

วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ

ปีที่ 15 เล่มที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2564

UTK

RESEARCH JOURNAL

Vol.15 No.2 JULY - DECEMBER 2021

ISSN 1906 - 0874

ISSN (Online) 2651 - 2130



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

Rajamangala University of Technology Krungthep

วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

Rajamangala University of Technology Krungthep Research Journal

ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2564 Vol 15 No.2 July - December 2021

เจ้าของ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทน์มณี

ศาสตราจารย์ ดร.ชัยยุทธ ชินณะราศรี

ศาสตราจารย์สมชาย วงศ์วิเศษ

ดร.สิริเบญญา กอวัฒนา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพรัตน์ ภัยวิมุตติ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สายชล ชุตติเจื้อจัน

ประภาพร ร้อยพรมมา

นางสาวรุ่งทิพา วงศ์ไพศาลฤทธิ์

รักษาการแทน อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลกรุงเทพ

กรรมการสภาวิชาการมหาวิทยาลัย

กรรมการสภามหาวิทยาลัย

กรรมการสภามหาวิทยาลัย

รองอธิการบดี

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม ศิวารุช

รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.กนกวรรณ จ้าวสุวรรณ

ผู้ช่วยผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

ดร.กฤษณ์ สงวนพวง

ผู้ช่วยผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จันทน์ไทย

ศาสตราจารย์กิตติคุณ ดร.อจธรา จันทน์ฉาย

รองศาสตราจารย์ ดร.นเรศเรษฐ พัฒนเดช

รองศาสตราจารย์ ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์

รองศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ ศรีวิงษ์กุล

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภะ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประยูร สุรินทร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุราษฎร์ พรหมจันทร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมล จิรเสียมรุก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมกริช ละวรรณวงษ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรพล จิรจรัส

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรนาถ ไกรภู

ดร.ประกอบ ขาติภักดิ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

มหาวิทยาลัยมหิดล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

เจ้าหน้าที่ประจำวารสาร

นางสาวเกตุวดี อุเทน

นางนภานภา จรเชื้อ

นางสาวขวัญใจ ยุกศิริรัตน์

นางสาวอัจฉรา จินดาจ้านง

นายวันนิวัติ วันทนา

นางวิไรรัตน์ ราษฎร์สภา

นางจันทนา สังข์อู่

นางสาวกนกวรรณ วอนเพียร

นางสาววันทนา ประดิธนาธรรม

นายวีระวัฒน์ ราษฎร์สภา

บทความที่ลงตีพิมพ์ในวารสารเป็นความคิดเห็นของผู้เขียน กองบรรณาธิการไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

ความเป็นมา

วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ISSN 1906 - 0874 เป็นวารสารวิชาการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ โดยสถาบันวิจัยและพัฒนา ได้มีการจัดทำวารสารอย่างต่อเนื่องตั้งแต่พ.ศ. 2550 จนถึงปัจจุบัน ซึ่งเป็นวารสารที่อยู่ในฐานข้อมูลของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารไทย (TCI) กลุ่มที่ 2 ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยเผยแพร่เป็นราย 6 เดือน ซึ่งตีพิมพ์ปีละ 2 ฉบับ (ฉบับละ 15-20 บทความ) และมีการดำเนินงาน จัดพิมพ์บทความประเภทต่าง ๆ ได้แก่ บทความวิจัย (Research paper) และ บทความวิชาการ (Academic paper)

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ เป็นบทความที่สร้างองค์ความรู้และมีคุณภาพในทางวิชาการสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการอ้างอิงได้ เพราะผ่านการพิจารณากลั่นกรองและประเมินคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง จากหลากหลายสถาบัน 3 ท่าน ซึ่งเป็นการประเมินแบบไม่แสดงชื่อผู้แต่งและผู้ประเมิน (Double blinded) ก่อนที่จะเผยแพร่สู่สาธารณชน จึงทำให้วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ เป็นวารสารวิชาการที่มีคุณภาพ

กองบรรณาธิการ วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ จัดทำวารสารเป็นรูปเล่มฉบับสมบูรณ์และเผยแพร่ให้กับสถาบันการศึกษาต่าง ๆ ทั่วประเทศไทย นอกจากนี้ยังสามารถสืบค้นเพื่ออ้างอิงหรืออ่านบทความที่เปี่ยมด้วยองค์ความรู้ได้ที่ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk>

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเผยแพร่บทความวิจัย (Research paper) และบทความวิชาการ (Academic paper) ที่มีคุณภาพของอาจารย์นักวิจัย นักวิชาการทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย ในสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง และสาขาต่าง ๆ ที่มีการบูรณาการข้ามศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ที่ทันสมัย ได้แก่
 - 1.1. Environment Chemistry
 - 1.2 General Engineering
 - 1.3. Applied Mathematics
 - 1.4 Renewable Energy, Sustainability and the Environment
 - 1.5 Biomaterials

2. เพื่อส่งเสริมและเป็นกลไกการขับเคลื่อนงานวิจัย ทำให้เกิดผลงานวิจัยที่เข้าไปสู่การพัฒนาต่อภาคสังคม ชุมชน และนำไปประยุกต์ใช้ในการเรียนการสอนเพื่อต่อยอด และเกิดความเชื่อมโยงระหว่างงานวิจัย งานวิชาการ ซึ่งนำมาสู่การเกิดประโยชน์ต่อมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ และตอบสนอง ต่อการพัฒนาเทคโนโลยีของประเทศไทย

นโยบายการรับบทความ

กองบรรณาธิการวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ มีความยินดีที่จะรับบทความจากอาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการทั้ง ภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย ในสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ได้แก่ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ และสาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง รวมถึงสาขาต่าง ๆ ที่มีการบูรณาการข้ามศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่เขียนเป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ ซึ่งผลงานวิชาการที่ส่งมาขอตีพิมพ์ต้องไม่เคยเผยแพร่ในสิ่งพิมพ์อื่นใดมาก่อน และต้องไม่อยู่ในระหว่างการพิจารณาของวารสารอื่น

การละเมิดลิขสิทธิ์ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้ส่งบทความโดยตรง บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ต้องผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการจากผู้ทรงคุณวุฒิ และได้รับความเห็นชอบจากกองบรรณาธิการ

ข้อความที่ปรากฏอยู่ในแต่ละบทความที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการเล่มนี้ เป็นความคิดเห็นส่วนตัวของผู้เขียนแต่ละ ท่าน ไม่เกี่ยวข้องกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพแต่อย่างใด ความรับผิดชอบด้านเนื้อหา และการ ตรวจร่างบทความแต่ละบทความเป็นของผู้เขียนแต่ละท่าน หากมีความผิดพลาดใด ๆ ผู้เขียน แต่ละท่านจะต้องรับผิดชอบบทความของตนเองแต่ผู้เดียว

กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์มิให้นำเนื้อหา หรือข้อคิดเห็นใด ๆ ของบทความในวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ ไป เผยแพร่ก่อนได้รับอนุญาตจากกองบรรณาธิการ อย่างเป็นลายลักษณ์อักษร ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ถือเป็น ลิขสิทธิ์ของวารสาร

ผู้ประสงค์จะส่งบทความกรุณาอ่านรายละเอียดการส่งบทความที่คำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความ ซึ่งได้รับไว้เล่มวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ หรือ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk> และสามารถส่ง Online ได้โดยกรอกรายละเอียดให้ครบถ้วนในระบบการส่งบทความ Online หากต้องการ สอบถามข้อมูลเพิ่มเติม ติดต่อได้ที่

สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120
โทร. 0 2286 9600 ต่อ 1177 โทรสาร 0 2287 9684
E-mail: utk_research_journal@mail.rmutk.ac.th
www.rdi.rmutk.ac.th

กำหนดการเผยแพร่

ปีละ 2 ฉบับ (ทุก 6 เดือนต่อฉบับ)

ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – มิถุนายน

ฉบับที่ 2 เดือนกรกฎาคม – ธันวาคม

การเผยแพร่

มอบให้สถาบันการศึกษาต่าง ๆ ทั่วประเทศไทย และ

<https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk>

สารบัญ

	หน้า
จลนพลศาสตร์และกลไกการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซาน Kinetics and Mechanism Adsorption of Methylene Blue Dye by Chitosan Flakes.....	1
ซัชลิษา บุญพะเนียด, หญิง อามาน, มัลลิกา โรจน์คงทรัพย์, โกวิทย์ ปิยะมั่งคณา	
อิทธิพลของสารตกแต่งสำเร็จกันยับชนิดต่าง ๆ ต่อสมบัติของผ้าฝ้ายลินิน Effect of various crease-resistant finish on muslin fabric properties.....	13
ธนวัฒน์ แก้วเกตุ, ธัญลักษณ์ ศรีสุข, ปิยะพร คามภิรภาพพันธ์	
ประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนของสารสกัดหยาบเอนไซม์ปาเปนจากส่วนเหลือใช้มะละกอ Protein Digestion Efficiency of Papain Enzyme Crude Extract from Papaya Byproduct.....	24
ดวงทิพย์ ไช้แก้ว, สารินิธิ บุญประสพ	
การศึกษาคคุณค่าทางโภชนาการของพืชอาหารหมักจากข้าวฟ่างหวาน Study on Nutritive Value of Silage from Sweet Sorghum (Sorghum bicolor (L.) Moench.)..	34
ยิ่งยง เมฆลอย, มณี อัครวานนท์	
เครื่องวัดฝุ่น PM2.5 แจ้งเตือนทางแอปพลิเคชันไลน์ Dust PM2.5 Monitoring and Alert System via LINE Application.....	45
ดอนสัน ปงผาบ, ปกรณ์ สันตกิจ	
เครื่องตรวจวัดความหวานเมลอนด้วยเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้ A Device of Measuring Melon Sweetness by Near-Infrared Technique.....	58
ชิตชนก มากจันทร์, สุธี ลิ้มแจ้งเพิ่มพูน, วิรัช กองสิน, กิตติพงศ์ คล้ายดี, เอกชัย รัตนบรรลือ	
การจำลองระบบแก้ว Gd ₂ O ₃ -TeO ₂ -B ₂ O ₃ เพื่อศึกษาสมบัติการกำบังรังสีกัมมาไอออน Simulation of Gd ₂ O ₃ -TeO ₂ -B ₂ O ₃ Glass System to investigate the Ionizing Radiation Shielding Properties.....	70
กิตติศักดิ์ ศรีวงศ์ษา, พันธศักดิ์ กล้ากล่อมจิตร, รัฐนันท์ ลิ้มเกียรติเชิดชู, อภิษฎา คิณชกวัฒน์, อัยรินทร์ ต้นติวชรกุลธร, สุนันทศักดิ์ ระวังวงศ์, จุมพล ขอบข้า	

อิทธิพลของกระบวนการดัดขึ้นรูปแบบ 3 จุด ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและความเสียหาย
ของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ JSC980Y

Effect of 3 Points Bending Process on Microstructure Evolution and Damage Characteristics
of Dual Phase High Strength Steel Sheets JSC980Y..... 84

ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ, พงศกร หลีตระกูล

การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ช่วยในการจับยึดชิ้นงานสำหรับกระบวนการตัดแบบหลายขั้นตอนบนเครื่อง
ตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้า

Designing and manufacturing clamping accessory for multi-stage cutting process on the
wire electrical discharge machine..... 95

กมลพงศ์ แจ่มกมล, ปิยะพงษ์ คำคุณ

การเปรียบเทียบวิธีการหาค่าเหมาะที่สุด ด้วยโซลเวอร์ของ Excel 2019 และขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุด
แบบวาฬ

Comparing Methods of Optimization in Solver of Excel 2019 and Whale Optimization
Algorithm..... 106

วรา มินเสน, นุสบา แสงงามเมือง, พิมพ์ภา ธาณินพงศ์, สาลินี อารังเลาะห์พันธุ์

จลนพลศาสตร์และกลไกการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซาน

Kinetics and Mechanism Adsorption of Methylene Blue Dye by Chitosan Flakes

ชัชลิภา บุญพะเนียด¹, หญิง อามาน², มัลลิกา โรจน์คงทรัพย์³, โกวิท ปิยะมังกลา^{4*}
Chatchalida Boonpanaid¹, Ying Arman², Mullika Rojkongsub³, Kowit Piyamongkala^{4*}

^{1,2,3,4*}ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

^{1,2,3,4*}Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology
North Bangkok, Thailand

*Corresponding Author. E-mail: kowit.p@sci.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานเป็นตัวดูดซับโดยทำการทดลองแบบแบตช์ ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลูในช่วง 24.4 - 110.2 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า เกล็ดไคโตซานมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูเท่ากับ 18.4 - 48.4 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์มีการอธิบายโดยใช้สมการ Pseudo-first order และ Pseudo - second order พบว่าการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูสอดคล้องกับ Pseudo-second order กลไกการดูดซับเกิดขึ้น 2 ขั้นตอน และการแพร่ที่ผิวเป็นขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ

คำสำคัญ: จลนพลศาสตร์การดูดซับ สีย้อมเมทิลีนบลู เกล็ดไคโตซาน

ABSTRACT

This research investigated the adsorption of methylene blue dye by chitosan flakes as adsorbent in batch experiments. The results of studying found that the initial concentration of methylene blue dye in the range of 24.4 - 110.2 mg/L showed the chitosan flakes had the ability to adsorb methylene blue dye of 18.4 - 48.4 mg/g, respectively. The kinetics model was described by pseudo - first order and pseudo - second order equations. It was found that the adsorption of methylene blue dye was accorded with the pseudo - second - order. The mechanism of the adsorption occurred 2 steps and the film diffusion was the rate limiting step of the adsorption.

Keyword: Kinetics, Adsorption, Methylene blue dye, Chitosan flakes

Received 25-05-2021

Revised 11-07-2021

Accepted 21-07-2021

1. บทนำ

อุตสาหกรรมสิ่งทอมีความสำคัญทางด้านเศรษฐกิจต่อประเทศไทยเป็นอย่างมาก ในปี พ.ศ. 2563 ประเทศไทยมีโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอทั้งสิ้น 4,830 โรงงาน [1] การฟอกย้อมเป็นการเปลี่ยนวัตถุสิ่งทอจำพวกเส้นด้ายดิบและผ้าดิบ ไปเป็นวัสดุสำเร็จ เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการทำเครื่องนุ่งห่ม การฟอกย้อมต้องใช้น้ำปริมาณมาก เพื่อเป็นตัวกลางให้สารเคมีและสีย้อมเกาะติดเส้นใย ในกระบวนการทำความสะอาดผ้า [2] น้ำเสียที่ปล่อยมาจากการฟอกย้อม จึงมีการปนเปื้อนของเส้นใยแป้ง สีย้อม กรดอินทรีย์ ไอออนโลหะหนัก [3] นอกจากนั้น ยังมีสีเข้มมาก และมีค่าความเป็นกรดต่ำ หรือมีค่าความเป็นเบสสูง หากปล่อยน้ำเสียเหล่านี้ลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ มีผลทำให้เกิดความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ เพื่อลดปัญหาของสีย้อมที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงต้องมีการก่อสร้างระบบบำบัดน้ำเสียให้ได้มาตรฐานก่อนปล่อยเป็นน้ำทิ้งโดยประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม กำหนดน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรมในส่วนของสีกำหนดค่าไว้ไม่เกิน 300 เอดีเอ็มไอ [4]

น้ำเสียจากการฟอกย้อม ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสีย้อมและสารเคมีที่เหลือตกค้างอยู่ในน้ำเสีย สามารถบำบัดน้ำเสียได้หลากหลายกระบวนการ [5] ได้แก่ การกำจัดของแข็งแขวนลอย โดยการแยกเศษผ้าด้วยตะแกรง การตกตะกอนกรวดหรือเม็ดทรายด้วยถังตกตะกอนขั้นต้น การกรองด้วยทรายหยาบ การเติมอลูมิเนียมซัลเฟตหรือแคลเซียมออกไซด์เพื่อกำจัดสารแขวนลอยที่มีขนาดเล็ก การใช้แก๊สโอโซนเพื่อย่อยสลายสีย้อมให้มีโมเลกุลเล็กลงและลดความเป็นพิษของสีย้อม นอกจากนั้นยังมี การใช้จุลินทรีย์กำจัด

สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ ให้เป็น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แก๊สมีเทน และน้ำ เป็นต้น

การดูดซับ นิยมนำมาใช้ในการบำบัดสีย้อมในน้ำเสีย เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงและใช้ระยะเวลาในการบำบัดสั้น ไม่จำเป็นต้องใช้ความดันและอุณหภูมิสูงในการดำเนินงาน ทำให้มีค่าใช้จ่ายในเรื่องวัสดุและการบำรุงรักษาต่ำ หลังการดูดซับยังสามารถนำตัวดูดซับไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้อีกด้วย ตัวดูดซับที่นิยมนำมาใช้ในการดูดซับน้ำเสียสีย้อม ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ กากมะพร้าว แกลบข้าวสาลี เมล็ดทุเรียน ชังข้าวโพด [6]

โคโคซานเป็นวัสดุจากธรรมชาติที่สลายตัวเองได้ง่าย ไม่เกิดการตกค้างในสิ่งแวดล้อม มีความปลอดภัยสูงเมื่อนำมาใช้กับมนุษย์ โครงสร้างทางเคมีของโคโคซานมีหมู่อะมิโนร่วมอยู่ด้วย จึงมีผลทำให้เป็นสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่ดีโคโคซานสามารถดูดซับสารมลพิษในน้ำเสียได้หลากหลายชนิดและมีประสิทธิภาพสูง จึงมีการนำโคโคซานมาดูดซับกรดฮิวมิก มีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 1.2 มิลลิกรัมต่อกรัม [7] ดูดซับไอออนเหล็ก (II) ไอออนทองแดง (II) และไอออนโครเมียม (VI) มีค่าร้อยละ 43, 90 และ 40 ตามลำดับ [8, 9, 10] ดูดซับสีย้อมรีเอ็กทีฟเรด 141 สีย้อม Sirius Red F3B และสีย้อม Telon Red M-3B มีค่าร้อยละการดูดซับสีย้อมทุกชนิดที่กล่าวมาข้างต้นนี้มากกว่าร้อยละ 80 [11] ดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยมีความสามารถในการดูดซับสูงสุด 50 มิลลิกรัมต่อกรัม [12]

สีย้อมเมทิลีนบลูเป็นสีย้อมสังเคราะห์ มีโครงสร้างเป็นไอออนประจุบวกในส่วนประกอบที่ให้สีมีความเป็นพิษต่อหนูทดลองเมื่อกลืนกินในระดับปานกลาง มีค่า LD₅₀ อยู่ที่ 1,180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม [13] มนุษย์เมื่อมีการสัมผัสสีย้อมเมทิลีนบลูอยู่เป็นประจำ

ก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง การกลืนกินในปริมาณมาก มีผลต่อระบบทางเดินหายใจ แสดงอาการเด่นของหัวใจที่เร็วกว่าปกติ ตลอดจนหายใจติดขัด [3] สีย้อมเมทิลีนบลูละลายน้ำได้ 43.6 กรัมต่อน้ำ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส [14] ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมจึงนำสีย้อมเมทิลีนบลูมาละลายน้ำ ใช้เป็นสีในผ้าฝ้าย ขนสัตว์ ตลอดจนกระดาษ การปนเปื้อนสีย้อมเมทิลีนบลูในแหล่งน้ำ ก่อให้เกิดสีน้ำเงินเข้มที่น่ายังเกียจเป็นอย่างมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในการนำเกล็ดโคโตซานมาใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู โดยทำการศึกษาในส่วนของการดูดซับสีย้อมและการดูดซับแบบแบตช์ เพื่อต้องการหาระยะเวลาในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำเสีย

2. วิธีดำเนินการ

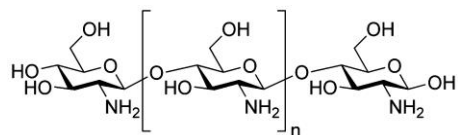
2.1. สารเคมี

เกล็ดโคโตซาน ($C_6H_{11}NO_4$)_n ทำจากเปลือกกุ้ง เป็นเกรดการค้า (บริษัท Sea Fresh (ประเทศไทย)) มีร้อยละของดีอะซิลเลชั่น มากกว่าร้อยละ 95 สูตรโครงสร้างทางเคมีของโคโตซานแสดงในภาพที่ 1

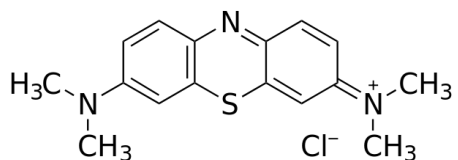
เกล็ดโคโตซานมีพื้นที่ผิวปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุน มีค่าเท่ากับ 3.07 ตารางเมตรต่อกรัม 7.49×10^{-3} ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และ 9.91 นาโนเมตร ตามลำดับ และมีประจุที่ผิวเป็นศูนย์ เท่ากับ pH 7.6[12]

กรดแอสติค ($C_2H_4O_2$) เกรดวิเคราะห์ (VWR International (ประเทศอังกฤษ)) สีย้อมเมทิลีนบลู ($C_{16}H_{18}ClN_3S$) เกรดวิเคราะห์ (Fluka (ประเทศสวิสเซอร์แลนด์)) สูตรโครงสร้างสีย้อมเมทิลีนบลู ดัง

แสดงในภาพที่ 2 ตลอดจนการทดลองใช้น้ำกลั่นในการเตรียมสารละลาย



ภาพที่ 1 โครงสร้างทางเคมีโคโตซาน [15]



ภาพที่ 2 โครงสร้างทางเคมีสีย้อมเมทิลีนบลู [16]

2.2. การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดโคโตซาน

เกล็ดโคโตซานปริมาณ 0.05 กรัม ถูกชั่งน้ำหนัก และนำไปใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นจึงมีการเติมสีย้อมเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 24.4, 45.8, 67.6, 91.9 และ 110.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งวัดความเป็นกรด-เบส โดย pH มิเตอร์ (Cyberscan, รุ่น Eutech pH 510, ประเทศสิงคโปร์) ได้เท่ากับ pH 8.0 ปริมาณ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ตามลงในขวดรูปชมพู่ จากนั้น จึงนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า (Umac Scientific, รุ่น UM-S60, ประเทศไทย) ที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที ในระหว่างดำเนินการทดลอง มีการเก็บตัวอย่างสีย้อมเมทิลีนบลูตามช่วงเวลาที่กำหนด จนกระทั่งถึงเวลา 60 นาที จากนั้น ตัวอย่างสีย้อมเมทิลีนบลูที่เก็บได้ มีการนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสีย้อมเมทิลีนบลูที่หลงเหลืออยู่ในสารละลายตัวอย่าง ด้วยเครื่องสเปกโตรนิค (Thermo, รุ่น Genesys 20,

ประเทศสหรัฐอเมริกา) ที่ความยาวคลื่น 663 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงที่วิเคราะห์ได้เข้ามาแทนค่าในสูตรของสมการเส้นตรงจากกราฟมาตรฐานที่เตรียมขึ้นจากนั้น คำนวณเป็นความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ภายหลังจากการดูดซับ ดำเนินการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่เวลาใด ๆ คำนวณได้จากสมการที่ (1) [17]

$$q_{t, \text{exp}} = \frac{(C_0 - C_t) V}{W} \quad (1)$$

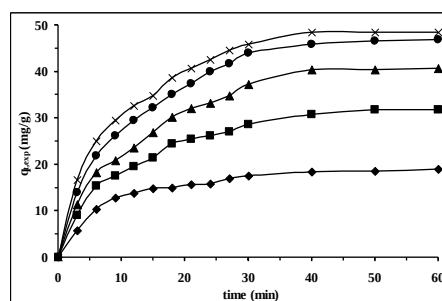
เมื่อ $q_{t, \text{exp}}$ หมายถึงความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่เวลาใด ๆ จากการทดลอง (มิลลิกรัมต่อกรัม) C_0 หมายถึงความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อลิตร) C_t หมายถึงความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลูที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร) V หมายถึงปริมาตรสีย้อมเมทิลีนบลู (ลิตร) และ W หมายถึงน้ำหนักเกล็ดไคโตซาน (กรัม)

3. ผลการดำเนินการและอภิปรายผล

3.1. ผลความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลู

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายมีผลอย่างมากต่อความสามารถในการดูดซับ [18] ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 24.4, 45.8, 67.6, 91.9 และ 110.2 มิลลิกรัมต่อลิตรโดยเกล็ดไคโตซานปริมาณ 0.05 กรัม แสดงในภาพที่ 3 พบว่า ในช่วงแรกของการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมาก เมื่อการดูดซับยังคงดำเนินต่อไปโดยเพิ่มเวลาการดูดซับ พบว่าความสามารถในการดูด

ซับสีย้อมเมทิลีนบลูมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นและมีสมดุล การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูเกิดขึ้นที่เวลา 40 นาที มีความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูเท่ากับ 18.4, 30.8, 40.4, 45.8 และ 48.4 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ ผลการทดลองดังกล่าวอธิบายเพิ่มเติมได้ว่า การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลูมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ผลในกรณีนี้เกิดขึ้นเนื่องจาก การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลูให้เพิ่มสูงขึ้น มีผลทำให้เกิดความแตกต่างที่มากขึ้น ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูในสารละลายและความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูที่ผิวหน้าของเกล็ดไคโตซาน เป็นผลทำให้เกิดแรงผลักดันจากการถ่ายโอนมวลเพิ่มมากขึ้น [19] ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลูให้เพิ่มสูงขึ้น จึงมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของเกล็ดไคโตซานเพิ่มสูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของพัชรนันท์ จัทรพลอย และคณะ ได้ใช้ถ่านเปลือกส้มโอที่เตรียมจากการเผาแบบเตาลานดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู[5]



ภาพที่ 3 ความสามารถในการดูดซับของเกล็ดไคโตซาน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลีนบลู: ◆ 20.4, ■ 45.8, ▲ 67.6, ● 91.9 และ × 110.2 mg/L

3.2. จลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมเมทิลินบลูโดยเกล็ดไคโตซาน

จลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับบนผิวตัวดูดซับ กับเวลา เพื่อนำมาใช้ในการทำนายความสามารถในการดูดซับนั้นเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วหรือเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ที่เวลาเท่าใด ๆ ตลอดช่วงเวลาของการดูดซับ [20] การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับนิยมใช้แบบจำลอง Pseudo - first order และ Pseudo - second order ในการทำนายความสามารถในการดูดซับที่เวลาใด ๆ [21] สมการเส้นตรงสำหรับ pseudo - first order เขียนได้ดังสมการที่ (2) ดังนั้นการทำนายความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลินบลูโดยเกล็ดไคโตซาน สำหรับสมการ Pseudo - first order เขียนได้ดังสมการที่ (3) [22]

$$\log(q_{e,exp} - q_{t,exp}) = \log q_{e,cal} - \frac{k_1}{2.303} t \quad (2)$$

$$q_{t,cal} = q_{e,cal} (1 - e^{-k_1 t}) \quad (3)$$

เมื่อ $q_{e,exp}$ หมายถึงความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลินบลูโดยเกล็ดไคโตซานที่สภาวะสมดุลจากการทดลอง (มิลลิกรัมต่อกรัม) $q_{e,cal}$ หมายถึงความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลินบลูโดยเกล็ดไคโตซานที่สภาวะสมดุล จากการคำนวณ (มิลลิกรัมต่อกรัม) $q_{t,cal}$ หมายถึงความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลินบลูโดยเกล็ดไคโตซานที่เวลาใด ๆ ที่ได้จากการคำนวณ (มิลลิกรัมต่อกรัม) k_1 หมายถึงค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (ต่อนาที) และ t หมายถึงเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

นำผลการทดลองการดูดซับสีย้อมเมทิลินบลูโดยเกล็ดไคโตซานตลอดช่วงเวลา 60 นาทีของการดูดซับ มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง t กับ $\log(q_{e,exp} - q_{t,exp})$ ได้สมการเส้นตรง โดยความสามารถในการดูดซับที่เป็นผลจากการคำนวณ หาได้จากจุดตัดของสมการเส้นตรง ในขณะที่ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง หาได้จากความชันของสมการเส้นตรง

สมการเส้นตรงสำหรับ Pseudo - second order เขียนดังสมการที่ (4) [22] ในขณะการทำนายความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลินบลูโดยเกล็ดไคโตซาน สำหรับสมการ Pseudo - second order เขียนได้ดังสมการที่ (5)

$$\frac{t}{q_{t,exp}} = \frac{1}{k_2 q_{e,cal}^2} + \frac{1}{q_{e,cal}} t \quad (4)$$

$$q_{t,cal} = \frac{k_2 q_{e,cal}^2 t}{1 + k_2 q_{e,cal} t} \quad (5)$$

เมื่อ k_2 หมายถึงค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่สอง (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที)

นำผลการทดลองการดูดซับสีย้อมเมทิลินบลูโดยเกล็ดไคโตซานมาเขียนกราฟระหว่าง t กับ $t/q_{t,exp}$ ได้สมการเส้นตรง โดยความสามารถในการดูดซับที่เป็นผลจากการคำนวณ หาได้จากความชันของสมการเส้นตรง ในขณะที่ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่สอง หาได้จากจุดตัดแกนตั้งของสมการเส้นตรง

การพิจารณาคัดเลือกจลนพลศาสตร์ที่มีความเหมาะสมกับการดูดซับสีย้อมเมทิลินบลูโดยเกล็ดไคโตซาน สามารถทำได้หลายแนวทางดังนี้ พิจารณา

จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสมการเส้นตรงที่เข้าใกล้ 1 มากที่สุด พิจารณาจากความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานที่สภาวะสมดุลที่เปรียบเทียบจากผลการทดลองและผลจากการคำนวณซึ่งให้ผลที่ใกล้เคียงกัน และพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ให้ค่าต่ำที่สุด โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เขียนดังสมการที่ (6) [23]

$$S.D. = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{(q_{t,exp} - q_{t,cal})^2}{q_{t,exp}} \right]}{n-1}} \quad (6)$$

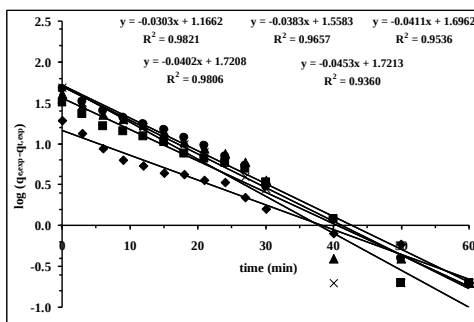
เมื่อ S.D. หมายถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) และ n หมายถึงจำนวนจุดของข้อมูล

เมื่อนำข้อมูลผลการทดลองความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานมาเขียนกราฟระหว่าง t กับ $\log(q_{e,exp} - q_{t,exp})$ ได้กราฟเส้นตรง ดังแสดงในภาพที่ 4 โดยค่าคงที่อัตราเร็วของ Pseudo - first order คำนวณหาได้จากความชันของเส้นตรง ในขณะเดียวกัน Pseudo - second order เป็นการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง t กับ $t/q_{t,exp}$ ได้กราฟเส้นตรงดังแสดงในภาพที่ 5 โดยความชันของสมการเส้นตรงมีค่าเท่ากับ $1/q_{e,cal}$ ซึ่งมีค่าเป็นบวก ในขณะที่จุดตัดแกนตั้งของสมการ Pseudo - second order สามารถนำมาใช้หาค่าคงที่ k_2 โดยแบบจำลองทั้งสองสมการ สามารถนำมาใช้ในการอธิบายอัตราเร็วของการดูดซับ ซึ่งประกอบด้วย การแพร่ที่ฟิล์มภายนอก การดูดซับและการแพร่ภายในรูพรุน ดังนั้นความถูกต้องของผลทดลอง จึงสามารถตรวจสอบได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ผลการทดลองการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซาน

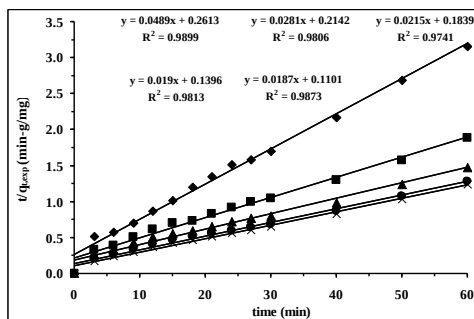
เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลูเป็น 24.4, 45.8, 67.6, 91.9 และ 110.2 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงในตารางที่ 1 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pseudo - second order มีความเป็นเส้นตรงมากกว่า Pseudo - first order เมื่อมีการพิจารณาผลจากการคำนวณความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่สภาวะสมดุล เมื่อใช้ Pseudo - first order มีค่าเท่ากับ 14.4, 36.0, 49.5, 52.4 และ 52.5 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันสำหรับสมการ Pseudo - second order มีค่าเท่ากับ 18.9, 31.8, 40.9, 47.1 และ 48.7 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ในขณะที่ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานที่ได้จากผลการทดลอง พบว่ามีค่าเท่ากับ 18.4, 30.8, 40.4, 45.8 และ 48.4 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ผลการคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานจากสมการ Pseudo - second order มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าคำนวณจากสมการ Pseudo - first order นอกจากนั้น ผลการคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานที่ได้จากสมการ Pseudo - second order มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำกว่าสมการ Pseudo - first order จากผลที่กล่าวมาดังกล่าวข้างต้นจึงลงความเห็นว่า การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานเป็นไปตามสมการ Pseudo - second order

จากนั้นนำผลการคำนวณความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานที่เวลาใด ๆ จากผลการทดลองและผลจากการคำนวณตามสมการ Pseudo - first order และ Pseudo - second order มาเขียนเป็นกราฟการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการดูดซับกับเวลาแสดงดังภาพที่ 6

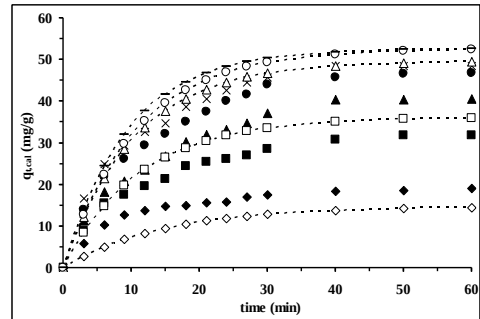
และ 7 ตามลำดับ สามารถอธิบายได้ว่า ผลการ
คำนวณค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีน
บลูโดยเกิดโคโตซานที่เวลาใด ๆ จากสมการ
Pseudo - second order มีความใกล้เคียงกับผล
การทดลองมากกว่าคำนวณจากสมการ Pseudo -
first order



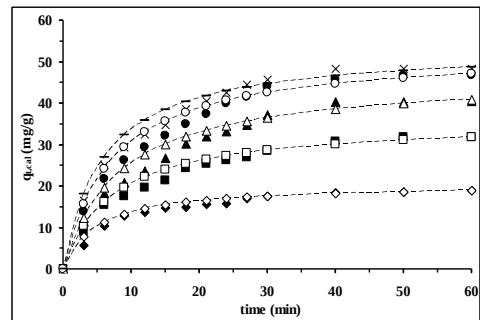
ภาพที่ 4 สมการเส้นตรง Pseudo - first order ที่
ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลีนบลู: $\diamond$ 20.4, $\blacksquare$
45.8, $\blacktriangle$ 67.6, $\bullet$ 91.9 และ $\times$ 110.2 mg/L



ภาพที่ 5 สมการเส้นตรง Pseudo - second order
ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลีนบลู: $\diamond$ 20.4, $\blacksquare$
45.8, $\blacktriangle$ 67.6, $\bullet$ 91.9 และ $\times$ 110.2 mg/L



ภาพที่ 6 ความสามารถในการดูดซับทำนายจาก
Pseudo - first order ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อม
เมทิลีนบลู: $\diamond$ 20.4, $\square$ 45.8, $\triangle$ 67.6, $\circ$ 91.9 และ
 $\blacksquare$ 110.2 mg/L



ภาพที่ 7 ความสามารถในการดูดซับทำนายจาก
Pseudo - second order ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อม
เมทิลีนบลู: $\diamond$ 20.4, $\square$ 45.8, $\triangle$ 67.6, $\circ$ 91.9
และ $\blacksquare$ 110.2 mg/L

ตารางที่ 1 ค่าความสามารถในการดูดซับและค่าคงที่อัตราเร็วการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซาน

C ₀ (mg/L)	q _{e,exp} (mg/g)	Pseudo - first order				Pseudo - second order			
		k ₁ (min ⁻¹)	q _{e,cal} (mg/g)	R ²	S.D.	k ₂ (g/mg·min)	q _{e,cal} (mg/g)	R ²	S.D.
24.4	18.4	0.0698	14.4	0.9821	0.2648	0.0101	18.9	0.9899	0.0385
45.8	30.8	0.0882	36.0	0.9657	0.1555	0.0039	31.8	0.9806	0.0635
67.6	40.4	0.0947	49.5	0.9536	0.2758	0.0026	40.9	0.9741	0.0738
91.9	45.8	0.0926	52.4	0.9806	0.1439	0.0027	47.1	0.9813	0.0599
110.2	48.4	0.1043	52.5	0.9360	0.2808	0.0032	48.7	0.9873	0.0489

3.3. กลไกการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซาน

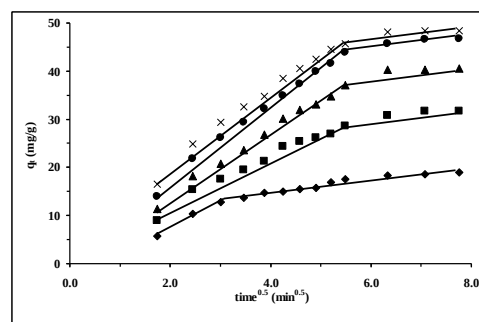
สมการการแพร่ภายในรูพรุนตัวดูดซับได้นำมาใช้ในการศึกษา กลไกการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซาน เขียนได้ดังสมการที่ (7) [22]

$$q_{t, \text{exp}} = k_t t^{0.5} + C \quad (7)$$

เมื่อ k_t หมายถึงค่าคงที่อัตราเร็วการแพร่สีย้อมเมทิลีนบลูเข้าไปภายในรูพรุนเกล็ดไคโตซาน (มิลลิกรัมต่อกรัม-นาที่^{0.5}) และ C หมายถึงความหนาของชั้นขอบเขต (มิลลิกรัมต่อกรัม)

นำข้อมูลผลการทดลองการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานปริมาณ 0.05 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลีนบลู 24.4, 45.8, 67.6, 91.9 และ 110.2 มิลลิกรัมต่อลิตร มาเขียนกราฟระหว่าง q_{t, exp} และ t^{0.5} โดยค่าความชันของกราฟในแต่ละช่วงเวลาเป็นค่า k_t ผลการทดลองและค่าคงที่อัตราเร็วการแพร่สีย้อมเมทิลีนบลูเข้าไปภายในรูพรุนเกล็ดไคโตซาน แสดงในภาพที่ 8 และตารางที่ 2 พบว่าการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซาน มีกลไกการดูดซับเกิดขึ้น 2 ขั้นตอนต่อเนื่องกัน อธิบายได้ดังนี้ [24] ขั้นตอนที่หนึ่ง เป็นการดูดซับที่บริเวณผิวภายนอกเกล็ดไคโตซาน ผลการ

ทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเห็นได้อย่างชัดเจน สีย้อมเมทิลีนบลูแพร่จากสารละลายเข้าไปภายในรูพรุนเกล็ดไคโตซาน ขั้นตอนที่สอง เป็นสมดุลการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซาน พบว่าความชันของเส้นตรงในช่วงนี้มีค่าลดลง



ภาพที่ 8 กลไกการดูดซับของเกล็ดไคโตซาน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลีนบลู: ◆ 20.4, ■ 45.8, ▲ 67.6, ● 91.9 และ × 110.2 mg/L

ตารางที่ 2 ค่าคงที่อัตราเร็วการแพร่สีย้อมเมทิลีนบลูเข้าไปภายในรูพรุนเกล็ดไคโตซาน

C ₀ (mg/L)	k ₁ (mg/g·min ^{0.5})	C ₁ (mg/g)	k ₂ (mg/g·min ^{0.5})	C ₂ (mg/g)
24.4	5.56	3.7	1.25	9.9
45.8	6.68	0.8	0.71	26.4
67.6	4.94	2.2	0.14	39.5
91.9	7.69	2.2	0.71	41.4
110.2	7.57	5.6	0.14	47.3

ความหนาของชั้นขอบเขต ซึ่งเป็นค่าจุดตัดแกน y จากการเขียนกราฟระหว่าง $q_{t, \text{exp}}$ กับ $t^{0.5}$ พบว่า มีค่ามากกว่าค่าคงที่อัตราเร็วการแพร่เข้าไปภายในรูพรุนตัวดูดซับในขั้นที่สอง (k_{s2}) เนื่องจากสีย้อมเมทิลีนบลู เกิดการดูดซับที่บริเวณผิวเกล็ดไคโตซานมากกว่าที่จะแพร่เข้าไปภายในรูพรุนเกล็ดไคโตซาน ผลที่เกิดขึ้นในกรณีนี้จึงมีอธิบายเพิ่มเติมได้คือการแพร่ของสีย้อมเมทิลีนบลูจากฟิล์มรอบนอกเกล็ดไคโตซานไปยังผิวรอบนอกเกล็ดไคโตซาน เป็นขั้นตอนการดูดซับที่เกิดช้าที่สุดและเป็นขั้นตอนหลักที่ควบคุมกระบวนการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซาน

3.4. ขั้นตอนการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานที่เกิดช้าที่สุด

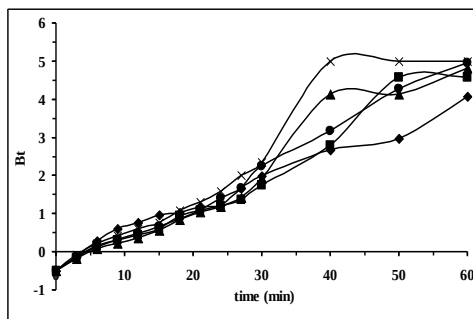
การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานเกิดขึ้นได้หลายขั้นตอน สิ่งที่ต้องศึกษาเพิ่ม ได้แก่ การพิสูจน์ขั้นตอนใดของกระบวนการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซาน เป็นขั้นตอนการดูดซับที่เกิดช้าที่สุด ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวจะเป็นตัวควบคุมกระบวนการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานทั้งหมดที่เกิดขึ้น การจำแนกขั้นตอนการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานที่ช้าที่สุด ใช้การแพร่ภายในรูพรุนเกล็ดไคโตซาน เขียนได้ดังสมการที่ (8) [25]

$$B_t = -0.4977 - \ln \left(1 - \frac{q_{t, \text{exp}}}{q_{e, \text{exp}}} \right) \quad (8)$$

เมื่อ B_t หมายถึงฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานที่เวลาใด ๆ ต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานที่สภาวะสมดุล

การเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า B_t กับเวลา ได้เป็นกราฟเส้นตรงและผ่านจุดกำเนิด โดยกรณีดังกล่าวให้อธิบายว่า การแพร่ภายในรูพรุนตัวดูดซับเป็นขั้นตอนการดูดซับที่เกิดช้าที่สุดหากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวเกิดขึ้นได้ในลักษณะอื่นได้แก่ ได้กราฟเป็นเส้นตรงและไม่ผ่านจุดกำเนิดหรือได้กราฟไม่เป็นเส้นตรงและไม่ผ่านจุดกำเนิดทั้งสองกรณีดังกล่าวข้างต้นนี้ ให้อธิบายว่าขั้นตอนการแพร่ที่บริเวณชั้นรอบนอกเป็นขั้นตอนการดูดซับที่เกิดช้าที่สุด[25]

เมื่อนำค่า B_t ที่คำนวณจากผลการทดลองได้มาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์กับเวลาเพื่อใช้ในการระบุขั้นตอนการแพร่ที่บริเวณชั้นรอบนอกหรือการแพร่ภายในรูพรุนเกล็ดไคโตซานเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซาน ผลแสดงในภาพที่ 9 พบว่า เส้นกราฟที่ได้ไม่เป็นเส้นตรงและไม่ผ่านจุดกำเนิดอีกด้วย ในกรณีจึงอธิบายได้ว่าการแพร่ที่บริเวณชั้นรอบนอกเป็นขั้นตอนการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานที่เกิดช้าที่สุด เนื่องจากความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูในสารละลายมีปริมาณน้อยและเกิดแรงดึงดูดทางเคมีของสีย้อมเมทิลีนบลูกับเกล็ดไคโตซาน



ภาพที่ 9 ขั้นตอนการดูดซับที่เกิดซ้ำที่สุดของเกล็ดไคโตซาน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลีนบลู: ◆ 20.4, ■ 45.8, ▲ 67.6, ● 91.9 และ × 110.2 mg/L

4. สรุป

การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซาน เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลูจากปริมาณ 24.4, 45.8, 67.6, 91.9 และ 110.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองดังกล่าวพบว่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ ที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ เกล็ดไคโตซานมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูเท่ากับ 18.4, 30.8, 40.4, 45.8 และ 48.4 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ สมดุลการดูดซับใช้เวลา 40 นาที จลนพลศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับ Pseudo - second order ซึ่งสามารถทำนายความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซาน ได้เป็นอย่างดีตลอดช่วงเวลาการทดลอง กลไกการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานเกิดขึ้น 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนการแพร่ที่บริเวณชั้นรอบนอกเป็นขั้นตอนการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานที่เกิดได้ซ้ำที่สุด

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] โรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่ม (สะสม) ณ เดือนมกราคม-มีนาคม 2564 สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพมหานคร: สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ. [ปรับปรุงเมื่อ 13 พฤษภาคม 2564; เข้าถึงเมื่อ 21 พฤษภาคม 2564]. จาก :<https://www.thaitextile.org/th/insign/detail.2393.1.0.html>
- [2] ขนิษฐา ชัยรัตนารณ. การดูดซับสีในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมผ้าด้วยตะกอนจุลินทรีย์. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี). 2552;1(1):7-25.
- [3] พลาธิป แซ่ฮ่วย, ตระการ กองแก้ว, ธันวาท วงศ์สุข และคณะ. การดูดซับสีเมทิลีนบลูด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ Na-A และ ซีโอไลต์มาตรฐาน 4A. วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์. 2562;18(2):51-63.
- [4] ขนิษฐา หทัยสมิทธิ์, สมบัติ ทิมทรัพย์, จักรพงษ์ แก้วขาว และคณะ. การยูกติใช้ร่างไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนถ่านกัมมันต์เพื่อบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2560;11(1):87-100.
- [5] พชรนันท์ จันทรพลอย, กฤติยาภรณ์ หลวงดี, นภรัตน์ จิวาลักษณ์. การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของถ่านเปลือกส้มโอที่เตรียมจากการเผาแบบเตาถ่าน. วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร. 2563;14(1):15-25.
- [6] ประกายเพชร ปานแก้ว, ภาสวิญญ์ ทรงจิตสมบูรณ์, วรณีย์ จิรอังกูรสกุล. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพและความเป็นพิษ

- ของถ่านกัมมันต์และเปลือกไข่ในการกำจัดสี
ย้อมเมทิลีนบลู. วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์.
2562;18(2):39-50.
- [7] สุนิสา สว่าง, จารุวรรณ ตาพัฒน์, โกวิทย์ ปี
ยะมงคล. การดูดซับกรดฮิวมิกโดยไคโตซาน-ซิ
ลิคาเรซิน: สมดุลและการออกแบบ. วารสาร
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราช
ภัฏอุตรธานี. 2561;6(1):29-43.
- [8] ชัชฎาภา เกตุวงศ์, พรพิมลพลคำ, สมสุข ไตรศุภ
กิตติและคณะ. การดูดซับไอออนของเหล็กใน
น้ำก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำประปาด้วยไค
โตซานจากกระดองปูนา. วารสารวิจัยและ
พัฒนายาลอยลงกรรมในพระบรมราชูปถัมภ์
สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2560;12(3):1-14.
- [9] ชัชฎาภา เกตุวงศ์, ภาณุวัฒน์ เกตุวงศ์, รัตติยา
ภรณ์ไพบา และคณะ. การดูดซับทองแดง (II)
ในน้ำเสียด้วยไคโตซานที่สกัดจากเปลือกปูม้า.
วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์. 2562;3(2):71-82.
- [10] ศิริวารินทร์ โตใหญ่, เกตุวดี วิไลพรเจริญ, ยิ่งพิศ
พรพัฒนกุล และคณะ. จลนศาสตร์ กลไกและ
เทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับโครเมียม (VI) จาก
น้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยใช้ไคโตซาน. วารสาร
วิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2555;
19(1):28-39.
- [11] เกตุณารินทร์ ปั่นเพ็ง, ธีระชัย ธนาคันต์, ศรีสุดา
ปัทมนุสรณ์ และคณะ. การดูดซับสีย้อมเอโซ
โดยผงลันแทน. วารสารวิทยาศาสตร์และ
เทคโนโลยี. 2561;7(2):169-80.
- [12] หญิง อามาน, มัลลิกา โรจน์คงทรัพย์, โกวิทย์ ปี
ยะมงคล. การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ด
ไคโตซาน: สมดุลและการประยุกต์ใช้สำหรับ
โรงงานอุตสาหกรรม. วารสารวิชาการพระจอม
เกล้าพระนครเหนือ. 2561;28(4):825-35.
- [13] จูติกร พรหมบรรจง, ธนากรณ ดำสุด, เขมมีการ
โหมพัตร และคณะ. การสลายสีย้อมเมทิลีนบลู
ของเม็ดพีทที่ตรึงสารสกัดหยาบใบรางจืด.
วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียว
เฉลิมพระเกียรติ. 2562;5(2):48-59.
- [14] ชานูชัย คหาปนะ, ณภัทร โพธิ์วัน. การศึกษา
ประสิทธิภาพดูดซับสีย้อมเมทิลีนโดยวัสดุดูดซับ
ที่เตรียมจากผักตบชวา. วารสาร
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิ
โรฒ. 2563;15(2):58-70.
- [15] จักรกฤษณ์ อัมพูช. การดัดแปรแร่ดินมอนต์มอ
ริลไลต์เพื่อการกำจัดสีย้อมจากน้ำเสีย.
วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.
2555;5(1):56-66.
- [16] พิชญ์สินี สมชัยดี, การะเกด เทศศรี. การ
สังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็กเชิงประกอบสาร
สกัดเปลือกมังคุดโดยวิธีสะอาดเพื่อใช้ในการ
กำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในสารละลายน้ำ.
วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
2561;27(5):777-91.
- [17] จักรกฤษณ์ อัมพูช, วิฑิตพร คำภู, นันทกานต์
ทองเฟื่อง และคณะ. การดูดซับสีย้อมรีแอ็คทีฟ
แบบลิค 5 บนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจาก
ผักตบชวา. วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์
ม.อบ. 2560;19(1):163-77.
- [18] ยุวรัตน์ เงินเย็น, ฉันทกร ปาทวาท, เกศรา
ศิลาเกษ และคณะ. การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู
จากสารละลายโดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จาก
ลูกยางนา. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

- มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี. 2563;8(2):119-31.
- [19] สิรินันท์ วิริยะสุนทร. การเตรียมนานาคอมพอสิตของแป้งแคทไธออนิกและมอนต์มอริลโลไนต์สำหรับการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู. วารสาร มทร. อีสาน. 2562;12(1):158-71.
- [20] ศุภกิจ แซ่เจียม, กัญหรีศรีพงศ์พันธ์. กระบวนการดูดซับสีรีแอคทีฟ เรด 31 จากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเปลือกกล้วย. Veridian E-Journal Science and Technology Silpakorn University. 2560;4(6):69-87.
- [21] ศรีสุตา นิเทศน์ธรรม, อัจฉราบุญมาหาล้า, อรพรรณ ชัยสิทธิ์. การเตรียมน้ำมันถั่วจากของเสียประเภทโฟมพอลิยูรีเทนโดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนต สำหรับการดูดซับสีย้อม. วารสารวิชาการ มทร. สุพรรณภูมิ. 2558;3(1):8-18.
- [22] จักรกฤษณ์ อังพุช, บุญส่ง จุฑารัตน์. พฤติกรรม การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 บนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากขาน้อย. วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. 2555;5(2):10-21.
- [23] รวิจันทร์ สุทธะนันท์, โกวิทย์ ปิยะมั่งคลา. จลนศาสตร์และเทอร์โมเคมีการดูดซับเมทิลีนบลู โดยใช้แกลบดัดแปร. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2554;21(2):337-348.
- [24] อุษณีย์ รัชไชยวรรณ, ยุพดี กุลรัตน์กิตติวงศ์, โกวิทย์ ปิยะมั่งคลา. การดูดซับไอออนเงินโดยไคโตซานเรซิน: ผลของอุณหภูมิ. วิศวกรรมลาดกระบัง. 2558;32(4):61-66.
- [25] อุษณีย์ รัชไชยวรรณ, ยุพดี กุลรัตน์กิตติวงศ์, โกวิทย์ ปิยะมั่งคลา. สมดุลและจลนศาสตร์การดูดซับไอออนเงินโดยไคโตซานผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เรซิน. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. 2557;9(2):12-22.

อิทธิพลของสารตกแต่งสำเร็จกันยับชนิดต่าง ๆ ต่อสมบัติของผ้าฝ้ายลินิน Effect of various crease-resistant finish on muslin fabric properties

ธนวัฒน์ แก้วเกตุ^{1*}, ธัญลักษณ์ ศรีสุข², ปิยะพร คามภิรภาพพันธ์^{3*}

Thanawat Kaewket^{1*}, Tanyalak Srisuk², Piyaporn Kampeerapapun^{3*}

^{1,3*}คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

²สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

^{1,3*}Faculty of Textile Industries, Rajamangala University of Technology Krungthep, Thailand

²Division of Textile Chemical Engineering, Faculty of Textile Industries,

Rajamangala University of Technology Krungthep, Thailand

*Corresponding Author. E-mail: piyaporn.k@mail.rmuk.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการเคลือบสารลงบนผ้าฝ้ายลินินเพื่อให้ผ้ามีสมบัติทนต่อการยับและช่วยลดการรีดผ้าหลังการซักหลังการใช้งาน ภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบผ้าฝ้ายลินินด้วยสารไดเมทิลอลดีไฮด์โรกซีเอทิลีนยูเรีย (KNITTEX® FEL) คือ อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส นาน 60 วินาที การใช้สารกันยับชนิดไดไฮดรอกซีเอทิลีนยูเรียที่ปราศจากฟอร์มาลดีไฮด์ (KNITTEX® FF) มีความคงทนต่อการยับดีที่สุด อัตราการดูดซึมน้ำบนพื้นผิวผ้าฝ้ายลินินที่ตกแต่งด้วยสารกันยับช้ากว่าผ้าฝ้ายลินินที่ไม่ผ่านการตกแต่งเล็กน้อย นอกจากนั้น ความกระด้างของผ้าฝ้ายลินินก่อนและหลังการตกแต่งกันยับมีค่าใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ : การตกแต่งสำเร็จ สารกันยับ ผ้าฝ้ายลินิน ผ้าย

ABSTRACT

The objective of this research was to apply resins to muslin fabric to impart wrinkle free smooth surface as well as to eliminate the ironing garments after wash on usage. The optimal condition of dimethylol dihydroxy ethylene urea (KNITTEX® FEL) treated muslin fabric was done using a temperature of 160°C for 60 s. It was found that formaldehyde-free dihydroxyethyleneurea agent imparted the best smooth appearance. The surface water absorption rate of wrinkle-free muslin fabrics was a bit slower than that of untreated muslin fabric. Moreover, the untreated and treated muslin fabrics showed similar stiffness behavior.

