

บทความวิจัย

- ◆ The Dietary Effects on Manure Characteristics and Biogas Production from Dairy Cows Feeding with Pineapple Peel
Siraprapa Chainetr Rungnapha Khiewwijit Khanchit Ngoenkhumkhong and Worawut Chainetr
- ◆ การเปลี่ยนแปลงคุณภาพไข่เค็มพอกขมแทนดินจอมปลวกบางส่วนระหว่างการเก็บรักษา
ณัฐมา เหล่ากุลดิกล รัตนภัทร มะโนชัย และ กาญจนา รัตนธีรวิเชียร
- ◆ การประยุกต์ใช้ฟิล์มแข็งเคลือบผิวเพื่อยืดอายุพันธุ์เห็ดในกระบวนการตัดขอบ
วิชัย พุ่มจันทร์ และ คมกริช ละวรรณวงษ์
- ◆ สมบัติทางวิศวกรรมของเปลือกปูพื้นคอนกรีตพรุนจากผิวทางแอสฟัลต์เพื่อนำมาใช้ใหม่โดยการแทนที่มวลรวมหยาบ
เฉลิมพล ไชยแก้ว และ กฤษดา เสือเอี่ยม
- ◆ กำลังอัด ความสามารถเก็บกักคลอไรด์และสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้ากันตราบละเอียดและผงหินปูน
บัญญัติ วารินทร์ไพล และ ปิตินันต์ กร้ามาตร
- ◆ ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานและความจุไฟฟ้าของข้าวเปลือกที่มีความชื้นแตกต่างกัน
อภิสิทธิ์ ภัคดิแก้ว กระวี ตรีอำนาจรศ เทวรัตน์ ตรีอำนาจรศ และ ณัฐพงศ์ รัตนเดช
- ◆ อิทธิพลของสภาวะการผลิตและการเก็บรักษาต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของพริกป่นและพริกป่นคั่ว
นิชาภรณ์ สุขชุ่ม สุพิชญา สุรเสรีวงษ์ และ ขวัญหทัย แสงทอง
- ◆ การประเมินประสิทธิภาพเครื่องอัดลูกอมชิง
ธนศิษฐ์ วงศ์ศิริอำนาจ ทิพาพร คำแดง จิระพล กลิ่นบุญ และ นำพร ปัญญาใหญ่
- ◆ การคัดเลือกแบคทีเรียจากลำไส้กุ้งกุลาดำเพื่อใช้เป็นโพรไบโอติกสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ
สุบันจิต นิมรัตน์ วุฒิศักดิ์ ศักดิ์สิทธิ์ และ วีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย
- ◆ การพัฒนาผลิตภัณฑ์ครีมแต่งหน้าเด็กไร้ไขมันทรานส์
บุญญาพร เชื้อสมพงษ์ นวลศรี สงสม มนฤทัย ศรีทองเกิด พรทวิ ธนสัมพันธ์ และ ณัฏฐา พันธุ์วงศ์
- ◆ การเปรียบเทียบภาระขาของรอยเชื่อมผ้าทอทางสถาปัตยกรรมจากการเชื่อมลมนร้อนและเหนียวน้ำ
กันตธกรณ์ เขาทอง เกษภากรณ์ ปริยดากล และ ประภาพรรณ เกษราพงศ์
- ◆ การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตอีฐของลมหวดลายอาหรับ กรณีศึกษา: มุสลิมโมเดิร์น จังหวัดปัตตานี
ชูไธดี สนิ สุรสิทธิ์ ระวีวงศ์ จุฬาลักษณ์ โรจนานุกูล และ ชัยยุทธ มิ่งาม
- ◆ การปรับปรุงประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักร ของระบบการกรองน้ำของโรงงานผลิตน้ำขนาดใหญ่
โดยใช้การบำรุงรักษาวิพลโดยทุกคนมีส่วนร่วม : กรณีศึกษาโรงงานผลิตน้ำประปาแห่งหนึ่ง
ศิริวิทย์ ปุสสิโร และ ศุภรัชชัย วรรัตน์
- ◆ อิทธิพลของรูปแบบความเร็วอากาศอบแห้งต่อการอบแห้งข้าวเปลือก
ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา กระวี ตรีอำนาจรศ และ เทวรัตน์ ตรีอำนาจรศ
- ◆ การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานของการเจาะทะลุของกระสุนบนผิวเกราะอะลูมิเนียม
ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
อนุชา สายเจริญ ปฏิภาณ ถิ่นพระบาท และ ประกอบ ชาติภักดิ์
- ◆ สมบัติทางกลของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดเชิงประกอบด้วยอลูมิเนียมออกไซด์สำหรับการใช้งานทางวิศวกรรม
งามพรรณ ชะโล และ ประกอบ ชาติภักดิ์

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร

RMUTP RESEARCH JOURNAL

ที่ปรึกษา

ดร.ณัฐวรพล รัชสิริวัชรบุล

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ดร.ปริญญ์ บุญกนิษฐ

รองอธิการบดีฝ่ายบริหาร วิจัยและพัฒนานวัตกรรม

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่เรือตรี ดร.ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี

กองบรรณาธิการ จากหน่วยงานภายนอก

ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย	วงศ์วิเศษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.อรรถกร	เก่งพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.สันติ	แมนศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศาสตราจารย์ ดร.ทรงศักดิ์	เพ็ชรมิตร	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.สายประสิทธิ์	เกิดนิยม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย	อมรศักดิ์ชัย	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย	พองสมุทร	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กองบรรณาธิการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งอรุณ พรเจริญ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัลทิมา เชาวชาญชัยกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตนพล มงคลรัตนาสี	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรลักษณ์ ปัญญาธิพิงศ์
ดร.ชลากร อุดมรักษาสกุล	ดร.สิงห์แก้ว ปือกเพ็ง
ดร.วราพร ทองจีน	นางสาวเจนจิรา บ.ป.สูงเนิน
นางสาวพัชรนันท์ ยั่งวรวิเชียร	นายปิยวัฒน์ เจริญทรัพย์

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิผู้ประเมินบทความ (Peer Review)
ประจำปีงบประมาณ 2565 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม - มิถุนายน 2565

ศาสตราจารย์ (เกียรติคุณ) ดร.อรอนงค์ นัยวิกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ รัตนวิไล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.เกรียงไกร แซ่มสีม่วง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.จิระชัย กาญจนพถุมพิพงศ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ชนนาถ กฤตวรกาญจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย สำราญวานิช	มหาวิทยาลัยบูรพา
รองศาสตราจารย์ ดร.บุรฉัตร ฉัตรวีระ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.วัชรียา ภูริวิโรจน์กุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ เปรมานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ตรีโลเกศ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.วีระเกษตร สอนผกา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนิษฐพร วังใน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำรรค	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนะ รักศรีศิริ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สนใจธรรม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐจริย์ จิระศกุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ รัตนเดช	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดิณกร ภูวดิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำรรค	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพณัช พวงมาลี	มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทวัฒน์ ขมหวาน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญดา เพ็ญโรจน์	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พจนศักดิ์ พจนา	มหาวิทยาลัยพะเยา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์พรรณ ปรี่องาม	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิษณีย์ ยืนยงพุทธกาล	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชัย ลีลาว์ขรมาศ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม อรุณ	มหาวิทยาลัยพะเยา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวิไล พองอินทร์	มหาวิทยาลัยพะเยา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรวิทย์ อุปลัมภานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ไทรภพ พาหอม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร

ปีที่ 16 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2565 ISSN 2651-1096 (Online)

หน้า

บทความวิจัย:

The Dietary Effects on Manure Characteristics and Biogas Production from Dairy Cows Feeding with Pineapple Peel	1
Siraprapa Chainetr Rungnapha Khiewwijit Khanchit Ngoenkhumkhong and Worawut Chainetr	
การเปลี่ยนแปลงคุณภาพไขเค็มพอกขม้นทดแทนดินจอมปลวกบางส่วนระหว่าง การเก็บรักษา	13
ณัฐณา เหล่ากุลดิลก รัตนภัทร มะโนชัย และ กาญจนา รัตนธีรวิเชียร	
การประยุกต์ใช้ฟิล์มแข็งเคลือบผิวเพื่อยืดอายุพันธุ์เอียงในกระบวนการตัดขอบ	28
วิชัย พุ่มจันทร์ และ คมกริช ละวรรณวงษ์	
สมบัติทางวิศวกรรมของบล็อกปูพื้นคอนกรีตพูนจากผิวทางแอสฟัลต์เก่านำมาใช้ใหม่ โดยการแทนที่มวลรวมหยาบ	41
เฉลิมพล ไชยแก้ว และ กฤษดา เสือเอี่ยม	
กำลังอัด ความสามารถเก็บกักคลอไรด์และสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต ผสมเถ้าแกวเตาบดละเอียดและผงหินปูน	53
บัญญัติ วารินทร์ไธล และ ปิติศานต์ กร้ามาตร	
ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานและความจุไฟฟ้าของข้าวเปลือกที่มีความชื้น แตกต่างกัน	69
อภิสิทธิ์ ภักดีแก้ว กระวี ตรีอำนาจรค เทวรัตน์ ตรีอำนาจรค และ ณัฐพงศ์ รัตนเดช	
อิทธิพลของสภาวะการผลิตและการเก็บรักษาต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของพริกป่น และพริกป่นคั่ว	83
ณิชากรณ์ สุขขุม สุพิชญา สุรเสรีวงษ์ และ ขวัญหทัย แซ่ทอง	

สารบัญ

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร

ปีที่ 16 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2565 ISSN 2651-1096 (Online)

หน้า

การประเมินประสิทธิภาพเครื่องอัดลูกอมขิง	95
ธนศิษฐ์ วงศ์ศิริอำนวย ทิพาพร คำแดง จิระพล กลิ่นบุญ และ นำพร ปัญญาใหญ่	
การคัดเลือกแบคทีเรียจากลำไส้กุ้งกุลาดำเพื่อใช้เป็นโพรไบโอติกสำหรับการเพาะเลี้ยง สัตว์น้ำ	105
สุบัณฑิต นิมรัตน์ วุฒิศักดิ์ ศักดิ์สิทธิ์ และ วีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย	
การพัฒนาผลิตภัณฑ์ครีมแต่งหน้าเค้กไร้ไขมันทรานส์	117
บุญญาพร เชื้อสมพงษ์ นวลศรี สงสม มนฤทัย ศรีทองเกิด พรทวี ธนสัมบัณณ์ และ ณัฏฐา พันธุ์วงษ์	
การเปรียบเทียบภาระขาของรอยเชื่อมผ้าทอทางสถาปัตยกรรมจากการเชื่อมลมร้อน และเหนียวน้ำ	127
กันต์กรรณ์ เขาทอง เจษฎาภรณ์ ปรียดำกล และ ประภาพรรณ เกษราพงศ์	
การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตอิฐของลมลอยลายอาหรับ กรณีศึกษา: มุสลิมโมเดิร์น จังหวัดปัตตานี	138
ชูไยดี สนิ สุรสิทธิ์ ระวีวงศ์ จุฬาลักษณ์ โรจนานุกูล และ ชัยยุทธ มีงาม	
การปรับปรุงประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักร ของระบบการกรองน้ำของโรงงานผลิต น้ำขนาดใหญ่ โดยใช้การบำรุงรักษาที่ผลโดยทุกคนมีส่วนร่วม : กรณีศึกษาโรงงานผลิต น้ำประปาแห่งหนึ่ง	149
ศิริวิทย์ ปุสสิโร และ ศุภรัชชัย วรรัตน์	
อิทธิพลของรูปแบบความเร็วอากาศอบแห้งต่อการอบแห้งข้าวเปลือก	165
ณัฐพงษ์ วงศ์บัพพา กระวี ตรีอำนรรค และ เทวรัตน์ ตรีอำนรรค	
การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานของการเจาะ ทะลุของกระสุนบนผิวเกราะอะลูมิเนียมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	177
อนุชา สายเจริญ ปฏิภาณ ถิ่นพระบาท และ ประกอบ ชาติภักต์	

สารบัญ

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร

ปีที่ 16 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2565 ISSN 2651-1096 (Online)

หน้า

สมบัติทางกลของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดเชิงประกอบด้วยอลูมิเนียม ออกไซด์สำหรับการใช้งานทางวิศวกรรม งามพรรณ ชะโล และ ประกอบ ชาติภักต์	192
---	-----

<http://journal.rmutp.ac.th/>

The Dietary Effects on Manure Characteristics and Biogas Production from Dairy Cows Feeding with Pineapple Peel

Siraprapa Chainetr^{1*} Rungnapha Khiewwijit¹ Khanchit Ngoenkhumkhong¹ and Worawut Chainetr²

¹ Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Rajamagala University of Technology Lanna

² Department of Faculty of Science and Agricultural Technology, Rajamagala University of Technology Lanna

¹ 128 Huay Kaew Road, Chang Phuak, Muang, Chiang Mai 50300, Thailand

² 200 Moo 17, Pichai, Muang, Lampang 52000, Thailand

Received 3 November 2020; Revised 11 May 2021; Accepted 7 June 2021

Abstract

This study explored the dietary effect on manure characteristics and potential of biogas production from the manure of dairy cows feeding with pineapple peel as a roughage source. Three mid-lactation primiparous crossbred Holstein dairy cows, which had an average body weight of 443.5 ± 10.6 kg and average milk production of 9.6 ± 0.3 kg/d were assigned with three different diet types including T1, T2 and T3. T1 was a control diet, which consisted of a mixture of dry Pangola grass and commercial pellet (CL). Moreover, T2 was a mixture of dry Pangola grass, pineapple peel and CL, while T3 was a mixture of pineapple peel and CL. Dairy cow manure was collected on the day 10th after feeding and anaerobic digestion of the dairy cow manure was operated with an HRT of 30 days. Results showed that all diet types gave similar manure characteristics of high organic matter and nitrogen. Average concentrations of TS and COD ranged from 82.59 to 85.78 g/L and 85.47 to 91.47 g/L, respectively, whereas TAN ranged from 1.54 to 1.67 g/L. However, a higher pH of 7.50 was found for the manure of dairy cow fed with T1, while a lower pH of 6.50 was obtained with T3. Besides, the highest methane yield of $0.20 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg VS}_{\text{added}}$ was obtained when using the manure of dairy cow fed with T1 as a substrate, followed by T2 and T3 which found at 0.14 and $0.11 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg VS}_{\text{added}}$, respectively. This indicated the efficient potential of biogas production from the manure of dairy cows fed with pineapple peel, which will improve sustainable utilization of agricultural wastes and waste produced from dairy cow farm in the future.

Keywords : Pineapple Peel; Dairy Cow; Manure Characteristics; Biogas

* *Corresponding Author. Tel.: +66 5392 1444, E-mail Address: Siraprapa@rmutl.ac.th*

1. Introduction

In 2019, the total cow milk produces around 522 million tons and it is expected to rise every year [1], [2]. Such a high dairy cow population will lead to a huge quantity of feed resources needed. Thailand is also one of predominantly agricultural countries with having nearly 0.7 million dairy cows in 2019 [3]. However, feed shortage becomes a major constraint to dairy production, including the dairy cow farm in Thailand. A lack of natural grasslands limits a large-scale dairy cow production in Thailand, especially during the dry season months [4]. Therefore, several local feed resources and agricultural by-products have been investigated to use as feed source for dairy cows such as pineapple peel, rice straw, sugarcane molasses and corn husk, as these contain high fiber for maintaining optimal rumen function of dairy cows [5]-[7]. Among the different alternative feed sources suggested by the researchers, pineapple peel becomes a promising feed sources for dairy cows, as pineapple has become one of the world majority commercial crops, which it grows best in the tropical areas [8]. Pineapple peel is a cannery by-product waste of pineapple (*Ananas comosus*) which can cause environmental pollutions, because this is highly fermentable and perishable [8], [9]. However, pineapple peel can be used as a potential roughage source for dairy cows due to high amount of effective fiber and sugars [5], [7]. Recently, the study of Wittayakun et al. [7] has successfully showed that pineapple peel could be used

as the main roughage for lactating dairy cows without affecting milk production.

Additionally, as the value of global manufacturing has continually increased both for industrial and agricultural sectors, which leading to a significant amount of energy usage and requires efficient waste management [10]. One of the renewable energy resources that has become very important is biogas. Biogas is produced through anaerobic digestion consisting of four subsequent steps, which are hydrolysis, acidogenesis, acetogenesis and methanogenesis. Biogas production technology is important for comprehensive utilization of biomass such as livestock manures. Especially, cow manure becomes a promising alternative as it generally contains high organic matter and biogas slurry can also be used as nutrients-rich organic fertilizer [11], [12]. Thus, the challenges in the future biogas production from dairy cow manure have changed to the development of a combined efficient feed source and potential resource recovery from the manure. However, limited information can be found in the literature on the effect of manure characteristics and biogas production from the manure of lactating dairy cows fed with pineapple peel as the roughage source. Therefore, the objective of this study was to explore the dietary effect on manure characteristics and potential of biogas production from the manure of dairy cows feeding with pineapple peel as the roughage source. The results obtained from this study can be further used for utilizing agricultural wastes to reduce environmental impacts

and improving sustainability of waste treatment for biogas production from dairy cow farm in the future.

2. Research Methodology

2.1 Animals and Diet Types

Three primiparous, mid-lactation (84 ± 18 days in milk) crossbred Holstein dairy cows, which had an average body weight of 443.5 ± 10.6 kg and average milk production of 9.6 ± 0.3 kg/d, were assigned with three different diet types including T1, T2 and T3. Each diet type was a mixture of different compositions, as suggested by Wittayakun et al. [7]. T1 was a control diet, which consisted of dry Pangola grass to commercial pellet (CL) containing 16% protein (Charoen Pokphand PCL, Thailand) with a ratio of 70:30 on dry matter basis. Moreover, T2 consisted of dry Pangola grass to pineapple peel to CL with a ratio of 35:35:30 and T3 consisted of pineapple peel to CL with a ratio of 70:30. In this study, the pineapple peel was collected from a cannery factory located in Lampang province, the Northern region of Thailand. For transportation, the pineapple peel was stored approximately 30 kg each in a sealed double layer polyethylene plastic bag without any preservative agents. Moreover, the Pangola grass was harvested on the day 50th after planting from the grassland located in the Faculty of Science and Agricultural Technology, Rajamagala University of Technology Lanna in Lampang province and the dry Pangola grass was chopped before used. This Pangola grass (*Digitaria eriantha*) is a

high-quality tropical grass, which is popularly grown in Thailand as a pasture and widely utilized as a livestock feed [13].

Feed for each lactating dairy cow was balanced depending on its body weight, milk yield and milk fat, which following the nutrients requirement recommended by the National Research Council (NRC) [14]. Each diet composition was weighted individually before distribution as a mixed feed. Moreover, each lactating dairy cow was house individually in a 3×6 m² pen with available drinking water and mineral blocks. Moreover, all dairy cows were fed twice daily at 7 AM and 5 PM at 110% of expected intake throughout the experiments [7]. Animal management and experimental protocol was performed with respect to animal care and welfare.

2.2 Anaerobic Digestion Setup

In this study, an anaerobic digestion was used to explore the potential of biogas production under anaerobic conditions from the manure of dairy cow as a substrate. Three different manure sources from the dairy cows fed with three diet types of T1, T2 and T3 were used. The anaerobic digestion reactors with a working volume of 5 L were operated in a complete randomized design with a hydraulic retention time (HRT) of 30 days [11], [15]. All experiments were conducted in triplicate. Daily anaerobic digester temperature was measured using a digital thermometer (SCT-lilliput, Scichem Tech). The temperatures of all anaerobic digesters were observed in a

range of 32 to 34°C, which implied that the operating digestion process was performed by mesophilic bacteria that had temperature ranged between 30 and 38°C [15].

2.3 Sample Collection and Analysis

Grab samples of dairy cow manure were collected on the day 10th after feeding and stored in a refrigerator (4°C) until used. Before start-up an anaerobic digestion, the manure was diluted with tap water in a ratio of 1:1 (dairy cow manure: tap water) to achieve a Total Solids (TS) content of approximately 5% [16]. The mixed liquid samples of undiluted manure from the dairy cows fed with different diet types of T1, T2 and T3, as well as samples of the end anaerobic digestion process were collected. The stored undiluted manure samples and digested samples were first measured pH using pH electrode (OHAUS Starter ST5000-B Bench pH Meter, USA). Then, the measurements of TS, Volatile Solids (VS), Chemical Oxygen Demand (COD), Total Organic Carbon (TOC), Total Ammonia Nitrogen (TAN), and Total Phosphorus (TP) were determined in triplicate for the undiluted manure according to standard methods [17]. Moreover, the concentrations of VS and COD were measured for the samples at the end of anaerobic digestion process. The amount of gas produced was also measured daily in the gas collection unit using volume displacement. Besides, the CH₄ and CO₂ content of biogas were measured at the end of system performance to examine the quality of

biogas production by using a gas chromatography (Model 7890, Agilent, USA). The removal efficiencies of VS and COD were calculated using equation (1) and the methane yield was calculated using equation (2) as follows [18], [19].

$$\eta_x = \frac{(C_{x,in} - C_{x,out}) * 100}{C_{x,in}} \quad (1)$$

When

η_x = Removal efficiencies of x (%), as this study refers to VS and COD

$C_{x,in}$ = Concentrations of x at the beginning (mg/L)

$C_{x,out}$ = Concentrations of x at the end of system performance (mg/L)

$$Y_{CH_4} = \frac{V_{CH_4}}{VS_{in}} \quad (2)$$

When

Y_{CH_4} = Methane yield
(m³ CH₄/kg VS_{added})

V_{CH_4} = Cumulative volume of methane production at the end of system performance (m³ CH₄)

VS_{in} = Mass of original VS content of the substrate (kg VS_{added})

3. Results and Discussion

3.1 Characteristics of the Manure from Dairy Cows Feeding with Different diets

Table 1 gives a summary of the most important characteristics of the undiluted manure from the dairy cows feeding with three different diet types of T1, T2 and T3, which were used as a substrate to anaerobic digestion for biogas production in this study.

Table 1 Characteristics of the undiluted manure from the dairy cows feeding with different diet types, which used as a substrate to anaerobic digestion for biogas production. (pH and concentrations are average values and standard deviations are shown between brackets, which calculated from the results of 3 samples.)

Parameters	Unit	Cow manure from dairy cows feeding with different diets ^a		
		T1	T2	T3
pH	-	7.50 (0.09)	7.10 (0.10)	6.50 (0.06)
Total Solids (TS)	g/L	85.78 (2.12)	83.46 (2.50)	82.59 (2.51)
Volatile Solids (VS)	g/L	70.40 (2.05)	65.87 (1.65)	63.56 (1.85)
Chemical Oxygen Demand (COD)	g/L	91.47 (3.25)	87.60 (2.67)	85.47 (2.75)
Total Organic Carbon (TOC)	%	33.79 (1.05)	33.59 (1.75)	33.02 (1.85)
Total Ammonia Nitrogen (TAN)	g/L	1.54 (0.09)	1.59 (0.08)	1.67 (0.09)
Total Phosphorus (TP)	g/L	0.40 (0.02)	0.43 (0.02)	0.44 (0.03)

^a T1: Control diet, dry Pangola grass to commercial pellet (CL) with a ratio of 70:30 on dry matter basis, T2: Dry Pangola grass to pineapple peel to CL with a ratio of 35:35:30, and T3: Pineapple peel to CL with a ratio of 70:30.

As shown in **Table 1**, the manure from the dairy cows was characterized mainly by high organic matter and nutrients especially nitrogen as compared to the average characteristics of human waste [15]. The dairy cow manure revealed average concentrations of TS and COD with a range of 82.59 to 85.78 g/L and 85.47 to 91.47 g/L, respectively. These results are in agreement with the previous studies, which also reported high concentrations of TS and COD ranged from approximately 51 to 107 g/L and 55 to 124 g/L, respectively [20]-[22]. This clearly showed that the dairy cow manure requires significant treatment for a sustainable and safe treated effluent before discharge to the environment. As the dairy cow manure contained such a high concentration of organic matter content, consequently, it becomes an excellent substrate for the production of biogas. Moreover, another advantage of ruminants manure especially cows is that

the manure is readily utilized for the fermentation phase and it already has the necessary methanogenic bacteria [23]. However, it is important to note that the differences in diet types resulted in different characteristics of the manure, especially pH values. An average pH for the manure of dairy cow fed with T1 was found at 7.50, while lower pH values of 7.10 and 6.50 were found for the manure of dairy cow fed with T2 and T3, respectively. The low pH for the dairy cow manure fed with T3 could be explained by the chemical properties of pineapple peel, which has rather low pH values of 3.47-3.84 [24]. In the literature, information about the biogas production from the manure of dairy cow feeding with pineapple peel as a roughage source, which resulting in a lower pH than using dry Pangola grass, is still limited and needs to be further investigated.

Moreover, the nutrients nitrogen (N) and phosphorus (P) in terms of TAN and

TP were also determined in the manure used as a substrate for the biogas production. The results clearly showed that the manure of dairy cows fed with T1, T2 and T3 contained high N. The average TAN concentrations ranged from 1.54 to 1.67 g/L and these results were in agreement with the studies of Frear et al. [22] and Liu et al. [25], who also reported the high TAN concentrations of 1.72 and 2.17 g/L, respectively. For this study, similar average concentrations for TOC, TAN and TP in the manure of dairy cows fed with T1, T2 and T3 were observed. This may cause by the similar organic carbon, N and P fractions in both dry Pangola grass and pineapple peel, resulting in the similar organic carbon and nutrients excretion [26]-[29]. Moreover, it is also important to note that ammonia inhibition in anaerobic digestion of the dairy cow manure feeding with T1, T2 and T3 is not expected to become a limiting factor, as Frear et al. [22] showed that TAN concentrations of 1.87 g/L (at pH 6.87) and 2.65 g/L (at pH 7.88) had no adverse inhibition on methane-forming bacteria.

3.2 System Performance of Biogas Production from the Dairy Cow Manure

Fig. 1 shows the cumulative biogas production from the dairy cow manure feeding with three different diet types of T1, T2 and T3 throughout the whole experiment.

As shown in **Fig. 1**, the dairy cow manure feeding with all three diets were possible to use as a substrate for biogas

production. The cumulative biogas production from the manure of dairy cow fed with T3 increased significantly in the first 8 days and reached the highest amount of 40 L after 16 days of digestion process. Whereas when using the manure of dairy cows fed with T1 and T2, the cumulative biogas production increased significantly in the first 20 and 12 days, respectively, and reach the highest amount of 58 L after 25 days and 44 L after 18 days of digestion process, respectively. These results clearly showed that the manure of dairy cows fed with different diet types would lead to different potential of biogas production. Moreover, a rapid increase in biogas production in the first 8 days from the manure of dairy cow fed with T3 could be explained by a low pH in the manure used, as acidic condition could increase the rates of particle disruption, hydrolysis and acidogenesis steps [30].

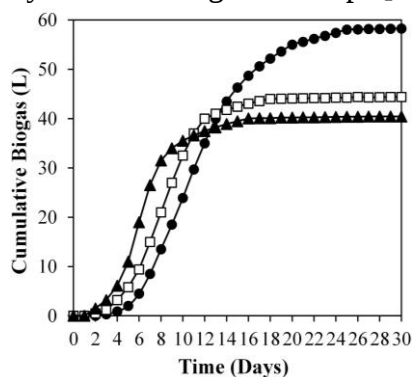


Fig. 1 Cumulative biogas production from the manure of dairy cows feeding with 3 different diets; (●) T1: Control diet consisted of dry Pangola grass to commercial pellet (CL) with a ratio of 70:30, (□) T2: Dry Pangola grass to pineapple peel to CL with a ratio of 35:35:30, and (▲) T3: Pineapple peel to CL with a ratio of 70:30.

Table 2 System performance of biogas production from the manure of dairy cows feeding with different diet types on pH in the effluent (pH_{eff}), biogas compositions of CH_4 and CO_2 , removal efficiencies of VS and COD, and methane yield. (pH and biogas compositions are average values. Standard deviations are shown between brackets, which calculated from the results of 3 samples).

Parameters ^a	Unit	System performance of biogas production from dairy cow manure feeding with different diets ^b		
		T1	T2	T3
pH_{eff}	-	7.07 (0.05)	6.58 (0.03)	6.18 (0.03)
CH_4 in biogas	%	60.33 (1.95)	50.95 (1.36)	41.75 (1.62)
CO_2 in biogas	%	38.55 (1.15)	46.79 (1.50)	51.33 (1.48)
VS removal efficiency	%	40.32	36.72	34.36
COD removal efficiency	%	45.67	41.45	38.10
Methane yield	$\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg VS}_{\text{added}}$	0.20	0.14	0.11

^a Volatile Solids (VS) and Chemical Oxygen Demand (COD).

^b T1: Control diet, dry Pangola grass to commercial pellet (CL) with a ratio of 70:30 on dry matter basis, T2: Dry Pangola grass to pineapple peel to CL with a ratio of 35:35:30, and T3: Pineapple peel to CL with a ratio of 70:30.

In addition, **Table 2** summarizes the system performance of biogas production from the dairy cow manure feeding with different diet types on pH values in the effluent, compositions of biogas, removal efficiencies of VS and COD, and methane yield. Generally, the anaerobic digestion process is sensitive to various processing conditions including pH values, in which optimum pH for acidogens ranged from 5.5 to 6.5 and for methanogens ranged from 6.8 to 7.2 [15], [31]. Based on the data shown in **Table 2**, the average pH values at the end of the system were decreased in all three anaerobic digesters of the dairy cow manure and reached down to pH values of 7.07, 6.58 and 6.18 when using the manure of dairy cows fed with T1, T2, and T3, respectively. These results indicated that only the anaerobic digester of the dairy cow manure feeding with T1 could give the optimal system performance of biogas production and

biogas quality. This confirmed by the results of pH value at the end of the system when using the manure of dairy cow fed with T1 that was in the optimum pH range for methanogens and therefore the highest cumulative biogas production was observed. In addition, as expected, the biogas quality in term of CH_4 and CO_2 contents, in which identified the quality of biogas, showed that the anaerobic digestion of the manure of dairy cow fed with T1 resulted in a higher average CH_4 content of 60.33%, followed by T2 (50.95%) and T3 (41.75%). This high CH_4 content of the biogas production also confirmed that methanogenesis was performed optimally in the anaerobic digestion of the manure of dairy cow fed with T1 and this is in agreement with the review study of Nasir et al. [11] that was reported the CH_4 content as between 50 and 70%. Besides, in the anaerobic digestion of the manure of dairy cows fed

with T2 and T3, biogas contained rather high amount of CO₂ content. This high amount of CO₂ most likely produced during the hydrolysis and acidogenesis steps as the methanogenic activity was not fully developed at low pH [30].

Moreover, the removal of organic matter in the forms of VS and COD degradation was also shown in **Table 2**. The results revealed poor biodegradable fraction of the dairy cow manure VS as compared to other livestock manure [11]. This is mainly due to the high amount of inorganic compounds and fibers in the diets that could not digest in the digestive system of dairy cow and therefore the dairy cow manure will be hardly degraded during the anaerobic digestion [11]. In this study, the average VS removal efficiencies ranged from 34.36 to 40.32%, which were comparable to an ultimate biodegradable fraction of the dairy cow manure VS of approximately 40% [32].

With a high total cumulative biogas production (**Fig. 1**) and CH₄ content obtained from the anaerobic digestion of the manure of dairy cow fed with T1, the methane yield of as high as 0.20 m³ CH₄/kg VS_{added} was achieved and this would translate to the methane yield of 0.49 m³ CH₄/kg VS_{degraded}. This result is in agreement with the review study of Nasir et al. [11] and the guidelines of Shelford et al. [33], which reported the methane yield from anaerobic digestion of the dairy cow manure as between 0.16-0.26 m³ CH₄/kg VS_{added} and the appropriate estimation of methane production based on VS degradation of 0.50 m³ CH₄/kg VS_{degraded}. Besides, lower methane yields

of 0.14 and 0.11 m³ CH₄/kg VS_{added} were found when using the manure of dairy cows fed with T2 and T3, respectively. The low methane yield in anaerobic digestion of the manure of dairy cow fed with T3 could be explained by (1) an inhibition of methanogenic activity at low pH value and (2) a higher lignin content in pineapple peel than dry Pangola grass as this expected to increase in lignin excretion in the manure [27], [30], [34]. The studies of Amon et al. [35] and Li et al. [36] showed that high lignin content in the manure could significantly reduce the methane yield. In order to make the use of pineapple peel as a substitute roughage source more attractive, several methods can be used to enhance methane yield such as anaerobic co-digestion with other organic wastes and pH adjustment in anaerobic digester. The anaerobic co-digestion would help to optimize feed compositions, macro and micronutrients, pH, and toxic compounds [11], [23], [30], [37]. For example, the review study of Nasir et al. [11] reported that anaerobic co-digestion of the dairy cow manure with other organic wastes could enhance the methane yield up to 0.31 m³ CH₄/kg VS_{added} when using anaerobic co-digestion of the dairy cow manure with kitchen waste. However, the anaerobic co-digestion process of the dairy cow manure still needs to be further investigated with respect to types of organic wastes used and mixing ratios. Additionally, pH adjustment in anaerobic digester can also be considered by using a base solution to the optimum pH range for methanogenic activity. This would help to enrich

methanogens as well as to prevent acid accumulation in the anaerobic digester, resulting in a higher methane yield [30].

4. Conclusion

In this study, it was found that all diet types of T1, T2 and T3 resulted in similar manure characteristics of high organic matter and high nutrient nitrogen. However, a higher pH was found for the manure of dairy cow fed with T1, while lower pH values were obtained with T2 and T3. Moreover, it was found that the highest methane yield was obtained from the manure of dairy cow fed with T1, followed by T2 and T3, respectively. The low methane yield from the manure of dairy cow fed with T3 is the most likely can be explained by an inhibition of methanogenic activity at low pH value and a higher lignin content in pineapple peel. However, the anaerobic co-digestion process with other organic wastes and pH adjustment in anaerobic digester could be used to further enhance the methane yield. Based on the results obtained from this study, it can be concluded that the manure of dairy cows fed with pineapple peel as a substitute roughage source was an effective potential substrate for biogas production. This study not only offers the opportunity to develop sustainable utilization of agricultural wastes for feedstock, but also improve the sustainability of waste management for biogas production from dairy cow farm in the future.

5. Acknowledgement

This work was supported by Rajamangala University of Technology Lanna. The authors would like to thank Assoc. Prof. Dr. Suntorn Wittayakun and Assist. Prof. Weera Innaree for the contribution of dairy cows used in this study.

6. References

- [1] M. Shahbandeh. (2020). Number of cattle worldwide from 2012 to 2020. [Online]. Available: www.statista.com
- [2] M. Shahbandeh. (2020). Cow milk production worldwide from 2015 to 2019. [Online]. Available: www.statista.com
- [3] Bureau of Agricultural Economic Research. (2019). Situation of the world dairy cows and Thailand in 2019. [Online]. Available: <http://www.dairydevelopmentprogram.weebly.com>
- [4] T. Bunmee, N. Chaiwang, C. Kaewkot and S. Jaturasitha, "Current situation and future prospects for beef production in Thailand-A review," *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, vol. 31, no. 7, pp. 968–975, 2018.
- [5] S. Paengkoum, M. Wanapat and P. Paengkoum, "Effects of pineapple peel and rice straw ratios as basal roughage in dairy cow," *International Journal of Agricultural, Biosystems Science and Engineering*, vol. 17, no. 1, pp. 7–8, 2013.

- [6] S. Sruamsiri, "Agricultural wastes as dairy feed in Chiang Mai," *Animal Science Journal*, vol. 78, no. 4, pp. 335–341, 2007.
- [7] S. Wittayakun, S. Innaree, W. Innaree and W. Chainetr, "Supplement of sodium bicarbonate, calcium carbonate and rice straw in lactating dairy cows fed pineapple peel as main roughage," *Slovak Journal of Animal Science*, vol. 48, no. 2, pp. 71–78, 2015.
- [8] M. Wadhwa and M.P.S. Bakshi, "Utilization of fruit and vegetable wastes as livestock feed and as substrates for generation of other value-added products," in *Rap Publication 2013/04*, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2013, pp. 1–67.
- [9] A. Upadhyay, J. P. Lama and S. Tawata, "Utilization of pineapple waste: a review," *Journal of Food Science and Technology Nepal*, vol. 6, pp. 10–18, 2010.
- [10] Global Insight. (2020). China set to take the lead in global manufacturing. [Online]. Available: www.reliableplant.com
- [11] I.M. Nasir, T.I. Mohd Ghazi and R. Omar, "Anaerobic digestion technology in livestock manure treatment for biogas production: a review," *Engineering in Life Sciences*, vol. 12, no. 3, pp. 258–269, 2012.
- [12] D.A. Putri, R.R. Saputro and B. Budiyo, "Biogas production from cow manure," *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 1, no. 2, pp. 61–64, 2012.
- [13] K. Tikam, *Evaluation of pangola grass as forage for ruminants*, Ph.D. thesis. Germany: Institute of Animal Science, University of Bonn, 2014.
- [14] NRC, *Nutrient Requirements of Dairy Cattle*, 7th ed. Washington DC: National Academy Press, 2001.
- [15] Metcalf and Eddy, *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, International edition 4th ed. USA: McGraw-Hill, 2004.
- [16] H.E.M.H. El-Mashad, *Solar thermophilic anaerobic reactor (STAR) for renewable energy production*, Ph.D. thesis. The Netherlands: Wageningen University, 2003.
- [17] APHA, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 22nd ed. Washington DC: American Water Works Association and Water Environment Federation, 2012.
- [18] D.W. Hamilton, "Anaerobic digestion of animal manures: methane production potential of waste materials," *Oklahoma Cooperative Extension Service*, vol. BAE-1762, pp. 1–4, 2012.
- [19] K. Panyaping, W. Kan-In, S. Saenphrom and A. Khampanyo, "Biochemical methane potential of several kinds of petioles and leaves waste," *Journal of Community Development Research*, vol. 5, no. 1, pp. 64–73, 2012.
- [20] B. K. Ahring, A. A. Ibrahim and Z. Mladenovska, "Effect of temperature

- increase from 55 to 65°C on performance and microbial population dynamics of an anaerobic reactor treating cattle manure,” *Water Research*, vol. 35, no. 10, pp. 2446–2452, 2001.
- [21] H. M. El-Mashad, W. K. Van Loon, G. Zeeman and G. P. Bot, “Rheological properties of dairy cattle manure,” *Bioresource Technology*, vol. 96, no. 5, pp. 531–535, 2005.
- [22] C. Frear, W. Liao, T. Ewing and S. Chen, “Baseline performance monitoring of commercial dairy anaerobic digester.” in *CSANR Research Report 2010–001: Climate Friendly Farming*, 2010, pp. 1-14.
- [23] F. Tufaner and Y. Avsar, “Effects of co-substrate on biogas production from cattle manure: a review,” *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 13, no. 9, pp. 2303–2312, 2016.
- [24] K.Z. Nadzirah, S. Zainal, A. Noriham, I. Normah, A.M. Siti Roha and H. Nadya, “Physico-chemical properties of pineapple variety N36 harvested and stored at different maturity stages,” *International Food Research Journal*, vol. 20, no. 1, pp. 225–231, 2013.
- [25] M. Liu, D. Giard, and S. Barrington, “Ammonium dissociation for swine and dairy cattle manures,” *Journal of Environmental Protection*, vol. 4, pp. 6–15, 2013.
- [26] S. Chulalaksananukul, N. Sinbuathong and W. Chulalaksananukul, “Bioconversion of pineapple solid waste under anaerobic condition through biogas production,” *Asia-Pacific Journal of Science and Technology*, vol. 17, no. 5, pp. 734–742, 2012.
- [27] J. E. Sanchez, L. Mejia and D. J. Royse, “Pangola grass colonized with *Scytalidium thermophilum* for production of *Agaricus bisporus*,” *Bioresource Technology*, vol. 99, no. 3, pp. 655–662, 2008.
- [28] V. Heuze, G. Tran and H. Archimede. (2015). Pangola grass (*Digitaria eriantha*). [Online]. Available: www.feedipedia.org
- [29] A. Abdullah and H. Mat, “Characterisation of solid and liquid pineapple waste,” *Reaktor*, vol. 12, no. 1, pp. 48–52, 2008.
- [30] A. Varol and A. Ugurlu, “Comparative evaluation of biogas production from dairy manure and co-digestion with maize silage by CSTR and new anaerobic hybrid reactor,” *Engineering in Life Sciences*, vol. 17, no. 4, pp. 402–412, 2017.
- [31] S.K. Khanal, *Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production: Principles and Applications*, 1st ed. Singapore: John Wiley & Sons Inc, 2008.
- [32] A. C. Wilkie, “Anaerobic digestion of dairy manure: design and process considerations,” *Dairy Manure Management: Treatment, Handling, and Community Relations*, vol. 176, pp. 301–312, 2005.

- [33] T. Shelford, C. Gooch, A. Choudhury and S. A. Lansing, *Technical reference guide for dairy-derived biogas production, treatment, and utilization*, New York: Pro Dairy Education & Applied Research, Cornell University's College of Agriculture and Life Sciences, 2019.
- [34] A. R. Madureira, T. Atatoprak, D. Çabuk, F. Sousa, R. C. Pullar and M. E. Pintado, "Extraction and characterisation of cellulose nanocrystals from pineapple peel," *International Journal of Food Studies*, vol. 7, pp. 24–33, 2018.
- [35] T. H. Amon, B. Amon, V. Kryvoruchko, V. Bodiroza, E. Potsch and W. Zollitsch, "Optimising methane yield from anaerobic digestion of manure: effects of dairy systems and of glycerine supplementation," *International Congress Series*, vol. 1293, pp. 217–220, 2006.
- [36] W. Li, H. Khalid, Z. Zhu, R. Zhang, G. Liu, C. Chen and E. Thorin, "Methane production through anaerobic digestion: participation and digestion characteristics of cellulose, hemicellulose and lignin," *Applied Energy*, vol. 226, pp. 1219–1228, 2018.
- [37] W. Soontornchaiboon, T. Plaingam and R. Pawongrat, "Pretreatment of coconut husk for biogas production by anaerobic fermentation with cow dung," *RMUTP Research Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 19–31, 2015.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การเปลี่ยนแปลงคุณภาพไข่เค็มพอกขมึ้นทดแทนดินจอมปลวกบางส่วน ระหว่างการเก็บรักษา

ณัฐมา เหล่ากุลติก^{1*} รัตนภัทร มะโนชัย¹ และ กาญจนา รัตนธีรวิเชียร²

¹ คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

² คณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

^{1, 2} 119 หมู่ 9 ถนนลำปาง-แม่ทะ ตำบลชมพู อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง 52100

รับบทความ 6 ตุลาคม 2563 แก้ไขบทความ 12 พฤษภาคม 2564 ตอรับบทความ 7 มิถุนายน 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของไข่เค็มพอกขมึ้นทดแทนดินจอมปลวกที่ระดับร้อยละ 0 5 15 และ 25 ในระหว่างการเก็บรักษา 4 สัปดาห์ ผลการทดลอง พบว่า การใช้ขมึ้นผงในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้ปริมาณเกลือที่วิเคราะห์ได้ในไข่แดงเค็มดิบและไข่ขาวเค็มดิบมีค่าลดลง ส่งผลให้ค่าร้อยละสัดส่วนไข่แดงที่แข็งตัวลดลงตามไปด้วย โดยไข่แดงสุกมีค่าความแข็งลดลง ส่วนไข่ขาวเค็มสุกจะมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบที่ระยะเวลาการพอกเดียวกัน คุณภาพด้านสีของไข่แดงดิบและไข่ขาวดิบสำหรับตัวอย่างที่พอกขมึ้นในระดับที่แตกต่างกันมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ไข่แดงมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสีส้มอมเหลือง ส่วนไข่ขาวมีทิศทางของสีแดงผสมสีเหลืองเล็กน้อยค่อนข้างโปร่ง โดยตัวอย่างไข่ขาวที่พอกด้วยขมึ้นในปริมาณมากขึ้น มีค่าความเป็นสีเหลืองเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณสารเคอร์คูมินที่วิเคราะห์ได้ในไข่ขาวที่มีค่าเพิ่มขึ้น จากการทดสอบความชอบทางประสาทสัมผัสด้วยวิธี 9-point hedonic scale ในด้านสี กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวม พบว่า ไข่เค็มที่พอกขมึ้นทดแทนดินจอมปลวกที่ระดับร้อยละ 25 ที่ระยะเวลาการพอก 2 สัปดาห์ มีคะแนนความชอบในทุกคุณลักษณะสูงและไม่แตกต่างจากสิ่งทดลองควบคุมที่ไม่มีขมึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยปริมาณเคอร์คูมินที่วิเคราะห์ได้ในไข่ขาวมีค่าเท่ากับ 3.885 มิลลิกรัมต่อไข่ขาวผง 1 กรัม ในสัปดาห์ที่ 2 และเพิ่มขึ้นเป็น 13.291 และ 18.484 มิลลิกรัมต่อไข่ขาวผง 1 กรัม ในสัปดาห์ที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

คำสำคัญ : ไข่เค็ม; ขมึ้น; ดินจอมปลวก; คุณภาพระหว่างการเก็บรักษา

<http://journal.rmutp.ac.th/>

The Quality Changes of Coating Salted Eggs with Turmeric to Partially Replace Soil from Termite Mound during Storage

Natcha Laokuldilok^{1*} Rattanapat Manochai¹ and Kanjana Ruttanateerawichien²

¹ Faculty of Agricultural Technology, Lampang Rajabhat University

² Faculty of Management Science, Lampang Rajabhat University

^{1,2} 119 Moo 9 Lampang – Mae Tha Road, Mueang District, Lampang 52100

Received 6 October 2020; Revised 12 May 2021; Accepted 7 June 2021

Abstract

This research aimed to study the quality changes of coating salted eggs partially replacing soil from termite mound with turmeric powder at the level of 0%, 5%, 15% and 25% during storage for 4 weeks. The results showed that the increasing in turmeric level caused a decrease in salt content in raw egg yolk and raw egg white which led to decrease in hardening ratio of egg yolk. The hardness values of cooked - salted egg yolk decreased while those of cooked - salted egg white slightly increased. At the same salting period, the color values of raw egg yolk and raw egg white coated with different levels of turmeric were slightly different. Egg yolks changed to a yellowish orange color while egg whites showed lightness with a direction of red and slightly yellowish color. The raw egg white coated with higher level of turmeric powder exhibited more yellowness which was in accordance with the increasing in curcumin content. From the results of 9-point hedonic scale in terms of color, aroma, overall taste and overall liking, it was found that salted eggs coated with turmeric powder to partially replace soil at a level of 25% with 2 weeks of preserved duration had high scores of sensory acceptability which did not differ significantly from the control samples (0% turmeric) ($p>0.05$). The curcumin content analyzed in dry egg white was 3.885 mg/g at week 2 and increased to 13.291 and 18.484 mg/g at week 3 and 4, respectively.

Keywords : Salted Egg; Turmeric; Soil From Termite Mound; Qualities During Storage

** Corresponding Author. Tel.: +668 1595 1110, E-mail Address: nutcha@live.lpru.ac.th*

1. บทนำ

ไข่เค็ม เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการถนอมอาหารด้วยเกลือ ซึ่งมีกรรมวิธีการผลิต 2 แบบ คือ การจุ่มไข่ดิบในน้ำเกลือและการพอกด้วยดินผสมเกลือ โดยตัวกลางที่ช่วยในการซึมผ่านเกลือเข้าสู่เปลือกไข่ คือ น้ำและดิน ตามลำดับ สำหรับเกลือที่ใช้ในการผลิตไข่เค็มคือ เกลือแกงหรือโซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride; NaCl) โดยจะใช้เกลือที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 25 และใช้ระยะเวลาในการดองหรือพอก 2-4 สัปดาห์ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งจะอาศัยหลักการออสโมซิส (Osmosis) เพื่อแทรกซึมสารละลายหรือส่วนผสมของเกลือที่มีความเข้มข้นสูงผ่านเปลือกไข่เข้าไปด้านใน ส่วนน้ำและความชื้นภายในไข่จะแพร่ผ่านเยื่อหุ้มและเปลือกออกสู่บรรยากาศภายนอก หลักการนี้ใช้ในการดองน้ำออกจากวัตถุดิบซึ่งจะช่วยลดค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (Water Activity, a_w) และควบคุมการเจริญของจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค ทำให้สามารถเก็บรักษาอาหารไว้ได้นานในการผลิตไข่เค็มนั้น นิยมใช้ไข่เป็ดมากกว่าไข่ไก่เนื่องจากทำให้ได้ไข่แดงเค็มที่มันเยิ้มซึ่งเป็นคุณลักษณะที่พึงประสงค์ของไข่เค็ม นอกจากนี้ เปลือกไข่เป็ดยังมีจำนวนรูพรุนต่อพื้นที่ผิว 1 ตารางเซนติเมตรมากกว่าไข่ไก่ ทำให้การซึมผ่านของเกลือเข้าสู่ไข่ด้านในได้มากกว่า [1] โดยในระหว่างการดองหรือพอกเค็มนั้นองค์ประกอบภายในไข่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ ส่งผลต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยไข่แดงจะค่อย ๆ กลายเป็นของแข็ง มีสีส้ม พบการไหลเยิ้มขององค์ประกอบประเภทไขมัน และมีลักษณะเนื้อสัมผัสเป็นเม็ด ๆ ส่วนไข่ขาวจะมีความหนืดที่ลดลง ซึ่งระดับการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวขึ้นอยู่กับปริมาณเกลือที่ซึมผ่านเข้าไป โดยขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ใช้ในการดองหรือพอก

สำหรับงานวิจัยนี้ ได้นำขมิ้นผงบดละเอียดมาทดแทนการใช้ดินจอมปลวกสำหรับพอกไข่เค็มที่ระดับปริมาณร้อยละ 0 5 15 และ 25 เพื่อศึกษาผลของการ

ทดแทนดังกล่าวต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านต่าง ๆ ของไข่เค็มในระหว่างการรักษา ขมิ้นมีองค์ประกอบของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญคือ สารในกลุ่มเคอร์คูมินอยด์ (Curcuminoid) ที่ประกอบด้วยสารสำคัญหลัก 3 ชนิด ได้แก่ เคอร์คูมิน (Curcumin) ดีเมทออกซีเคอร์คูมิน (Demethoxy Curcumin) และ บิส-ดีเมทออกซีเคอร์คูมิน (Bis-Demethoxy Curcumin) โดยเคอร์คูมินจัดเป็นสารหลักและพบในสัดส่วนที่สูงถึงร้อยละ 50 – 60 [2] งานวิจัยรายงานว่า เคอร์คูมินคุณสมบัติในการต้านการอักเสบ ต้านอนุมูลอิสระ และต้านการเกิดมะเร็งได้ [3] ดังนั้น การประยุกต์ใช้ขมิ้นสำหรับพอกไข่เค็มจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารด้วยพืชสมุนไพร โดยขมิ้นเป็นพืชที่เพาะปลูกได้ง่าย นิยมปลูกเป็นพืชสวนครัวตามบ้านเรือน จึงสามารถนำมาพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพได้อย่างหลากหลาย อย่างไรก็ตาม หนึ่งในข้อจำกัดสำหรับการพัฒนาไข่เค็มสมุนไพรคือ การแทรกซึมผ่านของสารสำคัญผ่านเปลือกเข้าสู่ภายในไข่ ซึ่งจำเป็นต้องมีการตรวจวิเคราะห์หาปริมาณสารสำคัญเพื่อยืนยันผลของกระบวนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของไข่เค็มพอกขมิ้นทดแทนการใช้ดินจอมปลวกบางส่วน โดยวิเคราะห์คุณภาพทั้งทางกายภาพ เคมี และทางประสาทสัมผัส รวมถึงปริมาณสารเคอร์คูมินที่ซึมผ่านเข้าสู่ภายในเปลือกไข่ ในช่วงระยะเวลาการรักษา 4 สัปดาห์ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ไข่เค็มพอกสมุนไพรอื่น ๆ ต่อไป

2. วิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมวัตถุดิบไข่เป็ด

ไข่เป็ดที่ใช้ในการทดลองนี้ซื้อจากตลาดเมืองใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ โดยมีน้ำหนักต่อลูกประมาณ 70 กรัม และมีความกว้าง 45 – 55 มิลลิเมตร นำไข่เป็ดมาล้างให้สะอาดแล้วฟอกไว้ นำดินจอมปลวกมาผสมเกลือ

โซเดียมคลอไรด์ที่อัตราส่วนเท่ากับ 3 : 1 จากนั้นเติมน้ำลงในส่วนผสมที่อัตราส่วน 1 : 1.5 คนให้เข้ากันแล้วนำไปพอกไข่ให้ทั่วทั้งฟอง หุ้มทับด้วยแกลบ เก็บรักษาในตะกร้าพลาสติกที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 3 องศาเซลเซียส)

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) ประกอบด้วย 4 สิ่งทดลอง คือ การทดแทนการใช้ดินจอมปลวกด้วยผงขมิ้นร้อยละ 0 (เป็นสิ่งทดลองควบคุม) 5 15 และ 25 ตามลำดับ จากนั้นสุ่มตัวอย่างทุก ๆ สัปดาห์มาวิเคราะห์คุณภาพในด้านต่าง ๆ จนครบ 4 สัปดาห์

2.2 การวิเคราะห์คุณภาพไข่เค็ม

2.2.1 การวิเคราะห์ปริมาณเกลือในไข่แดงเค็มดิบและไข่ขาวเค็มดิบ

ทำการแยกไข่แดงออกจากไข่ขาว แล้ววิเคราะห์ปริมาณเกลือในไข่ทั้ง 2 ส่วนที่แยกออกจากกัน ตามวิธีของ AOAC [4] โดยชั่งตัวอย่างหนักประมาณ 1.00 กรัม แล้วเติม 0.1 N AgNO_3 จำนวน 20 มิลลิลิตร และ HNO_3 จำนวน 10 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปต้มบนเตาความร้อนจนกระทั่งส่วนผสมทั้งหมดละลาย (ยกเว้น AgCl_2) โดยจะใช้เวลาต้มประมาณ 10 นาที รอสารละลายเย็นตัวลงแล้วเติมร้อยละ 5 Ferric Alum Indicator จากนั้นนำไปไทเทรตด้วย 0.1 N KSCN จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลใส บันทึกปริมาตรของ KSCN ที่ใช้ไป แล้วคำนวณตามสมการที่ (1) ดังนี้

ร้อยละปริมาณเกลือ

$$= 5.8 \times [(V_1 \times N_1) - (V_2 \times N_2)] / W \quad (1)$$

โดยที่ V_1 คือ ปริมาตรของ AgNO_3 (มิลลิลิตร); N_1 คือ ความเข้มข้นของ AgNO_3 (N); V_2 คือ ปริมาตรของ KSCN (มิลลิลิตร); N_2 คือ ความเข้มข้นของ KSCN (N) และ W คือ น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

2.2.2 การวัดค่าสี

เมื่อครบระยะเวลาสุ่มตัวอย่าง นำไข่เค็มในแต่ละสิ่งทดลองมาแกะดินออกแล้วล้างด้วยน้ำสะอาด ซับให้แห้งแล้ววัดค่าสีไข่แดงดิบและไข่ขาวดิบในเทอม L^* a^* และ b^* ด้วยเครื่อง Colorimeter (Konica Minolta CR-410, Japan) โดย L^* มีค่า 0 ถึง 100 (0 = มืดที่สุด และ 100 = สว่างที่สุด) หาก a^* มีค่าเป็นบวกแสดงทิศทางของสีแดง และเมื่อ a^* มีค่าเป็นลบแสดงทิศทางของสีเขียว สำหรับ b^* หากมีค่าเป็นบวกแสดงทิศทางของสีเหลือง และเมื่อ b^* มีค่าเป็นลบแสดงทิศทางของสีน้ำเงิน นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าความแตกต่างของสีโดยรวม (Total Color Difference; ΔE^*) ของไข่แดงเค็มดิบและไข่ขาวเค็มดิบเทียบกับตัวอย่างมาตรฐานคือไข่แดงและไข่ขาวที่ไม่ผ่านการพอก ดังสมการที่ (2)

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (2)$$

โดยที่ $\Delta L^* = L^*$ ของตัวอย่าง - L^* ของตัวอย่างมาตรฐาน; $\Delta a^* = a^*$ ของตัวอย่าง - a^* ของตัวอย่างมาตรฐาน และ $\Delta b^* = b^*$ ของตัวอย่าง - b^* ของตัวอย่างมาตรฐาน

2.2.3 สัดส่วนไข่แดงที่แข็งตัว (Hardening Ratio)

สัดส่วนไข่แดงที่แข็งตัวเป็นค่าร้อยละของน้ำหนักไข่แดงที่แข็งตัว ทำโดยตอกไข่เค็ม แล้วนำไข่แดงมากลึงเบา ๆ บนกระดาษกรอง (Whatman No.1) เพื่อกำจัดส่วนที่เป็นไข่ขาวออกไป จากนั้นชั่งน้ำหนักของไข่แดงทั้งลูก (W_0) แล้วใช้มีดผ่ากลางเพื่อให้ไข่แดงส่วนที่นุ่มและเป็นของเหลวที่อยู่ภายในไหลออกมา ซึ่งเฉพาะส่วนที่เป็นของแข็ง (W_{ex}) [5] นำค่าที่ได้มาคำนวณดังสมการที่ (3)

$$\text{สัดส่วนไข่แดงที่แข็งตัว} = (W_{ex} / W_0) \times 100\% \quad (3)$$

2.2.4 ปริมาณความชื้นของไข่แดงเค็มดิบและไข่ขาวเค็มดิบ

ทำการแยกไข่แดงออกจากไข่ขาว แล้ววิเคราะห์ปริมาณความชื้นในไข่ทั้ง 2 ส่วนที่แยกออกจากกัน ดัดแปลงวิธีของ AOAC [4] โดยชั่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน 1 - 2 กรัม ใส่ลงในภาชนะอะลูมิเนียมที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมงและทราบน้ำหนักที่แน่นอน นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 - 6 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบใส่ในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักของภาชนะพร้อมตัวอย่าง แล้วคำนวณหาร้อยละปริมาณความชื้นที่ระเหยไปในระหว่างการอบแห้ง

2.2.5 ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (Water Activity) ของไข่แดงเค็มดิบและไข่ขาวเค็มดิบ

ทำการแยกไข่แดงออกจากไข่ขาว แล้ววิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอกติวิตีในไข่ทั้ง 2 ส่วนที่แยกออกจากกัน ด้วยเครื่อง Water Activity Meter (Aqua Lab 4TE, USA)

2.2.6 ค่าความแข็งของไข่แดงและไข่ขาวสุก

วัดค่าความแข็งของไข่แดงสุกและไข่ขาวสุกด้วยเครื่อง TAXT2i Texture Analyzer (Stable Micro Systems, Surrey, England) นำไข่ที่ได้ในแต่ละสิ่งทดลองไปนึ่งสุกเป็นเวลา 10 นาที (จับเวลาหลังจากน้ำเดือด) แยกส่วนที่เป็นไข่แดงและไข่ขาวออกจากกัน เตรียมตัวอย่างไข่แดงโดยใช้มีดหั่นครึ่ง ส่วนไข่ขาวสุกหั่นเป็นสี่เหลี่ยมลูกเต๋าขนาด 1x1x1 เซนติเมตร โดยตัวอย่างจะถูกกดด้วยหัววัดทรงกระบอก (P50; เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร) กำหนดให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัววัดเท่ากับ 10 มิลลิเมตร/วินาที และกดลึกลงไปยังระยะ 50 ของความสูงตัวอย่างเริ่มต้น ค่าแรงสูงสุดที่ได้จากกราฟ Force – Deformation แสดงถึงค่าความแข็งของแต่ละตัวอย่าง ทำการทดสอบตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องซ้ำ 5 ครั้ง

2.2.7 การวิเคราะห์ปริมาณเคอร์คูมินด้วยวิธี UV-visible Spectrophotometry

ทำตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์ปริมาณเคอร์คูมินด้วยเทคนิค UV - Visible Spectrophotometry ตามวิธีของ ICH guidelines [6] ดังนี้

2.2.7.1 การตรวจสอบค่าความยาวคลื่นที่มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด

นำสารมาตรฐานเคอร์คูมิน (Sigma Aldrich) มาเตรียมสารละลายมาตรฐานที่ระดับความเข้มข้น 1 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ด้วยตัวทำละลายเมทานอล (ร้อยละ 99.9) จากนั้นเจือจางที่ระดับความเข้มข้น 5 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร แล้วทำไปสแกนเพื่อหาความยาวคลื่นที่มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) ด้วยวิธี UV - Visible Spectroscopy (ในช่วงความยาวคลื่น 200 - 800 nm)

2.2.7.2 การตรวจสอบการใช้ได้ของวิธีทดสอบ (Method Validation)

ตรวจสอบค่าต่าง ๆ ได้แก่ ความเป็นเส้นตรง (Linearity), ความถูกต้อง (Accuracy), ความแม่นยำ (Precision) ขีดจำกัดการตรวจหา (Limit of Detection; LOD) ขีดจำกัดการวัดเชิงปริมาณ (Limit of Quantification; LOQ) ด้วยเครื่อง UV - Visible Spectroscopy (Analytikjena Specord 200 Plus, Germany)

2.2.7.3 ความเป็นเส้นตรงและช่วงความเข้มข้นของสาร (Linearity and Range)

เตรียมสารละลายมาตรฐานเคอร์คูมินในตัวทำละลายเมทานอล (ร้อยละ 99.9) ที่ 6 ระดับความเข้มข้น (0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 4.0 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร) ทำการตรวจสอบค่าการดูดกลืนแสงเป็นเวลา 3 วัน ต่อเนื่อง (ความเข้มข้นละ 2 ซ้ำ) ($n = 6$) ตามวิธีของ P.V. Kadam et al. [2] นำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟความเป็นเส้นตรง คำนวณหาสมการถดถอยและค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (R^2) สำหรับค่า LOD

และ LOQ คำนวณจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) และความชันของเส้นกราฟ (S) ดังสมการ; $LOD = 3.3(\sigma/S)$ และ $LOQ = 10(\sigma/S)$

2.2.7.4 ความแม่นยำ (Precision)

ทำการวิเคราะห์ความเบี่ยงเบนของความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่คำนวณได้จากกราฟมาตรฐาน โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารมาตรฐานเคอร์คูมินที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน (0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 4.0 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร) ที่วัดค่าภายในวันเดียวกัน (3 ช่วงเวลา) (Intra-day) และที่วัดค่าเป็นเวลาสามวันต่อเนื่อง (Inter-day) ตามวิธีของ P.V. Kadam et al. [2] แล้วคำนวณหาร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%Relative Standard Deviation; %RSD)

2.2.7.5 ความถูกต้อง (Accuracy)

ค่าความถูกต้องเป็นค่าที่บอกความใกล้เคียงระหว่างค่าจริงกับค่าที่วิเคราะห์ได้ โดยการเติมตัวอย่างมาตรฐาน (Spiked Sample) ที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน 3 ระดับ (ได้แก่ 1.0, 2.0 และ 4.0 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร) ลงไปในตัวอย่างไข่ขาวที่พอกด้วยดินที่ไม่ผสมไขมัน แล้วทำการวิเคราะห์หาปริมาณตามวิธีการทดสอบที่ใช้ แล้วคำนวณร้อยละการกลับคืน (%Recovery)

2.2.8 การหาปริมาณเคอร์คูมินในไข่ขาวเค็มดิบด้วย

เทคนิค UV- Visible Spectrophotometry

นำไข่ขาวไปทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง จากนั้นบดให้ละเอียด ชั่งตัวอย่างผงใส่หลอดปั่นเหวี่ยงจำนวน 0.50 กรัม เติมน้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปสกัดด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิ (N-BIOTEK NB-205V, Korea) ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 คืน จากนั้นทำการปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกสารละลายออกจากตะกอนที่ระดับความเร็ว 5,000g เป็นเวลา 10 นาที ดูดเอาเฉพาะ

สารละลายที่อยู่ด้านบนมาวิเคราะห์หาปริมาณเคอร์คูมินตามวิธีทดสอบที่ผ่านการตรวจสอบความใช้ได้ แล้วคำนวณกลับในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัมไข่ขาวผงที่หกลบ ปริมาณความเข้มข้นของผงไข่ขาวในแต่ละตัวอย่างออกแล้วสำหรับไข่ขาวผงที่พอกด้วยดินที่ไม่ผสมไขมันจะทำการสกัดด้วยวิธีข้างต้นและใช้เป็นตัวอย่าง Blank ในการวัดค่าการดูดกลืนแสง

2.2.9 การทดสอบทางประสาทสัมผัส

ทำการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีการทดสอบความชอบ (9 - point hedonic scale) ด้วยผู้ทดสอบจำนวน 60 คน [7] ทำการเตรียมตัวอย่างโดยนำไข่เค็มพอกดินมาล้างให้สะอาด จากนั้นนำไปนึ่งเป็นเวลา 10 นาที (จับเวลาหลังจากน้ำเดือด) แล้วทำให้เย็นโดยใช้น้ำไหลผ่าน แกะเปลือกออก แล้วหั่นตามความยาวและแบ่งให้มีขนาด 1 ใน 6 ของไข่ทั้งลูก บรรจุในถ้วยทนร้อนที่มีฝาปิดสนิท ตัวอย่างจะถูกนำเสนอต่อผู้ทดสอบทีละ 1 ตัวอย่างด้วยรหัสเลขสุ่ม 3 ตัว โดยมีการสุ่มลำดับนำเสนอและให้ผู้ทดสอบบันทึกการประเมินตัวอย่างต่อไป คุณลักษณะที่ทดสอบ ได้แก่ สี กลิ่น รสชาติโดยรวม และความชอบโดยรวม

2.3 การวิเคราะห์ทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแต่ละสัปดาห์ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1 การวิเคราะห์ปริมาณเกลือในไข่แดงเค็มดิบและไข่ขาวเค็มดิบ

ปริมาณเกลือเฉลี่ยในไข่แดงและไข่ขาวในสัปดาห์ที่ศูนย์ซึ่งยังไม่ผ่านการพอกเค็มมีค่าเท่ากับร้อยละ

ละ 0.10 และ 0.29 ตามลำดับ แต่เมื่อระยะเวลาการพอกนานขึ้น ทั้งไข่แดงและไข่ขาวดิบที่ผ่านการพอกโดยใช้ไขมันผงทดแทนดินจอมปลวกในปริมาณร้อยละ 0 5 15 และ 25 มีปริมาณเกลือเพิ่มขึ้น

จากตารางที่ 1 พบว่า ในสัปดาห์ที่ 1 ไข่แดงที่พอกด้วยไขมันในปริมาณที่แตกต่างกัน มีปริมาณเกลือที่วิเคราะห์ได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) แต่เมื่อระยะเวลาการพอกนานขึ้น (สัปดาห์ที่ 2 3 และ 4) พบว่า การพอกด้วยไขมันในระดับสูง จะมีปริมาณเกลือที่วิเคราะห์ได้น้อยกว่าการพอกด้วยไขมันในระดับต่ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) เช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์ปริมาณเกลือในไข่ขาวดิบ (ตารางที่ 2) พบว่า เมื่อพอกด้วยไขมันในระดับที่สูงขึ้นจะทำให้ปริมาณเกลือมีค่าลดลง ($p\leq 0.05$) จากการสังเกตจะพบว่า เมื่อปริมาณไขมันเพิ่มมากขึ้น ความสามารถในการเกาะตัวของดินจอมปลวกจะลดลง เนื่องมาจากไขมันที่กระจายแทรกอยู่ในดินและดูดซับโมเลกุลของเกลือไว้ จึงทำให้การแทรกซึมผ่านเกลือจากดินเข้าสู่ไข่ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองใช้กากชาทดแทนดินจอมปลวกสำหรับพอกไข่เค็มในปริมาณที่มากขึ้น จะส่งผลให้ปริมาณเกลือในไข่มีค่าลดลง โดยไข่เค็มที่พอกด้วยกากชาในปริมาณร้อยละ 10 20 และ 30 มีปริมาณเกลือในไข่ขาวน้อยกว่าสูตรควบคุมที่ไม่มีกากชา [8] โดย การเพิ่มขึ้นของปริมาณเกลือในไข่แดงน้อยกว่าไข่ขาว เนื่องจากการเสียสภาพธรรมชาติของไข่แดงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นโครงข่ายเจลกึ่งยืดหยุ่นและมีโมเลกุลของไขมันอิสระถูกปลดปล่อยออกมาจากพันธะระหว่างโปรตีนจึงไปขัดขวางการแทรกซึมของเกลือจากไข่ขาวเข้าสู่ไข่แดง ในขณะที่การเสียสภาพของไข่ขาวจะส่งผลให้ความหนืดลดลง ทำให้การแทรกซึมเกลือเข้าสู่ไข่ขาวได้ง่ายขึ้น

เมื่อระยะเวลาการพอกนานขึ้น ปริมาณเกลือในไข่แดงดิบที่พอกด้วยไขมันทดแทนการใช้ดินจอมปลวก ร้อยละ 0 และ 5 มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

($p\leq 0.05$) ส่วนไข่แดงเค็มดิบที่พอกด้วยไขมันร้อยละ 15 และ 25 แสดงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปริมาณเกลือเพียงเล็กน้อยและมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) สำหรับไข่ขาวเค็มดิบในทุกะดับการพอกด้วยไขมัน มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปริมาณเกลือเมื่อระยะเวลาการพอกนานขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$)

ตารางที่ 1 ปริมาณเกลือในไข่แดงเค็มดิบที่พอกโดยใช้ไขมันผงทดแทนดินจอมปลวกบางส่วน เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์

สิ่งทดลอง	ร้อยละปริมาณเกลือในไข่แดงเค็มดิบ			
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4
0% ไขมัน	0.48 ^{ns,B} ±0.13	0.91 ^{a,A} ±0.10	0.98 ^{a,A} ±0.06	0.96 ^{a,A} ±0.03
5% ไขมัน	0.47 ^{ns,C} ±0.01	0.84 ^{ab,AB} ±0.23	0.81 ^{b,B} ±0.03	0.89 ^{b,A} ±0.05
15% ไขมัน	0.49 ^{ns,NS} ±0.03	0.63 ^{b,NS} ±0.12	0.57 ^{c,NS} ±0.07	0.59 ^{c,NS} ±0.01
25% ไขมัน	0.44 ^{ns,NS} ±0.05	0.59 ^{b,NS} ±0.12	0.54 ^{c,NS} ±0.08	0.54 ^{c,NS} ±0.00

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษ a, b, c ที่แตกต่างกันตามแนวตั้ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) ns หมายถึงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ A, B, C ที่แตกต่างกันตามแนวนอน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) NS หมายถึงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

ตารางที่ 2 ปริมาณเกลือในไข่ขาวเค็มดิบที่พอกโดยใช้ไขมันผงทดแทนดินจอมปลวกบางส่วน เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์

สิ่งทดลอง	ร้อยละปริมาณเกลือในไข่ขาวเค็มดิบ			
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4
0% ไขมัน	2.09 ^{a,D} ±0.01	3.44 ^{b,C} ±0.01	3.79 ^{a,A} ±0.33	3.61 ^{a,B} ±0.00
5% ไขมัน	1.88 ^{b,D} ±0.03	2.91 ^{b,C} ±0.04	3.71 ^{a,A} ±0.06	3.44 ^{b,B} ±0.02
15% ไขมัน	1.83 ^{b,C} ±0.05	2.82 ^{c,B} ±0.03	3.61 ^{b,A} ±0.05	3.60 ^{a,A} ±0.09
25% ไขมัน	1.75 ^{c,D} ±0.02	2.70 ^{d,C} ±0.00	3.08 ^{c,B} ±0.01	3.51 ^{c,A} ±0.04

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษ a, b, c ที่แตกต่างกันตามแนวตั้ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) ns หมายถึงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ A, B, C ที่แตกต่างกันตามแนวนอน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) NS หมายถึงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

3.2 การวัดค่าสี

เมื่อพิจารณาภาพโดยรวม (ตารางที่ 3 จากซ้ายไปขวา) พบว่า เมื่อระยะเวลาการพอกนานขึ้น ไข่แดง

เคมีดิลทุกสิ่งทดลองมีค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้ การเปลี่ยนแปลงสีของไข่แดงสอดคล้องกับปริมาณเกลือที่เพิ่มขึ้น โดยการแทรกซึมเกลือเข้าสู่ไข่จะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กับการสูญเสียน้ำภายในไข่ออกสู่สิ่งแวดล้อม ส่งผลให้ไข่แดงเคมีมีลักษณะแห้งและมีสีคล้ำลง [9]

ตารางที่ 3 ค่าสีในทอม L^* a^* และ b^* ของไข่แดงเคมีดิลที่พอกโดยใช้ไขมันผงทดแทนดินจอมปลวกบางส่วนเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์

สิ่งทดลอง	ค่าความสว่าง (L^*) ของไข่แดงเคมีดิล			
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4
0% ไขมัน	52.19 ^{ca} ±0.07	53.37 ^{ca} ±0.07	47.86 ^{bB} ±0.45	48.54 ^{bB} ±0.49
5% ไขมัน	52.58 ^{ca} ±0.18	53.34 ^{ca} ±0.05	46.70 ^{cd} ±0.09	51.53 ^{cC} ±0.39
15% ไขมัน	53.32 ^{bB} ±0.27	54.71 ^{bA} ±0.27	47.86 ^{bD} ±0.56	51.51 ^{aC} ±0.30
25% ไขมัน	54.27 ^{aB} ±0.60	55.95 ^{aA} ±0.86	50.40 ^{aD} ±0.40	51.56 ^{aC} ±0.37

สิ่งทดลอง	ค่าความเป็นสีแดงถึงสีเขียว (a^*) ของไข่แดงเคมีดิล			
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4
0% ไขมัน	24.65 ^{ns} ±0.23	22.23 ^{ab} ±0.02	22.04 ^{ns} ±5.84	20.18 ^{ns} ±1.66
5% ไขมัน	23.93 ^{ns} ±0.89	23.72 ^{ab} ±0.92	21.22 ^{ns} ±0.62	18.64 ^{ab} ±0.22
15% ไขมัน	23.74 ^{ns} ±0.51	21.41 ^{bB} ±1.61	19.57 ^{ns} ±0.43	16.96 ^{cd} ±0.23
25% ไขมัน	23.70 ^{ns} ±0.71	23.29 ^{ab} ±0.66	19.52 ^{ns} ±0.51	17.61 ^{bc} ±0.14

สิ่งทดลอง	ค่าความเป็นสีเหลืองถึงสีน้ำเงิน (b^*) ของไข่แดงเคมีดิล			
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4
0% ไขมัน	33.44 ^{aA} ±1.53	33.31 ^{aA} ±1.61	28.72 ^{ns} ±1.68	26.89 ^{aB} ±1.20
5% ไขมัน	30.96 ^{bA} ±0.56	31.44 ^{bA} ±0.12	29.04 ^{ns} ±0.35	25.65 ^{bc} ±0.39
15% ไขมัน	29.97 ^{bA} ±0.13	29.86 ^{bA} ±0.69	28.90 ^{ns} ±0.17	26.76 ^{cC} ±0.74
25% ไขมัน	29.99 ^{bB} ±0.26	30.55 ^{aA} ±0.17	28.62 ^{ns} ±0.54	25.05 ^{bD} ±0.17

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษ a, b, c ที่แตกต่างกันตามแนวดิ่ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ns หมายถึงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ A, B, C ที่แตกต่างกันตามแนวนอน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) NS หมายถึงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

นอกจากนี้ ปริมาณไขมันอิสระที่เพิ่มขึ้นมีการเคลื่อนย้ายไปยังบริเวณผิวด้านนอกของไข่แดงและทำหน้าที่เป็นตัวทำลายแรงควัตถุที่อยู่ในไข่แดงที่อยู่ในกลุ่มแคโรทีนอยด์และไรโบฟลาวิน ส่งผลให้ค่าความสว่างของไข่แดงเคมีมีค่าลดลงและมีสีส้มเข้มขึ้น [10] เมื่อเปรียบเทียบค่า L^* a^* และ b^* ของไข่แดงเคมีดิลในสัปดาห์เดียวกัน พบว่า ไข่แดงที่พอกไขมันในระดับที่

สูงขึ้น จะมีค่าความสว่างเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากปริมาณเกลือที่ลดลงส่งผลให้ไข่แดงมีการเสียสภาพธรรมชาติกลายเป็นก้อนแข็งและคล้ำน้อยกว่า ส่วนค่าความเป็นสีเหลืองและค่าความเป็นสีแดงจะมีค่าลดลงเล็กน้อย ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4 ค่าสีในทอม L^* a^* และ b^* ของไข่ขาวเคมีดิลที่พอกโดยใช้ไขมันผงทดแทนดินจอมปลวกบางส่วนเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์

สิ่งทดลอง	ค่าความสว่าง (L^*) ของไข่ขาวเคมีดิล			
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4
0% ไขมัน	92.68 ^{aA} ±1.09	92.70 ^{aA} ±0.61	90.36 ^{aB} ±0.50	90.31 ^{aB} ±0.16
5% ไขมัน	90.27 ^{bA} ±0.17	89.20 ^{bB} ±0.25	85.60 ^{cd} ±0.43	87.69 ^{bC} ±0.55
15% ไขมัน	89.49 ^{bc} ±0.36	89.95 ^{bA} ±0.56	88.70 ^{bB} ±0.64	85.52 ^{cC} ±0.32
25% ไขมัน	88.54 ^{cA} ±0.39	84.36 ^{cd} ±0.24	86.02 ^{cB} ±0.81	83.19 ^{dD} ±0.24

สิ่งทดลอง	ค่าความเป็นสีแดงถึงสีเขียว (a^*) ของไข่ขาวเคมีดิล			
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4
0% ไขมัน	-2.34 ^{ab} ±0.11	-2.38 ^{bA} ±0.06	-2.31 ^{bAB} ±0.03	-2.21 ^{bB} ±0.03
5% ไขมัน	-2.26 ^{aA} ±0.14	-2.15 ^{aB} ±0.05	-2.29 ^{ab} ±0.02	-1.96 ^{aB} ±0.07
15% ไขมัน	-2.53 ^{bA} ±0.07	-2.25 ^{ab} ±0.03	-2.32 ^{bB} ±0.02	-2.27 ^{bB} ±0.06
25% ไขมัน	-2.47 ^{bA} ±0.05	-2.29 ^{ab} ±0.12	-2.28 ^{aB} ±0.02	-2.25 ^{bB} ±0.05

สิ่งทดลอง	ค่าความเป็นสีเหลืองถึงสีน้ำเงิน (b^*) ของไข่ขาวเคมีดิล			
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4
0% ไขมัน	4.92 ^{bB} ±0.56	4.53 ^{dB} ±0.37	6.22 ^{aA} ±0.40	5.74 ^{cA} ±0.03
5% ไขมัน	5.23 ^{ab} ±0.28	5.24 ^{cC} ±0.12	5.72 ^{bB} ±0.17	6.46 ^{bA} ±0.17
15% ไขมัน	4.89 ^{bC} ±0.21	6.47 ^{bB} ±0.26	6.32 ^{aB} ±0.11	7.10 ^{aA} ±0.09
25% ไขมัน	5.64 ^{aD} ±0.10	6.80 ^{aB} ±0.02	6.28 ^{aC} ±0.13	7.35 ^{aA} ±0.31

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษ a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวดิ่ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ns หมายถึงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) NS หมายถึงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 4 แสดงค่าสีของไข่ขาวเคมีดิล พบว่าเมื่อระยะเวลาการพอกนานขึ้น ไข่ขาวดิลในทุกสิ่งทดลองมีค่าความสว่าง (L^*) ลดลง ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กล่าวคือ ไข่ขาวมีทิศทางของสีแดงผสมสีเหลืองเล็กน้อยค่อนไปทางสว่าง เมื่อเปรียบเทียบค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ของไข่ขาวที่ผ่านการพอกด้วยไขมันในปริมาณที่แตกต่างกันที่สัปดาห์เดียวกัน พบว่า ตัวอย่างไข่ขาวที่พอกด้วยไขมันใน

ปริมาณมากขึ้น จะมีค่า b^* เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้ เกิดจากสีเหลืองของไขมันที่แทรกซึมผ่านเข้าสู่เปลือกไข่ได้มากขึ้น [11] ตารางที่ 5 แสดงค่าความแตกต่างของสีโดยรวมระหว่างตัวอย่างกับตัวอย่างมาตรฐาน (Total Color Difference; ΔE^*) จะเห็นได้ว่า ที่ระยะเวลาการพอกเดียวกัน เมื่อพอกด้วยไขมันในปริมาณมากขึ้น ค่า ΔE^* ของไข่แดงและไข่ขาวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น นั่นคือ ค่าสีโดยรวมของตัวอย่างที่พอกไขมันในปริมาณสูงมีการเปลี่ยนแปลงจากตัวอย่างเริ่มต้นก่อนการพอกสูงกว่าตัวอย่างที่พอกไขมันในปริมาณน้อยกว่า นอกจากนี้ ที่ระยะเวลาการพอกนานขึ้น ส่งผลให้ค่า ΔE^* ของไข่แดงและไข่ขาวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 5 ค่าความแตกต่างของสีโดยรวมของไข่แดงและไข่ขาวเค็มดิบที่พอกโดยใช้ไขมันผงทดแทนดินจอมปลวกบางส่วนกับตัวอย่างมาตรฐาน (ΔE^*) เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์

สิ่งทดลอง	ค่า ΔE^* ของไข่แดงเค็มดิบ			
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4
0% ไขมัน	2.27 ^{b,B} ±1.09	2.52 ^{ab,B} ±0.96	6.93 ^{c,A} ±0.48	7.51 ^{c,A} ±0.81
5% ไขมัน	2.21 ^{b,B} ±0.25	2.97 ^{b,C} ±0.21	9.87 ^{b,A} ±0.45	7.60 ^{c,B} ±0.27
15% ไขมัน	3.52 ^{ab,B} ±0.11	3.65 ^{a,C} ±1.28	11.16 ^{a,A} ±0.14	8.75 ^{b,B} ±0.11
25% ไขมัน	3.22 ^{a,B} ±0.14	2.32 ^{ab,B} ±0.17	9.40 ^{b,A} ±0.63	9.63 ^{a,A} ±1.66

สิ่งทดลอง	ค่า ΔE^* ของไข่ขาวเค็มดิบ			
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4
0% ไขมัน	1.29 ^{d,B} ±0.51	0.97 ^{c,B} ±0.69	3.51 ^{c,A} ±0.48	3.39 ^{d,A} ±0.16
5% ไขมัน	3.35 ^{c,D} ±0.19	4.41 ^{b,C} ±0.19	8.04 ^{a,A} ±0.44	6.13 ^{c,B} ±0.49
15% ไขมัน	4.15 ^{b,C} ±0.33	3.99 ^{b,C} ±0.33	5.10 ^{b,B} ±0.62	8.37 ^{b,A} ±0.32
25% ไขมัน	5.10 ^{a,D} ±0.37	9.42 ^{a,B} ±0.24	7.70 ^{a,C} ±0.79	10.69 ^{a,A} ±0.25

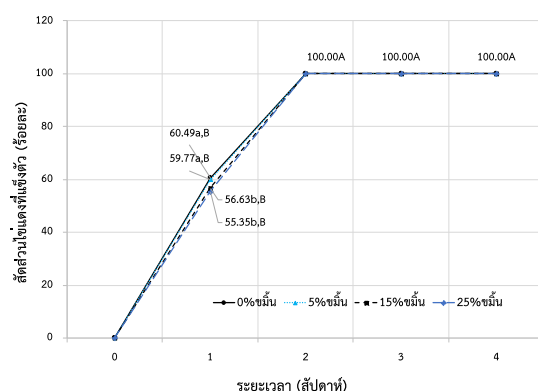
หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษ a, b, c ที่แตกต่างกันตามแนวตั้ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ns หมายถึงไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ A, B, C ที่แตกต่างกันตามแนวนอน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) NS หมายถึงไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

3.3 สัดส่วนไข่แดงที่แข็งตัว

ค่าสัดส่วนไข่แดงที่แข็งใช้เป็นดัชนีบอกถึงระดับการพอกไข่เค็มที่สมบูรณ์ จากรูปที่ 1 พบว่า ในสัปดาห์

ที่ 1 สิ่งทดลองควบคุมที่ไม่มีส่วนผสมของไขมันในการพอก มีค่าร้อยละสัดส่วนไข่แดงที่เป็นของแข็งสูงกว่าตัวอย่างอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตาม ไข่แดงของทุกสิ่งทดลองมีลักษณะแข็งเป็นก้อนอย่างสมบูรณ์ในสัปดาห์ที่ 2 (มีค่าร้อยละสัดส่วนไข่แดงที่แข็งเท่ากับ 100) ทั้งนี้ ส่วนของไข่แดงเริ่มเป็นของแข็งจากบริเวณใกล้เยื่อหุ้มไข่แดงแล้วค่อย ๆ เคลื่อนเข้าสู่ตรงกลาง โดยปริมาณเกลือที่มากขึ้นและปริมาณความชื้นภายในไข่ที่ลดลงส่งผลต่อการเกิดเจลแข็งกึ่งยืดหยุ่นของไข่แดง



หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษ a, b, c ที่แตกต่างกันตามแนวตั้ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ A, B, C ที่แตกต่างกันตามแนวนอน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

รูปที่ 1 สัดส่วนไข่แดงที่แข็งตัว (ร้อยละ) ที่พอกโดยใช้ไขมันผงทดแทนดินจอมปลวกบางส่วน เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์

3.4 ปริมาณความชื้นในไข่แดงเค็มดิบและไข่ขาวเค็มดิบ

ปริมาณความชื้นของไข่แดงและไข่ขาวเริ่มต้นที่ไม่ผ่านการพอกมีค่าเท่ากับร้อยละ 50.14 และ 85.89 ตามลำดับ เมื่อระยะเวลาการพอกนานขึ้น ปริมาณความชื้นของไข่แดงเค็มดิบและไข่ขาวเค็มดิบที่ผสมไขมันในระดับต่าง ๆ เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาการพอกเดียวกัน พบว่า ทั้งไข่แดงและไข่ขาว

ที่พอกด้วยขมิ้นในปริมาณที่สูงขึ้นจะมีปริมาณความชื้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงให้เห็นว่า การพอกด้วยดินจอมปลวกช่วยเก็บความชื้นไว้ในไข่มากกว่าการพอกด้วยดินจอมปลวกผสมขมิ้น ทั้งนี้ การหุ้มด้วยดินจอมปลวกช่วยให้เกิดการห่อหุ้มที่แน่นหนาบริเวณผิวเปลือกไข่ ในขณะที่ดินผสมขมิ้นจะมีลักษณะโปร่งและเบากว่า มีการระบายอากาศมากกว่า ทำให้เกิดการระเหยและการสูญเสียน้ำภายในไข่ได้มากกว่า

ตารางที่ 6 ร้อยละปริมาณความชื้นของไข่แดงเค็มดิบและไข่ขาวเค็มดิบที่พอกโดยใช้ขมิ้นผงทดแทนดินจอมปลวกบางส่วนกับตัวอย่างควบคุมเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์

สิ่งทดลอง	ร้อยละปริมาณความชื้นของไข่แดงเค็มดิบ			
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4
0% ขมิ้น	46.06 ^{aA} ±1.38	35.28 ^{aB} ±1.64	29.24 ^{aC} ±0.14	25.85 ^{aD} ±0.78
5% ขมิ้น	44.95 ^{abA} ±0.13	32.74 ^{abB} ±0.61	26.30 ^{bC} ±1.23	21.45 ^{bD} ±0.37
15% ขมิ้น	42.28 ^{bcA} ±1.51	33.94 ^{abB} ±0.57	25.62 ^{bC} ±0.35	20.84 ^{bD} ±0.73
25% ขมิ้น	40.08 ^{cA} ±0.65	31.14 ^{bB} ±0.56	24.72 ^{bC} ±0.43	20.32 ^{bD} ±0.77

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษ a, b, c ที่แตกต่างกันตามแนวตั้ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ns หมายถึงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ A, B, C ที่แตกต่างกันตามแนวนอน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) NS หมายถึงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

3.5 ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (Water activity) ในไข่แดงเค็มดิบและไข่ขาวเค็มดิบ

ค่าวอเตอร์แอคทิวิตีแสดงถึงปริมาณน้ำอิสระที่จุลินทรีย์นำไปใช้ในการเจริญเติบโต ค่าวอเตอร์แอคทิวิตีของไข่แดงและไข่ขาวเริ่มต้นที่ไม่ผ่านการพอกมีค่าเท่ากับ 1.000 ในไข่ทั้ง 2 ส่วน จากตารางที่ 7 พบว่าเมื่อระยะเวลาในการพอกนานขึ้น ค่าวอเตอร์แอคทิวิตีใน

ไข่แดงเค็มดิบและไข่ขาวเค็มดิบที่พอกโดยใช้ขมิ้นผงทดแทนดินจอมปลวกในระดับต่าง ๆ มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาการพอกเดียวกัน พบว่า ทั้งไข่แดงและไข่ขาวที่พอกด้วยขมิ้นในปริมาณที่สูงขึ้นจะมีค่าวอเตอร์แอคทิวิตีลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับทิศทางการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของทั้งไข่แดงเค็มดิบและไข่ขาวเค็มดิบ

ตารางที่ 7 ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (Water Activity) ในไข่แดงและไข่ขาวเค็มดิบที่พอกโดยใช้ขมิ้นผงทดแทนดินจอมปลวกบางส่วนกับตัวอย่างควบคุมเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์

สิ่งทดลอง	ค่าวอเตอร์แอคทิวิตีของไข่แดงเค็มดิบ			
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4
0% ขมิ้น	0.994 ^{abA} ±0.000	0.992 ^{abA} ±0.001	0.986 ^{aA} ±0.000	0.975 ^{aB} ±0.011
5% ขมิ้น	0.995 ^{aA} ±0.000	0.991 ^{bcA} ±0.002	0.961 ^{bB} ±0.003	0.929 ^{bC} ±0.007
15% ขมิ้น	0.995 ^{aA} ±0.000	0.994 ^{aA} ±0.001	0.944 ^{cB} ±0.002	0.927 ^{bC} ±0.010
25% ขมิ้น	0.993 ^{cA} ±0.000	0.989 ^{cA} ±0.000	0.952 ^{cB} ±0.008	0.931 ^{bC} ±0.004

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษ a, b, c ที่แตกต่างกันตามแนวตั้ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ns หมายถึงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ A, B, C ที่แตกต่างกันตามแนวนอน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) NS หมายถึงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

3.6 ค่าความแข็งของไข่แดงสุกและไข่ขาวสุก

การวัดค่าความแข็งของไข่แดงเค็มสุกจะทำการทดสอบโดยการหาค่าแรงกดสูงสุด (Maximum Force) จากตารางที่ 8 พบว่า แนวโน้มค่าความแข็งของไข่แดงสุกที่ผ่านการพอกดินผสมขมิ้นที่ระดับต่าง ๆ เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ จะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยสัปดาห์ที่ศูนย์มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 2.62 นิวตัน ทั้งนี้ เมื่อระยะเวลาการพอกนานขึ้น ปริมาณความเข้มข้นของเกลือที่สูงขึ้นและปริมาณความชื้นที่ลดลงทำให้ไข่แข็งมี

ลักษณะกิ่งแข็งคล้ายเจลยืดหยุ่น [12] และเมื่อเปรียบเทียบที่ระยะเวลาการพอกเดียวกันในแต่ละสัปดาห์ พบว่า ค่าความแข็งของไข่แดงที่พอกด้วยไขมันร้อยละ 25 มีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งทดลองอื่น ๆ ซึ่งสอดคล้องกับค่าสัดส่วนไข่แดงดิบที่แข็งตัวที่มีค่าน้อยกว่าสิ่งทดลองอื่น ๆ เช่นกัน สำหรับค่าความแข็งของไข่ขาวเค็มสุกทุกสิ่งทดลองเมื่อผ่านการพอกเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ จะมีค่าความแข็งลดลงจากไข่ขาวหนึ่งที่ไม่ผ่านการพอกเค็ม (ตารางที่ 9) โดยสัปดาห์ที่ศูนย์มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 9.67 นิวตัน และมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาการพอกนานขึ้น โดยในสัปดาห์ที่ 3 และ 4 พบว่า ไข่ขาวพอกด้วยดินไม่ผสมไขมัน (สิ่งทดลองควบคุม) มีค่าความแข็งน้อยกว่าสิ่งทดลองอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้เป็นผลมาจากปริมาณเกลือมีค่าสูงกว่า ซึ่งเกลือจะทำให้ความหนืดของไข่ขาวดิบมีค่าลดลง เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาของโปรตีนอัลบูมิน นอกจากนี้ มีรายงานว่า ความหนืดของไข่ขาวดิบเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 90.55 cP และเมื่อเวลาการตอ้งเค็มผ่านไป 4 สัปดาห์ ความหนืดมีค่าลดลงเป็น 42.19 cP ส่งผลให้ไข่ขาวเค็มสุกมีความนุ่มมากกว่าไข่ขาวสุกปกติ [5]

ตารางที่ 8 ค่าแรงกดสูงสุดของไข่แดงที่พอกโดยใช้ไขมันผงทดแทนดินจอมปลวกบางส่วน เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์

สิ่งทดลอง	ค่าแรงกดสูงสุดของไข่แดง (นิวตัน)			
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4
0% ไขมัน	3.50 ^{a,D} ±0.02	4.39 ^{ns,C} ±0.09	6.39 ^{a,B} ±0.05	8.30 ^{a,A} ±0.01
5% ไขมัน	3.46 ^{a,D} ±0.02	4.41 ^{ns,C} ±0.04	6.31 ^{ab,B} ±0.02	8.30 ^{a,A} ±0.01
15% ไขมัน	3.35 ^{b,D} ±0.04	4.37 ^{ns,C} ±0.02	6.33 ^{ab,B} ±0.04	8.19 ^{a,A} ±0.01
25% ไขมัน	3.30 ^{b,D} ±0.03	4.33 ^{ns,C} ±0.05	6.27 ^{b,B} ±0.02	8.00 ^{b,A} ±0.11

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษ a, b, c ที่แตกต่างกันตามแนวตั้ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ns หมายถึงไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ A, B, C ที่แตกต่างกันตามแนวนอน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) NS หมายถึงไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 9 ค่าแรงกดสูงสุดของไข่ขาวที่พอกโดยใช้ไขมันผงทดแทนดินจอมปลวกบางส่วน เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์

สิ่งทดลอง	ค่าแรงกดสูงสุดของไข่ขาว (นิวตัน)			
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4
0% ไขมัน	2.56 ^{ns,A} ±0.31	2.37 ^{ns,AB} ±0.12	2.04 ^{b,B} ±0.06	2.02 ^{b,B} ±0.05
5% ไขมัน	2.62 ^{ns,A} ±0.06	2.44 ^{ns,AB} ±0.01	2.27 ^{a,BC} ±0.07	2.16 ^{a,C} ±0.08
15% ไขมัน	2.54 ^{ns,A} ±0.03	2.47 ^{ns,AB} ±0.09	2.33 ^{a,BC} ±0.09	2.20 ^{a,C} ±0.01
25% ไขมัน	2.59 ^{ns,A} ±0.06	2.55 ^{ns,A} ±0.07	2.27 ^{a,B} ±0.03	2.20 ^{a,B} ±0.02

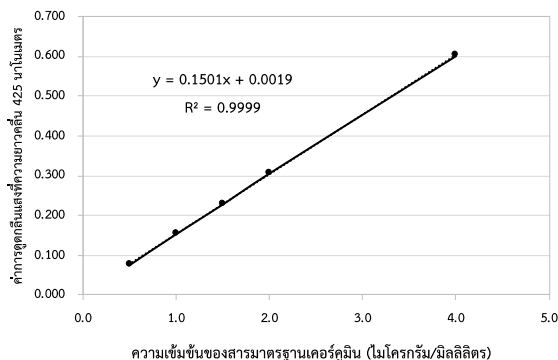
หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษ a, b, c ที่แตกต่างกันตามแนวตั้ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ns หมายถึงไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ A, B, C ที่แตกต่างกันตามแนวนอน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) NS หมายถึงไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

3.7 การวิเคราะห์ปริมาณเคอร์คูมินด้วยวิธี UV-Visible Spectrophotometry

3.7.1 การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์ปริมาณเคอร์คูมินด้วยวิธี UV-Visible Spectrophotometry

สารมาตรฐานเคอร์คูมินละลายได้อย่างสมบูรณ์ในตัวทำละลายเมทานอล โดยมีค่าความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 425 นาโนเมตร โดยกราฟมาตรฐานเคอร์คูมินมีความเป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้น 0.5 – 4.0 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร และมีสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.999 โดยความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง คือ $y = 0.1501x + 0.0019$ ดังแสดงในรูปที่ 2 มีค่าขีดจำกัดการตรวจหา (LOD) และขีดจำกัดการวัดเชิงปริมาณ (LOQ) เท่ากับ 0.3743 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร และ 1.1343 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ตามลำดับ ค่าความแม่นยำมีค่าร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) ต่ำกว่า 2 แสดงว่าวิธีการวิเคราะห์ที่มีความแม่นยำค่อนข้างสูง มีค่าร้อยละการกลับคืนอยู่ระหว่าง 75.12 – 83.94 โดยเกณฑ์การยอมรับค่าร้อยละการกลับคืนตามมาตรฐานทางอาหารและยาที่ระดับความเข้มข้น 1 ไมโครกรัม/กรัม อยู่ระหว่างร้อยละ 75 - 120 [13]



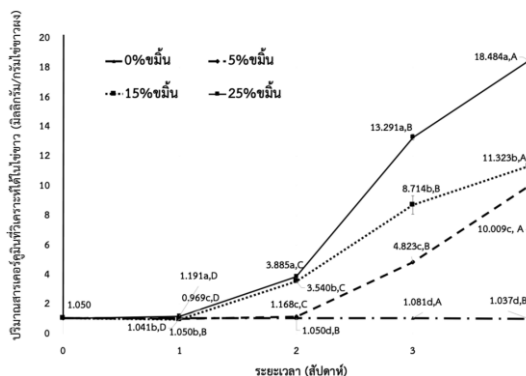
รูปที่ 2 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารมาตรฐานคอร์คูมิน

3.7.2 การหาปริมาณคอร์คูมินในไข่ขาวเค็มดิบด้วยเทคนิค UV- Visible Spectrophotometry

การพอกขมิ้นในปริมาณมากขึ้นและระยะเวลาพอกนานขึ้นส่งผลให้ปริมาณคอร์คูมินที่วิเคราะห์ได้ในไข่ขาวดิบมีค่าสูงขึ้น (รูปที่ 3) โดยตัวอย่างที่พอกขมิ้นที่ระดับร้อยละ 5 มีปริมาณคอร์คูมินที่วิเคราะห์ได้เท่ากับ 1.041 มิลลิกรัม/กรัมไข่ขาวผงในสัปดาห์ที่ 1 และเพิ่มเป็น 10.009 มิลลิกรัม/กรัมไข่ขาวผงในสัปดาห์ที่ 4 สำหรับตัวอย่างที่พอกขมิ้นที่ระดับร้อยละ 15 มีปริมาณคอร์คูมินที่วิเคราะห์ได้เท่ากับ 1.050 มิลลิกรัม/กรัมไข่ขาวผงในสัปดาห์ที่ 1 และเพิ่มเป็น 11.323 มิลลิกรัม/กรัมไข่ขาวผงในสัปดาห์ที่ 4 และตัวอย่างที่พอกขมิ้นที่ระดับร้อยละ 25 มีปริมาณคอร์คูมินที่วิเคราะห์ได้เท่ากับ 1.191 มิลลิกรัม/กรัมไข่ขาวผงในสัปดาห์ที่ 1 และเพิ่มเป็น 18.484 มิลลิกรัม/กรัมไข่ขาวผงในสัปดาห์ที่ 4 (รูปที่ 4 แสดงลักษณะไข่เค็มทั้งฟองและไข่ขาวดิบที่พอกเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์)

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะสามารถตรวจวัดปริมาณคอร์คูมินในไข่ขาวได้ แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่าขีดจำกัดการตรวจหา (LOD) ที่มีค่าเท่ากับ 0.3743 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ซึ่งหากปริมาณคอร์คูมินที่ตรวจพบน้อยกว่าค่า LOD ดังกล่าว จะถูกรายงานว่า “ตรวจไม่พบ” [14] โดยปริมาณคอร์คูมินที่ตรวจวัดได้ในรูปที่ 3

แสดงในหน่วยมิลลิกรัม/กรัมไข่ขาวผง แต่เมื่อเทียบค่า LOD ในหน่วยไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร พบว่า สิ่งทดลองที่สามารถรายงานการ “ตรวจพบ” ได้ คือ 1) สิ่งทดลองที่พอกด้วยขมิ้นร้อยละ 25 ที่ระยะเวลาการพอก 2 สัปดาห์เป็นต้นไป (0.384 – 1.829 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) 2) สิ่งทดลองที่พอกด้วยขมิ้นร้อยละ 15 ที่ระยะเวลาการพอก 3 สัปดาห์เป็นต้นไป (0.860 – 1.308 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) และ 3) สิ่งทดลองที่พอกด้วยขมิ้นร้อยละ 5 ที่ระยะเวลาการพอก 4 สัปดาห์ (0.995 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)



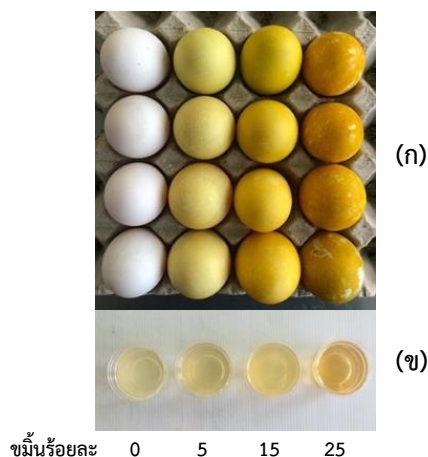
หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษ a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ns หมายถึงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) NS หมายถึงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

