

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

SRINAKHARINWIROT ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม - สิงหาคม พ.ศ. 2563



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เป็นวารสารในศูนย์ข้อมูลดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai – Journal Citation Index Centre: TCI) กลุ่มที่ 2 พ.ศ. 2558-2562 เลขที่ ISSN 1905-4548 เพื่อเผยแพร่บทความวิจัยและบทความวิชาการ ด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีวิศวกรรมเคมี วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมชีวการแพทย์ และสาขาใกล้เคียงอื่นๆ ทั้งในเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ เป็นภาษาอังกฤษหรือภาษาไทยที่มีบทความภาษาอังกฤษ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ จึงกำหนดให้จัดทำโครงการจัดทำวารสารทางวิชาการขึ้น โดยจัดพิมพ์เป็นประจำทุกปี ปีละ 3 ฉบับ ฉบับที่ 1 ช่วงเดือนมกราคม – เมษายน ฉบับที่ 2 ช่วงเดือนพฤษภาคม – สิงหาคม และฉบับที่ 3 ช่วงเดือนกันยายน – ธันวาคม ซึ่งบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ทุกบทความจะผ่านการทบทวนโดยผู้รู้เสมอ (peer review) โดยผู้ทรงคุณวุฒิสองคนในสาขาที่เกี่ยวข้องแบบอำพรางฝ่ายเดียว (single-blind) และสงวนสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พุทธศักราช 2521 และเผยแพร่แบบออนไลน์ทั่วประเทศ

วัตถุประสงค์

เพื่อเป็นแหล่งรวบรวม เผยแพร่บทความวิจัย และบทความวิชาการทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ในสาขาวิศวกรรมเคมี วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมชีวการแพทย์ และสาขาใกล้เคียงอื่นๆ ทั้งในเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ

เจ้าของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

63 หมู่ 7 ตำบลอโศก อำเภอบางบัวทอง

จังหวัดนนทบุรี 11000

โทร. 0 2649 5000 ต่อ 27560

<http://eng.swu.ac.th> และ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/sej>

อีเมล journalengswu@gmail.com

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภพ รอดอัมพร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติ สถาพรประสาธน์

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
รองคณบดีฝ่ายแผนและพัฒนา

รายนามคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ

ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกมอลิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.เอเดรียน อีแวน ฟลัด	สถาบันสิรินธรวิทยเมธี
ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต)
ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จันทน์ไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร. พานิช วุฒิปุณษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ โสภางค์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.อริศม ฤกษ์บุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย เปรมฤดีปริชาชาญ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ กริชชาญชัย ศฤงคารินทร์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต ชาลสิทธิ์ตระกูล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. ธนียา เกาศล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร	มหาวิทยาลัยศิลปากร
รองศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวรอาจารย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ยอดสุดใจ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บรรณาธิการอำนวยการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิไลดา หวังพานิช

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยานิชกุล

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล นาผล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.จันจิรา จัปศิลป์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.ทิมพันธุ์ เจริญพงษ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

รองศาสตราจารย์ ดร.สุนิติ สุภาพ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ธาราธิ์เศรษฐ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมวล ชูรัตน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ ศรีมรินทร์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อาจารย์ ดร.สุธิดา ทิพย์กษพันธ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อาจารย์นาวิ รุจิรามพ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ศาสตราจารย์ ดร.ทนต์เกียรติ เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกคณิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.เอเดรียน อีแวน พลัด	สถาบันสิริวิทยเมธี
ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต)
ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จันทน์ไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.พานิช วุฒิพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ โสภาคาง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.อริศม ฤกษ์บุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย เปรมฤดีปริชาชาญ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ กริชชาญชัย ศฤงคารินทร์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต ชาลธิ์รักษตระกูล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.ธนิยา เกาศล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร	มหาวิทยาลัยศิลปากร
รองศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวรอาจารย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ยอดสุดใจ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

นางสาวยุพาพร ประไพย์

บทบรรณาธิการ

ปัจจุบันนี้เป็นที่พูดถึงกันมากว่า ประเทศไทยกำลังเข้าสู่สังคมที่มีจำนวนคนชราเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่คนในวัยทำงานจะมีจำนวนน้อยลงอย่างขาดสมดุล สาเหตุเนื่องมาจากการลดลงของอัตราการเกิด ซึ่งคาดการณ์ว่าจะส่งผลกระทบมากกว่าหนึ่งด้าน อันได้แก่ รัฐบาลเก็บภาษีได้ไม่เพียงพอต่อการใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในการดูแลคนชรา และการลดลงของจำนวนผู้ต้องการศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษาส่งผลทำให้หลักสูตรที่มีผู้สมัครเรียนน้อยอาจจะต้องปิดตัวลง แต่อย่างไรก็ตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษาแห่งชาติและการประกันคุณภาพการศึกษาของประเทศไทย ได้มีการวางระบบและกลไกให้สถาบันอุดมศึกษามีแนวทางเปิดสอนหลักสูตรที่ตรงกับความต้องการของตลาดแรงงาน โดยจะต้องดำเนินการสำรวจความต้องการของทั้งนายจ้างและผู้เรียน เพื่อใช้ประกอบการทำหลักสูตร ซึ่งสอดคล้องกับรัฐบาลที่ได้มีการเน้นย้ำให้สถาบันอุดมศึกษาเปิดสอนหลักสูตรที่ตรงกับความต้องการของตลาดแรงงาน เพื่อให้บัณฑิตสามารถประกอบอาชีพได้

สำหรับการบริหารจัดการทรัพยากรคณาจารย์ให้เปลี่ยนแปลงทันกับการเปลี่ยนแปลงของหลักสูตรและความต้องการของสังคมเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก เพราะคณาจารย์สำเร็จการศึกษามาด้วยการทำปริญญาโทในหัวข้อที่ต้องมีความลุ่มลึก ทำให้ขาดมิติความกว้างที่จะปรับเปลี่ยนหัวข้อการสอนตามการเปลี่ยนแปลงของหลักสูตรได้ ขณะเดียวกันก็สามารถแก้ไขปัญหาได้ด้วยการเปิดรับอาจารย์ใหม่ เพราะอายุการทำงานของอาจารย์แต่ละคนยาวนานเกินการเปลี่ยนแปลงของความต้องการของหลักสูตร การแก้ปัญหาแนวทางนี้ เมื่อเวลาผ่านไปไม่นาน ปัญหาความไม่สอดคล้องระหว่างคณาจารย์ที่มีความรู้กับความต้องการของหลักสูตรก็จะวนกลับมาเกิดซ้ำอีก ไม่นับรวมภาระค่าใช้จ่ายที่ต้องแบกรับในการจ้างคณาจารย์กลุ่มเดิมที่ไม่สามารถสอนในหลักสูตรที่เปลี่ยนแปลงไปได้ ซึ่งจะทำให้ต้นทุนค่าธรรมเนียมการศึกษาสูงโดยไม่จำเป็น เกิดความไม่มีประสิทธิภาพในการใช้งบประมาณที่ได้รับ

ดังนั้นหากคณาจารย์มีความพยายามที่จะทำงานวิจัยในหัวข้อใหม่ ๆ ที่ไม่ถนัด และสามารถปรับเปลี่ยนหัวข้อการสอนให้ตรงตามการเปลี่ยนแปลงของหลักสูตรได้ ผู้กำกับดูแลงานวิจัยของหน่วยงานต่าง ๆ จึงควรทำงานบูรณาการกับหลักสูตรและการเรียนการสอน เพื่อกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการสนับสนุนโครงการวิจัยในหน่วยงาน ให้นำไปสู่ความสามารถในการสอนหัวข้อที่ตรงกับหลักสูตรที่เปลี่ยนแปลงไปได้ อีกทั้งผลลัพธ์ของโครงการวิจัยได้อีกทางคือ การตีพิมพ์บทความวิจัย วารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒที่ท่านถืออยู่นี้ จึงเป็นกลไกสำคัญในการผลักดันให้คณาจารย์ทำวิจัย ซึ่งกองบรรณาธิการดูแลเป็นอย่างดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ ขอแจ้งว่ากองบรรณาธิการได้ปรับแก้รูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิง ให้เป็นรูปแบบ IEEE ร้อยละร้อย เพื่อให้ผู้เขียนเตรียมต้นฉบับได้สะดวกขึ้น พร้อมให้ตัวอย่างอย่างครอบคลุม ท่านผู้เขียนที่เคยส่งบทความมาก่อน โปรดใช้รูปแบบ IEEE ในการเขียนเอกสารอ้างอิง

บทความวิจัย

การใช้ประโยชน์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุประสานสำหรับคอนกรีตบล็อก Utilization of Calcium Carbide Residue and Bottom Ash as a Binder for Solid Load-bearing Concrete Block กมล ตรีผอง วีรพันธุ์ เจียมมีปรีชา อรรคเดช อับดุลมาติน	1
สภาพจิตสังคมในการทำงานของแรงงานก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรร Psychosocial Working Condition of Construction Labor Working in Subdivision Housing Project นที สุริยานนท์ นคร สุริยานนท์ วนิดา สุริยานนท์	12
การจำลองทางเลือกการเดินทางโดยคำนึงถึงมลพิษทางอากาศในเมืองและการประยุกต์ใช้แบบจำลองโลจิสติกใน เขตเมืองนครปฐม Considering Urban Air Pollution in Travel Choice Modeling and Its Application to Logit Model in Nakhon Pathom ธนกร เมฆิน ฆนิศา รุ่งแจ้ง	30
พฤติกรรมของความแข็งและความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีของเหล็กหล่อขาวเติมธาตุผสมกึ่งหลายชนิดที่มี ปริมาณโครเมียมต่างกัน Behavior of Hardness and Abrasive Wear Resistance of Semi-multi-alloyed White Cast Iron with Different Chromium Contents ณัฏฐิศา โยธารณณ์ สุตสาคร อินธิเดช	47
การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้วัสดุดูดซับที่เตรียมจากผักตบชวา A Study on Adsorption Efficiency of Methylene Blue Dye using Adsorbent Material Prepared from Water Hyacinth ชาญชัย คหาปนระ ณภัทร โพธิ์วัน	58
การสร้างแบบจำลองสถานการณ์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตซาลาเปา Simulation Modeling to Improve the Efficiency of the Steamed Stuffed Buns Production ธนพันธ์ คงทอง เพ็ญสุตา พันฤทธิธำ เชษฐา ชำนาญหล่อ	71
การไพโรไลซิสแบบเร็วของถ่านทอรรีไฟด์จากไม้กระถินยักษ์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไต์สแบบพอง Fast Pyrolysis of Torrefied Leucaena leucocephala Wood in a Bubbling Fluidised-Bed Reactor นันทปรีชา สิงห์ทอง นวรงค์ ชลคุป อติศักดิ์ ปัตติยะ	81

สารบัญ

บทความวิจัย (ต่อ)

- การจัดการพลังงานสำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยของการไฟฟ้าผลิตแห่งประเทศไทย บนพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียม 98
Energy System Management for Substation of Electricity Generating Authority of Thailand
base on Artificial Neural Network
ศิริพงษ์ ลือชัย กวิน สนธิเพิ่มพูน
- แบบจำลอง 4D CAD สำหรับจัดการความปลอดภัยและลดผลกระทบการจราจรใน โครงการซ่อมบำรุงถนน
บริเวณทางแยกต่างระดับ: กรณีศึกษาแยกต่างระดับนครราชสีมา 106
4D CAD Model for Safety Management and Traffic Impact Reduction in Road Maintenance
Project at the Interchange: Case Study of the Nakhon Ratchasima Interchange
วิทยา รังคะนันนท์ วชรภูมิ เบญจโอฬาร

การใช้ประโยชน์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุประสานสำหรับ คอนกรีตบล็อก

Utilization of Calcium Carbide Residue and Bottom Ash as a Binder for Solid Load-bearing Concrete Block

กมล ตรีผอง^{1*} วีรพันธุ์ เจียมมีปรีชา² อรรคเดช อับดุลมาติน³

¹สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

วิทยาเขตวังไกลกังวล อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110

²สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

³สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

อำเภอเมือง จังหวัดนราธิวาส 96000

Kamon Treepong^{1*} Weeraphan Jiammeepreecha² Akkadath Abdulmatin³

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology

Rattanakosin, Wang Klai Kang Won Campus, Prachaup Kiri Khan, 77110

²Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,

Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima, 30000

³Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,

Princess of Naradhiwas University, Narathiwat, 96000

*Corresponding author Email: kamon.tre@rmutr.ac.th

(Received: September 22, 2019; Accepted: April 21, 2020)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุประสานสำหรับการผลิตคอนกรีตบล็อกทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ การศึกษาครั้งนี้ได้นำกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าก้นเตามาบดละเอียด และผสมในอัตราส่วนระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าก้นเตาเท่ากับ 30:70 (CB) เพื่อใช้เป็นวัสดุประสานในการผลิตคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักเชิงดัน คอนกรีตบล็อกที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีขนาดตัวอย่างเท่ากับ 100x100x200 มม.³ ทำการศึกษาความหนาแน่น ค่าดูดกลืนน้ำ และกำลังอัดของคอนกรีตบล็อก CB เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบคอนกรีตบล็อกที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (CT) ผลการทดสอบพบว่าค่าดูดกลืนน้ำ และกำลังอัดขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อก กล่าวคือความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกมีค่ามากส่งผลให้ค่าการดูดกลืนน้ำลดลงและกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกมีค่าเพิ่มขึ้น การใช้วัสดุประสาน CB สำหรับหล่อเป็นคอนกรีตบล็อกมีผลให้ค่าการดูดกลืนน้ำสูงขึ้นและกำลังอัดมีค่าลดลง อย่างไรก็ตาม ค่าการดูดกลืนน้ำและกำลังอัดของคอนกรีตบล็อก CB สามารถปรับปรุงได้โดยการเพิ่มปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในส่วนผสมร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก การใช้แรงดัน 6 กก./ตร.ซม. ในการขึ้นรูป และการลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในส่วนผสม ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ค่าการดูดกลืนน้ำและกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกที่ผ่านการปรับปรุง

สามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานของคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักเชิงดัน สำหรับการใช้งานเป็นกำแพงเหนือและต่ำกว่าระดับพื้นดินโดยปราศจากการป้องกันผิวได้ตามมาตรฐาน มอก. 60-2561 กำหนด

คำสำคัญ: กากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าก้นเตา คอนกรีตบล็อก การดูดกลืนน้ำ กำลังอัด

ABSTRACT

The aim of this research is the use of calcium carbide residue and bottom ash as a binder in concrete block to reduce the Portland cement. In this study, the calcium carbide residue and bottom ash were ground and mixed in the ratio between calcium carbide residue to bottom ash of 30:70 by weight (CB) to use as a binder for casting solid load-bearing concrete block. The specimen size of the block use in this study is 100x100x200 mm³. The density, water absorption and compressive strength of CB concrete block were investigated and compared with concrete block with Portland cement as a binder (CT). This result found that the water absorption and compressive strength of concrete block depended on its density i.e., the high density of the block resulted in the decrease of water absorption and increase compressive strength. The use of CB binder for casting concrete block affected on higher water absorption and lower compressive strength than CT concrete block. However, the water absorption and compressive strength of CB concrete block could be improved by added 10% of Portland cement by weight, used the pressure of 6 ksc to cast the block and decreased the water to binder ratio in the mixture. Therefore, the water absorption and compressive strength of the improved CB concrete block could meet the requirement of solid load-bearing concrete block for using as the wall above and below ground level without protecting surface in accordance with TIS 60-2561..