Keyword: Finishing, Anti-crease agent, Muslin fabric, Cotton

Received 19-08-2021

Revised 22-09-2021

Accepted 30-09-2021

1. บทนำ

ต้นกำเนิดของผ้าฝ้ายลินในปัจจุบันคือ เมืองธากา ประเทศบังกลาเทศ โดยมีการอ้างอิงถึงลินเป็นครั้งแรกในสมัยก่อนประวัติศาสตร์ ฝ้ายลินเป็นสินค้าที่มีค่าซึ่งมักมีมูลค่าเทียบเท่ากับทองคำและมีการซื้อขายกันทั่วโลกตลอดประวัติศาสตร์ของมนุษย์ พ่อค้าชาวยุโรปค้นพบฝ้ายลินครั้งแรกในเมืองโมซูล ประเทศอิรัก ด้วยเหตุนี้จึงได้ตั้งชื่อตามเมืองว่าฝ้ายลิน [1] จากประวัติแสดงให้เห็นว่าฝ้ายลินเป็นที่นิยมมาตั้งแต่สมัยอินเดียโบราณ และได้รับความนิยมแพร่หลายไปทั่วโลกอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน

ผ้าฝ้ายลินเป็นผ้าฝ้ายทอลายขัด มีสมบัติที่โดดเด่น เช่น เนื้อละเอียด ระบายอากาศดี แห้งเร็ว น้ำหนักเบาและไม่ระคายเคืองต่อผิวหนัง แม้ว่าฝ้ายมีสมบัติที่ดีหลายประการ แต่ฝ้ายมักพบปัญหาการเกิดรอยยับได้ง่าย ดังนั้นผ้าฝ้ายที่ทนต่อการยับจึงเป็นหนึ่งในความต้องการของผู้บริโภคในตลาดสิ่งทอ นอกจากนี้ ตลาดสิ่งทอยังมีความต้องการสินค้าที่มีสมบัติดีและมีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น เสื้อผ้าที่ดูแลรักษาง่ายและสวมใส่สบาย

การตกแต่งที่ดูแลรักษาง่าย (Easy care finishing) เป็นวิธีพิเศษในการขจัดรอยยับของผ้าฝ้าย กระบวนการนี้ช่วยต้านทานการหดตัวและการคืนตัวของริ้วรอยที่ดีขึ้นสำหรับผลิตภัณฑ์สิ่งทอประเภทเซลลูโลส กลไกการตกแต่งกันยับคือยับยั้งการเคลื่อนที่ของสายโซ่เซลลูโลสโดยการใช้การเชื่อมขวางด้วยเรซินหรือพอลิเมอร์ที่เหมาะสม เช่น ไกลออกซาล (Glyoxal) [2] ไดไฮดรอกซีเอทิลีน ยูเรีย (Dihydroxy ethylene urea) และไดเมทิล ไดไฮดรอกซียูเรีย (Dimethyl dihydroxy urea) [3] ไคโตซาน (Chitosan) [4-5]

กรดซิตริกและไซลิทอล (Citric acid and xylitol) [6]

ผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งกันยับช่วยปรับปรุงด้านความคงทนของผ้าและการดูแลรักษาง่าย แต่การตกแต่งผ้ากันยับก็แสดงสมบัติของผ้าที่ไม่พึงประสงค์เช่นกัน เช่น ความแข็งแรงของผ้าและการดูดซึมน้ำของผ้า ดังนั้น เพื่อที่จะลดสมบัติที่ไม่พึงประสงค์จากการตกแต่งกันยับบนผ้าฝ้าย จึงมีการศึกษาชนิดของสารเคมีและภาวะที่ใช้ในการตกแต่งสำเร็จต่อสมบัติของผ้า [7-8] อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาภาวะในการตกแต่งสารกันยับทางการค้าบนผ้าฝ้ายลิน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาภาวะในการตกแต่งสารกันยับเหล่านี้ต่อสมบัติของผ้าฝ้ายลินเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานสิ่งทอ

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

2.1 วัสดุ

ผ้าฝ้ายลิน ทอลายขัด ประกอบด้วยเส้นด้ายพุ่ง 100 เส้น เส้นด้ายยืน 90 เส้น เบอร์ด้าย 60 Ne น้ำหนักผ้า 150 กรัมต่อตารางเมตร (Weiqiao Textile Company Limited, สาธารณรัฐประชาชนจีน) ที่ย้อมด้วยสีรีแอคทีฟสีส้ม (Remazol Brilliant Orange 3R) ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักผ้า สารทำปฏิกิริยาเชื่อมขวาง 3 ชนิด คือ ไดเมทิลอลไดไฮดรอกซีเอทิลีน ยูเรีย (KNITTEX® FEL) ไดไฮดรอกซีเอทิลีนยูเรียในสารละลายที่เป็นน้ำปราศจากฟอรัมาลดีไฮด์ (KNITTEX® FF) และไดไฮดรอกซีเอทิลีนยูเรีย (KNITTEX® RCT) และตัวเร่งปฏิกิริยาจากเกลือแมกนีเซียม (KNITTEX-CATALYST® MO) (บริษัท ฮันท์สแมน (ประเทศไทย) จำกัด ประเทศไทย)

2.2 วิธีการทดลอง

2.2.1 การเตรียมสารกันยับ

ผสมสารทำปฏิกิริยาเชื่อมขวาง ปริมาณ 50 กรัม และตัวเร่งปฏิกิริยาจากเกลือ แมกนีเซียมปริมาณ 30 กรัม ปรับปริมาตรสารเป็น 1 ลิตรด้วยน้ำประปา

2.2.2 การตกแต่งสำเร็จสารกันยับ

ตกแต่งสารกันยับโดยวิธีจุ่มบิอัดสาร เข้าไปในผ้า (Pad-dry-cure method) ดังนี้ จุ่มอัด สารด้วยเครื่องบิอัดสาร รุ่น P-A1 (Copower technology, ประเทศไทย) ที่การบิอัดร้อยละ 85 ทำผ้าให้แห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็น เวลา 2 นาที จากนั้นนำผ้าเข้าเครื่องอบตกแต่งสำเร็จ ผ้า (stenter) รุ่น M-6 (Copower Technology, ประเทศไทย) เพื่อให้สารเกิดปฏิกิริยาเชื่อม ขวางโดยแปรผันอุณหภูมิที่ 150 – 160 องศา เซลเซียส และเวลา 60 – 90 วินาที

2.2.3 สันฐานวิทยาของผ้า

ตรวจสอบสันฐานวิทยาของผ้าก่อน และหลังการตกแต่งสำเร็จผ้าด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JSM-IT300 (JEOL Ltd., ประเทศญี่ปุ่น)

2.2.4 การดูดซึมน้ำของผ้า

ทดสอบการดูดซึมน้ำของผ้าตาม มาตรฐาน AATCC 79 โดยตัดผ้าขนาด 15 x 15 เซนติเมตร ซึ่งผ้าด้วยสะดิงให้ตึงและวางผ้าห่างจาก บิวเรต 1.0 ± 0.1 เซนติเมตร หยดน้ำจากบิวเรต 1 หยด ลงบนผ้าที่ซึ่งตึงแล้วเริ่มจับเวลาทันที สังเกต น้ำบนผ้าขึ้นทดสอบ หยดจับเวลาเมื่อน้ำซึมลงบนผ้า จนหมด ทดสอบซ้ำ 10 ครั้งและหาค่าเฉลี่ย

2.2.5 ความเรียบและรอยยับของผ้า

ทดสอบความเรียบของผ้าตาม มาตรฐาน AATCC 124-2009 โดยตัดผ้าขนาด 38 x 38 เซนติเมตร ทั้งในแนวด้ายยืนและแนวด้ายพุ่ง ซักผ้าด้วยเครื่องทดสอบการซัก (Launder-Ometer) รุ่น M228AA (SDL Atlas China, สาธารณรัฐ ประชาชนจีน) ที่มีผงซักฟอกปริมาณ 66 ± 0.1 กรัม น้ำปริมาตร 81 ± 1 ลิตร ความเร็วในการปั่นซัก 179 ± 2 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส นาน 8 นาที นำผ้าออกจากเครื่องทันทีก่อนที่เครื่อง จะระบายน้ำและแขวนตากผ้าขณะที่ผ้ายังเปียก บริเวณมุมของผ้าทั้งสองด้านเพื่อป้องกันการบิดของผ้า ระดับความเรียบและรอยยับ มี 5 ระดับ ดังนี้

- ระดับเกรด 5 เป็นลักษณะที่เรียบที่สุด ไม่มีรอยยับ
- ระดับเกรด 4 เป็นลักษณะเรียบ
- ระดับเกรด 3.5 เป็นลักษณะเรียบ เหมือนผ้าไม่ถูกรีด
- ระดับเกรด 3 เป็นลักษณะค่อนข้างเรียบ
- ระดับเกรด 2 เป็นลักษณะค่อนข้างยับมาก
- ระดับเกรด 1 เป็นลักษณะที่ยับมากที่สุด

2.2.6 มุมการคืนตัวต่อรอยยับ

ทดสอบมุมการคืนตัวต่อรอยยับซึ่ง แสดงถึงประสิทธิภาพของการตกแต่งกันยับตาม มาตรฐาน AATCC 66-1990 โดยตัดผ้าขนาด 15 x 40 มิลลิเมตร ทั้งแนวด้ายยืนและด้ายพุ่ง สอดผ้าเข้าไปในแผ่นเหล็กตามแนวยาวเพียงครึ่งหนึ่ง พับปลาย ผ้าส่วนเกินกลับไปและนำไปสอดไว้ในแผ่นพลาสติก และวางค้อนน้ำหนักทับไว้ จับเวลา 5 นาที เมื่อครบ กำหนดเวลา นำแผ่นเหล็กที่มีผ้าสอดไว้เข้าเครื่อง ทดสอบทิ้งไว้ 5 นาที อ่านค่าองศาการคืนตัว

2.2.7 ความกระด้างของผ้า

ทดสอบความกระด้างของผ้าตามมาตรฐาน ASTM D-1388-08 โดยตัดผ้าขนาด 2.5×22 เซนติเมตรทั้งแนวด้ายยืนและด้ายพุ่ง วางผ้าบนอุปกรณ์ทดลองแล้วค่อย ๆ ดันผ้าซึ่งเริ่มตั้งแต่หัวผ้า โดยใช้มือดันและใช้กระจกสไลด์เพื่อเป็นตัวพาจนผ้าตกแนบสนิทกับแนวเฉียงของเครื่องซึ่งมีมุม 41.5 องศา วัดความยาวของผ้า ทดลองซ้ำ 3 ครั้งและหาค่าเฉลี่ย จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความกระด้างของผ้า ดังสมการ

$$G = 0.10MC^3$$

เมื่อ G คือ ความกระด้างของผ้า (มิลลิกรัม เซนติเมตร)

M คือ น้ำหนักผ้าต่อต่อพื้นที่ (กรัมต่อตารางเมตร)

C คือ ความยาวของผ้าเมื่องอตัวแนบกับเครื่อง (เซนติเมตร)

จากนั้นคำนวณความกระด้างของผ้าโดยหาค่าเฉลี่ยของความกระด้างของผ้าแนวด้ายยืนและด้ายพุ่ง

$$G_{\text{ผ้า}} = (G_{\text{แนวด้ายยืน}} \times G_{\text{แนวด้ายพุ่ง}})^{1/2}$$

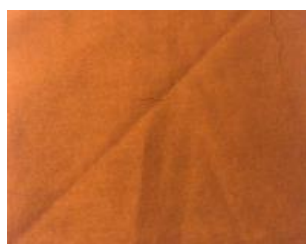
3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการตกแต่งกันยับชนิดไคเมทิลอลไดไฮดรอกซีเอทิลีนยูเรียบนผ้ามัสลิน

นำผ้ามัสลินไปตกแต่งกันยับด้วยสารดัดแปลงจากไคเมทิลอลไดไฮดรอกซีเอทิลีนยูเรีย (KNITTEX® FEL) ทำผ้าให้แห้ง จากนั้น นำผ้าไปทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางที่อุณหภูมิ 150 – 160 องศาเซลเซียส นาน 60 – 90 วินาที ลักษณะและสัณฐานวิทยาของผ้ามัสลินก่อนและหลังการตกแต่งกันยับ แสดงในภาพที่ 1-2



(ก) ก่อนการตกแต่ง



60 วินาที



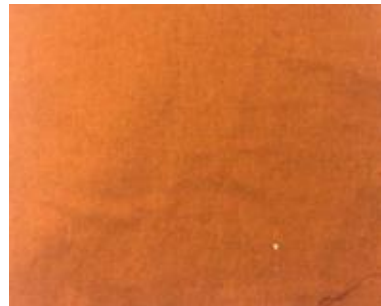
90 วินาที

(ข) 150 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 1 ลักษณะผ้าก่อนและหลังการตกแต่งกันยับ



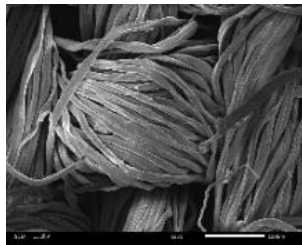
60 วินาที



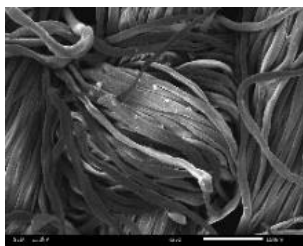
90 วินาที

(ค) 160 องศาเซลเซียส

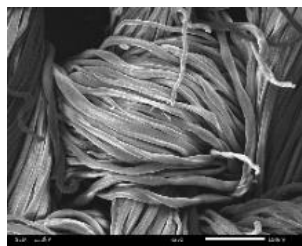
ภาพที่ 1 (ต่อ) ลักษณะผ้าก่อนและหลังการตกแต่งกันยับ



(ก) ก่อนการตกแต่ง

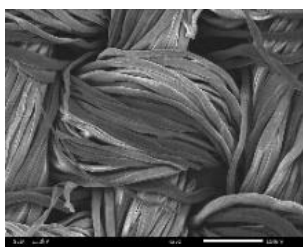


60 วินาที

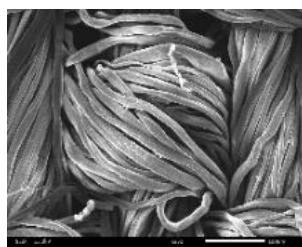


90 วินาที

(ข) 150 องศาเซลเซียส



60 วินาที



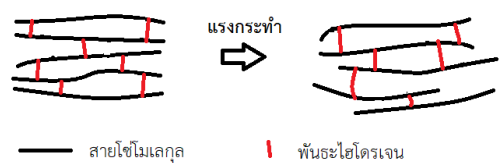
90 วินาที

(ค) 160 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 2 สัณฐานวิทยาของผ้าฝ้ายก่อนและหลังการตกแต่งกันยับ

ผ้ามีสลิหลังจากการตกแต่งสารกันยับ มีความเรียบกว่าผ้าก่อนการตกแต่ง (ภาพที่ 1) และเมื่อใช้อุณหภูมิสูงขึ้นและเวลานานขึ้น ผ้าที่ได้มีความยับลดลง อย่างไรก็ตาม เมื่ออุณหภูมิสูงเกิน 160 องศาเซลเซียส ผ้าที่ได้จะมีความแข็งแรงด่างมาก ส่วนสัณฐานวิทยาของผ้าฝ้ายก่อนและหลังการตกแต่งกันยับไม่มีความแตกต่างกัน (ภาพที่ 2)

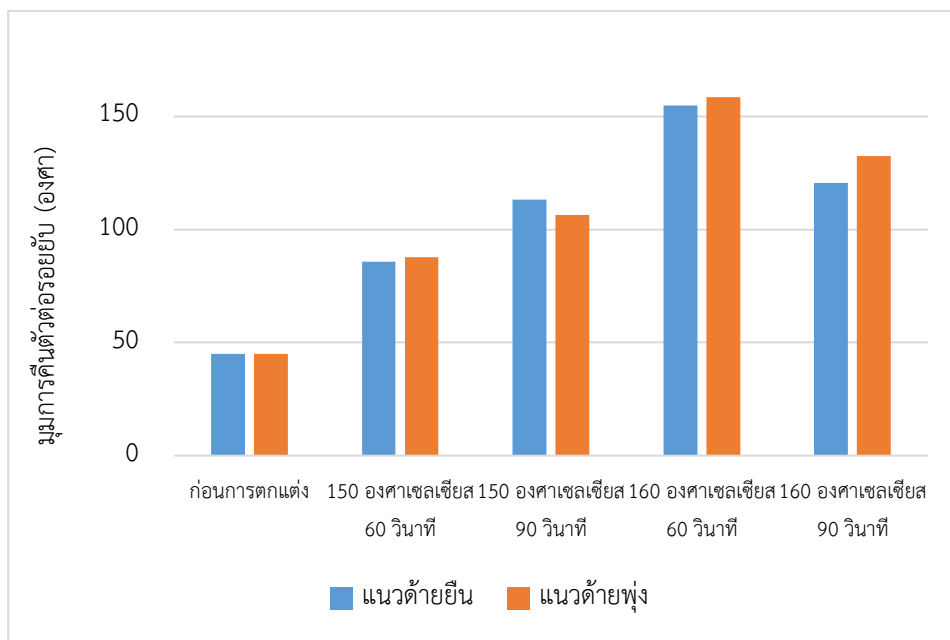
ผ้ามีสลิทำจากเส้นใยฝ้ายซึ่งเป็นเซลลูโลสชนิดหนึ่งที่มีสมบัติยับง่ายเนื่องจากเซลลูโลสมีพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่จำนวนมาก ภายใต้สภาวะที่ผ้าถูกกดทับในระหว่างการใช้งานหรือในการซักล้าง สายโซ่โมเลกุลสามารถเลื่อนไถลได้ ทำให้พันธะไฮโดรเจนเกิดการแตกหักและเกิดพันธะไฮโดรเจนที่ตำแหน่งใหม่ (ภาพที่ 3) [3]



ภาพที่ 3 การเกิดรอยยับบนผ้าฝ้าย

การป้องกันการยับของผ้าฝ้ายคือการป้องกันการบิดเบือน (Distortion) การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โมเลกุล สารกันยับเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลของเซลลูโลส ทำให้โมเลกุลของเซลลูโลสไม่เคลื่อนที่ไปจากเดิมเมื่อถูกแรงกดทับ ผ้าจึงไม่ยับ

การตกแต่งกันยับที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เวลา 60 วินาที มีค่ามุมการคืนตัวต่อรอยยับดีที่สุด คือ แนวด้ายยืน 154.8 องศา และแนวด้ายพุ่ง 158.7 องศา (ภาพที่ 4)

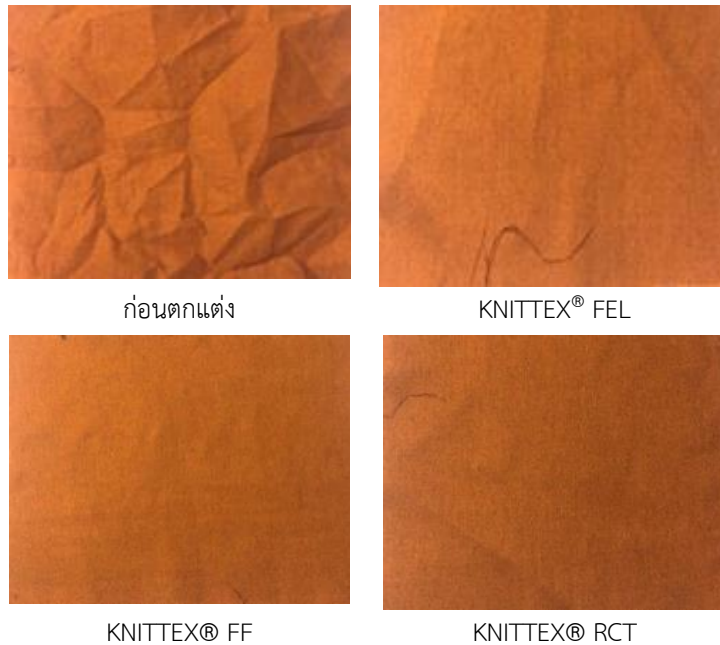


ภาพที่ 4 มุมการคืนตัวต่อรอยยับของผ้า เมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาต่างกัน

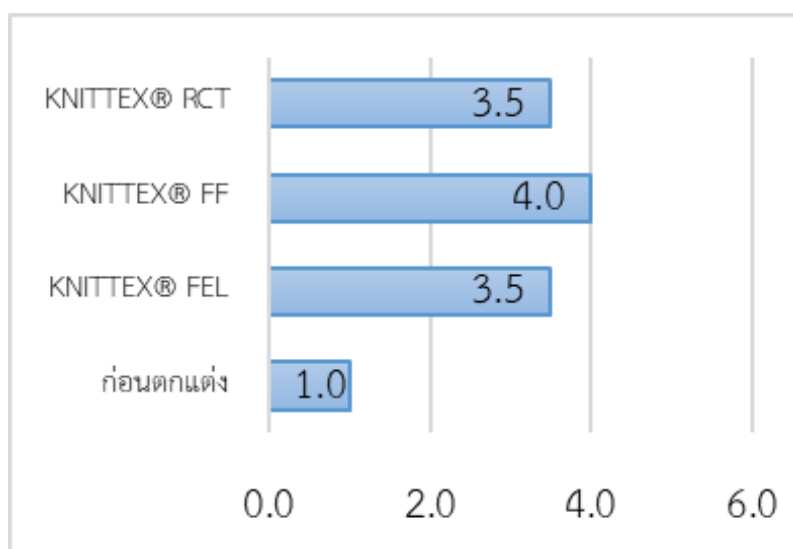
3.2 ชนิดของสารกันยับต่อความเรียบของ ผ้าฝ้าย

ตกแต่งกันยับบนผ้าฝ้ายด้วยสารกันยับ
ชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส นาน 60

วินาที ลักษณะของผ้า ความเรียบของผ้าและมุมการ
คืนตัวต่อการยับก่อนและหลังการตกแต่งกันยับแสดง
ในภาพที่ 5-7



ภาพที่ 5 ลักษณะของผ้าเมื่อตกแต่งด้วยสารกันยับชนิดต่าง ๆ

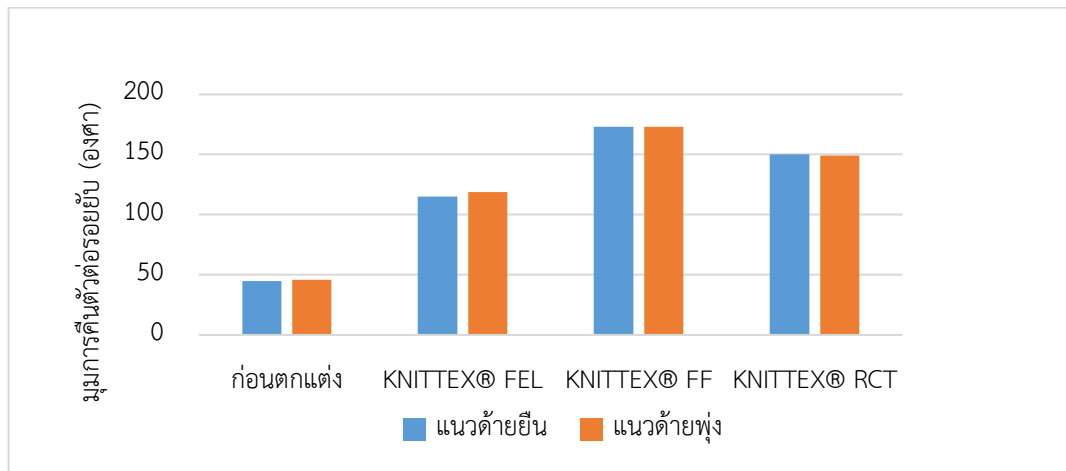


ภาพที่ 6 ระดับความเรียบและรอยยับของผ้า

การตกแต่งกันยับบนผ้าช่วยให้ผ้ามีความเรียบขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการตกแต่ง ชนิดของสารตกแต่งกันยับมีผลต่อความเรียบและรอยยับบนผ้า (ภาพที่ 5-6) กล่าวคือ ผ้าที่ตกแต่งกันยับด้วย KNITTEX® FF มีความเรียบมากที่สุด

รองลงมาเป็นผ้าที่ตกแต่งกันยับด้วย KNITTEX® RCT และ KNITTEX® FEL

การตกแต่งผ้าด้วย KNITTEX® FF มีมุมการคืนตัวต่อการยับของผ้าสูงที่สุด (ภาพที่ 7) ซึ่งแสดงถึงผ้ามีความสามารถในการทนต่อการยับได้ดีที่สุด

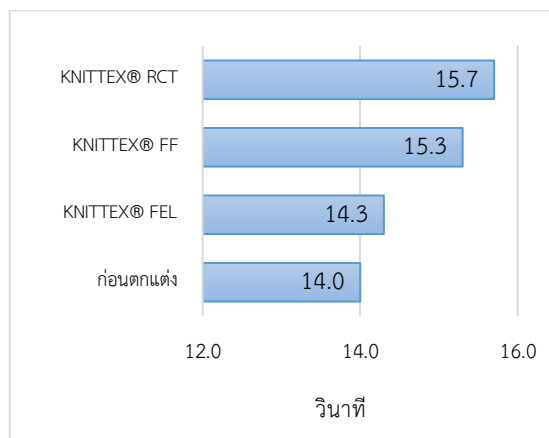


ภาพที่ 7 มุมการคืนตัวต่อการยับของผ้า เมื่อใช้สารต่างกัน

3.3 การดูดซึมน้ำของผ้า

สมบัติเด่นของผ้าฝ้ายคือมีสมบัติดูดซึมน้ำดี แต่เนื่องจากการตกแต่งสารเคมีบนผ้าอาจก่อให้เกิดสมบัติที่ไม่พึงประสงค์ได้ เช่น ทำให้ผ้าดูดซึม

น้ำต่ำ จนผู้สวมใส่เสื้อผ้ารู้สึกอึดอัดไม่สบายตัว ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงทดสอบสมบัติด้านการดูดซึมน้ำของผ้าก่อนและหลังการตกแต่ง ผลการทดสอบแสดงในภาพที่ 8



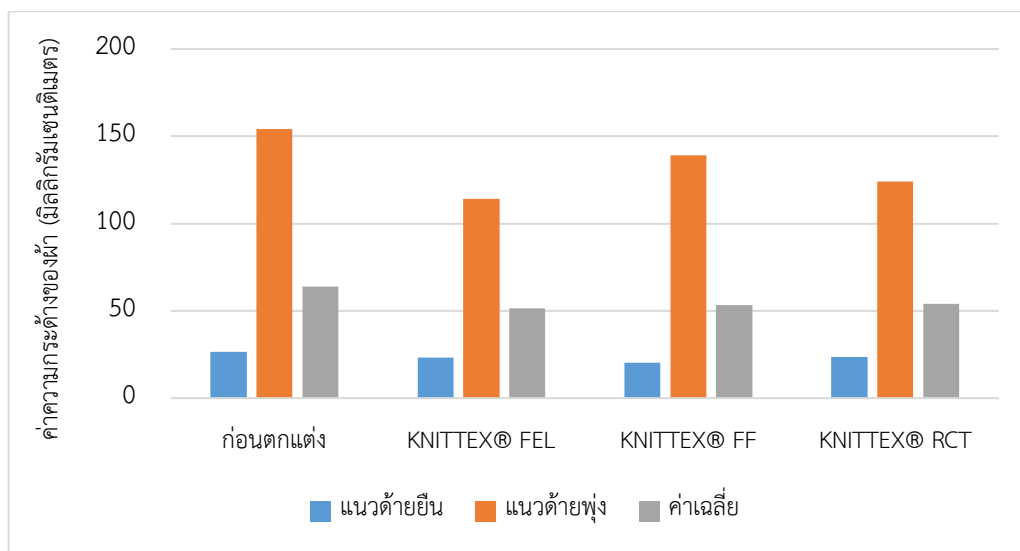
ภาพที่ 8 การดูดซึมน้ำของผ้า

ผ้าหลังการตกแต่งกันยับใช้เวลาในการดูดซึมน้ำต่ำลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับผ้าก่อนการตกแต่ง

ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nawshin F. et al [9] ทั้งนี้เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสทำปฏิกิริยาเชื่อมขวางกับสารตกแต่งกันยับทำให้เหลือหมู่ไฮดรอกซิลน้อยลงที่จะดึงดูดโมเลกุลของน้ำ การดูดซึมน้ำของผ้าลดลง ดังนั้นเวลาในการดูดซึมน้ำของผ้าหลังการตกแต่งกันยับจึงต่ำลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับผ้าก่อนการตกแต่งสำเร็จ

3.4 ความกระด้างของผ้า

ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติในการใช้งานของวัสดุสิ่งทอ เช่น ความกระด้าง น้ำหนัก และความหนาของผ้า [10] ซึ่งความกระด้างของผ้าเป็นปัจจัยสำคัญหนึ่งในการตัดสินใจเลือกใช้ผ้าของผู้ใช้งานปลายทาง (End users) ความทนทานต่อการดัดโค้ง (Bending rigidity) เป็นหนึ่งในวิธีที่นิยมใช้ตัดสินความกระด้างของผ้า ผลการทดสอบความกระด้างของผ้ามีสลิทก่อนและหลังการตกแต่งกันยับแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ความกระด้างของผ้า

ค่าความกระด้าง หมายถึง ความต้านทานของวัสดุต่อแรงที่ทำให้วัสดุโค้งงอ การโค้งงอของผ้ามากหรือน้อยขึ้นกับการเคลื่อนไหวของเส้นด้ายยืนและเส้นด้ายพุ่งซึ่งมีอิทธิพลจากแรงเสียดทานระหว่างเส้นใยกับเส้นใยเมื่อเส้นใยเลื่อนผ่านกันระหว่างการเสีรูปของเส้นด้ายหรือผ้า ผ้าที่มีความทนต่อการเสีรูปได้ดีแสดงว่ามีค่าความกระด้างสูง [11]

ค่าความกระด้างของผ้าในแนวเส้นด้ายพุ่งสูงกว่าแนวเส้นด้ายยืน (ภาพที่ 9) ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของเส้นด้ายยืน (100 เส้นต่อตารางนิ้ว) มีความหนาแน่นกว่าแนวเส้นด้ายพุ่ง (90 เส้นต่อตารางนิ้ว) ทำให้ความสามารถในการเคลื่อนตัวของเส้นด้ายพุ่งเป็นไปได้ยาก ดังนั้น การดัดงอทางแนวด้ายพุ่งจึงยากกว่า [12] และเมื่อเปรียบเทียบค่าความกระด้างเฉลี่ยของผ้าก่อนและหลังการตกแต่ง

กันยับพบว่าผ้าหลังการตกแต่งกันยับมีค่าความกระด้างลดลงเล็กน้อย ซึ่งการที่ค่าความกระด้างลดลงหลังจากการตกแต่งสำเร็จหมายถึงผ้าสวมใส่สบายขึ้น

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองประสิทธิภาพของสารกันยับทางการค้า 3 ชนิด ผลการทดลองพบว่าการตกแต่งผ้ามีสลิด้วย KNITTEX® FF ซึ่งเป็นสารดัดแปลงจากไดไฮดรอกซีเอทิลีนยูเรียที่ปราศจากฟอร์มาลดีไฮด์ ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส นาน 60 วินาที มีความทนต่อการยับสูงสุด ผ้ามีสลิหลังการตกแต่งกันยับใช้เวลาในการดูดซึมน้ำไม่แตกต่างจากผ้าก่อนการตกแต่งกันยับ ส่วนผ้าหลังการตกแต่งกันยับ มีความกระด้างของผ้าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับผ้าก่อนการตกแต่งกันยับ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ให้อาณัติ ห้องทดสอบทางสิ่งทอ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] MasterClass [Internet]. San Francisco: Fabric 101: What Is Muslin? How to Use and Care for Muslin; c2021 [updated 2020 Nov 8; cited 2021 Mar 26]. Available from: <https://www.masterclass.com/articles/fabric-101-what-is-muslin-how-to-use-and-care-formuslin#what-is-muslin>
- [2] Yahya C, Muhammet A, Yildiray T, et al. Effect of Wrinkle Resistance Finish on Cotton Fabric Properties. Indian Journal of Fibre & Textile Research. 2009; 34: 183-186.
- [3] Tusif MQ, Mahmood N, Amin N, et al. Impact of Various Wrinkle Free Finishes on Wrinkle Recovery Property of Cotton Fabric under Different Variables. J Textil Sci Eng. 2014; 4: 1-5. DOI: 10.4172/2165-8064.1000160.
- [4] Rui W, and Huawu L. Wrinkle-Resistance Property of Cotton Fabric Treated by Chitosan and Epoxy-Silicone Micro-Emulsion. Advanced Materials Research. 2011; 331: 382-385. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.331.382.
- [5] Lixia H, Lin X, Guang, Y. Chitosan Application in Textile Processing. Current Trends in Fashion Technology & Textile Engineering. 2018; 4(2): 1-3. DOI: 10.19080/CTFTE.2018.04.555635.
- [6] Jian L, Bijia W, Xiaomei X et al. Green Finishing of Cotton Fabrics Using a Xylitol-Extended Citric acid Cross-linking System on a Pilot Scale. ACS Sustainable Chemistry & Engineering. 2016; 4(3): 1131-1138. DOI: 10.1021/acssuschemeng.5b01213.
- [7] Xu W, Li Y. Cotton Fabric Strength Loss from Treatment with Polycarboxylic Acids for Durable Press Performance.

- Textil Res J. 2000; 70(11): 597-961.
DOI: 10.1177/004051750007001104.
- [8] Kuzuhara A, Hori T. Reducing Wrinkle Formation in Wool with 2-Iminothiorane Hydrochloride. Textil Res J. 2002; 72(4): 285-289. DOI: 10.1177/004051750207200402.
- [9] Nawshin F, Abu N, Ahsanul H, et al. Comparative Enactment of Formaldehyde free and Formaldehyde based Cross-linkers on Cotton Woven Fabrics. Tekstilec. 2017; 60(2): 107-115. DOI: 10.14502/Tekstilec2017.60.107-115
- [10] Nilgün Ö, Arif Taner Ö, Gamze SM, et al. Influence of Yarn and Fabric Construction Parameters on Drape and Bending Behavior of Cotton Woven Fabrics. TEKSTİL ve KONFEKSİYON. 2014; 24(2): 169-179.
- [11] On-na H, Chi-wai K. Effect of CO2 Laser Treatment on The Fabric hand of Cotton and Cotton/Polyester Blended Fabric. Polymers. 2017; 9(11): 1-12. DOI:10.3390/polym9110609.
- [12] Sunay O, Esra K, Behcet B. Comparison of Bending, Drapability and Crease Recovery Behaviors of Woven Fabrics Produced from Polyester Fibers Having Different Cross-sectional Shapes. Textile Research Journal. 2010; 80(12): 1180-1190. DOI:10.1177/0040517509355351.

ประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนของสารสกัดหยาบเอนไซม์ปาเปนจากส่วนเหลือใช้มะละกอ

Protein Digestion Efficiency of Papain Enzyme Crude Extract from Papaya Byproduct

ดวงทิพย์ ไช้แก้ว^{1*}, สารนิต บุญประสพ²
Dongtip Kaikaew^{1*}, Saranit Boonprasop²

¹คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

²วิทยาลัยพยาบาลบรมราชชนนี จังหวัดนนทบุรี

¹Faculty of Home Economics Technology, Rajamangala University of Technology Krungthep

²Borommaratchonnan College of Nursing, Nonthaburi

*Corresponding author. Tel: 09 0197 6399, E-mail: dongtip.s@mail.rmutk.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการย่อยโปรตีนของสารสกัดหยาบเอนไซม์ปาเปนจากส่วนที่เหลือใช้ของมะละกอ โดยสกัดสารสกัดหยาบจากเปลือกและเมล็ดมะละกอแช่ดองแล้วหาปริมาณสารสกัดหยาบต่อน้ำหนักของส่วนที่เหลือใช้ ความเป็นกรดต่าง ปริมาณเอนไซม์ปาเปนในสารสกัดหยาบ และประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนด้านเนื้อสัมผัสและด้านปริมาณโปรตีน พบว่าปริมาณสารสกัดหยาบเอนไซม์ปาเปนจากเปลือกและเมล็ดมะละกอเท่ากับ 5.76 กรัมต่อ100 กรัมของเปลือก และ 8.92 กรัมต่อ 100 กรัมของเมล็ด มีความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5.56 และ 5.53 ตามลำดับ มีปริมาณเอนไซม์ปาเปนในสารสกัดหยาบจากเปลือกและเมล็ดมะละกอเท่ากับ 130.36 และ 167.48 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ ประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนด้านเนื้อสัมผัสจากการวัดแรงเค้นของเนื้อหมูที่หมักกับสารสกัดหยาบจากเปลือกและเมล็ดมะละกอเป็นเวลา 30 45 และ 60 นาที พบว่าเนื้อหมูที่หมักกับสารสกัดหยาบจากเปลือกและเมล็ดมะละกอใช้แรงเค้นเท่ากับ 128.75 119.24 11.35 และ 98.97 91.68 85.49 นิวตัน ตามลำดับ ซึ่งเนื้อหมูที่มีความนุ่มจะใช้แรงเค้นต่ำจากการที่เอนไซม์มีประสิทธิภาพในการย่อยโปรตีนสูง ส่วนประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนด้านปริมาณโปรตีนในเนื้อหมูที่หมักกับสารสกัดหยาบจากเปลือกและเมล็ดมะละกอเป็นเวลา 30 45 และ 60 นาที พบว่า ปริมาณโปรตีนในเนื้อหมูที่หมักกับสารสกัดหยาบจากเปลือกและเมล็ดมะละกอเท่ากับ 0.442 1.021 1.604 และ 0.610 1.354 2.105 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ ซึ่งปริมาณโปรตีนจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการหมักที่เพิ่มขึ้น โดยสารสกัดหยาบเอนไซม์ปาเปนจากเมล็ดมะละกอมีประสิทธิภาพในการย่อยโปรตีนมากกว่าจากเปลือกมะละกอ

คำสำคัญ : เอนไซม์ปาเปน สารสกัดหยาบ มะละกอ

Received 27-09-2021

Revised 17-12-2021

Accepted 27-12-2021

Abstract

This research was investigated the efficiency of proteins digestion of crude extracts, papain enzymes from papaya byproduct. By extracting crude extracts, papain enzymes from papaya peels and seeds variety of Khaek Dum, then determined the amount of crude extract to the weight of papaya byproduct, pH, the amount of papain enzymes in the crude extract including the efficiency of protein digestion in the texture and protein content. It was found that the amount of crude extract from papaya peels and papaya seeds were 5.76 g/100 g and 8.92 g/100 g, respectively. The amount of papain enzymes in crude extracts from papaya peels and papaya seeds were 130.36 and 167.48 mg/ml, and pH values were 5.56 and 5.53 respectively. The efficiency of protein digestion was influenced by texture from the shear force of pork marinated with crude extract, papain enzymes from papaya peels and papaya seeds for 30, 45 and 60 min. The results found that shear forces of pork marinated with crude extract, papain enzymes from papaya peels and papaya seeds used were 128.75, 119.24, 11.35 and 98.97, 91.68, 85.49 N, respectively. The softer pork used lower shear forces for cutting because of the enzymes from papaya were high effective on digesting proteins. The protein content from the protein degradation of pork marinated with crude extracts papain enzymes, from papaya peels and papaya seeds for 30, 45 and 60 min were 0.442, 1.021, 1.604 and 0.610, 1.354, 2.105 mg/mL, respectively. The protein content was increased when increased marinated time. The efficiency of protein digestion of crude extracts, papain enzyme from the papaya seeds were higher than the papaya peels.

Keyword : Papain enzymes, Crude extracts, Papaya

1. บทนำ

ปัจจุบันในอุตสาหกรรมมีการประยุกต์ใช้เอนไซม์ที่สกัดได้จากพืช สัตว์ และจุลินทรีย์ เพื่อช่วยลดต้นทุนในกระบวนการผลิต ลดการใช้สารเคมีที่มีราคาสูงซึ่งส่วนใหญ่นิยมใช้เอนไซม์ที่สกัดได้จากพืช เนื่องจากมีความปลอดภัยมากกว่าเอนไซม์จากสัตว์และจุลินทรีย์ [1] โดยเฉพาะอย่างยิ่งเอนไซม์ปาเปนจากมะละกอและเอนไซม์โบรมิเลนจากสับปะรดที่พบได้ตามธรรมชาติ [2] ซึ่งเอนไซม์ปาเปนและเอนไซม์โบรมิเลนจัดเป็นเอนไซม์โปรติเอส

(Protease) ที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายโปรตีน และมีอยู่มากมายหลายชนิดสามารถพบได้ทั้งในพืช สัตว์ และจุลินทรีย์ โดยเอนไซม์กลุ่มนี้มีหลายชนิดและมีความแตกต่างกันด้านความจำเพาะของสับสเตรต กลไกในการเร่งปฏิกิริยา ลักษณะของบริเวณเร่ง สารยับยั้งและเร่งปฏิกิริยา ลำดับของกรดอะมิโนในโมเลกุล น้ำหนักโมเลกุล ช่วงของความเป็นกรดต่างและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำงาน เป็นต้น [3] โดยเอนไซม์โปรติเอสที่นิยมผลิตใช้กันอย่างแพร่หลายนั้นได้มาจากพืช ได้แก่ เอนไซม์

ปาเปน (Papain) จากยางมะละกอ และเอนไซม์โบรมิเลน (Bromelain) จากสับปะรด เอนไซม์ปาเปนมีความสามารถในการย่อยสลายโปรตีนได้ดีในสภาวะที่เป็นกลางในช่วงพีเอช 6.0 – 7.5 เมื่อมีการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโปรตีนหรือย่อยสลายโปรตีนที่มีโพลีเปปไทด์ขนาดเล็กและมีกรดอะมิโนอิสระเป็นจำนวนมาก เอนไซม์ปาเปนได้มาจากพืชด้วยการสกัดจากยางมะละกอ (*Carica papaya* L.) ซึ่งมีในส่วนของใบ ก้านใบ ลำต้น และผลดิบ จัดอยู่ในกลุ่มของซิสเตอีนโปรตีเอส (Cysteine protease) ที่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายโปรตีน [4] เอนไซม์ปาเปนเป็นโปรตีนชนิดหนึ่งที่ประกอบไปด้วยกรดอะมิโน 212 ตัว กรดอะมิโนซิสเตอีน 7 ตัว ซึ่งเอนไซม์ปาเปนได้จากมะละกอมีคาร์โบไฮเดรต เป็นส่วนประกอบด้วย และในการผลิตเอนไซม์ปาเปนระดับอุตสาหกรรมต้องใช้ต้นทุนสูงและมีราคาค่อนข้างแพง [5] มีการนำเอนไซม์ปาเปนมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น การทำให้เครื่องดื่มใส การทำให้เนื้อสัตว์มีความนุ่ม การฟอกหนังให้นุ่ม [6] ด้านอาหารประเภทเนื้อสัตว์เอนไซม์ปาเปนจะย่อยสลายโปรตีนที่อยู่ในเนื้อสัตว์ทำให้เนื้อสัตว์มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่นุ่มขึ้น และเป็นผลทำให้ร่างกายดูดซึมกรดอะมิโนได้ [7] และใช้เป็นยารักษาอาการการเกิดลิ้มเลือดหัวใจและหลอดเลือด ใช้เป็นยาฆ่าพยาธิ ยาช่วยย่อยอาหาร [8] ในประเทศไทยมีการบริโภคมะละกอกันทั่วทุกภาคไม่ว่าจะเป็นในระดับครัวเรือนหรือระดับอุตสาหกรรม นิยมบริโภคมะละกอพันธุ์แขกดำกันเป็นส่วนใหญ่ โดยใช้เฉพาะส่วนของเนื้อมะละกอ ส่วนเปลือกและเมล็ดต้องทิ้งไปเป็นขยะที่ไม่ได้ประโยชน์ ดังนั้นจึงนำส่วนเปลือกและเมล็ดของมะละกามาสกัดเป็นเอนไซม์ในรูปของสารสกัดหยาบเอนไซม์ปาเปนด้วยน้ำกลั่นที่เป็นวิธีการ

สกัดที่ง่าย สะดวก รวดเร็ว และปลอดภัย เพื่อเปรียบเทียบปริมาณสารสกัดหยาบและประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนของสารสกัดหยาบที่สกัดได้จากส่วนของเปลือกและส่วนของเมล็ดมะละกอ เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกไปใช้ในด้านอาหาร ยา และเครื่องใช้ต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การเตรียมสารสกัดหยาบเอนไซม์ปาเปนจากส่วนที่เหลือใช้ของมะละกอ

2.1.1 เตรียมสารสกัดหยาบ

สารสกัดหยาบจากเมล็ดมะละกอโดยนำเมล็ดของมะละกอพันธุ์แขกดำไปปั่นด้วยเครื่องปั่นให้ละเอียดกับน้ำกลั่น ในอัตราส่วน 2:1 กรองเอาเฉพาะส่วนที่เป็นของเหลวแล้วนำไปเหวี่ยงแยกตะกอนด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge : HERMLE, Model WB10, Germany) ที่ความเร็ว 6,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ซึ่งจะได้สารสกัดหยาบเป็นสารละลายใสอยู่ด้านบนและด้านล่างเป็นตะกอน ส่วนสารสกัดหยาบจากเปลือกของมะละกอเตรียมเช่นเดียวกันกับเมล็ดมะละกอ นำสารสกัดหยาบที่เป็นสารละลายส่วนที่ใสไว้ในขวดแก้วและเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4 องศาเซลเซียส ก่อนที่จะนำไปใช้ต่อไป และคำนวณปริมาณสารสกัดหยาบต่อน้ำหนักของเมล็ดหรือของเปลือกมะละกอ (กรัมต่อ 100 กรัมของเมล็ด/ของเปลือก)

2.1.2 ตรวจสอบปริมาณเอนไซม์ปาเปน

โดยวิธี Bradford Protein Assay [9] ด้วยการสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างค่าดูดกลืนแสงกับระดับความเข้มข้นของสารละลาย Bovine serum albumin (BSA) ใช้ความเข้มข้นที่ 200, 400,

600, 800 และ 1,000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร เติมสารละลาย Bio - Rad 5 มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำไปใส่ในเครื่องหมุนผสม (Vortex Mixer : Vortex-Genie 2 Scientific, United States) นานอย่างน้อย 5 นาที เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ แล้วจึงนำสารละลาย Bovine serum albumin (BSA) ปริมาณ 1 มิลลิลิตร ไปทำการวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตร (Spectrophotometer รุ่น Biochrome libra S70 PC Double Beam, United States) นำค่าดูดกลืนแสงที่ได้มาคำนวณหาสมการเส้นตรง และค่า R-squared (R^2) เพื่อเป็นกราฟมาตรฐาน สำหรับใช้ในการคำนวณปริมาณเอนไซม์ต่อไป

วิเคราะห์ปริมาณเอนไซม์ปาเปนในสารสกัดหยาบจากเมล็ดและจากเปลือกมะละกอส่วนที่ใส โดยนำมาเจือจางด้วยน้ำกลั่นที่ระดับการเจือจาง 10^{-1} แล้วนำสารสกัดหยาบมา 1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองที่มีสารละลาย Bio - Rad 5 มิลลิลิตร นำไปใส่ลงในเครื่องหมุนผสมนานอย่างน้อย 5 นาที เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ แล้วนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร จากนั้นจึงนำค่าดูดกลืนแสงที่ได้ไปแทนค่าในสมการเส้นตรงบนกราฟมาตรฐานและคำนวณปริมาณเอนไซม์เทียบกับกราฟมาตรฐานของสารละลาย Bovine serum albumin (BSA)

2.1.3 วัดความเป็นกรดต่างของสารสกัดหยาบจากเปลือกและเมล็ดมะละกอ ด้วยเครื่องวัดความเป็นกรดต่าง (pH meter รุ่น Extech PH100 : Exstik, United States)

2.2 ประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนของสารสกัดหยาบเอนไซม์ปาเปนจากส่วนเหลือใช้ของมะละกอ

2.2.1 ประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนด้านเนื้อสัมผัส (Texture)

โดยนำสารสกัดหยาบเอนไซม์ปาเปนที่สกัดได้จากเมล็ดและเปลือกมะละกอพันธุ์แขกดำมาหมักกับเนื้อหมูส่วนสะโพกขนาด กว้าง 3 ± 0.5 เซนติเมตร ยาว 5 ± 0.5 เซนติเมตร และหนา 1 ± 0.5 เซนติเมตร โดยใช้สารสกัดหยาบร้อยละ 20 ของน้ำหนักเนื้อหมู และเนื้อหมูไม่ได้หมัก (Control) เป็นเวลา 30 45 และ 60 นาที ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำเนื้อหมูมาทำการวัดแรงเฉือน (Shear force) ด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analysis รุ่น TA TXplus) ด้วยหัววัดรหัส HDP/BSK โดยวางแผนการทดลองแบบ 2×3 Factorial in CRD และทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติด้วย ANOVA และหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี DMRT (Duncan's new multiple rang test) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ ด้วยโปรแกรม SPSS 17 for windows

2.2.2 ประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนด้านปริมาณโปรตีน

นำเนื้อหมูส่วนสะโพกขนาด กว้าง 3 ± 0.5 เซนติเมตร ยาว 5 ± 0.5 เซนติเมตร และหนา 1 ± 0.5 เซนติเมตร หมักด้วยสารสกัดหยาบเอนไซม์ปาเปนที่สกัดได้จากเมล็ดและเปลือกมะละกอพันธุ์แขกดำและเนื้อหมูที่ไม่ได้หมัก (Control) เป็นเวลา 30 45 และ 60 นาที ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำป่นให้

ละเอียดและเจือจางด้วยน้ำกลั่นในอัตราส่วน 10^{-1} ใส่เครื่องหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็ว 6,000 รอบต่อนาที นำสารสกัดหยาบส่วนที่ใสด้านบน (Crude protein) ปริมาณ 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในสารละลาย Bio-Rad 5 มิลลิลิตร อย่างน้อย 5 นาที เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรแล้วนำค่าดูดกลืนแสงที่ได้ไปแทนค่าในสมการเส้นตรงบนกราฟมาตรฐานและคำนวณปริมาณเอนไซม์เทียบกับกราฟมาตรฐานของสารละลาย Bovine serum albumin (BSA) วางแผนการทดลองแบบแบบ 2×3 Factorial in CRD และทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติด้วย ANOVA และหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี DMRT (Duncan's new multiple rang test) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ ด้วยโปรแกรม SPSS 17 for windows

3.ผลการวิจัยและอภิปรายผล

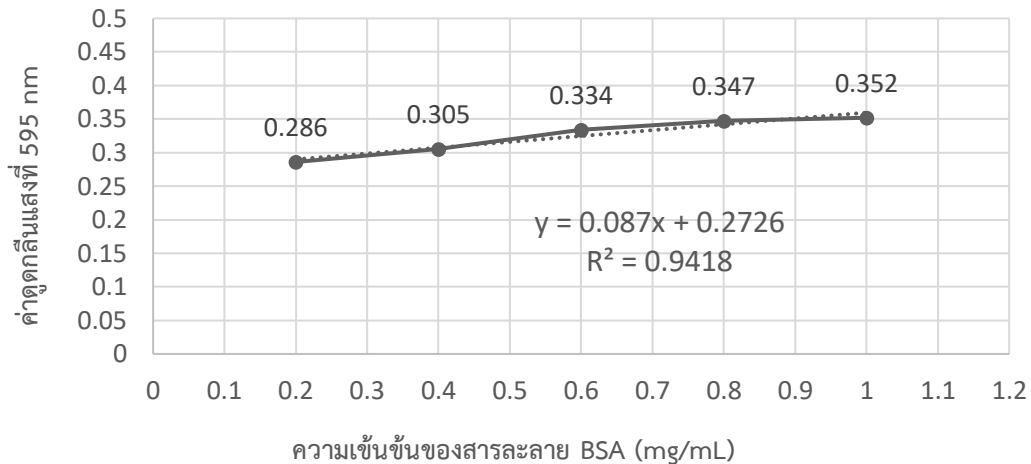
3.1 การเตรียมสารสกัดหยาบเอนไซม์ปาเปนจากส่วนที่เหลือใช้ของมะละกอ

สารสกัดหยาบเอนไซม์ปาเปนจากเมล็ดและเปลือกของมะละกอพันธุ์แขกดำมีลักษณะเป็นสารละลายสีขาวใสและสารละลายสีเขียวอ่อน มีปริมาณ 8.92 กรัมต่อ 100 กรัมของเมล็ด และ 5.76

กรัมต่อ 100 กรัมของเปลือก ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งปริมาณสารสกัดหยาบเอนไซม์ปาเปนจากเมล็ดมะละกามีปริมาณมากกว่าจากเปลือกมะละกอ เนื่องจากภายในเมล็ดมีปริมาณของน้ำยางมากกว่าในเปลือกมะละกอ เมื่อนำมาตรวจสอบปริมาณเอนไซม์ปาเปนด้วยวิธี Bradford Protein Assay โดยการสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลาย Bovine serum albumin (BSA) ระหว่างค่าดูดกลืนแสงกับปริมาณความเข้มข้นของสารละลาย BSA ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งกราฟแสดงเส้นแนวโน้มสมการ $y = 0.087x + 0.2726$ และมีค่า R-squared (R^2) เท่ากับ 0.9418 คำนวณหาปริมาณเอนไซม์ปาเปนจากสมการ พบว่าปริมาณเอนไซม์ปาเปนในสารสกัดหยาบเอนไซม์ปาเปนจากส่วนเมล็ดมะละกามีปริมาณมากกว่าจากส่วนเปลือกมะละกอ โดยมีปริมาณของเอนไซม์ปาเปนเท่ากับ 167.48 และ 130.36 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ มีความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5.56 และ 5.53 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยในส่วนของเปลือกมะละกอจะมีปริมาณน้ำยางน้อยกว่าเนื่องจากเกิดการสูญเสียไปในระหว่างการปอกเปลือก มีสอดคล้องกับงานวิจัยของ Esti และคณะ [10] รายงานว่าเอนไซม์ปาเปนมีอยู่มากในน้ำยางของส่วนต่าง ๆ ของมะละกอ ได้แก่ ใบ ก้านใบ ลำต้นและผลดิบ

ตารางที่ 1 ปริมาณสารสกัดหยาบ ปริมาณเอนไซม์ปาเปนและความเป็นกรดต่าง(pH)

	ปริมาณสารสกัดหยาบ (g/100 g)	ปริมาณเอนไซม์ปาเปน (mg/mL)	ความเป็นกรดต่าง (pH)
เมล็ดมะละกอ	8.92	167.48	5.56
เปลือกมะละกอ	5.76	130.36	5.53

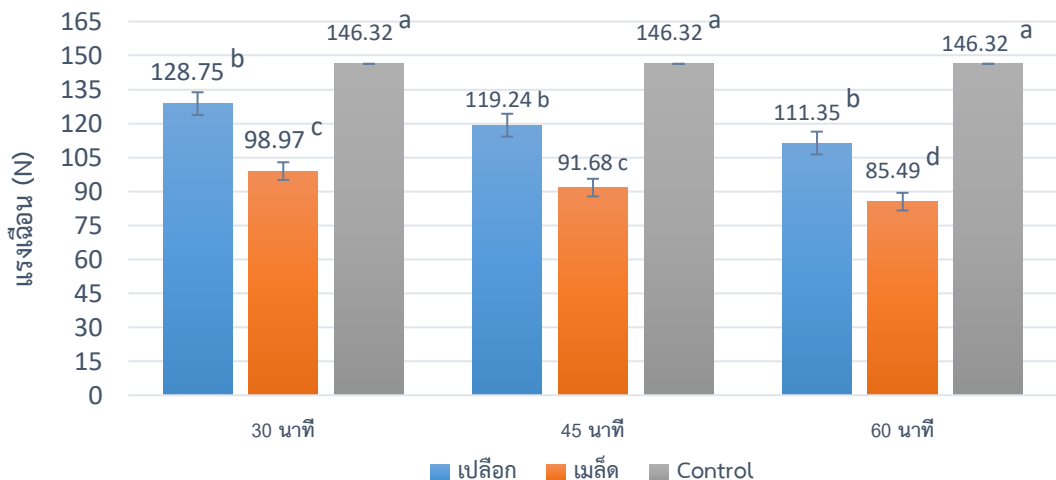


ภาพที่ 1 กราฟมาตรฐานค่าดูดกลืนแสงของสารละลาย Bovine serum albumin (BSA)

3.2 ประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนของสารสกัดหยาบปลาแปนจากส่วนเหลือใช้มะละกอ

นำสารสกัดหยาบเอนไซม์ปลาแปนจากส่วนเมลิ็ด และส่วนเปลือกมะละกอพันธุ์แขกดำมาใช้หมักเนื้อหมู แล้ววัดประสิทธิภาพในการย่อยโปรตีนด้าน

เนื้อสัมผัสจากการวัดเนื้อสัมผัสในเนื้อหมูด้วยการวัดแรงเฉือนและปริมาณโปรตีนจากการละลายของโปรตีนในเนื้อหมู ดังแสดงในภาพที่ 2 พบว่าเนื้อหมูที่หมักกับสารสกัดหยาบจากส่วนเปลือกและส่วนเมลิ็ดมะละกอ มีค่าเฉลี่ยแรงเฉือนน้อยกว่าเนื้อหมูที่ไม่ได้หมัก



ภาพที่ 2 ประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนด้านเนื้อสัมผัสจากการวัดแรงเฉือน (Shear force)

หมายเหตุ: ^{a,b,c} หมายถึง มีความแตกต่างกันในแนวตั้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$)

โดยมีแนวโน้มจากมากไปหาน้อยเมื่อใช้เวลาในการหมักมากขึ้น โดยเนื้อหมูที่หมักกับสารสกัดหยาบเอนไซม์ปาเปนจากส่วนเปลือกมะละกามีค่าเฉลี่ยแรงเคียนจากการหมักในเวลา 30 45 และ 60 นาที เท่ากับ 98.97 91.68 และ 85.49 นิวตัน (N) ตามลำดับ ส่วนเนื้อหมูที่หมักกับสารสกัดหยาบเอนไซม์ปาเปนจากส่วนเมล็ดมะละกามีค่าเฉลี่ยแรงเคียนจากการหมักในเวลา 30 45 และ 60 นาที เท่ากับ 128.75 119.24 และ 113.35 นิวตัน (N) ตามลำดับ และเนื้อหมูที่ไม่ได้หมัก (Control) มีค่าเฉลี่ยแรงเคียนที่เวลา 30 45 และ 60 นาที เท่ากับ 146.32 นิวตัน (N) แสดงให้เห็นว่าสารสกัดหยาบเอนไซม์ปาเปนจากส่วนเมล็ดมะละกามีค่าเฉลี่ยแรงเคียนน้อยกว่าแต่มีปริมาณเอนไซม์ปาเปนในสารสกัดหยาบมากกว่า (ตารางที่ 1) ซึ่งเนื้อหมูที่มีความนุ่มจะใช้เวลาเคี้ยวและความนุ่มของเนื้อหมูจากการที่เนื้อหมูถูกย่อยสลายโปรตีนจากเอนไซม์ปาเปน และขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของเอนไซม์ปาเปนที่มีอยู่ในสารสกัดหยาบ เนื่องจากเยื่อเกี่ยวพันและโปรตีนในกล้ามเนื้อทำให้เนื้อนุ่ม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Erdmann และคณะ [7] รายงานว่าเอนไซม์ปาเปนจะไฮโดรไลซ์หรือย่อยสลาย

โปรตีนในเนื้อสัตว์ทำให้สายโพลีเปปไทด์สั้นลงได้ กรดอะมิโนจำนวนมากและทำให้เนื้อนุ่มขึ้น และเป็นผลทำให้ร่างกายสามารถดูดซึมกรดอะมิโนได้เมื่อเอนไซม์ทำงานได้ดีและมีประสิทธิภาพมาก