รูปที่ 3 ปริมาณคอร์คูมินในไข่ขาวเค็มดิบ (มิลลิกรัม/กรัม ไข่ขาวผง) ที่พอกโดยใช้ขมิ้นผงทดแทนดินจอมปลวกบางส่วน เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์

สำหรับขีดจำกัดการวัดเชิงปริมาณซึ่งเป็นคุณสมบัติของวิธีทดสอบที่แสดงความสามารถของวิธีในการรายงานผลที่ความเข้มข้นต่ำสุดที่มีความแม่นยำ ความเที่ยง และความไม่แน่นอนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับจากการทดลองนี้ พบว่า ค่า LOQ มีค่าเท่ากับ 1.1343 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ดังนั้น สิ่งทดลองที่สามารถรายงานผลได้สอดคล้องกับความสามารถของวิธีทดสอบ จึงต้องมีค่าการตรวจพบสารคอร์คูมินได้ไม่น้อยกว่าค่า LOQ

ดังกล่าว ได้แก่ 1) สิ่งทดลองที่พอกด้วยไขมันร้อยละ 25 ที่ระยะเวลาการพอก 3 สัปดาห์เป็นต้นไป (1.181 – 1.829 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร) และ 2) สิ่งทดลองที่พอกด้วยไขมันร้อยละ 15 ที่ระยะเวลาการพอก 4 สัปดาห์ (1.308 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร)



รูปที่ 4 ตัวอย่างไข่เค็ม (ก) และไข่ขาวดิบ (ข) ที่พอกโดยใช้ไขมันผงทดแทนดินจอมปลวกบางส่วน ที่ระยะการพอกในสัปดาห์ที่ 4

3.8 การทดสอบทางประสาทสัมผัส

การทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคทั่วไป จำนวน 60 คน แสดงตารางที่ 10 โดยในการทดลองนี้จะเริ่มทดสอบในสัปดาห์ที่ 1 – 4 เนื่องจากในสัปดาห์ที่ศูนย์นั้นสิ่งทดลองยังเป็นไข่ต้มธรรมดา ไม่มีรสเค็ม และยังไม่มีการแพร่ซึมผ่านของเกลือเข้าสู่ไข่ เมื่อเปรียบเทียบคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสในแต่ละคุณลักษณะของแต่ละสิ่งทดลองที่ผ่านการพอกเป็นระยะเวลาเดียวกันเดียวกัน พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) เมื่อพอกเป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์เป็นต้นไป คะแนนความชอบในทุกคุณลักษณะของทุกสิ่งทดลองมีแนวโน้มลดลง โดยคุณลักษณะด้านรสชาติโดยรวมและความชอบโดยรวมเมื่อพอกเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์จะมีคะแนนลดลงอยู่ในระดับชอบเล็กน้อยถึงชอบปานกลาง (คะแนนอยู่

ระหว่าง 6 – 7) ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากรสเค็มที่เพิ่มมากขึ้นและส่งผลให้ผู้บริโภคมีความชอบลดลง

ตารางที่ 10 คะแนนความชอบทางประสาทสัมผัส (9-point hedonic scale) ด้านสี กลิ่น รสชาติโดยรวม และความชอบโดยรวมของไข่เค็มที่พอกโดยใช้ไขมันผงทดแทนดินจอมปลวกบางส่วน เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์

สิ่งทดลอง	สีของไข่แดง			
	สัปดาห์ที่ 1 ^{ns}	สัปดาห์ที่ 2 ^{ns}	สัปดาห์ที่ 3 ^{ns}	สัปดาห์ที่ 4 ^{ns}
0% ไขมัน ^{NS}	7.00±0.53	7.33±0.82	7.33±0.82	7.40±0.74
5% ไขมัน ^{NS}	6.67±1.23	7.20±0.68	7.20±0.94	7.50±0.86
15% ไขมัน ^{NS}	7.40±0.91	7.80±0.94	7.47±0.92	7.40±0.83
25% ไขมัน ^{NS}	6.53±1.73	7.40±0.83	7.37±0.82	7.40±1.06
สิ่งทดลอง	กลิ่น			
	สัปดาห์ที่ 1 ^{ns}	สัปดาห์ที่ 2 ^{ns}	สัปดาห์ที่ 3 ^{ns}	สัปดาห์ที่ 4 ^{ns}
0% ไขมัน ^{NS}	6.00 ^{ns} ±0.65	6.80 ^{ns} ±0.41	6.60 ^{ns} ±0.99	6.23 ^{ns} ±0.88
5% ไขมัน ^{NS}	6.33 ^{ns} ±0.62	7.20 ^{ns} ±0.68	6.60 ^{ns} ±0.99	6.40 ^{ns} ±1.45
15% ไขมัน ^{NS}	6.20 ^{ns} ±0.68	6.73 ^{ns} ±1.16	6.40 ^{ns} ±1.06	6.40 ^{ns} ±1.64
25% ไขมัน ^{NS}	6.40 ^{ns} ±0.99	7.13 ^{ns} ±0.74	6.93 ^{ns} ±1.28	6.57 ^{ns} ±1.79
สิ่งทดลอง	รสชาติโดยรวม			
	สัปดาห์ที่ 1 ^{ns}	สัปดาห์ที่ 2 ^{ns}	สัปดาห์ที่ 3 ^{ns}	สัปดาห์ที่ 4 ^{ns}
0% ไขมัน ^{NS}	7.07 ^{ns} ±0.80	7.27 ^{ns} ±0.80	7.13 ^{ns} ±0.52	6.80 ^{ns} ±1.01
5% ไขมัน ^{NS}	6.93 ^{ns} ±0.88	7.20 ^{ns} ±0.94	7.13 ^{ns} ±0.64	6.80 ^{ns} ±1.08
15% ไขมัน ^{NS}	7.07 ^{ns} ±1.03	7.33 ^{ns} ±0.62	7.27 ^{ns} ±0.88	7.00 ^{ns} ±1.25
25% ไขมัน ^{NS}	7.00 ^{ns} ±1.20	7.27 ^{ns} ±0.70	7.13 ^{ns} ±0.74	6.40 ^{ns} ±1.12
สิ่งทดลอง	ความชอบโดยรวม			
	สัปดาห์ที่ 1 ^{ns}	สัปดาห์ที่ 2 ^{ns}	สัปดาห์ที่ 3 ^{ns}	สัปดาห์ที่ 4 ^{ns}
0% ไขมัน ^{NS}	6.80 ^{ns} ±0.68	7.20 ^{ns} ±0.56	7.20 ^{ns} ±0.68	6.80 ^{ns} ±1.15
5% ไขมัน ^{NS}	6.93 ^{ns} ±0.96	7.20 ^{ns} ±0.86	7.20 ^{ns} ±0.56	6.80 ^{ns} ±1.08
15% ไขมัน ^{NS}	7.33 ^{ns} ±1.18	7.27 ^{ns} ±0.88	7.27 ^{ns} ±1.03	7.00 ^{ns} ±1.25
25% ไขมัน ^{NS}	6.87 ^{ns} ±0.83	7.27 ^{ns} ±0.80	7.13 ^{ns} ±0.74	6.33 ^{ns} ±1.11

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษ ns หมายถึง ไม่แตกต่างกันตามแนวตั้ง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ NS หมายถึง ไม่แตกต่างกันตามแนวนอน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

เมื่อพิจารณาสิ่งทดลองที่พอกด้วยไขมันผงทดแทนดินจอมปลวกที่ระดับร้อยละ 15 และ 25 มีคะแนนความชอบด้านกลิ่น รสชาติโดยรวม และด้านความชอบโดยรวมค่อนข้างสูงในสัปดาห์ที่ 2 แม้ว่าจะมีค่าไม่แตกต่างจากสิ่งทดลองควบคุมและสิ่งทดลองอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ดังนั้น เมื่อพิจารณาทั้งด้านคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสและ

ปริมาณการแทรกซึมของสารเคอร์คูมินเข้าสู่ไข่ขาว ร่วมกับการเปรียบเทียบปริมาณเคอร์คูมินที่วิเคราะห์ได้ กับค่า LOD นั้น พบว่า การพอกด้วยมันฝรั่งทดแทนดิน จอมปลวกในปริมาณสูง คือ ที่ระดับร้อยละ 25 ที่ ระยะเวลาการพอก 2 สัปดาห์ จึงเหมาะสมในการผลิต ไข่เค็มพอกสมุนไพรผสมดินจอมปลวกโดยไม่ส่งผล กระทบต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัส และสามารถ รายงานค่าการตรวจพบเคอร์คูมินได้ตามวิธีการทดสอบ ที่ผ่านการตรวจสอบความใช้ได้ (Validated Method)

4. สรุป

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของไข่ เค็มพอกขมิ้นผงทดแทนดินจอมปลวกที่ระดับร้อยละ 0 5 15 และ 25 ในระหว่างการเก็บรักษา 4 สัปดาห์ พบว่า การใช้ขมิ้นผงในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ปริมาณเกลือที่ วิเคราะห์ได้ในไข่แดงเค็มดิบและไข่ขาวเค็มดิบมีค่าลดลง ส่งผลให้ค่าร้อยละสัดส่วนไข่แดงที่แข็งตัวลดลงตามไป ด้วย โดยไข่แดงสุกมีค่าความแข็งลดลง ส่วนไข่ขาวเค็ม สุกจะมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อระยะเวลาการ พอกนานขึ้น ไข่แดงมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสีส้มอม เหลือง ส่วนไข่ขาวมีทิศทางการสีแดงผสมสีเหลือง เล็กน้อยก่อน โดยทั้งไข่แดงเค็มดิบและไข่ขาวเค็มดิบมีสี คล้ำลง นอกจากนี้ ตัวอย่างไข่ขาวที่พอกด้วยขมิ้นใน ปริมาณมากขึ้น มีค่าความเป็นสีเหลืองเพิ่มขึ้น ซึ่ง สอดคล้องกับปริมาณสารเคอร์คูมินที่วิเคราะห์ได้ในไข่ ขาวที่มีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอคติ วิตีในไข่แดงเค็มดิบและไข่ขาวเค็มดิบที่พอกดินจอม ปลวกเพียงอย่างเดียวมีค่าน้อยกว่าการพอกด้วยดินจอม ปลวกผสมขมิ้น แสดงให้เห็นว่าดินจอมปลวกเพียงอย่าง เดียวสามารถกักเก็บเกลือได้แน่นกว่า ทำให้ความชื้น ออกจากไข่น้อยลง จากการทดสอบความชอบทาง ประสาทสัมผัสด้วยวิธี 9-point hedonic scale พบว่า ไข่เค็มที่พอกขมิ้นผงทดแทนดินจอมปลวกที่ระดับร้อย ละ 25 ที่ระยะเวลาการพอก 2 สัปดาห์ มีคะแนน

ความชอบในทุกคุณลักษณะสูงและไม่แตกต่างจากสิ่ง ทดลองควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะ ของไข่เค็มที่พอกด้วยดินจอมปลวกผสมขมิ้น รวมถึงผล ของการแทรกซึมผ่านของสารเคอร์คูมินเข้าสู่ภายในไข่ ซึ่งเป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ด้วยสมุนไพร อย่างไรก็ตาม ควรมีการศึกษาคุณสมบัติด้าน ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของไข่เค็มที่มีซึม ผ่านของสารเคอร์คูมินต่อไปในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยงบประมาณสนับสนุนการวิจัยจาก สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและ นวัตกรรม (สกอ.) และมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพปวง (Matching Fund) ภายใต้โครงการ การพัฒนาทุนทาง สังคมสู่ความมั่นคงของเศรษฐกิจฐานรากด้วยนวัตกรรม ประจำปี พ.ศ.2561

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Benjakul and T. Kaewmanee, "Sodium chloride preservation in duck eggs," in *Egg Innovation and Strategies for Improvement*, P. Hester, Ed. Oxford: Academic Press, 2017, pp. 415–426.
- [2] P.V. Kadam, C.L. Bhingare, R.Y. Nikam and S.A. Pawar, "Development and validation of UV Spectrophotometric method for the estimation of Curcumin in cream formulation," *Pharmaceutical Methods*, vol. 4, pp. 43–45, Aug. 2013.
- [3] R. Anto, J. George, K. Babu, K. Rajasekharan and R. Kuttan, "Antimutagenic and anticarcinogenic activity of natural and

- synthetic curcuminoids,” *Mutation Research*, vol. 370, pp. 127–131, Sep. 1996.
- [4] AOAC. *Official method of analytical chemists*, 17th ed. Arlington: The Association of Official Analytical Chemists Inc., 2000.
- [5] S. P. Chi and K. H. Tseng, “Physicochemical properties of salted pickled yolk from duck and chicken eggs,” *Journal of Food Science*, vol. 33, pp. 507–513, Jun. 2008.
- [6] Guideline IH. *Validation of analytical procedure: text and methodology*. Q2 (R1). 2005.
- [7] A.V.A. Resurreccion. *Consumer Sensory Testing for Product Development*, Gaithersburg, Md.: Aspen Publishers, 1998.
- [8] S. Apirattananuson, “Coating of chaiya salted eggs with tea waste to partially replace soil from termite mound,” *RMUTP Research Journal Science & Technology*, vol. 11, no. 1, pp. 111–125, Jan. 2017.
- [9] C. W. Lin, “The storage of egg. In the chemistry and utility of egg,” Taipei: Hua shiang Yuan publishing Co. pp. 98–121, 1983.
- [10] H. Sugino, T. Nitoda and L.R. Juneja, “General chemical composition of hen eggs,” in *Hen Eggs: Their Basic and Applied science*, T. Yamamoto, L.R. Juneja, H. Hatta and M. Kim, eds. CRC Press., Boca Raton, Florida, USA, 1996, pp. 13–24.
- [11] N. Laokuldilok, N. Panthong, S. Kittipanaprai, T. Tikapanya and P. Taokum, “Application of Ultrasonication Technique for Salting Duck Egg with Turmeric,” in *Proceeding of ARUCON 2019*, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University, Thailand, 2019, pp. 324–330.
- [12] T. Kaewmanee, S. Benjakul and W. Visessanguan, “Changes in chemical composition, physical properties and microstructure of duck egg as influenced by salting,” *Food Chemistry*, vol. 112, pp. 560–569, 2009.
- [13] AOAC International. (2020, October). “Requirements for Single Laboratory Validation of Chemical Method,” [Online]. Available: http://www.aoac.org/Official_Methods/slv_guidelines.pdf
- [14] D.A. Armbruster and T. Pry, “Limit of blank, limit of detection and limit of quantitation,” *The Clinical Biochemist Reviews*, vol. 29 suppl (i), pp. S49–S52, Aug. 2008.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การประยุกต์ใช้ฟิล์มแข็งเคลือบผิวเพื่อยืดอายุพันธะเอียงในกระบวนการตัดขอบ

วิชัย พุ่มจันทร์* และ คมกริช ละววรรณวงษ์

คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล
ถนนเพชรเกษม อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110

รับบทความ 9 พฤศจิกายน 2563 แก้ไขบทความ 14 พฤษภาคม 2564 ตอรับบทความ 7 มิถุนายน 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อยืดอายุพันธะในกระบวนการตัดขอบ (Trimming Process) ด้วยเทคโนโลยีการเคลือบผิว กระบวนการวิจัยประกอบไปด้วยการทดลองสองส่วน ในส่วนแรกการทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานด้วยวิธีหมุนบอลบนแผ่นจาน (Ball-on-disk) บนเครื่องไตรบอมิเตอร์ วัสดุที่ใช้ทำบอลคือเหล็กเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD11 ตามมาตรฐาน JIS ทำการชุบแข็งที่ค่าความแข็ง 60 ± 2 HRC เคลือบผิวโดยกรรมวิธี PVD ด้วยฟิล์ม AlCrN และ TiAlN แผ่นจานคือเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ตามมาตรฐาน JIS หนา 2 มิลลิเมตร ส่วนที่สองคือการทดสอบการสึกหรอด้วยแม่พิมพ์ตัดขอบโดยใช้พันธะตรงและพันธะเอียง 45 องศา แบบไม่เคลือบผิว และพันธะเอียง 45 องศา เคลือบผิวด้วยฟิล์ม AlCrN และ TiAlN วัสดุชิ้นงานคือ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 หนา 2 มิลลิเมตร นอกจากนี้ในงานวิจัยได้มีการจำลองการตัดด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่ออธิบายถึงกลไกการขาดของชิ้นงาน แม้ว่าการเคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งส่งผลให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าสูงกว่ากรณีที่ไม่ได้เคลือบผิว แต่ก็สามารถยืดอายุการใช้งานของพันธะได้ ผลของการจำลองการตัดพบว่า พันธะเอียง 45 องศา สามารถสร้างชิ้นงานความเที่ยงตรงสูงได้โดยมีรอยตัดฉีกยาวมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการตัดขอบด้วยพันธะตรง เนื่องจากความเค้นภายในเนื้อวัสดุชิ้นงานไม่เกิดการเชื่อมต่อจากพันธะสุดท้ายทำให้การแตกหักช้าลงไปด้วย และพันธะเอียง 45 องศา ที่เคลือบผิวด้วยฟิล์ม TiAlN มีความทนทานสูงสุดสามารถตัดชิ้นงานได้มากถึง 5,000 ครั้ง

คำสำคัญ : การเคลือบผิว; ฟิล์มแข็งเคลือบผิว; แม่พิมพ์ตัดขอบ; การสึกหรอ; เหล็กแผ่นรีดเย็น

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 2899 3153, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: wichai.poo@rmutr.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

The Application of Hard Film Coating for Extension Tool Life on Inclined Punch in the Trimming Process

Wichai Pumchan* and Komgrit Lawanwong

Production Engineering Technology, Faculty of Industry and Technology, Rajamangala University of Technology Rattanakosin Wong Klai Kang Won Campus
Petchkasem Road, Hua Hin, Prachuap Khiri Khan 77110

Received 9 November 2020; Revised 14 May 2021; Accepted 7 June 2021

Abstract

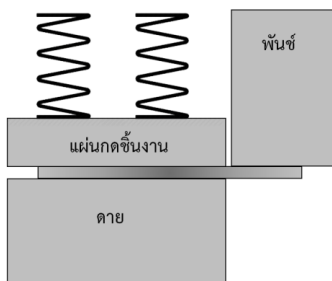
The objective of this research is to increase the tool life of trimming process by surface coating technology. The procedure of this research consists of two sections. In the first section, the friction coefficient was investigated with the ball on disk technique by using a tribometer. Steel ball was produced from cold work tool steel grade SKD11 (JIS) hardened to 60 ± 2 HRC. Two types of surface coating, namely AlCrN and TiAlN, were conducted by PVD technique. Disk material used in this experiment was made by stainless steel JIS; SUS 304 of 2 mm thickness. For the second section, the wear tests of trimming die were performed by using flat punch and inclined punch 45 degrees without surface coating as well as the inclined punch 45 degrees coated with AlCrN and TiAlN (PVD). Workpiece material used for the wear test was stainless steel JIS; SUS 304 of 2 mm thickness. Additionally, the finite element analysis was carried out for explanation the deformation of the workpiece during trimming operation. Although the friction coefficient of the surface coating was higher than non-coating, it could be extended the tool life ostensibly. As the result of FEM, the inclined punch 45 degrees could be generated the long sheared surface more than the flat punch. This is due to the internal stress of workpiece that did not connect from the punch to the die, so the crack propagation would be delayed. The inclined punch 45 degrees coated TiAlN has a highly durable which can be used up to 5,000 strokes.

Keywords : Coating; Hard Film Coating; Trimming Die; Wear; Cold Rolled Steel Sheet

* Corresponding Author. Tel.: +668 2899 3153, E-mail Address: wichai.poo@rmutr.ac.th

1. บทนำ

กระบวนการตัดขอบ (Trimming Process) เป็นกระบวนการตัดพิเศษที่เพิ่มเข้ามาในขั้นตอนสุดท้ายเพื่อให้ได้ขอบตัดที่มีคุณภาพสูง (รอยตัดเนียนยาวและไม่มีครีบ) ดังรูปที่ 1 เมื่อต้องการชิ้นงานที่มีคุณภาพสูงจึงมีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มกระบวนการตัดขอบเข้าไปในขั้นตอนสุดท้ายก่อนนำไปใช้งาน ในหลายปีที่ผ่านมาพบว่า มีงานวิจัยหลายฉบับที่ให้ความสำคัญเกี่ยวกับการผลิตชิ้นงานที่มีความเที่ยงตรงโดยอาศัยแม่พิมพ์ตัด อาทิ ในงานวิจัย [1]-[4] ทำการศึกษาคุณภาพของชิ้นงานที่ผ่านการตัดด้วยระยะเคลียแรนซ์ต่างกัน การเจาะรูขนาดเล็ก การใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์พฤติกรรมต่าง ๆ ในระหว่างการตัดชิ้นงาน K. Mori et al. [5] นำเสนอการสร้างรัศมีขนาดเล็กบริเวณคมตัดของพันธ์ร่วมกับการใช้ระยะเคลียแรนซ์ที่แคบมาก ๆ ในการตัดเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ผลที่ได้รับคือสามารถเพิ่มความยาวของรอยตัดเนียนได้



รูปที่ 1 กระบวนการตัดขอบ (Trimming Process)

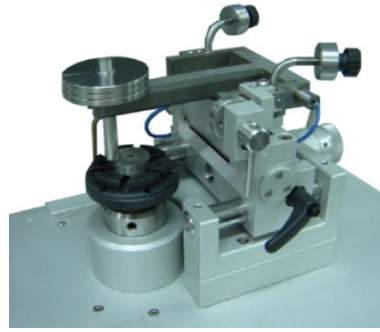
P. Chumrum et al. [6] ศึกษาตัวแปรต่าง ๆ เช่น ระยะเคลียแรนซ์และมุมเน้นพลังงานที่ใช้ในการตัดเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง L. Komgrit และ L. Pongsakorn [7] นำเสนอการเอียงพันธ์ในกระบวนการตัดขอบซึ่งสามารถเพิ่มรอยตัดเนียนได้ S.-H. Song et al. [8] ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วในการตัดชิ้นงานบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ อย่างไรก็ตามการที่จะได้มาซึ่งชิ้นงานที่มีความเที่ยงตรง

สูงไม่ใช่ความต้องการหลักเพียงอย่างเดียวหากแต่ว่าพันธ์ที่ใช้ตัดชิ้นงานต้องทนทานสามารถทำงานได้อย่างยาวนานอีกด้วย ซึ่งการเพิ่มความสามารถในการทนต่อแรงกระแทกและการเสียดสี สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเลือกใช้วัสดุทำพันธ์ที่มีความแข็งแรงสูง หรือชุบด้วยสารชุบแบบต่าง ๆ รวมไปถึงการเคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็ง โดยการเคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งนั้นเป็นการเพิ่มสมบัติความทนทานของผิวแม่พิมพ์ อย่างไรก็ตาม การเคลือบผิวแม่พิมพ์ด้วยฟิล์มแข็งนั้น มีผลกระทบในด้านต้นทุนในสัดส่วนที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นในการพิจารณาเลือกใช้ชนิดของฟิล์มแข็งต้องพิจารณาอย่างรอบคอบ เนื่องจากอุตสาหกรรมการเคลือบผิวภายในประเทศไทยมีความสามารถในการเคลือบด้วยสารต่าง ๆ ด้วยกรรมวิธีไอเคมี (CVD) และไอกายภาพ (PVD) ซึ่งในแต่ละกรรมวิธีนั้นจะมีต้นทุนและสมบัติภายหลังการเคลือบแตกต่างกันออกไป ดังนั้นการพิจารณาเพื่อเลือกใช้ชนิดของฟิล์มที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง การศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า มีงานวิจัยจากหลายประเทศนิยมใช้เทคโนโลยีการเคลือบผิวมาแก้ปัญหาเฉพาะด้านต่าง ๆ เช่น P. Pesch et al. [9] ทดสอบความสามารถของฟิล์มแข็งที่เหมาะสมกับงานดึง (Strip-drawing-test) ทำการเคลือบผิวแม่พิมพ์ต่างชนิดและกรรมวิธีการเคลือบ คือ PVD-TiN, PVD-TiAlN, PVD-TiCN, TiN-sputterd และ TiN-arc ซึ่งสำหรับฟิล์มเคลือบ TiN-sputtered นั้นเหมาะสมกับการใช้งานแม้ว่าจะมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะสูงกว่าชนิดอื่น แต่พบว่าไม่มีสิ่งกะสี้ที่เคลือบอยู่บนแผ่นเหล็กหลุดมาเกาะติดที่แม่พิมพ์ K. Lawanwong et al. [10] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมทางด้านไดรบอลอย์ของฟิล์มแข็งเคลือบผิวชนิด TiAlN, TiN และ TiCN-CVD ภายใต้สภาวะไม่ใช่สารหล่อลื่น คู่สัมผัส คือเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ทำการทดสอบความเสียดทานและปริมาณการสึกหรอด้วยเครื่องทดสอบไดรบอลิเตอร์ Ö. N. Cora et al. [11] นำเสนอการป้องกันการสึกหรอด้วยการ

เคลือบผิวแบบ PVD, CVD และ TD โดยการปรับเปลี่ยนชนิดของวัสดุพื้น (Substrate) จากนั้นใช้เครื่องจักร CNC ขุดผิวบนชิ้นงานเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ซึ่งพบว่าชนิดของวัสดุพื้นนั้นส่งผลต่อประสิทธิภาพการต้านทานการสึกหรอเนื่องจากการเคลือบฟิล์มแต่ละชนิดลงบนวัสดุพื้นที่แตกต่างกัน แรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวแตกต่างกัน จากงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถยืนยันได้เป็นอย่างดีว่า การเคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งนั้นยังคงน่าสนใจ ยิ่งไปกว่านั้นการสึกหรอที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ตัด ไม่ว่าจะเป็นงานแบบลงค้ำ (Blanking) เพียสซิง (Piercing) แม่พิมพ์ตัดขอบอุตสาหกรรมการผลิตให้มีความสำคัญอยู่เสมอ ในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการเพิ่มคุณภาพของชิ้นงานในกระบวนการตัดขอบโดยทำการเอียงพื้น 45 องศา ซึ่งผลจากการตัดสามารถเพิ่มรอยตัดเฉือนได้ แต่พบการสึกหรออย่างรุนแรง ดังนั้นผู้วิจัยจึงเสนอการเคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งเพื่อยืดอายุของพื้นผิว การตรวจสอบถึงประสิทธิภาพของฟิล์มแข็งนั้นผู้วิจัยได้ทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียหายบนเครื่องไทรบอมิเตอร์ จากนั้นทดสอบแบบทำลายด้วยการตัดชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ขนาด 2 มิลลิเมตร เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมนั้นมีสมบัติการยึดติดกับเหล็กเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD11 ซึ่งมีปริมาณคาร์บอนสูงถึงร้อยละ 12 และเป็นที่นิยมใช้เป็นผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ และกลไกของการเพิ่มขึ้นของรอยตัดเฉือนถูกอธิบายด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

2. อุปกรณ์และวิธีทดสอบการสึกหรอ

เพื่อยืนยันถึงประสิทธิภาพของการต้านทานการสึกหรอของผิวเคลือบชนิดต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้จึงได้แบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วนคือ การทดสอบแบบจำลองการเคลื่อนที่สัมผัสด้วยวิธี Ball-on-disk ตามมาตรฐาน (ASTM G133-95) [10] ดังรูปที่ 2 ควบคู่ไปกับการบ่มตัดชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์ตัด (Blanking die)



รูปที่ 2 เครื่องไทรบอมิเตอร์สำหรับทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียหาย

2.1 การทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียหายด้วยเทคนิค Ball-on-disk

เพื่อให้เกิดความสมบูรณ์ในการวิเคราะห์การตัดชิ้นงานด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่กำหนดให้ ป้อนค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย การทดสอบหาสัมประสิทธิ์ความเสียหายระหว่างผิวสัมผัสด้วยเทคนิค Ball-on-disk บนเครื่องไทรบอมิเตอร์จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมเนื่องจากสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว ไม่ซับซ้อนและมีความแม่นยำ โดยกำหนดคู่สัมผัสคือบอล (Ball) และแผ่นจาน (Disk) ในงานวิจัยนี้จึงกำหนดเงื่อนไขในการสร้างบอลและจานดังนี้

- บอลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ผลิตจากเหล็กเครื่องมืองานเย็นเกรด JIS; SKD11 ชุบแข็ง 60 ± 2 HRC
- แผ่นจานผลิตจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นจานคือ 25 มิลลิเมตร

ไม่ใช้สารหล่อลื่น น้ำหนักกด 10 นิวตัน ความเร็วเชิงเส้นคงที่ตลอดการทดลอง 10 เซนติเมตรต่อวินาที ระยะทำการทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียหาย 200 เมตร บอลเคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็ง 2 ชนิด คือ AlCrN-PVD (Double Layer) และ TiAlN-PVD (Multilayer) จากนั้นติดตั้งบอลและแผ่นจานบนเครื่องไทรบอมิเตอร์ ดังรูปที่ 2 การวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย (μ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (1)$$

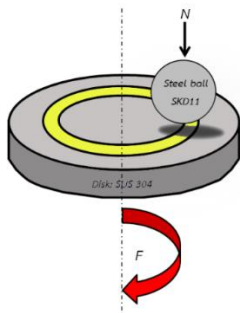
โดยที่

μ คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

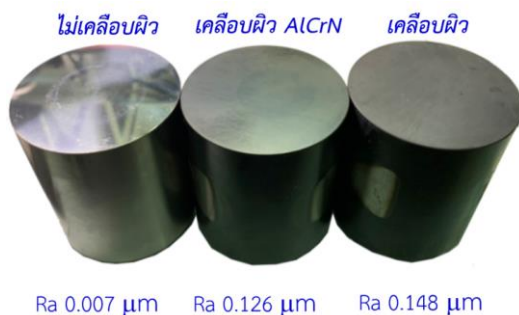
F คือ แรงต้านทานการเคลื่อนที่

N คือ แรงตั้งฉากหรือแรงกดวัตถุสัมผัสเข้าหากัน

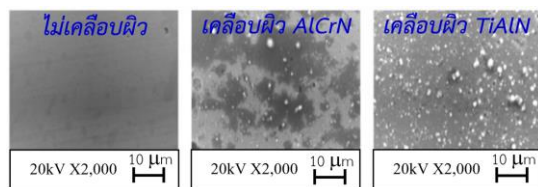
หลักการทำการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 หลักการของการทดสอบแบบ Ball-on-disk



(ก) ชิ้นงานเคลือบผิวจำลอง (Dummy)

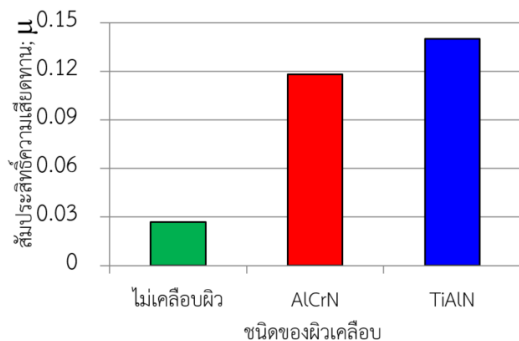


(ข) พื้นผิวของชิ้นงานเคลือบผิวจำลอง

รูปที่ 4 ชิ้นงานเคลือบผิวจำลองสำหรับการทดสอบ
สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

การเคลือบผิวของงานวิจัยนี้ ได้ทำการสร้าง
ชิ้นงานเคลือบผิวจำลอง (Dummy) ดังรูปที่ 4 (ก)

เพื่อนำเข้าเตาเคลือบผิวพร้อมกับพันธ์และบอล จากนั้น
นำชิ้นงานเคลือบผิวจำลองที่ผ่านการเคลือบผิวไป
ตรวจสอบสมบัติอื่น ๆ ซึ่งก่อนทำการเคลือบผิวมี
ข้อกำหนดที่สำคัญมากคือต้องเตรียมผิวที่จะเคลือบให้
เรียบที่สุด ดังนั้นชิ้นงานที่ไม่ได้เคลือบผิวจึงต้องผ่านการ
ขัดผิวแบบละเอียด (Lapping) จนได้ความละเอียดสูงสุด
ดังรูปที่ 4 (ก) และยืนยันด้วยรูปถ่ายพื้นผิวด้วยกล้อง
SEM ดังรูปที่ 4 (ข) พบว่ามีความหยาบผิวต่ำที่สุด (มีค่า
ความหยาบผิวที่ 0.007 ไมโครเมตร) เมื่อนำไปทดสอบ
สัมประสิทธิ์ความเสียดทานจึงได้ค่าที่ต่ำสุด ดังรูปที่ 5

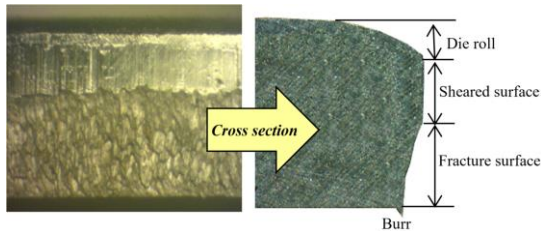


รูปที่ 5 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

ในส่วนของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผิว
เคลือบนั้นพบว่ามีการเคลือบปกคลุมอยู่บนพื้นผิว ดังรูป
ที่ 4 (ข) โดย TiAlN ผิวหยาบสุดคือ 0.148 ไมโครเมตร
จึงมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงสุด รองลงมาคือ บอล
ที่เคลือบด้วย AlCrN ซึ่งมีความหยาบผิวที่ 0.126
ไมโครเมตร

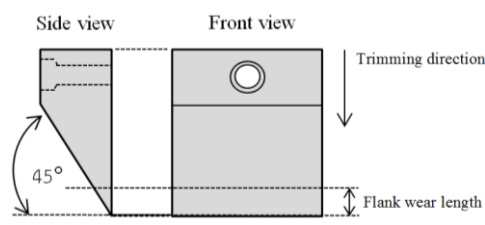
2.2 การติดตั้งแม่พิมพ์ตัดขอบและข้อกำหนด ในการตัดชิ้นงาน

การกำหนดคุณภาพชิ้นงานสำหรับงานแบลงค์กิ้ง
และเพียสซึ่งนั้นสามารถกำหนดได้จากรอย ตัดเฉือน
ขอบตัดของชิ้นงานสามารถแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก
ได้แก่ ส่วนโค้งมน (Die Roll) รอยตัดเฉือน (Sheared
Surface) รอยฉีกขาด (Fracture Surface) และครีป
(Burr) แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ขอบตัดชิ้นงานที่ได้จากการตัดด้วย
แม่พิมพ์แบบลงค้ำ

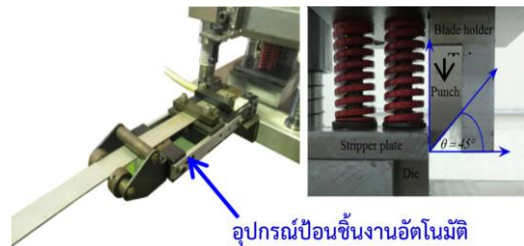
ในงานวิจัยนี้ดำเนินการทดสอบกับกระบวนการตัดขอบ (Trimming Process) ซึ่งเป็นกระบวนการเก็บผิวในขั้นตอนสุดท้าย จึงใช้ระยะเคลือบแรนซ์แคบ ส่งผลให้เกิดการเสียดสีอย่างรุนแรงเนื่องจากเป็นขั้นตอนเก็บผิวสุดท้าย ทำให้ขอบตัดที่ได้จะมีผิวมันและครีบบางเล็กน้อยเท่านั้น โดยวัสดุชิ้นงานสำหรับการตัดนั้นเป็นวัสดุเดียวกันกับการทดสอบสมบัติความเสียหาย คือ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ขนาด 2 มิลลิเมตร และเพื่อให้ได้รอยตัดเฉือนที่ดียาวที่สุด จึงนำเสนอพันธ์เอียงทำมุม 45 องศา ดังรูปที่ 7 พันธุ์และด้ายผลิตจากเหล็กเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD11 ชุบแข็ง ที่ระดับความแข็งคงที่เท่ากับ 60 ± 2 HRC เคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็ง TiAlN (สีม่วงเทา) และ AlCrN (สีเทาสว่าง) ดังรูปที่ 8 จากนั้นติดตั้งพันธ์บนแม่พิมพ์ตัดขอบพร้อมกับติดตั้งอุปกรณ์ป้อนชิ้นงานอัตโนมัติ ดังรูปที่ 9 ทำการทดสอบความทนทานของพันธ์ด้วยการตัดชิ้นงานโดยให้แรงตัดคงที่จากเครื่องเพรสแบบเพลาช้อเหวี่ยงขนาด 60 ตัน ดังรูปที่ 10 จำนวนครั้งในการตัดต่อนาที (Stroke per Minute; SPM) คือ 30 และไม่มีการใช้สารหล่อลื่นในการทดสอบ ทำการวัดระยะการสึกหรอที่เกิดขึ้นบนคมตัดพันธ์เป็นช่วง ๆ



รูปที่ 7 พันธุ์สำหรับกระบวนการตัดขอบ



รูปที่ 8 พันธุ์เคลือบผิวสำหรับกระบวนการตัดขอบ



รูปที่ 9 ชุดแม่พิมพ์ตัดขอบและอุปกรณ์ป้อนชิ้นงาน
อัตโนมัติ



รูปที่ 10 การติดตั้งแม่พิมพ์ตัดขอบบนเครื่องเพรส

2.3 การจำลองการตัดด้วยวิธีการทางไฟไนต์

เอลิเมนต์

ส่วนประกอบที่สำคัญของงานวิจัยนี้คือ การจำลองการตัดด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งทำให้สามารถเข้าใจถึงกลไกการเปลี่ยนรูปของชิ้นงานขณะตัดได้เป็นอย่างดี เพื่อให้ผลการจำลองถูกต้อง ในการสร้างแบบจำลองนั้นจำเป็นต้องทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุ

ชิ้นงานก่อน โดยเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง ด้วยมาตรฐาน JIS B13 พร้อมติดตั้งสเตรนเกจเพื่อนำไปคำนวณความเค้นจริง-ความเครียดจริง ดังรูปที่ 11 จากนั้นติดตั้งชิ้นงานทดสอบเข้ากับเครื่อง Universal Testing Machine ดังรูปที่ 12 ผลการทดสอบแรงดึง และสมบัติทางกลของวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 แสดงดังรูปที่ 13 และตารางที่ 1 ตามลำดับ

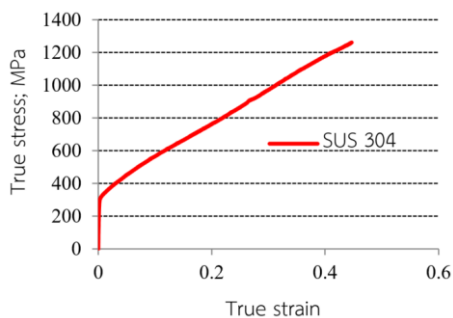
ในงานวิจัยนี้ แบบการจำลองตัดด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้การจำลองแบบ 2 มิติ แสดงดังรูปที่ 14 และมีรายละเอียดของเงื่อนไขในการคำนวณแสดงดังตารางที่ 2



รูปที่ 11 ชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง JIS B13



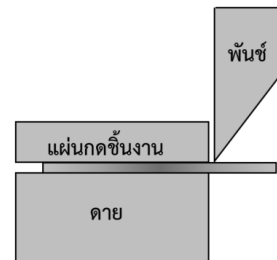
รูปที่ 12 การทดสอบแรงดึงด้วยเครื่อง Universal Testing Machine



รูปที่ 13 ความเค้น-ความเครียดจริงเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304

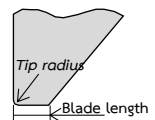
สมบัติทางกลของวัสดุสแตนเลสเกรด JIS; 304	
ความเค้นคราก (MPa)	310
ค่าความแข็งแรงสูงสุด (MPa)	806
ค่าความเค้นจริง; K (MPa)	1650
สัมประสิทธิ์ค่าความเครียดแข็ง; n	0.44
Critical damage value (Cockcroft & Latham)	1.19



รูปที่ 14 แบบจำลองตัดด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ตารางที่ 2 รายละเอียดของการจำลองตัดด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

รายละเอียดการจำลองการตัดด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์	
สมบัติของชิ้นส่วนแม่พิมพ์	ฟันซ์, คาย และแผ่นปลดชิ้นงาน เป็นแบบแข็งเกร็ง (Rigid body)
สมบัติของวัสดุชิ้นงาน	ชิ้นงานเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติก ความหนาชิ้นงาน 2 มิลลิเมตร
รัศมีที่ปลายฟันซ์	0.02 มิลลิเมตร
ระยะตรงของใบมีด (BL)	0.1 มิลลิเมตร
ชนิดของวัสดุชิ้นงาน	สแตนเลส 304
ระยะเคลียร์แรนซ์	2%
จำนวนเอลิเมนต์	5,000
สัมประสิทธิ์ความเสียหาย	ตามการทดสอบ Ball-on-disk

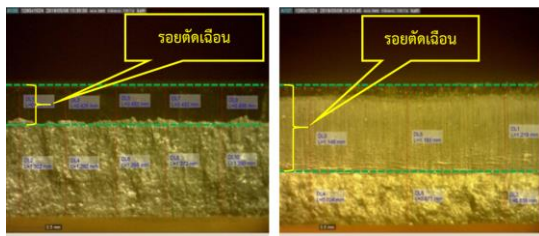


3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการตัดชิ้นงานด้วยการใช้ฟันซ์ที่มีมุมเอียง 45 องศา

รูปที่ 15 แสดงความแตกต่างของขอบตัดชิ้นงาน ที่ผ่านการตัดด้วยฟันซ์ตรงและฟันซ์เอียง จากผลการทดลองพบว่ารอยตัดเฉือนของชิ้นงานที่ผ่านการตัดด้วย

พื้นที่ตรงมีรอยตัดเฉือนเพียงร้อยละ 20 ของความหนาเท่านั้น เมื่อเปลี่ยนมาใช้พื้นที่เฉียง 45 องศา ตัดชิ้นงานพบว่าสามารถวัดรอยตัดเฉือนเฉลี่ยได้ประมาณร้อยละ 55 ของความหนา จากผลดังกล่าว ในส่วนของการทดลองการสึกหรอและการเคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งนี้ จึงขอเสนอผลเฉพาะพื้นที่เฉียง 45 องศาเท่านั้น สำหรับสาเหตุที่รอยตัดเฉือนยาวมากขึ้นเมื่อใช้พื้นที่เฉียงนั้นจะได้อธิบายด้วยวิธีการ FE-simulation ในลำดับต่อไป



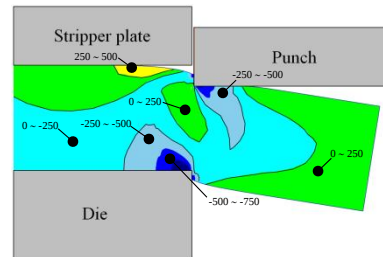
(ก) รอยตัดพื้นที่ตรง (ข) รอยตัดพื้นที่เฉียง 45 องศา

รูปที่ 15 ขอบตัดที่ผ่านการตัดด้วยพื้นที่ตรงและพื้นที่เฉียง 45 องศา ที่เคลือบแรนซ์ร้อยละ 2

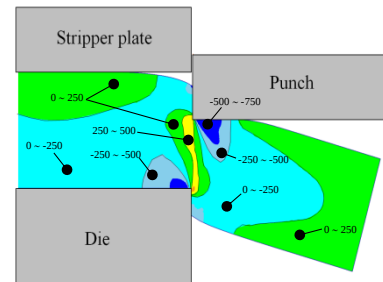
3.2 ผลการวิเคราะห์รอยตัดเฉือนด้วย FE-Simulation

จากการที่รอยตัดเฉือนยาวขึ้นนั้นสามารถอธิบายได้ด้วย FE-simulation ในหัวข้อนี้จึงอธิบายถึงสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงขอบตัด เมื่อตัดด้วยพื้นที่ตรงและพื้นที่เฉียง 45 องศา ในรูปที่ 16 (ก) – (ค) แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนชิ้นงานเมื่อใช้พื้นที่ตรงตัดชิ้นงานที่ระยะความลึกต่างกันคือ ร้อยละ 20, 40 และ 60 ของความหนาชิ้นงาน ผลการตรวจสอบที่ระยะความลึกร้อยละ 20 ดังรูปที่ 16 (ก) พบว่าได้คมตัดของพื้นที่และเนื้อคมตัดของตาย พบความเค้นอัด -250 ~ -500 เมกะปาสกาล และบริเวณกลางชิ้นงานพบการกระจายตัวของความเค้นดึงที่มีค่าประมาณ 250 เมกะปาสกาล และเมื่อพื้นที่ตัดชิ้นงานลึกลงไปเรื่อย ๆ ถึงระดับร้อยละ 40 ของความหนา ความเค้นดึงสูงขึ้นที่

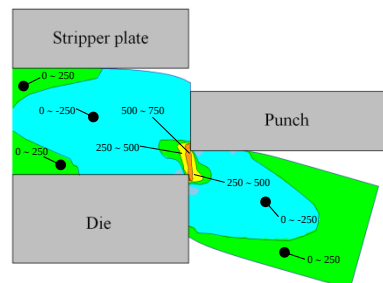
ระดับ 250 ~ 500 เมกะปาสกาล เกิดขึ้นในบริเวณกว้างจากใต้คมตัดพื้นที่บรรจบไปถึงเนื้อคมตัดตาย ดังรูปที่ 16 (ข) จนกระทั่งที่ระยะกตร้อยละ 60 ความเค้นดึงเพิ่มสูงขึ้นจนถึงระดับ 500 ~ 750 เมกะปาสกาล ทำให้ชิ้นงานขาดออกจากกัน ดังรูปที่ 16 (ค)



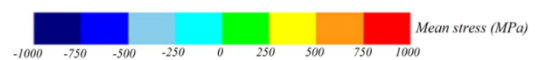
(ก) ระยะกตร้อยละ 20



(ข) ระยะกตร้อยละ 40



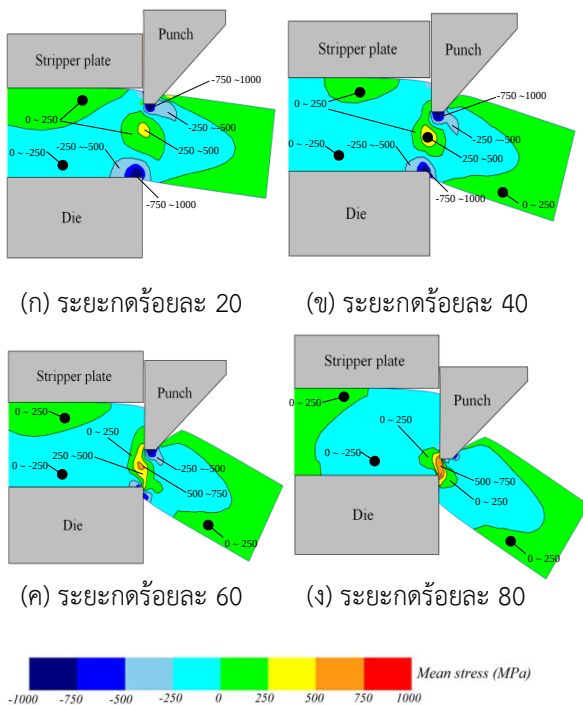
(ค) ระยะกตร้อยละ 60



รูปที่ 16 การกระจายตัวของความเค้นเมื่อใช้ตัดชิ้นงานด้วยพื้นที่ตรงที่เคลือบแรนซ์ร้อยละ 2

ในกรณีตัดชิ้นงานด้วยพื้นที่เฉียง 45 องศา รูปที่ 17 (ก)-(ง) ที่ระยะกตร้อยละ 20 พบว่าได้คมตัดของพื้นที่และเนื้อคมตัดของตาย มีความเค้นอัดที่ระดับ

-250 ~ -500 เมกะปาสกาล กระจายตัวในบริเวณที่ไม่กว้างนักและความเค้นดิ่งที่ระดับ 250 ~ 500 เมกะปาสกาล เกิดขึ้นในบริเวณกึ่งกลางชิ้นงาน ดังรูปที่ 17 (ก) เมื่อเพิ่มระยะกดลึกที่ร้อยละ 40 ของความหนา พบว่าความเค้นอัดที่ระดับ -250 ~ -500 เมกะปาสกาล ยังคงเกิดขึ้นที่ได้คมตัดของพินซ์และเหนือคมตัดของดาวย และความเค้นดิ่งที่ระดับ 250 ~ 500 เมกะปาสกาล เกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางชิ้นงานไม่เปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 17 (ข)



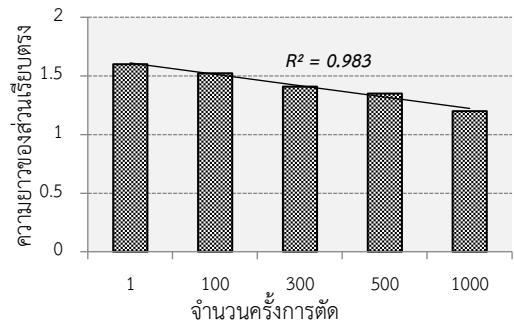
รูปที่ 17 การกระจายตัวของความเค้นเมื่อตัดด้วยพินซ์
เอียง 45 องศา ที่เคลียร์แรนซ์ร้อยละ 2

จากนั้นที่ระยะกดลึกร้อยละ 60 ความเค้นดิ่งเพิ่มขึ้นที่ระดับ 500 ~ 750 เมกะปาสกาล แต่ยังอยู่บริเวณกึ่งกลางชิ้นงานและเมื่อกดลึกจนถึงระยะร้อยละ 80 ดังรูปที่ 17 (ง) ความเค้นดิ่งที่ระดับ 500 ~ 750 เมกะปาสกาล เชื่อมต่อจากฝั่งพินซ์ไปยังฝั่งดาวยทำให้ชิ้นงานขาดออกจากกัน เมื่อเปรียบเทียบกับ การตัดด้วยพินซ์ตรงแล้วสังเกตได้ว่า การเชื่อมต่อกันของความเค้น

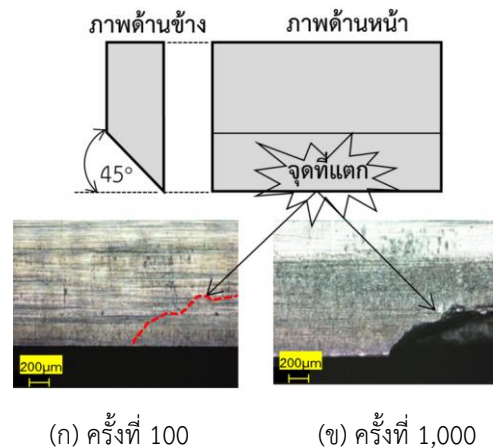
ดิ่งนั้นจะเกิดขึ้นในระยะกดลึกร้อยละ 60 แต่เมื่อใช้พินซ์เอียง 45 องศา ต้องกดลึกถึงระดับร้อยละ 80 ความเค้นดิ่งจึงเกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างฝั่งพินซ์และดาวย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้รอยตัดเฉือนของการตัดชิ้นงานด้วยพินซ์เอียง 45 องศา ยาวกว่าการตัดด้วยพินซ์ตรง

3.3 การสึกหรอที่เกิดขึ้นบนคมตัดพินซ์

การสึกหรอที่เกิดขึ้นบนพินซ์เอียง 45 องศา ภายหลังการตัดชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 หนา 2 มิลลิเมตร ที่ระยะเคลียร์แรนซ์ร้อยละ 2 ในกรณีที่ไม่มีการเคลือบผิว สามารถสังเกตการสึกหรอได้จากการวัดรอยตัดเฉือนที่ชิ้นงาน ข้อมูลของการเปลี่ยนแปลงของรอยตัดเฉือนแสดงดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 การเปลี่ยนแปลงของรอยตัดเฉือนของชิ้นงาน
ที่ตัดด้วยพินซ์เอียง 45 องศา ที่เคลียร์แรนซ์ร้อยละ 2



(ก) ครั้งที่ 100

(ข) ครั้งที่ 1,000

รูปที่ 19 ความเสียหายของพินซ์เอียง 45 องศาที่เกิดขึ้น
บริเวณคมตัดที่เคลียร์แรนซ์ร้อยละ 2

จากรูปที่ 18 พบว่า เมื่อทำการตัดชิ้นงานมากขึ้น ส่วนเรียบตรงจะลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งการตัดครั้งที่ 1,000 พบว่า คมตัดของพันธ์เกิดการแตกหักเสียหายไม่สามารถใช้งานต่อไปได้ ดังรูปที่ 19 การแตกหักเสียหายของพันธ์นั้นเกิดขึ้นในลักษณะการแตกหักเฉพาะบริเวณ (Chipping) ที่คมตัด เนื่องจากเป็นมุมแหลม พันธุ์รับแรงน้อยและเป็นจุดที่อ่อนแอที่สุด

การตัดชิ้นงานด้วยพันธ์เอียง 45 องศา ทำให้รอยตัดเฉือนของชิ้นงานยาวกว่าพันธ์ตรง แต่การใช้พันธ์เอียงที่มีมุมแหลมกลับพบอุปสรรคในด้านของอายุการใช้งานที่สั้นมาก

3.4 การใช้ฟิล์มแข็งเคลือบผิวเพื่อยืดอายุการใช้งานพันธ์

จากผลการทดลองในหัวข้อก่อนหน้าได้กล่าวถึงความสำเร็จในการตัดชิ้นงานความเที่ยงตรงสูงด้วยพันธ์เอียง 45 องศา แต่อายุของพันธ์นั้นค่อนข้างสั้นเนื่องจากชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 มีความแข็งแรงสูงและมีความหนาถึง 2 มิลลิเมตร อีกทั้งชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 มีส่วนผสมของโครเมียมสูงถึงร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก ซึ่งทำให้เกิดปัญหาการเกาะติด (Adhesion) เนื่องจากสมบัติเข้ากันได้ทางเคมี (Compatibility) [12] ของเหล็กเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD11(พันธ์) ซึ่งมีปริมาณโครเมียมสูงเช่นกัน เมื่อโลหะที่มีธาตุโครเมียมสูงทั้งคู่สัมผัสกันทำให้เกิดการเหนียวแน่นขึ้นที่พื้นผิวนำไปสู่การสึกหรออย่างรุนแรงในที่สุด ดังนั้นการเคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งจึงเป็นทางออกในการแก้ไขปัญหานี้ได้และสามารถยืดอายุพันธ์ได้อีกด้วย

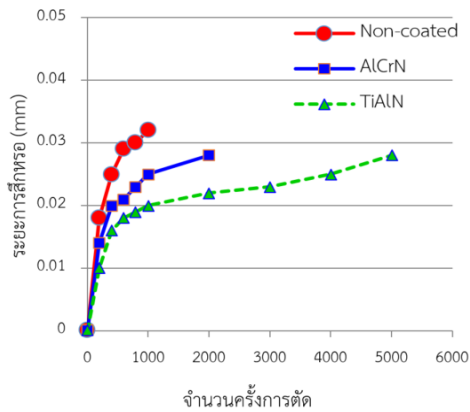
งานวิจัยนี้เลือกใช้สารเคลือบสองชนิด คือ อลูมิเนียมโครเมียมไนไตรด์ (AlCrN) และไททาเนียมไนไตรด์ (TiAlN) บนพื้นฐานของกรรมวิธีเคลือบผิวแบบ PVD ลงบนพันธ์ เนื่องจากคมตัดของพันธ์มีความเอียงและปลายแหลม ทำให้การเคลือบผิวแบบ PVD ซึ่งใช้อุณหภูมิต่ำกว่าแบบ CVD สามารถ

ป้องกันการบดงอและแตกร้าวในขณะที่ทำการเคลือบผิว นอกจากนี้ฟิล์มทั้งสองชนิดนี้นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตแม่พิมพ์อีกด้วย เพื่อยืนยันถึงประสิทธิภาพของฟิล์มแข็งเคลือบผิวแม่พิมพ์นั้น ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองการตัดขอบคือเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ตามมาตรฐาน JIS ความหนา 2 มิลลิเมตร เคลือบเรซินร้อยละ 2 ของความหนา ผลการทดลองในรูปที่ 20 แสดงระยะการสึกหรอที่เกิดขึ้นกับพันธ์เอียง 45 องศา หลังผ่านการตัดชิ้นงานในปริมาณที่แตกต่างกัน จากการตรวจสอบพบว่าการสึกหรอของพันธ์เอียง 45 องศา (เคลือบผิวและไม่เคลือบผิว) ในช่วงแรก (ชิ้นที่ 1-500) การสึกหรอที่เกิดขึ้นที่พันธ์เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งถึงการตัดในครั้งที่ 1,000 พันธุ์ที่ถูกเคลือบผิวเริ่มมีอัตราการสึกหรอที่ช้าลงจนมีแนวโน้มเกือบที่จะคงที่ เนื่องจากการที่ระยะช่องว่างแม่พิมพ์แต่ละตัวถูกขยายใหญ่ขึ้นและคมตัดเกิดการเปลี่ยนรูปร่างเป็นระฆัง พันธุ์ที่เคลือบด้วยสาร TiAlN สามารถตัดชิ้นงานได้ถึง 5,000 ครั้ง รองลงมาคือ พันธุ์ที่เคลือบด้วย AlCrN ตัดชิ้นงานได้ถึง 2,000 ครั้ง ในขณะที่พันธ์ที่ไม่ได้เคลือบผิวเกิดการแตกหักเสียหายขึ้นในการตัดครั้งที่ 1,000 ทำให้ไม่สามารถทดลองตัดชิ้นงานต่อไปได้ จากผลดังกล่าวจึงสรุปประสิทธิภาพของฟิล์มแข็งเคลือบผิวได้ดังนี้

- พันธุ์เอียง 45 องศา เคลือบผิวด้วย AlCrN ความหนาเป็น 2 เท่าของพันธ์ไม่เคลือบผิว
- พันธุ์เอียง 45 องศา เคลือบผิวด้วย TiAlN ความหนาเป็น 5 เท่าของพันธ์ไม่เคลือบผิว

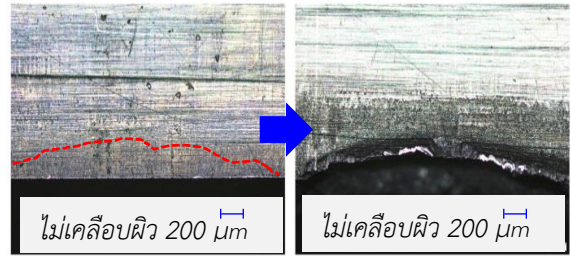
จากผลการสึกหรอในรูปที่ 21 พบว่าการเคลือบผิวสามารถยืดอายุพันธ์ได้เป็นอย่างดี เนื่องจากมีความแข็งที่ผิวสูงมากดังค่าความแข็ง (ตรวจสอบจากบริษัทผู้ผลิตด้วย HV Hardness Tester) ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 22 เมื่อความแข็งมากขึ้นส่งผลให้อายุการใช้งานพันธ์เอียง 45 องศา ยาวนานขึ้นอย่างชัดเจน อิทธิพลของความแข็งนั้นสัมพันธ์กับปริมาณการสึกหรอที่เกิดขึ้น โดยสามารถสรุปได้ดังนี้ พันธุ์ที่เคลือบผิวด้วย TiAlN มี

ความทนทานมากที่สุด รองลงมาคือ พันซ์ที่เคลือบผิวด้วย AlCrN และ พันซ์ที่ไม่ได้เคลือบผิว เป็นอันดับสุดท้าย



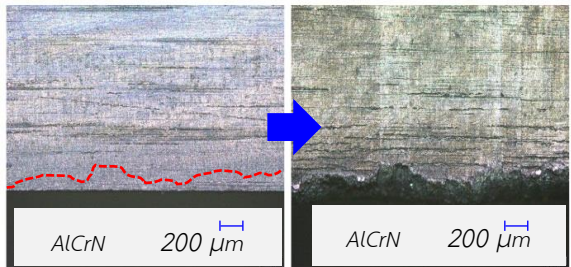
รูปที่ 20 ระยะการสึกหรอบนพันธ์เอียง 45 องศา ที่เคลือบแรนซ์ร้อยละ 2

ในรูปที่ 23 (ก) – (จ) แสดงการเปลี่ยนแปลงของส่วนเรียบตรงของชิ้นงานที่ตัดด้วยพันธ์เอียง 45 องศา เคลือบผิวด้วยฟิล์มเคลือบต่างชนิดกัน ทำการบันทึกในครั้งแรกของการตัดและครั้งสุดท้ายเมื่อพันธ์ไม่สามารถตัดชิ้นงานได้อีกต่อไป ในการตัดครั้งแรกของทุกพันธ์พบรอยตัดเฉือนยาวใกล้เคียงกันดังรูป 23 (ก), (ค) และ (จ) เมื่อพิจารณาถึงชิ้นงานในการตัดครั้งสุดท้ายของแต่ละเงื่อนไข พบว่าพันธ์เอียง 45 องศา ที่ไม่ได้เคลือบผิวมีรอยตัดเฉือนลดลงอย่างมากและความกว้างของการฉีกขาด (x) เพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 23 (ข) ในขณะที่พันธ์ที่เคลือบผิวด้วย AlCrN และ TiAlN ความกว้างของการฉีกขาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังรูปที่ 23 (ง) และ (ฉ) จากการสังเกตความเปลี่ยนแปลงของรอยตัดเฉือนพบว่าเมื่อตัดชิ้นงานเพิ่มขึ้น ความยาวของรอยตัดเฉือนจะลดลงเรื่อยๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วเนื่องจากพันธ์สึกหรอ จากรูปแม้ว่าการใช้พันธ์เอียง 45 องศา เคลือบผิวด้วย TiAlN จะแตกหักเสียหายที่ระยะการตัดชิ้นงาน 5,000 ชิ้น ชิ้นงานที่ได้จากการตัดก็ยังมีส่วนเรียบตรงที่สามารถยอมรับได้ (รอยตัดเฉือนประมาณร้อยละ 35 ของความหนา 2 มิลลิเมตร)



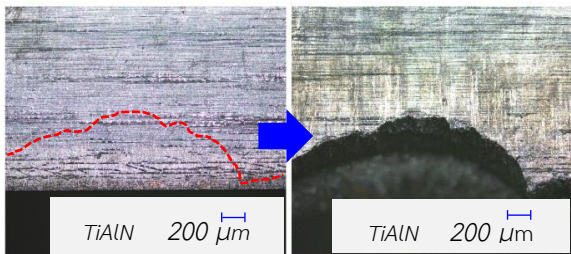
(ก) ตัดครั้งที่ 100

(ข) ตัดครั้งที่ 1,000



(ค) ตัดครั้งที่ 100

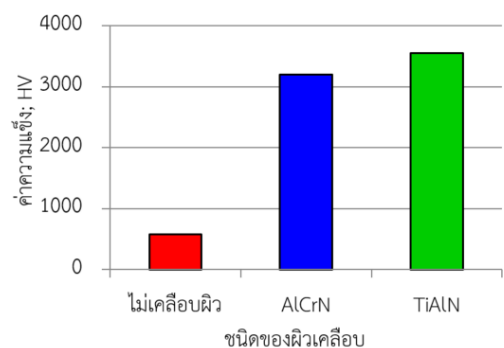
(ง) ตัดครั้งที่ 2,000



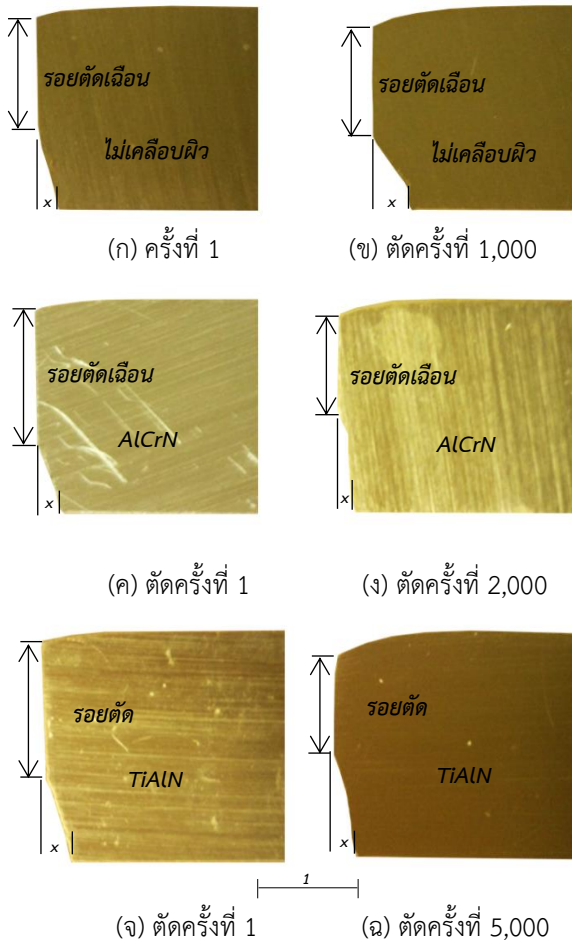
(จ) ตัดครั้งที่ 100

(ฉ) ตัดครั้งที่ 5,000

รูปที่ 21 การสึกหรอที่เกิดขึ้นกับพันธ์เอียง 45 องศา เคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งต่างชนิดกันที่เคลือบแรนซ์ร้อยละ 2



รูปที่ 22 ความแข็งของพันธ์เอียง 45 องศา แบบไม่เคลือบผิวและเคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็ง



รูปที่ 23 การเปลี่ยนแปลงของขอบตัดชิ้นงานที่ตัดจาก
พังก์เอียง 45 องศา เคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งต่างชนิดกัน

4. สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการยืดอายุการใช้งานของ
พังก์ในกระบวนการตัดขอบ ซึ่งเป็นกระบวนการเก็บผิว
ในขั้นตอนสุดท้ายของการผลิต ประเด็นหลักของการ
วิจัยในงานนี้คือ การเคลือบผิวของพังก์ให้แข็ง เพื่อเพิ่ม
อายุการใช้งานของพังก์ให้ยาวนานขึ้น หลักการ
ดำเนินงานในการทดลองนั้น จะนำพังก์ที่ไม่ผ่านการ
เคลือบผิวและเคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งมาทดลองในการ
ตัดเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ที่เหมือนกัน หลังการ
ทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

- ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานไม่ส่งผลต่อการ
ด้านทานการสึกหรอของผิวเคลือบเนื่องจากลักษณะ
ของการตัดขอบคือการกระแทกและการเสียดสี
รุนแรง
- ความแข็งของผิวเคลือบส่งผลต่อการด้านทานการ
สึกหรอในกระบวนการตัดขอบได้อย่างชัดเจน
- การสึกหรอที่พบในงานวิจัยนี้มีลักษณะการแตก
เฉพาะบริเวณ (Chipping) เนื่องจากการกระแทกที่
รุนแรง
- พังก์เอียง 45 องศา ไม่เคลือบผิวตัดชิ้นงาน
เที่ยงตรงสูงได้ 1,000 ชิ้น
- พังก์เอียง 45 องศา เคลือบผิว AlCrN สามารถ
ตัดชิ้นงานความเที่ยงตรงสูงได้ถึง 2,000 ชิ้น
- พังก์เอียง 45 องศา เคลือบผิว TiAlN มีความ
ทนทานที่สุดสามารถตัดชิ้นงานความเที่ยงตรงสูงได้
ถึง 5,000 ชิ้น
- การตัดด้วยพังก์ตรงพบว่ารอยตัดเฉือนของชิ้นงาน
มีเพียงร้อยละ 20 ของความหนา 2 มิลลิเมตร
- การตัดด้วยพังก์เอียง 45 องศา พบว่าส่วนเรียบ
ตรงของชิ้นงานเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 55 ของ
ความหนา 2 มิลลิเมตร

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
รัตนโกสินทร์ รวมทั้งภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าธนบุรี ที่ให้การสนับสนุนซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์
(Finite Element Software)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] G. Fang, P. Zeng and L. Lou, "Finite element
simulation of the effect of clearance on the
forming quality in the blanking process,"

- Journal of Materials Processing Technology*, vol. 122, no. 2-3, pp. 249-254, Mar. 2002.
- [2] M. Sasada, H. Kobayashi and I. Aoki, "Study on piercing mechanism of small holes," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 177, pp. 649-652, Jul. 2006.
- [3] S. Thipprakmas, M. Jin, K. Tomokazu, Y. Katsuhiro and M. Murakawa, "Prediction of Fineblanked surface characteristics using the finite element method (FEM)," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 198, pp. 391-398, Mar. 2008.
- [4] M. Farzin, H. R. Javani, M. Mashayekhi and R. Hambli, "Analysis of blanking process using various damage criteria," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 177, no. 1, pp. 287-290, Jul. 2006.
- [5] K. Mori, Y. Abe, Y. Kidoma and P. Kadarno, "Slight clearance punching of ultra-high strength steel sheets using punch having small round edge," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 65, pp. 41-46, Feb. 2013.
- [6] P. Chumrum, N. Koga and V. Premanond, "Experimental investigation of energy and punch wear in piercing of advanced high-strength steel sheet," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 79, no. 5, Jul. 2015.
- [7] L. Komgrit and L. Pongsakorn, "FE Simulations and Experimental Analysis of the Blade Angle Effect on Sheared Surface in Trimming Process of Advanced High-Strength Steel Sheet," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 44, Jun. 2019.
- [8] S.-H. Song and W. Choi, "FEM investigation on thermal effects on force in high-speed blanking of mild steel," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 17, pp. 631-635, May 2016.
- [9] P. Pesch, S. Sattel, S. Woestmann, P. Masarczyk, K. Herden, T. Stucky, A. Martense, S. Ulriche and H. Hollecke, "Performance of hard coated steel tools for steel sheet drawing," *Surface and Coatings Technology*, vol. 163-164, pp. 739-746, Jan. 2003.
- [10] K. Lawanwong, B. Sresomroeng and V. Premanond, "The study type of hard film coating and strength of materials to wear volume by Ball-on-disk technique," *Engineering Journal of Research and Development*, vol. 20, no. 4, pp. 84-91, Oct. 2009.
- [11] Ö. N. Cora, A. AğCayazi, K. Namiki, H. Sofuoğlu and M. Koç, "Die wear in stamping of advanced high strength steels – Investigations on the effects of substrate material and hard-coatings," *Tribology International*, vol. 52, pp. 50-60, Apr. 2012.
- [12] J. A. Schey, *Tribology in Metalworking: Friction, Lubrication, and Wear*, 2nd ed. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1984.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

สมบัติทางวิศวกรรมของบล็อกปูพื้นคอนกรีตพรุนจากผิวทางแอสฟัลต์ นำมาใช้ใหม่โดยการแทนที่มวลรวมหยาบ

เฉลิมพล ไชยแก้ว¹ และ กฤษดา เสือเอี่ยม^{2*}

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

¹ ถนนเพชรเกษม ตำบลหนองแก อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ 10710

² 1381 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

รับบทความ 20 พฤศจิกายน 2563 แก้ไขบทความ 7 มิถุนายน 2564 ตอรับบทความ 7 กรกฎาคม 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำหินที่ได้จากการรื้อผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าและนำกลับมาใช้ใหม่ในงานบล็อกปูพื้นคอนกรีตพรุน โดยทำการย่อยและแยกขนาดหินด้วยการร่อนผ่านตะแกรงขนาดมาตรฐาน โดยเลือกใช้ขนาดหินที่ผ่านตะแกรงขนาด 1/2 นิ้ว และค้างบนตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว กับหินที่ผ่านตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว และค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 นำมาผสมรวมกันในสัดส่วนร้อยละ 50 : 50 เพื่อแทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ โดยกำหนดปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 18 และ 20 โดยน้ำหนักหิน รวมถึงอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 และ 0.35 ตามลำดับ ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด กำลังดัดและอัตราการซึมผ่านน้ำ ผลการศึกษาพบว่าปริมาณซีเมนต์เพสต์และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มีอิทธิพลต่อสมบัติด้านกำลังและอัตราการซึมผ่านน้ำของบล็อกปูพื้นคอนกรีตพรุน โดยบล็อกปูพื้นคอนกรีตพรุนที่ผสมรวมปริมาณปูนซีเมนต์สูงกว่า (ร้อยละ 20) จะมีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 16-24 เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณปูนซีเมนต์ต่ำกว่า (ร้อยละ 18) ในทางกลับกันอัตราการซึมผ่านน้ำลดลงร้อยละ 5.1-8.1

คำสำคัญ : บล็อกปูพื้น; คอนกรีตพรุน; ผิวทางแอสฟัลต์นำมาใช้ใหม่; การซึมผ่านน้ำ; มวลรวมหยาบ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 9985 5852, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: gritsada.s@rmutp.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Engineering Properties of Porous Concrete Paving Blocks from Recycled Asphalt Pavement as Coarse Aggregate Replacement

Chalermphol Chaikaew¹ and Gritsada Sua-iam^{2*}

¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin

² Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

¹ Phetchakaseam Road Nhong-kea, Hua-Hin, Prachuapkhirikhan 77110

² 1381 Pracharat 1 Road, Wong Sawang, Bang Sue, Bangkok 10800

Received 20 November 2020; Revised 7 June 2021; Accepted 7 July 2021

Abstract

This research aimed to study the use of coarse aggregate obtained from removing old recycled asphalt pavement (RAP) in the production of the porous concrete paving block. Crushing and size separation of the coarse aggregate by using standard sieve size by selected the gradation size of the coarse aggregate that passed to sieve size 1/2" and retained on sieve size 3/8" and other that passed to sieve size 3/8" and retained on sieve size No.4 by mixing ratio 50 : 50 of the mass as replaced natural coarse aggregate. Portland cement quantity about 18% and 20% by weight of the aggregate. The water to cement ratio was 0.30 and 0.35 respectively. Compressive strength, flexural strength, and water permeability were investigated. The results showed that the cement content and water to cement ratio was influenced the strength properties and water permeability rate of the porous concrete paving block. The porous concrete paving block mixed with higher cement content (20%) had the compressive strength at the age of 28 days increased by 16-24% when compared with lower cement content (18%). On the other hand, the water permeability rate decreased by 5.1-8.1%.

Keywords : Paving Blocks; Porous Concrete; Recycle Asphalt Pavement; Water Permeability; Coarse Aggregate

** Corresponding Author. Tel.: +668 9985 5852, E-mail Address: gritsada.s@rmutp.ac.th*

1. บทนำ

การเติบโตทางเศรษฐกิจอย่างรวดเร็วในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมาทำให้พื้นที่ในเมืองรอง (Sub-urban) หลายแห่งกลายเป็นเมืองที่พลุกพล่าน ซึ่งเกิดจากผลกระทบของการขยายตัวของเมืองที่ไม่สามารถคาดเดาได้ ควบคู่ไปกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก และปริมาณของจำนวนถนนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวซบน้ำที่ลดลง ส่งผลให้มีปริมาณน้ำที่ไหลบ่าและน้ำท่วมฉับพลันเพิ่มขึ้นบนพื้นผิวทางมากขึ้น โดยปริมาณน้ำที่ท่วมขังและไหลบ่าในปริมาณที่มากนี้ส่งผลกระทบต่อทั้งผู้ใช้รถและคนเดินถนน สร้างความเสียหายให้แก่ชีวิตและทรัพย์สิน รวมทั้งความไม่สะดวกในการดำรงชีวิต [1], [2] จากปัญหาดังกล่าวนำไปสู่แนวความคิดการทำให้ คอนกรีตพรุน (Porous Concrete) ซึ่งเป็นคอนกรีตรูปแบบหนึ่งที่มีคุณสมบัติพิเศษโดยต้องการให้ภายในมีโพรงหรือความพรุนอย่างต่อเนื่อง ยอมให้น้ำซึมผ่านได้สูงเมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติซึ่งถูกคิดค้นและพัฒนาในประเทศอังกฤษและสหรัฐอเมริกามากกว่า 30 ปี [3] ถือได้ว่าเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับใช้ในงานผิวทางหรือทางเท้าที่น้ำซึมได้ ทั้งยังช่วยในการดูดซับเสียงและเป็นฉนวนกันความร้อนบนผิวทาง รวมถึงยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานทางวิศวกรรมโยธาและสถาปัตยกรรมได้อีกด้วย โดยทั่วไปขนาดของช่องว่างหรือรูพรุนที่เชื่อมต่อกันในคอนกรีตมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง 2 ถึง 8 มิลลิเมตร มีปริมาตรโพรงช่องว่างโดยประมาณร้อยละ 15 ถึง 35 และมีกำลังรับแรงอัดอยู่ระหว่าง 2.8 ถึง 28.0 เมกะปาสคาล [4]

บล็อกปูพื้น คอนกรีต (Paving Concrete Blocks) เป็นหนึ่งในรูปแบบการนำแนวคิดคอนกรีตพรุนเข้ามาประยุกต์ใช้ เนื่องจากทางเดินเท้าที่สร้างจากกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นโดยทั่วไปส่วนใหญ่ มักจะมีลักษณะที่บ้นน้ำสูง น้ำจึงไม่สามารถซึมผ่านไปสู่ชั้นดินได้ ก่อให้เกิดปัญหาน้ำท่วมขังบนพื้นผิวทางเดินเท้า ส่งผล

ต่ออุปสรรคการใช้ทางเดินเท้าและอันตรายจากการลื่นล้มได้ง่าย ทั้งนี้ในปัจจุบันบล็อกปูพื้นคอนกรีตอาจมีทั้งรูปแบบที่บ้นและแบบมีช่องเปิด ถึงแม้ว่าบล็อกปูพื้นคอนกรีตแบบมีช่องเปิดจะมีความสามารถในการระบายน้ำได้ดีแต่ความแตกต่างของเนื้อวัสดุบล็อกปูพื้นคอนกรีตทั้งสองชนิดซึ่งได้แก่คอนกรีตและดินที่อยู่ในช่องเปิด ส่งผลให้พื้นผิวไม่เรียบเป็นอุปสรรคต่อการเดินเท้าและการวิ่ง เป็นต้น [5] งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับบล็อกปูพื้นคอนกรีตพบว่าเมื่อใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่สูงขึ้นจะมีความสามารถในการอัดขึ้นรูปบล็อกปูพื้นคอนกรีตได้ดี [5] หรือศึกษาอิทธิพลจากขนาดของมวลรวมหยาบที่แตกต่างกันพบว่ามวลรวมหยาบที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีกำลังอัดที่สูงกว่า ในทางกลับกันการต้านทานต่อการสั่นไถลของผิวหน้าลดลง [6] ในขณะที่มวลรวมหยาบที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมีอัตราการซึมผ่านน้ำที่สูงกว่า [1]

ปัจจุบันแนวโน้มการนำวัสดุในกระบวนการก่อสร้างกลับมาใช้ใหม่ถือได้ว่าเป็นแนวคิดในการรักษาสีสิ่งแวดล้อมจากกระบวนการผลิตวัสดุใหม่และลดการทำลายทรัพยากรธรรมชาติ ผิวทางแอสฟัลต์เก่าเมื่อถูกรื้อออกเนื่องจากการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งานและมักถูกนำไปกองไว้เป็นขยะของเสียที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี เนื่องจากถนนที่อยู่ในความรับผิดชอบของกรมทางหลวงซึ่งเป็นสายทางหลักมากกว่าร้อยละ 90 เป็นถนนผิวทางลาดยาง [7] ดังนั้นแนวคิดในการนำมวลรวมซึ่งยังคงอยู่ในสภาพที่ดีอยู่กลับมาใช้ใหม่หรือที่เรียกว่า “ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิล (Recycled Asphalt Pavement, RAP)” มาใช้ในงานคอนกรีตเริ่มมีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย [8] โดยยังสามารถนำมาเป็นวัสดุทดแทนมวลรวมหยาบในงานบล็อกปูพื้นคอนกรีตทางเดินได้อีกด้วย [9] ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ในการนำเอาผิวทางแอสฟัลต์เก่ากลับมาใช้ใหม่ในการทดแทนมวลรวมหยาบสำหรับประยุกต์ใช้ในการผลิตบล็อกปูพื้นในรูปแบบ

คอนกรีตพูน เพื่อศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมและอัตราการซึมผ่านน้ำจากการนำแอสฟัลต์เก่ามาใช้แทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

2.1.1 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement) ตามมาตรฐาน มอก. 15 หรือ ASTM C150

2.1.2 หินจากการรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์ (Recycled Asphalt Pavement) แก่กลับมาใช้ใหม่ โดยการรื้อทิ้งผิวทางที่เสื่อมสภาพเนื่องจากอายุการใช้งานที่ยาวนานมากกว่า 20 ปี ในความรับผิดชอบของแขวงทางหลวงประจำบริเวณที่แสดงในรูปที่ 1 มีปริมาณยางแอสฟัลต์ร้อยละ 4.85 โดยน้ำหนักของผิวทางแอสฟัลต์



รูปที่ 1 หินจากรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์เก่า

ตารางที่ 1 สมบัติของหินจากการรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์เก่ากลับมาใช้ใหม่

สมบัติที่ทดสอบ	ค่าเฉลี่ย
ความถ่วงจำเพาะรวม	2.54
หน่วยน้ำหนักแห้ง (kg/m^3)	1,608
การดูดซึมน้ำ (%)	0.91
โมดูลัสความละเอียด	5.94
การต้านทานการสึกกร่อน (%)	27.8
ปริมาณยางแอสฟัลต์ (%)	4.85

จากนั้นทำการบดย่อยผิวทางแอสฟัลต์เก่าและแยกขนาดหินโดยการร่อนผ่านตะแกรงขนาดมาตรฐาน โดยแบ่งเป็น 2 ขนาดได้แก่ ขนาดที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 1/2 นิ้ว ค้างบนตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว และขนาดที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 ซึ่งเป็นขนาดส่วนใหญ่ที่ใช้บนผิวทางแอสฟัลต์เก่าที่ทำการศึกษา เป็นการแยกมวลรวมขนาดเดียวเพื่อเตรียมสำหรับการผลิตคอนกรีตพูน ซึ่งหินหรือมวลรวมหยาบที่ได้จัดเตรียมจากการร่อนผ่านตะแกรง ทำการล้างน้ำก่อนทำการผสมและทุกการผสมจะอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry) ซึ่งเป็นการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต และเนื่องจากมีส่วนผสมของยางจากแอสฟัลต์เคลือบบริเวณผิวของหินไว้ทำให้มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำ สมบัติของหินจากการรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์ดังแสดงในตารางที่ 1

2.1.3 น้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตใช้น้ำประปา

2.2 การออกแบบอัตราส่วนผสม

ทำการกำหนดอัตราส่วนผสมของบล็อukupั่นคอนกรีตพูน โดยใช้ปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 18 และ 20 โดยน้ำหนักมวลรวม สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้าที่พบว่าความเป็นไปได้ในการผลิตบล็อukupั่นคอนกรีตพูนโดยใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ในช่วงร้อยละ 18-22 โดยน้ำหนักของมวลรวม [5] มวลรวมหยาบทั้งหมด (ทดแทนการใช้หินจากธรรมชาติ) มาจากการคละกัระหว่างหินจากการรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์เก่าที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 1/2 นิ้ว ค้างบนตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว และที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 ในอัตราส่วนร้อยละ 50 : 50 เนื่องจากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าเมื่อไม่มีส่วนผสมของมวลรวมละเอียด การผสมรวมอัตราส่วนดังกล่าวมวลรวมมีความหนาแน่นมากที่สุดหรือมีปริมาณช่องว่างน้อยที่สุดซึ่งจะส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตให้สูงขึ้น และยังคงสภาพของมวลรวมหยาบที่มีขนาดไม่ต่อเนื่อง (Open Grade) ไว้อีกด้วยซึ่งเป็นข้อกำหนดสำคัญของ

การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตพูน และมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อน้ำปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 และ 0.35 ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของ มอก. 378-2531 ระบุอัตราส่วนน้ำต่อน้ำปูนซีเมนต์ไม่เกิน 0.55 [10] โดยใช้สัญลักษณ์แทนในส่วนผสมเป็น w/c โดย x หมายถึง อัตราส่วนน้ำต่อน้ำปูนซีเมนต์ และ y หมายถึง ร้อยละปริมาณปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมหยาบ อาทิเช่น $w0.30/c18$ หมายถึง ส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อน้ำปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 และปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 18 ต่อน้ำหนักของมวลรวม ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของบล็อukupื้นคอนกรีตพูนที่ใช้ในการศึกษา

สัญลักษณ์	มวลรวม		ปูนซีเมนต์	
	1/2"- 3/8"	3/8"- No.4	ต่อน้ำหนัก มวลรวม	w/c
w0.30/c18	50	50	18	0.30
w0.30/c20	50	50	20	0.30
w0.35/c18	50	50	18	0.35
w0.35/c20	50	50	20	0.35

2.3 กระบวนการทดสอบ

ทำการผสมบล็อukupื้นคอนกรีตพูนตามสัดส่วนที่กำหนด จากนั้นเทลงแบบตัวอย่างทดสอบบรจนแข็งตัว ทำการบ่มน้ำจนถึงอายุทดสอบ ทำการทดสอบสมบัติของคอนกรีตแข็งตัวประกอบไปด้วย

2.3.1 การทดสอบความหนาแน่น

การทดสอบความหนาแน่นแห้งหรือหน่วยน้ำหนักแห้งทำได้โดยการนำตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 เซนติเมตร ที่อายุทดสอบ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 2 มาทำการวัดขนาดจริงหลังจากถอดแบบหล่อพร้อมชั่งน้ำหนักเพื่อทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของคอนกรีตจากอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักที่ได้จากการชั่งต่อปริมาตรในแต่ละของก้อนตัวอย่าง

2.3.2 การทดสอบกำลังอัด

นำตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 เซนติเมตร จำนวน 3 ก้อน ซึ่งทำการบ่มน้ำตลอดอายุการทดสอบกำหนด 3, 7 และ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ก้อนตัวอย่างการทดสอบความหนาแน่นและกำลังอัด

ทำการทดสอบกำลังอัด ตามมาตรฐาน BS-1881 โดยสามารถหาค่ากำลังอัด (CS) ได้จากสมการที่ (1)

$$CS = P/A \quad (1)$$

เมื่อ P คือแรงกดสูงสุดที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบ (นิวตัน) และ A คือพื้นที่หน้าตัดรับแรง (ตารางเมตร)



รูปที่ 3 เครื่องขึ้นรูปบล็อukupื้นคอนกรีต

2.3.3 การทดสอบกำลังดัด

การทดสอบกำลังดัดโดยการขึ้นรูปตัวอย่างบล็อกปูพื้นคอนกรีตพรุนขนาด 40x40x4 เซนติเมตร ด้วยเครื่องขึ้นรูปบล็อกปูพื้นคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 3

จากกระบวนการขึ้นรูปจนได้บล็อกปูพื้นคอนกรีตตามขนาดกำหนด (40x40x4 เซนติเมตร) ดังแสดงในรูปที่ 4 หลังจากคอนกรีตแข็งตัวทำการถอดบล็อกปูพื้นคอนกรีตออกจากแบบ ทำการบ่มน้ำตลอดอายุการทดสอบกำหนด 3, 7 และ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผ่นตัวอย่างการทดสอบกำลังดัด

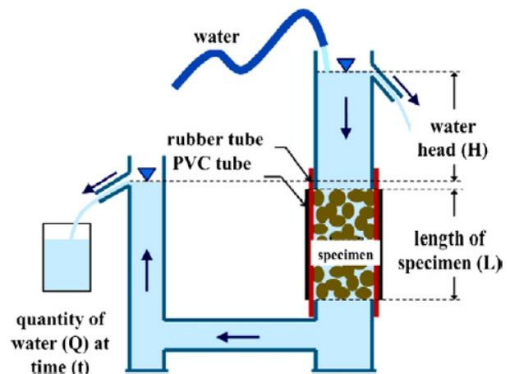
การทดสอบกำลังดัดของบล็อกปูพื้นคอนกรีตพรุนโดยการนำบล็อกปูพื้นคอนกรีตพรุนขึ้นจากน้ำใช้ผ้าซับผิวภายนอกให้แห้ง วางบล็อกปูพื้นคอนกรีตพรุนบนฐานรองรับของเครื่องทดสอบ โดยให้น้ำหนักกระทำที่จุดกึ่งกลางของบล็อกปูพื้นคอนกรีตพรุน การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 378-2531:กระเบื้องคอนกรีตปูพื้น [10] หรือตามมาตรฐาน ASTM 293 โดยสามารถหาค่ากำลังดัด (R) ได้จากสมการที่ (2)

$$R = 3PL/2bd^2 \quad (2)$$

เมื่อ P คือแรงกดสูงสุดที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบ (นิวตัน), L คือความยาวของแผ่นทางเท้า (เมตร), b คือความกว้างของแผ่นทางเท้า (เมตร) และ d คือความหนาของแผ่นทางเท้า (เมตร) ตามลำดับ

2.3.4 การทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำ

การทดสอบหาอัตราการซึมผ่านน้ำในบล็อกปูพื้นคอนกรีตพรุน ซึ่งใช้ชุดทดสอบการซึมผ่านน้ำด้วยท่อพีวีซี ขนาด 4 นิ้ว มีฝาครอบด้านบนและล่างต่อกันด้วยก๊อกร้าขนาด 1/4 นิ้ว และมีความสูงของน้ำวัดจากด้านบนถึงก๊อกร้าด้านล่าง 155 เซนติเมตร ด้วยวิธีความดันคงที่ (Constant Head) โดยจับเวลาเมื่อน้ำซึมผ่านตัวอย่างคอนกรีตพรุน แล้วนำไปคำนวณหาอัตราการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตพรุน ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 เครื่องทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำ [4]

โดยสามารถหาค่าอัตราการซึมผ่านน้ำ (P) ได้จากสมการที่ (3)

$$P = Q/t \quad (3)$$

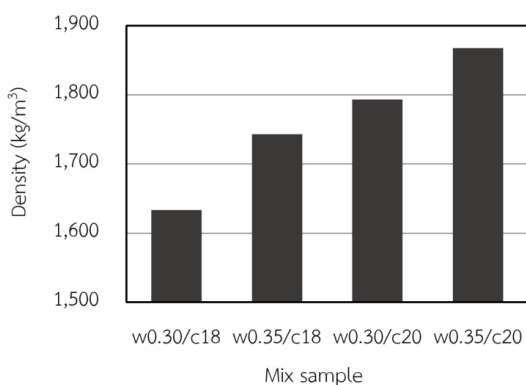
เมื่อ Q คือปริมาตรน้ำที่ซึมผ่าน (ลิตร) และ t คือเวลาที่ใช้ในการซึมผ่านตัวอย่างคอนกรีตพรุน (วินาที) ตามลำดับ

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ความหนาแน่น

ผลการทดสอบความหนาแน่นของบล็อกปูพื้นคอนกรีตพรุนที่ใช้มวลรวมหยาบจากหินที่ได้มาจากการรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์เก่าที่อายุทดสอบ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่า ตัวอย่างบล็อกปูพื้นคอนกรีตพรุน

ที่ใช้มวลรวมหยาบจากหินที่ได้มาจากการรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์เก่าเมื่อผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 18 มีความหนาแน่นเท่ากับ 1,633 และ 1,743 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 และ 0.35 ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 20 ความหนาแน่นเท่ากับ 1,792 และ 1,867 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 และ 0.35 ตามลำดับ



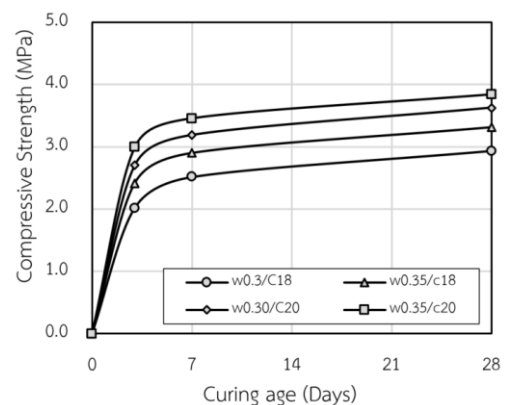
รูปที่ 6 ความหนาแน่นของตัวอย่างทดสอบอายุ 28 วัน

จากผลการทดสอบเห็นได้ว่าความหนาแน่นของบล็อกปูพื้นคอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมหยาบจากหินที่ได้จากการรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์เก่ามีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อผสมรวมปริมาณปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่สูงขึ้นเนื่องจากปริมาณช่องว่างที่ลดลงจากปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่เพิ่มสูง [2], [5], [9] นอกจากนี้ความพูนมีแนวโน้มลดลง ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เพิ่มสูงขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ N. Saboo et al. [9]

3.2 กำลังอัด

ผลการทดสอบกำลังอัดของบล็อกปูพื้นคอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมหยาบจากหินที่ได้มาจากการรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์เก่าที่อายุทดสอบ 3, 7 และ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่า กำลังอัดของตัวอย่างบล็อกปูพื้น

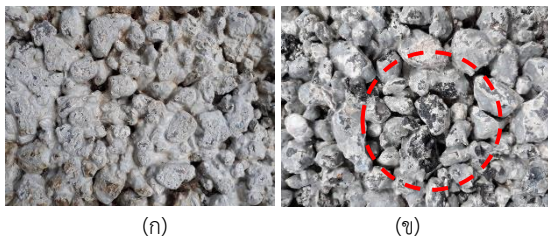
คอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมหยาบจากหินที่ได้มาจากการนำผิวทางแอสฟัลต์เก่ามาใช้ใหม่มีแนวโน้มการพัฒนา กำลังอัดเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น พิจารณาที่อายุ 28 วัน ตัวอย่างบล็อกปูพื้นคอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมหยาบจากหินที่ได้มาจากการรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์เก่าเมื่อผสมรวมปริมาณปูนซีเมนต์อัตราส่วนร้อยละ 18 มีกำลังอัดเท่ากับ 2.9 และ 3.3 เมกะปาสคาล เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 และ 0.35 ตามลำดับ หรือคิดเป็นกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 13.8 ในขณะที่เมื่อผสมรวมปริมาณปูนซีเมนต์อัตราส่วนร้อยละ 20 มีกำลังอัดเท่ากับ 3.6 และ 3.8 เมกะปาสคาล เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 และ 0.35 ตามลำดับ หรือคิดเป็นกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 9.1



รูปที่ 7 การพัฒนากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตพูนที่อายุทดสอบ 3, 7 และ 28 วัน

เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทดสอบในสัดส่วนผสมที่ต่างกันเมื่ออายุ 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ [8] ตัวอย่างส่วนผสมที่ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ต่อน้ำหนักของมวลรวมมีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าตัวอย่างส่วนผสมที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ที่น้อยกว่า (ร้อยละ 18) ทั้งนี้เมื่อปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้บล็อกปูพื้นคอนกรีต

พรมมีสมบัติทางด้านกำลังรับแรงอัดมากขึ้นเนื่องจากซีเมนต์เพสต์ที่ห่อหุ้มมวลรวมมีความหนาเพิ่มขึ้น ทำให้มวลรวมมีการยึดเกาะกันดียิ่งขึ้นส่งผลให้เกิดการเติมเต็มช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ทำให้โพรงมีปริมาณและขนาดลดลง บล๊อคปูพื้นคอนกรีตพรมจึงมีความหนาแน่นมากยิ่งขึ้น [2], [5], [6], [9] ในขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบปริมาณปูนซีเมนต์คงที่ที่บล็อukupื้นคอนกรีตพรมที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่สูงกว่า ($w/c = 0.35$) จะให้ค่ากำลังอัดที่มากกว่าบล็อukupื้นคอนกรีตพรมที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่น้อยกว่า ($w/c = 0.30$) เนื่องจากในส่วนผสมที่มีปริมาณน้ำน้อยส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์มีความหนืดและทำการเคลือบผิวมวลรวมได้ไม่สม่ำเสมอทำให้การยึดเกาะระหว่างซีเมนต์เพสต์และมวลรวมได้ไม่ดี [5], [9] ดังแสดงในรูปที่ 8



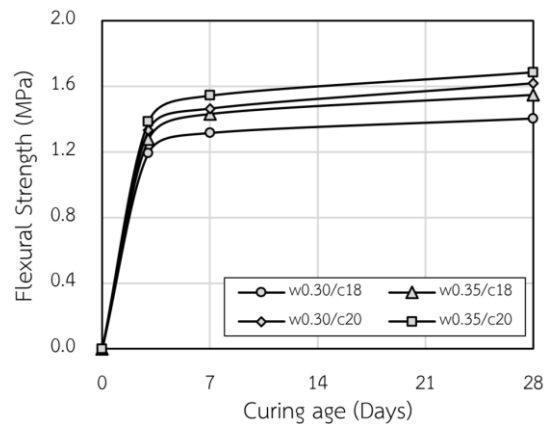
รูปที่ 8 (ก) ซีเมนต์เพสต์ที่ห่อหุ้มมวลรวมได้ทั่วถึง และ (ข) ซีเมนต์เพสต์ที่ห่อหุ้มมวลรวมได้ไม่ดี

3.3 กำลังดัด

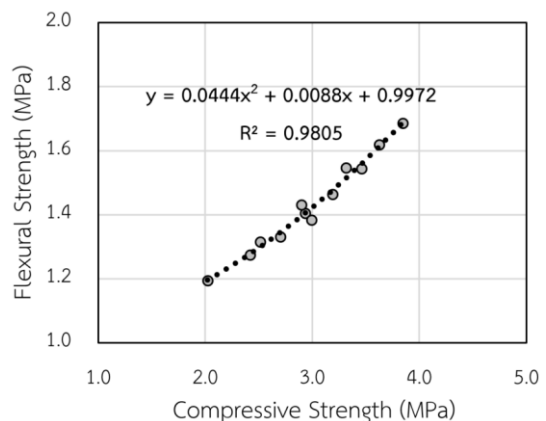
การพัฒนา กำลังดัดของบล็อukupื้นคอนกรีตพรมที่ใช้มวลรวมหยาบจากหินที่ได้มาจากการรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์เก่ามีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น และการพัฒนา กำลังดัดของบล็อukupื้นคอนกรีตพรมมีแนวโน้มไปในแนวทางเดียวกับการพัฒนา กำลังอัด ผลการทดสอบกำลังดัดของบล็อukupื้นคอนกรีตพรมแทนที่มวลรวมหยาบจากหินที่ได้มาจากการรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์เก่าที่อายุทดสอบ 3, 7 และ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 9

พิจารณาผลการทดสอบกำลังดัดที่อายุ 28 วัน พบว่า ตัวอย่างบล็อukupื้นคอนกรีตพรมที่ใช้มวลรวม

หยาบจากหินที่ได้มาจากการรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์เก่า



รูปที่ 9 การพัฒนา กำลังดัดของบล็อukupื้นคอนกรีตพรมที่อายุทดสอบ 3, 7 และ 28 วัน



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและกำลังดัดของบล็อukupื้นคอนกรีตพรม

เมื่อผสมรวมปูนซีเมนต์ปริมาณร้อยละ 18 ต่อน้ำหนักของมวลรวม ค่ากำลังดัดเท่ากับ 1.40 เมกะปาสคาล เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 และค่ากำลังดัดเท่ากับ 1.55 เมกะปาสคาล เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.35 ซึ่งคิดเป็นกำลังดัดที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 10.7 เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 ในขณะผสมรวมปูนซีเมนต์ปริมาณร้อยละ 20 ต่อน้ำหนักของมวลรวม ค่ากำลังดัดเท่ากับ 1.62 เมกะปาสคาล เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ

0.30 และค่ากำลังอัดเท่ากับ 1.69 เมกะปาสคาล เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.35 คิดเป็นกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 4.3 เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบปริมาณปูนซีเมนต์คงที่บล็อคปูพื้นคอนกรีตพูนที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่สูงกว่าจะมีแนวโน้มให้ค่ากำลังอัดที่มากกว่าบล็อคปูพื้นคอนกรีตพูนที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่น้อยกว่าเนื่องจากซีเมนต์เพสต์มีความชื้นเหลือที่เพียงพอต่อการเคลือบผิวมวลรวมได้อย่างสม่ำเสมอ สอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัด เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและกำลังอัดของตัวอย่างบล็อคปูพื้นคอนกรีตพูนดังแสดงในรูปที่ 10

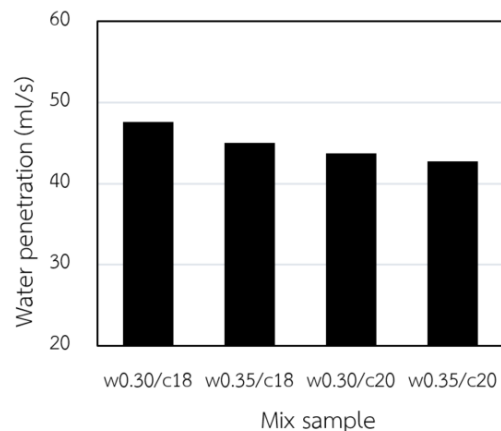
ซึ่งเห็นได้ว่ากำลังอัดของตัวอย่างบล็อคปูพื้นคอนกรีตพูนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังอัดสูงขึ้น เป็นความสัมพันธ์เชิงแปรผันตามในลักษณะโพลิโนเมียล (Polynomial) ดังสมการที่ (4)

$$y = 0.0444x^2 + 0.0088x + 0.9972 \quad (4)$$

เมื่อ y คือกำลังอัด และ x คือกำลังอัด เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและกำลังอัดของบล็อคปูพื้นคอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมหยาบจากหินที่ได้มาจากการรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์เก่า ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของสมบัติด้านกำลัง ได้แก่ ปริมาณเพสต์และการยึดเกาะระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวม (Interfacial Transition Zone, ITZ) [9] เมื่อนำผลกำลังอัดมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 378-2531: กระเบื้องคอนกรีตปูพื้น ซึ่งกำหนดค่ามาตรฐานกำลังรับแรงดัดตามขวางของกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 3 เมกะปาสคาล พบว่าบล็อคปูพื้นคอนกรีตพูนที่นำหินที่ได้จากการรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์เก่ามาแทนที่มวลรวมหยาบมีค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่ามาตรฐานกำหนด เนื่องจากบล็อคปูพื้นคอนกรีตพูนมีความหนาแน่นที่ต่ำกว่าและมีปริมาตรโพรงที่สูงกว่าบล็อคคอนกรีตปูพื้นทั่วไป

3.3 อัตราการซึมผ่านน้ำ

ผลการทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำของบล็อคปูพื้นคอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมหยาบจากหินที่ได้มาจากการรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์เก่าที่อายุทดสอบ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 11 พบว่า ตัวอย่างบล็อคปูพื้นคอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมหยาบจากหินที่ได้จากการรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์เก่าเมื่อผสมรวมปูนซีเมนต์ปริมาณอัตราส่วนร้อยละ 18 มีอัตราการซึมผ่านน้ำเท่ากับ 47.6 และ 45.0 มิลลิลิตรต่อวินาที เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 และ 0.35 ตามลำดับ หรือคิดเป็นอัตราการซึมผ่านน้ำลดลงร้อยละ 5.42 ในขณะที่เมื่อผสมรวมปริมาณปูนซีเมนต์อัตราส่วนร้อยละ 20 มีอัตราการซึมผ่านน้ำเท่ากับ 43.8 และ 42.7 มิลลิลิตรต่อวินาที เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 และ 0.35 ตามลำดับ หรือคิดเป็นอัตราการซึมผ่านน้ำลดลงร้อยละ 2.32



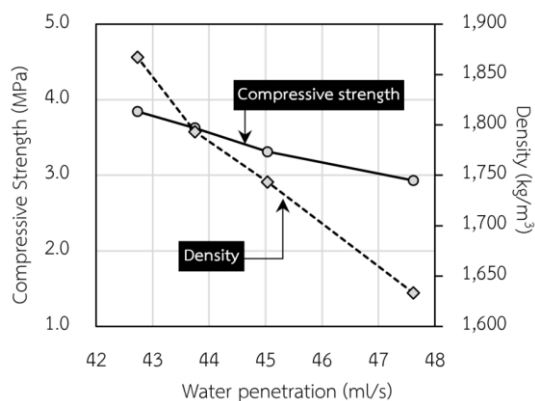
รูปที่ 11 การซึมผ่านน้ำในบล็อคปูพื้นคอนกรีตพูน

จากผลการทดสอบเห็นได้ว่าบล็อคปูพื้นคอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมหยาบจากหินที่ได้จากการรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์เก่าเมื่อผสมรวมปูนซีเมนต์ปริมาณร้อยละ 18 ของน้ำหนักมวลรวมที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 (w0.30/c18) มีค่าอัตราการซึมผ่านน้ำสูงที่สุด ทั้งนี้เมื่อผสมรวมปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มสูงขึ้น (w0.30/c20) ค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของ

ตัวอย่างบล็อกปูพื้นคอนกรีตพูนมีแวนโนมัลดลงร้อยละ 8.1 ในขณะที่เดียวกันเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์คงที่พบว่า อัตราการซึมผ่านน้ำมีแวนโนมัลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ N.Saboo et al. [9] พบว่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่สูงขึ้นส่งผลให้ความพรุนหรือช่องว่างในคอนกรีตพูนลดลง เนื่องจากปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่เพิ่มขึ้นจะเข้าไปอุดช่องว่างระหว่างมวลรวม ในขณะที่ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนืดลดลงและซีเมนต์เพสต์ทำการเคลือบผิวมวลรวมได้ดีขึ้น [5], [9] รวมถึงการผสมรวมมวลรวมหยาบต่างขนาดนั้นมวลรวมหยาบที่มีขนาดเล็กกว่าจะเข้าไปอุดช่องว่าง [1] นอกจากนี้อัตราการซึมผ่านน้ำไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณโพรงเพียงอย่างเดียวแต่ขึ้นอยู่กับขนาดและความต่อเนื่องของโพรงอีกด้วย [2]

3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด ความหนาแน่นและอัตราการซึมผ่านน้ำ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด ความหนาแน่นและค่าอัตราการซึมผ่านน้ำในตัวอย่างบล็อกปูพื้นคอนกรีตพูนดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ของกำลังอัด ความหนาแน่นและอัตราการซึมผ่านน้ำในบล็อกปูพื้นคอนกรีตพูน

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังอัดมีแวนโนมัลเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการซึมผ่าน

น้ำลดลง และอัตราการซึมผ่านน้ำมีแวนโนมัลลดลงเมื่อปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมเพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ T. Kamon and T. Ronnakorn [2] หรือกล่าวได้ว่ากำลังอัดมีความสัมพันธ์เชิงผกผันกับความพรุนนั่นคือความพรุนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังอัดลดลง [1] เป็นไปในแนวทางเดียวกันกับความหนาแน่นของตัวอย่างบล็อกปูพื้นคอนกรีตพูนมีแวนโนมัลดลงเมื่ออัตราการซึมผ่านน้ำมากขึ้น เนื่องจากอัตราการซึมผ่านน้ำที่สูงขึ้นมีความสัมพันธ์กับปริมาตรโพรงที่เกิดขึ้นในตัวอย่างบล็อกปูพื้นคอนกรีตพูนที่สูงขึ้นตามไปด้วย [4] ปริมาตรโพรงหรือความพรุนที่สูงขึ้นส่งผลให้บล็อกปูพื้นคอนกรีตพูนมีค่าความหนาแน่นลดลงและความสามารถในการรับกำลังอัดที่ต่ำ [3] จากผลการทดสอบพบว่ากำลังอัดของบล็อกปูพื้นคอนกรีตพูนที่อายุ 28 วันอยู่ในช่วง 2.9-3.6 เมกะปาสคาล ซึ่งมีค่าที่ต่ำเมื่อเทียบกับบล็อกคอนกรีตปูพื้นทางเท้าทั่วไป เนื่องจากโครงสร้างภายในของคอนกรีตที่มีปริมาตรโพรงที่มากกว่า และการนำหินที่ได้จากผิวทางแอสฟัลต์เก่ามามาใช้ใหม่เพื่อแทนที่มวลรวมหยาบยังมีปัญหาที่การยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เพสต์กับผิวสัมผัสของมวลรวมอีกด้วย [7]-[9] แต่จุดเด่นของบล็อกปูพื้นคอนกรีตพูนได้แก่ ความสามารถในการระบายน้ำที่ดีในช่วงที่มีฝนตกหรือน้ำท่วมซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับบล็อกคอนกรีตปูพื้นทางเท้าทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 ความสามารถในการระบายน้ำของบล็อกปูพื้นคอนกรีตพูนจากการนำผิวทางแอสฟัลต์เก่ามาใช้ใหม่

4. สรุป

จากการศึกษาแนวทางความเป็นไปได้ของการนำหินหรือมวลรวมหยาบที่ได้จากการนำผิวทางแอสฟัลต์เก่ากลับมาใช้ใหม่ในการผลิตบล็อกปูพื้นคอนกรีตพรุน สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. บล็อกปูพื้นคอนกรีตพรุนที่ใช้การคละขนาดของมวลรวมจากผิวทางแอสฟัลต์เก่านำมาใช้ใหม่ ที่ผสมรวมปูนซีเมนต์ในปริมาณที่สูงกว่าจะมีแนวโน้มความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย แต่ในทางกลับกันอัตราการซึมผ่านน้ำลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ผสมรวมปูนซีเมนต์ในปริมาณที่น้อยกว่า

2. บล็อกปูพื้นคอนกรีตพรุนที่ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ต่อน้ำหนักมวลรวม ให้กำลังอัดและกำลังดัดที่สูงกว่าตัวอย่างที่ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 18 ต่อน้ำหนักมวลรวม โดยปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่เพิ่มขึ้นจะช่วยพัฒนาสมบัติด้านกำลัง เนื่องจากซีเมนต์เพสต์สามารถห่อหุ้มมวลรวมได้อย่างสม่ำเสมอทำให้มีการยึดเกาะกันดียิ่งขึ้น

3. บล็อกปูพื้นคอนกรีตพรุนที่นำหินจากผิวทางแอสฟัลต์เก่ามาใช้ใหม่โดยเป็นการผสมระหว่างขนาดคละที่กำหนดนั้นมีค่ากำลังอัดและกำลังดัดที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับบล็อกคอนกรีตปูพื้นทั่วไป แต่ในขณะเดียวกันเห็นได้ชัดว่าบล็อกปูพื้นคอนกรีตพรุนมีความสามารถในการไหลซึมผ่านน้ำได้ดีกว่า ทั้งยังเป็นการนำของเหลือทิ้งจากการก่อสร้างผิวทางกลับมาใช้ใหม่ เป็นการช่วยลดการใช้ทรัพยากรจากธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดได้อีกทางหนึ่งด้วย

4. เมื่อพิจารณาสมการหาค่ากำลังดัดเห็นได้ว่าขึ้นอยู่กับขนาดและความหนาของบล็อกปูพื้นคอนกรีต ดังนั้นควรศึกษาขนาดและความหนาของบล็อกปูพื้นคอนกรีตที่หลากหลายมากขึ้นตามที่ได้ระบุไว้ใน มอก. 378-2531 ซึ่งมีขนาดแนะนำถึง 7 ขนาด

5. ควรทำการศึกษาเปรียบเทียบถึงผลกระทบของสมบัติทางวิศวกรรมเมื่อผลิตบล็อกปูพื้นคอนกรีต

พรุนจากการนำหินธรรมชาติที่มีขนาดคละตามเกณฑ์มาตรฐาน หรือขนาดคละทั้งแบบที่มีขนาดไม่ต่อเนื่อง (Open Grade) หรือที่มีขนาดเดียว (Single Grade)

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ หน่วยงานที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน รวมถึงสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ได้อนุเคราะห์เครื่องมือในการทดสอบและขอขอบคุณแนวทางหลวงประจวบคีรีขันธ์ (หัวหิน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ผิวทางแอสฟัลต์ของเก่าที่ได้จากการรื้อทิ้งในการทำวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. H. Abd Halim, H. Md. Nor, R. P. Jaya, A. Mohamed, M. H. W. Ibrahim, N. I. Ramli and F. M. Nazri, "Permeability and Strength of Porous Concrete Paving Blocks at Different Sizes Coarse Aggregate," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1049, 2018.
- [2] T. Kamon and T. Ronnakorn, "A Study of Water Permeability on Porous Concrete Using Recycled Coarse Aggregates," in *Proceeding of the 25th National Convention on Civil Engineering*, Chonburi, Thailand, 2020, pp. MAT13-1-MAT13-7.
- [3] C. Nantachai, "Unit Weight and Compressive Strength of Pervious Concrete mixed with Oil Palm Shell," *Journals of Community Development and life Quality*, vol. 1, pp. 97-106, 2013.