Keyword: Calcium carbide residue, bottom ash, concrete block, water absorption, compressive strength.

1. บทนำ

คอนกรีตบล็อก (Concrete block) เป็นวัสดุก่อสร้างที่นิยมใช้ในการก่อผนังและกำแพงเป็นจำนวนมาก แต่กระบวนการผลิตคอนกรีตบล็อกในปัจจุบันยังคงใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Ordinary Portland cement) เป็นวัตถุดิบหลัก ซึ่งกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จะมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) สู่ชั้นบรรยากาศสูงขึ้นประมาณ 1.02 ตันต่อปริมาณปูนซีเมนต์ 1 ตัน [1] ในปี ค.ศ. 2004 พบว่ามีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์อยู่ที่ 1.7x10⁹ ตันต่อปี [2] จากปัญหาดังกล่าวจึงมีงานวิจัยเป็นจำนวนมากที่นำเสนอการใช้วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan material) เพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีต เช่น เถ้าลอย เถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้าขาน้อย และ เถ้าแกลบ เป็นต้น [3]–[5]

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) เป็นวัสดุที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างแคลเซียมคาร์ไบด์กับน้ำในกระบวนการผลิตก๊าซ

อะเซทิลีน ซึ่งเป็นก๊าซที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมงานเชื่อม กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาจะอยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) อยู่ในสถานะของเหลว ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตพบว่า กากแคลเซียมคาร์ไบด์นำมาใช้ร่วมกับวัสดุปอซโซลานได้ และสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้เป็นอย่างดีเมื่อมีการบดให้ได้ความละเอียดสูง [6]–[8]

เถ้าก้นเตา (Bottom ash, BA) เป็นวัสดุที่เหลือจากการนำเอาถ่านหิน (Coal) มาเผาเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าเกิดเป็นเถ้าลอยที่มีอนุภาคขนาดเล็ก รูปร่างทรงกลม ไม่มีรูพรุน ในขณะที่เถ้าก้นเตาจะมีขนาดอนุภาคใหญ่และมีรูพรุน ดังนั้นในการใช้เถ้าก้นเตาจำเป็นจะต้องทำการบดละเอียดเพื่อให้สามารถเป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีตได้ [9]–[11] โดยในปี ค.ศ. 2016 พบว่ามีปริมาณเถ้าก้นเตา 1.4×10^6 ตันต่อปี จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และยังคงมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นทุกปี [12] องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเถ้าก้นเตาได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมินัมไตรออกไซด์ (Al_2O_3) เฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) จากงานวิจัยของ Chindaprasit และคณะ [13] พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตาจะเหมือนกับเถ้าลอย (Fly ash) กล่าวคือจะมีปริมาณของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, CaO และ SO_3 ร้อยละ 72.2, 16.5 และ 2.4 ตามลำดับ ในขณะที่เถ้าลอยจะมีอยู่ร้อยละ 74.8, 16.6 และ 2.6 ตามลำดับ ซึ่งค่ามาตรฐาน ASTM C 618 ได้กำหนดคุณสมบัติของวัสดุปอซโซลานประเภท Class F จะต้องมีความปริมาณของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ และ SO_3 มากกว่าร้อยละ 70 และ 5 ตามลำดับ [14] สำหรับค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss of ignition, LOI) ของเถ้าก้นเตาจะมีค่าร้อยละ 2.9 สูงกว่าเถ้าลอยซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.8 ซึ่งยังคงต่ำกว่าค่ามาตรฐาน ASTM C 618 ที่กำหนดการสูญเสีย น้ำหนักเนื่องจากการเผาสําหรับวัสดุปอซโซลานต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 6 [14]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตพบว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าก้นเตาสามารถใช้งานเพื่อเป็นวัสดุประสานสำหรับคอนกรีตได้ [15] โดยงานวิจัยนี้เน้นการนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าก้นเตามาใช้เพื่อเป็นวัสดุประสานในการผลิตคอนกรีตบล็อกเพื่อทดแทนปริมาณการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ลดปัญหามลพิษทางสิ่งแวดล้อม และลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศ เพราะใช้ปริมาณปูนซีเมนต์น้อยมากเพื่อเป็นสารตั้งต้นในส่วนผสม

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1. วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้มาจากโรงงานผลิตก๊าซอะเซทิลีน จังหวัดสมุทรสาคร นำมาตากแดดให้แห้งจนมีค่าความชื้นเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ลักษณะของ CCR ก่อนบดมีสีเทาขาว เกะตัวเป็นก้อน ดังแสดงในรูปที่ 1(ก) เมื่อสังเกตจากภาพถ่ายที่ ท ต ส อบ โดยวิธี Scanning Electronic Microscope (SEM) พบว่า CCR ก่อนบดมีขนาดใหญ่ ผิวขรุขระ และรูปร่างไม่แน่นอน รูปที่ 2(ก) หลังจากนำบดด้วยเครื่องบดวัสดุ จนกระทั่งมีปริมาณอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยในงานวิจัยนี้สามารถทำได้อยู่ที่ร้อยละ 3.80 โดยน้ำหนัก และมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.37 โดยมีสมบัติทางกายภาพดังแสดงในตารางที่ 1 สําหรับ CCR หลังบดมีสีเข้มขึ้นเล็กน้อย และสังเกตจากรูปที่ 2(ข) พบว่าอนุภาค CCR มีขนาดเล็กลง แต่ยังคงมีผิวขรุขระ และรูปร่างไม่แน่นอน CCR ที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ได้มาจากชุดเดียวกันกับงานวิจัยของ Abdulmatin และคณะ [15] ซึ่งมีองค์ประกอบหลักทางเคมีคือ CaO โดยมีปริมาณร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก และค่า LOI เท่ากับร้อยละ 27 ดังแสดงในตารางที่ 2

เถ้าก้นเตา (BA) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้มาจากโรงผลิตไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีสีเทาดำ (รูปที่ 3(ก)) มีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับเถ้าลอยและมีรูพรุนดังแสดงในรูปที่ 4(ก) จึงจำเป็นต้องนำมาบดละเอียดจนกระทั่งมีปริมาณ

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหลังการอบ

วัสดุ ประสาน	ความถ่วง จำเพาะ	ปริมาณอนุภาคค้ำ บนตะแกรง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		ดัชนี กำลังที่ อายุ 7 วัน (ร้อยละ)
		เบอร์ 200	เบอร์ 325	
CCR	2.37	3.80	-	-
BA	2.66	-	1.20	86

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่าน [15,16]

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	CCR	BA
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	5.2	35.6
อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3)	2.5	19.6
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3)	2.0	14.9
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	59.8	18.7
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	1.0	1.7
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	2.1	2.4
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	0.4	1.2
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.3	2.3
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI)	26.9	3.6

อนุภาคค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยในงานวิจัยนี้สามารถทำได้อยู่ที่ร้อยละ 1.20 โดยน้ำหนัก และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.66 โดยมีสมบัติทางกายภาพดังแสดงในตารางที่ 1 ภายหลังการอบ BA มีสีน้ำตาลเข้ม ดังแสดงในรูปที่ 3(ข) องค์ประกอบหลักทางเคมีของ BA คือ SiO_2 , Fe_2O_3 และ Al_2O_3 รวมกันเท่ากับร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังมีปริมาณ CaO ประมาณร้อยละ 19 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 2 [16]

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) เพื่อหล่อคอนกรีตบล็อกควบคุม และใช้เป็นสารเร่งกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกแบบรับน้ำหนักที่มี CCR ผสม

BA เป็นวัสดุประสาน ความถ่วงจำเพาะของ OPC มีค่าเท่ากับ 3.14 สำหรับมวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำและมวลรวมหยาบที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือหินฝุ่น โดยมีสมบัติทางกายภาพดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพของมวลรวม

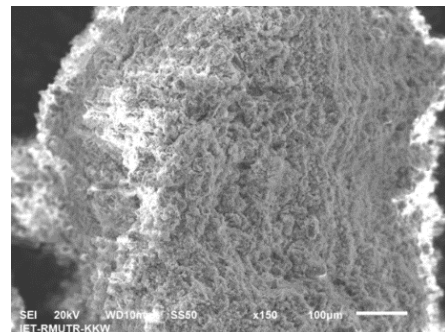
มวลรวม	ความถ่วง จำเพาะ	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
ทรายแม่น้ำ	2.63	1.52
หินฝุ่น	2.71	0.40



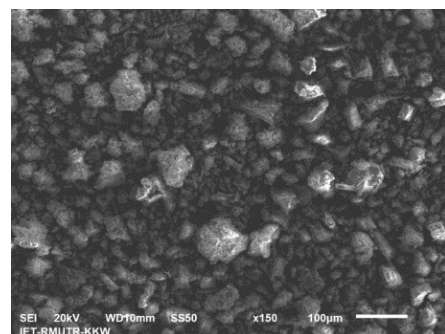
(ก) ก่อนบด

(ข) หลังบด

รูปที่ 1 กากแคลเซียมคาร์ไบด์

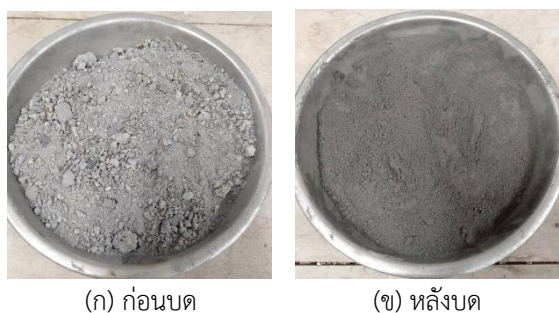


(ก) ก่อนบด

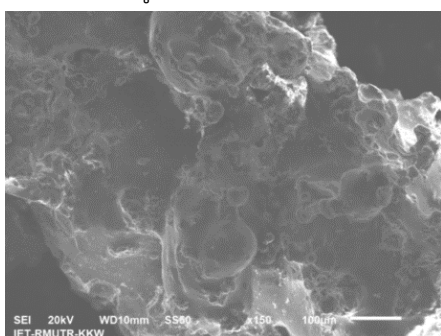


(ข) หลังบด

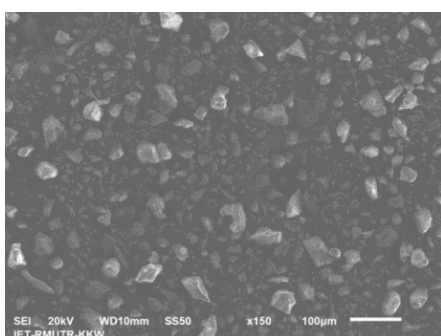
รูปที่ 2 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของกากแคลเซียมคาร์ไบด์



รูปที่ 3 เล้ากันตา



(ก) ก่อนบด



(ข) หลังบด

รูปที่ 4 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของเล้ากันตา

2.2. การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบคอนกรีตบล็อก

ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้อัตราส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเล้ากันตาเท่ากับ 30:70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (CB) ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ทำให้มอร์ตาร์มีค่ากำลังอัดสูงสุด [16] คอนกรีตบล็อกที่ศึกษาแบ่งออกเป็นสองกลุ่มคือ กลุ่มที่ 1 คอนกรีตบล็อกที่ไม่ใส่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมและไม่ใช้แรงดันในการขึ้นรูป ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ใช้ตัวย้อยเป็น CT-N และ CB-N สำหรับคอนกรีตบล็อกควบคุมและคอนกรีตบล็อกที่ใช้ CB เป็นวัสดุประสาน กลุ่มที่ 2 คือ

คอนกรีตบล็อกที่มีวิธีการปรับปรุงกำลังอัดด้วยการใส่ OPC ในส่วนผสมร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และใช้แรงดันในการขึ้นรูปขนาด 6 กก/ซม² ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 ใช้ตัวย้อยเป็น CT-L และ CB-L สำหรับคอนกรีตบล็อกควบคุมและคอนกรีตบล็อกที่ใช้ CB เป็นวัสดุประสาน คอนกรีตบล็อกทั้งหมดในการศึกษาครั้งนี้ใช้อัตราส่วน วัสดุประสาน:มวลรวมละเอียด:มวลรวมหยาบเท่ากับ 1:1.4:1.75 โดยทุกตัวอย่างถูกหล่อให้ได้ขนาด 100x100x200 มม.³ ดังแสดงในตารางที่ 4

การทดสอบการดูดกลืนน้ำและความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกของคอนกรีตบล็อกทั้ง 4 ตัวอย่าง คือ คอนกรีต CT-N, CT-L, CB-N และ CB-L ทดสอบที่อายุ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C140 [17] โดยนำตัวอย่างไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110±5 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อหาปริมาณน้ำที่ดูดซึมเข้าไป ค่าเฉลี่ยการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกทั้ง 3 ตัวอย่าง นำมาใช้ในการรายงานผล

หลังจากการหล่อตัวอย่างคอนกรีตบล็อกจะนำมาบ่มในน้ำสะอาด จนถึงอายุของการบ่มที่กำลังอัดของคอนกรีตบล็อกทดสอบที่อายุ 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C140 [17]

3. ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

3.1 การดูดกลืนน้ำและความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อก

รูปที่ 5 แสดงผลการทดสอบความหนาแน่นและการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตบล็อกที่อายุ 28 วัน พบว่าคอนกรีตบล็อก CT-N, CT-L, CB-N และ CB-L มีความหนาแน่นเท่ากับ 2253, 2260, 1970 และ 2230 กก./ลบ.ม. ซึ่งสอดคล้องกับค่าดูดกลืนน้ำ 107, 89, 232, และ 150 กก/ลบ.ม. หรือเท่ากับร้อยละ 4.79, 3.97, 11.76 และ 6.72 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบคอนกรีตบล็อกที่มีวัสดุประสานชนิดเดียวกัน พบว่าคอนกรีตบล็อกที่ใช้แรงดันในการขึ้นรูป

ตารางที่ 4 ส่วนผสมของคอนกรีตบล็อก

คอนกรีต บล็อก	สัดส่วนผสม (กก./ลบ.ม.)						W/B ratio
	OPC	CCR	BA	Sand	Crushed dust	water	
CT-N	525	0	0	735	920	240	0.45
CB-N	0	157.5	367.5	735	920	240	0.45
CT-L	525	0	0	735	920	185	0.35
CB-L	52.5	141.75	330.75	735	920	185	0.35