ในด้านปริมาณโปรตีนเป็นการหาปริมาณโปรตีนที่ละลายออกมาจากเนื้อหมูโดยการวัดค่าดูดกลืนแสงเพื่อหาประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะมีปริมาณโปรตีนหรือกรดอะมิโนเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าเนื้อหมูที่ผ่านการหมักมีปริมาณโปรตีนที่ละลายออกมาเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเนื้อหมูที่ไม่ได้ผ่านการหมัก โดยปริมาณโปรตีนที่วัดได้จากเนื้อหมูหมักกับสารสกัดหยาบเอนไซม์ปาเปนจากส่วนเปลือกมะละกที่เวลา 30 45 และ 60 นาที มีปริมาณโปรตีนที่วัดได้เท่ากับ 0.578 1.157 และ 1.740 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ส่วนเนื้อหมูที่หมักกับสารสกัดหยาบเอนไซม์ปาเปนจากส่วนเมล็ดที่เวลา 30 45 และ 60 นาที มีปริมาณโปรตีนที่วัดได้เท่ากับ 0.746 1.490 และ 2.241 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ และเนื้อหมูที่ไม่ได้หมักที่เวลา 30 45 และ 60 นาที มีปริมาณโปรตีนที่วัดได้เท่ากับ 0.136 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนของสารสกัดหยาบเอนไซม์ปาเปนในส่วนของเมล็ด

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนของสารสกัดหยาบเอนไซม์ปาเปนจากเปลือกและเมล็ดมะละกอ

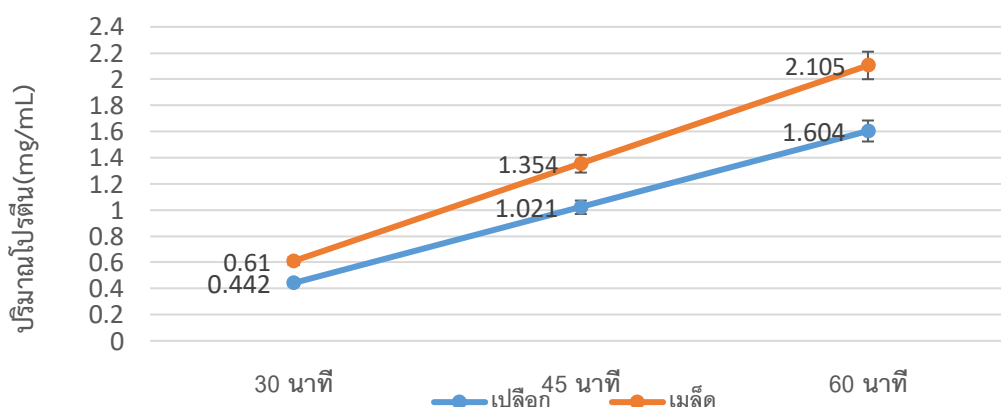
ตัวอย่าง	ปริมาณโปรตีน (mg/mL)		
	30 นาที	45 นาที	60 นาที
เนื้อหมู (control)	0.0	0.0	0.0
หมูหมักสารสกัดหยาบจากเปลือก	0.442±0.02 ^d	1.021±0.03 ^c	1.604±0.02 ^b
หมูหมักสารสกัดหยาบจากเมล็ด	0.610±0.01 ^d	1.354±0.02 ^b	2.105±0.01 ^a

หมายเหตุ : ^{a,b,c} หมายถึง มีความแตกต่างกันในแนวตั้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (P<0.05)

± หมายถึง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

และส่วนของเปลือกจากปริมาณโปรตีนที่ละลายออกมาของเนื้อหูกหมักเทียบกับเนื้อหูกที่ไม่ได้หมัก (Control) ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่า ปริมาณโปรตีนที่ละลายออกมาจากเนื้อหูกที่หมักกับสารสกัดหยาบเอนไซม์ปาเปนในส่วนของเมล็ดที่เวลา 30 45 และ 60 นาที มีปริมาณโปรตีนที่วัดได้เท่ากับ 0.610 1.354 และ 2.105 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ ส่วนเนื้อหูกที่หมักกับสารสกัดหยาบเอนไซม์ปาเปนส่วนของเปลือกที่เวลา 30 45 และ 60 นาที มีปริมาณโปรตีนที่วัดได้เท่ากับ 0.442 1.021 และ 1.604 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ โดยมีแนวโน้มปริมาณโปรตีนเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้ระยะเวลาในการหมักมากขึ้นดังแสดงในภาพที่ 3 แสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาในการหมักที่เพิ่มขึ้นนั้นทำให้เอนไซม์มีประสิทธิภาพและสามารถย่อยสลายโปรตีนได้ดี เนื่องจากเอนไซม์ปาเปนในสารสกัดหยาบไปย่อยสลายโปรตีนในเนื้อเยื่อของเนื้อหูกและมีการดออะมิโนอิสระจำนวนมากละลายออกมาส่งผลให้ปริมาณ

ของโปรตีนที่วัดได้มีมากขึ้นด้วย โดยที่สารสกัดหยาบเอนไซม์ปาเปนจากส่วนของเมล็ดมะละกอมีประสิทธิภาพในการย่อยโปรตีนได้ดีมากกว่าจากส่วนของเปลือกมะละกอตามระยะเวลาการหมักที่เพิ่มขึ้น และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$) ซึ่งในการหมักเนื้อหูกกับสารสกัดหยาบอยู่ในช่วงอุณหภูมิห้อง (35 องศาเซลเซียส) และอยู่ในสภาวะที่เป็นกลางจึงทำให้เอนไซม์ปาเปนมีประสิทธิภาพในการทำงานได้ดี เมื่อมีระยะเวลาในการหมักมากขึ้นจึงช่วยเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายโปรตีนได้มากขึ้นด้วย โดยที่มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Konno และคณะ [11] ระบุว่าเอนไซม์ปาเปนมีประสิทธิภาพในการทำงานได้ดีช่วงอุณหภูมิ 30 – 40 องศาเซลเซียส และในสภาวะที่มีความเป็นกรดต่ำที่เหมาะสมมากในช่วง 5 – 10 ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของเอนไซม์ด้วยอยู่อีกทั้งก็ยังมีการย่อยสลายโปรตีนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลาการหมักที่ 60 นาทีแรก หลังจากนั้นระดับการย่อยสลายโปรตีนจะคงที่ [12]



ภาพที่ 3 ปริมาณโปรตีนที่ละลายออกจากเนื้อหูกที่หมักกับสารสกัดหยาบในส่วน of เปลือกและส่วนของเมล็ดมะละกอ

หมายเหตุ : * หมายถึง มีความแตกต่างกันในแนวตั้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$)

สรุปผล

สารสกัดหยาบเอนไซม์ปาเปนจากส่วน
เมล็ดของมะละกอพันธุ์แขกดำ มีปริมาณสารสกัด
หยาบที่สกัดได้มากกว่าจากส่วนเปลือกมะละกอ
เท่ากับ 8.92 กรัมต่อ 100 กรัมของเมล็ด และ 5.76
กรัมต่อ 100 กรัมของเปลือก และมีปริมาณเอนไซม์
ปาเปนในสารสกัดหยาบจากส่วนเมล็ดและจากส่วน
เปลือกเท่ากับ 167.48 และ 130.36 มิลลิกรัมต่อ
มิลลิลิตร และมีความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5.56 และ
5.53 ตามลำดับ ซึ่งสารสกัดหยาบเอนไซม์ปาเปนที่ได้
มีลักษณะเป็นสารละลายสีขาวใส โดยมีประสิทธิภาพ
ในการย่อยโปรตีนทางด้านเนื้อสัมผัสด้วยการวัด
แรงเหวี่ยง ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของแรงเหวี่ยงจากมากไป
หาน้อยเมื่อใช้ระยะเวลาในการหมัก 30 45 และ 60
นาที เท่ากับ 98.97 91.68 และ 85.49 นิวตัน (N)
ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพในการย่อยโปรตีน
ทางด้านปริมาณโปรตีนที่วัดได้จากการสลายตัวของ
โปรตีน ซึ่งสารสกัดหยาบเอนไซม์ปาเปนจากส่วนของ
เมล็ดมะละกอสามารถย่อยสลายโปรตีนได้ปริมาณ
โปรตีนมากกว่าจากส่วนของเปลือกมะละกอ โดย
ปริมาณโปรตีนที่ละลายออกจากเนื้อหมูที่หมักภายใน
เวลา 30 45 และ 60 นาที เท่ากับ 0.610 1.354
และ 2.105 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ ซึ่ง
ระยะเวลาในการหมักที่เพิ่มมากขึ้นมีผลต่อ
ประสิทธิภาพการย่อยสลายโปรตีนของสารสกัดหยาบ
เอนไซม์ปาเปนจากส่วนของเมล็ดและส่วนของเปลือก
มะละกอเพิ่มมากขึ้นด้วยที่อุณหภูมิห้องหรือ 35
องศาเซลเซียส

อ้างอิง

[1] You L, Zhao M, Liu RH, et al. Antioxidant
and antiproliferative activities of loach

(*Misgurnus anguillicaudatus*) peptides
prepared by papain digestion. J Agr Food
Chem. 2010;14:7948-53.

- [2] Sullivan GA and Calkins CR. Application
of exogenous enzymes to beef muscle
of high and low connective tissue. Meat
Science J. 2010;85:730-4.
- [3] Abdel-Naeem HHS and Mohamed HHM.
Improving the physico - chemical and
Sensory characteristics of camel meat
burger patties using ginger extract and
papain. Meat Science J. 2016;118:52-60.
- [4] Kristinsson HG. Aquatic food protein
hydrolysates. In: Maximising the Value of
Marine By Products. Cambridge
Woodhead, UK; 2006.
- [5] Fernandez J, Castaneda D and Hormigo
D. New trends for a classical enzyme:
papain, a biotechnological success story
in the food industry. Journal Food
Science and Technology. 2017;68:91–
101.
- [6] Kim DC, Cahe HJ and In MJ. Existence of
stable fibrin clotting inhibitor in salt
fermented anchovy sauce. Journal Food
Compos Anal. 2004;17:113-8.
- [7] Erdmann K, Cheung WY and Schroder H.
The possible roles of food derived
bioactive peptides in reducing the risk of
cardiovascular diseases. J Nutr Biochem.
2008;19:643–54.

- [8] Giannini MJ, Coleman M and Innerfiled I. Antithrombin activity in Homocystinuria. The Lancet J.1975;305:1090-4.
- [9] Ninfa A, Ballou D and Benore M. Fundamental Laboratory Approaches for Biochemistry and Biotechnology. John Wiley & Sons Inc. 2010.
- [10] Esti M, Benucci I, Lombardelli C, et al. Papain from papaya (*Carica papaya* L.) fruit and latex : Preliminary characterization in alcoholic-acidic buffer for wine application. J Food Biop Process.2013;91:595-8.
- [11] Konno K, Hirayama C, Nakamura M, et al. Papain protects papaya trees from herbivorous insects: role of cysteine proteases in latex. The Plant J. 2004;37: 370-8.
- [12] Abdulazeez SS, Ramamoorthy B, Ponnusamy P. Proximate analysis and production of protein hydrolysate from king fish of Arabian gulf coast - Saudi arabia. Int J Pharm Bio Sciences. 2013;3: 138-44.

การศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของพืชอาหารหมักจากข้าวฟ่างหวาน
Study on Nutritive Value of Silage from Sweet Sorghum
(*Sorghum bicolor* (L.) Moench.)

ยั้งยง เมฆลอย^{1*}, มณี อัครวานนท์²
Yingyong Makloi^{1*}, Manee Archavaranon²

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีการเกษตร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

² สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยรามคำแหง

¹Department of Agricultural, Faculty of Science, Ramkhamhaeng University, Thailand

²Research and Development, Ramkhamhaeng University, Thailand

*Corresponding author. Tel.: 0 2310 8382, E-mail: yingyong@ru.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของพืชหมักจากข้าวฟ่างหวาน (*Sorghum bicolor* (L.) Moench.) เพื่อใช้สำหรับการเลี้ยงสัตว์ โดยการผลิตพืชอาหารหมักในวิธีการดังนี้ ได้แก่ 1) ข้าวฟ่างหวานหมัก 2) ข้าวฟ่างหวานหมักผสมรำข้าว 5 เปอร์เซ็นต์ 3) ชานข้าวฟ่างหวานหมักผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ และ 4) ชานข้าวฟ่างหวานหมักผสมกากน้ำตาลและรำข้าวอย่างละ 5 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองพบว่า พืชอาหารหมักทั้ง 4 ชนิด มีลักษณะคุณภาพทางกายภาพที่ดี ด้านองค์ประกอบทางเคมี ข้าวฟ่างหวานหมักผสมรำข้าว 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณโปรตีนมากที่สุดเฉลี่ย 9.98 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ ข้าวฟ่างหวานหมักมีปริมาณโปรตีนเฉลี่ย 7.01 เปอร์เซ็นต์ ส่วนชานข้าวฟ่างหวานหมักผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ และชานข้าวฟ่างหวานหมักผสมรำข้าว 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณโปรตีนเฉลี่ยเท่ากับ 4.30 และ 4.92 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เยื่อใยส่วนของผนังเซลล์ (NDF) ข้าวฟ่างหวานหมักและข้าวฟ่างหวานหมักผสมรำข้าว 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่า NDF สูงกว่าชานข้าวฟ่างหวานหมักผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ และชานข้าวฟ่างหวานหมักผสมกากน้ำตาลและรำข้าวอย่างละ 5 เปอร์เซ็นต์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่ชานข้าวฟ่างหวานหมักและชานข้าวฟ่างหวานหมักผสมรำข้าวมีเยื่อใยที่เหลือจากการละลายด้วยกรด (ADF) สูงกว่าข้าวฟ่างหวานหมักและข้าวฟ่างหวานหมักผสมรำข้าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตาม ชานข้าวฟ่างหวานแม้จะมีคุณค่าทางโภชนาการต่ำแต่มีสมบัติที่สามารถใช้เป็นส่วนประกอบหลักในอาหารเลี้ยงสัตว์ได้

คำสำคัญ: พืชหมัก ข้าวฟ่างหวาน กากน้ำตาล รำข้าว

Received 08-10-2021

Revised 22-11-2021

Accepted 01-12-2021

ABSTRACT

The study deals with the nutritive value silage from sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench.) used for husbandry. The production of silage in the following ways; 1) fermented sweet sorghum, 2) fermented sweet sorghum with 5% rice bran 3) fermented sweet sorghum bagasse with 5% molasses and 4) fermented sweet sorghum bagasse with 5% molasses and 5% rice bran. The results showed that all four silage treatments had good physical properties. For chemical composition, the protein content of sweet sorghum silage mixed 5% rice bran was highest with an average of 9.98 %, followed by the protein contents of sweet sorghum silage, sweet sorghum bagasse silage and sweet sorghum bagasse silage mixed 5% rice with the average of 7.01, 4.30 and 4.92 %, respectively. The NDF fiber contents of sweet sorghum silage and sweet sorghum bagasse silage mixed 5% rice bran were significantly higher than that of sweet sorghum bagasse silage and sweet silage mixed 5% rice bran, while ADF values of fermented sweet sorghum bagasse and fermented sweet sorghum bagasse were significantly higher than that of sweet sorghum bagasse silage and sweet sorghum bagasse silage mixed rice bran. However, nutritive values of sorghum bagasse were rather low but it can be used as a major feed ingredient.

Keywords: Silage, Sweet sorghum, Molasses, Rice bran

1. บทนำ

ประเทศไทยมีช่วงฤดูแล้งที่ยาวนาน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญหนึ่งที่ทำให้ไม่สามารถผลิตหญ้าสดสำหรับเลี้ยงสัตว์ได้ตลอดทั้งปี จึงมักจะประสบปัญหาการขาดแคลนอาหารสดในช่วงฤดูแล้ง โดยเฉพาะสำหรับสัตว์เคี้ยวเอื้อง เช่น โค แพะ และแกะ เป็นต้น ซึ่งทำให้ต้องใช้อาหารข้นในปริมาณสูงขึ้น ส่งผลทำให้ต้นทุนค่าอาหารเพิ่มมากขึ้น การถนอมพืชอาหารสัตว์ไว้ใช้ในฤดูแล้งด้วยการทำหญ้าหมักหรือพืชอาหารสัตว์หมักจึงเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถจะช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้ ข้าวฟ่างหวาน (*Sorghum bicolor* (L.) Moench.) เป็นพืชชนิดเดียวกันกับข้าวฟ่างที่ปลูกเพื่อใช้ประโยชน์จากเมล็ด พืชในกลุ่มข้าวฟ่างมีทั้งปลูกเพื่อเก็บเมล็ดเป็นไว้อาหาร อาหารสัตว์ ตัดสดสำหรับสัตว์

และใช้ประโยชน์อย่างอื่นๆ Reddy and Reddy [1] กล่าวว่า ข้าวฟ่างหวานมีลักษณะเด่นหลายอย่าง มีศักยภาพที่จะนำมาพัฒนาเป็นข้าวฟ่างอาหารสัตว์ได้ เนื่องจากผลผลิตต่อต้นสูง มีความหวานในต้น ปรับตัวกับสภาพแวดล้อมได้กว้าง โดยมีงานศึกษาวิจัยเกี่ยวกับข้าวฟ่างหวานสำหรับการเลี้ยงสัตว์จำนวนมาก เช่น ฉายแสง และคณะ [2] ได้ทำการทดสอบข้าวฟ่างหวาน 4 พันธุ์ ได้แก่ Hi-sugar Big sugar และ Sweet sorghum ซึ่งทั้ง 3 พันธุ์เป็นข้าวฟ่างลูกผสมจากประเทศญี่ปุ่น และพันธุ์สุพรรณบุรี 1 (อุทอง 203) เพื่อผลิตหญ้าหมัก โดยทำการตัดข้าวฟ่างที่อายุ 45 60 และ 75 วัน พบว่า ข้าวฟ่างทุกพันธุ์ให้ผลผลิตน้ำหนักแห้งโดยเฉลี่ยที่ค่อนข้างสูงเมื่อตัดที่อายุ 75 วัน แต่มีแนวโน้มว่า ข้าวฟ่างพันธุ์ลูกผสมจากประเทศญี่ปุ่นให้

ผลผลิตที่ค่อนข้างสูงกว่าข้าวฟ่างหวานพันธุ์สุพรรณบุรี 1 และมีแนวโน้มว่าคุณภาพของหญ้าหมักที่ผลิตจากข้าวฟ่างหวานที่ตัดที่อายุ 75 วัน จะมีคุณภาพดีกว่าหญ้าหมักที่ตัดที่อายุอื่น ยิ่งยง และมณี [3] ศึกษาผลผลิตและคุณค่าทางโภชนาการของข้าวฟ่างหวาน 3 พันธุ์ ได้แก่ ข้าวฟ่างหวานพันธุ์ Wray Cowley และ Keller โดยเปรียบเทียบกับข้าวโพดพันธุ์นครสวรรค์ 3 ที่อายุการเก็บเกี่ยวหลังการปลูก 60 75 และ 90 วัน พบว่า ข้าวฟ่างหวานพันธุ์ Wray ให้ผลผลิตน้ำหนักแห้งเฉลี่ยมากที่สุด 150.50 กรัมต่อต้น และมีปริมาณโปรตีนเฉลี่ยสูงที่สุด 10.03 เปอร์เซ็นต์ โดยพืชทดลองทั้ง 4 ชนิด มีปริมาณโปรตีนสูงที่สุดที่อายุ 60 วัน ขณะที่ปริมาณโปรตีนจะลดลงเมื่ออายุการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้น และนอกจากข้าวฟ่างหวานแล้ว ชานข้าวฟ่างหวานซึ่งเป็นของเหลือจากกระบวนการผลิตเอทานอลยังเป็นวัตถุดิบที่มีแนวโน้มที่มีศักยภาพสำหรับการทำอาหารหมักอีกด้วย ซึ่ง Dong et al. [4] ได้ทำการศึกษาผลการเพาะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ต่อลักษณะการหมักและชนิดของจุลินทรีย์ของชานข้าวฟ่างหวานหมัก ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า แลคติกแอซิดแบคทีเรีย (Lactic acid bacteria) มีส่วนช่วยในการรักษาคุณค่าทางโภชนาการและการจัดการกระบวนการหมักของชานข้าวฟ่างหวาน และในการทดลองใช้ชานข้าวฟ่างหวานในการเลี้ยงสัตว์ Kumari et al. [5] ได้ศึกษากระบวนการที่เหมาะสมเพื่อให้ประโยชน์จากชานข้าวฟ่างหวานที่เป็นของเหลือจากการผลิตเอทานอล ด้วยการผสมชานข้าวฟ่างหวานกับอาหารข้น ในอัตราส่วน 50 : 50 ในรูปอาหารบดอาหารเม็ด และสับคลุก โดยเปรียบเทียบกับต้นข้าวฟ่างหวานบดผสมอาหารข้นในการเลี้ยงลูกแกะอายุ 9 เดือน ผลการทดลองพบว่า ในจำนวนกลุ่มอาหารทั้งหมด ค่าเฉลี่ยวัตถุดิบที่กิน และการย่อยได้อาหารเม็ดใช้ประโยชน์ได้ดีกว่าอาหารแบบอื่น ๆ

สำหรับการเลี้ยงลูกแกะโต เช่นเดียวกับ Anandan et al. [6] ได้ทำการศึกษาคุณค่าการให้อาหารจากชานข้าวฟ่างหวานและเศษใบที่เหลือจากการสกัดน้ำหวานเพื่อผลิตเอทานอลในการเลี้ยงแกะ โดยใช้ชานข้าวฟ่างหวานและเศษใบปริมาณ 450 กรัมต่อกิโลกกรัม ในอัตราส่วนผสมของอาหารได้แก่ ลำต้นถั่วชิกพี 50 กรัมต่อกิโลกกรัม และอาหารข้นจากของเหลือทางการเกษตร เช่น รำ กากถั่วเหลือง กากน้ำตาล 500 กรัมต่อกิโลกกรัม ในรูปแบบต่าง ๆ ได้แก่ อาหารบดอาหารเม็ด อาหารก้อน และการให้ชานข้าวฟ่างหวานและเศษใบ เสริมด้วยอาหารข้น โดยให้ชานข้าวฟ่างหวานและเศษใบ เป็นวิธีการควบคุม จากผลการทดลองรายงาน ว่า ชานข้าวฟ่างหวานและเศษใบสามารถใช้เป็นส่วนประกอบหลักในอาหารเลี้ยงสัตว์ ช่วยเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจและลดปัญหาการขาดแคลนอาหารสัตว์ การแปรรูปอาหารสัตว์เป็นแบบบดและเม็ดจะช่วยให้ผลผลิตปศุสัตว์สูงขึ้นและต้นทุนการขนส่งอาหารสัตว์ลดลง

จากข้อมูลและผลการทดลองจากงานวิจัยดังกล่าวข้างต้น แสดงให้เห็นว่า ข้าวฟ่างหวานเป็นพืชชนิดหนึ่งที่มีความน่าสนใจอย่างยิ่ง สำหรับการนำมาเพื่อใช้เป็นอาหารสัตว์หรือส่วนประกอบหลักในอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้อง ดังนั้น วัตถุประสงค์ของการวิจัยในครั้งนี้ เพื่อศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของข้าวฟ่างหวานหมักสำหรับการนำมาใช้ในการเลี้ยงสัตว์ เพื่อทดแทนในช่วงการขาดแคลนพืชอาหารสด และเป็นการใช้ของเหลือจากการการเกษตรให้เกิดประโยชน์

2. วิธีดำเนินการวิจัย

การทดลองนี้ได้ทำการทดลองที่ฟาร์มกวางมหาวิทยาลัยรามคำแหง จังหวัดสุโขทัย ระหว่างเดือนมิถุนายน ถึง เดือนกันยายน พ.ศ. 2563 ในการทดลอง

ใช้ข้าวฟ่างหวานพันธุ์ Wray ที่ได้จากการปลูกและเก็บเมล็ดพันธุ์ในฟาร์มกว้าง มหาวิทยาลัยรามคำแหง ดำเนินการปลูกข้าวฟ่างหวานในแปลงปลูกพื้นที่ 2 ไร่ ใช้ระยะปลูกระหว่างต้นระหว่างแถว 50 x 50 เซนติเมตร หยอดเมล็ดในอัตรา 3 เมล็ดต่อหลุม จากนั้นเมื่ออายุได้ 7 วันหลังเพาะเมล็ด ทำการถอนต้นกล้าให้เหลือหลุมละ 1 ต้น พร้อมกับให้ปุ๋ยยูเรีย 46-0-0 โดยการหว่าน ในอัตรา 30 กิโลกรัมต่อไร่ เมื่ออายุได้ 15 วัน ให้ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 20 กิโลกรัมต่อไร่ และให้ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อีกครั้ง เมื่ออายุ 30 วัน ในอัตรา 20 กิโลกรัมต่อไร่ ทำการเก็บเกี่ยวต้นข้าวฟ่างหวานที่อายุ 75 วันหลังการปลูก โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ต้นข้าวฟ่างหวานรวมใบ และส่วนเฉพาะลำต้น ข้าวฟ่างหวานที่รีดเอาน้ำหวานออก นำข้าวฟ่างหวานทั้ง 2 ส่วนมาสับให้มีขนาดเล็ก 1 – 2 เซนติเมตร ดำเนินการผลิตพืชอาหารหมักในวิธีการต่าง ๆ ดังนี้คือ

1. ข้าวฟ่างหวานหมัก
2. ข้าวฟ่างหวานหมักผสมรำข้าว 5 เปอร์เซ็นต์
3. ชานข้าวฟ่างหวานหมักผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์
4. ชานข้าวฟ่างหวานหมักผสมกากน้ำตาลและรำข้าวอย่างละ 5 เปอร์เซ็นต์ (5 เปอร์เซ็นต์ กากน้ำตาล และ 5 เปอร์เซ็นต์ รำข้าว ของวัตถุดิบในการหมัก) โดยนำวัสดุที่เตรียมได้ใส่ลงในถุงพลาสติกดำขนาด 60 ลิตร อัดให้แน่นและปิดมิดถุงไม่ให้อากาศเข้า หลังจากหมัก 21 วัน ทำการเปิดดูบันทึกลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ สี กลิ่น ลักษณะเนื้อ ค่าความเป็นกรด – ด่าง (pH) โดยสุ่มเก็บตัวอย่างจากปากถุง กลางถุง และก้นถุง เพื่อหมักวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ โปรตีนรวม ไขมัน เถ้า และเยื่อใยรวมตามวิธี AOAC [7] วิเคราะห์หาเยื่อใยส่วนของผนังเซลล์ (NDF) ด้วยการละลายผนังเซลล์ของพืชด้วยไซเตียม ลอริล ซัลเฟต แล้วกรองแยกส่วน

ของผนังเซลล์ออกจากส่วนที่เป็นสารละลายภายในเซลล์ ซึ่งละลายอยู่ในสารชำระล้าง (Detergent) ที่เป็นกลาง จากนั้นส่วนของสารประกอบของเซลล์และเฮมิเซลลูโลสที่ละลายได้ในกรดจะถูกนำมาย่อยด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น ส่วนที่เหลืออยู่คือ เยื่อใยที่เหลือจากการละลายด้วยกรด (ADF) ซึ่งประกอบไปด้วย เซลลูโลส และลิกนิน ตามวิธี Van Soest et al. [8]

การวางแผนการทดลองวิเคราะห์หาค่าประกอบทางเคมีของพืชอาหารหมัก แบบ Completely randomized design (CRD) จำนวน 4 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติและเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan 's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การศึกษาพืชหมักจากข้าวฟ่างหวานพันธุ์ Wray ใน 4 วิธีการ ได้แก่ 1. ข้าวฟ่างหวานหมัก 2. ข้าวฟ่างหวานหมักผสมรำข้าว 5 เปอร์เซ็นต์ 3. ชานข้าวฟ่างหวานหมักผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ 4. ชานข้าวฟ่างหวานหมักผสมกากน้ำตาลและรำข้าวอย่างละ 5 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดลองหลังการหมักที่ 21 วัน ในด้านลักษณะคุณภาพทางกายภาพ พบว่า ข้าวฟ่างหวานหมัก ส่วนเนื้อใบและลำต้นยังคงสภาพเดิม มีสีเหลืองอมเขียว กลิ่นคล้ายน้ำส้มสายชูหมัก วัดค่า pH เฉลี่ยได้เท่ากับ 3.93 (ภาพที่ 1)

ข้าวฟ่างหวานหมักผสมรำข้าว 5 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเนื้อใบและลำต้นยังคงสภาพเดิม มีสีเขียวอมเหลือง กลิ่นคล้ายน้ำส้มสายชูหมัก ค่า pH เฉลี่ยเท่ากับ 3.80 (ภาพที่ 2)



ภาพที่ 1 ข้าวฟ่างหวานหมัก



ภาพที่ 2 ข้าวฟ่างหมักผสมรำข้าว 5 เปอร์เซ็นต์

ส่วนขานข้าวฟ่างหวานหมักผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ (ภาพที่ 3) และขานข้าวฟ่างหวานหมักผสมกากน้ำตาลและรำข้าวอย่างละ 5 เปอร์เซ็นต์

(ภาพที่ 4) เหนื่อยังคงสภาพเดิมสีเหลืองอมน้ำตาลหรือน้ำตาลทอง กลิ่นคล้ายน้ำส้มสายชูหมัก ค่า pH เฉลี่ยเท่ากับ 4.48 และ 4.40 ตามลำดับ



ภาพที่ 3 ขานข้าวฟ่างหวานหมักผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4 ขานข้าวฟ่างหวานหมักผสมกากน้ำตาลและรำข้าวอย่างละ 5 เปอร์เซ็นต์

ด้านองค์ประกอบทางเคมีของพืชอาหารหมัก (ตารางที่ 1) จากการทดลองพบว่า ข้าวฟ่างหวานหมักผสมรำข้าวมีปริมาณโปรตีนเฉลี่ยมากที่สุด คือ 9.98 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ ข้าวฟ่างหวานหมัก ชานข้าวฟ่างหวานหมักผสมกากน้ำตาลและรำข้าว และชานข้าวฟ่างหวานหมักผสมกากน้ำตาลมีปริมาณโปรตีนเฉลี่ยเท่ากับ 7.01 4.92 และ 4.30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ปริมาณไขมัน ข้าวฟ่างหวานหมักผสมรำข้าวมีปริมาณไขมันเฉลี่ยมากที่สุดคือ 2.57 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ ชานข้าวฟ่างหวานหมักผสมกากน้ำตาลและรำข้าวมีปริมาณไขมันเฉลี่ย 2.40 เปอร์เซ็นต์ ส่วนข้าวฟ่างหวานหมักและชานข้าวฟ่างหวานหมักผสมกากน้ำตาลมีปริมาณไขมันเฉลี่ยเท่ากับ 1.69 และ 1.66 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยปริมาณไขมันของพืชอาหารหมักทั้งสองชนิดไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ปริมาณเถ้า หรือแร่ธาตุในอาหาร ข้าวฟ่างหวานหมักผสมรำข้าวมีปริมาณเถ้าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 3.35 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ ชานข้าวฟ่างหวานหมักผสมกากน้ำตาลและรำข้าวมีปริมาณเถ้า 2.85 เปอร์เซ็นต์ ส่วนข้าวฟ่างหวานหมักและชานข้าวฟ่างหวานหมักผสมกากน้ำตาล มีปริมาณเถ้าเฉลี่ยเท่ากับ 2.45 และ 2.44 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยปริมาณเถ้าของพืชอาหารหมักทั้งสองชนิดนี้ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ปริมาณเยื่อใยรวม จากผลการทดลองชานข้าวฟ่างหวานหมักมีปริมาณเยื่อใยสูงกว่าข้าวฟ่างหวานหมักอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่ปริมาณเยื่อใย

รวมเฉลี่ยระหว่างชานข้าวฟ่างหมักผสมกากน้ำตาลและชานข้าวฟ่างหวานหมักผสมกากน้ำตาลและรำข้าวไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยมีปริมาณเยื่อใยเฉลี่ยเท่ากับ 8.02 และ 8.00 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนปริมาณเยื่อใยเฉลี่ยระหว่างข้าวฟ่างหวานหมักและข้าวฟ่างหวานหมักผสมรำข้าว มีปริมาณเยื่อใยเฉลี่ยเท่ากับ 7.13 และ 7.02 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ส่วนของผนังเซลล์หรือเยื่อใยที่ไม่ละลายในสารที่เป็นกลางแต่ละลายในสารละลายที่เป็นกรด (NDF) จากผลการทดลอง ข้าวฟ่างหวานหมักมีปริมาณ NDF เฉลี่ยสูงที่สุด 18.81 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ ข้าวฟ่างหวานหมักผสมรำข้าวมีปริมาณ NDF เฉลี่ยเท่ากับ 18.64 เปอร์เซ็นต์ ส่วนชานข้าวฟ่างหวานหมักผสมกากน้ำตาลและชานข้าวฟ่างหวานหมักผสมกากน้ำตาลและรำข้าวปริมาณ NDF เฉลี่ยเท่ากับ 11.45 และ 11.41 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยปริมาณ NDF ของชานข้าวฟ่างหวานหมักทั้งสองชนิดไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ส่วนเยื่อใยที่ไม่ละลายในกรด (ADF) เป็นส่วนของลิกนินและเซลลูโลส ชานข้าวฟ่างหวานหมักผสมกากน้ำตาลและชานข้าวฟ่างหวานหมักผสมกากน้ำตาลและรำข้าวมีปริมาณ ADF เฉลี่ยมากที่สุด คือ 11.49 และ 11.48 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ รองลงมาคือ ข้าวฟ่างหวานหมักมีปริมาณ ADF เฉลี่ยเท่ากับ 11.42 เปอร์เซ็นต์ และข้าวฟ่างหวานหมักผสมรำข้าวมีปริมาณ ADF เฉลี่ยเท่ากับ 11.37 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 1 เปอร์เซ็นต์องค์ประกอบทางเคมีของข้าวฟ่างหวานหมัก 4 ชนิด

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ข้าวฟ่างหวานหมัก ^{1/}			
	ข้าวฟ่างหวาน	ข้าวฟ่างหวานผสมรำข้าว	ชานข้าวฟ่างหวานผสมกากน้ำตาล	ชานข้าวฟ่างหวานผสมกากน้ำตาลและรำข้าว
โปรตีนรวม	7.01 ^b	9.98 ^a	4.30 ^d	4.92 ^c
ไขมัน	1.69 ^c	2.57 ^a	1.66 ^c	2.40 ^b
เถ้า	2.44 ^c	3.35 ^a	2.45 ^c	2.85 ^b
เยื่อใยรวม	7.02 ^b	7.13 ^b	8.00 ^a	8.02 ^a
NDF	18.81 ^a	18.64 ^b	11.45 ^c	11.41 ^c
ADF	11.42 ^b	11.37 ^c	11.49 ^a	11.48 ^a

^{1/}ค่าเฉลี่ยจากจำนวน 4 ซ้ำ ค่าเฉลี่ยในแนวนอนที่มีอักษรเหมือนกัน แสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ จากการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยโดย DMRT ($p = 0.05$)

จากผลการทดลอง คุณภาพทางกายภาพของพืชหมักที่ผลิตจากข้าวฟ่างหวานพันธุ์ Wray ที่อายุเก็บเกี่ยว 75 วัน พืชหมักจากข้าวฟ่างหวานมีลักษณะคุณสมบัติทางกายภาพที่ดีมาก สอดคล้องกับฉายแสงและคณะ [2] รายงานว่า ด้านคุณภาพของหญ้าหมักข้าวฟ่างหวานที่ตัดที่อายุ 75 วัน มีแนวโน้มว่าจะมีคุณภาพดีกว่าหญ้าหมักที่ตัดที่อายุ 45 และ 60 วัน เนื่องจากมีปริมาณน้ำตาลในลำต้นสูงทำให้ได้หญ้าหมักที่มีค่า pH ต่ำ เช่นเดียวกับยิ่งยง และธงชัย [9] ศึกษาคุณค่าทางอาหารของข้าวฟ่างหวานหมัก รายงานว่าข้าวฟ่างหวานพันธุ์ Keller ที่อายุ 90 วัน มีปริมาณวัตถุแห้ง แป้งและน้ำตาลสูงเหมาะสำหรับที่จะนำมาผลิตอาหารหยาบหมัก สายัณห์ [10] ระบุว่า การลดลงของค่า pH จะทำให้หญ้าเป็นกรด ส่งผลทำให้เกิดการสูญเสียทั้งในด้านวัตถุแห้งและคุณภาพเกิดขึ้นได้น้อย น้ำตาลส่วนใหญ่สะสมในลำต้นมากกว่าในใบและพบในปริมาณสูงเมื่อหญ้าเข้าสู่ระยะออกดอก การเพิ่มความเป็นกรดให้กับพืชอาหารหมัก เป็นการป้องกันแบคทีเรียกลุ่มคลอสตริเดียม

(Clostridium) ซึ่งถ้าแบคทีเรียกลุ่มนี้มีปริมาณมากจะทำให้โปรตีนมีปริมาณลดลง และสามารถเปลี่ยนกรดอะซิติก และกรดแลคติก เป็นกรดบิวทิริกที่มีกลิ่นเหม็น โดยกรดแลคติกสามารถลดการสูญเสียโปรตีนและป้องกันการเกิดแอมโมเนีย

ด้านคุณค่าทางโภชนาการ ปัจจัยที่ควบคุมคุณภาพของพืชอาหารหมัก นอกจากจะขึ้นอยู่กับชนิดพันธุ์พืชกรรมวิธีการหมัก ยังขึ้นอยู่กับอายุขณะตัดพืชด้วย ฉายแสง และคณะ [2] รายงานว่า ข้าวฟ่างหวานหมักที่ตัดที่อายุ 75 วัน มีปริมาณโปรตีนอยู่ในช่วง 5.8-7.3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีแนวโน้มว่าจะต่ำกว่าข้าวฟ่างหวานหมักที่ตัดที่อายุ 45 วัน ซึ่งมีโปรตีนอยู่ในช่วง 7.2-10.7 เปอร์เซ็นต์ รวมทั้งค่าการย่อยได้ของข้าวฟ่างหมักที่ตัดที่อายุ 75 วัน ก็มีแนวโน้มว่าจะต่ำกว่าข้าวฟ่างหวานหมักที่ตัดที่อายุ 45 วัน เช่นเดียวกับยิ่งยง และธงชัย [9] รายงานว่า ข้าวฟ่างหวานพันธุ์ Keller ที่อายุการตัด 60 วัน มีปริมาณโปรตีนเฉลี่ยอยู่ที่ 5.56 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่อายุการตัด 90 วัน ปริมาณโปรตีนเฉลี่ยเท่ากับ 4.13 เปอร์เซ็นต์ แต่ที่อายุการตัด 90 วัน มี

ความเหมาะสมที่จะนำมาผลิตเป็นพืชหมักมากกว่าดังเหตุผลในข้างต้น

ในส่วนของการชานข้าวฟ่างหวานหมัก จากผลการทดลอง ชานข้าวฟ่างหวานหมักมีลักษณะคุณภาพทางกายภาพและโภชนาการต่ำกว่าข้าวฟ่างหวานหมัก โดยเฉพาะคุณค่าทางโภชนาการ (ตารางที่ 1) แม้จะมีการผสมกากน้ำตาลปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ในการกระบวนการหมัก ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องจากการรีดน้ำหวานออกจากลำต้นทำให้เกิดการสูญเสียสารประกอบภายในเซลล์ และสารประกอบที่ละลายน้ำได้ เช่น แร่และน้ำตาล เป็นต้น สายพันธ์ [10] กล่าวว่าพืชที่เหมาะสมสำหรับการทำหญ้าหมักต้องมีการโบไฮเดรตที่ละลายน้ำได้ในระดับที่เพียงพอต่อการหมักเปรี้ยว แต่สามารถใช้วิธีการบางอย่างให้หญ้าหมักเกิดการหมักได้ดีขึ้น เช่น การใส่เชื้อแบคทีเรียผลิตกรดแลคติกในขณะกำลังทำการหมัก การใช้เอนไซม์ต่าง ๆ เช่น เซลลูโลติก อะไมโลไลติก หรือการใส่กากน้ำตาล ข้าวโพดบด มันสำปะหลัง ในการหมัก เป็นต้น จากผลการทดลอง ข้าวฟ่างหวานหมักและชานข้าวฟ่างหวานหมักที่ผสมรำข้าว 5 เปอร์เซ็นต์ สามารถช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ เช่น โปรตีน และไขมัน (ตารางที่ 1) โดยที่สมบัติทางกายภาพของพืชหมักไม่เปลี่ยนแปลง ในส่วนของชานข้าวฟ่างหมักยังมีปริมาณเยื่อใย ADF สูง ซึ่งเยื่อใยดังกล่าวมีส่วนของลิกนินและเซลลูโลส ในปริมาณสูง นอกจากนี้อายุการตัดพืชขณะนำมาหมักยังเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมปริมาณการย่อยของพืชหมักอีกด้วย [10] สอดคล้องกับการทดลองของยังยง และมณี [3] จากการเปรียบเทียบคุณค่าทางโภชนาการของข้าวฟ่างหวาน 3 พันธุ์ ได้แก่ Cowley Keller และ Wray กับข้าวโพดพันธุ์นครสวรรค์ 3 ที่อายุการเก็บเกี่ยว 60 75 และ 90 วัน รายงานว่า ในแต่ละช่วงอายุของการตัดที่เพิ่มขึ้น ปริมาณเยื่อใยรวม ตลอดจนเยื่อใย NDF และ ADF

ของข้าวฟ่างหวานทั้ง 3 สายพันธุ์และข้าวโพดจะสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

วิโรจน์ [11] กล่าวว่า เยื่อใยสูง คุณภาพเยื่อใยต่ำเพราะมีการเกาะกันของโมเลกุลคาร์โบไฮเดรตได้เป็นพันธะที่แข็งแรง มีการโบไฮเดรตต่ำ โปรตีนต่ำ มีลิกนินสูงสัตว์จะย่อยลิกนินได้น้อยหรือไม่ได้เลย ทำให้สัตว์กินอาหารได้น้อยลงและอ้วน การใส่สาร เช่น ยูเรีย แอมโมเนียม และโซเดียมไฮดรอกไซด์ สามารถปรับปรุงการย่อยได้สูงขึ้น โดยสารที่เป็นนี้ต่างจะทำให้ลิกนินแตกและทำให้ผิวเปลือกของต้นพืชแตกออกง่ายต่อการเข้าย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ แต่ในการใช้ต้องคำนึงถึงความเหมาะสม เนื่องจากสัตว์อาจได้รับโซเดียมในปริมาณที่มากเกินไป และปล่อยโซเดียมส่วนเกินออกสู่สิ่งแวดล้อม

อย่างไรก็ตาม เยื่อใยที่เป็นส่วนที่ย่อยยากยังเหมาะกับการใช้เลี้ยงสัตว์ เช่น โค กระบือ แพะ แกะ และกวาง เป็นต้น ซึ่งเป็นสัตว์กระเพาะรวมหรือสัตว์เคี้ยวเอื้องที่มีความสามารถในการใช้อาหารที่มีคุณภาพต่ำแปลงเป็นโปรตีนและพลังงานสูงได้ดี [11] ชานข้าวฟ่างหวานแม้จะเป็นวัสดุที่มีคุณค่าทางโภชนาการต่ำ แต่ถ้าหากมีกระบวนการหมักที่เหมาะสมที่สามารถส่งเสริมการย่อยและใช้ประโยชน์จากลิกนิน ชานข้าวฟ่างหวานจะเป็นวัตถุดิบที่สามารถนำไปใช้ในกรณีขาดแคลนพืชอาหารในฤดูแล้ง และสามารถนำมาใช้ทดแทนพืชอาหารหายขาดได้ โดยใช้ร่วมกับอาหารอื่นที่ให้พลังงานและโปรตีนมีคุณภาพดี

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองเปรียบเทียบพืชอาหารหมักจากข้าวฟ่างหวานพันธุ์ Wray พบว่า พืชอาหารหมักทั้ง 4 วิธีการ ในส่วนของเนื้อยังคงสภาพเดิม ไม่มีกลิ่นเหม็นเน่า มีค่า pH อยู่ระหว่าง 3.80 – 4.48 โดยเฉพาะพืช

อาหารหมักจากข้าวฟ่างหวานมีลักษณะคุณภาพทางกายภาพที่ดีมาก ด้านองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของพืชอาหารหมัก จากการทดลองพบว่า ข้าวฟ่างหวานหมักมีปริมาณโปรตีนเฉลี่ยเท่ากับ 7.01 เปอร์เซ็นต์ ข้าวฟ่างหวานหมักผสมรำข้าว จะมีปริมาณโปรตีนเฉลี่ยเท่ากับ 9.98 เปอร์เซ็นต์ ส่วนขานข้าวฟ่างหวานหมักและขานข้าวฟ่างหวานหมักผสมรำข้าวมีปริมาณโปรตีนเฉลี่ยเท่ากับ 4.30 และ 4.92 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การผสมรำข้าว 5 เปอร์เซ็นต์ในการหมักช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการและไม่ทำให้ลักษณะทางกายภาพของพืชหมักเปลี่ยนแปลง สำหรับปริมาณเยื่อใย NDF ข้าวฟ่างหวานหมักมีค่า NDF สูงกว่าขานข้าวฟ่างหวานหมัก ส่วนปริมาณ ADF ให้ผลในทางที่ตรงกันข้ามคือขานข้าวฟ่างหวานหมักมีค่า ADF สูงกว่าข้าวฟ่างหวานหมัก

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Reddy BVS, Reddy PS. Sweet Sorghum: Characteristic and potential. International Sorghum and Millets Newsletter, ICRISAT. 2003; 44:26-8.
- [2] ฉายแสง ไผ่แก้ว, พิมพาพร พลเสน, บุญชู ชมพูสอ. การทดสอบพันธุ์ข้าวฟ่างหวานเพื่อผลิตหญ้าหมัก. รายงานผลการวิจัยประจำปี 2546. กองอาหารสัตว์ กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2546; 205-14.
- [3] ยิ่งยง เมฆลอย, มณี อัครวานนท์. การเปรียบเทียบผล ผลิตและคุณค่าทางโภชนาการของข้าวโพดและข้าวฟ่างหวาน 3 พันธุ์. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยรามคำแหง ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2563; 22(2). 13-22.
- [4] Dong M, Li Q, Xu F, et al. Effects of microbial inoculants on the fermentation characteristics and microbial communities of sweet sorghum bagasse silage. Scientific reports. [internet] 2020 Jan [cited 2021 Aug 12]; 10(837): 1-9. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.s41598-020-57628-0>.
- [5] Kumari NN, Reddy YR, Blummel M, et al. Effect of feeding processed sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) bagasse based complete diet on nutrient utilization and microbial N supply in growing ram lambs. Small Ruminant Research. 2014; 117(1). 52-7.
- [6] Anandan S, Zoltan H, Blummel M, et al. Feeding value of sweet sorghum bagasse and leaf residues after juice extraction for bio-ethanol production fed to sheep as complete ration in diverse physical forms. J nifedsci. 2012;175(3/4):134-6.
- [7] AOAC. Official Method of Analyses. 18th edition. Association of Official Analytical Chemists. Washington. D.C. 2011.
- [8] Van Soest PJ, Robertson J, Lewis BA. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. J Dairy Sci. 1991;74(10):3583-97.

- [9] ยิ่งยง เมฆลอย, ธงชัย ช่วยสถิต. การศึกษาคุณค่าทางอาหารของข้าวฟ่างหวานสำหรับสัตว์. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยรามคำแหง ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2560;20(1):37-49.
- [10] สายัณห์ ทัดศรี. พืชอาหารสัตว์เขตร้อน. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2547.
- [11] วิโรจน์ ภัทรจินดา. โภชนศาสตร์สัตว์เลี้ยง และ สัตว์ป่า. ขอนแก่น: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น; 2555.

เครื่องวัดฝุ่น PM2.5 แจ้งเตือนทางแอปพลิเคชันไลน์ Dust PM2.5 Monitoring and Alert System via LINE Application

ดอนสัน ปงผาบ^{1*}, ปกรณ์ สันตกิจ²
Donson Pongphab^{1*}, Pakorn Santakij²

^{1*}สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

²สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

^{1*}Department of Electrical Technology, Faculty of Industrial Technology,
Lampang Rajabhat University, Thailand

²Department of Information Technology, Faculty of Science,
Lampang Rajabhat University, Thailand

*Corresponding Author. Tel. 08 4500 0474, E-mail: donson@lpru.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการสร้างเครื่องวัดฝุ่น PM 2.5 และมีการแจ้งเตือนผลผ่านทางแอปพลิเคชันไลน์ หลักการทำงานของเครื่องจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO เป็นตัวควบคุมการอ่านค่าจากเซ็นเซอร์ ตรวจวัดปริมาณฝุ่น PM 2.5 ค่าอุณหภูมิและความชื้นในอากาศ ในส่วนของการแจ้งเตือนจะแสดงบนจอแสดงผล และแจ้งเตือนเป็นสถานะไฟกระพริบสีเขียว สีเหลืองและสีแดง เพื่อให้สามารถแจ้งเตือนและมองเห็นในระยะไกล ได้ จากนั้นจะส่งค่าปริมาณฝุ่นที่วัดได้ให้กับ NodeMCUesp8266 เพื่อแจ้งเตือนปริมาณฝุ่นทางแอปพลิเคชันไลน์ ตามเวลาที่กำหนดหรือเมื่อมีปริมาณฝุ่นในอากาศเกินค่ามาตรฐานความปลอดภัยคือ 100 ไมครอนหรือ ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้เซ็นเซอร์วัดฝุ่นแบบเลเซอร์รุ่น PMS5003 หลักการวัดปริมาณฝุ่นจะมีพัดลม ขนาดเล็กดูดอากาศเข้ามาในตัวเซ็นเซอร์แล้วฉายแสงเลเซอร์ผ่านอนุภาคฝุ่นในอากาศ เมื่อแสงเลเซอร์กระทบกับ ฝุ่นทำให้แสงเกิดการกระเจิงจึงสามารถวัดปริมาณของละอองฝุ่นได้โดยสามารถวัดฝุ่นขนาด PM 1.0 PM 2.5 และ PM 10 ได้ในชุดเดียวกันมีหน่วยวัดเป็นไมครอน ซึ่งเซ็นเซอร์วัดฝุ่นใช้เวลาในการตรวจวัดน้อยกว่า 3 วินาที มีความละเอียดในการวัดอนุภาคที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางที่มากกว่า 0.5 ไมครอน มีประสิทธิภาพ 98% ในช่วงการวัด 0-500 ไมครอน จากการทดสอบและติดตั้งในอาคารฝึกปฏิบัติการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย ราชภัฏลำปาง เครื่องวัดฝุ่นแจ้งเตือนทางแอปพลิเคชันไลน์สามารถใช้งานได้จริงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้คือ สามารถวัดค่าฝุ่น PM 2.5 ได้สามารถแจ้งเตือนทางแอปพลิเคชันไลน์และสามารถมองเห็นสัญญาณไฟเตือนใน ระยะไกลได้ถึง 20 เมตร โดยมีผลการวัดปริมาณฝุ่นเทียบกับเครื่องวัดฝุ่นของ Dust Boy ได้ค่าที่ใกล้เคียงกันไป ในทิศทางเดียวกันและมีค่าผิดพลาดประมาณ 4.09%

คำสำคัญ : เครื่องวัดฝุ่น, ฝุ่นอนุภาคขนาด 2.5 ไมครอน, แอปพลิเคชันไลน์

Received 08-08-2021

Revised 04-11-2021

Accepted 05-11-2021

ABSTRACT

The Air Quality Monitoring PM 2.5 is presented in this study, and the results can be alerted via the LINE application. The PM 2.5, temperature and humidity sensors and are all part of the Arduino UNO microcontroller used in this study. The offline notification appears on the screen and is shown by flashing lights green, yellow, and red. As a result, the lighting is visible from a distance. NodeMCUEsp8266 is used to send the results of PM 2.5 online at the specified time. In addition, when PM 2.5 exceeds the safety standard, which is 100 microns or micrograms per cubic meter, the LINE application can be notified. The dust is measured using a laser sensor PMS5003 for PM 2.5. The main concepts in this study are the small fan pulling air into the sensor and the sensor beaming laser light through the dust particles in the air. When laser light collides with dust, the light scatters, allowing the number of dust particles to be measured. It is possible to measure PM 1.0, PM 2.5 and PM 10 at the same time. Micrograms per cubic meter, or micron, are the measurement unit for PM 2.5 and PM 10. The measurement time was less than 3 seconds. A particle count efficiency was 50% for particles with a minimum diameter of 0.3 microns and a 98% effectiveness for particles larger than 0.5 microns in the measuring range of 0-500 microns. The tests and evaluations revealed that it could be utilized for the intended purpose, measuring PM 2.5 dust and alerting users via the LINE app and remote warning light which can be seen at a distance of up to 20 meters. The dust measurement results was compared to the dust meter "Boy's dust" providing the similar values in the same direction with error of about 4.09%

Keyword: Dust Monitoring, PM2.5, LINE Application, Arduino

1.บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยประสบปัญหามลพิษทางอากาศทุกปี สาเหตุมาจากการสะสมของควันหรือฝุ่นในอากาศ โดยส่วนใหญ่เกิดจากการเผาเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและไฟฟ้า และมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นในทุกๆ ปี โดยเฉพาะในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย ซึ่งปัญหามลพิษทางอากาศในภาคเหนือนั้นได้ส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชน จากการศึกษาของ ฐิฎาพร สุภาชี และคณะ [1] พบว่าฝุ่น PM 2.5 และ PM 10 เป็น

สาเหตุให้เกิดโรค เช่น ตาอักเสบ โรคหัวใจและหลอดเลือด โรคระบบทางเดินหายใจ และโรคผิวหนังอักเสบ เป็นต้น ซึ่งจากการศึกษาในช่วงเดือนมกราคม-เมษายน ปี พ.ศ. 2559 มีจำนวนผู้ป่วยรวมในอัตราร้อยละ 16 แสดงให้เห็นปัญหาสุขภาพที่เกิดจากปัญหามลพิษทางอากาศดังกล่าว Jingli L และคณะ [2] ได้พบว่าฝุ่นละอองขนาดเล็กได้กลายเป็นความกังวลด้านสาธารณสุขที่สำคัญเนื่องจากส่งผลต่อปอดซึ่งเป็นอวัยวะหลักที่ได้รับผลกระทบจากฝุ่น PM2.5

จากการศึกษางานวิจัยย้อนหลังเกี่ยวกับระบบการแจ้งเตือนมลพิษทางอากาศพบว่ามีการ

ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเพื่อหาแนวทางในการวัดและ
แจ้งเตือนปริมาณฝุ่นในลักษณะต่างๆ เช่น ออร์ปรภา
ภูมิยะกาญจนะ และคณะ [3] ได้ศึกษาและพัฒนา
ระบบตรวจวัดค่าและติดตามคุณภาพอากาศแบบ
เรียลไทม์ มีขนาดเล็ก ราคาไม่แพง โดยสามารถติดตั้ง
ในบริเวณพื้นที่กรุงเทพมหานครได้ ตัวตรวจวัด
คุณภาพอากาศจะใช้เซนเซอร์วัดแก๊สเซ็นเซอร์ชนิด
ทินออกไซด์ซึ่งเป็นนาโนเทคโนโลยีที่มีความไวต่อแก๊ส
ไนโตรเจนไดออกไซด์ ได้ค่าความถูกต้องเท่ากับ 82%
เมื่อทำการปรับเทียบกับการตรวจวัดภาคพื้นดินของ
กรมควบคุมมลพิษ นอกจากนี้ค่าความเข้มข้นของ
แก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ที่ได้จากการตรวจวัด
ภาคพื้นดินได้นำมาหาค่าสหสัมพันธ์กับภาพถ่าย
ดาวเทียม จากนั้นได้นำมาหาค่าสหสัมพันธ์กับค่า
PM10 ที่ตรวจติดตามจากภาคพื้นดิน และแสดง
ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ผ่านอินเทอร์เน็ตเพื่อ
เพิ่มการมีส่วนร่วมและความตระหนักของประชาชน
ต่อคุณภาพอากาศ จากนั้น สุดจิต คุรุจิต [4] ได้
พัฒนาระบบฐานข้อมูลการเปลี่ยนแปลงสภาพ
ภูมิอากาศ การตรวจวัดปริมาณฝุ่นละอองเชิงมวล
PM 2.5 และ PM 10 ในอากาศด้วยเครื่องตรวจจับ
ฝุ่นละอองไร้สาย โดยพัฒนาระบบฐานข้อมูล Cloud
computing เพื่อศึกษาถึงปัญหาฝุ่นควันที่เกิดขึ้นในเขต
ภาคเหนือตอนบน โดยมีการตรวจวัดปริมาณฝุ่น
การตรวจวัดปริมาณฝุ่นไร้สาย เพื่อนำไปศึกษา
ผลกระทบที่จะเกิดขึ้นทั้งต่อสุขภาพมนุษย์ ระบบ
นิเวศและทรัพยากรธรรมชาติ ซึ่งมีการติดตั้งสถานี
ตรวจวัดปริมาณฝุ่นละอองเชิงมวลเรียลไทม์เดือนกัย
วิฤตฝุ่นควันในพื้นที่ภาคเหนือจำนวนทั้งหมด
4 สถานี เพื่อให้สามารถเข้าถึงข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว
ทันสถานการณ์ และเข้าใจง่าย สามารถเป็นข้อมูล
เพื่อสนับสนุนแนวทางการแก้ไขปัญหาหมอกควัน