- [4] V. Sata, A. Wongsu and P. Chindaprasit, "Properties of Pervious Geopolymer Concrete Using Recycled Aggregate," *Construction and Building Materials*, vol. 42, pp. 33-39, 2013.
- [5] Y. Hirun, T. Tanchaisawat, P. Mulrungsee, V. Bumlungam and A. Peasura, "The Pervious Concrete Paving Blocks," in *Proceeding of the 4th Annual Concrete Conference*, Ubon Ratchathani, Thailand, 2008.
- [6] A. H. Nur. Hidayah, Md. Nor. Hasanan and P. J. Ramadhansyah, "Porous Concrete Paving Blocks Using Coarse Aggregate," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 554, pp. 111-115, 2014.
- [7] J. Suebsuk, K. Chaiyadechakorn, P. Panpipat and T. Poongernkham, "Compressive and Splitting Tensile Strengths of Concrete Using Recycled Pavement Waste as Coarse Aggregate," *SWU Engineering Journal*, vol. 11, no. 2, pp. 125-132, 2016.
- [8] J. Suebsuk, K. Chaiyadechakorn and P. Panpipat, "Mix Design of Portland Cement Concrete using Recycled Asphalt Pavement (RAP) as Coarse Aggregate in Highway Applications," in *Proceeding of the 24th National Convention on Civil Engineering*, Udonthani, Thailand, 2019.
- [9] N. Saboo, A. N. Prasad, M. Sukhija, M. Chaudhary and A. K. Chandrappa, "Effect of the use of recycled asphalt pavement (RAP) aggregates on the performance of pervious paver blocks (PPB)," *Construction and Building Materials*, vol. 262, pp. 120581, 2020.
- [10] Thai Industrial Standard (TIS) 378-2531, Concrete flooring tiles, Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, Bangkok, Thailand, 1988.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

กำลังอัด ความสามารถเก็บกักคลอไรด์และสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ ของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดและผงหินปูน

บัญญัติ วารินทร์ไธล^{1*} และ ปิติศานต์ กร้ามาต²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

¹ 85 ถนนมาลัยแมน อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000

² 39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

รับบทความ 16 พฤศจิกายน 2563 แก้ไขบทความ 8 มิถุนายน 2564 ตอรับบทความ 7 กรกฎาคม 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษากำลังอัดประลัย ความสามารถเก็บกักคลอไรด์และสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด และผงหินปูน ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 จากผลการศึกษาพบว่า กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดมีค่าน้อยกว่าของ OPC ล้วนที่อายุ 28 วัน ส่วนกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าใกล้เคียงกับของ OPC ล้วน และมีการพัฒนา กำลังอัดประลัยมากขึ้นเมื่อผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร้อยละ 20 และ 30 ที่อายุ 56 วัน นอกจากนี้ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด และคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด และคอนกรีตผสมผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่ความสามารถในความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด และคอนกรีตผสมผงหินปูน มีมากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน สุดท้ายพบว่าคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดและผงหินปูนให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์น้อยกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

คำสำคัญ : คอนกรีต; ความสามารถเก็บกักคลอไรด์; สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์; เถ้าก้นเตาบดละเอียด; ผงหินปูน

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Compressive Strength, Chloride Binding Capacity and Chloride Diffusion Coefficient of Concrete Containing Ground Bottom Ash and Limestone Powder

Banyut Warinlai^{1*} and Pitisan Krammart²

¹ Civil Engineering, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University

² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

¹ 85 Malai Man Road, Muang District, Nakhon Pathom 73000

² 39 Moo 1, Rangsit-Nakhon Nayok Road, Khlong Hok, Thanyaburi District, Pathum Thani 12110

Received 16 November 2020; Revised 8 June 2021; Accepted 7 July 2021

Abstract

This research was aimed to study the compressive strength, chloride binding capacity and chloride diffusion coefficient of concrete replaced by ground bottom ash (GBA), and limestone powder in ordinary Portland cement (OPC). The water to binder ratios were 0.55. The results showed that the compressive strength of concrete with GBA was lesser than that of OPC concrete at 28 days. Also, the compressive strength of concrete with limestone powder was close to that of OPC concrete and compressive strength could develop of concrete with GBA 20% and 30% higher than that of OPC concrete at 56 days. Moreover, the total chloride of the concrete containing GBA and limestone powder was less than that of OPC concrete. The chloride penetration of the concrete containing GBA and limestone powder was less than that of OPC concrete. The chloride binding capacity of the concrete made with ground bottom ash and limestone powder were higher than that of OPC concrete. Finally, the chloride diffusion coefficient of the concrete containing GBA and limestone powder was less than that of OPC concrete.

Keywords : Concrete; Chloride Binding Capacity; Chloride Diffusion Coefficient; Ground Bottom Ash; Limestone Powder

** Corresponding Author. Tel.: +668 1194 1759, E-mail Address: nowsurvey@hotmail.com*

1. บทนำ

ปัจจุบันโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นที่นิยมใช้ในวงการก่อสร้าง โครงสร้างคอนกรีตจำเป็นต้องมีการออกแบบโครงสร้างที่ดี สามารถรับน้ำหนักออกแบบได้ตลอดอายุการใช้งาน โดยปราศจากการซ่อมแซมในระดับที่เกินกว่าการคาดหมายเอาไว้ โครงสร้างคอนกรีตแต่ละประเภทที่มีการก่อสร้างแล้วแต่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันออกไป อายุของโครงสร้างจึงไม่เท่ากัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง มีการกัดกร่อนสูง ซึ่งส่วนใหญ่จะพบในสภาวะแวดล้อมชายทะเล เป็นผลให้คอนกรีตมีคุณสมบัติทางกลแย่ง โดยเฉพาะคุณสมบัติการรับแรงต่ำลงไปตามกาลเวลารวมถึงทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ส่งผลต่อความคงทนของโครงสร้าง

จากสภาวะแวดล้อมชายทะเล คลอไรด์ที่มีอยู่ในน้ำทะเลและมีก๊าซออกซิเจนร่วมอยู่ด้วย การกัดกร่อนของคลอไรด์จะเริ่มเกิดเมื่อสารละลายคลอไรด์กระทำต่อฟิล์มบางๆที่หุ้มเหล็กเสริมไว้ จนเมื่อฟิล์มเสียหายและออรอนของคลอไรด์กับก๊าซออกซิเจนทำปฏิกิริยากับเหล็กจนเหล็กเกิดสนิมในโครงสร้างคอนกรีตซึ่งสนิมเหล็กเหล่านี้ จนเกิดการขยายตัวของเหล็กเสริม เมื่อปริมาตรเหล็กเสริมเกิดการขยายตัวทำให้เกิดแรงดันขึ้นรอบๆ ส่งผลให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวจนแตกร้าวและก่อความเสียหายแก่โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในที่สุด ทำให้คุณสมบัติด้านกำลัง ความคงทนลดลงตามลำดับ

ถ้าหากเราใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุผสมคอนกรีตได้เป็นอย่างดี [1] จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าคุณสมบัติด้านกำลังในระยะยาวจะดีขึ้น [2,3] รวมถึงคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตเกี่ยวกับการต้านทานคลอไรด์และซัลเฟตดีขึ้นเช่นกัน [4,5] ในส่วนของผงหินปูนซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการย่อยหินเพื่อใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ จากงานวิจัย

ที่ผ่านมาพบว่าผงหินปูนจัดเป็นวัสดุผสมเพิ่มในปูนซีเมนต์ที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลและความคงทนของวัสดุเชื่อมประสานในระยะยาวได้ [5] รวมถึงคอนกรีตผสมผงหินปูนมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตผสมสารปอซโซลานบางชนิด โดยผงหินปูนไปอุดโพรงช่องว่างของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตเกิดความแข็งแรงมากขึ้น [6] นอกจากนี้ ยังพบอีกว่า การใช้วัสดุปอซโซลานจำพวกเถ้าลอยและเถ้าถ่านเตาร้อยละ 10 ทำให้การต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตสูงขึ้น [7] ซึ่งจะเห็นได้ว่า วัสดุปอซโซลานรวมทั้งฝุ่นหินปูน เมื่อนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในปริมาณที่เหมาะสมย่อมเกิดผลดีช่วยปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้มีความคงทนขึ้น [8] การวิจัยที่ผ่านมาไม่ว่าจะต่างประเทศหรือในประเทศไทยนั้น การนำเอาเถ้าถ่านเตาบดละเอียดหรือผงหินปูนอย่างใดอย่างหนึ่ง มาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน หรือนำทั้งเถ้าถ่านเตาบดละเอียดและผงหินปูนรวมกันทั้งสองชนิดมาแทนที่ในปูนซีเมนต์ ซึ่งถือว่ายังมีการนำมาใช้น้อยมาก จึงทำให้คุณสมบัติบางประการของคอนกรีตด้อยลง อย่างไรก็ตามปริมาณที่เหมาะสมในการใช้งานเถ้าถ่านเตาบดละเอียดและผงหินปูน รวมถึงการนำมาใช้ร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพนั้น จำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อทราบคุณสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุประสานให้แน่ชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการนำวัสดุดังกล่าวมาใช้ผสมร่วมในส่วนผสมคอนกรีต เพื่อเพิ่มความคงทนให้กับคอนกรีตที่ต้องเผชิญสิ่งแวดล้อมต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสภาวะแวดล้อมชายทะเล เพื่อเพิ่มศักยภาพในการใช้งานของเถ้าถ่านเตาในงานคอนกรีตประเภทต่างๆ ได้ดียิ่งขึ้น

จากที่กล่าวมา เพื่อเพิ่มศักยภาพในการใช้งานของเถ้าถ่านเตาบดละเอียดและผงหินปูนในงานคอนกรีตประเภทต่างๆ ให้ดียิ่งขึ้น การวิจัยครั้งนี้จึงได้มุ่งเน้นการนำเถ้าถ่านเตาบดละเอียด ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลาน ร่วมด้วยผงหินปูน มาใช้แทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ เพื่อ

ศึกษากำลังอัด ความสามารถด้านทานการแทรกซึม คลอไรด์และการเก็บกักคลอไรด์ ตลอดจนค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลการออกแบบสำหรับโครงสร้างคอนกรีตที่มีการเสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้วัสดุประสานซึ่งประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก แก้วกันเตาบละเอียด และผงหินปูน (ขนาดเฉลี่ย 8 ไมโครเมตร) เป็นวัสดุประสานเพิ่มเติมที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยมวลรวมใช้หินและทรายแม่น้ำ ส่วนน้ำใช้น้ำประปา

2.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้ประกอบด้วย 1) สมบัติพื้นฐานของวัสดุประสาน ซึ่งได้แก่ ความละเอียดโดยวิธีเบลน ความถ่วงจำเพาะ 2) กำลังอัดประลัยของคอนกรีตและ 3) ความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุประสาน

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แก้วกันเตาบละเอียด และผงหินปูน โดยความละเอียดโดยวิธีเบลนทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 204 [9] ความถ่วงจำเพาะ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 188 [10] โดยในส่วนองค์ประกอบทางเคมีนั้น ใช้วิธีวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบออกไซด์ของวัสดุประสาน ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)

2.2.2 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

สำหรับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ทดสอบตามมาตรฐาน BS 1881-116 [11] โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีต

ขนาด 100x100x100 มม.³ จำนวน 3 ตัวอย่างต่อหนึ่งสัดส่วนผสม หลังจากถอดแบบ 1 วัน ทำการบ่มน้ำจนถึงเวลาทำการทดสอบที่อายุ 28 และ 56 วัน

2.2.3 ความสามารถเก็บกักคลอไรด์และการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

สำหรับการหาความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ (chloride binding capacity) ของคอนกรีต มีรายละเอียดวิธีการศึกษาดังนี้

การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร ถอดแบบเมื่อครบ 24 ชั่วโมง และบ่มตัวอย่างในน้ำประปาเป็นเวลา 28 วัน

การแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์และการเก็บผงตัวอย่างคอนกรีต

ทำการบ่มคอนกรีตในน้ำ 28 วัน นำขึ้นมาจากน้ำทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงให้ผิวตัวอย่างแห้ง ทำการเคลือบผิวคอนกรีตด้านข้างและด้านล่างให้รอบโดยอีพ็อกซี (Epoxy) เว้นผิวด้านบนหนึ่งด้านจำนวน 3 รอบทิ้งระยะห่างในการเคลือบผิวประมาณ 4 ถึง 6 ชั่วโมง ต้องมั่นใจว่าไม่มีรูหรือรอยให้น้ำซึมเข้าใต้ที่ผิวเคลือบ ทิ้งให้สารเคลือบผิวคอนกรีตแห้งระยะเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการเตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (น้ำเกลือ) ความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนร้อยละ 5 แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM C 1556 [12] ตามระยะเวลาการทดสอบที่อายุ 28 และ 91 วัน เมื่ออายุการทดสอบ นำตัวอย่างคว่ำผิวนล่างให้น้ำระบายออก 24 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างคอนกรีตด้วยการเจาะเอาผงตัวอย่างชั้นละ 10 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 จำนวนน้ำหนักชั้นละ 20 กรัม ทุกๆ ชั้น โดยวัดจากผิวหน้าของคอนกรีตที่คลอไรด์ซึมผ่านจำนวน 5 ชั้นนำไปไตเตรทหาปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งจะได้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total Chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C1152 [13] และ

ปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free Chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C1218 [14] ส่วนปริมาณคลอไรด์ยึดจับ (Fixed Chloride) ได้มาจากผลต่างของคลอไรด์ทั้งหมดกับคลอไรด์อิสระ นอกจากนี้ค่าปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตสามารถนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ ได้ดังสมการที่ 1

$$C(x,t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a t}} \right) \right] \quad (1)$$

โดยที่ $C(x, t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ระยะความลึก x จากผิวหน้าทีระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล ($\%$ โดยน้ำหนักวัสดุประสาน), C_s คือปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต ($\%$ โดยน้ำหนักวัสดุประสาน), D_a คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต ($\text{cm}^2/\text{วัน}$), x คือ ระยะทางจากผิวหน้าคอนกรีต (cm), t คือ ระยะเวลาที่เผชิญคลอไรด์ (วัน)



รูปที่ 1 การแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์และการเก็บผงตัวอย่างคอนกรีต



รูปที่ 2 การหาปริมาณคลอไรด์ด้วยเครื่องวัดคลอไรด์อัตโนมัติ

2.3 ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้

สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ กำลังอัดประลัย และความสามารถในความสามารถเก็บ

กักคลอไรด์ของคอนกรีต มีการออกแบบสัดส่วนผสมที่ใช้วัสดุประสานสอง และสามชนิด คือ ระบบวัสดุประสานสองชนิด แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 20, 30 และผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5, 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานและระบบวัสดุประสานสามชนิด แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 10, 15, 20, 25 ร่วมกับผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5, 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน คอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก ดังตารางที่ 1 ตลอดการศึกษานี้

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ กำลังอัดประลัย และการหาความสามารถในความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีต โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55

ส่วนผสมของคอนกรีต (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)						
สัดส่วนผสม	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าก้นเตาบดละเอียด	ผงหินปูน	ทราย (SSD)	หิน (SSD)	น้ำ
CC	395	-	-	795	964	214
CC-20BA	316	79	-	759	964	214
CC-30BA	277	118	-	759	964	214
CC-5LP	375	-	20	759	964	214
CC-10LP	356	-	39	759	964	214
C-15BA-5LP	316	59	20	759	964	214
C-25BA-5LP	277	98	39	759	964	214
C-10BA-10LP	316	39	20	759	964	214
CC-20BA-10LP	277	79	20	759	964	214

หมายเหตุ CC หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน, CC-5LP หมายถึงคอนกรีตผสมผงหินปูนร้อยละ 5 และ CC-20BA หมายถึง คอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร้อยละ 20 เป็นต้น

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมี ของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าก้นเตาบดละเอียด	ผงหินปูน
SiO ₂	19.50	41.35	0.45
Al ₂ O ₃	4.97	20.11	0.05
Fe ₂ O ₃	3.78	13.24	0.03
CaO	65.38	16.65	55.20
MgO	1.08	2.37	0.34
SO ₃	2.16	2.68	<0.01
Na ₂ O	0.22	0.29	<0.01
K ₂ O	0.47	2.51	0.01
LOI	2.27	1.01	43.12
Free lime	1.00	<0.01	<0.01

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

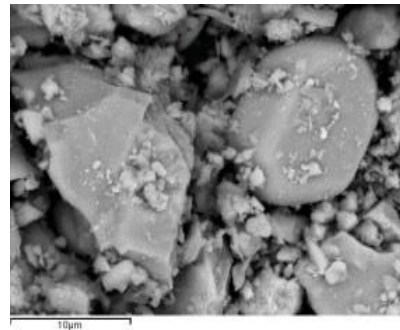
องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าก้นเตาบดละเอียด	ผงหินปูน
ความละเอียดโดยวิธีเบลน (ชม. ² /ก.)	3,250	4,960	5,210
ความถ่วงจำเพาะ	3.12	2.65	2.69
ร้อยละที่ค้างตะแกรงเบอร์ 325	20.04	16.34	-

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

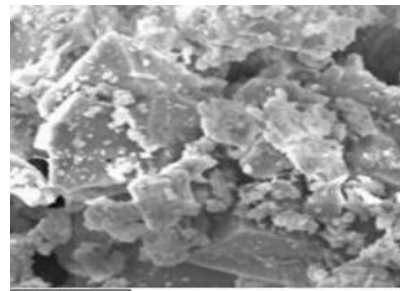
3.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุประสาน

จากการทดสอบสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าก้นเตาบดละเอียด และผงหินปูนที่ใช้ในการศึกษา ได้ผลการศึกษาขององค์ประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2 และคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสานดังแสดงใน

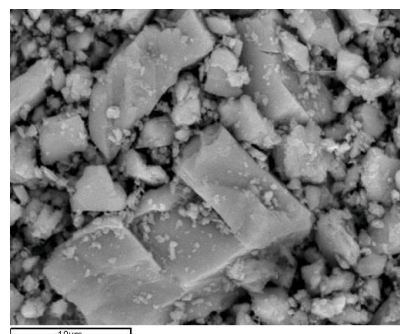
ตารางที่ 3 สำหรับรูปที่ 3 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังของอนุภาค โดยวิธี SEM (Scanning Electron Microscope) ขยาย 3500 เท่า จะเห็นว่าลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์มีลักษณะเป็นเหลี่ยม ผิวค่อนข้างขรุขระไม่เรียบ และมีอนุภาคหลายๆ ขนาดปนกันอยู่ในขณะที่ผงหินปูนและเถ้าก้นเตาบดละเอียดนั้น มีลักษณะอนุภาคเป็นเหลี่ยม ผิวขรุขระไม่เรียบคล้ายกับกรณีของปูนซีเมนต์แต่มีขนาดของอนุภาคที่เล็กกว่า



(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



(ข) เถ้าก้นเตาบดละเอียด

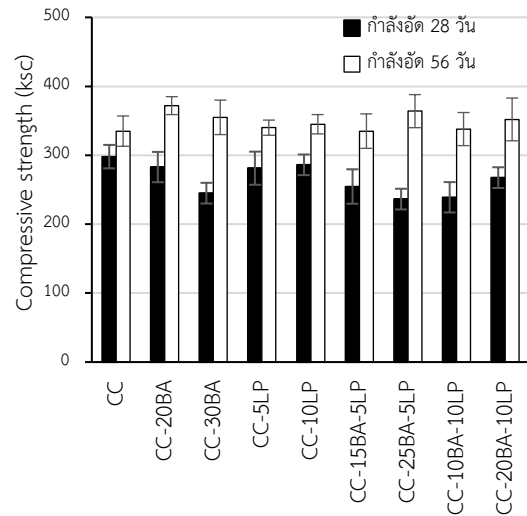


(ค) ผงหินปูน

รูปที่ 3 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของวัสดุประสานโดยวิธี SEM กำลังขยาย 3,500 เท่า

3.2 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

รูปที่ 4 แสดงค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต โดยตัวอย่างคอนกรีตบ่มน้ำที่อายุ 28 วัน พบว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มาก ทั้งนี้เนื่องจากการผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง ซึ่งกำลังรับแรงช่วงแรกจะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นหลัก ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดน้อยรวมทั้งการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดช้า ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดช่วงแรกต่ำ ส่วนเมื่อผสมด้วยผงหินปูนส่งผลให้ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงและใกล้เคียงกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อผสมผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง และผงหินปูนมีอนุภาคที่ค่อนข้างละเอียดจึงเป็นการช่วยในการเติมเต็มในช่องว่างของคอนกรีตส่งผลให้กำลังอัดประลัยมีค่าใกล้เคียงหรือลดลงไม่มากนักเมื่อเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่เมื่อตัวอย่างคอนกรีตอายุ 56 วัน การพัฒนากำลังอัดที่มีส่วนผสมของเถ้าก้นเตาบดละเอียดผสมในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 30 พบว่ากำลังอัดมีมากกว่าที่อายุ 28 วัน ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่นำเสนอผ่านมาของ K. Tuntisukrarom และคณะ [3] ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานสมบูรณ์ สำหรับคอนกรีตผสมด้วยผงหินปูนมีแนวโน้มค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตใกล้เคียงหรือสูงกว่าไม่มากเมื่อเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนการผสมกรณี 3 วัสดุประสาน คือ คอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร่วมกับผงหินปูนให้ผลในแนวโน้มที่สอดคล้องกับการผสมด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดหรือผงหินปูนเพียงอย่างเดียว ดังเหตุผลดังกล่าวมาแล้ว



รูปที่ 4 ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต

3.3 ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีต

สำหรับความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ (Chloride Binding Capacity) ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด และคอนกรีตผสมผงหินปูน โดยได้บ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำ 28 วัน เมื่อครบอายุการบ่มแล้ว จากนั้นนำตัวอย่างไปเผชิญเกลือคลอไรด์ที่ 28 และ 91 วัน ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4 และ 5 ประกอบด้วยผลของคลอไรด์ทั้งหมด (Total Chloride) และคลอไรด์อิสระ (Free Chloride) ส่วนคลอไรด์ยึดจับ (Fixed Chloride) ได้มาจากผลต่างของคลอไรด์ทั้งหมดกับคลอไรด์อิสระ และในกรณีอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ (Fixed Chloride Ratio) เป็นอัตราส่วนระหว่างคลอไรด์ยึดจับต่อคลอไรด์ทั้งหมด

โดยการทดลองนี้ใช้อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับพิจารณาความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีตพบว่า ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด (ร้อยละ 20 และ 30) มีค่ามากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะเถากันเตาบดละเอียดมีปริมาณของสารประกอบ Al_2O_3 (ร้อยละ 20.11) ซึ่งมากกว่าในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงส่งผลให้ความสามารถในการดักจับคลอไรด์ในรูปของปฏิกิริยาเคมีสูงขึ้น เมื่อมีการเพิ่มปริมาณการแทนที่ด้วยเถากันเตาบดละเอียดมากขึ้น และปฏิกิริยาปอซโซลานที่เพิ่มขึ้นทำให้มีปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) มากขึ้น ทั้งยังสามารถดักจับคลอไรด์ไอออนได้ ซึ่งเป็นการดักจับคลอไรด์ไอออนด้วยกระบวนการทางกายภาพ ส่งผลให้สามารถยึดจับคลอไรด์ได้มากขึ้น [15] ในส่วนของคอนกรีตผสมผงหินปูน พบว่า ความสามารถเก็บกักคลอไรด์มากกว่า

ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนทั้งนี้อาจเป็นเพราะ ผุ่นหินปูนช่วยยึดจับคลอไรด์ด้วยกระบวนการถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพ (Surface Force) ได้บนผิวของผลผลิตไฮเดรชัน เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต เป็นต้น [15] นอกจากนี้เมื่อพิจารณารูปที่ 5 ถึง 8 พบว่า ที่ระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ที่ 91 วัน ความสามารถเก็บกักคลอไรด์มีแนวโน้มมากกว่าของคอนกรีตที่ระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ที่ 28 วัน ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ เพราะเมื่ออายุของคอนกรีตนานขึ้นการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันหรือปอซโซลานของคอนกรีตสมบูรณ์มากขึ้น ส่งผลให้ยึดจับคลอไรด์ได้มากขึ้น

ตารางที่ 4 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระและคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับของคอนกรีตที่บ่มน้ำ 28 วัน และเผชิญเกลือคลอไรด์ 28 วัน

ลำดับ ที่	สัญลักษณ์	ระยะ จากผิว (มม.)	คลอไรด์ ทั้งหมด (%โดย นน. วัสดุประสาน)	คลอไรด์ อิสระ (%โดย นน. วัสดุประสาน)	คลอไรด์ ยึดจับ (%โดย นน. วัสดุประสาน)	อัตราส่วน คลอไรด์ ยึดจับ
1	CC	5	0.391	0.370	0.021	0.054
		15	0.188	0.173	0.015	0.080
		25	0.100	0.090	0.010	0.100
		35	0.062	0.032	0.030	0.484
		45	0.038	0.030	0.008	0.211
2	CC-20BA	5	0.230	0.160	0.070	0.304
		15	0.080	0.036	0.044	0.550
		25	0.020	0.015	0.005	0.250
		35	0.000	0.000	0.000	0.000
		45	0.000	0.000	0.000	0.000
3	CC-30BA	5	0.288	0.196	0.092	0.319
		15	0.086	0.063	0.023	0.267
		25	0.019	0.010	0.009	0.474
		35	0.011	0.009	0.002	0.182
		45	0.009	0.005	0.004	0.444

ลำดับ ที่	สัญลักษณ์	ระยะ จากผิว (มม.)	คลอไรต์ ทั้งหมด (%โดย นน. วัสดุประสาน)	คลอไรต์ อิสระ (%โดย นน. วัสดุประสาน)	คลอไรต์ ยึดจับ (%โดย นน. วัสดุประสาน)	อัตราส่วน คลอไรต์ ยึดจับ
4	CC-5LP	5	0.370	0.300	0.070	0.189
		15	0.136	0.129	0.007	0.051
		25	0.040	0.033	0.007	0.175
		35	0.010	0.009	0.001	0.100
		45	0.010	0.005	0.005	0.500
5	CC-10LP	5	0.365	0.299	0.066	0.181
		15	0.059	0.044	0.015	0.254
		25	0.014	0.010	0.004	0.286
		35	0.000	0.000	0.000	0.000
		45	0.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ 5 ปริมาณคลอไรต์ทั้งหมด คลอไรต์อิสระและคลอไรต์ที่ถูกยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรต์ที่ถูกยึดจับของคอนกรีตที่บ่มน้ำ 28 วัน และเผชิญเกลือคลอไรต์ 28 วัน (ต่อ)

ลำดับ ที่	สัญลักษณ์	ระยะ จากผิว (มม.)	คลอไรต์ ทั้งหมด (%โดย นน. วัสดุประสาน)	คลอไรต์ อิสระ (%โดย นน. วัสดุประสาน)	คลอไรต์ ยึดจับ (%โดย นน. วัสดุประสาน)	อัตราส่วน คลอไรต์ ยึดจับ
6	CC-15BA-5LP	5	0.350	0.280	0.070	0.200
		15	0.160	0.150	0.010	0.063
		25	0.050	0.050	0.000	0.000
		35	0.030	0.006	0.024	0.800
		45	0.000	0.000	0.000	0.000
7	CC-25BA-5LP	5	0.360	0.340	0.020	0.056
		15	0.149	0.120	0.029	0.195
		25	0.041	0.033	0.008	0.195
		35	0.018	0.009	0.009	0.500
		45	0.011	0.005	0.006	0.545
8	CC-10BA-10LP	5	0.363	0.250	0.113	0.311
		15	0.161	0.127	0.034	0.211
		25	0.055	0.041	0.014	0.255
		35	0.014	0.009	0.005	0.357
		45	0.011	0.010	0.001	0.091

ลำดับ ที่	สัญลักษณ์	ระยะ จากผิว (มม.)	คลอไรด์ ทั้งหมด (%โดย นน. วัสดุประสาน)	คลอไรด์ อิสระ (%โดย นน. วัสดุประสาน)	คลอไรด์ ยึดจับ (%โดย นน. วัสดุประสาน)	อัตราส่วน คลอไรด์ ยึดจับ
9	CC-20BA-10LP	5	0.250	0.185	0.065	0.260
		15	0.060	0.030	0.030	0.500
		25	0.016	0.014	0.002	0.125
		35	0.010	0.009	0.001	0.100
		45	0.010	0.009	0.001	0.100

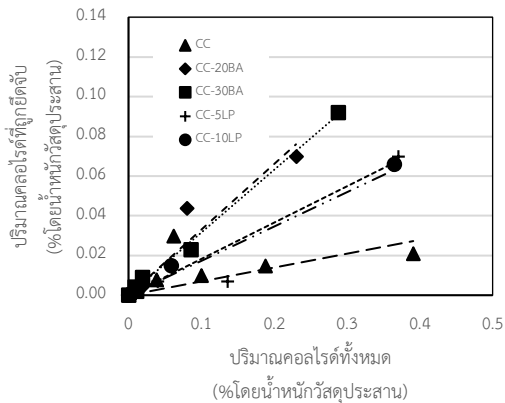
ตารางที่ 6 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระและคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับของคอนกรีตที่บ่มน้ำ 28 วัน และเผชิญเกลือคลอไรด์ 91 วัน

ลำดับ ที่	สัญลักษณ์	ระยะ จากผิว (มม.)	คลอไรด์ ทั้งหมด (%โดย นน. วัสดุประสาน)	คลอไรด์ อิสระ (%โดย นน. วัสดุประสาน)	คลอไรด์ ยึดจับ (%โดย นน. วัสดุประสาน)	อัตราส่วน คลอไรด์ ยึดจับ
1	CC	5	0.425	0.330	0.095	0.224
		15	0.200	0.198	0.002	0.010
		25	0.135	0.126	0.009	0.067
		35	0.080	0.070	0.010	0.125
		45	0.050	0.020	0.030	0.600
2	CC-20BA	5	0.360	0.180	0.180	0.500
		15	0.090	0.060	0.030	0.333
		25	0.024	0.019	0.005	0.208
		35	0.022	0.016	0.006	0.273
		45	0.014	0.012	0.002	0.143
3	CC-30BA	5	0.310	0.280	0.030	0.097
		15	0.092	0.080	0.012	0.130
		25	0.020	0.015	0.005	0.250
		35	0.010	0.009	0.001	0.100
		45	0.010	0.000	0.010	1.000
4	CC-5LP	5	0.400	0.322	0.078	0.195
		15	0.175	0.110	0.065	0.371
		25	0.120	0.104	0.016	0.133
		35	0.065	0.051	0.014	0.215
		45	0.040	0.026	0.014	0.350

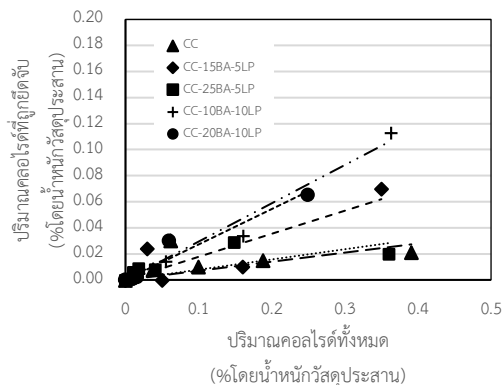
ลำดับ ที่	สัญลักษณ์	ระยะ จากผิว (มม.)	คลอไรด์ ทั้งหมด (%โดย นน. วัสดุประสาน)	คลอไรด์ อิสระ (%โดย นน. วัสดุประสาน)	คลอไรด์ ยึดจับ (%โดย นน. วัสดุประสาน)	อัตราส่วน คลอไรด์ ยึดจับ
5	CC-10LP	5	0.292	0.190	0.102	0.349
		15	0.131	0.100	0.031	0.237
		25	0.075	0.057	0.018	0.240
		35	0.035	0.026	0.009	0.257
		45	0.016	0.012	0.004	0.250

ตารางที่ 7 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระและคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับของคอนกรีตที่บ่มน้ำ 28 วัน และเผชิญเกลือคลอไรด์ 91 วัน (ต่อ)

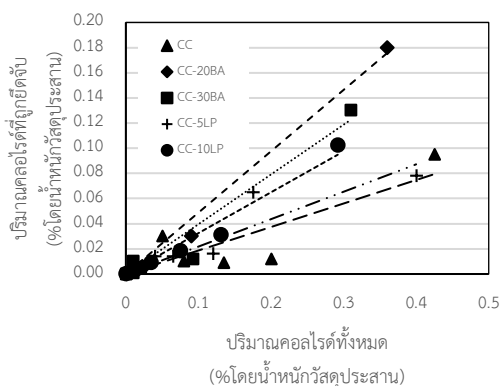
ลำดับ ที่	สัญลักษณ์	ระยะ จากผิว (มม.)	คลอไรด์ ทั้งหมด (%โดย นน. วัสดุประสาน)	คลอไรด์ อิสระ (%โดย นน. วัสดุประสาน)	คลอไรด์ ยึดจับ (%โดย นน. วัสดุประสาน)	อัตราส่วน คลอไรด์ ยึดจับ
6	CC-15BA-5LP	5	0.321	0.250	0.071	0.221
		15	0.187	0.168	0.019	0.102
		25	0.050	0.025	0.025	0.500
		35	0.040	0.020	0.020	0.500
		45	0.016	0.011	0.005	0.313
7	CC-25BA-5LP	5	0.386	0.251	0.135	0.350
		15	0.160	0.100	0.060	0.375
		25	0.029	0.021	0.008	0.276
		35	0.014	0.011	0.003	0.214
		45	0.014	0.007	0.007	0.500
8	CC-10BA-10LP	5	0.380	0.300	0.080	0.211
		15	0.130	0.065	0.065	0.500
		25	0.060	0.040	0.020	0.333
		35	0.030	0.030	0.000	0.000
		45	0.020	0.010	0.010	0.500
9	CC-20BA-10LP	5	0.330	0.260	0.070	0.212
		15	0.10	0.070	0.030	0.300
		25	0.030	0.015	0.015	0.500
		35	0.020	0.010	0.010	0.500
		45	0.010	0.009	0.001	0.100



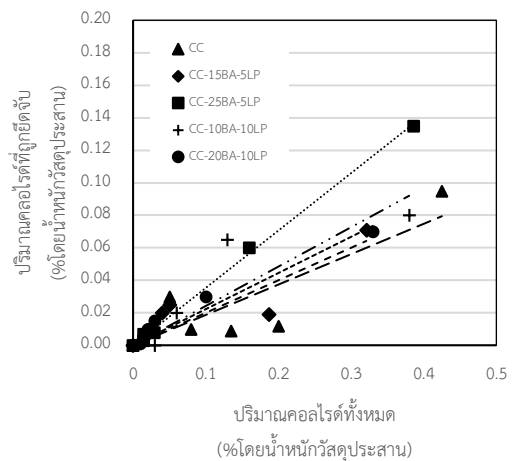
รูปที่ 5 ความสามารถยึดจับคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานแบบ 2 ชนิด ภายหลังเผชิญเกลือคลอไรด์เป็นระยะเวลา 28 วัน



รูปที่ 6 ความสามารถยึดจับคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานแบบ 3 ชนิด ภายหลังเผชิญเกลือคลอไรด์เป็นระยะเวลา 28 วัน



รูปที่ 7 ความสามารถยึดจับคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานแบบ 2 ชนิด ภายหลังเผชิญเกลือคลอไรด์เป็นระยะเวลา 91 วัน

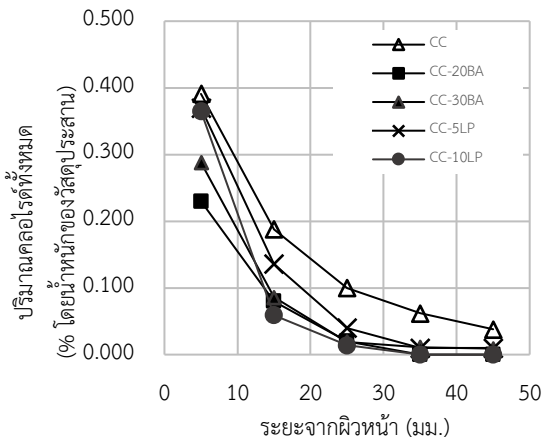


รูปที่ 8 ความสามารถยึดจับคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานแบบ 3 ชนิด ภายหลังเผชิญเกลือคลอไรด์เป็นระยะเวลา 91 วัน

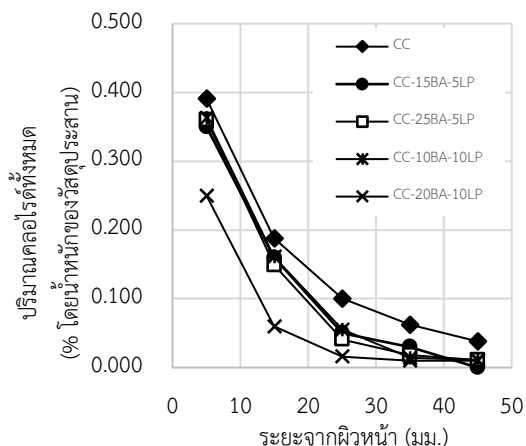
3.4 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด จากตารางที่ 4 ถึง 7 และ รูปที่ 9 ถึง 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิวคอนกรีตของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด คอนกรีตผสมผงหินปูน และคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน โดยพบว่า ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด คอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะ การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าก้นเตาบดละเอียด รวมทั้งวัสดุส่วนอื่นที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาปอซโซลานทำหน้าที่ช่วยในการเติมเต็มช่องให้คอนกรีตมีความทึบมากขึ้นจึงทำให้คลอไรด์ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตยากขึ้น นอกจากนี้ความละเอียดของผงหินปูนที่มีส่วนช่วยเข้าไปอุดช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความพรุนน้อย จึงส่งผลให้คลอไรด์ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตยากเช่นกัน ในส่วนของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร่วมกับผงหินปูนมีการซึมผ่านคลอไรด์น้อยกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

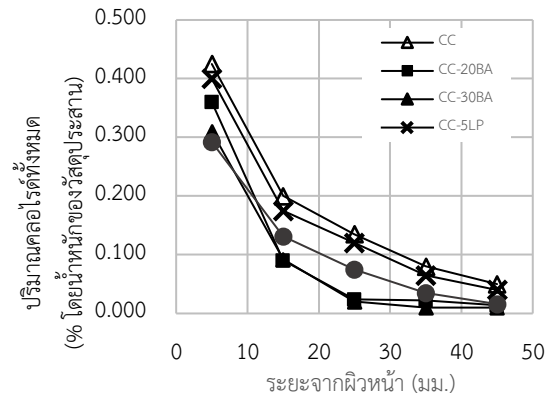
ประเภทที่ 1 ล้วน เนื่องจากเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว สำหรับคอนกรีตที่เผชิญคลอไรด์ 91 วัน มีค่าการซึมผ่านคลอไรด์มากกว่าคอนกรีตที่เผชิญคลอไรด์ 28 วัน เพราะคอนกรีตที่เผชิญคลอไรด์เป็นระยะเวลาสั้นกว่าย่อมเกิดการเสื่อมสภาพ เนื่องจากคลอไรด์มากขึ้นตามลำดับไปด้วย



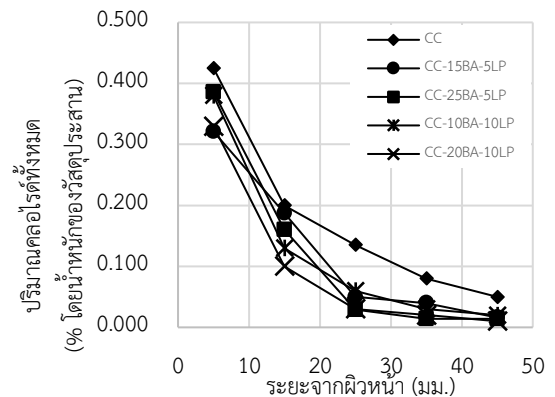
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิวคอนกรีตของคอนกรีตที่ใส่ 2 สัดส่วนผสม ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ที่ 28 วัน



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิวคอนกรีตของคอนกรีตที่ใส่ 3 สัดส่วนผสม ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ที่ 28 วัน



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิวคอนกรีตของคอนกรีตที่ใส่ 2 สัดส่วนผสม ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ที่ 91 วัน



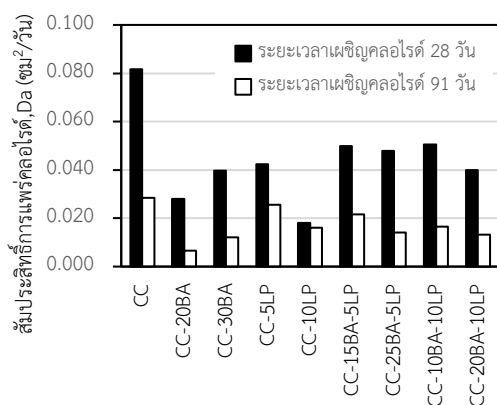
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิวคอนกรีตของคอนกรีตที่ใส่ 3 สัดส่วนผสม ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ที่ 91 วัน

3.5 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต

จากผลการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตให้ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเพื่อนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ (Da) ได้ดังรูปที่ 13 ซึ่งคอนกรีตมีอายุที่เพิ่มขึ้นสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์นั้นมามีค่าที่ต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตสามารถเกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์มากขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีเนื้อภายในที่แน่นขึ้นและโพรงช่องว่างภายในลดลง

นอกจากนี้พบว่าการใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดและผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

สามารถลดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ได้มากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากการใช้เถ้ากันเตาบละเอียดและฝุ่นหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้อนุภาคของฝุ่นหินปูนกระจายตัวดีขึ้น ประกอบกับขนาดอนุภาคที่เล็กของฝุ่นหินปูนเข้าไปอุดโพรงช่องว่างส่งผลให้คอนกรีตมีเนื้อภายในที่แน่นขึ้น รวมถึงเถ้ากันเตาบละเอียดเป็นสารปอซโซลานที่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ช่วยปรับปรุงให้คอนกรีตมีคุณสมบัติต่างๆดีขึ้น ประกอบระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่นานขึ้นทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดสมบูรณ์ ในส่วนของคอนกรีตเถ้ากันเตาบละเอียดผสมฝุ่นหินปูน ให้ค่ามีแนวโน้มที่สอดคล้องกับการผสมด้วยด้วยเถ้ากันเตาบละเอียดเพียงอย่างเดียว ดังเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว

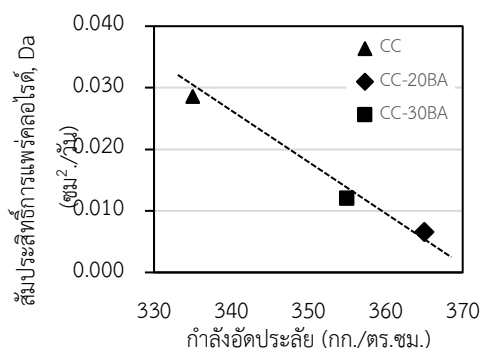


รูปที่ 13 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่เผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน

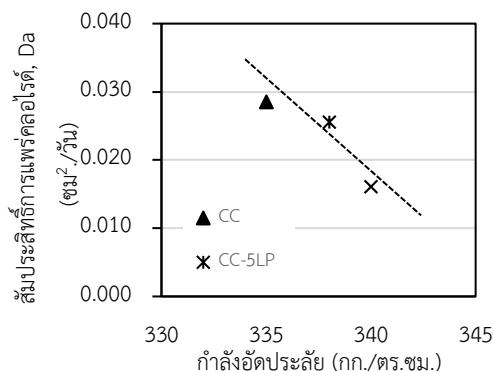
3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต

จากรูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยของคอนกรีตอายุ 56 วัน และสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่บ่มน้ำ 28 วันและเผชิญคลอไรด์ 28 วัน พบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะมีค่าน้อยลงกำลังอัดประลัยของคอนกรีตจะมากขึ้น คอนกรีต

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่มีคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตสูงและกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีแนวโน้มต่ำลง ซึ่งคอนกรีตที่มีการผสมเถ้ากันเตาบละเอียดจะให้ค่าที่ตรงกันข้ามกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เนื่องจากเถ้ากันเตาบละเอียดเป็นสารปอซโซลานที่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก ที่ช่วยปรับปรุงให้คอนกรีตมีคุณสมบัติต่างๆดีขึ้น และด้วยระยะเวลาที่นานขึ้นการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดได้อย่างต่อเนื่องและสมบูรณ์ที่สุด ส่วนของฝุ่นหินปูนที่มีขนาดอนุภาคที่เล็ก สามารถไปอุดโพรงช่องว่างคอนกรีต เป็นผลให้คอนกรีตมีรูพรุนน้อยลง



(ก) คอนกรีตผสมเถ้ากันเตาบละเอียด



(ข) คอนกรีตผสมฝุ่นหินปูน

รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 56 วันและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่บ่มน้ำ 28 วัน และเผชิญเกลือคลอไรด์ 28 วัน

4. สรุป

จากผลการศึกษาวิจัยครั้งนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1. กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนที่อายุ 28 วัน ส่วนกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมีแนวโน้มการพัฒนากำลังอัดมากขึ้นเมื่อผสมเถ้าก้นเตาร้อยละ 20 และ 30 ที่อายุ 56 วัน

2. ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด และคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

3. การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด และคอนกรีตผสมผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

4. ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด และคอนกรีตผสมผงหินปูน มีมากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

5. คอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดและผงหินปูนให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์น้อยกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนทุนการวิจัยในครั้งนี้ ตลอดจนสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Jaturapitakkul and R. Cheerarot, "Development of Bottom Ash as Pozzolan Material," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 48-53, Feb. 2003.
- [2] R. Cheerarot and C. Jaturapitakkul, "Use of Ground Bottom Ash as a Pozzolan Material in Concrete," *Research and development journal*, vol. 14, no. 2, pp. 1-8, 2003.
- [3] K. Tuntisukrarom, T. Choksawangnetr, P. Srihabutra and R. Cheerarot, "Utilization of ground bottom ash in high performance concrete," *Research and development journal*, vol. 23, no. 1, pp. 40-47, 2012.
- [4] S. Inthata and R. Cheerarot, "The Resistance to Chloride Penetration of Ground Bottom Ash Concrete," *Research and development journal*, vol. 19, no. 2, pp. 39-46, 2008.
- [5] P. Krammart and S. Tangtermsirikul, "Sulfate Resistance of Mortars with Limestone Powder," in *Proceeding of the 3rd Annual Concrete Conference, Thailand Concrete Association*, October 2010, pp. MAT 89-96.
- [6] H. Hornain, J. Marchand, V. Duhot and M. Moranville, "Diffusion of chloride ions in limestone filler blended cement pastes and mortars," *Cement and concrete research*, vol. 25, no. 8, pp. 1667-1678, Dec. 1995.
- [7] S. Arttamart and T. Sumranwanich, "Compressive strength and chloride

- penetration resistance of concrete with fly ash, limestone powder and partial replacement of fine aggregate by bottom ash,” *Journal of Engineering, RMUTT*, vol. 17, no. 2, pp. 113-125, 2019.
- [8] T. Jena and K.C. Panda, “Mechanical and durability properties of marine concrete using fly ash and silpozz,” *Advances in Concrete Construction*, vol. 6, no. 1, pp. 47-68, Feb. 2018.
- [9] American Society for Testing and Materials, ASTM C 204 - 00: Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus, Annual Book of ASTM Standards, 2000.
- [10] American Society for Testing and Materials, ASTM C 188 - 95: Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement, Annual Book of ASTM Standards, 1995.
- [11] British Standard Institute, BS 1881: Part 108 Method of Making Test Cube from Fresh Concrete, London, 1983.
- [12] American Society for Testing and Materials, ASTM C1556, Standard test method for determining the apparent chloride diffusion coefficient of cementitious mixtures by bulk diffusion. 2004. vol. 4.02.
- [13] American Society for Testing and Materials, ASTM C1152, Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete. 2004. vol. 4.02.
- [14] American Society for Testing and Materials, ASTM C1218 M-99R08, Standard test method for water soluble chloride in mortar and concrete. 2008. vol. 4.02.
- [15] S. Tangtermsirikul, Durability and Mix Design of Concrete, 1st ed., Printing House of Thammasat University, 2003.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานและความจุไฟฟ้าของข้าวเปลือกที่มีความชื้นแตกต่างกัน

อภิสิทธิ์ รักดีแก้ว¹ กระวี ตรีอำรรค^{1*} เทวรัตน์ ตรีอำรรค² และ ณัฐพงศ์ รัตนเดช³

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

³ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์

^{1,2} 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

³ 17/1 หมู่ 6 ตำบลชุมโค อำเภอปะทิว จังหวัดชุมพร 86160

รับบทความ 24 พฤษภาคม 2564 แก้ไขบทความ 27 มิถุนายน 2564 ตอรับบทความ 30 มิถุนายน 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์เซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุมาใช้ในการทดสอบหาอิทธิพลของอุณหภูมิข้าวเปลือกที่มีต่อสัญญาณทางไฟฟ้าที่รับค่ามาจากเซนเซอร์ดังกล่าว เมื่อทดสอบกับข้าวเปลือกที่มีความชื้นในช่วง 9.2 - 22.75% มาตรฐานเปียก ที่อุณหภูมิ 40 - 80°C เพื่อหารูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกกับสัญญาณทางไฟฟ้า พบว่าค่าสัญญาณเฉลี่ยในช่วงวินาทีที่ 20 ถึง 40 จากการวัดด้วยเซนเซอร์ทั้ง 2 ชนิดมีความสัมพันธ์เชิงเส้นผกผันกับค่าความชื้นของข้าวเปลือก อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสัญญาณทางไฟฟ้าที่วัดได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่า Adjust R^2 (ระดับความเชื่อมั่น 95%) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSEC) แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจากค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดต้านทาน มีความแม่นยำในการคำนวณค่าความชื้นข้าวเปลือกช่วงอุณหภูมิปานกลางถึงสูง คือ 60 - 80°C มากกว่าช่วงอุณหภูมิต่ำ ในขณะที่แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจากค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จากเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุมีความแม่นยำในการคำนวณค่าความชื้นข้าวเปลือกช่วงอุณหภูมิต่ำถึงปานกลาง คือ 40 - 60°C ดังนั้นโมดูลเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานจึงมีความเป็นไปได้และมีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์วัดความชื้นข้าวเปลือกในกระบวนการอบแห้งที่มีอุณหภูมิสูงกว่าเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดเก็บประจุ

คำสำคัญ : ความชื้นข้าวเปลือก; เซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทาน; เซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดเก็บประจุ; การอบแห้ง

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +664 4224 766, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: krawee@sut.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Effect of Temperature on Electrical Resistivity and Capacitive Signal of Various Moisture Paddy

Aphisik Pakdeekaew¹ Krawee Treeamnu^{1*} Tawarat Treeamnu² and Nuttapong Ruttanadech³

¹ School of Mechanical engineering, Suranaree University of Technology

² School of Agricultural engineering, Suranaree University of Technology

³ Department of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus

^{1,2} 111 University Avenue, Muang District Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

³ 17/1 Chum Kho, Pathiu, Chumphon, 86160, Thailand

Received 24 May 2021; Revised 27 June 2021; Accepted 30 June 2021

Abstract

This research proposes an application of resistive and capacitive soil moisture sensors to investigate the influences of paddy temperature on the electrical signal received from sensors when tested with paddy moisture in the range 9.2 - 22.75%wb at 40 - 80°C to determine the relationship between paddy moisture and electrical signals. It was found that the mean signal values between 20 - 40 seconds from both sensors were inversely linear correlation with the moisture content of the paddy. Temperature is the factors that influence the measured electrical signal. R^2 , Adjust R^2 (95% confidence interval), and RMSEC showed that the model developed from the resistive sensor signals was accurate in calculating the moisture content of paddy between medium to high temperature in range 60 - 80°C more than the low temperature range. While the capacitive sensor signals model is accurate in calculating paddy moisture between low to medium temperature in range 40 - 60 °C. Therefore, the resistive soil moisture sensor is possible and more suitable for applying as a paddy moisture sensor in the high temperature drying processes than a capacitor soil moisture sensor.

Keywords : Moisture Content of Paddy; Resistive Soil Moisture Sensor; Capacitive Soil Moisture Sensor; Drying

** Corresponding Author. Tel.: +664 4224 766, E-mail Address: krawee@sut.ac.th*

1. บทนำ

ข้าว (*Oryza sativa* L.) เป็นพืชอาหารหลักที่ประชากรมากกว่าครึ่งของโลกนิยมนำมาบริโภค [1]-[3] นอกจากนี้ยังมีความสำคัญต่อวิถีชีวิตความเป็นอยู่ของเกษตรกรไทยที่เพาะปลูกข้าวเป็นอาชีพหลัก จากยอดรวมสถิติการส่งออกสินค้ามาตรฐานข้าวหอมมะลิไทยตามใบรับรองมาตรฐานสินค้าที่ออกโดยสภาหอการค้าแห่งประเทศไทย ในปี 2563 มีปริมาณ 1,334.036 พันเมตริกตัน คิดเป็นมูลค่ารวม 42,486.98 ล้านบาท [4] สร้างเม็ดเงินเข้าสู่ประเทศเป็นจำนวนมาก ข้าวจึงเป็นพืชที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย ข้าวหลังการเก็บเกี่ยวใหม่นั้นจะมีความชื้นสูงอยู่ในช่วง 22–26% มาตรฐานเปียก จึงจำเป็นต้องทำการลดความชื้นในข้าวลงประมาณ 12–14% เพื่อป้องกันการเสื่อมคุณภาพของข้าวเปลือก เนื่องมาจากการเจริญเติบโตของเชื้อรา [5]-[7] และเพื่อลดข้อจำกัดของการอบแห้งแบบดั้งเดิม ที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านแรงงานคน พื้นที่ในการดำเนินการ วัสดุอุปกรณ์ ตลอดจนสภาพอากาศที่ไม่เอื้ออำนวยต่อการลดความชื้นข้าว ในระดับอุตสาหกรรมจึงมีการนำเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกรูปแบบต่างๆ มาใช้เพื่อให้สามารถดำเนินการบนข้อจำกัดดังกล่าวได้

ในขณะอบแห้งข้าวเปลือกการประเมินความชื้นข้าวที่อยู่ในกระบวนการลดความชื้นนี้มีความจำเป็นอย่างยิ่งเพราะจะทำให้ทราบค่าความชื้นสุดท้ายที่ต้องการและยุติกระบวนการได้ทันที่ หากทราบค่าความชื้นช้าเกินไปจะทำให้ข้าวเปลือกแห้งมากเกินไปเมื่อนำไปกะเทาะเปลือกจะเกิดการแตกหักสูงและยังเป็นการสูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์ ในทางกลับกันหากยุติกระบวนการอบแห้งเร็วเกินไปย่อมได้ข้าวที่มีความชื้นสูงเกินมาตรฐานเช่นกัน การวัดปริมาณความชื้นข้าวเปลือก สามารถทำได้ทั้งวิธีการวัดทางตรงและวิธีการวัดทางอ้อม การวัดทางตรงอาศัยการคำนวณความชื้นในเมล็ดข้าวด้วยน้ำหนักจากการนำข้าวตัวอย่างไปอบด้วยอุณหภูมิสูงตามมาตรฐานต่างๆ วิธีการนี้

สามารถนำมาใช้เป็นวิธีการอ้างอิงมาตรฐานสำหรับการสอบเทียบได้ [8] แต่มีข้อจำกัดเรื่องของเวลาในการอบแห้งเพื่อไล่ความชื้นในข้าวที่ต้องใช้เวลานานเพื่อที่จะสามารถวัดความชื้นข้าวได้อย่างทันที่ซึ่งมีการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของข้าวเปลือก เช่น การนำไฟฟ้า ความต้านทานไฟฟ้า ความจุไฟฟ้า คุณสมบัติทางแม่เหล็ก และอื่นๆ มาใช้เพื่อออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์การวัดความชื้นข้าวเปลือก ซึ่งวิธีการดังกล่าว เรียกว่า วิธีการวัดทางอ้อม [9]-[14] นักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาและพัฒนาเครื่องมือวัดความชื้นเมล็ดพืชขึ้น จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า Nath and Ramanathan [15] ได้พัฒนาจรรยาอินเทอร์เฟซ ซึ่งใช้หลักการวัดความจุของตัวเก็บประจุเซรามิกที่แตกต่างกัน เพื่อวิเคราะห์ความชื้นข้าวออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยให้ผลลัพธ์ที่รวดเร็วแม่นยำ และเชื่อถือได้ Joaquin, et al. [8] ได้ประเมินสมรรถนะของเครื่องมือวัดความชื้นที่พัฒนาขึ้นโดยหลักการความจุไฟฟ้า เพื่อเป็นเครื่องมือทางเลือกราคาประหยัดสำหรับการวัดปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกภายในถุง Makky, et al. [16] ทำการทดสอบแบบไม่ทำลาย โดยใช้เทคนิคการประเมินสเปกตรัมอินฟราเรดคลื่นสั้น (SWIR) ช่วง 1,000-2,500 นาโนเมตร เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของข้าวพื้นเมือง 2 ชนิดจากสุมาตราตะวันตก อินโดนีเซีย Lin, et al. [17] ทำการออกแบบและพัฒนาเซ็นเซอร์ตรวจจับความชื้นเมล็ดข้าว ด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (NIR) โดยมีเป้าหมายเพื่อประเมินความชื้นที่แม่นยำและเป็นระบบออนไลน์ นอกจากนี้วิธีการวัดความชื้นทางอ้อมยังถูกนำไปใช้ในกระบวนการอบแห้ง ความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของการวัดแบบตามเวลาจริงเป็นผลดีต่อการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้ง และสามารถลดการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งได้ [18] ตัวอย่างการนำเทคนิคดังกล่าวไปใช้กับเครื่องอบแห้ง เช่น ใช้กับการตรวจสอบความชื้นแบบออนไลน์สำหรับ

การทำแห้งผงแบคทีเรียลีเทียมไอออนแบบสูญญากาศ [19] ใช้ในการวิเคราะห์ความชื้นข้าวเปลือกในเครื่องแบบแห้งแบบไหลขวาง [20] ใช้ประเมินความชื้นแบบตามเวลาจริงในส่วนผสมเปียก (Wet cake) ทางเภสัชกรรม สำหรับกระบวนการทำแห้งแบบกระแทกวน [21] เป็นต้น

การพัฒนาเทคนิคการวัดความชื้นด้วยวิธีทางอ้อม ไม่เพียงแต่จะสามารถลดการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งและเป็นผลดีต่อการปรับปรุงคุณภาพการอบแห้งแล้ว ยังช่วยอำนวยความสะดวกในการดำเนินการของเครื่องอบแห้งได้ งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนออิทธิพลของอุณหภูมิข้าวเปลือกที่มีต่อสัญญาณทางไฟฟ้าที่รับค่ามาจากเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุเมื่อนำมาทดสอบวัดสัญญาณทางไฟฟ้ากับข้าวเปลือกที่มีความชื้นในช่วง 9.2 - 22.75% (wet basis, wb) ที่อุณหภูมิ 40 - 80°C ทั้งนี้เพื่อหารูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกกับสัญญาณทางไฟฟ้า ในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน พร้อมทั้งเปรียบเทียบความเป็นไปได้ในการเลือกใช้เซนเซอร์วัดความชื้นที่เหมาะสมเพื่อพัฒนาไปสู่ระบบประเมินความชื้นข้าวเปลือกแบบตามเวลาจริงสำหรับวัดความชื้นข้าวในกระบวนการอบแห้งต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเตรียมตัวอย่างข้าวสำหรับการทดลอง

2.1.1 การเตรียมเครื่องมือและวัสดุ

ข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ถูกลำนำมาตรวจสอบความชื้นเริ่มต้น ตามสมการที่ 1 ด้วยวิธีการอบลมร้อน อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลากว่า 72 ชั่วโมง (รูปที่ 1) [22] เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณหาปริมาณน้ำที่ต้องเติมกลับเข้าไปยังข้าวเปลือก โดยใช้กระบอกพ่นละอองน้ำให้ทั่วถึงเมล็ดข้าวเปลือกมากที่สุด ทำการคลุกเคล้าข้าวเปลือกให้ผสมกับละอองน้ำอย่างทั่วถึงกัน เพื่อให้ได้ความชื้นตามต้องการด้วยสมการที่ 2 โดยมีเป้าหมายในการเตรียมความชื้นข้าวเปลือก 5 ค่า ได้แก่

9.2%wb 13.15%wb 17.12%wb 19.56%wb และ 22.75%wb ตามลำดับ

$$MC_{wb,initial} = \frac{W_w - W_d}{W_w} \times 100\% \quad (1)$$

$$W_{water,add} = \frac{W_{net} \times MC_{target}}{(W_{net} \times MC_{initial}) - MC_{target}} \quad (2)$$

โดยที่

$MC_{wb,initial}$ คือ เปอร์เซนต์ความชื้น (เริ่มต้น)

MC_{target} คือ เปอร์เซนต์ความชื้น (เป้าหมาย)

W_w คือ มวลของตัวอย่างข้าวเปลือกก่อนอบไล่ความชื้น (g)

W_d คือ มวลของตัวอย่างข้าวเปลือกหลังอบไล่ความชื้น (g)

W_{net} คือ มวลของข้าวเปลือกทั้งหมดที่นำมาเตรียมความชื้น (g)

$W_{water,add}$ คือ มวลของน้ำที่ต้องเติมให้แก่ข้าวเปลือกสำหรับการเตรียมความชื้น (g)



รูปที่ 1 ก) ข้าวเปลือกตัวอย่างที่บรรจุในถ้วยชั่งน้ำหนัก
ข) เครื่องอบหาความชื้นแบบ Hot air oven



รูปที่ 2 การเตรียมตัวอย่างข้าวเปลือกสำหรับการทดลอง

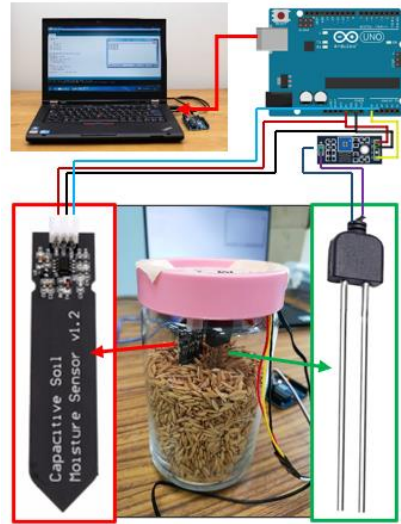
หลังจากนั้นนำข้าวเปลือกที่ถูกเติมน้ำแล้วบรรจุในภาชนะปิดสนิทตามรูปที่ 2 และนำไปเก็บในห้องเย็น อุณหภูมิ 2 - 5°C เป็นเวลากว่า 24 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการแพร่กระจายตัวของความชื้นข้าวทั่วกล่อง [23]

2.1.2 การวัดสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน

ในการทดลองนี้ได้ประยุกต์ใช้โมดูลเซนเซอร์สำหรับวัดความชื้นในดินเป็นอุปกรณ์วัดค่าทางไฟฟ้าของข้าวเปลือก โดยเลือกใช้โมดูลเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทาน (Resistive soil moisture sensor module) ยี่ห้อ diymore ผลิตโดย Worldchips จากประเทศจีน มีขนาด 36mm x 15mm x 7mm แรงดันไฟฟ้าทำงาน: 3.3 – 12 VDC กระแสไฟฟ้าทำงาน: < 20 mA กระแสไฟฟ้าขาออก: < 30 mA [24] และโมดูลเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดเก็บประจุ (Capacitive soil moisture sensor) ยี่ห้อ SZYTF ผลิตโดย YX Electronic Components ประเทศจีน มีขนาด 98 mm x 23 mm แรงดันไฟฟ้าทำงาน: 3.3 - 5.5 VDC แรงดันไฟฟ้าขาออก: 0 - 3.0 VDC [25] ตามรูปที่ 3 และใช้ Microcontroller Arduino Uno R3 ในการรับค่าสัญญาณจากโมดูลวัดความชื้นทั้งสองชนิดประมวลผลและแสดงค่าสัญญาณดังกล่าวผ่านจอ Serial monitor ของ Personal Laptop ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยทำการวัดกับตัวอย่างข้าวเปลือกที่บรรจุอยู่ในขวดโหลแก้วปิดสนิทที่ถูกทำให้มีอุณหภูมิ 40 50 60 70 และ 80°C ตามลำดับด้วยตู้อบลมร้อน ตามรูปที่ 5



รูปที่ 3 ก) เซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทาน
ข) เซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดเก็บประจุ



รูปที่ 4 แผนภาพการวัดสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน



รูปที่ 5 การบรรจุข้าวเปลือกและวิธีการอบข้าวที่อุณหภูมิต่างๆ

ใน 1 การทดลอง จะใช้ตัวอย่าง 3 ตัวอย่าง สำหรับการทดสอบซ้ำ 3 ซ้ำ แล้วจึงเก็บตัวอย่างข้าวหลังการวัดค่าสัญญาณไฟฟ้านำไปอบในตู้อบลมร้อน อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เพื่อคำนวณหาความชื้นข้าวเปลือกที่มีอยู่ตามสมการ 1 สำหรับการเปรียบเทียบในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

2.1.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณทางไฟฟ้ากับค่าความชื้นของข้าวเปลือก

งานวิจัยนี้ได้นำค่าสัญญาณที่รับค่าจากเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุ ตั้งแต่วินาทีที่ 0 ถึง 120 มาใช้ในการวิเคราะห์ ช่วงข้อมูลที่มีค่าค่อนข้างคงที่ที่สุดถูกเลือกมาวิเคราะห์ด้วยรูปแบบ

ความสัมพันธ์แบบการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression) (สมการที่ 3) ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ โดยใช้วิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระเข้าสมการแบบเลือกทั้งหมด (Enter Method) เพื่อทำนายค่าความชื้นของข้าวเปลือกที่แต่ละอุณหภูมิ ซึ่งจะอยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น ดังสมการที่ 4 [26]

$$Y = MX + C \quad (3)$$

$$WB_p = \text{Coefficient}(\text{signal}) + \text{Constant} \quad (4)$$

โดยที่

Y, WB_p คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้นข้าวฐานเปียกที่ถูกทำนายด้วยสมการทางคณิตศาสตร์

$M, \text{Coefficient}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

X, signal คือ ค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่วัดได้จากโมดูลวัดความชื้นในดิน

$C, \text{Constant}$ คือ ค่าคงที่ความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

การประมาณค่าตัวแปรของสมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายอาศัยวิธีการกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method) ค่าประมาณดังกล่าวส่งผลให้ผลรวมกำลังสองของค่าผิดพลาด (Sum Square Error; SSE) ต่ำที่สุด โดยค่าความชัน (M) หาได้จากสมการที่ 5 และค่าคงที่ (C) หาได้จากสมการที่ 6 [26]

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i}{\sum_{i=1}^n X_i^2} \quad (5)$$

$$C = \bar{Y} - M \bar{X} \quad (6)$$

โดยที่

$\bar{X}$ คือ ค่าเฉลี่ยของสัญญาณไฟฟ้า (X) ที่รวบรวมมา n จำนวน

$\bar{Y}$ คือ ค่าเฉลี่ยของความชื้นข้าวเปลือก (Y) ที่รวบรวมมา n จำนวน

ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination; R^2) เป็นค่าทางสถิติสำหรับวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับข้อมูลที่ใช้เปรียบเทียบ คำนวณได้จากสมการที่ 7 ซึ่งบ่งชี้ถึงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตาม (Y) ที่อธิบายได้จากสมการถดถอยที่ประมาณขึ้น [27] และ R^2 ที่ทำการปรับค่าให้สอดคล้องกับจำนวนตัวแปรทำนายในสมการ (Adjust R^2) คำนวณได้จากสมการที่ 8 [28] นอกจากนี้ การประเมินประสิทธิภาพของการทำนายความชื้นข้าวเปลือกด้วยสมการถดถอยเชิงเส้น อธิบายได้จากค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error of Collection, RMSEC) แสดงดังสมการที่ 9 [29, 30]

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2} \quad (7)$$

$$\text{Adjust } R^2 = 1 - \left[\frac{n-1}{n-p} \cdot (1 - R^2) \right] \quad (8)$$

$$\text{RMSEC} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2} \quad (9)$$

โดยที่

n คือ ขนาดของกลุ่มตัวอย่าง

p คือ จำนวนค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยเชิงเส้น

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ตัวอย่างข้าวในการทดลอง

ผลการเตรียมความชื้นถูกเปรียบเทียบกับค่าความชื้นเป้าหมายที่ต้องการ ณ เงื่อนไขของอุณหภูมิการทดสอบต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1

เมื่อเปรียบเทียบผลของการเตรียมความชื้นข้าวเปลือกกับค่าความชื้นเป้าหมายที่ต้องการ ด้วยค่าเฉลี่ยของความชื้นเปลือกที่ถูกเติมน้ำกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล (Standard Deviation; S.D.) พบว่า ตัวอย่างข้าวเปลือกที่ใช้ทดสอบ ณ อุณหภูมิ 40°C - 70°C มีค่าเฉลี่ยของความชื้นข้าวใกล้เคียงกับค่าความชื้นเป้าหมายที่ต้องการ โดยมีส่วนเบี่ยงเบนของข้อมูลน้อยมาก (ในช่วง 0.02-0.93) ในขณะที่ข้าวเปลือกที่ใช้ทดสอบ ณ อุณหภูมิ 80°C มีค่าเฉลี่ยของความชื้นข้าวคลาดเคลื่อนกับค่าความชื้นเป้าหมายที่ต้องการ ตั้งแต่ 1.26% - 3.2% (wet basis) และส่วนเบี่ยงเบนของข้อมูลอยู่ในช่วง 0.66 - 1.45 ซึ่งเห็นได้ชัดว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้นสำหรับการควบคุมเงื่อนไขของตัวอย่างข้าวเปลือกที่ใช้ทดสอบ ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของส่วนเบี่ยงเบนความชื้นข้าวจากการเตรียมตัวอย่าง อย่างไรก็ตาม ความชื้นที่แท้จริงของข้าวเปลือกถูกใช้สำหรับการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณทางไฟฟ้ากับค่าความชื้นของข้าวเปลือกที่อุณหภูมิใดๆ ในการทดลองนี้

3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือก

กับค่าสัญญาณทางไฟฟ้า

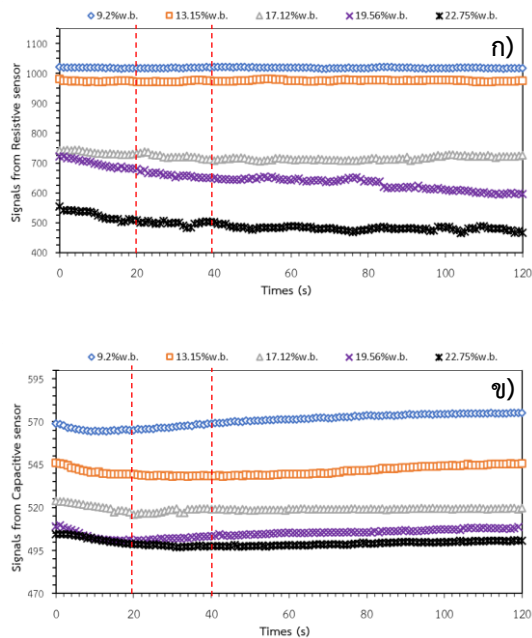
รูปที่ 6 แสดงค่าตัวอย่างสัญญาณไฟฟ้าเฉลี่ยได้จากโมดูลเซนเซอร์วัดความชื้นในดินทั้ง 2 ชนิดที่อุณหภูมิ 60°C ตั้งแต่วินาทีที่ 0 - 120 โดยสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากเซนเซอร์ทั้งสองมีค่าในช่วงการวัด 0 - 1,023 ระดับ (ที่การแปลงค่าสัญญาณ 8 บิต) ในช่วงเริ่มต้นของการวัดมีความไม่แน่นอนเกิดขึ้นชัดเจนในช่วงวินาทีที่ 0 - 20 ซึ่งเป็นพฤติกรรมของข้อมูลที่ลดลงตามเวลาใน

ตารางที่ 1 ผลของการเตรียมความชื้นข้าวเปลือกสำหรับใช้ทดสอบ ณ อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ	ความชื้นเป้าหมาย (%)	ความชื้นจากการทดลอง (%)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
40°C	9.20	9.35	0.02
	13.15	13.32	0.03
	17.12	17.35	0.08
	19.56	19.95	0.09
	22.75	23.10	0.09
50°C	9.20	9.12	0.03
	13.15	12.99	0.05
	17.12	17.29	0.07
	19.56	20.03	0.36
	22.75	22.76	0.21
60°C	9.20	9.07	0.10
	13.15	12.78	0.24
	17.12	16.87	0.13
	19.56	19.70	0.35
	22.75	22.31	0.38
70°C	9.20	9.18	0.15
	13.15	12.65	0.38
	17.12	16.44	0.42
	19.56	19.63	0.51
	22.75	22.26	0.93
80°C	9.20	7.94	0.66
	13.15	10.78	1.07
	17.12	14.80	1.39
	19.56	16.66	1.45
	22.75	19.55	1.11

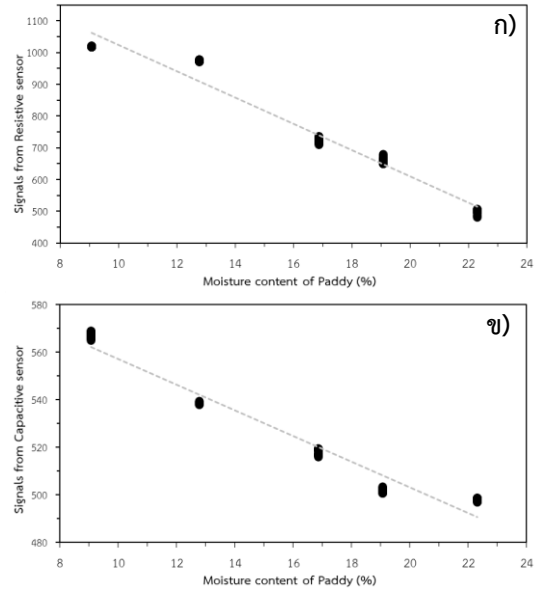
ช่วงแรกจนกระทั่งข้อมูลค่อนข้างคงที่ตามแกนนอน ในช่วงวินาทีหลัง เพื่อป้องกันการลดลงของอุณหภูมิของข้าวเปลือกจากการถ่ายเทความร้อนกับแวดล้อมตั้งแต่วินาทีที่ 40 - 120 และเพื่อหลีกเลี่ยงความไม่แน่นอน

ของข้อมูลจากการวัดค่าสัญญาณไฟฟ้าในช่วงเริ่มต้น ผู้วิจัยจึงเลือกข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากเซนเซอร์ ตั้งแต่วันที่ 20 ถึงวันที่ 40 มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย โดยใช้ค่าความชื้นเฉลี่ยของข้าวเปลือกจากการเตรียมความชื้นที่อุณหภูมิต่างๆ (ตารางที่ 1) เป็นข้อมูลสำหรับเปรียบเทียบและหาตัวแบบของสมการเชิงเส้นถดถอย

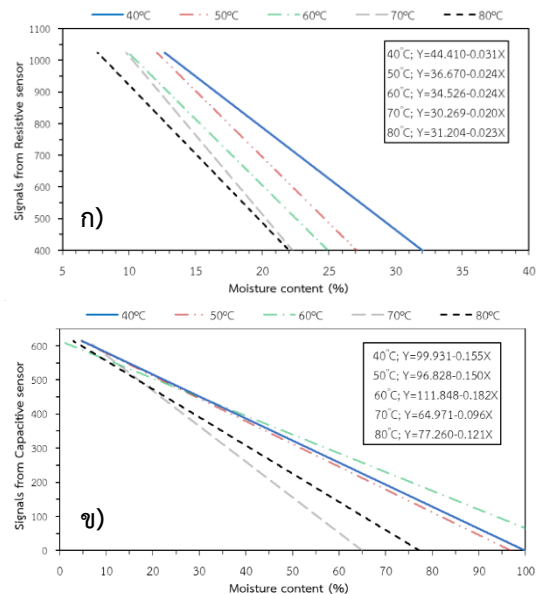


รูปที่ 6 ตัวอย่างสัญญาณไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 60°C ก) ค่าที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทาน ข) ค่าที่ได้จากเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดเก็บประจุ

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์ทั้ง 2 ชนิดกับค่าความชื้นของข้าวเปลือกที่อุณหภูมิการวัด 60°C พบว่า ค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์มีความสัมพันธ์เชิงเส้นผกผันกับค่าความชื้นของข้าวเปลือก กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของค่าความชื้นข้าวเปลือกจะทำให้ค่าสัญญาณไฟฟ้าจากเซนเซอร์ชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุมีแนวโน้มลดลง โดยที่ ที่อุณหภูมิ 40 50 60 70 และ 80°C มีแนวโน้มของความสัมพัธ์ไปในทิศทางเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 7 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกกับค่าสัญญาณทางไฟฟ้า ก) จากโมดูลเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทาน และ ข) จากเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดเก็บประจุ ที่อุณหภูมิ 60°C



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกกับค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จาก ก) โมดูลเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทาน และ ข) ค่าที่ได้จากเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดเก็บประจุที่แต่ละอุณหภูมิการทดลอง

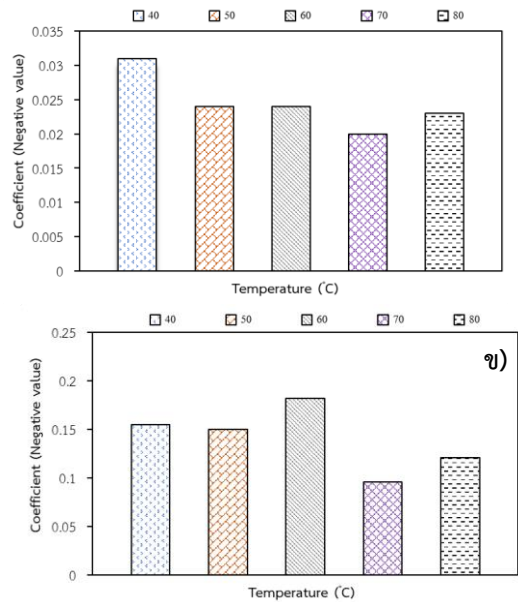
3.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความสัมพันธ์ระหว่าง ความชื้นข้าวเปลือกและค่าสัญญาณไฟฟ้า

จากรูปที่ 8 จะเห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) หรือความชันของเส้นแนวโน้ม มีค่าน้อยกว่าศูนย์ ซึ่งให้ถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าสัญญาณไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง เมื่อตัวแปรต้น (ค่าความชื้นข้าวเปลือก) มีค่าเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งในแต่ละอุณหภูมิมีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย หรือความชันของกราฟ แสดงดังรูปที่ 9

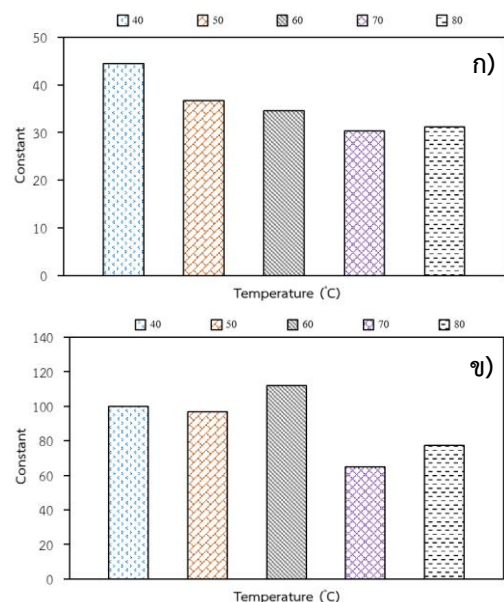
จากรูปที่ 9 ก) ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกและสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดต้านทานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ค่าเป็นลบน้อยลง) ในช่วงอุณหภูมิ 40 - 50°C และค่อนข้างคงที่ในช่วงอุณหภูมิ 50 - 80°C

ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกและสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ (รูปที่ 9 ข) มีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงอุณหภูมิ 40 - 50°C และมีต่ำสุด (ค่าเป็นลบมากที่สุด) ที่ 60°C ก่อนที่จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ค่าเป็นลบน้อยลง) ในช่วง 70 - 80°C นอกจากนี้ ค่าคงที่จากรูปแบบความสัมพันธ์แบบการถดถอยเชิงเส้นนี้ มีค่าแตกต่างกันในแต่ละอุณหภูมิที่ทำการทดสอบซึ่งแสดงดังรูปที่ 10

จากรูปที่ 10 ก) ค่าคงที่ของความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกและสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดต้านทานมีแนวโน้มลดลงในช่วงอุณหภูมิ 40 - 70°C และค่อนข้างคงที่ในช่วงอุณหภูมิ 70 - 80°C ในขณะที่ค่าคงที่ของความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกและสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ (รูปที่ 10 ข) มีแนวโน้มลดลงในช่วงอุณหภูมิ 40 - 50°C และมีค่าสูงสุดที่ 60°C จากนั้นจึงมีแนวโน้มลดลงในช่วงอุณหภูมิ 70 - 80°C แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย และค่าคงที่นี้จะมีความสอดคล้องกับรูปที่ 8 ก) และ ข) โดยเส้นกราฟ



รูปที่ 9 ค่าสัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกกับสัญญาณไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 40 - 80°C ก) จากเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทาน ข) จากเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดเก็บประจุ



รูปที่ 10 ค่าคงที่ของความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกกับสัญญาณไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 40 - 80°C ที่ได้จาก ก) โมดูลเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทาน และ ข) เซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดเก็บประจุ

ความสัมพันธ์ของความชื้นข้าวเปลือกและสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดต้านทานมีแนวโน้มลดความชันลงในช่วงอุณหภูมิต่ำ จากนั้นค่าจะค่อนข้างคงที่เมื่ออุณหภูมิการทดสอบเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ค่าดังกล่าวจากโมดูลเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุมีแนวโน้มคงที่ได้ช่วงอุณหภูมิต่ำ และค่อนข้างคงที่ในช่วงอุณหภูมิสูง นอกจากนี้ค่าคงที่ของความสัมพันธ์ซึ่งคือจุดตัดแกนตั้งของเส้นกราฟความสัมพันธ์จะมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยที่ค่าคงที่ของเส้นกราฟความสัมพันธ์ของความชื้นข้าวเปลือกและสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดต้านทานในช่วงอุณหภูมิสูงการทดลองค่าสูงมีค่าเกือบจะคงที่ ในขณะที่ค่าคงที่ของเส้นกราฟความสัมพันธ์ของความชื้นข้าวเปลือกและสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุจะมีค่าเกือบจะคงที่ในช่วงอุณหภูมิการทดลองค่าต่ำ

3.4 ความสามารถของแบบจำลองความสัมพันธ์ในการคำนวณหาความชื้นข้าวเปลือกที่แต่ละอุณหภูมิการทดลอง

ความสัมพันธ์ในรูปการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายระหว่างความชื้นข้าวเปลือกและค่าสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุได้ถูกสร้างเป็นแบบจำลองขึ้น จากนั้นได้ทดสอบการคำนวณหาความชื้นของแบบจำลองที่แต่ละอุณหภูมิของการทดลอง โดยประเมินความสามารถในการคำนวณค่าจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error of Collection, RMSEC) ค่าสัมประสิทธิ์ค่าคงที่และค่าการประเมิน แสดงตามตารางที่ 2

ก)

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรเปรียบเทียบระหว่างเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานกับชนิดเก็บประจุ

Type of sensor	Resistive soil moisture sensor module					Capacitive soil moisture sensor				
	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C
Coefficient	-0.031	-0.024	-0.024	-0.02	-0.023	-0.155	-0.15	-0.182	-0.096	-0.121
Constant	44.410	36.670	34.526	30.269	31.204	99.931	96.828	111.848	64.971	77.260
R^2	0.802	0.869	0.958	0.951	0.958	0.974	0.903	0.969	0.637	0.750
Adjust R^2	0.800	0.868	0.958	0.950	0.958	0.948	0.902	0.968	0.633	0.747
RMSEC	2.156	1.785	0.993	1.067	0.912	1.130	1.534	0.865	2.839	2.070

หมายเหตุ : ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 2 พบว่า อุณหภูมิของข้าวเปลือกขณะทำการวัดสัญญาณทางไฟฟ้าจากเซ็นเซอร์วัดความชื้นทั้ง 2 ชนิด ล้วนส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์และค่าคงที่ในสมการคำนวณความชื้นข้าวเปลือกทั้งสิ้น อาจกล่าวได้ว่า อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อความถูกต้องของผลการคำนวณค่าความชื้นข้าวเปลือกของแบบจำลองที่ถูกพัฒนาด้วยวิธีการนี้

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่า Adjust R^2 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจากค่าสัญญาณทาง

ไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดต้านทาน มีความแม่นยำในการคำนวณค่าความชื้นข้าวเปลือกช่วงอุณหภูมิปานกลางถึงสูง คือ 60 - 80°C มากกว่าช่วงอุณหภูมิต่ำ (40 และ 50°C) โดยมีค่า R^2 Adjust R^2 เท่ากับ 0.958 0.951 0.958 และ 0.958 0.950 0.958 ที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80°C ตามลำดับ และมีค่า RMSEC ต่ำที่สุดโดยมีค่าเป็น 0.993 1.067 และ 0.912 ที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80°C ตามลำดับ ในขณะที่แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจากค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุมีความแม่นยำในการคำนวณค่าความชื้นข้าวเปลือกช่วง

อุณหภูมิต่ำถึงปานกลาง คือ 40 - 60°C มากกว่าช่วงอุณหภูมิสูง (70 และ 80°C) โดยมีค่า R^2 , Adjust R^2 เท่ากับ 0.974 0.903 0.969 และ 0.948 0.902 0.968 ที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60°C ตามลำดับ และมีค่า RMSEC ต่ำที่สุดโดยมีค่าเป็น 1.130 1.534 และ 0.865 ที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60°C ตามลำดับ ซึ่งค่าความชื้นที่คำนวณได้จากแบบจำลองที่ใช้สัญญาณไฟฟ้าจากโมดูลเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุนี้มีผลสอดคล้องกับการทดสอบของ Jitsorn, et. al. [9] Song, Q. [10] S. Wu. et, al. [31], [32] และ B. Besharati [33] ดังนั้นโมดูลเซนเซอร์ชนิดนี้มีความเหมาะสมที่จะประยุกต์ใช้ในการวัดค่าความชื้นข้าวเปลือกที่อุณหภูมิห้องหรือสูงกว่าไม่มาก และจากผลการทดลองนี้การประยุกต์ใช้เซนเซอร์เพื่อวัดค่าความชื้นข้าวเปลือกในกระบวนการอบแห้งซึ่งมีอุณหภูมิสูง โมดูลเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานจึงมีความเป็นไปได้และมีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้มากกว่า

4. สรุป

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเฉลี่ยของข้าวเปลือกกับสัญญาณไฟฟ้าจากโมดูลเซนเซอร์ทั้ง 2 ชนิด ในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน พบว่าสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์มีความสัมพันธ์เชิงเส้นผกผันกับค่าความชื้นของข้าวเปลือก โดยโมดูลเซนเซอร์ชนิดต้านทานมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ลดลงในช่วงอุณหภูมิต่ำจากนั้นค่าจะค่อนข้างคงที่เมื่ออุณหภูมิการทดสอบเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์จากเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุมีแนวโน้มคงที่ได้ช่วงอุณหภูมิต่ำ และค่อนข้างคงที่ในช่วงอุณหภูมิสูง นอกจากนี้ค่าคงที่ของความสัมพันธ์ที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดต้านทานในช่วงอุณหภูมิสูงมีค่าเกือบจะคงที่ ในขณะที่ค่าคงที่จากเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุมีค่าเกือบจะคงที่ในช่วงอุณหภูมิการทดลองค่าต่ำ พฤติกรรม การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์และค่าคงที่ของความสัมพันธ์ดังกล่าว สรุปได้ว่า อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อความถูกต้องของผลการคำนวณค่า

ความชื้นข้าวเปลือกของแบบจำลองที่ถูกพัฒนาด้วยวิธีการนี้ จากการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่า Adjust R^2 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ประกอบกับค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSEC) พบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจากค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดต้านทาน มีความแม่นยำในการคำนวณค่าความชื้นข้าวเปลือกช่วงอุณหภูมิปานกลางถึงสูง คือ 60 - 80°C มากกว่าช่วงอุณหภูมิต่ำ (40 และ 50°C) ในขณะที่แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจากค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จากเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ มีความแม่นยำในการคำนวณค่าความชื้นข้าวเปลือกช่วงอุณหภูมิต่ำถึงปานกลาง คือ 40 - 60°C มากกว่าช่วงอุณหภูมิสูง (70 และ 80°C) ดังนั้นการประยุกต์ใช้เซนเซอร์เพื่อวัดค่าความชื้นข้าวเปลือกในกระบวนการอบแห้งซึ่งมีอุณหภูมิสูง โมดูลเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานจึงมีความเป็นไปได้และมีความเหมาะสมมากกว่าเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดเก็บประจุ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] X.-j. Li, et al., "Changes in moisture effective diffusivity and glass transition temperature of paddy during drying," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 128, pp. 112-119, Sep. 2016.
- [2] S. Doungporn, N. Poomsa-ad and L. Wiset, "Drying equations of Thai Hom Mali paddy by using hot air, carbon dioxide and nitrogen gases as drying media," *Food and Bioproducts Processing*, vol. 90, no. 2, pp. 187-198, Feb. 2012.

- [3] S. Echaroj, et al., "Effect of Geometric Design on Airflow Simulation Inside the Storage Room for Paddy," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2019, p. 012040.
- [4] Department of Foreign Trade, (2021, April 27). Export statistics of Thai jasmine rice (by country / yearly comparison) on February 2021. [Online]. Available: <http://www.dft.go.th>
- [5] T. Tian, et al., "Characterization of differences between microwave and traditional thermal sterilization to prevent fungal spoilage during storage of high-moisture paddy rice," *Cereal Chemistry*, pp. 1-10, Jul. 2020.
- [6] H.J. Das, R. Saikia and P. Mahanta, "Effects of spiral and cone angles on drying characteristics and energy consumption of fluidized bed paddy dryer," *Drying Technology*, pp. 1-12, Sep. 2020.
- [7] W. Jittanit, N. Saeteaw and A. Charoenchaisri, "Industrial paddy drying and energy saving options," *Journal of stored products research*, vol. 46, no. 4, pp. 209-213, Apr. 2010.
- [8] A.C. Joaquin, M.E.V. Ramos and R.C. Martinez, "Development and Performance Evaluation of a Grain Probe Moisture Meter for Paddy," *International Journal of Environmental Science and Development*, vol. 10, no. 10, pp. 350-355, Oct. 2019.
- [9] B. Jitsom, S. Sungnul and E. Kunawuttipreechachan, "Numerical Solutions of the Moisture Transport in Rough Rice," *Engineering Letters*, vol. 28, no. 3, 2020.
- [10] Q. Song, et al., "Design of Capacitive Paddy Moisture Sensor Based on Electrical Impedance Spectroscopy Analysis," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 11, p. 3968, Jun. 2020.
- [11] P. Klomklao, S. Kuntinugunetanon and W. Wongkokua, "Moisture content measurement in paddy," *JPhCS*, vol. 901, no. 1, p. 012068, 2017.
- [12] M. Abdullah, et al. "A Review on Moisture Measurement Technique in Agricultural Silos," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2019, p. 012068.
- [13] N.A.M. Ramli, et al., "A Review on Frequency Selection in Grain Moisture Content Detection," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, p. 012002.
- [14] D. Nath and P. Ramanathan, "Non-destructive methods for the measurement of moisture contents—a review," *Sensor Review*, vol. 37, no. 1, pp. 71-77, 2017.
- [15] D. Nath and P. Ramanathan, "Interfaced circuit using a non-destructive method for moisture measurement," *Microprocessors and Microsystems*, vol. 73, p. 102951, December 2020.
- [16] M. Makky, et al. "Determination of moisture content in rice using non-destructive short-wave near infrared spectroscopy," in *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing LLC, 2019, p. 020014.