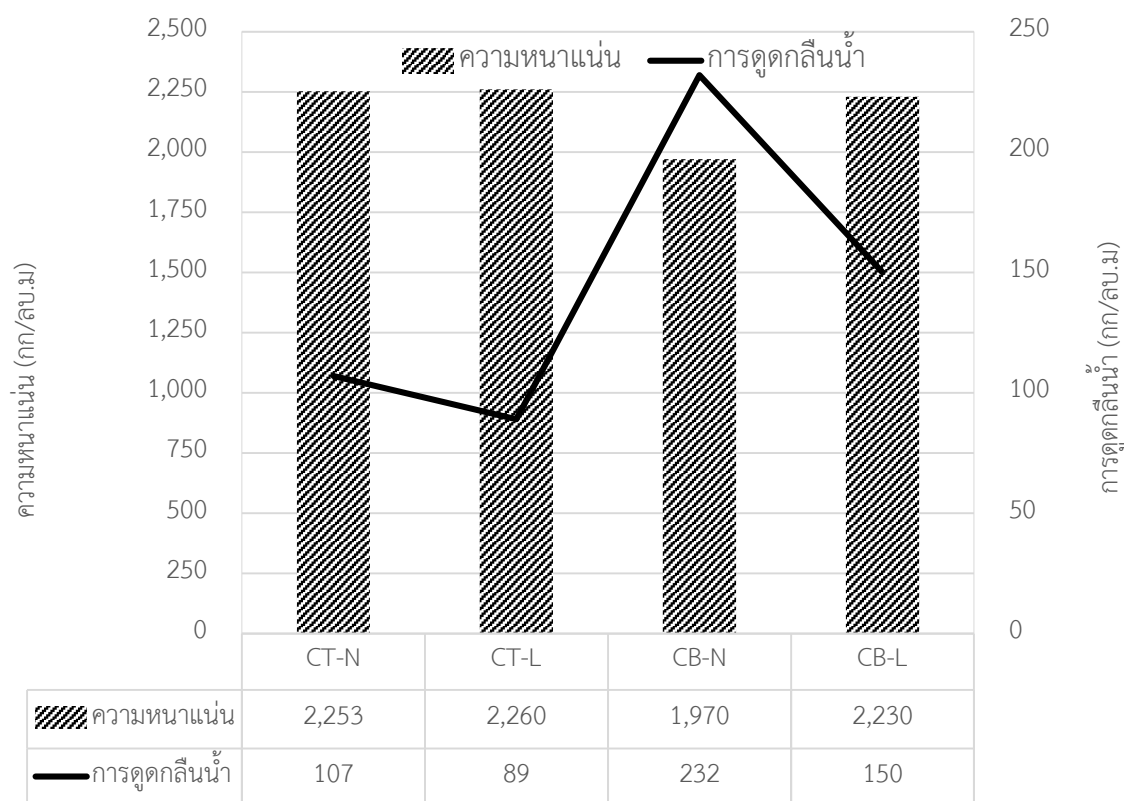
และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 มีความหนาแน่นที่มากกว่าคอนกรีตบล็อกที่ไม่ใช้แรงดันในการขึ้นรูปและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ยกตัวอย่างเช่น คอนกรีตบล็อก CT-L มีความหนาแน่นมากกว่า CT-N ในทางเดียวกัน CB-L มีความหนาแน่นมากกว่า CB-N ทั้งนี้เป็นเพราะการใช้แรงดันในการขึ้นรูปจะทำให้เนื้อของคอนกรีตอัดตัวกันแน่นขึ้นเมื่อคอนกรีตแข็งตัวจะทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตมีมากขึ้น สอดคล้องกับรายงานของ Namarak และคณะ [18] รายงานว่า การเพิ่มแรงดันส่งผลให้ความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกมากขึ้นด้วย นอกจากนี้การลดอัตราส่วนส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในส่วนผสมทำให้ปริมาณน้ำอิสระในเนื้อคอนกรีตน้อยลงส่งผลให้ปริมาณโพรงลดลง [19] การลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจึงเป็นอีกหนึ่งเหตุผลที่ทำให้ความแน่นของคอนกรีตบล็อกมีค่ามากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบผลของวัสดุประสานต่อความหนาแน่นพบว่าคอนกรีตบล็อกมี OPC ล้วนเป็นวัสดุประสาน มีความหนาแน่นสูงกว่าคอนกรีตบล็อกที่ทำจาก CB เป็นวัสดุประสาน ทั้งนี้เป็นเพราะความถ่วงจำเพาะของ OPC มีค่าสูงกว่า CCR และ BA โดยที่ OPC มีความถ่วงจำเพาะ 3.15 ในขณะที่ CCR และ BA มีค่าเท่ากับ 2.37 และ 2.66 อีกทั้งปฏิกิริยาไฮเดรชันของ OPC มีปฏิกิริยาที่เร็วและสมบูรณ์กว่าปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่าง CCR และ BA โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วง 28 วันแรก [20] ด้วยเหตุนี้ส่งผลให้ความหนาแน่นของคอนกรีต

บล็อก CB มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตบล็อก CT เมื่อปรับปรุงคอนกรีตบล็อก CB ด้วยวิธีการเพิ่ม OPC ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ในส่วนผสม ใช้แรงดันในการขึ้นรูป และลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเหลือ 0.35 (CB-L) ทำให้คอนกรีตบล็อก CB มีความหนาแน่นสูงขึ้นกว่าเดิม (CB-N) แต่ยังคงมีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าคอนกรีตบล็อก CT-N ที่ไม่ใช้แรงดันในการขึ้นรูปและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 เล็กน้อย

สำหรับค่าการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตบล็อกมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นอย่างมีนัยสำคัญกล่าวคือเมื่อความหนาแน่นมากขึ้นส่งผลให้ค่าการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตบล็อกต่ำลง เป็นที่ทราบกันดีว่าความหนาแน่นมีมากขึ้นปริมาณช่องว่างมีน้อยลงทำให้การดูดกลืนของคอนกรีตบล็อกมีค่าต่ำลง นอกจากนี้จะเห็นว่าคอนกรีต CB-N และ CB-L มีค่าการดูดกลืนน้ำสูงกว่าคอนกรีตบล็อก CT-N และ CT-L ค่อนข้างมาก ไม่เพียงแต่เป็นผลเนื่องมาจากความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกแต่ยังเนื่องมาจากอนุภาคของ CCR และ BA มีความพรุนสูงทำให้มีการดูดน้ำเข้าไปในอัตราที่สูงขึ้น

ถึงแม้ว่าคอนกรีตบล็อก CB มีค่าการดูดกลืนน้ำน้อยกว่าคอนกรีตบล็อก CT อย่างไรก็ตาม คอนกรีตบล็อก CB-L ยังคงมีค่าการดูดกลืนน้ำที่ 28 วัน ผ่านมาตรฐาน มอก. 60-2516 [21] สำหรับคอนกรีตบล็อกเชิงต้นชั้นคุณภาพ ก-1 ก-2 กล่าวคือมีค่าการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตบล็อกไม่เกิน 160 กก./ลบ.ม. สำหรับคอนกรีตบล็อกที่มีความหนาแน่นมากกว่า 2001 กก./ลบ.ม.



รูปที่ 5 ความหนาแน่นและการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตบล็อก

3.2 กำลังอัดของคอนกรีตบล็อก

จากผลการทดสอบกำลังอัด พบว่ากำลังอัดของคอนกรีต CT จะมีการพัฒนากำลังอย่างรวดเร็วในช่วงแรก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วง 14 วัน ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้คอนกรีตบล็อก CT-N และ CT-L มีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตบล็อก CB-N และ CB-L ดังแสดงในตารางที่ 5 ดังที่กล่าวมาข้างต้น กำลังอัดที่เกิดขึ้นของคอนกรีตบล็อก CB-N และ CB-L เกิดจากผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่าง Ca(OH)_2 ของ CCR และ SiO_2 รวมถึง Al_2O_3 ของ BA ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ หากสังเกตจากร้อยละของกำลังของคอนกรีตบล็อก CB เทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตบล็อก CT จะเห็นว่า ทั้งคอนกรีตบล็อก CB-N และ CB-L ร้อยละของกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่คอนกรีตบล็อกมีอายุ 7 วันขึ้นไปและค่อนข้างคงที่เมื่อคอนกรีตบล็อกมีอายุมากกว่า 56 วัน แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดที่ได้จากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

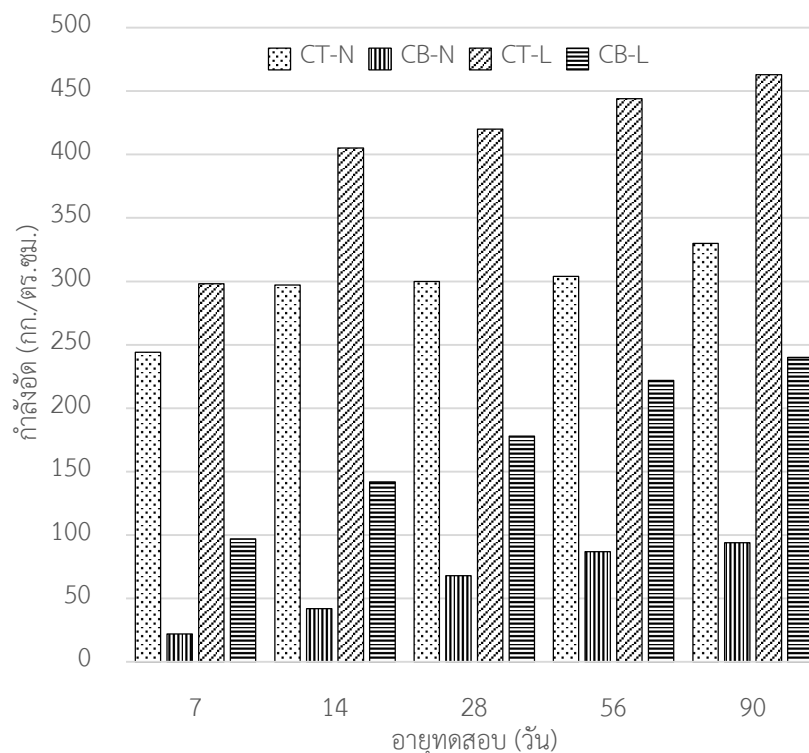
ในช่วง 56 วันแรก หลังจากนั้นจะมีอัตราคงที่เมื่อเทียบกับอัตราการพัฒนากำลังอัดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตบล็อก CT ดังแสดงในรูปที่ 6

ตารางที่ 5 กำลังอัดของคอนกรีตบล็อก (หน่วย: กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

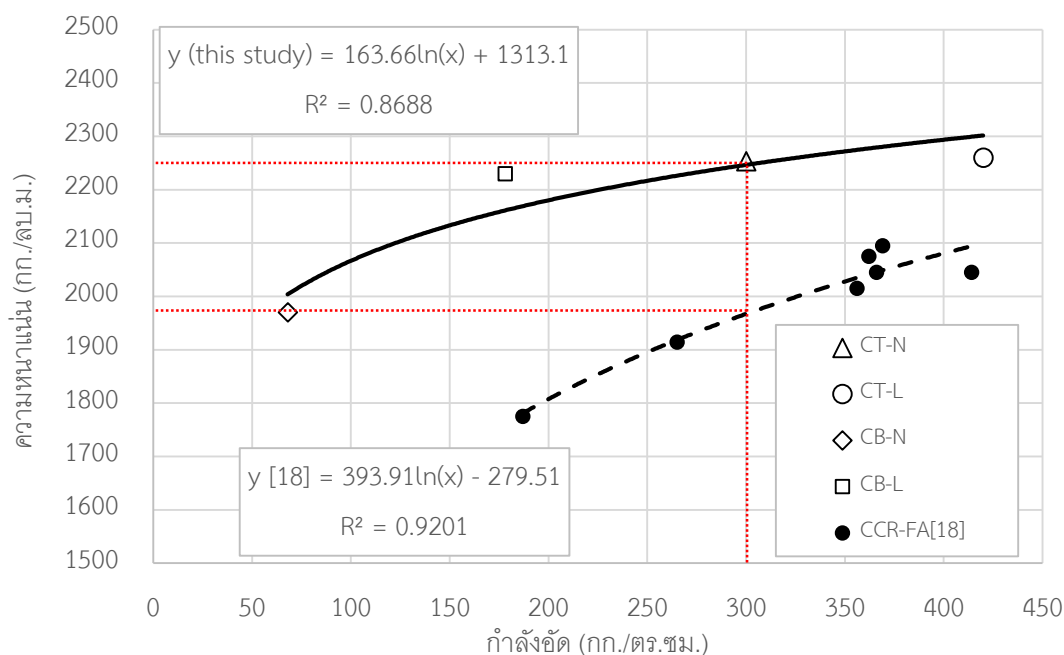
คอนกรีตบล็อก	กำลังอัด (ร้อยละ)				
	7 วัน	14 วัน	28 วัน	56 วัน	90 วัน
CT-N	244 (100)	297 (100)	300 (100)	304 (100)	330 (100)
CB-N	22 (9.0)	42 (14.1)	68 (22.7)	87 (28.6)	94 (28.5)
CT-L	298 (100)	405 (100)	420 (100)	444 (100)	463 (100)
CB-L	97 (32.6)	142 (35.1)	178 (42.4)	222 (50.0)	240 (51.8)

เมื่อแยกพิจารณาคอนกรีตบล็อกตามวัสดุประสานที่เหมือนกัน สำหรับคอนกรีตบล็อก CT-L มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตบล็อก CT-N อย่างชัดเจน ในขณะที่เดียวกัน คอนกรีตบล็อก CB-L มีกำลังสูงกว่าคอนกรีตบล็อก CB-N เช่นเดียวกัน ซึ่งมีเหตุผลสามารถอธิบายได้ว่า ประการแรก การลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในส่วนผสมส่งผลให้กำลังอัดมีค่าสูงขึ้น Lam และคณะ [22] รายงานว่าหากปริมาณน้ำในส่วนผสมมีมากขึ้นทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ของอนุภาคเจือจางจึงอาจทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้น้อยลง นอกจากนี้ปริมาณน้ำอิสระยังทำให้อัตราในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกต่ำลง และทำให้เกิดโพรงในซีเมนต์เพสต์มากขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าลดลง [19, 23] ประการที่สองการใช้แรงดันมาช่วยในการขึ้นรูปทำให้เนื้อคอนกรีตอัดตัวกันแน่นขึ้นความหนาแน่นมีมากขึ้นทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งเห็นได้ชัดว่าความหนาแน่นมีความสัมพันธ์กับกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกอย่างชัดเจน กล่าวคือกำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกมีค่ามากขึ้น ผลการ