ในเขตพื้นที่ภาคเหนือ เพื่อนำไปสู่การแก้ไขปัญหาได้
อย่างถูกต้อง และรวดเร็วทันเหตุการณ์ต่อปัญหาที่
เกิดขึ้น ต่อมา อาทิตย์ ยาวุฒิและคณะ [5,6]
ได้พัฒนาและทดสอบภาคสนามเครื่องวัดและ
วิเคราะห์ขนาดฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศแบบใช้
หลักการวัดกระแสน้ำไฟฟ้าสถิตของอนุภาคผ่านตัวกรอง
ฝุ่นละอองประสิทธิภาพสูง เครื่องวัดปริมาณฝุ่น
ต้นแบบที่พัฒนาประกอบด้วย ชุดคัดแยกฝุ่นละออง
PM 2.5 และ PM 10 ชุดให้ประจุไฟฟ้ากับฝุ่นละออง
แบบเส้นลวดโครนา ลูกถ้วยพาราเคย์ วงจรอิเล็กทรอนิกส์
ชุดวัดและควบคุมอัตราการไหลของ
อากาศ บีมสัญญาณแสง แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง
กระแสตรงและชุดควบคุมและประมวลผลข้อมูล
สามารถวิเคราะห์และเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองขนาด
เส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 2.5 หรือ 10 ไมครอน
ในอากาศที่มีช่วงของความเข้มข้นของอนุภาค 0 ถึง
300 ไมครอน หรือ 106 ถึง 1012 อนุภาค
ต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้เวลาในการประมวลผล
ประมาณ 0.1 วินาที สามารถเชื่อมต่อข้อมูลไปยัง
คอมพิวเตอร์ภายนอกผ่านพอร์ตอนุกรมเทียบเคียงได้
กับอุปกรณ์ที่มาจากต่างประเทศ และมีขนาด
กะทัดรัดและทนทานเหมาะสำหรับการตรวจวัดและ
ศึกษามลพิษทางอากาศ [7] ต่อมา Karami, M. และ
คณะ [8] ได้ศึกษาและพัฒนาเครื่องตรวจสอบ
คุณภาพสิ่งแวดล้อมและเก็บข้อมูลในอาคารแบบ
พกพา โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino
เชื่อมต่อกับเซ็นเซอร์อุณหภูมิ ความชื้น ความสว่าง
แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สารประกอบอินทรีย์ระเหย
ง่ายและฝุ่น PM 2.5 เพื่อตรวจวัดสภาพแวดล้อมใน
อาคาร ใช้โปรโตคอลการสื่อสารแบบไร้สายในการ
เชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์เพื่อรับส่งข้อมูลแบบ
เรียลไทม์ทำให้สามารถจัดเก็บข้อมูลบนคลาวด์

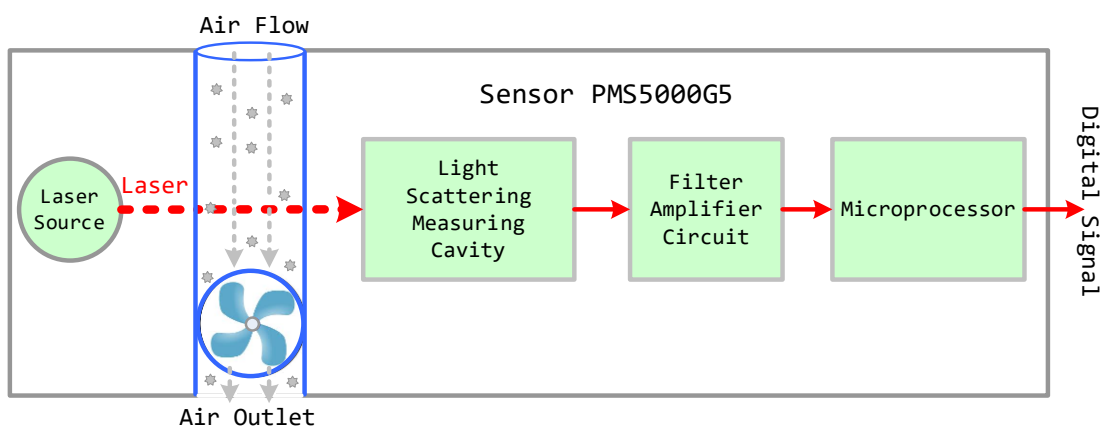
(Cloud) สามารถตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูลแบบเรียลไทม์ได้

จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะพบว่ามีการพัฒนา ระบบตรวจวัดคุณภาพอากาศในลักษณะที่เป็นระบบ เครือข่ายขนาดใหญ่ ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะ ออกแบบและสร้างระบบแจ้งเตือนคุณภาพอากาศ ที่สามารถวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง น้อยกว่า 2.5 ไมครอน ในบริเวณพื้นที่เฉพาะเจาะจง โดยสามารถแจ้งเตือนแบบเรียลไทม์ได้ ทั้งจากการ

แสดงผลโดยตรงในระยะไกลจากสัญญาณไฟ แจ้งเตือนที่สามารถมองเห็นได้โดยง่าย จากสถานที่ จริงและสามารถแจ้งเตือนผ่านทางระบบออนไลน์ ผ่านเครือข่ายทางสังคมที่ผู้ใช้ส่วนใหญ่ใช้งานอยู่แล้ว โดยการแจ้งเตือนผ่านทางแอปพลิเคชันไลน์ เพื่อให้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันได้ง่าย ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและ สร้างเครื่องวัดปริมาณฝุ่น PM 2.5 และแจ้งเตือน สภาพอากาศค่าปริมาณฝุ่น PM 2.5

2.วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 เซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่น



ภาพที่ 1 หลักการทำงานของเซ็นเซอร์วัดฝุ่น PMS5003

PM 1.0 ฝุ่นละอองที่มีขนาดไม่เกิน 1 ไมครอน เพราะอนุภาคขนาดเล็กสามารถซึมทะลุ ถุงลมปอดเข้าไปในเส้นเลือดที่ไปเลี้ยงหัวใจและสมอง ก่อเป็นปัจจัยที่เพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดโรคต่าง ๆ หากสะสมต่อเนื่องในระยะยาวก็อาจก่อให้เกิด โรคหัวใจล้มเหลวและโรคหลอดเลือดสมอง

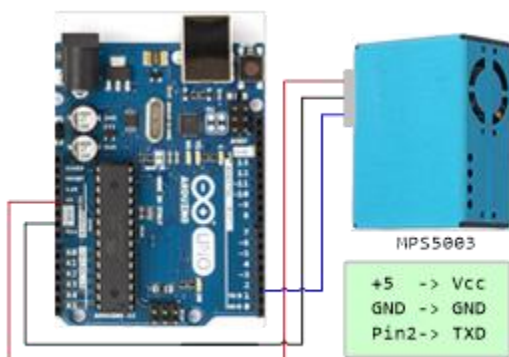
PM 2.5 คือเป็นฝุ่นที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางไม่ เกิน 2.5 ไมครอน เกิดจากการเผาไหม้ทั้งจาก

ยานพาหนะ การเผาป่า ไฟป่า พืชการเกษตรและ กระบวนการอุตสาหกรรม สามารถเข้าไปถึงถุงลมใน ปอดได้ ส่งผลทำให้เกิดโรคในระบบทางเดินหายใจ และโรคปอดต่าง ๆ

PM 10 คือฝุ่นที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ไม่เกิน 10 ไมครอน เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงของ เครื่องยนต์ กระบวนการอุตสาหกรรม หรือเกิดจาก งานก่อสร้าง ส่งผลกระทบต่อสุขภาพเนื่องจากเมื่อ

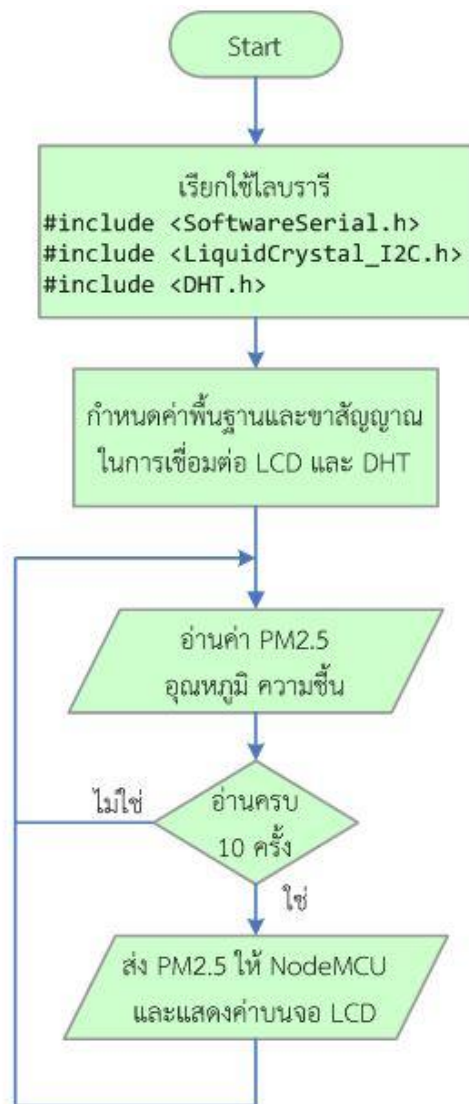
หายใจเข้าไปสามารถเข้าไปสะสมในระบบทางเดินหายใจ

เซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่น PMS5003 มีหลักการทำงานโดยใช้หลักการของการส่งแสงเลเซอร์ฉายแสงผ่านอนุภาคฝุ่นที่ลอยอยู่ในอากาศ ซึ่งจะมีพดลขนาดเล็กดูดอากาศเข้ามาในท่อ เมื่อฝุ่นเคลื่อนผ่านลำแสงก็จะปิดกั้นแสงบางส่วนทำแสงเกิดการกระเจิงทำให้ความเข้มของแสงลดลงเซ็นเซอร์จึงสามารถตรวจวัดปริมาณฝุ่นได้ โดยสามารถวัดค่าอนุภาคฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM 1.0 PM 2.5 และ PM 10 ได้ในชุดเดียวกัน มีเวลาในการตรวจวัดน้อยกว่า 3 วินาที มีความละเอียดในการวัดอนุภาคที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางที่อนุภาคมากกว่า 0.5 ไมครอนในช่วงการวัด 0-500 ไมครอน มีประสิทธิภาพการนับอนุภาค 98% ให้สัญญาณเอาต์พุตแบบดิจิตอลที่เป็นค่าฝุ่นที่วัดได้มีหน่วยเป็นไมครอน การเชื่อมต่อเซ็นเซอร์วัดฝุ่น PMS5003 กับไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino มี 3 ขาคือ 5V ต่อกับ Vcc ขา GND ต่อกับ GND และขา 2 เป็นขาข้อมูลต่อเข้ากับขา TXD ของเซ็นเซอร์ ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การเชื่อมต่อกับเซ็นเซอร์วัดฝุ่น

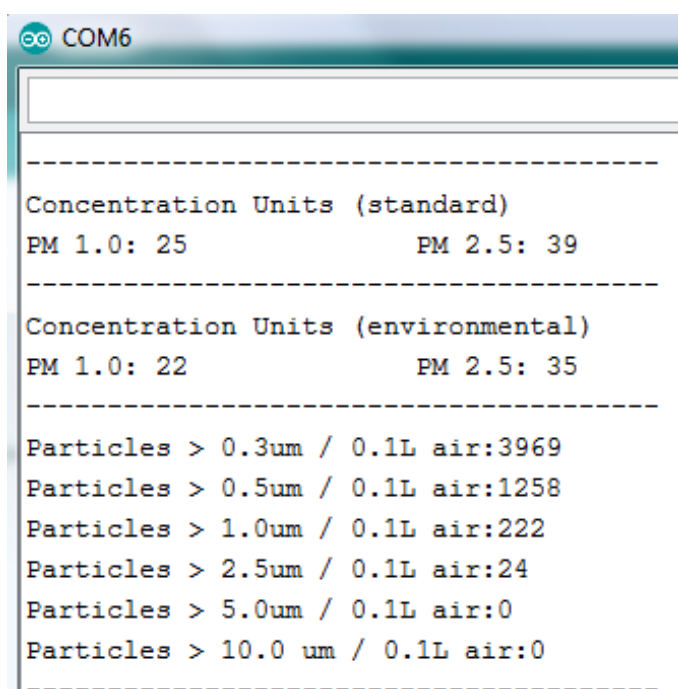
2.2การเขียนโปรแกรมวัดปริมาณฝุ่น



ภาพที่ 3 โฟลว์ชาร์ตโปรแกรมวัดปริมาณฝุ่น

ในการพัฒนาได้ใช้โปรแกรม Arduino IDE เขียนตามโครงสร้างของภาษาซี โดยเริ่มจากการเรียกใช้ไลบรารี SoftwareSerial.h เพื่อใช้ในการรับส่งข้อมูลแบบอนุกรม อ่านค่าจากเซ็นเซอร์วัดฝุ่น ใช้ไลบรารี LiquidCrystal_I2C.h ในการแสดงผลบนจอ LCD และเรียกใช้ไลบรารี DHT.h ในการอ่านค่าอุณหภูมิและความชื้น จากนั้นทำการอ่านค่าฝุ่น อุณหภูมิและความชื้น ทำการวัดซ้ำ 10

หาค่าเฉลี่ยของการวัดเพื่อลดค่าผิดพลาด แล้วนำค่าที่วัดได้มาแสดงผลบนจอภาพและหลอดแสดงผล จากนั้นส่งค่าปริมาณฝุ่น PM 2.5 ที่วัดได้ให้กับ NodeMCU เพื่อทำการแจ้งเตือนทางแอปพลิเคชันไลน์ตามเวลาที่กำหนดและเมื่อปริมาณค่าฝุ่นเกิน 100 ไมครอน แสดงดังโพล์ชาร์ตในภาพที่ 3 และได้ตัวอย่างผลการวัดดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ตัวอย่างค่าที่ได้การวัดปริมาณฝุ่น

2.3 การส่งข้อมูล Arduino และ NodeMCU

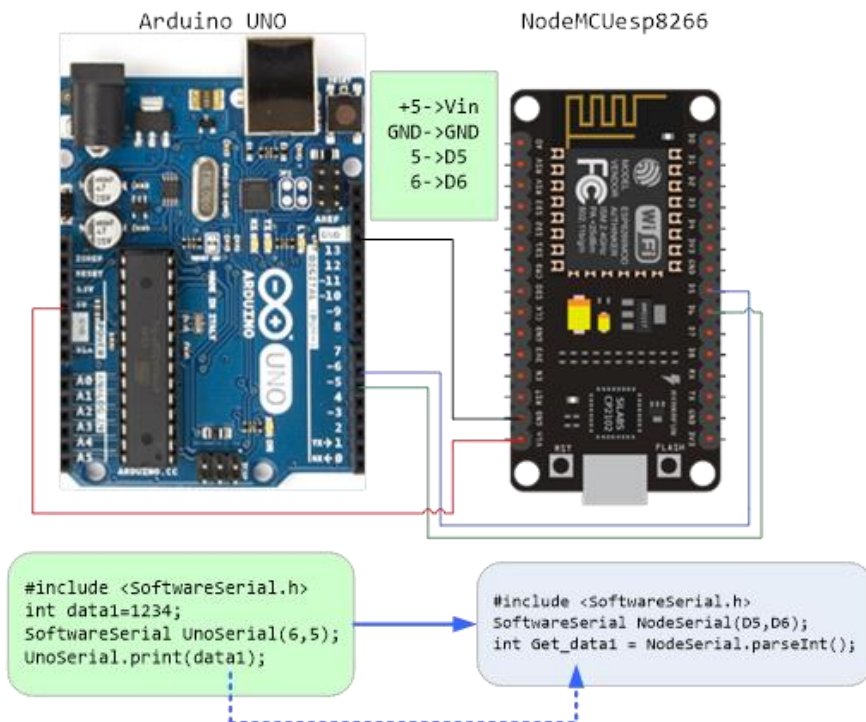
เครื่องวัดค่าฝุ่นจะมีส่วนประกอบหลักได้แก่ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino เป็นตัวตรวจวัดและส่วนของการแสดงผล แล้วจึงส่งค่าฝุ่นละออง PM2.5 ที่วัดได้ให้กับ NodeMCUesp8266 เพื่อแจ้งเตือนปริมาณค่าฝุ่น PM2.5 ผ่านทางแอปพลิเคชันไลน์

ตามเวลาและเงื่อนไขที่กำหนดหรือเมื่อมีปริมาณค่าฝุ่นเกินมาตรฐาน

โดยหลักการทำงาน Arduino UNO จะส่งข้อมูลจากตัวแปร dataPM25 ซึ่งเป็นค่าปริมาณฝุ่นที่วัดได้ ออกทางขา 5 ให้กับขา D5 ของ NodeMCU ผ่านฟังก์ชันUnoSerial.print (dataPM25); จากนั้น NodeMCU จะรอรับค่าที่เข้ามาโดยใช้

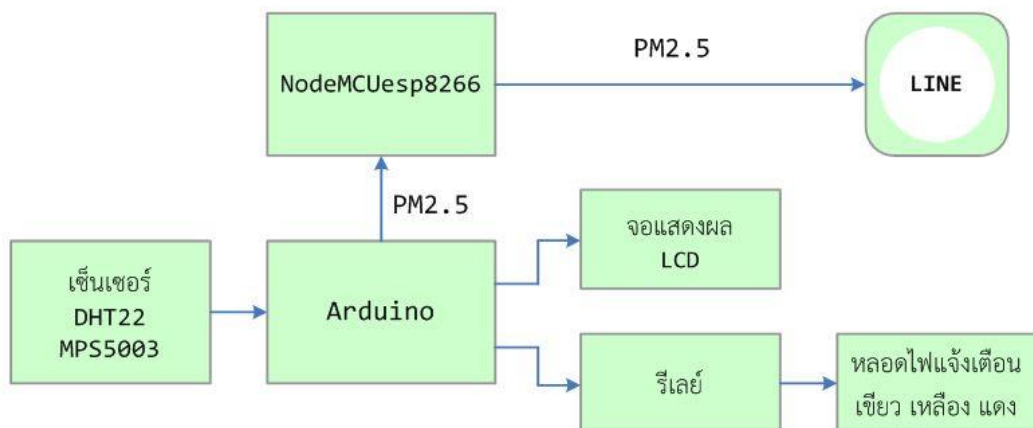
ฟังก์ชัน `NodeSerial.parseInt()`; และในการสื่อสารแบบอนุกรมต้องเรียกใช้ไลบรารี `SoftwareSerial.h` โดยขั้นตอนการส่งข้อมูลจะต้องเขียนโปรแกรมเพื่อส่ง

ข้อมูลปริมาณฝุ่น PM 2.5 ใน Arduino และเขียนโปรแกรมรับค่าใน NodeMCU แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การเชื่อมต่อ Arduino UNO และ NodeMCUesp8266

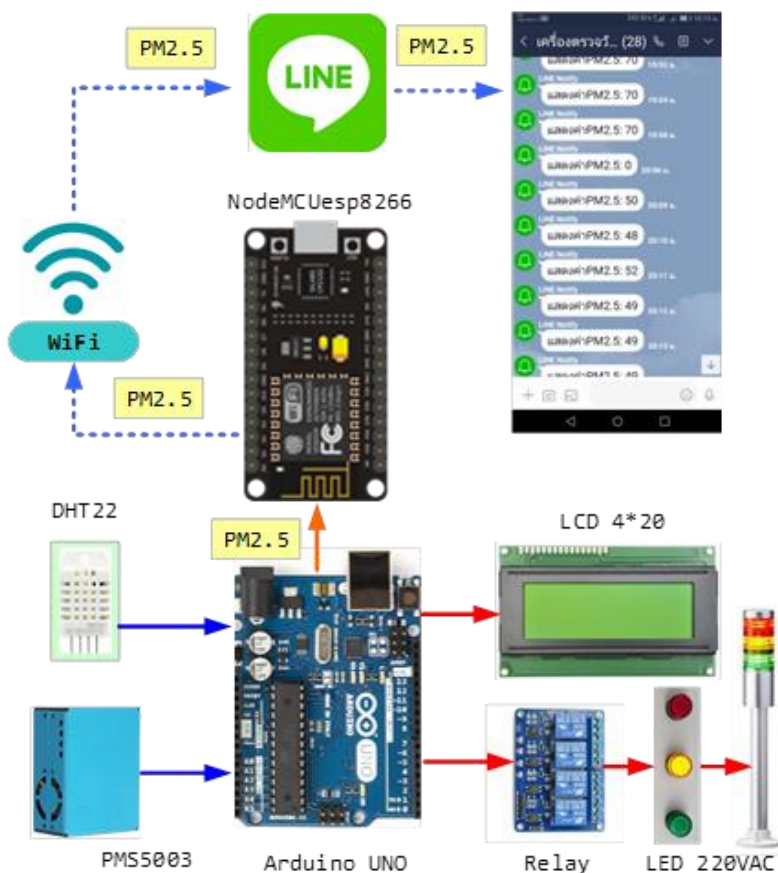
2.4 เครื่องวัดฝุ่นและแจ้งเตือนทางแอปพลิเคชันไลน์



ภาพที่ 6 แผนผังการทำงานของเครื่องวัดฝุ่นและแจ้งเตือนทางแอปพลิเคชันไลน์

จากรูปที่ 6 แสดงแผนผังการทำงานของเครื่องวัดฝุ่นและแจ้งเตือนทางแอปพลิเคชันไลน์ เริ่มจากไมโครคอนโทรลเลอร์จะอ่านค่าอุณหภูมิ ความชื้นและฝุ่น PM 1 PM 2.5 และ PM 10 จากเซ็นเซอร์ นำมาแสดงผลบนจอภาพและแจ้งเตือนทางหลอดไฟสีเขียว สีเหลืองและสีแดงกระพริบทำให้สามารถมองเห็นได้ในระยะไกล โดยที่ไฟเขียวหมายถึงอากาศดีมีปริมาณ PM 2.5 น้อยกว่า 80 ไมครอน สีเหลืองหมายถึงคุณภาพอากาศปานกลาง PM 2.5 มีค่าอยู่ระหว่าง 80 ถึง 100 ไมครอน และสีแดงหมายถึงคุณภาพอากาศที่เริ่มส่งผลกระทบต่อ

สุขภาพมีปริมาณฝุ่น PM 2.5 มากกว่า 100 ไมครอน จากนั้นส่งค่าฝุ่น PM 2.5 ให้กับ NodeMCUesp8266 เพื่อส่งค่าฝุ่นที่วัดได้ให้กับแอปพลิเคชันไลน์ซึ่งจะทำการแจ้งเตือนตามเวลาที่กำหนดทุก ๆ 2 ชั่วโมงและจะแจ้งเตือนเมื่อมีปริมาณฝุ่นเกินค่าที่ปลอดภัยคือมากกว่า 100 ไมครอน ทำให้สามารถรับรู้ปริมาณฝุ่นทางแอปพลิเคชันไลน์และสามารถมองเห็นได้ในระยะไกลได้จากสัญญาณไฟกระพริบสีเขียว สีเหลือง และสีแดงทำให้มีความสะดวกในการแจ้งเตือนโดยระบบการทำงานของเครื่องวัดฝุ่นสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 การทำงานของเครื่องวัดฝุ่นและแจ้งเตือนทางแอปพลิเคชันไลน์

2.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเครื่องวัดฝุ่น

วิธีการการเปรียบเทียบเครื่องวัดฝุ่นจะไม่เหมือนเครื่องวัดทั่วไปให้ใช้การหาค่าความถูกต้องจากค่าความผิดพลาด โดยมีค่าจริงกับค่าที่วัดได้เนื่องจากฝุ่นในอากาศที่เราสนใจเป็นค่าชั่วขณะที่ไม่นานถึงระดับค่ามาตรฐาน ราย 24 ชั่วโมง หรือรายปี ด้วยเครื่องวัดมาตรฐานที่ใช้การเก็บตัวอย่าง ดังนั้นการหาประสิทธิภาพของเครื่องวัดฝุ่นแบบที่รายงานผลอัตโนมัติ โดยใช้โมเดลการวิเคราะห์ถดถอยโพลีโนเมียล (Polynomial regression analysis model) ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น ตามสมการที่ (1) และการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of determination; r^2) ตามสมการที่ (2)[9]

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_1^2 + \dots + b_nx_1^n \quad (1)$$

$$r^2 = \frac{(\sum xy - n\bar{x}\bar{y})^2}{(\sum x^2 - n\bar{x}^2)(\sum y^2 - n\bar{y}^2)} \quad (2)$$

เพื่อดูว่าเครื่องทั้งสองที่เปรียบเทียบกับนั้นมีการวัดค่าที่มีความสมรूपกันมากน้อยแค่ไหนเมื่อตรวจวัดและอ่านค่าฝุ่นในช่วงเวลาเดียว

สำหรับการศึกษาครั้งนี้จะทดสอบเครื่องวัดฝุ่นแฉ่งเตื่อนทางแอฟฟลิเคชันไลน์เปรียบเทียบกับเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 และ PM10 แบบเซนเซอร์ (DustBoy) ที่มีใช้งานจริงและติดตั้งมากกว่า 100 จุดทั่วประเทศ เพื่อทำการ

เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างเครื่องวัดค่าฝุ่นที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นมาใช้ในการศึกษารุ่นนี้กับเครื่องวัดฝุ่นที่มีการใช้งานจริง

3.ผลการทดลอง

ในการทดลองจะทดสอบเครื่องวัดฝุ่นแฉ่งเตื่อนทางแอฟฟลิเคชันไลน์เปรียบเทียบกับเครื่องวัดสภาพอากาศ PM 2.5 Dust Boy ที่มีใช้งานจริงและติดตั้งมากกว่า 100 จุดทั่วประเทศ ทดสอบและติดตั้งภายในอาคารฝึกปฏิบัติการของคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำปางเก็บข้อมูลทุก ๆ 30 นาทีจำนวน 100 ครั้งซึ่งผลที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ได้ค่าใกล้เคียงกันซึ่งมีค่าผิดพลาดประมาณ 4.09 % โดยมีผลการทดสอบดังกราฟภาพที่ 12-14 ส่วนการทดสอบเรื่องระยะทางในการมองเห็น หลอดสัญญาณไฟแฉ่งเตื่อน ได้ทดสอบกับนักศึกษาจำนวน 20 ภายในอาคารฝึกปฏิบัติการ ที่ระยะทาง 5 เมตร มีผลการมองเห็นชัดเจนอยู่ในระดับ 5 จำนวน 20 คน ที่ระยะทาง 10 เมตร มีผลการมองเห็นชัดเจนอยู่ในระดับ 5 จำนวน 17 คนและอยู่ในระดับ 4 จำนวน 3 คน ที่ระยะทาง 15 เมตร มีผลการมองเห็นชัดเจนอยู่ในระดับ 5 จำนวน 12 คน อยู่ในระดับ 4 จำนวน 5 คนและระดับ 3 จำนวน 3 คน ที่ระยะทาง 20 เมตรซึ่งเป็นระยะทางที่ไกลที่สุดของโรงฝึกปฏิบัติการ มีผลการมองเห็นชัดเจนอยู่ในระดับ 5 จำนวน 8 คน ระดับ 4 จำนวน 7 คน ระดับ 3 จำนวน 4 คนและระดับ 2 จำนวน 1 คนแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การทดสอบการมองเห็นที่ระยะต่างๆ

ระยะทาง	ระดับการมองเห็น 1-5 (5 ชัดเจนมากที่สุด)					ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	
5 เมตร					20	5.0
10 เมตร				3	17	4.85
15 เมตร			3	5	12	4.45
20 เมตร	1	4	7	8		4.10



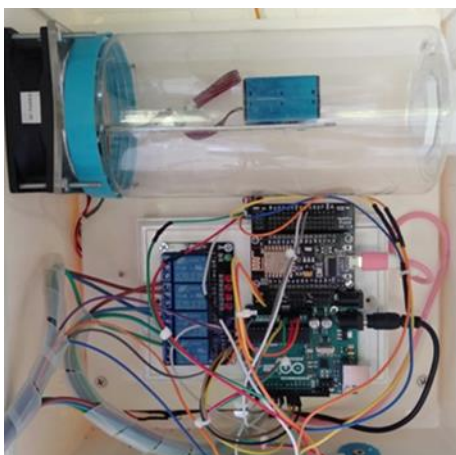
ภาพที่ 10 ด้านหน้าเครื่องวัดปริมาณฝุ่น



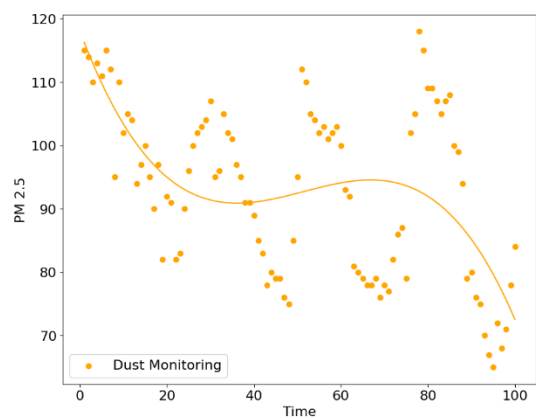
ภาพที่ 8 การทดลองเครื่องวัดฝุ่น



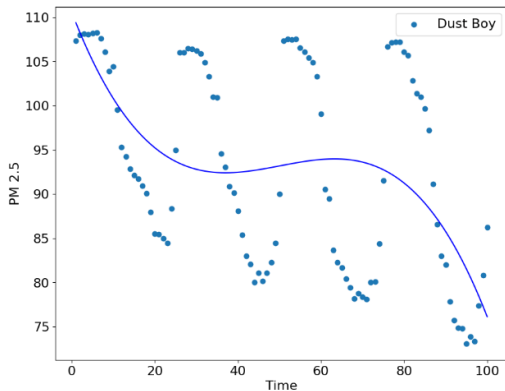
ภาพที่ 11 การติดตั้งเครื่องวัดฝุ่นในโรงฝึกปฏิบัติการ



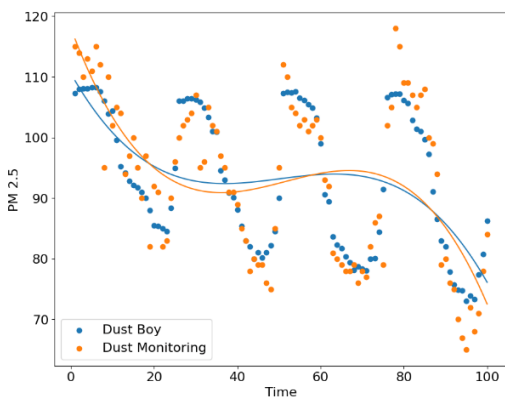
ภาพที่ 9 วงจรภายในเครื่องวัดปริมาณฝุ่น



ภาพที่ 12 กราฟปริมาณฝุ่น PM 2.5 ที่วัดได้



ภาพที่ 13 กราฟปริมาณฝุ่น PM 2.5 ของ Dust Boy



ภาพที่ 14 กราฟเปรียบเทียบปริมาณฝุ่น 2 เครื่อง

4.สรุปผลการทดลอง

เครื่องตรวจวัดฝุ่นแจ้งเตือนทางแอปพลิเคชันไลน์ มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องตรวจวัดค่าปริมาณฝุ่น PM 2.5 ในการใช้งานปกติจะแจ้งเตือนทุกๆ 2 ชั่วโมงและจะแจ้งเตือนเมื่อมีปริมาณฝุ่น PM 2.5 มีค่าเกิน 100 ไมครอน โดยผู้ใช้งานสามารถเพิ่มเพื่อนในแอปพลิเคชันไลน์จาก QR code ที่ข้างตัวเครื่อง โครงสร้างของเครื่องวัดค่าอากาศ ความสูงของเสามีขนาด 145 เซนติเมตร ขนาดของเครื่องตรวจวัดค่าอากาศ 30 x 25 เซนติเมตร ในการตรวจวัดค่าอากาศ จะใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับฝุ่น PM 2.5 แบบเลเซอร์ PMS5003 โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

Arduino Uno เป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบและใช้ NodeMCU เป็นตัวแจ้งเตือนปริมาณฝุ่นทางแอปพลิเคชันไลน์ เหมาะสำหรับการติดตั้งในอาคารฝึกปฏิบัติการ โรงงานหรือสนามกีฬาในร่ม จากการทดสอบและติดตั้งเครื่องวัดเครื่องตรวจวัดค่าอากาศ ในอาคารฝึกปฏิบัติการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยราชภัฏรำปาง โดยจะวัดค่าอากาศทุก ๆ 30 นาที จำนวน 100 ครั้งซึ่งผลที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ได้ค่าใกล้เคียงกันซึ่งมีค่าผิดพลาดประมาณ 4.09 % ซึ่งหาคำนวณได้จากสูตร

$$x = \frac{A - B}{B} * 100$$

โดยที่

x = เปอร์เซนต์ค่าผิดพลาด

A = ปริมาณฝุ่นที่ได้จากเครื่องที่สร้าง

B = ปริมาณฝุ่นที่ได้จากเครื่องที่นำมาเทียบวัด

ส่วนการทดสอบเรื่องระยะทางในการมองเห็นสัญญาณไฟแจ้งเตือน ได้ทดสอบกับนักศึกษาจำนวน 20 คนภายในอาคารฝึกปฏิบัติการที่ระทางห่าง 5 เมตร มีผลการมองเห็นชัดเจนอยู่ในระดับ 5.0 ที่ระยะห่าง 10 เมตร มีผลการมองเห็นชัดเจนอยู่ในระดับ 4.85 ที่ระยะห่าง 15 เมตร มีผลการมองเห็นชัดเจนอยู่ในระดับ 4.45 และที่ระยะห่าง 20 เมตรซึ่งเป็นระยะทางที่ไกลที่สุดของอาคารฝึกปฏิบัติการ มีผลการมองเห็นชัดเจนอยู่ในระดับ 4.10 การสร้างเครื่องวัดปริมาณฝุ่นใช้งบประมาณ 3,000 บาท ในการพัฒนาปรับปรุงในอนาคต อาจเพิ่มหลอดสัญญาณไฟแจ้งเตือนในหลายจุด มีการแจ้งเตือนด้วยเสียงเมื่อปริมาณฝุ่นมีค่ามากเกินมาตรฐาน เลือกใช้เซ็นเซอร์ที่มีความเที่ยงตรงและแม่นยำสูงและพัฒนาให้สามารถติดตั้งภายนอกอาคารได้

5.กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับคำแนะนำจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์อาทิตย์ ยาอุทมิ อาจารย์จากมหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์ลำปาง ผู้ที่ได้สร้างเครื่องวัดฝุ่น Dust Boy ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ ผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยฉบับนี้จะมีประโยชน์ในการป้องกันและแจ้งเตือนฝุ่นมลพิษในอากาศ จึงขอมอบส่วนดีทั้งหมดนี้ให้แก่คณาจารย์ที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาจนทำให้ผลงานวิจัยเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้องและขอขอบความกตัญญู กตเวทิตาคุณ แต่บิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน สำหรับข้อแนะนำต่าง ๆ ผู้วิจัยยินดีที่จะรับฟังคำแนะนำจากทุกท่านที่ได้เข้ามาศึกษา เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

6.อ้างอิง

- [1] ฐิฎาพร สุภาชี, พานิช อินต๊ะ, เสริมเกียรติจอมจันทร์ยอง และคณะ. การวิเคราะห์ปริมาณฝุ่นละอองเชิงมวล PM2.5 และ PM10 ในบรรยากาศด้วยเครื่องตรวจวัดฝุ่นละอองไร้สายในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย. วารสารวิจัยเทคโนโลยีนวัตกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์ลำปาง. 2561; 2(1):65-78.
- [2] Jingli L, Yiran H, Lingjing L, et al. PM2.5 exposure perturbs lung microbiome and its metabolic profile in mice. Science of the Total Environment. 2020; 2020(721):137432.
- [3] อรประภา ภูมิเมษกาญจนะ, ศิโยชิ ฮอนดะ. การตรวจติดตามคุณภาพอากาศแบบ Real-time ในสิ่งแวดล้อมเมืองโดยใช้เครื่องตรวจวัดจากภาคพื้นดิน ชุดอุปกรณ์นาโนเทคโนโลยีแก๊สเซ็นเซอร์ชนิดทินออกไซด์ และภาพถ่ายดาวเทียมผ่านระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์แบบอินเทอร์เน็ต. มหาวิทยาลัยศิลปากร. กรุงเทพฯ. 2552.
- [4] สุดจิต คุรุจิต, ธัญญชัย วรรณสุข, ชื่นจิตร์ ชาญชิตปรีชา และคณะ. การพัฒนาระบบเฝ้าระวังฝุ่นละอองและคุณภาพอากาศแบบบูรณาการเพื่อสนับสนุนการจัดการคุณภาพอากาศในชุมชน. สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. นครราชสีมา: 2553.
- [5] อาทิตย์ ยาอุทมิ, สมศักดิ์ วรรณชัย, พิลิษฐ์ วิมลธนสิทธิ์ และคณะ. การพัฒนาเครื่องวัดฝุ่นหลักการทางแสงและเปรียบเทียบผลการวัดกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 40: มหาวิทยาลัยมหิดล จังหวัดนครปฐม. 2562. 481-484.
- [6] อาทิตย์ ยาอุทมิ, พิลิษฐ์ วิมลธนสิทธิ์, สาคร ปันตา และคณะ. เซ็นเซอร์หลักการทางแสงราคาถูกลำบากสำหรับงานตรวจวัดฝุ่นละอองในอากาศ. การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 3: 24-25 พฤษภาคม 2561; ลอฟท์ มาเนีย บูติก โฮเทล จังหวัดชุมพร. 2561. หน้า 160-161.
- [7] อาทิตย์ ยาอุทมิ และ พานิช อินต๊ะ. เครื่องวัดและวิเคราะห์ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 และ 10 ในอากาศ. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9: พลังงานสีเขียว เพื่อโลกที่สดใส; 8-10 พฤษภาคม 2556; ชลพฤกษ์รีสอร์ท จังหวัดนครนายก. 2556.

- [8] Majid K, Gabrielle V, Liping W. Continuous monitoring of indoor environmental quality using an Arduinobased data acquisition system. Journal of Building Engineering. 2018; 2018(19):412-419.
- [9] Artit Y, Pisit W, Kitchar C, et al. Comparison of Particulate Matter Monitoring Using Beta Attenuation Monitor and Light Scattering Method in angkok Thailand. 3rd International Technical Conference on Circuits /Systems, Computers and Communications 2018 (ITC-CSCC 2018); 2018 July 4-7; Mandarin Hotel, Bangkok Thailand; 2018. 498-501.

เครื่องตรวจวัดความหวานเมล่อนด้วยเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้

A Device of Measuring Melon Sweetness by Near-Infrared Technique

ชิดชนก มากจันทร์^{1*}, สุธี ลีจงเพิ่มพูน², วิรัช กองสิน³, กิตติพงษ์ คล้ายดี⁴, เอกชัย รัตนบรรลือ⁵

Chidchanok Markjan^{1*}, Sutee Leejongpermpoon², Wiruch Kongsin³,

Kittiphong Klaidee⁴, Aekchai Rattanabanlue⁵

^{1,2,3,4}สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

⁵สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

^{1,2,3,4} Department of Electrical Engineering, Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Thailand.

⁵Department of Mechanical Engineering, Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Thailand.

* Corresponding author. Tel. 06 4936 6398, E-mail: chidchanok.m@rmutsb.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเครื่องตรวจวัดความหวานเมล่อนด้วยเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้ด้วยการรับส่งสัญญาณแบบสะท้อนกลับเพื่อเป็นประโยชน์ในการตรวจวัดความหวานของเมล่อนในขณะเพาะปลูก มีวัตถุประสงค์เพื่อทราบความสัมพันธ์ของช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสม ระยะติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด และจำนวนอุปกรณ์ตรวจวัด ต่อค่าความหวาน ผลความหวานที่ได้จากการทดลองวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ รีเฟล็กโต-มิเตอร์ ทำการทดลองที่ความยาวคลื่นอินฟราเรดความถี่ช่วงสั้นที่ 760, 810 และ 860 nm ที่ระยะห่างอุปกรณ์รับส่งสัญญาณแบบสะท้อนกลับตั้งแต่ 0.1-1 cm ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์รับส่งสัญญาณแบบสะท้อนกลับจำนวน 1-3 ตำแหน่ง เมล่อนกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ทดลอง สายพันธ์ 115 อายุเก็บเกี่ยวไม่น้อยกว่า 80 วัน น้ำหนักไม่น้อยกว่า 1.2 kg ขนาดเส้นรอบวงไม่น้อยกว่า 35 cm ผลการทดลองพบว่าที่ความยาวคลื่นอินฟราเรดความถี่ช่วงสั้นที่ 860 nm ระยะห่างในการติดตั้งอุปกรณ์ที่ 0.1 cm และ ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์รับส่งสัญญาณแบบสะท้อนกลับจำนวน 3 ตำแหน่ง สามารถให้ความแม่นยำในการวัดความหวานตามมาตรฐาน 12 °Brix ในห้องปฏิบัติการคือ 60% และค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ ±1 °Brix

คำสำคัญ : ของแข็งที่ละลายน้ำได้ เมล่อน วัดความหวาน

ABSTRACT

This research developed a of a device of measuring melon sweetness by near-infrared technique with reflected transponder signals useful for indicating the sweetness of melons during cultivation. The research objective is to know the relationship of the proper wavelength

Received 12-10-2021

Revised 26-11-2021

Accepted 01-12-2021

range, measuring device installation distances and the number of measuring devices per sweetness. Sweetness results were obtained from the analytical experiment by a reflectometer device. Such experiment was performed at short-range infrared wavelengths of 760, 810 and 860 nm at reflectance transceiver distances from 0.1 to 1 cm. There were 1-3 mounting positions of reflector transceivers. The melon samples used in the experiment belong to the strain 115 with a harvesting age of no less than 80 days, a weight no less than 1.2 kgs, and a circumference of no less than 35 cm. The results indicated that, at the short-range infrared wavelength of 860 nm, the instrument mounting distance of 0.1 cm. and the mounting position of the reflector transceiver in 3 positions were able to achieve the measurement accuracy of 12 °Brix standard sweetness. In the laboratory, it is equal to 60% while the tolerance value is to ± 1 °Brix.

Keyword: Soluble Solids content: Melon: Sweet measure

1. บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีว่าประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ซึ่งภาคเกษตรกรรมยังคงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศ และส่งผลถึงแนวโน้มของระบบความมั่นคงทางอาหารของโลก เนื่องจากเกษตรกรรมเป็นต้นทางของการผลิตปัจจัย 4 ซึ่งเป็นปัจจัยหลักของการดำรงชีวิตของมนุษย์ แต่ด้วยปัญหาการปลูกพืชชนิดเดิมซ้ำเป็นระยะเวลานาน อาจนำมาซึ่งปัญหา ดินเสื่อม ปัญหาโรคระบาด และปัญหาแมลงศัตรูพืช จึงส่งผลให้เกษตรกรให้ความสนใจในการปลูกพืชหมุนเวียน โดยพืชทางเลือกที่สำคัญและเกษตรกรให้ความสนใจปลูกเพิ่มมากขึ้น นั่นคือแตงเทศ เนื่องจากเป็นพืชที่มีศักยภาพทางการตลาดสูง โดยในปัจจุบันประเทศไทยมีการผลิตแตงเทศอยู่หลายชนิด เช่น แคนตาลูป เมล่อนผิวตาข่าย เมล่อนผิวเรียบ เป็นต้น พื้นที่เพาะปลูกส่วนใหญ่อยู่ในแถบ ภาคกลาง ภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งมีพื้นที่เพาะปลูกแตงเทศรวมทั้งประเทศอยู่ราว ๆ 4,524 ไร่ ผลผลิตรวมทั้งสิ้นประมาณ 9,176 ตัน โดยผลผลิตส่วนใหญ่ใช้บริโภค

ภายในประเทศ [1] และหากจำแนกพื้นที่เพาะปลูกแตงเทศเป็นรายชนิดพบว่า ในปี 2558 พื้นที่เพาะปลูกเมล่อนมีทั้งหมด 9 จังหวัด เนื้อที่เพาะปลูกรวมทั้งสิ้น 371 ไร่ ผลผลิตรวมเท่ากับ 1,157 ตัน [2] และได้มีการขยายพื้นที่เพาะปลูกเพิ่มมากขึ้นในปี 2559 โดยมีพื้นที่เพาะปลูกเมล่อนเพิ่มขึ้นเป็น 17 จังหวัด เนื้อที่เพาะปลูกรวมทั้งสิ้น 533 ไร่ ผลผลิตรวมเท่ากับ 1,323 ตัน และมีแนวโน้มสูงขึ้นอีกในอนาคต [3] โดยจังหวัดที่มีการเพาะปลูกเมล่อนมากที่สุดคือ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา นนทบุรี และจันทบุรี ตามลำดับ จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าปริมาณผลผลิตของเมล่อนที่เพิ่มขึ้นอาจมีแนวโน้มมาจากการเพาะปลูกเมล่อนที่เพิ่มขึ้น จึงสามารถคาดการณ์ได้ว่าเมล่อนเริ่มเป็นที่ต้องการของตลาด แต่การผลิตพืชในเชิงเศรษฐกิจนั้นนอกจากปริมาณของผลผลิตแล้วจำเป็นต้องพิจารณาถึงคุณภาพของผลผลิต โดยจากข้อมูลของสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ได้กำหนดมาตรฐานสินค้าเกษตรของแตงเทศเพื่อจำหน่ายในรูปผลผลิตสดแก่ผู้บริโภคไว้ โดย

นอกจากลักษณะทางกายภาพหลักของแตงเทศ ในเรื่องของการไม่มีตำหนิที่ผิว ไม่มีคามผิดปกติ ด้านรูปทรงและสี ฯลฯ แล้วนั้น ตัวแปรสำคัญอีกตัวแปรหนึ่งที่เป็นตัวกำหนด และแบ่งชั้นคุณภาพคือ ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (Total soluble solids; TSS) โดยการแบ่งชั้นคุณภาพของแตงเทศนั้นจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ แตงเทศมาตรฐานชั้นพิเศษ (Extra class) แตงเทศมาตรฐานชั้นหนึ่ง (Class I) และแตงเทศมาตรฐานชั้นสอง (Class II) โดยแตงเทศมาตรฐานชั้นพิเศษนั้นต้องมีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ไม่ต่ำกว่า 12% และ แตงเทศมาตรฐานชั้นหนึ่งและสอง ต้องมีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ไม่ต่ำกว่า 10% ถือเป็นค่าที่ยอมรับได้[4] โดยปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ในผลแตงเทศนั้นยังมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับปริมาณน้ำตาลในผลแตงเทศอีกด้วย ซึ่งปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ในผลแตงเทศทุกๆ ไปจะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 8-15% [5]

จากข้อมูลดังกล่าวมาข้างต้นทำให้ทราบว่า ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ เป็นคุณลักษณะที่ถูกนำมาใช้ในการกำหนดมาตรฐานคุณภาพผลผลิตเพื่อการบริโภค ส่งผลให้หลาย ๆ หน่วยงานให้ความสนใจในการศึกษาวิธีการตรวจวัดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ในผลไม้ด้วยกันอยู่หลายวิธี เช่น 1) การตรวจสอบคุณภาพของมะม่วง โดยจะพิจารณาความหนาแน่น ความชื้น ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีเอกซ์ [6] 2) การตรวจสอบค่าของแข็งที่ละลายน้ำได้ของผลลองกองด้วยเครื่องวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านใกล้อินฟราเรด โดยเปรียบเทียบกับวิธีการใช้คลื่นแบบทะลุผ่านและแบบสะท้อนกลับ [7] 3) การศึกษาวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว สีจากภาพถ่าย เพื่อประเมิน

ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้และความสดของเมล่อน เป็นต้น

จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ในการสร้างเครื่องตรวจวัดความหวานเมล่อนด้วยเทคนิคอินฟราเรด ย่านใกล้ด้วยการรับส่งสัญญาณแบบสะท้อนกลับโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทราบความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นต่อระยะทางการติดตั้งเซ็นเซอร์รับส่งสัญญาณแบบสะท้อนกลับต่อค่าความหวานพร้อมกับหาค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของอุปกรณ์วัดความหวานที่สร้างขึ้น และหาความสัมพันธ์ของจำนวนอุปกรณ์และตำแหน่งการติดตั้งต่อค่าความหวานของผลเมล่อน เพื่อเป็นประโยชน์ในการตรวจวัดความหวานของเมล่อนในขณะเพาะปลูกซึ่งเป็นเทคนิคที่เหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องมีการเปลี่ยนจุดที่ทำการวัดอยู่ตลอดโดยมิต้องทำการปรับเทียบตำแหน่งวัดค่าก่อนการใช้งานเหมือนเทคนิคการใช้คลื่นแบบเจาะทะลุ อีกทั้งยังมีการเพิ่มความแม่นยำด้วยการเพิ่มจำนวนตำแหน่งวัดค่าที่เหมาะสม ซึ่งสามารถที่จะลดการสูญเสียของเกษตรกรในการวัดความหวานแบบไม่ทำลาย และลดความเสี่ยงที่จะเก็บเกี่ยวผลผลิตที่ยังไม่ได้คุณภาพความหวานตามมาตรฐานแทนวิธีเดิมที่ใช้การนับจำนวนวันเก็บเกี่ยว ด้วยการใช้นวัตกรรมเพื่อพัฒนากระบวนการผลิตนำไปสู่การเพิ่มขีดความสามารถในการผลิตเพื่อรองรับการเติบโตในอนาคตของตลาดต่อไป

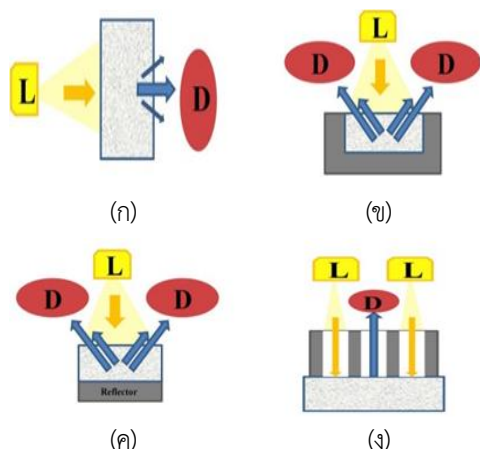
2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 หลักการที่ใช้ในการออกแบบ

2.1.1 เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (NIRs) [8]

เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (NIR) เป็นวิธีการวิเคราะห์โมเลกุลที่ไม่ทำลายตัวอย่าง โดย

อาศัยการตรวจวัดปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 400-2500 นาโนเมตร โดยรูปแบบที่วัดนี้มีปฏิกิริยาต่อแสงเนียร์อินฟราเรด (NIRS) [9] แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การวัดด้วยคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรดย่านใกล้กับวัตถุ[9]

- (ก) ระบบการวัดแบบส่องผ่าน
- (ข) ระบบการวัดการสะท้อนแบบแพร่
- (ค) ระบบการวัดการสะท้อนแบบส่องผ่าน
- (ง) ระบบการวัดการสะท้อนผ่านตัวอย่าง

1) Transmittance แสงตกกระทบบตัวอย่างด้านหนึ่งโดยที่ Detector จะวัดปริมาณแสงที่ผ่านออกมาจากตัวอย่างในด้านตรงกันข้ามดังภาพที่ 1 (ก)

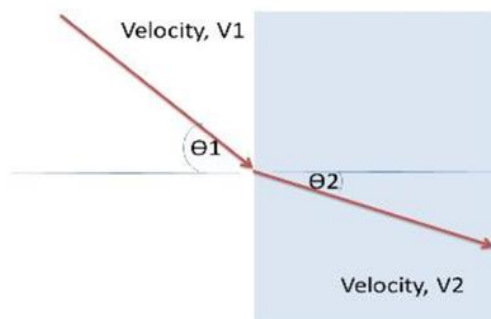
2) Reflectance แสงจะตกกระทบบที่ผิวของตัวอย่างและอาจแพร่กระจายในปริมาณหนึ่งก่อนแล้ววัดปริมาณแสงสะท้อนกลับออกมาโดย Detector ดังภาพที่ 1 (ข)

3) Transflectance แสงจากแหล่งกำเนิดแสงตกกระทบบตัวอย่างและส่องผ่านตัวอย่างลงไปตกกระทบบวัตถุที่ไม่ดูดกลืนแสง (แผ่นเซรามิกทองหรืออลูมิเนียม) ที่อยู่ด้านล่างตัวอย่าง แล้วเกิดการสะท้อนกลับมายัง Detector ดังภาพที่ 1 (ค)

4) Interactance กระบวนการนี้เกิดในกรณีที่ใช้หัววัดใยแก้วนำแสง (Fiber optics probe) แสงจะออกมาจากส่วนวงแหวนด้านนอกของหัววัดมาตกกระทบบตัวอย่าง และแสงที่สะท้อนออกมาจากเนื้อตัวอย่างจะถูกส่งไปยังที่ Detector บริเวณส่วนกลางของใยแก้วนำแสง แสดงดังภาพที่ 1 (ง)

2.1.2 Refractometer [10]

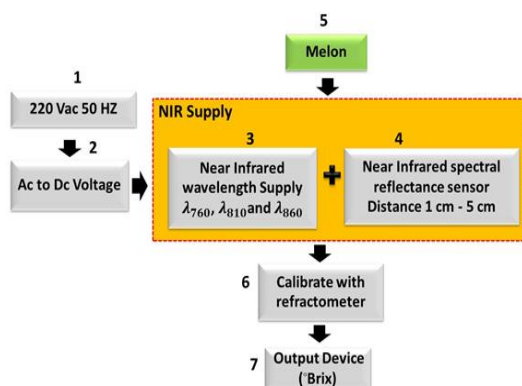
การวัดดัชนีหักเหของแสง (Refractive index) เมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางหนึ่งสู่อีกตัวกลาง ทำให้ มุม ความเร็ว (Velocity, v) ของแสงแตกต่างกันสารละลายที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันเมื่อแสงส่องผ่านจะเกิดการหักเห และให้ค่าดัชนีหักเหของแสงต่างกันซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าว จึงนำมาประยุกต์ใช้วัดค่าความเข้มข้นของสารละลายได้ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ดัชนีการหักเห[10]

2.2 การออกแบบและการทดลอง

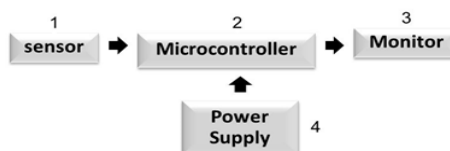
2.2.1 ไตอะแกรมการทดลอง



ภาพที่ 3 ไตอะแกรมการทดลอง

ภาพที่ 3 แสดงขั้นตอนการทำงานของชุดทดลองสำหรับวิเคราะห์ผลความยาวคลื่นต่อค่าของแข็งที่ละลายน้ำได้ด้วยเทคนิคคลื่นอินฟราเรดความถี่ช่วงสั้นในห้องปฏิบัติการ โดยเริ่มจากแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าแรงดัน 220 โวลต์, 50 เฮิร์ต ในหมายเลข 1 ไปยังอุปกรณ์แปลงไฟในหมายเลข 2 เพื่อทำการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ให้กับแหล่งกำเนิดคลื่นอินฟราเรดความถี่ช่วงสั้นที่มีความยาวคลื่น 760, 810 และ 860 nm ในหมายเลข 3 จากนั้นทำการปรับระยะเซ็นเซอร์รับแอมพลิจูดสะท้อนกลับของคลื่นที่ระยะห่าง 0.1 - 1 cm ในหมายเลข 4 ทำการทดสอบกับผลเมลอน ในหมายเลข 5 และเปรียบเทียบความหวานของผลเมลอนด้วยเครื่องมือรีเฟร็กโตมิเตอร์ ในหมายเลข 6 วัดและวิเคราะห์ผลค่าความหวานของผลเมลอนที่เกิดขึ้นของชุดทดลอง ในหมายเลข 7

2.2.2 ไตอะแกรมวงจรของชุดทดลอง
เครื่องตรวจวัดความหวานเมลอนด้วยเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้



ภาพที่ 4 ไตอะแกรมการทดลองวัดค่าความหวานด้วยเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้

จากภาพที่ 4 หมายเลข 1 เซ็นเซอร์ NIR วัดค่าความเข้มแสงและทำการส่งค่าไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ใน หมายเลข 2 ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการประมวลผลค่าที่ได้จากการวัดเพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลความหวานของผลเมลอนที่ได้บันทึกค่า และส่งค่าไปแสดงผลที่จอมอนิเตอร์ในหมายเลข 3 เพื่อบอกระดับความหวานของผลเมลอนเป็นตัวเลข ในส่วนของหมายเลข 4 เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับตัวอุปกรณ์การวัด โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่

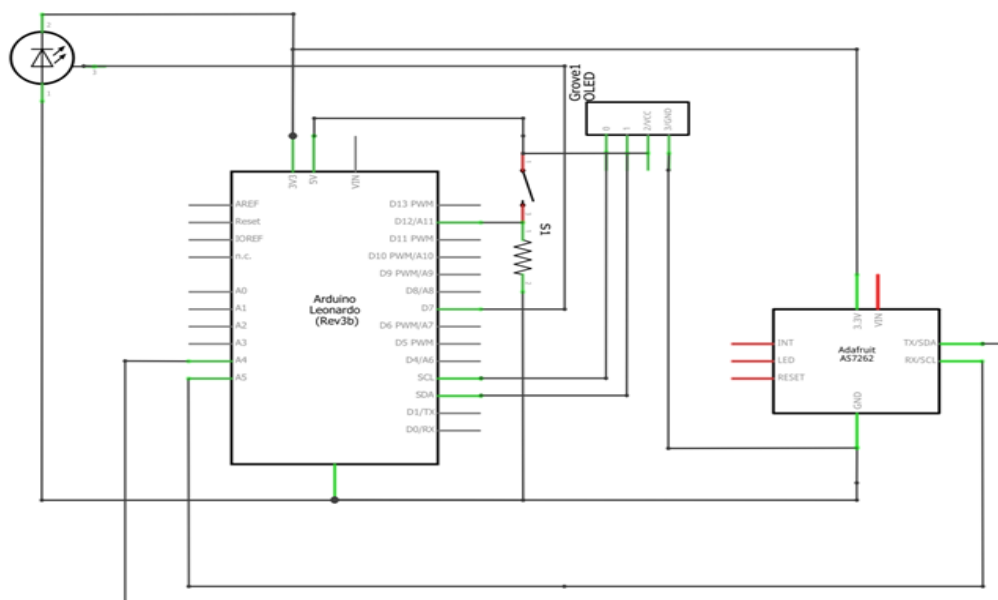


ภาพที่ 5 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

จากภาพที่ 5 แสดงชุดทดลองสำหรับวิเคราะห์ผลความยาวคลื่นต่อค่าของแข็งที่ละลายน้ำได้ด้วยเทคนิคคลื่นอินฟราเรดความถี่ช่วงสั้นในห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วยหมายเลข 1 อุปกรณ์รับและส่งสัญญาณ หมายเลข 2 ชุดปรับระยะห่าง