- [17] L. Lin, et al., "Rapid-detection sensor for rice grain moisture based on NIR spectroscopy," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 8, p. 1654, Apr. 2019.
- [18] C. Li, et al., "Developing an online measurement device based on resistance sensor for measurement of single grain moisture content in drying process," *Sensors*, vol. 20, no. 15, p. 4102, Jul. 2020.
- [19] F. Zhao, et al., "A novel online moisture monitoring method for vacuum drying of lithium ion battery powder," *Powder Technology*, vol. 375, pp. 244-248. Jul. 2020.
- [20] S. Hemhirun and P. Bunyawanichakul, "The use of Temperature and Relative Humidity Sensors to Estimate the Final Moisture Content of the Drying Process," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 9, no. 5, pp. 926-932, May 2020.
- [21] Z. Wang, et al., "Moisture soft sensor for agitated pan dryers using a hybrid modeling approach," *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 586, p. 119518, June 2020.
- [22] S. Sotong and K. Ruaypom, "Germinated Rice Drying by Fluidized Bed Technique using Superheated Steam," *Rajabhat Rambhai Barni Research Journal*, vol. 10, no. 3, pp. 88-97, 2016.
- [23] P. Bunyawanichakul, "Evolution of preparation process of reference sample for paddy moisture meter," *Srinakharinwirot University (Journal of Science and Technology)*, vol. 5, no. 9, pp. 47-55, 2013.
- [24] Worldchips. (2021, June 25). Soil Moisture Sensor and Detector Module Soil Moisture Tester Soil Moisture Corrosion Resistance Tester for Arduino. [Online]. Available: <https://www.aliexpress.com>
- [25] YX Electronic Components. (2021, June 25). Capacitive Soil Moisture Sensor Not Easy to Corrode Wide Voltage for Arduino. [Online]. Available: <https://www.aliexpress.com>
- [26] P. Sudasna-na-Ayudhya and P. Luangpaiboon, "Design and Analysis of Experiments," Bangkok: Top Publishing, 2008.
- [27] A. Puttipipatkajorn and A. Puttipipatkajorn, "Development of Portable Device for Moisture Content Determination of Para Rubber Sheet Based on Near Infrared Spectroscopy," *Thai Science and Technology Journal*, pp. 1845-1856, 2020.
- [28] A.-N. Spiess and N. Neumeyer, "An evaluation of R^2 as an inadequate measure for nonlinear models in pharmacological and biochemical research: a Monte Carlo approach," *BMC pharmacology*, vol. 10, no. 1, pp. 1-11, 2010.
- [29] C. Patcharachoenwong, K. Hernmek, and W. Kimpan, "Arrival Time Prediction Model to a Pier for Public Transportation Boats," *Journal of Science Ladkrabang*, vol. 29, no. 2, pp. 31-44, 2020.
- [30] P. Waramit, N. Weerayuth and U.Teeboonma, "Comparison of Hot Air Drying Model between Empirical Model and Artificial Neural Network Model," *Journal of*

- Science & Technology, Ubonratchathani University*, vol. 3, no. 1, pp. 60-68, 2016.
- [31] S. Wu, B. Zhang, Y. Tian, S. Zhou and H. Ma, "A grain moisture model based on capacitive sensor," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1074, p. 012120, 2018.
- [32] S. Wu, B. Zhang, Y. Tian, S. Zhou and H. Ma, "A grain moisture model based on capacitive sensor," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1074, p. 012120.
- [33] B. Besharati, A. Lak, H. Ghaffari, H. Karimi and M. Fattahzadeh, "Development of a model to estimate moisture contents based on physical properties and capacitance of seeds," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 318, p. 112513.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

อิทธิพลของสภาวะการผลิตและการเก็บรักษาต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของพริกป่นและพริกป่นคั่ว

ณิชาภรณ์ สุขชุ่ม สุพิชญา สุรเสรีวงศ์ และ ขวัญหทัย แซ่ทอง*

วิทยาลัยนวัตกรรมการเกษตรและเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยรังสิต

52/347 ตำบลหลักหก อำเภอเมือง จังหวัดปทุมธานี 12000

รับบทความ 22 กุมภาพันธ์ 2564 แก้ไขบทความ 9 กรกฎาคม 2564 ตอบรับบทความ 16 สิงหาคม 2564

บทคัดย่อ

การพัฒนาผลิตภัณฑ์พริกป่นโดยการสำรวจทัศนคติ และความต้องการของผู้บริโภคเพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาพริกป่นคุณภาพสูง ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ และสมบัติทางเคมีกายภาพระหว่างเก็บ เริ่มจากนำพริกสดเฉพาะที่มีผลดี สีแดง ลำงและลูกในน้ำที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นแช่พริกในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ร้อยละ 0.25 ร่วมกับ กรดซิตริก ร้อยละ 1.0 เป็นเวลา 30 นาที อบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 ชั่วโมง จนได้พริกแห้งความชื้นประมาณร้อยละ 8 นำพริกแห้งที่ได้ได้คั่วแล้วมาบดเป็นพริกป่น การคั่วพริกแห้งก่อนนำไปบดเป็นพริกป่นส่งผลต่อการลดลงของค่าความชื้น ค่าวอเตอร์แอคติวิตี ค่าสี และค่าอะฟลาทอกซิน ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของพริกป่นระหว่างเก็บพบว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพและร้อยละการยอมรับของผู้บริโภค ขณะที่บรรจุภัณฑ์ชนิดอลูมิเนียมฟอยล์ช่วยชะลอการเพิ่มขึ้นของปริมาณอะฟลาทอกซินในพริกป่นได้ดีกว่าบรรจุภัณฑ์ชนิดโพลิโพรพิลีน อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์พริกป่นที่พัฒนาได้มีจำนวนเชื้อแบคทีเรียกลุ่มแอโรบิกในปริมาณต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ไม่พบยีสต์และรา และมีปริมาณสารพิษอะฟลาทอกซินอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานภายหลังการเก็บนาน 12 สัปดาห์ ในทุกสภาวะ ซึ่งสอดคล้องกับความต้องการของผู้บริโภคที่ตระหนักถึงคุณภาพ ความสะอาด และความปลอดภัยเป็นปัจจัยสำคัญในการตัดสินใจเลือกซื้อผลิตภัณฑ์จากพริก

คำสำคัญ : การพัฒนาผลิตภัณฑ์; พริกป่น; การเตรียม; การเก็บ; อะฟลาทอกซิน

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +66 2997 2200 ต่อ 3212, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: k_charetong@yahoo.com

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Influence of Processing and Storage Conditions on Physicochemical Properties of Chili Powder and Roasted Chili Powder

Nichaporn Sukchum Supitchaya Surasereewong and Kwanhathai Chaethong*

College of Agricultural Innovation and Food, Rangsit University
52/347 Lak-Hok, Muang, Pathum Thani 12000

Received 22 February 2021; Revised 9 July 2021; Accepted 16 August 2021

Abstract

Development of chili powder products through consumer survey to be used as the information for the development of high quality chili powder. The quality and physicochemical properties of chili powder during storage were investigated. The sound and red pods of fresh chili were washed and blanched at 100°C for 3 min. Blanched chili pods were soaked in 0.25% sodium metabisulfite with 1.0% citric acid for 30 min prior to drying in a tray dryer at 65°C for 14 h to obtain dried chili with a final moisture content of approximately 8%. Dried chili pods without stem were ground to obtain chili powder. Roasting before grinding resulted in the reduction of moisture, a_w and color values. The results of study on the quality changes of chili powder during storage showed that storage temperature was the important factor affecting the changes in physicochemical properties and percentage of consumer acceptance. Meanwhile, aluminum foil packaging slowed the increase of aflatoxin content in chili powder better than polypropylene. However, aerobic bacterial count of the developed chili powder product is very low compared to the microbiological specifications while yeast and mold were not detected. The product contains a standard level of aflatoxin content after 12 weeks in all storage conditions which corresponds to the awareness of consumers in terms of quality, cleanliness and safety are important factors in deciding to buy chili products.

Keywords : Product Development; Chili Powder; Pretreatment; Storage; Aflatoxin

* Corresponding Author. Tel.: +66 2997 2200 ext. 3212, E-mail Address: k_charetong@yahoo.com

1. บทนำ

พริก (Capsicums) มีความสำคัญต่อวิถีชีวิตคนไทยโดยเป็นเครื่องปรุงรสที่สำคัญในอาหาร และแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เพื่อเพิ่มมูลค่า เช่น น้ำพริก ซอสพริก และเครื่องแกงสำเร็จรูป เป็นต้น อีกทั้งยังเป็นวัตถุดิบสำคัญในอุตสาหกรรมแปรรูปทั้งอาหารและยา [1] โดยเฉลี่ยแล้วคนไทยบริโภคพริกแห้งและพริกป่นประมาณ 4.87 กิโลกรัมต่อปี [2] ในแต่ละปีประเทศไทยมีปริมาณการใช้พริกเป็นจำนวนมาก จากสถิติการส่งออกและการนำเข้าของกรมศุลกากรปี 2561 การส่งออกพริกและผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพริกทั้งในรูปพริกสด พริกแห้ง พริกบดหรือป่น และซอสพริก ประมาณ 88,697 ตัน คิดเป็นมูลค่า 3,995.28 ล้านบาท และมีการนำเข้าประมาณ 104,574 ตัน เป็นมูลค่าสูงถึง 6,426.58 ล้านบาท [3]

พริกป่น เป็นผลิตภัณฑ์แปรรูปจากพริกเพื่อให้สามารถเก็บได้นานขึ้น โดยการนำผลพริกสดที่สุกหรือแก่จัด อาจมีก้านผลติดอยู่ นำไปล้างทำความสะอาดหรืออบให้แห้งแล้วนำไปคั่วและบดได้เป็นพริกป่น [4] แต่การผลิตโดยส่วนใหญ่ยังเป็นแบบดั้งเดิม คือ การนำพริกสดตากแดดธรรมชาติบนลานดินโดยไม่มีการคัดพริกที่เน่าเสียและล้างทำความสะอาดก่อน อีกทั้งพริกบดหรือพริกป่นนำเข้าจากต่างประเทศที่นำเข้ามาในปริมาณมากยังคงมีปัญหาด้านคุณภาพและความปลอดภัย แต่ละปีประเทศไทยมีปริมาณการใช้พริกแห้งจำนวนมาก จากข้อมูลสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร [5] พบว่ามีการนำเข้าพริกแห้งปีละกว่าห้าพันเก้าร้อยล้านบาท เป็นการนำเข้าจากประเทศเพื่อนบ้าน เนื่องจากมีราคาถูกกว่า แต่ก็มีปัญหาในด้านคุณภาพและความปลอดภัย มักพบสิ่งเจือปน การปนเปื้อนเชื้อรา และอะฟลาทอกซินซึ่งเป็นสารกระตุ้นการก่อมะเร็งที่ตับและอวัยวะอื่นๆ ค่อนข้างสูง C. Chuaysrinule et al. [6] รายงานการปนเปื้อนเชื้อราในพริกแห้งและพริกป่นที่จำหน่ายในประเทศไทยสูงเกินร้อยละ 85 โดยส่วนใหญ่เป็นเชื้อราที่

สร้างสารพิษอะฟลาทอกซิน จากรายงานผลการสำรวจตลาดพริกแห้งและพริกป่นจากแหล่งผลิต ตลาดค้าส่ง และตลาดค้าปลีกในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล พบว่ามีจำนวนตัวอย่างพริกป่นมากกว่าร้อยละ 50 ที่มีปริมาณจุลินทรีย์สูงกว่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน แม้จะไม่พบการปนเปื้อนอะฟลาทอกซิน [7] L.B. Bullerman and A. Bianchini [8] พบว่าจะทำให้ปริมาณอะฟลาทอกซินลดลงนั้นต้องใช้ความร้อนสูง แต่ยังไม่สามารถกำจัดสารพิษจากเชื้อราให้หมดไปได้ ที่อุณหภูมิสูงกว่า 150 องศาเซลเซียส ปริมาณสารพิษอะฟลาทอกซินจะลดความเข้มข้นได้ปานกลาง จะเห็นได้ว่าการใช้อุณหภูมิสูงเพียงอย่างเดียวไม่สามารถลดปริมาณอะฟลาทอกซินได้เพียงพอ จึงมีผู้บริโภคบางส่วนเลิกบริโภคพริกแห้งและพริกป่นจากสาเหตุดังกล่าว การปรับปรุงคุณภาพและมาตรฐานการแปรรูปพริกป่นที่มีคุณภาพและปลอดภัยจึงมีบทบาทสำคัญต่อการบริโภคและการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ

ด้วยเหตุนี้ จึงมีแนวคิดในการพัฒนาผลิตภัณฑ์พริกป่นคุณภาพสูงที่ตรงตามความต้องการของผู้บริโภค โดยเริ่มจากศึกษาทัศนคติ และความต้องการของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์แปรรูปจากพริกโดยการใช้แบบสอบถามในการสำรวจข้อมูลทางประชากรศาสตร์และการศึกษาสภาวะการผลิตและการเก็บรักษาที่มีต่อคุณภาพพริกป่นที่ผลิตได้ โดยวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพจุลินทรีย์ ตรวจวิเคราะห์หาปริมาณสารพิษอะฟลาทอกซิน และทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัตถุดิบ

พริกสดพันธุ์จินดา ชื่อจากตลาดสี่มุมเมือง จังหวัดปทุมธานี นำมาคัดเฉพาะผลที่มีสีแดงจัด สม่ำเสมอ และไม่มีตำหนิ เก็บที่อุณหภูมิ 4±2 องศาเซลเซียส

2.2 วิธีการทดลอง

2.2.1 การศึกษาทัศนคติ และความต้องการของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์จากพริก

ศึกษาทัศนคติและความต้องการของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์พริกแห้ง พริกป่นและผลิตภัณฑ์แปรรูปจากพริก เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาเป็นแนวทางในการผลิตพริกป่นคุณภาพสูงที่ตรงกับความต้องการของผู้บริโภค โดยการสร้างแบบสอบถามในการสำรวจข้อมูลทางประชากรศาสตร์ และสอบถามเกี่ยวกับพฤติกรรมการซื้อและการบริโภค ความตระหนักของผู้บริโภคที่มีต่อพริกแห้ง/พริกป่น และผลิตภัณฑ์แปรรูปจากพริก จากกลุ่มเป้าหมายจำนวน 150 คน ด้วยวิธีการสุ่มตัวอย่างโดยไม่อาศัยความน่าจะเป็น (Non-probability) แบบสะดวก (Convenience Sampling) [9], [10] กำหนดเกณฑ์อายุของผู้บริโภคตั้งแต่ 18 ปีขึ้นไป ในมหาวิทยาลัยรังสิต และเขตจังหวัดปทุมธานี

2.2.2 การศึกษาสภาวะการผลิตและการเก็บรักษาต่อคุณภาพพริกป่น

นำพริกที่ได้มาผ่านกระบวนการเตรียมโดยการลวกน้ำเดือดอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที เพื่อให้มีปริมาณจุลินทรีย์ต่ำ และยับยั้งเอนไซม์ จากนั้นแช่พริกในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ ร้อยละ 0.25 ร่วมกับกรดซิตริก ร้อยละ 1.0 เป็นเวลา 30 นาที [11] จากนั้นอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาด (Tray Dryer) ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 ชั่วโมง จนได้พริกแห้งความชื้นสุดท้ายประมาณ ร้อยละ 8

นำพริกแห้งที่ได้มาผลิตเป็นพริกป่น โดยนำพริกแห้งที่คัดก้านออกแล้วแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งนำไปบดเป็นพริกป่นทันที และอีกส่วนนำไปคั่วโดยดัดแปลงวิธีการคั่วโดยใช้ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เกลี่ยบางในถาดสแตนเลสที่ผ่านการอบ และกลับถาด 1 ครั้ง

ได้เป็นพริกคั่วและนำไปบดเป็นพริกป่น นำพริกป่นที่คั่วและไม่คั่วเก็บในบรรจุภัณฑ์แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ โพลีโพรพิลีน (Polypropylene, PP) และอลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminum Foil, AL) ปริมาณ 100 กรัมต่อถุง เก็บที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ (20, 30 และ 40 องศาเซลเซียส) โดยมีอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิควบคุม สุ่มตัวอย่างพริกป่นออกมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพ ได้แก่ ปริมาณความชื้น [12] วัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w) ด้วยเครื่อง AquaLab (รุ่น Series 3 TE. บริษัท Decagon Devices, Inc., ประเทศสหรัฐอเมริกา) วัดค่าความสว่าง (L^*), ค่าสีแดง (a^*), ค่าสีเหลือง (b^*) ด้วยเครื่อง Spectrophotometer (Nippon Denshoku SE6000, Tokyo, Japan) แล้วคำนวณค่าความแตกต่างของสีโดยรวม (ΔE^*) จากสมการ (1) เมื่อ L_0^* , a_0^* และ b_0^* คือค่าสีของพริกป่นก่อนเก็บ

$$\Delta E^* = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (1)$$

วิเคราะห์หาสารให้ความเผ็ด (Capsaicinoids) โดยใช้เครื่อง HPLC (Shimadzu LC-10AD, a Detectors (RF-10AXL), Japan) [13] วิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด [14] ปริมาณยีสต์และรา [15] วิเคราะห์หาปริมาณสารอะฟลาทอกซินโดยใช้ ELISA kit (MycJudge; Tokyo, Japan) และทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค จำนวน 50 คน โดยวิธีให้คะแนนความชอบ (9-Point Hedonic Scale)

2.2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ตั้งแต่การเตรียมตัวอย่างไปจนถึงการวิเคราะห์ และนำข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าคุณภาพต่างๆ มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ถ้าพบนัยสำคัญทางสถิติจะคำนวณค่า Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) เพื่อทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

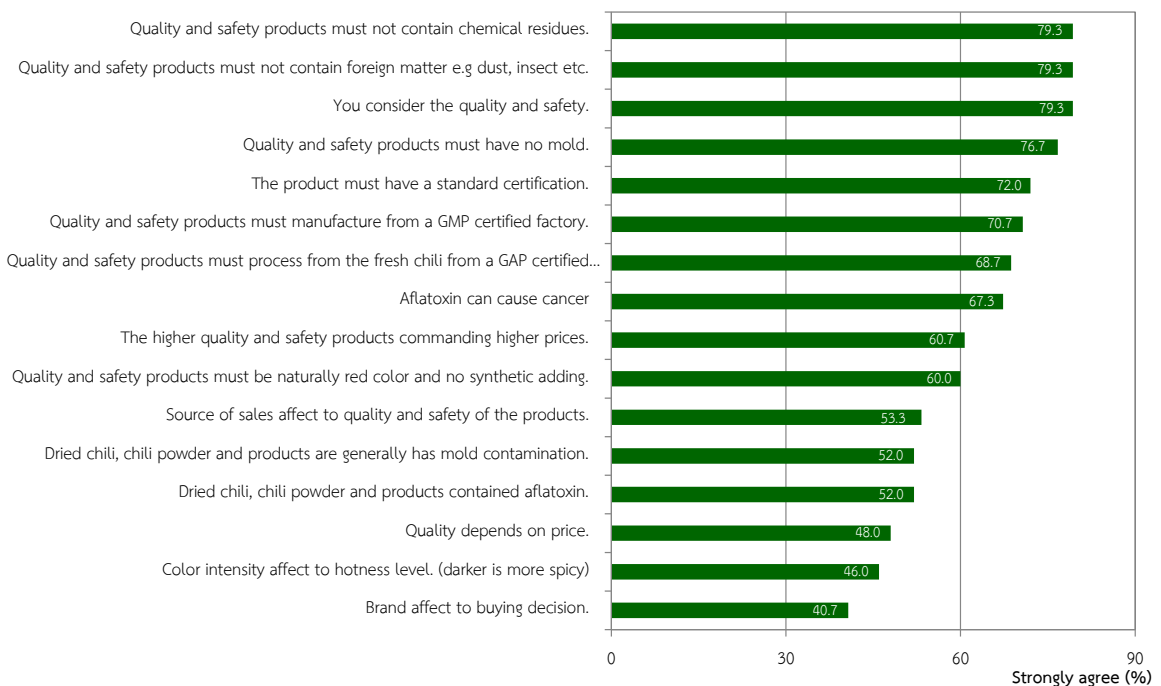
3.1 ผลการศึกษาทัศนคติ และความต้องการของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์จากพริก

จากผลสำรวจผู้บริโภคจำนวน 150 คน สัดส่วนเป็นเพศชายร้อยละ 29 และเพศหญิงร้อยละ 71 โดยส่วนใหญ่อายุอยู่ในช่วง 18-25 ปี การศึกษาระดับปริญญาตรี อาชีพนักศึกษา และพนักงานเอกชน และรายได้ 20,001-50,000 บาท พบการบริโภคพริกในรูปแบบต่างๆ ได้แก่ พริกสด พริกแห้ง พริกป่น ซอสพริก และน้ำพริก เป็นต้น โดยผลสำรวจพบว่าพริกป่นเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการบริโภคสูงสุด คิดเป็นร้อยละ 61 จากผลสำรวจผู้ที่รับประทานเผ็ดร้อยละ 78 มีการบริโภคพริกในปริมาณเฉลี่ย 1-3 ช้อนชาต่อวัน และมีความถี่การบริโภค 3-5 วันต่อสัปดาห์ แหล่งในการซื้อพริกส่วนใหญ่คือ ตลาดสด และผู้บริโภคต้องการให้ผลิตภัณฑ์จากพริกมีอายุการเก็บนาน 3-6 เดือน

รูปที่ 1 แสดงถึงความตระหนักของผู้บริโภคและปัจจัยสำคัญในการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์แปรรูปจากพริก จากผลการสำรวจพบว่าผู้บริโภคให้ความตระหนักสูงสุดถึงคุณภาพและความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ สินค้าต้องมีเครื่องหมายรับรองคุณภาพ ต้องมีการแปรรูปจากพริกที่มีคุณภาพปลอดภัย ไม่มีเชื้อรา ไม่มีสิ่งแปลกปลอม เช่น เศษฝุ่นผง แมลง และต้องไม่มีสารตกค้างในผลิตภัณฑ์พริกแห้ง พริกป่น หรือผลิตภัณฑ์ที่แปรรูปจากพริก และผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและปลอดภัยต้องผ่านกระบวนการผลิตที่ได้มาตรฐานถูกสุขลักษณะ (Good Manufacturing Practice, GMP)

3.2 ผลการศึกษาสภาวะการผลิตและการเก็บรักษาต่อคุณภาพพริกป่น

จากผลการศึกษาทัศนคติ และความต้องการของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์จากพริก นำมาใช้เป็นข้อมูลใน



รูปที่ 1 ความตระหนักของผู้บริโภคและปัจจัยสำคัญในการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์แปรรูปจากพริก (N=150 คน)

การพัฒนาพริกป่นที่มีคุณภาพและความปลอดภัยตามความต้องการของผู้บริโภคและศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ และสมบัติทางเคมีกายภาพระหว่างเก็บ โดยใช้รูปแบบสภาวะการผลิตของ K. Chaethong and R. Pongsawatmanit [11] และวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพและจุลินทรีย์ของพริกป่นที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 1) พบว่าพริกป่นที่ผลิตได้จากพริกแห้งที่นำไปคั่วมีปริมาณความชื้นลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับความชื้นในพริกป่นที่ไม่คั่ว ($p \leq 0.05$) เช่นเดียวกับการลดลงของค่า a_w เนื่องจากระบวนการคั่วซึ่งมีอิทธิพลมากกว่าการอบแห้งในการดึงน้ำออกจากผลิตภัณฑ์และการลดลงของค่า a_w [16] อย่างไรก็ตามค่าความชื้นของพริกป่นทั้ง 2 แบบที่ผลิตได้ไม่เกินค่าความชื้นที่มาตรฐานกำหนดให้ไม่เกินร้อยละ 13.5 [17] ค่าสีความสว่าง (L^*) ของพริกป่นที่ไม่ผ่านการคั่วมีค่าเท่ากับ 32.8 มากกว่าในพริกป่นคั่วซึ่งมีค่าเท่ากับ 30.9 ($p \leq 0.05$) แสดงว่ากระบวนการคั่วก่อนบดเป็นพริกป่นทำให้มีสีเข้ม การใช้อุณหภูมิสูงในการคั่วทำให้สารสีน้ำตาลในตัวอย่างเพิ่มขึ้นซึ่งสารสีน้ำตาลดังกล่าวเกิดจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard Reaction) และปฏิกิริยาการเปลี่ยนเป็นคาราเมลของน้ำตาล (Caramelization) [18], [19] ขณะที่ค่าสีแดง (a^*) ของพริกป่นคั่วมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ภายหลังการนำพริกแห้งไปคั่วก่อนบดที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เนื่องจากสารแคปแซนทิน (Capsanthin) ที่เป็นสารประกอบหลักที่ให้สีแดงในพริกลดลงเมื่อผ่านกระบวนการให้ความร้อน [20] เช่นเดียวกับค่าสีเหลือง (b^*) ของพริกป่นที่ไม่ผ่านการคั่วมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับพริกป่นคั่ว อาจเนื่องมาจากการสลายตัวของสารประกอบให้สีในพริกภายหลังกระบวนการคั่ว ผลการตรวจสอบคุณภาพด้านจุลินทรีย์ในพริกป่นที่ผลิตได้ทั้งสองแบบพบว่ามีความชื้นแบคทีเรียกลุ่มแอโรบิกในปริมาณต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานสินค้าเกษตร (พริกป่น) ที่กำหนดให้จำนวนเชื้อแบคทีเรียกลุ่ม

ตารางที่ 1 สมบัติทางเคมีกายภาพและจุลินทรีย์ของพริกป่นที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมที่แตกต่างกัน

Properties	Unroasted	Roasted
Moisture (% wb)	8.3±0.2 ^a	5.2±0.5 ^b
a_w	0.321±0.000 ^a	0.270±0.000 ^b
L^*	32.8±0.9 ^a	30.9±0.9 ^b
a^*	25.4±1.5 ^a	17.2±0.5 ^b
b^*	16.3±1.0 ^a	10.6±0.4 ^b
Total capsaicinoids (mg/100 g,db) ^{ns}	584±26	572±12
Aerobic Plate Count (CFU/g)	<10	<10
Yeasts and Molds (CFU/g)	ND	ND
Aflatoxin (µg/kg, db)	4.55±0.10	<1.49

หมายเหตุ a-b ที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) , ns = not significant

แอโรบิกต้องไม่เกิน 5×10^5 โคโลนีต่อกรัม และไม่พบยีสต์และราในพริกป่นที่ผลิตได้ทั้งสองชนิด ซึ่งมาตรฐานกำหนดต้องไม่เกิน 1×10^2 โคโลนีต่อกรัม และผลการวิเคราะห์ปริมาณอะฟลาทอกซินในพริกป่นไม่คั่วและพริกป่นคั่วมีค่าเท่ากับ 4.55 และน้อยกว่า 1.49 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าที่มาตรฐานกำหนดให้ไม่เกิน 15 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม [21]-สอดคล้องกับรายงานวิจัยที่ระบุว่าความร้อนจากกระบวนการคั่วช่วยลดปริมาณสารอะฟลาทอกซิน [22]

ผลการเก็บพริกป่นคั่วและไม่คั่วในบรรจุภัณฑ์แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ PP และ AL (รูปที่ 2) และเก็บที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (5, 20, 30 และ 40 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ พบว่าอุณหภูมิและระยะเวลาเก็บมีผลต่อการเปลี่ยนแปลง เมื่อเก็บไป 12 สัปดาห์ โดยพริกป่นคั่วและไม่คั่วมีความชื้น และค่า a_w เพิ่มขึ้นเมื่อเก็บนานขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเก็บที่อุณหภูมิสูง 40 องศาเซลเซียส พริกป่นคั่วและไม่คั่วมีค่า



ก)

ข)

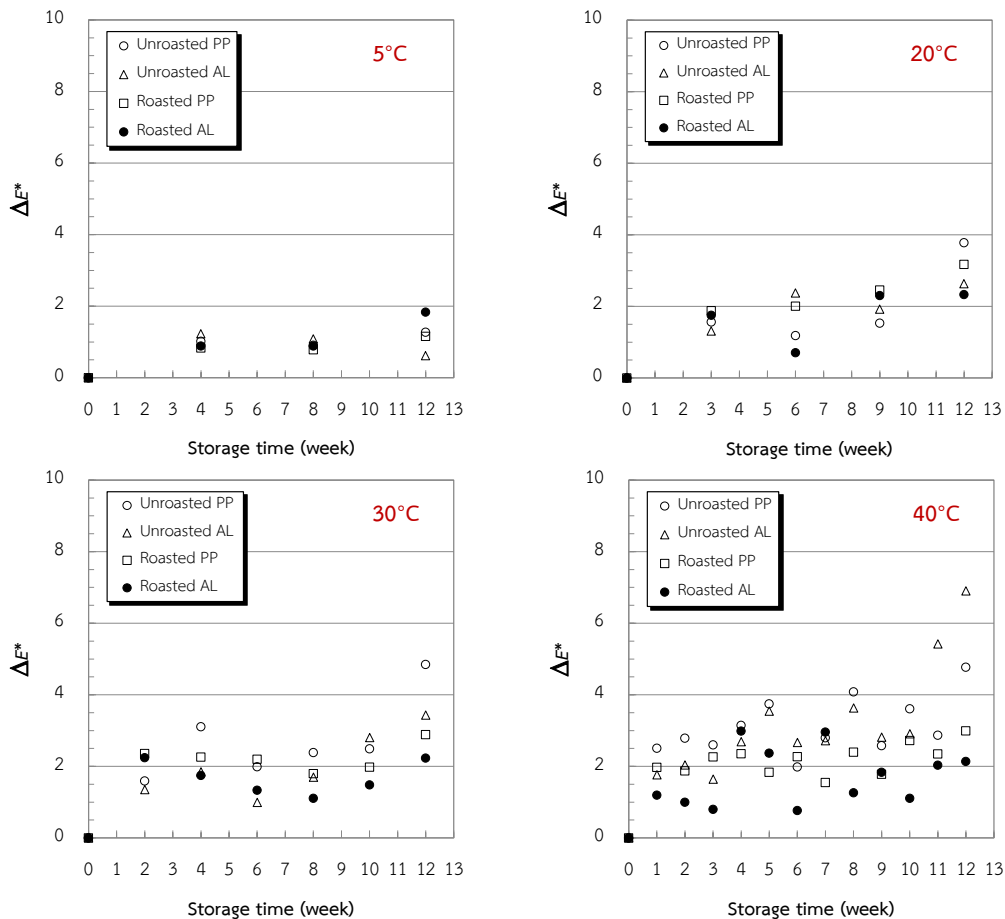
รูปที่ 2 ก) พริกป่นที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ชนิด AL

ข) พริกป่นที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ชนิด PP

ความชื้นเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็นเท่ากับร้อยละ 6.4 และ 8.6 ตามลำดับ ซึ่งยังไม่เกินมาตรฐานค่าความชื้นพริกป่นที่กำหนด (ร้อยละ 11) เช่นเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงของค่า a_w พริกป่นคั่วและไม่คั่วมีค่า a_w เพิ่มขึ้นเป็นเท่ากับ 0.280 และ 0.345 ตามลำดับ ซึ่งยังต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานกำหนดให้ไม่เกิน 0.6 ในอาหารแห้ง [23] ค่า ΔE^* ในตัวอย่างพริกป่นทั้งสองที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ที่แตกต่างกัน และเก็บที่อุณหภูมิต่างๆ ค่า ΔE^* มีค่ามากแสดงว่าผลิตภัณฑ์มีการเปลี่ยนแปลงสีไปจากก่อนเก็บมาก จากข้อมูลหลังเก็บ 12 สัปดาห์พบว่าพริกป่นไม่คั่วมีแนวโน้มการเพิ่มของค่า ΔE^* มากกว่าพริกป่นคั่ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเก็บที่อุณหภูมิสูง 30 และ 40 องศาเซลเซียส (รูปที่ 3) ทั้งนี้เนื่องจากพริกป่นคั่วมีการเปลี่ยนแปลงของค่าสีตั้งแต่เริ่มต้นมาจากผลของกระบวนการคั่วด้วยอุณหภูมิสูง ทำให้สารสีน้ำตาลในตัวอย่างเพิ่มขึ้นและมีค่า a^* ค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญจากสารแคปแซนทีนที่เป็นสารประกอบหลักที่ให้สีแดงในพริกภายหลังการคั่ว จึงทำให้มีการเพิ่มขึ้นของค่า ΔE^* ในพริกป่นคั่วน้อยกว่าพริกป่นไม่คั่ว โดยพบการเพิ่มของค่า ΔE^* ตั้งแต่สัปดาห์ที่ 1 ของการเก็บในผลิตภัณฑ์พริกป่นทั้งสองแบบที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ PP และ AL ขณะที่ค่า ΔE^* ในพริกป่นที่เก็บอุณหภูมิ

ควบคุม 5 องศาเซลเซียส มีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากอุณหภูมิเก็บมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสีสอดคล้องกับ R. L. Coleman et al. [24] และ D. S. Lee et al. [25] ที่รายงานว่าอุณหภูมิต่ำ 15 และ 25 องศาเซลเซียส สามารถคงสีในพริกแดงและพริกเขียวภายหลังการทำแห้งได้และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 40 องศาเซลเซียส พริกแห้งจะมีสีแดงจางไปและมีสีน้ำตาลและสีดำเกิดขึ้น ซึ่งอธิบายได้จากการสลายตัวของรงควัตถุให้สี Carotenoid และปฏิกิริยาการเกิดสารสีน้ำตาล [26]

ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านการยอมรับของผู้บริโภค จำนวน 50 คน ในระหว่างเก็บผลิตภัณฑ์พริกป่น เป็นเวลา 12 สัปดาห์ พบว่า อุณหภูมิและระยะเวลาเก็บส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค โดยที่อุณหภูมิการเก็บ 5 และ 20 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยตั้งแต่เริ่มเก็บจนถึงสัปดาห์ที่ 12 อยู่ในช่วงการยอมรับของผู้บริโภคระหว่างร้อยละ 80-90 (รูปที่ 4) ขณะที่พริกป่นที่เก็บที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส มีการยอมรับน้อยกว่าร้อยละ 80 ในสัปดาห์ที่ 10 เป็นต้นไป ส่วนพริกป่นที่เก็บที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีร้อยละการยอมรับต่อผลิตภัณฑ์พริกป่นไม่คั่วลดลงในสัปดาห์ต้นๆของการเก็บ แตกต่างจากในผลิตภัณฑ์พริกป่นคั่วซึ่งมีค่าร้อยละการยอมรับต่อผลิตภัณฑ์ลดลงน้อยกว่าร้อยละ 80 หลังสัปดาห์ที่ 8 เป็นต้นไป ซึ่งร้อยละการยอมรับของผู้บริโภคสัมพันธ์กับแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า ΔE^* โดยพริกป่นคั่วที่มีค่า ΔE^* เพิ่มขึ้นน้อยกว่าพริกป่นไม่คั่ว สอดคล้องกับร้อยละการยอมรับซึ่งมีค่าลดลงน้อยกว่าในช่วงต้นของการเก็บในทุกอุณหภูมิ และร้อยละการยอมรับมีค่าใกล้เคียงกันหลังการเก็บ 10 สัปดาห์เป็นต้นไป โดยในสัปดาห์ที่ 12 ของการเก็บที่อุณหภูมิ 30 และ 40 องศาเซลเซียส พริกป่นคั่วและไม่คั่วที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ชนิด PP และ AL มีการยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์ลดลงใกล้เคียงกัน จากผลการวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็น

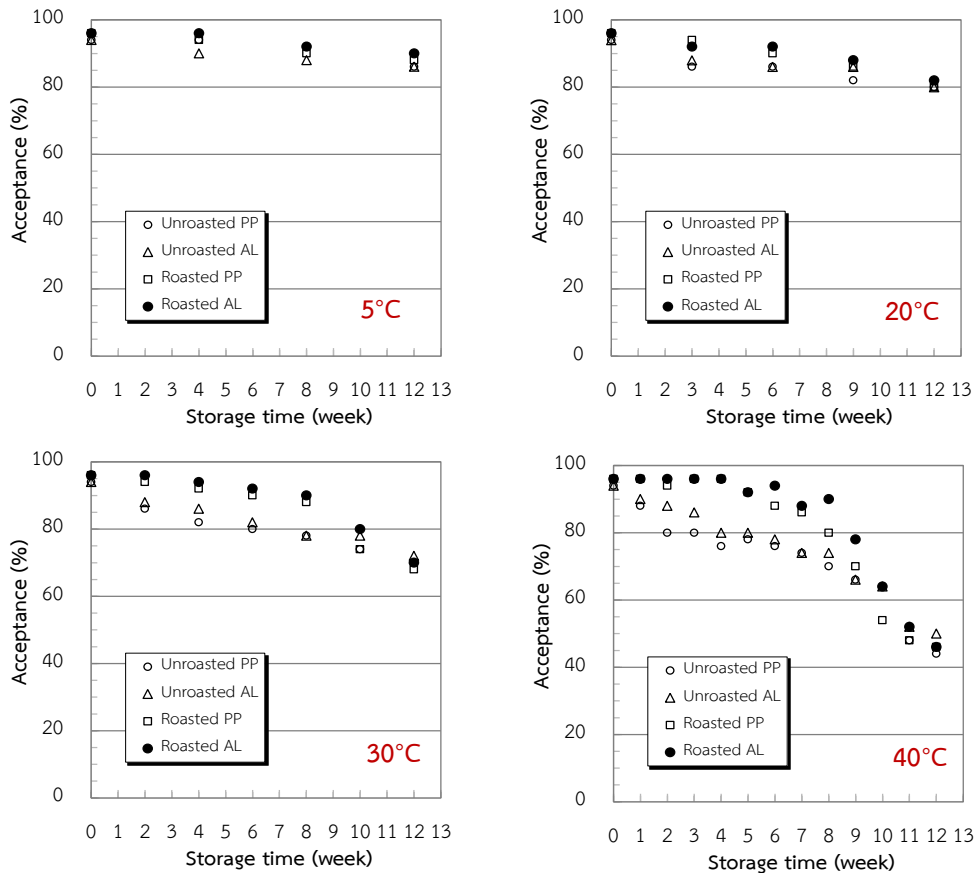


รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงค่า ΔE^* ของผลิตภัณฑ์พริกป่นที่เก็บอุณหภูมิแตกต่างกัน เป็นเวลา 12 สัปดาห์

เห็นได้ว่าการเก็บที่อุณหภูมิสูงมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีการเสื่อมคุณภาพเร็วขึ้น การเก็บที่อุณหภูมิ ต่ำจะช่วยลดการเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งในด้านชีวเคมีและจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุการเสื่อมเสียในอาหารได้ [27] ขณะที่บรรจุภัณฑ์ที่แตกต่างกันกลับไม่ส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค แตกต่างจากรายงานของ M. Rattanaporn [28] ซึ่งรายงานอายุการเก็บรักษาของพริกป่นในบรรจุภัณฑ์ชนิด PP และ AL ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เท่ากับ 28 และ 56 วัน ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์หาปริมาณอะฟลาทอกซินในผลิตภัณฑ์พริกป่นและพริกป่นคั่วในบรรจุภัณฑ์แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ PP และ AL และเก็บที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (5, 20, 30 และ 40 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา

12 สัปดาห์ แสดงดังตารางที่ 2 พบการเพิ่มขึ้นของปริมาณอะฟลาทอกซินในผลิตภัณฑ์พริกป่นทั้งสองแบบเมื่ออุณหภูมิการเก็บเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในตัวอย่างพริกป่นไม่คั่ว โดยบรรจุภัณฑ์ชนิด AL มีการเพิ่มขึ้นของอะฟลาทอกซินน้อยกว่าในบรรจุภัณฑ์ชนิด PP อาจเนื่องมาจากการเจริญเติบโตของเชื้อราและสร้างสารพิษอะฟลาทอกซินที่อุณหภูมิ 25-40 องศาเซลเซียส [29] โดยพริกป่นคั่วซึ่งมีปริมาณอะฟลาทอกซินน้อยกว่าพริกป่นไม่คั่วตั้งแต่ก่อนเก็บ มีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเปรียบเทียบกับค่าเริ่มต้นที่อุณหภูมิการเก็บ 30 และ 40 องศาเซลเซียส และไม่แตกต่างระหว่างบรรจุภัณฑ์ต่างชนิดกัน ซึ่งให้เห็นว่ากระบวนการคั่วช่วยในการลดและชะลอการเพิ่มขึ้นของอะฟลาทอกซินในระหว่างเก็บ



รูปที่ 4 ร้อยละการยอมรับที่มีต่อผลิตภัณฑ์พริกป่นที่เก็บอุณหภูมิแตกต่างกัน เป็นเวลา 12 สัปดาห์

สอดคล้องกับรายงานที่ระบุว่ากระบวนการคั่วช่วยลดปริมาณอะฟลาทอกซินได้ถึงร้อยละ 45-83 [30] อย่างไรก็ตามพริกป่นที่ผลิตได้ทั้งสองแบบภายหลังการเก็บ 12 สัปดาห์มีปริมาณอะฟลาทอกซินไม่เกินที่มาตรฐานกำหนดไว้ คือ ต้องไม่เกิน 15 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม [17] ในขณะที่ปริมาณอะฟลาทอกซินที่สุ่มตรวจในตัวอย่างพริกแห้งและพริกป่นที่จำหน่ายตามท้องตลาดในประเทศไทย จำนวน 120 ตัวอย่างพบปริมาณอะฟลาทอกซินในพริกป่นมากกว่า 19.7 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และในพริกแห้งมากกว่า 20.8 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม [6] ซึ่งให้เห็นว่าสถานะการผลิตที่ใช้ในการศึกษานี้ เริ่มตั้งแต่การคัดเลือกเมล็ดพริกที่สมบูรณ์ การลวก และแช่พริกด้วยโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ร่วมกับกรดซิตริกก่อน

นำไปทำแห้ง สามารถนำไปใช้ในการผลิตพริกป่นและพริกป่นคั่วได้ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้มีจำนวนเชื้อแบคทีเรียกลุ่มแอโรบิกในปริมาณต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ไม่พบยีสต์และรา และมีปริมาณสารพิษอะฟลาทอกซินอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานภายหลังการเก็บทุกสภาวะนาน 12 สัปดาห์ และตรงตามความต้องการของผู้บริโภคที่ตระหนักถึงคุณภาพ ความสะอาด และความปลอดภัย

4. สรุป

การผลิตพริกป่นคุณภาพสูงโดยอาศัยผลการศึกษาค้นคว้าความต้องการของผู้บริโภคที่ตระหนักถึงคุณภาพ ความสะอาด และความปลอดภัยเป็นปัจจัยสำคัญในการ

ตารางที่ 2 ปริมาณอะฟลาทอกซิน (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง) ในพริกป่นที่เก็บอุณหภูมิแตกต่างกัน เป็นเวลา 12 สัปดาห์

Storage temperature	Unroasted		Roasted	
	PP	AL	PP	AL
Freshly prepared	4.55± 0.07 ^{Ca}	4.55± 0.07 ^{Ca}	<1.49	<1.49
5°C	9.75± 0.16 ^{Ba}	5.84± 1.74 ^{Cb}	<1.49	<1.49
20°C	14.29±0.23 ^{Aa}	9.69± 0.08 ^{Cb}	<1.49	<1.49
30°C	13.62± 0.00 ^{Aa}	5.33±0.16 ^{Ab}	1.84±0.00 ^{ABc}	<1.49
40°C	13.33± 0.00 ^{Aa}	8.79± 0.00 ^{Bb}	2.20±0.00 ^{Ac}	2.67±0.08 ^c

หมายเหตุ a-c ที่แตกต่างกันในแนวนอน และ A-C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตัดสินใจเลือกซื้อผลิตภัณฑ์แปรรูปจากพริก พริกป่นที่ผลิตได้จากพริกแห้งที่นำไปคั่วก่อนบดมีปริมาณความชื้นค่า a_w ค่าสี L^* a^* b^* และปริมาณอะฟลาทอกซินลดลงเมื่อเทียบกับพริกป่นไม่คั่วและมีการเปลี่ยนแปลงของสีน้อยกว่าในระหว่างเก็บ อุณหภูมิการเก็บเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสีโดยส่งผลต่อร้อยละการยอมรับของผู้บริโภคที่ลดลง ขณะที่บรรจุภัณฑ์ชนิด AL ช่วยชะลอการเพิ่มขึ้นของปริมาณอะฟลาทอกซินในพริกป่นได้ดีกว่าบรรจุภัณฑ์ชนิด PP อย่างไรก็ตามพริกป่นและพริกป่นคั่วที่ผลิตได้มีปริมาณสารพิษอะฟลาทอกซินอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานไม่เกิน 15 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และสภาวะการเก็บส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสีและความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ ควรเก็บผลิตภัณฑ์พริกป่นในถุงอูมิเนียมฟอยล์และเก็บที่อุณหภูมิต่ำเพื่อคงคุณภาพของพริกป่นไว้ได้นานยิ่งขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ทุนอุดหนุนจากมหาวิทยาลัยรังสิต และขอขอบคุณวิทยาลัยนวัตกรรมการเกษตรและเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยรังสิต ที่สนับสนุนทุนการศึกษา “ต้นกล้าไบโอเทค” (นางสาวณิชากรณ์ สุขชุม)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Wiriya, T. Paiboon and S. Somchat, “Effect of drying air temperature and chemical pretreatments on quality of dried chill,” *International Food Research Journal*, vol. 16, pp. 441-454, 2009.
- [2] U. Mustafa, M. Ali, T. Satapornvorasak and O. Dissataporn, “Food Chain Analysis: Setting Research Priorities,” in *Proceeding of Asia – Thailand*, Taiwan, 2006, pp. 197-24.
- [3] Ministry of Commerce. (2020, December 2). Import-Export Structure of Menucom [Online]. Available: <http://www2.ops3.moc.go.th/>
- [4] R. I. Nogueira, F. E. P. Cornejo, W. A. L. Junior, H. R. Bizzo, R. Antoniassi and S. P. Freitas, “Effects of drying parameters on pepper (*Capsicum spp.*),” in *Proceeding of 2 nd Mercosur Congress*

- on Chemical Engineering and 4th Mercosur Congress on Process Systems Engineering, Brasil, 2005, pp. 154-159.
- [5] Office of Agricultural Economics. (2021, June 29). Dried chili import statistics in 2020 [Online]. Available: http://impexp.oae.go.th/service/import.php?S_YEAR=2563&E_YEAR=2563&PRODUCT_GROUP=5251&PRODUCT_ID=3827&wf_search=&WF_SEARCH=Y
- [6] C. Chuaysrinule, T. Maneeboon, C. Roopkham and W. Mahakarnchanakul, "Occurrence of aflatoxin- and ochratoxin A-producing *Aspergillus* species in Thai dried chilli," *Journal of Agriculture and Food Research*, vol. 2, Dec. 2020.
- [7] P. Runghaphar. (2018, December 4). The Development of Quality for safety chili [Online]. Available: <https://www3.rdi.ku.ac.th/?p=41431>
- [8] L. B. Bullerman and A. Bianchini, "Stability of mycotoxin during food processing," *International Journal of Food Microbiology*, vol. 119, pp. 140-146, 2007.
- [9] P. Suchart, *Social science research methodology*, 1st ed. Bangkok: Lieng Chiang Printing House, 1997.
- [10] P. Kotler, *Marketing Management: Analysis, Planning, Implementation, and Control*, 9th ed. New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1997.
- [11] K. Chaethong and R. Pongsawatmanit, "Influence of sodium metabisulfite and citric acid in soaking process after blanching on quality and storage stability of dried chili," *Journal of Food Processing and Preservation*, vol. 39, no. 6, pp. 2161–2170, 2015.
- [12] Official methods of analysis of AOAC International. 17th ed. Maryland: Gaithersburg Md., 2000.
- [13] M. Contreras-Padilla and E. M. Yahia, "Changes in capsaicinoids during development, maturation, and senescence of chili peppers and relation with peroxidase activity," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 46, no. 6, pp. 2075–2079. 1998.
- [14] BAM. (2001a). (2017, October 17). Bacteriological Analytical Manual Chapter 3: Aerobic Plate Count. In FDA Bacteriological Analytical Manual [Online]. Available:<http://www.cfsan.fda.gov/~ebam/bam-3.html>
- [15] BAM. (2001b). (2017, October 17). Bacteriological Analytical Manual Chapter 18: Yeasts Molds and Microtoxins. In FDA Bacteriological Analytical Manual [Online]. Available:<http://www.cfsan.fda.gov/ebam/bam-18.html>
- [16] C. Bonazzi and E. Dumoulin, "Quality changes in food materials as influenced by drying processes," in *Modern Drying Technology*, vol. 1, E. Tsotsas and A. S. Mujumdar, 1st ed. Weinheim, Germany: Wiley-VCH GmbH, 2011, pp. 1–20.

- [17] *Thai Agricultural Standard*, Pub. L. No. TAS 3004-2017, 2017.
- [18] J. E. Hodge, "Dehydrated Foods, Chemistry of Browning Reactions in Model Systems," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 1, no. 15, pp. 928-943, 1953.
- [19] D. D. Kitts, C. H. Wu, A. Kopec and T. Nagasawa, "Chemistry and genotoxicity of caramelized sucrose," *Molecular Nutrition Food Research*, vol. 50, no. 12, pp.1180-1190, Dec. 2006.
- [20] S. Kim, K. W. Lee, J. Park, H. J. Lee and I. K. Hwang, "Effect of drying in antioxidant activity and changes of ascorbic acid and colour by different drying and storage in Korean red pepper (*Capsicum annuum* L.)," *International Journal of Food Science & Technology*, vol. 41, pp. 90-95, 2006.
- [21] *Thai Agricultural Standard*, Pub. L. No. TAS 3001-2010, 2010.
- [22] R. Farahmandfar and B. Tirgarian, "Degradation of aflatoxins and tocopherols in peanut (*Arachis hypogaea*): Effect of aflatoxin type, time and temperature of roasting," *Drying Technology*, vol. 38, no. 16, pp. 2182-2189, 2020.
- [23] M. J. Jay, *Modern food microbiology*, 1st ed. Gaithersburg: Aspen Publishers, 1998.
- [24] R. L. Coleman, C. J. Wagner, W. L. Bryan and R. E. Berry, "Preliminary evaluations of sulfite pretreatments for sun-dried and hot air-dried green peppers," *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, Florida, vol. 91, pp. 146-148, 2012.
- [25] D. S. Lee, S. K. Chung, H. K. Kim and K. L. Yam, "Nonenzymatic browning in dried red pepper products," *Journal of Food Quality*, vol. 14, pp. 153-163, 1991.
- [26] R. Addala, M. Vasavada, J. Dong and S. Subramanian, "Effect of storage conditions on rate of color degradation of paprika based products," *Journal of Fixed Point Theory and Applications*, vol. 6, pp. 423, 2015.
- [27] M. Rattanaporn, "Quality and Process Improvement of Chilli Powder," M.S. thesis, Kasetsart Univ., Bangkok, Thailand, 2003.
- [28] S. Ruangchai and S. Tantakasem "Storage Quality of Tamarind Chili Paste mixed Roselle," *University of the Thai Chamber of Commerce Journal*, vol. 31, no. 2, pp. 89-98, 2011.
- [29] P. Thippaya, E. Siriporn, S. Warunee and R. Songpon, *Contamination of aflatoxins in legume-base processed food*, 1st ed. Bangkok: Technical and Planning Division, Food and Drug Administration. Ministry of Public Health, 1987.
- [30] B. Kabak, "The fate of mycotoxins during thermal food processing," *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 89, pp. 549-554, 2009.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การประเมินประสิทธิภาพเครื่องอัดลูกอมชิ่ง

ธนศิษฐ์ วงศ์ศิริอำนวย¹ ทิพาพร คำแดง¹ จิระพล กลิ่นบุญ² และ นำพร ปัญโญใหญ่^{1*}

¹ คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

² สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

¹ 63 หมู่ 4 ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

² 96 หมู่ 3 ถนนพุทธมณฑล สาย 5 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170

รับบทความ 31 มีนาคม 2564 แก้ไขบทความ 12 กรกฎาคม 2564 ตอบรับบทความ 16 สิงหาคม 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อออกแบบ ประเมินประสิทธิภาพ และอัตราการทำงาน ในกระบวนการอัดลูกอมชิ่ง เพื่อลดระยะเวลาและแรงงานของวิสาหกิจชุมชน พิมมาลาเฮิร์บส์ จังหวัดเชียงราย โครงสร้างหลักของเครื่องอัดลูกอมชิ่ง ประกอบด้วยระบบส่งกำลังใช้มอเตอร์ขนาด 1.5 กิโลวัตต์ หมุนสกรูอัดผ่านชุดหน้าแปลน และชุดควบคุมความเร็วรอบ ทำการทดสอบที่ความเร็วรอบ 3 ระดับ คือ $1,000 \pm 10$ $1,200 \pm 10$ และ $1,400 \pm 10$ รอบต่อนาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของลูกอมชิ่งหลังอัด 9.7 มิลลิเมตร ผลการทดสอบพบว่า เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพและอัตราการทำงานมีค่าเพิ่มขึ้นตาม ความเร็วรอบที่เหมาะสมในการอัดลูกอมชิ่ง คือ $1,400 \pm 10$ รอบต่อนาที ประสิทธิภาพการทำงานจะแปรผันตามอัตราการป้อนเนื้อชิ่งกวน เมื่ออัตราการป้อนเนื้อชิ่งกวนเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการทำงานเพิ่มขึ้นตาม ทดสอบอัตราการป้อน 8 ระดับ ที่ 300 500 600 900 1,000 1,500 2,000 และ 3,000 กรัม ตามลำดับ ได้ประสิทธิภาพการทำงานสูงสุดคือ 90.85 เปอร์เซ็นต์ ผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์พบว่า ค่าใช้จ่ายในการทำงานของเครื่องอัดลูกอมชิ่งเท่ากับ 18,063.6 บาทต่อปี พิจารณาการทำงานของเครื่องอัดลูกอมชิ่งที่ 792 ชั่วโมงต่อปี มีระยะเวลาคืนทุน 6 เดือน 11 วัน

คำสำคัญ : ประสิทธิภาพ; ลูกอมชิ่ง; อัตราการทำงาน

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Efficiency Evaluate of Ginger Candy Machine

Thanasit Wongsiriamnouy¹ Tipapon Khamdeang¹ Jirapol Klinbun² and
Numpon Panyoyai^{1*}

¹ Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of
Technology Rattanakosin Salaya Campus

¹ 63 Moo 4 Nonghan, Sansai, Chiang Mai 50290

² 96 Moo 3 Phutthamonthon Sai 5 Road, Salaya, Phutthamonthon, Nakhon Pathom 73170

Received 31 March 2021; Revised 12 July 2021; Accepted 16 August 2021

Abstract

This research objective was to design the ginger candy compression machine and determine the efficiency and capacity for saving time and labor in pressing ginger candy for community enterprise groups Pim Malaherb, Chiang Rai Province. Ginger candy compression machine consists of the main structure, namely the extruder and power transmission systems. The machine was designed with two horsepower motors or 1.5 kilowatts to drive the shaft and to rotate the screw through the flange. This study installs the inverter to control the motor speed at $1,000 \pm 10$, $1,200 \pm 10$ and $1,400 \pm 10$ rpm. The extrusion die had an average diameter of 9.7 millimeters. The results found that the motor's speed that was suitable for compression was a Rotational speed of $1,400 \pm 10$ rpm. When the speed increased, the efficiency and the working rate increased too. The amount of ginger stirred was used at 300 500 600 900 1,000 1,500 2,000 and 3,000 grams. The maximum efficiency was 90.85 percent. The efficiency increased with the amount of ginger stirred. The ginger candy compression machine's engineering economic analysis results found that the machine's operating cost was 18,063.6 baht per year. When considering the machine's operation at 792 hours per year, the payback period was 6 months and 11 days.

Keywords : Efficiency; Ginger Candy; Working Rate

** Corresponding Author. Tel.: +668 1784 0249, E-mail Address: n.panyoyai@gmail.com*

1. บทนำ

ขิง เป็นสมุนไพรพื้นบ้านที่หายากและราคาสูง เป็นพืชที่พบได้ทั่วทุกภาคของประเทศไทย ขิงมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ (Zingiber Officinale Roscoe) มีคุณสมบัติทางยาในการลดอาการท้องอืด ช่วยบรรเทาอาการไมเกรน ช่วยป้องกันมะเร็ง ช่วยลดน้ำตาลในเลือด และ ช่วยกระตุ้นให้เลือดไหลเวียนได้สะดวก นอกจากนี้ ยังนิยมเพาะปลูกกันมากในเขตร้อนและกึ่งร้อนหลายประเทศ ทั้ง จีน อินเดีย ในจิริยา ออสเตรเลีย จาเมกาและเฮติ เนื่องจากคุณสมบัติที่ใช้ประกอบอาหารและคุณสมบัติทางยา [1] นอกจากนั้นขิงแห้งหรือขิงผงยังใช้ในการผลิตเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ เช่น เบียร์ ไวน์และเบียร์ ในหลายๆประเทศ กรณีของน้ำมันจากขิงนั้นยังสามารถใช้เป็นส่วนประกอบในขนมและน้ำอัดลมด้วย [2]

จากคุณสมบัติที่กล่าวมา ขิงได้มีการนำขิงมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ลูกอมสมุนไพร เช่น ลูกอมขิง ซึ่งมีน้ำตาลและเนื้อขิงเป็นส่วนประกอบหลัก มีประโยชน์ในการช่วยเจริญอาหาร ลดอาการคลื่นไส้อาเจียน [3] โดยลูกอมขิงของวิสาหกิจชุมชน พิมมาลาเฮิร์ส มีส่วนประกอบของน้ำตาลร้อยละ 15 ขิงได้ถูกนำมาใช้ทดแทนผลไม้บางชนิดที่นำเข้าจากต่างประเทศ ในการผลิตผลิตภัณฑ์ลูกอม อีกทั้งยังได้ สี กลิ่น รส ที่เป็นธรรมชาติ ลดการเติม สี กลิ่นและรสสังเคราะห์ ทำให้สุขภาพของผู้บริโภคมีความปลอดภัย รวมถึงเป็นการส่งเสริมการปลูกขิงเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ทางอุตสาหกรรม รวมถึงการใช้กากที่เหลือจากกระบวนการแปรรูป แล้วนำมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม ซึ่งได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก [4] อย่างไรก็ตามเนื่องจาก กลิ่นฉุนและรสชาติที่เผ็ด จึงมีข้อจำกัด ในการพัฒนาขิงให้เป็นผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูป ดังนั้น ผลิตภัณฑ์จากขิงที่มีอยู่ในตลาดจึงมีน้อย เช่น ลูกอม ยาขู กาลัง และน้ำเชื่อม ถึงอย่างไร ผลิตภัณฑ์แปรรูปจากขิงยังคงมีความต้องการสูง ด้านส่วนประกอบของขนมต่างๆ [5] เป็นต้น นอกจากนั้นขิงยังสามารถนำมาแปรรูปเป็นน้ำขิงโดยการสกัดทางเคมีด้วยตัวทำละลายหรือการสกัดด้วย

กรรมวิธีทางกล [6] สำหรับวิธีการสกัดทางเคมีนั้นต้องใช้ตัวทำละลายอินทรีย์เพื่อให้ได้น้ำมันจากเนื้อขิง [7] วิธีการสกัดแบบนี้เกษตรกรไม่ได้นำมาใช้เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายสูง และมีความซับซ้อนของอุปกรณ์ที่ใช้ในการสกัดมาก

ในปัจจุบันได้มีการผลิตลูกอมขิงแต่พบปัญหาด้านกำลังในการผลิตเนื่องจากข้อจำกัดด้านคุณสมบัติของลูกอมขิง ดังนั้นจึงได้มีแนวคิดในการนำเครื่องจักรเข้ามาช่วยในการผลิตเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ซึ่งการออกแบบเครื่องอัดเม็ดลูกอมขิงนั้นได้พิจารณาขั้นตอนต่างๆ จากคุณสมบัติทางกายภาพของลูกอมขิงมาใช้ในการออกแบบเป็นสำคัญ

2. ระเบียบวิธีวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและหาประสิทธิภาพของเครื่องอัดลูกอมขิง มีขั้นตอนการดำเนินงานและการทดลองดังต่อไปนี้

2.1 ขั้นตอนการออกแบบ



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของเครื่องอัดลูกอมขิง

โครงสร้างหลักของเครื่องอัดลูกอมขิง ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม เนื่องจากเป็นเครื่องจักรสำหรับกระบวนการทางอาหาร และเพื่อรองรับอุปกรณ์ส่วนประกอบต่างๆ ซึ่งต้องมีความแข็งแรงพอที่จะรองรับชิ้นส่วนต่างๆ ได้เป็นอย่างดี [8] ขั้นตอนการออกแบบส่วนประกอบ สามารถแยกส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องอัดแท่งลูกอมขิงออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

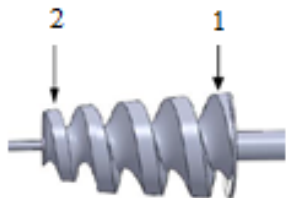
2.1.1 ชุดกระบอกอัด



รูปที่ 2 ชุดกระบอกอัด

ด้านบนมีช่องป้อนเนื้อชিংกวน หน้าแปลนยึดติดกับกระบอกลดขนาดด้านหน้าชุดกรวย ชุดกระบอกเกลียวอัดรับแรงขับจากมอเตอร์ ทำหน้าที่ลำเลียงเนื้อชিংกวนเข้าสู่กระบอกลดขนาดและรีดออกทางหน้าแปลน

2.1.2 ชุดสกรูอัด



รูปที่ 3 ชุดสกรูอัด

แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ สกรูส่วนด้านท้าย มีลักษณะเกลียวที่มีขนาดใหญ่กว่า มีช่องว่างระหว่างเกลียวทำหน้าที่ลำเลียงเนื้อชিংกวนไปอัดในส่วนด้านหน้า สกรูส่วนด้านหน้ามีลักษณะเกลียวที่เล็กลงตามขนาดของกระบอกลดขนาดเพื่อสร้างแรงดันในการอัดเนื้อชিংให้ติดกันเป็นแท่ง

2.1.3 ชุดหน้าแปลน



รูปที่ 4 หน้าแปลนสามช่องอัด

ทำหน้าที่รองรับเนื้อชিংที่ทำการอัดในช่วงกระบอกอัดเพื่อกำหนดลักษณะเนื้อชিংให้เป็นที่ทรงกระบอกกลมตามลักษณะของช่องอัด โดยเนื้อชিংอัดแท่งที่ไหลออกมาตามช่องอัดหน้าแปลนที่มีลักษณะเป็นที่ทรงกระบอกกลม

2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัย เพื่อให้ได้เครื่องอัดลูกอมชিংที่มีประสิทธิภาพการใช้งานที่ดี ดังนั้นจึงได้ทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆของเครื่องอัดแท่งลูกอมชিংและคุณลักษณะเฉพาะทางกายภาพของลูกอมชিংที่ได้จากการเครื่องอัด ดังต่อไปนี้

2.2.1 การทดสอบประสิทธิภาพและอัตราการผลิต

ทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องอัดลูกอมชিংมีวิธีการดำเนินงานดังต่อไปนี้ เตรียมเนื้อชিংกวนสำหรับการทดสอบการอัดครั้งละ 300 กรัม โดยทำการวัดค่าความชื้นของเนื้อชিংก่อนการทดสอบ ตัวอย่างละ 3-4 กรัม จำนวน 3 ตัวอย่าง หลังจากนั้น เปิดเครื่องอัดแท่งลูกอมชিং และตั้งความเร็วรอบตามตัวแปรกำหนดไว้ คือ $1,000 \pm 10$, $1,200 \pm 10$ และ $1,400 \pm 10$ รอบต่อนาที ตามลำดับ ทำการป้อนเนื้อชিংกวนเข้าเครื่องอัด พร้อมจับเวลาที่ใช้ในการทดสอบ และทำการบันทึกผลการทดลอง ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ตามตัวแปรที่กำหนด หลังจากนั้น ทดสอบอัตราการป้อน 8 ระดับ ที่ 300 500 600 900 1,000 1,500 2,000 และ 3,000 กรัม บันทึกผลการทดสอบ นำผลการทดสอบที่ได้ไปคำนวณหาค่าอัตราการผลิต และค่าประสิทธิภาพของเครื่องอัด โดยใช้สมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ ดังนี้

$$Product\ rate = \frac{m_{output}}{time} \quad (1)$$

โดยที่

Product rate คือ อัตราการผลิต (กรัม/นาที)

m_{output} คือ มวลลูกอมชিংหลังอัด (กรัม)

time คือ เวลาในการอัด (นาทิต)

$$Efficiency = \frac{m_{output}}{m_{input}} \times 100 \quad (2)$$

โดยที่

Efficiency คือ ประสิทธิภาพ (เปอร์เซ็นต์)

m_{output} คือ มวลลูกอมซิงหลังอัด (กรัม)

m_{input} คือ มวลเนื้อซิงก่อนอัด (กรัม)

2.2.2 การทดสอบลักษณะเฉพาะทางกายภาพ

ขั้นตอนนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพของลูกอมซิงที่ผ่านการอัดเป็นแท่งแล้ว เพื่อเปรียบเทียบคุณภาพของลูกอมซิงที่ผลิตได้จากเครื่องอัดลูกอมซิงกับลูกอมซิงที่จำหน่ายโดยวิสาหกิจชุมชนสำหรับค่าความชื้นของลูกอมซิงหลังการอัดหาได้จากสมการที่ (3) ดังนี้

$$MC = \frac{w-d}{w} \times 100 \quad (3)$$

โดยที่

MC = ปริมาณความชื้น (เปอร์เซ็นต์)

w-d = มวลก่อนอบ - มวลหลังอบ (กิโลกรัม)

w = มวลก่อนอบ (กิโลกรัม)

2.2.3 การทดสอบค่าเนื้อสัมผัส

ใช้เครื่อง Texture Profile Analysis ดังรูปที่ 5 ด้วยวิธีทดสอบแบบ TPA ใช้หัวกดรหัส P/50 วัดแรงกด



รูปที่ 5 เครื่อง Texture Profile Analysis

โดยที่ TPA คือ การที่หัววัดกดตัวอย่างลง 2 ครั้งเลียนแบบการเคี้ยวของมนุษย์ คุณสมบัติที่ทำการศึกษามีดังนี้

ค่า Adhesiveness คือ การยึดติด

ค่า Springiness คือ ความยืดหยุ่นของอาหาร

ค่า Cohesiveness คือ การเกาะติด

ค่า Gumminess คือ ลักษณะที่อาหารกึ่งแข็งที่แตกตัวออกจนพร้อมที่จะกลืนได้

ค่า Chewiness คือ ค่าความเคี้ยวได้ หรือความต้านทานการเคี้ยว

2.2.4 การวัดค่าสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer

หลังจากที่ซิงกวผ่านการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแล้ว นำไปวัดค่าสีของลูกอมซิง โดยใช้ระบบ L* - a* - b* ซึ่งเป็นระบบการบรรยายสีแบบ 3 มิติ แกน L* จะบรรยายถึงความสว่าง (lightness) จากค่าสีแสดงสีขาว (+L*) จนไปถึงค่าสีแสดงถึงสีดำ (-L*) สำหรับแกน a* จะบรรยายถึงแกนสีจากสีเขียว (-a*) ไปจนถึงสีแดง (+a*) ส่วนแกน b* นั้นจะบรรยายถึงแกนสีจากสีน้ำเงิน (-b*) ไปจนถึงสีเหลือง (+b*) โดยใช้เครื่องทดสอบการวัดค่าสี ตามรูปที่ 6



รูปที่ 6 เครื่องวัดค่าสี Colorimeter

2.2.5 การวิเคราะห์และประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์และประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์ประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ค่าใช้จ่ายในการทำงานและ

การคำนวณจุดคุ้มทุน ค่าใช้จ่ายในการทำงาน ประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายคงที่ (Fixed Cost, FC) และ ค่าใช้จ่ายผันแปร (Variable Cost, VC) และการวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period; PBP) คือ ระยะเวลาจากการเริ่มลงทุนจนถึงเวลาที่รายได้สุทธิเฉลี่ยต่อปีจากการใช้อุปกรณ์มีค่าเท่ากับการลงทุน ซึ่งเขียนให้อยู่ในรูปสมการที่ (4)-(6) ตามลำดับ

$$TC = FC + VC \quad (4)$$

$$\text{ค่าใช้จ่ายในการทำงาน (บาท)} = \frac{TC}{(Cap \times h \times A)} \quad (5)$$

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน(ปี)} = \frac{\text{ราคาเครื่อง (P)}}{\text{รายได้สุทธิจากการขาย}} \quad (6)$$

โดยที่

- TC คือ ค่าใช้จ่ายรวม (บาท/ปี)
 FC คือ ค่าใช้จ่ายคงที่ (คือบาท/ปี)
 VC คือ ค่าใช้จ่ายผันแปร (บาท/ปี)
 Cap คือ การทำงานของเครื่องจักร (บาท/ชั่วโมง)
 h คือ ชั่วโมงการทำงานต่อวัน (ชั่วโมง/วัน)
 A คือ จำนวนวันที่ปฏิบัติงานต่อปี (วัน/ปี)
 P คือ ราคาเครื่องจักร (บาท)

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องอัดลูกอมชিং แสดงดังรูปที่ 7

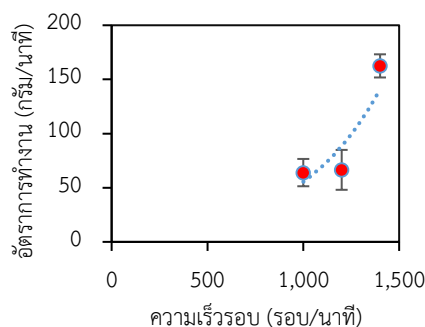


รูปที่ 7 การอัดลูกอมชিং

มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและทำการประเมินประสิทธิภาพการทำงาน ที่เงื่อนไขที่ดีที่สุดของเครื่อง โดยทำการทดสอบการอัดขึ้นรูปลูกอมชিং โดยป้อนเนื้อชিংกวนครึ่งละประมาณ 300 กรัม ที่ความเร็วรอบ 1,000±10 1,200±10 และ 1,400±10 รอบต่อนาที ตามลำดับ ทำการทดสอบความเร็วรอบละ 3 ซ้ำ

3.1 อัตราการทำงานของเครื่องอัดลูกอมชিং

จากผลการทดสอบหาอัตราการทำงานด้วยการชั่งน้ำหนักหลังอัดเปรียบเทียบกับเวลาการทำงาน โดยใช้เนื้อชিংกวนครึ่งละ 300 กรัม ทำการทดสอบ 3 ซ้ำ พบว่า ค่าเฉลี่ยของอัตราการทำงานที่ความเร็วรอบ 1400±10 รอบต่อนาที มีค่าสูงสุด 162.5 กรัมต่อนาที และอัตราการทำงานที่ 1,000±10 และ 1200±10 รอบต่อนาที มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ และมีค่าน้อยสุดที่ 64 กรัมต่อนาที แสดงได้ดังรูปที่ 8



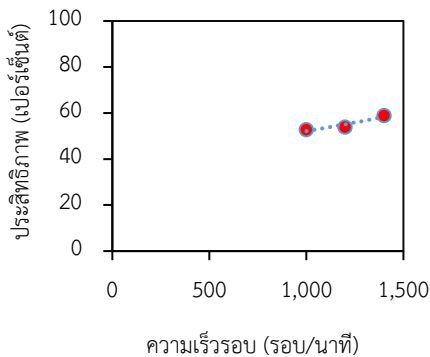
รูปที่ 8 อัตราการทำงานของเครื่องอัดลูกอมชিং

จากผลทดสอบที่ความเร็วรอบสูงจะได้อัตราการทำงานที่สูงกว่า สาเหตุเนื่องจากความเร็วรอบส่งผลต่อปริมาณเนื้อชিংที่ลำเลียงและเวลาที่ใช้ในการอัด คือที่ความเร็วรอบสูงการลำเลียงเนื้อชিংผ่านสกรูเพื่ออัดจะมีปริมาณมากกว่า และใช้เวลาอัน้อยลง ทำให้อัตราการทำงานของเครื่องอัดแท่งลูกอมชিংเพิ่มสูงขึ้น

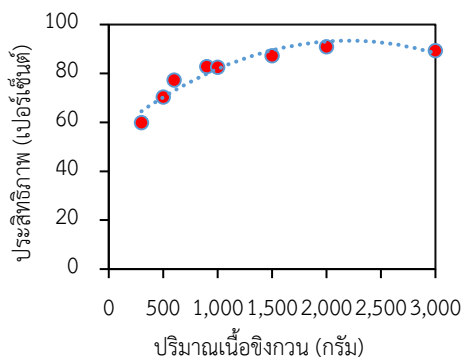
3.2 ค่าประสิทธิภาพของเครื่องอัดลูกอมชিং

จากผลการทดสอบและการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยโดยใช้เนื้อชিংกวนครึ่งละ 300 กรัม

พบว่าค่าประสิทธิภาพของเครื่องอัดลูกอมซึ่งที่ความเร็วรอบ $1,400 \pm 10$ รอบต่อนาที มีค่าสูงสุดที่ 58.94 เปอร์เซ็นต์ และค่าประสิทธิภาพความเร็วรอบที่ $1,000 \pm 10$ รอบต่อนาที มีค่าน้อยสุดที่ 52.7 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากความเร็วรอบที่มากกว่าส่งผลต่อความเร็วการป้อนเนื้อซึ่งได้มากกว่า แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ผลของความเร็วรอบต่อประสิทธิภาพเครื่องอัดลูกอมซึ่งโดยใช้เนื้อชিংกวครั้งละ 300 กรัม



รูปที่ 10 ผลของปริมาณเนื้อชিংกวต่อประสิทธิภาพเครื่องอัดลูกอมซึ่ง

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องอัดที่ $1,400 \pm 10$ รอบต่อนาที ทำการเพิ่มปริมาณชিংกวในแต่ละการทดสอบ พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการอัดจาก 58.94 เปอร์เซ็นต์ ไปจนถึง 90.85 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นปริมาณชিংกวที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการอัดเพิ่มขึ้นตาม สามารถเพิ่มปริมาณชিংกวจนถึง 2,000 กรัม จะได้ค่าประสิทธิภาพ

การอัดสูงสุดที่ 90.85 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มปริมาณเนื้อชিংกว พบว่าไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการอัดของเครื่องได้ เนื่องจากมีปริมาณเนื้อชিংกวคงค้างในสกรูอัดมากขึ้น ผลการทดสอบประสิทธิภาพการอัดของเครื่องอัดลูกอมซึ่งที่ความเร็ว $1,400 \pm 10$ รอบต่อนาที แสดงดังรูปที่ 10

3.3 ผลการทดสอบหาปริมาณค่าความชื้น

จากการนำชিংกวก่อนอัดและลูกอมซึ่งหลังอัดมาทดสอบเพื่อหาปริมาณความชื้น ใช้เวลาอบ 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน AOAC และคำนวณโดยใช้สมการที่ (3) พบว่าก่อนอัดขึ้นรูปลูกอมซึ่ง มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 7 และหลังอัดมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 3 ของน้ำหนักทดสอบ แสดงดังตารางที่ 1 และ 2

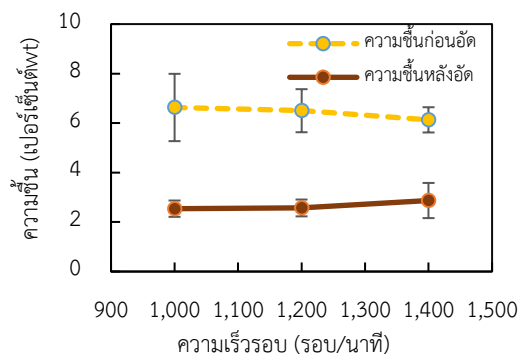
ตารางที่ 1 ปริมาณความชื้นของเนื้อชিংกวก่อนการอัด

RPM	มวลเฉลี่ย ก่อนอบ (g)	มวลเฉลี่ย หลังอบ (g)	ปริมาณความชื้น (%wt)
$1,000 \pm 10$	2.74 ± 0.02	2.56 ± 0.06	6.63 ± 1.36
$1,200 \pm 10$	3.06 ± 0.22	2.86 ± 0.20	6.50 ± 0.87
$1,400 \pm 10$	3.45 ± 0.08	3.24 ± 0.06	6.13 ± 0.51

ตารางที่ 2 ปริมาณความชื้นของเนื้อชিংกวหลังการอัด

RPM	มวลเฉลี่ย ก่อนอบ (g)	มวลเฉลี่ย หลังอบ (g)	ปริมาณความชื้น (%wt)
$1,000 \pm 10$	3.58 ± 0.50	3.49 ± 0.50	2.54 ± 0.33
$1,200 \pm 10$	4.09 ± 0.80	3.99 ± 0.80	2.57 ± 0.34
$1,400 \pm 10$	3.38 ± 0.82	3.29 ± 0.82	2.87 ± 0.71

ผลการทดสอบพบว่าค่าความชื้นมีค่าลดลงหลังจากการอัดเม็ดลูกอมซึ่ง เนื่องจากเกิดแรงดันและความร้อนภายในกระบอกอัด ทำให้ความชื้นของเนื้อชিংกวลดลง พบว่าค่าความชื้นก่อนกระบวนการอัด มีค่าอยู่ระหว่าง 6.13 ถึง 6.63 เปอร์เซ็นต์ หลังจากการอัดค่าความชื้นมีค่าลดลง มีค่าอยู่ระหว่าง 2.54 ถึง 2.87 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 ความชื้นก่อนอัดและหลังอัดขึ้นรูปลูกอมขิง

3.4 ผลการทดสอบค่าสีของลูกอมขิงหลังอัด

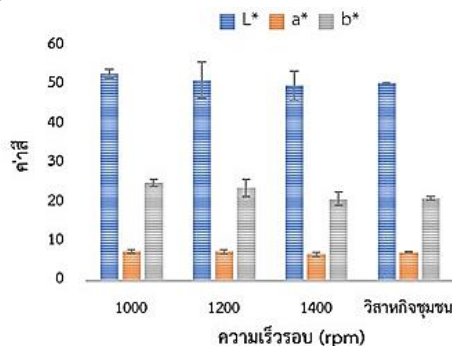
การทดสอบค่าสีของลูกอมขิงด้วยเครื่อง Colorimeter สามารถทดสอบคุณสมบัติเชิงแสงที่บ่งบอกลักษณะภายนอกของผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่สามารถบอกค่าของสีที่ใช้เป็นมาตรฐานสากลได้ โดยมีระบบที่แสดงค่า C.I.E. LAB (L^* , a^* , b^*) [9] ที่ใช้ในการวัดค่าสีของลูกอมขิงที่ผ่านการอัดขึ้นรูป ที่ความเร็วรอบ 1,000±10 1,200±10 และ 1,400±10 รอบต่อนาที ค่าสีที่วัดได้จะนำมาเปรียบเทียบกับค่าสีของผลิตภัณฑ์จากวิสาหกิจชุมชน ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าสี L^* a^* b^* ของลูกอมขิงหลังการอัด

RPM	L^* เฉลี่ย	a^* เฉลี่ย	b^* เฉลี่ย
1,000±10	52.93 ± 1.08	7.49 ± 0.43	25.03 ± 0.85
1,200±10	51.37 ± 4.61	7.47 ± 0.60	23.86 ± 2.17
1,400±10	49.90 ± 3.76	6.78 ± 0.51	21.01 ± 1.83
วิสาหกิจฯ	50.56 ± 0.14	7.36 ± 0.08	21.17 ± 0.45

ทำการวิเคราะห์ค่าสีของลูกอมขิง หลังจากกระบวนการอัดที่ความเร็วรอบ 1,000±10 1,200±10 และ 1,400±10 รอบต่อนาที และลูกอมขิงจากวิสาหกิจชุมชนต้นแบบ มาวัดค่าสี พบว่า ค่าสีที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่าความร้อนในกระบวนการอัดมีอุณหภูมิต่ำจึงไม่ส่งผลต่อปริมาณน้ำตาลที่มีในเนื้อของลูกอมขิง [10] ซึ่งไม่ทำให้สีของลูกอมขิงในระหว่างกระบวนการอัดที่ความเร็วรอบต่างๆ มีการเปลี่ยนแปลง

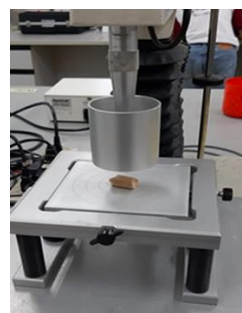
และเนื้อขิงกวนที่ใช้ในการอัดได้มาจากแหล่งผลิตเดียวกัน ทำให้ค่าสีของลูกอมขิงจากเครื่องอัดและวิสาหกิจชุมชนฯ อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานเดียวกัน แสดงได้ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 ค่าสีของลูกอมขิงหลังอัดเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์จากวิสาหกิจชุมชน

3.5 ผลของความเร็วยรอบที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของลูกอมขิงหลังอัด

การทดสอบหาค่าทางกายภาพคือ การหาค่าเนื้อสัมผัสของลูกอมขิง ได้แก่ Hardness, Adhesiveness, Springiness, Cohesiveness, Gumminess และ Chewiness โดยใช้เครื่อง Texture Analyzer วิธีทดสอบแบบ TPA ใช้หัวกดรหัส P/50 กำหนดค่าความเครียดของลูกอมขิงเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ และความเร็วหัวกด 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ผลการทดสอบค่าเนื้อสัมผัสของลูกอมขิงที่อัดขึ้นรูปที่ความเร็วรอบ 1,000±10 1,200±10 และ 1,400±10 รอบต่อนาที แสดงดังรูปที่ 13 และตารางที่ 4 [11]



รูปที่ 13 การหาค่าสมบัติทางเนื้อสัมผัสของลูกอมขิง

ตารางที่ 4 ค่าสมบัติทางเนื้อสัมผัสของลูกอมชิง

Texture			
Quality	1,000±10	1,200±10	1,400±10
Attributes			
Hardness (g)	5,293.32 ± 716.77	6,541.64 ± 1,323.72	10,203.47 ± 1,732.84
Adhesiveness	-0.02 ± 0.04	-0.28 ± 0.33	-0.86 ± 0.78
Springiness	0.43 ± 0.03	0.44 ± 0.03	0.49 ± 0.01
Cohesiveness	0.19 ± 0.01	0.19 ± 0.02	0.22 ± 0.04
Gumminess	990.64 ± 199.87	1,287.38 ± 404.49	2,274.16 ± 710.13
Chewiness	427.11 ± 98.45	570.93 ± 179.38	1,122.17 ± 339.97

จากผลการทดสอบหาค่าเนื้อสัมผัสของลูกอมชิงด้วยเครื่อง Texture Analyzer ทดสอบตัวอย่างละ 3 ครั้ง แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าเฉลี่ยพบว่า ค่าเนื้อสัมผัสของลูกอมชิงที่ผลิตได้จากเครื่องอัดลูกอมชิงต้นแบบ มีค่าแปรผันตรงกับความเร็วรอบ คือที่ความเร็วรอบ 1,400±10 รอบต่อนาที จะได้ค่าเนื้อสัมผัสแต่ละค่ามากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วรอบ 1,200±10 และ 1,000±10 รอบต่อนาที ตามลำดับ ความแตกต่างของเนื้อสัมผัส มีสาเหตุจากความเร็วรอบที่ต่ำจะมีขนาดแรงดันภายในกระบอกจากสกรูอัดน้อยกว่าความเร็วรอบสูง ส่งผลทำให้ค่าเนื้อสัมผัสมีค่าน้อย และเมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์จากวิสาหกิจชุมชน พบว่ามีค่าความยืดหยุ่นของลูกอมชิงเมื่อออกแรงกดแล้วกลับคืนรูปได้ ไม่ยุบตัวเสียรูปทรง ลูกอมชิงที่ผลิตจากเครื่องอัดลูกอมชิงต้นแบบมีค่าใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์จากวิสาหกิจชุมชน ซึ่งผลของสมบัติทางเนื้อสัมผัสดังกล่าวสอดคล้องกับค่าของผลิตภัณฑ์ลูกอมชิงที่วางจำหน่ายในท้องตลาด

3.6 ผลการวิเคราะห์และประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์

จากการวิเคราะห์และประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์ตามสมการที่ (4)-(6) พบว่า ต้นทุนในการใช้เครื่องอัดลูกอมชิง มีค่าใช้จ่ายในการทำงาน 18,063.6 บาท/ปี ราคา

เครื่องอัดลูกอมชิง 60,000 บาท รายได้จากการขายลูกอมชิง 130,000 บาท พิจารณาการทำงานของเครื่องอัดลูกอมชิงที่ 792 ชั่วโมงต่อปี ดังนั้น ระยะเวลาคืนทุนของเครื่องอัดลูกอมชิงเท่ากับ 0.536 ปี หรือ 6 เดือน 11 วัน

4. สรุป

จากการทดสอบหาค่าประสิทธิภาพของเครื่องอัดลูกอมชิง โดยศึกษาผลของความเร็วรอบต่อกำลังการผลิตจากเครื่องอัดลูกอมชิง สามารถสรุปผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์ได้ดังนี้

4.1 เครื่องอัดลูกอมชิงทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ใช้มอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าเป็นต้นกำลัง มีขนาดเพลาส่งกำลังเท่ากับ 25 มิลลิเมตร และมีสกรูทำหน้าที่สร้างแรงอัด เครื่องอัดลูกอมชิงออกแบบจากการคำนวณตามหลักทฤษฎีทางวิศวกรรมศาสตร์ มีค่าเฉลี่ยกำลังการผลิตสูงสุดเท่ากับ 162.48 กรัมต่อนาที หรือ 29.25 กิโลกรัมต่อวัน (3 ชั่วโมงการทำงานต่อวัน) ที่ความเร็วรอบ 1,400±10 รอบต่อนาที

4.2 การทดสอบหาประสิทธิภาพของการผลิตด้วยเครื่องอัดลูกอมชิงพบว่า ประสิทธิภาพของการทำงานสูงสุดมีค่าเท่ากับ 90.85 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วรอบ 1,400±10 รอบต่อนาที เวลาในการอัด 3 ชั่วโมง

4.3 ผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์พบว่า ค่าใช้จ่ายในการทำงาน 18,063.6 บาท/ปี เมื่อพิจารณาการทำงานของเครื่องที่ 792 ชั่วโมงต่อปี มีระยะเวลาคืนทุนของเครื่องอัดลูกอมชิงเท่ากับ 0.536 ปี หรือ 6 เดือน 11 วัน

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนจาก โปรแกรมสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีและนวัตกรรม (ITAP) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ และ วิสาหกิจชุมชน พิมมาลาเฮิร์บส์ จังหวัดเชียงราย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Bartley and A. Jacobs, "Effects of drying on flavor compounds in Australian-grown ginger (*Zingiber officinale*)," *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 80, pp. 209-215, 01/15, 2000.
- [2] R. K. Yadav, D. S. Yadav, N. Rai, S. K. Sanwal and P. Sarma, "Commercial prospects of ginger cultivation in north-eastern region," *ENVIS Bull Himal Ecol*, vol. 12, no. 2, pp. 1-5, 2004.
- [3] K. K. Dash, V. M. Balasubramaniam and S. Kamat, "High pressure assisted osmotic dehydrated ginger slices," *Journal of Food Engineering*, vol. 247, pp. 19-29, 2019.
- [4] N. Balasundram, K. Sundram and S. Samman, "Phenolic compounds in plants and agri-industrial by-products: Antioxidant activity, occurrence, and potential uses," *Food Chemistry*, vol. 99, no. 1, pp. 191-203, 2006.
- [5] A. Nath, B. C. Deka, A. K. Jha, D. Paul and L. K. Misra, "Effect of slice thickness and blanching time on different quality attributes of instant ginger candy," *Journal of Food Science and Technology*, vol. 50, no. 1, pp. 197-202, 2013.
- [6] O. O. Onu and K. J. Simonyan, "Design and construction of a motorized ginger juice expression machine," *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, vol. 19, no. 3, pp. 163-16, 2017.
- [7] A. Ibrahim and A. P. Onwualu, "Technologies for extraction of oil from oil-bearing agricultural products: A review," *Journal of Agricultural Engineering and Technology (JAET)*, vol. 13, pp. 58-70, 2005.
- [8] P. Polsakkwa, S. Rakarin and T. Khamdaeng, "Optimization of Liquid Removal from *Mesona Chinensis* Benthams Using a Centrifuge Machine," *Journal of Science & Technology MSU*, vol. 38, no. 6, pp. 625-632, 2019.
- [9] T. Khamdaeng, T. Wongsiriamnuay, N. Panyoyai, K. Narkprasom and W. Intagun, "Mechanical properties and melting conditions of beeswax for comb foundation forming," *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, vol. 18, no. 3, pp. 282-293, 2016.
- [10] M. S. Alam et al., "Quality Evaluation of Ginger Candy Prepared by Osmotic Dehydration Techniques," *Food and Nutrition Sciences*, vol. 9, pp. 376-389, 2018.
- [11] S. Somruethai, R. Jiraporn, and M. Jirawan, "Effect of surimi, emulsified soybean oil and tapioca flour ratio on physico-chemical properties and sensory evaluation in fish emulsion sausage," in *Proceedings of 53rd Kasetsart University Annual Conference: Plants, Animal, Veterinary Medicine, Fisheries, Agricultural Extension and Home Economics Bangkok (Thailand)*, 2015: The Thailand Research Fund, pp. 1236-1244.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การคัดเลือกแบคทีเรียจากลำไส้กุ้งกุลาดำเพื่อใช้เป็นโพรไบโอติกสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

สุบันทิต นิมรัตน์^{1*} วุฒิศักดิ์ ศักดิ์สิทธิ์¹ และวีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย²

¹ ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี

² ภาควิชาวาริชศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี

^{1, 2} 169 ถนนลงหาดบางแสน ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

รับบทความ 12 มีนาคม 2564 แก้ไขบทความ 13 กรกฎาคม 2564 ตอรับบทความ 16 สิงหาคม 2564

บทคัดย่อ

การศึกษาในครั้งนี้เป็นการประเมินคุณสมบัติโพรไบโอติกของแบคทีเรียที่แยกได้จากทางเดินอาหารของกุ้งกุลาดำ (*Penaeus monodon*) จากแบคทีเรียที่คัดแยกได้ทั้ง 14 สายพันธุ์ พบว่าแบคทีเรีย 6 สายพันธุ์ ได้แก่ S1, S3, S6, S7, T4 และ T5 สามารถย่อยสารอาหารได้ทั้ง 3 ชนิด คือ โปรตีน แป้งและไขมันได้ โดยสายพันธุ์ที่ย่อยสารอาหารทั้ง 3 ชนิดได้ดีที่สุด คือ S3, S7, และ S2 ตามลำดับ แบคทีเรีย 6 สายพันธุ์ไม่สามารถย่อยสลายเม็ดแดงได้ ได้แก่ S2, S3, T0, T1, T2 และ T3 และ S2 เป็นสายพันธุ์ที่สามารถยับยั้งแบคทีเรียก่อโรคในกุ้ง คือ *Vibrio harveyi* ได้ดีที่สุดจากการทดสอบด้วยเทคนิค Agar overlay เมื่อศึกษาความสามารถในการทนต่อสภาพแวดล้อมพบว่าสายพันธุ์ S2 และ T0 เจริญได้ดีในสภาวะแวดล้อมกว้าง คือ สภาวะที่มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 0-8% ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6-10 และอุณหภูมิ 25-37 องศาเซลเซียส ดังนั้นแบคทีเรียที่มีศักยภาพเป็นโพรไบโอติกสำหรับการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลมากที่สุด คือ สายพันธุ์ S2 เนื่องจากไม่ย่อยสลายเม็ดเลือดแดง และยังการเจริญของ *V. harveyi* สามารถย่อยโปรตีนและไขมันและทนต่อสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการเลี้ยงกุ้งทะเลได้ดี โดยสามารถจัดจำแนกแบคทีเรียชนิดนี้ได้เป็น *Micrococcus* sp. สายพันธุ์ S2 แต่ควรมีการศึกษาการกระตุ้นภูมิคุ้มกัน การย่อยสารอาหารและการส่งเสริมการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสายพันธุ์นี้ในกุ้งทะเลต่อไป

คำสำคัญ : โพรไบโอติก; กุ้งกุลาดำ; เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ; สารอาหาร; ความยั่งยืน

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +66 3874 5900 ต่อ 3120, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: subunti@buu.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Screening of Bacteria Isolated from Black Tiger Shrimp (*Penaeus monodon*) Intestine Using as Probiotics in Aquaculture

Subuntith Nimrat^{1*} Wuttisak Saksit¹ and Verapong Vuthiphandchai²

¹ Department of Microbiology, Faculty of Science, Burapha University, Chon Buri

² Department of Aquatic Science, Faculty of Science, Burapha University, Chon Buri

^{1, 2} 169 Long Had Bangsaen Road, Saensuk Subdistrict, Mueang District, Chon Buri 20131

Received 12 March 2021; Revised 13 July 2021; Accepted 16 August 2021

Abstract

In this study, 14 bacterial strains isolated from gastrointestinal tract of black tiger shrimp (*Penaeus monodon*) was investigated for their probiotic potential. The results showed that 6 strains, namely S1, S3, S6, S7, T4 and T5 were able to degrade 3 nutrient substances including protein, starch, and lipid among which S3, S7, and S2 were the best tested nutrient-degrading bacteria, respectively. Six bacterial strains were unable to lyse red blood cells including S2, S3, T0, T1, T2 and T3. S2 strain showed the strongest antibacterial activity against shrimp pathogenic *Vibrio harveyi* following an agar overlay technique. Based on environmental tolerance tests, S2 and T0 strains grew well under wide ranges of environmental conditions, e.g. sodium chloride concentration (0-8%), pH (6-10), and temperature (25-37°C). As a consequence, S2 strain had the most probiotic potential for shrimp culture owing to no hemolysis of red blood cells, inhibition of *V. harveyi* growth, protein and lipid degrading ability, and high environmental tolerance for shrimp cultivation. The strain was identified as *Micrococcus* sp. S2. However, additional study focused on immune response, nutrient digestibility and growth promotion of the strain should be further performed in marine shrimp.