ทดสอบในครั้งนี้เป็นการยืนยันผลการทดสอบของ Namarak และคณะ [18] ซึ่งศึกษาคอนกรีตบล็อกที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสาน (CCR-FA) อย่างไรก็ตามจะพบว่าหากพิจารณาที่กำลังอัดเท่ากัน ความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้มีค่ามากกว่าความหนาแน่นที่ได้จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ [18] ตัวอย่างเช่น พิจารณากำลังอัดเท่ากับ 300 กก./ตร.ซม. ความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อก CCR-FA มีค่าประมาณ 1970 กก./ลบ.ม. ในขณะที่ความหนาแน่นที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้มีค่าประมาณ 2250 กก./ลบ.ม. ทั้งนี้เนื่องมาจากคอนกรีตจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ [18] ที่ใช้มวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.40 เป็นมวลรวมในส่วนผสมเพียงอย่างเดียวและมีอัตราส่วนของวัสดุประสาน : มวลรวม เท่ากับ 1:3 ในขณะที่คอนกรีตบล็อกในการศึกษาครั้งนี้เป็นมวลรวมละเอียด และมีการเพิ่มหินปูนที่มีความจำเพาะเท่ากับ 2.71 เป็นมวลรวมหยาบ อีกทั้งอัตราส่วนระหว่างวัสดุประสาน : มวลรวม เท่ากับ 1:3.15



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกและอายุทดสอบ



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและกำลังอัดของคอนกรีตบล็อก

การศึกษาครั้งนี้ยังพบอีกว่าไม่เพียงแต่การใช้แรงดันในการขึ้นรูปและการลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในส่วนผสมการเพิ่ม OPC เพียงร้อยละ 10 ยังสามารถให้กำลังอัดของคอนกรีตบล็อก CB-L มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยกำลังอัดของคอนกรีตบล็อก CB-L มีค่าเท่ากับ 142 กก./ตร.ซม. ซึ่งมีค่าสูงกว่ามาตรฐาน มอก. 60-2516 [21] คือต้องมากกว่า 125 กก./ตร.ซม. เมื่อพิจารณาร่วมกับความหนาแน่นและค่าดูดกลืนน้ำของคอนกรีตบล็อกพบว่าคอนกรีตบล็อก CB-L สามารถจัดเป็นคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักเชิงตันชั้นคุณภาพ ก-1 และ ก-2 คือคอนกรีตบล็อกที่ใช้สำหรับกำแพงภายนอกทั้งเหนือและต่ำกว่าระดับดินโดยไม่จำเป็นต้องมีการป้องกันผิว อย่างไรก็ตามสำหรับคอนกรีต CB-N เมื่ออายุมากกว่า 56 วัน สามารถจัดเป็นคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักเชิงตันชั้นคุณภาพ ค-1 และ ค-2 กล่าวคือคอนกรีตบล็อกที่ใช้ทั่วไปสำหรับกำแพงหรือระดับดินที่มีการป้องกันความเสียหายเนื่องจากดินฟ้าอากาศ โดยต้องมีกำลังอัดมากกว่า 85 กก./ตร.ซม.

4. สรุป

บทความนี้นำเสนอการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุประสานสำหรับผลิตคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักเชิงตันจากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 การดูดกลืนน้ำมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อก ค่าการดูดกลืนน้ำจะมีค่าลดลงเมื่อคอนกรีตบล็อกมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

4.2 การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าก้นเตาบดละเอียดเป็นวัสดุประสานผลิตเป็นคอนกรีตบล็อกเชิงตันโดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ส่งผลให้ค่าการดูดกลืนน้ำมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม อย่างไรก็ตามการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตบล็อก CB สามารถปรับปรุงได้โดยการใส่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน การใช้แรงดันในการขึ้นรูป และการลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

4.3 ค่ากำลังอัดมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกเช่นเดียวกันกับค่าการดูดกลืนน้ำ กล่าวคือกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อคอนกรีตบล็อกมีความหนาแน่นมากขึ้น

4.4 งานวิจัยนี้สามารถผลิตคอนกรีตบดล็อกรับน้ำหนักเชิงตันตามมาตรฐาน มอก. 60-2561 ได้จากวัสดุประสานที่มาจากวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมคือ กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าก้นเตา โดยการเพิ่มปูนซีเมนต์ในส่วนผสมเพียงร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน การใช้แรงดันในการขึ้นรูป และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 สามารถผลิตคอนกรีตบดล็อกมีกำลังอัดและการดูดกลืนน้ำผ่านเกณฑ์มาตรฐานสำหรับคอนกรีตบดล็อกรับน้ำหนักเชิงตันประเภท ก-1 และ ก-2 สำหรับคอนกรีตบดล็อกที่ใช้วัสดุประสานจากวัสดุเหลือทิ้งโดยไม่มีปูนซีเมนต์ในส่วนผสม สามารถจัดเป็นคอนกรีตบดล็อกรับน้ำหนักเชิงตันประเภท ค-1 และ ค-2

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล ที่ได้สนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ ภายใต้สัญญาทุนเลขที่ A-3/2561

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] G. Habert, C. Billard, P. Rossi, C. Chen and N. Roussel, "Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives," *Cem. Conc. Res.*, vol. 40, no. 5, pp. 820–826, 2010.
- [2] E. Gartner, "Industrially interesting approaches to "low-CO₂" cements," *Cem. Conc. Res.*, vol. 34, no. 9, pp. 1489–1498, 2004.
- [3] C. Jaturapitakkul and B. Roongreung, "Cementing material from calcium carbide resi-due-rice husk ash," *J. Mat. Civ. Eng, ASCE*, vol. 15, no. 5, pp. 470–475, 2003.
- [4] C. D. Altis, "High-volume fly ash concrete with high strength and low drying shrinkage," *J. Mat. Civ. Eng, ASCE*, vol. 15, no. 2, pp. 153–156, 2003.
- [5] A. Rerkpiboon, W. Tangchirapat and C. Jaturapitakkul, "Strength, chloride resistance, and expansion of concretes containing ground bagasse ash," *Constr. Build. Mat.*, vol. 101, part. 1, pp. 983–989, 2015.
- [6] ปิติศานต์ กร้ามาตร, สุภิษาติ มาตย์ภูธร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิมล เงามพิสดาร. "การศึกษา กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ได้จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหิน," วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 7 (ฉบับที่ 2): หน้า 65–75, 2539.
- [7] ธนพล เหล่าสมาธิกุล และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. "สมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสาน," *การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 4*. 20-22/10/2551. อุบลราชธานี, 2551, หน้า MAT88–MAT95.
- [8] สุทธิพันธ์ แอเดียว, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. "กำลังอัดและการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร่วมกับเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสาน," วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 22 (ฉบับที่ 4): หน้า 34–42, 2554.
- [9] C. Jaturapitakkul and R. Cheererot, "Development of bottom ash as pozzolanic material," *J. Mat. Civ. Eng, ASCE*, vol. 15, no. 1, pp. 48–53, 2003.
- [10] H. Kurama and M. Kaya, "Usage of coal combustion bottom ash in concrete mixture," *Constr. Build. Mat.*, vol. 22, no. 9, pp. 1922–1928, 2008.
- [11] A. Abdulmatin, W. Tangchirapat and C. Jaturapitakkulya, "An investigation of bottom ash as a pozzolanic material," *Constr. Build. Mat.*, vol. 186, pp. 155–162, 2018.

- [12] เพ็ญพิชชา คงเพิ่มโกศล, อรรคเดช อับดุลมาติน, วีระชาติ ตั้งจิรภัทร และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. “การพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีตโดยใช้วัสดุประสานจากเถ้าก้นเตาและกากแคลเซียมคาร์ไบด์,” วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, ปีที่ 4 (ฉบับที่ 1), หน้า 11–19, 2559.
- [13] P. Chindaprasirt, C. Jaturapitakkul, W. Chalee and U. Rattanasak, “Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers,” *Waste Manage.*, vol. 29, no. 2, pp. 539–543, 2009.
- [14] Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM Standard C618, 2015.
- [15] A. Abdulmatin, P. Khongpermgoson, W. Tangchirapat and C. Jaturapitakkul, “Use of eco-friendly cementing material in concrete made from bottom ash and calcium carbide residue,” *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 43, no. 4, pp. 1617–1626, 2018.
- [16] อรรคเดช อับดุลมาติน, วีระชาติ ตั้งจิรภัทร และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. “ผลกระทบของชนิดของสารลดน้ำพิเศษต่อสมบัติของเพสต์และมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าก้นเตาร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสาน,” วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, ปีที่ 3 (ฉบับที่ 1), หน้า 31–41, 2558.
- [17] ASTM C140 / C140M-18a, Standard Test Methods for Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Units, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- [18] C. Namarak, C. Bumrungsri, W. Tangchirapat, and C. Jaturapitakkul, “Development of Concrete Paving Blocks Prepared from Waste Materials without Portland Cement,” *Mater. Sci.*, Vol. 24, no. 1, pp. 92-99, 2018.
- [19] V. Živica, “Effects of the very low water/cement ratio,” *Constr. Build. Mat.* Vol. 23, no. 12, pp. 3579-3582, 2009
- [20] C. Rattanashotinunt, P. Thairit, W. Tangchirapat, and C. Jaturapitakkul, “Use of calcium carbide residue and bagasse ash mixtures as a new cementitious material in concrete,” *Mater. Des.*, Vol. 46, pp. 106–111, 2013.
- [21] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกแข็งต้นรับน้ำหนัก, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม มอก. 60-2516, 2516.
- [22] L. Lam, Y. Wong, and C. Poon, “Degree of hydration and gel/space ratio of high-volume fly ash/cement systems,” *Cem. Concr. Res.* Vol. 30, no. 5, pp. 747–756, 2000.
- [23] R. Duval, and E. Kadri, “Influence of silica fume on the workability and the compressive strength of high-performance concretes,” *Cem. Concr. Res.* Vol. 28, no. 4, pp. 533–547, 1998.

สภาพจิตสังคมในการทำงานของแรงงานก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรร Psychosocial Working Condition of Construction Labor Working in Subdivision Housing Project

นที สุริยานนท์^{1*} นคร สุริยานนท์² และวนิดา สุริยานนท์^{2,3,4}

Natee Suriyanon Nakorn Suriyanon and Wanida Suriyanon

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพมหานคร 10530

²สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ 50300

³ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50300

⁴บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50300

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mahanakorn University of Technology,
Bangkok, 10530, Thailand

²Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Lanna, Chiangmai 50300, Thailand

³Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Chiangmai University,
Chiangmai, 50300, Thailand

⁴Graduate School of Chiangmai University, Chiangmai University, Chiangmai, 50300, Thailand

*E-mail: nsuriyan@hotmail.com

(Received: April 27, 2020; Accepted: May 15, 2020)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้สำรวจระดับการรับรู้ของแรงงานก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรรต่อสามปัจจัยด้านจิตสังคมในการทำงาน จำแนกกลุ่มแรงงานตามประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงาน และทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลส่วนบุคคลของกลุ่มตัวอย่างและประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงาน กลุ่มตัวอย่างของงานวิจัยคือแรงงาน 438 คนจากแปดโครงการก่อสร้างบ้านจัดสรรในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร ซึ่งมีราคาขายต่อหลังระหว่าง 2.50 ล้านบาท ถึง 5.00 ล้านบาท การจัดเก็บข้อมูลถูกดำเนินการในเดือน ตุลาคม 2561 คะแนนการรับรู้ปัจจัยด้านการเรียกร้องจากงาน ด้านอำนาจการควบคุมในงาน และด้านการสนับสนุนทางสังคมที่ได้รับจากการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.96 คะแนน 2.96 คะแนน และ 3.04 คะแนนตามลำดับ สัดส่วนกลุ่มตัวอย่างในประเภทสภาพจิตสังคมที่ทำให้แรงงานมีความเครียดสูงและรู้สึกโดดเดี่ยว มีความเครียดสูงแต่ไม่รู้สึกโดดเดี่ยว รู้สึกกระตือรือร้น มีความเครียดต่ำ และรู้สึกเฉื่อยชา มีจำนวนร้อยละ 16.21 ร้อยละ 21.24 ร้อยละ 21.46 ร้อยละ 21.23 และร้อยละ 19.86 ตามลำดับ ผลการทดสอบไคสแควร์แสดงว่า เพศ อายุ ระดับการศึกษา สัญชาติ ประสบการณ์การทำงาน ประเภทการว่าจ้าง ตำแหน่ง รายได้เฉลี่ยต่อเดือน เป็นข้อมูลส่วนบุคคลของแรงงานที่มีความสัมพันธ์กับประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานของแรงงานอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: สภาพจิตสังคมในการทำงาน แรงงานก่อสร้าง โครงการบ้านจัดสรร

ABSTRACT

This research examined the perceptions of the construction labors working in subdivision housing project on three psychosocial factors, classified labors according to their psychosocial working condition statuses, and tested the relationship between samples' personal characteristics and their psychosocial working conditions statuses. The samples of this research were 438 workers working in eight housing estate projects in Bangkok, which had selling price between 2.50 million baht and 5.00 million baht. Data was collected in October 2018. Samples perception scores of the psychological demand, the control latitude and the social support analyzed from the survey data had the mean values of 2.96, 2.96 and 3.04, respectively. Proportion of the samples in the psychosocial working condition statuses that causes high strain isolated, high strain collective, active behavior, low strain, and passive behavior were 16.21 %, 21.24 %, 21.46 %, 21.23 %, and 19.86 %, respectively. Results from Chi-Square test indicated that gender, age, education level, nationality, work experience, type of employment, position, and average monthly income are labor's personal characteristics that were significantly related with psychosocial working conditions status of the labor.