อุปกรณ์รับส่งสัญญาณ ที่ระยะ 0.1-1 cm โดยทำการ
ปรับระยะห่างเทียบกับเครื่องมือไมโครมิเตอร์

หมายเลข 3 อุปกรณ์อ่านค่าสัญญาณ หมายเลข 4
รีเฟล็กโตมิเตอร์



ภาพที่ 6 วงจรเครื่องตรวจวัดความหวานเมล็ดองุ่นด้วยเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้ด้วยการรับส่งสัญญาณแบบสะท้อนกลับ

จากภาพที่ 6 หลักการทำงานของ
วงจรโดยเมื่อกดสวิตช์สัญญาณจะถูกส่งเข้าไปที่
ไมโครคอนโทรลเลอร์ จากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์
จะเปิดการทำงานของระบบการวัดค่าโดย
แหล่งกำเนิดคลื่น จะยังคลื่นผ่านเมล็ดองุ่นเข้าสู่เซ็นเซอร์
รับค่าที่อยู่ฝั่งตรงข้ามจากนั้นเซ็นเซอร์จะส่งค่า
สัญญาณให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลและ
แสดงค่าความหวาน($^{\circ}$ Brix) ออกมาที่หน้าจอ
แสดงผล

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 การทดลองเพื่อทราบความสัมพันธ์ของ ความยาวคลื่นต่อระยะห่างอุปกรณ์ตรวจจับต่อค่า ความหวาน

การทดลองนี้เพื่อทราบความสัมพันธ์ค่า
พลังงานของความยาวคลื่นต่อระยะห่างอุปกรณ์รับส่ง
สัญญาณแบบสะท้อนกลับ ที่ระยะห่างการติดตั้ง
เซ็นเซอร์รับส่งสัญญาณแบบสะท้อนกลับ 0.1 -1 cm
แหล่งกำเนิดคลื่นอินฟราเรดความถี่ช่วงสั้นที่ความยาว
คลื่น 760, 810 และ 860 nm ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพลังงานการสะท้อนกลับอินฟราเรดย่านใกล้ที่ความยาวคลื่น 760, 810 และ 860 nm ที่ระยะห่างการติดตั้งอุปกรณ์ตั้งแต่ 0.1-1 cm

distance (cm)	NIRs reflection (mw/cm ²)		
	λ_{760}	λ_{810}	λ_{860}
0.1	13.91	3.63	7.20
0.2	81.97	16.31	13.60
0.3	259.31	53.29	29.19
0.4	320.41	71.42	34.79
0.5	281.17	59.09	28.79
0.6	236.46	48.22	24.39
0.7	207.65	41.69	21.19
0.8	170.89	34.08	17.60
0.9	137.58	27.55	14.40
1	121.38	23.93	12.40

จากตารางที่ 1 พบว่าในช่วงแรกทีระยะห่าง 0.1 cm มีพลังงานสะท้อนกลับน้อยที่สุดเนื่องจากระยะของอุปกรณ์ปล่อยสัญญาณใกล้วัตถุทดลองมากเกินไปทำให้แสงที่สะท้อนกลับส่วนใหญ่ไม่สามารถเข้าสู่อุปกรณ์รับสัญญาณได้ และค่าการสะท้อนกลับจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น โดยค่าการสะท้อนกลับที่มากที่สุดคือที่ระยะห่าง 0.4 cm เนื่องจากระยะดังกล่าวเป็นระยะที่อ่านค่าได้ดีที่สุดซึ่งมีความสัมพันธ์กับการสั้นของโมเลกุลของน้ำและน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบหลักในเมล็ดอ่อน ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อการดูดกลืนคลื่น [6] จากนั้นค่าการสะท้อนกลับจะเริ่มลดลง ตามระยะห่างที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากในอากาศโดยทั่วไปจะมี แก๊สต่าง ๆ ความชื้น ฝุ่นละอองปะปนอยู่ ซึ่งปัจจัยต่างๆเหล่านี้มีผลโดยตรงในการดูดซับและ การกระเจิงของคลื่นอินฟราเรดย่านใกล้ [11] โดยจากผลการทดลองมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันทุกช่วงความยาวคลื่น

ผลจากการทดลองนี้จึงนำไปสู่การทดลองต่อไป โดยจะทำการหาความสัมพันธ์ของค่าพลังงานสะท้อนกลับ ที่ความยาวคลื่น 760, 810 และ 860 nm ต่อค่าความหวานโดยเปรียบเทียบกับอุปกรณ์รีแฟล็กโตมิเตอร์ ที่ระยะห่างอุปกรณ์ 0.1 cm และ 0.4 cm เนื่องจากระยะ 0.1 cm เป็นระยะที่อุปกรณ์ส่งสัญญาณใกล้กับวัตถุทดลองมากที่สุด และ ระยะ 0.4 cm เป็นระยะอุปกรณ์รับสัญญาณสะท้อนกลับได้ดีที่สุด เพื่อนำมาวิเคราะห์ความแม่นยำในการวัดความหวานต่อไป

3.2 ความสัมพันธ์ของค่าพลังงานสะท้อนกลับ ต่อความยาวคลื่น 760, 810 และ 860 nm ต่อค่าความหวาน

เป็นการทดลองหาความสัมพันธ์ของค่าพลังงานสะท้อนกลับ ที่ความยาวคลื่น ต่อความแม่นยำในการวัดความหวานที่ระยะห่างอุปกรณ์รับส่งสัญญาณ 1 ตัว 0.1 และ 0.4 cm แสดงดังตารางที่ 2 และ 3

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ของค่าพลังงานสะท้อนกลับและค่าความผิดพลาดของเซ็นเซอร์ที่ความยาวคลื่น 760, 810 และ 860 nm ต่อค่าความหวานที่ระยะห่างเซ็นเซอร์ 0.1 cm

NIRs reflection (mw/cm ²)			TSS (Brix)	% Error		
λ_{760}	λ_{810}	λ_{860}		λ_{760}	λ_{810}	λ_{860}
30.2 - 34.28	7.76 - 8.76	9.6 - 12	12	90	60	60
34.28 - 46.1	8.77 - 9.79	12.1 - 15.6	13	90	80	50
46.2 - 47.6	9.8 - 13.05	15.6 - 16.8	14	80	80	60
Over 47.7	Over 13.06	Over 16.8	15	90	70	60

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ของค่าพลังงานสะท้อนกลับและค่าความผิดพลาดของเซ็นเซอร์ที่ความยาวคลื่น 760, 810 และ 860 nm ต่อค่าความหวานที่ระยะห่างเซ็นเซอร์ 0.4 cm

NIRs reflection (mw/cm ²)			TSS (Brix)	% Error		
λ_{760}	λ_{810}	λ_{860}		λ_{760}	λ_{810}	λ_{860}
200 - 225.4	32.4 - 41.1	24.3 - 27.84	12	70	60	60
225.4 - 279.42	41.1 - 52.1	27.84 - 30.58	13	80	70	70
279.43 - 333.07	52.2 - 67.95	30.59 - 34.1	14	80	70	70
Over 333.08	Over 67.96	Over 34.2	15	90	80	70

จากผลการทดลองในตารางที่ 2 และ 3 พบว่าพลังงานที่สะท้อนกลับมีค่าแปรตามความหวานที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือ เมื่อพลังงานสะท้อนกลับมีค่าเพิ่มขึ้นค่าความหวานที่อ่านได้จากรีเฟล็กโตมิเตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากช่วงความยาวคลื่นที่เลือกใช้โดนสะท้อนกลับจากค่า TSS ที่เพิ่มขึ้นหรือก็คือช่วงดังกล่าวไม่ใช่ช่วงที่ถูกดูดซับ และในการนำช่วงการวัดที่เก็บผลจากค่าเฉลี่ยในการทดลองพบว่าที่ค่าความยาวคลื่น 760 nm มีร้อยละความผิดพลาดในการวัดมากที่สุด ส่วนช่วงการวัดความยาวคลื่นที่ 860 nm มีความผิดพลาดในการวัดน้อยที่สุด อีกทั้งผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าที่ระยะติดตั้ง 0.1 cm ให้ความแม่นยำในการวัดความหวานที่ดีกว่าระยะ 0.4 cm ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากพื้นผิวของเมล็ดที่

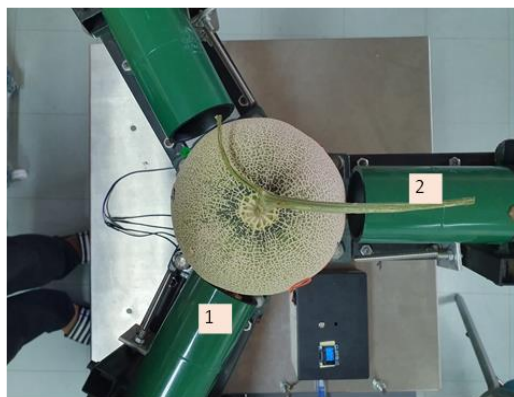
ไม่สม่ำเสมอส่งผลต่อการสะท้อนกลับของแสงและทิศทางทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดค่ามากกว่า โดยผลเมล็ดที่มีค่าความหวานน้อยส่วนใหญ่จะมีพื้นผิวแข็งและเรียบมีรอยเส้นโดยรอบน้อยทำให้เกิดการกระเจิงที่พื้นผิว (Surface scattering) [12] โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดคำนวณได้จากค่าที่วัดได้จากเครื่องมือรีเฟล็กโตมิเตอร์เปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยที่ได้จากช่วงคลื่นในการทำนายจากเครื่องต้นแบบในการทดลอง

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ช่วงความยาวคลื่นที่ควรเลือกใช้ในการวัดค่าคือ 860 nm และระยะที่ควรติดตั้งอุปกรณ์รับส่งสัญญาณคือ 0.1 cm เพื่อนำมาวิเคราะห์ในการทดลองส่วนต่อไปคือในส่วนของการคำนวณอุปกรณ์รับส่ง

สัญญาณที่เพิ่มขึ้นต่อความแม่นยำในการวัดค่าความหวาน

3.3 ความสัมพันธ์ของความแม่นยำในการวัดความหวานต่อจำนวนอุปกรณ์ส่งและรับสัญญาณ

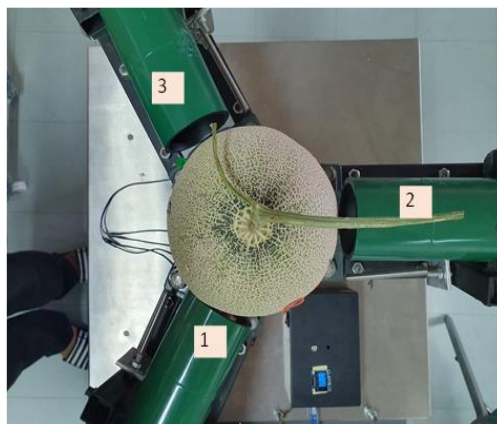
ในการทดลองนี้เป็นการวิเคราะห์ความแม่นยำในการวัดค่าต่อจำนวนอุปกรณ์ส่งและรับสัญญาณ 1 – 3 ตำแหน่ง ที่ระยะห่าง 0.1 cm ต่อค่าความหวานของผลเมล่อน โดยตำแหน่งการติดตั้งเซ็นเซอร์จำนวน 2 ตำแหน่งและ จำนวน 3 ตำแหน่ง แสดงดังภาพที่ 7-8



ภาพที่ 7 ตำแหน่งการติดตั้งเซ็นเซอร์ 2 ตำแหน่ง

ตารางที่ 4 ความสัมพันธ์ของค่าพลังงานสะท้อนกลับที่ความยาวคลื่น 860 nm ต่อค่าความหวานที่ระยะห่างเซ็นเซอร์ 0.1 cm และติดตั้งเซ็นเซอร์จำนวน 2 ตำแหน่ง

Energy range at λ_{860}	TSS (°Brix)
9.5 - 11.4	12
11.5 - 13.8	13
13.8 - 15.6	14
Over 15.6	15



ภาพที่ 8 ตำแหน่งการติดตั้งเซ็นเซอร์ 3 ตำแหน่ง
จากภาพที่ 8 แสดงการติดตั้งเซ็นเซอร์ในชุดทดสอบทั้งหมด 3 ตำแหน่ง

ตารางที่ 5 ความสัมพันธ์ของค่าพลังงานสะท้อนกลับที่ความยาวคลื่น 860 nm ต่อค่าความหวานที่ระยะห่างเซ็นเซอร์ 0.1 cm และติดตั้งเซ็นเซอร์จำนวน 3 ตำแหน่ง

Energy range at λ_{860}	TSS (°Brix)
7.4 - 9.6	12
9.6 - 11.5	13
11.6 - 13.5	14
Over 13.5	15

ตารางที่ 6 ค่าความผิดพลาดของเซ็นเซอร์วัดค่าความหวานตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3

TSS (°Brix)	Number of sensor position (% Error)		
	1	2	3
12	60	60	30
13	50	50	40
14	60	50	40
15	60	50	40

จากตารางที่ 4-6 วิเคราะห์ความแม่นยำในการวัดค่าต่อจำนวนอุปกรณ์ส่งและรับสัญญาณ 1 – 3 ตำแหน่ง ที่ระยะห่าง 0.1 cm ต่อค่าความหวานที่ได้ โดยผลที่ได้จากตำแหน่งการวัดแต่ละจุดทำการหาค่าเฉลี่ยจากทั้งสามความยาวคลื่นเพื่อทราบค่าความหวานจากนั้นในกรณีที่มีตำแหน่งการวัดเกินหนึ่งจุดให้นำค่าเฉลี่ยที่ได้แต่ละจุดมาหาค่าเฉลี่ยตามจำนวนตำแหน่งอีกครั้งเพื่อทราบค่าความหวานที่ได้จากการใช้งานเครื่อง ผลการทดลองพบว่าการติดตั้งอุปกรณ์ส่งและรับสัญญาณจำนวน 1 และ 2 ตำแหน่ง มีความผิดพลาดในการวัดใกล้เคียงกัน ส่วนการติดตั้งอุปกรณ์จำนวน 3 ตำแหน่ง มีความผิดพลาดลดลง อีกทั้งจากผลการทดลองยังทำให้ทราบว่าความผิดพลาดที่ค่าความหวานเพิ่มขึ้นจะมีโอกาสเกิดความผิดพลาดในการวัดมากขึ้นเนื่องจากลักษณะของความหนาเปลือกในแต่ละด้านของเมล็ดก่อนถึงเนื้อที่มีความหวานไม่สมมาตรซึ่งสอดคล้องกับการติดตั้งอุปกรณ์หนึ่งจุด และสองจุดที่มีความผิดพลาดสูงกว่าจากการที่วัดในตำแหน่งเปลือกหนา และการติดตั้งตำแหน่งการวัดสามจุดสามารถลดร้อยละความผิดพลาดในการวัดได้

จากผลการทดลองในส่วนการวัดความหวานในผลเมล็ดที่มีค่าความหวานน้อยจะมีความแม่นยำมากกว่าเนื่องจากตามลักษณะโครงสร้างของผลเมล็ดที่มีความหวานน้อยเปลือกและเนื้อค่อนข้างจะแข็งทำให้ค่าความยาวคลื่นสะท้อนกลับที่ได้มีความแม่นยำมากกว่าในผลเมล็ดที่มีความหวานมาก และในการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดในตำแหน่งที่ไม่สมมาตรของเนื้อเมล็ดกับเปลือกดังที่กล่าวไปทำให้คลื่นที่สะท้อนออกมามีโอกาสอ่านค่าความหวานได้ลดลง เพราะฉะนั้นจึงสรุปได้ว่าในการ

ใช้งานควรติดตั้งอุปกรณ์ที่ตำแหน่ง 0.1 cm พร้อมทั้งติดตั้งตำแหน่งตรวจวัด 3 จุด และทำการหาค่าเฉลี่ยจะสามารถให้ความแม่นยำในการวัดความหวานในห้องปฏิบัติการได้ประมาณ 60% โดยความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าแสดงผลการทดลองดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การทำนายค่าความหวานของเซ็นเซอร์ 3 ตำแหน่งเปรียบเทียบกับค่าความหวานของเครื่อง Refractometer

Numb er of trials	TSS (°Brix) Prototype machine	TSS (° Brix) Refractom eter	Differen ce of TSS (°Brix)
1	12	12	0
2	12	13	1
3	13	12	-1
4	13	13	0
5	13	13	0
6	14	14	0
7	14	13	-1
8	14	14	0
9	15	15	0
10	15	14	1

จากตารางที่ 7 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องพบว่ามีความแม่นยำในการวัดที่ 60 % และมีค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดความหวานที่ ± 1 °Brix ตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐานการคัดเกรดผลเมล็ดของสหรัฐอเมริกา เมล็ดจะมีค่าน้ำตาลอยู่ระหว่าง 12-15 °Brix [5]

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาออกแบบและจัดสร้างเครื่องตรวจวัดความหวานเมล็ดด้วยเทคนิค

อินฟราเรดย่านใกล้ด้วยการรับส่งสัญญาณแบบสะท้อนกลับซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

ความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นต่อระยะห่างอุปกรณ์รับส่งสัญญาณแบบสะท้อนกลับ ที่ระยะห่างอุปกรณ์รับส่งสัญญาณแบบสะท้อนกลับตั้งแต่ 0.1 – 1 cm สามารถสรุปได้ว่าระยะห่าง 0.4 cm เป็นระยะห่างที่อุปกรณ์รับส่งสัญญาณสะท้อนกลับได้ดีที่สุด เนื่องจากระยะห่างที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดช่องอากาศระหว่างอุปกรณ์กับผลเมล่อน ซึ่งภายในช่องอากาศจะประกอบด้วย โมเลกุลต่าง ๆ ความชื้น ฝุ่นละอองปะปนอยู่ ซึ่งปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้มีผลโดยตรงในการดูดซับและ การกระเจิงของคลื่นอินฟราเรดย่านใกล้ [11]

ผลของความสัมพันธ์ของค่าพลังงานสะท้อนกลับ ต่อความยาวคลื่น 760, 810 และ 860 nm และต่อความหวาน พบว่าที่ค่าความยาวคลื่น 810 nm ระยะห่างอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ 0.1 cm มีความผิดพลาดในการวัดความหวานน้อยที่สุด

ความสัมพันธ์ของความแม่นยำในการวัดความหวานต่อจำนวนอุปกรณ์ส่งและรับสัญญาณ ในการใช้งานควรติดตั้งอุปกรณ์ที่ระยะ 0.1 cm พร้อมทั้งติดตั้งตำแหน่งตรวจวัด 3 จุด หาค่าเฉลี่ย สามารถให้ความแม่นยำในการวัดความหวานในห้องปฏิบัติการประมาณ 60% ค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 1 \text{ }^{\circ}\text{Brix}$

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม ศูนย์พัฒนาวิชาชีพ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรีที่อำนวยความสะดวก

ในการใช้อุปกรณ์ในการทำวิจัย และขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ในการให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

6. อ้างอิง

- [1] สำนักกำหนดมาตรฐาน และ สำนักงานมาตรฐานเกษตรและอาหารแห่งชาติ. โครงการสัมมนาเชิงปฏิบัติการวางมาตรฐานสินค้าเกษตรเรื่อง ถั่วฝักยาว แตงเทศ และ แก้วมังกร [อินเทอร์เน็ต]. 2557 [เข้าถึงเมื่อ 20 มิถุนายน 2561]. จาก: www.acfs.go.th/news/docs/acfs_09-07-57-03..html
- [2] พงทิพย์ บุญช่วย. ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร กรมส่งเสริมการเกษตร. เมล่อนญี่ปุ่น [อินเทอร์เน็ต]. 2559 [เข้าถึงเมื่อ 10 กุมภาพันธ์ 2562]. จาก: <http://production.doae.go.th>
- [3] พงทิพย์ บุญช่วย. ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร กรมส่งเสริมการเกษตร. เมล่อนญี่ปุ่น [อินเทอร์เน็ต]. 2560. [เข้าถึงเมื่อ 10 กุมภาพันธ์ 2562]. จาก:<http://production.doae.go.th>
- [4] สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. มาตรฐานสินค้าเกษตรเรื่องแตงเทศ (Melon). มาตรฐานสินค้าเกษตร มกษ. 2559;26:1-13.
- [5] Paulo SL, Antonio R, Dantas D, et al; Juice Extraction for Total Soluble Solids Content Determination in Melon. Journal of Revista Caatinga. 2006;19(3):268-71.

- [6] Barcelon E, Tojo S, Watanabe K. Relating X-ray Absorption and Some Quality Characteristics of Mango Fruit (*Mangifera indica* L.). *J Agr Food Chem.* 1999;47(9):3822-3825.
- [7] อาทิตย์ จันทร์หิรัญ, วารุณี ณะแพสย์, ศุมาพร เกษมสำราญ และคณะ. การตรวจสอบค่าความหวานผลลองกองด้วยเครื่องวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านใกล้อินฟราเรด. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร.* 2553;41(3/1):29-32.
- [8] Rawankar A, Nanda M, Jadhav H, et al; Detection of N, P, K Fertilizers in Agricultural Soil with NIR Laser Absorption Technique. [Internet]. *IEEE India;* 2018 [cited 2019 Feb 12]. DOI: 10.1109/ICMAP.2018.8354625
- [9] กนกพร ชัยวุฒิกุล. NIR Spectrometer เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์สารอินทรีย์. [อินเทอร์เน็ต]. 2551 [เข้าถึงเมื่อ 20 กุมภาพันธ์ 2562]. จาก :<http://nirapplication.blogspot.com/2008/03/nirspectrometer.html>
- [10] นิธิยา รัตนานนท์. Refractometer. [อินเทอร์เน็ต]. 2558 [เข้าถึงเมื่อ 13 กุมภาพันธ์ 2562]. จาก :<http://www.foodnetworksolution.com>
- [11] Ijaz M, Ghassemlooy Z, Pesek J, et al; Modeling of Fog and Smoke Attenuation in Free Space Optical Communications Link under Controlled Laboratory Conditions. *J Lightwave Tech.* 2013;31(11):1720-1726.
- [12] Kittler J, Windridge D, Goswami D, Subsurface scattering deconvolution for improved NIR-visible facial image correlation. [Internet]. *IEEE United Kingdom;* 2009 [cited 2019 Feb 13]. DOI: 10.1109/AFGR.2008.4813473

การจำลองระบบแก้ว Gd_2O_3 - TeO_2 - B_2O_3 เพื่อศึกษาสมบัติการกำบังรังสีก่อไอออน

Simulation of Gd_2O_3 - TeO_2 - B_2O_3 Glass System to investigate the Ionizing Radiation Shielding Properties

กิตติศักดิ์ ศรีวงศ์ษา^{1*}, พันธศักดิ์ กล้ากล่อมจิตร², รัฐนันท์ ลิ้มเกียรติเชิดชู³, อภิษฎา คิณชกวัฒน์⁴,

อัยริน ดันติวัชรกุลธร⁵, สุนันทศักดิ์ ระว่างวงศ์⁶, จุมพล ขอบข้า⁷

Kittisak Sriwongsa^{1,2*}, Punsak Glumglomchit³, Ratthanant Limkiatcherdchoo³, Apichaya Kinchokawat³, Iyarin Tantiwatcharakultorn³, Sunantasak Ravangvong⁴, Chumphon Khobkham⁵

¹หลักสูตรฟิสิกส์ศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม

¹โรงเรียนสาธิต มหาวิทยาลัยศิลปากร (มัธยมศึกษา) นครปฐม

^{2,3,4,5}โรงเรียนหัวหินวิทยาลัย ประจวบคีรีขันธ์

⁶สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

⁷คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี

¹Lecturers responsible for Bachelor of Education Program in Physics, Faculty of Education, Silpakorn University, Nakhon Pathom, Thailand

¹The demonstration school of Silpakorn University (secondary), Nakhon Pathom, Thailand

^{2,3,4,5} Huahin Vitthayalai School, Prachuapkhirikhan, Thailand

⁶Division of Science and Technology, Faculty of Science and Technology, Phetchaburi Rajabhat University, Thailand

⁷Faculty of Engineering, Thonburi University, Thailand

Corresponding Author. Tel: 08 5215 8754, E-mail: Sriwongsa_k@silpakorn.edu

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อจำลองระบบแก้ว xGd_2O_3 -(80-x) TeO_2 -20 B_2O_3 สำหรับศึกษาสมบัติการกำบังรังสีก่อไอออน (มีประจุและไม่มีประจุ) ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าของแกดโดลิเนียมออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0, 5, 10, 15, และ 20 เปอร์เซ็นต์โมล ตามลำดับ โดยรังสีชนิดที่มีประจุที่ดำเนินการพิจารณาได้แก่ ไฮโดรเจน ไอออนและคาร์บอนไอออน ในขณะที่รังสีประเภทที่ไม่มีประจุที่พิจารณาได้แก่ รังสีเอกซ์และรังสีแกมมา ซึ่งรังสีชนิดที่มีประจุได้ดำเนินการศึกษาค่าการหยุดอิเล็กตรอนิกส์ (Electronic stopping) การหยุดนิวเคลียร์ (Nuclear stopping) และช่วงคาดการณ์เฉลี่ย (Projected range, PR) ที่ช่วงพลังงาน 70 ถึง 250 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ด้วยโปรแกรม SRIM ขณะที่รังสีชนิดที่ไม่มีประจุได้ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล

Received 14-10-2021

Revised 29-11-2021

Accepted 11-12-2021

(Mass attenuation coefficient, μ_m) และเลขอะตอมยังผล (Effective atomic number: Z_{eff}) ที่ช่วงพลังงาน 10^{-5} ถึง 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ โดยใช้โปรแกรม Phy-X/PSD ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและมีความน่าเชื่อถืออยู่ในปัจจุบัน จากผลการวิจัยทำให้ทราบว่า การเพิ่มปริมาณของแกโดลิเนียมออกไซด์ในแก้วตัวอย่างจะทำให้สมบัติในการกำบังรังสีทั้งประเภทที่มีประจุและไม่มีประจุดีขึ้น ซึ่งตัวอย่างที่ดีที่สุดในการวิจัยก็คือ $20\text{Gd}_2\text{O}_3-60\text{TeO}_2-20\text{B}_2\text{O}_3$ (Gd5) ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของแกโดลิเนียมทำให้เกิดโอกาสของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีกับตัวกลางเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

คำสำคัญ : รังสีแกมมา ไอออน ช่วงคาดการณ์เฉลี่ย สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล แก้ว

Abstract

The objectives of this research is to simulate $x\text{Gd}_2\text{O}_3-(80-x)\text{TeO}_2-20\text{B}_2\text{O}_3$ glass system for investigation of the ionizing radiation (charged and uncharged radiation) shielding properties which varies the concentration of Gadolinium (III) oxide (Gd_2O_3) at 0, 5, 10, 15 and 20 mol% respectively. The charged particles such as hydrogen ions and carbon ions while uncharged particles such as X-ray and gamma ray were used to investigate the properties. The theoretical parameters of charged particles such as electronic stopping, nuclear stopping and projected range (PR) were estimated by using the SRIM program in the energy range of 70–250 MeV. The values of uncharged particles such as mass attenuation coefficient (μ_m) and effective atomic number (Z_{eff}) were also determined at energy ranging $10^{-3}-10^5$ MeV by using the Phy-X/PSD program. This program is widely used and reliable at present. The results indicated that the increasing concentration of Gadolinium (III) oxide in glass samples provided excellent charged particles and uncharged particles radiation shielding which resulted in this $20\text{Gd}_2\text{O}_3-60\text{TeO}_2-20\text{B}_2\text{O}_3$ (Gd5) glass sample. This was due to the increasing Gadolinium (III) oxide content in glass which increased the probability of interaction between ionizing radiation with matter.

Keywords: Ionizing radiation, Projected range, Mass attenuation coefficient, Glass

1. บทนำ

แม้ว่าการนำรังสีแกมมาไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ จะทำให้เกิดการพัฒนาอย่างมากในเทคโนโลยีสมัยใหม่ เช่นด้านโทรคมนาคม

อุตสาหกรรมเคมี และอวกาศ แต่ก็เป็นอันตรายต่อมนุษย์ อุปกรณ์ และพืช ดังนั้นการสร้างวัสดุป้องกันรังสีที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อลดการสัมผัสกับรังสีสำหรับสิ่งที่อยู่ใกล้กับบริเวณที่เกี่ยวข้องกับรังสีทั้งหมด จากสมบัติของวัสดุ เช่น ความโปร่งใส

ความแข็งแรง ความคงตัวทางความร้อนสูง ทนต่อการกัดกร่อน การประดิษฐ์ง่าย เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และปลอดภัย แก้วจึงถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในวัสดุกำบังรังสีเมื่อเทียบกับวัสดุอื่น ๆ เช่น ตะกั่ว โพลีเมอร์ คอนกรีต และดินเหนียว [1-4] แก้วเทลลูไรต์มีข้อได้เปรียบที่เหนือกว่าแก้วประเภทอื่น ๆ เนื่องจากแก้วเทลลูไรต์มีพลังงานโฟนอนสัมพัทธ์ (Relatively phonon energy) ต่ำ ($\sim 700 \text{ cm}^{-1}$) ดัชนีการหักเหของแสงสูง (~ 2.0) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง ความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี สามารถให้แสงผ่านได้ทั้งช่วงที่ตามองเห็นและใกล้อินฟราเรด ($\sim 360\text{--}6500 \text{ nm}$) มีความสามารถในการละลายธาตุหายาก (RE) ดี มีความเสถียรทางความร้อนและสารเคมีสูง [5] ดัชนีการหักเหของแสงแบบไม่เป็นเชิงเส้นสูงและพลังงานโฟนอนต่ำ (Low phonon energy) ทำให้แก้วเทลลูไรต์เป็นตัวเลือกที่เหมาะสมสำหรับงานด้านเลเซอร์ [6] ความเสถียรสูงต่อการคายน้ำ ปลอดภัย และทนต่อความชื้นเป็นเวลานานเป็นสมบัติที่โดดเด่นเพิ่มเติม นอกจากนี้ อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างต่ำและสมบัติความหนาแน่นสูงยังเอื้อต่อการใช้งานที่หลากหลาย เมื่อเปรียบเทียบกับแก้วแบบเดิมอื่น ๆ แก้วเทลลูไรต์ใช้งานได้ดีกว่าแก้วฟอสเฟตและบอเรต เนื่องจากไม่มีสมบัติดูดความชื้น [7] ดังนั้นในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย ความต้านทานการกัดกร่อนจึงมีความสำคัญทางเทคโนโลยีอย่างมาก การพัฒนาวัสดุที่สามารถกำบังรังสีสำหรับห้องรังสีวินิจฉัยมีความสำคัญอย่างมากต่ออนาคตของสาขารังสีวิทยา สมบัติที่สำคัญที่สุดของวัสดุที่จะใช้เป็นวัสดุกำบังรังสี

คือ การลดทอนโฟตอนของรังสีแกมมา และสามารถทำได้โดยการใช้วัสดุที่มีองค์ประกอบเลขอะตอมสูงซึ่งมีความหนาแน่นสูง สมบัติที่สำคัญอื่น ๆ ของวัสดุกำบังรังสีแบบใหม่คือง่ายในการขึ้นรูปและการผลิตตัวอย่างตามที่ต้องการของแต่ละสถานที่ที่จะนำไปใช้งาน สมบัติเหล่านี้สามารถพบได้ในระบบแก้วหลายระบบที่มีความสามารถดังกล่าว [10,11,13–15] แก้วที่มีองค์ประกอบของเลขอะตอมที่สูง ได้แก่ เทลลูไรต์ ($Z = 52$) นิยมนำมาเป็นโครงสร้างหลักของแก้วเพื่อประยุกต์ใช้งานด้านแก้วกำบังรังสี เนื่องจากสามารถช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีเอกซ์ รังสีแกมมา และนิวตรอนพลังงานสูง [8,9,12,16–19] การจำลองสมบัติการกำบังรังสีของแก้วเทลลูไรต์บอเรต โดยใช้ Geant4, โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Phy-X, XCOM, การจำลอง FLUKA, โปรแกรม Phy-X/PSD และ Phy-X/ZEXTRAa ที่พัฒนาขึ้นใหม่ แสดงให้เห็นว่าแก้วเทลลูไรต์บอเรตเหล่านี้มีประโยชน์สำหรับการประยุกต์ใช้ในการกำบังรังสีแกมมา อิเล็กตรอน และนิวตรอน [20–24] แกโดลิเนียมออกไซด์ (Gd_2O_3) มีผลอย่างมากต่อสมบัติทางแสงของแก้วเทลลูไรต์ เนื่องจากมีเส้นสเปกตรัมที่คมชัด ดัชนีการหักเหของแสงสูง และมีศักยภาพสูงในการผลิตการปล่อยเลเซอร์ [25] จากการศึกษาค่าความหนาครึ่งค่า (Half value layer) และเลขอะตอมยังผลของระบบแก้วเมื่อเพิ่มปริมาณของ Gd_2O_3 ในแก้ว ค่าความหนาครึ่งค่าจะลดลงและค่าเลขอะตอมยังผลจะเพิ่มขึ้น ยิ่งไปกว่านั้น Gd_2O_3 ช่วยทำให้แก้วมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลที่สูงขึ้น ส่งผลทำให้แก้วมีสมบัติต่อการกำบังรังสีที่ดีขึ้น [26–28] ในปัจจุบันประเทศไทยได้นำรังสี

ก่อก่อไอออนมาใช้ในการรักษาและบำบัดโรค โดยเฉพาะโรคมะเร็ง เช่น การนำรังสีก่อก่อไอออนประเภทที่มีประจุไฟฟ้ามาใช้ คือ การใช้อนุภาคบำบัด แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่ การรักษาด้วยอนุภาคโปรตอน (Proton beam therapy) ได้มาจากการแยกไฮโดรเจนไอออน และ การรักษาด้วยอนุภาคไอออนหนัก (Heavy-ion beam therapy) ซึ่งจะใช้อัตราคาร์บอนในการรักษา และการนำรังสีก่อก่อไอออนประเภทที่ไม่มีประจุไฟฟ้ามาใช้ ได้แก่ รังสีแกมมา ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของธาตุบางชนิด ได้แก่ ธาตุเรเดียม ธาตุซีเซียม และธาตุโคบอลต์ เป็นต้น และรังสีเอกซ์ที่เกิดจากเครื่องผลิตรังสี ซึ่งรังสีก่อก่อไอออนทั้งสองประเภทต่างก็มีอันตรายต่อผู้ที่ใช้งานและผู้ป่วย ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องสร้างวัสดุกำบังรังสีเพื่อนำมาใช้งานร่วมกับเครื่องมือและใช้ป้องกันผู้ที่มีส่วนร่วมในการใช้งาน

ระบบแก้ว $x\text{Gd}_2\text{O}_3-(80-x)\text{TeO}_2-20\text{B}_2\text{O}_3$ โดย $x = 0, 5, 10, 15$, และ 20 เปอร์เซ็นต์โมล จะนำมาวิเคราะห์สมบัติต่อการกำบังรังสีก่อก่อไอออนประเภทที่มีประจุ (ไฮโดรเจนไอออนและคาร์บอนไอออน) และประเภทที่ไม่มีประจุ (รังสีแกมมาและรังสีเอกซ์) เพื่อให้ครอบคลุมด้านการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง กรณีสมบัติด้านการกำบังรังสีก่อก่อไอออนประเภทที่มีประจุจะศึกษาในช่วงพลังงาน 70 ถึง 250 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเป็นช่วงพลังงานที่ใช้ในการบำบัดรักษาโรคมะเร็งโดยการรักษาด้วยอนุภาคโปรตอน [29] โดยใช้โปรแกรม SRIM [30] ขณะที่รังสีก่อก่อไอออนประเภทที่ไม่มีประจุจะศึกษาในช่วงพลังงาน 10^{-5} ถึง 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเป็นช่วงพลังงานที่มากพอสำหรับนำมาประยุกต์ใช้

งานกับรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาโดยใช้โปรแกรม Phy-X/PSD [31] พารามิเตอร์ที่นำมาวิเคราะห์ ได้แก่ การหยุดอิเล็กตรอนิกส์ (Electronic stopping) การหยุดนิวเคลียร์ (Nuclear stopping) ช่วงคาดการณ์เฉลี่ย (Projected range: PR) ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass attenuation coefficient: μ_m) และเลขอะตอมยังผล (Effective atomic number: Z_{eff})

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

การกำบังรังสีก่อก่อไอออนประเภทที่มีประจุไฟฟ้า (ไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออน)

อัตราการสูญเสียพลังงานของไอออนในระบบแก้วตัวอย่างแบ่งออกเป็นสองกลไกที่ต่างกันของการสูญเสียพลังงาน ได้แก่ พลังงานที่ถ่ายโอนโดยไอออนไปยังนิวเคลียสของระบบแก้วตัวอย่าง (เรียกว่าการหยุดนิวเคลียร์) และพลังงานที่ถ่ายโอนโดยไอออนไปยังอิเล็กตรอนของระบบแก้วตัวอย่าง (เรียกว่า การหยุดแบบอิเล็กตรอนิกส์) ความสำคัญสัมพัทธ์ของกระบวนการของอันตรกิริยาต่าง ๆ ระหว่างไอออนกับตัวกลางของระบบแก้วตัวอย่างจะขึ้นอยู่กับความเร็วของไอออนเป็นส่วนใหญ่ รวมถึงจะขึ้นอยู่กับประจุของไอออน และเลขอะตอมยังผลของระบบแก้วตัวอย่าง สำหรับอัตราการสูญเสียพลังงาน ช่วงคาดการณ์เฉลี่ย (Projected range) คือระยะห่างเฉลี่ยจากพื้นผิวของระบบแก้วตัวอย่างที่ไอออนฝังตัวเข้าไปอย่างเข้มข้น เป็นอีกหนึ่งพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการชนกันระหว่างไอออนกับอะตอมแลตทิซ (Lattice atom) ของระบบแก้วตัวอย่าง

การหยุดแบบอิเล็กทรอนิกส์ เกิดจากการชนทางอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งไอออนทั้งสองที่เคลื่อนที่นั้นจะไปกระตุ้นหรือ ทำให้ไอเล็กรอนหลุดออกมาจากอะตอมในระบบแก้วตัวอย่าง การหยุดแบบอิเล็กทรอนิกส์สำหรับไอออนช้าจะแปรผันตรงกับความเร็ของไอออน ในขณะที่ไอออนเร็วการหยุดแบบอิเล็กทรอนิกส์จะลดลงเมื่อพลังงานจลน์เพิ่มข้ขึ้นกรณีทีพลังงานไอออนสูง อัตราการสูญเสียพลังงานทีเกิดจากการหยุดแบบอิเล็กทรอนิกส์ สามารถคำนวณได้จาก [32]

$$-\frac{dE}{dx}\bigg|_e = \frac{2\pi Z_1^2 e^4}{E} N Z_2 \left(\frac{M_1}{m_e} \right) \ln \left(\frac{2m_e v^2}{I} \right) \quad (1)$$

โดย $-\frac{dE}{dx}\bigg|_e$ คือ อัตราการสูญเสียพลังงานทีเกิด

จากการหยุดแบบอิเล็กทรอนิกส์

Z_1 คือ ประจุของไอออน

E คือ พลังงานของไอออนทีเคลื่อนที่

N คือ ความหนาแน่นของอะตอมใน

ตัวกลางหยุด

Z_2 คือ เลขอะตอมของอะตอมหยุด

M_1 คือ มวลของไอออน

m_e คือ มวลของอิเล็กตรอนในตัวกลาง

หยุด

v คือ ความเร็วของไอออนทีผ่าน

อิเล็กตรอนในตัวกลางหยุด

I คือ พลังงานไอออไนซ์เฉลี่ย

ในการหยุดนิวเคลียร์ จะกล่าวถึง
การสูญเสียพลังงานโดยเฉลี่ยทีเกิดจากการชนกัน

แบบยืดหยุ่นระหว่างไอออนกับอะตอมเป้าหมาย
อำนาจหยุดนิวเคลียร์หรืออัตราการสูญเสียพลังงาน
นิวเคลียร์คือพลังงานทีสูญเสียไปโดยอนุภาคเคลื่อนที่
เนื่องจากการชนกันแบบยืดหยุ่นต่อความยาวหน่วยที
เคลื่อนที่เข้าไปในเป้าหมาย ความน่าจะเป็นของ
อนุภาคทีมีพลังงาน E เกิดการชนขณะเดินทางเป็น
ระยะทาง dx ซึ่งส่งผลให้สูญเสียพลังงานระหว่าง T
และ $T + dT$ การสูญเสียพลังงานเฉลี่ยโดยอนุภาค
เคลื่อนที่ในระยะทาง dx หาได้จาก [33]

$$-\frac{dE}{dx}\bigg|_n = N \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} T \frac{d\sigma(E)}{dT} dT \quad (2)$$

โดย $-\frac{dE}{dx}\bigg|_n$, $\frac{d\sigma(E)}{dT}$ คือ อำนาจหยุด
นิวเคลียร์ และภาคตัดขวางอนุพันธ์ของการส่งผ่าน
พลังงาน

$T_{\min}$ และ $T_{\max}$ คือ ค่าต่ำสุด และค่าสูงสุด

ในการถ่ายโอนพลังงาน กล่าวคือเป็นพลังงานที
จำเป็นสำหรับการแทนที่อะตอมจากตำแหน่งแลตทิซ
มีค่าประมาณ 20–30 อิเล็กตรอนโวลต์

ช่วงคาดการณ์เฉลี่ย (Projected range,
PR) คือ ความยาวเส้นทางเฉลี่ยทั้งหมดของโปรเจก-
ไทล์ไอออนทีวัดตามทิศทางของเหตุการณ์ ทีเกิดขึ้น
ในระหว่างทีโปรเจกไทล์ไอออนเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปใน
ตัวกลางเป้าหมาย โดยสัมพันธ์กับช่วง R ทีเป็น
ระยะทางทั้งหมดทีโปรเจกไทล์เคลื่อนที่ในตัวกลาง
เป้าหมายจนหยุดนิ่ง หาได้จาก [34]

$$PR \cong \frac{R}{1 + (M_2/3M_1)} \quad (3)$$

โดย M_2 คือ มวลของเป้าหมาย
พารามิเตอร์ทั้งสามนี้สามารถคำนวณได้
โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ The Stopping and
Ion Ranges in Matter (SRIM) [33]

การกำบังรังสีก่อกไอออนประเภทที่ไม่มีประจุ ไฟฟ้า (รังสีแกมมา และรังสีเอกซ์)

ในการศึกษาทางทฤษฎีของค่าต่าง ๆ ที่
เกี่ยวข้องกับการกำบังรังสีก่อกไอออนประเภทที่ไม่มี
ประจุไฟฟ้า (รังสีแกมมา และรังสีเอกซ์) ได้แก่ ค่า
สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (μ_m) และค่าเลข
อะตอมยังผล (Z_{eff}) ได้รับมาจากซอฟต์แวร์ Phy-
X/PSD ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลคำนวณ
ได้จาก “กฎการผสม (Mixture rule)” ดังสมการที่
(4) [35-37]

$$\mu_m = \sum_i w_i (\mu_m)_i \quad (4)$$

เมื่อ w_i คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของแต่ละธาตุ
($\mu_m)_i$ คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของ
แต่ละธาตุ

การคำนวณหาค่าเลขอะตอมยังผล ซึ่ง
นิยามของค่าเลขอะตอมยังผลคือ ค่าเฉลี่ยของเลข
อะตอมในสารที่เป็นสารประกอบหรือของผสม
ซึ่งอาจมีค่าไม่คงที่ขึ้นกับอันตรกิริยาระหว่างโฟตอน
ของรังสีตกกระทบกับสารนั้น นิยามโดยจากสมการ
ที่ (5)

$$Z_{eff} = \frac{\sigma_{t,a}}{\sigma_{t,el}} \quad (5)$$

โดย $\sigma_{t,a}$ คือ ภาคตัดขวางรวมของอันตรกิริยาทั้งหมด
ต่ออะตอมซึ่งมีสมการที่ (6)

$$\sigma_{t,a} = \frac{1}{N_A} \sum f_i A_i (\mu_m)_i \quad (6)$$

และ $\sigma_{t,el}$ คือ ภาคตัดขวางรวมของอันตรกิริยา
ทั้งหมดต่ออิเล็กตรอนซึ่งมีสมการที่ (7)

$$\sigma_{t,el} = \frac{1}{N_A} \sum \frac{f_i A_i}{Z_i} (\mu_m)_i \quad (7)$$

เมื่อ N_A คือ ค่าคงที่อวกาโดร 6.02×10^{23}
 A_i คือ เลขมวลของธาตุแต่ละชนิดในสาร
 Z_i คือ เลขอะตอมของธาตุแต่ละชนิดใน
สาร

f_i คือ อัตราส่วนของจำนวนอะตอมของ
ธาตุแต่ละชนิดในสารต่อมวล 1 กรัม กับจำนวน
อะตอมทั้งหมดของสารต่อมวล 1 กรัม

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในการศึกษาทางทฤษฎีของการจำลองระบบ
แก้ว $x\text{Gd}_2\text{O}_3-(80-x)\text{TeO}_2-20\text{B}_2\text{O}_3$ โดย x คือ
ปริมาณความเข้มข้นเท่ากับ 0, 5, 10, 15, และ 20
เปอร์เซ็นต์โมล ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของระบบ
แก้วตัวอย่างนี้เพื่อนำไปวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ
สำหรับประยุกต์ใช้เป็นวัสดุกำบังรังสีก่อกไอออนแสดง
ดังตารางที่ 1

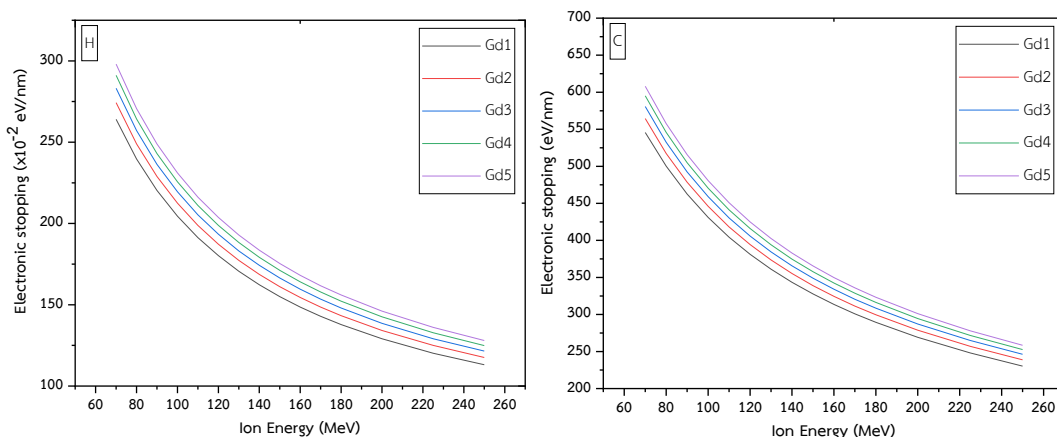
ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โมล) ของระบบแก้วตัวอย่าง

รหัสระบบแก้ว	องค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โมล)		
	Gd ₂ O ₃	TeO ₂	B ₂ O ₃
Gd1	0	80	20
Gd2	5	75	20
Gd3	10	70	20
Gd4	15	65	20
Gd5	20	60	20

การกำบังรังสีแกมมาไอออนประเภทที่มีประจุไฟฟ้า (ไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออน)

เมื่อไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออนทะลุผ่านเข้าไปภายในระบบแก้วตัวอย่างทั้งห้า ทั้งสองไอออนจะเกิดการชนกันเป็นชุดกับอะตอมและอิเล็กตรอนในระบบแก้วตัวอย่าง ในการชนกันเหล่านี้ ไอออนที่ตกกระทบจะสูญเสียพลังงานไป ขึ้นอยู่กับพลังงาน มวล และเลขอะตอมของไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออน รวมทั้งมวล เลขอะตอม และความหนาแน่นของระบบแก้วตัวอย่าง ภาพที่ 1 แสดงการหยุดอิเล็กตรอนของไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออนในช่วงพลังงาน 70–250 เมกะอิเล็กตรอน-โวลต์ ตัวอย่างแก้ว Gd5 > Gd4 > Gd3 > Gd2 > Gd1 ตามลำดับ ผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าระบบแก้วตัวอย่าง Gd5 ส่งผลทำให้ไอออนที่ตกกระทบสูญเสีย

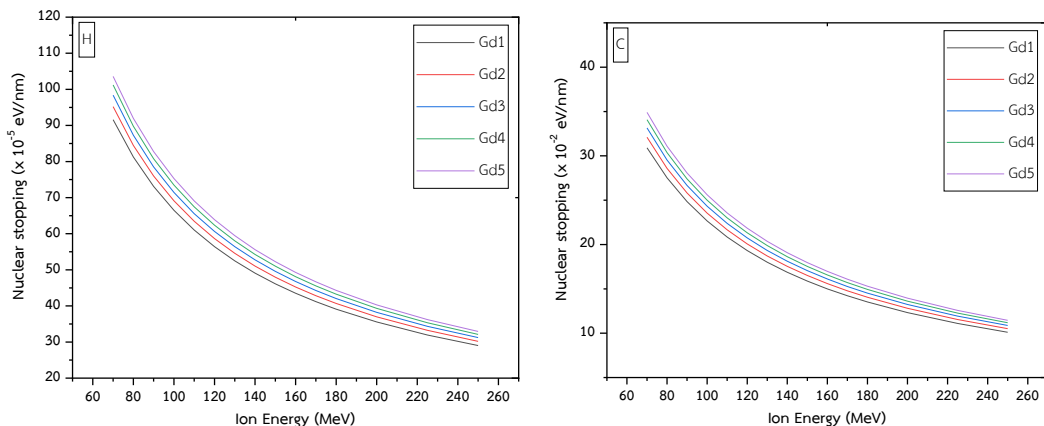
พลังงานมากที่สุด สิ่งนี้เกิดจากการเพิ่มปริมาณเปอร์เซ็นต์โมลของแกโดลิเนียมซึ่งจะทำให้ค่าของเลขอะตอมยังผลของระบบแก้วเพิ่มมากขึ้นโดยสอดคล้องกับภาพที่ 5 ดังนั้นจึงทำให้แก้ว Gd5 มีโอกาสในการหยุดอิเล็กตรอนมากขึ้น และกรณีที่มีการหยุดอิเล็กตรอนจากคาร์บอนไอออนมีค่ามากกว่าการหยุดอิเล็กตรอนจากไฮโดรเจน-ไอออน เนื่องจากคาร์บอนไอออนมีมวลและเลขอะตอมสูงกว่าไฮโดรเจนไอออน ยิ่งไปกว่านั้นจะเห็นว่าแนวโน้มพลังงานของไอออนเพิ่มมากขึ้นค่าการหยุดอิเล็กตรอนก็จะลดลง เหตุผลเนื่องจากเกิดการถ่ายโอนพลังงานของไอออนเนื่องจากการชนกันระหว่างไอออนกับอิเล็กตรอน โดยเป็นการชนกันแบบไบนารี (Binary collisions) [38]



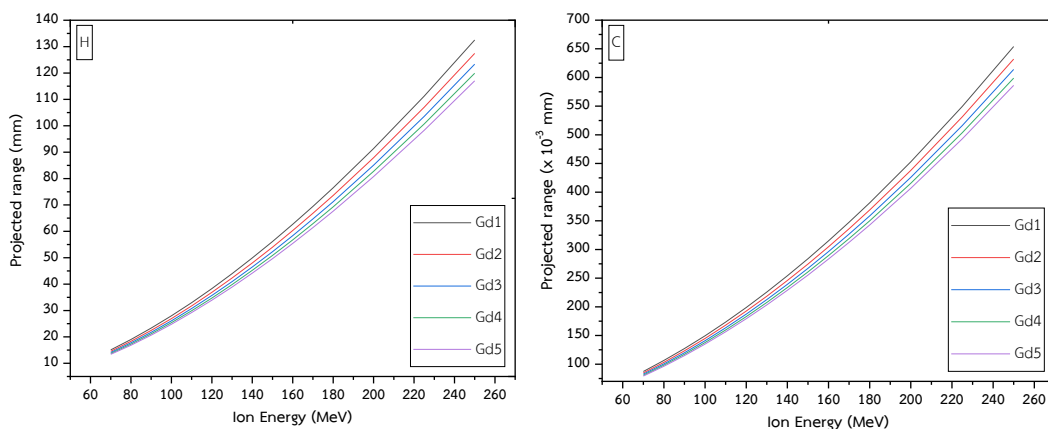
ภาพที่ 1 การหยุดอิเล็กตรอนของไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออนที่พลังงาน 70–250 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

เมื่อไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออนเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในบริเวณผิวเนื้อของระบบแก้ว ตัวอย่าง ไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออนจะเกิดการชนกับอะตอมของระบบแก้วตัวอย่างที่อยู่เบื้องหลังจะทำให้เกิดการเบี่ยงเบนทิศทางการเคลื่อนที่ของไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออนจากทิศทางเดิม อิทธิพลหลักที่ส่งผลทำให้ไอออนเปลี่ยนทิศทางของการกระเจิงเกิดจากการชนของไอออนกับอะตอมในแลตทิซแต่ละตัว โดยจะเกิดการชนแบบไบนารี เหตุการณ์การชนกันที่ง่ายที่สุดคือการชนกันระหว่างไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออนกับนิวเคลียสของอะตอม โดยมีเงื่อนไขว่าค่าเส้นทางอิสระเฉลี่ย (Mean free path) ระหว่างการชนกันนั้นจะต้องมากกว่าระยะห่างระหว่างอะตอม โมเมนตัมของอะตอมของระบบแก้วที่หดรตัวเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดจำนวนความเสียหายที่เกิดขึ้นในระบบแก้วตัวอย่าง โมเมนตัมที่ถ่ายโอนไปยังอะตอมที่หดรตัวยัง

เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการสูญเสียพลังงานของไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออน เนื่องจากการชนกันของไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออนกับนิวเคลียสในอะตอมของระบบแก้วตัวอย่าง ภาพที่ 2 แสดงการหยุดนิวเคลียร์ ของไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออนที่ช่วงพลังงาน 70–250 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ตัวอย่าง แก้ว Gd5 > Gd4 > Gd3 > Gd2 > Gd1 ตามลำดับ ในการหยุดนิวเคลียร์จะต้องคำนึงถึง การสูญเสียพลังงานโดยเฉลี่ยที่เกิดจากการชนกันแบบยืดหยุ่นกับอะตอมของระบบแก้วตัวอย่าง โดยอำนาจหยุดนิวเคลียร์หรืออัตราการสูญเสียพลังงานนิวเคลียร์คือพลังงานที่สูญเสียไปโดยอนุภาคเคลื่อนที่เนื่องจากการชนกันแบบยืดหยุ่นต่อหน่วยความยาวที่เคลื่อนที่ภายในระบบแก้วตัวอย่าง ผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าแก้วตัวอย่าง Gd5 ส่งผลทำให้ไอออนที่ตกกระทบสูญเสียพลังงานมากที่สุด [38]



ภาพที่ 2 การหยุดนิวเคลียร์ของไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออนที่พลังงาน 70-250 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์



ภาพที่ 3 ช่วงคาดการณ์เฉลี่ยของไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออนที่พลังงาน 70-250 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

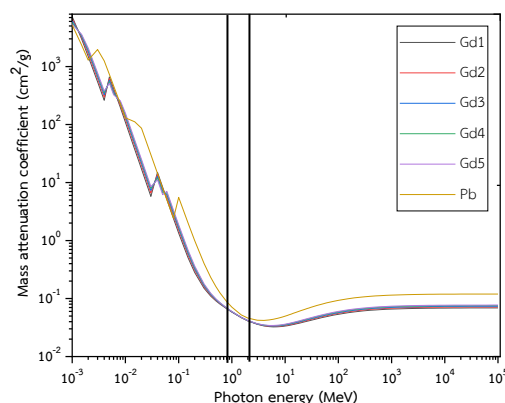
ภาพที่ 3 แสดงค่าช่วงคาดการณ์เฉลี่ย (Projected range, PR) ของระบบแก้วทั้งห้า ที่ช่วงพลังงานไอออน 70-250 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ผลที่ได้สอดคล้องกับค่าการหยุดอิเล็กตรอนิกส์และนิวเคลียร์ ดังภาพที่ 1 และ 2 นั่นคือ แก้วตัวอย่าง Gd1 > Gd2 > Gd3 > Gd4 > Gd5 ตามลำดับ โดยผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงระยะห่างเฉลี่ยจากพื้นผิวของระบบแก้วตัวอย่างที่ไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออนทะลุทะลวงผ่านเข้าไป ผลที่ตามมาจะทำให้ระบบแก้วเกิดการเสียหายที่ความลึกต่าง ๆ ความเสียหาย

นี้เกิดจากการยุบตัวของอะตอมในแลตทิซในบริเวณผิวของระบบแก้ว ทำให้แก้วมีอายุการใช้งานที่ต่างกันขึ้นกับแหล่งกำเนิดไอออน ดังงานวิจัยนี้จะเห็นว่าไฮโดรเจนไอออนจะส่งผลทำให้ระบบแก้วเกิดความเสียหายได้มากกว่าคาร์บอนไอออน เนื่องจากมีค่าช่วงคาดการณ์เฉลี่ยที่มากกว่า อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าระบบแก้ว Gd5 มีค่าช่วงคาดการณ์เฉลี่ยที่น้อยที่สุด ผลที่ได้สะท้อนให้เห็นว่าระบบแก้ว Gd5 สามารถป้องกันไอออนทั้งสองได้ดีที่สุด [40]