Keywords : Probiotic; Black Tiger Shrimp; Aquaculture; Nutrient; Sustainability

* Corresponding Author. Tel.: +66 3874 5900 ต่อ 3120, E-mail Address: subunti@buu.ac.th

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศชั้นนำของโลกในการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลและส่งออกผลิตภัณฑ์จากกุ้งทะเลโดยปริมาณผลผลิตกุ้งทะเลจากการเพาะเลี้ยงในปี พ.ศ. 2560 สูงถึงเกือบ 4 แสนตัน คิดเป็นมูลค่ากว่า 67,000 ล้านบาท [1] แต่อย่างไรก็ตามการเพาะเลี้ยงกุ้งในเชิงอุตสาหกรรมแบบหนาแน่นทำให้เกิดผลกระทบสุขภาพต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นโรคระบาดจากแบคทีเรีย เช่น โรคเรืองแสงจาก *Vibrio harveyi* โรคตายด่วน (Early Mortality Syndrome) หรือเรียกว่ากลุ่มอาการตับและตับอ่อนตายเฉียบพลัน (Acute Hepatopancreatic Necrosis Syndrome) ที่เกิดจาก *V. parahaemolyticus* บางสายพันธุ์ และโรคที่เกิดจากไวรัส ได้แก่ โรคกล้ามเนื้อตายจาก Infectious Myonecrosis Virus โรคตัวพิการจาก Infectious Hypodermal and Haematopoietic Necrosis Virus และโรคที่เกิดจาก Hepatopancreatic Parvovirus เป็นต้น จึงทำให้มีการใช้ยาปฏิชีวนะและสารเคมีในการเพาะเลี้ยงเพื่อลดการระบาดของโรคและส่งเสริมการเจริญเติบโตของกุ้ง แต่การใช้ยาปฏิชีวนะอย่างอิสระ ไร้ขอบเขตและขาดการควบคุมก่อให้เกิดผลเสียหลายประการ ไม่ว่าจะเป็นการอุบัติและการแพร่กระจายของแบคทีเรียดื้อยาในสัตว์ มนุษย์และสิ่งแวดล้อม การตกค้างและสะสมของยาปฏิชีวนะในสัตว์น้ำ เมื่อมนุษย์บริโภคเข้าไปอาจมีผลโดยตรงต่อสมดุลของจุลินทรีย์ที่อาศัยตามปกติในลำไส้ของมนุษย์หรือจุลินทรีย์ที่ดื้อยาอาจเพิ่มจำนวนขึ้นภายในลำไส้จนกระทั่งไปรบกวนการทำงานหรือการป้องกันการติดเชื้อของจุลินทรีย์ภายในลำไส้ รวมทั้งทำให้เกิดการกีดกันทางการค้าระหว่างประเทศ เป็นต้น [2]

นอกเหนือจากความกังวลด้านสุขภาพที่เกิดจากการใช้ยาปฏิชีวนะและแบคทีเรียดื้อยา ปัจจุบันผู้บริโภคมีความใส่ใจในอาหารเพื่อสุขภาพ ปราศจากสารอันตรายเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงมีความสนใจในการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้น

โดยหนึ่งในวิธีการที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืน คือ การใช้โพรไบโอติกหรือสารเสริมชีวนะ F.J. Gatesoupe [3] ได้ให้คำนิยามของโพรไบโอติกว่า เซลล์ของจุลินทรีย์ที่เติมลงไปโดยวิธีใดวิธีหนึ่งแล้วสามารถอาศัยและมีชีวิตอยู่ได้ภายในลำไส้เจ้าบ้านเพื่อพร้อมปรับปรุงสุขภาพเจ้าบ้านให้ดีขึ้น โพรไบโอติกที่ดีจะทำให้จุลินทรีย์ภายในลำไส้สมดุล ลดปัญหาการติดเชื้อภายในทางเดินอาหาร ช่วยให้การดูดซึมสารอาหารดีขึ้นและกระตุ้นภูมิคุ้มกันโรคได้ จุลินทรีย์ที่นิยมใช้เป็นโพรไบโอติกในสัตว์น้ำ ได้แก่ แบคทีเรีย เช่น *Lactobacillus*, *Bacillus* และ *Enterococcus* และยีสต์ เช่น *Saccharomyces* หรือเชื้อผสม เป็นต้น [4]-[7] การใช้โพรไบโอติกในการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลช่วยเพิ่มการตอบสนองของระบบภูมิคุ้มกัน เพิ่มการเจริญเติบโต ปรับปรุงคุณภาพน้ำรักษาความสมดุลของจุลินทรีย์ในทางเดินอาหารของกุ้งและป้องกันโรคจากแบคทีเรียก่อโรค [4]-[8] ประเทศไทยได้มีการใช้โพรไบโอติกในการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลอย่างแพร่หลายมากกว่า 10 ปี จากข้อมูลการสำรวจการใช้โพรไบโอติกในการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมในฟาร์มเลี้ยงกุ้ง 60 แห่ง ในจังหวัดระยองระหว่างเดือนธันวาคม พ.ศ. 2549 ถึงมกราคม พ.ศ. 2550 พบว่าเกษตรกรส่วนใหญ่ใช้โพรไบโอติกในการเพาะเลี้ยงกุ้งกว่าร้อยละ 60 โดยเกษตรกรนำโพรไบโอติกมาผสมกับอาหารและนำโพรไบโอติกผสมน้ำสาตรอบบ่อเพื่อเพิ่มการเจริญเติบโตและการรอดชีวิตของกุ้ง [9] โพรไบโอติกหลายชนิดที่คัดแยกได้ในประเทศไทยได้รับการพิสูจน์และยอมรับถึงประสิทธิภาพในการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเล ยกตัวอย่างเช่น *Bacillus* S11 เป็นสายพันธุ์ที่มีศักยภาพในการเพิ่มจำนวนและลดปริมาณแบคทีเรียกลุ่ม *Vibrio* ในทางเดินอาหารของกุ้งกุลาดำ รวมทั้งเพิ่มการรอดชีวิตของกุ้งกุลาดำที่เหนียวนาให้เกิดโรคจาก *V. harveyi* [10] นอกจากนี้ยังมีการใช้แบคทีเรียผสมที่ประกอบด้วย *Bacillus subtilis*, *B. polymyxa*, *B. megaterium*, *B. licheniformis* และ *B. thuringiensis* ในการ

เพาะเลี้ยงกึ่งกลาดำ พบว่าแบคทีเรียผสมดังกล่าวสามารถเพิ่มการเจริญเติบโต การรอดชีวิตและมีบทบาทในการปรับปรุงจุลินทรีย์ในทางเดินอาหารของกึ่งกลาดำได้อย่างมีประสิทธิภาพ [4] แบคทีเรียผสมกลุ่มเดียวกันนี้ยังถูกนำมาใช้ในการเพาะเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม โดยสามารถเพิ่มการเจริญเติบโต การรอดชีวิต ปรับปรุงคุณภาพน้ำ ปรับสมดุลของจุลินทรีย์ในลำไส้และเพิ่มความต้านทานโรคที่เกิดจาก *V. harveyi* [8]

การศึกษาในครั้งนี้เป็นการคัดเลือกแบคทีเรียสายพันธุ์ใหม่จากทางเดินอาหารของกึ่งกลาดำที่มีคุณสมบัติเป็นโพรไบโอติกเพื่อนำมาใช้ในการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเล เพื่อลดการใชยาปฏิชีวนะในการเลี้ยงกุ้งและทดแทนการใช้ผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกทางการค้าที่นำเข้าจากต่างประเทศที่มีราคาสูงและอาจจะไม่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมการเพาะเลี้ยงกุ้งของประเทศไทย

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การคัดแยกแบคทีเรียที่มีคุณสมบัติย่อย

สลายโปรตีน แป้งและไขมัน

ลุ่มจับกึ่งกลาดำที่เลี้ยงในบ่อดินจากฟาร์มเลี้ยงกุ้งเอกชนในอำเภอบ้านโพธิ์ จังหวัดฉะเชิงเทรา แล้วขนส่งมายังบ่ออนุบาลในโรงเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ภาควิชาวาริชศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จากนั้นนำกึ่งกลาดำ 20 ตัว มาแช่ในสารละลายฟอร์มาลิน (0.05 กรัมต่อลิตร) นาน 5 นาที เพื่อฆ่าเชื้อแบคทีเรียภายนอก นำลำไส้กึ่งกลาดำเจือจางแบบ 10 เท่า ใน 0.85% Normal Saline Solution แล้วดูตัวอย่างแต่ละระดับความเจือจางเกลี่ยลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ Nutrient Agar บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง จากนั้นนำแบคทีเรียที่แยกได้มาทำให้บริสุทธิ์และซิดเป็นจุดบนอาหาร Skim Milk Agar, Starch Agar และ Tributyrin Agar เมื่อบ่มจนเพาะเชื้อบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ครบ 2-3 วัน วัดวงใสรอบโคโลนีแบคทีเรียที่เจริญบนอาหาร Skim Milk

Agar และ Tributyrin Agar เพื่อประเมินความสามารถย่อยโปรตีนและไขมัน ตามลำดับ และวัดสารละลายไอโอดีนลงบนอาหาร Starch Agar และวัดวงใสรอบโคโลนีแบคทีเรียเพื่อประเมินความสามารถย่อยแป้ง จากนั้นคำนวณประสิทธิภาพการย่อยสลายโดยคำนวณจากขนาดวงใสหารด้วยขนาดโคโลนี [11]

2.2 การยับยั้งเชื้อก่อโรคในกึ่งกลาดำ

การศึกษาความสามารถในการยับยั้งเชื้อก่อโรคของแบคทีเรียที่แยกได้ในการศึกษาครั้งนี้ดำเนินการทดสอบด้วย 2 เทคนิค ได้แก่ Agar Well Diffusion และ Agar Overlay โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

การยับยั้งแบคทีเรียก่อโรคด้วยวิธี Agar Well Diffusion [11] เริ่มจากนำแบคทีเรียที่แยกได้จากลำไส้กึ่งกลาดำเลี้ยงในอาหาร Nutrient Broth ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง แล้วเก็บส่วนใสด้วยการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 8,000 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที ดูดส่วนใสปริมาตร 100 ไมโครลิตร ลงในหลุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร บนอาหาร Nutrient Agar ที่เติม 3% NaCl และป้ายด้วยแบคทีเรียก่อโรคกุ้ง คือ *Vibrio harveyi* ความเข้มข้น 0.01 ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ที่วัดด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ นำจานเพาะเชื้อบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง คำนวณประสิทธิภาพการยับยั้งโดยวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงใสลบด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางของหลุม

การยับยั้งแบคทีเรียก่อโรคด้วยวิธี Agar overlay [12] นำแบคทีเรียที่แยกได้มาปรับความเข้มข้นเท่ากับ 10^8 CFU/mL จากนั้นดูดเชื้อปริมาตร 5 ไมโครลิตร ลงบนผิวหน้าอาหาร Nutrient Agar ที่เติม 3% NaCl บ่มจนเพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง แล้วเททับผิวหน้าอาหารด้วย Nutrient Soft Agar (0.7% agar) ที่มี *V. harveyi* ความเข้มข้น 0.01 ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง คำนวณ

ความกว้างของบริเวณยับยั้งจากเส้นผ่านศูนย์กลางของวงใสลบด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนี

2.3 ความสามารถในการก่อโรคของแบคทีเรียที่แยกได้จากลำไส้กึ่ง

นำแบคทีเรียที่แยกได้จากลำไส้กึ่งกลาดำซิดลงบนอาหาร Blood Agar บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง สังเกตการณ์ย่อยสลายเม็ดเลือดแดงของแบคทีเรีย เพื่อนำสายพันธุ์ที่ไม่ย่อยสลายเม็ดเลือดแดงไปศึกษาต่อไป

2.4 คุณสมบัติการทนต่อสภาพแวดล้อม

นำแบคทีเรียสายพันธุ์ที่ไม่ย่อยสลายเม็ดเลือดแดงมาเลี้ยงในอาหาร Nutrient Broth ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง แล้วปรับความเข้มข้นให้เป็น 1.0 ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ดูด Cell Suspension ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในอาหาร Nutrient Broth ที่เติม 0, 2, 4, 6, 8 และ 10% NaCl และ Nutrient Broth ที่ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2, 4, 6, 7, 8 และ 10 แล้วบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาความสามารถในการทนต่อเกลือและค่าความเป็นกรด-ด่างต่างๆ นอกจากนี้ดูด Cell Suspension ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในอาหาร Nutrient Broth บ่มที่อุณหภูมิ 10, 25, 37 และ 55 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาความสามารถในการทนต่ออุณหภูมิต่างๆ หลังจากบ่มเขื่อนาน 24 ชั่วโมง นำไปวัดความขุ่นที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เพื่อประเมินการเจริญของเซลล์ โดยสภาวะที่แบคทีเรียทดสอบมีค่าการดูดกลืนแสงสูงจะบ่งชี้ว่าสภาวะนั้นแบคทีเรียสามารถเจริญได้ดีกว่าสภาวะที่มีค่าการดูดกลืนแสงต่ำ ซึ่งในช่วงเริ่มต้นการทดลองแบคทีเรียแต่ละสายพันธุ์มีค่าการดูดกลืนแสงที่สภาวะต่างๆ อยู่ในช่วง 0.01-0.02

2.5 จำแนกชนิดของแบคทีเรียที่มีคุณสมบัติเป็นโพรไบโอติก

นำแบคทีเรียสายพันธุ์ที่มีคุณสมบัติเป็นโพรไบโอติกมาศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและสมบัติทางชีวเคมี [13] และ API Test Kits (BioMerieux, Marcy l' Etoile, France)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

แบคทีเรียที่แยกได้จากลำไส้กึ่งกลาดำในครั้งนี้มีทั้งหมด 14 ไอโซเลท เมื่อนำมาศึกษาคุณสมบัติการเป็นโพรไบโอติกได้ผลการทดลองดังนี้

3.1 คุณสมบัติการย่อยสลายโปรตีน แป้งและไขมัน

แบคทีเรีย 6 ไอโซเลท สามารถย่อยสารอาหารทั้ง 3 ชนิดได้ ได้แก่ S1, S3, S6, S7, T4 และ T5 โดยสายพันธุ์ที่ย่อยโปรตีน แป้งและไขมันได้ดีที่สุด คือ S3 (3.81), S7 (2.0) และ S2 (3.30) ตามลำดับ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพของแบคทีเรียที่แยกได้จากลำไส้กึ่งกลาดำในการย่อยโปรตีน แป้งและไขมัน

Isolate ID	Protein	Starch	Lipid
S1	3.05	1.0	1.85
S2	3.70	-	3.30
S3	3.81	1.0	2.06
S4	1.61	-	-
S5	1.5	-	-
S6	1.79	1.0	1.81
S7	2.96	2.0	2.18
S8	1.59	-	-
T0	-	-	1.19
T1	-	-	2.04
T2	2.33	-	2.16
T3	-	1.4	1.33
T4	1.67	1.4	1.27
T5	1.97	1.3	1.37

–: no bacterial growth on the medium

โปรตีน คาร์โบไฮเดรตและไขมันเป็นสารอาหารที่มีความสำคัญต่อมนุษย์ สัตว์บกและสัตว์น้ำ รวมถึงกิ้งในการส่งเสริมการเจริญเติบโต การทำงานและองค์ประกอบของโครงสร้างร่างกาย ตามปกติแล้วอาหารกึ่งทางการค้ามักประกอบด้วยโปรตีนเป็นองค์ประกอบหลักตั้งแต่ 28-57% ของน้ำหนักอาหารขึ้นอยู่กับชนิดของกิ้ง [14] นอกจากนี้ยังประกอบด้วยไขมันตั้งแต่ 6-10% [15] ดังนั้นหากแบคทีเรียที่มีความสามารถในการย่อยสารอาหารเหล่านี้ได้ดีก็มักจะทำให้ระบบทางเดินอาหารของกิ้งย่อย ดูดซึมและใช้สารอาหารได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลต่อการเจริญเติบโตที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง [3], [7]

3.2 การยับยั้งเชื้อก่อโรค *V. harveyi*

ฤทธิ์การยับยั้ง *V. harveyi* ด้วยเทคนิค Agar well diffusion ของแบคทีเรียที่แยกได้จากลำไส้กิ้งกุลาดำพบในบางสายพันธุ์เท่านั้น ได้แก่ S2, S3 และ T2 โดยมีประสิทธิภาพเท่ากับ + ในขณะที่แบคทีเรียเหล่านี้มีฤทธิ์การยับยั้ง *V. harveyi* สูงขึ้นเมื่อทดสอบด้วยเทคนิค Agar Overlay โดย S3 เป็นสายพันธุ์ที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด (+++) รองลงมาคือ S2 และ T2 (++) ดังตารางที่ 2 จากการจัดจำแนกชนิดของแบคทีเรียพบว่า S3 จัดจำแนกได้เป็น *Bacillus pasteurii* และ S2 และ T2 จัดจำแนกได้เป็น *Micrococcus* sp. ตามปกติแล้วแบคทีเรียสกุล *Bacillus* มีความสามารถในการสร้างสารที่มีฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียได้หลากหลายชนิด เช่น สารปฏิชีวนะ (Polymyxin, Bacitracin และ Gramicidin) แบคเทอริโอซิน ชิเตอร์โฟฟอร์ ไคโซไซม์และกรดอินทรีย์ต่างๆ [3] ส่วนแบคทีเรียสกุล *Micrococcus* นั้นก็มีรายงานความสามารถในการยับยั้งเชื้อก่อโรคเช่นเดียวกัน ได้แก่ *E. coli*, *Salmonella typhimurium*, *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Klebsiella pneumoniae* และ *Aeromonas hydrophila* [16], [17] การศึกษาในครั้งนี้ยังพบว่าการ

ทดสอบฤทธิ์การยับยั้งเชื้อก่อโรคด้วยเทคนิค Agar Overlay มีค่าสูงกว่าการทดสอบด้วยเทคนิค Agar Well Diffusion ทั้งนี้อาจเกิดจากการผลิตสารออกฤทธิ์ของแบคทีเรียในขณะทดสอบ การระเหยของสารออกฤทธิ์ที่ผลิตจากแบคทีเรียในขณะทดสอบด้วย Agar well diffusion และสารออกฤทธิ์เป็นสารที่ยึดเกาะกับผนังเซลล์ของแบคทีเรีย (Membrane-bound Agents) [18] ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าเทคนิค Agar Overlay เป็นเทคนิคที่ดีในการทดสอบฤทธิ์การยับยั้งเชื้อก่อโรคเพื่อคัดเลือกแบคทีเรียที่มีคุณสมบัติเป็นโปรไบโอติกสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพการยับยั้ง *V. harveyi* ของแบคทีเรียที่แยกได้จากลำไส้กิ้งกุลาดำด้วยเทคนิค Agar well diffusion และ Agar overlay methods

Isolate ID	Agar well	Agar overlay
S1	-	-
S2	+	++
S3	+	+++
S4	-	+
S5	-	-
S6	-	+
S7	-	+
S8	-	-
T0	-	-
T1	-	-
T2	+	++
T3	-	+
T4	-	-
T5	-	+

- = no inhibition zone, + = 1-2 mm, ++ = 3-5 mm, +++ = 6-8 mm

3.3 การย่อยสลายเม็ดเลือดแดง

จากแบคทีเรียทั้ง 14 สายพันธุ์ พบว่าแบคทีเรียที่ไม่ย่อยสลายเม็ดเลือดแดง ได้แก่ S2, S3, T0, T1, T2 และ T3 (ตารางที่ 3) การที่เชื้อใดสามารถย่อยสลายเม็ดเลือดแดงได้อาจเป็นการบ่งชี้เบื้องต้นว่าเชื่อนั้นมี

ความสามารถในการก่อโรค เนื่องจากผลิตสาร Hemolysin ที่มีฤทธิ์ทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ของเม็ดเลือดแดง และมักมีผลต่อกลไกการทำลายเชื้อของเม็ดเลือดขาวในระหว่างการติดเชื้อ [19] แต่อย่างไรก็ตามการแตกของเม็ดเลือดแดงอาจเกิดจากสาเหตุอื่นได้เช่นกัน เช่น สารลดแรงตึงผิวที่แบคทีเรียผลิตขึ้น เป็นต้น [20] ดังนั้นหากแบคทีเรียใดมีความสามารถก่อโรคจะไม่นำมาใช้เป็นโพรไบโอติกเป็นอันตราย ถึงแม้ว่าแบคทีเรียนั้นจะมีคุณสมบัติอื่นที่ดี เนื่องจากหากหลุดไปสิ่งแวดล้อมก็อาจจะก่อให้เกิดการแพร่ระบาดโรคไปสู่มนุษย์หรือสัตว์ต่างๆ ทำให้สัตว์หรือมนุษย์ป่วยและล้มตายได้ และอาจทำให้เกิดผลกระทบต่อเศรษฐกิจในทางอ้อมอีกด้วย ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้จึงนำแบคทีเรียที่ไม่สามารถย่อยสลายเม็ดเลือดแดงมาทดสอบในขั้นต่อไป

ตารางที่ 3 การย่อยสลายเม็ดเลือดแดงของแบคทีเรียที่แยกได้จากลำไส้กุ้งกุลาดำบนอาหาร Blood Agar

Isolate ID	Hemolysis pattern	Isolate ID	Hemolysis pattern
S1	β -hemolysis	S8	β -hemolysis
S2	γ -hemolysis	T0	γ -hemolysis
S3	γ -hemolysis	T1	γ -hemolysis
S4	α -hemolysis	T2	γ -hemolysis
S5	α -hemolysis	T3	γ -hemolysis
S6	β -hemolysis	T4	β -hemolysis
S7	β -hemolysis	T5	β -hemolysis

β -hemolysis = complete hemolysis of red blood cells,

α -hemolysis = partial hemolysis of red blood cells, γ -

hemolysis = no hemolysis of red blood cells

3.4 การจัดจำแนกแบคทีเรีย

เมื่อนำแบคทีเรียสายพันธุ์ที่ไม่ย่อยสลายเม็ดเลือดแดงมาจัดจำแนกชนิดแบคทีเรีย ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ชนิดของแบคทีเรียสายพันธุ์ที่ไม่ย่อยสลายเม็ดเลือดแดงที่แยกได้จากลำไส้กุ้งกุลาดำ

Isolate ID	Bacterial species
S2	<i>Micrococcus</i> sp.
S3	<i>Bacillus pasteurii</i>
T0	<i>Methylococcus</i> sp.
T1	<i>Pantoea</i> sp.
T2	<i>Micrococcus</i> sp.
T3	<i>Listeria denitrificans</i>

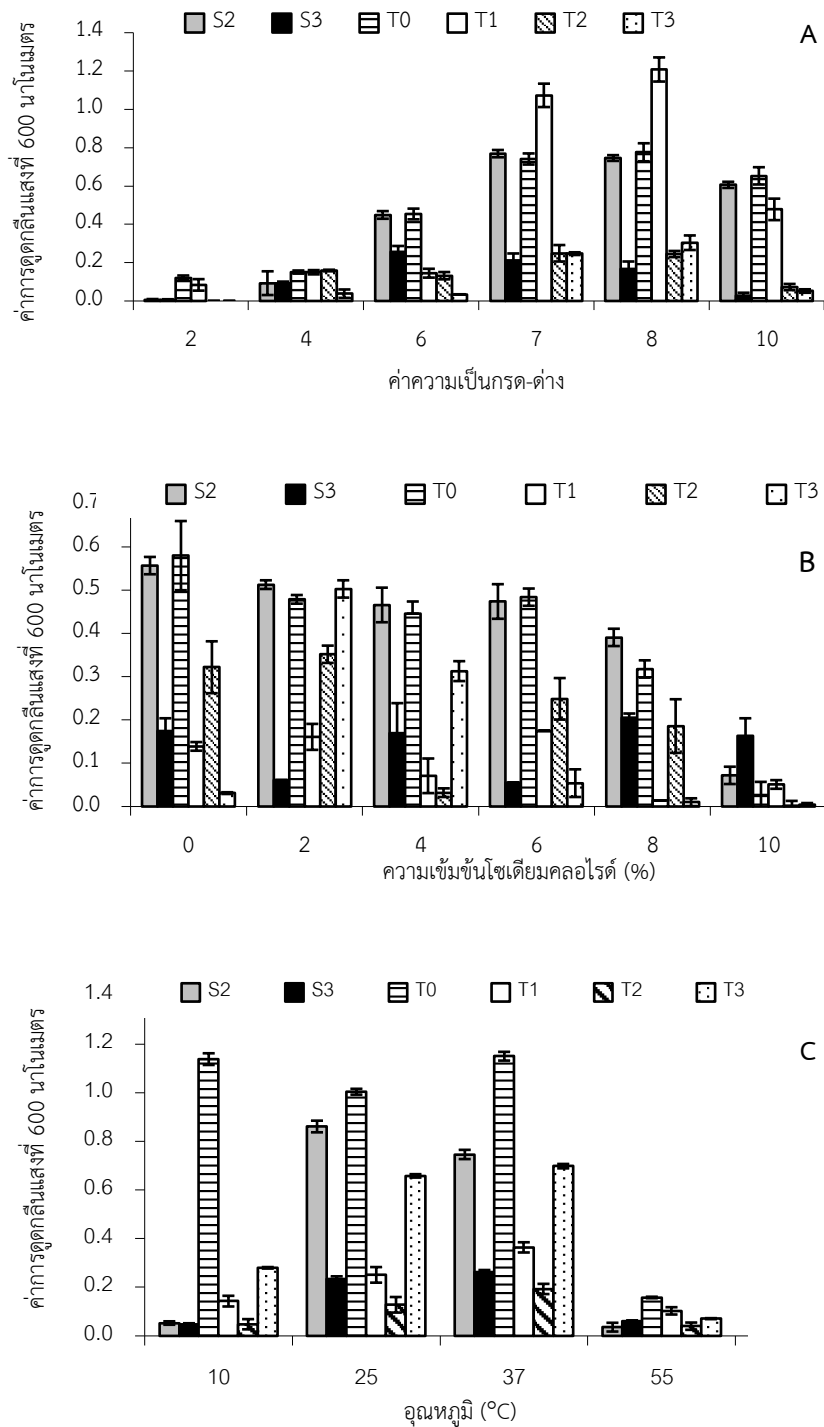
3.5 การทนต่อสภาพแวดล้อมของแบคทีเรีย

เมื่อนำแบคทีเรียที่ไม่ย่อยสลายเม็ดเลือดแดงทั้ง 6 สายพันธุ์ มาศึกษาการทนต่อความเป็นกรด-ด่าง พบว่า *Micrococcus* sp. S2 และ *Methylococcus* sp. T0 เจริญได้ดีในช่วงความเป็นกรด-ด่างตั้งแต่ 6-10 ส่วน *Pantoea* sp. T1 เจริญได้ดีที่ความเป็นกรด-ด่าง 7-10 (รูปที่ 1A) การทดสอบการทนต่อโซเดียมคลอไรด์ พบว่า *Micrococcus* sp. S2 และ *Methylococcus* sp. T0 เจริญได้ดีที่สุดและกว้างที่สุดคือ เจริญได้ดีในโซเดียมคลอไรด์ 0-8 % โดย *Micrococcus* sp. S2 เจริญได้ดีที่สุดในช่วงความเค็มเกลือดังกล่าว (รูปที่ 1B) สำหรับการทนต่ออุณหภูมิต่างๆ พบว่าสายพันธุ์ที่เจริญได้ดีที่สุดในช่วงอุณหภูมิกว้าง คือ *Methylococcus* sp. T0 โดยเจริญได้ที่อุณหภูมิ 10-37 องศาเซลเซียส ส่วน *Micrococcus* sp. S2 และ *L. denitrificans* T3 เจริญได้ดีที่อุณหภูมิ 25-37 องศาเซลเซียส (รูปที่ 1C)

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าแบคทีเรียแต่ละสายพันธุ์มีข้อดีต่างกัน โดย *Micrococcus* sp. S2 สามารถย่อยโปรตีนและไขมันได้ดี ทนต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ และความเข้มข้นเกลือกว้าง ส่วน *B. pasteurii* S3 สามารถย่อยได้ทั้งโปรตีน ไขมันและแป้ง แต่ทนต่อสภาวะแวดล้อมได้ไม่ดัดนัก และ *Methylococcus* sp. T0 สามารถทนต่อสิ่งแวดล้อมได้ดีและเจริญได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ แต่ย่อยสลายได้เพียงไขมันเท่านั้น เป็นต้น เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของการเป็น

โพรไบโอติกพบว่า *Micrococcus* sp. S2 มีความเหมาะสมในการใช้เป็นโพรไบโอติกสำหรับการเพาะเลี้ยงกุ้งมากที่สุด เนื่องจากไม่ย่อยสลายเม็ดเลือดแดง มีความสามารถในการย่อยโปรตีนและไขมัน ยับยั้ง *V. harveyi* ได้ในระดับหนึ่ง เจริญได้ดีในสภาวะที่มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ ค่าความเป็นกรด-ด่างกว้างและอุณหภูมิกว้าง คือ 0-8%, 6-10 และ 25-37 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ทำให้น่าจะรอดชีวิตได้ดีในสภาวะการเลี้ยงกุ้งในน้ำทะเลที่มีความเป็นด่างและความเค็มประมาณ 1-3% โดย M. Thongsom and L. Chanudom [21] ได้คัดแยกแบคทีเรียจากทางเดินอาหารกึ่งตึกแตน พบว่าแบคทีเรียแลคติกจำนวน 7 ไอโซเลท สามารถเจริญได้ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 3-6 สามารถย่อยแป้ง โปรตีนและไขมัน และยับยั้ง *V. parahaemolyticus* และ *V. harveyi* ได้ การศึกษาก่อนหน้านี้ยังได้ยืนยันความสำเร็จของการใช้แบคทีเรียสกุล *Micrococcus* นั่นคือ *M. luteus* เป็นโพรไบโอติกในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยพบว่า *M. luteus* สามารถเพิ่มการเจริญเติบโต การนำสารอาหารไปใช้ในการเจริญเติบโต การรอดชีวิตและความสามารถในการต้านทานต่อโรคที่เกิดจาก *A. hydrophila* ของปลานิล (*Oreochromis niloticus*) ได้อย่างชัดเจน [16] รวมทั้ง *Micrococcus* sp. บางสายพันธุ์ยังถูกนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกทางการค้าสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่จำหน่ายในประเทศไทย ผสมกับแบคทีเรียโพรไบโอติกชนิดอื่น เช่น *Bacillus* และ *Staphylococcus* เป็นต้น [11] เนื่องจากแบคทีเรียชนิดนี้มีบทบาทในการเพิ่มอัตราการรอดชีวิตและการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการผลิตสารต้านจุลชีพกลุ่ม Antimicrobial Peptides ของกุ้งกุลาดำปกติและกุ้งกุลาดำที่เหนียวทำให้เกิดโรคจาก White Spot Virus [22] ส่วนแบคทีเรียชนิดอื่นที่แยกได้ในการศึกษานี้ก็ถูกนำมาใช้เป็นโพรไบโอติกสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเช่นเดียวกัน ได้แก่ *Bacillus* [4]-[6], [8] การศึกษาใน

ครั้งนี้เป็นการทดสอบคุณสมบัติโพรไบโอติกของเชื้อเดี่ยวซึ่งอาจให้ผลไม่ตึงนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสามารถในการยับยั้งเชื้อก่อโรค แบคทีเรียที่แยกได้จากลำไส้กุ้งกุลาดำในครั้งนี้สามารถยับยั้งเชื้อก่อโรคได้ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาก่อนหน้านี้ [16, 17, 21] แต่อย่างไรก็ตามแบคทีเรียบางสายพันธุ์ คือ *Micrococcus* sp. S2 เป็นแบคทีเรียที่สามารถย่อยโปรตีนและไขมันได้สูง ซึ่งสารอาหารทั้งสองชนิดนี้จัดเป็นองค์ประกอบหลักในอาหารกุ้งทะเล และแบคทีเรียชนิดนี้เจริญได้ดีในสภาพแวดล้อมกว้าง ทำให้มีความเหมาะสมนำมาใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในสภาวะแวดล้อมของเมืองไทย แต่อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและครอบคลุมคุณสมบัติที่ดีของโพรไบโอติกในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ จึงควรมีการศึกษาการใช้เชื้อผสมร่วมกับแบคทีเรียโพรไบโอติกสายพันธุ์อื่นในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำต่อไป ซึ่งอาจจะให้ผลการทดลองที่แตกต่างออกไป การใช้โพรไบโอติกแบบเชื้อผสมได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกุ้งทะเล [4, 5, 6, 8] รวมทั้งผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกทางการค้าหลายชนิดมักประกอบด้วยจุลินทรีย์ผสม [11] เนื่องจากจุลินทรีย์แต่ละสายพันธุ์มีความสามารถที่ต่างกัน การใช้จุลินทรีย์ผสมจึงช่วยส่งเสริมบทบาทหน้าที่ของโพรไบโอติกที่แตกต่างกันออกไป ไม่ว่าจะเป็นการผลิตเอนไซม์เพื่อช่วยระบบการย่อยอาหารและดูดซึมสารอาหาร การกระตุ้นภูมิคุ้มกันและการยับยั้งเชื้อก่อโรค เป็นต้น โดย *Micrococcus* sp. S2 อาจนำไปเป็นเชื้อผสมร่วมกับแบคทีเรียสายพันธุ์อื่นที่มีคุณสมบัติที่ดีที่แยกได้จากการศึกษาในครั้งนี้เพื่อทดสอบฤทธิ์ยับยั้งเชื้อก่อโรค ดังรายงานของ S. Nimrat et al. [8] ที่พบว่าส่วนโสมที่ได้จากการเจริญร่วมกัน (Co-culture) ของแบคทีเรียผสม 5 สายพันธุ์ ได้แก่ *B. subtilis*, *B. polymyxa*, *B. megaterium*, *B. licheniformis* และ *B. thuringiensis* ซึ่งมีฤทธิ์ในการยับยั้ง *V. harveyi*



รูปที่ 1 ความสามารถในการเจริญในสภาพแวดล้อม ได้แก่ A) ค่าความเป็นกรด-ต่าง, B) ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ และ C) อุณหภูมิ แตกต่างกัน หลังการบ่มนาน 24 ชั่วโมง; S2 = *Micrococcus* sp., S3 = *B. pasteurii*, T0 = *Methylococcus* sp., T1 = *Pantoea* sp., T2 = *Micrococcus* sp. และ T3 = *L. denitrificans*

เชื้อผสมร่วมกับแบคทีเรียสายพันธุ์อื่นที่มีคุณสมบัติที่ดีที่แยกได้จากการศึกษาในครั้งนี้เพื่อทดสอบฤทธิ์ยับยั้งเชื้อก่อโรค ดังรายงานของ S. Nimrat et al. [8] ที่พบว่าส่วนโสมที่ได้จากการเจริญร่วมกัน (Co-culture) ของแบคทีเรียผสม 5 สายพันธุ์ ได้แก่ *B. subtilis*, *B. polymyxa*, *B. megaterium*, *B. licheniformis* และ *B. thuringiensis* มีฤทธิ์ในการยับยั้ง *V. harveyi* ในขณะที่ส่วนโสมที่ได้จากเชื้อเดี่ยวไม่มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อก่อโรค รวมทั้งอาจนำ *Micrococcus* sp. S2 มาผสมร่วมกับแบคทีเรียชนิดอื่นที่มีคุณสมบัติยับยั้ง *V. harveyi* เพื่อนำมาใช้ในการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเล ยกตัวอย่างเช่น *B. subtilis* F6 และ *Enterococcus* S2 ซึ่งเป็นแบคทีเรียโพรไบโอติกสายพันธุ์ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการของคณะผู้วิจัย โดยแบคทีเรียทั้งสองสายพันธุ์นี้แยกได้จากทางเดินอาหารของกุ้งกุลาดำที่สามารถผลิตเอนไซม์ช่วยย่อยสารอาหารและดูดซึมสารอาหาร รวมทั้งยังสามารถยับยั้ง *V. harveyi* ได้ในหลอดทดลองและเพิ่มความต้านทานต่อโรคเรื้อรังที่เกิดจาก *V. harveyi* ในกุ้งกุลาดำ [23] นอกจากนี้ควรมีการศึกษาประสิทธิภาพการกระตุ้นภูมิคุ้มกัน การป้องกันโรค การย่อยสารอาหาร การดูดซึมสารอาหาร การส่งเสริมการเจริญเติบโตและการรักษาสสมดุลของจุลินทรีย์ประจำถิ่นในระบบทางเดินอาหารของแบคทีเรียชนิดนี้ที่ใช้แบบเชื้อผสมในกุ้งทะเลต่อไป

4. สรุป

Micrococcus sp. S2 เป็นแบคทีเรียที่แยกได้จากทางเดินอาหารกุ้งกุลาดำที่มีศักยภาพเป็นโพรไบโอติกสำหรับการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลมากที่สุด เนื่องจากไม่ย่อยสลายเม็ดเลือดแดง มีความสามารถในการย่อยโปรตีนและไขมัน ยับยั้ง *V. harveyi* ได้ในระดับหนึ่งเจริญได้ดีในสภาวะที่มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ ค่าความเป็นกรด-ด่างกว้างและอุณหภูมิกว้าง คือ 0-8%,

6-10 และ 25-37 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ทำให้น่าจะมีชีวิตรอดได้ดีในสภาวะการเลี้ยงกุ้งในน้ำทะเลที่มีความเป็นด่างและความเค็มประมาณ 1-3% และน่าจะส่งเสริมการย่อยสารอาหารทำให้กุ้งเจริญเติบโตได้ดี โดยอาจจะนำไปใช้เป็นโพรไบโอติกแบบเชื้อผสมกับแบคทีเรียชนิดอื่นที่แยกได้หรือสายพันธุ์อื่นที่มีความสามารถในการยับยั้ง *V. harveyi* แต่การศึกษานี้เป็นเพียงการศึกษาในระดับหลอดทดลอง ดังนั้นจึงควรศึกษาศักยภาพการเป็นโพรไบโอติกของสายพันธุ์นี้ในกุ้งทะเลต่อไป เช่น การกระตุ้นภูมิคุ้มกัน การป้องกันโรค การย่อยสารอาหาร การส่งเสริมการดูดซึมสารอาหาร การส่งเสริมการเจริญเติบโตและการรักษาสสมดุลของจุลินทรีย์ประจำถิ่นในระบบทางเดินอาหาร เป็นต้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาจุลชีววิทยาและภาควิชาวาริชศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการทดลองและอุปกรณ์ต่าง ๆ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Fisheries Statistics of Thailand, *Statistics of Marine Shrimp Culture 2017*. Fisheries Statistics Analysis and Research Group, Fisheries Development Policy and Strategy Division, Department of Fisheries, Ministry of Agriculture and Cooperatives, No. 9/2019, 2019.
- [2] F.C. Cabello, H.P. Godfrey, A.H. Buschmann and H.J. Dölz, "Aquaculture as yet another environmental gateway to the development and globalisation of antimicrobial resistance," *Lancet*

- Infectious Diseases*, vol. 16, no. 7, pp. e127-e133, Jul. 2016.
- [3] F.J. Gatesoupe, "The use of probiotics in aquaculture," *Aquaculture*, vol. 180, no. 1-2, pp. 147-165, Oct. 1999.
- [4] T. Boonthai, V. Vuthiphandchai and S. Nimrat, "Probiotic bacteria effects on growth and bacterial composition of black tiger shrimp (*Penaeus monodon*)," *Aquaculture Nutrition*, vol. 17, no. 6, pp. 634-644, Dec. 2011.
- [5] S. Nimrat, T. Boonthai and V. Vuthiphandchai, "Effects of probiotic forms, compositions of and mode of probiotic administration on rearing of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) larvae and postlarvae," *Animal Feed Science and Technology*, vol. 169, no. 3-4, pp. 244-258, Nov. 2011.
- [6] S. Nimrat, S. Suksawat, T. Boonthai and V. Vuthiphandchai, "Potential *Bacillus* probiotics enhance bacterial numbers, water quality and growth during early development of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*)," *Veterinary Microbiology*, vol. 159, no. 3-4, pp. 443-450, Oct. 2012.
- [7] N.V. Hai, "The use of probiotics in aquaculture: review," *Journal of Applied Microbiology*, vol. 119, no. 4, pp. 917-935, Oct. 2015.
- [8] S. Nimrat, W. Khaopong, J. Sangsong, T. Boonthai and V. Vuthiphandchai, "Improvement of growth performance, water quality and disease resistance against *Vibrio harveyi* of postlarval whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) by administration of mixed microencapsulated *Bacillus* probiotics," *Aquaculture Nutrition*, vol. 26, no. 5, pp. 1407-1418, Oct. 2020.
- [9] S. Nimrat, P. Kaewmanee, T. Boonthai and V. Vuthiphandchai, "Field survey on the use of probiotic in Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) aquaculture in Rayong province," *Burapha Science Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 56-69, 2009.
- [10] S. Rengpipat, W. Phianphak, S. Piyatiratitivorakul and P. Menasveta, "Effects of a probiotic bacterium on black tiger shrimp *Penaeus monodon* survival and growth," *Aquaculture*, vol. 167, no. 3-4, pp. 301-313, Sep. 1998.
- [11] S. Nimrat and V. Vuthiphandchai, "In vitro evaluation of commercial probiotic products used for marine shrimp cultivation in Thailand," *African Journal of Biotechnology*, vol. 10, no. 22, pp. 4643-4650, 2011.
- [12] S.R. Spelhaug and S.K. Halander, "Inhibition of foodborne bacteria pathogens by bacteriocin from *Lactococcus lactis* and *Pediococcus pentosaceus*," *Journal of Food Protection*, vol. 52, no. 12, pp. 856-862, Dec. 1989.

- [13] J.G. Holt, N.R. Krieg, P.H.A. Sneath, J.T. Staley and S.T. Williams, *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology*. Baltimore: Williams and Wilkins, 1994.
- [14] S.Y. Shiau, "Nutrient requirements of penaeid shrimps," *Aquaculture*, vol. 164, no. 1-4, pp. 77-93, May 1998.
- [15] D.M. Akiyama, W.G. Dominy and A.L. Lawrence, "Penaeid shrimp nutrition for the commercial feed industry," in *Proceedings of the Aquaculture Feed Processing and Nutrition Workshop*, American Soybean Association, Singapore, 1991, pp. 80-98.
- [16] A.M. Abd El-Rhman, Y.A.E. Khattab and A.M.E. Shalaby, "*Micrococcus luteus* and *Pseudomonas* species as probiotics for promoting the growth performance and health of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*," *Fish and Shellfish Immunology*, vol. 27, no. 2, pp. 175-180, Aug. 2009.
- [17] A. Akbar, U. Sitara, I. Ali, N. Muhammad and S.A. Khan, "Isolation and characterization of biotechnologically potent *Micrococcus luteus* strain from environment," *Pakistan Journal of Zoology*, vol. 46, no. 4, pp. 967-973, Aug. 2014.
- [18] B.H. Çadirci and S. Çitak, "A comparison of two methods used for measuring antagonistic activity of lactic acid bacteria," *Pakistan Journal of Nutrition*, vol. 4, no. 4, pp. 237-241, Apr. 2005.
- [19] M. Zaky and W. Zina, *Pathogenic Hemolytic Bacteria*. Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2016.
- [20] N. Butkhot, P. Soodsawaeng, T. Boonthai, V. Vuthiphandchai and S. Nimrat, "Properties and safety evaluation of *Bacillus velezensis* BUU004 as probiotic and biopreservative in seafood products," *Southeast Asian Journal of Tropical Medicine and Public Health*, vol. 51, no. 2, pp. 201-211, Jun. 2020.
- [21] M. Thongsom and L. Chanudom, "Isolation of lactic acid bacteria from mantis shrimp (*Harpiosquilla raphidea*) intestine for probiotic development," *RMUTSV Research Journal*, vol. 11, no. 2, pp. 232-244, 2019.
- [22] S.P. Antony, I.S.B. Singh, R.M. Jose, P.R.A. Kumar and R. Philip, "Antimicrobial peptide gene expression in tiger shrimp, *Penaeus monodon* in response to gram-positive bacterial probionts and white spot virus challenge," *Aquaculture*, vol. 316, no. 1-4, pp. 6-12, Jun. 2011.
- [23] S. Nimrat, P. Tanutpongpalin, K. Sritunyalucksana, T. Boonthai and V. Vuthiphandchai, "Enhancement of growth performance, digestive enzyme activities and disease resistance in black tiger shrimp (*Penaeus monodon*) postlarvae by potential probiotics," *Aquaculture International*, vol. 21, no. 3, pp. 655-666, Oct. 2013.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ครีมแต่งหน้าเค้กไร้ไขมันทรานส์

บุญญาพร เชื้อสมพงษ์^{1*} นวลศรี สงสม² มนฤทัย ศรีทองเกิด¹ พรทวิ ชนสัมบัณณ์¹ และ
ณัฏฐา พันธุ์วงศ์¹

¹ คณะโรงเรียนการเรือน มหาวิทยาลัยสวนดุสิต วิทยาเขตสุพรรณบุรี

² คณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยสวนดุสิต วิทยาเขตสุพรรณบุรี

^{1,2} 57 หมู่ 2 ถนนสุพรรณบุรี-ป่าโมก ตำบลโคกโคเต่า อำเภอมะเมือง จังหวัดสุพรรณบุรี 72000

รับบทความ 1 เมษายน 2564 แก้ไขบทความ 21 กรกฎาคม 2564 ตอบรับบทความ 16 สิงหาคม 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ครีมแต่งหน้าเค้กไร้ไขมันทรานส์ การคัดเลือกสูตรครีมแต่งหน้าเค้กพื้นฐาน 3 สูตร โดยผู้ทดสอบ จำนวน 50 คน โดยแบบชิมทดสอบชิม 9- Points Hedonic Scale Test พบว่า สูตรครีมแต่งหน้าเค้กที่มีคะแนนความชอบรวมสูงสุดเท่ากับ 8.37 ± 0.71 คะแนน อยู่ในระดับชอบมากที่สุด ซึ่งประกอบด้วย เนยสด ร้อยละ 36.08 เนยขาว ร้อยละ 15.47 ไข่ขาว ร้อยละ 5.15 น้ำตาลทราย ร้อยละ 25.77 เกลือ ร้อยละ 1.03 น้ำ ร้อยละ 15.47 และ กลีนิวนิลลา ร้อยละ 10 จากนั้นทดสอบปริมาณทดแทนเนยขาวในสูตรครีมด้วยถั่วขาว ในปริมาณที่แตกต่างกัน 5 ระดับ คือ ร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 คัดเลือกสูตรครีม พบว่า ปริมาณการทดแทนเนยขาวด้วยถั่วขาว ที่เหมาะสมในสูตรครีม คือสูตรร้อยละ 100 มีคะแนนความชอบรวม เท่ากับ 8.42 ± 0.75 อยู่ในระดับความชอบมากที่สุด ได้รับการยอมรับจากผู้ทดสอบชิม จำนวน 100 คน โดยมีค่าคะแนนเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 8.10 ± 0.74 คะแนน ผลิตภัณฑ์มีค่าความสว่าง (L^*) เท่ากับ 37.52 ± 0.04 a* เท่ากับ 0.30 ± 0.01 b* เท่ากับ 11.19 ± 0.04 C เท่ากับ 11.20 ± 0.04 และ H เท่ากับ 88.42 ± 0.07 ตามลำดับ ค่าความหนืด เท่ากับ 2857 ± 26.62 cPs ค่าความชื้น ร้อยละ 31.78 ± 0.05 % w.b. และค่าเนื้อสัมผัส ได้แก่ ความแน่นเนื้อ เท่ากับ 55340.06 ± 68.39 g, ความคงตัว เท่ากับ $47,435.10 \pm 376.39$ นิวตัน และการรวมตัวกัน เท่ากับ 5.30 ± 0.39 g.sec ซึ่งมากกว่าสูตรครีมพื้นฐาน และคุณค่าทางโภชนาการต่อหนึ่งหน่วยบริโภค มีคาร์โบไฮเดรตลดลง 0.19 กรัม พลังงานมากกว่า 32.43 กิโลแคลอรี ไขมันลดลง 1.97 กรัม น้ำตาลลดลง 30 กรัม และโปรตีนมากกว่าสูตรครีมพื้นฐาน 0.23 กรัม ซึ่งมีปริมาณเท่ากับ 150 กรัมโดยน้ำหนัก

คำสำคัญ : การพัฒนา; ครีมแต่งหน้าเค้ก; ไขมันทรานส์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 9521 8025, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: boonyaporn_chu@dusit.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Development of Cake Decorated Cream without Trans Fat

Boonyaporn Chuamsompong^{1*} Nualsri Songsom² Monruthai Srithongkerd¹
Porntawee Tanasombun¹ and Natcha Phanwong¹

¹ Faculty of School of Culinary Art, Suan Dusit University Suphanburi Campus

² Faculty of Management Sciences, Suan Dusit University Suphanburi Campus

^{1,2} 57 Moo 2 Suphanburi-Pamok Rd, Khok Kho Thao, Mueang District, Suphan Buri 72000

Received 1 April 2021; Revised 21 July 2021; Accepted 16 August 2021

Abstract

The objective of this research was to study the development of cake decorated cream without trans fat. selection of buttercream using as a standards recipe from 3 formulas 50 tasters by 9 Point Hedonic Scales Test. The formula using buttercream had 8.37 ± 0.71 points at very like level was composed of butter 36.08 % shortening 15.47 % white egg 5.15 % sugar 25.77 % salt 1.03 % water 15.47 % and vanilla 10 %. Then substitute shortening with white kidney bean at 0, 25, 50, 75, 100 %. The 100% white kidney bean recipe was the highest acceptable 8.42 ± 0.75 points at the very like level. The acceptance test with 100 consumers was 8.10 ± 0.74 score at very like. The color of products showed $L^* a^* b^* C$ and H were 37.52 ± 0.04 , 0.30 ± 0.01 , 11.19 ± 0.04 , 11.20 ± 0.04 , 88.42 ± 0.07 respectively, The Viscosity was 2857 ± 26.62 cPs, Moisture was 31.78 ± 0.05 w.b., Texture (Firmness) was 55340.06 ± 68.39 g, Consistency was 47435.10 ± 376.39 N. and Cohesiveness was 5.30 ± 0.39 g.sec which more than the standard recipe and nutritive values per one serving. Carbohydrates decrease at 0.19 gram, Energy increase at 32.43 kilocalories, Fat decrease at 1.97 gram, Sugar decrease at 30 gram and more protein than the standard recipe with 0.23 gram. per serving at 150 g.

Keywords : Development; Cake Decorate Cream; Trans Fat

* Corresponding Author. Tel.: +668 9521 8025, E-mail Address: boonyaporn_chu@dusit.ac.th

1. บทนำ

ปัจจุบันนี้สังคมตระหนักถึงปัญหาด้านสุขภาพ และการให้ความสำคัญกับการเลือกรับประทานอาหารที่ดีต่อสุขภาพมากขึ้น เนื่องจากภาวะน้ำหนักเกินและโรคอ้วนเป็นปัญหาสุขภาพของประชาคมโลก ภาวะโรคอ้วนเป็นปัจจัยเสี่ยงสร้างผลกระทบทางสุขภาพกายและสุขภาพจิต ผู้ที่อยู่ในภาวะโรคอ้วนร้อยละ 58 เกิดโรคเบาหวาน ร้อยละ 42 เกิดโรคเมตาบอลิซึม ร้อยละ 21 และเกิดโรคหลอดเลือดหัวใจ ซึ่งปัญหาสุขภาพเหล่านี้เป็นสาเหตุการเสียชีวิตที่สำคัญเปรียบเสมือนดังฆาตกรเงียบ ผลการศึกษาวิจัยยืนยันอย่างเป็นรูปธรรมที่ชัดเจนว่าภาวะน้ำหนักเกิน และโรคอ้วนส่งผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายด้านสุขภาพเป็นจำนวนมหาศาล การรับประทานไขมันทรานส์เป็นหนึ่งในปัจจัยเสี่ยงที่สำคัญมากของการเกิดโรค [1] ไขมันทรานส์ส่งผลให้ผู้บริโภคมีความเสี่ยงในการเกิดโรคหลอดเลือดหัวใจมากขึ้นถึง 10 เท่า [2] ด้วยเหตุนี้ประเทศต่าง ๆ ในยุโรป รวมถึงสหรัฐอเมริกา จึงได้กำหนดค่ามาตรฐานสูงสุดของปริมาณไขมันทรานส์ในอาหารไว้ สิ้นค้าใดที่มีค่าไขมันทรานส์เกินกว่ากำหนด ถูกห้ามจำหน่าย [3] ทำให้ผู้บริโภคตระหนักในปัญหาข้างต้นจึงเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมในการบริโภค โดยหลีกเลี่ยงอาหารมีไขมันทรานส์ อาทิเช่น เนยขาว (Shortenings) มาร์การีน (Margarine) ที่ใช้ผลิตอาหารเพื่อยืดอายุของผลิตภัณฑ์จำพวกเบเกอรี่ เช่น บัตเตอร์ครีม โดนัต เป็นต้น

เนยขาว (Shortening) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ไขมัน (Fat) หรือน้ำมันที่ใช้เป็นส่วนประกอบในการทำผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ (Bakery) เพื่อตีครีมทำเค้ก ผสมกับแป้งทำพาย ทำให้แป้งกระจายไม่เกาะตัวกันแน่น และใช้เป็นไขมันสำหรับการทอด (Frying Oil) [4] เนยขาวผลิตขึ้นเป็นครั้งแรกในปี 1911 โดย Crisco ผู้ผลิตเนยขาวอันโด่งดังในสหรัฐอเมริกา มีคุณสมบัติคล้ายเนยและมันหมูแต่ต้นทุนการผลิตต่ำกว่า ไม่จำเป็นต้องแช่เย็น [5] ลักษณะเนื้อสัมผัสมี

ความสำคัญต่อการใช้งาน โดยวัตถุดิบหลักในการผลิตซอร์ตเทนนิ่ง คือ ไขมันประเภทไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน (Polyunsaturated Fat) ผ่านกระบวนการเติมไฮโดรเจน ทำให้เปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นกึ่งของแข็ง มีจุดเกิดควัน (Smoke Point) สูงกว่าเนยและมาร์การีน [5] กระบวนการนี้ทำให้ไขมันไม่อิ่มตัวที่ดีต่อสุขภาพกลายเป็นไขมันอิ่มตัวที่เต็มไปด้วยอันตราย [2] เมื่อเรารับประทานไขมันทรานส์เข้าไป ไขมันทรานส์จึงกลายเป็นสิ่งแปลกปลอมที่ร่างกายเราไม่เคยรู้จักมาก่อน ร่างกายเราไม่มีเอนไซม์ที่ช่วยในการนำไขมันทรานส์ไปใช้ร่างกายต้องกำจัดไขมันทรานส์ออกจากร่างกาย เพราะเป็นสิ่งแปลกปลอมของร่างกาย ระบบการใช้ไขมันในร่างกายเกิดการแปรปรวนทำให้ร่างกายมีการสร้างไขมันโปรตีนตัวร้าย (LDL) จำนวนมาก ไขมันโปรตีนตัวร้ายไปจับคู่กับคอเลสเตอรอลทำให้เกิดเป็นคอเลสเตอรอลตัวร้าย (LDL-C) ทำให้ร่างกายไม่สามารถสร้างไขมัน โปรตีนตัวดี (HDL-C) และลดจำนวนลง ทำให้ร่างกายสร้างไตรกลีเซอไรด์จำนวนมากก่อให้เกิดความเสี่ยงในการเกิดโรค [6] จากปัญหาข้างต้นสมาคมโรคหัวใจทั้ง ในประเทศไทยและต่างประเทศต่างยอมรับว่า ถั่วเป็นอาหารเพื่อสุขภาพหัวใจและหลอดเลือด เพราะมีสรรพคุณช่วยลดคอเลสเตอรอลไม่ดี (LDL) และลดความเสี่ยงต่อโรคหลอดเลือดหัวใจลงเมื่อรับประทานเป็นประจำคู่กับอาหารที่มีประโยชน์อื่นๆ [7]

ถั่วขาว (White Kidney Beans) มีชื่อดั้งเดิมว่า ถั่วแระริคอต (Haricot Bean) มีต้นกำเนิดในแถบประเทศเม็กซิโก ถั่วขาวมีลักษณะทางพฤกษศาสตร์เหมือนถั่วแดง เมล็ดมีสีขาว ลักษณะกลมมีขนาดเล็กกว่าเมล็ดถั่วแดงหลวง [8] ถั่วขาวอุดมไปด้วยสารอาหารที่ให้พลังงาน เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และ มีสารอาหารที่มีคุณสมบัติเชิงหน้าที่มากมาย เช่น วิตามิน แร่ธาตุ ที่พบมากในถั่วขาว 3 อันดับแรกคือ เหล็ก แมกนีเซียม และแมงกานีส มีสารยับยั้งการทำงานของ เอนไซม์แอลฟาอะไมเลส มีกากใยอาหารช่วยระบบขับถ่าย และ

ยังมีสาร ต่างๆ ที่ช่วยลดความเสี่ยงต่อภาวะคอเลสเตอรอลสูง และโรคเบาหวาน [9] การนำเมล็ดถั่วขาวมาสกัดด้วยน้ำพอบสาร “ฟาซีโอลามิน” (Phaseolamin) ในส่วนของโปรตีนที่สามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส (Alpha-amylase) ซึ่งทำหน้าที่ย่อยคาร์โบไฮเดรต ทำให้อาหารประเภทสตาρχ ที่เรบริโภคเข้าไปไม่เปลี่ยนเป็นสภาพน้ำตาลทั้งหมด [10] คุณสมบัติที่โดดเด่นที่สุดของถั่วขาว คือช่วยควบคุมน้ำหนักโดยการยับยั้งการย่อยคาร์โบไฮเดรตให้พลังงานต่ำ มีส่วนช่วยในระบบขับถ่าย ช่วยป้องกันการเกิดโรคทางเดินอาหาร นอกจากนี้ ยังมีความเชื่อมโยงระหว่างการรับประทานอาหารที่มีกากใยสูงช่วยลดปริมาณคอเลสเตอรอล และป้องกันภาวะไขมันในเลือดสูง การลดความเสี่ยงการเกิดโรคหัวใจและหลอดเลือด และการลดความเสี่ยงการเกิดโรคความดันโลหิตสูง อาหารที่มีกากใยสูงมีค่าดัชนีไกลซีมิกต่ำเหมาะสมสำหรับผู้ป่วยโรคเบาหวานอีกด้วย [9] โปรตีนจากถั่วขาว ประกอบด้วย กรดแอมิโน ที่จำเป็นต่อร่างกายครบถ้วน นอกจากนี้ สารฟาซีโอลามิน (Phaseolin) เป็นสารประเภทโปรตีนสามารถสกัดได้จากถั่วขาว มีสมบัติการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส (Alpha-amylase) ส่งผลให้เกิดการย่อยคาร์โบไฮเดรตลดลง จึงทำให้สตาρχไม่สามารถเปลี่ยนเป็นน้ำตาลได้ [10] ถั่วขาวยังมีสตาρχทนย่อย (Resistant Starch) ประมาณร้อยละ 14.8 [11] ดังนั้นการรับประทานถั่วขาวหรือสารสกัดฟาซีโอลามินช่วยให้กระบวนการเปลี่ยนสตาρχ ในอาหารให้เป็นน้ำตาลลดน้อยลง ร่างกายจึงดึงไขมันในร่างกายออกมาใช้ทดแทน จึงช่วยให้ไขมันสะสมลดน้อยลง ร่างกายไม่อ้วนหรือลดความอ้วนได้ นอกจากนั้นสตาρχที่บางส่วนไม่เปลี่ยนเป็นน้ำตาลเลย ก็ทำให้ร่างกายรู้สึกอิ่มได้นานไม่รู้สึกหิวง่าย

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีความสนใจพัฒนาครีมแต่งหน้าเค้กไร้ไขมันทรานส์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการ

ทดแทนปริมาณถั่วขาวที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์ครีมแต่งหน้าเค้ก รวมทั้งการศึกษาวเคราะห์คุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ และการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ครีมแต่งหน้าเค้ก ไร้ไขมันทรานส์ ผู้บริโภคยุคปัจจุบันที่เลือกหลีกเลี่ยงการบริโภคไขมันทรานส์ ซึ่งเกิดผลเสียจากสาเหตุของการเกิดโรคแก่ร่างกาย อีกทั้งยังสามารถให้ผู้บริโภครับประทานถั่วขาวซึ่งมีคุณค่าทางโภชนาการสูง และให้พลังงานต่ำในรูปแบบครีมแต่งหน้าเค้กไร้ไขมันทรานส์ ทำให้ได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคจึงนำสู่การเพิ่มมูลค่าถั่วขาวและผลผลิตทางการเกษตรโครงการหลวง เพื่อเพิ่มรายได้แก่ชุมชนและการพัฒนาเศรษฐกิจของไทย

2. ระเบียบวิธีวิจัย

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ครีมแต่งหน้าเค้กไร้ไขมันทรานส์ ซึ่งทดแทนไขมันทรานส์ด้วยถั่วขาว ดังนั้นผู้วิจัยจะต้องรวบรวมข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้องและทำการศึกษา และเลือกใช้เครื่องมือในการทำการทดลองงานวิจัยนี้ โดยมีระเบียบวิธีวิจัย ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 ขั้นตอนการวิจัย

2.1.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัย

เนยสดชนิดจืด (ตราออร์คิด / บริษัทมะลิกรุป 1962 จำกัด) เนยขาว (ตราโอพีครีม / บริษัทเกตุวานิชอุตสาหกรรม จำกัด) ถั่วขาว (ตราโครงการหลวง) ไข่ขาวเบอร์2 (ตราซีพี / บริษัทเจริญโภคภัณฑ์อาหาร จำกัด มหาชน) น้ำตาลทราย (ตรามิตรผล / บริษัทน้ำตาลมิตรผล จำกัด) เกลือ (ตราปรุงทิพย์ / บริษัทอุตสาหกรรมเกลือบริสุทธิ์ จำกัด) น้ำ (ตราคริสตัล / บริษัทเสริมสุข จำกัด มหาชน) กลิ่นวนิลลา (ตราวินเนอร์ / ห้างหุ้นส่วน จำกัด เกรทฮิลล์)

2.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องผสมอาหาร เครื่องชั่ง เครื่องปั่นของเหลว กระทะทองเหลือง หม้อต้ม กระชอนดำนน้ำตาล อ่าง

ผสมกลาง, เล็ก ซ้อนดวง ถ้วยดวงของเหลว ถ้วยเตรียมพายยาง พายพลาสติก พายไม้ เทอร์โมมิเตอร์ หัวบีบ/ถุงบีบ เครื่องวัดค่าสี เครื่องวัดความหนืด เครื่องวัดเนื้อสัมผัส และตู้อบลมร้อนสำหรับหาความชื้น

2.1.3 วิธีการดำเนินการทดลอง

2.1.3.1 คัดเลือกสูตรพื้นฐานผลิตภัณฑ์ครีมแต่งหน้าเค้ก ทำการคัดเลือกสูตรครีมแต่งหน้าเค้กจำนวน 3 สูตร เพื่อใช้เป็นสูตรพื้นฐานและนำไปทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสในด้านความชอบโดยรวม สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมด้วยวิธีการทดสอบแบบให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ (9 Point Hedonic Scale Test) โดยใช้ผู้ทดสอบเป็นนักศึกษาสาขาวิชาเทคโนโลยีการประกอบอาหารและการบริการ จำนวน 50 คน คณะโรงเรียนการเรือนมหาวิทยาลัยสวนดุสิต วิทยาเขตสุพรรณบุรี

ตารางที่ 1 สูตรพื้นฐานครีมแต่งหน้าเค้ก ทั้ง 3 สูตร

ส่วนผสม	สูตรที่ 1 ร้อยละ	สูตรที่ 2 ร้อยละ	สูตรที่ 3 ร้อยละ
เนยสด	13.22	36.08	32.26
เนยขาว	26.45	15.47	21.51
ไข่ขาว	19.83	5.15	10.75
น้ำตาลทราย	26.45	25.77	26.88
เกลือ	0.17	1.03	0.54
น้ำ	13.22	15.47	8.06
กลิ่นวนิลลา	0.66	0.66	0.66

การเตรียมครีมแต่งหน้าเค้ก โดยผสมน้ำ น้ำตาลทราย และเกลือปั่นเข้าด้วยกัน ยกขึ้นตั้งไฟอ่อนประมาณ 105 องศาเซลเซียส ประมาณ 12-15 นาที เคี่ยวจนส่วนผสมขึ้นเป็นน้ำเชื่อม ตีไข่ขาวด้วยหัวตีตะกร้อโดยใช้ความเร็วสูงสุดจนขึ้นฟู เติมน้ำเชื่อมที่ยังร้อนอยู่ที่ละน้อยจนหมด ตีต่อด้วยความเร็วปานกลาง

ระดับ 5 - 7 จนส่วนผสมเย็นสนิท ใส่เนยสดและเนยขาวลงผสม ตีต่อจนส่วนผสมขึ้นฟูและเข้ากันดี จึงนำไปผสมสีต่างๆ และปาดตกแต่งบนหน้าเค้ก [12] ซึ่งเป็นวิธีการตีแบบอิตาเลียน ลักษณะเนื้อครีมจะคงรูปมากกว่าแบบอื่นๆ

2.1.3.2 พัฒนาผลิตภัณฑ์ครีมแต่งหน้าเค้ก ไร่ไขมันทรานส์ นำสูตรพื้นฐานที่ผ่านการคัดเลือก คือ สูตรที่ 2 มาทดสอบปริมาณการทดแทนเนยขาวด้วยถั่วขาวที่เหมาะสมในสูตรครีมแต่งหน้าเค้ก โดยทดแทนปริมาณถั่วขาวในอัตราส่วนตามน้ำหนัก ร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 ของส่วนผสมทั้งหมด เตรียมครีมแต่งหน้าเค้ก ตามข้อ 1 คัดเลือกกลุ่ม โดยผู้ทดสอบจำนวน 50 คน และนำมาทดสอบคุณภาพด้านประสาทสัมผัสและการยอมรับของคุณลักษณะด้านลักษณะที่ปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และด้านความชอบโดยรวม เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ครีมแต่งหน้าเค้กทดแทนเนยขาวด้วยถั่วขาวที่เหมาะสมที่สุด ด้วยวิธีการนำถั่วขาวมาแช่น้ำ 5-6 ชั่วโมง จึงแกะเปลือกถั่วขาวออกนำถั่วขาวไปต้มที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที หลังจากต้มถั่วขาวสุกแล้ว ใช้กระชอนกรองเนื้อถั่วขาว พักให้เย็น ใส่เครื่องปั่นของเหลว ปั่นจนละเอียด กรองผ่านกระชอน และนำถั่วขาวใส่กระทะทองเหลือง ตั้งไฟอ่อน กวนจนถั่วขาวจับตัวเป็นเนื้อเนียน ไม่ติดกระทะ และพักไว้จนเย็นสนิทจึงนำไปผสมกับส่วนผสมบัตเตอร์ครีมที่ทดแทนเนยขาวด้วยถั่วขาว



รูปที่ 1 กระบวนการทำถั่วขาวกวน

2.2 การวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์ครีม แต่งหน้าเค้กไร้ไขมันทรานส์ ดังนี้

2.2.1 วิเคราะห์คุณภาพทางประสาทสัมผัส ประเมินทางด้านประสาทสัมผัส โดยวิธีการ 9- Points Hedonic Scale Test [13] วางแผนการทดลองโดยแบบบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design, RCBD) เปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติโดยวิธี Duncan's new Multiple Range Test, DMRT วิเคราะห์ค่าความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 [13] วิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS เวอร์ชัน 19

2.2.2 วิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ครีมแต่งหน้าเค้กไร้ไขมันทรานส์ โดยนำตัวอย่างผลิตภัณฑ์ครีมแต่งหน้าเค้กไร้ไขมันทรานส์ ขนาดตัวอย่าง 10 กรัม ต่อ 1 ตัวอย่างไปทดสอบ

2.2.2.1 ค่าสี ด้วยเครื่อง Color Meter ยี่ห้อ Colorimeter รุ่น AR-F701 ค่าที่วัด ได้แก่ ค่า L^* a^* b^* C และ H โดยการวัดค่าสี จำนวน 3 ครั้ง แล้วบันทึกผลการทดลอง

2.2.2.2 ค่าความหนืด ด้วยเครื่องวัด Viscometer ยี่ห้อ Brookfield รุ่น DV-II+ Pro ค่าที่วัด ได้แก่ ความหนืด (Viscosity) โดยใส่ตัวอย่างในภาชนะรองรับ นำมาวางประกอบเข้ากับเครื่องวัดความหนืด และเข็มวัดอุณหภูมิ 100 รอบ/นาที เป็นเวลานาน 180 วินาที เพื่อดูค่าความหนืด และจดบันทึกการทดลอง

2.2.2.3 ค่าเนื้อสัมผัส ด้วยเครื่องวัด Texture Measurement รุ่น TA. XT. Plus. ค่าที่วัด ได้แก่ ความแน่นเนื้อ (Firmness) ความคงตัว (Consistency) การรวมตัวกัน (Cohesiveness) โดยนำตัวอย่างมาใส่ในถ้วยใส่ตัวอย่างให้เนื้อตัวอย่างสม่ำเสมอ และปาดตัวอย่างให้ผิวหน้าเรียบ โดยใช้หัววัดกดลงไปบนตัวอย่างด้วยแรงเริ่มต้น ที่ 5 g จนถึง 400 g Pre-test Speed 2.0 mm/s, Test Speed 1.0 mm/s และ Post-Test Speed 10.0 mm/s วัดค่า 5 ครั้ง ในแต่ละซ้ำ และรายงานผลเป็นหน่วยนิวตัน

2.2.2.4 ค่าความชื้น ด้วยเครื่องวัด Hot Air Oven ยี่ห้อ Memmert ค่าที่วัด Moisture ด้วยวิธีการ Primary Method โดยเตรียมตัวอย่าง ประมาณ 10 กรัม ในการวิเคราะห์ความชื้น ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง และทำให้แห้งด้วยตู้อบลมร้อน อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้ง อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 105 - 110 องศาเซลเซียส ประมาณ 2 ชั่วโมง แล้วแยกใส่โถแก้วดูดความชื้น (Desiccator) จากนั้นจึงทำการอบซ้ำอีกครั้งละ 30 นาที จนได้น้ำหนักที่คงที่ แล้วจึงนำไปคำนวณต่อไป

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

1. สูตรพื้นฐานของผลิตภัณฑ์ครีมแต่งหน้าเค้กจากการประเมินทางประสาทสัมผัสของผู้ทดสอบชิมจากอาจารย์และนักศึกษาทางด้านอาหาร จำนวน 50 คน พบว่า ผลิตภัณฑ์ครีมแต่งหน้าเค้ก สูตรพื้นฐานที่ 2 [12] ซึ่งมีส่วนผสม ได้แก่ เนยสด ไข่ขาว น้ำตาลทราย เกลือ น้ำ และเนยขาว โดยมีค่าคะแนนเฉลี่ยทางด้านลักษณะที่ปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบ โดยรวม เท่ากับ 8.13 ± 0.77 , 8.33 ± 0.66 , 8.27 ± 0.88 , 8.07 ± 0.69 , 8.23 ± 0.81 , 8.37 ± 0.71 คะแนน โดยสูตรที่ 1 [14] มีปริมาณเนยขาวมาก มีผลต่อสีที่เปลี่ยนไปเป็นสีขาวจากปริมาณเนยขาวและมีกลิ่นครีมแต่งหน้าเค้กจากเนยขาว ปริมาณไข่ขาวมีมากกว่าทุกสูตรทำให้มีกลิ่นคาวไข่มากกว่า รสชาติครีมแต่งหน้าเค้กหวานมากกว่าสูตรอื่นด้วยปริมาณน้ำตาลที่มากกว่า สูตรที่ 3 [15] มีสีขาวเหลืองนวล มีกลิ่นไข่น้อย รสชาติออก



รูปที่ 2 การตีครีมและการตกแต่งหน้าเค้ก

หวาน มีเนื้อสัมผัสครีมแต่งหน้าเค้กที่เหนียวกว่าสูตรอื่นๆ เพราะปริมาณของเหลวในสูตรมีน้อย และสูตรที่ 2 เป็นสูตรที่ได้รับการคัดเลือก เนื่องจากมีสีเหลืองนวล ไม่มีกลิ่นคาวไข่ รสชาติดี เนื้อสัมผัสครีมแต่งหน้าเค้ก คงรูปดีกว่าสูตรอื่นๆ ซึ่งอยู่ในระดับชอบมากที่สุด ตามลำดับ แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คะแนนเฉลี่ยการทดสอบทางประสาทสัมผัสของครีมแต่งหน้าเค้กสูตรพื้นฐาน 3 สูตร

คุณลักษณะ	ค่าคะแนนเฉลี่ยคุณลักษณะทางด้านประสาทสัมผัส		
	สูตรพื้นฐานที่ 1	สูตรพื้นฐานที่ 2	สูตรพื้นฐานที่ 3
ลักษณะที่ปรากฏ	7.67 ^b ±0.92	8.13 ^a ±0.77	7.53 ^b ±0.77
สี	7.87 ^b ±0.81	8.33 ^a ±0.66	7.67 ^b ±0.71
กลิ่น	7.80 ^b ±0.84	8.27 ^a ±0.88	7.43 ^b ±0.81
รสชาติ	7.53 ^b ±0.90	8.07 ^a ±0.69	7.70 ^b ±0.87
เนื้อสัมผัส	7.87 ^b ±0.83	8.23 ^a ±0.81	7.73 ^b ±0.90
ความชอบโดยรวม	7.87 ^b ±0.90	8.37 ^a ±0.71	7.53 ^b ±0.57

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

: อักษร a, b และ c ที่แตกต่างกันในแนวนอนเดียวกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

2. การหาปริมาณการทดแทนเนยขาวด้วยถั่วขาว ที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ครีมแต่งหน้าเค้ก พบว่าจากการประเมินทางประสาทสัมผัสของผู้ทดสอบชิมจากผู้เชี่ยวชาญและนักศึกษาทางด้านอาหาร จำนวน 50 คน ได้การยอมรับผลิตภัณฑ์การทดแทนเนยขาวด้วยถั่วขาว ร้อยละ 100 โดยมีค่าคะแนนเฉลี่ยทาง ด้านลักษณะที่ปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม มีค่าคะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 7.86±0.99, 7.72±1.08, 8.30±0.73, 8.20±0.85, 8.10±0.88 และ 8.42±0.75 คะแนน โดยคุณลักษณะ ด้านสี คือ สีออกขาว เหลืองอ่อนๆ เนื่องจากการเติมถั่วขาวลงในผลิตภัณฑ์ครีมแต่งหน้าเค้กไร้ไขมันทรานส์ ด้านกลิ่น มีกลิ่นหอมของถั่วขาวจางๆเมื่อรับประทานไป แต่ถ้าดม

กลิ่นในผลิตภัณฑ์โดยตรงจะไม่ได้กลิ่น ด้านรสชาติ หวานกำลังพอดี และมีรสเค็ม มัน เล็กน้อย แต่ไม่เลี่ยน และด้านเนื้อสัมผัสมีความคงรูป ความคงตัวของอิมัลชันเพิ่มขึ้น เมื่อตั้งทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องไม่ละลาย มีเนื้อสัมผัสที่นุ่ม เนื้อเนียน และไม่เหลว ไม่แข็ง จนเกินไป เพราะมีเนื้อสัมผัสของถั่วขาวอยู่ในผลิตภัณฑ์สามารถรับรู้ได้เมื่อรับประทาน แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยคุณลักษณะทางด้านประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ครีมแต่งหน้าเค้กไร้ไขมันทรานส์

คุณลักษณะ	ค่าเฉลี่ยคะแนนความชอบ±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน				
	ร้อยละ 0	ร้อยละ 25	ร้อยละ 50	ร้อยละ 75	ร้อยละ 100
ลักษณะที่ปรากฏ	7.12 ^b ±0.96	7.10 ^b ±0.90	7.14 ^b ±0.83	7.40 ^b ±0.99	7.86 ^a ±0.99
สี	7.22 ^b ±0.81	7.06 ^b ±1.01	7.24 ^b ±0.87	7.32 ^b ±0.99	7.72 ^a ±1.08
กลิ่น	6.96 ^b ±1.04	6.96 ^b ±0.75	7.06 ^b ±0.86	7.24 ^b ±0.98	8.30 ^a ±0.73
รสชาติ	6.86 ^b ±1.01	6.84 ^b ±0.99	7.10 ^b ±0.97	7.16 ^b ±0.97	8.20 ^a ±0.85
เนื้อสัมผัส	6.92 ^b ±1.20	6.94 ^b ±0.91	7.00 ^b ±0.88	7.26 ^b ±0.96	8.10 ^a ±0.88
ความชอบโดยรวม	7.04 ^b ±0.98	7.02 ^b ±0.97	7.06 ^b ±0.76	7.30 ^b ±0.88	8.42 ^a ±0.75

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

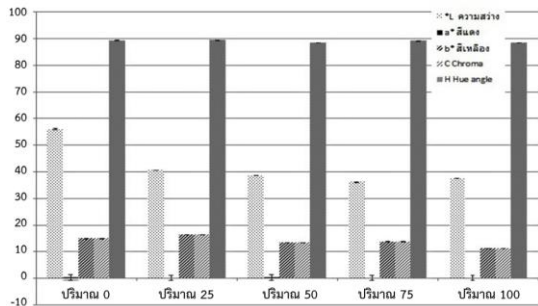
: อักษร a, b และ c ที่แตกต่างกันในแนวนอนเดียวกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

3. คุณภาพของผลิตภัณฑ์ครีมแต่งหน้าเค้กไร้ไขมันทรานส์ และสูตรพื้นฐาน ประกอบด้วย

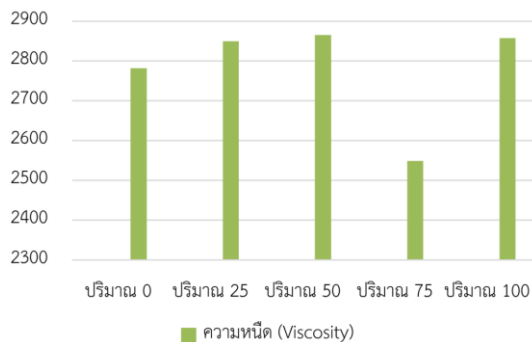
3.1. คุณภาพทางประสาทสัมผัส พบว่า จากการประเมินทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภคทั่วไป จำนวน 100 คน ได้ยอมรับผลิตภัณฑ์ครีมแต่งหน้าเค้กไร้ไขมันทรานส์ โดยมีค่าคะแนนเฉลี่ยทางด้านลักษณะที่ปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม มีค่าคะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 7.75±0.80, 7.84±0.81, 7.84±0.87, 8.07±0.86, 7.95±0.79 และ 8.10±0.74 ตามลำดับ ผู้ทดสอบชิมให้การยอมรับสูงสุดจากผลประเมินทางด้านประสาทสัมผัสมีค่าคะแนนเฉลี่ยสูงทางสถิติอยู่ที่ระดับความชอบมาก

3.2. คุณภาพทางกายภาพ ได้แก่ ค่าสี การวัดค่าสีของครีมแต่งหน้าเค้กไร้ไขมันทรานส์และครีมแต่งหน้าเค้กสูตรพื้นฐาน พบว่า แตกต่างกันอย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงถึง ค่าสีในระดับปริมาณต่างๆ ซึ่งค่าความสว่าง L^* เท่ากับ 37.52 ± 0.04 a^* เท่ากับ 0.30 ± 0.01 b^* เท่ากับ 11.19 ± 0.04 C เท่ากับ 11.20 ± 0.04 H เท่ากับ 88.42 ± 0.07 และค่าความหนืด เท่ากับ 2857 ± 26.62 cPs แสดงดังรูปที่ 3 และ 4



รูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์ค่าสี L^* a^* b^* C และ H ของผลิตภัณฑ์ครีมแต่งหน้าเค้กไร้ไขมันทรานส์



รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืด (Viscosity) ของผลิตภัณฑ์ครีมแต่งหน้าเค้กไร้ไขมันทรานส์

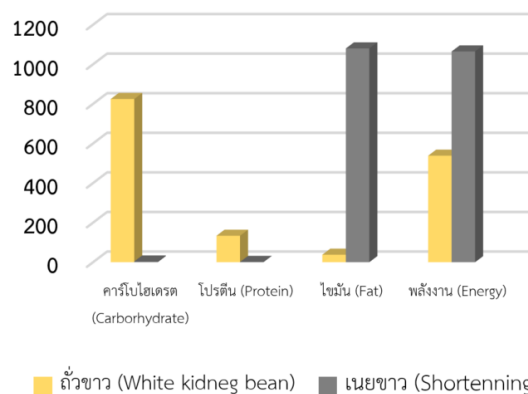
3.3. คุณภาพทางเคมี ได้แก่ ค่าความชื้น และค่าเนื้อสัมผัส ของผลิตภัณฑ์ครีมแต่งหน้าเค้กไร้ไขมันทรานส์ พบว่า ครีมแต่งหน้าเค้กไร้ไขมันทรานส์ ร้อยละ 100 มีค่าความชื้น ร้อยละ 31.78 ± 0.05 % w.b. และค่าเนื้อสัมผัส (Texture) ได้แก่ ความแน่นเนื้อ (Firmness) เท่ากับ 55340.06 ± 68.39 g., ความคงตัว (Consistency) เท่ากับ 47435.10 ± 376.39 นิวตัน และการรวมตัวกัน (Cohesiveness) เท่ากับ 5.30 ± 0.39 g.sec ซึ่งมากกว่าสูตรพื้นฐาน (ตารางที่ 4)

ตารางที่ 4 ค่าความชื้น Moisture และค่าเนื้อสัมผัส Texture ของผลิตภัณฑ์ครีมแต่งหน้าเค้กไร้ไขมันทรานส์ เปรียบเทียบร้อยละ 0 และ 100 ดังนี้

ปริมาณ (Moisture)	เนื้อสัมผัส (Texture)		
	ความแน่นเนื้อ (Firmness)	ความคงตัว (Consistency)	การรวมตัวกัน (Cohesiveness)
0	20.71±0.22	23342.72±319.29	17301.41±338.21
25	21.33±0.05	25773.38±179.26	20575.44±428.04
50	29.38±0.04	33539.09±481.87	24704.36±295.14
75	31.46±0.10	47300.04±264.62	32687.36±295.14
100	31.78±0.05	55340.06±68.39	47435.10±376.39

4. คุณค่าทางโภชนาการ พบว่า ผลิตภัณฑ์ครีมแต่งหน้าเค้กไร้ไขมันทรานส์ โดยปริมาณที่ควรบริโภคต่อวันของร่างกายมนุษย์ จะได้รับคาร์โบไฮเดรตคิดเป็น 60% (1,200 กิโลแคลอรี) หรือเป็นปริมาณที่ควรบริโภคเท่ากับ 300 กรัมต่อวัน, โปรตีน 10% (200 กิโลแคลอรี) หรือเป็นปริมาณที่ควรบริโภคเท่ากับ 50 กรัมต่อวัน, ไขมัน 30% (600 กิโลแคลอรี) หรือเป็นปริมาณที่ควรบริโภคเท่ากับ 66.6 กรัมต่อวัน จากข้อมูลข้างต้นนั้น วิถีปฏิบัติที่ต่างกัน คือ เนยขาวกับถั่วขาว แต่ใช้ในปริมาณเท่ากัน คือ 150 กรัม ได้ให้คุณค่าทางโภชนาการที่ต่างกัน โดยถั่วขาวมี คาร์โบไฮเดรต 91.6 กรัม หรือ 824.4 กิโลแคลอรี มากกว่าเนยขาวที่มีคาร์โบไฮเดรต

คุณค่าทางโภชนาการ



รูปที่ 5 คุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ครีมแต่งหน้าเค้กไร้ไขมันทรานส์เปรียบเทียบกับถั่วขาวกับเนยขาว (150 กรัม)

0.9 กรัม หรือเพียง 3.6 กิโลแคลอรี, ถั่วขาวมีโปรตีน 33.4 กรัม หรือ 133.6 กิโลแคลอรี ต่างกับเนยขาวที่มีโปรตีนเพียง 0.3 กรัม หรือ 1.2 กิโลแคลอรี, ถั่วขาวมีไขมัน 4.2 กรัม หรือ 37.8 กิโลแคลอรีต่างกับเนยขาวที่มีไขมันมากถึง 120 กรัม หรือ 1,080 กิโลแคลอรี และถั่วขาวมีพลังงาน 538.0 กิโลแคลอรี ต่างกับเนยขาวที่มีพลังงานสูงถึง 1,064.8 กิโลแคลอรี พลังงานที่ต่างกันมากถึง 526.8 กิโลแคลอรี แสดงดังรูปที่ 5

ผลิตภัณฑ์ครีมแต่งหน้าเค้กไร้ไขมันทรานส์ มีลักษณะคงตัว และไม่แข็งจนเกินไป แต่เมื่อทิ้งไว้ในที่ที่มีอากาศค่อนข้างร้อนจึงเริ่มอ่อนตัวลง แต่สามารถคงสภาพในอุณหภูมิปกติได้แต่จะคงสภาพดีที่สุด ในอุณหภูมิ 2-5 องศาเซลเซียส ด้านสี คือ สีออกขาวเหลืองอ่อนๆ เนื่องจากการเติมถั่วขาวลงในผลิตภัณฑ์ครีมแต่งหน้าเค้กไร้ไขมันทรานส์ ด้านกลิ่น มีกลิ่นหอมของถั่วขาวเมื่อรับประทานไป แต่ถ้าดมกลิ่นในผลิตภัณฑ์โดยตรง จะไม่ได้กลิ่น ด้านรสชาติ หวานกำลังพอดี และมีรสเค็ม มัน เล็กน้อย แต่ไม่เลี่ยน และด้านเนื้อสัมผัส มีเนื้อสัมผัสที่นุ่ม เนื้อเนียน และไม่เหลว ไม่แข็งจนเกินไป เพราะมีเนื้อสัมผัสของถั่วขาวอยู่ในผลิตภัณฑ์สามารถรับรู้ได้เมื่อรับประทานถั่วขาวจัดเป็นแหล่งของโปรตีนและใยอาหาร [16] โปรตีนจากถั่วขาวประกอบด้วย กรดแอมิโนที่จำเป็นต่อร่างกายครบถ้วน นอกจากนี้ สารฟาสีโอลามิน (Phaseolin) เป็นสารประเภทโปรตีนสามารถสกัดได้จากถั่วขาว มีสมบัติการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส (Alpha-amylase) ส่งผลทำให้เกิดการย่อยคาร์โบไฮเดรตลดลง จึงทำให้สตาร์ชไม่สามารถเปลี่ยนเป็นน้ำตาลได้ [10] ถั่วขาวยังมีสตาร์ชทนย่อย (Resistant Starch) ประมาณร้อยละ 14.8 [11] ดังนั้น การรับประทานผงถั่วขาวหรือสารสกัดฟาสีโอลามินช่วยให้กระบวนการเปลี่ยนสตาร์ชในอาหารให้เป็นน้ำตาลลดน้อยลง ร่างกายจึงดึงไขมันในร่างกายออกมาใช้ทดแทน จึงช่วยให้ไขมันสะสมลดน้อยลง ร่างกายไม่อ้วนหรือลดความอ้วนได้

นอกจากนั้นสตาร์ชที่บางส่วนไม่เปลี่ยนเป็นน้ำตาลเลย ก็ทำให้ร่างกายรู้สึกอึดได้นาน ไม่รู้สึกหิวง่าย และคุณสมบัติของอิมัลซิไฟเออร์ นอกจากทำหน้าที่ ในการเป็นตัวประสานส่วนที่เป็นน้ำและน้ำมันให้สามารถกระจายตัวอยู่ด้วยกัน อิมัลซิไฟเออร์ยังช่วยให้ความหนืดให้กับผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย

4. สรุป

จากการพัฒนาผลิตภัณฑ์ครีมแต่งหน้าเค้กไร้ไขมันทรานส์ พบว่า สูตรครีมแต่งหน้าเค้กพื้นฐานที่มีคะแนนความชอบรวมสูงสุด ซึ่งอยู่ในระดับชอบมากที่สุด คือ เนยสด ร้อยละ 36.08 เนยขาว ร้อยละ 15.47 ไข่ขาว ร้อยละ 5.15 น้ำตาลทราย ร้อยละ 25.77 เกลือ ร้อยละ 1.03 น้ำ ร้อยละ 15.47 และกลิ่นวนิลลา ร้อยละ 10 ปริมาณการทดแทนเนยขาวด้วยถั่วขาวที่เหมาะสมและมีคะแนนความชอบสูงสุดคือ ถั่วขาว ร้อยละ 100 มีค่าสี L^* เท่ากับ 37.52 ± 0.04 , a^* เท่ากับ 0.30 ± 0.01 , b^* เท่ากับ 11.19 ± 0.04 , C เท่ากับ 11.20 ± 0.04 และ H เท่ากับ 88.42 ± 0.07 ตามลำดับ ค่าความหนืด เท่ากับ 2857 ± 26.62 cPs, ค่าความชื้น ร้อยละ 31.78 ± 0.05 % w.b. และค่าเนื้อสัมผัส ได้แก่ ความแน่นเนื้อ เท่ากับ $55,340.06 \pm 68.39$ g, ความคงตัว เท่ากับ 47435.10 ± 376.39 นิวตัน และการรวมตัวกัน เท่ากับ 5.30 ± 0.39 g.sec ซึ่งมากกว่าสูตรพื้นฐานและคะแนนการยอมรับของผู้บริโภคทั่วไปจำนวน 100 คน เท่ากับ 8.10 ± 0.74 คะแนน อยู่ในระดับชอบมาก

5. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยสวนดุสิต วิทยาเขตสุพรรณบุรี ที่ได้อนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการอาหาร เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับการดำเนินการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Nutsaraporn, "Avoid trans fats in food," M.S. thesis, Dept. Pharmacy, Khon Kaen Univ., Thailand, 2016.
- [2] C. Anchan, "Know trans fats," *Academic Journal University of the Thai Chamber of Commerce*, vol. 29, no. 4, pp. 124-135, Oct.-Dec. 2009.
- [3] S. Hiromi, *Stay a hundred years without getting sick*, Thailand: SE-EDUCATION, 2013.
- [4] P. Pimpen, "Trans fat label," M.S. thesis, Dept. Food Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Univ., Thailand, 2014.
- [5] T. Sumalee, *Are trans fats really dangerous*. Thailand: Nestle Research Center Switzerland and the Nestlé Consumer Center, 2015.
- [6] I. Boonchai, *Conquer serious diseases without drugs*, Thailand: Good Health, 2014.
- [7] P. Kristi, *Eat well*, Thailand: *Healthy*, 2011.
- [8] T. Wilasinee, "Characteristics and nutritional value of white bean yogurt," M.S. thesis, Dept. Economics. Kasetsart Univ., Thailand, 2011.
- [9] C. Busarin, "Functional Properties of White Kidney Bean and Its Application of White Kidney Bean Powder in Pastry Products," M.S. thesis, Dept. Agro-Industry. Kasetsart Univ., Thailand, 2016.
- [10] R. Lakkhana, "White Kidney Bean, a wonderful plant on the highlands. Thailand: Kasikorn newspaper, vol. 82, pp. 32-34, 2009.
- [11] A. Perera, V. Meda and R.T. Tyler, "Resistant starch: A review of analytical protocols for determining resistant starch and of factors affecting the resistant starch content of foods," *Food Research International*, vol. 43, pp. 1959-1974, 2010.
- [12] H. Jamlongluk, P. Rungthip and P. Abhisit, *Cake Decorating*. Thailand: Housekeeper, 2009.
- [13] W. Phairoj, *Sensory Evaluation*, Agro Industry, Thailand: Chiang Mai University, 2002.
- [14] D. Jariya, *Basic and Applied art of cake decoration*, Thailand: House Maid, 1994.
- [15] P. Rungthip, *Cupcakes 2 new ideas for decorating*. Thailand: Housekeeper, 2010.
- [16] S. Sai-Ut, S. Ketnawa, P. Chaiwut and S. Rawdkuen, "Biochemical and functional properties of proteins from red kidney bean, navy bean and adzuki beans," *Food Agro-Industry*, vol. 2, pp. 493-504, 2009

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การเปรียบเทียบภาระขาดของรอยเชื่อมผ้าทอทางสถาปัตยกรรม จากการเชื่อมลมร้อนและเหนียวน้ำ

กันต์ธกรณ์ เขาทอง^{1*} เจษฎาภรณ์ ปรียดำกุล² และ ประภาพรณ เกษราพงศ์³

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

² คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

³ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

¹ 1 ถนนมาลัยแมน ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

² 25/25 ถนนพุทธมณฑล สาย 4 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170

³ 199 ถนนสุขุมวิท ตำบลทุ่งสุขลา อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี 20230

รับบทความ 15 กุมภาพันธ์ 2564 แก้ไขบทความ 22 กรกฎาคม 2564 ตอรับบทความ 16 สิงหาคม 2564

บทคัดย่อ

ผ้าทอทางสถาปัตยกรรมได้ถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่องจนมีคุณสมบัติที่โดดเด่นทำให้สถาปนิกและวิศวกรนำมาออกแบบและใช้งานกับอาคารสำคัญต่าง ๆ ทั่วโลก แต่ปัญหาที่พบคือผ้าทอทางสถาปัตยกรรมจากผู้ผลิตมีขนาดเล็กกว่าความต้องการใช้งาน เพื่อให้สามารถใช้งานได้จึงต้องนำผ้าทอทางสถาปัตยกรรมมาเชื่อมติดกัน ปัจจุบันวิธีที่นิยมนำมาเชื่อมผ้าทอทางสถาปัตยกรรมคือการเชื่อมเหนียวน้ำ แต่มีปัญหาการใช้งานหลายประการเพื่อลดปัญหาเหล่านั้นผู้วิจัยจึงสร้างเครื่องเชื่อมลมร้อนมาทดแทนเครื่องเชื่อมเหนียวน้ำ โดยพิจารณาภาระขาดของรอยเชื่อมซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้บอกความแข็งแรงของรอยเชื่อมและมีความสำคัญยิ่งสำหรับการนำผ้าทอทางสถาปัตยกรรมไปใช้งานงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการเปรียบเทียบภาระขาดของรอยเชื่อมผ้าทอทางสถาปัตยกรรมจากการเชื่อมลมร้อนและเหนียวน้ำ โดยใช้การออกแบบการทดลองของทฤษฎีแบบ Orthogonal Arrays L25 ผลการศึกษาพบว่าผ้าทอทางสถาปัตยกรรมที่เชื่อมด้วยลมร้อนมีภาระขาดสูงสุดแนว warp เท่ากับ 95.38 กิโลนิวตันต่อเมตร ส่วนแนว weft มีภาระขาดสูงสุดเท่ากับ 86.17 กิโลนิวตันต่อเมตร และผ้าทอทางสถาปัตยกรรมที่เชื่อมเหนียวน้ำมีภาระขาดสูงสุดแนว warp เท่ากับ 101.37 กิโลนิวตันต่อเมตร ส่วนแนว weft มีภาระขาดสูงสุดเท่ากับ 97.78 กิโลนิวตันต่อเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าภาระขาดของรอยเชื่อมจากการเชื่อมผ้าทอทางสถาปัตยกรรมทั้งสองวิธีแตกต่างกันไม่มากจึงสามารถนำการเชื่อมด้วยลมร้อนมาทดแทนการเชื่อมเหนียวน้ำได้

คำสำคัญ : ผ้าทอ; การผลิต; ลมร้อน; เหนียวน้ำ; รอยเชื่อม

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +66 3435 5310, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: fengkkk@ku.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

The Comparison of Failing Load of Architectural Fabrics of Weld Seams between the Hot Air Welding and High Frequency Welding

Kunthakorn Khaothong^{1*} Jetsadaporn Priyadumkol² and Prapapan Ketsarapong³

¹ Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University

² Faculty of Engineering, Mahidol University

³ Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University

¹ 1 Malaiman Road, Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom, 73140

² 25/25 Phutthamonthon Road, Salaya, Nakhon Pathom, 73170

³ 119 Sukhumvitand Rode, Sriracha, Chon Buri, 20230

Received 15 February 2021; Revised 22 July 2021; Accepted 16 August 2021

Abstract

Architectural fabrics were continuously developed on their unique performance. Architects and Engineers designed them for the application of important buildings around the world despite the symptom that Architectural fabric sizes from manufactures are smaller than the application sizes. Recently, although the well-known method used to weld Architectural fabrics to enlarge their size is the high frequency welding, there were some application issues. To mitigate those issues, the researcher created the hot air welding to replace the high frequency welding in consideration on the failing loads of welded seams which are variable factors of the failing loads to indicate the weld strength and it is crucial for the Architectural fabric application. This research presents the comparison of failing load of weld seams between the hot air welding and high frequency welding by the test of Taguchi's Orthogonal arrays L25 method. The test results demonstrated that Architectural fabrics welded by the hot air welding has the highest failing loads of wrap, equal to 95.38 kN/m and the highest failing loads of weft at 86.17 kN/m. Conversely, Architectural fabrics welded by the high frequency welding has the highest failing loads of wrap, equal to 101.37 kN/m and the highest failing loads of weft at 97.78 kN/m. Based on a forementioned results, there is no significant difference from both welding methods and thus concluded that the hot air welding could be used to replace the high frequency welding method.