Keywords: Psychosocial Working Condition, Construction Labor, Subdivision Housing Project

1. บทนำ

ในแต่ละปีมีงานก่อสร้างในโครงการบ้านจัดสรรในเขตกรุงเทพและปริมณฑลเป็นจำนวนมาก ข้อมูลทางสถิติจากธนาคารแห่งประเทศไทย ระบุว่าในระหว่างปี 2556 ถึง 2560 มีการขออนุญาตจดทะเบียนที่พักอาศัยประเภทบ้านพักอาศัยในโครงการบ้านจัดสรรจำนวนมากถึง 167,915 หน่วย [1] อย่างไรก็ตามด้วยอุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่ใช้แรงงานเข้มข้น ซึ่งประสบปัญหาการขาดแคลนแรงงานอย่างมาก [2] เพื่อรักษาไว้และเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของกิจการผู้รับเหมาก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรรจำเป็นต้องใส่ใจในการบริหารแรงงานก่อสร้าง ซึ่งเป็นทรัพยากรที่กิจการมีอยู่อย่างจำกัด ให้สามารถทำงานได้อย่างเต็มศักยภาพ

สภาพจิตสังคมในการทำงาน (Psychosocial Working Condition) เป็นหนึ่งในปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างสูงต่อผลิตผลของแรงงาน หลายงานวิจัยในอดีตยืนยันว่าสภาพจิตสังคมในการทำงานซึ่งทำให้แรงงานมีความเครียดสูง (และรู้สึกโดดเดี่ยว) ตามทฤษฎี Job Demand – Control (–Support) Model ได้แก่ สภาพ

การทำงานซึ่งทำให้แรงงานรู้สึกว่าคุณค่าตนถูกคาดหวังความรับผิดชอบจากการทำงานสูง แต่กลับมีระดับอำนาจการควบคุมในงานต่ำ (และได้รับการสนับสนุนทางสังคมต่ำ) จะส่งผลกระทบต่อแรงงานในหลายด้าน ได้แก่ 1) ด้านสุขภาวะทางด้านจิตใจที่สัมพันธ์กับงานที่ทำ (Job related well-being) ได้แก่ ความพึงพอใจในงานที่ทำ (Job satisfaction) ความอ่อนเพลียทางอารมณ์หรือหมดแรงที่จะทำงาน (Emotional exhaustion) [3] และ [4] 2) ด้านสุขภาวะทางด้านจิตใจโดยทั่วไป (General psychological well-being) ได้แก่ สุขภาพจิต (Mental health) ความทุกข์ทางจิตใจ (Psychological distress) ความวิตกกังวล (Anxiety) ความซึมเศร้า (Depression) และความอ่อนเพลีย อ่อนใจ (Fatigue) [3] และ [4] และ 3) ด้านสุขภาพกาย (Physical health status) ได้แก่ การเกิดโรคหัวใจและหลอดเลือด (Cardiovascular disease) การเกิดอาการความผิดปกติ หรือตายจากสภาวะหรือโรคอื่น ๆ ที่ไม่ใช่โรคหัวใจและหลอดเลือด (Non-cardiovascular diseases) เช่น โรคระบบทางเดินอาหาร (Gastro intestinal disease) โรคหรือความผิดปกติทาง

ผิวหนัง (Skin disorder) อาการกล้ามเนื้อและกระดูก (Musculoskeletal symptoms) พยาธิสภาพและการตายที่สัมพันธ์กับการดื่มสุรา (Alcohol related morbidity and mortality) และการตายจากทุกสาเหตุ (All-cause mortality) [5] นอกจากนั้นยังพบว่าแรงงานซึ่งมีความเครียดสูง (และรู้สึกโดดเดี่ยว) ยังมีอัตราการขาดงาน [6] และมีความตั้งใจที่จะเลิกอาชีพหรือลาออกจากงาน [7] – [9] สูงกว่าแรงงานในกลุ่มอื่นอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน

จากข้อเท็จจริงข้างต้น เพื่อให้ผู้รับเหมาก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรรมีเกณฑ์เปรียบเทียบความเหมาะสมของสัดส่วนแรงงานในแต่ละประเภทสภาพทางจิตสังคมในการทำงานในกิจการของตนรวมถึงสามารถวางแผนการปรับปรุงสัดส่วนแรงงานในแต่ละประเภทสภาพทางจิตสังคมในการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้จึงทำการสำรวจข้อมูลระดับการรับรู้ของแรงงานก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรรต่อสามปัจจัยด้านจิตสังคมในการทำงาน ตามทฤษฎี Job Demand – Control (–Support) Model ได้แก่ ข้อเรียกร้องจากงาน (Psychological Demand) อำนาจการควบคุมในงานของแรงงาน (Control Latitude) และการสนับสนุนทางสังคม (Social Support) และจำแนกสัดส่วนแรงงานตามประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงาน รวมถึงทำการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลส่วนบุคคลของแรงงานกับประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงาน

2. วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ ดังนี้

2.1 สำรวจระดับการรับรู้ของแรงงานก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรรต่อสามปัจจัยด้านจิตสังคมในการทำงานอันประกอบไปด้วย การเรียกร้องจากงาน อำนาจการควบคุมในงาน และการสนับสนุนทางสังคม

2.2 จำแนกกลุ่มแรงงานก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรรตามประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงาน ตามทฤษฎี Job Demand – Control (–Support) Model

และทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติส่วนบุคคลกับประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงาน

3. ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีขอบเขตของการวิจัย ดังนี้

3.1 ขอบเขตด้านประชากร

กลุ่มประชากรที่งานวิจัยนี้ศึกษา คือ แรงงานก่อสร้าง ไม่จำกัดเพศ ช่วงอายุระหว่าง 20 ปี ถึง 55 ปี ซึ่งปฏิบัติงานอยู่ในโครงการก่อสร้างบ้านจัดสรรในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร ซึ่งมีราคาขายต่อหลังระหว่าง 2.50 ล้านบาท ถึง 5.00 ล้านบาท

3.2 ขอบเขตด้านเนื้อหาที่ศึกษา

ปัจจัยด้านจิตสังคมในการทำงานของคณงานก่อสร้างบ้านจัดสรร ที่งานวิจัยนี้ศึกษาประกอบด้วย ข้อเรียกร้องจากงาน อำนาจการควบคุมในงาน และการสนับสนุนทางสังคม และงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลระดับการรับรู้ของแรงงานต่อปัจจัยทั้งสามในจำแนกกลุ่มแรงงานก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรร ออกเป็นห้าประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงาน ประกอบด้วย

ประเภท 1A –สภาพจิตสังคมในการทำงานที่ทำให้แรงงานมีความเครียดจากการทำงานสูง และรู้สึกโดดเดี่ยว

ประเภท 1B –สภาพจิตสังคมในการทำงานที่ทำให้แรงงานมีความเครียดจากการทำงานสูง แต่ไม่รู้สึกโดดเดี่ยว

ประเภท 2 –สภาพจิตสังคมในการทำงานที่ทำให้แรงงานรู้สึกกระตือรือร้น (ทำงานเชิงรุก)

ประเภท 3 –สภาพจิตสังคมในการทำงานที่ทำให้แรงงานมีเครียดจากการทำงานต่ำ

ประเภท 4 –สภาพจิตสังคมในการทำงานที่ทำให้แรงงานรู้สึกเฉื่อยชา (ทำงานเชิงรับ)

3.3 ขอบเขตด้านเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

งานวิจัยนี้ใช้แบบสอบถามเป็นเครื่องมือในการสำรวจระดับการรับรู้ของแรงงานต่อสามปัจจัยด้านจิตสังคมในการทำงาน

สถิติเชิงพรรณนาที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลส่วนบุคคลของกลุ่มตัวอย่าง และระดับการรับรู้ของแรงงานต่อ

สามปัจจัยด้านจิตสังคมในการทำงาน คือ ความถี่ ร้อยละ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

สถิติเชิงอนุมาน ที่ใช้ในทดสอบสมมติฐานความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลส่วนบุคคลของกลุ่มตัวอย่าง และประเภสภาพด้านจิตสังคมในการทำงานของแรงงาน คือ การทดสอบไคสแควร์ (Chi Square test)

3.4 ขอบเขตด้านระยะเวลาการเก็บข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างถูกดำเนินการในเดือน ตุลาคม พ.ศ. 2561 รวมระยะเวลา 1 เดือน

4. ปัจจัยด้านจิตสังคมในการทำงาน

ในปี ค.ศ. 1976 Robert Karasek [10] ได้เสนอ Job Demand-Control Model จำแนกประเภทต่าง ๆ ของสภาพด้านจิตสังคมในการทำงานจากการพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองปัจจัยด้านจิตสังคมในการทำงาน ได้แก่ ข้อเรียกร้องจากการทำงาน และอำนาจการควบคุมในงาน โดยปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้งสองจะก่อให้เกิดประเภสภาพจิตสังคมในการทำงานที่แตกต่างกันดังนี้

ประเภทที่ 1 สภาพจิตสังคมในการทำงานซึ่งทำให้แรงงานมีความเครียดจากการทำงานสูง (High Strain Job) ได้แก่ สภาพการทำงานซึ่งทำให้แรงงานรู้สึกว่ามีข้อเรียกร้องจากงานสูง แต่แรงงานมีอำนาจในการควบคุมในงานอยู่ในระดับต่ำ สภาพจิตสังคมในการทำงานประเภทนี้จะทำให้แรงงานมีความรู้สึกที่ต้องทำตามความต้องการของงานโดยไม่ต่อรองไม่ได้ แรงงานในกลุ่มนี้มีความเสี่ยงในการเกิดการเจ็บป่วย หรือมีปัญหาสุขภาพอย่างมาก

ประเภทที่ 2 สภาพจิตสังคมในการทำงานซึ่งทำให้แรงงานเกิดความกระตือรือร้น และทำงานเชิงรุก (Active Job) ได้แก่ สภาพการทำงานซึ่งทำให้แรงงานรู้สึกว่าแม้จะมีข้อเรียกร้องจากงานในระดับที่สูง แต่แรงงานก็มีอำนาจในการควบคุมในงานอยู่ในระดับสูงเช่นเดียวกัน สภาพจิตสังคมในการทำงานประเภทนี้จะทำให้แรงงานมีความเครียดในระดับปานกลาง เกิดความรู้สึกขยันขันแข็ง เกิดการมีส่วนร่วม เกิดแรงจูงใจที่จะเรียนรู้ เกิดความ

ต้องการที่จะมีชื่อเสียงหรือมีความเด่น และเกิดความรู้สึกถึงความสำเร็จในชีวิต

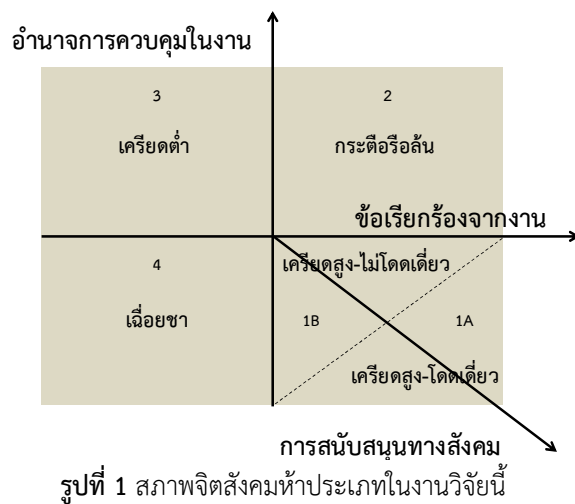
ประเภทที่ 3 สภาพจิตสังคมในการทำงานซึ่งทำให้แรงงานมีความเครียดจากการทำงานต่ำ (Low Strain Job) ได้แก่ สภาพการทำงานซึ่งทำให้แรงงานรู้สึกว่ามีข้อเรียกร้องจากงานต่ำ แต่แรงงานมีอำนาจในการควบคุมในงานอยู่ในระดับสูง สภาพจิตสังคมในการทำงานประเภทนี้จะทำให้แรงงานมีความเครียดจากการทำงานเล็กน้อย มีความสุขในการทำงาน แต่ในระยะยาวแรงงานอาจเกิดความรู้สึกกดดันเนื่องจากการขาดโอกาสในการใช้ศักยภาพของตนเองอย่างเต็มที่

ประเภทที่ 4 สภาพจิตสังคมในการทำงานซึ่งทำให้แรงงานเกิดความเฉื่อยชา และทำงานเชิงรับ (Passive Job) ได้แก่ สภาพการทำงานซึ่งทำให้แรงงานรู้สึกว่ามีข้อเรียกร้องจากงานและมีอำนาจในการควบคุมในงานอยู่ในระดับต่ำ สภาพจิตสังคมในการทำงานประเภทนี้จะทำให้แรงงานมีความเครียดในระดับปานกลาง เกิดความรู้สึกเฉื่อยชา มีการพัฒนาและสร้างสรรค์ต่ำ เกิดภาวะจำยอมโดยไม่คิดแก้ไขอะไร

ต่อมาในปี ค.ศ. 1988 Jeffrey V. Johnson และคณะ [11] ได้นำเสนอแนวคิดว่าการมีระดับการสนับสนุนทางสังคมสูงจะช่วยทุเลาการเกิดความเครียดจากการทำงานได้ และได้เสนอ Demand-Control-Support Model ซึ่งมีการเพิ่มปัจจัยด้านการสนับสนุนทางสังคมเข้าไปใน Demand-Control Model

ตามทฤษฎี Demand-Control Model แรงงานซึ่งทำงานในสภาพจิตสังคมประเภท 1 ซึ่งมีความเครียดจากการทำงานสูง เป็นแรงงานที่มีความเสี่ยงต่อการมีปัญหาทางสุขภาพจิต มีปัญหาทางสุขภาพร่างกาย รวมถึงมีอัตราการขาดงาน และอัตราการลาออกจากงานสูงกว่าแรงงานกลุ่มอื่น และตามทฤษฎี Demand-Control-Support Model ความเครียดของแรงงานอาจได้รับการทุเลาลงหากแรงงานได้รับการสนับสนุนทางสังคม ในงานวิจัยนี้จึงเจาะจงจำแนกเฉพาะแรงงานในกลุ่มจิตสังคมในการทำงานประเภท 1 ออกเป็นสองประเภทย่อย ตามระดับปัจจัยด้านการสนับสนุนทางสังคม ได้แก่ ประเภท 1A

สภาพจิตสังคมในการทำงานที่ทำให้แรงงานที่มีความเครียดจากการทำงานสูง และรู้สึกโดดเดี่ยว และประเภท 1B สภาพจิตสังคมในการทำงานที่ทำให้แรงงานที่มีความเครียดจากการทำงานสูง แต่ไม่รู้สึกโดดเดี่ยว ดังแสดงในรูปที่ 1



5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แม้ว่าในต่างประเทศจะมีงานวิจัยเกี่ยวกับการสำรวจปัจจัยด้านจิตสังคมในการทำงาน การจำแนกประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงาน รวมถึงการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระดับปัจจัยจิตสังคมในการทำงาน ประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงาน และปัจจัยอิสระอื่นๆเป็นจำนวนมาก งานวิจัยในหัวข้อดังกล่าวในประเทศไทยกลับมีอยู่อย่างจำกัด จากข้อมูลงานที่ผู้วิจัยรวบรวมได้พบว่างานวิจัยในประเทศไทยส่วนใหญ่ให้ความสำคัญทำการศึกษากลุ่มตัวอย่างเพียงสองกลุ่ม ได้แก่ พนักงานหรือแรงงานในโรงงาน และผู้ประกอบการวิชาชีพพยาบาลหรือบุคลากรในโรงพยาบาลเท่านั้น โดยมีรายละเอียดโดยสังเขปดังนี้

งานวิจัยของ ทนงศักดิ์ ยิ่งรัตนสุข และคณะ [12] นิษฐ์ ประสิทธิ์เตสัง [13] ญัฐ ประสิทธิ์เตสัง และญัฐนันท์ ประสิทธิ์เตสัง [14] สุรัสวดี ถนัดศีลธรรม [15] เปรมยศ เปี่ยมนิธิกุล [16] ทำการสำรวจระดับปัจจัยด้านจิตสังคมในการทำงานของพนักงานหรือแรงงานในโรงงาน งานวิจัยสามงานวิจัยแรกใช้แบบสอบถามซึ่งแปลมาจาก