การกำบังรังสีกัมมันตภาพที่ไม่มีประจุไฟฟ้า (รังสีเอกซ์ และรังสีแกมมา)

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลแสดงได้ดังภาพที่ 4 โดยค่านี้สามารถอธิบายได้ด้วยการเกิดอันตรกิริยาของรังสีกับวัสดุตัวกลางในแต่ละช่วงพลังงาน จากภาพแบ่งออกเป็น 3 ปรากฏการณ์คือ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ที่พลังงานต่ำกว่า 200 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ การกระเจิงแบบคอมป์ตันจะเกิดที่พลังงาน 200 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ถึง 1.02 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ และการผลิตคู่จะเกิดที่พลังงานตั้งแต่ 1.02 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ เป็นต้นไป จากการวิเคราะห์พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลในช่วงปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อระดับพลังงานเพิ่มมากขึ้นโดยค่านี้จะแปรผันตรงกับ $E^{7/2}$ ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลในช่วงการกระเจิงแบบคอมป์ตันมีค่าลดลงอย่างช้า ๆ โดยในช่วงนี้จะแปรผัน E^{-1} และลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลในช่วงการผลิตคู่พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลเพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานเพิ่มขึ้นถึงระดับพลังงาน 300 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ หลังจากนั้นจะมีค่าเกือบคงที่โดยในช่วงนี้จะแปรผันตรงกับ $\log E$ และจากภาพยังจะเห็นได้อีกว่ากราฟมีลักษณะไม่ต่อเนื่องมีรอยหยักซึ่งลักษณะของกราฟแบบนี้เกิดจากค่าขอบเขตการดูดกลืนของธาตุ Gd Te และ B โดยแก๊วตัวอย่าง Gd5 มีค่าสูงที่สุดนั่นหมายความว่าแก๊วตัวอย่างนี้มีความสามารถในการกำบังรังสีได้ดีที่สุด [40] และยังสามารถสังเกตได้ว่าในบางช่วงพลังงานค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแก๊วตัวอย่างมีค่าสูงกว่าค่า

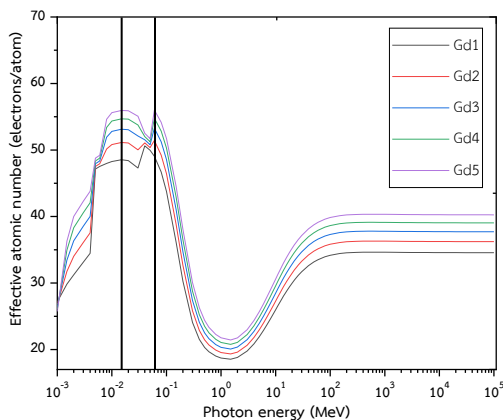
สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตะกั่ว เช่นในช่วงพลังงานน้อยกว่า 0.001 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ช่วงพลังงาน 0.004 – 0.01 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และในช่วงพลังงาน 0.03 – 0.08 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งนั่นหมายความว่าในช่วงพลังงานดังกล่าวแก๊วตัวอย่างนี้มีสมบัติในการกำบังรังสีดีกว่าตะกั่ว



ภาพที่ 4 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลที่พลังงานในช่วง 10^{-3} – 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

ผลการศึกษาเลขอะตอมยังผล (Z_{eff}) ของระบบแก๊วตัวอย่างกับระดับพลังงานในช่วง 1 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ถึง 100 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ พบว่าค่านี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก โดยพบว่าค่าเลขอะตอมยังผลมีจุดยอดสองจุด ที่พลังงาน 0.01 และ 0.06 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ และจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงจุดต่ำสุดที่พลังงาน 1.5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเป็นช่วงอันตรกิริยาการกระเจิงแบบคอมป์ตัน หลังจากนั้นค่านี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับพลังงานสูงขึ้นและเริ่มคงที่จากช่วงระดับพลังงานมากกว่า 100 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ เป็นต้นไป ดังแสดงในภาพที่ 5 และพบว่าแก๊วตัวอย่าง Gd5 มีค่าเลขอะตอมยังผล

สูงสุตนั้นแสดงให้เห้นว่าแก้วตัวอย่างนี้มีโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีกับวัสดุตัวกลางสูงสุต [39]



ภาพที่ 5 เลขอะตอมยังผลของระบบแก้วตัวอย่างที่พลังงานในช่วง 10^{-3} – 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

4. สรุปผลการวิจัย

การศึกษาสมบัติต่อการกำบังรังสีแกมมาของระบบแก้ว $x\text{Gd}_2\text{O}_3$ – $(80-x)\text{TeO}_2$ – $20\text{B}_2\text{O}_3$ โดย x คือ ปริมาณความเข้มข้นเท่ากับ 0, 5, 10, 15, และ 20 เปอร์เซ็นต์โมล โดยแบ่งออกเป็นการศึกษาสมบัติกำบังรังสีประเภทที่มีประจุและไม่มีประจุ ด้วยโปรแกรม SRIM และ โปรแกรม Phy-X/PSD ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและมีความน่าเชื่อถืออยู่ในปัจจุบัน ตามลำดับ ซึ่งพารามิเตอร์ของประเภทที่มีประจุได้ทำการศึกษาค่าการหยุดอิเล็กตรอนิกส์ การหยุดนิวเคลียร์ และช่วงคาตการณ์เฉลี่ยของไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออนที่พลังงาน 70–250 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ประเภทไม่มีประจุได้ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลและค่าเลขอะตอมยังผล ที่พลังงานในช่วง 10^{-3} – 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ จากการศึกษาพบว่าแก้วตัวอย่าง $20\text{Gd}_2\text{O}_3$ –

60TeO_2 – $20\text{B}_2\text{O}_3$ (Gd5) มีสมบัติในการกำบังรังสีทั้งประเภทที่มีประจุและไม่มีประจุที่ดีที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และ Thailand Science Research and Innovation (TSRI) ที่สนับสนุนงานวิจัยนี้

6. อ้างอิง

- [1] Issa SAM, Hamdalla TA, Darwish AAA. Effect of ErCl_3 in gamma and neutron parameters for different concentration of ErCl_3 - SiO_2 (EDFA) for the signal protection from nuclear radiation. J Alloys Compd. 2017;698:234-40.
- [2] Gaikwad DK, Obaid SS, Sayyed MI et al. Comparative study of gamma ray shielding competence of WO_3 – TeO_2 – PbO glass system to different glasses and concretes. Mater Chem Phys. 2018; 213:508-17.
- [3] Rammah YS, El-Agawany FI, Mahmoud KA et al. FTIR, UV-Vis-NIR spectroscopy, and gamma rays shielding competence of novel ZnO-doped vanadium borophosphate glass. J Mater Sci: Mater Electron. 2020;31:9099-113.
- [4] Al-Buriah MS, Bakhsh EM, Tonguc B et al. Mechanical and radiation shielding

- properties of tellurite glasses doped with ZnO and NiO. *Ceram Int.* 2020; 46(11):19078-83.
- [5] Mark F, George FB. Optical properties of solids. *Am J Phys.* 2002;70(12):1269-70.
- [6] Wang JS, Vogel EM, Snitzer E. Tellurite glass: a new candidate for fiber devices. *Opt Mater.* 1994;3(3):187-203.
- [7] Sidek, HAA, Halimah MK, Faizal MN et al. Synthesis and elastic behaviour of borate glass doped with high tellurite content. *J Appl Sci.* 2006;6(2):274-9.
- [8] Tijani SA, Kamal SM, Al-Hadeethi Y et al. Radiation shielding properties of transparent erbium zinc tellurite glass system determined at medical diagnostic energies. *J Alloy Compd.* 2018;741:293-9.
- [9] El-Mallawany R, Sayyed MI. Condensed matter comparative shielding properties of some tellurite glasses: Part 1. *Physica B.* 2018;539:133-40.
- [10] Sayyed MI, Khattari ZY, Kumar A et al. Radiation shielding parameters of BaO-Nb₂O₅-P₂O₅ glass system using MCNP5code and XCOM software. *Mater Res Express.* 2018;5:115203.
- [11] Sayyed MI, Kaky KM, Gaikwad DK et al. Physical, structural, optical and gamma radiation shielding properties of borate glasses containing heavymetals (Bi₂O₃/MoO₃). *J Non-Cryst Solids.* 2019; 507:30-7.
- [12] Tekin HO, Sayyed MI, Manici T et al. Photon shielding characterizations of bismuth modified borate-silicate-tellurite glasses using MCNPX Monte Carlo code. *Mater Chem Phys.* 2018; 211:9-16.
- [13] Kurudirek M. Heavy metal borate glasses: Potential use for radiation shielding. *J Alloy Compd.* 2017; 727(36):1227-36.
- [14] Waly EA, Al-Qous GS, Bourham MA. Shielding properties of glasses with different heavy elements additives for radiation shielding in the energy range 15-300 keV. *Radiat Phys Chem.* 2018; 150:120-124.
- [15] Chanthima N, Kaewkhao J, Limkitjaroenporn P et al. Development of BaO-ZnO-B₂O₃ glasses as a radiation shielding material. *Radiat Phys Chem.* 2017;137: 72-7.
- [16] Gaikwad DK, Sayyed MI, Obaid SS et al. Gamma ray shielding properties of TeO₂-ZnF₂-As₂O₃-Sm₂O₃ glasses. *J Alloy Compd.* 2018; 765:451-8.
- [17] Kaky KM, Sayyed MI, Laariedh F et al. Stuctural, optical and radiation shielding

- properties of zinc boro-tellurite alumina glasses. *Appl Phys A Mater.* 2019; 125(32):1-12.
- [18] Issa SAM, Kumar A, Sayyed MI et al. Mechanical and gamma-ray shielding properties of $\text{TeO}_2\text{-ZnO-NiO}$ glasses. *Mater Chem Phys.* 2018;212:12-20.
- [19] Singh VP, Badiger NM, Chanthima N et al. Evaluation of gamma-ray exposure buildup factors and neutron shielding for bismuth borosilicate glasses. *Radiat Phys Chem.* 2014; 98:14-21.
- [20] Al-Buriah MS, Bakhsh EM, Tonguc B et al. Mechanical and radiation shielding properties of tellurite glasses doped with ZnO and NiO. *Ceram Int.* 2020; 46(11):19078-83.
- [21] Olarinoye IO, Alomairy S, Sriwunkum C et al. Effect of $\text{Ag}_2\text{O/V}_2\text{O}_5$ substitution on the radiation shielding ability of tellurite glass system via XCOM approach and FLUKA simulations. *Phys Scr.* 2021; 96(6):065308.
- [22] Al-Buriah MS, Somaily HH, Alalawi A et al. Polarizability Optical basicity, and photon attenuation properties of $\text{Ag}_2\text{O-MoO}_3\text{-V}_2\text{O}_5\text{-TeO}_2$ glasses: the role of silver oxide. *J Inorg Organomet P.* 2021; 31:1047-56.
- [23] Al-Buriah MS, Alajerami YSM, Abouhaswa AS et al. Effect of chromium oxide on the physical, optical, and radiation shielding properties of lead sodium borate glasses. *J Non-Cryst Solids.* 2020; 544:120171.
- [24] Alshahrani B, Olarinoye IO, Mutuwong C et al. Amorphous alloys with high Fe content for radiation shielding applications. *Radiat Phys Chem.* 2021; 183:109386.
- [25] Azlan MN, Eevon C, Halimah MK et al. Effect of Gd^{3+} on optical and thermal properties of tellurite glass. *J Theor Appl Phys.* 2020; 14(2):137-47.
- [26] Bektasoglu M. Mohammad MA. Investigation of radiation shielding properties of $\text{TeO}_2\text{-ZnO-Nb}_2\text{O}_5\text{-Gd}_2\text{O}_3$ glasses at medical diagnostic energies. *Ceram Int.* 2020; 46(10):16217-23.
- [27] Al-Hadeethi Y, Sayyed MI. Effect of Gd_2O_3 on the radiation shielding characteristics of $\text{Sb}_2\text{O}_3\text{-PbO-B}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3$ glass system. *Ceram Int.* 2020; 46(9):13768-73.
- [28] Kaewjaeng S, Wantana N, Kothan S et al. Effect of Gd_2O_3 on the radiation shielding, physical, optical and luminescence behaviors of $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{-La}_2\text{O}_3\text{-}$

- ZnO-B₂O₃-Dy₂O₃ glasses. Radiat Phys Chem. 2021; 185:109500.
- [29] Mohan R, Grosshans D, Proton Therapy- Present and Future. Adv Drug Deliv Rev. 2017; 109:26-44.
- [30] Andrievskii RA. Effect of irradiation on the properties of nanomaterials. The Phys Metals Metallogr. 2010; 110(3):229-40.
- [31] Şakar E, Özpolat ÖF, Alim B et al. Phy-X/PSD: Development of a user friendly online software for calculation of parameters relevant to radiation shielding and dosimetry. Radiat Phys Chem. 2020; 166:108496.
- [32] Nastasi M, Mayer JW, Hirvonen JK. Ion-Solid Interactions: Fundamentals and Applications. Cambridge: Cambridge University Press; 1996.
- [33] Ziegler JF, Biersack JP, Littmark U. The Stopping and Range of Ions in Solids. New York: Pergamon Press; 1985.
- [34] Winterbon KB, Sigmund P, Sanders JB. Spatial distribution of energy deposited by atomic particles in elastic collisions. Kgl Dan Vidensk Mat-Fys Medd. 1970; 37(14):1-12.
- [35] Sriwongsa K, Rimdusit T, Jirayut Phothawilkiat J et al. Photon Interaction, Buildup Factors and Fast Neutron Removal of Some Scintillators Used X-Ray and CT Imaging. Jmsae. 2021; 10(2):58-69.
- [36] Sriwongsa K, Laopoonphol N, Ariyalerdchai S, et al. Comparative study of mass attenuation coefficient, effective atomic numbers, and effective electron densities of EU-Doped CsCaBrI₂, CsSrBrI, and CsSrClBr₂ scintillators. Suranaree J Sci Technol. 2020;27(4):010023-7.
- [37] Sriwongsa K, Laopoonphol N, Ariyalerdchai S et al. The comparative study of photon shielding's properties of MoNbCrVTi and MoNbCrZrTi alloy materials. Suranaree J Sci Technol. 2020;27(4):010023-6.
- [38] Nastasi M. & Mayer J.W. Ion Implantation and Synthesis of Materials. Springer Berlin Heidelberg New York. 2006:49–58.
- [39] Sriwongsa K, Glimglomchit P. Sualuang B et al. Shielding of uncharged and charged radiation of PbO-B₂O₃-SiO₂-Na₂O glass system. NUJST. 2021; 30(1):109-119.

อิทธิพลของกระบวนการดัดขึ้นรูปแบบ 3 จุด ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและ ความเสียหายของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ JSC980Y

Effect of 3 Points Bending Process on Microstructure Evolution and Damage Characteristics of Dual Phase High Strength Steel Sheets JSC980Y

ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ^{1*}, พงศกร หลีตระกูล²

Natthasak Pornputsiri^{1*}, Pongsakorn Leetrakul²

^{1*,2}สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

^{1*,2}Department of Industrial and Production Engineering, Faculty of Industry and Technology, Rajamangala
University of Technology Rattanakosin, Thailand

*Corresponding author. Tel.: 08 6667 6802 E-mail: natthasak.por@mutr.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ JSC980Y ขนาดความหนา 1 มิลลิเมตร ซึ่งถูกใช้งานอย่างแพร่หลายเพื่อการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ แต่พบปัญหาหลักคือมักจะเกิดการแตกร้าวเสียหายได้ง่าย เนื่องจากมีสมบัติด้านความแข็งแรงสูงและขึ้นรูปได้ยากที่อุณหภูมิห้อง เพื่อหลีกเลี่ยงปรากฏการณ์ดังกล่าว จึงได้กำหนดแนวทางเพื่อเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบอุ่นที่อุณหภูมิ 200 °C, 400 °C, และ 600 °C เปรียบเทียบกับผลการดัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้อง ด้วยวิธีการทดสอบการดัดขึ้นรูปแบบ 3 จุด ที่ขนาดมุมแตกต่างกันในช่วง 0-75° โดยใช้พื้นที่ที่มีรัศมี 0.25 มิลลิเมตร ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิการดัดขึ้นรูปจะส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการดัดขึ้นรูปและขนาดมุมดัดตัวกลับของโลหะแผ่นอย่างชัดเจน โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้ขนาดมุมดัดตัวกลับเพิ่มมากขึ้นและขนาดของมุมดัดตัวกลับจะเกิดขึ้นสูงสุดที่อุณหภูมิ 400 °C เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิที่วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคนอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิขึ้นทดสอบเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างจุลภาคและรูปแบบของรอยแตกร้าวบนพื้นผิวการดัดของชิ้นงานสำเร็จ

คำสำคัญ : กระบวนการดัด การขึ้นรูปแบบอุ่น การดัดตัวกลับ กลไกความเสียหาย การขึ้นรูปโลหะแผ่น

Abstract:

This study used dual phase high strength steel sheets metal JSC980Y of 1 millimeter size thickness, as a conventional used in the process of forming automotive parts. Cracking and tearing occur due to its high strength property resulting in brittleness at room temperature.

Received 07-09-2021

Revised 11-11-2021

Accepted 15-11-2021

To avoid this phenomenon and increases of formability, bending was carried out by applying the warm temperature treatments at 200 °C, 400 °C and 600 °C, compared with the bending test at room temperature. 3-Point bending processes were performed with different bending angles (0-75°) by a 0.25 millimeter punch tip radius. The experiment results showed that, the bending temperature directly affects the formability and the springback angle of the dual phase sheet metal. When the temperature was increased, springback angle tended to increase and the springback angle maximum occurred at the bending temperature of 400 °C because this temperature range was effect on microstructure changes of dual phase steel. Furthermore, when the bending temperature was increased, it directly affected to microstructure and failure characteristics on the bending surface of the finished product.

Keywords: Bending process Warm forming Spring-back Failure mechanisms Sheet metal forming

1. บทนำ

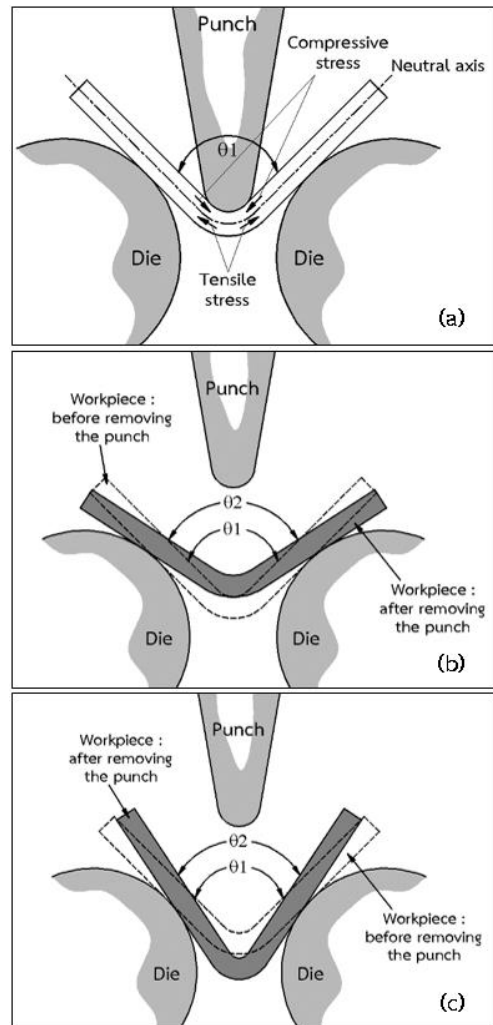
สืบเนื่องจากเหล็กกล้าชนิดความแข็งแรงสูงเป็นเหล็กกล้าชนิดที่ถูกนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์อย่างกว้างขวาง เพราะเป็นเหล็กกล้าที่มีความโดดเด่นด้านความแข็งแรง จึงนิยมนำมาใช้ผลิตเป็นชิ้นส่วนประกอบของยานยนต์ เช่น ชิ้นส่วนกันชน แซสซี และโครงสร้างประตูเป็นต้น เพื่อวัตถุประสงค์ด้านความปลอดภัย การลดน้ำหนักของรถยนต์ซึ่งช่วยให้ประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงและลดมลพิษทางอากาศได้ กล่าวคือโครงสร้างรถยนต์ที่แข็งแรงจะช่วยให้การปกป้องผู้ขับขี่หรือผู้โดยสารได้ดีขึ้นและรถยนต์ที่มีมวลหรือน้ำหนักน้อยลงก็จะช่วยลดความรุนแรงจากการชนกระแทกได้มากขึ้น โดยเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ (Dual Phase) เป็นชนิดของเหล็กกล้าที่ถูกนำมาใช้เพื่อการผลิตเป็นชิ้นส่วนยานยนต์มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าชนิดอื่นๆ ในกลุ่มเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเนื่องจากมีความโดดเด่นด้านความแข็งแรงสูงและสามารถดูดซับพลังงานจากการชนกระแทกได้ดี โดยเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่จะมีโครงสร้าง

จุลภาคซึ่งประกอบด้วยเฟสมาร์เทนไซต์ (Martensite) กระจายอยู่ในโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรต์ (Ferrite matrix) ซึ่งปริมาณและความหนาแน่นของเฟสมาร์เทนไซต์จะส่งผลโดยตรงต่อค่าความแข็งแรง (Strength) ความสามารถในการขึ้นรูป (Formability) และความเครียดแข็ง (Strain hardening) ของเหล็กกล้าชนิดนี้ ปัญหาสำคัญในการขึ้นรูปของเหล็กกล้าชนิดความแข็งแรงสูง คือ การแตกร้าวเสียหายและการดัดตัวกลับของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาโดยส่วนใหญ่ได้ดำเนินการตรวจสอบความสามารถในการขึ้นรูปจากลักษณะและผลที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวภายนอกของชิ้นทดสอบ แต่การแตกร้าวเสียหายของโลหะแผ่นจากการขึ้นรูปโดยการพับหรือดัดขึ้นรูปที่รุนแรง จะเกิดขึ้นทั้งบนพื้นผิวภายนอกและภายในเนื้อของวัสดุ โดยเฉพาะความเสียหายที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าและสังเกตไม่พบที่พื้นผิวภายนอกซึ่งเป็นอันตรายอย่างยิ่งเมื่อนำไปใช้งาน

พฤติกรรมการคืนตัวกลับเป็นปัญหาสำคัญ ของกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น ซึ่งอยู่ในรูปของ การเกิดสปริงแบ็ค (Spring-back) หรือสปริงโก (Spring-go) การคืนรูปในลักษณะของการเกิดสปริง แบ็คหมายถึง ขนาดของมุมขึ้นงานที่เพิ่มมากขึ้นหลัง การตัดดัดภาพที่ 1(b) ในขณะที่การเกิดสปริงโก หมายถึง หลังการดัดขึ้นงานจะมีขนาดมุมลดลงดัง ภาพที่ 1(c) ซึ่งพฤติกรรมการเกิดสปริงแบ็คและการ เกิดสปริงโกจะส่งผลอย่างมากต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ และกระบวนการผลิตต่อเนื่องในอุตสาหกรรม การผลิต ผู้ออกแบบและผลิตแม่พิมพ์จึงได้พยายามค้นหา วิธีการออกแบบแม่พิมพ์เพื่อแก้ปัญหาการคืนตัวของ แผ่นขึ้นงานหลังการขึ้นรูปด้วยวิธีการคำนวณหรือโดย การทดลอง ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองเวลาและส่งผลให้ ต้นทุนการผลิตเพิ่มสูงขึ้น การออกแบบแม่พิมพ์ให้มี ขนาดมุมหรือระยะการกดดัดที่มากกว่าหรือน้อยกว่า ขนาดมุมขึ้นงานสำเร็จ จึงเป็นแนวทางในการชดเชย พฤติกรรมการคืนรูปของวัสดุ ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาที่มี ผลดีที่สุด สามารถลดการสิ้นเปลืองด้านเวลาและวัสดุ จากการทดลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ [1]

การดัดขึ้นรูปเป็นกระบวนการที่สำคัญใน อุตสาหกรรมการผลิต เนื่องจากการขึ้นรูปโลหะแผ่น จะมีส่วนของกระบวนการดัดขึ้นรูปร่วมด้วยเสมอ ทั้งนี้ความถูกต้องเที่ยงตรงของผลิตภัณฑ์หรือขนาด ขึ้นงานสำเร็จจะขึ้นอยู่กับความแม่นยำในการ ออกแบบแม่พิมพ์และการกำหนดเงื่อนไขใน กระบวนการดัดขึ้นรูปที่เหมาะสม [2] ทั้งนี้การดัดขึ้น รูปด้วยวิธีการดัดแบบ 3 จุด (3-point bending) เป็นวิธีการที่ง่ายและประหยัด เนื่องจากสามารถขึ้น รูปขึ้นงานได้ขนาดมุมที่หลากหลายบนแม่พิมพ์เพียง ชุดเดียวโดยการกำหนดระยะการกดของพินซ์ และ เป็นวิธีการที่ได้รับผลกระทบจากแรงเสียดทาน

ระหว่างผิวชิ้นงานและผิวของตายขณะขึ้นรูป น้อยมาก [3]



ภาพที่ 1 ลักษณะการดัดและการคืนรูปของวัสดุ

(a) ขณะกดดัดขึ้นรูป (b) การเกิดสปริงแบ็ค $\theta_2 > \theta_1$

(c) การเกิดสปริงโก $\theta_2 < \theta_1$ [1]

ที่ผ่านมามีนักวิจัยซึ่งได้ทำการศึกษา เกี่ยวกับเงื่อนไขและข้อกำหนดของกระบวนการดัด ขึ้นรูปแบบ 3 จุดไว้อย่างหลากหลายเช่น การศึกษา ถึงผลกระทบของความหนาแผ่นโลหะ ผลกระทบจาก

ทิศทางการรีดของวัสดุ สมบัติทางกลของวัสดุ ค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานและรีดมีพื้นที่ ส่งผลต่อพฤติกรรมของการเกิดสปริงแบ็คและสปริงโกของชิ้นงานสำเร็จ [4] และมีการวิจัยเพื่อตรวจสอบผลกระทบจากการออกแบบแม่พิมพ์ เช่น ลักษณะภาพร่างของพื้นที่ รีดมีพื้นที่ รีดมีตาย และลักษณะของแผ่นกดยึดชิ้นงานที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของการติดตัวกลับของโลหะแผ่น เป็นต้น [5] นักวิจัยบางส่วนได้ใช้เทคนิคการตัดโค้งเพื่อศึกษาขนาดการเกิดสปริงแบ็คและสปริงโก โดยใช้เทคนิคการตัดขึ้นรูปนูน ซึ่งมักจะถูกใช้ในกระบวนการตัดขึ้นรูปตัวในเชิงจัดการการเกิดสปริงแบ็คและสปริงโก เพื่อให้ได้ชิ้นงานสำเร็จที่มีขนาดมุมที่ต้องการและเที่ยงตรง และแสดงให้เห็นว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเกิดสปริงแบ็คและสปริงโกคือขนาดความกว้างและความสูงที่ส่วนปลายของพื้นที่เพื่อการกดนูนต่ำ (Coined-bead) บนแผ่นโลหะ [6, 7] นอกจากนี้ยังพบว่านักวิจัยซึ่งได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกลไกการแตกหักและการแตกร้าวเสียหายของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่ถูกตัดขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ตัดรูปตัว V ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เปรียบเทียบกับผลการตัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้อง เพื่อหาแนวทางในการเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปของโลหะแผ่นชนิดดังกล่าว [8] ได้มีการศึกษาวิจัยผลกระทบของอุณหภูมิการขึ้นรูปและขนาดของเกรนที่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่ผ่านกรรมวิธีการอบอ่อนแบบต่อเนื่อง ซึ่งพบว่าค่าความแข็งแรงดึงของโลหะแผ่นจะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิการทดสอบเพิ่มสูงขึ้นในช่วง 20 ถึง 300 °C [9] และมีนักวิจัยที่ได้ทำการตรวจสอบพฤติกรรมของการติดตัวกลับของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงในช่วงอุณหภูมิอุ่นและร้อน ซึ่งพบว่ามุมขนาดมุมติดตัวกลับจะลดลงอย่างชัดเจนเมื่อ

อุณหภูมิบริเวณมุมติดเพิ่มขึ้นสูงกว่า 750K ซึ่งน้อยกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ของเฟสออสเทนไนต์ [10]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิการตัด เพื่อการเพิ่มความสามารถในการตัดขึ้นรูปของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่เกรด JSC980Y โดยใช้กระบวนการตัดขึ้นรูปแบบ 3 จุด ด้วยการเปรียบเทียบผลการตัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิและขนาดมุมการตัดที่แตกต่างกัน เนื่องจากโดยทั่วไปการตัดขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ที่อุณหภูมิห้องมักจะเกิดการแตกร้าวเสียหายได้ง่ายจากสมบัติด้านความแข็งแรงและพฤติกรรมความเครียดเชิงสูง ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการศึกษาทดลองการตัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน เพื่อหลีกเลี่ยงการแตกร้าวเสียหายและเพิ่มความสามารถในการตัดขึ้นรูปของเหล็กกล้าชนิดดังกล่าว

2. วัสดุและการออกแบบการทดลอง

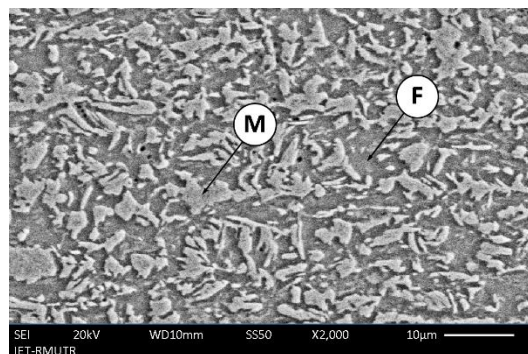
2.1 วัสดุการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่เกรด JSC980Y ขนาดความหนา 1 มิลลิเมตร โดยตัดเตรียมชิ้นทดสอบในทิศทางขวางแนวการรีดด้วยเครื่องตัดโลหะแผ่นพาวเวอร์ชีयरและตกแต่งเพื่อลบรอยครีบจากการตัดด้วยกระดาษทรายเพื่อให้ได้ขนาดชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ขนาดความกว้าง 12.5 มิลลิเมตร x ขนาดความยาว 30 มิลลิเมตร จำนวน 10 ชิ้น ต่อเงื่อนไขการทดสอบ โดยสมมติฐานการทดสอบได้กำหนดค่าความเชื่อมั่นของข้อมูลที่ 95% และมีความคลาดเคลื่อนของข้อมูลไม่เกิน 5% จากผลการสุ่มตัวอย่างเพื่อทดสอบสมมติฐานงานวิจัยโดยการทดสอบทางสถิติ (T-test) จากการกำหนดจำนวนครั้งการทดสอบที่จำนวน 10 ตัวอย่างต่อเงื่อนไข

การทดลองพบว่าได้ค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า α (0.05) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขนาดมุมตีดตัวกลับของ แต่ละขนาดมุมการดัดมีค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ส่วน การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของโลหะแผ่นจะ ดำเนินการโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี (Elemental analyzer) ซึ่งผลการตรวจสอบ แสดงดังตารางที่ 1 ส่วนลักษณะโครงสร้างจุลภาค ของโลหะแผ่นก่อนการดัดขึ้นรูป จะดำเนินการ ตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ทางโลหะวิทยา ดัง ภาพที่ 2 ซึ่งพบว่าโครงสร้างหลักของเหล็กกล้าชนิดนี้ จะประกอบไปด้วยเฟสมาร์เทนไซต์ (M) ซึ่งมีลักษณะ เป็นสีขาว เกิดกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรต์ (F) ที่ปรากฏเป็นสีเทา

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้า ความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่เกรด JSC980Y

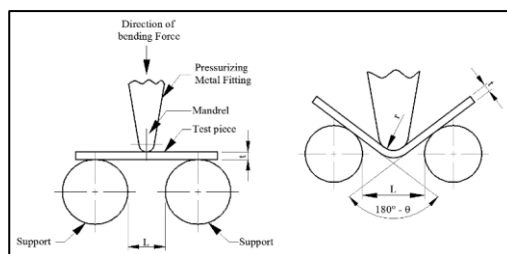
C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	Cr (%)
0.1766	1.823	1.4262	0.0190	0.0306



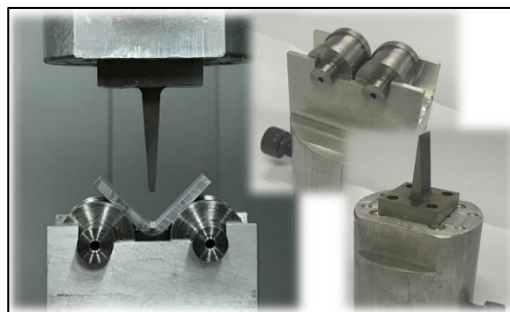
ภาพที่ 2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้ากล้า ชนิดเฟสคู่เกรด JSC980Y ที่อุณหภูมิห้อง

2.2 เครื่องมือและมาตรฐานการทดสอบ

งานวิจัยนี้ดำเนินการทดสอบการดัดแบบ 3 จุดตามมาตรฐาน ISO7438 : 2010 [11] ซึ่งใช้สำหรับทดสอบผลิตภัณฑ์ประเภทโลหะแผ่น โดยรายละเอียดจะแสดงดังภาพที่ 3 ส่วน ซึ่งจะกำหนดระยะห่างระหว่างผิวทรงกระบอกที่ใช้ในการทดสอบ (L) $L = 2r + 3t$ โดยที่ r คือรัศมีการดัดโค้งหรือรัศมี ส่วนปลายของพันธ์ และ t คือ ขนาดความหนาของ ชิ้นทดสอบ ซึ่งกำหนดขนาดทรงกระบอกรองรับให้มีขนาดรัศมี (R) 10 มิลลิเมตร และใช้พันธ์ที่มีขนาด รัศมี (r) 0.25 มิลลิเมตร ให้แรงกดที่จุดกึ่งกลาง ความยาวของชิ้นทดสอบ



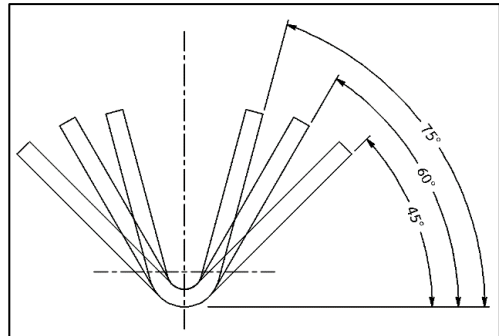
ภาพที่ 3 ภาพแบบการทดสอบการดัดแบบ 3 จุด ตามมาตรฐาน ISO 7438 : 2010 [11]



ภาพที่ 4 เครื่องมือทดสอบการดัดขึ้นรูปแบบ 3 จุด

2.3 ข้อกำหนดการทดลอง

ทำการทดสอบโดยใช้ชุดแม่พิมพ์สำหรับทดสอบการติดตามข้อกำหนดของวัตถุประสงค์ ขอบเขตการวิจัย และมาตรฐานการทดสอบ ดังภาพที่ 4 โดยจะติดตั้งชุดแม่พิมพ์บนเครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์ รุ่น Zwick / Z020 เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการดัดตัวกลับ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและกลไกความเสียหายของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง โดยจะดำเนินการดัดขึ้นรูปโลหะแผ่นที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 4 ระดับ คืออุณหภูมิห้อง 200°C 400°C และ 600°C โดยขึ้นทดสอบจะถูกอบให้ความร้อนด้วยเตาไฟฟ้าและใช้การควบคุมอุณหภูมิแบบ Proportional integral derivative (PID) ซึ่ง จะทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งใกล้กับขึ้นทดสอบมากที่สุดเพื่อความแม่นยำในการควบคุมอุณหภูมิ โดยทำการอบที่อุณหภูมิสูงกว่าที่กำหนดประมาณ 20 °C เพื่อชดเชยการสูญเสียความร้อนขณะนำขึ้นทดสอบไปทำการดัดขึ้นรูป กำหนดความเร็วในการกดดัดที่ 120 มิลลิเมตร/นาที โดยไม่ใช้สารหล่อลื่น ทำการบันทึกผลการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลและประเมินความสามารถในการดัดขึ้นรูปรวมทั้งตรวจสอบวิวัฒนาการความเสียหายของขึ้นทดสอบที่มุมการดัด 45° 60° และ 75° ตามลำดับ ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ขนาดช่วงของมุมในการทดสอบการดัด

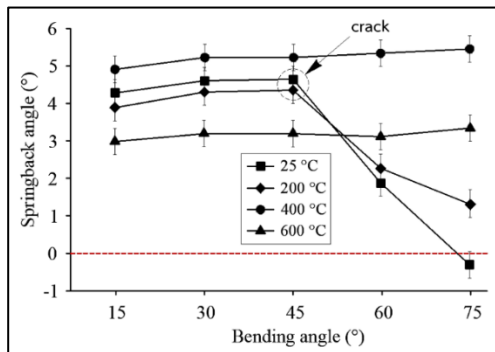
2.4 การบันทึกผลการทดลอง

ขึ้นทดสอบที่ได้จากดัดขึ้นรูปด้วยขนาดมุมที่แตกต่างกัน (ภาพที่ 5) จำนวน 10 ชิ้น โดยขึ้นทดสอบ จะถูกนำไปถ่ายภาพด้านหน้าเพื่อวัดขนาดมุมด้วยเครื่องโปรไฟล์โปรเจกเตอร์ (Profile projector) โดยการลากเส้นอ้างอิงที่ขอบขึ้นทดสอบเพื่อวัดขนาดมุมและเปรียบเทียบขนาดมุมดัดตัวกลับ ซึ่งผลการวัดขนาดมุมดัดตัวกลับจะแสดงดังกราฟในภาพที่ 6 จากนั้นจะนำขึ้นทดสอบไปตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวการดัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ (Optical microscope, OM) ดังภาพที่ 7 จากนั้นจะนำขึ้นทดสอบไปหล่อด้วยเรซิน ชัดผิวเรียบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320 – 1,200 และ ผงลูมินาขนาด 0.3 ไมครอนเมตร เพื่อตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคและความเสียหายบริเวณมุมการดัด โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Light optical microscope, LOM) และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลกระทบของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อขนาดมุมตีดตัวกลับ

การตีดตัวกลับเป็นปัญหาสำคัญที่พบบ่อยที่สุดในกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดปัญหาในกระบวนการประกอบชิ้นส่วน



ภาพที่ 6 ขนาดมุมตีดตัวกลับที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

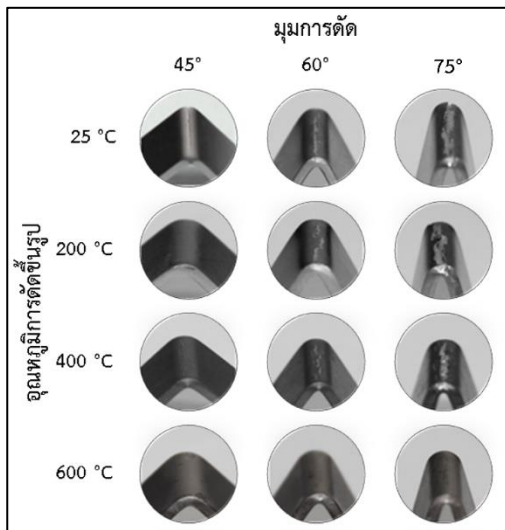
จากผลการทดลองในภาพที่ 6 แสดงให้เห็นว่าการดัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) และ 200 °C มีขนาดของมุมตีดตัวกลับเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงของมุมดัดขึ้นรูปตั้งแต่ 15°-45° คือการดัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้องด้วยมุมการดัด 15° จะมีขนาดมุมตีดตัวกลับเฉลี่ยที่ 4.324° และที่มุมการดัด 45° จะมีขนาดมุมตีดตัวกลับเฉลี่ยที่ 4.578° และขนาดมุมตีดตัวกลับจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อขนาดมุมการดัดเพิ่มสูงกว่า 45° โดยที่มุมการดัด 60° จะมีขนาดมุมตีดตัวกลับเฉลี่ยที่ 1.892° ส่วนผลการดัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 200 °C ด้วยมุมการดัด 15° จะมีขนาดมุมตีดตัวกลับเฉลี่ยที่ 3.907° และที่มุมการดัด 45° จะมีขนาดมุมตีดตัวกลับเฉลี่ยที่ 4.340° และขนาดมุมตีดตัวกลับจะลดลงอย่างรวดเร็วที่มุมการดัด 60° ซึ่งมีขนาดมุมตีดตัวกลับเฉลี่ยที่ 2.165° ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดรอยแตกร้าวบนพื้นผิวการดัด ส่วนการดัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ

การดัด 400 °C จะพบว่าขนาดมุมตีดตัวกลับเกิดขึ้นสูงสุดเนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนรูปของเฟสเบนไนต์ [12] ซึ่งพบว่าที่มุมการดัด 15° จะมีขนาดมุมตีดตัวกลับเฉลี่ยที่ 4.950° และขนาดมุมตีดตัวกลับจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อขนาดมุมการดัดเพิ่มสูงขึ้นโดยที่มุมการดัด 75° จะมีขนาดมุมตีดตัวกลับเฉลี่ยที่ 5.679° ส่วนการดัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 600 °C พบว่ามีขนาดของมุมตีดตัวกลับน้อยที่สุด โดยที่มุมการดัด 15° จะมีขนาดมุมตีดตัวกลับเฉลี่ยที่ 3.057° และขนาดมุมตีดตัวกลับจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อขนาดมุมการดัดเพิ่มสูงขึ้นโดยที่มุมการดัด 75° จะมีขนาดมุมตีดตัวกลับเฉลี่ยที่ 3.274°

3.2 ลักษณะและความเสียหายบนพื้นผิวการดัด

ภายหลังการทดสอบการดัดจะนำชิ้นทดสอบไปทำการตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวการดัดเนื่องจากพื้นผิวส่วนนี้เป็นส่วนที่ได้รับ ความเค้นแรงดึงสูงสุดด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ (OM) โดยลักษณะของพื้นผิวขึ้นทดสอบจากการดัดขึ้นรูปด้วยมุมดัด 75° แสดงดังภาพที่ 7 ซึ่งพบว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านการดัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) จะปรากฏรอยแตกร้าวบนพื้นผิวการดัดอย่างชัดเจนที่มุมการดัด 45° ซึ่งรอยแตกจะมีลักษณะเป็นแนวเส้นตลอดความกว้างของชิ้นทดสอบและรอยแตกดังกล่าวจะขยายตัวกว้างขึ้นเมื่อมุมการดัดเพิ่มสูงขึ้น จนถึงมุมการดัด 75° รอยแตกร้าวจะขยายกว้างและฉีกขาดออกจากกันอย่างสมบูรณ์ ส่วนชิ้นทดสอบที่ผ่านการดัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 200 °C รอยแตกร้าวจะเริ่มปรากฏที่มุมการดัด 60° ส่วนการดัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 400 °C รอยแตกร้าวจะเริ่มปรากฏให้เห็นที่มุมการดัด 45° โดยลักษณะของรอยแตกจะเกิดขึ้นเป็นหลายแนวเส้นซึ่งแตกต่างจากการดัดขึ้น

รูปที่ระดับอุณหภูมิอื่น ๆ ส่วนการตัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 600 °C จะไม่ปรากฏรอยแตกร้าวบนพื้นผิวขึ้นทดสอบแต่อย่างใด



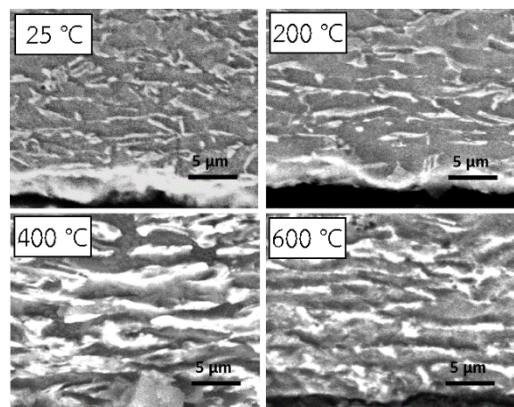
ภาพที่ 7 ลักษณะพื้นผิวขึ้นทดสอบจากการตัดที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

จากผลการทดลองดังกล่าวพบว่ามี ความสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Davidkov [13] และ Tsoupis [14] ซึ่งอธิบายได้ว่ารอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวการตัดเป็นผลมาจากความเค้นดึงที่เพิ่มสูงขึ้นขณะเกิดการเปลี่ยนรูปถาวร จึงส่งผลทำให้สมบัติความเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุลดลง อย่างไรก็ตามข้อบกพร่องดังกล่าวจะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณส่วนโค้งนอกสุดของมุมการตัด เนื่องจากเป็นส่วนที่ความเค้นดึงเกิดขึ้นสูงสุดเมื่อขนาดมุมการตัดเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลต่อค่าความเค้นดึงมากขึ้น ทำให้ร่องลึกบนพื้นผิวขยายตัวเกิดเป็นรอยแตกร้าวที่ชัดเจนมากขึ้น ส่วนผลกระทบของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อความเสียหายของชิ้นทดสอบ จะพบว่าความเสียหายของพื้นผิวจะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจาก

การเปลี่ยนแปลงของลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 400 °C เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิที่วัสดุเปลี่ยนโครงสร้างเป็นเฟสเบนไนต์เพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้วัสดุมีสมบัติเปราะในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเป็น 600 °C โครงสร้างจุลภาคของวัสดุจะมีปริมาณของเฟสออสเทนไนต์เพิ่มมากขึ้นขณะที่เฟสมาร์เทนไซต์มีปริมาณลดลง จึงส่งผลให้วัสดุมีความสามารถในการยืดตัวเพิ่มสูงขึ้น

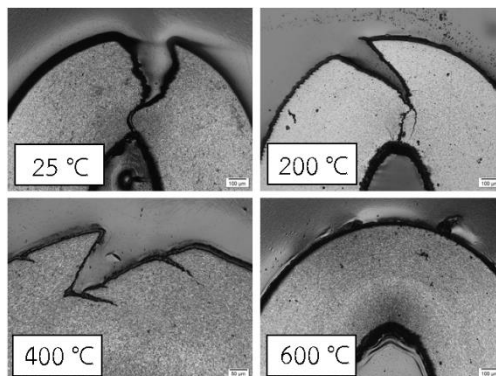
3.3 ลักษณะและความเสียหายของโครงสร้างจุลภาค

ชิ้นทดสอบที่ได้จากการตัดขึ้นรูปจะถูกนำไปหล่อด้วยเรซิน ชัดผิวเรียบด้วยกระดาษทราย และผงอลูมินารวมทั้งกัดผิวด้วยกรดเคมี จากนั้นจะนำไปตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OLYMPUS, BX 60 M) และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) โดยลักษณะโครงสร้างจุลภาคหลังการตัดขึ้นรูปจะแสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 โครงสร้างจุลภาคหลังการตัดขึ้นรูปของเหล็กกล้า JSC980Y ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

จากภาพที่ 8 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบจากการตัดขึ้นรูปด้วยขนาดมุม 75° ที่อุณหภูมิห้อง 200 °C 400 °C และ 600 °C ตามลำดับ ผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคในตำแหน่งของบริเวณมุมการตัดบริเวณที่อยู่ใกล้พื้นผิวด้านนอกของมุมการตัด ซึ่งเป็นส่วนที่ได้รับความเค้นดึง (Tensile stress) สูงสุด จะพบว่าชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านการอบให้ความร้อน (25 °C) ลักษณะโครงสร้างจุลภาคจะประกอบด้วยไปด้วยเฟสมาร์เทนไซต์ (สีขาว) เกิดกระจายอยู่ในโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์ (สีเทา) ส่วนชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิ 200 °C จะพบว่าโครงสร้างจุลภาคเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำและใช้เวลาในการอบให้ความร้อนค่อนข้างสั้น เมื่ออุณหภูมิการอบให้ความร้อนเพิ่มขึ้นเป็น 400 °C จะพบการเปลี่ยนรูปของโครงสร้างจุลภาคที่ชัดเจนขึ้น เนื่องจากเกิดการแพร่ของธาตุคาร์บอนจากเฟสมาร์เทนไซต์เกิดเป็นเฟสเบนไนต์ (Bainite) และคาร์ไบด์ขนาดเล็กหรือซีเมนไต์ (Fe_3C) กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์ ($\alpha\text{-Fe}$) และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 600 °C จะพบว่าในโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์จะมีปริมาณของเฟสมาร์เทนไซต์และปริมาณคาร์ไบด์ลดลง ซึ่งผลการตรวจสอบดังกล่าวมีความสอดคล้องกับแผนภาพ TTT ของวัสดุ และงานวิจัยของ Sirinakorn และคณะ [15] และ Anazadeh และคณะ [16]



ภาพที่ 9 ลักษณะความเสียหายในแนวภาคตัดขวางของชิ้นทดสอบที่มุมตัด 75° ภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

นอกจากนั้นผลการตรวจสอบพื้นผิวภาคตัดขวางของชิ้นทดสอบบริเวณมุมการตัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงดังภาพที่ 9 จะพบว่าการตัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้องและการอบให้ความร้อนที่ 200 °C จะพบรอยแตกกว้างขนาดใหญ่และมีความเสียหายที่รุนแรงบนพื้นผิวภายนอกของมุมตัด โดยชิ้นทดสอบจะขาดจากกันเป็น 2 ส่วนหลังการตัดขึ้นรูปด้วยมุมตัด 75° ส่วนชิ้นทดสอบที่ทำการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400 °C พบความรุนแรงของการแตกร้าว น้อยลงและรอยแตกกว้างจะเกิดขึ้นเป็นหลายแนวเส้น และชิ้นทดสอบที่ทำการอบให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิ 600 °C จะไม่ปรากฏรอยแตกร้าวบนพื้นผิวของภาคตัดขึ้นรูปทดสอบแต่อย่างใด

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและขนาดมุมการดัดขึ้นรูปที่ส่งผลต่อขนาดมุมดัดตัวกลับ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและลักษณะความเสียหายของชิ้นงานสำเร็จหลังการดัดขึ้นรูปสามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิการขึ้นรูปและขนาดมุมการดัด จะส่งผลโดยตรงต่อความเที่ยงตรงของขนาดชิ้นงานสำเร็จในรูปของขนาดมุมดัดตัวกลับ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและความเสียหายของชิ้นงานสำเร็จ ซึ่งพบว่าขนาดมุมดัดตัวกลับจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อขนาดมุมการดัดเพิ่มมากขึ้นส่วนการดัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 400 °C จะมีขนาดมุมดัดตัวกลับสูงที่สุด เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่เกิดการเปลี่ยนรูปของเฟสเบไนต์ และความสามารถในการขึ้นรูปของโลหะแผ่นจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อวัสดุมีอุณหภูมิสูงกว่า 400 °C เนื่องจากปริมาณเฟสมาเทนไซด์ที่ลดน้อยลงซึ่งส่งผลทำให้วัสดุมีความสามารถในการยืดตัวหรือมีความเหนียวเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับลักษณะโครงสร้างจุลภาค ความเสียหายที่เกิดบนพื้นผิวการดัดของชิ้นทดสอบ และความเสียหายภายในโครงสร้างจุลภาคบริเวณมุมการดัด ซึ่งพบว่ารอยแตกร้าวหรือความเสียหายจะเกิดขึ้นได้ง่ายเมื่อทำการดัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่ำ โดยรอยแตกจะเริ่มก่อตัวบนขอบผิวด้านนอกซึ่งเป็นส่วนที่เกิดความเค้นดึงสูงสุดและขยายตัวเข้าสู่กึ่งกลางความหนาชิ้นทดสอบเมื่อขนาดมุมการดัดเพิ่มสูงขึ้น

ดังนั้นในการประยุกต์ใช้วิธีการขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ที่อุณหภูมิแบบอุ่นเพื่อหลีกเลี่ยงการแตกร้าวเสียหายและลดพฤติกรรมการดัดตัวกลับของชิ้นงานสำเร็จ จึงควรขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงกว่า 400 °C แต่ไม่ควรให้สูงกว่าอุณหภูมิ

การเกิดผลึกใหม่ของวัสดุเพราะจะส่งผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานสำเร็จ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่สาขาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี ที่อนุเคราะห์เครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินการวิจัยจนงานวิจัยฉบับนี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ozdemir M, Gökmeşe H, Dilipak H, et al. Investigation as experimental and micro-structural of the effect to spring back/forward amount of 16Mo3 (1.5415) sheet materials of different heat-treatments. ISITES, E-Publishing, 2014; 148-55.
- [2] Imai K, Koyama J, Jin Y. High-accuracy V-bending system by real time identifying material property. J Mater Process Tech, 2008;201(1-3):193-7.
- [3] Tekaslan Ö, Şeker U, Özdemir A. Determining spring back amount of steel sheet metal has 0.5 mm thickness in bending dies. Material and Design, 2006; 27(3):251-8.
- [4] Ragai L, Lazim D, Nemes A. Anisotropy and spring-back in draw-bending of stainless steel 410: experimental and

- numerical study. J Mater Process Tech, 2005;166(1):116-7.
- [5] Sousa L, Castro C, Antonio C. Optimal design of V and U bending processes using genetic algorithms. J Mater Process Tech, 2006;172(1):35-41.
- [6] Phanitwong W, Thipprakmas S. Determination of Coined-Bead Geometry in the V-Bending Process. Advances in Mechanical Engineering. 2014;63:45-52.
- [7] Thipprakmas S. Finite Element Analysis on the Coined-Bead Mechanism during the V Bending Process. Material and Design. 2011;32(10):4909-17.
- [8] Gökmeşe H, Özdemir M. The Effect of Heat Treatment on the Formability Behavior of Hardox-500 Sheet Material. GU J Sci, Part: C. 2016;4(4):343-9.
- [9] Luo L, Li W, Wang L, et al. Tensile behaviors and deformation mechanism of a medium Mn-TRIP steel at different temperatures. Mater Sci Eng. 2017; 682: 698–703.
- [10] Yanagimoto J, Oyamada K, Nakagawa T. Springback of high-strength steel after hot and warm sheet formings. CIRP Ann. 2005;54(1): 213–6.
- [11] ASM International. Mechanical Testing and Evaluation, ASM Handbook., Vol. 8. Ohio, USA, 2000.
- [12] Zhu M, Xu G, Zhou M, et al. Effects of tempering on the microstructure and properties of a high-strength bainite rail steel with good toughness, Metals (Basel). 2018;8(7):484.
- [13] Davidkov A, Jain M K, Petrov R H, et al. Strain localization and damage development during bending of Al-Mg alloy sheets, Mater Sci Eng. 2012;(550):395–407.
- [14] Tsoupis I, Hildering S, Merklein M. Prediction of damage in small curvature bending processes of high strength steels using continuum damage mechanics model in 3D simulation, Prod Eng. 2013;7(2–3):239–49.
- [15] Sirinakorn T, Uthaisangskuk V. Effects of The Tempering Temperature on Mechanical Properties, J Met Mater Miner. 2014;24(1):13–20.
- [16] Anazadeh A S, Kheirandish S. Affect of the tempering temperature on the microstructure and mechanical properties of dual phase steels. Mater Sci Eng .2011;532-41.

การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ช่วยในการจับยึดชิ้นงานสำหรับกระบวนการตัด
แบบหลายขั้นตอนบนเครื่องตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้า

Designing and manufacturing clamping accessory for multi-stage cutting
process on the wire electrical discharge machine

กมลพงศ์ แจ่มกมล¹, ปิยะพงษ์ คำคุณ^{2*}

Kamonpong Jamkamon¹, Piyapong Kumkoon²

^{1,2*}ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

^{1,2*}Department of Mechanical and Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of
Technology Krungthep, Thailand

*Corresponding Author. Tel. 08 7512 29030, E-mail: piyapong.k@mail.rmuk.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างอุปกรณ์ช่วยในการจับยึดชิ้นงานซึ่งใช้ร่วมกับปากกาจับชิ้นงานสำหรับการตัดชิ้นงานแบบหลายขั้นตอนบนเครื่องตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้า โดยชิ้นงานที่ใช้สำหรับการออกแบบอุปกรณ์ช่วยในการจับยึดเป็นปลอกจับดอกสว่านแบบสปริง ซึ่งในการแปรรูปต้องทำการจับชิ้นงานเพื่อตัดส่วนที่เป็นก้นจากนั้นจะต้องทำการสลับด้านและทำการหมุนชิ้นงาน 90 องศา เพื่อตัดในส่วนที่เป็นปลอกจับดอกสว่าน โดยอุปกรณ์ช่วยในการจับยึด เลือกใช้วัสดุเป็นแผ่นอลูมิเนียมและทำการแปรรูปเพื่อให้มีขนาดตามแบบงานโดยใช้เครื่องตัดโลหะด้วยไฟฟ้าและเครื่องกัดเป็นหลัก จากการทดลองเพื่อประเมินความสามารถของอุปกรณ์ช่วยในการจับยึดชิ้นงาน พบว่า สมรรถนะของกระบวนการจับยึดมีค่าสูงกว่า 1.330 โดยในส่วนของ การตัดชิ้นงานในบริเวณที่เป็นก้นและส่วนที่เป็นปลอกจับมีค่าสมรรถนะของกระบวนการ 1.852 และ 2.924 ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าสมรรถนะของอุปกรณ์ช่วยในการจับยึดชิ้นงานที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นมาอยู่ในเกณฑ์การใช้งานได้ดี

คำสำคัญ : การตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้า, การออกแบบอุปกรณ์จับยึด, ปลอกจับดอกสว่านแบบสปริง

ABSTRACT

The aim of this research is to design and manufacture a clamping aid used in conjunction with a vise for multi-stage cutting on the wire electrical discharge machining. The workpiece used for the design of clamping aids is a spring collet of the drill chuck. The machining process requires holding the workpiece to cut the shank part, then the workpiece must be reversed and rotated 90 degrees to cut the part of the spring collet. The material used for the

Received 14-06-2021

Revised 03-08-2021

Accepted 04-08-2021

construction of the clamping accessory is an aluminum plate. The wire electrical discharge machining and milling were the main processes for work material removed as the design. The experimental result was found that the capability process of clamping device was higher than 1.330 The capability process of the cutting in the region of shank and collet part of drill chuck was resulted by 1.852 and 2.924, respectively. From these results, it can be concluded that the performance of the clamping device designed and manufactured is sufficient to use for multiple cutting processes in the wire electrical discharge machining.