Keywords : Canvas; Manufacturing; Hot Air; High Frequency; Welded Seam

** Corresponding Author. Tel.: +663 4355 310, E-mail Address: fengkkk@ku.ac.th*

1. บทนำ

ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ได้นำศาสตร์ทางเคมีสิ่งทอมาประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีการเคลือบผิววัสดุ ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์จากวัสดุชนิดใหม่จำนวนมากและเกิดเป็นนวัตกรรมการผลิตผ้าทอที่โดดเด่น อาทิการนำเส้นใยพลาสติกโพลีเอสเตอร์มาทอแล้วเคลือบผิวด้วยพีวีซีอะคริลิก ทำให้ได้ผ้าทอที่มีคุณสมบัติสำคัญคือ เส้นใยมีความแข็งแรง ทนไฟ ทนความร้อน น้ำหนักเบา รับประทานได้ง่าย ทนต่อแสงแดดและความชื้น เป็นฉนวน มีอายุการใช้งานยาวนาน มีสีสันสวยงาม ติดตั้งง่าย และสามารถออกแบบโครงสร้างให้มีรูปทรงที่หลากหลาย [1] ทำให้เหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำมาใช้ในงานสถาปัตยกรรม โดยผู้ออกแบบ วิศวกร และสถาปนิก ได้นำผ้าทอประเภทนี้มาใช้กับอาคารชั้นนำหลายแห่งทั่วโลก เช่น O₂ Arena ในกรุงลอนดอน ประเทศอังกฤษ [2] หลังคาพักผ่อนที่ประกอบพิธีอัญมหนครเมกะ ประเทศซาอุดีอาระเบีย อาคารจัดแสดงการบินในประเทศสาธารณรัฐสิงคโปร์ รวมถึงสนามบิน ห้างสรรพสินค้าและร้านอาหารต่าง ๆ เพื่อทดแทนผ้าทอทางสถาปัตยกรรมแบบเดิม [3] นอกจากนี้ยังนักวิจัยบางท่านได้นำผ้าทอประเภทนี้ไปใช้ส่งลมในระบบปรับอากาศด้วย [4]

เนื่องจากผ้าทอทางสถาปัตยกรรมมีขนาดความกว้างมาตรฐานที่ผลิตจากโรงงานประมาณ 1.4 ถึง 2.5 เมตร [5] แต่การใช้งานต้องการผ้าทอขนาดใหญ่กว่าขนาดมาตรฐานมาก จึงต้องนำผ้าทอมาเชื่อมติดกันด้วยเครื่องเชื่อมเหนียวน้ำที่มีขายทั่วไปในเชิงพาณิชย์ซึ่งมีข้อเสียคือ ราคาสูง เครื่องเชื่อมมีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก ทำให้ไม่สะดวกหากจะนำมาติดตั้งบริเวณไซต์งานเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจึงได้นำเสนอกรรมวิธีการเชื่อมผ้าทอทางสถาปัตยกรรมด้วยลมร้อนซึ่งมีขนาดเล็กขนย้ายได้ง่าย มีราคาถูก สามารถติดตั้งอุปกรณ์และใช้งานบริเวณไซต์งานได้ [6]

เนื่องจากบริเวณรอยเชื่อมของชิ้นงานมักมีความแข็งแรงน้อยกว่าบริเวณอื่น ดังนั้นความแข็งแรงของรอย

เชื่อมจึงมีอิทธิพลอย่างมากต่อการออกแบบโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม [7] โดยกรรมวิธีการเชื่อมต่างกันจะมีตัวแปรกำหนดความแข็งแรงรอยเชื่อมต่างกัน เช่นการเชื่อมเหนียวน้ำแบบลูกกลิ้ง ความเร็วและแรงกดของลูกกลิ้งมีอิทธิพลต่อความสามารถในการรับแรงดันของรอยเชื่อม [8] และคุณลักษณะทางกลของรอยเชื่อมขึ้นกับสมรรถนะของรอยเชื่อม (ความดันกด×กำลังไฟฟ้า/ความเร็วลูกกลิ้ง) [9], [10] สำหรับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมผ้าทอที่เชื่อมด้วยลมร้อนคือระยะห่างหัวเป่าลมกับชิ้นงาน อุณหภูมิลมร้อน แรงบิดและความเร็วลมร้อน เนื่องจากมีนัยสำคัญทางสถิติตามวิธีการ ANOVA [11]

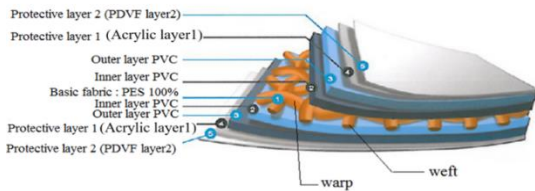
จากการตรวจสอบเอกสารพบว่ายังไม่มีงานวิจัยใดทำการทดลองและวิเคราะห์ภาระขาดของรอยเชื่อมผ้าทอทางสถาปัตยกรรมด้วยวิธีการเชื่อมด้วยเครื่องเหนียวน้ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาระยะขาดของรอยเชื่อมผ้าทอทางสถาปัตยกรรมด้วยวิธีการเชื่อมเหนียวน้ำเปรียบเทียบกับวิธีการเชื่อมลมร้อน เพื่อนำผลที่ได้จากการการศึกษาไปปรับปรุงและพัฒนาเครื่องเชื่อมด้วยลมร้อนและเทคนิคการออกแบบโครงสร้างผ้าทอทางสถาปัตยกรรมต่อไป

2. อุปกรณ์แล่วิธีการวิจัย

2.1 ผ้าทอทางสถาปัตยกรรม

งานวิจัยนี้ใช้ผ้าทอทางสถาปัตยกรรมที่ทอจากเส้นใยโพลีเอสเตอร์ตามแนว Warp และ Weft โดยผ่านกระบวนการเคลือบด้วย PVC สองชั้น ทำให้ผ้าทอสามารถกันน้ำได้ 100% ชั้นถัดมาเคลือบ Acrylic และชั้นนอกสุดเคลือบ Polyvinylidene Fluoride (PVDF) สองชั้น ทำให้ผ้าทอสามารถป้องกันรังสี UV, แสงแดด, การเกิดเชื้อราและความชื้นได้ โดยผ้าทอมีอัตราการส่องผ่านของแสงอยู่ในช่วง 5–10 % ตัวอย่างโครงสร้างและส่วนประกอบผ้าทอทางสถาปัตยกรรมแสดงในรูปที่ 1 เนื่องจากวัสดุที่ใช้ผลิตทั้งหมดเป็นโพลีเมอร์ทำให้ผ้าทอ

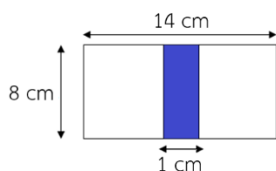
ชนิดนี้มีสมบัติเป็นฉนวน [12] และมีภาระขาดแนว warp และ weft เท่ากับ 112.72 dbF และ 100.26 kN/m ตามลำดับ [13]



รูปที่ 1 ผ้าทอทางสถาปัตยกรรมสำหรับงานวิจัย

2.2 การเตรียมชิ้นงาน

การทดลองต้องเตรียมชิ้นงานโดยนำผ้าทอสถาปัตยกรรมมาตัดให้มีขนาด 7.5 x 8 เซนติเมตร จำนวนสองแผ่น การเชื่อมต่อให้นำผ้าทอมาซ้อนทับเพื่อให้รอยเชื่อมมีความกว้าง 1 เซนติเมตร ตามรูปที่ 2 โดยต้องอบชิ้นงานทุกชิ้นด้วยเครื่องอบความร้อนที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อควบคุมความชื้น

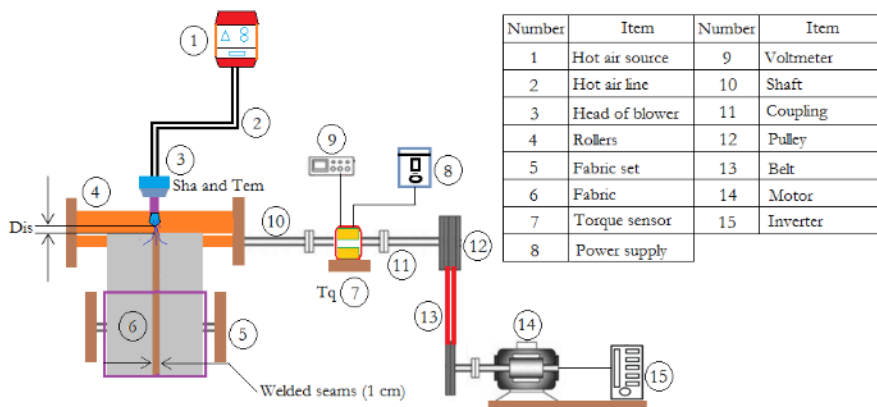


รูปที่ 2 ขนาดรอยเชื่อมผ้าทอทางสถาปัตยกรรม

2.3 การเชื่อมลมร้อน

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยทำการเชื่อมลมร้อนชิ้นงานที่เตรียมไว้ด้วยเครื่องเชื่อมลมร้อนที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น กรรมวิธีการเชื่อมลมร้อนเริ่มจากนำชิ้นงานสองชิ้นซ้อนทับกันให้ได้ความกว้างรอยเชื่อมตามต้องการแล้วป้อนชิ้นงานเข้าสู่ชุดหนีบ (หมายเลข 4) ที่ส่งกำลังมาจากมอเตอร์ขนาด 0.5 กำลังม้า (หมายเลข 14) ทำให้สามารถควบคุมอัตราป้อนและแรงบิดของชุดหนีบได้ โดยค่าแรงบิดถูกวัดด้วยเครื่องวัดแรงบิดหรือทอร์กเซนเซอร์ (หมายเลข 7) และคำนวณอัตราป้อนได้จากรอบของลูกกลิ้ง (หมายเลข 4) ส่วนบริเวณทางเข้าสู่ชุดหนีบชิ้นงานถูกให้ความร้อนด้วยลมร้อนที่ผลิตมาจากชุดสร้างลมร้อน (หมายเลข 1) และความกว้างรอยเชื่อมจะถูกควบคุมด้วยหัวเป่าลมทรงกระบอกขนาด 1 เซนติเมตร (หมายเลข 3) ซึ่งสามารถปรับอุณหภูมิและความเร็วลมร้อนได้ เมื่อชิ้นงานผ่านกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลมร้อนแล้วชิ้นงานจะถูกม้วนเก็บด้วย Fabric set (หมายเลข 5) ตามรูปที่ 3

สำหรับการวิเคราะห์ความแข็งแรงของรอยเชื่อมพิจารณาจากภาระที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน ทุกการทดลองกำหนดปัจจัยนำเข้า 4 ปัจจัยคือ ระยะห่างหัวเป่าลมกับชิ้นงาน, อุณหภูมิลมร้อน, แรงบิด และความเร็วลมร้อน ซึ่งแต่ละปัจจัยถูกแบ่งออก 5 ระดับ รายละเอียดแสดงตามตารางที่ 1



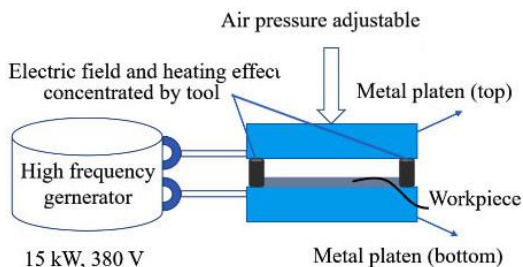
รูปที่ 3 เครื่องเชื่อมลมร้อน [11]

ตารางที่ 1 ปัจจัยนำเข้าสำหรับเชื่อมลมนร้อน

ปัจจัยนำเข้า	ระดับ				
	1	2	3	4	5
ระยะหัวเป่าลมกับชิ้นงาน (mm)	2	4	6	8	10
อุณหภูมิลมร้อน (°C)	160	170	180	190	200
แรงบิด (N.mm)	5000	6000	7000	8000	9000
ความเร็วลมร้อน (mm/s)	1000	2000	3000	4000	5000

2.4 การเชื่อมเหนียวนำ

งานวิจัยนี้นำเครื่องเชื่อมเหนียวนำที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ซึ่งเครื่องเชื่อมมีองค์ประกอบตามรูปที่ 4 มาใช้เชื่อมชิ้นงาน



รูปที่ 4 เครื่องเชื่อมเหนียวนำ

กรรมวิธีการเชื่อมเริ่มจากนำชิ้นงานสองชิ้นซ้อนทับกันให้ได้ความกว้างรอยเชื่อมตามต้องการแล้วนำมาวางบนแผ่นความร้อนด้านล่าง (Bottom Metal Platen) จากนั้นกดด้วยระบบนิวเมติกส์ให้แผ่นความร้อนด้านบน (Top Metal Platen) มากดทับชิ้นงาน โดยความร้อนเกิดจากเครื่องสร้างความถี่ความร้อน (High Frequency Generator) จากนั้นความร้อนจะถูกส่งผ่านชิ้นงานทำให้เกิดรอยเชื่อม [14] ทำการจับเวลาเชื่อม

สำหรับการวิเคราะห์ความแข็งแรงของรอยเชื่อมพิจารณาจากภาระที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน ทุกการทดลองกำหนดปัจจัยนำเข้า 3 ปัจจัย คือ ความถี่ ความดัน และเวลาเชื่อม ซึ่งแต่ละปัจจัยถูกแบ่งออก 5 ระดับ รายละเอียดแสดงตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปัจจัยนำเข้าสำหรับเชื่อมเหนียวนำ

ปัจจัยนำเข้า	ระดับ				
	1	2	3	4	5
ความถี่ (MHz)	21	24	27	30	33
ความดัน (MPa)	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
เวลาเชื่อม (s)	3	6	9	12	15

2.5 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ออกแบบการทดลองตามแผนการทดลองปัจจัยนำเข้าทางสถิติเนื่องจากมีความเหมาะสมสำหรับใช้ออกแบบการทดลองปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิต เพื่อให้ได้กระบวนการผลิตที่มีความแม่นยำ ลดเวลาที่ใช้ในการทดลองและลดความแปรผัน (Variation) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต [15] โดยงานวิจัยนี้ใช้รูปแบบการทดลองแบบ Orthogonal Arrays L 25 [16] แต่ละรูปแบบการทดลองผู้วิจัยทำการทดลองซ้ำรูปแบบละ 5 ครั้ง เพื่อพิจารณาปัจจัยออกเสียคือ ภาระขาด (Failing Load) ของชิ้นงาน

2.6 การทดสอบภาระขาด

ชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมทั้งสองวิธีจะถูกนำไปทดสอบภาระขาดด้วยแรงดึงทั้งแนว Warp และ Weft ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ตามมาตรฐาน ISO 1421:2016 ที่อุณหภูมิห้อง การทดสอบใช้ Grips Separation ขนาดเท่ากับ 200 มิลลิเมตร ระยะ Extensometer เท่ากับ 50 มิลลิเมตร และชิ้นงานจะถูกดึงด้วยความเร็ว grip เท่ากับ 100 มิลลิเมตรต่อวินาที จนเกิดการฉีกขาดบริเวณรอยเชื่อม

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลการทดสอบภาระขาดรอยเชื่อมด้วย

วิธีการเชื่อมลมร้อน

ภาระขาดสูงสุดทั้งแนว warp และ weft เกิดที่สภาวะระยะห่างหัวเป่าลมกับชิ้นงาน 10 มิลลิเมตร, อุณหภูมิลมร้อน 160 องศาเซลเซียส, แรงบิด 9000 นิวตัน.มิลลิเมตรและความเร็วลมร้อน 4000 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยแนว warp มีภาระขาดสูงสุดเท่ากับ 95.38 กิโลนิวตันต่อเมตร ส่วนแนว weft มีภาระขาดสูงสุดเท่ากับ 86.17 กิโลนิวตันต่อเมตร (การทดลอง 21) ตามตารางที่ 3

โดยที่ภาวะภาระขาดสูงสุดใช้เวลาในการดึงงานชิ้นงานขาดออกจากกันนานกว่าสภาวะอื่น เนื่องจากต้องใช้ระยะเวลาในการทำลายพันธะที่หลอมละลายติดกันระหว่างชิ้นงานทดสอบทั้งสอง สำหรับการขาดกันของชิ้นงานทุกการทดลองชิ้นงานขาดที่ตำแหน่งของรอยเชื่อม ตามรูปที่ 5 เพราะความร้อนทำให้ของเนื้อวัสดุของชิ้นงานหลอมละลายทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดเกรนของวัสดุ ตำแหน่งรอยเชื่อมจึงมีความเหนียวน้อยกว่าบริเวณนอกรอยเชื่อม ประกอบกับการเชื่อมลมร้อนลมร้อนความร้อนมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอจึงมีฟองอากาศเกิดขึ้นบริเวณผิวรอยเชื่อมทำให้ความแข็งแรงบริเวณรอยเชื่อมมีน้อยกว่าบริเวณอื่น



รูปที่ 5 รอยขาดภาระขาดสูงสุดการเชื่อมลมร้อน
(การทดลอง 21)

3.2 ผลการทดสอบภาระขาดรอยเชื่อมด้วย

วิธีการเชื่อมเหนียวน้ำ

ภาระขาดสูงสุดทั้งแนว Warp และ แนว Weft เกิดที่ภาวะความถี่ 30 เมกะเฮิรตซ์, ความดันกด 1.0 เมกะปาสคาล และเวลา 9 วินาที โดยแนว warp มีภาระขาดสูงสุดเท่ากับ 101.37 กิโลนิวตันต่อเมตร ส่วนแนว Weft มีภาระขาดสูงสุดเท่ากับ 97.78 กิโลนิวตันต่อเมตร (การทดลอง 20) ตามตารางที่ 4

โดยภาวะภาระขาดสูงสุดใช้เวลาในการดึงงานชิ้นงานขาดจากกันนานกว่าสภาวะอื่นเพราะต้องใช้เวลาลายพันธะที่หลอมติดกันบริเวณรอยเชื่อม เช่นเดียวกับการเชื่อมลมร้อนและทุกการทดลองชิ้นงานขาดที่นอกตำแหน่งของรอยเชื่อม ตามรูปที่ 6 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ L. Kun et al. [17]



รูปที่ 6 รอยขาดภาระขาดสูงสุดการเชื่อม
(การทดลอง 20)

เนื่องจากอุณหภูมิแผ่นเหนียวน้ำมีอุณหภูมิสูงและมีการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ส่งมาจากแผ่นเหนียวน้ำตามแนวความยาวไปยังบริเวณรอยเชื่อมของชิ้นทดสอบทั้งสอง ทำให้อุณหภูมิผิวรอยเชื่อมมีการแกว่งไกวสูง รอยเชื่อมเหนียวจึงติดกันแน่นมีความแข็งแรงมากกว่าส่วนอื่นของชิ้นงานและหากมีแรงดึงต้องใช้เวลานานในการทำลายพันธะบริเวณรอยเชื่อม ประกอบกับการที่แผ่นเหนียวน้ำกดทับชิ้นงานโดยตรงและมีการกระจายตัวของความร้อนสม่ำเสมอทำให้ฟองอากาศเกิดขึ้นบริเวณรอยเชื่อมมีน้อยมาก ดังนั้นหากนำผ้าทอทางสถาปัตยกรรมที่ผ่านการเชื่อมเหนียวน้ำไปใช้งานจะทำให้ยากต่อการตรวจสอบความเสียหาย

ตารางที่ 3 ภาวะขาดผ้าทอสถาปัตยกรรมเชื่อมด้วยวิธีลมนร้อน

การทดลอง	ปัจจัยเข้า				ปัจจัยออก	
	ระยะหัวเป่า	อุณหภูมิ	แรงบิด	ความเร็ว	ภาวะขาด	ภาวะขาด
	ลมกับชิ้นงาน (mm)	ลมนร้อน (°C)	(N.mm)	ลมนร้อน (mm/s)	แนว warp (kN/m)	แนว weft (kN/m)
1	2	160	5000	1000	70.34	61.34
2	2	170	6000	2000	64.62	55.74
3	2	180	7000	3000	58.63	51.06
4	2	190	8000	4000	50.54	41.54
5	2	200	9000	5000	45.42	37.11
6	4	160	6000	3000	80.25	70.89
7	4	170	7000	4000	74.96	66.12
8	4	180	8000	5000	63.22	54.67
9	4	190	9000	1000	56.74	48.53
10	4	200	5000	2000	49.76	41.25
11	6	160	7000	5000	83.15	73.86
12	6	170	8000	1000	72.91	62.93
13	6	180	9000	2000	67.78	56.99
14	6	190	5000	3000	60.92	51.24
15	6	200	6000	4000	55.73	47.16
16	8	160	8000	2000	90.43	81.77
17	8	170	9000	3000	81.26	71.64
18	8	180	5000	4000	74.14	65.14
19	8	190	6000	5000	67.23	58.57
20	8	200	7000	1000	63.22	53.53
21	10	160	9000	4000	95.38	86.17
22	10	170	5000	5000	89.59	79.88
23	10	180	6000	1000	81.82	72.45
24	10	190	7000	2000	75.44	65.6
25	10	200	8000	3000	68.59	59.61

ตารางที่ 4 ภาวะขาดผ้าทอสถาปัตยกรรมเชื่อมด้วยวิธีเหนียวน้ำ

การทดลอง	ปัจจัยเข้า			ปัจจัยออก	
	ความถี่ (MHz)	ความดันกด (MPa)	เวลาเชื่อม (s)	ภาวะขาดแนว warp (kN/m)	ภาวะขาดแนว weft (kN/m)
1	21	0.2	3	78.12	69.54
2	21	0.4	6	72.66	65.74
3	21	0.6	9	66.25	60.36
4	21	0.8	12	61.57	55.83

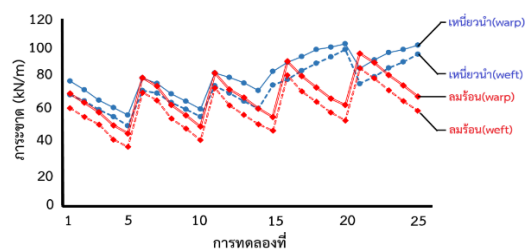
ตารางที่ 4 ภาระขาดผ้าทอสถาปัตยกรรมเชื่อมด้วยวิธีเหนียวน้ำ (ต่อ)

การทดลอง	ปัจจัยเข้า			ปัจจัยออก	
	ความถี่ (MHz)	ความดันกด (MPa)	เวลาเชื่อม (s)	ภาระขาดแนว warp (kN/m)	ภาระขาดแนว weft (kN/m)
5	21	1.0	15	56.92	50.15
6	24	0.2	6	80.11	72.23
7	24	0.4	9	76.74	70.49
8	24	0.6	12	70.22	64.61
9	24	0.8	15	65.61	60.59
10	24	1.0	3	60.76	55.84
11	27	0.2	9	83.22	75.13
12	27	0.4	12	80.39	70.52
13	27	0.6	15	76.98	65.48
14	27	0.8	3	72.31	61.01
15	27	1.0	6	84.14	75.68
16	30	0.2	12	89.93	79.15
17	30	0.4	15	93.43	84.65
18	30	0.6	3	97.92	89.28
19	30	0.8	6	99.38	93.15
20	30	1.0	9	101.37	97.78
21	33	0.2	15	86.14	76.56
22	33	0.4	3	91.43	80.81
23	33	0.6	6	95.91	86.38
24	33	0.8	9	97.92	90.04
25	33	1.0	12	100.59	94.89

3.3 อภิปรายผลเปรียบเทียบการทดสอบภาระขาดรอยเชื่อมด้วยวิธีการเชื่อมลมน้ำกับการเชื่อมเหนียวน้ำ

ผลการเปรียบเทียบภาระขาดรอยเชื่อมด้วยวิธีการเชื่อมลมน้ำกับการเชื่อมเหนียวน้ำแสดงตามรูปที่ 7 ผ้าทอทางสถาปัตยกรรมที่เชื่อมด้วยวิธีเหนียวน้ำมีภาระขาดแนว Warp ในช่วง 56.92 ถึง 101.37 กิโลนิวตันต่อเมตร และแนว Weft ในช่วง 50.15 ถึง 97.78 กิโลนิวตันต่อเมตร ซึ่งสูงกว่าการเชื่อมลมน้ำที่มีภาระขาดแนว Warp ในช่วง 45.42 ถึง 95.38 กิโลนิวตันต่อเมตร และแนว Weft ในช่วง

37.11 ถึง 86.17 กิโลนิวตันต่อเมตร โดยการเชื่อมเหนียวน้ำมีภาระขาดแนว Warp และ แนว Weft สูงกว่าการเชื่อมลมน้ำ 5.91 และ 11.87% ตามลำดับ



รูปที่ 7 เปรียบเทียบภาระขาดการเชื่อมผ้าทอทางสถาปัตยกรรมด้วยวิธีการเชื่อมลมน้ำกับการเชื่อมเหนียวน้ำ

หากพิจารณาตามรูปที่ 5 การเชื่อมลมนร้อนขึ้นงานจะขาดบริเวณรอยเชื่อมเนื่องจากบริเวณรอยเชื่อมมีความแข็งแรงและมีความเหนียวน้อยกว่าบริเวณอื่นเนื่องจากลมร้อนกระจายตัวไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดโพรงอากาศบริเวณรอยเชื่อม ทำให้ขณะดึงทดสอบภาระขาดทุกส่วนของชิ้นงานจะเกิดการยึดตัว หากพิจารณาตามรูปที่ 6 ขณะดึงทดสอบภาระขาดชิ้นงานที่เชื่อมด้วยวิธีเหนียวนำชิ้นงานจะไม่มีกการยึดตัวและชิ้นงานจะขาดนอกบริเวณรอยเชื่อม เนื่องจากบริเวณรอยเชื่อมมีโพรงอากาศเกิดขึ้นน้อยกว่าการเชื่อมด้วยวิธีลมนร้อนมาก จึงทำให้บริเวณรอยเชื่อมมีความเหนียวและความแข็งแรงทำให้สามารถรับภาระขาดได้มากกว่าบริเวณอื่น

ภาระขาดจากการเชื่อมเหนียวนำไม่ได้ขาดบริเวณรอยนั้นคือรอยเชื่อมจากการเชื่อมเหนียวนำมีความแข็งแรงของรอยเชื่อมสูงกว่ารอยเชื่อมจากการเชื่อมลมนร้อน และหากพิจารณาภาระขาดสูงสุดของการเชื่อมเหนียวนำกับภาระขาดผ้าทอสถาปัตยกรรมที่ไม่มีรอยเชื่อมพบว่าภาระขาดสูงสุดของการเชื่อมเหนียวนำน้อยกว่าภาระขาดผ้าทอสถาปัตยกรรมที่ไม่มีรอยเชื่อมในทั้งแนว Warp และ Weft

เนื่องจากการเชื่อมลมนร้อนภาระขาดเกิดที่ตำแหน่งรอยเชื่อมและเกิดการยึดตัวหากนำผ้าทอทางสถาปัตยกรรมที่เชื่อมด้วยลมนร้อนไปใช้งานจะทำให้ง่ายต่อการตรวจสอบความเสียหาย ส่วนการเชื่อมเหนียวนำภาระขาดเกิดที่ตำแหน่งนอกบริเวณรอยเชื่อมหากนำผ้าทอทางสถาปัตยกรรมที่เชื่อมด้วยความร้อนเหนียวนำไปใช้งานจะทำให้ยากต่อการตรวจสอบความเสียหาย

หากพิจารณาความสามารถการรับภาระขาดพบว่า การเชื่อมลมนร้อนสามารถรับภาระขาดได้น้อยกว่าเชื่อมเหนียวนำเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อเปรียบเทียบกับความคุ้มค่าด้านราคาที่เครื่องเชื่อมเหนียวนำมีราคาสูงกว่าเครื่องเชื่อมลมนร้อนหลายเท่าตัวทั้งเครื่องเชื่อม

เหนียวนำมีความยุ่งยากในการขนย้ายและไม่สามารถนำไปประกอบหรือเชื่อมผ้าทอทางสถาปัตยกรรมบริเวณไซต์งานได้ แต่เครื่องเชื่อมลมนร้อนสามารถประกอบและติดตั้งได้ง่าย ทำให้สามารถขนย้ายไปประกอบหรือเชื่อมชิ้นงานบริเวณไซต์งานได้และการนำผ้าทอทางสถาปัตยกรรมที่เชื่อมด้วยลมนร้อนไปใช้งานสามารถตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ง่ายกว่า ผู้วิจัยจึงเห็นว่าการเชื่อมผ้าทอทางสถาปัตยกรรมควรนำการวิธีการเชื่อมลมนร้อนมาทดแทนการเชื่อมเหนียวนำ

4. สรุป

ภาระขาดของรอยเชื่อมผ้าทอทางด้านสถาปัตยกรรม จากการเชื่อมเหนียวนำมีภาระขาดสูงกว่าการเชื่อมด้วยลมนร้อนแนว Warp 5.91 % และแนว Weft 11.87 % ภาวะการเชื่อมเหนียวนำที่สามารถรับภาระขาดสูงสุดคือ ความถี่ 30 เมกะเฮิร์ตซ์, ความดันกด 1.0 เมกะปาสคาล และเวลา 9 วินาที ส่วนภาวะการเชื่อมลมนร้อนที่สามารถรับภาระขาดสูงสุดคือ ระยะห่างหัวเป่าลมกับชิ้นงาน 10 มิลลิเมตร, อุณหภูมิลมนร้อน 160 องศาเซลเซียส, แรงบิด 9000 นิวตัน-มิลลิเมตร และความเร็วลมนร้อน 4000 มิลลิเมตรต่อวินาที และภาระขาดสูงสุดของการเชื่อมเหนียวนำน้อยกว่าภาระขาดผ้าทอสถาปัตยกรรมที่ไม่มีรอยเชื่อมในแนว Warp และ Weft เท่ากับ 11.20% และ 2.54 % ตามลำดับ กล่าวคือ ผ้าทอสถาปัตยกรรมที่ไม่มีรอยเชื่อม สามารถรับแรงดึงได้มากที่สุด รองลงมาคือ รอยเชื่อมจากการเชื่อมเหนียวนำและรอยเชื่อมจากการเชื่อมลมนร้อน ตามลำดับ

หากพิจารณาด้านการเกิดรอยขาดพบว่า การเชื่อมลมนร้อนรอยขาดเกิดที่ตำแหน่งรอยเชื่อมส่วนการเชื่อมเหนียวนำรอยขาดเกิดนอกบริเวณรอยเชื่อม การเชื่อมผ้าทอทางสถาปัตยกรรมด้วยลมนร้อนสามารถตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ง่ายกว่าการเชื่อม

ด้วยเหนียวนำ ดังนั้นการเชื่อมด้วยลมร้อนสามารถนำไปทดแทนการเชื่อมเหนียวนำสำหรับการเชื่อมผ้าทอทางสถาปัตยกรรมได้เป็นอย่างดี

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Luo Yixi, Hu Hong and R. Fangueiro, "Tensile and tearing properties of PVC coated biaxial warp knitted fabrics under biaxial loads," *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, vol. 33, no. 2, pp. 146-150, Jun. 2008.
- [2] Andrzej Ambroziak and Pawel Klosowski, "Mechanical properties for preliminary design of structures made from PVC coated fabric," *Construction and Building Materials*, vol. 50, no. 1, pp. 74-81, Jan. 2014.
- [3] A. Ambroziak, "Mechanical properties of Preconstraint 1202S coated fabric under biaxial tensile test with different load ratios," *Construction and Building Materials*, vol. 80, no. 2, pp. 210-224, Apr. 2015.
- [4] K. Khaothong, W. Chaiworapuek, and J. Priyadumkol, "Pressure loss diagram of air flow in polyester fabric duct acrylic PVC coated," *The Journal of KMUTNB*, vol. 29, no. 3, pp. 445-453, Jul.-Sep. 2019.
- [5] T. Shi, W. Chen, C. Gao, J. Hu, B. Zhao, D and Zhang, Z. Qiu, "Shear behavior of architectural coated fabrics under biaxial bias extension," *Construction and Building Materials*, vol. 187, no. 6, pp. 964-973, Oct. 2018.
- [6] S.S. Volkow, "Ultrasound welding of synthetic fabric for technical purposes," *Welding International*, vol. 23, no. 10, pp. 789-795, Sep. 2009.
- [7] Kunthakorn Khaothong, Kanit Manatura and Tinnasit Krisinburasak, "Influence of Hot Air Welding Parameters for Architecture Canvas," in *Proceeding of 31th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand (MENET)*, Thailand, 2018, pp. 926-934.
- [8] Hui Shi, Jianping Wang, Xiaona Chen, Shunhua Luo and Lingxi Zhang, "Research on the seam performance of waterproof clothing based on continuous ultrasonic welding technology," *International Journal of Clothing Science and Technology*, vol. 28, no. 2, pp. 171-190, Mar. 2016.
- [9] P.Q. Jiang, Y.F. Lai and Chen. X. Sh, "Seam mechanical properties of polyester /cotton blended woven fabric welded by ultrasonic sewing machine," *Journal of Donghua University (Natural Science)*, vol. 39, no. 5, pp. 283-285, Mar. 2013.
- [10] Jiang. P.Q, Lai, Y.F. and Chen. X.Sh, "Seam mechanical properties of polyester fabric welded by ultrasonic sewing machine",

- Journal of Textile Research*, vol. 34, no. 3, pp. 127-130, Oct. 2013.
- [11] Kunthakorn Khaothong, "Analysis of Failing load and optimization of hot air welding parameters on PVC-Acrylic coated polyester fabric by taguchi and ANOVA Technique," *Engineering Journal*, vol. 23, no. 6, pp. 331-334, Nov. 2019.
- [12] Kunthakorn Khaothong, "Experimental setup for measuring thermal conductivity of architecture fabrics," *Engineering Journal of Research and Development Journal*, vol. 31, no. 1, pp. 145-154, Jan. 2020.
- [13] Tensile - architecture. (2020, Oct 1). [Online]. Available: <http://www.sioen technicaltextiles.com>
- [14] L. Kun, A.C. Murariu, "Research on the Influence of Artificial Ageing on the Tensile Properties of Plastic Coated Composites with Fabric Inserts," in *Proceeding of 7th International Conference on Innovative Technologies for Joining Advanced Materials (TIMA)*, Romania, 2014, pp. 224-229.
- [15] Ranjit K. Roy, *Design of Experiments Using The Taguchi Approach: 16 Steps to Product and Process Improvement*. 1st ed. New York: Wiley-Interscience, 2001.
- [16] Douglas C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 9th ed. New York: John Wiley and Sons, 2017.
- [17] L. Kun, A.C. Murariu, A.V. Birdeanu and K.N. Kun, "Development of an experimental program for optimizing of process parameters used in high frequency welding of PVC coated PE fabrics," *Welding & Material Testing Science*, vol. 3, no. 3, pp. 3-8, Jan. 2014.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตอิฐช่องลมลดลายอาหรับ กรณีศึกษา: มุสลิมโมเดิร์น จังหวัดปัตตานี

ซูไฮดี สนิ^{1*} สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์¹ จุฬาลักษณ์ โรจนานุกุล¹ และ ชัยยุทธ มีงาม²

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

¹ 1 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อยาง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

² 160 หมู่ 4 ถนนกาญจนวนิช ตำบลเขารูปช้าง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

รับบทความ 19 มกราคม 2564 แก้ไขบทความ 27 กรกฎาคม 2564 ตอรับบทความ 31 สิงหาคม 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตอิฐช่องลมลดลายอาหรับ ด้วยวิธีการผลิตแบบใหม่ที่ใช้เครื่องอัดขึ้นรูป ทำการศึกษาการผลิตทุกขั้นตอน ซึ่งนำไปสู่ความสามารถในการเพิ่มปริมาณการผลิตอิฐช่องลมให้สูงขึ้น หลังจากการดำเนินงานผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากระบวนการผลิตอิฐช่องลมนั้นมีประสิทธิภาพการทำงานที่สูงขึ้น ดังนี้ ปริมาณการผลิตเพิ่มขึ้นจากวิธีการเดิม 20 ก้อนต่อวัน เพิ่มขึ้นเป็น 50 ก้อนต่อวัน คิดเป็นสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 76.10 และจากเดิมใช้เวลาในการผลิตที่ 1,401 นาทีต่อก่อน หลังจากการปรับปรุงพบว่าสามารถลดเวลาการผลิตลงเหลือ 97 นาทีต่อก่อน คิดเป็นสัดส่วนของเวลาในการผลิตลดลงร้อยละ 93.07 ตามลำดับ

คำสำคัญ : ประสิทธิภาพ; กระบวนการผลิต; อิฐช่องลม; ลดลายอาหรับ

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Increasing Efficiency of Vent Brick Arabian Style Manufacturing Case Study: Muslim Modern at Pattani Province

Suhaidee Sani^{1*} Surasit Rawangwong¹ Julaluk Rojananukul¹ and
Chaiyoot Meengam²

¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

² Faculty of Industrial Technology, Songkhla Rajabhat University

¹ 1 Ratchadamnoennok Road, Boyang Sub-district, Muang District, Songkhla 90000

² 160 Moo 4, Khoa-Roob-Chang Sub-district, Muang District, Songkhla 90000

Received 19 January 2021; Revised 27 July 2021; Accepted 31 August 2021

Abstract

The objective of this study is to improve the efficiency in manufacturing process of Arabian-style ventilation bricks with a new production method that uses a machine. The study focuses on all steps of productions in order to increase productivity. After the experiment, the study shows that the improvement of ventilation brick manufacturing includes the increase in production volume from 20 pieces per day to 50 pieces per day, representing an increase of 76.19 percent; and the decrease in production cycle time originally from 1,401 minutes per piece to 97 minutes per piece, representing a decrease of 93.07 percent respectively.

Keywords : Efficiency; Manufacturing Process; Vent Brick; Arabian Style

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการแข่งขันทางนวัตกรรมเพื่อส่งเสริมการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจให้เป็นประเทศที่ก้าวข้ามกับดักรายได้ปานกลาง นำไปสู่การพัฒนาที่หลุดพ้นจากความยากจนและสร้างรายได้ด้วยการพัฒนาประเทศด้านอุตสาหกรรมและการส่งออก [1] ซึ่งมีความสอดคล้องกับแผนพัฒนาประเทศในปัจจุบันที่เรียกว่า “ประเทศไทย 4.0” (Thailand 4.0) ให้เป็นเศรษฐกิจใหม่ (New Engines of Growth) เพื่อให้ประชากรมีรายได้ที่สูงขึ้น โดยมีเป้าหมายให้เกิดขึ้นในระยะเวลา 20 ปีข้างหน้า ซึ่งการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานของระบบเศรษฐกิจเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาของประเทศไทย เช่น เศรษฐกิจด้านการค้า ด้านวิสาหกิจชุมชน เป็นต้น อย่างไรก็ตามการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานไม่ได้จำกัดอยู่เพียงด้านการก่อสร้างเท่านั้น แต่ยังรวมไปถึงการพัฒนาเทคโนโลยีชุมชนอีกด้วย ซึ่งส่งผลต่อการพัฒนาประเทศ โครงสร้างระบบเศรษฐกิจและนำไปสู่ขีดความสามารถในการแข่งขันทางธุรกิจ ทำให้ดัชนีมวลรวมในประเทศ (Gross Domestic Product : GDP) เพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้การก่อสร้างของประเทศไทยมีอัตราการขยายแบบก้าวกระโดด ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีอัตราการขยายตัวที่ขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการพัฒนารูปแบบและปรับปรุงผลิตภัณฑ์อยู่เสมอ [2] ซึ่งปัจจุบันผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมก็เป็นอีกสินค้าหนึ่งที่เป็นที่ต้องการในธุรกิจก่อสร้างอาคารบ้านเรือน [3] จากการออกแบบสถาปัตยกรรมสมัยใหม่ ผู้ประกอบการผลิตอุตสาหกรรมก็ต้องมีการปรับตัวอยู่เสมอเพื่อให้สามารถแข่งขันในตลาดได้ ด้วยการคิดค้นผลิตภัณฑ์รูปแบบใหม่ การปรับปรุงกระบวนการผลิต [4] เพื่อนำไปสู่การแข่งขันทางธุรกิจและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ กลุ่มมุสลิมโมเดิร์น จังหวัดปัตตานี ซึ่งเป็นกลุ่มผลิตอาหารฮาลาลได้ประสบกับปัญหาในกระบวนการ

ผลิตในสภาวะปัจจุบัน ส่งผลให้การผลิตล่าช้า คุณภาพสินค้าไม่สม่ำเสมอ ทำให้การส่งมอบสินค้าให้กับลูกค้าไม่ตรงตามกำหนดเวลา จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการพัฒนากระบวนการผลิตด้วยการเพิ่มเทคโนโลยีที่ทันสมัยและมีรูปแบบการผลิตที่เหมาะสม นำไปสู่ประสิทธิภาพสูงสุดในกระบวนการผลิต [5]

คณะผู้วิจัยได้เล็งเห็นปัญหาในกระบวนการผลิตอาหารฮาลาลของ กลุ่มมุสลิมโมเดิร์น จังหวัดปัตตานีและจากการศึกษายังไม่พบรายงานวิจัยที่สอดคล้องกับการออกแบบเทคโนโลยีการผลิตอาหารฮาลาลลดเวลาสำหรับที่ส่งผลให้ลดข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตนำไปสู่ความสะดวก รวดเร็วและสามารถลดต้นทุนในการผลิตได้ อีกทั้งยังสามารถเพิ่มกำลังการผลิตให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น จึงเป็นที่มาและความสำคัญของงานวิจัยนี้ ด้วยการออกแบบสร้างเทคโนโลยีการอัดแผ่นอาหารฮาลาลลดเวลาสำหรับ อันเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแผ่นอาหารฮาลาลลดเวลาสำหรับของ กลุ่มมุสลิมโมเดิร์น จังหวัดปัตตานีต่อไป

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาและปรับปรุงกระบวนการผลิตแผ่นอาหารฮาลาลลดเวลาสำหรับของ กลุ่มมุสลิมโมเดิร์น จังหวัดปัตตานี ให้มีประสิทธิภาพการผลิตที่เพิ่มขึ้น

3. ระเบียบวิธีวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Research) ที่มีกลุ่มตัวอย่างเป็นคนงานที่อยู่ในกระบวนการผลิต โดยการดำเนินการเก็บข้อมูลเป็นไปตามทฤษฎีการศึกษาการทำงาน (Work Study) ที่มุ่งเน้นการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตอาหารฮาลาลลดเวลาสำหรับได้เริ่มต้นด้วยการศึกษาด้านประสิทธิภาพการผลิตก่อนการปรับปรุง (Before) และหลังการปรับปรุง (After) ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การรวบรวมสาเหตุของปัญหา

การประเมิณหาสาเหตุของกระบวนการเพื่อนำไปวิเคราะห์ปัญหามานี้ใช้เครื่องมือรวบรวมสาเหตุของปัญหาของการวิจัยเป็นแบบสอบถาม ด้วยการสัมภาษณ์จากพนักงาน จากนั้นทำการรวบรวมข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างที่เจาะจงให้เพียงพอ จากการ

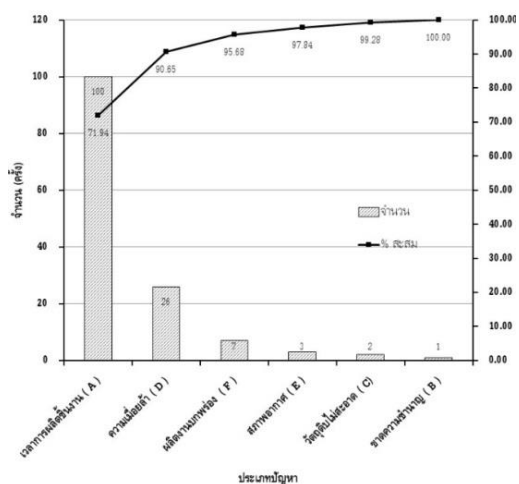
รวบรวมสาเหตุของปัญหาได้จำแนกประเภทของปัญหาออกเป็น 6 ปัญหา ได้แจกแจงจำนวนข้อมูลของปัญหาที่เกิดขึ้นของกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ของลวดลายอาหารบ เพื่อนำไปใช้ในการเลือกงานที่จะดำเนินขั้นตอนต่อไป ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความถี่ของประเภทสาเหตุของปัญหาจากการทำงาน

รหัส	สาเหตุของปัญหา	ความถี่	รวม
A	เวลาการผลิตชิ้นงาน		100
B	ขาดความชำนาญ		1
C	วัตถุดิบไม่สะอาด		2
D	ความเมื่อยล้า		26
E	สภาพอากาศ		3
F	ผลิตงานบกพร่อง		7

ขั้นตอนที่ 2 การคัดเลือกงาน

การคัดเลือกงานในการแก้ปัญหาทางคณะผู้วิจัยได้นำข้อมูลการประเมิณหาสาเหตุของกระบวนการมาสร้างเป็นแผนภาพพาเรโต (Pareto Diagram) เพื่อเป็นพิจารณาคัดเลือกงานที่เกิดปัญหา โดยเลือกความถี่สูงเป็นประเด็นของการทำวิจัย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตผลิตภัณฑ์ของลวดลายอาหารบของกระบวนการผลิต



รูปที่ 1 แผนภาพพาเรโตจำแนกตามสาเหตุของปัญหาจากการทำงาน

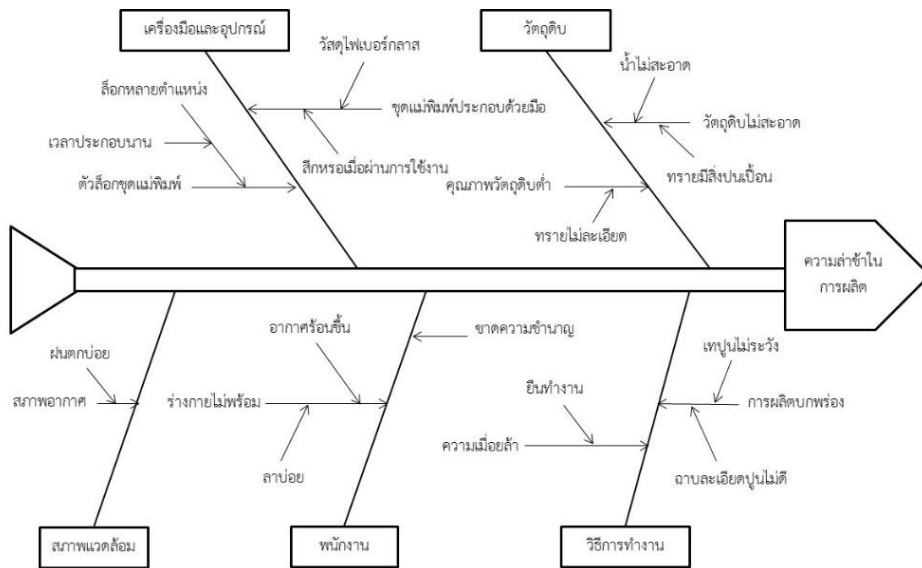
ในรูปแบบปัจจุบัน จากการศึกษพบว่ากระบวนการผลิตชิ้นงานผลิตภัณฑ์ของลวดลายอาหารบนั้น มีประเภทของปัญหา ซึ่งสามารถเรียงลำดับของปัญหาได้ดังนี้ เวลาการผลิตชิ้นงาน ความเมื่อยล้า ผลิตชิ้นงานบกพร่อง สภาพอากาศ วัตถุดิบไม่สะอาดและขาดความชำนาญงานตามลำดับ จึงเป็นเหตุผลสำคัญของงานวิจัยการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตในครั้งนี้ คณะผู้วิจัยได้คัดเลือกปัญหาที่มีจำนวนมากที่สุด คือ เวลาการผลิตชิ้นงานมาเป็นปัจจัยหลักในการศึกษา โดยมีการคำนึงถึงปัญหาที่เหลือตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 1

ขั้นตอนที่ 3 การวิเคราะห์ข้อมูลของปัญหา

การเลือกงานจากผลการจำแนกประเภทของปัญหาการผลิต การดำเนินการคัดเลือกจากประเภทของปัญหาที่เกิดขึ้นจำนวนมากที่สุด คือ เวลาการผลิตชิ้นงานซึ่งทำให้เกิดปัญหาผลิตชิ้นงานล่าช้า เพราะใช้เวลาการผลิตมาก ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงได้มุ่งเน้นการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตผลิตภัณฑ์ของลวดลายอาหารบที่ปัญหาการผลิตชิ้นงานไม่ทัน โดยพบว่าใช้เวลาในการผลิตเฉลี่ย 22 ชั่วโมงต่อชิ้นงาน จึงเป็นแนวทางในการ

วิเคราะห์และเลือกปัญหานี้ จากนั้นจึงนำข้อมูลจาก แผนภาพพาเรโตมาดำเนินการวิเคราะห์ปัญหาด้วย

เครื่องมือแผนผังเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนผังเหตุและผลของความล่าช้าในกระบวนการผลิต

จากการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาด้วย แผนผังเหตุและผล พบว่าเครื่องมือและอุปกรณ์ของการผลิตแบบปัจจุบันนั้น เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดความล่าช้าในกระบวนการผลิต ขั้นตอนในการผลิตเริ่มต้นด้วยการเทปูนในแบบแม่พิมพ์และฉาบให้เรียบ จากนั้นรอให้ปูนในแบบแม่พิมพ์แข็งตัวและปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ จะได้อิฐช่องลม ดังแสดงในรูปที่ 3 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาแนวทางการแก้ไขวิธีการหล่อเทปูนแบบเปียก ด้วยการหล่อแบบแห้ง ซึ่งจะผสมปูนหล่อในสถานะกึ่งของแข็ง



รูปที่ 3 การผลิตอิฐช่องลมลดความล่าช้า

ขั้นตอนที่ 4 การปรับปรุงกระบวนการผลิต

ทำการปรับปรุงแม่พิมพ์และจัดทำเครื่องอัดอิฐช่องลมลดความล่าช้าใหม่ เพื่อลดความล่าช้าในกระบวนการผลิต โดยมีขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานดังต่อไปนี้

1) ศึกษาเวลาการทำงานของแต่ละกระบวนการในการผลิตอิฐช่องลมลดความล่าช้า ด้วยแผนภูมิกระบวนการไหล พบว่าเวลาการทำงานของแต่ละขั้นตอนมีจำนวน 13 กิจกรรม ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยได้ทำการจับเวลาเป็นจำนวน 10 ครั้งของแต่ละขั้นตอนการผลิต

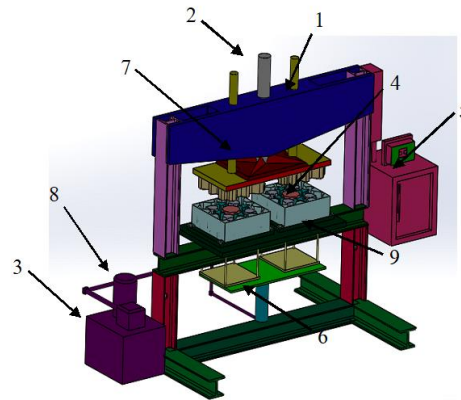
2) ศึกษาการจัดวางแผนผังบริเวณที่ทำงานก่อนการปรับปรุงกระบวนการผลิต จากการศึกษาค้นคว้าสามารถผลิตอิฐช่องลมได้จำนวน 20 ชิ้นต่อวัน และมีข้อจำกัดเรื่องพื้นที่การวางแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 5

3) ออกแบบเครื่องมืออัดขึ้นรูปอิฐช่องลมลดความล่าช้า งานวิจัยในครั้งนี้ คณะผู้วิจัยทำการออกแบบ

เครื่องอัดขึ้นรูป แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การออกแบบโครงสร้างของเครื่อง (Structure) ดังแสดงในรูปที่ 6 และอีกส่วน คือ การออกแบบและสร้างชุดแม่พิมพ์อิฐช่องลมลดลายอาหาร (Mold) ที่มีความซับซ้อนของ

แบบงานและต้องออกแบบเพื่อให้พนักงานสามารถทำงานได้อย่างสะดวก ด้วยการเพิ่มระบบกลไก (Mechanism) สำหรับปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์แบบอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 7

แผนภูมิกระบวนการไหล (Flow Process Chart)					
ที่ตั้ง : จังหวัดปัตตานี		สรุปผล			
ชื่อบริษัท : ร้านมุสลิมโมเดิร์น		สัญลักษณ์	ปัจจุบัน	ปรับปรุง	ลดลง
ผลิตภัณฑ์ : อิฐช่องลมลดลายอาหาร		การปฏิบัติงาน	○	8	-
		การเคลื่อนย้าย	⇒	2	-
		การรอคอย	◇	1	-
		การตรวจสอบ	□	1	-
วิธีเดิม □ วิธีปรับปรุง		การเก็บ	▽	1	-
กิจกรรม : กระบวนการผลิตอิฐช่องลมลดลายอาหาร		รวม		13	-
วันที่ : 30/12/60		เวลาเฉลี่ย (นาฬิกา)		1,328	-
บันทึกโดย : นายสหพล ยีหะ		ระยะทาง (เมตร)		13	-
อนุมัติโดย : นายซูไฮดี สนิ		หมายเหตุ :			
รายการ	ระยะทาง (เมตร)	เวลาเฉลี่ย (นาฬิกา)	สัญลักษณ์		
เตรียมเครื่องมืออุปกรณ์และส่วนผสม	-	3.74	●	○	
เตรียมส่วนผสม	7	1.83	●	⇒	
ผสมกวนปูนซีเมนต์ หินปูน และน้ำ	-	29.95	●		
นำชุดแม่พิมพ์ทำขึ้นเครื่องให้ทั่ว	-	1.33	●		
ตักปูนใส่ภาชนะ (ที่ผสมปูน)	4	0.74	●	⇒	
นำปูนมาเทใส่ชุดแม่พิมพ์	-	1.17	●		
นำค้อนเคาะชุดแม่พิมพ์	-	0.21	●		
เติมปูนให้เต็มแม่พิมพ์จนเต็ม	-	0.96	●		
รอคอยปูนให้แห้ง	-	1,260	●	□	
ถอดตัวล็อกชุดแม่พิมพ์	-	0.78	●		
เก็บชุดแม่พิมพ์พร้อมทำความสะอาด	-	0.36	●		
ตกแต่งผิวพร้อมตรวจสอบ	-	26.70	●		■
เก็บงานรอวางจำหน่าย	2	0.23	●		▽

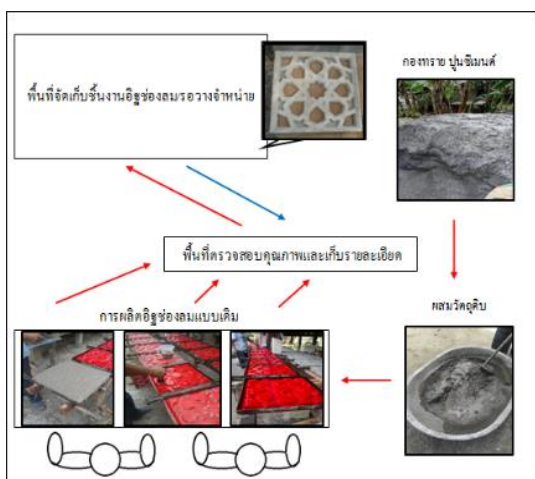


หมายเลข ชื่อส่วนประกอบ

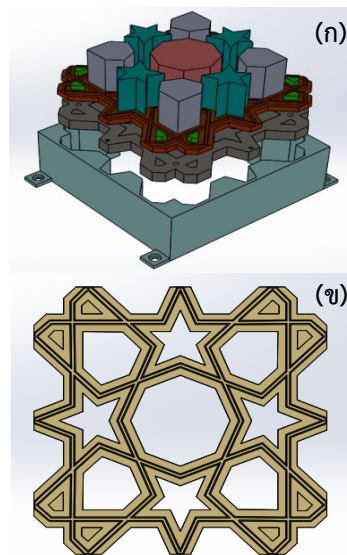
- | | |
|------------------------|-------------------|
| 1 โครงสร้าง | 6 ชุดปลดชิ้นงาน |
| 2 กระบอกไฮดรอลิก | 7 ชุดกดอัดชิ้นงาน |
| 3 ถังพักน้ำมันไฮดรอลิก | 8 มอเตอร์ |
| 4 ชุดแม่พิมพ์ | 9 ฐานรองแม่พิมพ์ |
| 5 ชุดควบคุมระบบ | |

รูปที่ 6 แบบของเครื่องอัดขึ้นรูปอิฐช่องลมลดลายอาหาร

รูปที่ 4 แผนภูมิกระบวนการไหลของการผลิตอิฐช่องลมลดลายอาหารก่อนการปรับปรุง



รูปที่ 5 การวางแผนผังการทำงานแบบปัจจุบัน



รูปที่ 7 ต้นแบบชุดแม่พิมพ์อิฐช่องลมลดลายอาหาร (ก) ชุดแม่พิมพ์ล่าง และ (ข) แผ่นปลดชิ้นงาน

4) วิเคราะห์ข้อมูลของเวลาที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงาน ซึ่งในการวิเคราะห์ข้อมูลจะนำเสนอในผลการทดลองต่อไป

3. ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

การทดสอบจับเวลาที่ใช้ในการผลิตของกระบวนการผลิตอิฐช่องลมลดตายอาหรับ ด้วยนาฬิกาจับเวลา การผลิตก่อนและหลังการปรับปรุงกระบวนการผลิตอิฐช่องลมลดตายอาหรับมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

3.1 ผลการเปรียบเทียบเวลาการผลิตอิฐช่องลมลดตายอาหรับ

การทดลองเปรียบเทียบเวลาการผลิตอิฐช่องลมลดตายอาหรับจากการผลิตรูปแบบเดิมและรูปแบบใหม่ แสดงข้อมูลในตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าเวลาการผลิตก่อนการปรับปรุงนั้นใช้เวลาเร็วสุด 1,328.90 นาทีต่อชิ้น หลังจากที่ได้ปรับปรุงแบบการผลิตแบบใหม่ พบว่าเวลาการผลิตลดลง เหลือเพียง 166.60 นาทีต่อชิ้น และประสิทธิภาพการผลิตเชิงเวลาเพิ่มขึ้น ร้อยละ 87.46 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการผลิตแบบเดิม อย่างไรก็ตามจากการจัดวางแผนผังบริเวณการทำงานใหม่ ก็นำไปสู่การลดลงของเวลาในการผลิตอิฐช่องลมลดตายอาหรับเช่นกัน

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบเวลาการผลิตแบบเดิมและการผลิตแบบใหม่

ครั้งที่	จำนวนเวลาผลิต (นาทีต่อชิ้นงาน)	
	การผลิตแบบเดิม	การผลิตแบบใหม่
1	1,324.0	167.0
2	1,327.0	166.0
3	1,338.0	166.0
4	1,328.0	166.0
5	1,327.0	170.0
6	1,328.0	164.0
7	1,330.0	167.0
8	1,332.0	166.0
9	1,328.0	168.0
10	1,327.0	166.0
เฉลี่ย	1,328.9	166.6

3.2 ผลการประเมินความพึงพอใจการใช้เครื่องอัดขึ้นรูปอิฐช่องลมลดตายอาหรับ

การประเมินความพึงพอใจได้กำหนดเป้าหมายของผู้ประเมิน ออกเป็น 3 กลุ่ม ผู้ตอบแบบสอบถามทั้งหมดรวมทั้ง 3 กลุ่ม จำนวน 17 คน ประกอบด้วยผู้ประกอบการ ร้อยละ 11.76 ผู้เชี่ยวชาญด้านการผลิต ร้อยละ 29.41 และพนักงานปฏิบัติงาน ร้อยละ 58.82 โดยทำการเปรียบเทียบความพึงพอใจของการผลิตก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง ผลการประเมินความพึงพอใจการใช้เครื่องอัดขึ้นรูปอิฐช่องลมลดตายอาหรับ จะเห็นได้ว่า 1) ด้านออกแบบเครื่องมือ ได้แก่ การออกแบบทางวิศวกรรม ความแข็งแรงของโครงสร้าง และการเลือกใช้วัสดุ พบว่ามีความพึงพอใจถึง ร้อยละ 83.25 2) ด้านความสามารถในการทำงาน ได้แก่ ระบบประสิทธิภาพทันสมัย มีความสะดวกใช้งานไม่ซับซ้อน ตอบสนองวัตถุประสงค์การใช้งานและสามารถดูแลทำความสะอาดได้ง่าย พบว่ามีความพึงพอใจ ร้อยละ 81.55 3) ด้านความปลอดภัยในการใช้งาน ได้แก่ มีวิธีการบำรุงดูแลรักษาได้ง่ายของเครื่องมือ ความปลอดภัยในการใช้งานมีเครื่องหมายเตือนระบุชัดเจน และคู่มือระบบบำรุงดูแลรักษาที่สะดวกและควรตรวจสอบเช็คเครื่องก่อน/หลังใช้งานทุกครั้ง พบว่ามีความพึงพอใจ ร้อยละ 82.13 และ 4) ด้านความพึงพอใจโดยรวม พบว่ามีความพึงพอใจ ร้อยละ 93.20 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3 ผลการตรวจสอบเชิงคุณภาพของชิ้นงานที่ได้จากการตรวจสอบแสดงให้เห็นว่าคุณภาพสูงขึ้น ไม่มีการบิดตัว ผิวของชิ้นงานเรียบสม่ำเสมอ ไม่แตกเสียรูปขณะปลดชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 อิฐช่องลมลดตายอาหรับชิ้นที่ผ่านกระบวนการผลิตแบบใหม่

ตารางที่ 3 แสดงผลการประเมินความพึงพอใจการใช้เครื่องอัดขึ้นรูปอิฐช่องลมลดตายอาหรับ

หัวข้อประเมิน	คะแนนเฉลี่ย		ระดับความพึงพอใจ	เปอร์เซ็นต์ระดับความพึงพอใจ
	การผลิตรูปแบบเดิม	การผลิตรูปแบบใหม่		
1. ออกแบบด้านเครื่องมือ				
1.1 ออกแบบทางวิศวกรรม	2	4.33	มากที่สุด	86.60
1.2 ความแข็งแรงของเครื่องมือ	2	3.66	มาก	73.20
1.3 การเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม	2	4.33	มากที่สุด	86.60
1.4 รูปแบบมีความเหมาะสมและสวยงาม	2	4.33	มากที่สุด	86.60
เฉลี่ย				83.25
2. ด้านความสามารถในการทำงาน				
2.1 ระบบมีประสิทธิภาพทันสมัยและเชื่อถือได้	2.5	4.66	มากที่สุด	93.20
2.2 มีความสะดวกในการใช้งานที่ไม่ซับซ้อน	2	4.33	มากที่สุด	86.60
2.3 ตอบสนองตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน	2.33	3.66	มาก	73.20
2.4 สามารถดูแลรักษาทำความสะอาดได้ง่าย	2.33	3.66	มาก	73.20
เฉลี่ย				81.55
3. ด้านความปลอดภัยในการใช้งาน				
3.1 มีวิธีการบำรุงดูแลรักษาได้ง่ายของเครื่องมือ	2	3.66	มาก	73.20
3.2 มีความปลอดภัยในการใช้งานมีเครื่องหมายเตือนระบุชัดเจน	2	4.33	มากที่สุด	86.60
3.3 มีคู่มือระบบบำรุงดูแลรักษาที่สะดวก และ ควรตรวจเช็คเครื่องก่อน/หลังใช้งานทุกครั้ง	2	4.33	มากที่สุด	86.60
เฉลี่ย				82.13
4. ด้านความพึงพอใจโดยรวม				
4.1 ความพึงพอใจโดยรวมของผู้ใช้งาน/บุคลากร	2.5	4.66	มากที่สุด	93.20
เฉลี่ย				93.20

4. การอภิปรายผล

การศึกษาผลการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตอิฐช่องลมลดตายอาหรับ กรณีศึกษา โมเดิร์นมุสลิม จังหวัดปัตตานี พบว่ากระบวนการผลิตอิฐช่องลมลดตายอาหรับในรูปแบบเดิมนั้น ใช้เวลาการผลิตมาก จึงส่งผลให้ผลิตชิ้นงานได้เพียงจำนวน 20 ชิ้นต่อวัน เนื่องจากขั้นตอนของการเตรียมวัตถุดิบในรูปแบบที่มีสภาพเป็นของเหลว จากนั้นนำไปเทลงในแม่พิมพ์ที่ประกอบไว้ ส่งผลให้วัตถุดิบต้องเปลี่ยนสภาพจากของเหลวจนกลายเป็นของแข็ง ดังนั้นต้องใช้ระยะเวลา

ในการรอเพื่อให้วัตถุดิบนั้นอยู่ในสภาพของแข็งนาน อีกทั้งเครื่องมือที่เป็นแม่พิมพ์นั้น จะต้องใช้เวลาในการถอดประกอบแม่พิมพ์แต่ละชิ้นงานนาน เป็นเวลา 3.74 นาทีต่อชิ้นงาน คิดเป็นเป็น ร้อยละ 0.28 ของเวลาการผลิตรูปแบบเดิม เมื่อความต้องการของสินค้ามีเพิ่มมากขึ้น ทำให้ทางผู้ประกอบการต้องการปรับเปลี่ยนรูปแบบการผลิตของสินค้าจากรูปแบบเดิมให้มีความรวดเร็วและใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่ที่เหมาะสมประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิต สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Sasiporn [6] ได้รายงานว่าการพัฒนารูปแบบผลิตภัณฑ์

ทางผู้ประกอบการมีความคาดหวังสูง สำหรับการออกแบบกระบวนการผลิตอิฐช่องลมลดลอยอาหรับรูปแบบใหม่นั้น เพื่อให้มีประสิทธิภาพการผลิตที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับการผลิตรูปแบบเดิม จะต้องมีการดำเนินการปรับเปลี่ยนกระบวนการอยู่ 2 ส่วน คือ 1) การเตรียมวัตถุดิบ และ 2) การใช้เครื่องมือในรูปแบบใหม่ และยังสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Abdollah ardeshir [7] ที่รายงานว่าต้องมีออกแบบเครื่องมือสมัยใหม่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตของอิฐช่องลม นอกจากนั้นยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sergio Neves Monteiro [8] ได้อธิบายว่าปัญหาของกระบวนการเทคอนกรีตลงในแม่พิมพ์ แล้วใช้เครื่องสั่นเขย่าคอนกรีตนั้น ไม่สามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้ จำเป็นจะต้องทำการปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามการใช้เทคนิคการลดความสูญเปล่าที่เกิดขึ้นในการทำงานก็สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตได้ [9] หรือการประยุกต์ใช้วัสดุที่เหลือใช้มาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ก็สามารถเพิ่มมูลค่าในการผลิตได้ นำไปสู่การเกิดประสิทธิภาพที่สูงขึ้น [10] ดังนั้นงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการขจัดความสูญเปล่าที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต เริ่มจากการเลือกงานที่มีปริมาณความถี่สูงสุด คือ เวลาการผลิตชิ้นงาน คิดเป็นร้อยละ 71.94 ของกระบวนการผลิตทั้งหมด จากนั้นวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาด้วยเทคนิคทางวิศวกรรมอุตสาหกรรม โดยรวบรวมสาเหตุของปัญหาจากผู้เกี่ยวข้อง ได้แก่ ผู้ประกอบการผู้เชี่ยวชาญด้านการผลิตและพนักงานปฏิบัติงาน รวมทั้งหมดเป็นจำนวน 17 คน นำมาสรุปผลหาสาเหตุ ซึ่งจากปัญหาแสดงให้เห็นว่าขั้นตอนการรอของกระบวนการหล่อปูนตามแบบแม่พิมพ์ของอิฐช่องลมลดลอยอาหรับมีความล่าช้า เนื่องจากเป็นการหล่อแบบเปียก งานวิจัยนี้เสนอแนวทางการปรับปรุงด้วยการหล่อแบบแห้ง ด้วยการผสมปูนหล่อในสถานะกึ่งของแข็ง นอกจากนั้นยังออกแบบและสร้างเทคโนโลยีช่วยในการผลิตที่นำไปสู่การเพิ่มกำลังการผลิต [11] ด้วยการ

ออกแบบและสร้างเครื่องอัดขึ้นรูปอิฐช่องลมลดลอยอาหรับ กรอบแนวคิดของการออกแบบเครื่องอัดขึ้นรูปอิฐช่องลมลดลอยอาหรับ ประกอบด้วย 1) โครงสร้างมีความแข็งแรง 2) การบำรุงรักษา 3) ต้นทุนที่เหมาะสม และ 4) ความปลอดภัยหลังจากที่ได้ดำเนินการออกแบบเครื่องอัดขึ้นรูปอิฐช่องลมลดลอยอาหรับแล้ว ได้ดำเนินการสร้างเครื่องอัดขึ้นรูปอิฐช่องลมลดลอยอาหรับ ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ 1) โครงสร้าง 2) ชุดระบบปั๊มไฮดรอลิก 3) ชุดควบคุมการทำงาน และ 4) ชุดแม่พิมพ์อิฐช่องลม จากนั้นเพื่อให้เป็นไปตามแนวคิดของงานวิจัยที่ใช้การศึกษาการทำงาน พร้อมทั้งใช้เทคโนโลยีประยุกต์ในระบบการผลิต จนนำไปสู่การลดของเสียในกระบวนการผลิต [12] จึงดำเนินการทดลองใช้เครื่องอัดขึ้นรูปอิฐช่องลมลดลอยอาหรับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สามารถลดระยะเวลาในกระบวนการผลิตได้ โดยพบว่ากำลังการผลิตเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 87.46 เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตรูปแบบเดิม นอกจากนั้นผลการวิจัยยังพบว่าผลการประเมินความพึงพอใจการใช้เครื่องอัดขึ้นรูปอิฐช่องลมลดลอยอาหรับ ทั้ง 4 ด้าน คือ ด้านออกแบบเครื่องมือ ด้านความสามารถในการทำงาน ด้านความปลอดภัยในการใช้งานและด้านความพึงพอใจโดยรวม อยู่ในระดับดีมากและมากที่สุด ตามลำดับ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นได้ชัดเจนว่า การใช้หลักการทางวิศวกรรมวิเคราะห์ปัญหาและแนวทางการแก้ไขของปัญหาเหมาะสม สามารถนำไปสู่การเพิ่มความสามารถในการผลิตอิฐช่องลมลดลอยอาหรับที่มีคุณภาพและประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

5. สรุปผลการวิจัย

การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตอิฐช่องลมลดลอยอาหรับ กรณีศึกษาโมเดิร์นมุสลิม จังหวัดปัตตานี พบว่าการผลิตอิฐช่องลมลดลอยอาหรับในกระบวนการผลิตรูปแบบใหม่มีประสิทธิภาพการผลิตที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับการผลิตรูปแบบเดิม จากผลการ

ทดลองดังกล่าวส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในการผลิตลดลงจากเดิมใช้ 1,328.90 นาทีต่อชิ้น ลดลงเป็น 166 นาทีต่อชิ้น คิดเป็นร้อยละ 87.46 โดยได้ทำการทดลองเปลี่ยนรูปแบบวิธีการผลิตรูปแบบใหม่ คือ การเตรียมวัตถุดิบ เครื่องมือการผลิต ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตดีขึ้นของผลผลิตอาหารปิ้งสุกขึ้น

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Somchai Jitsuchon, "Thailand in a Middle-income Trap," *TDRI Quarterly Review*, vol. 27, no. 2, pp. 13–20, Jun. 2012.
- [2] S. O. Yakubu and M. B. Umar, "Design Construction and Testing of a Multipurpose Brick/Block Molding Machine," *American Journal of Engineering Research*, vol. 4, no. 2, pp. 1-12, Feb. 2015.
- [3] Ahmad M. Al-Harashsheh and Mohammed M. Obeidat, "A Sociolinguistics Study of Colors Used in Colloquial Jordanian Arabic," *Human and Social Sciences*, vol. 44, no. 4, pp. 241–249, Jan. 2017.
- [4] Paitoon Pakara Phang and Pattama Charoenphon, "The optimization of the production process using lean techniques: a case study of the production of bricks or concrete blocks," M.S. thesis., Dept. Biz., RUMTT., Thanyaburi, 2012.
- [5] K. Tushar, "Material Handling Process Improvement Using Lean Manufacturing Principles," *International of Industrial Engineering*, vol. 18, no. 7, pp. 357-368, Jan. 2010.
- [6] Sasiporn Taikham and Narin Sungruksa, "The Development of Creative Product Model to Value-Added of the Small and Micro Community Enterprise in Ratchaburi Province," *Varidian E-Journal Silpakorn University*, vol. 8, no. 1, pp. 606-632, Jan. 2015.
- [7] Abdollah ardeshir and Pedram farnood Ahmadi, "A synopsis about production of brick from lightweight and waste material," *Computations and Materials in Civil Engineering*, vol. 1, no. 3, pp. 143-163, Dec. 2016.
- [8] Sergio Neves Monteiro and Carlos Mauricio Fontes Vieira, "On the production of fired clay bricks from waste materials: A critical update," *Construction and building material*, vol. 68, pp. 599-610, Oct. 2014.
- [9] Maroot Reame and Terapong Seasang, "Increasing Efficiency Production Process Using Lean Technique a Case Study of Concrete Block Production Process," in *The 3rd National RMUTR Conference Rajamangala University of Technology Rattanakosin*, Thailand, 2018, pp. 18-23.
- [10] Z. Lianyang, "Production of bricks from waste materials," *Construction and Building Materials*, vol. 47, pp. 643–655, Aug. 2013.
- [11] S.K. Kolawole and J.K. Odusote, Design Fabrication and Performance Evaluation of a Manual Clay Brick Molding Machine," *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 17-20, Feb. 2013.
- [12] C. Roriz. "Application of Lean Production Principles and Tools for Quality

Improvement of Production Processes in a
Carton Company,” *Procedia*

Manufacturing, vol. 11, pp. 1069–1076,
Jun. 2017.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การปรับปรุงประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักร ของระบบการกรองน้ำ ของโรงงานผลิตน้ำขนาดใหญ่ โดยใช้การบำรุงรักษาทีละขั้นโดยทุกคนมี ส่วนร่วม : กรณีศึกษาโรงงานผลิตน้ำประปาแห่งหนึ่ง

ศิริวิทย์ ปุสสิโร* ศุภรัชชัย วรรัตน์

วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต

110/1-4 ถนนประชาชื่น แขวงทุ่งสองห้อง เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร 10210

รับบทความ 30 ตุลาคม 2563 แก้ไขบทความ 18 สิงหาคม 2564 ตอรับบทความ 16 กันยายน 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักรของระบบการกรองน้ำ ของโรงงานผลิตน้ำการศึกษา ซึ่งมีกระบวนการผลิตน้ำแบ่งเป็น 4 สายการผลิตน้ำ โดยระบบการกรองน้ำมีหัวขับไฟฟ้า และชุดเกียร์ขับ เป็นเครื่องจักรหลัก ที่เกิดปัญหาความเสียหายบ่อยครั้ง ทำให้ระบบการกรองน้ำเป็นกระบวนการคอคอดของกระบวนการผลิตน้ำ โดยการศึกษาวิจัยนี้ แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรก เป็นการนำเสนอสมการและขั้นตอนในการวัดค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักรของระบบการกรองน้ำ โดยใช้ข้อมูลจากระบบการจัดการงานบำรุงรักษาด้วยคอมพิวเตอร์ มาวิเคราะห์ โดยใช้ข้อมูลทางด้านเวลาเฉลี่ยก่อนการเสียหาย, เวลาเฉลี่ยในการซ่อม และข้อมูลการผลิตน้ำ ขั้นตอนที่สอง เป็นการปรับปรุงค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักรของระบบการกรองน้ำ โดยการวิเคราะห์ความสูญเสียที่เกิดขึ้นของหัวขับไฟฟ้า และชุดเกียร์ขับ และใช้หลักการของการบำรุงรักษาทีละขั้นโดยทุกคนมีส่วนร่วมในการปรับปรุง ผลการศึกษาค้นพบว่า ค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักรของระบบการกรองน้ำเพิ่มขึ้น คิดเป็นร้อยละ 0.11, 0.68, 0.44 และ 2.44 ตามลำดับของแต่ละสายการผลิตน้ำ กำลังการผลิตน้ำที่เพิ่มขึ้น คิดเป็น 328,500 ลูกบาศก์เมตรต่อปี, 1,168,000 ลูกบาศก์เมตรต่อปี, 1,022,000 ลูกบาศก์เมตรต่อปี และ 3,832,500 ลูกบาศก์เมตรต่อปี ตามลำดับของแต่ละสายการผลิตน้ำ ในงานวิจัยนี้ เป็นการใส่หลักการปรับปรุงเฉพาะจุด โดยการเพิ่มเติมระบบป้องกัน เพื่อป้องกันความเสียหายของเครื่องจักร เนื่องจากปัญหาส่วนใหญ่พบว่าระบบป้องกันเกิดการดำเนินงานผิดพลาด ซึ่งเป็นปัญหาที่พบมากที่สุดสายการผลิตที่ 4 และปัจจัยความสำเร็จต้องอาศัยทรัพยากรบุคคลของทุกฝ่ายในการร่วมมือกัน ระดมสมอง วิเคราะห์ ถึงสาเหตุของความสูญเสียต่างๆ เพื่อกำจัดความสูญเสีย และใช้องค์ความรู้เชิงวิศวกรรมในการปรับปรุง

คำสำคัญ : ประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักร; ระบบการจัดการงานบำรุงรักษาด้วยคอมพิวเตอร์; เวลาเฉลี่ยก่อนการเสียหาย; เวลาเฉลี่ยในการซ่อม; การบำรุงรักษาทีละขั้นโดยทุกคนมีส่วนร่วม

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +66 8451 5356, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: sirawit78956@gmail.com

<http://journal.rmutp.ac.th/>

The Overall Equipment Effectiveness Improvement of the Water Filtration Systems in the Large Water Treatment Plant by Total Productive Maintenance Evaluation: A Case Study of the Water Treatment Plant

Sirawit Pussawiro* Suparatchai Vorarat

College of Innovation Technology and Engineering, Dhurakij Pundit University

110/1-4 Prachachuen Road, Thung Song Hong, Lak Si, Bangkok 10210

Received 30 October 2020; Revised 18 August 2021; Accepted 16 September 2021

Abstract

This research objective is to improve the overall equipment effectiveness of the water filtration systems in the case study of the Water Treatment Plant, which divides the water production into 4 production lines. The water filtration system has an electric actuator and gear, is the main machine in the water filtration system. An electric actuator and gear have more machine breakdowns. That makes the water filtration system is the bottleneck of the water production process. This research study is divided into two steps: the first step is the presentation of the equation and the steps to measure the Overall Equipment Effectiveness of the water filtration system. The equation used data from the computer maintenance management system to analysis on mean time between failure data (MTBF), mean time to repair data (MTTR) and water production process data. The results can be improved the overall equipment effectiveness of the water filtration system increased to 0.11%, 0.68%, 0.44% and 2.44%, respectively in each production process line. And increased Quantity of Filtration Water increased to 328,500 m³/year, 1,168,000 m³/year, 1,022,000 m³/year and 3,832,500 m³/year, respectively in each production process line. In this research used the pillar of focus improvement. By adding a protection system to prevent machine breakdown, because of the most of the problems are found that the protection system malfunctions. This is the most problem in the 4th. And then used engineering knowledge to improve water production and the success factor are required a human resources of all parties to cooperate, brainstorm and analyze the causes of various losses in order to eliminate them.

Keywords : Overall Equipment Effectiveness; Computer Maintenance Management System; Mean Time Between Failure; Mean Time To Repair; Total Productive Maintenance

* Corresponding Author. Tel.: +66 8451 5356, E-mail Address: sirawit78956@gmail.com

1. บทนำ

โรงงานผลิตน้ำกรณศึกษาเป็นโรงงานผลิตน้ำขนาดใหญ่ ที่มีกำลังการผลิตน้ำประปาสูงสุดวันละ 1,600,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีหน้าที่ในการจัดหาและผลิตน้ำประปาที่มีคุณภาพให้กับภาคอุตสาหกรรมและประชาชน ตามมาตรฐานองค์การอนามัยโลก (World Health Organization: WHO) แต่ในปัจจุบันการผลิตน้ำประปา พบปัญหาเกี่ยวกับเสถียรภาพของกระบวนการผลิตน้ำประปา เนื่องจากกระบวนการผลิตมีความหลากหลายของยี่ห้อของเครื่องจักร ซึ่งระบบการกรองน้ำ เป็นกระบวนการหลักหนึ่งในกระบวนการผลิตน้ำประปา ที่เกิดปัญหาความเสียหายของเครื่องจักรบ่อยครั้ง โดยเครื่องจักรหลักที่พบปัญหาความเสียหายที่ใช้ในระบบการกรองน้ำ คือ หัวขับไฟฟ้า และชุดเกียร์ขับ โรงงานผลิตน้ำกรณศึกษามุ่งเน้นที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักรของระบบการกรองน้ำ ซึ่งในการปรับปรุงจำเป็นต้องทราบถึงความสูญเสียของเครื่องจักร ที่ส่งผลทำให้ค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักรลดลง ซึ่งนิยามความสูญเสียใหญ่ 6 ประการ (Six Big Losses) ของเครื่องจักร ได้รับการยอมรับและนำไปใช้อย่างแพร่หลายในงานบำรุงรักษาเครื่องจักรเพื่อหาสาเหตุความสูญเสียและกำจัดความสูญเสียนั้น ๆ คำจำกัดความสูญเสีย 6 ประการ [1] ที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรม ดังนี้

1. การสูญเสียเวลาจากความเสียหายของเครื่องจักร (Failure/Breakdown Losses) เกิดจากเครื่องจักรเสียหาย โดยไม่ได้วางแผนล่วงหน้า

2. การสูญเสียเวลาการตั้งค่า หรือการปรับแต่ง (Set-up/Adjustment Time Losses) เกิดจากการหยุดทำงานเนื่องจากการผลิตของหนึ่งรายการสิ้นสุดลง และเครื่องจักรถูกปรับตั้งค่าเพื่อตอบสนองความต้องการการผลิตของรายการอื่น ๆ

3. การสูญเสียเวลาที่ไม่ทำงานและการสูญเสียเวลาหยุดเล็กน้อย (Idling and Minor Stop Losses)

เกิดจากการผลิตถูกขัดจังหวะ จากสาเหตุของความผิดปกติชั่วคราว หรือเมื่อเครื่องหยุดทำงานเล็กน้อย

4. การสูญเสียเวลาจากการลดความเร็ว (Reduced Speed Losses) เกิดจากความเร็วที่ใช้ในการผลิตจริง ต่ำกว่าความเร็วมาตรฐาน / ความเร็วที่กำหนด

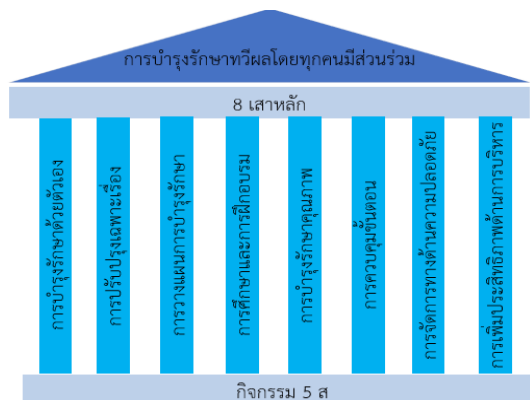
5. การสูญเสียเวลาจากช่วงเริ่มต้นผลิต (Startup Losses) เกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นผลิต ในช่วงเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ใหม่, ช่วงเริ่มต้นผลิตหลังจากหยุดกะ, ช่วงเริ่มต้นผลิตหลังจากหยุดซ่อมแซม

6. การสูญเสียเวลาจากการผลิตของเสีย และการแก้ไข (Defects and Rework Losses) เกิดจากผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ ไม่สามารถแก้ไข / ซ่อมแซมได้ หรือผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ไม่เป็นไปตามข้อกำหนด แต่สามารถแก้ไข / ปรับแต่งเพื่อให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ตรงตามมาตรฐานได้ แต่ต้องเสียเวลาในการแก้ไข / ปรับแต่ง

การบำรุงรักษาวิผลโดยทุกคนมีส่วนร่วม มีต้นกำเนิดในประเทศญี่ปุ่น เป็นวิธีการปรับปรุงเครื่องจักรตลอดไปจนถึงการจัดการทรัพยากรในกระบวนการผลิตให้เกิดความน่าเชื่อถือ มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยการมีส่วนร่วมของพนักงานในบริษัท การประยุกต์ใช้งานการบำรุงรักษาวิผลโดยทุกคนมีส่วนร่วม ปัจจัยที่สำคัญที่นำไปสู่ความสำเร็จนั้นต้องอาศัยความร่วมมือของพนักงานและการสนับสนุนของผู้บริหารระดับสูง [2] ซึ่งการบำรุงรักษาวิผลโดยทุกคนมีส่วนร่วม ประกอบด้วยกลยุทธ์แปดเสาหลัก ดังแสดงในรูปที่ 1 กลยุทธ์แปดเสาหลัก ได้รับการยอมรับในการนำมาใช้จัดการปัญหาที่เกิดขึ้นของเครื่องจักรและอุปกรณ์ สามารถลดอัตราความเสียหาย, เวลาการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน, เวลาซ่อม และการสูญเสียน้ำ ในกระบวนการผลิตน้ำของโรงงานผลิตน้ำ [1]

ปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์มาใช้งานกับกระบวนการผลิต และการบำรุงรักษาเครื่องจักรมากขึ้น เพื่อเก็บข้อมูลด้านต่าง ๆ และนำ

ข้อมูลนั้น ๆ มาวิเคราะห์ เพื่อใช้หาแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักร ระบบการจัดการงานบำรุงรักษาด้วยคอมพิวเตอร์ เป็นเครื่องมือในการสนับสนุนกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับด้านงานบำรุงรักษาเครื่องจักร และช่วยสำหรับการตัดสินใจในการบำรุงรักษา โดยอาศัยข้อมูล เพื่อค้นหาความเสียหายที่เกิดขึ้นของเครื่องจักร และนำไปปรับปรุงต่อไป [3] ซึ่งจำเป็นต้องมีการเก็บข้อมูลพื้นฐานต่าง ๆ ที่เพียงพอเพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการปรับปรุงและตัดสินใจ [4]



รูปที่ 1 กลยุทธ์แปดเสาหลักของการบำรุงรักษาที่วิเศษ โดยทุกคนมีส่วนร่วม [2]

การวัดค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักร ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง และมีการประยุกต์ใช้งานในหลาย ๆ อุตสาหกรรม [5]-[8] ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักร ประกอบด้วย 3 ตัวแปร คือ 1.ความพร้อมในการใช้งาน, 2.อัตราสมรรถนะ และ 3.อัตราคุณภาพ [5]-[6] ดังสมการที่ (1) - (4)

$$OEE = A \times P \times Q \quad (1)$$

โดยที่

OEE คือ ประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักร (%)

A คือ ความพร้อมในการใช้งาน (%)

P คือ อัตราสมรรถนะ (%)

Q คือ อัตราคุณภาพ (%)

$$A = \frac{\text{เวลาให้บริการงาน} - \text{เวลาสูญเสียเครื่องจักร}}{\text{เวลาให้บริการงาน}} \quad (2)$$

$$P = \frac{\text{รอบเวลาทางทฤษฎี} \times \text{จำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้}}{\text{เวลาเดินเครื่อง}} \quad (3)$$

$$Q = \frac{\text{ปริมาณผลผลิตที่ได้} - \text{ปริมาณของเสีย}}{\text{ปริมาณผลผลิตที่ได้}} \quad (4)$$

นอกจากนี้ ความพร้อมในการใช้งาน สามารถคำนวณจากเวลาเฉลี่ยก่อนการเสียหาย และเวลาเฉลี่ยในการซ่อม [5] ดังสมการที่ (5)

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100 \quad (5)$$

โดยที่

$MTBF$ คือ ระยะเวลาเฉลี่ยก่อนการเสียหายของเครื่องจักรแต่ละครั้ง (นาท)

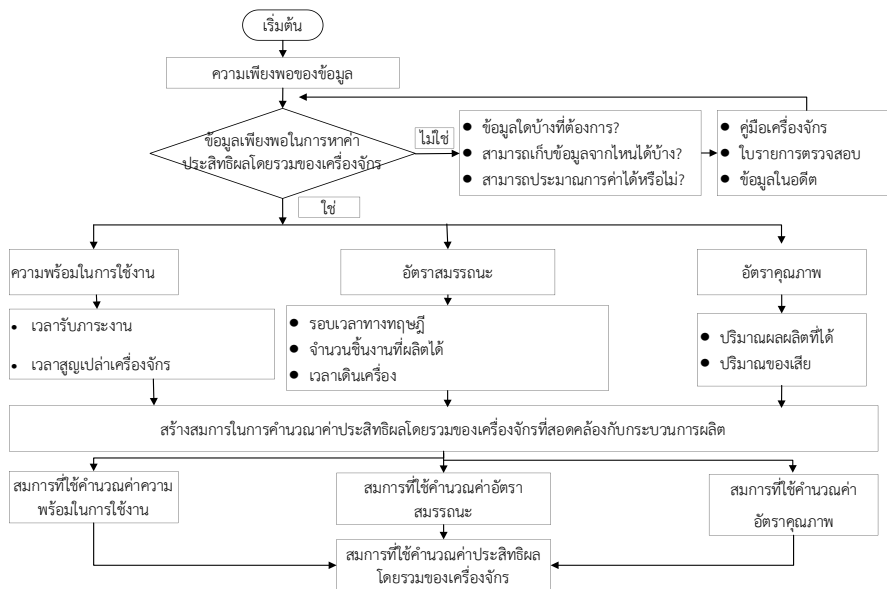
$MTTR$ คือ ระยะเวลาเฉลี่ยตั้งแต่เครื่องจักรเสียหายจนใช้งานได้ในแต่ละครั้ง (นาท)

ในแต่ละภาคอุตสาหกรรม ค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักร จะมีค่าแตกต่างกันของแต่ละอุตสาหกรรม [1], [2], [5]-[9] ขึ้นอยู่กับลักษณะของกระบวนการผลิตของแต่ละอุตสาหกรรม แต่พบว่า การวัดค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักร การคำนวณของตัวแปร ด้านอัตราสมรรถนะ และด้านอัตราคุณภาพ ยังไม่สะท้อนกับการผลิตจริง [9] ดังนั้นการวัดค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักร ต้องอาศัยข้อมูลที่สะท้อนความเป็นจริง จากการเก็บข้อมูล การวิเคราะห์ และการแยกแยะความสูญเสียที่เกิดขึ้นจริง เพื่อใช้ในการปรับปรุงของกระบวนการผลิต

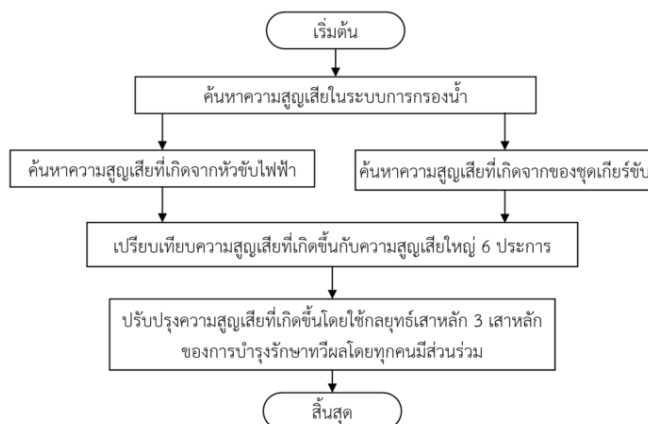
2. ระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษาวิจัยเป็นการศึกษาในระบบการกรองน้ำ เนื่องจากเกิดปัญหาความเสียหายบ่อยครั้ง ทำให้ระบบการกรองน้ำเป็นกระบวนการคอขวดของกระบวนการผลิตน้ำ โดยระบบการกรองน้ำมีหัวขับไฟฟ้า และชุดเกียร์ขับ เป็นเครื่องจักรหลัก การศึกษาวิจัยแบ่งเป็นขั้นตอน 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกเป็นการนำเสนอสมการและขั้นตอนในการวัดค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักรของระบบการกรองน้ำ โดยใช้ข้อมูลจากระบบการจัดการงานบำรุงรักษา

ด้วยคอมพิวเตอร์ มาวิเคราะห์ โดยใช้ข้อมูลทางด้านระยะเวลาเฉลี่ยก่อนการเสียหายของเครื่องจักรแต่ละครั้ง, ระยะเวลาเฉลี่ยตั้งแต่เครื่องจักรเสียหายจนใช้งานได้ในแต่ละครั้ง และข้อมูลการผลิตน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2 ขั้นตอนที่สอง เป็นการปรับปรุงค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักรในระบบการกรองน้ำ โดยการวิเคราะห์ความสูญเสียที่เกิดขึ้นของหัวขับไฟฟ้า และชุดเกียร์ขับ และใช้หลักการของการบำรุงรักษาทวิผลโดยทุกคนมีส่วนร่วม มาใช้ในการปรับปรุง ดังแสดงในรูปที่ 3



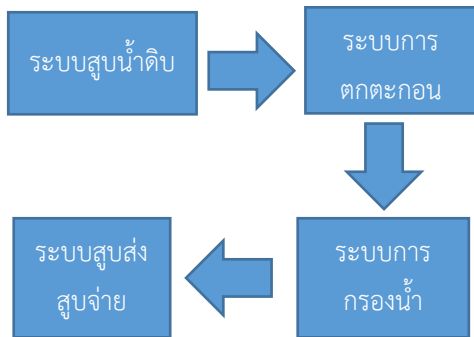
รูปที่ 2 กรอบแนวคิดการคำนวณค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักร



รูปที่ 3 กรอบแนวคิดของการวิเคราะห์ความสูญเสียที่เกิดขึ้น และการปรับปรุง

2.1 ขอบเขตในการณศึกษา

โรงงานผลิตน้ำกรณศึกษา มีกระบวนการผลิตน้ำแบ่งเป็น 4 สายการผลิตน้ำ แต่ละสายการผลิตประกอบด้วย 4 ระบบหลัก คือ 1. ระบบสูบน้ำดิบ, 2. ระบบการตกตะกอน, 3. ระบบการกรองน้ำ, 4. ระบบสูบส่ง สูบจ่าย ดังแสดงในรูปที่ 4 ระบบการกรองน้ำเกิดปัญหาความเสียหายของเครื่องจักรบ่อยครั้ง ทำให้เป็นกระบวนการคอขวดของกระบวนการผลิตน้ำ โดยมีหัวขับไฟฟ้า และชุดเกียร์ขับ เป็นเครื่องจักรหลักองค์ประกอบของบ่อกรองน้ำ และกำลังการผลิต ในแต่ละสายการผลิต ดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 4 กระบวนการผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำกรณศึกษา ของแต่ละสายการผลิต

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของบ่อกรองน้ำ และกำลังการผลิต ในแต่ละสายการผลิต

สายการผลิต	จำนวนบ่อกรอง (บ่อ)/ยี่ห้อเครื่องจักร	จำนวนหัวขับไฟฟ้า, ชุดเกียร์ขับ (ชุด)	กำลังการผลิตสูงสุด (ลบ.ม/วัน)
สายการผลิต น้ำที่ 1	8/(A)	40	400,000
สายการผลิต น้ำที่ 2	8/(B)	40	400,000
สายการผลิต น้ำที่ 3	14/(A)	70	400,000
สายการผลิต น้ำที่ 4	14/(C)	70	400,000

ในแต่ละบ่อกรองน้ำ ประกอบด้วยหัวขับไฟฟ้า และชุดเกียร์ขับ 5 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 5 และหน้าที่การทำงานของหัวขับไฟฟ้า และชุดเกียร์ขับ ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 5 องค์ประกอบของหัวขับไฟฟ้า และชุดเกียร์ขับของแต่ละบ่อกรองน้ำ [10]

ตารางที่ 2 หน้าที่การทำงานของหัวขับไฟฟ้า และชุดเกียร์ขับ

ชนิดหัวขับไฟฟ้า และชุดเกียร์ขับ	หน้าที่
หัวขับไฟฟ้า และชุดเกียร์ขับของวาล์วน้ำเข้า	ใช้เป็นทางเข้าของน้ำที่ผ่านระบบตกตะกอนแล้ว เข้าสู่แต่ละบ่อกรองน้ำ
หัวขับไฟฟ้า และชุดเกียร์ขับของวาล์วกรองน้ำ	ใช้เป็นทางออกของน้ำที่ผ่านการกรองแล้วของแต่ละบ่อกรองน้ำ
หัวขับไฟฟ้า และชุดเกียร์ขับของวาล์วน้ำล่าง	ใช้เป็นทางเข้าของน้ำเพื่อล้างบ่อกรองน้ำ โดยใช้ น้ำเป็นตัวล้างของแต่ละบ่อกรองน้ำ
หัวขับไฟฟ้า และชุดเกียร์ขับของวาล์วน้ำทิ้ง	เป็นทางออกของน้ำที่ล้างบ่อกรองน้ำ ของแต่ละบ่อกรองน้ำ
หัวขับไฟฟ้า และชุดเกียร์ขับของวาล์วลม	ใช้เป็นทางเข้าของลม เพื่อใช้ในการล้างบ่อกรอง โดยใช้ลมเป็นตัวล้าง ของแต่ละบ่อกรองน้ำ

2.2 การวัดประสิทธิผลโดยรวมของเครื่องจักร

จากสมการที่ (2) – (4) ในการคำนวณหาค่าประสิทธิผลโดยรวมของเครื่องจักรของระบบกรองน้ำสามารถสร้างตัวแปรของสมการ เพื่อคำนวณหาค่าความพร้อมในการใช้งาน, อัตราสมรรถนะ, อัตราคุณภาพ

และแหล่งของข้อมูลที่ใช้ 2 แหล่งข้อมูล คือ 1. ระบบซ่อมบำรุง เป็นข้อมูลด้านการบำรุงรักษาจากระบบการจัดการงานบำรุงรักษาด้วยคอมพิวเตอร์ และ 2. ระบบผลิต เป็นข้อมูลด้านการผลิตต่าง ๆ ในกระบวนการผลิต ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สมการเพื่อคำนวณของค่าความพร้อมในการใช้งาน, อัตราสมรรถนะ, อัตราคุณภาพ และแหล่งของข้อมูล

ตัวแปรจาก สมการ(2)-(4)	นิยามตัวแปรในการคำนวณ	ตัวแปร สมการ	แหล่งข้อมูล
ความพร้อมในการใช้งาน (Availability Rate: AR)			
เวลาสูญเสีย เครื่องจักร	เวลาบำรุงรักษาตามแผน (Maintenance Planning Time)	t_{pmpt}	ระบบซ่อมบำรุง
	-เวลาบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (PM Time)	t_{pmt}	
	-เวลาการตั้งค่า (Setting Time)	t_{st}	
	เวลาเสียที่ไม่ได้วางแผน (Unplan Down Time) /	t_{udt} /	
	เวลาเฉลี่ยในการซ่อม (Mean Time To Repair)	$MTTR$	
	-เวลาเสียถึงการปิดเพื่อซ่อม (Lead Time to Repair Time)	t_{lrt}	
	-เวลาซ่อม (Repair Time)	t_{rt}	
	-เวลาการตั้งค่า (Setting Time)	t_{st}	
	เวลาใช้งานสุทธิ (Net Operating Time)/	t_{net} /	
	เวลาเฉลี่ยก่อนการเสียหาย (Mean Time Between Failure)	$MTBF$	
	เวลาในการล้างบ่อกรองน้ำ (Operational Washing Time)	t_{opt}	ระบบผลิต
เวลารับ ภาระงาน	เวลาในการนำเครื่องจักรใช้งาน (Loading Time)	t_{lt}	ระบบซ่อมบำรุง + ระบบผลิต
อัตราสมรรถนะ (Performance Rate: PR)			
รอบเวลา ทางทฤษฎี	รอบการกรองน้ำตามผู้ออกแบบ (Filtration Design Time)	F_{dt}	ระบบผลิต
	เวลาทั้งหมดที่ต้องการผลิตที่ผู้ออกแบบ (Filtration Design Total Time)	t_{fdt}	ระบบผลิต
	ปริมาณน้ำเข้าตามผู้ออกแบบ (Quantity of Inlet Water Design)	Q_{dw}	ระบบผลิต
จำนวนชิ้นงาน ที่ผลิตได้	ปริมาณน้ำที่กรองได้ (Quantity of Filtration Water)	Q_{out}	ระบบผลิต
	ความเร็วของน้ำเข้าบ่อกรองน้ำ (Velocity of Inlet Water)	V_{pr}	
เวลาเดินเครื่อง	เวลาใช้งานสุทธิ (Net Operating Time)	t_{net}	ระบบซ่อมบำรุง
อัตราคุณภาพ (Quality Rate: QR)			
ปริมาณของเสีย	ปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต (Defect Quantity of Production)	Q_{prls}	ระบบผลิต
ปริมาณผลผลิตที่ได้	ปริมาณน้ำที่กรองได้ (Quantity of Filtration Water)	Q_{out}	ระบบผลิต

จากตารางที่ 3 การนิยามตัวแปรการคำนวณค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักรของระบบการกรองน้ำ พิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

- ความพร้อมในการใช้งาน

จากสมการที่ (2) การวัดความพร้อมในการใช้งาน โดยพิจารณาจากความพร้อมของหัวขับไฟฟ้า และชุดเกียร์ขับ เนื่องจากเป็นเครื่องจักรหลักในการควบคุมวาล์ว เพื่อควบคุมการทำงานบ่อกรองน้ำให้ทำงานตามฟังก์ชันของการกรองน้ำ สามารถแบ่งช่วงเวลาการใช้งานของบ่อกรองน้ำแต่ละบ่อ ในระบบการกรองน้ำ มีตัวแปร คือ 1. เวลาสูญเสียเครื่องจักร เป็นช่วงเวลาที่ไม่ได้ใช้งานในการกรองน้ำของบ่อกรองน้ำ ในระบบกรองน้ำ ประกอบด้วย เวลาบำรุงรักษาตามแผน เป็นช่วงเวลาหยุดบ่อกรองน้ำ ในระบบกรองน้ำ เพื่อทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (PM) ประกอบด้วย เวลาบำรุงรักษาเชิงป้องกัน ตามแผนงานที่กำหนดไว้ และช่วงเวลาการตั้งค่าของหัวขับไฟฟ้า เพื่อให้ตำแหน่งวาล์วตรงกับความเป็นจริง ก่อนการใช้งาน และเวลาในการล้างบ่อกรองน้ำ เป็นช่วงเวลาของการล้างบ่อกรองน้ำตามมาตรฐาน 2. เวลาบริการงาน เป็นช่วงเวลาที่ใช้งานในการกรองน้ำของบ่อกรองน้ำ ในระบบกรองน้ำ โดยใช้หัวขับไฟฟ้าและชุดเกียร์ขับ ทำหน้าที่ควบคุมวาล์วต่าง ๆ เพื่อให้บ่อกรองน้ำทำงานได้ตามฟังก์ชัน ประกอบด้วย เวลาเสียที่ไม่ได้วางแผน/ เวลาเฉลี่ยในการซ่อม เป็นช่วงเวลาที่ย่อกรองน้ำ ในระบบกรองน้ำไม่สามารถกรองน้ำได้ เนื่องจากเครื่องจักรหลัก ซึ่งประกอบด้วยหัวขับไฟฟ้า และชุดเกียร์ขับเสียหาย ทำให้ไม่สามารถเปิด-ปิด วาล์ว เพื่อควบคุมการทำงานของบ่อกรองน้ำได้ ทำให้ต้องหยุดการผลิตของบ่อกรองน้ำนั้น ๆ ประกอบด้วย เวลาเสียถึงการปิดเพื่อซ่อม เป็นช่วงเวลาของเครื่องจักรหลัก ซึ่งประกอบด้วยหัวขับไฟฟ้า และชุดเกียร์ขับ เสียจนถึงเวลาการปิดบ่อกรองน้ำเพื่อซ่อมบำรุงเวลาซ่อม เป็นช่วงเวลาของการซ่อมแซม และ ช่วงเวลาการตั้งค่าของหัวขับไฟฟ้า เพื่อให้ตำแหน่งวาล์วตรงกับ

ความเป็นจริง และ เวลาใช้งานสุทธิ/ เวลาเฉลี่ยก่อนการเสียหาย เป็นช่วงเวลาที่ใช้งานหัวขับไฟฟ้า และชุดเกียร์ขับ ในการเปิด-ปิด วาล์วต่าง ๆ เพื่อให้บ่อกรองน้ำ ในระบบการกรองน้ำทำงานตามฟังก์ชันการใช้งาน เพื่อกรองน้ำได้ตามปกติและมาตรฐาน

- อัตราสมรรถนะ

จากสมการที่ (3) เป็นการวัดอัตราสมรรถนะของแต่ละบ่อกรองน้ำ ของระบบการกรองน้ำ การวัดอัตราสมรรถนะ มีตัวแปร คือ 1. รอบทางทฤษฎี เป็นรอบเวลาของการออกแบบในการกรองน้ำ ซึ่งการกรองน้ำของแต่ละบ่อกรองน้ำ มีการควบคุมความเร็วของน้ำให้มีความสัมพันธ์กันของวาล์วต่าง ๆ ในบ่อกรองน้ำนั้น ๆ ซึ่งกำลังการผลิตสูงสุดตามที่ออกแบบไว้ ของแต่ละสายผลิต 400,000 ลบ.ม./วัน 2. จำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ เป็นปริมาณน้ำที่กรองได้แต่ละบ่อกรองน้ำ ของระบบการกรองน้ำ แต่ละสายการผลิต ซึ่งปริมาณน้ำที่กรองได้มีความสัมพันธ์กับความเร็วของน้ำที่เข้าในแต่ละบ่อกรองน้ำ โดยใช้หัวขับไฟฟ้า และชุดเกียร์ขับ เป็นตัวควบคุมวาล์ว ในการกำหนดความเร็วดังกล่าว และต้องอาศัยการทำงานที่สัมพันธ์ตามลำดับหน้าที่ของ หัวขับไฟฟ้า และชุดเกียร์ขับทั้งหมด 3. เวลาเดินเครื่อง เป็นช่วงเวลาที่บ่อกรองน้ำใช้ในการกรองน้ำจริงได้ตามฟังก์ชันการทำงาน เป็น เวลาใช้งานสุทธิ/ เวลาเฉลี่ยก่อนการเสียหาย ในการกรองน้ำของแต่ละบ่อกรองน้ำ โดยใช้หัวขับไฟฟ้า และชุดเกียร์ขับ ในการเปิด-ปิด วาล์วต่าง ๆ

- อัตราคุณภาพ

จากสมการที่ (4) เป็นการวัดคุณภาพของน้ำแต่ละบ่อกรองน้ำ ของระบบการกรองน้ำ ปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น คือ ปริมาณน้ำที่ผ่านการกรองแล้วไม่ได้คุณภาพ ซึ่งอาจเกิดจากความเสียหายของหัวกรองน้ำ จากการทำงานผิดพลาดของระบบลมหรือระบบน้ำล้างของบ่อกรองน้ำ ซึ่งปัจจุบันจะไม่พบประเด็นดังกล่าว เนื่องจากมีระบบป้องกันการผิดพลาดของเครื่องจักร

2.2.1 ความพร้อมในการใช้งาน (AR)

จากตารางที่ 3 ความพร้อมในการใช้งาน ของแต่ละบ่อกรองน้ำ สามารถแบ่งช่วงเวลาหนึ่งปีของการใช้งานบ่อกรองน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 6 สามารถสร้างสมการในการคำนวณ ดังแสดงในสมการ (6) - (11)

$$MTTR = \sum_{i=1}^j t_{lrt,i} + (t_{rt,i} + t_{st,i}) \quad (6)$$

$$t_{lt} = 525,600 - (t_{pmpt} + t_{opt}) \quad (7)$$

$$t_{pmpt} = \sum_{i=1}^j (t_{pmt,i} + t_{st,i}) \quad (8)$$

$$t_{opt} = \sum_{i=1}^j t_{opt,i} \quad (9)$$

$$MTBF = t_{lt} - MTTR \quad (10)$$

$$AR = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100 \quad (11)$$

โดยที่ i, j = บ่อกรองน้ำบ่อแรกถึงสุดท้าย ของแต่ละสายการผลิต

2.2.2 อัตราสมรรถนะ (PR)

จากตารางที่ 3 สามารถสร้างสมการในการคำนวณ ดังแสดงในสมการ (12) - (14)

$$F_{dt} = \frac{t_{fdt}}{Q_{dw}} \quad (12)$$

$$Q_{out} = \sum_{i=1}^j V_{pr,i} \times t_{net,i} \quad (13)$$

$$PR = \frac{F_{dt} \times Q_{out}}{t_{net}} \times 100 \quad (14)$$

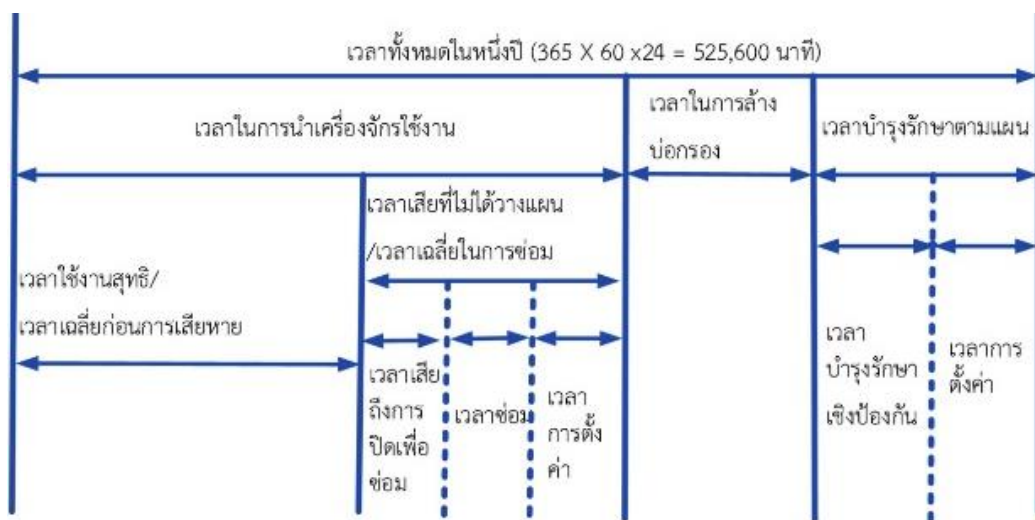
โดยที่ i, j = บ่อกรองน้ำบ่อแรกถึงสุดท้าย ของแต่ละสายการผลิต

2.2.3 อัตราคุณภาพ (QR)

จากตารางที่ 3 สามารถสร้างสมการในการคำนวณ ดังแสดงในสมการ (15)

$$QR = \sum_{i=1}^j \frac{Q_{out,i} - Q_{prls,i}}{Q_{out,i}} \times 100 \quad (15)$$

โดยที่ i, j = บ่อกรองน้ำบ่อแรกถึงสุดท้าย ของแต่ละสายการผลิต



รูปที่ 6 ช่วงเวลาหนึ่งปีของการใช้งานบ่อกรองน้ำ

2.2.4 ค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักร

จากสมการที่ (1) สามารถนำมาใช้ในการคำนวณค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักรของระบบการกรองน้ำ แต่ละสายการผลิต ดังแสดงในสมการ (16)

$$OEE = AR \times PR \times QR \quad (16)$$

โดยที่

OEE คือ ประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักร (%)

AR คือ ความพร้อมในการใช้งาน (%)

PR คือ อัตราสมรรถนะ (%)

QR คือ อัตราคุณภาพ (%)

2.2.5 กำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้น (Quantity of

Increasing Filtration Water: Q_{inc})

จากตารางที่ 4 กำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้น โดยเปรียบเทียบกำลังการผลิตของบ่อกรองน้ำ ก่อนและหลังการปรับปรุง ของแต่ละสายการผลิตน้ำ ดังแสดงในสมการ (17)

$$Q_{inc} = \sum_{i=1}^j Q_{out,i,after} - Q_{out,i,before} \quad (17)$$

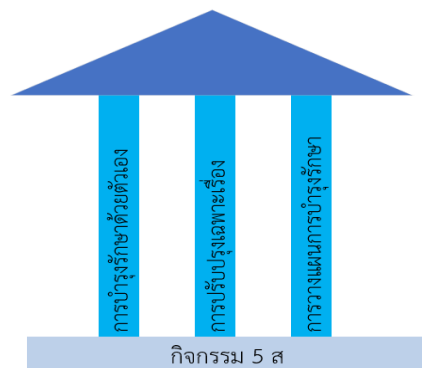
โดยที่

Q_{inc} คือ กำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้นในแต่ละสายการผลิต (ลบ.ม./ปี)

i, j คือ บ่อกรองน้ำบ่อแรกถึงบ่อสุดท้ายของแต่ละสายการผลิต

2.3 การวิเคราะห์ความสูญเสีย และการปรับปรุงค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักรของระบบกรองน้ำ

ในการวิเคราะห์ความสูญเสีย โดยการนำข้อมูลความเสียหายที่เกิดขึ้น เปรียบเทียบกับความสูญเสียใหญ่ 6 ประการ และการปรับปรุง โดยการประยุกต์ใช้กลยุทธ์ของเสาหลักแปดประการของการบำรุงรักษาวิเศษ โดยทุกคนมีส่วนร่วม ซึ่งงานวิจัยนี้มุ่งเน้นใช้ 3 เสาหลัก คือ 1. เสาหลักการบำรุงรักษาด้วยตนเอง 2. เสาหลักการปรับปรุงเฉพาะเรื่อง และ 3. เสาหลักการวางแผนการบำรุงรักษา ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยรายละเอียดความสัมพันธ์ของความสูญเสียกับตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ ดังแสดงในตารางที่ 5 ความสัมพันธ์ของการปรับปรุงกับความสูญเสีย ดังแสดงในตารางที่ 6



รูปที่ 7 เสาหลัก 3 เสาหลักในการปรับปรุงประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักรของระบบการกรองน้ำ

ตารางที่ 4 การสร้างสมการในการหากำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้น ของระบบการกรองน้ำ

ขั้นตอน	นิยามตัวแปรของสมการ	ตัวแปรสมการ	แหล่งข้อมูล	ช่วงเวลาเก็บข้อมูล
ก่อนการปรับปรุง	กำลังการผลิตของบ่อกรองน้ำ ก่อนการปรับปรุง (Quantity of Filtration Water Before Improvement)	$Q_{out,i,before}$	ระบบผลิต	1 ปี
หลังการปรับปรุง	กำลังการผลิตของบ่อกรองน้ำ หลังการปรับปรุง (Quantity of Filtration Water After Improvement)	$Q_{out,i,after}$	ระบบผลิต	1 ปี
สรุป	กำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้นในแต่ละสายการผลิต (Quantity of Increasing Filtration Water)	Q_{inc}	ระบบผลิต	1 ปี

ตารางที่ 5 ความสัมพันธ์ของความสูญเสียกับตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ

ความสูญเสียที่เกิดขึ้น	ความสัมพันธ์ตัวแปร	รายละเอียดคำอธิบาย
(1) การสูญเสียเวลาจากความเสียหายของเครื่องจักร		
มอเตอร์ของหัวขับไฟฟ้าใหม่ หรือชุดเกียร์ขับเคลื่อน	$t_{udt} \subset [AR]^*$	ความเสียหายของเครื่องจักรเป็นช่วงเวลาเสียที่ไม่ได้วางแผนไว้ $[AR]$ ทำให้ไม่สามารถใช้งานบ่อกรองน้ำ ในระบบกรองน้ำได้ตามปกติ
(2) การสูญเสียเวลาการตั้งค่า หรือการปรับแต่ง		
เปอร์เซ็นต์ การทำงานของ หัวขับไฟฟ้า ไม่สอดคล้องกับ กระบวนการผลิตจริง	$t_{udt} \subset [AR]$ $V_{pr} \subset [PR]$	เปอร์เซ็นต์ที่ไม่สอดคล้องผิดพลาดเป็นช่วงเวลาเสียที่ไม่ได้วางแผนไว้ การควบคุมเปอร์เซ็นต์โดย Battery Back Up ซึ่งถ้าไฟฟ้าที่จ่ายไม่เสถียร ทำให้ ตำแหน่งเปอร์เซ็นต์เกิดการผิดพลาดที่ตัวอุปกรณ์ $[AR]$ และส่งผลต่อ ความเร็วของน้ำบ่อกรองน้ำบ่อนั้น ๆ $[PR]$
(3) การสูญเสียเวลาที่ไมทำงาน และการสูญเสียเวลาหยุดเล็กน้อย		
ระบบอัตโนมัติ ไม่ส่งคำสั่งไป ยังหัวขับไฟฟ้าให้ทำงานตาม กำลังการผลิตจริง	$t_{udt} \subset [AR]$ $V_{pr} \subset [PR]$	การทำงานของเครื่องจักร ในแต่ละบ่อกรองน้ำ จะเป็นการทำงานร่วมกัน ของ 5 หัวขับไฟฟ้าและชุดเกียร์ขับเคลื่อน สถานะของแต่ละเครื่องจักร จะถูกส่ง สัญญาณไปยังระบบอัตโนมัติ เมื่อเกิดการผิดพลาด ทำให้การทำงานไม่ สอดคล้องกับกระบวนการผลิต $[AR]$ และส่งผลต่อความเร็วของน้ำบ่อ กรองน้ำบ่อนั้น ๆ $[PR]$
(4) การสูญเสียเวลาจากการลดความเร็ว		
เปอร์เซ็นต์ การทำงานของ หัวขับไฟฟ้า น้อยกว่าความ ต้องการของกระบวนการ ผลิตจริง	$t_{udt} \subset [AR]$ $V_{pr} \subset [PR]$	เปอร์เซ็นต์ของหัวขับไฟฟ้าน้อยกว่ากระบวนการผลิตจริง เนื่องจากชุด ฟันเพื่องบอกตำแหน่งเพื่อแสดงตำแหน่ง เกิดการทำงานผิดพลาด $[AR]$ ไม่สอดคล้องกับกระบวนการผลิตจริง และส่งผลต่อความเร็วของ น้ำบ่อกรองน้ำบ่อนั้น ๆ $[PR]$
(5) การสูญเสียเวลาจากช่วงเริ่มต้นผลิต		
ปริมาณน้ำที่ค้างในบ่อกรอง น้ำ ที่เกิดการเสียหายของ เครื่องจักร	$t_{udt} \subset [AR]$	กรณีที่มีปริมาณน้ำที่ค้างในบ่อกรองน้ำ ก่อนเริ่มต้นการผลิตต้องมีการล้าง บ่อกรองน้ำก่อน ซึ่งเวลาดังกล่าวส่งผลให้ค่า MTBF มีค่าลดลง $[AR]$ เนื่องจากบ่อกรองน้ำไม่สามารถใช้งานในการกรองน้ำได้ทันที
(6) การสูญเสียเวลาจากการผลิตของเสียและการแก้ไข		
ปริมาณน้ำเสีย เนื่องจาก ไม่ สามารถกรองน้ำตาม มาตรฐาน	$Q_{prls} \subset [QR]$	เป็นปริมาณน้ำกรองไม่ได้คุณภาพจากการผลิต ซึ่งอาจเกิดจากการเสียหาย ของหัวกรองน้ำ จากการทำงานผิดพลาดของระบบลมหรือระบบน้ำล้าง และอาจเกิดจากการหลุดตัวของโครงสร้างบ่อกรองน้ำ ทำให้หัวกรองน้ำเกิด เสียหาย $[Q_{prls}]$ ซึ่งปริมาณน้ำที่กรองน้ำได้ไม่มีคุณภาพ และ จำเป็นต้องกำจัดทิ้ง

$t_{udt} \subset [AR]^*$ คือ ตัวแปร t_{udt} อยู่ในสมการ AR

ในปรับปรุง โดยใช้หลักการการบำรุงรักษาวิผล โดยทุกคนมีส่วนร่วม จากรูปที่ 7 โดยอาศัยการระดมสมอง (Brain Storming) เพื่อวิเคราะห์ปัญหา และหาแนวทางในการแก้ไขปรับปรุง โดยความร่วมมือตั้งแต่ระดับผู้บริหารที่ต้องให้การสนับสนุน จนถึงระดับพนักงานปฏิบัติการที่ต้องปฏิบัติตามตามแนวทางขั้นตอนที่กำหนด ของฝ่ายผลิต, ฝ่ายซ่อมบำรุงรักษาไฟฟ้า, ฝ่ายระบบอัตโนมัติ สามารถแบ่งปัญหาความสูญเสียของระบบการกรองน้ำได้เป็น 2 ประเภท คือ

(1) ปัญหาเล็กน้อย (Minor Problem) เป็นปัญหาของความสูญเสีย ที่สามารถแก้ไขปัญหาโดยการ

ปรับเปลี่ยนกระบวนการทำงาน เช่น เพอร์เซ็นต์การทำงานของหัวขับไฟฟ้า ไม่สอดคล้องกับกำลังการผลิต, การหยุดการผลิตของบ่อกรองน้ำ เพื่อทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน

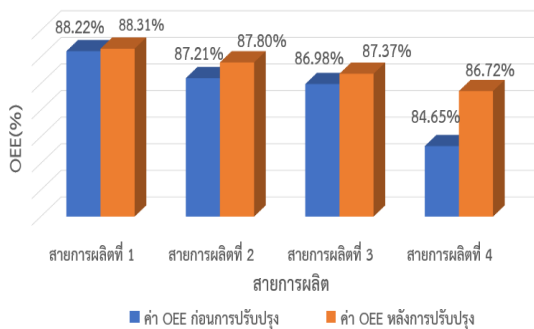
(2) ปัญหาหลัก (Major Problem) เป็นปัญหาของความสูญเสีย ที่ต้องอาศัยความรู้เฉพาะด้านเชิงวิศวกรรม ในการแก้ไข ซึ่งระบบการผลิตน้ำ ถูกเชื่อมโยงและควบคุมการผลิต โดยระบบอัตโนมัติ เช่น ปัญหามอเตอร์หัวขับไฟฟ้าไหม้หรือชุดเกียร์ขับแตก เนื่องจากเซ็นเซอร์แรงบิด (Torque Sensor) ของหัวขับไฟฟ้าทำงานผิดพลาด ทำให้ต้องหยุดการผลิตของบ่อกรองน้ำ

ตารางที่ 6 ความสัมพันธ์ของการปรับปรุงกับความสูญเสีย และรูปแบบปัญหา

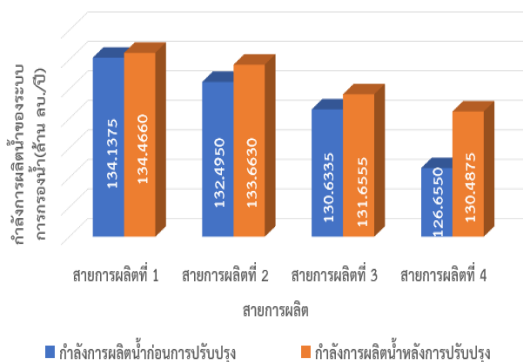
รายละเอียดการปรับปรุงเสาหลัก	ความสูญเสียใหญ่ 6 ประการ	รูปแบบปัญหา และ ทีมงานที่มีส่วนร่วม
<u>การบำรุงรักษาด้วยตัวเอง</u> <u>รูปแบบเดิม</u> : เพอร์เซ็นต์การทำงานของหัวขับไฟฟ้า ไม่สอดคล้องกับกำลังการผลิตจริง การแก้ไข โดยการแจ้งซ่อมให้พนักงานบำรุงรักษาเข้าไปปรับตั้งค่า <u>รูปแบบการปรับปรุง ใหม่</u> : พนักงานควบคุมการผลิตปรับตั้งค่าเพอร์เซ็นต์เอง	(2) การสูญเสียเวลาการตั้งค่าหรือการปรับแต่ง (4) การสูญเสียเวลาจากการลดความเร็ว	- ปัญหาเล็กน้อย - ผู้บริหาร ฝ่ายผลิต, ฝ่ายบำรุงรักษาไฟฟ้า -พนักงานฝ่ายผลิต, ฝ่ายบำรุงรักษาไฟฟ้า
<u>การปรับปรุงเฉพาะจุด</u> <u>รูปแบบเดิม</u> : ค่าลิมิตของแรงบิดในหัวขับไฟฟ้าเป็นขั้นตอนแรกของการป้องกันความเสียหาย จะตัดการทำงาน เมื่อเกิดแรงบิดที่ผิดปกติ เพื่อป้องกันความเสียหาย ซึ่งบางกรณีพบว่ามอเตอร์หัวขับไฟฟ้าไหม้หรือชุดเกียร์ขับแตก จากการทำงานผิดพลาด (Error) ของลิมิตของแรงบิด <u>รูปแบบการปรับปรุง ใหม่</u> : เพิ่มเดิมการป้องกันเป็น 2 ขั้นตอน (Double Protection) โดยใช้โปรแกรมในระบบควบคุมอัตโนมัติ ในการควบคุมเวลาทำงานของหัวขับไฟฟ้า เมื่อเวลาการทำงานที่นานผิดปกติ จะตัดการทำงาน เพื่อป้องกันความเสียหายในขั้นตอนที่สอง ต่อจากค่าลิมิตของแรงบิดในหัวขับไฟฟ้า	(1) การสูญเสียเวลาจากความเสียหายของเครื่องจักร (6) การสูญเสียเวลาจากการผลิตของเสียและการแก้ไข	- ปัญหาหลัก - ผู้บริหาร ฝ่ายบำรุงรักษาไฟฟ้า, ฝ่ายระบบอัตโนมัติ -พนักงาน ฝ่ายบำรุงรักษาไฟฟ้า, ฝ่ายระบบอัตโนมัติ
<u>การวางแผนการบำรุงรักษา</u> <u>รูปแบบเดิม</u> : การบำรุงรักษาเชิงป้องกันของหัวขับไฟฟ้าและชุดเกียร์ขับ ตามระยะเวลาที่กำหนดคงที่ <u>รูปแบบการปรับปรุง ใหม่</u> : ปรับระยะเวลาการบำรุงรักษาเชิงป้องกันให้สอดคล้องกับระยะเวลาเฉลี่ยก่อนการเสียหายของหัวขับไฟฟ้า หรือชุดเกียร์ขับ ในแต่ละบ่อกรองน้ำ	(3) การสูญเสียเวลาที่ไม่ทำงานและการสูญเสียเวลาหยุดเล็กน้อย (5) การสูญเสียเวลาจากช่วงเริ่มต้นผลิต	- ปัญหาเล็กน้อย - ผู้บริหาร ฝ่ายผลิต, ฝ่ายบำรุงรักษาไฟฟ้า -พนักงานฝ่ายผลิต, ฝ่ายบำรุงรักษาไฟฟ้า

3. ขั้นตอนการวัดค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักรและผลลัพธ์

ขั้นตอนในการหาค่าความพร้อมในการใช้งาน, อัตราสมรรถนะ, อัตราคุณภาพ, ค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักรของระบบการกรองน้ำ และกำลังการผลิตน้ำ ก่อนและหลังการปรับปรุง ดังแสดงในตารางที่ 7 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักรของระบบการกรองน้ำ ก่อนและหลังจากการปรับปรุง ดังแสดงในรูปที่ 8 และกำลังการผลิตน้ำ ก่อนและหลังการปรับปรุง ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 8 ค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักรระบบการกรองน้ำ ก่อนและหลังการปรับปรุง (%)



รูปที่ 9 กำลังการผลิตน้ำ ก่อนและหลังการปรับปรุง (ลิตร/ชม.)

4. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอ สมการและขั้นตอน ในการวัดค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักรของระบบการกรองน้ำ ในการปรับปรุงค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักรของระบบการกรองน้ำ ซึ่งความเชื่อถือได้ของเครื่องจักรในแต่ละสายการผลิตมีความแตกต่างกันจากแต่ละยี่ห้อของเครื่องจักรที่ใช้งาน โดยการวิเคราะห์ความสูญเสียที่เกิดขึ้น สามารถแบ่งปัญหาของความสูญเสีย ในการปรับปรุงได้เป็น 2 ลักษณะ คือ ปัญหาที่สามารถแก้ไข โดยการปรับเปลี่ยนกระบวนการทำงาน ใช้เสาหลักการบำรุงรักษาด้วยตนเอง กับ เสาหลักการวางแผนการบำรุงรักษา และปัญหาที่ต้องอาศัยความรู้เฉพาะด้านเชิงวิศวกรรม ใช้เสาหลักการปรับปรุงเฉพาะจุด ผลการวิจัยพบว่า ค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักรของระบบการกรองน้ำ เพิ่มขึ้น คิดเป็น 0.11%, 0.68%, 0.44% และ 2.44% ตามลำดับของแต่ละสายการผลิต และกำลังการผลิตน้ำที่เพิ่มขึ้นคิดเป็น 328,500 ลูกบาศก์เมตรต่อปี, 1,168,000 ลูกบาศก์เมตรต่อปี, 1,022,000 ลูกบาศก์เมตรต่อปี และ 3,832,500 ลูกบาศก์เมตรต่อปี ตามลำดับของแต่ละสายการผลิตน้ำ ในงานวิจัยนี้ เป็นการใช้เสาหลักการปรับปรุงเฉพาะจุด โดยการเพิ่มเติมระบบป้องกัน เพื่อป้องกันความเสียหายของเครื่องจักร เนื่องจากปัญหาส่วนใหญ่พบว่าระบบป้องกันเกิดการ ทำงานผิดพลาด ซึ่งเป็นปัญหาที่พบมากที่สุด ในสายการผลิตที่ 4 และต้องอาศัยทรัพยากรบุคคลของทุกฝ่ายในการร่วมมือกัน ระดมสมอง วิเคราะห์ ถึงสาเหตุของความสูญเสียต่าง ๆ เพื่อกำจัดความสูญเสีย และใช้องค์ความรู้เชิงวิศวกรรมในการปรับปรุง

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณเป็นพิเศษสำหรับทุกฝ่ายที่สนับสนุนให้การศึกษาวิจัยนี้ประสบความสำเร็จ รวมถึงโรงงานผลิตน้ำกรณีศึกษา ที่สนับสนุนข้อมูลในการวิจัยครั้งนี้

ตารางที่ 7 การหาค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักรของระบบการกรองน้ำ และกำลังการผลิตน้ำ

ลำดับ	สมการ	ก่อนและหลังการปรับปรุง (สายการผลิตน้ำ)			
ค่าความพร้อมใช้งาน (Availability Rate: AR)					
1	$MTTR = \sum_{i=1}^j t_{lrt,i} + (t_{rt,i} + t_{st,i})$ (นาที)	ก่อน (1)	หลัง (1)	ก่อน (2)	หลัง (2)
		900	630	3,690	2,052
		ก่อน (3)	หลัง (3)	ก่อน (4)	หลัง (4)
		1,380	399	7,200	1,944
2	$t_{lt} = 525,600 - (t_{pmpt} + t_{opt})$ (นาที)	ก่อน (1)	หลัง (1)	ก่อน (2)	หลัง (2)
		516,960	517,710	516,600	517,572
		ก่อน (3)	หลัง (3)	ก่อน (4)	หลัง (4)
		510,720	512,319	508,680	511,584
3	$t_{pmpt} = \sum_{i=1}^j (t_{pmt,i} + t_{st,i})$ (นาที)	ก่อน (1)	หลัง (1)	ก่อน (2)	หลัง (2)
		1,440	720	1,440	720
		ก่อน (3)	หลัง (3)	ก่อน (4)	หลัง (4)
		2,520	1,260	2,520	1,260
4	$t_{opt} = \sum_{i=1}^j t_{opt,i}$ (นาที)	ก่อน (1)	หลัง (1)	ก่อน (2)	หลัง (2)
		7,200	7,170	7,560	7,308
		ก่อน (3)	หลัง (3)	ก่อน (4)	หลัง (4)
		12,360	12,021	14,400	12,756
5	$MTBF = t_{lt} - MTTR$ (นาที)	ก่อน (1)	หลัง (1)	ก่อน (2)	หลัง (2)
		516,060	517,080	512,910	515,520
		ก่อน (3)	หลัง (3)	ก่อน (4)	หลัง (4)
		509,340	511,920	501,480	509,640
6	$AR = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100$ (%)	ก่อน (1)	หลัง (1)	ก่อน (2)	หลัง (2)
		99.83	99.88	99.29	99.60
		ก่อน (3)	หลัง (3)	ก่อน (4)	หลัง (4)
		99.73	99.92	98.58	99.62
อัตราสมรรถนะ (Performance Rate: PR)					
7	$F_{dt} = \frac{t_{fdt}}{Q_{dw}}$ (นาที/ลบ.ม)	ก่อน (1)	หลัง (1)	ก่อน (2)	หลัง (2)
		0.0034	0.0034	0.0034	0.0034
		ก่อน (3)	หลัง (3)	ก่อน (4)	หลัง (4)
		0.0034	0.0034	0.0034	0.0034
8	$Q_{out} = \sum_{i=1}^j V_{pr,i} \times t_{net,i}$ (ลิ้น-ลบ.ม/ปี)	ก่อน (1)	หลัง (1)	ก่อน (2)	หลัง (2)
		134.1375	134.4660	132.4950	133.6630
		ก่อน (3)	หลัง (3)	ก่อน (4)	หลัง (4)
		130.6335	131.6555	126.6550	130.4875

ตารางที่ 7 (ต่อ) การหาค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักรของระบบการกรองน้ำ และกำลังการผลิตน้ำ

ลำดับ.	สมการ	ก่อนและหลังการปรับปรุง (สายการผลิตน้ำ)			
		ก่อน (1)	หลัง (1)	ก่อน (2)	หลัง (2)
9	$PR = \frac{F_{dt} \times Q_{out}}{t_{net}} \times 100$	88.37	88.42	87.83	88.15
	(%)	87.22	87.44	85.87	87.05
อัตราคุณภาพ (Quality Rate: QR)					
10	$QR = \sum_{i=1}^j \frac{Q_{out,i} - Q_{prls,i}}{Q_{out,i}} \times 100$	ก่อน (1)	หลัง (1)	ก่อน (2)	หลัง (2)
	(%)	100	100	100	100
		ก่อน (3)	หลัง (3)	ก่อน (4)	หลัง (4)
		100	100	100	100
ค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักร (Overall Equipment Effectiveness)					
11	$OEE = AR \times PR \times QR$	ก่อน (1)	หลัง (1)	ก่อน (2)	หลัง (2)
	(%)	88.22	88.31	87.21	87.80
		ก่อน (3)	หลัง (3)	ก่อน (4)	หลัง (4)
		86.98	87.37	84.65	86.72
กำลังการผลิตน้ำที่เพิ่มขึ้น (Quantity of Increasing Filtration Water)					
12	$Q_{inc} = \sum_{i=1}^j Q_{out,i,after} - Q_{out,i,before}$	สายการผลิตน้ำ ที่ 1		สายการผลิตน้ำ ที่ 2	
	(ลบ.ม/ปี)	328,500		1,168,000	
		สายการผลิตน้ำ ที่ 3		สายการผลิตน้ำ ที่ 4	
		1,022,000		3,832,500	

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Kigisirisin and P. Sirawit, "Approach for Total Productive Maintenance Evaluation in Water Productivity: A Case Study at Mahasawat Water Treatment Plant," in *Proceeding of 12th International Conference on Hydroinformatics*, South Korea, 2016, pp. 260-267.
- [2] R. Singh, A. M. Gohil, D. B. Shah and S. Desai, "Total Productive Maintenance (TPM) Implementation in a Machine Shop: A Case Study," in *Proceeding of 3rd Nirma University International Conference on Engineering*, India, 2013, pp. 592-599
- [3] M. Wienker, K. Henderson and J. Volkerts, "The Computerized Maintenance Management System An essential Tool for World Class Maintenance," in *Proceeding of 3rd International Symposium on Innovation and Technology in the Phosphate Industry*, Morocco, 2016, pp. 413-420.
- [4] I. Lopes, P. Senra, S. Vilarinho, V. Sa, C. Teixeira, J. Lopes, A. Alves, J. A. Oliveira and M. Figueiredo, "Requirements specification of a computerized maintenance management system – a case

- study,” in *Proceeding of 6th Changeable, Agile, Reconfigurable & Virtual Production*, United Kingdom, 2016, pp. 268 – 273.
- [5] A. Moreira, F. J. G. Silva, A. I. Correia, T. Pereira, L. P. Ferreira and F. De Almeida, “Cost reduction and quality improvements in the printing industry,” in *Proceeding of 28th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*, USA, 2018, pp.623–630.
- [6] B. G. Mwanza and C. Mbohwa, “Design of total productive maintenance model for effective implementation: Case study of chemical manufacturing company,” in *Proceeding of Industrial Engineering and Service Science 2015*, Indonesia, 2015, pp. 461-470.
- [7] R.singh, D. B. Shah, A. M. Gohil and M. H. Shah “Overall Equipment Effectiveness (OEE) Calculation -Automation through Hardware & Software Development,” in *Proceeding of 3rd Nirma University International Conference on Engineering*, India, 2013, pp. 579-584.
- [8] A. S. Relkar, K. N. Nandurkar, “Optimizing and analyzing Overall Equipment Effectiveness (OEE) Through Design of Experiments (DOE),” in *Proceeding of International Conference on Modeling, Optimization and Computing*, India, 2012, pp.2973-2980.
- [9] R. Hedman, M. Subramaniyan and P. Almström, “Analysis of critical factors for automatic measurement of OEE,” in *Proceeding of 49th CIRP Conference on Manufacturing Systems*, Germany, 2016, pp. 128 – 133.
- [10] *Work Instruction Manuals in Process for Water Treatment Plant*, Mahasawat Water Treatment Plant, Nonthaburi, NC, 2018, pp. 3-5.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

อิทธิพลของรูปแบบความเร็วอากาศอบแห้งต่อการอบแห้งข้าวเปลือก

ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา¹ กระวี ตรีอำนรรค^{1*} และ เทวรัตน์ ตรีอำนรรค²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

^{1,2} 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รับบทความ 16 สิงหาคม 2564 แก้ไขบทความ 6 กันยายน 2564 ตอรับบทความ 16 กันยายน 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบความเร็วอากาศอบแห้งที่มีผลต่อการอบแห้งข้าวเปลือก เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมต้นแบบถูกใช้ในการศึกษานี้ ทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์หอมปทุม 15 กิโลกรัม ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 22-25 มาตรฐานเปียก อบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนมีความชื้นเป็นร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก โดยใช้ความเร็วอากาศอบแห้งสองแบบคือ ความเร็วอากาศอบแห้งคงที่ตลอดกระบวนการทดลองที่ 12.80 เมตรต่อวินาทีและความเร็วอากาศอบแห้งที่ปรับลดทุก 15 นาที ตลอดกระบวนการทดสอบ (มีค่าจาก 12.80 - 8.44 เมตรต่อวินาที) อบแห้งในหอบแห้งแบบท่อตั้งตรงแนวดิ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.81 เซนติเมตร สูง 1 เมตร เพื่อศึกษาผลการอบแห้งจาก พฤติกรรมการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และประสิทธิภาพเชิงความร้อนในการอบแห้ง ผลการทดสอบพบว่า การอบแห้งที่ความเร็วอากาศอบแห้งคงที่ใช้เวลาอบแห้งน้อยกว่า มีอัตราการอบแห้งสูงกว่า ใช้พลังงานจำเพาะป้อนภูมิน้อยกว่า และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าในช่วงความชื้นข้าวเปลือกสูง เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งที่มีการปรับลดความเร็วอากาศอบแห้งในระหว่างกระบวนการทดสอบ

คำสำคัญ : เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกพาหะลม; ความเร็วอากาศอบแห้ง; อัตราการอบแห้ง; พลังงานในการอบแห้ง

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +66 4422 4766, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: krawee@sut.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Influence of Drying Air Velocity Characteristics on Paddy Drying

Nuttapong Wongbubpa¹ Krawee Treeamnuk^{1*} and Tawarat Treeamnuk²

¹ School of mechanical engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

² School of agricultural engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

^{1,2} 111 University Avenue, Mueang, Nakhon Ratchasima, 30000

Received 16 August 2021; Revised 6 September 2021; Accepted 16 September 2021

Abstract

The objective of this research was to study the influence of drying air velocity characteristics on paddy drying. The pneumatic dryer prototype was used in this study. Test drying 15 kg of Hom Pathum paddy at 22 – 25% initial wet basis moisture content was tested drying under the drying air temperature 80°C until its moisture is 14% wet basis with the two drying air velocity characteristics. The first characteristic of drying air velocity is constant at 12.80 m/s and another is reduced velocity every 15 minutes throughout the test process from 12.80 - 8.44 m/s. Drying in a vertical tube with a diameter of 3.81 cm and height 1 m for study the drying behavior, drying rate (DR), specific energy consumption (SEC), and thermal efficiency of drying. The results showed that drying with constant air velocity gives a shorter time, higher drying rate, lower primary SEC consumption, and higher thermal efficiency than drying with reducing air velocity.

Keywords : Pneumatic Paddy Drying; Drying Air Velocity; Drying Rate; Energy Consumption

* Corresponding Author. Tel.: +66 4422 4766, E-mail Address: krawee@sut.ac.th

1. บทนำ

ผลผลิตทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว โดยเฉพาะข้าวเปลือกมักจะมีความชื้นสูงประมาณ ร้อยละ 22-25 มาตรฐานเปียก [1] ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ข้าวเปลือกเกิดเชื้อราในระหว่างการเก็บรักษาอันเป็นผลมาจากความชื้นที่สูงเกินไป ดังนั้นการอบแห้งข้าวเปลือกจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อการถนอมรักษาคุณภาพและยืดอายุการเก็บรักษาให้ยาวนาน ความชื้นข้าวเปลือกที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษาควรมีค่าอยู่ที่ประมาณร้อยละ 12-14 มาตรฐานเปียก [1] และในการลดความชื้นข้าวเปลือกสามารถทำได้โดยใช้เครื่องอบแห้งหลากหลายชนิด เช่น เครื่องอบแห้งแบบถาด เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด เครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็คเบด เครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระอย่างต่อเนื่อง เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม เครื่องอบแห้งแบบกระแสน และเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบไหลต่อเนื่อง ด้วยเทคนิคการแผ่รังสีความร้อนในไมโครเวฟ เป็นต้น ซึ่งเครื่องอบแห้งชนิดต่าง ๆ มีจุดเด่นและจุดด้อยที่ต่างกัน ในกระบวนการอบแห้งส่วนใหญ่นิยมใช้การถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนซึ่งเป็นตัวกลางในการอบแห้งไปยังวัสดุที่ขึ้นเพื่อไล่ความชื้นออกด้วยกระบวนการระเหยน้ำ การทบทวนบทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งด้วยลมร้อนพบว่า การถ่ายเทความร้อนแบบเป่าผ่านใน 2 มิติได้ถูกนำมาใช้กับวัสดุเกษตร 3 ชนิด คือ ข้าวเปลือก ข้าวโพด และถั่วเหลือง และมีการศึกษาถึงผลความเร็วของลมร้อนที่มีต่อการอบแห้ง [2] Z. Sun et al. [3] ได้ทำการวิเคราะห์ความร้อนของข้าวเปลือกเมล็ดยาวตามอุณหภูมิอากาศที่ใช้อบแห้ง 3 ระดับ คือ อุณหภูมิต่ำ 45 องศาเซลเซียส อุณหภูมิปานกลาง 80 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสูง 180 องศาเซลเซียส พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเมล็ดอยู่ระหว่าง 60-100 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับความชื้นของข้าวเปลือก T. Chitsomboon et al. [4] ได้ศึกษาอัตราการอบแห้งและการใช้พลังงานของ

เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ พบว่าเครื่องอบแห้งชนิดนี้สามารถลดความชื้นข้าวเปลือกจำนวน 1.5 กิโลกรัม จากความชื้นร้อยละ 23.75 มาตรฐานแห้ง ให้เหลือ 15.5 มาตรฐานแห้ง โดยใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 30 วินาที ในขณะที่ความเร็วอากาศอบแห้งมีผลอย่างมากต่ออัตราการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งข้าวแบบหล่นอิสระอย่างต่อเนื่อง โดยระยะเวลาการอบแห้งลดลงจาก 150 นาที เหลือ 82 นาที และ 130 นาที เหลือ 60 นาที เมื่อเปลี่ยนความเร็วอากาศอบแห้งจาก 1 เมตรต่อวินาที เป็น 4 เมตรต่อวินาที [5] โดยข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ สามารถให้ร้อยละข้าวตันได้สูงถึง 55-60 [6] T. Wichinthanasan et al. [7] พบว่าเครื่องอบแห้งแบบกระแสนทำงานร่วมกับเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม สามารถลดความชื้นข้าวเปลือกได้ถึงร้อยละ 10.78 มาตรฐานแห้ง ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 110 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนวัสดุ 62 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ร้อยละข้าวตันและค่าความขาวของเมล็ดข้าวจะลดลงตามอุณหภูมิของอากาศอบแห้งที่สูงขึ้น งานวิจัยของ A.G. Cnossen et al. [8] ได้ศึกษาการอบแห้งข้าวที่ใช้อุณหภูมิของอากาศอบแห้งสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition) พบว่าวิธีดังกล่าวช่วยลดระยะเวลาการอบแห้ง และการให้ความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้ความชื้นมีสถานะสมดุลต่ำทำให้พื้นที่ผิวของเมล็ดข้าวเปลี่ยนจากสถานะเจลเป็นสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition) และลดอัตราการอบแห้งได้ด้วย งานวิจัยของ P. Ondokmai et al. [9] ได้ทำการวิจัยเชิงสำรวจเพื่อประเมินสมรรถนะการอบแห้งข้าวเปลือกของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกที่มีลักษณะเป็นโดมทำงานร่วมกับเครื่องเติมอากาศโดยใช้ถ่านเป็นเชื้อเพลิง ที่ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้นร้อยละ 25 มาตรฐานเปียก พบว่าระบบปรับปรุงสีดวงอาทิตย์ 350 วัตต์ต่อตารางเมตร และอุณหภูมิภายในโดมมีค่า 48

องศาเซลเซียส ในขณะที่ภายนอกมีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เมื่อทำให้อุณหภูมิภายในโดมเพิ่มขึ้น 25 องศาเซลเซียสโดยใช้ระบบเชื้อเพลิงร่วมกันสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกให้เหลือร้อยละ 15 มาตรฐานเปียกได้ งานวิจัยของ S. Aktar et al. [10] ได้ศึกษาการดำเนินการเพื่อประเมินประสิทธิภาพทางเทคนิคของเครื่องอบแห้งแบบ Low cost mechanical batch dryer (STR) ในประเทศบังกลาเทศ สำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส ถึง 42 องศาเซลเซียส ความจุในการอบแห้ง 300 กิโลกรัม พบว่าประสิทธิภาพการอบแห้งและการถ่ายเทความร้อนมีค่าคงที่ประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องอบแห้งมีค่าอยู่ที่ร้อยละ 22.7 ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพของชุดเครื่องอบแห้งแบบมาตรฐาน งานวิจัยของ C.K. Saha et al. [11] จาก Bangladesh Agricultural University (BAU) ประเทศบังกลาเทศได้เผยแพร่บทความวิจัยเกี่ยวกับประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งที่ถูกพัฒนาโดยมหาวิทยาลัยของตนเองโดยให้ชื่อว่า BAU-STR ซึ่งมีความจุข้าวเปลือกในการอบแห้งที่ 500 กิโลกรัม ใช้เวลาในการอบแห้ง 4-4.7 ชั่วโมง ซึ่งเครื่องอบแห้งดังกล่าวมีความสามารถในการกระจายความร้อนของอุณหภูมิอากาศอบแห้งผ่านถึงบรรจุเมล็ดข้าวได้อย่างสม่ำเสมอเป็นผลดีต่อการอบแห้ง ประสิทธิภาพของเครื่องอยู่ในเกณฑ์ดีและเครื่องอบแห้งดังกล่าวอาจถูกพัฒนาให้สามารถนำไปใช้งานในประเทศที่กำลังพัฒนาได้ ปี 2018 N. Saelim et al. [12] ได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคการแผ่รังสีความร้อนในแนวรัศมี โดยอาศัยการแผ่รังสีความร้อนจากการติดตั้งฮีตเตอร์อินฟราเรดไฟฟ้าเข้าไปที่แกนกลางของชุดทดสอบทรงกระบอกที่สร้างขึ้น ทำการทดสอบกับข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 23-26 มาตรฐานเปียก อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส โดยปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของข้าวเปลือก 0.837 1.228 1.875 และ 2.308 กิโลกรัมต่อนาที ผล

การทดสอบพบว่าอัตราการไหลของข้าวเปลือกมีอิทธิพลต่อสมรรถนะการอบแห้งเป็นอย่างมาก โดยสำหรับอัตราการไหลที่ 1.875 กิโลกรัมต่อนาที คือค่าที่เหมาะสมต่อสมรรถนะการอบแห้งที่ดีที่สุดเนื่องจากให้ค่าอัตราการอบแห้งสูงสุด ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด อีกทั้งยังให้ค่าร้อยละข้าวต้นและดัชนีความขาวของเมล็ดข้าวใกล้เคียงกับชุดควบคุมมากที่สุดอีกด้วย ปี 2020 N. Wongbubpa et al. [13] ได้นำเสนอการคำนวณเชิงตัวเลขรูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งแบบขนานในหอบแห้งแนวตั้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ขึ้น โดยเป็นการป้อนอากาศอบแห้งจากด้านล่างของหอ เมล็ดข้าวเปลือกที่เคลื่อนที่ในหอบแห้งภายใต้การไหลของลมร้อนแบบดังกล่าวจะเกิดการเคลื่อนที่แบบ ขึ้น-ลงตลอดความสูงของหอบแห้งซึ่งจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่หลายแบบภายในหอบแห้ง ทั้งแบบไหลไปพร้อมอากาศ (Co-current flow) แบบไหลสวนทางกัน (Counter current flow) และแบบไหลขวาง (Cross current flow) โดยไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์ขวางภายในหอบแห้งเลย ซึ่งเชื่อว่าจะช่วยให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทความชื้นระหว่างอากาศกับเมล็ดข้าวเปลือกได้ดีและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และเชื่อว่าจะเป็นแนวทางที่ดีต่อการนำไปปรับใช้ในการอบแห้งวัสดุเกษตรชนิดอื่น ๆ ที่มีลักษณะเป็นเมล็ดเช่นเดียวกัน และในปี 2021 N. Wongbubpa et al [14] ได้รายงานผลการศึกษากลไกการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้งแบบลมร้อนด้วยวิธีการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ที่จะส่งผลต่อพฤติกรรมเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกภายในหอบแห้ง โดยได้ทำการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งการเคลื่อนที่ ความเร็ว เรย์โนลด์สนับเบอร์ และระยะทางรวมของการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกเมื่ออยู่ในหอบแห้งภายในระยะเวลา 3 วินาที ที่ความยาวหอบแห้ง 2 เมตร ผลการจำลองพบว่าการสร้างการไหล

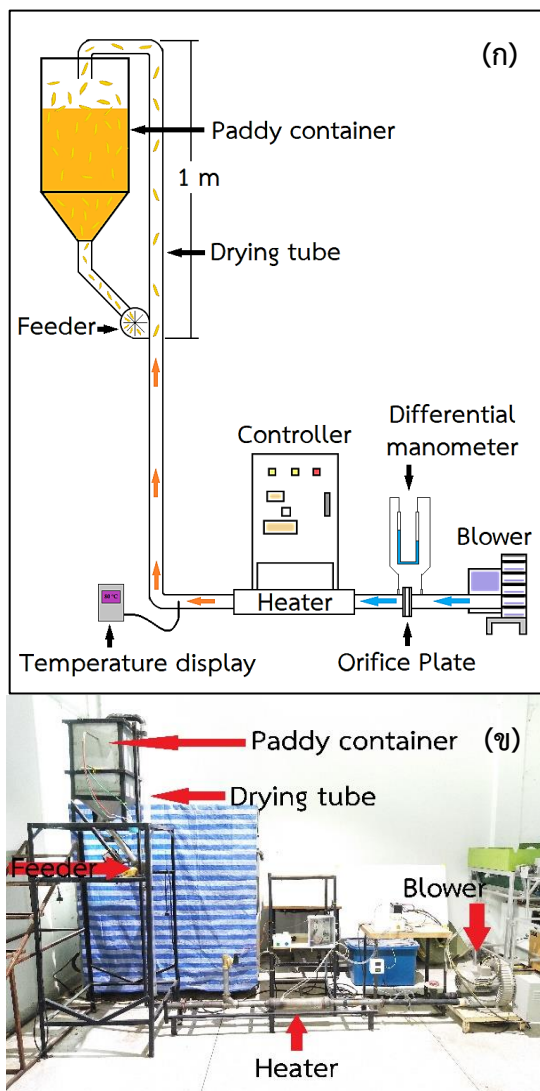
ของอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง (Pulse Flow) สามารถเพิ่มระยะการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้งได้มากกว่าความยาวของหอบแห้ง ความเร็วของการไหลในหอบแห้งมีสถานะไม่คงที่ขึ้นอยู่กับรูปแบบของช่วงอากาศที่กำหนด ซึ่งทำให้เกิดความปั่นป่วนสำหรับการไหลได้เป็นอย่างดีและส่งผลต่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ด้วยเช่นกัน

งานวิจัยจำนวนมากพยายามค้นหาเทคนิคใหม่ในกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือก เช่นเดียวกับงานวิจัยนี้ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบความเร็วอากาศที่ส่งผลต่อเวลาการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและประสิทธิภาพของการอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม โดยทดสอบเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยความเร็วอากาศสองรูปแบบ คือ ความเร็วอากาศอบแห้งคงที่ และความเร็วอากาศอบแห้งที่ถูกปรับลดลงต่อเนื่องระหว่างทดสอบ

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 เครื่องอบแห้งต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic dryer) ขนาดเล็ก (รูปที่ 1) มีเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออบแห้ง (Drying tube) ขนาด 3.81 เซนติเมตร (1.5 นิ้ว) ความยาวท่ออบแห้ง 1 เมตร ใช้เครื่องทำความร้อนขนาด 4 กิโลวัตต์ (ขดลวดความร้อนประติษฐ์) มอเตอร์เครื่องเป่าลมขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ของ Ventex รุ่น 2RB 710 H16 ซึ่งสามารถปรับความร้อนและความเร็วลมได้ การทำงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือก เริ่มจากเครื่องเป่าลมที่ควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้าด้วยอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ของ Frecon รุ่น F003b-4 ดูดอากาศจากสิ่งแวดล้อมผ่านชุดออริฟิสเพลท (Orifice plate) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ในการเทียบวัดความเร็วอากาศอบแห้งด้วย Differential manometer ของ Kimo รุ่น CP103-



รูปที่ 1 (ก) ระบบของเครื่องอบแห้งต้นแบบที่ใช้ทดสอบ
(ข) เครื่องอบแห้งต้นแบบ

PO แล้วผ่านเข้าสู่เครื่องทำความร้อน (Heater) ที่ควบคุมอุณหภูมิด้วยตัวควบคุมอุณหภูมิแบบ PID ของ Shinko รุ่น JCS-33A เพื่อใช้เป็นอากาศอบแห้ง จากนั้นอากาศอบแห้งจะเคลื่อนตัวเข้าสู่ท่ออบแห้ง (Drying tube) ที่วางตัวในแนวตั้ง ในขณะที่เดียวกันข้าวเปลือกชั้นจะถูกปล่อยจากถังเก็บ (Paddy container) ด้วยตัวป้อนข้าวเปลือก (Feeder) และถูกลำเลียงไปพร้อม ๆ กับอากาศอบแห้งจากส่วนล่างของท่อขึ้นสู่ด้านบนและ

ถูกนำออกที่ทางปลายท่อด้านบน ข้าวเปลือกจะตกลงสู่ถังเก็บอีกครั้งและรอการอบแห้งในรอบต่อไป ข้าวเปลือกชื้นและอากาศอบแห้งจะเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน (Concurrent Flow) เป็นลักษณะของการหอบเอาเมล็ดข้าวให้ไหลไปตามกระแสอากาศ ซึ่งจะเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนและความชื้นได้เป็นอย่างดี

2.2 การทดสอบเครื่องต้นแบบ

การทดสอบใช้ข้าวเปลือกพันธุ์หอมปทุม ทำการจำลองความชื้นให้มีค่าใกล้เคียงกับข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวใหม่จากแปลง ซึ่งมีความชื้นอยู่ที่ประมาณร้อยละ 22-25 มาตรฐานเปียก [1] ด้วยการพ่นละอองน้ำลงในกองข้าวเปลือกและคลุกเคล้าให้ทั่วกันก่อนนำไปเก็บในพาชนะทึบแสงเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ข้าวในกองมีความชื้นทั่วถึงกัน [15] ในงานวิจัยนี้เลือกความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยที่ประมาณร้อยละ 24 มาตรฐานเปียก และจะทำการลดความชื้นด้วยชุดทดสอบต้นแบบที่สร้างขึ้น โดยให้ความชื้นลดลงเหลือประมาณร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก ซึ่งเป็นความชื้นที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษา [1] โดยใช้ข้าวเปลือกในการทดสอบครั้งละ 15 กิโลกรัม อัตราการป้อนข้าวเปลือก 1.00 กิโลกรัมต่อนาที ควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งให้คงที่ที่ 80 องศาเซลเซียส โดยใช้ Thermocouple type K เป็นตัววัดค่าอุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าท่ออบแห้งและส่งสัญญาณให้กับ Temperature control ซึ่งจะทำหน้าที่ควบคุมเครื่องทำความร้อน (Heater) เลือกใช้ความเร็วของอากาศอบแห้งเฉลี่ยสำหรับการทดสอบสองรูปแบบคือ ความเร็วอากาศอบแห้งแบบคงที่ตลอดกระบวนการทดสอบ ที่ 12.80 เมตรต่อวินาที และ ความเร็วอากาศอบแห้งแบบปรับลดลงให้สัมพันธ์กับน้ำหนักของข้าวเปลือกที่ลดลงทุกหนึ่งรอบของการป้อนข้าวเปลือก จนหมดถัง (เท่ากับเวลา 15 นาที คำนวณได้จากอัตราการป้อนข้าวเปลือก) ตลอดการทดสอบ ซึ่งพบว่ามีความลดลงจาก 12.80 จนถึง 8.44 เมตรต่อวินาที อ่านค่าเพื่อ

ปรับตั้งความเร็วทั้งสองรูปแบบจากชุด Differential manometer และ Orifice plate ที่ติดตั้งในระบบ

ขณะทำการอบแห้งข้าวเปลือกเมล็ดข้าวจะไหลเวียนอย่างช้า ๆ และเป็นชั้น ๆ ทำการเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกที่ตกลงสู่ถังเก็บ (Paddy container) ทุก 20 นาที จนกระทั่งถึงค่าความชื้นข้าวเปลือกที่ต้องการ (ประมาณร้อยละ 14) จึงยุติการทดลอง ทำการทดสอบซ้ำรูปแบบความเร็วละ 3 ซ้ำ วัดและบันทึกค่าพลังงานของเครื่องเป่าลมและฮีตเตอร์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้าของ Chauvin Arnoux รุ่น C.A 8435 และรุ่น C.A 8334 ตามลำดับ ตัวอย่างข้าวเปลือกถูกนำไปหาค่าความชื้นตามมาตรฐานของ Association of Official Analytical Chemists (AOAC) [16] โดยนำเมล็ดข้าวเปลือกจำนวนประมาณ 10 กรัม ใส่ในถ้วยอะลูมิเนียมจากนั้นนำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาจากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก แล้วจึงคำนวณค่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกต่อไป

2.3 การประเมินสมรรถนะการอบแห้ง

การประเมินสมรรถนะการในอบแห้งจะพิจารณาจากความรวดเร็ว (ระยะเวลา) ในการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและประสิทธิภาพที่ใช้ในการอบแห้ง

2.3.1 อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR)

นำข้อมูลการทดสอบมาวิเคราะห์หาปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากข้าวเปลือกต่อระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง การคำนวณแสดงดังสมการ (1) [12]

$$DR = \frac{W_i - W_f}{t} \quad (1)$$

โดยที่

DR คือ อัตราการอบแห้ง (กิโลกรัมน้ำต่อชั่วโมง)

W_i คือ น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้น (กิโลกรัม)

W_f คือ น้ำหนักข้าวเปลือกหลังอบแห้ง (กิโลกรัม)

t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (ชั่วโมง)

$$Q_s = W_d C_{pd} (T_{p2} - T_{p1}) + W_d C_{pw} (T_{p2} - T_{p1}) M_i \quad (6)$$

$$Q_a = \dot{m}_a (C_a + C_v H_1) \cdot (T_2 - T_1) \quad (7)$$

2.3.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC)

พลังงานที่ใช้ในกระบวนการลดความชื้นแบ่งพิจารณาเป็นสองส่วนคือ ความสิ้นเปลืองพลังงานป้อนภูมิจำเพาะ (พลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง, SEC_{Heater}) และความสิ้นเปลืองพลังงานพัดยภูมิจำเพาะ (พลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อน, SEC_{Blower}) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2) และ (3) [12]

$$SEC_{Heater} = \frac{3.6E}{W_i - W_f} \quad (2)$$

$$SEC_{Blower} = \frac{3.6E}{W_i - W_f} \quad (3)$$

โดยที่

SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย)

E คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศอบแห้ง และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อน (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)

2.3.3 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง (Thermal Efficiency of Paddy Drying, η_{dry})

พิจารณาจากผลรวมของปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำและปริมาณความร้อนที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิให้กับเมล็ดข้าวเปลือกส่วนด้วยปริมาณความร้อนที่อากาศได้รับ แสดงดังสมการ (4) (5) (6) และ (7) [17]

$$\eta_{dry} = \left(\frac{Q_{evap} + Q_s}{Q_a} \right) \times 100 \quad (4)$$

$$Q_{evap} = W_d (M_i - M_f) h_{fg} \quad (5)$$

โดยที่

Q_{evap} คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ (กิโลจูล)

W_d คือ มวลแห้งของวัสดุ (กิโลกรัม)

M_i คือ ความชื้นวัสดุก่อนอบแห้ง (เศษส่วน ร้อยละมาตรฐานแห้ง)

M_f คือ ความชื้นวัสดุหลังอบแห้ง (เศษส่วน ร้อยละมาตรฐานแห้ง)

h_{fg} คือ ความร้อนแฝงของน้ำที่อุณหภูมิ T_{p2} (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)

Q_s คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิวัสดุ (กิโลจูล)

C_{pd} คือ ความร้อนจำเพาะของวัสดุแห้ง (กิโลจูลต่อกิโลกรัม-องศาเซลเซียส)

C_{pw} คือ ความร้อนจำเพาะของน้ำ (กิโลจูลต่อกิโลกรัม-องศาเซลเซียส)

T_{p1} คือ อุณหภูมิวัสดุก่อนอบแห้ง (องศาเซลเซียส)

T_{p2} คือ อุณหภูมิวัสดุหลังอบแห้ง (องศาเซลเซียส)

Q_a คือ ปริมาณความร้อนที่อากาศได้รับ (กิโลจูล)

$\dot{m}_a$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง (กิโลกรัมอากาศแห้งต่อชั่วโมง)

C_a คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง (กิโลจูลต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง-องศาเซลเซียส)

C_v คือ ความร้อนจำเพาะของไอน้ำ (กิโลจูลต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง-องศาเซลเซียส)

H_1 คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศ (กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง)

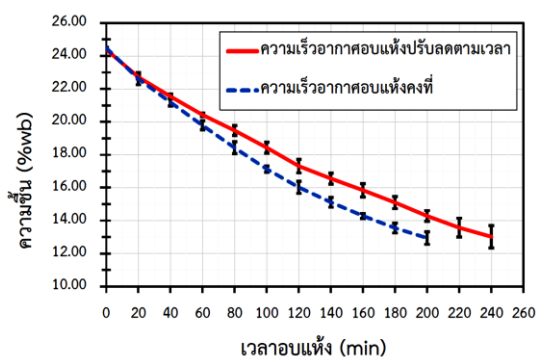
T_1 คือ อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องทำความร้อน (องศาเซลเซียส)

T_2 คือ อุณหภูมิอากาศออกจากเครื่องทำความร้อน (องศาเซลเซียส)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 พฤติกรรมการอบแห้ง (Drying Behavior)

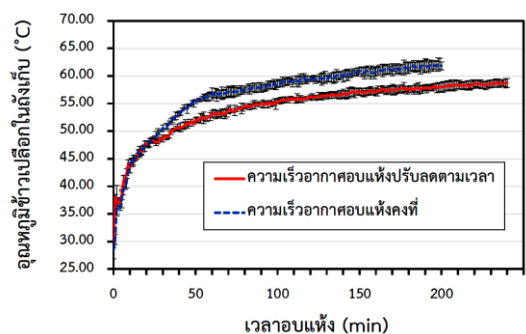
ผลการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบเปรียบเทียบกับพฤติกรรมการลดลงของความชื้นระหว่างรูปแบบความเร็วอากาศอบแห้งคงที่และความเร็วอากาศอบแห้งที่ถูกปรับลดลงตลอดการทดสอบ ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส มีลักษณะดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา

เมื่อพิจารณาการลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลาในการอบแห้ง (รูปที่ 2) พบว่ามีลักษณะลดลงอย่างค่อยเป็นค่อยไปตลอดช่วงที่ทำการศึกษจากรูปจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าหลังจากเวลาผ่านไป 20 นาที การใช้ความเร็วอากาศอบแห้งคงที่ที่จะทำให้ความชื้นข้าวลดลงต่ำกว่าการใช้ความเร็วอากาศที่มีการปรับลดความเร็วลงอย่างเห็นได้ชัด และในทางกลับกันเมื่อพิจารณาที่ความชื้นค่าเดียวกัน (หลังจากที่เวลาอบแห้งผ่านไป 20 นาที) การปรับลดความเร็วอากาศอบแห้งก็จะใช้เวลาอบแห้งที่นานมากกว่าการทดสอบในกรณีที่ความเร็วอากาศอบแห้งคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากความเร็วอากาศอบแห้งถือเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อกระบวนการอบแห้งที่ทำหน้าที่ช่วยในการระเหยความชื้นออกจากเมล็ดข้าว อีกทั้งความเร็วอากาศอบแห้งทำหน้าที่ช่วยในการถ่ายเทความร้อนจากอากาศ

สู่เมล็ดข้าวเปลือก ในกรณีการอบแห้งที่ใช้อากาศอบแห้งแบบคงที่ 12.80 เมตรต่อวินาที จะสามารถถ่ายเทความร้อนจากอากาศเข้าสู่เมล็ดข้าวเปลือกได้ดีกว่าในกรณีการอบแห้งที่มีการปรับลดความเร็วจาก 12.80-8.44 เมตรต่อวินาที ซึ่งหากการอบแห้งมีการถ่ายเทความร้อนไปยังเมล็ดข้าวได้สูง ความร้อนนี้จะช่วยในการขับเคลื่อนความชื้นออกจากเมล็ดข้าวเปลือกได้ดีตามด้วยเช่นกัน ผลของพฤติกรรมการอบแห้งนี้สอดคล้องกันกับผลการเก็บข้อมูลอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังเก็บตลอดการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3 ที่จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังเก็บกรณีทำการทดสอบอบแห้งด้วยความเร็วอากาศอบแห้งแบบคงที่ จะมีอุณหภูมิสูงกว่ากรณีทำการทดสอบอบแห้งที่มีการปรับลดความเร็ว และความแตกต่างนี้เริ่มสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนที่เวลา 20 นาทีเช่นกัน ความแตกต่างระหว่างความเร็วอากาศอบแห้งดังกล่าวมีค่าประมาณ 5 องศาเซลเซียส ตลอดการทดสอบ



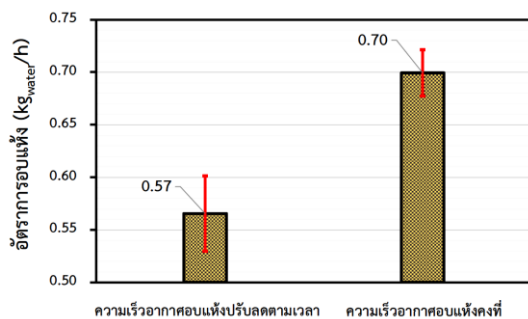
รูปที่ 3 อุณหภูมิข้าวเปลือกในถังเก็บตลอดการทดสอบ

แม้ว่าการปรับลดความเร็วอากาศอบแห้งจะช่วยชะลอเวลาให้ข้าวเปลือกสัมผัสกับอากาศอบแห้งในหอบแห้งได้นานขึ้นแต่กลับมีพฤติกรรมการอบแห้งแตกต่างกับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ [4] และการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นที่เป็นช่องอ [18] ซึ่งระบบอบแห้งทั้งสองแบบมีการชะลอการเคลื่อนที่ของ

ข้าวเปลือกเพื่อหน่วงเวลาให้ข้าวเปลือกสัมผัสอากาศร้อนได้นานขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้เพราะระบบทั้งสองใช้การหน่วงการเคลื่อนที่ของข้าวเปลือกโดยไม่มีการลดความเร็วของอากาศอบแห้ง จึงทำให้สองระบบนั้นมีข้อได้เปรียบทั้งในเรื่องความเร็วอากาศและระยะเวลาที่ข้าวเปลือกสัมผัสอากาศร้อนที่นานเช่นกัน จึงทำให้อัตราการอบแห้งสูงกว่ำนั่นเอง

3.2 อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR)

คือปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากข้าวเปลือกจากความชื้นเริ่มต้นจนกระทั่งลดลงถึงความชื้นร้อยละ 14 มาตรฐานเปียกต่อระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ดังรูปที่ 4



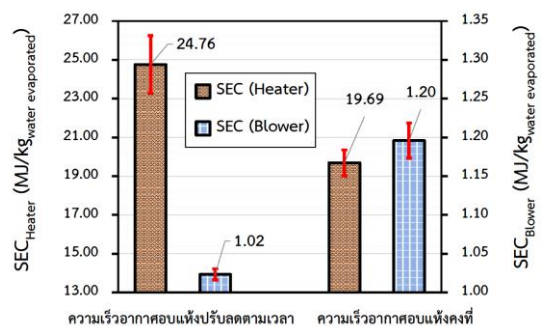
รูปที่ 4 อัตราการอบแห้งข้าวเปลือกที่ความเร็วอากาศอบแห้งแตกต่างกัน

พบว่า การปรับลดความเร็วอากาศอบแห้งลงนั้นให้อัตราการอบแห้งอยู่ที่ 0.57 กิโลกรัมน้ำต่อชั่วโมง ซึ่งต่ำกว่าการทดสอบในกรณีที่ความเร็วอากาศอบแห้งคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.70 กิโลกรัมน้ำต่อชั่วโมง เนื่องจากอัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เมล็ดข้าวเปลือกได้รับ หากเมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้สามารถถ่ายเทมวลความชื้นออกจากเมล็ดข้าวเปลือกได้ดีขึ้นและอิทธิพลของความเร็วอากาศอบแห้งที่แม้จะมีอุณหภูมิเท่ากันแต่ความเร็วที่สูงกว่าย่อมทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงกว่าและทำให้ข้าวเปลือกอุณหภูมิสูงกว่าไปด้วย ซึ่งสามารถอธิบายได้

ตามสมการของ Fick's Law Diffusion [19] สอดคล้องกันกับผลในรูปที่ 3 กล่าวคือการทดสอบในกรณีที่ความเร็วอากาศอบแห้งคงที่ ค่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังเก็บมีค่าสูงกว่าการทดสอบในกรณีที่มีการปรับลดความเร็วอากาศอบแห้ง ทำให้ความสามารถในการถ่ายเทมวลสารออกจากเมล็ดได้ดี จึงทำให้อัตราการอบแห้งสูงกว่า

3.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC)

ค่าพลังงานที่ใช้ในกระบวนการลดความชื้นตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งลดความชื้นได้ร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก แบ่งพิจารณาเป็นสองส่วนคือ ความสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ (พลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง, SEC_{Heater}) ที่คำนวณได้ มีค่าเท่ากับ 19.69 และ 24.76 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย และ ความสิ้นเปลืองพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ (พลังงานที่ใช้ในการขับลม, SEC_{Blower}) ที่คำนวณได้ มีค่าเท่ากับ 1.02 และ 1.20 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ความเร็วอากาศอบแห้งแตกต่างกัน

จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าการปรับลดความเร็วอากาศอบแห้งจะมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะที่สูงกว่าการทดสอบในกรณีที่ความเร็วอากาศอบแห้งคงที่ อันเป็นผลมาจากระยะเวลาการอบแห้งที่ยาวนานกว่าซึ่งสอดคล้องกันกับรูปที่ 1 ทำให้มีการใช้

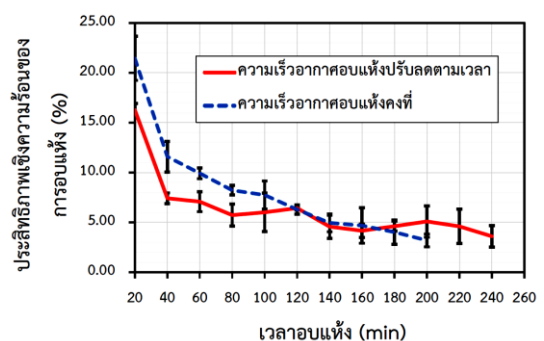
พลังงานไฟฟ้ามากกว่าและทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานปฏุมุมิจำเพาะสูงตามไปด้วย ในขณะที่การทดสอบในกรณีที่มีการปรับลดความเร็วอากาศอบแห้งจะมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานปฏุมุมิจำเพาะต่ำกว่า การทดสอบในกรณีที่ความเร็วอากาศอบแห้งคงที่ อันเป็นผลมาจากเครื่องเป่าลม (Blower) มีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ต่ำกว่าเนื่องจากอากาศอบแห้งถูกปรับลดความเร็วลงตลอดกระบวนการทดลอง จึงทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานปฏุมุมิจำเพาะนั้นต่ำลง

3.4 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง (Thermal Efficiency of Paddy Drying, η_{dry})

เมื่อนำข้อมูลการทดสอบมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง โดยพิจารณาทุก ๆ 20 นาที ดังรูปที่ 6 พบว่าในช่วงต้นของการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้งในกรณีที่ความเร็วอากาศอบแห้งคงที่มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่มากกว่าในกรณีที่มีการปรับลดความเร็วอากาศอบแห้ง และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้งมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อเวลาของการอบแห้งนานขึ้น (มีลักษณะที่สอดคล้องกันทั้งสองกรณีการทดสอบ) เนื่องจากเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น อุณหภูมิของข้าวเปลือกมีค่าสูงและเริ่มจากมีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงท้ายการทดลอง (มีการเปลี่ยนแปลงค่าน้อยลง ดังรูปที่ 3) ทำให้ปริมาณความร้อนที่ข้าวเปลือกรับไว้และใช้ในการระเหยน้ำในแต่ละรอบเวลาน้อยลง เป็นผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้งมีแนวโน้มที่ลดลงตามเวลาที่มากขึ้น

จากผลการทดสอบทั้งหมดนี้ พบว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าสูง ซึ่งต้องอาศัยอุณหภูมิของอากาศอบแห้งในการถ่ายเทความร้อนให้กับเมล็ดข้าว แต่การเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งจะทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานปฏุมุมิจำเพาะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากต้องใช้

พลังงานในการทำความร้อนให้อากาศมากขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งที่สำคัญ คือความเร็วอากาศอบแห้งและระยะเวลาที่ข้าวเปลือกสัมผัสกับอากาศอบแห้งเพื่อถ่ายเทความร้อน โดยที่ต้องไม่ทำให้ความเร็วของอากาศอบแห้งลดลง ซึ่งปัจจัยดังกล่าวสามารถช่วยเพิ่มอุณหภูมิให้กับข้าวเปลือกได้ดีและความชื้นที่ถ่ายเทออกจากข้าวเปลือกยังสามารถระบายสู่อากาศอบแห้งที่เป็นตัวกลางได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นแล้วการเพิ่มอัตราการอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมจึงควรเป็นการเพิ่มความเร็วอากาศอบแห้งหรือปรับเปลี่ยนรูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งในแบบอื่น ที่ช่วยห้วงเวลาการสัมผัสถ่ายเทความร้อนได้โดยไม่มีความเร็วของอากาศอบแห้งลดลง การศึกษาแบบการไหลของอากาศแบบเป็นช่วง (Pulse flow) [13] [14] ซึ่งเป็นเทคนิคที่ช่วยห้วงเวลาการเคลื่อนที่ของข้าวเปลือกในระบบการอบแห้งแบบพาหะลมได้ จึงอาจเป็นแนวทางหนึ่งที่มีความน่าสนใจ ซึ่งต้องมีการศึกษาเพื่อหาวิธีการที่เหมาะสมต่อไป



รูปที่ 6 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้งตามเวลา

4. สรุป

จากการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์หอมปทุมด้วยรูปแบบความเร็วอากาศอบแห้งที่แตกต่างกัน พบว่า อุณหภูมิของข้าวเปลือกมีผลต่อการอบแห้ง ความเร็วอากาศอบแห้งมีผลต่ออัตราการอบแห้ง ผลการทดสอบที่ความเร็วอากาศอบแห้งคงที่ให้อัตราการ

อบแห้งที่สูงกว่าการทดสอบที่ความเร็วอากาศอบแห้งปรับลดลง อีกทั้งยังพบว่าค่าความสิ้นเปลืองพลังงานปฏิกิริยาจำเพาะต่ำกว่า ถึงแม้ว่าจะให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานหุติยาภิรมย์จำเพาะที่สูงกว่าก็ตาม ผลรวมพลังงานทั้งหมดยังให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานรวมจำเพาะที่ต่ำกว่า และการอบแห้งด้วยความเร็วอากาศคงที่มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าเช่นกัน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่สนับสนุนทุนวิจัยและสนับสนุนด้านเครื่องมือในการทำวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of Agriculture, Quality and Inspection of Thai Hom Mali Rice. Bangkok Thailand, Jirawat express co., ltd. 2004.
- [2] S. Prachayawarakorn, S. Ruengnarong and S. Soponronnarit, "Characteristic of heat transfer in two-dimensional spouted bed," *International Journal of Food Engineering Research*, vol. 76, pp 327-333, 2006.
- [3] Z. Sun, W. Yang, T. Siebenmorgen, A. Stelwagen and A. Cnossen, "Thermomechanical transitions of rice kernels," *Cereal Chemistry*, vol. 79, no. 3, pp. 349-353, 2002.
- [4] T. Chitsomboon, S. Khaengkarn and K. Pechnumkheaw, "Free-fall-paddy rice dryer: A fast and energy efficient dryer," in *Proceeding of the 2nd Conference on Energy Network of Thailand*, 2006.
- [5] K. Pechnumkheaw, S. Meesukchaosumran and T. Chitsomboon, "Effect of Air Velocity on Drying Rate of Paddy Using Continuous Free-fall Technique," in *Proceeding of the 22nd Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand*, 2008.
- [6] S. Meesukchaosumran and T. Chitsomboon, "Free-Fall Dryer: Appropriate Drying Condition for Good Rice Quality," in *Proceeding of the 23rd Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand*, 2009.
- [7] T. Wichinthanasan, W. Ritthong and K. Sathapornprasath, "Paddy dehydration using Impinging stream dryer combined with Pneumatic dryer," in *Proceeding of the 25th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand*, 2011.
- [8] A.G. Cnossen, T.J. Siebenmorgen and W. Yang, "The glass transition temperature concept in drying and tempering: effect of drying rate," *American Society of Agricultural Engineering (ASAE)*, vol. 45, no. 3, pp 759-766, 2002.
- [9] P. Ondokmai, N. Homdoun, N. Dussadee, P. Yongphet, S. Bouchareon and R. Ramaraj, "Performance of Paddy Greenhouse Solar Dryer Operate with Hybrid Gasification Technology," in *Proceeding of 23rd Tri-U International Joint Seminar and Symposium Bogor Agricultural University*, Indonesia, 2016.
- [10] S. Aktar, R. Kibria, M.M. Alam, M. Kabir and C.K. Saha, "Performance Study of STR

- Dryer for Paddy,” J. Agril. Mach. Bioresour. Eng, vol. 7 no. 1, pp. 9–16, 2016.
- [11] C.K. Saha, Md.A. Alam, Md.M. Alam and P.K. Kalita, “Field Performance of BAU-STR Paddy Dryer in Bangladesh,” *ASABE 2017 Annual International Harvey J.*, 2017.
- [12] N. Saelim, T. Treeamnuk and K. Treeamnuk, “Development of a Continuous Flow Paddy Dryer with Infrared Radial Radiation Technique,” *RMUTP Research Journal*, vol. 12, no. 2, Jul.-Dec. 2018.
- [13] N. Wongbubpa, K. Treeamnuk and T. Treeamnuk, “Kinematics motion of paddy in hot air pulse flow,” in *Proceeding of the 13th TSAE International Conferences 187*, Suranaree University of Technology, Thailand, 2020.
- [14] N. Wongbubpa, K. Treeamnuk and T. Treeamnuk, “Computer Simulation Study of Paddy Motion in Hot Air Drying Chamber,” in *Proceeding of the 22nd TSAE National Conferences*, Khon Kaen University, Thailand, 2021.
- [15] S. Limpiti and V. Changrue, “Effects of rewetting on milling quality of wet season Japanese rice,” *Journal of Agricultural*, vol. 12, no. 2, pp. 134-139, 1996.
- [16] AOAC (Association of Official Analytical Chemists), “Official Methods of Analysis,” 17th ed., Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, Maryland, 2000.
- [17] T. Treeamnuk, “Drying and Storage of Agricultural Products,” School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, pp. 130-138, 2011.
- [18] N. Wongbubpa and T. Chitsomboon, “Effectiveness of The Elbowed Spouted Bed Paddy Dryer,” in *Proceeding of the 29th Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand*, Nakhon Ratchasima, 2015.
- [19] Y.A. Cengel, Heat and Mass Transfer, 3th ed. Published by McGraw-Hill Companies, Inc., 1221 Avenue of the Americas, New York, NY 10020, 2006.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานของการเจาะทะลุของกระสุนบนผิวเกราะอะลูมิเนียมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อนุชา สายเจริญ ปฏิภาณ ถิ่นพระบาท และ ประกอบ ชาติภักดิ์*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

รับบทความ 17 กันยายน 2564 แก้ไขบทความ 17 ตุลาคม 2564 ตอรับบทความ 19 ตุลาคม 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานของการเจาะทะลุของกระสุนบนผิวเกราะด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบผลลัพธ์กับการทดสอบยิงเกราะกันกระสุนจริงและการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โปรแกรม SolidWorks ถูกเลือกใช้เป็นเครื่องมือในการสร้างโมเดลของกระสุนและเกราะกันกระสุน การจำลองรูปแบบการยิงแผ่นเกราะกันกระสุนได้เลือกใช้โปรแกรม ANSYS Explicit Dynamic การทดสอบการยิงกระสุนอ้างอิงตามมาตรฐาน NIJ 3 วัสดุของกระสุนที่ใช้ในการจำลองคือทังสเตนคาร์ไบด์ ขนาด 7.62 มิลลิเมตร ความเร็วกระสุน 847 ± 9.1 เมตรต่อวินาที วัสดุแผ่นเกราะกันกระสุนมี 2 ชนิด คือ SKD11 และ อะลูมิเนียม AL-7075 T6 โดยการจำลองได้แบ่งออกเป็นจำลองแผ่นเกราะแบบซ้อนด้วยขนาดความหนาของแผ่นเกราะเท่ากับ 6, 8, และ 10 มิลลิเมตร มุมองศาของการยิงเกราะกันกระสุนคือ 0, 30 และ 45 องศา ผลจากการจำลองแสดงให้เห็นว่า ความหนาของแผ่นเกราะกันกระสุนที่เพิ่มขึ้นและมุมในการยิงที่มากขึ้นเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้แผ่นเกราะสามารถต้านทานการเจาะทะลุได้อย่างมาก

คำสำคัญ : เกราะกันกระสุน; เกราะอะลูมิเนียม; ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร. +66 2836 3000 ต่อ 4138, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ prakorb.c@rmutp.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Parameter Analysis that Affects the Ability to Resistance Penetration of Ammunition on the Aluminum Armor Surface Using Finite Element Method

Anucha Saicharoen Padipan Tinprabath and Prakorb Chartpuk*

Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Phra Nakhon

1381 Pracharat 1 Road, Wong Sawang Subdistrict, Bang Sue District, Bangkok 10800

Received 17 September 2021; Revised 17 October 2021; Accepted 19 October 2021

Abstract

This research investigated the factors influencing the penetrating resistance of the armor surface using the finite element method. In this study, firing tests on actual bulletproof armor and finite element simulation modeling of bulletproof armor using the SolidWorks program were compared. The pattern model of firing onto armor was created and simulated using the ANSYS Explicit Dynamic program. The damage test was conducted in accordance with the National Institute of Justice Level 3 standards. The bullet material used in the model was 7.62 mm tungsten carbide (WC) moved at speed of 847 ± 9.1 m/s. In this simulation, two different kinds of bulletproof armor were used: SKD1 and Aluminum AL7075. According to the simulations, the armor plates were stacked with thicknesses of 6, 8, and 10 mm, and the angles of firing of bulletproof armor were at 0, 30, and 45 degrees. The simulation findings showed that factors influencing the considerable resistance of the armor plates to bullet penetration are increases in firing angle and armor thickness.

Keywords : Bulletproof Armor; Aluminum Armor; Finite Element Method

* Corresponding Author. Tel.: +669 8279 5855, E-mail Address: prakorb.c@rmutp.ac.th

1. บทนำ

ในปัจจุบันความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยี รวมถึงวัสดุขั้นสูง (Advanced Materials) เพื่อใช้ในการประยุกต์งานทางด้านวิศวกรรมต่างๆ รวมถึงทางด้านการวิศวกรรมเครื่องกลมีความก้าวหน้าไปอย่างมาก โดยการพัฒนาในระดับโครงสร้างวัสดุให้มีความเฉพาะเจาะจง เสถียร แม่นยำและมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้เกิดสมบัติของวัสดุที่พิเศษเพื่อการใช้งานเฉพาะด้าน ที่ผ่านมาการพัฒนาวัสดุเกรดได้มุ่งเน้นไปที่การลดน้ำหนักของวัสดุเกรดที่มีอยู่ เพราะน้ำหนักที่ลดลงจะช่วยในการประหยัดพลังงานตลอดจนการเพิ่มความคล่องตัว ในอดีตเหล็กถูกนำมาใช้เป็นเกรดเนื่องจากมีความแข็งแรงสูงของพวกเขาที่มีความเหนียวที่ดีและต้นทุนต่ำ นำไปสู่การค้นหาเทคนิคการผลิตที่แตกต่างกัน เช่น การรักษาความร้อน การรีดเย็น ฯลฯ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งของเหล็ก ซึ่งในจะช่วยในการลดน้ำหนักของชุดเกรด การศึกษาก่อนหน้านี้มีอย่างกว้างขวาง การศึกษาผลกระทบของการรักษาความร้อนในการปรับปรุงคุณสมบัติของเกรดเหล็ก [1]–[8]

มีการศึกษาเกี่ยวกับทิศทางของเกรนที่วิ่งเข้ามาปะทะกับแผ่นเกรด ซึ่งให้เห็นว่ามุมวิ่งเข้าปะทะกับแผ่นเกรดที่ 30 องศา จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงโดยประมาณ 30% ในขณะที่ประสิทธิภาพการป้องกันเพิ่มขึ้นเป็น 21% [9] นั่นคือทุกครั้งที่ทำทดสอบต้องทดสอบที่มุมปะทะ 0 องศา เพื่อให้ครอบคลุมการโจมตีของเกรน อะลูมิเนียมเป็นวัสดุหนึ่งที่มีความน่าสนใจ เนื่องจากมีความหนาแน่นต่ำ ทำให้เบา จนถูกนำเสนอการใช้งานเป็นเกรดน้ำหนักเบา มีการอ้างอิงที่มีอยู่ในวารสารการวิจัยระดับนานาชาติจำนวนมากเกี่ยวกับพฤติกรรมของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีความแข็งแรงสูง [9]–[14] Namik Kiliç & Bülent Ekici [15] ได้นำเสนอการต้านทานชิปนาวูของเหล็กเกรดความแข็งแรงสูงต่อเกรนเจาะเกรด 7.62 mm ใช้การจำลองอุทกพลศาสตร์ของอนุภาคการรองรับและวิธี SPH ได้

ดำเนินการโดยใช้แบบจำลอง 3 มิติของเกรนและแผ่นเกรดที่มีความหนา 9 และ 20 มม. เพื่อตรวจสอบวิธีการจำลอง นอกจากนี้ยังมีการทดสอบวัสดุสำหรับเกรดเหล็กและแกนเหล็กชุบแข็งของเกรนเพื่อพัฒนาความสัมพันธ์เชิงโครงสร้างของ Johnson–Cook Constitutive Relations สำหรับทั้งแบบจำลองความแข็งแรงและความล้มเหลว สุดท้ายผลลัพธ์จากการจำลองเชิงตัวเลข 3 มิติพร้อมแบบจำลองรายละเอียดของเกรนและแผ่นเกรดถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง M. Rodriguez-Millan et al. [16] นำเสนอกลไกการเจาะของแผ่นเกรดอะลูมิเนียม 2024 ที่ถูกกระแทกโดยปลายเกรนที่มีรูปร่างต่างกัน ใช้วิธีการแปลง FEM-SPH ซึ่งให้การทำนายพฤติกรรมทางกลของ AA 2024-T351 ที่แม่นยำ การจำลองช่วยให้เข้าใจปรากฏการณ์การกระแทกและการกระจายพลังงานที่เสียรูปไปตามแผ่นอะลูมิเนียม ไม่พบความแตกต่างที่มีนัยสำคัญในการต้านทานเกรนที่มีรูปร่างต่างกันส่วนปลาย อย่างไรก็ตาม ความแปรผันที่เกี่ยวข้องของความเร็วตกค้างถูกบันทึกเมื่อความเร็วเกรนเพิ่มขึ้น งานวิจัยที่ผ่านมามีการผสมผสานโลหะผสมและโลหะพื้นฐาน เพื่อปรับปรุงวัสดุเกรด และใช้ในการก่อสร้างยานพาหนะ [17]–[20] N.K. Gupta et al. [21] ทำการทดลองและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Abaqus สำหรับแผ่นเกรดแผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์ 1100-H12 ที่ได้รับผลกระทบจากเกรนด้วยความหนาแผ่นเกรดที่หลากหลายอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสมมีความแข็งแรงและความเหนียวสูง มีจุดหลอมเหลวต่ำและมีอัตราความเครียดสูง เหมาะที่จะนำมาประยุกต์เป็นวัสดุเกรด เป้าหมายในการนำมาใช้งานคือการสร้างให้มีชั้นหลาย ด้วยการใช้วัสดุหลายชนิดร่วมกัน เป็นวิธีการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพต่อการปรับปรุงความต้านทานการเจาะเกรด และปรับปรุงให้มีค่าความแข็งที่ผิวให้สูงขึ้น และต้องออกแบบให้เกิดการเลี้ยวเบนของเกรนเมื่อเข้ามาปะทะ เป็นหลักการการสลายพลังงานจลน์

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อคาดการณ์การเกิดความเสียหายที่เกิดจากการยิงกระสุนภายใต้การยิงกระสุนตามมาตรฐาน NIJ 3 ด้วยของวัสดุกระสุนคือทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) ขนาด 7.62 มิลลิเมตร ความเร็วของกระสุนที่ 847 ± 9.1 m/s เพื่อให้ลดขั้นตอน เวลาจากการทดสอบจริง อีกทั้งยังลดงบประมาณจากการทดสอบจริง

2. ระเบียบวิธีวิจัย

กระบวนการดำเนินงานวิจัยที่ประกอบไปด้วยวิธีการดำเนินงานวิจัย การออกแบบแผ่นเกราะที่ใช้วัสดุแตกต่างกันในการออกแบบ การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมรวมถึงการสร้างแบบจำลองการยิงชุดเกราะ และการกำหนดค่าสมบัติของวัสดุตามสมการความเสียหาย การแบ่งเอลิเมนต์ การวิเคราะห์แผ่นเกราะด้วยโปรแกรม Ansys Explicit Dynamics

2.1 ขั้นตอนการวิจัย

ขั้นตอนวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย การทดสอบการยิงแผ่นเกราะจริง และการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อนำผลลัพธ์จากการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง เพื่อตรวจสอบขีดความสามารถของโปรแกรมและสร้างไฟไนต์เอลิเมนต์โมเดลที่ถูกต้องในกระบวนการ Pre-processing ที่อ้างอิงผลความเสียหาย ความแม่นยำ เทียบตรงของการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มาตรฐานการทดสอบแผ่นเกราะกันกระสุนเป็นมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับเรื่องวิธีทดสอบ เกณฑ์การทดสอบ ความสามารถหรือประสิทธิภาพการป้องกันกระสุนโดย National Institute of Justice ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งประเทศไทยและอีกหลายประเทศทั่วโลกใช้มาตรฐานนี้ โดยมาตรฐาน NIJ แบ่งออกเป็น 6 ระดับ ซึ่ง NIJ ระดับ 3 หมายถึงแผ่นเกราะสามารถป้องกันกระสุนขนาด 7.62x51 mm NATO M80 ball ด้วยน้ำหนักกระสุน 9.6 g มีความเร็วกระสุน 847 ± 9.1 m/s (2780 ± 30

ft/s) และ NIJ ระดับ 4 หมายถึงแผ่นเกราะสามารถป้องกันกระสุนขนาด .30-06 Springfield M2 น้ำหนัก 10.8 g มีความเร็ว 878 ± 9.1 m/s (2880 ± 30 ft/s)

2.2 กำหนดสมมติฐานในการวิเคราะห์

สมมติฐานของวัสดุที่ใช้สำหรับกระสุน แผ่นเกราะอะลูมิเนียมอัลลอยด์และ SKD11 กำหนดให้เป็นวัสดุที่มีเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และมีสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง (Isotropic Materials) ความเสียหายที่เกิดขึ้นพิจารณาตั้งแต่ช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นไปจนถึงช่วงพลาสติก ความเสียหายที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับที่มีอัตราความเครียดสูง

2.3 กระบวนการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2.3.1 ขั้นตอนการเตรียมการ (Pre-processing) เป็นการสร้างไฟไนต์เอลิเมนต์โมเดล การสร้างโมเดลสามมิติของแผ่นเกราะกันกระสุนและหัวกระสุน ด้วยโปรแกรม SolidWorks วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม ANSYS Explicit Dynamic กำหนดวัสดุให้กับชิ้นส่วนต่างๆ ซึ่งมีทฤษฎีโมเดลวัสดุในส่วน Explicit Materials ประกอบด้วย Johnson-Holmquist Strength Continuous, Steinberg Guinan Strength, Equation of State, Johnson-Cook Failure เป็นต้น การกำหนดคู่สัมผัสเป็นการกำหนดชนิดของหน้าสัมผัสที่สัมผัสกันเช่น กระสุนที่สร้างขึ้นจะมี 8 ชิ้นส่วนจะต้องกำหนดให้ทุกหน้าสัมผัสเป็นแบบ Bonded การกำหนดความเร็วของกระสุน การกำหนดจุดรองรับหรือจุดจับยึด และการกำหนดชนิดเอลิเมนต์ การควบคุมขนาดเอลิเมนต์

2.3.2 กระบวนการประมวลผล (Solve-processing) เป็นขั้นตอนการวิเคราะห์แบบ Explicit Dynamics ต้องเลือกใช้กับแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น การเสียรูปขนาดใหญ่ และมีอัตราความเครียดสูง

2.3.3 กระบวนการแสดงผลลัพธ์ (Post-processing) เป็นขั้นตอนการแสดงผลหลังจากการวิเคราะห์ โดยค่าที่แสดงจะมีลักษณะเป็นค่าตัวเลขที่โหนด (Node Value)

การแสดงผลเพื่อพิจารณา ประกอบด้วย การเสียรูป ทิศทางการเสียรูป ความเร็วของวัตถุ ทิศทางของความเร็ว ความเค้นและความเครียดต่างๆ

2.4 ทฤษฎีและสมบัติของวัสดุ

2.4.1 โมเดลของ Johnson Holmquist Failure

Johnson Holmquist แบบจำลองที่เหมาะสมในการทำนายพฤติกรรมของวัสดุเปราะที่ต้องรับน้ำหนักมากคุณสมบัติหลักของโมเดลนี้ ได้แก่ ค่าความแข็งแรงขึ้นอยู่กับแรงกด ความเสียหาย และการแตกหัก ความแข็งแรงที่สำคัญหลังจากการแตกหักและผลกระทบจากอัตราความเครียดสูง สำหรับกระสุนทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten Carbide Bullet) ซึ่งเป็นกระสุนเจาะเกราะที่มีส่วนของหัวกระสุนอยู่ภายในปลอกทองเหลืองทำจากทังสเตนคาร์ไบด์ มีขนาด 7.62 mm ดังนั้นโมเดลรูปแบบความเสียหายของ Johnson-Holmquist Failure Model จึงถูกนำมาใช้กับกระสุนดังกล่าวที่มีความแข็งแรงอยู่ภายใต้แรงดันขนาดใหญ่และอัตราความเครียดสูง รูปแบบจะพยายามรวมปรากฏการณ์ที่พบเมื่อวัสดุที่เปราะบางถูกแรงกระทำและเกิดความเสียหาย ซึ่งเป็นหนึ่งในแบบจำลองที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดเมื่อต้องรองรับกับผลกระทบจากชิปนาวุธ (Ballistic) กำหนดให้ σ คือความเค้นคราก (Yield Stress) เป็นไปตามสมการที่ (1) [22]

$$\sigma = \left(A(P^* + T^*)^N (1 + D) + B \cdot (P^*)^M D \right) \times (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (1)$$

$$\text{เมื่อ } T^* = \frac{T}{T_{HEL}} \text{ และ } P^* = \frac{P}{P_{HEL}} \quad (2)$$

โดยที่ A, B, C, M, N เป็นค่าคงที่ของวัสดุ ความดันปกติคือ $P^* = P/P_{HEL}$ โดยที่ P คือความดันไฮโดรสแตติกที่แท้จริง และค่า P_{HEL} คือค่าความดันไฮโดรสแตติกที่ HEL (Hugoniot Elastic Limit) ความดันไฮโดรสแตติกแรงดึงสูงสุดที่ปรับให้เป็นมาตรฐานคือ $T^* = T/T_{HEL}$

โดยที่ T คือ แรงดันไฟฟ้าสถิตสูงสุดที่วัสดุสามารถทนได้ $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$ คืออัตราความเครียดไร้มิติ โดยที่ $\dot{\epsilon}$ คืออัตราความเครียดที่เทียบเท่าจริง และ $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$ จากสมการที่ (1) กรณีความแข็งแรงตามปกติไม่เสียหาย (The Normalized Intact Strength) จะได้รูปแบบสมการที่ (3) และจากสมการที่ (1) กรณีความแข็งแรงตามปกติเสียหาย (The Normalized Fracture Strength) จะได้รูปแบบสมการที่ (4) [22]

$$\sigma_i^* = A(P^* + T^*)^N \cdot (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (3)$$

$$\sigma_f^* = B(P^*)^M \cdot (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \leq SFMAX \quad (4)$$

2.4.2 โมเดลของ Johnson-Cook

Johnson-Cook Model คือแบบจำลองเชิงปรากฏการณ์ที่มักใช้ในการทำนายการตอบสนองของโลหะอาจได้รับผลกระทบและการเจาะเนื่องจากสามารถสร้างความเครียดได้การชุบแข็งผลกระทบจากอัตราความเครียดและการอ่อนตัวจากความร้อน คุณสมบัติเหล่านี้ควบคู่ไปในลักษณะทวีคูณโดยใช้สมการต่อไปนี้ [23]

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) [1 + C \ln \dot{\epsilon}^*] [1 - T^{*m}] \quad (5)$$

โดยที่ σ คือ ความเค้นเทียบเท่า (Equivalent Stress) และค่า ϵ คือ ความเครียดพลาสติกที่เท่าเทียมกัน (Equivalent Plastic Strain) A, B, C, m และ n คือ ค่าคงที่ของวัสดุ โดยที่ A คือ ค่าคงที่ภายใต้เงื่อนไขอ้างอิงความเค้นของวัสดุ B คือ ค่าคงที่การแข็งตัวของความเครียด n คือ สัมประสิทธิ์การแข็งตัวของความเครียด C คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเสริมความแข็งแรงของอัตราความเครียด (A Strain Rate Hardening Factor) และ m คือ ค่าสัมประสิทธิ์การอ่อนตัวด้วยความร้อน (Thermal-softening Factor) $\dot{\epsilon}^*$ คือ อัตราความเครียดไร้มิติที่อ้างอิงจากอัตราความเครียดต่อเวลาที่ $1/s$, T^* คือ อุณหภูมิไร้มิติ

(Nondimensional Temperature) กำหนดตัวแปร T^* ได้ด้วยสมการที่ (6) [23]

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (6)$$

โดยที่ T_r คือ อุณหภูมิห้อง (298 K) และ T_m คือ อุณหภูมิหลอมละลายของวัสดุ โดยค่าสมบัติของวัสดุ และพารามิเตอร์ของกระสุน 7.62x51 มิลลิเมตร เป็น วัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten Carbide) ที่ใช้ในการ จำลองแสดงในตารางที่ 1 สำหรับแผ่นเกราะกันกระสุน SKD 11 แสดงดังตารางที่ 2 สมบัติของแผ่นเกราะกัน กระสุนด้วยวัสดุ AL-7075 T6 แสดงดังตารางที่ 3 และ สมบัติของแผ่นเกราะกันกระสุน SUS 304 แสดงดัง ตารางที่ 4

ตารางที่ 1 สมบัติของ Tungsten Carbide [24], [25]

Properties	Tungsten carbide
Density (ρ , g/cm ³)	14.56
Young's modulus (E, GPa)	539
Poisson ratio (ν)	0.23
Bulk modulus (GPa)	332
Shear modulus (GPa)	219
Tensile yield strength (GPa)	3.85
Compressive yield strength (GPa)	4.53
Johnson-Holmquist Strength (Continuous JH-2)	
Damage type	Gradual (JH2)
Hugoniot Elastic Limit (HEL, GPa)	656
Intact strength constant (A)	0.9899
Intact strength exponent (n)	0.0322
Strain rate constant (C)	0
Fracture strength constant (B)	0.67
Fracture strength exponent (m)	0.0322
Maximum fracture strength ratio	1000
Damage constant (D1)	1
Damage constant (D2)	0
Hydrodynamic tensile limit (GPa)	-4

ตารางที่ 2 สมบัติของ SKD 11 [25], [26]

Properties	SKD11
Density (ρ , g/cm ³)	8.4
Modulus of elasticity (E, GPa)	208
Poisson ratio (ν)	0.3
Bulk modulus (GPa)	173
Shear modulus (GPa)	80
Thermal conductivity (W/mK)	20.5 (350°C)
Thermal expansion (W/mK)	11
Specific heat (J/kg °C)	461
Johnson-Cook Strength	
Initial yield stress (A, MPa)	1766
Hardening constant (B, MPa)	904
Hardening exponent (n)	0.39
Strain rate constant (C)	0.012
Thermal softening exponent	3.38
Melting temperature (K)	1733

ตารางที่ 3 สมบัติของ AL-7075 T6 [27]

Properties	AL-7075 T6
Density (ρ , g/cm ³)	2.804
Specific heat (J/kg °C)	848
Steinberg-Guinan Strength	
Initial yield stress (Y, MPa)	420
Max. yield stress (Ymax, MPa)	810
Shear modulus (GPa)	80
Hardening constant (B)	965
Hardening exponent (n)	0.1
Derivative (dG/dP, G'P)	1.74
Derivative (dG/dT, G'T), MPa/°C	-16.4
Derivative (dY/dP, Y'P)	0.02738
Melting temperature (T_{melt} , °C)	946.85
Shear modulus (GPa)	26.7
EOS	
Gruneisen coefficient	2.2
Parameter (C1, m/s)	5200
Parameter (S1)	1.36
Parameter quadratic (S2)	0

ตารางที่ 4 สมบัติของ SUS 304 [In ANSYS Program]

Properties	SUS304
Density (ρ , g/cm ³)	7.9
Specific heat (J/kg °C)	423
Initial yield stress (Y, MPa)	340
Max. yield stress (Ymax, MPa)	2,500
Shear modulus (GPa)	77
Hardening constant (B)	43
Hardening exponent (n)	0.35
Derivative (dG/dP, G'P)	1.74
Derivative (dG/dT, G'T), MPa/°C	-35.04
Derivative (dY/dP, Y'P)	0.007684
Melting temperature (T _{melting} , °C)	2,106.9
Shear modulus (GPa)	77
EOS	
Gruneisen coefficient	1.93
Parameter (C1, m/s)	4,570
Parameter (S1)	1.49
Parameter quadratic (S2, s/m)	0

2.5 โมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์

สร้างโมเดลแผ่นเกราะกันกระสุนให้มีขนาดพื้นที่ 300x300 mm กำหนดให้แผ่นเกราะมีเอลิเมนต์ชนิดเฮกซะฮีดรอล (Hexahedral) และหัวกระสุนส่วนที่แหลมเป็นเอลิเมนต์ชนิดเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) กำหนดหน้าสัมผัสด้วย Contacts Bodies เป็นแบบ Bonded ทั้งหมดของกระสุนจำนวน 12 หน้าสัมผัสควบคุมขนาดเอลิเมนต์โดยการปรับขนาดเอลิเมนต์จากขอบของแผ่นเกราะที่มีขนาดเอลิเมนต์ใหญ่ลู่เข้าไปยังกลางแผ่นเกราะที่มีขนาดเอลิเมนต์ที่เล็กลง ด้วยการกำหนด Bias Type และ Bias Factor เท่ากับ 12 ใช้เทคนิคการเพิ่มชั้นเอลิเมนต์ตลอดความหนาด้วยการกำหนด Number of Divisions เท่ากับ 3 กำหนดที่ผิวขอบของแผ่นเกราะทั้ง 4 ด้านเป็นแบบยึดแน่น (Fixed Support) กระสุนพุ่งเข้าแผ่นเกราะด้วยความเร็วตามมาตรฐาน NIJ 3 ที่ 847 m/s ทำมุมปะทะกับแผ่นเกราะที่ 0 องศา กำหนดชุดคำนวณเป็น AUTODYN ตั้งค่าการ

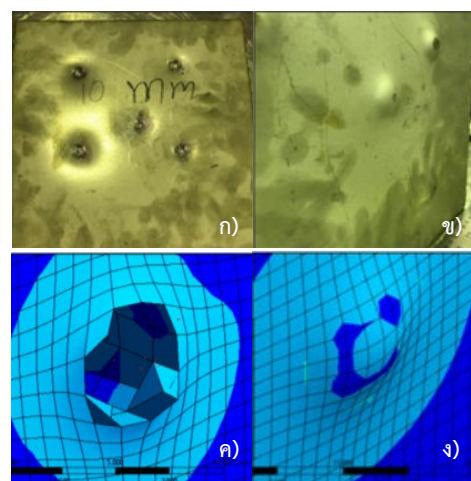
วิเคราะห์ด้วย End Time เท่ากับ 0.001 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย Equivalent (Von-Mises) Stress

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 เปรียบเทียบผลระหว่าง EXP กับ FEA

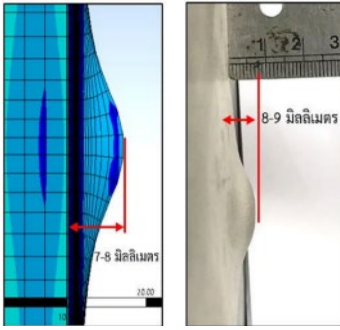
จากการทดสอบการยิงแผ่นเกราะที่โรงงานวัตถุระเบิดทหาร กรมการอุตสาหกรรมป้องกันประเทศและพลังงาน จ.นครสวรรค์ (Military Explosives Factory, Defence Industry Department, Defence Industry and Energy Centre) ตามมาตรฐาน NIJ 3 ด้วยกระสุนขนาด 7.62x51 mm NATO FMJ 148 Gr. ที่มุม 0 องศา ความเร็ว 847±9.1 m/s มีผลการทดสอบทั้งสองวิธีเปรียบเทียบกันเป็น 2 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 แผ่นเกราะด้านหน้าและด้านหลังมีความหนาแผ่นละ 10 mm ไม่มีระยะห่างระหว่างแผ่น ทำด้วยวัสดุ SUS304 ผลลัพธ์คือกระสุนได้เจาะทะลุแผ่นเกราะด้านหน้าอย่างสมบูรณ์แต่แผ่นเกราะด้านหลังไม่ทะลุ เกิดเป็นรอยย่นที่บริเวณด้านหลังแผ่นเกราะ ดังรูปที่ 1 และมีระยะย่นเปรียบเทียบทั้งสองวิธีดังรูปที่ 2 และแสดงให้เห็นว่าผลจากการจำลองกับผลการทดสอบจริงมีความสอดคล้องกัน



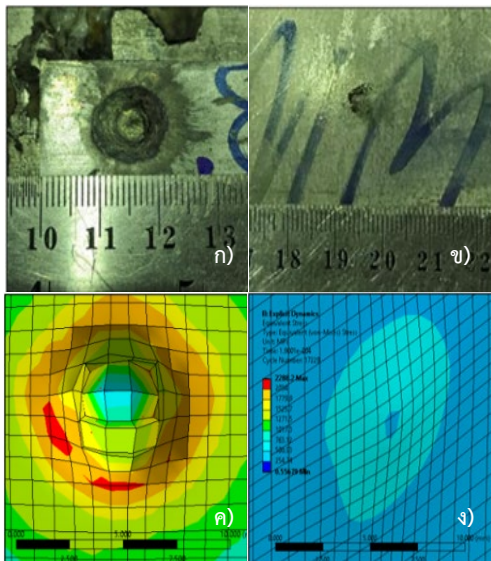
รูปที่ 1 ความเสียหายที่แผ่นเกราะสแตนเลส SUS304

ก) EXP. แผ่นด้านหน้า ข) EXP. แผ่นด้านหลัง ค) FEA แผ่นด้านหน้า และ ง) FEA แผ่นด้านหลัง [25]



รูปที่ 2 เปรียบเทียบระยะของแผ่นเกราะด้านหลัง
ด้วยวิธี EXP และ FEA [25]

กรณีที่ 2 แผ่นเกราะแผ่นด้านหน้าทำจากวัสดุ SKD11 มีความหนา 10 mm และแผ่นเกราะด้านหลังทำจาก SUS304 มีความหนา 10 mm ไม่มีระยะห่างระหว่างแผ่น ผลที่ได้คือแผ่นเกราะด้านหน้าและด้านหลังไม่เจาะทะลุ วัสดุขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางได้ประมาณ 9 mm แต่แผ่นเกราะด้านหน้าจะมีรอยบุ๋มดังรูปที่ 3 ดังนั้นผลจากการจำลองกับการทดสอบจริง มีความแตกต่างกันน้อยกว่าร้อยละ 10 แสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้อง



รูปที่ 3 ความเสียหายที่แผ่นเกราะสแตนเลส SKD11 ก) EXP. แผ่นด้านหน้า ข) EXP. แผ่นด้านหลัง ค) FEA แผ่นด้านหน้า และ ง) FEA แผ่นด้านหลัง [25]

3.2 ผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

แผ่นเกราะกันกระสุนด้านหน้าทำจาก SKD11 เป็นแบบแผ่นซ้อนและมีแผ่นอะลูมิเนียมเป็นแผ่นเกราะด้านหลังที่มีขนาดความหนาของวัสดุที่ 6, 8 และ 10 mm ที่การจำลองจะมีมุมกระแทกของกระสุนที่มุม 0, 30, และ 45 องศา โดยทำการปรับค่าความหนาของแผ่นเกราะที่ทำจาก SKD11 และ AL-7075 T6 ปรับค่าความหนาเริ่มตั้งแต่ 4 mm ไปจนถึง 10 mm และพบว่ามูมยังมีผลต่อความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุ ได้ผลการจำลองดังตารางที่ 2

ตารางที่ 5 ผลการจำลองแผ่นเกราะแบบซ้อนของวัสดุ SKD11 กับวัสดุ AL-7075 T6 และมุมมองการยิงของกระสุนบนแผ่นเกราะ

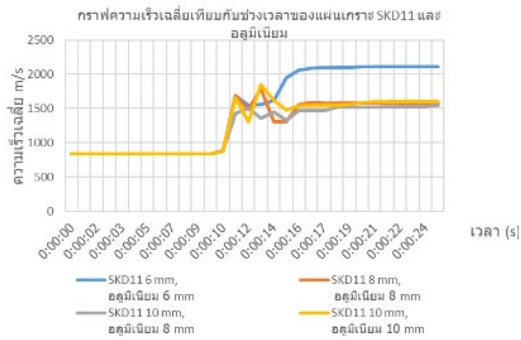
ความหนาแผ่นเกราะ (mm)		มุมกระแทก (องศา)		
แผ่นหน้า	แผ่นหลัง			
SKD11	AL-7075 T6	0	30	45
4	4	ทะลุ	ทะลุ	ทะลุ
5	5	ทะลุ	ทะลุ	ทะลุ
6	6	ทะลุ	ทะลุ	ไม่ทะลุ
8	8	ทะลุ	ไม่ทะลุ	ไม่ทะลุ
10	8	ทะลุ	ไม่ทะลุ	ไม่ทะลุ
10	10	ทะลุ	ไม่ทะลุ	ไม่ทะลุ

3.2.1 การจำลองมุมกระแทกที่ 0 องศา ด้วยความหนาของแผ่นซ้อนที่ 6, 8 และ 10 mm

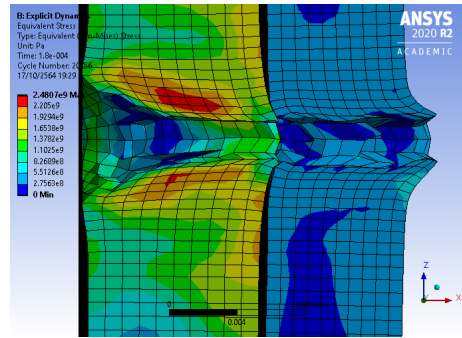
เปรียบเทียบความเค้นและความเร็วกระสุนที่วิเคราะห์ได้ด้วยรูปที่ 4-5 โดยปรับค่าความหนาของ SKD11 และ AL-7075 T6 ตั้งแต่ 6, 8 และ 10 mm



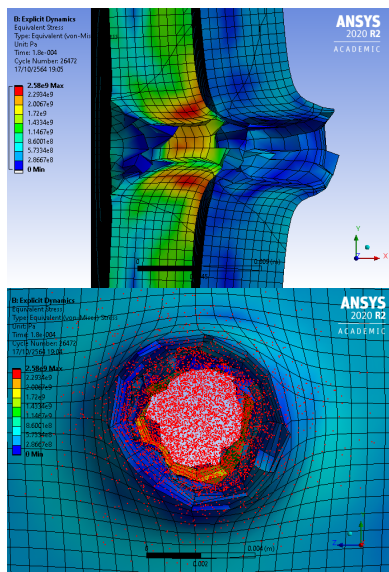
รูปที่ 4 ความเค้นเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และ AL-7075 T6 ที่มุมยิง 0 องศา