Psychosocial Working Condition Questionnaire ของ Maria WindersZal-Bazyl เป็นเครื่องมือในการสำรวจระดับปัจจัยด้านจิตสังคมของกลุ่มตัวอย่าง ในขณะที่งานวิจัยที่เหลือใช้แบบสอบถามที่ดัดแปลงหรือแปลจาก Job Content Questionnaire ของ Robert Karasek เป็นเครื่องมือสำรวจระดับปัจจัย

นอกจากการนำเสนอข้อมูลการรับรู้ของกลุ่มตัวอย่างต่อปัจจัยด้านจิตสังคมแล้ว งานวิจัยของทนงศักดิ์ ยิ่งรัตนสุข และคณะ [12] และ งานวิจัยของสุรัสวดี ถนัดศีลธรรม [15] ยังได้ทำการจำแนกกลุ่มตัวอย่างตามประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงาน โดยงานวิจัยของทนงศักดิ์ ยิ่งรัตนสุข และคณะ [12] ได้ใช้เกณฑ์ค่าเฉลี่ยคะแนนของแต่ละปัจจัยด้านจิตสังคมต่ำกว่า 3 และตั้งแต่ 3 ขึ้นไปแบ่งกลุ่มแรงงานเป็นกลุ่มคะแนนต่ำและกลุ่มคะแนนสูง (ทั้งสามปัจจัยมีช่วงคะแนนระหว่าง 1 ถึง 5 คะแนน) ในขณะที่งานวิจัยของ สุรัสวดี ถนัดศีลธรรม [15] ใช้เกณฑ์ค่ามัธยฐานของคะแนนของแต่ละปัจจัยด้านจิตสังคมเป็นเกณฑ์ในการแบ่งกลุ่ม

ทนงศักดิ์ ยิ่งรัตนสุข และคณะ [12] และสุรัสวดี ถนัดศีลธรรม [15] ยังทำการทดสอบไคสแควร์ เพื่อทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยอิสระต่าง ๆ และประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงาน (ระดับความเครียดจากงาน) ผลการศึกษาของทนงศักดิ์ ยิ่งรัตนสุข และคณะ [12] ยืนยันว่า เพศ มีความสัมพันธ์กับประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงาน ในขณะที่ผลการศึกษาของสุรัสวดี ถนัดศีลธรรม [15] ยืนยันว่า อายุ การศึกษา ประสบการณ์การทำงาน และรายได้ สัมพันธ์กับระดับประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงาน (ระดับความเครียดจากงาน)

จิรัฐดา ธาณรัตน์ [17] ทิพากร สายเพชร [18] ปาณิภา เสี่ยงเพราะ และคณะ [19] วีรวัฒน์ ทางธรรม [20] Orawan Kaewboonchoo และคณะ [21] นาฏยามณีรุ่ง [22] Jutamane Sakkomonsri และคณะ [23] กฤตภพ ฐิตารีย์ และ วรุฒ ชัยวงษ์ [24] ทำการสำรวจระดับปัจจัยด้านจิตสังคมในการทำงานของพยาบาลวิชาชีพและบุคลากรในโรงพยาบาล

งานวิจัยของทิพากร สายเพชร[18] ใช้แบบสอบถามซึ่งแปลมาจาก Psychosocial Working Condition Questionnaire ของ Maria WindersZal-Bazyl เป็นเครื่องมือในการประเมินระดับปัจจัยด้านจิตสังคมของกลุ่มตัวอย่าง งานวิจัยที่เหลือใช้แบบสอบถามที่ดัดแปลงหรือแปลจาก Job Content Questionnaire ของ Robert Karasek หรือ ทฤษฎี Job Demand-Control-Support Model เป็นเครื่องมือสำรวจระดับปัจจัย

ในการจำแนกกลุ่มตัวอย่างตามประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงาน จิริสุตา ธาณิรัตน์ [17] จำแนกกลุ่มตัวอย่างเป็นสี่กลุ่มตาม Job Demand-Control Model และแปดกลุ่มตาม Job Demand-Control-Support Model โดยใช้เกณฑ์คะแนนด้านความต้องการในงานต่ำกว่าหรือเท่ากับ 31 คะแนน (จากช่วงคะแนน 8 ถึง 40 คะแนน) คะแนนด้านการควบคุมงานต่ำกว่าหรือเท่ากับ 41 คะแนน (จากช่วงคะแนน 12 ถึง 60 คะแนน) และด้านการสนับสนุนทางสังคมในการทำงานต่ำกว่าหรือเท่ากับ 81 คะแนน (จากช่วงคะแนน 23 ถึง 115 คะแนน) ในการแบ่งกลุ่มคะแนนปัจจัยต่ำ และคะแนนปัจจัยสูง

ทิพากร สายเพชร [18] ได้จำแนกกลุ่มตัวอย่างเป็นสองประเภท โดยใช้ค่าคะแนนเฉลี่ยปัจจัยด้านข้อเรียกร้องจากงานหารด้วยค่าคะแนนเฉลี่ยปัจจัยด้านการควบคุมในงาน น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 เป็นเกณฑ์ในการจำแนกประเภท ในขณะที่ ปาณิภา เสี่ยงเพราะ และคณะ [19] วีรวัฒน์ ทางธรรม [20] Orawan Kaewboon-choo และคณะ [21] Jutamanee Sakkomonsri และคณะ [23] จำแนกกลุ่มตัวอย่างเป็นสี่ประเภทตามแนวคิด Job Demand – Control Model โดย ปาณิภา เสี่ยงเพราะ และคณะ [19] ใช้เกณฑ์คะแนนปัจจัยด้านข้อเรียกร้องการทำงานน้อยกว่า 26 (จากช่วงคะแนน 8 ถึง 32 คะแนน) คะแนนปัจจัยด้านการควบคุมในงานน้อยกว่า 31 คะแนน (จากช่วงคะแนน 11 ถึง 44 คะแนน) ในการแบ่งกลุ่ม กฤตภพ ฐิตารีย์ และ วรุฒ ชัยวงศ์ [24] ใช้เกณฑ์ค่ามัธยฐานของคะแนนของแต่ละปัจจัยด้านจิตสังคมเป็นเกณฑ์ในการแบ่งกลุ่มคะแนนต่ำและกลุ่มคะแนนสูง งานวิจัยที่เหลือใช้

เกณฑ์ค่าเฉลี่ยคะแนนของแต่ละปัจจัยด้านจิตสังคมเป็นเกณฑ์ในการแบ่งกลุ่ม

นอกจากนี้ ปาณิภา เสี่ยงเพราะ และคณะ [19] วีรวัฒน์ ทางธรรม [20] Jutamanee Sakkomonsri และคณะ [23] และ กฤตภพ ฐิตารีย์ และ วรุฒ ชัยวงศ์ [24] ยังได้ทำการทดสอบไคสแควร์ เพื่อทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยอิสระต่าง ๆ กับประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงาน (ระดับความเครียดจากงาน) โดยผลการศึกษาของ ปาณิภา เสี่ยงเพราะ และคณะ [19] ระบุว่าตำแหน่งงาน ประสบการณ์ในการทำงาน และการอบรมเฉพาะทางโรคเมเร็ง สัมพันธ์ภาพภายในครอบครัวและภาระการรับผิดชอบในครอบครัว องค์กร สภาพการทำงาน และการสนับสนุนทางสังคม มีความสัมพันธ์กับความเครียดจากการทำงาน (ประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงาน) วีรวัฒน์ ทางธรรม [20] ระบุว่า อายุ ค่าตอบแทน สถานที่ปฏิบัติงาน แรงสนับสนุนทางสังคมจากผู้บังคับบัญชา ความคลุมเครือในบทบาท มีความสัมพันธ์กับความเครียดจากการทำงาน (ประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงาน) Jutamanee Sakkomonsri และคณะ [23] ระบุว่า อายุ ระดับการศึกษา ประสบการณ์การทำงาน ความเร่งด่วนของงาน ความผาสุก แรงสนับสนุนจากหัวหน้า แรงสนับสนุนจากเพื่อนร่วมงาน ความคลุมเครือของหน้าที่ และความขัดแย้งของหน้าที่ มีความสัมพันธ์กับความเครียดจากการทำงาน (ประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงาน) กฤตภพ ฐิตารีย์ และ วรุฒ ชัยวงศ์ [24] ระบุว่าปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับความเครียดจากงาน (ประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงาน) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ได้แก่ อายุ ระดับการศึกษา ความเพียงพอของรายได้ สาขาอาชีพ ข้อเรียกร้องจากงานด้านงานใช้ร่างกาย อันตรายหรือความเสี่ยงจากงาน แรงสนับสนุนทางสังคม แรงสนับสนุนจากหัวหน้างานและความมั่นคงในหน้าที่การงาน

Orawan Kaewboonchoo และคณะ [21] ใช้การวิเคราะห์ Multiple Regression วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ กับความต้องการที่จะคงอยู่ของพยาบาลที่ทำงานในประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงาน

ที่แตกต่างกัน พบว่า ในกลุ่มพยาบาลที่ทำงานในประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานที่มีความเครียดจากการทำงานสูง การสนับสนุนจากหัวหน้างานมีความสัมพันธ์กับความต้องการที่จะคงอยู่อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่กลุ่มพยาบาลซึ่งทำงานในประเภทสภาพจิตสังคมที่ทำให้เกิดความกระตือรือร้น การสนับสนุนจากเพื่อนร่วมงานมีความสัมพันธ์กับความต้องการที่จะคงอยู่อย่างมีนัยสำคัญ

นอกเหนือจากงานวิจัยเกี่ยวกับสภาพจิตสังคมในการทำงานในกลุ่มแรงงาน/พนักงานโรงงาน และกลุ่มวิชาชีพพยาบาลแล้ว มีผู้วิจัยทำการศึกษาศักยภาพด้านจิตสังคมในการทำงานและจำแนกประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงาน ในกลุ่มตัวอย่างอื่น ๆ จำนวนเล็กน้อย ได้แก่ งานวิจัยดังต่อไปนี้

ดลฤดี เพชรขำ [25] และ จิตกาญจนา ขาญศิลป์ [26] ใช้แบบสอบถามที่ดัดแปลงมาจาก Job Content Questionnaire ของ Robert Karasek เป็นเครื่องมือในการสำรวจสำรวจระดับปัจจัยด้านจิตสังคมในการทำงานของแรงงานเยาชนที่ทำงานร้านสะดวกซื้อ และระดับปัจจัยด้านจิตสังคมในการทำงานของพนักงานเทศบาลในจังหวัดสงขลา ตามลำดับ

ธนิยะ วงศ์วาร [27] สำรวจระดับปัจจัยด้านจิตสังคมในการทำงานของเจ้าหน้าที่เรือนจำความมั่นคงสูงโดยใช้แบบประเมินความเครียดจากงานฉบับภาษาไทย (Thai JCQ) เป็นเครื่องมือ และใช้เกณฑ์ค่ามัธยฐานของคะแนนของแต่ละปัจจัยด้านจิตสังคมเป็นเกณฑ์ในการแบ่งกลุ่มและทำการทดสอบไคสแควร์ วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ กับความเครียดจากการทำงาน (ประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงาน) ซึ่งผลการศึกษแสดงว่า ระดับการศึกษา การออกกำลังกาย แรงสนับสนุนจากงาน และความมั่นคงในงาน มีความสัมพันธ์กับความเครียดจากการทำงาน (ประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงาน) อย่างมีนัยสำคัญ

กานดา จันทรย์แย้ม [28] สำรวจระดับปัจจัยด้านจิตสังคมในการทำงานของผู้ปฏิบัติงานอาชีพต่าง ๆ ในจังหวัดสงขลา โดยใช้แบบประเมินความเครียดจากงานฉบับภาษาไทย (Thai JCQ) เป็นเครื่องมือ ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัย

ได้ใช้ค่า P_{75} ของคะแนนปัจจัยด้านข้อเรียกร้องจากงานของกลุ่มตัวอย่าง และ P_{25} ของคะแนนปัจจัยด้านการควบคุมหรืออำนาจในการตัดสินใจในงานเป็นเกณฑ์ในการจำแนกกลุ่มคะแนนต่ำและกลุ่มคะแนนสูง

วลีรัตน์ เชื้อ เทิดทูนภูกุ และพีรพนธ์ ลือบุญธวัชชัย [29] สำรวจระดับปัจจัยด้านจิตสังคมในการทำงานของทนายความโดยใช้แบบประเมินความเครียดจากงานฉบับภาษาไทย (Thai JCQ) เป็นเครื่องมือ และใช้ค่ามัธยฐานของคะแนนของแต่ละปัจจัยด้านจิตสังคมเป็นเกณฑ์ในการจำแนกประเภท ผู้วิจัยยังทำการทดสอบไคสแควร์เพื่อทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยอิสระต่าง ๆ และภาวะหมดไฟ กับประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงาน (ระดับความเครียดจากงาน) และซึ่งผลการทดสอบระบุว่าระดับรายได้เฉลี่ย ประเภทใบอนุญาต และภาวะหมดไฟ มีความสัมพันธ์กับประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงาน

อาทรณ์ กิจจา และ อุษณา แฉ่งคล้าย [30] สำรวจระดับปัจจัยด้านจิตสังคมในการทำงานของนักบัญชีในองค์การบริหารส่วนตำบลโดยใช้แบบสอบถามซึ่งดัดแปลงมาจาก Job Content Questionnaire ตามแนวคิดของ Robert Kerasek เป็นเครื่องมือ โดยใช้เกณฑ์คะแนนด้านความต้องการในงาน ต่ำกว่าหรือเท่ากับ 29 คะแนน คะแนนด้านการควบคุมงาน ต่ำกว่าหรือเท่ากับ 25 คะแนน ในการแบ่งกลุ่มคะแนนปัจจัยต่ำ และคะแนนปัจจัยสูง

ผลการจำแนกกลุ่มตัวอย่างตามประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานตาม Job Demand - Control - Model ของงานวิจัยในอดีตดังแสดงในตารางที่ 1

จากข้อมูลงานวิจัยที่ผู้วิจัยได้นำเสนอทั้งหมดข้างต้น จะเห็นได้ว่า ไม่มีงานวิจัยใดที่จำเพาะเจาะจงสำรวจระดับการรับรู้ของแรงงานก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรรต่อปัจจัยด้านจิตสังคมในการทำงาน ระบุสัดส่วนแรงงานก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรรจำแนกประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงาน และระบุความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติส่วนบุคคลของแรงงานก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรรและประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานของแรงงาน ซึ่งเป็นองค์ความรู้ที่มีความสำคัญและจำเป็น สำหรับผู้รับเหมา-

ตารางที่ 1 สัดส่วนกลุ่มตัวอย่างจำแนกตามสภาพจิตสังคมในการทำงาน จากการงานวิจัยในอดีต