Keyword: Wire electrical discharge machining, Clamping design, Spring collet

1. บทนำ

การตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้า (Wire electrical discharge machining, WEDM) เป็นกระบวนการแปรรูปสมัยใหม่ที่ใช้สำหรับการแปรรูปชิ้นงานโดยใช้เส้นลวดเป็นอิเล็กโทรด (Wire electrode) ในการกัดเซาะโดยการควบคุมพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าภายใต้การปกคลุมด้วยของเหลวไดอิเล็กทริก (Dielectric fluid) ซึ่งเป็นนิยมใช้สำหรับการแปรรูปชิ้นส่วนที่มีรูปร่างซับซ้อนและยากต่อการตัดเฉือนด้วยกระบวนการทางกล [1,2] กระบวนการดังกล่าวเป็นการควบคุมพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าเพื่อให้เกิดการสปาร์คและแปรรูปโลหะโดยที่อิเล็กโทรดไม่สัมผัสกับชิ้นงาน

ส่วนประกอบของเครื่องกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้ามีโตะงานอยู่ภายในถังซึ่งบรรจุของเหลวไดอิเล็กทริก ทั้งนี้พื้นผิวโตะงานเป็นระนาบอ้างอิงและใช้ในการจับยึดชิ้นงาน และพื้นที่การตัดชิ้นงานจะมีขนาดเล็กกว่าโตะงานทำให้การเตรียมวัสดุชิ้นงานจำเป็นต้องเผื่อขนาดสำหรับการจับยึด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าการตัดชิ้นงานที่มีขนาดเล็กจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ช่วยในการจับยึด โดยงานวิจัยของ Bicknell G, Manogharan G. [1] ทำการตัดชิ้นงานโดยการกัดเซาะโลหะด้วยลวดไฟฟ้าบนวัสดุ

เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L เพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ เวลาเปิด เวลาปิด และแรงดันไฟฟ้า ซึ่งทำการติดตั้งชิ้นงานเพลากลมและใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานโดยใช้พื้นผิวโตะงานเป็นระนาบอ้างอิง พบว่าพารามิเตอร์เหล่านี้ส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการตัดชิ้นงาน Wang Y และคณะ [3] ทำการทดลองตัดเฟืองในระดับไมโครโดยใช้กระบวนการตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้า พบว่า การพัฒนาอุปกรณ์จับยึดให้มีความยืดหยุ่นของศูนย์กลางแบบในตัว (Self-centering flexible fixture) เป็นกุญแจสำคัญสำหรับการจับยึดอย่างแม่นยำ Jan Bouquet J และคณะ [4] ศึกษาการผลิตเฟืองต้นแบบอย่างรวดเร็วโดยใช้เทคโนโลยีที่ต่างกัน พบว่า การกัดเฟือง (Hobbing) และการเจียรระนาบ (Grinding) จำเป็นต้องมีการออกแบบและสร้างเครื่องมือเฉพาะ ในขณะที่การตัดด้วยลวดไฟฟ้าจะมีความแม่นยำและคุณภาพพื้นผิวที่ดีแต่จำเป็นต้องพัฒนากระบวนการจับยึดเพื่อให้สามารถตัดชิ้นงานได้โดยรอบจากการจับยึดเพียงครั้งเดียว Manoj I. V. และ Narendranath S. [5] ทำการตัดชิ้นงานโดยการเอียงอุปกรณ์จับยึดเพื่อศึกษาผลกระทบที่มีต่อความสามารถในการแปรรูป พบว่าการเอียงอุปกรณ์จับยึดส่งผลให้พื้นที่การกัดเซาะเพิ่มมากขึ้นและความเร็วตัดลดลง จากงานวิจัยเหล่านี้

บ่งชี้ได้ว่าการออกแบบและการจับยึดชิ้นงานเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความแม่นยำในการแปรรูปชิ้นงานโดยการตัดโลหะด้วยไฟฟ้า

ในอุตสาหกรรมการผลิตได้มีการใช้ปากกาจับงานเป็นอุปกรณ์มาตรฐานในการจับยึดชิ้นงาน อย่างไรก็ตามปากกาจับงานที่มีอยู่โดยทั่วไปแล้วจะมีการจับยึดที่อ้างอิงตามรูปทรงมาตรฐานของชิ้นงาน ทำให้การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ช่วย เพื่อให้ปากกาจับงานสามารถจับยึดชิ้นงานที่มีลักษณะซับซ้อนเป็นสิ่งที่ท้าทายสำหรับการก้าวข้ามขีดจำกัดของเครื่องจักรและอุปกรณ์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างอุปกรณ์ช่วยในการจับยึดร่วมกับปากกาสำหรับการจับยึดชิ้นงานที่มีความซับซ้อนทางด้านรูปทรง ทั้งนี้ความสามารถในการจับยึดและความแม่นยำในการแปรรูปจะประเมินจากสมรรถนะของกระบวนการ (Process capability index, CPI) ใช้สัญลักษณ์ว่า C_P สำหรับของเขตตามสเป็ค 2 ด้าน [6,7] ดังสมการที่ 1

$$C_P = \frac{S_U - S_L}{6s} \quad (1)$$

เมื่อ C_P คือ ค่าดัชนีชี้วัดสมรรถนะของกระบวนการ

S_U คือ ค่าของเขตค่าสูงของสเป็ค

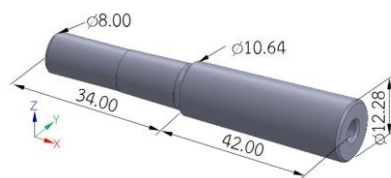
S_L คือ ค่าของเขตค่าต่ำของสเป็ค

s คือ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

2. การดำเนินการทดลอง

การวิจัยนี้แบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก โดยในส่วนแรกเป็นการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ช่วยในการจับยึดชิ้นงานโดยคำนึงถึง ขอบเขตการออกแบบ การออกแบบ และการสร้าง ตลอดจนการทดลองเพื่อประเมินสมรรถนะ

ของอุปกรณ์ช่วยในการจับยึด ในส่วนที่สองเป็นการทดลองตัดเพื่อประเมินสมรรถนะของการตัดชิ้นงานโดยการตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้า ทั้งนี้การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ช่วยในการจับยึดชิ้นงานเป็นกรณีศึกษาสำหรับการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ช่วยในการจับยึดสำหรับการตัดชิ้นงานปลอกจับดอกสว่านแบบสปริง (Spring collet) แสดงใน ภาพที่ 1 ซึ่งมีความซับซ้อนในการตัดเนื่องจากต้องจับยึดและตัดชิ้นงานหลายขั้นตอน ทั้งนี้วัสดุชิ้นงานเป็นเหล็กกล้า JIS SKD 61 ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนมีความแข็งอยู่ในช่วง 46-48 HRC



(ก) แบบวัตถุดิบชิ้นงานก่อนการตัด



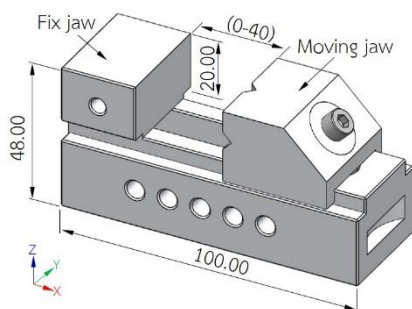
(ข) แบบชิ้นงานสำเร็จภายหลังการตัด

ภาพที่ 1 แบบชิ้นงานสำหรับการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ช่วยในการจับยึด

2.1 ข้อจำกัดของการออกแบบอุปกรณ์ช่วยในการจับยึดชิ้นงาน

การจับยึดชิ้นงานเพื่อทำการตัดโดยเครื่องตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้าซึ่งอ้างอิงจากแบบงานที่แสดงในภาพที่ 1 ซึ่งชิ้นงานมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่สุด 12.28 มิลลิเมตร และมีความยาวสูงสุด 67 มิลลิเมตร ทั้งนี้การตัดในแต่ละส่วนจำเป็นต้องกระทำอย่างเป็น

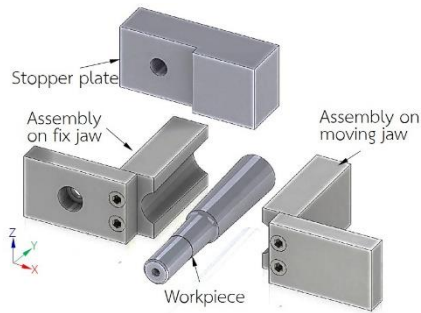
ขั้นตอน โดยบริเวณที่ต้องการตัดประกอบด้วยส่วนที่เป็น
กัน และส่วนที่เป็นรอยบากซึ่งแต่ละรอยจะทำมุมกัน 90
องศา ทั้งนี้การตัดชิ้นงานในบริเวณส่วนที่เป็นกัน
จำเป็นต้องจับยึดชิ้นงานฝั่งตรงกันข้ามซึ่งมีลักษณะเป็น
เพลารียว และในการตัดบากร่องชิ้นงานในส่วนที่เป็นกัน
จะถูกจับยึด อย่างไรก็ตามปากกามาตรฐานที่ใช้สำหรับ
การตัดงานซึ่งมีเครื่องหมายการค้าเป็น LINCO Tool
makers vise รุ่น GIN-VB15 ดังแสดงในภาพที่ 2 ขนาด
ความกว้างปากจับ 36 มิลลิเมตร ความยาวสูงสุดที่
สามารถจับได้ 40 มิลลิเมตร และความลึกปากจับ 20
มิลลิเมตร ทั้งนี้เนื่องจากปากจับมาตรฐานของปากกาเป็น
แบบพื้นผิวราบทำให้ไม่สามารถจับยึดชิ้นงานที่มีลักษณะ
เป็นเพลารียวและส่วนที่กันได้โดยตรง ทำให้มีความ
จำเป็นต้องออกแบบและสร้างอุปกรณ์ช่วยในการจับยึดที่
มีลักษณะพื้นผิวสัมผัสด้านหนึ่งเหมือนชิ้นงานและอีก
ด้านหนึ่งเหมือนกับปากจับของปากกาเพื่อให้สามารถจับ
ชิ้นงานสำหรับการตัดโดยกระบวนการตัดโลหะด้วยไฟฟ้า
ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 2 ปากกาจับชิ้นงานมาตรฐาน

2.2 การออกแบบและการสร้างอุปกรณ์ช่วยใน การจับยึดชิ้นงาน

การตัดงานขั้นตอนแรกในส่วนที่เป็นกัน
อุปกรณ์ช่วยในการจับยึดชิ้นงานถูกออกแบบให้มี
ลักษณะพื้นผิวโค้งเว้าและมีความลาดเอียงเหมือนกับ
ชิ้นงาน และอีกด้านหนึ่งแบนราบมีขนาดความกว้าง
และยาวที่สามารถประกอบและแนบสนิทเข้ากับพื้นผิว
ของปากทั้งฝั่งที่เป็นปากตายและปากเคลื่อนที่ ดังแสดง
ในภาพที่ 3 (ก) อุปกรณ์ช่วยในการจับยึดฝั่งปากตาย (Fix
jaw) ถูกจับยึดเข้ากับปากกาโดยใช้สกรูขนาด M5 (DIN
EN ISO 4762) และมีการติดตั้งแผ่นโลหะ (Stopper
plate) เพื่อการจับยึดชิ้นงานในแต่ละครั้งอยู่ในตำแหน่ง
ที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด ในขณะที่อุปกรณ์ช่วยในการจับ
ยึดที่ประกอบเข้ากับปากของปากกาฝั่งเคลื่อนที่ (Moving
jaw) จะมีระยะคลอนเล็กน้อยเพื่อให้มีความยืดหยุ่นใน
การจับยึดชิ้นงาน วัสดุอลูมิเนียมถูกเลือกใช้สำหรับ
การสร้างอุปกรณ์ช่วยในการจับยึดเนื่องจากแปรรูปได้
ง่ายและเป็นวัสดุที่อ่อนซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อการเกิดรอย
ขีดข่วนบนชิ้นงาน ทั้งนี้ชิ้นส่วนอุปกรณ์ช่วยในการจับยึด
ต่างสร้างขึ้นโดยใช้เครื่องจักรกลอัตโนมัติ
(Computerized numerical control, CNC) เป็นเครื่อง
ตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้ายี่ห้อ Mitsubishi รุ่น MV1200
(D-cubes Series) และเครื่องกัดที่มีเครื่องหมายการค้า
ของ EMCO รุ่น PC MILL 50 โดยอุปกรณ์ช่วยในการจับ
ยึดชิ้นงานที่สร้างแล้วเสร็จแสดงดังภาพที่ 3 (ข)



(ก) แบบอุปกรณ์ช่วยในการจับยึด

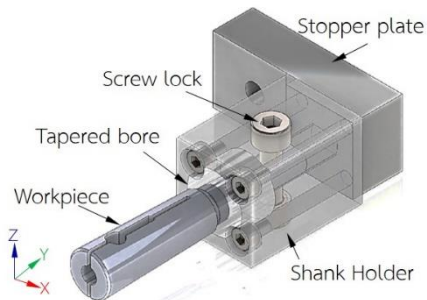


(ข) อุปกรณ์ช่วยสำหรับการจับยึดชิ้นงาน

ภาพที่ 3 อุปกรณ์ช่วยในการจับยึดสำหรับการตัดชิ้นงานในส่วนที่เป็นกัน

การตัดในส่วนที่เป็นรอยบากจำเป็นต้องจับยึดชิ้นงานในส่วนที่เป็นกันทำให้อุปกรณ์ช่วยในการจับชิ้นงานในส่วนนี้จำเป็นต้องมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสและมีช่องตรงกึ่งกลางที่มีรูปทรงเหมือนกับกันของชิ้นงาน (Shank holder) ซึ่งมีชิ้นส่วนที่เป็นรูเรียว (Tapered bore) คอยประคองชิ้นงานให้เข้าตำแหน่งศูนย์กลางดังแสดงการออกแบบอุปกรณ์ช่วยสำหรับการจับยึดในภาพที่ 4 (ก) ทั้งนี้อุปกรณ์ช่วยในการจับยึดต้องประกอบเข้าด้วยกันโดยมีระยะคลอนน้อยที่สุดเพื่อให้หลีกเลี่ยงความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดจากการสลับตำแหน่งของการจับยึดในการบากร่องนอกเหนือจากนี้ได้มีการเจาะรูทำเกลียวฝึงสกรู (Screw lock) เพื่อช่วยในการจับยึดชิ้นงานโดยชิ้นส่วนเหล่านี้

ผลิตขึ้นจากวัสดุอลูมิเนียมและแปรรูปซึ่งใช้กระบวนการตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้าเป็นหลัก



(ก) แบบอุปกรณ์ช่วยในการจับยึด

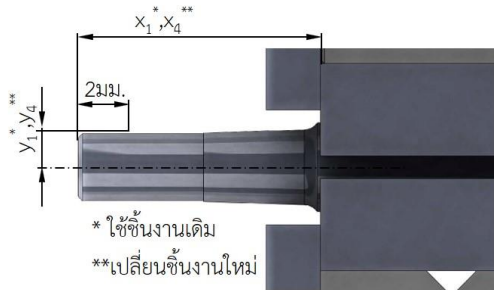


(ข) อุปกรณ์ช่วยสำหรับการจับยึดชิ้นงาน

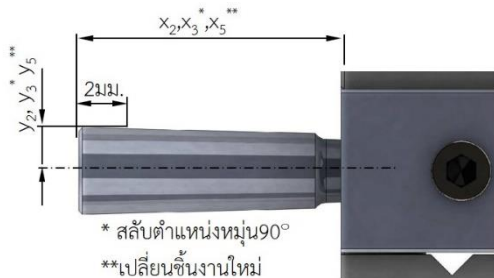
ภาพที่ 4 อุปกรณ์ช่วยในการจับยึดสำหรับการตัดชิ้นงานในส่วนที่เป็นรอยบาก

2.3 การประเมินสมรรถนะของอุปกรณ์ช่วยจับยึดชิ้นงาน

การระบุตำแหน่งของเครื่องตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (Mitsubishi รุ่น MV1200) มีค่าความละเอียดในอยู่ที่ 0.0001 มิลลิเมตร และมีค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดจากการทดลองอยู่ที่ 0.001 มิลลิเมตร ทั้งนี้ในการการประเมินสมรรถนะของอุปกรณ์ช่วยจับยึดชิ้นงานสำหรับการตัดชิ้นงานในส่วนที่เป็นกัน จะทำการติดตั้งชิ้นงานบนเครื่องจักรและระบุพิกัดจุดศูนย์กลางของชิ้นงานจากตำแหน่งอ้างอิงในแนวแกนเป็น x_1 และแนวแกน y_1 ดังแสดงในภาพที่ 5 (ก)



(ก) การจับยึดเพื่อตัดกันของชิ้นงาน



(ข) การจับยึดเพื่อตัดรอยบากของชิ้นงาน

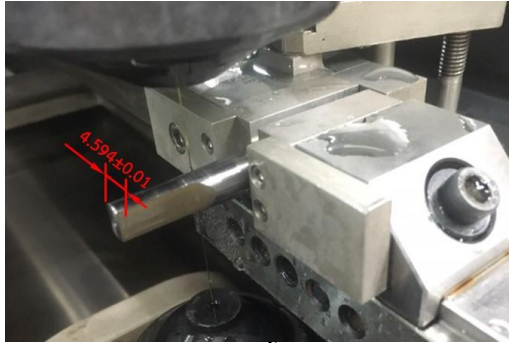
ภาพที่ 5 ตำแหน่งอ้างอิงในการวัดเพื่อหาค่าสมรรถนะของอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน

ในส่วนของการตัดชิ้นงานสำหรับตัดรอยบากร่องกำหนดตำแหน่งอ้างอิงในแนวแกนเป็น x_2 และแนวแกน y_2 และการถอดเพื่อหมุนจับชิ้นงานใหม่ 90 องศา กำหนดตำแหน่งอ้างอิงในแนวแกนเป็น x_3 และแนวแกน y_3 ดังแสดงในภาพที่ 5 (ข) โดยการทดลองจะทำการถอดและจับยึดชิ้นงานเดิมเพื่อทำซ้ำจำนวน 35 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของอุปกรณ์ช่วยในการจับยึดชิ้นงานที่ได้ออกแบบและสร้างชิ้นงาน

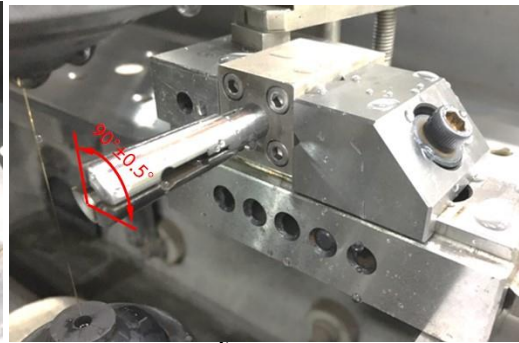
ในกรณีการจับยึดชิ้นงานที่ต่างกันจำนวน 35 ชิ้นสำหรับการตัดชิ้นงานส่วนที่เป็นกันและรอยบากกำหนดตำแหน่งอ้างอิงการวัดในแนวแกนเป็น x_4, y_4 และ x_5, y_5 ตามลำดับ และผลที่ได้จากการทดลองจะถูกนำไปคำนวณหาสมรรถนะของกระบวนการในการการจับยึดโดยมีค่าความคลาดเคลื่อน (พิกัดความเผื่อ) กำหนดไว้ที่ ± 0.005 มิลลิเมตร

2.4 การประเมินสมรรถนะในการแปรรูปชิ้นงาน

สมรรถนะในการแปรรูปชิ้นงานจากการใช้อุปกรณ์ช่วยในการจับยึดชิ้นงานจะประเมินจากขนาดความหนาของชิ้นงานในส่วนที่เป็นกันโดยการวัดด้วยไมโครมิเตอร์ที่มีเครื่องหมายการค้าเป็น Mitutoyo มีค่าความละเอียด 0.001 มิลลิเมตร โดยตำแหน่งการวัดส่วนที่เป็นกันของชิ้นงานแสดงดังภาพที่ 6 (ก) และทำการตรวจสอบความฉากของรอยบากด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) ที่มีเครื่องหมายการค้า Olympus รุ่น STM6 ร่วมกับโปรแกรม Olympus stream basic โดยใช้รูปแบบการวัดมุม 4 ตำแหน่ง (4 Point angle) ซึ่งตำแหน่งการวัดจากการตัดชิ้นงานจริงแสดงในภาพที่ 6 (ข) ทั้งนี้ขนาดระบุและพิกัดความเผื่อของกันชิ้นงานที่ 4.594 ± 0.01 มิลลิเมตร และความฉากของรอยบากที่ 90 ± 0.50 องศา



(ก) ตำแหน่งการวัดขนาดชิ้นงานส่วนที่เป็นกัน



(ข) ตำแหน่งการวัดชิ้นงานที่เป็นร่องบาก 90 องศา

ภาพที่ 6 ตำแหน่งการวัดขนาดมุมของชิ้นงาน

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

3.1 ผลการประเมินสมรรถนะของอุปกรณ์
ช่วยจับยึดชิ้นงาน

การตรวจสอบความสามารถของอุปกรณ์ช่วย
ในการจับยึดโดยการวัดระยะห่างจากตำแหน่งอ้างอิง

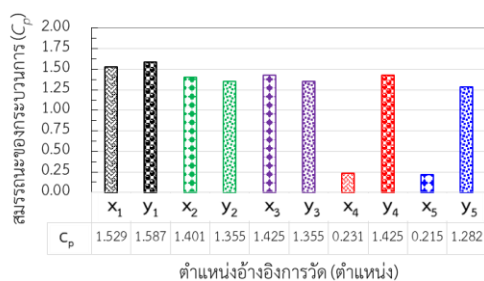
จำนวน 35 ครั้ง ภายใต้เงื่อนไขการถอดแล้วประกอบ
ใหม่โดยใช้วัสดุชิ้นงานเดียวกัน และการถอดแล้ว
ประกอบโดยเปลี่ยนชิ้นงานใหม่แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดลองประเมินสมรรถนะของอุปกรณ์ช่วยในการจัดยึดชิ้นงาน

ครั้งที่	ระยะการวัดจากตำแหน่งอ้างอิง โดยถอดและจับยึดชิ้นงานเดิมซ้ำ (มิลลิเมตร)						ระยะการวัดจากตำแหน่งอ้างอิง โดยถอดเปลี่ยนชิ้นงานใหม่ (มิลลิเมตร)				
	X ₁	Y ₁	X ₂	Y ₂	X ₃	Y ₃	X ₄	Y ₄	X ₅	Y ₅	
1	33.6885	4.1229	44.6673	6.2180	44.6664	6.2179	33.6834	4.1216	44.6645	6.2161	
2	33.6898	4.1223	44.6684	6.2165	44.6665	6.2168	33.6999	4.1229	44.6678	6.2168	
3	33.6917	4.1242	44.6696	6.2199	44.6697	6.2170	33.6958	4.1213	44.6782	6.2200	
4	33.6889	4.1243	44.6695	6.2204	44.6699	6.2167	33.6879	4.1234	44.6695	6.2192	
5	33.6910	4.1233	44.6673	6.2189	44.6675	6.2168	33.7004	4.1232	44.6702	6.2184	
6	33.6900	4.1241	44.6675	6.2190	44.6681	6.2188	33.6938	4.1228	44.6711	6.2186	
7	33.6896	4.1216	44.6680	6.2155	44.6686	6.2176	33.7023	4.1234	44.6650	6.2170	
8	33.6887	4.1241	44.6666	6.2174	44.6654	6.2198	33.6867	4.1240	44.6666	6.2190	
9	33.6900	4.1227	44.6666	6.2182	44.6673	6.2178	33.6947	4.1236	44.6780	6.2193	
10	33.6885	4.1232	44.6650	6.2183	44.6669	6.2192	33.6934	4.1240	44.6871	6.2191	
11	33.6902	4.1226	44.6663	6.2184	44.6681	6.2165	33.7001	4.1234	44.6635	6.2167	
12	33.6879	4.1226	44.6689	6.2174	44.6672	6.2181	33.7046	4.1216	44.6629	6.2187	
13	33.6887	4.1239	44.6667	6.2167	44.6686	6.2188	33.6948	4.1242	44.6688	6.2168	
14	33.6883	4.1216	44.6677	6.2183	44.6674	6.2192	33.6893	4.1219	44.6734	6.2196	
15	33.6907	4.1227	44.6681	6.2162	44.6686	6.2169	33.6975	4.1208	44.6739	6.2172	

ตารางที่ 1 (ต่อ) ผลการทดลองประเมินสมรรถนะของอุปกรณ์ช่วยในการจัดยึดชิ้นงาน

ครั้งที่	ระยะการวัดจากตำแหน่งอ้างอิง โดยถอดและจับยึดชิ้นงานเดิมซ้ำ (มิลลิเมตร)						ระยะการวัดจากตำแหน่งอ้างอิง โดยถอดเปลี่ยนชิ้นงานใหม่ (มิลลิเมตร)			
	X ₁	Y ₁	X ₂	Y ₂	X ₃	Y ₃	X ₄	Y ₄	X ₅	Y ₅
16	33.6881	4.1237	44.6658	6.2162	44.6680	6.2195	33.6883	4.1240	44.6795	6.2195
16	33.6881	4.1237	44.6658	6.2162	44.6680	6.2195	33.6883	4.1240	44.6795	6.2195
17	33.6913	4.1208	44.6676	6.2183	44.6680	6.2197	33.6865	4.1210	44.6567	6.2162
18	33.6884	4.1209	44.6673	6.2170	44.6657	6.2193	33.6853	4.1217	44.6576	6.2167
19	33.6912	4.1229	44.6677	6.2183	44.6689	6.2163	33.7047	4.1238	44.6734	6.2191
20	33.6904	4.1219	44.6670	6.2174	44.6665	6.2185	33.6983	4.1229	44.6667	6.2165
21	33.6915	4.1220	44.6678	6.2192	44.6676	6.2174	33.6985	4.1215	44.6598	6.2197
22	33.6905	4.1235	44.6704	6.2181	44.6669	6.2168	33.6872	4.1212	44.6831	6.2196
23	33.6913	4.1232	44.6670	6.2176	44.6656	6.2152	33.6894	4.1235	44.6814	6.2189
24	33.6888	4.1220	44.6683	6.2194	44.6688	6.2173	33.6904	4.1237	44.6739	6.2187
25	33.6904	4.1214	44.6686	6.2183	44.6690	6.2160	33.7123	4.1208	44.6765	6.2169
26	33.6895	4.1242	44.6680	6.2160	44.6672	6.2188	33.6956	4.1221	44.6696	6.2164
27	33.6901	4.1214	44.6671	6.2178	44.6693	6.2178	33.6856	4.1215	44.6843	6.2175
28	33.6897	4.1217	44.6670	6.2151	44.6660	6.2176	33.6949	4.1236	44.6737	6.2168
29	33.6897	4.1221	44.6690	6.2180	44.6674	6.2156	33.6893	4.1234	44.6599	6.2197
30	33.6916	4.1241	44.6667	6.2199	44.6659	6.2181	33.7123	4.1211	44.6721	6.2166
31	33.6891	4.1237	44.6672	6.2180	44.6678	6.2193	33.6894	4.1215	44.6629	6.2168
32	33.6895	4.1226	44.6689	6.2192	44.6680	6.2179	33.6983	4.1207	44.6619	6.2191
33	33.6893	4.1234	44.6658	6.2180	44.6672	6.2184	33.7004	4.1221	44.6778	6.2186
34	33.6907	4.1212	44.6674	6.2183	44.6668	6.2195	33.6945	4.1240	44.6656	6.2195
35	33.6896	4.1236	44.6655	6.2184	44.6683	6.2187	33.6993	4.1237	44.6668	6.2194
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.00109	0.00105	0.00119	0.00123	0.00117	0.00123	0.00722	0.00117	0.00776	0.00130
ขนาดระบุ (มิลลิเมตร)	33.6900	4.1225	44.6680	6.2180	44.6680	6.2180	33.6900	4.1225	44.6680	6.2180
พิสัยความเผื่อ (มิลลิเมตร)	± 0.005	± 0.005	± 0.005	± 0.005	± 0.005	± 0.005	± 0.005	± 0.005	± 0.005	± 0.005
S _U (มิลลิเมตร)	33.6950	4.1275	44.6725	6.2230	44.6726	6.2230	33.6950	4.1275	44.6754	6.2230
S _L (มิลลิเมตร)	33.6850	4.1175	44.6625	6.2130	44.6626	6.2130	33.6850	4.1175	44.6654	6.2130
C _P	1.5291	1.5873	1.4006	1.3550	1.4245	1.3550	0.2308	1.4245	0.2148	1.2821



ภาพที่ 7 สมรรถนะของกระบวนการจับยึดชิ้นงาน โดยใช้อุปกรณ์ช่วยในการจับยึด

สมรรถนะของกระบวนการสำหรับการจับยึดชิ้นงานโดยใช้อุปกรณ์ช่วยในการจับยึดแสดงดังภาพที่ 7 พบว่า ความสามารถในการจับยึดชิ้นงานสำหรับการตัดส่วนที่เป็นกันโดยการจับซ้ำด้วยชิ้นงานเดิมซึ่งอ้างอิงตำแหน่งวัด x_1 และ y_1 มีค่าสมรรถนะของกระบวนการ (C_p) อยู่ที่ 1.529 และ 1.587 ตามลำดับ โดยเมื่อพิจารณาแล้ว พบว่า ค่า C_p ที่ได้มากกว่า 1.33 สำหรับกระบวนการทำงานโดยทั่วไป ถือว่ากระบวนการทำงานดีในระดับผ่านเกณฑ์ของค่าความแปรปรวน (Variation) อย่างมีนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่ากระบวนการนั้นใช้งานได้ดี [6] ในส่วนของการจับยึดชิ้นงานสำหรับการตัดส่วนที่เป็นรอยบากอ้างอิงตำแหน่งวัด x_2 , y_2 , x_3 และ y_3 พบว่า มีค่าสมรรถนะของกระบวนการจับยึดอยู่ที่ 1.401, 1.355, 1.425 และ 1.355 ตามลำดับ จึงทำให้สามารถสรุปได้ว่าอุปกรณ์ช่วยในการจับยึดที่ได้ออกแบบและสร้างมีสมรรถนะของกระบวนการในการจับยึดอยู่ในเกณฑ์ใช้งานได้ดี

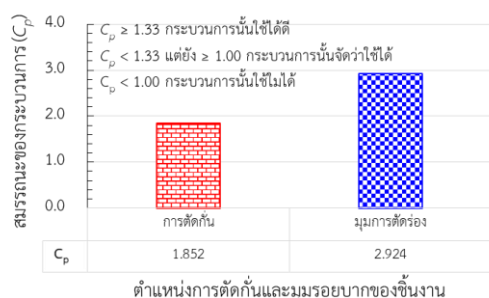
เมื่อพิจารณาถึงเงื่อนไขการใช้งานจริงที่ต้องมีการถอดเปลี่ยนชิ้นงาน พบว่า สมรรถนะของกระบวนการจับยึดสำหรับการตัดชิ้นงานส่วนที่เป็นกันโดยอ้างอิงตำแหน่งวัด x_4 และ y_4 มีค่า 0.231 และ 1.425 ตามลำดับ โดยในส่วนของการจับยึด

ชิ้นงานสำหรับตัดรอยบากจากการอ้างอิงตำแหน่งวัด x_5 และ y_5 มีค่า 0.215 และ 1.282 ซึ่งสมรรถนะของกระบวนการที่น้อยกว่า 1.33 แต่มากกว่า 1 จัดว่ากระบวนการนั้นใช้ได้ อย่างไรก็ตามก็ตามผลจากการทดลอง พบว่า มีค่าสมรรถนะของกระบวนการจับยึดที่น้อยกว่า 1 แสดงว่ากระบวนการจับยึดนั้นไม่สามารถใช้งานได้ นั่นหมายความว่ากระบวนการยังมีความแปรปรวน (Variation) อันเนื่องมาจาก สาเหตุของปัญหาโดยทั่วไป ชนิดที่ยังควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable) อยู่มาก จำเป็นต้องค้นหาพารามิเตอร์ (Parameters) ที่ต้องควบคุมเพิ่มมากขึ้นเพื่อลดความแปรปรวนของกระบวนการลงให้มีค่าไม่เกิน 0.05 จึงจะทำให้ค่า $C_p > 1.33$ ได้ ซึ่งจากการทดลองนี้สามารถอธิบายสมรรถนะของการบวนการจับยึดชิ้นงานที่ต่ำเมื่อทำการเปลี่ยนชิ้นงานได้ว่าเป็นเหตุมาจากชิ้นงานที่แปรรูปมาด้วยกระบวนการก่อนหน้านี้มีขนาดที่แตกต่างกันเนื่องจากในระบบการผลิตมีการยอมรับพิสัยความเผื่อจึงทำให้ส่งผลต่อสมรรถนะในการจับยึด ดังนั้นในการตัดงานจริงจึงต้องทำการปรับตั้งตำแหน่งอ้างอิงในแนวแกน x ใหม่ทุกครั้งเมื่อมีการเปลี่ยนชิ้นงาน [6]

3.2 ผลการประเมินสมรรถนะในการแปรรูปชิ้นงาน

ผลจากการทดลองตัดชิ้นงานในส่วนที่เป็นกันจำนวน 35 ชิ้น มีค่าเฉลี่ยของความหนาชิ้นงาน 5.5938 มิลลิเมตร และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (s) 0.0018 มิลลิเมตร โดยมีค่าพิสัยความเผื่อของชิ้นงานที่กำหนดตามแบบงาน ± 0.01 มิลลิเมตร โดยมีขนาดระบุของชิ้นงานเป็น 4.594 มิลลิเมตร ทำให้สามารถจำแนกเป็นเขตค่าสูงของสเปค (S_U) และเขตค่าต่ำของสเปค (S_L) เท่ากับ 4.604 และ 4.584 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งเมื่อ

คำนวณหา ค่าสมรรถนะของ กระบวนการตัด พบว่ามีค่าอยู่ที่ 1.852 โดยในส่วน ของการตรวจสอบมุม 90 องศา ของรอยบากร่องที่มี ขนาดพิสัยความเผื่อ ± 0.5 องศา (อ้างอิงค่าพิสัยความ เผื่อทั่วไป DIN ISO 2768-1) [7] พบว่า ขนาดของมุม เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 90.016 องศา และมีค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน 0.057 องศา โดยมีค่าสมรรถนะของ กระบวนการตัดเท่ากับ 2.924 (คำนวณจาก $[(90 + 0.5) - (90 - 0.5)] / (6 \times 0.057)$) แสดงภาพที่ 8 จากภาพเมื่อเทียบกับดัชนีชี้วัดสมรรถนะของ กระบวนการทำให้สามารถสรุปได้ว่าการตัดชิ้นงาน โลหะด้วยลวดไฟฟ้าโดยใช้อุปกรณ์ช่วยในการจับยึดที่ ได้ออกแบบและสร้างขึ้นมาอยู่ในเกณฑ์ใช้งานได้



ภาพที่ 8 สมรรถนะการตัดชิ้นงานโลหะด้วยลวด ไฟฟ้า

4. สรุปผล

การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ช่วยในการจับ ยึดสำหรับการตัดชิ้นงานแบบหลายขั้นตอนบนเครื่อง ตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้าจากการศึกษาและทดลองตัด ชิ้นส่วนปลอกจับดอกส่วนแบบสปริง (Spring collet) สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ความสามารถในการจับยึดของอุปกรณ์ที่ ออกแบบและสร้างขึ้นมาจากการทดสอบประเมิน

สมรรถนะของกระบวนการในการจับยึดเพื่อตัดส่วนที่ เป็นก้นของชิ้นงานโดยอ้างอิงตำแหน่งในแนวแกน x และ y ซึ่งเป็นการถอดและประกอบโดยใช้ชิ้นงานเดิม มีค่า 1.529 และ 1.587 ตามลำดับ ในส่วนของ การจับยึดชิ้นงานเพื่อตัดส่วนที่เป็นปลอกจับ มีค่า สมรรถนะของกระบวนการ 1.401 และ 1.355 และ เมื่อทำการหมุนปรับตำแหน่ง 90 องศา สมรรถนะ ของกระบวนการจับยึดมีค่า 1.425 และ 1.355 ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าสมรรถนะของอุปกรณ์ช่วยใน การจับยึดชิ้นงานอยู่ในเกณฑ์การใช้งานได้ดี

2) สมรรถนะของกระบวนการจับยึดเมื่อ เปลี่ยนชิ้นงานใหม่โดยอ้างอิงระยะการวัด [8] ตาม แนวแกน x สำหรับการตัดส่วนที่เป็นก้นและปลอกจับ ลดเหลือ 0.231 และ 0.215 จัดว่าอยู่ในเกณฑ์การใช้ งานไม่ได้ การลดลงของสมรรถนะมีสาเหตุมาจาก ความคลาดเคลื่อนของชิ้นงานที่จัดเตรียมผลิตซึ่งอยู่ ในเกณฑ์การยอมรับของระบบพิสัยความเผื่อ ดังนั้น ในการปฏิบัติงานจริงต้องทำการปรับตั้งตำแหน่ง อ้างอิงของชิ้นงานสำหรับการตัดในแนวแกน x ทุก ครั้ง

3) สมรรถนะของกระบวนการตัดชิ้นงานโดย ใช้อุปกรณ์ช่วยในการจับยึดสำหรับการตัดชิ้นงาน ส่วนที่เป็นก้นและปลอกจับมีค่าสมรรถนะอยู่ที่ 1.852 และ 2.924 ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าสมรรถนะของ การตัดชิ้นงานบนเครื่องตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้าโดยใช้ อุปกรณ์ช่วยในการจับยึดชิ้นงานที่ออกแบบและสร้าง ขึ้นมาอยู่ในเกณฑ์การใช้งานได้ดี

5. กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้วิจัย ใคร่ขอขอบคุณสาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ สถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

ราชมณฑลกรุงเทพ ที่ให้การสนับสนุนในการ
ดำเนินงานวิจัย

6. อ้างอิง

- [1] Bicknell G, Manogharan G. A Comparison of the Effects of Wire Electrical Discharge Machining Parameters on the Processing of Traditionally Manufactured and Additively Manufactured 316L Stainless Steel Specimens. Proceedings of the ASME 2018 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE2018); 2018 November 9-15; Pittsburgh, PA, USA; 2018. 1-6.
- [2] Gangil M, Pradhan MK, Purohit R. Review on modelling and optimization of electrical discharge machining process using modern techniques. Materials Today: Proceedings. 2017;4(2):2048-2057.
- [3] Wang Y, Chen X, Wang Z, et al. Fabrication of micro gear with intact tooth profile by micro wire electrical discharge machining. Mater Process Tech. 2018;252:137-147.
- [4] Bouquet J, Hensgen L, Klink A, et al. Fast production of gear prototypes—a comparison of technologies. Procedia CIRP. 2014;14:77-82.
- [5] Manoj IV, Narendranath S. Influence of machining parameters on taper square areas during slant type taper profiling using wire electric discharge machining. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021;1017(1):012012.
- [6] วีรพงษ์ เณลิมจิระรัตน์. วิถีทางสถิติเพื่อการพัฒนาคุณภาพ. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2541.
- [7] บรรเลง ศรีนิล, สมนึก วัฒนศรีกุล. ตารางคู่มืองานโลหะ. กรุงเทพฯ : ศูนย์ผลิตตำราเรียนมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ; 2553.
- [8] รูปนันท อ่อนหวานกรกิจ, ศิโรรัตน์ พัฒนไพโรจน์. การเพิ่มกำลังการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์โดยการเพิ่มความเร็วยรอบในการผลิตของเครื่องจักร. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. 2562;(30):131-141

การเปรียบเทียบวิธีการหาค่าเหมาะที่สุด ด้วยโซลเวอร์ของ Excel 2019
และขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบวาฬ
Comparing Methods of Optimization in Solver of Excel 2019
and Whale Optimization Algorithm

วฐา มินเสน^{1*}, นุสบา แสงงามเมือง², พิมพภา ธานีพงษ์³, สาลินี อารังเลาหะพันธุ์⁴
Watha Minsan^{1*}, Nutsaba Saengngammuang², Phimpaka Taninpong³,
Salinee Thumronglaohapun⁴

^{1*,2,3,4} กลุ่มวิทยาการข้อมูล ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

^{1*,2,3,4} Data Science Research Center, Department of Statistics, Faculty of Science,
Chiang Mai University, Thailand

*Corresponding author. Tel.:05 394 3381, Email: wathaminsan@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบวิธีการหาค่าเหมาะที่สุด วิธีเกรเดียนต์ลดรูปแบบวายนัยทั่วไป (Generalized reduced gradient: GRG) และเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary algorithm: EV) ด้วยโซลเวอร์ของโปรแกรม Excel เวอร์ชัน 2019 และการหาค่าเหมาะที่สุดแบบวาฬ (Whale optimization algorithm: WOA) ที่พัฒนาใน Visual basic for application (VBA) โดยใช้ฟังก์ชันเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะจำนวน 16 ฟังก์ชันสำหรับหาค่าเหมาะที่สุด และใช้เกณฑ์การตัดสินใจ 4 เกณฑ์ คือ 1) อัตราความสำเร็จ (Success rate: *SR*) 2) ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean absolute error: *MAE*) 3) อัตราความสำเร็จและค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (*SR* and *SAE*) และ 4) เวลาเฉลี่ย (Average time: *AT*) เป็นตัวกำหนดวิธีการค้นหาค่าตอบที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยในแต่ละฟังก์ชันมีการทำซ้ำ 100 รอบ ผลการวิจัยพบว่า เกณฑ์การตัดสินใจลำดับที่ 1) ถึง 3) วิธีการ WOA เป็นวิธีการหาค่าตอบที่ดีที่สุด ส่วนเกณฑ์การตัดสินใจลำดับที่ 4) วิธีการ GRG เป็นวิธีการที่ใช้เวลาในการหาค่าตอบได้เร็วที่สุด

คำสำคัญ: วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบวาฬ วิธีเชิงวิวัฒนาการ วิธีเกรเดียนต์ลดรูปแบบวายนัยทั่วไป

Abstract

This research aims to compare the optimization method between generalized reduced gradient (GRG) and evolutionary algorithm (EV) in solver of Excel 2019 and whale optimization algorithm (WOA) which was developed in visual basic for application (VBA). The criteria to test optimization for 16 benchmark functions including: 1) success rate (*SR*), 2) mean absolute error

Received 14-06-2021

Revised 03-08-2021

Accepted 04-08-2021

(MAE), 3) success rate and standard deviation absolute (SR and SAE) and 4) average time (AT), were used to compare the efficiency of the methods. Each method was applied to solve 16 benchmark functions and repeated 100 iterations for each function. The numerical result indicated that WOA provided the best solutions for criteria 1) - 3). However, for the fourth criterion GRG gave the shortest running time.

Keywords: Whale Optimization, Evolutionary, Generalized reduced gradient

1. บทนำ

โปรแกรม Microsoft Excel เป็นโปรแกรมที่พัฒนาโดยบริษัท Microsoft และเป็นโปรแกรมหนึ่งในชุด Microsoft Office เป็นโปรแกรมที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย สามารถนำมาใช้งานได้ง่าย เหมาะกับลักษณะงานในหลากหลายด้าน เช่น ด้านบัญชี ด้านสถิติ ด้านวิศวกรรมศาสตร์ ด้านงบประมาณ และด้านการวางแผน ฯลฯ มีความสามารถในการสร้างตาราง การคำนวณ การวิเคราะห์ การออกรายงานในรูปแบบตารางและกราฟ และยังสามารถป้องกันการป้อนข้อมูล แก้ไขข้อมูล สะดวกต่อการคำนวณ และการนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้ และยังสามารถจัดข้อมูลต่าง ๆ ได้อย่างเป็นหมวดหมู่และเป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น และนอกจากนี้ใน Excel ยังมีชุดสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ที่เรียกว่า โซลเวอร์ (Solver)

โซลเวอร์เป็นโปรแกรมย่อย (Add-in) ของ Excel ที่สามารถใช้เพื่อช่วยในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) จากข้อจำกัดหรือเงื่อนไขที่มีอยู่ เช่น บางครั้งจะให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในช่วงขอบเขตหรือเงื่อนไขที่กำหนด บางครั้งอาจให้เพียงผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเท่าที่หาได้ภายในเวลาที่กำหนด เป็นต้น โดยในโซลเวอร์จะมีวิธีให้เลือกใช้ทั้งหมด 5 วิธี ได้แก่ 1) วิธีกำหนดการเชิงเส้นซิมเพล็กซ์ (Simplex linear programming: LP) 2) วิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-

raphson: NR) 3) เกรเดียนต์สังยุค (Conjugate gradient: CG) 4) วิธีเกรเดียนต์ลดรูปแบบวางนัยทั่วไป (Generalized reduced gradient: GRG) และ 5) วิธีเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary algorithm: EV) โดยแต่ละวิธีจะมีเงื่อนไขการใช้งานที่แตกต่างกัน วิธี LP เหมาะสำหรับใช้แก้ปัญหาแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น (Linear) สำหรับปัญหาแบบจำลองที่ไม่เชิงเส้น (Non-linear) เมื่อเซลล์วัตถุประสงค์ (เซลล์ที่แสดงค่าวัตถุประสงค์) และเงื่อนไขบังคับ เป็นฟังก์ชันต่อเนื่องและเปลี่ยนแปลงอย่างค่อยเป็นค่อยไปของเซลล์ตัดสินใจ วิธี NR CG และ GRG เหมาะสมที่จะใช้ในการหาคำตอบ และวิธี EV เหมาะสำหรับใช้แก้ปัญหาที่มีความซับซ้อน ที่ต้องการผลลัพธ์ใกล้เคียงผลลัพธ์ที่ดีที่สุด รวมทั้งปัญหาที่เซลล์วัตถุประสงค์ และ/หรือเงื่อนไขบังคับเป็นฟังก์ชันที่มีค่าไม่ต่อเนื่องหรือไม่เปลี่ยนแปลงอย่างค่อยเป็นค่อยไปของเซลล์ตัดสินใจ [1, 2]

วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยโซลเวอร์วิธี LP NR และ CG ของ Excel จะถูกติดตั้งอยู่บนโซลเวอร์ของ Excel เวอร์ชัน 2007 และ วิธี LP GRG และ EV ของ Excel จะถูกติดตั้งอยู่บนโซลเวอร์ของ Excel เวอร์ชัน 2010 ขึ้นไป ในงานวิจัยของ Minsan และ Minsan [2] ในปี ค.ศ. 2019 ได้ทดลองเปรียบเทียบวิธี NR CG GRG และ EV ในฟังก์ชันเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะ (Benchmark function)

13 ฟังก์ชัน พบว่า วิธี EV เป็นวิธีการที่ค้นหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดทั้งอัตราความสำเร็จ (Success rate: *SR*) ที่สูงในการหาค่าต่ำสุดวงกว้าง (Global minimum) และค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean absolute error: *MAE*) และค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation absolute error: *SAE*) ที่ต่ำ และวิธี GRG เป็นวิธีที่ค้นหาคำตอบได้อย่างรวดเร็วโดยมีเวลาเฉลี่ย (Average time: *AT*) ในการค้นหาคำตอบที่มากกว่าวิธี NR และ CG อยู่เล็กน้อยแต่ประสิทธิภาพของคำตอบที่ได้จะดีกว่ามาก และในปี ค.ศ. 2021 Minsan [3] ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมเปรียบเทียบวิธี NR CG GRG และ EV ในตัวแบบทางด้านสถิติศาสตร์ ซึ่งผลที่ได้ก็เป็นในทิศทางเดียวกันกับ [2] คือการใช้ Excel เวอร์ชัน 2019 ที่มีวิธี GRG และ EV ในการหาคำตอบจะทำให้ผลลัพธ์ของงานวิจัยออกมามีคุณภาพ

อย่างไรก็ตามมีขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดอีกหลายวิธีที่ถูกคิดค้นและพัฒนาขึ้นมาเรื่อย ๆ และเริ่มถูกนำมาใช้โดยทั่วไปแต่ยังไม่มีผลการทดลองหรือพัฒนาวิธีการเหล่านั้นบน Excel หนึ่งในวิธีการใหม่ที่ถูกพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 2016 และถูกนำไปอ้างอิงงานวิจัยแล้วกว่า 3,000 รายการ คือขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบวาฬ (Whale optimization algorithm: WOA) ซึ่งเป็นหนึ่งในขั้นตอนวิธีเมตาฮีริสติก (Meta-heuristic algorithm) ที่มีแนวคิดมาจากการเลียนแบบปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ ในลักษณะของการเลียนแบบพฤติกรรมของสัตว์ โดยขั้นตอนวิธีแบบ WOA ได้รับการพัฒนาขึ้นโดย Mirjalili และ Lewis [4] ได้รับแรงบันดาลใจมาจากพฤติกรรมการหาอาหารของวาฬหลังค่อม ซึ่งมีลักษณะการล่าเหยื่อที่

พิเศษ คือ วาฬหลังค่อมจะระบุตำแหน่งของเหยื่อได้เมื่อทราบตำแหน่งของเหยื่อ วาฬหลังค่อมจะสร้างฟองอากาศในรูปเกลียวล้อมรอบเหยื่อไว้ (Bubble-net feeding) และบีบวงล้อมเข้าไปเรื่อย ๆ พร้อมกับเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียว และว่ายน้ำขึ้นมามันผิวน้ำเพื่อกินเหยื่อ

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะนำ WOA มาพัฒนาด้วยโปรแกรม Visual basic for application (VBA) บน Excel เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาค่าเหมาะที่สุดของวิธี WOA กับโซลเวอร์ ของ Excel เวอร์ชัน 2019 ด้วยวิธี GRG และวิธี EV จากการแก้ปัญหาของฟังก์ชันเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะ โดยจะใช้เกณฑ์การตัดสินใจทั้งหมด 4 แบบ คือ *SR* *MAE* *SAE* และ *AT* [2]

2. วิธีดำเนินการวิจัย

ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้วิธี WOA และโซลเวอร์ โดยวิธี GRG และ วิธี EV ในการทดสอบผลการหาค่าเหมาะที่สุด โดยใช้ฟังก์ชันเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะเป็นเกณฑ์เปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้ 16 ฟังก์ชัน แต่ละฟังก์ชันทดสอบซ้ำ 100 รอบ โดยมีเกณฑ์การตัดสินใจสำหรับวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยกันทั้งหมด 4 เกณฑ์ ซึ่งมีรายละเอียดตามลำดับดังนี้

2.1 ขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบวาฬ [4, 5]

วิธี WOA ได้รับแรงบันดาลใจมาจากพฤติกรรมการล่าเหยื่อของวาฬหลังค่อม ด้วยเทคนิคการปล่อยฟองอากาศออกมาเพื่อดันให้ฝูงปลารวมกลุ่ม เรียกว่า การสร้างฟองอากาศในรูปเกลียวล้อมรอบเหยื่อไว้ หรือ Bubble-net feeding วิธีนี้

วาทหลังค่อมจะดำน้ำลงไปและเริ่มสร้างฟองอากาศในรูปเกลียวรอบตัวเหยื่อและว่ายน้ำขึ้นไปบนผิวน้ำเพื่อกินเหยื่อ วิธี WOA จะนำหลักการหาอาหารของวาทมาใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งมีทั้งหมด 3 ขั้นตอน

2.1.1 การล้อมเหยื่อ (Encircling prey)

วาทหลังค่อมทราบตำแหน่งของเหยื่อและล้อมพวกมันไว้ โดยกำหนดว่าค่าตอบที่ดีที่สุด เป็นตำแหน่งของเหยื่อที่เป็นเป้าหมายหรือจุดที่ใกล้เคียงกับค่าเหมาะที่สุดจากนั้นตัวแทนของคำตอบอื่น ๆ จะปรับปรุงตำแหน่งของตัวเองโดยอ้างอิงกับตำแหน่งของเหยื่อ เปรียบได้กับวาทหลังค่อมที่พุ่งเข้าไปล้อมเหยื่อ ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าว ดังสมการที่ (1) และ (2)

$$\bar{D} = |\bar{C} \cdot \bar{X}^*(t) - \bar{X}(t)| \quad (1)$$

$$\bar{X}(t+1) = \bar{X}^*(t) - \bar{A} \cdot \bar{D} \quad (2)$$

เมื่อ t คือ จำนวนรอบการทำซ้ำในปัจจุบัน (Current iteration) $\bar{A}$ และ $\bar{C}$ คือ สัมประสิทธิ์ค่าเวกเตอร์ค่า $\bar{X}^*$ คือ เวกเตอร์แสดงตำแหน่งของคำตอบที่ดีที่สุด $\bar{X}$ คือ เวกเตอร์แสดงตำแหน่งของคำตอบ $||$ คือ ค่าสัมบูรณ์ $\cdot$ คือ การคูณแบบจุดต่อจุด (Element-by-element multiplication) โดย $\bar{A}$ และ $\bar{C}$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3) และ (4)

$$\bar{A} = 2\bar{a} \cdot \bar{r} - \bar{a} \quad (3)$$

$$\bar{C} = 2 \cdot \bar{r} \quad (4)$$

เมื่อ $\bar{a}$ ลดลงแบบเชิงเส้นจาก 2 ถึง 0 ระหว่างรอบของการทำซ้ำ และ $\bar{r}$ คือเวกเตอร์แบบสุ่มในช่วง $[0,1]$ ดังนั้นเมื่อกวาทหลังค่อมดำเนินการ

ตามสมการที่ (1) ที่ใช้เหยื่อเป็นเป้าหมายการเคลื่อนที่จะได้ค่า $\bar{D}$ เพื่อนำไปใช้ในการกำหนดการเคลื่อนที่ในรอบต่อไปของวาทหลังค่อมในสมการที่ (2) แล้ววาทหลังค่อมก็จะเข้าใกล้เหยื่อมากขึ้น

2.1.2 การโจมตีด้วยฟองอากาศแบบเกลียว (Bubble-net attacking method)

จำลองพฤติกรรมโจมตีด้วยฟองอากาศของวาทหลังค่อมด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีดังนี้

1) การบีบวงล้อม (Shrinking encircling mechanism)

พฤติกรรมนี้เป็นตามสมการที่ (2) และสามารถแสดงได้ด้วยการลดลงของค่า $\bar{a}$ ในสมการที่ (3) เนื่องจากช่วงการเปลี่ยนแปลงของค่า $\bar{A}$ นั้นขึ้นอยู่กับค่าลดลงของค่า $\bar{a}$ โดย $\bar{A}$ นั้นจะมีค่าสุ่มอยู่ในช่วง $[-a, a]$ ซึ่งจะส่งผลต่อขอบเขตการค้นหาคำตอบรอบบริเวณคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการคำนวณปัจจุบัน หาก $\bar{A}$ มีค่าลดลงขอบเขตการค้นหาคำตอบก็จะยิ่งแคบลง

2) การเคลื่อนที่แบบเกลียว (Spiral updating position)

พฤติกรรมนี้จะจำลองการเคลื่อนที่แบบเกลียวของวาทหลังค่อมที่พุ่งเข้าหาเหยื่อในสมการที่ (5) ดังนี้

$$\bar{X}(t+1) = \bar{D}' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \bar{X}^*(t) \quad (5)$$

ที่ $\bar{D}' = |\bar{X}^*(t) - \bar{X}(t)|$ b คือ ค่าคงที่สำหรับการกำหนดรูปร่างของเกลียว l คือ ค่าสุ่มระหว่าง $[-1,1]$

วาทหลังค่อมจะแสดงพฤติกรรมการว่ายน้ำรอบเหยื่อโดยค่อย ๆ บีบวงล้อมหรือการเคลื่อนที่แบบเกลียวเข้าไปอย่างใดอย่างหนึ่งใน

จำลองพฤติกรรมนี้ วิธี WOA จะกำหนดความน่าจะเป็น 50% ระหว่างการเกิดพฤติกรรมการบินวงล้อมและการเคลื่อนที่แบบเกลียว แสดงดังสมการที่ (6)

$$\bar{X}(t+1) = \begin{cases} \bar{X}^*(t) - \bar{A} \cdot \bar{D} & \text{if } p < 0.5 \\ \bar{D}' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \bar{X}^*(t) & \text{if } p \geq 0.5 \end{cases} \quad (6)$$

เมื่อ p คือ เลขสุ่มในช่วง $[0,1]$
นอกเหนือจากการโจมตีด้วย
พองอากาศแล้ว วาฬหลังค่อมจะค้นหาเหยื่อ (Search
for prey) ต่อไปด้วยวิธีการสุ่ม