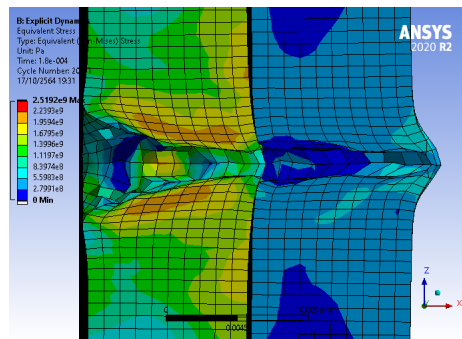
รูปที่ 5 ความเร็วเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และ AL-7075 T6 ที่มุมยิง 0 องศา



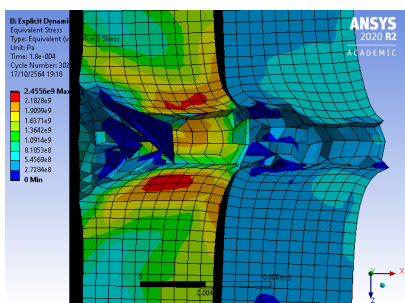
รูปที่ 8 แผ่นเกราะ SKD11 อยู่ด้านหน้ามีความหนา 10 mm และแผ่นเกราะ AL-7075 T6 อยู่ด้านหลังมีความหนา 8 mm มุมยิง 0 องศา



รูปที่ 6 แผ่นเกราะ SKD11 อยู่ด้านหน้ามีความหนา 6 mm และแผ่นเกราะ AL-7075 T6 อยู่ด้านหลังมีความหนา 6 mm มุมยิง 0 องศา



รูปที่ 9 แผ่นเกราะ SKD11 อยู่ด้านหน้ามีความหนา 10 mm และแผ่นเกราะ AL-7075 T6 อยู่ด้านหลังมีความหนา 10 mm มุมยิง 0 องศา



รูปที่ 7 แผ่นเกราะ SKD11 อยู่ด้านหน้ามีความหนา 8 mm และแผ่นเกราะ AL-7075 T6 อยู่ด้านหลังมีความหนา 8 mm มุมยิง 0 องศา

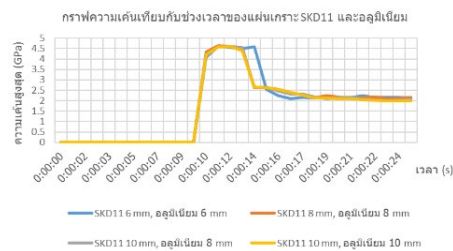
ผลการจำลองของแผ่นเกราะ SKD11 ซ้อนด้วยแผ่นเกราะอะลูมิเนียม ที่มุม 0 องศา โดยใช้ความเร็วในการจำลองของลูกกระสุนด้วยความเร็ว 847 m/s เห็นได้ว่าแผ่นเกราะซ้อนทุกขนาดความหนานั้นไม่สามารถต้านทานจากกระสุนต่อการเจาะทะลุได้ จากการพิจารณาของกราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลานั้นพบได้ว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะทุกขนาดนั้นมีความเค้นที่ไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งในส่วนของกราฟความเร็วเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลานั้นจะเห็นได้ว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะซ้อน SKD11 ขนาด 6 mm อะลูมิเนียม 6 mm นั้นความเร็วของกระสุนจะอย่างรวดเร็วในช่วงทะลุผ่านเกราะและจากรอยการทำลายของกระสุนบริเวณการเจาะทะลุนั้นจะเห็นได้ว่าความหนาของ

เกราะ SKD11 6 mm อะลูมิเนียม 6 mm นั้นมีขนาดใหญ่กว่าเกราะอื่นๆ ที่มีขนาดของความหนามากกว่าอย่างเห็นได้ชัด จากผลการจำลองนี้นั้นสรุปได้ว่าความหนาของแผ่นซ้อนที่ 0 องศา ไม่สามารถต้านทานต่อการเจาะทะลุของกระสุนได้

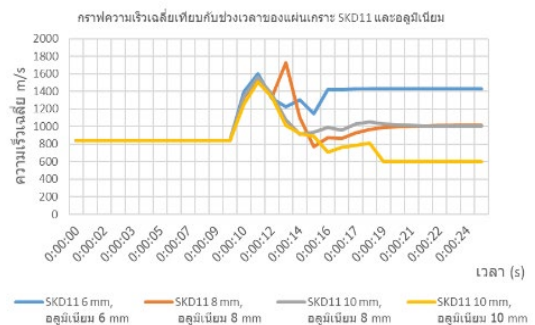
3.2.2 การจำลองมุมกระแทกที่ 30 องศา ด้วยความหนาของแผ่นซ้อนที่ 6, 8 และ 10 mm

ผลการจำลองของแผ่นเกราะ SKD11 ซ้อนด้วยแผ่นเกราะอะลูมิเนียม ที่มุม 30 องศา โดยใช้ความเร็วในการจำลองของลูกกระสุนด้วยความเร็ว 847 m/s จากรูปที่ 10-15 เห็นได้ว่าแผ่นเกราะซ้อน SKD11 ความหนา 6 mm อะลูมิเนียมความหนา 6 mm ไม่สามารถต้านทานจากกระสุนต่อการเจาะทะลุได้ แต่ที่ความหนาของแผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 8 mm อะลูมิเนียมความหนา 8 mm, SKD11 ความหนา 10 mm อะลูมิเนียมความหนา 8 mm และ SKD11 ความหนา 10 mm อะลูมิเนียมความหนา 10 mm สามารถต้านทานจากกระสุนต่อการเจาะทะลุได้ จากการพิจารณาของกราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลานั้นพบได้ว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะทุกขนาดนั้นมีความเค้นที่ไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งในส่วนของกราฟความเร็วเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลานั้นจะเห็นได้ว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะซ้อน SKD11 ความหนา 10 mm อะลูมิเนียมความหนา 10 mm นั้นมีความเร็วหลังจากการเจาะทะลุต่ำสุด เนื่องจากการต้านทานของเกราะกันกระสุนที่มีความหนาที่สูงทำให้สามารถหยุดการกระจายของเศษกระสุนและจากรอยการทำลายของกระสุนบริเวณการเจาะทะลุนั้นจะเห็นได้ว่าความหนาของเกราะซ้อน SKD11 ความหนา 6 mm อะลูมิเนียมความหนา 6 mm มีรอยขนาดใหญ่หลังจากการเจาะทะลุแต่ในส่วนที่แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 8 mm อะลูมิเนียมความหนา 8 mm, SKD11 ความหนา 10 mm อะลูมิเนียมความหนา 8 mm และ SKD11 ความหนา 10 mm อะลูมิเนียมความหนา 10 mm เกราะชั้นนอกมีการเจาะ

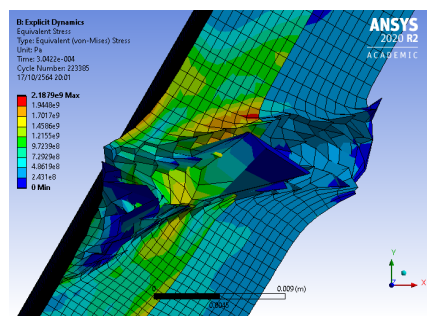
ทะลุแต่ไม่ถึงแผ่นซ้อนชั้นใน จากผลการจำลองนี้นั้นสรุปได้ว่าที่ 30 องศา ของการจำลองยิงของกระสุนในไฟไนต์เอลิเมนต์ความหนาของแผ่นเกราะกันกระสุนเป็นผลต่อการต้านทานของการเจาะทะลุอย่างเห็นได้ชัดโดยการต้านทานของเกราะกันกระสุนนั้นเริ่มที่ความหนาของเกราะ SKD11 ชั้นนอกที่ 8 mm แต่ในส่วนแผ่นเกราะ SKD11 ชั้นนอกที่ 6 mm นั้นกระสุนสามารถเจาะทะลุได้อย่างสมบูรณ์



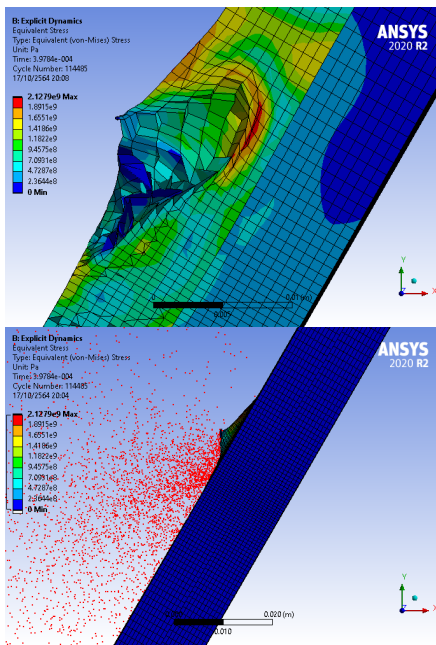
รูปที่ 10 ความเค้นเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และ AL-7075 T6 ที่มุมยิง 30 องศา



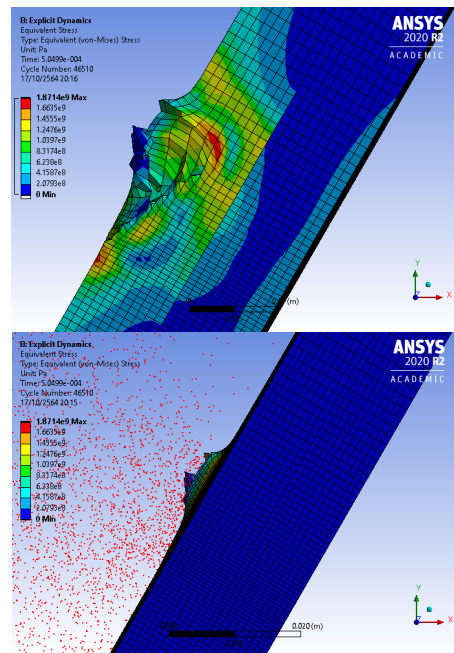
รูปที่ 11 ความเร็วเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และ AL-7075 T6 ที่มุมยิง 30 องศา



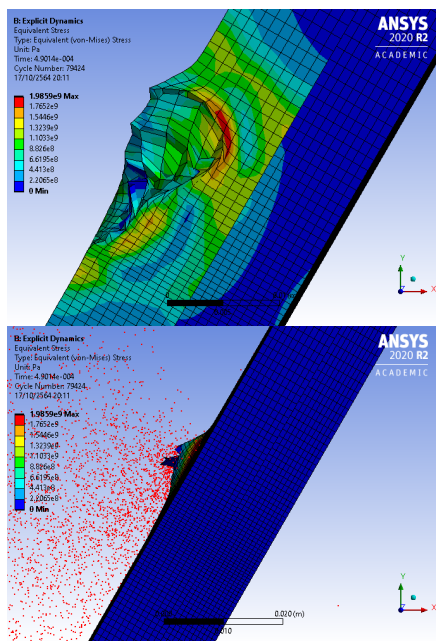
รูปที่ 12 แผ่นเกราะ SKD11 อยู่ด้านหน้ามีความหนา 6 mm และแผ่นเกราะ AL-7075 T6 อยู่ด้านหลังมีความหนา 6 mm มุมยิง 30 องศา



รูปที่ 13 แผ่นเกราะ SKD11 อยู่ด้านหน้ามีความหนา 8 mm และแผ่นเกราะ AL-7075 T6 อยู่ด้านหลังมีความหนา 8 mm มุมยิง 30 องศา



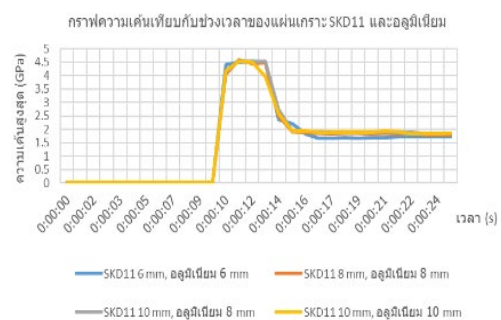
รูปที่ 15 แผ่นเกราะ SKD11 อยู่ด้านหน้ามีความหนา 10 mm และแผ่นเกราะ AL-7075 T6 อยู่ด้านหลังมีความหนา 10 mm มุมยิง 30 องศา



รูปที่ 14 แผ่นเกราะ SKD11 อยู่ด้านหน้ามีความหนา 10 mm และแผ่นเกราะ AL-7075 T6 อยู่ด้านหลังมีความหนา 8 mm มุมยิง 30 องศา

3.2.3 การจำลองมุมกระแทกที่ 45 องศา ด้วยความหนาของแผ่นชั้นที่ 6, 8 และ 10 mm

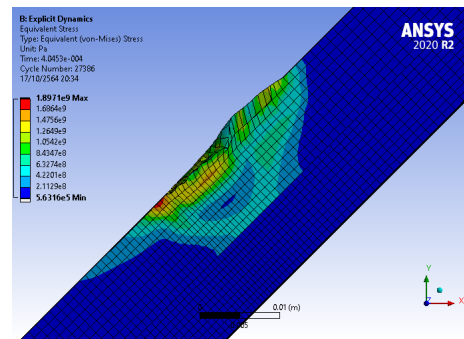
ผลการจำลองแสดงให้เห็นมุมยิงที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความหนาเดิมนี้กลับไม่สามารถต้านทานการเจาะทะลุได้ ดังนั้นจึงเป็นแนวทางในการออกแบบแผ่นเกราะที่มีหน้าเรียบเป็นแผ่นเกราะที่มีหน้าไม่เรียบ เพื่อสร้างมุมยิงให้เกิดขึ้น มีผลดังรูปที่ 16-21



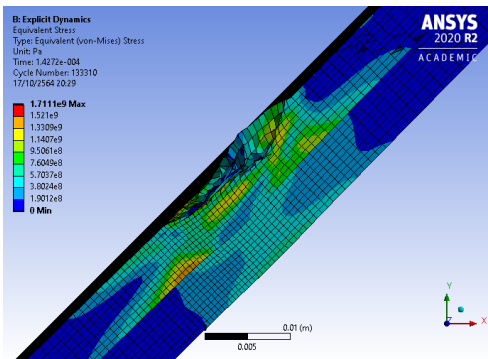
รูปที่ 16 ความเค้นเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และ AL-7075 T6 ที่มุมยิง 45 องศา



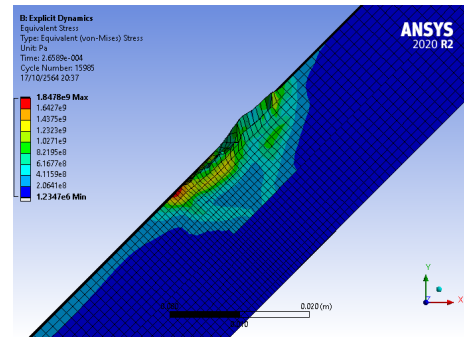
รูปที่ 17 ความเร็วเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และ AL-7075 T6 ที่มุมยิง 45 องศา



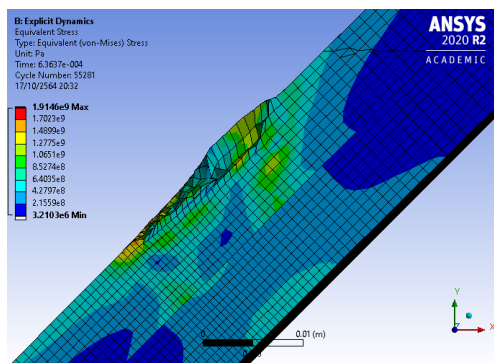
รูปที่ 20 แผ่นเกราะ SKD11 อยู่ด้านหน้ามีความหนา 10 mm และแผ่นเกราะ AL-7075 T6 อยู่ด้านหลังมีความหนา 8 mm มุมยิง 45 องศา



รูปที่ 18 แผ่นเกราะ SKD11 อยู่ด้านหน้ามีความหนา 6 mm และแผ่นเกราะ AL-7075 T6 อยู่ด้านหลังมีความหนา 6 mm มุมยิง 45 องศา



รูปที่ 21 แผ่นเกราะ SKD11 อยู่ด้านหน้ามีความหนา 10 mm และแผ่นเกราะ AL-7075 T6 อยู่ด้านหลังมีความหนา 10 mm มุมยิง 45 องศา



รูปที่ 19 แผ่นเกราะ SKD11 อยู่ด้านหน้ามีความหนา 8 mm และแผ่นเกราะ AL-7075 T6 อยู่ด้านหลังมีความหนา 8 mm มุมยิง 45 องศา

4. สรุป

สรุปผลการการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อวิเคราะห์รูปแบบความเสียหายและความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุของแผ่นเกราะ SKD11 และเกราะ AL-7075 T6 ตามมาตรฐาน NIJ 3 ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการจำลองนี้ได้เปรียบเทียบความสอดคล้องกับการทดลองจริง เพื่อยืนยันผลการจำลอง โดยการนำการเสนอข้อมูลของผลการศึกษาและสมมติฐานการวิจัย พบว่าสอดคล้องกันโดยพิจารณาความเสียหายที่เกิดกับแผ่นเกราะด้วยรอยร้าวของเกราะกันกระสุนที่ต่างกัน 1 mm (น้อยกว่าร้อยละ 10) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ ดังนั้นจึงได้ใช้โปรแกรม

ไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS Explicit Dynamic ในจำลองความเสียหายของแผ่นเกราะที่สามารถต้านทานการเจาะทะลุของมาตรฐาน NIJ 3 ได้ตัวแปรที่มีผลต่อการวิเคราะห์แผ่นเกราะกันกระสุนในการจำลองนี้นั้นมี 5 องค์ประกอบหลักคือ

1. ชนิดของวัสดุสำหรับสร้างแผ่นเกราะกันกระสุนและชนิดวัสดุที่นำมาทำกระสุน คือปัจจัยหลักของการป้องกันและการทำลายเกราะ

2. ความเร็วของกระสุนเป็นปัจจัยหลักที่ใช้ในการจำลอง ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน NIJ

3. มุมกระแทกของกระสุนที่มีแนวกระสุนกระทำเข้าที่เจาะแผ่นเกราะกันกระสุนเป็นปัจจัยหลักเมื่อมุมของกระสุนเอียงจะทำให้หน้าสัมผัสของกระสุนลดลง และยังช่วยให้กระสุนเปลี่ยนทิศทางการกระแทกอีกด้วย

4. ความหนาของแผ่นเกราะกันกระสุนเป็นปัจจัยหลักของความต้านทาน

5. ขนาดของเมชที่ใช้การในการวิเคราะห์เป็นปัจจัยร่วมบ่งบอกถึงความละเอียดจากความเสียหายเมื่อขนาดเมชเล็กจะส่งผลถึงความละเอียดและการใช้เวลาในการจำลองยาวนาน

วัสดุเกราะกันกระสุนที่ใช้จากการจำลองนี้มี 2 ชนิดคือ 1.SKD11 2. อะลูมิเนียม AL-7075 โดยการจำลองจะแบ่งออกเป็นจำลองแผ่นเกราะแบบซ้อนขนาดของแผ่นเกราะนั้นมีขนาด 6, 8, และ 10 มิลลิเมตร โดยมุมมองของการยิงเกราะกันกระสุนนั้นมีมุมที่ 0, 30 และ 45 องศา ซึ่งวัสดุของกระสุนที่กำหนดคือทั้งสเตนคาร์ไบด์ โดยการจำลองแบบแผ่นซ้อนนั้นได้ศึกษาพฤติกรรมของความเสียหายของแต่ละวัสดุว่าความเสียหายของผิวเกราะ ความแข็งแรงของวัสดุ ความเค้นสูงสุดที่ได้ซึ่งสามารถวิเคราะห์แสดงผลได้จากโปรแกรม ANSYS และจากความเสียหายของวัสดุโดยการอ้างอิงความเสียหายจากทฤษฎีความเสียหาย Johnson Cook โดยการกำหนดเงื่อนไขของความเสียหายในโปรแกรม ANSYS Explicit Dynamic ในความเร็วหลังจากการ

กระจายตัวของกระสุนนั้นมีมากเพียงใด ความสอดคล้องกันจึงแสดงให้เห็นว่าการจำลองด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นสามารถคาดการณ์ความเสียหายของแผ่นเกราะกันกระสุนได้ เพื่อช่วยในการลดงบประมาณในการวิจัยและระยะเวลาในการวิจัยแผ่นเกราะกันกระสุน

กรณีจากการวิเคราะห์มุมกระแทกของศาเริ่มที่ 30 องศาขึ้นไปจะเห็นได้ว่าเกราะกันกระสุนจะสามารถต้านทานการเจาะทะลุได้ อันเนื่องมาจากมุมมองของกระสุนเอียงจะทำให้เกิดการหักเหของกระสุน เป็นการเพิ่มระยะทางในการหยุดกระสุน แต่ในส่วนของความหนาที่แผ่นที่มีขนาดความหนาแผ่นซ้อนที่ 6 mm ที่มุม 30 องศาทะลุผ่าน เนื่องจากความหนายังไม่เพียงพอสำหรับการต้านทานกระสุนขนาด 7.62 mm ความเร็ว 847 ± 9.1 m/s ประโยชน์จากการทำวิจัยนี้จะเป็นข้อมูลและแนวทางเพื่อได้ต้นแบบการออกแบบเกราะกันกระสุนและยังสามารถลดต้นทุนการออกแบบทดสอบเกราะกันกระสุน พร้อมทั้งสามารถพัฒนาต่อยอดการออกแบบเกราะกันกระสุนต่อไปอีกด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนทุนการวิจัยประจำปี พ.ศ. 2560 ตามสัญญาทุนวิจัยเลขที่ วช(อ)(กบ)/47/2561 โดยบทความวิจัยนี้เป็นผลจากการทำวิจัยต่อยอดจากทุนที่ได้รับและขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่สนับสนุนเครื่องมือ สถานที่ และสิ่งอำนวยความสะดวกในการดำเนินการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] W.S. Lee and T.T. Su, "Mechanical properties and microstructural features of AISI 4340 high strength alloy steel under quenched and tempered conditions," *J. Mat. Process Technol*, vol. 87, pp. 198–206, 1999.

- [2] A.K. Srivastava, G. Jha, N. Gope and S.B. Singh, “ Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of cold rolled C–Mn–Si Trip aided steel,” *Mat Charact*, vol. 57, pp. 127–135, 2006.
- [3] P.K. Ray, R.I. Ganguly and A.K. Panda, “Optimization of mechanical properties of an HSLA-100 steel through control of heat treatment variables,” *Mater Sci Eng A*, vol. 346, pp. 122–131, 2003.
- [4] S.K. Dhua, A. Ray and D.S. Sarma “Effect of tempering temperatures on the mechanical properties and microstructures of HSLA–100 type copper bearing steels,” *Mater Sci Eng A*, vol. 318, pp. 197–210, 2001.
- [5] P.K. Jena, K. Sivakumar and T. B. Bhat “Effect of heat treatment on mechanical and ballistic properties of ultra- high strength DMR- 7 0 0 steel,” *Met Mater Process*, vol. 19, no. 1–4, pp. 339–346, 2007.
- [6] P.K. Jena, K. Ramanjeneyulu, K. Sivakumar and T.B. Bhat, “Ballistic studies on layered structures,” *Mater Des*, vol. 30, no. 6, pp. 1922–1931, 2009.
- [7] T. Demir, M. Übeyli and R.O. Yıldırım, “ Investigation on the ballistic impact behavior of various alloys against 7.62 mm armor piercing projectile,” *Mater Des*, vol. 29, pp. 2009–2016, 2008.
- [8] P.K. Jena, B. Mishra, M. Ramesh Babu, A. Babu, A.K. Singh, K. Sivakumar and T. BalakrishnaBhat, “Effect of heat treatment on mechanical and ballistic properties of a high strength armour steel,” *Int J Impact Eng*, vol. 37, pp. 242–249, 2010.
- [9] N.K. Gupta, M.A. Iqbal and G.S. Sekhon, “Experimental and numerical studies on the behavior of thin aluminum plates subjected to impact by blunt – and hemispherical- nosed projectiles,” *Int J Impact Eng*, vol. 32, pp. 1921–1944, 2006.
- [10] J.C.F. Millet, N.K. Bourne and M.R. Edwards, “The effect of heat treatment on the shock induced mechanical properties of aluminium alloy-7017,” *Scripta Mater*, vol. 51, pp. 967–971, 2004.
- [11] Y.B. Lee, D.H. Shin, K.T. Park and W.J. Nam, “ Effect of annealing temperature on microstructures and mechanical properties of a 5083 Al alloy deformed at cryogenic temperature,” *Scripta Mater*, vol. 51, pp. 355–359, 2004.
- [12] L. D. Oosterkamp, A. Ivankovic and G. Venizelos, “High strain rate properties of selected aluminium alloys,” *Mater Sci Eng A*, vol. 278, pp. 225–235, 2000.
- [13] T. Borvik, A.H. Clausen, O.S. Hopperstad and M. Langseth, “Perforation of AA5083-H116 aluminium plates with conical-nose steel projectiles experimental study,” *Int J Impact Eng*, vol. 30, pp. 367–384, 2004.
- [14] K. Siva kumar, Singh Dinesh and T.B. Bhat, “ Studies on aluminium armour plates impacted by deformable and non-deformable projectile,” *Mater Sci Forum*, vol. 465–466, pp. 79–84, 2004.

- [15] Ozs_ahin Evren and Tolun Suleyman, "On the comparison of the ballistic response of coated aluminum plates," *Mater Des*, vol. 31, pp. 3188-3193, 2010.
- [16] E. Ozs_ahin and S. Tolun, "Influence of layer sequencing on ballistic resistance of polyethylene supported AA 7075 T651 plates," *J Istanbul Technol Univ*, vol. 8, no. 2, pp. 72-80, 2009.
- [17] M. Balakrishnan, V. Balasubramanian and G. Madhusudhan Reddy, "Effect of PTA hardfaced interlayer thickness on ballistic performance of shielded metal arc welded armor steel welds," *J Mater Eng Perform*, vol. 22, no. 3, pp. 806, Mar. 2013.
- [18] M. Balakrishnan, V. Balasubramanian and G. Madhusudhan Reddy, "Effect of hardfaced interlayer thickness on ballistic performance of armour steel weldsm," *Mater Des*, vol. 44, pp. 59-68, 2013.
- [19] M. Balakrishnan, V. Balasubramanian and G. Madhusudhan Reddy, "Effect of joint design on ballistic performance of quenched and tempered steel welded joint," *Mater Des*, vol. 54, pp. 616-623, 2014.
- [20] S. Babu, V. Balasubramanian, G. Madhusudhan Reddy and TS. Balasubramanian, "Improving the ballistic immunity of armour steel weldments by plasma transferred arc (PTA) hardfacing," *Mater Des*, vol. 31, pp. 2664-2669, 2010.
- [21] M. Balakrishnan, V. Balasubramanian, G. Madhusudhan Reddy and K. Sivakumar, "Effect of buttering and hardfacing on ballistic performance of shielded metal arc welded armour steel joints," *Mater Des*, vol. 32, pp. 469-479, 2011.
- [22] J. Wang, Y. Yin and C. Luo, "Johnson-Holmquist-II (JH-2) Constitutive Model for Rock Materials: Parameter Determination and Application in Tunnel Smooth Blasting," *Appl. Sci.*, vol. 8, pp. 1675, 2018.
- [23] W. Hubert, Jr. Meyer and D. S. Kleponis, "An Analysis of Parameters for the Johnson-Cook Strength Model for 2-in-Thick Rolled Homogeneous Armor," Army Research Laboratory, Jun. 2001.
- [24] F. M. John, T. Jan Arild, S. Stian, B. Svien Morten, S.-E. Lasse and F. Haakon, "Development of material models for semi-brittle materials like tungsten carbide," *Norwegian Defence Research Establishment (EFI)*, pp. 1-51, Nov. 2010.
- [25] K. Navapon and C. Prakorb, "Parameter analysis of SKD11 and SUS304 bulletproof plate that resistance penetration of bullet 7.62 mm according to standard NIJ 4 by finite element method," *International Journal of Mechanical Engineer and Technology.*, vol. 10, pp. 207-221, Sep. 2019.
- [26] J. L. Li, L. L. Jing and M. Chen, "An FEM study on residual stresses induced by high-speed end-milling of hardened steel SKD11," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, no. 9, pp. 4515-4520, May 2009.
- [27] Steinberg D.J. LLNL, "Equation of State and Strength Properties of Selected Materials", Feb. 1991.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

สมบัติทางกลของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดเชิงประกอบด้วย อลูมิเนียมออกไซด์สำหรับการใช้งานทางวิศวกรรม

งามพรรณ ชะโล และ ประกอบ ชาติฤกษ์*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กทม. 10800

รับบทความ 31 มีนาคม 2565 แก้ไขบทความ 19 พฤษภาคม 2565 ตอบรับบทความ 20 พฤษภาคม 2565

บทคัดย่อ

ในการดำเนินการวิจัยด้านวัสดุเพื่อหาสูตรส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบสองชนิด คือ พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE) กับผงอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน (Hot Compression Molding Process) ที่ให้ค่าสมบัติทางกลที่ดี สภาวะที่เหมาะสมในการอัดขึ้นรูปอยู่ภายใต้ความดัน 100 bar และอุณหภูมิ 140 °C จากนั้นดำเนินการอัดขึ้นรูปวัสดุ UHMWPE ที่ผสมแล้วด้วยอัตราส่วนผสมต่างๆ ที่มีฟิลเลอร์เป็น Al_2O_3 ขนาดอนุภาค 0.3 μm (300 nm), 0.05 μm (50 nm), Calcined Al_2O_3 B-grad 5 μm และ Al_2O_3 HTM 2-5 μm จากการวิจัยได้เลือกใช้เกรดของ Al_2O_3 เป็น Al_2O_3 HTM 30 มีขนาดอนุภาคผงไม่สม่ำเสมอเคล้ากันไปอยู่ในช่วง 2 ถึง 5 μm และปริมาณการผสม Al_2O_3 ที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงสมบัติทางกลและสมบัติความต้านทานการสึกหรอของวัสดุก่อน UHMWPE Composite คือ UHMWPE+ Al_2O_3 HTM 30 ที่อัตราส่วนร้อยละ 95:5 โดยพิจารณาทั้งในด้านสมบัติของวัสดุและต้นทุน ในการทดสอบการกระแทกพบว่า Al_2O_3 HTM 2-5 μm จะให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกสูงกว่าอลูมิเนียมออกไซด์เกรดอื่นๆ ด้วยค่าที่สูงถึง 586.8 J/m ที่อัตราส่วนผสมอลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 5 การทดสอบค่าความแข็งแรงของ UHMWPE+ Al_2O_3 HTM 2-5 μm พบว่าให้ค่าความแข็งแรงอยู่ที่ 58.8 ด้วยเครื่องมือมาตรฐาน Durometer การทดสอบแรงดึงได้ค่าต่างๆ ประกอบด้วย Yield strength, Ultimate tensile strength, Elongation at break และ Modulus of elasticity เท่ากับ 20.52 MPa, 29.96 MPa, 265.80% และ 784.46 MPa ตามลำดับ

คำสำคัญ : สมบัติทางกล; พอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด; อลูมิเนียมออกไซด์

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Mechanical Properties of UHMWPE Composite with Al_2O_3 for Application in Engineering

Ngampan Chalo and Prakorb Chartpuk*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

1381 Pracharat 1 Road, Wongsawang Sub-district, Bang Sue District, Bangkok 10800

Received 31 March 2022; Revised 19 May 2022; Accepted 20 May 2022

Abstract

In conducting the research on Material Science, two composite materials, ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) powder and aluminum oxide (Al_2O_3) powder were formulated by hot compression molding process. The formulated materials demonstrated good mechanical properties. Based on the studies, the Al_2O_3 grade selected was Al_2O_3 HTM 30 harboring mixed uneven powder particle sizes ranging from 2 to 5 microns (μm) and selected proportion of Al_2O_3 alloy mixed for improving mechanical and wear resistance properties of the UHMWPE composite material was the UHMWPE+ Al_2O_3 HTM 30 at a ratio of 95:5%. When considering both material properties and cost effectiveness in the impact test, 2-5 μm Al_2O_3 HTM carried the higher impact strength than other aluminum oxide grades with the values up to 586.8 J/m at a ratio of 5% aluminum oxide. The hardness test of the 2-5 μm UHMWPE+ Al_2O_3 HTM delivered the hardness at 58.8 using the standard durometer. The tensile test values consisted of yield strength, ultimate tensile strength, elongation at break, and modulus of elasticity equal to 20.52 MPa, 29.96 MPa, 265.80% and 784.46 MPa, respectively.

Keywords : Mechanical Properties; UHMWPE; Al_2O_3

* Corresponding Author. Tel.: +669 8279 5855, E-mail Address: prakorb.c@rmutp.ac.th

1. บทนำ

ภาคอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ในปัจจุบันให้ความสำคัญกับการนำพอลิเมอร์มาใช้งานทางด้านวิศวกรรมมากขึ้น แต่พอลิเมอร์บริสุทธิ์มีสมบัติทางกลและสมบัติความต้านทานการสึกหรอยังไม่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานบางอย่างทางวิศวกรรม พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้งานคือ พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (Ultra High Molecular Weight Polyethylene, UHMWPE) สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านการแพทย์ เช่น นำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนรองลื่นที่เป็นส่วนประกอบของข้อต่อเทียมต่างๆ (Total Joint Replacement) สำหรับงานศัลยกรรมกระดูกและกล้ามเนื้อ การพัฒนาขาเทียมเพื่อทดแทนกระดูกอ่อนที่เสียหายในข้อสะโพกและข้อเข่า [1]-[3] หรือการนำเอา UHMWPE ที่ทำการขึ้นรูปแล้วมาประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรม นำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกล อาทิเช่น เพื่อง์ เกียร์ แบร็งค์ ชิ้นส่วนรองลื่นสำหรับเครื่องจักรกลชนิดต่าง ๆ [4]

เนื่องจาก UHMWPE เป็นวัสดุพอลิเมอร์หรือพลาสติกวิศวกรรมในกลุ่มพอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) ที่มีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งผลึก (Semi Crystalline) มีสมบัติโดดเด่นทางด้านความต้านทานการสึกหรอ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ มีความลื่นตัวสูง ทนต่อแรงกระแทก มีความเหนียวต่อปฏิกิริยาเคมีและสารเคมีต่าง ๆ [4], [5] ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการปรับปรุงสมบัติต่างๆ เหล่านี้ด้วยการผสมสารเติมแต่ง (Additives) ชนิดต่างๆ เข้าไปเพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ ให้สูงขึ้นและเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานเฉพาะทาง เนื่องจากการใช้งานของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเหล่านี้ต้องทำงานภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกันและสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ ความสึกหรอที่เกิดขึ้นจะเพิ่มมากขึ้นหากชิ้นส่วนต่างๆ อยู่ภายใต้อุณหภูมิที่สูงขึ้น และการทำงานที่อยู่ภายใต้สภาวะที่มีความดันและความเครียดสูง เครื่องจักรต้องได้รับการตรวจสอบและบำรุงรักษาเป็น

ประจำและชิ้นส่วนจะถูกเปลี่ยนบ่อยขึ้น และนอกจากนี้ยังมีการผสมสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านการขึ้นรูป ซึ่งพอลิเมอร์ที่ผ่านการผสมสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านการขึ้นรูปนี้โดยทั่วไปจะถูกเรียกว่า พอลิเมอร์คอมปาวด์ (Polymer Compound) สารเติมแต่งที่ใช้ผสมเพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์คือ ฟิลเลอร์ (Filler) ซึ่งหมายถึงสารเติมแต่งที่ผสมกับพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มเนื้อหรือปรับปรุงสมบัติทางกลของพอลิเมอร์และนอกจากนี้ในบางกรณีฟิลเลอร์ยังมีส่วนช่วยลดต้นทุนการผลิตชิ้นงานที่ทำจากพอลิเมอร์เปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มเนื้อแต่จะส่งผลต่อสมบัติบางประการที่เปลี่ยนไปในทางลบหรือบวกก็เป็นได้ Al_2O_3 เป็นเซรามิกชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มสมบัติทางกล ด้วยสมบัติที่โดดเด่นของวัสดุเซรามิกทำให้มีความเหมาะสมเป็นพิเศษ เช่น ค่าความแข็งที่สูง สามารถต้านทานสูงต่อการขีดขูด มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำ มีความต้านทานต่อการสารเคมีที่ดี และความสามารถในการทนต่ออุณหภูมิสูง

O. Hussain et al. [1] นำเสนอวัสดุผสมไฮบริด UHMWPE/nano- Al_2O_3 /Vitamin-C ที่เหมาะสำหรับใช้เป็นกระดูกอ่อนเทียมในข้อต่อเทียม Al_2O_3 ถูกใช้เป็นสารเติมแต่งต่อต้านการสึกหรอใน UHMWPE พบว่าเมื่อผสม Al_2O_3 2 wt% จะมีประสิทธิภาพต้านทานการสึกหรอได้ดีกว่าวัสดุผสมอื่นๆ สารเติมแต่งจึงถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการปรับปรุงสมบัติเชิงหน้าที่ของพอลิเมอร์คอมโพสิต UHMWPE [6], [7] ด้วยการเสริมแรงกระจายสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของ UHMWPE [2], [8], [9] ได้อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามต้องให้ความสนใจกับการก่อตัวของโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสม ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลที่เกิดขึ้น F.S. Senatov et al. [10] ได้ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของวัสดุผสม UHMWPE ที่เติมด้วยอนุภาคนาโน Al_2O_3 และไมโครสเฟียร์หลังการเปิดใช้งานเชิงกล เนื่องจาก UHMWPE มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ที่

จุดหลอมเหลวจึงมีความหนืดสูงมากและพารามิเตอร์การแพร่ตัวเองของสายโซ่โมเลกุลต่ำมาก ซึ่งนำไปสู่ความยากลำบากในการรวมตัวและการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันในระหว่างการเผาผนึกเป็นผลให้เกิดข้อบกพร่องทางโครงสร้างในผลิตภัณฑ์ UHMWPE ได้ J.J. Wu et al. [11] จึงได้ศึกษาเกี่ยวกับบทบาทสำคัญของลำดับอุณหภูมิ-เวลาในสถานะหลอมเหลวระหว่างกระบวนการผลิต สำหรับช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวคือ 145–200°C เป็นเวลา 10–90 นาที โดยพื้นฐานแล้วจะมีเส้นทางความเค้น-ความเครียดเหมือนกัน ซึ่งสะท้อนความไม่แปรเปลี่ยนของระดับความเป็นผลึก

ดังนั้นในบทความนี้ได้เลือกใช้สารเติมแต่งที่เป็นผงอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) มุ่งเน้นหาสูตรสำหรับการผสมและสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมของ UHMWPE ที่ถูกผสมด้วย Al_2O_3 เพื่อให้ทราบสมบัติทางกลและนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเชิงประกอบในการขึ้นรูปล้อรันแฟลท (Run-Flat) สำหรับรถยนต์นั่งและรถบรรทุกขนาดเล็กต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

ในระเบียบวิธีวิจัยได้กำหนดวัสดุเป็น UHMWPE และ Al_2O_3 ที่นำมาใช้ในการวิจัย ซึ่ง UHMWPE มีขนาดอนุภาคในช่วง 80-100 μm ตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่ามีความบริสุทธิ์และในการดำเนินงานสร้างขึ้นทดสอบจะปราศจากการปนเปื้อนต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตจะผลิตชิ้นงานทดสอบด้วยการอัดขึ้นรูปร้อน และได้วัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous Material) มีการกระจายตัวของอนุภาค Al_2O_3 ทั่วทั้งปริมาตรของชิ้นทดสอบ และมีสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทุกทาง (Isotropic Materials)

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1. วัสดุผง UHMWPE U511 เป็นพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด พร้อมตัวกันการกัดกร่อน (CS) ในรูปแบบผงโดยมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยประมาณ 5.5

ล้านกรัมต่อโมล มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 125 μm น้ำหนักโมเลกุลที่สูงมากให้คุณสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์หลายประการ รวมถึงความต้านทานต่อการเสียดสีสูง ความต้านทานแรงกระแทก และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ ที่ผลิตโดยบริษัท IRPC Public Company Limited ประเทศไทย มีสมบัติดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE) [12]

Properties	Method	Unit	Value
Density	ISO 1183	g/cm^3	0.93
Bulk density	ISO 60	g/cm^3	≥ 0.40
Intrinsic viscosity $[\eta]$	ISO 1628-3	mL/g	2300
Average molecular weight (cal.)	Margolies's Eq.	g/mol	5.5×10^6
Average particle size, X50	Laser Scattering	μm	150
Tensile strength at yield	ISO527	MPa	22
Tensile strength at break	ISO527	MPa	35
Ultimate elongation	ISO527	%	≥ 300
Izod impact strength	ASTM D256	J/m	NB
Hardness	ISO 868	Shore D	63
Melting temperature (10°C/min)	ASTM D3418	°C	130–135
Vicat softening point (1 kg)	ISO 306	°C	125–128

ตารางที่ 2 สมบัติของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) [13]

Property	Al_2O_3
Molecular weight (10^6 g/mol)	101.96
Melting temperature (°C)	2072
Poisson's ratio	0.22
Specific gravity (g/cm^3)	3.96
Tensile modulus of elasticity (GPa)	370
Compressive Strength (MPa)	2600
Tensile ultimate strength (MPa)	260
Fracture Toughness $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	4
Density (g/cc)	3.9

2. Al_2O_3 มีสมบัติดังตารางที่ 2 และผ่านการตรวจสอบรูปลักษณะพื้นฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ประกอบด้วย

- 0.05 μm (50 nm) เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท BUEHLER จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา

- 0.3 μm (300 nm) เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท
BUEHLER จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา

- 2-5 μm เป็น Al_2O_3 99.5%, HTM30 Grade,
Alpha Phase ผ่านการ Calcined ผลิตโดยบริษัท
Indian Aluminium Co.,Ltd.

- 5 μm เป็น Al_2O_3 99.4%, Calcined B-grade
ผลิตโดยบริษัท Indian Aluminium Co., Ltd.

2.2 เครื่องมือและมาตรฐานการทดสอบ

1. เครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความละเอียด 0.0001 g /0.1 mg ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น ATX224R
2. เตาอบลมร้อนยี่ห้อ Binder รุ่น FD 53L
3. เครื่องโฮโมจีไนส์แบบความเร็วรอบสูง (High Speed Homogenizer) และเครื่องกระจายอัลตราโซนิค (Ultrasonic Disperser)
4. แม่พิมพ์และเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน
5. เครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ สำหรับตัดแต่งชิ้นทดสอบได้ขนาดตามที่ต้องการ ได้แก่ เลื่อยสายพาน เครื่องกัด และกระดาษทรายสำหรับขัดเตรียมชิ้นงาน
6. เครื่องทดสอบความต้านแรงดึง (Tensile Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 638
7. เครื่องทดสอบความแข็ง Shore D แบบ Shore D ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งยี่ห้อ TECLOCK รุ่น GS-702G Type D
8. เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมี และสมบัติทางกายภาพ ซึ่งประกอบด้วย 1) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscopy) 2) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ JEOL model JSM-IT300 3) Differential Scanning Calorimeter และ 4) FT-IR spectroscopy ยี่ห้อ Bruker รุ่น Tensor 27 การตรวจพิสูจน์เกี่ยวกับโมเลกุลของสารด้วยเครื่อง FT-IR Spectroscopy สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งตัวอย่างที่เป็นของแข็ง ของเหลว และ

ก๊าซ โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นอินฟราเรดในช่วงประมาณ 12,800 ถึง 10 cm^{-1} ซึ่งความยาวคลื่น (Wave Number) สามารถแบ่งย่อยออกได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วง Far IR (200 ถึง 10 cm^{-1}) Mid IR (4,000 ถึง 200 cm^{-1}) และ Near IR (12,800 ถึง 4,000 cm^{-1})

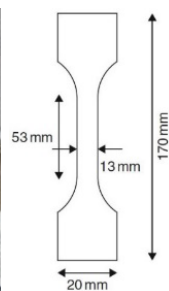
2.3 กระบวนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

นำผง UHMWPE บริสุทธิ์ มาทำการผสมกับผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่มีอนุภาคขนาด 0.05 μm (50 nm), 0.3 μm (300 nm), 2-5 μm HTM30 grade และ 5 μm Calcined B-grade สำหรับในส่วนของกระบวนการเตรียมผง UHMWPE ผสมฟิลเลอร์อนุภาค Al_2O_3 จะต้องทำการผสม UHMWPE กับฟิลเลอร์อนุภาค Al_2O_3 โดยเริ่มจากการนำฟิลเลอร์อนุภาค Al_2O_3 ไปทำให้เกิดการกระจายตัว (De-agglomerate) ด้วยเครื่อง Ultrasonic Disperser เป็นระยะเวลา 10 นาที เพื่อแยกฟิลเลอร์อนุภาค Al_2O_3 ออกจากกันและป้องกันไม่ให้เกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน โดยใช้เมทิลแอลกอฮอล์เป็นตัวกลางในการทำให้เกิดการกระจายตัว จากนั้นจึงทำการปั่นผสมฟิลเลอร์อนุภาค Al_2O_3 รวมกับผง UHMWPE ด้วยเครื่อง High Speed Homogenizer ที่มีความเร็วรอบ 32,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที (ในการใช้เมทิลแอลกอฮอล์เป็นตัวกลางช่วยในการปั่นผสมนี้เนื่องจากผง UHMWPE มีค่าความหนาแน่นสูงกว่าเมทิลแอลกอฮอล์จึงส่งผลให้ UHMWPE สามารถจมลงในเมทิลแอลกอฮอล์ได้) และนำไปวางในที่โล่งไม่มีความชื้นเพื่อให้เมทิลแอลกอฮอล์เกิดการระเหยจนหมดแล้วจึงนำผงที่ได้ไปเข้าเตาอบลมร้อนยี่ห้อ Binder รุ่น FD 53L จนได้ผงที่มีส่วนผสมของ UHMWPE+ Al_2O_3 หลังจากนั้นจึงทำการสร้างชิ้นงานทดสอบด้วยการอัดขึ้นรูปร้อนผ่านกระบวนการ Hot Compression Molding โดยแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปมีขนาด 160x80x50 mm ภายใต้การอัดขึ้นรูปร้อนที่แรงอัด 10 MPa ที่อุณหภูมิ 140 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลานาน 45 min ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแม่พิมพ์และปัจจัยอื่นๆ จะได้ชิ้นงานตามขนาด

แม่พิมพ์และมีความหนา 10 mm พร้อมทั้งจะนำไปทดสอบสมบัติทางกลต่างๆ ต่อไป จากรูปที่ 1 (ก) เป็นการขึ้นรูปเพื่อเตรียมเป็นชิ้นทดสอบแรงดึงที่มีขนาดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 มีขนาดดังรูปที่ 1 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 ชิ้นงานทดสอบแรงดึง (ก) การขึ้นรูปชิ้นงาน และ (ข) ชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638

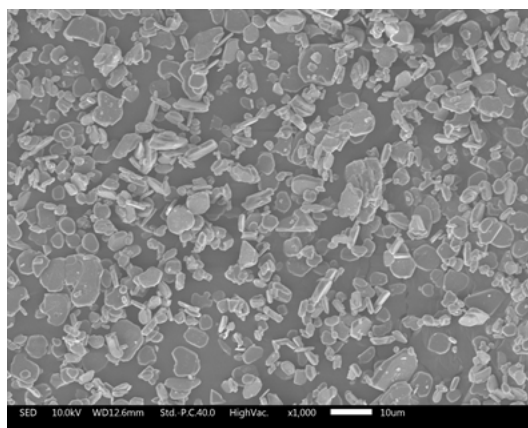
3. ผลการวิเคราะห์และผลการทดสอบ

3.1 ผลการศึกษาวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้าง

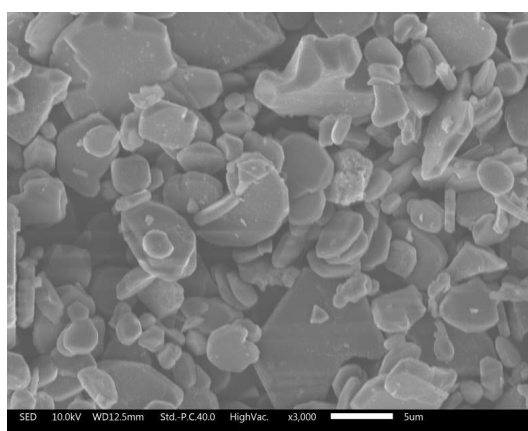
จุลภาคของผงวัสดุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ผงอลูมิเนียมออกไซด์ Al_2O_3 เป็นวัสดุฟิลเลอร์ที่ใช้ในการทำวิจัย ก่อนการอัดขึ้นรูปแผ่นเซรามิกได้ทำการศึกษากระบวนการวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างของผงวัสดุที่ทดสอบก่อนจะนำชิ้นงานเข้าวิเคราะห์ จะต้องทำการเคลือบทองคำลงบนผิวชิ้นงานด้วยเครื่อง Sputter Coaters ยี่ห้อ QUORUM รุ่น Q150R ES และขั้นตอนสุดท้ายคือการเคลือบผิวเพื่อเตรียมตัวอย่าง ซึ่งจะทำให้พื้นผิวชิ้นงานมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าในสภาวะความเป็นสุญญากาศสูง (HV) จากนั้นนำไปตรวจสอบรูปลักษณะพื้นฐานที่กำลังขยายต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-IT300 ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างขนาดเล็กมาก ๆ ของตัวอย่างทางชีวภาพ เป็นการถ่ายภาพด้วยแสงต้นตำ

และการถ่ายภาพในโหมดสุญญากาศต่ำและยังช่วยให้ภาพมีคุณภาพสูงดังรูปที่ 2 และ 3 จากนั้นนำชิ้นงานมาทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) ยี่ห้อ Rigaku-Miniflex ซึ่งเป็นเครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์แบบตั้งโต๊ะ วิเคราะห์การเลี้ยวเบนของผงอนุภาคที่สามารถระบุเฟสของผลึก (Phase ID) และการหาปริมาณ เฟอร์รอนต์ (%) ความเป็นผลึก ขนาดและความเครียดของผลึก การปรับแต่งพารามิเตอร์แลตทิซ การปรับแต่ง Rietveld และโมเลกุล โครงสร้าง มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิจัย ซึ่งเป็นการตรวจสอบวัสดุที่นำมาใช้ในกระบวนการวิจัยนี้

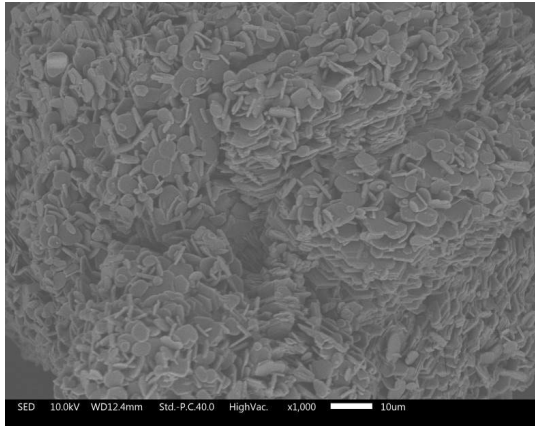


(ก)

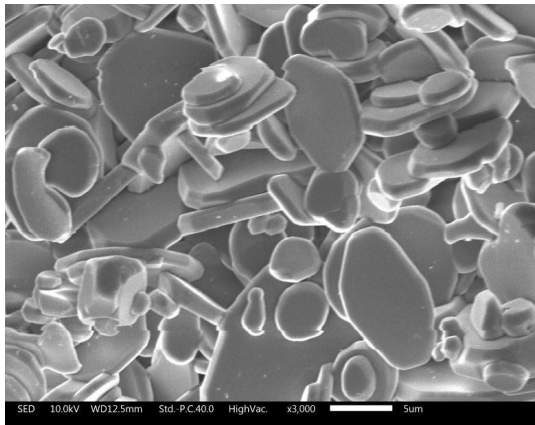


(ข)

รูปที่ 2 รูปลักษณะพื้นฐานของ Al_2O_3 HTM 30 grade ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด, (ก) ที่กำลังขยาย $\times 1000$ และ (ข) ที่กำลังขยาย $\times 3000$



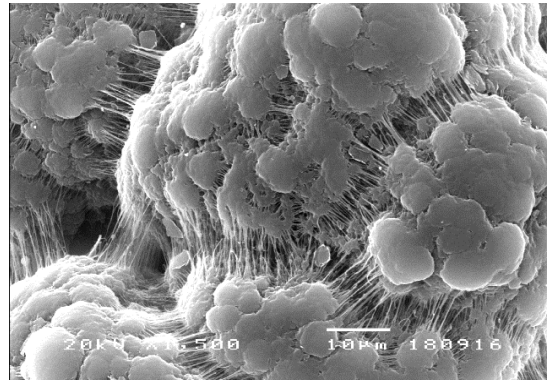
(ก)



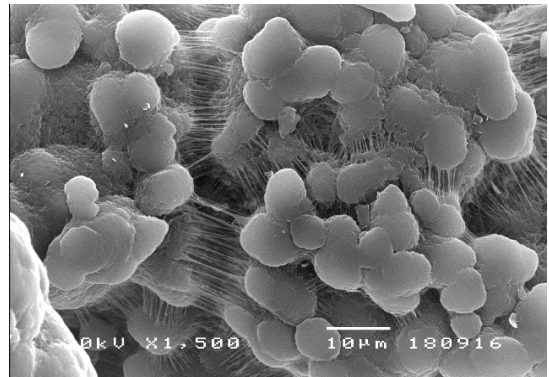
(ข)

รูปที่ 3 รูปลักษณะพื้นฐานของ Al_2O_3 Calcined B grade ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด, (ก) ที่กำลังขยาย $\times 1000$ และ (ข) ที่กำลังขยาย $\times 3000$

จากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจึงได้ภาพที่แสดงลักษณะพื้นฐานของผงอลูมิเนียมออกไซด์ Al_2O_3 และ UHMWPE ซึ่งใช้ในการศึกษานี้แสดงดังรูปที่ 2, 3 และ 4 ด้วยกำลังขยายที่ 1,000 และ 3,000 เท่า จากการศึกษาโครงสร้างพบว่า Alumina Al_2O_3 B-Grade จะมีขนาดอนุภาคผงอยู่ที่ประมาณ 5 μm และอนุภาคผงจะมีขนาดใกล้เคียงกัน แต่สำหรับ Alumina Al_2O_3 HTM 30 จะมีขนาดอนุภาคผงอยู่ที่ประมาณ 2-5 μm มีขนาดไม่สม่ำเสมอเคล้ากันไป จากผลการวิเคราะห์ธาตุโดยใช้รังสีเอกซ์ X-Ray Diffractometer: (XRD) จะบอกชนิดของสารประกอบ



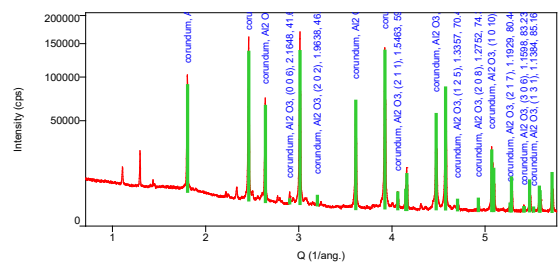
(ก)



(ข)

รูปที่ 4 รูปลักษณะพื้นฐานของ UHMWPE ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้น ๆ ได้ ยิ่งไปกว่านั้นผลการวิเคราะห์ที่ได้สามารถนำไปใช้ในการพัฒนางานวิจัย งานในกระบวนการผลิต จากรูปที่ 5-6 แสดงให้เห็นถึง XRD Pattern ของอลูมิเนียมออกไซด์ และ UHMWPE ได้อย่างชัดเจน เป็น Corundum Al_2O_3 มีรูปผลึกระบบเฮกซะโกนอล คือรูปหกเหลี่ยม



รูปที่ 5 Calcined Al_2O_3 B grade



รูปที่ 8 เครื่องทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore D

ตารางที่ 4 ค่าความแข็งเฉลี่ยที่ร้อยละของ Al_2O_3

Specimens	Durometer Hardness (Shore D)	SD
B-grade 5%	56.6	0.92
B-grade 8%	58.4	1.02
B-grade 10%	59.2	0.75
HTM-30 5%	58.8	1.72
HTM-30 8%	59.2	1.60
HTM-30 10%	59.4	0.49
Alumina 0.3 μm 5%	60.8	1.66
Alumina 0.3 μm II 8%	59.7	0.90
Alumina 0.05 μm 8%	61.9	2.47

ผลของค่าที่เพิ่มขึ้นจะหมายถึงวัสดุนั้นมีค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น จากตารางที่ 4 พบว่าขนาดอนุภาคผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่มีขนาดเล็กกว่าและมีปริมาณร้อยละของส่วนผสมเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องด้วยอลูมิเนียมออกไซด์มีความแข็งเมื่อผสมลงไปจึงก่อให้เกิดเนื้อของ UHMWPE ที่แข็งขึ้น สำหรับชนิดของ Calcined Al_2O_3 B-grade 5 μm และ Al_2O_3 HTM 2-5 μm เมื่อผสมลงไป ใน UHMWPE แล้วจะไม่เห็นความแตกต่างของค่าความแข็ง ทั้งนี้ความแตกต่างของอนุภาคที่เล็กลง คือ 0.3 μm หรือ 0.05 μm จะไม่ก่อให้เกิดความแตกต่างของค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 5 และ 8 ของ Calcined Al_2O_3 B-grade 5 μm และ Al_2O_3 HTM 2-5 μm เป็นสิ่งที่ควรนำไปประกอบการพิจารณาเลือกใช้

3.4 ผลการทดสอบแรงดึง

ในการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่อง UTM จะได้ค่าต่างๆ ประกอบด้วยค่า Yield Strength ในช่วง Linear Elastic และ Ultimate Tensile Strength ดังตารางที่ 5 สำหรับค่า Elongation at Break (ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด คิดเป็นร้อยละการยืดตัวของวัตถุที่จุดขาดเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวเริ่มต้น) และ Modulus of Elasticity แสดงดังตารางที่ 6 ด้วยการเตรียมชิ้นงานทดสอบชุดละ 5 ชิ้นงานและนำมาหาค่าเฉลี่ยในแต่ละค่าโดยพิจารณาจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เป็นสำคัญ จากการทดสอบพบว่าที่ส่วนผสมระหว่าง UHMWPE และอลูมิเนียมออกไซด์ที่เหมาะสมในภาพรวมทั้งสมบัติทางกลและต้นทุนของอลูมิเนียมออกไซด์ที่นำมาผสมและนำไปประยุกต์ใช้งานทางกลนั้นคือ UHMWPE+HTM-30 5% ค่าต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 5 และตารางที่ 6

ตารางที่ 5 ความเค้นที่จุดครากและความต้านทานแรงดึงสูงสุดของ UHMWPE + Al_2O_3 ร้อยละ 5, 8 และ 10

Specimens	Yield Strength (MPa)		Ultimate Tensile Strength (MPa)	
	Average	SD	Average	SD
UHMWPE+ B-grad 5%	12.41	0.25	29.2	0.6
UHMWPE + B- grad 8%	12.21	0.05	29.16	0.42
UHMWPE+ B-grad 10%	10.88	0.27	29.57	1
UHMWPE+ HTM-30 5%	20.52	0.43	29.96	0.71
UHMWPE+ HTM-30 8%	11.01	0.33	28.63	0.87
UHMWPE+ HTM-30 10%	11.36	0.46	29.19	0.69
UHMWPE+ Al_2O_3 0.3 5%	12.5	0.33	29.91	0.71
UHMWPE+ Al_2O_3 0.3 8%	21.86	0.22	29.15	0.82
UHMWPE+ Al_2O_3 0.05 8%	11.26	0.48	29.85	0.78

ตารางที่ 6 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด และโมดูลัสความยืดหยุ่นของ UHMWPE + Al_2O_3 ร้อยละ 5, 8 และ 10

Specimens	Elongation at Break (%)		Modulus of Elasticity (MPa)	
	Average	SD	Average	SD
UHMWPE+ B-grad 5%	254.24	1.95	796.62	3.13
UHMWPE + B-grad 8%	256.42	1.54	847.66	3.77
UHMWPE+ B-grad 10%	239.52	1.60	907.99	3.35
UHMWPE+ HTM-30 5%	265.80	3.20	784.46	3.28
UHMWPE+ HTM-30 8%	227.33	3.79	836.05	2.50
UHMWPE+ HTM-30 10%	251.22	2.46	865.54	2.79
UHMWPE+ Al_2O_3 0.3 5%	260.34	1.81	854.75	2.23
UHMWPE+ Al_2O_3 0.3II 8%	258.09	3.77	885.04	2.94
UHMWPE+ Al_2O_3 0.05 8%	253.42	1.41	889.09	4.84

4. สรุปและอภิปรายผล

พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (Ultra High Molecular Weight Polyethylene, UHMWPE) ใช้เป็นผงวัสดุหลัก และมีผงอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 เป็นวัสดุเสริม อัตราส่วนระหว่าง UHMWPE และ Al_2O_3 จะอยู่ที่ 95:5 ถึง 92:8 ตามลำดับ ซึ่งรูปลักษณะพื้นฐานจะแบนกลม ขนาดอนุภาคของผง Al_2O_3 จะอยู่ที่ 5 μm ภายใต้การอัดขึ้นรูปร้อนที่แรงอัด 10 MPa ที่อุณหภูมิ 140 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลานาน 45 min พบว่า Al_2O_3 HTM 2-5 μm จะให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกสูงกว่าอลูมิเนียมออกไซด์เกรดอื่นๆ ด้วยค่าที่สูงถึง 586.8 J/m ที่ส่วนผสมอลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 5 การทดสอบค่าความแข็งของ UHMWPE+ Al_2O_3 HTM 2-5 μm พบว่าให้ค่าความแข็งอยู่ที่ 58.8 ด้วยเครื่องมือมาตรฐาน Durometer

จากการทดสอบแรงดึงจะได้ค่าต่างๆ ประกอบด้วย Yield Strength = 20.52 MPa, Ultimate Tensile Strength = 29.96 MPa, Breaking Strength = 22.83 MPa, Elongation at Break = 265.8 % และ Modulus of Elasticity = 784.46 MPa (ค่าต่างๆ เหล่านี้ซึ่งได้จากการทดลองจะสามารถนำไปใช้ต่อไปในการวิเคราะห์ได้ด้วยโปรแกรมทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์) ผลการทดลองที่ได้ดังกล่าวสอดคล้องกับ F. S. Senatov et al. [2] จึงกล่าวได้ว่าสูตรในการผสมและกระบวนการผลิตในห้องทดลองทำให้ได้ตัวอย่างสูตรที่จะนำไปใช้ในการทดลองสร้างล้อนิรภัยรันแฟลท (Run-Flat) ที่มีน้ำหนักเบา ซึ่งกระบวนการออกแบบและสร้างล้อรันแฟลทจะเป็นอีกส่วนหนึ่งที่ต้องใช้กระบวนการวิศวกรรมย้อนรอยเข้ามาแก้ไขปัญหา และจะต้องดำเนินการทดสอบการใช้งานจริงทั้งในห้องปฏิบัติการและบนสนามทดสอบจริง

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ พ.ศ. 2561 ตามสัญญาเลขที่ กบง./2559-194 คณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติเป็นอย่างสูง ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ และเครื่องมือเครื่องจักร สาธารณูปโภคต่างๆ ในการทำงานวิจัย ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัตน์ วรรณศรี ที่ปรึกษาห้องปฏิบัติการวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต ศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

6. บรรณานุกรม

- [1] O. Hussain, B. Ahmad and S. Saleem, "Tribological performance of biomedical grade UHMWPE/nano- Al_2O_3 /Vitamin-C hybrid

- composite for cartilage replacements,” *Mater. Lett.*, vol. 291, p. 129515, May 2021.
- [2] F. S. Senatov et al., “Biocompatible polymer composites based on ultrahigh molecular weight polyethylene perspective for cartilage defects replacement,” *J. Alloys Compd.*, vol. 586, pp. S544–S547, Feb. 2014.
- [3] N. N. Mallikarjuna, A. Venkataraman and T. M. Aminabhavi, “A study on γ - Fe_2O_3 loaded poly (methyl methacrylate) nanocomposites,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 94, no. 6, pp. 2551–2554, 2004.
- [4] S. M. Kurtz. UHMWPE Biomaterials Handbook, Elsevier Ins., China, 2009.
- [5] M. Hussain et al., “Ultra-High-Molecular-Weight-Polyethylene (UHMWPE) as a Promising Polymer Material for Biomedical Applications: A Concise Review,” *Polymers*, vol. 12, no. 2, p. 323, Feb. 2020.
- [6] Z. Tai, Y. Chen, Y. An, X. Yan, and Q. Xue, “Tribological Behavior of UHMWPE Reinforced with Graphene Oxide Nanosheets,” *Tribol. Lett.*, vol. 46, no. 1, pp. 55–63, Apr. 2012.
- [7] S. Gürgen, O. N. Çelik and M. C. Kuşhan, “Tribological behavior of UHMWPE matrix composites reinforced with PTFE particles and aramid fibers,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 173, p. 106949, Sep. 2019.
- [8] A. V. Maksimkin, S. D. Kaloshkin, V. V. Tcherdyntsev, F. S. Senatov and V. D. Danilov, “Structure and properties of ultra-high molecular weight polyethylene filled with disperse hydroxyapatite,” *Inorg. Mater. Appl. Res.*, vol. 3, no. 4, pp. 288–295, 2012.
- [9] A. V. Maksimkin et al., “Ultra-high molecular weight polyethylene reinforced with multi-walled carbon nanotubes: Fabrication method and properties,” *J. Alloys Compd.*, vol. 536, pp. S538–S540, Sep. 2012.
- [10] F. S. Senatov, A. A. Baranov, D. S. Muratov, M. V. Gorshenkov, S. D. Kaloshkin and V. V. Tcherdyntsev, “Microstructure and properties of composite materials based on UHMWPE after mechanical activation,” *J. Alloys Compd.*, vol. 615, pp. S573–S577, Dec. 2014.
- [11] J. J. Wu, C. P. Buckley and J. J. O’Connor, “Mechanical integrity of compression-moulded ultra-high molecular weight polyethylene: effects of varying process conditions,” *Biomaterials*, vol. 23, no. 17, pp. 3773–3783, Sep. 2002.
- [12] POLIMAXX, Safety data sheet, (2017 May), IRPC Public Company Limited, Bangkok.
- [13] Alumina, alpha Al_2O_3 , 99.5%, Matweb Material property data, [Online]. Available: <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=0654701067d147e88e8a38c646dda195&n=1&ckck=1>
- [14] N. K. Myshkin and A. V. Kovalev, “Adhesion and Friction of Polymers, in Polymer Tribology, editors: Sujeet K Sinha and Brian J Briscoe, Imperial College Press, 2009, pp. 3–32.

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร

RMUTP RESEARCH JOURNAL

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร เป็นวารสารสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่และถ่ายทอดผลงานวิจัยและผลงานวิชาการทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย ซึ่งอยู่ในฐานข้อมูลของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai Journal Citation Index Centre, TCI Centre) กำหนดการตีพิมพ์เผยแพร่ ปีละ 2 ฉบับ (ราย 6 เดือน) ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน และฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม โดยรับพิจารณาบทความทั้งที่เป็นภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยมีกรอบของวารสารที่ครอบคลุมในสาขาวิชาต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาศาสตร์ประยุกต์ และวิศวกรรมศาสตร์ ทั้งนี้บทความดังกล่าวผู้เขียนต้องไม่เสนอบทความฉบับเดียวกันกับที่เคยตีพิมพ์ในวารสารอื่นมาก่อน เว้นแต่ผ่านการเรียบเรียงและเพิ่มเนื้อหาใหม่ บทความแต่ละบทความต้องผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิที่ตรงตามสาขาของบทความนั้นอย่างน้อย 2 ท่าน และผู้ทรงคุณวุฒิต้องมาจากหน่วยงานที่ต่างกันกับผู้เขียน อีกทั้งผู้ทรงคุณวุฒิที่ประเมินบทความเดียวกันนั้นจะต้องมาจากหน่วยงานที่ต่างกันด้วย ซึ่งจัดประเภทของการ Peer Review เป็นแบบ Double Blinded หมายถึง ผู้ทรงคุณวุฒิจะไม่ทราบชื่อผู้เขียน และผู้เขียนจะไม่ทราบชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

1. ประเภทของบทความที่ตีพิมพ์

1.1 บทความวิจัย (Research article) เป็นบทความที่ได้จากงานวิจัย มีเนื้อหาสำคัญที่อธิบายถึงระเบียบวิธีวิจัย ผลการทดลอง การวิเคราะห์ผล และการสรุปผลที่ชัดเจน

1.2 บทความวิชาการ (Academic article) เป็นบทความที่มีลักษณะดังนี้

1. Literature review เป็นบทความจากการทบทวนเอกสาร ซึ่งเป็นผลมาจากการวิจัยหลายๆ ครั้ง ถือเป็นบทความที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง
2. Technical paper เป็นบทความนำเสนอกระบวนการในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ การทดสอบภาคสนาม รวมไปถึงเทคนิคการวิเคราะห์ใหม่ๆ
3. Professional practice เป็นบทความที่มาจากประสบการณ์ หรือความชำนาญของผู้เขียน
4. Policy paper เป็นบทความเกี่ยวกับนโยบายด้านต่างๆ ของหน่วยงาน

2. ส่วนประกอบของบทความแต่ละประเภท

2.1 บทความวิจัย

ก. ส่วนปก ให้แยกออกเป็น 2 หน้า โดยปกหน้าแรกเป็นภาษาไทย และปกหน้าที่สองเป็นภาษาอังกฤษ โดยแต่ละปกหน้าต้องจบในหน้าหนึ่งของตัวเอง ประกอบด้วย

1. ชื่อบทความ (Title) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรสั้นกะทัดรัด ชี้ถึงเป้าหมายหลักของการวิจัย
2. ชื่อผู้เขียนทุกท่าน (Authors) ให้ระบุเฉพาะชื่อ และ นามสกุล โดยไม่ต้องมีคำนำหน้านาม
3. หน่วยงาน/สังกัด และที่อยู่ สำหรับการติดต่อทางไปรษณีย์ ของผู้เขียนทุกท่าน
4. ตัวเลขยก ให้เขียนไว้บนนามสกุล เพื่อระบุว่าเป็นตำแหน่งทางวิชาการและที่อยู่ของผู้เขียนท่านใด

5. **บทคัดย่อ (Abstract) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ** ควรสั้นตรงประเด็น ครอบคลุมสาระสำคัญของการศึกษา ได้แก่ วัตถุประสงค์ วิธีการ ผลและการวิจารณ์ เป็นต้น
6. **คำสำคัญ (Keywords) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ** เป็นการกำหนดคำสำคัญที่สามารถนำไปใช้เป็นคำสืบค้นในระบบฐานข้อมูล ประมาณ 3-5 คำ
7. **ผู้พิมพ์ประสานงาน (Corresponding Author)** ให้ทำเครื่องหมาย * ไว้บนนามสกุล และระบุหมายเลขโทรศัพท์ และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (E-mail)

ข. ส่วนเนื้อหา ประกอบด้วย

1. **บทนำ (Introduction)** เป็นส่วนของความสำคัญและมูลเหตุที่นำไปสู่การวิจัย พร้อมวัตถุประสงค์และการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
2. **ระเบียบวิธีวิจัย (Research Methodology) หรือ วิธีการทดลอง (Experimental Methods)** เป็นการอธิบายวิธีการดำเนินการวิจัย การทดลอง อุปกรณ์ เครื่องมือ การติดตั้งและการวัดค่าต่างๆ
3. **ผลการทดลองและวิจารณ์ผล หรือ ผลการศึกษาและอภิปรายผล (Results and Discussion)** ควรเสนอผลอย่างชัดเจน ตรงประเด็น เป็นผลที่ค้นพบโดยลำดับตามหัวข้อที่ศึกษาพร้อมการวิจารณ์ผล
4. **สรุป (Conclusion)** สรุปสาระสำคัญที่ได้จากการศึกษา
5. **กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)** เป็นการระบุแหล่งทุนสนับสนุนการวิจัย (ถ้ามี) และการระบุหน่วยงานหรือบุคคลที่ให้การสนับสนุน ช่วยเหลือการทำวิจัย
6. **เอกสารอ้างอิง (References)** ต้องใช้ตามแบบที่วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร กำหนดอย่างเคร่งครัดและเขียนเอกสารอ้างอิง เฉพาะเอกสารที่นำมาอ้างอิงในเนื้อหาเท่านั้น

2.2 บทความวิชาการ

ก. ส่วนปก มีส่วนประกอบเหมือนบทความวิจัย

ข. ส่วนเนื้อหา ประกอบด้วย

1. **บทนำ (Introduction)** เป็นส่วนของที่มาและมูลเหตุของการเขียนบทความ
2. **ผลการศึกษา/ผลการดำเนินการ (Results)** เป็นการเสนอผลอย่างชัดเจน ตามประเด็นโดยลำดับตามหัวข้อที่ศึกษาหรือดำเนินการ
3. **สรุป (Conclusion)** สรุปสาระสำคัญที่ได้จากการศึกษา
4. **กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)** เป็นการระบุแหล่งทุนสนับสนุนการวิจัย (ถ้ามี) และการระบุหน่วยงานหรือบุคคลที่ให้การสนับสนุน ช่วยเหลือการทำวิจัย
5. **เอกสารอ้างอิง (References)** ใช้รูปแบบที่วารสารฯ กำหนดอย่างเคร่งครัดและเขียนอ้างอิงเฉพาะเอกสารที่ปรากฏในบทความเท่านั้น

3. รูปแบบการพิมพ์บทความ

ให้ใช้ไฟล์รูปแบบบทความ (Template Form) ซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้จาก <http://journal.rmutp.ac.th/> โดยไฟล์รูปแบบบทความมีการตั้งค่านำกระดาษแล้ว ดังนี้

รายการ	บทความภาษาไทย	บทความภาษาอังกฤษ
ระยะขอบ	ขอบบน (Top Margin) 2.50 ซม. ขอบล่าง (Bottom Margin) 2.00 ซม. ขอบซ้าย (Left Margin) 2.00 ซม. ขอบขวา (Right Margin) 2.00 ซม.	ขอบบน (Top Margin) 2.50 ซม. ขอบล่าง (Bottom Margin) 2.00 ซม. ขอบซ้าย (Left Margin) 2.00 ซม. ขอบขวา (Right Margin) 2.00 ซม.
ขนาดกระดาษ	ขนาดกระดาษ A4 (กำหนดเอง) ความกว้าง 19 ซม. ความสูง 27 ซม.	ขนาดกระดาษ A4 (กำหนดเอง) ความกว้าง 19 ซม. ความสูง 27 ซม.
เค้าโครง	หัวกระดาษและท้ายกระดาษ เลือกหน้าคู่และหน้าคี่ต่างกัน หน้าแรกต่างกัน จากขอบหัวกระดาษ และ ท้ายกระดาษ ตั้งค่า 1.25	หัวกระดาษและท้ายกระดาษ เลือกหน้าคู่และหน้าคี่ต่างกัน หน้าแรกต่างกัน จากขอบหัวกระดาษ และ ท้ายกระดาษ ตั้งค่า 1.25
รูปแบบตัวอักษร	TH SarabunPSK	Times New Roman
หมายเลขหน้า	ตำแหน่ง ด้านบน ไม่แสดงหมายเลขหน้าในหน้าแรก หน้าคี่ ใส่หมายเลขหน้า ตำแหน่งบนขวา หน้าคู่ ใส่หมายเลขหน้า ตำแหน่งบนซ้าย ขนาดตัวอักษร 14	ตำแหน่ง ด้านบน ไม่แสดงหมายเลขหน้าในหน้าแรก หน้าคี่ ใส่หมายเลขหน้า ตำแหน่งบนขวา หน้าคู่ ใส่หมายเลขหน้า ตำแหน่งบนซ้าย ขนาดตัวอักษร 14
การย่อหน้า	ส่วนปก ย่อ 1.00 ซม. ส่วนเนื้อหา ย่อ 1.00 ซม.	ส่วนปก ย่อ 1.00 ซม. ส่วนเนื้อหา ย่อ 1.00 ซม.
จำนวนหน้าทั้งหมด	8-12 หน้า	8-12 หน้า
ชื่อวารสาร (ภาษาไทย)	อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของหัวกระดาษ หน้าคู่ ขนาดตัวอักษร 14 (ตัวหนา เอียง) “วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ปีที่ x ฉบับที่ x...xxxx-xxxx,xxx”	อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของหัวกระดาษ หน้าคู่ ขนาดตัวอักษร 14 (ตัวหนา เอียง) “วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ปีที่ x ฉบับที่ x...xxxx-xxxx,xxx”
ชื่อวารสาร (ภาษาอังกฤษ)	อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของหัวกระดาษ หน้าคี่ ขนาด ตัวอักษร 14 (ตัวหนา) “RMUTP Research Journal, Vol., No.,xxxx-xxxx,xxx”	อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของหัวกระดาษ หน้าคี่ ขนาด ตัวอักษร 14 (ตัวหนา) “RMUTP Research Journal, Vol., No.,xxxx-xxxx,xxx”
การพิมพ์ส่วนปก	พิมพ์เต็มหน้ากระดาษ (พิมพ์ 1 คอลัมน์)	พิมพ์เต็มหน้ากระดาษ (พิมพ์ 1 คอลัมน์)
การพิมพ์ส่วนเนื้อหา	พิมพ์ 2 คอลัมน์ แต่ละคอลัมน์กว้าง 7.1 ซม. ระยะห่างระหว่างคอลัมน์ 0.8 ซม.	พิมพ์ 2 คอลัมน์ แต่ละคอลัมน์กว้าง 7.1 ซม. ระยะห่างระหว่างคอลัมน์ 0.8 ซม.
ชื่อบทความ	ทั้งชื่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษพิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 22 ตัวตรงหนา จัดชิดขอบ ซ้ายหน้ากระดาษ	ชื่อภาษาอังกฤษ พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาด 16 ตัวตรงหนา จัดชิดขอบซ้าย หน้ากระดาษ
ชื่อผู้เขียน	ทั้งชื่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ พิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 18 ตัวตรงไม่หนา จัดชิด ขอบซ้ายหน้ากระดาษ	ชื่อภาษาอังกฤษ พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาด 12 ตัวตรง ไม่หนา จัดชิดขอบซ้าย หน้ากระดาษ
ตัวเลขยกบนนามสกุล	ขนาดตัวอักษรเท่ากับชื่อและนามสกุล แต่ทำเป็น ตัวยก	ขนาดตัวอักษรเท่ากับชื่อและนามสกุล แต่ทำเป็น ตัวยก
หน่วยงาน/สังกัด และที่อยู่	ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ พิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาดตัวอักษร 14	พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาดตัวอักษร 11

รายการ	บทความภาษาไทย	บทความภาษาอังกฤษ
ชื่อบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ	พิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 20 (ตัวตรง หนา) จัดชิดขอบซ้ายหน้ากระดาษ	พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาด 14 (ตัวตรง หนา) จัดชิดขอบซ้ายหน้ากระดาษ
เนื้อหาบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ	พิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาดตัวอักษร 14	พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาดตัวอักษร 12
ชื่อคำสำคัญ	ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 14 (ตัวหนา)	ภาษาอังกฤษ ด้วย Times New Roman ขนาด 12 (ตัวหนา)
คำสำคัญ	ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 14 ตัวตรง บาง ใส่เครื่องหมาย Semicolon (;) ระหว่างคำ	ด้วย Times New Roman ขนาด 12 ตัวตรง บาง ใส่เครื่องหมาย Semicolon (;) ระหว่างคำ
ชื่อผู้สนับสนุนประสานงาน หมายเลขโทรศัพท์ และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์	ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 13 (ตัวเอียง หนา)	ด้วย Times New Roman ขนาด 10 (ตัวเอียง หนา)
ชื่อหัวเรื่องใหญ่	พิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 18 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย ประกอบด้วย 1.บทนำ 2.วิธีการทดลอง หรือ วิธีการศึกษา 3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลหรือ ผลการศึกษาและอภิปรายผล 4. สรุป 5. กิตติกรรมประกาศ และ 6. เอกสารอ้างอิง	พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาด 14 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย ประกอบด้วย 1.Introduction 2. Research Methodology 3. Results and Discussion 4. Conclusion 5. Acknowledgement and 6. References
ชื่อหัวเรื่องรอง	TH SarabunPSK ขนาด 16 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย	Times New Roman ขนาด 12 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย
ชื่อหัวเรื่องย่อย	TH SarabunPSK ขนาด 14 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย	Times New Roman ขนาด 12 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย
เนื้อหาบทความ	TH SarabunPSK ขนาด 14	Times New Roman ขนาด 12
ชื่อตาราง	TH SarabunPSK 14 ตัวบาง แต่เฉพาะคำว่า “ตารางที่” ต้องเป็นตัวหนา จัดชิดขอบซ้าย	Times New Roman 12 ตัวบาง แต่เฉพาะคำว่า “Table 1” ต้องเป็นตัวหนา จัดชิดขอบซ้าย
ชื่อรูป	TH SarabunPSK 14 ตัวบาง แต่เฉพาะคำว่า “รูปที่” ต้องเป็นตัวหนา จัดกึ่งกลางคอลัมน์	Times New Roman 12 ตัวบาง แต่เฉพาะคำว่า “Fig.1.” ต้องเป็นตัวหนา จัดกึ่งกลางคอลัมน์
สมการ	ใช้โปรแกรม MathType ด้วยรูปแบบอักษร Times New Roman ขนาด 12 สัญลักษณ์หรือตัวแปรที่เขียนในสมการ จะต้องมีรูปแบบเดียวกันกับสัญลักษณ์หรือตัวแปรที่อยู่ในคำอธิบายหรือในเนื้อหา และให้จัดชิดขอบซ้ายสุดเสมอ ส่วนเลขบอกลำดับสมการ ให้เขียนลำดับเลขไว้ในวงเล็บ และจัดชิดขวาสุด	ใช้โปรแกรม MathType ด้วยรูปแบบอักษร Times New Roman ขนาด 12 สัญลักษณ์หรือตัวแปรที่เขียนในสมการ จะต้องมีรูปแบบเดียวกันกับสัญลักษณ์หรือตัวแปรที่อยู่ในคำอธิบายหรือในเนื้อหา และให้จัดชิดขอบซ้ายสุดเสมอ ส่วนเลขบอกลำดับสมการ ให้เขียนลำดับเลขไว้ในวงเล็บ และจัดชิดขวาสุด
คำอธิบายตัวแปรจากสมการ	ใช้โปรแกรม MathType ด้วยรูปแบบอักษร Times New Roman ขนาด 12 จัดชิดขอบซ้ายสุด เครื่องหมาย “=” ของตัวแปรในแต่ละบรรทัด ต้องตรงกันในแนวดิ่ง	ใช้โปรแกรม MathType ด้วยรูปแบบอักษร Times New Roman ขนาด 12 จัดชิดขอบซ้ายสุด เครื่องหมาย “=” ของตัวแปรในแต่ละบรรทัด ต้องตรงกันในแนวดิ่ง

รายการ	บทความภาษาไทย	บทความภาษาอังกฤษ
เนื้อหาในตาราง / แผนภูมิ	TH SarabunPSK 12 ตัวบาง	Times New Roman 10 ตัวบาง
การอ้างอิงในเนื้อเรื่องและการอ้างอิงท้ายเรื่อง	ให้ดูจากข้อที่ 5. การอ้างอิง	ให้ดูจากข้อที่ 5. การอ้างอิง

4. การส่งต้นฉบับบทความ

การส่งต้นฉบับบทความ ผู้เขียนสามารถส่งบทความออนไลน์ ได้ที่ <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/RMUTP/index> หรือสอบถามข้อมูลได้ที่ กองบรรณาธิการวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร 399 ถนนสามเสน แขวงวชิรพยาบาล เขตดุสิต กรุงเทพฯ 10300 โทรศัพท์ 0 2665 3777 ต่อ 6645 โทรสาร 0 2665 3860

5. จริยธรรม บทบาท และหน้าที่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จัดทำวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้หลักธรรมาภิบาลและเคร่งครัดในด้านจริยธรรม บทบาท และหน้าที่ต่อสังคมอย่างแท้จริง มีการ แต่งตั้งกองบรรณาธิการภายในและภายนอกโดยผู้บริหารสูงสุดของมหาวิทยาลัย กำหนดหน้าที่และความรับผิดชอบอย่างชัดเจน สามารถปฏิบัติงานได้อย่างโปร่งใสและมีความเป็นอิสระในการพัฒนาวารสาร ให้ก้าวหน้าและมีคุณภาพ การจัดทำวารสารเป็นการเชื่อมต่อบุคคลหรือกลุ่มบุคคล 3 ส่วน ประกอบด้วย 1) ผู้เขียน 2) บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสาร และ 3) ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ภายใต้การตรวจสอบ คุณภาพวารสารโดยศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) ทั้งนี้เพื่อให้วารสารมีคุณภาพเป็นไปตามหลักสากล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จึงได้กำหนดจริยธรรม บทบาท และหน้าที่ของผู้เขียน บรรณาธิการ และกองบรรณาธิการวารสาร และผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ไว้ดังต่อไปนี้

5.1 จริยธรรม บทบาท และหน้าที่ของผู้เขียน

5.1.1 บทความที่ผู้เขียนยื่นเข้ามายังวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร เพื่อให้พิจารณานั้น จะต้องไม่ไปยื่นต่อวารสารอื่นใดในคราวหรือเวลาเดียวกัน เว้นแต่ไม่ผ่านการพิจารณาและได้รับเอกสารยืนยันผลการพิจารณาจากกองบรรณาธิการแล้ว จึงจะสามารถดำเนินการยื่นต่อวารสารอื่นใดได้

5.1.2 ผู้เขียนต้องไม่ทำการคัดลอกผลงานทางวิชาการของผู้เขียนอื่น และไม่ตีพิมพ์ซ้ำผลงานของตนเอง (Self-Plagiarism) ไม่ลักลอกผลงานของตนเอง สำหรับข้อมูลอื่นใดของผู้เขียนอื่นที่ผู้เขียนนำมาใช้ในบทความจะต้องทำการเขียนอ้างอิงในส่วนเนื้อหาของเนื้อหาและอ้างอิงส่วนท้ายให้ถูกต้องตามหลักวิชาการ

5.1.3 ผู้เขียนจะต้องนำเสนอผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง การวิเคราะห์ หรือการคำนวณอย่างตรงไปตรงมา ไม่บิดเบือนข้อมูล (Fabrication or Misrepresentation) จากความเป็นจริงและไม่สร้างหลักฐานเท็จเพื่อรองรับผลลัพธ์ของตนเอง

5.1.4 ผู้เขียนจำเป็นต้องกล่าวคำขอบคุณบุคคลหรือหน่วยงานไว้ในกิตติกรรมประกาศ หากผู้เขียนได้รับทุนวิจัยความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือ เครื่องจักร อุปกรณ์ หรือช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เพื่อให้ได้มาซึ่งความสำเร็จของบทความฉบับนั้น ๆ

5.1.5 วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ไม่อนุญาตให้เพิ่มเติมบุคคลอื่นใดที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้อง เข้ามา

ชื่ออยู่ในบทความ เช่น ไม่มีส่วนร่วมในการทำวิจัย หรือไม่มีส่วนร่วมในการเขียนบทความนั้น ๆ โดยผู้เขียนทุกท่านที่มีชื่อในบทความจะต้องมีส่วนร่วมรับผิดชอบ

5.2 จริยธรรม บทบาท และหน้าที่ของบรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสาร

5.2.1 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร มีบทบาทและหน้าที่ในการพิจารณาบทความเบื้องต้นก่อนรับเข้าสู่กระบวนการของวารสาร ประกอบด้วย การพิจารณาเนื้อหาบทความกับกรอบของวารสาร การพิจารณารูปแบบการเขียนบทความ การพิจารณาความเข้มข้นของบทความ การลบลอกผลงานทางวิชาการ การเลือกและกำหนดผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ และพิจารณาคุณภาพโดยรวมของบทความ ก่อนเข้าสู่กระบวนการประเมินบทความต่อไป

5.2.2 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารต้องพิจารณาบทความเบื้องต้นบนพื้นฐานคุณธรรมและจริยธรรม โดยไม่เอนเอียงหรือใช้ความรู้สึกส่วนตัวพิจารณาบทความนั้น ต้องไม่มีอคติต่อผู้เขียนหรือต่อหน่วยงาน ของผู้เขียน

5.2.3 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารต้องกำหนดหรือเลือกผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความที่มีความเชี่ยวชาญตรงตามสาขาของบทความนั้น ๆ โดยผู้ทรงคุณวุฒิที่กำหนดนั้นจะต้องไม่มาจากหน่วยงานเดียวกันกับผู้เขียนและผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความทุกท่านที่ประเมินบทความเดียวกันจะต้องไม่มาจากหน่วยงานเดียวกันด้วย ทั้งนี้เพื่อป้องกันผลประโยชน์ทับซ้อนที่อาจเกิดขึ้น

5.2.4 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารต้องเก็บรักษาความลับเกี่ยวกับผู้เขียนและผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ไม่ให้ทราบข้อมูลซึ่งกันและกัน หมายความว่า ผู้ทรงคุณวุฒิที่เป็นผู้ประเมินบทความจะต้องไม่ทราบชื่อผู้เขียนและชื่อหน่วยงาน และผู้เขียนจะต้องไม่ทราบชื่อและหน่วยงานผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ (ประเภทของ Peer Review เป็นแบบ Double Blinded) เพื่อป้องกันปัญหาความขัดแย้งที่อาจเกิดขึ้นได้

5.2.5 บรรณาธิการ กองบรรณาธิการ ที่ปรึกษาวารสาร รวมทั้งผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการจัดทำวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ต้องไม่ตีพิมพ์บทความของตนเองลงในวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ที่กำกับดูแลอยู่โดยไม่มีข้อยกเว้น

5.2.6 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ต้องไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อนใด ๆ อันไม่ชอบธรรมและผิดหลักจริยธรรมกับผู้เขียน และกับผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ โดยต้องไม่มีการเรียกรับผลประโยชน์ใด ๆ ทั้งสิ้น

5.2.7 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารต้องควบคุมและกำกับกระบวนการต่าง ๆ ของวารสารอย่างตรงไปตรงมา ไม่เข้าข้างผู้เขียนใด หรือให้ความช่วยเหลือที่ไม่ถูกต้อง ผิดหลักคุณธรรม จริยธรรมและขาดธรรมาภิบาล

5.2.8 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มีหน้าที่ต้องให้ความร่วมมือ ควบคุมและกำกับให้วารสารมีความถูกต้องและมีคุณภาพเป็นไปตามที่ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทยกำหนดตามมาตรฐาน

5.3 จริยธรรม บทบาท และหน้าที่ของผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

5.3.1 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความมีหน้าที่ประเมินบทความในด้านต่าง ๆ ตามรูปแบบที่วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร กำหนดด้วยความเข้มข้นและให้ข้อเสนอแนะหรือเหตุผลเชิงวิชาการอันเป็นประโยชน์ต่อผู้เขียน

5.3.2 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องประเมินบทความที่ได้รับมอบหมายจากบรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ให้แล้วเสร็จในช่วงระยะเวลาที่กำหนด เพื่อประโยชน์สูงสุดของผู้เขียนบทความ

5.3.3 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องพิจารณาบทความที่ได้รับจากบรรณาธิการหรือกองบรรณาธิการถึงความเชี่ยวชาญของตนเองกับเนื้อหาในบทความ หากเห็นว่าบทความที่ได้รับมีเนื้อหาไม่ตรงตามความเชี่ยวชาญที่แท้จริงจะต้องแจ้งกองบรรณาธิการวารสารให้รับทราบโดยเร็วและปฏิเสธการประเมิน

5.3.4 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องมีหลักจริยธรรมในการประเมินบทความ ไม่เอนเอียงหรือมีอคติต่อเนื้อหาบทความ ต้องไม่ใช้ความคิดเห็นส่วนตัวที่ไม่เป็นไปตามหลักทฤษฎีเชิงวิชาการ ปราศจากหลักฐานที่น่าเชื่อถือได้มาเป็นเกณฑ์ในการตัดสินบทความนั้น ๆ

5.3.5 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องเก็บรักษาความลับ ด้วยการไม่เปิดเผยข้อมูลเนื้อหาในบทความของผู้เขียนแก่บุคคลอื่นใดในช่วงระยะเวลาของการประเมินบทความนั้น

6. การอ้างอิง

การอ้างอิงในบทความวิจัยและบทความวิชาการสำหรับวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กำหนดการอ้างอิงให้เป็นไปตามรูปแบบ IEEE (อ้างอิงจาก <https://www.ieee.org/documents/ieeecitationref.pdf> หรือที่ http://www.ieee.org/documents/style_manual.pdf) โดยต้องเขียนเป็นภาษาอังกฤษเท่านั้น หากบทความที่อ้างอิงมาจากบทความภาษาไทย ต้องแปลเป็นภาษาอังกฤษให้ถูกต้อง สำหรับการใส่อ้างอิงในเนื้อเรื่อง (In-text citations) ให้ใช้เครื่องหมาย [] โดยมีตัวอย่างการเขียน เช่น [1] หรือ [2] หรือ [1], [2] หรือ [1]-[3] หรือ [1], [3]-[8] หรือ [9], [10], [15], [16] หากมีการอ้างอิงซ้ำบทความเดิมให้ใช้หมายเลขเดิม

ในกรณีมีการอ้างอิงในเนื้อหาด้วยการกำหนดชื่อผู้แต่งบทความให้เขียนตามตัวอย่าง ดังนี้ K. S. Karukanan [1] หรือ L. A. Hoi and S. D. Woo [2] หรือ P. A. Abarwale et al. [3]

ในส่วนของการอ้างอิงส่วนท้าย (Reference List) จะต้องเรียงตามลำดับบทความที่เขียนอ้างอิงในเนื้อเรื่อง ซึ่งจำแนกรูปแบบการเขียนอ้างอิงส่วนท้ายได้ดังต่อไปนี้

1) การอ้างอิงจากบทความในวารสาร (Journal Articles)

รูปแบบ: [1] Author, "Title of Article," *Title of Journal*, Volume, Issue, Pages. Year.

ตัวอย่าง:

- [1] H. Li, Z. Huang, L. Cheng, S. Kong and S. Liu, "Structure and dielectric properties of novel low temperature co-fired Bi₂O₃-RE₂O₃-MoO₃ (RE=Pr, Nd, Sm, and Yb) based microwave ceramics," *Ceramics International Journal*, vol. 43, no. 5, pp. 4570-4575, Apr. 2017.

2) การอ้างอิงจากการนำเสนอผลงานในการประชุมทางวิชาการ (Conference Technical Articles)

รูปแบบ: [1] Author, "Title of paper," in *Title of Conference*, Conference date, Editor, Ed.

Location: Publisher, Year, Pages.

ตัวอย่าง:

- [2] T. Fedushchak, M. Uimin, S. Zhuravkov and A. Vosmerikov, "Nanopowder hydrogenation catalysts of diesel fraction components," in *Proceeding of 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST)*, Tomsk Polytechnic University Tomsk, Russia, 2012, pp. 1–4.
- [3] W. Herz, M. Süßer, A. Ulbricht and F. Wüchner, "The operation experience with the dual cooling system of the polo coil (two phase-supercritical He)," in *Proceedings of the Sixteenth International Cryogenic Engineering Conference/International Cryogenic Materials Conference*, Germany, 1997, pp. 469–472.

3) การอ้างอิงจากหนังสือ (Books)

รูปแบบ: [1] Author. *Title of Book*, Editor, ed. Location: Publisher, Year, Pages.

ตัวอย่าง:

- [4] R. C. Hibbeler, *Mechanics of Materials*, 9th ed. Boston: Pearson, 2013.
- [5] R. M. Burton, B. Obel and G. DeSanctis, *Organizational Design: A Step-by-Step Approach*, 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2011.

4) การอ้างอิงจากบทในหนังสือ

รูปแบบ: [1] J. K. Author, "Title of chapter in the book," in *Title of His Published Book*, xth ed. City of Publisher, Country if not USA: Abbrev. of Publisher, year, ch. x, sec. x, pp. xxx–xxx.

ตัวอย่าง:

- [6] L. Stein, "Random patterns," in *Computers and You*, J. S. Brake, Ed. New York: Wiley, 1994, pp. 55-70.
- [7] R. L. Myer, "Parametric oscillators and nonlinear materials," in *Nonlinear Optics*, vol. 4, P. G. Harper and B. S. Wherret, 1st ed. San Francisco, CA: Academic, 1977, pp. 47-160.

5) การอ้างอิงจากวิทยานิพนธ์ (Theses and Dissertations)

รูปแบบ:

- [1] J. K. Author, "Title of dissertation," Ph.D. dissertation, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., City of Univ., Abbrev. State, year.
- [2] J. K. Author, "Title of thesis," M.S. thesis, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., City of Univ., Abbrev. State, year.

ตัวอย่าง:

- [8] J. O. Williams, "Narrow-band analyzer," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Harvard Univ., Cambridge, MA, 1993.
- [9] N. Kawasaki, "Parametric study of thermal and chemical nonequilibrium nozzle flow," M.S. thesis, Dept. Electron. Eng., Osaka Univ., Osaka, Japan, 1993.

6) การอ้างอิงจากสิทธิบัตร (Patents)

รูปแบบ: [1] J. K. Author, "Title of patent," U.S. Patent x xxx xxx, Abbrev. Month, day, year.

ตัวอย่าง:

[10] J. P. Wilkinson, "Nonlinear resonant circuit devices," U.S. Patent 3 624 125, July 16, 1990.

7) การอ้างอิงจากมาตรฐาน (Standards)

รูปแบบ: [1] *Title of Standard*, Standard number, date.

ตัวอย่าง:

[11] *IEEE Criteria for Class IE Electric Systems*, IEEE Standard 308, 1969.

[12] *Letter Symbols for Quantities*, ANSI Standard Y10.5-1968.

8) การอ้างอิงจากคู่มือ (Handbooks)

รูปแบบ: [1] *Name of Manual/Handbook*, x Ed., Abbrev. Name of Co., City of Co., Abbrev.
State, year, pp. xx-xx.

ตัวอย่าง:

[13] *Transmission Systems for Communications*, 3rd Ed., Western Electric Co., Winston-Salem, NC, 1985, pp. 44–60.

[14] *Motorola Semiconductor Data Manual*, Motorola Semiconductor Products Inc., Phoenix, AZ, 1989.

Research Articles

- ◆ **The Dietary Effects on Manure Characteristics and Biogas Production from Dairy Cows Feeding with Pineapple Peel**
Siraprapa Chainetr Rungnapha Khiewwijit Khanchit Ngoenkhumkhong and Worawut Chainetr
- ◆ **The Quality Changes of Coating Salted Eggs with Turmeric to Partially Replace Soil from Termite Mound during Storage**
Natcha Laokuldilok Rattanapat Manochai and Kanjana Ruttanateerawichien
- ◆ **The Application of Hard Film Coating for Extension Tool Life on Inclined Punch in the Trimming Process**
Wichai Pumchan and Komgrit Lawanwong
- ◆ **Engineering Properties of Porous Concrete Paving Blocks from Recycled Asphalt Pavement as Coarse Aggregate Replacement**
Chalermphol Chaikaew and Gritsada Sua-iam
- ◆ **Compressive Strength, Chloride Binding Capacity and Chloride Diffusion Coefficient of Concrete Containing Ground Bottom Ash and Limestone Powder**
Banyut Warinlai and Pitisan Krammart
- ◆ **Effect of Temperature on Electrical Resistivity and Capacitive Signal of Various Moisture Paddy**
Aphisik Pakdeekaew Krawee Treeamnuk Tawarat Treeamnuk and Nuttapong Ruttanadech
- ◆ **Influence of Processing and Storage Conditions on Physicochemical Properties of Chili Powder and Roasted Chili Powder**
Nichaporn Sukchum Supitchaya Surasereewong and Kwanhathai Chaethong
- ◆ **Efficiency Evaluate of Ginger Candy Machine**
Thanasit Wongsiriamnouy Tipapon Khamdeang Jirapol Klinbun and Numpon Panyoyai
- ◆ **Screening of Bacteria Isolated from Black Tiger Shrimp (*Penaeus monodon*) Intestine Using as Probiotics in Aquaculture**
Subuntith Nimrat Wuttisak Saksit and Verapong Vuthiphandchai
- ◆ **Development of Cake Decorated Cream without Trans Fat**
Boonyaporn Chuamsompong Nualsri Songsom Monruthai Srithongkerd Porntawee Tanasombun and Natcha Phanwong
- ◆ **The comparison of failing load of architectural fabrics of weld seams between the hot air welding and high frequency welding**
Kunthakorn Khaothong Jetsadaporn Priyadumkol and Prapapan Ketsarapong
- ◆ **Increasing efficiency of vent brick Arabian style manufacturing Case study: Muslim Modern at Pattani Province**
Suhaidee Sani Surasit Rawangwong Julaluk Rojananukul and Chaiyoot Meengam
- ◆ **The Overall Equipment Effectiveness Improvement of the Water Filtration Systems in the Large Water Treatment Plant by Total Productive Maintenance Evaluation: A Case Study of the Water Treatment Plant**
Sirawit Pussawiro and Suparatchai Vorarat
- ◆ **Influence of Drying Air Velocity Characteristics on Paddy Drying**
Nuttapong Wongbubpa Krawee Treeamnuk and Tawarat Treeamnuk
- ◆ **Parameter Analysis that Affects the Ability to Resistance Penetration of Ammunition on the Aluminum Armor Surface Using Finite Element Method**
Anucha Saicharoen Padipan Tinprabath and Prakorb Chartpuk
- ◆ **Mechanical Properties of UHMWPE Composite with Al_2O_3 for Application in Engineering**
Ngampan Chalo and Prakorb Chartpuk