	กลุ่มตัวอย่าง	เครียดสูง (High strain)	กระตือรือร้น (Active)	เครียดต่ำ (Low strain)	เฉื่อยชา (Passive)
ทงศ์ศักดิ์ ยิ่งรัตนสุข และคณะ [12]	พนักงานสำนักงานใน นิคมอุตสาหกรรม	9.64	56.77	7.05	26.04
สุรัสวดี ถนัด ศีลธรรม [15]	แรงงานนอกระบบ	26.8	70.7	2.4	0.0
	แรงงานในระบบ	42.0	54.0	0.0	4.0
จิรัฐดา ธานีรัตน์ [17]	บุคลากรในโรงพยาบาล	16.2	36.6	19.4	27.8
ทิพากร สายเพชร[18]	พยาบาลวิชาชีพ	41.8	-	58.2	-
ปาณิภา เสี่ยงเพราะ และคณะ [19]	พยาบาล ใน โรงพยาบาลโรคมะเร็ง	27.7	25.2	22.6	24.5
วีรวัฒน์ ทางธรรม [20]	พยาบาลเพศชาย	32.3	14.5	15.9	37.3
Orawan Kaewboonchoo และคณะ [21]	พยาบาลเพศหญิง	17.5	36.4	24.3	21.8
Jutamanee Sakkomonsri และ คณะ [23]	พยาบาลประจำ รถพยาบาล	33.5	21.2	27.3	18.0
กฤตภพ ฐิตารีย์ และ วรุฒ ชัยวงษ์ [24]	บุคลากรในโรงพยาบาล	26.93	25.48	16.83	30.76
ธนิยะ วงศ์วาร [27]	เจ้าหน้าที่เรือนจำ	22.6	28.1	23.0	26.3
กานดา จันทรไย้ม [28]	ผู้ปฏิบัติงานโรงงาน	33.5	27.5	26.5	12.5
	บุคลากรมหาวิทยาลัย	0.7	22.7	75.2	1.4
	ครู	0.0	21.9	76.9	1.2
	ทหาร	0.0	4.0	76.0	20.0
	พยาบาล	2.5	15.0	67.0	15.5
	ตำรวจ	2.0	30.6	53.0	14.3
	ผู้ปฏิบัติงานธุรกิจ บริการ	1.6	13.7	58.4	26.3
วลีรัตน์ เชื้อ เทิดทูนภ ภูษ และพีรพนธ์ ลือ บุญธวัชชัย [29]	ทนายความ	22.3	77.3		

ตารางที่ 1 (ต่อ) สัดส่วนกลุ่มตัวอย่างจำแนกตามสภาพจิตสังคมในการทำงาน จากการงานวิจัยในอดีต

	กลุ่มตัวอย่าง	เครียดสูง (High strain)	กระตือรือร้น (Active)	เครียดต่ำ (Low strain)	เฉื่อยชา (Passive)
อาทรณ์ กิจจา และ อุษณา แจ้งคล้าย [30]	นักบัญชี	17.58	46.16	17.58	18.68

ก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรรในการบริหารจัดการประเภทสภาพทางจิตสังคมในการทำงานของแรงงานก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรร

6. แบบสอบถาม และการเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่าง

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยพัฒนาแบบสอบถาม และเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

6.1 แบบสอบถาม และการประเมินระดับการรับรู้

แบบสอบถามที่ใช้ในการศึกษาแบ่งเป็นออกเป็นสี่ส่วน ส่วนที่ 1 ข้อมูลส่วนบุคคล ส่วนที่ 2 ข้อเรียกร้องจากงาน ส่วนที่ 3 การควบคุมในงาน และส่วนที่ 4 การสนับสนุนทางสังคม

จำนวนคำถามเกี่ยวกับปัจจัยหลักด้านต่าง ๆ สามารถจำแนกได้เป็นปัจจัยย่อย ดังแสดงในตารางที่ 2

แบบสอบถามในส่วนที่ 2 ถึง 4 ของงานวิจัยนี้ นำมาจากแบบประเมินสภาพจิตสังคมในการทำงาน (Psychosocial Working Condition Questionnaire) ของ Maria WindersZal-Bazyl ซึ่งแปลโดย ทนงศักดิ์ ยิ่งรัตนสุข และคณะ [12]

ในการตอบแบบสอบถามส่วนที่ 2 ถึง 4 กลุ่มตัวอย่างถูกกำหนดให้แสดงความเห็น 5 ระดับ ข้อคำถามเชิงบวกคะแนนจะเรียงจาก 1, 2, 3, 4, 5 ในขณะที่ข้อคำถามเชิงลบ คะแนนจะเรียงจาก 5, 4, 3, 2, 1

คะแนนเฉลี่ยค่าระดับการรับรู้ของแรงงานต่อแต่ละปัจจัยหลัก(ย่อย) ถูกคำนวณโดยการนำผลรวมคะแนนที่ได้จากการรวมคะแนนแต่ละข้อในแต่ละปัจจัยหลัก(ย่อย) มาทำการหารด้วยจำนวนข้อในแต่ละปัจจัยหลัก(ย่อย) คะแนนเฉลี่ยของค่าระดับการรับรู้ของแรงงานที่ได้จากการคำนวณจึงมีค่าอยู่ระหว่าง 1 คะแนน ถึง 5 คะแนน

ตารางที่ 2 จำนวนคำถามของแต่ละปัจจัยหลัก จำแนกตามปัจจัยย่อย

ปัจจัยด้านจิตสังคมในการทำงาน		
ปัจจัยหลัก	ปัจจัยย่อย	จำนวนคำถาม
ข้อเรียกร้องจากงาน		25
	ข้อเรียกร้องด้านสติปัญญา	9
	ข้อเรียกร้องด้านจิตกายภาพ	9
	ข้อเรียกร้องจากบทบาท	7
การควบคุมในงาน		20
	การควบคุมพฤติกรรมในการทำงาน	10
	การควบคุมความสามารถใช้ทักษะในการทำงาน	10
การสนับสนุนทางสังคม		16
	การสนับสนุนจากผู้บังคับบัญชา	8
	การสนับสนุนจากเพื่อนร่วมงาน	8

6.2 การเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่าง

งานวิจัยนี้ทำการสุ่มตัวอย่างแบบชั้นภูมิ (Stratified Sampling) โดยคัดเลือกโครงการก่อสร้างบ้านจัดสรร ซึ่งมีคุณสมบัติตรงตามที่ได้กำหนดไว้ในขอบเขตของงานวิจัย จำนวนแปดโครงการ จากนั้นทำการติดต่อเพื่อเก็บข้อมูลจากแรงงานก่อสร้างทุกคนในโครงการเหล่านั้น

จากแบบสอบถามที่แจกไปจำนวนทั้งสิ้น 575 ชุด ผู้วิจัยได้รับแบบสอบถามคืนจากผู้ตอบแบบสอบถาม 450 ชุด เป็นแบบสอบถามที่มีความสมบูรณ์และผ่านการคัด

กรองทั้งสิ้น 438 ชุด ข้อมูลเบื้องต้นของกลุ่มตัวอย่าง
ได้แก่ จำนวนตัวอย่าง และร้อยละของกลุ่มตัวอย่าง เมื่อ

จำแนกกลุ่มตัวอย่างตามข้อมูลส่วนบุคคล ดังแสดงใน
ตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ข้อมูลเบื้องต้นของกลุ่มตัวอย่าง

ลักษณะทางด้านประชากร	จำนวน	ร้อยละ
เพศ		
ชาย	345	78.77
หญิง	93	21.23
อายุ		
ต่ำกว่าหรือเท่ากับ 30 ปี	147	33.56
มากกว่า 30 ปีแต่ไม่เกิน 40ปี	217	49.54
มากกว่า 40 ปี	74	16.90
ระดับการศึกษา		
ประถม	122	27.86
มัธยมต้น	140	31.96
สูงกว่ามัธยมต้น	176	40.18
สัญชาติ		
ไทย	376	85.84
อื่นๆ	62	14.16

ลักษณะทางด้านประชากร	จำนวน	ร้อยละ
ประสบการณ์การทำงาน		
ต่ำกว่าหรือเท่ากับ 10 ปี	264	60.27
มากกว่า 10 ปี	174	39.73
ประเภทการว่างงาน		
รายวัน	321	73.29
รายเดือน	117	26.71
ตำแหน่ง		
ช่างไม้	80	18.26
ช่างปูน	127	29.00
ช่างเหล็ก	113	25.80
กรรมกร	118	26.94
รายได้เฉลี่ยต่อเดือน		
ต่ำกว่า 12,000 บาท	212	48.40
12,001 บาท – 15,000 บาท	150	34.25
15,001 บาทขึ้นไป	76	17.35

7. ผลการศึกษา

ข้อมูลผลการศึกษาของงานวิจัยนี้ถูกนำเสนอใน
หัวข้อที่ 7.1 ถึง 7.3 ตามลำดับ

7.1 ระดับการรับรู้ของแรงงานก่อสร้างโครงการบ้าน
จัดสรรต่อปัจจัยด้านจิตสังคมในการทำงาน

7.1.1 ระดับการรับรู้ของแรงงานก่อสร้างโครงการ
บ้านจัดสรรต่อปัจจัยด้านข้อเรียกร้องจากงาน

ข้อมูลระดับการรับรู้ของแรงงานก่อสร้างโครงการ
บ้านจัดสรรต่อปัจจัยด้านข้อเรียกร้องจากงาน ซึ่งได้จาก
การสำรวจจากกลุ่มตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลแสดงว่าแรงงานก่อสร้าง
โครงการบ้านจัดสรร แสดงการรับรู้เกี่ยวกับข้อเรียกร้อง
จากงานโดยภาพรวมเฉลี่ยเท่ากับ 3.00 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ

2.28 ค่าสูงสุดเท่ากับ 3.92 โดยส่วนใหญ่มีคะแนนระหว่าง
3.00 ถึง 3.99 (ร้อยละ 58.90) รองลงมาคือ 2.00 ถึง
2.99 (ร้อยละ 41.10)

เมื่อพิจารณารายละเอียดคะแนนของแต่ละปัจจัย
ย่อยของปัจจัยด้านข้อเรียกร้องจากงาน พบว่า ข้อ
เรียกร้องด้านสติปัญญา ข้อเรียกร้องจากบทบาท ข้อ
เรียกร้องด้านจิตกายภาพ มีคะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 3.07
3.00 และ 2.92 ตามลำดับ

7.1.2 ระดับการรับรู้ของแรงงานก่อสร้างโครงการ
บ้านจัดสรรต่อปัจจัยด้านการควบคุมในงาน

ข้อมูลระดับการรับรู้ของแรงงานก่อสร้างโครงการ
บ้านจัดสรรต่อปัจจัยด้านการควบคุมในงาน ซึ่งได้จากการ
สำรวจจากกลุ่มตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 4 ข้อมูลกลุ่มตัวอย่างจำแนกตามคะแนนปัจจัยด้านข้อเรียกร้องจากงาน

ปัจจัยที่วัด		ระดับคะแนน			
		1.00–1.99	2.00–2.99	3.00–3.99	4.00 - 5.00
ข้อเรียกร้องจากงาน	ร้อยละ	0.00	41.10	58.90	0.00
	จำนวน	(0)	(180)	(258)	(0)
ค่าเฉลี่ย 3.00 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.24 ค่าต่ำสุด 2.28 ค่าสูงสุด 3.92					
ข้อเรียกร้องด้านสติปัญญา	ร้อยละ	0.00	37.67	62.10	0.23
	จำนวน	(0)	(165)	(272)	(1)
ค่าเฉลี่ย 3.07 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.34 ค่าต่ำสุด 2.00 ค่าสูงสุด 4.33					
ข้อเรียกร้องด้านจิตกายภาพ	ร้อยละ	1.60	45.21	52.28	0.91
	จำนวน	(7)	(198)	(229)	(4)
ค่าเฉลี่ย 2.92 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.43 ค่าต่ำสุด 1.67 ค่าสูงสุด 4.00					
ข้อเรียกร้องจากบทบาท	ร้อยละ	0.69	36.07	62.10	1.14
	จำนวน	(3)	(158)	(272)	(5)
ค่าเฉลี่ย 3.00 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.36 ค่าต่ำสุด 1.71 ค่าสูงสุด 4.00					

ตารางที่ 5 ข้อมูลกลุ่มตัวอย่างจำแนกตามคะแนนปัจจัยด้านการควบคุมในงาน

ปัจจัยที่วัด		ระดับคะแนน			
		1.00–1.99	2.00–2.99	3.00–3.99	4.00 - 5.00
ด้านการควบคุมในงาน	ร้อยละ	0.23	57.08	42.69	0.00
	จำนวน	(1)	(250)	(187)	(0)
ค่าเฉลี่ย 2.96 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.29 ค่าต่ำสุด 1.95 ค่าสูงสุด 3.90					
การควบคุมพฤติกรรม	ร้อยละ	0.00	50.23	48.40	1.37
	จำนวน	(0)	(220)	(212)	(6)
ค่าเฉลี่ย 2.99 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.38 ค่าต่ำสุด 2.10 ค่าสูงสุด 4.20					
การควบคุมทักษะ	ร้อยละ	1.14	52.51	46.12	0.23
	จำนวน	(5)	(230)	(202)	(1)
ค่าเฉลี่ย 2.92 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.35 ค่าต่ำสุด 1.70 ค่าสูงสุด 4.00					

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลแสดงว่าแรงงานก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรร แสดงการรับรู้เกี่ยวกับการควบคุมในงานโดยภาพรวมเฉลี่ยเท่ากับ 2.96 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.95 ค่าสูงสุดเท่ากับ 3.90 โดยส่วนใหญ่มีคะแนน ระหว่าง 2.00 ถึง 2.99 (ร้อยละ 57.01) รองลงมาคือ 3.00 ถึง 3.99 (ร้อยละ 42.70)

เมื่อพิจารณารายละเอียดคะแนนของแต่ละปัจจัย

ย่อยของปัจจัยด้านการควบคุมในงาน พบว่า ปัจจัยด้านการควบคุมพฤติกรรมในการทำงานมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าปัจจัยด้านการควบคุมความสามารถในการใช้ทักษะในงาน โดยมีคะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 2.99 และ 2.92 ตามลำดับ

7.1.3 ระดับการรับรู้ของแรงงานก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรรต่อปัจจัยด้านการสนับสนุนทางสังคม

ข้อมูลระดับการรับรู้ของแรงงานก่อสร้างโครงการ

บ้านจัดสรรต่อปัจจัยด้านการสนับสนุนทางสังคม ซึ่งได้
จากการสำรวจจากกลุ่มตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ข้อมูลกลุ่มตัวอย่างจำแนกตามคะแนนปัจจัยด้านการสนับสนุนทางสังคม