2.1.3 การค้นหาเหยื่อ

ในการกำหนดการเคลื่อนที่ของ
วาฬหลังค่อมอาจดำเนินการตามสมการที่ (1) ที่ใช้

เหยื่อเป็นเป้าหมายในการเคลื่อนที่หรืออาจให้วาฬ
หลังค่อมจะค้นหาเหยื่อด้วยการสุ่ม โดยมีเกณฑ์ที่ใช้
กำหนดจาก $\bar{A}$ ในสมการที่ (3) ถ้า โดยถ้าสมาชิกใน
 $|A| < 1$ จะดำเนินการตามสมการที่ (1) แต่ถ้าสมาชิกใน
 $|A| \geq 1$ จะดำเนินการค้นหาเหยื่อแบบสุ่มตามสมการที่
(7) และ (8)

$$\bar{D} = |\bar{C} \cdot \bar{X}_{rand} - \bar{X}| \quad (7)$$

$$\bar{X}(t+1) = \bar{X}_{rand} - \bar{A} \cdot \bar{D} \quad (8)$$

ที่ $\bar{X}_{rand}$ คือ เวกเตอร์สุ่มซึ่งคัดเลือกจาก
ประชากรคำตอบในรอบการคำนวณปัจจุบัน
รหัสเทียมของ WOA แสดงได้ดังภาพที่ 1

```

Initialize the whales population  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )
Calculate the fitness of each search agent
 $X^*$  = the best search agent
while ( $t < \text{maximum number of iterations}$ )
  for each search agent
    Update  $a$ ,  $A$ ,  $C$ ,  $l$ , and  $p$ 
    if1 ( $p < 0.5$ )
      if2 ( $|A| < 1$ )
        Update the position of the current search agent by the Eq. (2.1) 1
      else if2 ( $|A| \geq 1$ )
        Select a random search agent ( $X_{rand}$ )
        Update the position of the current search agent by the Eq. (2.8) 8
      end if2
    else if1 ( $p \geq 0.5$ )
      Update the position of the current search by the Eq. (2.5)
    end if1
  end for
  Check if any search agent goes beyond the search space and amend it
  Calculate the fitness of each search agent
  Update  $X^*$  if there is a better solution
   $t = t + 1$ 
end while
return  $X^*$ 
  
```

ภาพที่ 1 รหัสเทียมของขั้นตอนวิธี WOA กำหนด Search agent = 50 และ Max iteration = 5,000 [4]

2.2 กำหนดค่าปริยาย (Default) ของ วิธีการค้นหาคำตอบของ GRG และ EV [2]

การใช้วิธี GRG และ EV ในการประมาณ
ค่าพารามิเตอร์ กำหนดค่าปริยายในตัวเลือก
(Options) ของโซลเวอร์ไว้ดังนี้

- 1) Constraint precision: 0.000001
- 2) Use automatic scaling: true
- 3) Solving limits มี Max time เท่ากับ
5,000 วินาที
- 4) Convergence: 0.0001

- 5) Population size: 100
- 6) Random seed: 0
- 7) Require bounds on variables: true
- 8) Maximum time without improvement: 30
- 9) สำหรับวิธี GRG กำหนด Derivatives: forward and use multistart: true
- 10) สำหรับวิธีการ EV กำหนด Mutation rate: 0.075

หมายเหตุ: ในงานวิจัยนี้ เงื่อนไขบังคับ (Constraint) คือ ขอบเขตบน (Upper bound) และขอบเขตล่าง (Lower bound)

วิธี GRG และ EV จะกำหนดคำตอบเริ่มต้นจากค่าสุ่ม (Random) ตามการแจกแจงเอกรูปต่อเนื่อง (Continuous uniform distribution) จากขอบเขตบน และ ขอบเขตล่าง ของแต่ละฟังก์ชันเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะ

2.3 ฟังก์ชันเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะ

ในการศึกษาวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดนั้น จะใช้การศึกษาแบบจำลอง (Simulation study) โดยการนำวิธีการที่ต้องการศึกษาไปค้นหาคำตอบกับฟังก์ชันที่เป็นที่รู้จักและทราบค่าต่ำสุดวงกว้างดังเช่นงานวิจัยของ Karaboga [6] ที่เป็นผู้เสนอแนวคิดการหาค่าเหมาะที่สุดแบบฝูงผึ้ง (Honey bee swarm) ซึ่งใช้ ฟังก์ชันเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะ 3 ฟังก์ชันที่เป็นที่รู้จักโดยทั่วไปคือ Sphere, Rosenbrock และ Rastrigin เดชา และ สุภาภรณ์ [7] ศึกษาขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้เพื่อแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดไม่เชิงเส้นแบบฟันสุมเปรียบกับวิธีขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm) และ การหาค่าเหมาะที่สุดแบบฝูงอนุภาค (Particle swarm optimization) โดยใช้

ฟังก์ชันเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะแบบ 2 ตัวแปร จำนวน 8 ฟังก์ชัน ในงานวิจัยนี้จึงกำหนดปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดเป็นฟังก์ชันเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะจำนวน 16 ฟังก์ชันจากการสุ่มจากแหล่งข้อมูลฟังก์ชันที่เป็นที่รู้จักและใช้เป็นแหล่งอ้างอิงจำนวน 3 แหล่ง [8-10] ทุกปัญหาเป็นแบบ 2 ตัวแปร ($d=2$) มีรายละเอียดต่อไปนี้

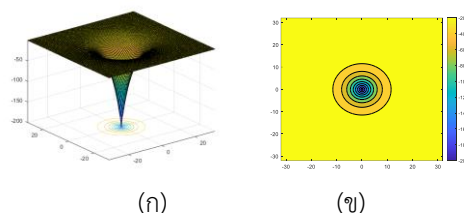
2.3.1 Ackley N.2 function ดังสมการที่ (9) ค่าต่ำสุดวงกว้าง ขอบเขตบน และ ขอบเขตล่าง คือ

$$f(x_1, x_2) = -200e^{-0.2\sqrt{\frac{1}{2}(x_1^2 + x_2^2)}} \quad (9)$$

$$f(x_1^*, x_2^*) = 0, \text{ at } x_i^* = (0, 0) \text{ for } i = 1, 2$$

$$x_i \in [-32, 32] \text{ for } i = 1, 2$$

ผิว (Surface) และ เส้นชั้นความสูง (Contour) ของ Ackley N.2 function แสดงดังภาพที่ 2 (ก) และ 2 (ข) ตามลำดับ



ภาพที่ 2 Ackley function

2.3.2 Adjiman function ดังสมการที่ (10) ค่าต่ำสุดวงกว้าง ขอบเขตบน และ ขอบเขตล่าง คือ

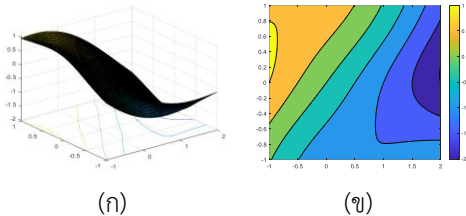
$$f(x_1, x_2) = \cos(x_1) \sin(x_2) - \frac{x_1}{x_2^2 + 1} \quad (10)$$

$$f(x_1^*, x_2^*) = -2.02181, \text{ at } x_i^* = (0, 0)$$

$$\text{for } i = 1, 2$$

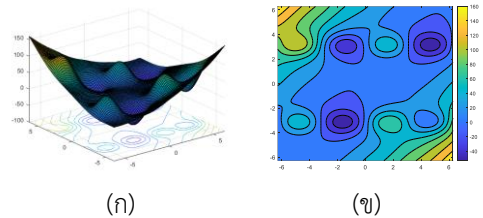
$$x_1 \in [-1, 2], x_2 \in [-1, 1]$$

ผิว และ เส้นชั้นความสูง ของ Adjiman function แสดงดังภาพที่ 3 (ก) และ 3 (ข) ตามลำดับ



ภาพที่ 3 Adjiman function

ผิว และ เส้นชั้นความสูง ของ Bird function แสดงดังภาพที่ 5 (ก) และ 5 (ข) ตามลำดับ



ภาพที่ 5 Bird function

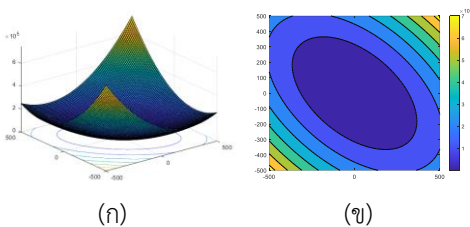
2.3.3 Bartels conn function ดังสมการที่ (11) ค่าต่ำสุดวงกว้าง ขอบเขตบน และ ขอบเขตล่าง คือ

$$f(x_1, x_2) = |x_1^2 + x_2^2 + x_1^2 x_2^2| + |\sin(x_1)| + |\cos(x_2)| \quad (11)$$

$$f(x_1^*, x_2^*) = 1, \text{ at } x_i^* = (0, 0) \text{ for } i = 1, 2$$

$$x_i \in [-500, 500] \text{ for } i = 1, 2$$

ผิว และ เส้นชั้นความสูง ของ Bartels conn function แสดงดังภาพที่ 4 (ก) และ 4 (ข) ตามลำดับ



ภาพที่ 4 Bartels conn function

2.3.4 Bird function ดังสมการที่ (12) ค่าต่ำสุดวงกว้าง ขอบเขตบน และ ขอบเขตล่าง คือ

$$f(x_1, x_2) = \sin(x_1)e^{(1-\cos(x_2))^2} + \cos(x_2)e^{1-\sin(x_1)} + (x_1 - x_2)^2 \quad (12)$$

$$f(x_1^*, x_2^*) = -106.764537, \text{ at } x_i^* = (-1.58214, -3.13024)$$

$$\text{or } x_i^* = (4.70104, 3.15294) \text{ for } i = 1, 2$$

$$x_i \in [-2\pi, 2\pi] \text{ for } i = 1, 2$$

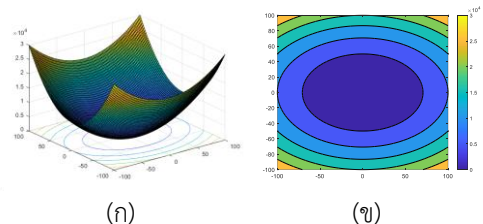
2.3.5 Bohachevsky N.2 function ดังสมการที่ (13) ค่าต่ำสุดวงกว้าง ขอบเขตบน และ ขอบเขตล่าง คือ

$$f(x_1, x_2) = x_1^2 + 2x_2^2 - 0.3\cos(3\pi x_1)\cos(4\pi x_2) + 0.3 \quad (13)$$

$$f(x_1^*, x_2^*) = 0, \text{ at } x_i^* = (0, 0) \text{ for } i = 1, 2$$

$$x_i \in [-100, 100] \text{ for } i = 1, 2$$

ผิว และ เส้นชั้นความสูง ของ Bohachevsky N.2 function แสดงดังภาพที่ 6 (ก) และ 6 (ข) ตามลำดับ



ภาพที่ 6 Bohachevsky N.2 function

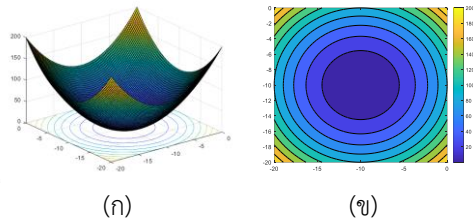
2.3.6 Brent function ดังสมการที่ (14) ค่าต่ำสุดวงกว้าง ขอบเขตบน และ ขอบเขตล่าง คือ

$$f(x_1, x_2) = (x_1 + 10)^2 + (x_2 + 10)^2 + e^{-x_1^2 - x_2^2} \quad (14)$$

$$f(x_1^*, x_2^*) = e^{-200}, \text{ at } x_i^* = (-10, -10) \text{ for } i = 1, 2$$

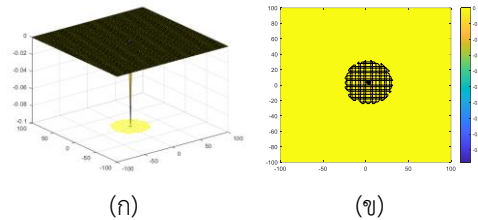
$$x_i \in [-20, 0] \text{ for } i = 1, 2$$

ผิว และ เส้นชั้นความสูง ของ Brent function แสดงดังภาพที่ 7 (ก) และ 7 (ข) ตามลำดับ



ภาพที่ 7 Brent function

ผิว และ เส้นชั้นความสูง ของ Easom function แสดงดังภาพที่ 9 (ก) และ 9 (ข) ตามลำดับ



ภาพที่ 9 Easom function

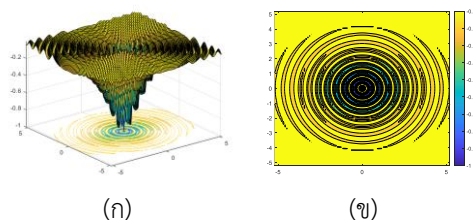
2.3.7 Drop-wave function ดังสมการที่ (15)
(15) ค่าต่ำสุดวงกว้าง ขอบเขตบน และ ขอบเขตล่าง คือ

$$f(x_1, x_2) = -\frac{1 + \cos(12\sqrt{x_1^2 + x_2^2})}{0.5(x_1^2 + x_2^2) + 2} \quad (15)$$

$$f(x_1^*, x_2^*) = -1, \text{ at } x_i^* = (0, 0) \text{ for } i = 1, 2$$

$$x_i \in [-5.2, 5.2] \text{ for } i = 1, 2$$

ผิว และ เส้นชั้นความสูง ของ Drop-wave function แสดงดังภาพที่ 8 (ก) และ 8 (ข) ตามลำดับ



ภาพที่ 8 Drop-wave function

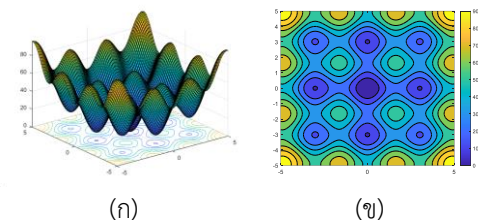
2.3.9 Egg crate function ดังสมการที่ (17)
ค่าต่ำสุดวงกว้าง ขอบเขตบน และ ขอบเขตล่าง คือ

$$f(x_1, x_2) = x_1^2 + x_2^2 + 25(\sin^2(x_1) + \sin^2(x_2)) \quad (17)$$

$$f(x_1^*, x_2^*) = 0, \text{ at } x_i^* = (0, 0) \text{ for } i = 1, 2$$

$$x_i \in [-5, 5] \text{ for } i = 1, 2$$

ผิว และ เส้นชั้นความสูง ของ Egg crate function แสดงดังภาพที่ 10 (ก) และ 10 (ข) ตามลำดับ



ภาพที่ 10 Egg crate function

2.3.8 Easom function ดังสมการที่ (16)
ค่าต่ำสุดวงกว้าง ขอบเขตบน และ ขอบเขตล่าง คือ

$$f(x_1, x_2) = -\cos(x_1)\cos(x_2)e^{-(x_1-\pi)^2-(x_2-\pi)^2} \quad (16)$$

$$f(x_1^*, x_2^*) = -1, \text{ at } x_i^* = (\pi, \pi) \text{ for } i = 1, 2$$

$$x_i \in [-100, 100] \text{ for } i = 1, 2$$

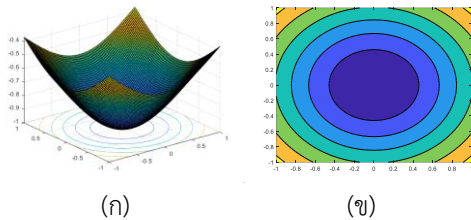
2.3.10 Exponential function ดังสมการที่ (18)
(18) ค่าต่ำสุดวงกว้าง ขอบเขตบน และ ขอบเขตล่าง คือ

$$f(x_1, x_2) = -e^{-0.5 \sum_{i=1}^2 x_i^2} \quad (18)$$

$$f(x_1^*, x_2^*) = 1, \text{ at } x_i^* = (0, 0) \text{ for } i = 1, 2$$

$$x_i \in [-1, 1] \text{ for } i = 1, 2$$

ผิว และ เส้นชั้นความสูง ของ Exponential function แสดงดังภาพที่ 11 (ก) และ 11 (ข) ตามลำดับ



ภาพที่ 11 Exponential function

2.3.11 Himmelblau function ดังสมการที่ (19) ค่าต่ำสุดวงกว้าง ขอบเขตบน และ ขอบเขตล่าง คือ

$$f(x_1, x_2) = (x_1^2 + x_2 - 11)^2 + (x_1 + x_2^2 - 7)^2 \quad (19)$$

$$f(x_1^*, x_2^*) = 0, \text{ at } x_i^* = (3, 2)$$

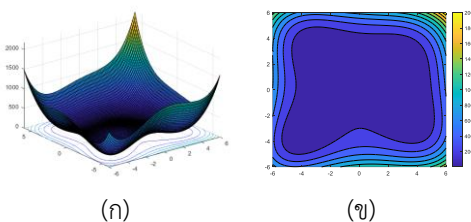
$$\text{or } x_i^* = (-2.805118, 3.283186)$$

$$\text{or } x_i^* = (-3.779310, -3.283186)$$

$$\text{or } x_i^* = (3.584458, -1.848126) \text{ for } i = 1, 2$$

$$x_i \in [-6, 6] \text{ for } i = 1, 2$$

ผิว และ เส้นชั้นความสูง ของ Himmelblau function แสดงดังภาพที่ 12 (ก) และ 12 (ข) ตามลำดับ



ภาพที่ 12 Himmelblau function

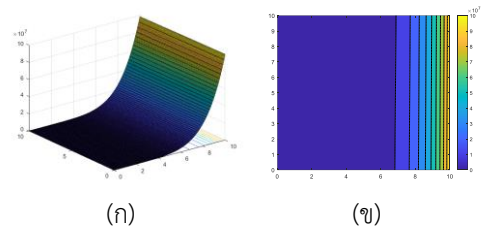
2.3.12 Leon function ดังสมการที่ (20) ค่าต่ำสุดวงกว้าง ขอบเขตบน และ ขอบเขตล่าง คือ

$$f(x_1, x_2) = 100(x_2 - x_1^3)^2 + (1 - x_1)^2 \quad (20)$$

$$f(x_1^*, x_2^*) = 0, \text{ at } x_i^* = (1, 1) \text{ for } i = 1, 2$$

$$x_i \in [-0, 10] \text{ for } i = 1, 2$$

ผิว และ เส้นชั้นความสูง ของ Leon function แสดงดังภาพที่ 13 (ก) และ 13 (ข) ตามลำดับ



ภาพที่ 13 Leon function

2.3.13 Levy No.13 function ดังสมการที่ (21) ค่าต่ำสุดวงกว้าง ขอบเขตบน และ ขอบเขตล่าง คือ

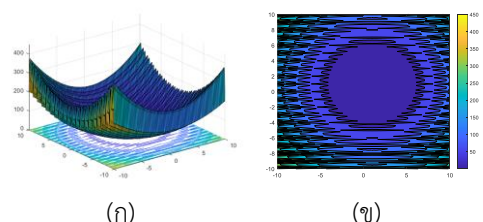
$$f(x_1, x_2) = \sin^2(3\pi x_1) + (x_1 - 1)^2 \quad (21)$$

$$(1 + \sin^2(3\pi x_2)) + (x_2 - 1)^2 (1 + \sin^2(2\pi x_2))$$

$$f(x_1^*, x_2^*) = 0, \text{ at } x_i^* = (1, 1) \text{ for } i = 1, 2$$

$$x_i \in [-10, 10] \text{ for } i = 1, 2$$

ผิว และ เส้นชั้นความสูง ของ Levy No.13 function แสดงดังภาพที่ 14 (ก) และ 14 (ข) ตามลำดับ



ภาพที่ 14 Levy No.13 function

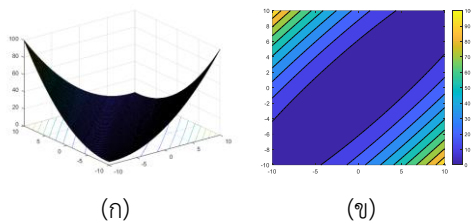
2.3.14 Matyas function ดังสมการที่ (22) ค่าต่ำสุดวงกว้าง ขอบเขตบน และ ขอบเขตล่าง คือ

$$f(x_1, x_2) = 0.26(x_1^2 + x_2^2) - 0.48x_1x_2 \quad (22)$$

$$f(x_1^*, x_2^*) = 0, \text{ at } x_i^* = (0, 0) \text{ for } i = 1, 2$$

$$x_i \in [-10, 10] \text{ for } i = 1, 2$$

ผิว และ เส้นชั้นความสูง ของ Matyas function แสดงดังภาพที่ 15 (ก) และ 15 (ข) ตามลำดับ



ภาพที่ 15 Matyas function

2.3.15 Qing function ดังสมการที่ (23)

ค่าต่ำสุดวงกว้าง ขอบเขตบน และ ขอบเขตล่าง คือ

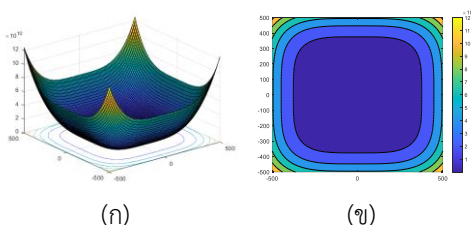
$$f(x_1, x_2) = \sum_{i=1}^2 (x_i^2 - i)^2 \quad (23)$$

$$f(x_1^*, x_2^*) = 0, \text{ at}$$

$$x_i^* = (\sqrt{\pm i}, \sqrt{\pm i}) \text{ for } i = 1, 2$$

$$x_i \in [-500, 500] \text{ for } i = 1, 2$$

ผิว และ เส้นชั้นความสูง ของ Qing function แสดงดังภาพที่ 16 (ก) และ 16 (ข) ตามลำดับ



ภาพที่ 16 Qing function

2.3.16 Styblinski-tank function ดังสมการที่ (24) ค่าต่ำสุดวงกว้าง ขอบเขตบน และ ขอบเขตล่าง คือ

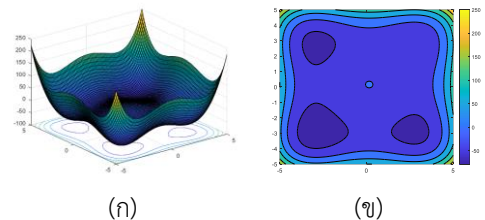
$$f(x_1, x_2) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 (x_i^4 - 16x_i^2 + 5x_i) \quad (24)$$

$$f(x_1^*, x_2^*) = -39.16559(2), \text{ at}$$

$$x_i^* = (-2.903534, 2.903534) \text{ for } i = 1, 2$$

$$x_i \in [-5, 5] \text{ for } i = 1, 2$$

ผิว และ เส้นชั้นความสูง ของ Styblinski-tank function แสดงดังภาพที่ 17 (ก) และ 17 (ข) ตามลำดับ



ภาพที่ 17 Styblinski-tank function

2.4 จำนวนรอบในการทำซ้ำ

(Replication) [2]

ในงานวิจัยนี้กำหนดจำนวนรอบในการทำซ้ำแต่ละสถานการณ์ (R) 100 รอบ โดยในแต่ละรอบกำหนดค่าปริยายของเวลาสูงสุด (Max time) ในแต่ละวิธีการค้นหาคำตอบเท่ากับ 5,000 วินาที หรือประมาณ 83.33 นาที ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.2

2.5 วิธีการตัดสินใจ (Decision method) [2]

2.5.1 อัตราความสำเร็จในการค้นหาคำตอบ (Success rate: SR) ที่มีค่ามากที่สุดเป็นตัวกำหนดวิธีการค้นหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพมาก

ที่สุด โดยมีสูตรดังสมการที่ (25) และ (26) อัตราความสำเร็จในการค้นหาคำตอบ คือ

$$SR_k = \frac{S}{R} \times 100, \quad k = \text{GRG, EV, WOA} \quad (25)$$

เมื่อ S คือ จำนวนครั้งที่หาค่าต่ำสุดวงกว้าง โดย ถ้าค่า $e = |f(x_1^*, x_2^*) - f(x_1, x_2)|$ ที่ $e \leq 10^{-5}$ ถือว่าการหาค่าเหมาะที่สุดครั้งนั้น มีค่าต่ำที่สุดโดยรวม R คือ จำนวนรอบของการทำซ้ำในแต่ละสถานการณ์ กำหนด $R = 100$

$$SR_{\max} = \text{Max}(SR_{\text{GRG}}, SR_{\text{EV}}, SR_{\text{WOA}}) \quad (26)$$

เมื่อ $SR_{\max}$ คือ วิธีการที่ดีที่สุดในการหาคำตอบ
2.5.2 ค่าความคาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean absolute error: MAE) โดยมีสูตรดังสมการที่ (27) และ วิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดจะเป็นค่าต่ำสุดของ MAE ของแต่ละวิธี ดังสมการที่ (28)

$$MAE_k = \sum_{i=1}^R \frac{|f(x_1, x_2)_i - f(x_1^*, x_2^*)|}{R}, \quad k = \text{GRG, EV, WOA} \quad (27)$$

เมื่อ $f(x_1, x_2)_i$ คือ ค่าที่ต่ำที่สุดรอบที่ i , $i = 1, 2, 3, \dots, R$
 $f(x_1^*, x_2^*)$ คือ ค่าต่ำสุดวงกว้าง

$$MAE_{\min} = \text{Min}(MAE_{\text{GRG}}, MAE_{\text{EV}}, MAE_{\text{WOA}}) \quad (28)$$

เมื่อ $MAE_{\min}$ คือ วิธีการที่ดีที่สุดในการหาคำตอบ

2.5.3 ค่าความคาดเคลื่อนสัมบูรณ์ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation absolute error: SAE) โดยมีสูตรดังสมการที่ (29)

$$SAE_k = \sqrt{\sum_{i=1}^R \frac{(f(x_1, x_2)_i - MAE_k)^2}{R}}, \quad k = \text{GRG, EV, WOA} \quad (29)$$

เมื่อ $f(x_1, x_2)_i$ คือ ค่าที่ต่ำที่สุดรอบที่ i , $i = 1, 2, 3, \dots, R$

MAE_k คือ ค่าความคาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย $k = \text{GRG, EV, WOA}$ และ วิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดจะพิจารณาจากวิธีที่ให้ $SR_{\max}$ มากที่สุดและมีค่า $SAE_{\min}$ ต่ำสุด เนื่องจากการมีอัตราความสำเร็จที่สูงและมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยนั้นแสดงว่าวิธีการหาคำตอบวิธีการนั้นเป็นวิธีการที่แกร่ง (Robust) หรืออาจจะกล่าวได้ว่าเป็นวิธีการที่ทั้งแม่นยำ (Accuracy) และ เทียงตรง (Precision) ต่อคำตอบค่า $SAE_{\min}$ ต่ำสุด ดังสมการที่ (30)

$$SAE_{\min} = \text{Min}(SAE_{\text{GRG}}, SAE_{\text{EV}}, SAE_{\text{WOA}}) \quad (30)$$

เมื่อ $SR_{\max}$ และ $SAE_{\min}$ คือ วิธีการที่ดีที่สุดในการหาคำตอบ

2.5.4 เวลาเฉลี่ย (Average time: AT) คือเวลาเฉลี่ยในการหาคำตอบแต่ละรอบ โดยมีสูตรดังสมการที่ (31)

$$AT_k = \frac{\sum_{i=1}^R T_i}{R}, \quad k = \text{GRG, EV, WOA} \quad (31)$$

วิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดจะเป็นค่าต่ำสุดของ AT ดังสมการที่ (32)

$$AT_{\min} = \text{Min}(AT_{\text{GRG}}, AT_{\text{EV}}, AT_{\text{WOA}}) \quad (32)$$

เมื่อ $AT_{\min}$ คือ วิธีการที่ดีที่สุดในการหาคำตอบ

2.6 เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผล

CPU and mainboard: Corei5-9400
2.9 GHz
RAM: DDR4 (2400) 8 GB
Hard disk: NVMe SSD 240 GB

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในการวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบผลการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้ฟังก์ชันเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะ จำนวน 16 ฟังก์ชัน ด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด WOA และโซลเวอร์วิธีการ GRG และ EV ได้ผลการวิจัยดังนี้

3.1 อัตราความสำเร็จในการค้นหาคำตอบที่มีค่ามากที่สุด

จากตารางที่ 1 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด WOA เป็นวิธีที่ให้ค่า SR ที่ดีที่สุด โดย SR มากที่สุดจำนวน 16 ฟังก์ชัน อันดับสองเป็นวิธี EV ให้ค่า SR จำนวน 12 ฟังก์ชัน และอันดับสุดท้ายเป็นวิธี GRG ให้ค่า SR จำนวน 7 ฟังก์ชันต่ำสุดของ MAE ของแต่ละวิธี จากตารางที่ 2 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ค่า MAE ที่ดีที่สุด คือ วิธี WOA ค่า MAE ต่ำที่สุดจำนวน 10 ฟังก์ชัน อันดับสองเป็นวิธี GRG ให้ค่า MAE ต่ำที่สุดจำนวน 3 ฟังก์ชัน คือ Adjiman, Bird และ Brent และวิธี EV ให้ค่า MAE ต่ำที่สุดจำนวน 3 ฟังก์ชัน คือ Himmelblau, Levi N. 13 และ Styblinski-Tank

3.2 ค่าความคาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยที่มีค่าต่ำที่สุด

ใช้ค่าความคาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยที่มีค่าต่ำที่สุด โดยวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดจะเป็นค่า

3.3 อัตราความสำเร็จในการค้นหาคำตอบที่มีค่ามากที่สุดและค่าความคาดเคลื่อนสัมบูรณ์ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มีค่าต่ำที่สุด

วิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดจะพิจารณาจากวิธีที่ให้ SR มากที่สุดและมีค่า SAE ค่าต่ำสุดจากตารางที่ 3 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ค่า SAE ที่ดีที่สุด คือ วิธี WOA โดยที่ วิธี WOA ให้ค่า SAE ต่ำที่สุดจำนวน 11 ฟังก์ชัน วิธี EV ให้ค่า SAE ต่ำที่สุดจำนวน 4 ฟังก์ชัน และวิธี GRG ให้ค่า SAE ต่ำที่สุดจำนวน 1 ฟังก์ชัน เมื่อพิจารณาร่วมกับค่า SR พบว่าวิธีที่ให้ค่า SR มากที่สุดและมีค่า SAE ต่ำที่สุด คือ วิธี WOA จำนวน 11 ฟังก์ชัน วิธี EV จำนวน 4 ฟังก์ชัน และ วิธี GRG มีเพียง 1 ฟังก์ชันที่ให้ค่า SR มากที่สุดและมีค่า SAE ต่ำที่สุด คือฟังก์ชัน Brent

ตารางที่ 1 ค่า SR ของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละฟังก์ชันเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะ

No	Function	GRG	EV	WOA
1	Ackley N. 2	7	53	100
2	Adjiman	100	100	100
3	Bartels conn	38	100	100
4	Bird	100	100	100
5	Bohachevsky	52	100	100
6	Brent	100	100	100
7	Drop-wave	2	100	100
8	Easom	15	2	100
9	Egg crate	98	100	100
10	Exponential	100	100	100
11	Himmelblau	100	100	100
12	Leon	97	43	100
13	Levi N. 13	15	100	100
14	Matyas	100	100	100
15	Qing	19	97	100
16	Styblinski-	100	100	100

หมายเหตุ: 100 เป็นวิธีที่ดีที่สุด

ตารางที่ 2 ค่า *MAE* ของวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของแต่ละฟังก์ชันเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะ

No	Function	GRG	EV	WOA
1	Ackley N.	7.0351E-	2.0509E-	0
2	Adjiman	2.2754E-	1.5983E-	3.216
3	Bartels	7.5882E-	1.6316E-	0
4	Bird	1.2252E-	1.4481E-	2.510
5	Bohache	0.11304	6.5871E-	0
6	Brent	4.7416E-	1.1262E-	5.294
7	Drop-	0.17524	3.4105E-	0
8	Easom	0.84999	0.97999	3.223
9	Egg crate	0.18976	2.2423E-	0
1	Exponent	1.0864E-	3.5295E-	0
1	Himmelb	6.6298E-	3.989E-	1.267
1	Leon	2.9248E-	0.18280	7.323
1	Levi N.	1.08154	7.2043E-	1.537
1	Matyas	3.3083E-	1.8879E-	0
1	Qing	0.42248	0.00985	1.186
1	Styblinski	1.2824E-	1.2427E-	9.138

หมายเหตุ: เป็นวิธีที่ดีที่สุด

ตารางที่ 3 ค่า *SAE* ของวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของแต่ละฟังก์ชันเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะ

No	Function	GRG	EV	WOA
1	Ackley	4.4816E	2.9309E	0
2	Adjiman	7.6222E	9.6623E	1.971
3	Bartels	0.00028	3.0991E	0
4	Bird	4.5282E	2.9678E	5.972
5	Bohache	0.12419	8.7998E	0
6	Brent	1.8176E	1.8887E	9.115
7	Drop-	0.12454	4.9925E	0
8	Easom	0.35706	0.13999	7.695
9	Egg crate	1.32834	3.3594E	0
1	Exponen	1.3235E	6.0538E	0
1	Himmel	9.4189E	5.6176E	6.885
1	Leon	1.8766E	0.36314	1.969
1	Levi N.	1.48022	9.0444E	2.753
1	Matyas	5.6585E	2.4816E	0
1	Qing	0.85966	0.09800	3.830
1	Styblinsk	9.4589E	2.0452E	2.011

หมายเหตุ: เป็นวิธีให้ค่า *SAE* ต่ำสุด

ตารางที่ 4 ค่า *AT* (หน่วย: วินาที) ของวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของแต่ละฟังก์ชันเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะ

No	Function	GRG	EV	WOA
1	Ackley N. 2	0.42	57.51	6.95
2	Adjiman	0.17	12.56	7.03
3	Bartels conn	0.23	51.35	6.98
4	Bird	0.43	48.74	7.01
5	Bohachevsky	0.27	48.14	7.48
6	Brent	0.25	48.70	7.11
7	Drop-wave	0.44	40.37	7.06
8	Easom	1.22	1.54	7.57
9	Egg crate	1.63	47.66	7.03
10	Exponential	0.34	38.77	7.01
11	Himmelblau	0.37	48.13	7.10
12	Leon	0.76	16.88	7.05
13	Levi N. 13	0.42	38.83	7.87
14	Matyas	0.40	38.90	7.00
15	Qing	0.37	38.43	7.12
16	Styblinski-	0.59	39.09	7.16

หมายเหตุ: เป็นวิธีที่ดีที่สุด

3.4 เวลาเฉลี่ยที่มีค่าต่ำที่สุด

วิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดที่จะพิจารณาเวลาเฉลี่ยในการคำนวณหาค่าตอบที่ต่ำสุด จากตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่าวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดที่ให้ค่า *AT* ที่ดีที่สุด (หน่วย: วินาที) คือ วิธี GRG โดยที่ วิธี GRG ให้ค่า *AT* ต่ำที่สุดทุกฟังก์ชัน มีเวลาเฉลี่ยในการหาค่าตอบเพียง 0.52 วินาที อันดับสองคือวิธี WOA เวลาเฉลี่ยในการหาค่าตอบเพียง 7.16 วินาที และอันดับสุดท้ายเป็นวิธี EV เวลาเฉลี่ยในการหาค่าตอบเพียง 38.48 วินาที ซึ่งผลสรุปนี้สอดคล้องกับงานวิจัย Minsan และ Minsan [2] และ Min [3] ที่กล่าวว่าวิธี GRG เป็นวิธีที่สามารถหาค่าตอบได้อย่างรวดเร็ว

4. สรุปผลการวิจัย

วิธีการหาค่าเหมาะที่สุด WOA เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในงานวิจัยนี้ โดยเอาชนะวิธี GRG และ EV ที่มีอยู่ในโซลเวอร์ ของ Excel เวอร์ชัน 2019 คือ WOA เป็นวิธีที่มีอัตราความสำเร็จในการค้นหาคำตอบมากที่สุดและยังเป็นวิธีการที่แข็งแกร่งเนื่องจากการมีอัตราความสำเร็จที่สูงและมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่น้อยกว่า และยังให้ค่าความคาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยที่ต่ำที่สุด เนื่องจากวิธี WOA เป็นวิธีการค้นหาแบบความฉลาดแบบกลุ่ม (Swarm intelligence) ที่จำนวนตัวแทน (Agent) ที่กำหนดโดยในที่นี้คือจำนวนวานั้นจะช่วยกันค้นหาคำตอบทั้งในพื้นที่กว้างของคำตอบที่เป็นไปได้และค่อย ๆ รวมตัวกันค้นหาในพื้นที่วงแคบเมื่อกลุ่มตัดสินใจแล้วว่าพื้นที่แถวนั้นเป็นเป้าหมาย ทำให้การค้นหาคำตอบมีประสิทธิภาพและเป็นวิธีการที่นิยมศึกษาและนำมาใช้ประโยชน์ในปัจจุบัน จึงสรุปจากผลการวิจัยได้ว่าการนำ WOA มาพัฒนามาเป็น VBA เพื่อใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเป็นวิธีการที่ดี เป็นทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับผู้ใช้งาน Excel อย่างไรก็ตาม WOA ยังมีเวลาในการค้นหาคำตอบมากกว่า GRG ทั้งนี้เวลาในการค้นหาคำตอบนั้นมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง 2 ปัจจัยคือ ขั้นตอนวิธีของ WOA เองที่ทำให้การค้นหาคำตอบใช้เวลามาก เช่นการกำหนดจำนวนตัวแทน (หรือจำนวนวาท) ที่อาจจะยังปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมเพิ่มขึ้นได้ เป็นต้น หรือ การเขียนคำสั่ง (Code) ใน VBA เองยังมีจุดที่สามารถลดเวลาลงได้อีก นั่นหมายถึงผู้ที่สนใจวิธี WOA ไปพัฒนาต่อบน VBA อาจจะต้องศึกษาการเขียนโปรแกรม VBA เชิงลึกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ WOA ต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

6. อ้างอิง

- [1] พิศาล สีนวล. การใช้โปรแกรมทางคณิตศาสตร์สำหรับแก้ปัญหาจัดสรรทรัพยากรเพื่อลดเวลาในการวางแผนการผลิต [วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2559.
- [2] Minsan P, Minsan W. Comparing methods of optimization in solver of Microsoft Excel 2007 and 2019. UTK Research Journal. 2019;13(2):144-61.
- [3] Minsan P. Comparing Methods of Optimization in Solver of Microsoft Excel 2007 and 2019: A Case Study of Statistical Models. The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok. 2021;31(2):496-511.
- [4] Mirjalili S, Lewis A. The Whale Optimization Algorithm. Adv Eng Software. 2016;95:51-67.
- [5] ดร.ณภพ ยอดเพชร. อภิรัฐ ศิริธราธิวัตร, รองฤทธิ์ ฉัตรถาวร และคณะ. การจัดเรียงรูปแบบโครงข่ายไฟฟ้าที่เหมาะสมเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยวิธีจำลองการล่าเหยื่อของวาฬ. งานประชุมวิชาการ และนวัตกรรม กฟภ. ปี 2561; วันที่ 24-25 กันยายน 2561; ณ ศูนย์ประชุมวายุภักษ์ ศูนย์ราชการเฉลิมพระเกียรติ แจ้งวัฒนะ; 2561. น. 75-80.

- [6] Karaboga D. An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization. Technical Report-TR06, Engineering Faculty Computer Engineering Department Kayseri/Türkiye, Erciyes University. 2005.
- [7] เดชา พงดาวเรือง, สุภาภรณ์ สุวรรณรังษี. การประยุกต์ขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้เพื่อแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดไม่เชิงเส้นแบบเฟ้นสุ่ม. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2560; วันที่ 12-15 กรกฎาคม 2560; ณ โรงแรมดิเอ็มเพรส เชียงใหม่; 2560. น. 1077-83.
- [8] Indusmic Private Limited [Internet] . Benchmark function; 2021 [cited 2021 July 1]. Available form: <https://www.indusmic.com/blog/categories/benchmark-function>.
- [9] Global Optimization Benchmarks and AMPGO [Internet]. Test functions index; 2021 [cited 2021 July 1]. Available form: http://infinity77.net/global_optimization/test_functions.html#test-functions-index.
- [10] Mazhar Ansari Ardeh [Internet] . BenchmarkFcns; 2021 [cited 2021 July 1] . Available form: <https://github.com/mazhar-ansari-ardeh/BenchmarkFcns/tree/master/benchmarks>.

คำแนะนำสำหรับผู้เขียน

วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ รับบทความทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ต้องเป็นต้นฉบับ ไม่เคยตีพิมพ์ หรือเผยแพร่ที่ไหนมาก่อน มีจุดประสงค์เพื่อเผยแพร่ความรู้ และผลงานวิชาการทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และมีการตรวจสอบคุณภาพอย่างเคร่งครัด

1. หลักเกณฑ์การส่งบทความ

1.1 บทความเปิดรับทั้งจากบุคคลภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

1.2 บทความมีรูปแบบการเขียนตามที่กำหนดไว้

1.3 บทความวิชาการต้องมีความยาวประมาณ 12-20 หน้า ในรูปแบบ 2 คอลัมน์

บทความวิจัย ต้องมีความยาวประมาณ 10-15 หน้า ในรูปแบบ 2 คอลัมน์

1.4 การส่งบทความ เพื่อผ่านการพิจารณาก่อนกรองและประเมินคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิ ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องผ่าน รูปแบบ Online

โดยจัดส่งไฟล์อิเล็กทรอนิกส์ผ่าน <https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk> เริ่มจากการกรอกข้อมูลตามแบบฟอร์มส่งบทความเพื่อพิจารณาให้สมบูรณ์ บทความจะได้รับการพิจารณาก่อนกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิ และเมื่อบทความได้รับการแก้ไข (หากมี) อย่างเหมาะสม ผู้เขียนจะต้องส่งบทความเข้ามายัง <https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk> เพื่อดำเนินการในส่วนอื่นต่อไป

2. ประเภทของบทความที่ตีพิมพ์

บทความที่ตีพิมพ์ในวารสารมี 2 ประเภท คือ

2.1 บทความวิจัย (Research Paper) เป็นบทความที่มีลักษณะและรูปแบบการวิจัยตามหลักวิชาการ เช่น ตั้งสมมติฐาน โดยระบุวัตถุประสงค์ที่ชัดเจน ได้ค้นคว้าทดลองอย่างมีระบบ และสรุปผลการวิจัยที่นำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

2.2 บทความวิชาการ (Academic Paper) เป็นบทความที่มีลักษณะเชิงวิเคราะห์หรือวิจารณ์ จากการทบทวนเอกสาร จากประสบการณ์หรือความชำนาญของผู้เขียน และเสนอแนวคิดใหม่บนพื้นฐานวิชาการ อันก่อให้เกิดองค์ความรู้หรือสามารถประยุกต์ใช้ประโยชน์

3. รูปแบบการพิมพ์บทความ

3.1 ระยะขอบ

ขอบบน (Top Margin) 1 นิ้ว หรือ 2.54 ซม.

ขอบล่าง (Bottom Margin) 0.7 นิ้ว หรือ 2 ซม.

ขอบขวา (Right Margin) 0.7 นิ้ว หรือ 2 ซม.

ขอบซ้าย (Left Margin) 0.7 นิ้ว หรือ 2 ซม.

3.2 กระดาษ

ขนาด B5 (JIS) 18.2 x 25.7 ซม.

3.3 รูปแบบตัวอักษร

บทความภาษาไทย ใช้ TH SarabunPSK

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ Time New Roman

3.4 ชื่อเรื่อง

บทความภาษาไทย ใช้ชื่อเรื่องทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ขนาด 16 ตัวหนา (พิมพ์กลางหน้ากระดาษควรเป็นชื่อที่สั้น กระทัดรัด ได้ใจความตรงกับวัตถุประสงค์และเนื้อเรื่อง)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ชื่อเรื่อง ขนาด 16 ตัวหนา (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

3.5 ชื่อผู้เขียนและชื่อผู้ร่วมงาน

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 14 ตัวหนา (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 12 ตัวหนา (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

3.6 สถานที่ทำงาน เบอร์โทรศัพท์ และ E-mail

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 12 ตัวปกติ (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 10 ตัวปกติ (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

3.7 คำว่า บทคัดย่อ/Abstract

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 16 ตัวหนา

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 12 ตัวหนา

3.8 เนื้อความใน บทคัดย่อ/Abstract

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 14 ตัวปกติ (พิมพ์แบบเต็มขอบ)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 11 ตัวปกติ (พิมพ์แบบเต็มขอบ)

3.9 เนื้อความทั้งหมด (แบ่งเป็น 2 คอลัมน์ ระยะห่างระหว่างคอลัมน์ 0.3 นิ้ว หรือ 0.7 ซม.)

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 14 ตัวปกติ

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 11 ตัวปกติ

3.10 ชื่อหัวเรื่องใหญ่

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 16 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 12 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)

3.11 ชื่อหัวเรื่องย่อย

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 14 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 11 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)

3.12 คำว่า กิตติกรรมประกาศ/Acknowledgement และคำว่า เอกสารอ้างอิง/Reference

(ใส่หมายเลขลำดับหัวเรื่องด้วย)

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 16 ตัวหนา

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 12 ตัวหนา

3.13 สมการหรือพจน์ทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน

ควรเขียนโดยใช้ Equation Editor โดยจัดแยกบรรทัด และมีเลขกำกับอยู่ในวงเล็บเล็ก จัดพิมพ์ด้วย Microsoft Word

4. ส่วนประกอบของบทความแต่ละประเภท

4.1 บทความวิจัย

A. ส่วนปก

1. **ชื่อบทความ (Title)** ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรกะทัดรัด ไม่ยาวเกินไป ชื่อเรื่องต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
2. **ชื่อผู้เขียน (Authors)** ชื่อเต็ม นามสกุลเต็ม ของผู้เขียนทุกคน สำหรับผู้เขียนประสานงานให้ใส่ที่อยู่ให้ละเอียด พร้อมทั้งหมายเลขโทรศัพท์/โทรสาร และ E-mail address ที่สามารถติดต่อได้
3. **ตัวলেখยก** ให้เขียนไว้บนนามสกุล เพื่อระบุที่อยู่ของผู้เขียน
4. **บทคัดย่อ (ABSTRACT)** ควรจัดทำเป็นร้อยแก้วย่อหน้าเดียว สั้น ตรงประเด็น ครอบคลุมสาระสำคัญของการศึกษา ได้แก่ วัตถุประสงค์ วิธีการ ผลการวิจัยและการอภิปรายผล เป็นต้น ถ้าบทความเป็นภาษาไทยจะต้องมีบทคัดย่อทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยให้ภาษาไทยขึ้นก่อน มีความยาวไม่เกิน 1,000 คำ
5. **คำสำคัญ (keywords)** ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ เป็นคำสำคัญที่สามารถใช้ในการสืบค้น ในระบบฐานข้อมูล

หมายเหตุ : เนื้อหาส่วนปกจะต้องเขียนให้อยู่ในกระดาษ จำนวน 1 หน้า เท่านั้น

B. ส่วนเนื้อหา

1. **บทนำ (INTRODUCTION)** เพื่ออธิบายถึงความสำคัญของปัญหา และวัตถุประสงค์ของการวิจัย รวมถึงการทบทวนวรรณกรรม และเอกสารที่เกี่ยวข้อง
2. **วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ (MATERIALS AND METHODS)/วิธีดำเนินการวิจัย (RESEARCH METHODOLOGY)** อธิบายเครื่องมือและวิธีการดำเนินการวิจัยให้ชัดเจน
 - บทความวิจัยด้านวิทยาศาสตร์ ควรอธิบายเกี่ยวกับเครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี และวิธีการที่ใช้ในการวิจัย
3. **ผลการวิจัยและอภิปรายผล/ ผลการทดลองและอภิปรายผล (RESULT AND DISCUSSION)** เสนอผลการทดลอง อย่างชัดเจน และตรงประเด็น ควรมีรูปภาพ/หรือตารางประกอบ การอธิบายผลในตารางและรูปภาพ ต้องไม่ซ้ำซ้อนกัน รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาไทย ให้บรรยายเป็นภาษาไทย รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาอังกฤษ ให้บรรยายเป็นภาษาอังกฤษ

- เป็นการอธิบายผลการวิจัยว่าเป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้หรือไม่เพียงใด และควรอ้างอิงทฤษฎีหรือเปรียบเทียบการทดลองของผู้อื่นที่เกี่ยวข้องประกอบ เพื่อให้ผู้อ่านเห็นด้วยตามหลักการหรือคัดค้านทฤษฎีที่มีอยู่เดิม รวมทั้งแสดงให้เห็นถึงการนำไปใช้ประโยชน์ และการให้ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต
- รูปภาพ/กราฟ ให้อยู่ในเนื้อเรื่องของบทความ ขนาดตัวอักษรสามารถอ่านได้ชัดเจน เหมาะสมกับขนาดของรูปภาพ/กราฟ โดยบันทึกเป็นไฟล์ที่มีนามสกุล JPG มีความละเอียดไม่ต่ำกว่า 300 dpi เท่านั้น ถ้าเป็นภาพถ่ายกรุณาส่งภาพต้นฉบับ และในกรณีที่ป็นรูปลายเส้นให้วาดโดยใช้หมึกสีดำที่มีความคมชัด หมายเลขรูปภาพ/กราฟให้เป็นเลขอารบิก และอยู่ด้านล่างของรูปภาพ/กราฟ
- ตาราง ให้อยู่ในเนื้อเรื่องของบทความ หมายเลขตารางให้เป็นเลขอารบิก และอยู่ด้านบนของตาราง

4. **บทสรุป (CONCLUSION)** สรุปประเด็น และสาระสำคัญที่ได้จากการวิจัย
5. **กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)** เป็นการแสดงความขอบคุณแก่ผู้ให้ความช่วยเหลือให้การวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เพียงสั้นๆ (อาจมีหรือไม่ก็ได้)
6. **เอกสารอ้างอิง (REFERENCES)** เป็นรายการเอกสารอ้างอิงที่ใช้เป็นหลักในการค้นคว้าวิจัยที่ได้รับการตรวจสอบเพื่อนำมาเตรียมรายงาน และมีการอ้างอิงถึงเฉพาะเอกสารที่ปรากฏในบทความเท่านั้น การอ้างอิงให้จัดเรียงตามลำดับที่อ้างอิงเป็นตัวเลขในเครื่องหมาย [x] และให้เริ่มต้นเรียงลำดับเอกสารจากที่พบในเนื้อหา ก่อนเป็น [1] หากผู้เขียนมีมากกว่า 3 คน ให้ใส่ชื่อ 3 คนแรก แล้วตามด้วย และคณะหรือ et al.

การอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่องของบทความ (In-text Citations) การอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่อง ให้ใช้ระบบแวนคูเวอร์ (Vancouver style) สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่

<http://library.md.chula.ac.th/guide/vancouver2011.pdf>

ตัวอย่างการเขียนเอกสารอ้างอิง

หนังสือหรือตำรา

รูปแบบพื้นฐาน ชื่อผู้แต่ง (Author) / ชื่อหนังสือ (Title of the book) / ครั้งที่พิมพ์ (Edition) / เมืองที่พิมพ์ (Place of Publication) : สำนักพิมพ์ (Publisher) ; ปี (Year).

- Janeway CA, Travers P, Walport M, Shlomchik M. Immunobiology. 5th ed. New York: Garland Publishing; 2001.

- รังสรรค์ ปัญญาัญญะ. โรคติดเชื้อของระบบประสาทกลางในประเทศไทย. กรุงเทพฯ: เรือนแก้วการพิมพ์; 2536.

บทความจากวารสาร (Articles in Journals)

รูปแบบพื้นฐาน ชื่อผู้แต่ง(Author)/ชื่อบทความ(Title of the article)/ชื่อวารสาร(Title of the Journal)/ปีที่พิมพ์(Year);เล่มที่ของวารสาร(Volume):หน้า(Pages).

- ขนิษฐา คำรงกิจ, ใหม่ น้อยพิทักษ์, วิญญู ตั้งวโรตมณกุล และคณะ.การศึกษาสมบัติทางกลและส่วนผสมทางเคมีของรอยเชื่อมเหล็กกรางรถไฟ. วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ. 2561;12(1):119-31.
- White AR, Treenate D, Kiatgungwalgrai A, et al. The effects of accent familiarity on english as a foreign language students' word recognition and comprehension of the english language. UTK Res J. 2559;10(2):21-30.

เอกสารอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Material)

รูปแบบพื้นฐาน ชื่อผู้แต่ง (Author)/ชื่อบทความ (Title of the article) [ประเภทของสื่อ/วัสดุ]/สถานที่พิมพ์: สำนักพิมพ์; ปีพิมพ์ (Year) [เข้าถึงเมื่อ/cited ปี เดือน วันที่]./จาก (Available from): <http://.....>

- Foley KM, Gelband H, editors. Improving palliative care for cancer [Internet]. Washington: National Academy Press; 2001 [cited 2002 Jul 9]. Available from: <https://www.nap.edu/catalog/10149/improving-palliative-care-for-cancer>.
- “กำเนิด” ระบบหลักประกันสุขภาพถ้วนหน้า มิติใหม่แห่งการบริการด้านสาธารณสุขเพื่อคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้นของคนไทย [อินเทอร์เน็ต]. นนทบุรี: สปสช.; 2552. [เข้าถึงเมื่อ 25 มีนาคม 2554]. จาก: www.localfund.in.th/files/NHSO-intro1-6.pdf

การอ้างอิงบทความที่นำเสนอในการประชุม หรือสรุปผลการประชุม (Conference paper)

รูปแบบพื้นฐาน ชื่อผู้เขียน./ชื่อเรื่อง./ใน(In):/ชื่อบรรณาธิการ./บรรณาธิการ./ชื่อหนังสือ./ชื่อการประชุม./วัน เดือน ปีที่ประชุม./สถานที่จัดประชุม./สถานที่พิมพ์:/สำนักพิมพ์;/ปีที่พิมพ์./น./เลขหน้าเริ่มต้น-เลขหน้าสุดท้ายของบทที่อ้าง.

- ชีวะ ฤชตระกูล. Coagulopathy in liver diseases. ใน: ปิยะวัฒน์ โกมลมิศร์, ทวีศักดิ์ แทนวันดี, อนุชิต จุฑะพุทธิ, บรรณาธิการ. Vascular diseases of the liver. การประชุมวิชาการประจำปี ครั้งที่ 4 Vascular diseases of the liver; วันที่ 12-14 มีนาคม 2552; เพชรบุรี. กรุงเทพฯ: สมาคมโรคตับ (ประเทศไทย); 2552. น.1-13.

4.2 บทความวิชาการ

A. ส่วนปก

มีส่วนประกอบเหมือนบทความวิจัย

B. ส่วนเนื้อหา

1. บทนำ (INTRODUCTION) เป็นส่วนของที่มาของมูลเหตุของการเขียนบทความ
2. วิธีการศึกษา/วิธีดำเนินการ (METHOD) (ถ้ามี) เป็นการอธิบายวิธีการศึกษา หรือ การดำเนินการตามประเภทของบทความวิชาการ
3. ผลการศึกษา/ผลการดำเนินการ (RESULT AND DISCUSSION) เป็นการเสนอผล อย่างชัดเจน ตามประเด็นโดยลำดับตามหัวข้อที่ศึกษาหรือดำเนินการ
4. สรุป (CONCLUSION) สรุปประเด็น และสาระสำคัญที่ได้จากการศึกษา
5. เอกสารอ้างอิง (REFERENCES) ใช้ตามที่วารสารกำหนด

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Review)

รองศาสตราจารย์สมยศ เดชภีรัตน์มงคล	รองศาสตราจารย์นิศากร สังวาระนที
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชาญยุทธ์ กาญจนพิบูลย์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัชรินทร์ ชุมจันทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัศพงศ์ พันธุ์พฤษ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประเสริฐ เผื่อนหมื่นไวย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศราวุธ ใจเย็น	ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิพงษ์ เหมะธูลิน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฉัตรชัย พะวงษ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ เกียรติวิภาค
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิรินาถ ศรีอ่อนนวล	ผู้ช่วยศาสตราจารย์นพรัตน์ มะเท
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัญชลี ทองกำเหนิด	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรพงศ์ บุญช่วยแทน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์แมน ตัญแพร่	ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิษณุ ทองขาว
ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิวัฒน์ มูเก็ม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์เสาวณีย์ อารีจางเจริญ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.เบญจมาศ ไชยลาภ	ดร.ชัชฎา หนูสาย
ดร.อรรถพล สีดำ	ดร.จตุพร อรุณกมลศรี
ดร.ธนวรรณ เวียงสีมา	ดร.ปราโมทย์ ฉลองรัตนสกุล
ดร.ละออ สมสะกีสวัสดิ์	ดร.เบญจมาศ คล้ายเครือญาติ
อาจารย์ประชม ทางทอง	

แบบฟอร์มส่งบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ลงในวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว)..... นามสกุล.....

ขอส่ง ☐ บทความวิจัย

☐ บทความวิชาการ

เรื่อง (ภาษาไทย).....

.....

เรื่อง (ภาษาอังกฤษ).....

.....

ชื่อผู้เขียนร่วม (ภาษาไทย)

1.

2.

3.

ชื่อผู้เขียนร่วม (ภาษาอังกฤษ)

1.

2.

3.

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก..... หมู่ที่..... ซอย.....

ถนน..... ตำบล/แขวง..... อำเภอ/เขต..... จังหวัด.....

รหัสไปรษณีย์..... E-mail..... โทรศัพท์.....

โทรสาร..... โทรศัพท์ (มือถือ).....

ข้าพเจ้าขอรับรองว่าบทความนี้ ☐ เป็นผลงานของข้าพเจ้าแต่เพียงผู้เดียว

☐ เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามชื่อที่ระบุในบทความจริง

โดยขอรับรองว่ารูปภาพและข้อความทั้งหมดในบทความนี้ ไม่ละเมิดลิขสิทธิ์ใด ๆ และบทความนี้ไม่เคย
ลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และจะไม่นำบทความนี้ส่งไปเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นอีกเป็น
การซ้ำซ้อนการละเมิดลิขสิทธิ์ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนบทความโดยตรง ทั้งนี้ผู้เขียนเข้าใจในนโยบาย
การรับบทความของวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพแล้ว และยินยอมว่าบทความที่ตีพิมพ์ลงในวารสารวิจัย
มทร. กรุงเทพ ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ลงชื่อ.....

(.....)



หนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความ
วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ขอรับรองว่าบทความ.....

เรื่อง

โดย

ได้ผ่านการประเมินจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ
และตีพิมพ์ในวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ
ปีที่..... ฉบับที่ (..... - พ.ศ.)

(.....)
บรรณาธิการวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ขั้นตอนการจัดทำวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ