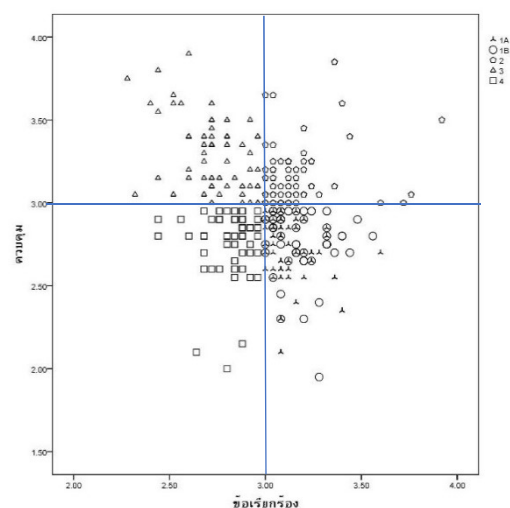
ปัจจัยที่วัด		ระดับคะแนน			
		1.00–1.99	2.00–2.99	3.00–3.99	4.00 - 5.00
ด้านการสนับสนุนทางสังคม	ร้อยละ	0.00	33.79	66.21	0.00
	จำนวน	(0)	(148)	(290)	(0)
ค่าเฉลี่ย 3.04 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.31 ค่าต่ำสุด 2.00 ค่าสูงสุด 3.75					
การสนับสนุนจากผู้บังคับบัญชา	ร้อยละ	0.23	33.11	66.21	0.45
	จำนวน	(1)	(145)	(290)	(2)
ค่าเฉลี่ย 3.06 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.37 ค่าต่ำสุด 1.75 ค่าสูงสุด 4.13					
การสนับสนุนจากเพื่อนร่วมงาน	ร้อยละ	0.68	31.74	67.58	0.00
	จำนวน	(3)	(139)	(296)	(0)
ค่าเฉลี่ย 3.02 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.35 ค่าต่ำสุด 1.88 ค่าสูงสุด 3.75					

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลแสดงว่าแรงงานก่อสร้าง
โครงการบ้านจัดสรร แสดงการรับรู้เกี่ยวกับการสนับสนุน
ทางสังคมโดยภาพรวมเฉลี่ยเท่ากับ 3.04 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ
2.00 ค่าสูงสุดเท่ากับ 3.75 โดยส่วนใหญ่มีคะแนนระหว่าง
3.00 ถึง 3.99 (ร้อยละ 66.21) รองลงมาคือ 2.00 ถึง
2.99 (ร้อยละ 33.79)

เมื่อพิจารณารายละเอียดคะแนนของแต่ละปัจจัย
ย่อยของปัจจัยด้านการสนับสนุนทางสังคม พบว่า ปัจจัย
ด้านการสนับสนุนจากผู้บังคับบัญชามีค่าเฉลี่ยสูงกว่า
ปัจจัยด้านการสนับสนุนจากเพื่อนร่วมงาน โดยมีคะแนน
เฉลี่ยเท่ากับ 3.06 และ 3.02 ตามลำดับ

7.2 การจำแนกกลุ่มแรงงานก่อสร้างโครงการบ้าน
จัดสรรตามประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงาน
ในการจำแนกกลุ่มแรงงานตามประเภทสภาพจิตสังคมใน
การทำงาน ผู้วิจัยใช้เกณฑ์คะแนนเฉลี่ยต่ำกว่า 3.00
คะแนนของแต่ละปัจจัยด้านจิตสังคม ในการแบ่งแยก
ระดับการรับรู้ปัจจัยระดับต่ำและระดับสูง เพื่อจำแนก
กลุ่มแรงงานเป็นห้าประเภทตามที่ได้กำหนดไว้ใน
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ข้อมูลการกระจายตัวของกลุ่มตัวอย่างแรงงาน
ก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรร เมื่อการจำแนกกลุ่มแรงงาน
ตามประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานจากการ
พิจารณาพิจารณาระดับการรับรู้ของแรงงานต่อสามปัจจัย
ด้านจิตสังคมในการทำงานดังแสดงในรูปที่ 2 ข้อมูล
สัดส่วนแรงงานในแต่ละประเภทสภาพจิตสังคม ดังแสดง
ในตารางที่ 7



รูปที่ 2 การกระจายตัวของกลุ่มตัวอย่าง
ในแต่ละสภาพจิตสังคมการทำงาน

จากข้อมูลในตารางที่ 7 พบว่าแรงงานก่อสร้างซึ่งจัดอยู่ในประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานที่ทำให้มีความเครียดจากการทำงานสูงมีจำนวนมากถึงร้อยละ 37.45 (ประเภท 1A และประเภท 1B) โดยมีจำนวนแรงงานถึงร้อยละ 16.21 ซึ่งนอกจากจะมีความเครียดจากการทำงานสูงแล้ว แรงงานยังรู้สึกโดดเดี่ยวอีกด้วย (ประเภท 1A) และมีแรงงานก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรรที่จัดอยู่ในประเภทสภาพจิตสังคมที่ทำให้รู้สึกกระตือรือร้น (ประเภท 2) ประเภทสภาพจิตสังคมที่ทำให้มีความเครียดจากการทำงานต่ำ (ประเภท 3) และประเภทสภาพจิตสังคมที่ทำให้รู้สึกเฉื่อยชา (ประเภท 4) จำนวนร้อยละ 21.46 ร้อยละ 21.23 และร้อยละ 19.86 ตามลำดับ

ตารางที่ 7 จำนวนและร้อยละของกลุ่มตัวอย่าง จำแนกตามประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงาน

ประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงาน	จำนวน	ร้อยละ
1A - มีความเครียดสูงและรู้สึกโดดเดี่ยว	71	16.21
1B - มีความเครียดสูงแต่ไม่รู้สึกโดดเดี่ยว	93	21.24
2 - รู้สึกกระตือรือร้น	94	21.46
3 - มีความเครียดต่ำ	93	21.23
4 - รู้สึกเฉื่อยชา	87	19.86

7.3 การทดสอบสมมติฐานความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติส่วนบุคคลและประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานของแรงงาน

งานวิจัยนี้ใช้การทดสอบไคสแควร์ ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติส่วนบุคคลและประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานของแรงงาน ตามสมมติฐานดังนี้

H_0 = คุณสมบัติส่วนบุคคลของแรงงานประเภทใด ๆ ที่ทดสอบ ไม่มีความสัมพันธ์กับประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานของแรงงาน

H_1 = คุณสมบัติส่วนบุคคลของแรงงานประเภทใด ๆ ที่ทดสอบ มีความสัมพันธ์กับประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานของแรงงาน

ทั้งนี้ทำการทดสอบที่ $\alpha = 0.05$ และ $\alpha = 0.10$

ข้อมูลสัดส่วนกลุ่มตัวอย่างจำแนกตามคุณสมบัติส่วนบุคคลของแรงงานและประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานของแรงงาน และผลการทดสอบไคสแควร์ ดังแสดงในตารางที่ 8

จากข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 8 พบว่า เพศ ระดับการศึกษา สัญชาติ ประสบการณ์การทำงาน ประเภทการว่าจ้าง ตำแหน่ง และรายได้เฉลี่ยต่อเดือน มีความสัมพันธ์กับประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานของแรงงาน ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ในขณะที่อายุมีความสัมพันธ์กับประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานของแรงงาน ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.10

เมื่อพิจารณาข้อมูลสัดส่วนแรงงานเมื่อจำแนกกลุ่มแรงงานตามข้อมูลส่วนบุคคลต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 8 พบข้อสังเกตดังนี้

แรงงานเพศชายมีสัดส่วนในประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานที่ทำให้มีความเครียดสูงและรู้สึกโดดเดี่ยว (ประเภท 1A) และทำให้มีความเครียดสูงแต่ไม่รู้สึกโดดเดี่ยวสูง (ประเภท 1B) มากกว่าแรงงานเพศหญิง ในทางตรงกันข้ามแรงงานเพศหญิงมีสัดส่วนในประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานที่ทำให้มีความเครียดจากการทำงานต่ำ (ประเภท 3) มากกว่าแรงงานเพศชาย

แรงงานช่วงอายุต่ำกว่า 30 ปี มีสัดส่วนในประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานที่ทำให้มีความเครียดสูงแต่ไม่รู้สึกโดดเดี่ยว (ประเภท 1B) มากกว่าแรงงานช่วงอายุอื่น แรงงานช่วงอายุ 31-40 ปี มีสัดส่วนในประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานที่ทำให้รู้สึกกระตือรือร้น (ประเภท 2) และทำให้มีความเครียดจากการทำงานต่ำ (ประเภท 3) มากกว่าแรงงานช่วงอายุอื่น ในขณะที่แรงงานช่วงอายุมากกว่า 40 ปี มีสัดส่วนในประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานที่ทำให้มีความเครียดสูงและรู้สึกโดดเดี่ยว (ประเภท 1A) และทำให้รู้สึกเฉื่อยชา (ประเภท 4) มากกว่าแรงงานช่วงอายุอื่น

แรงงานซึ่งจบการศึกษาระดับชั้นประถมศึกษา มีสัดส่วนในประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานที่ทำให้มีความเครียดจากการทำงานต่ำ (ประเภท 3) มากกว่าแรง-

ตารางที่ 8 ข้อมูลสัดส่วนแรงงาน และผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลส่วนบุคคลกับประเภสภาพจิตสังคมในการทำงาน

	เพศ		อายุ			ระดับการศึกษา			สัญชาติ	
	ชาย	หญิง	≤ 30 ปี	31 – 40 ปี	> 40 ปี	ประถม	ม.ต้น	> ม.ต้น	ไทย	อื่นๆ
1A	19.4	4.3	17.7	12.4	24.3	12.3	9.3	24.4	16.5	14.5
1B	23.8	11.8	25.9	18.4	20.3	14.8	17.1	29.0	22.6	12.9
2	20.3	25.8	19.0	25.8	13.5	19.7	29.3	16.5	22.6	14.5
3	17.1	36.6	18.4	24.0	18.9	31.1	22.1	13.6	19.1	33.9
4	19.4	21.5	19.0	19.4	23.0	22.1	22.1	16.5	19.1	24.2
X²	29.509		13.854			39.517			10.226	
Sig.	0.000**		0.086*			0.000**			0.037**	

	ประสบการณ์การทำงาน		ประเภทการว่าจ้าง		ตำแหน่ง				รายได้เฉลี่ยต่อเดือน		
	≤ 10 ปี	>10 ปี	รายวัน	รายเดือน	ช่างไม้	ช่างปูน	ช่างเหล็ก	กรรมกร	≤ 12,000	12,001 –15,000	≥ 15,001
1A	13.3	20.7	14.6	20.5	31.3	23.6	10.6	3.4	15.1	10.0	31.6
1B	22.0	20.1	15.0	38.5	12.5	29.9	24.8	14.4	18.9	20.0	30.3
2	22.3	20.1	23.4	16.2	25.0	16.5	21.2	24.6	20.3	22.0	23.7
3	25.4	14.9	25.5	9.4	13.8	11.0	18.6	39.8	31.6	17.3	0.0
4	17.0	24.1	21.5	15.4	17.5	18.9	24.8	17.8	14.2	30.7	14.5
X²	12.023		38.306		72.548				60.081		
Sig.	0.017**		0.000**		0.000**				0.000**		

* มีความสัมพันธ์ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.10

** มีความสัมพันธ์ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

งานซึ่งจบการศึกษาระดับอื่น แรงงานซึ่งจบการศึกษาระดับชั้นมัธยมต้น มีสัดส่วนในประเภสภาพจิตสังคมในการทำงานที่ทำให้รู้สึกกระตือรือร้น (ประเภท 2) มากกว่าแรงงานซึ่งจบการศึกษาระดับอื่น และแรงงานซึ่งจบการศึกษาระดับสูงกว่าชั้นมัธยมต้น มีสัดส่วนในประเภสภาพจิตสังคมในการทำงานที่ทำให้มีความเครียดสูงและรู้สึกโดดเดี่ยว (ประเภท 1A) และทำให้มีความเครียดสูงแต่ไม่รู้สึกโดดเดี่ยว (ประเภท 1B) มากกว่าแรงงานซึ่งจบการศึกษาระดับอื่น

แรงงานสัญชาติไทยมีสัดส่วนในประเภสภาพจิตสังคมในการทำงานที่ทำให้มีความเครียดสูงแต่ไม่รู้สึกโดด

เดี่ยว (ประเภท 1B) และทำให้มีความเครียดจากการทำงานต่ำ (ประเภท 3) มากกว่าแรงงานสัญชาติอื่น ในทางตรงกันข้ามแรงงานสัญชาติอื่นมีสัดส่วนในประเภสภาพจิตสังคมในการทำงานที่ทำให้มีความเครียดจากการทำงานต่ำ (ประเภท 3) และทำให้รู้สึกเฉื่อยชา (ประเภท 4) มากกว่าแรงงานสัญชาติไทย

แรงงานที่มีประสบการณ์ทำงานน้อยกว่า 10 ปี มีสัดส่วนในประเภสภาพจิตสังคมในการทำงานที่ทำให้มีความเครียดจากการทำงานต่ำ (ประเภท 3) มากกว่าแรงงานแรงงานที่มีประสบการณ์ทำงานมากกว่า 10 ปี ในทางตรงกันข้ามที่แรงงานที่มีประสบการณ์ทำงาน

มากกว่า 10 ปี มีสัดส่วนในประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานที่ทำให้มีความเครียดสูงและรู้สึกโดดเดี่ยว (ประเภท 1A) และทำให้รู้สึกเฉื่อยชา (ประเภท 4) มากกว่าแรงงานที่มีประสบการณ์ทำงานน้อยกว่า 10 ปี

แรงงานตำแหน่งช่างปูนและช่างเหล็กมีสัดส่วนในประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานที่ทำให้มีความเครียดสูงแต่ไม่รู้สึกโดดเดี่ยว (ประเภท 1B) มากกว่าแรงงานตำแหน่งช่างไม้และกรรมกร แรงงานตำแหน่งช่างไม้และช่างปูนมีสัดส่วนในประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานที่ทำให้มีความเครียดสูงและรู้สึกโดดเดี่ยว (ประเภท 1A) มากกว่าแรงงานตำแหน่งช่างเหล็กและกรรมกร แรงงานตำแหน่งกรรมกรมีสัดส่วนในประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานที่ทำให้มีความเครียดจากการทำงานต่ำ (ประเภท 3) มากกว่าแรงงานตำแหน่งอื่น และแรงงานตำแหน่งช่างเหล็กมีสัดส่วนในประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานที่ทำให้รู้สึกเฉื่อยชา (ประเภท 4) สูงกว่าแรงงานตำแหน่งอื่น

แรงงานที่มีรายได้เฉลี่ยสูงกว่า 15,000 บาท มีสัดส่วนในประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานที่ทำให้มีความเครียดสูงและรู้สึกโดดเดี่ยว (ประเภท 1A) และทำให้มีความเครียดสูงแต่ไม่รู้สึกโดดเดี่ยว (ประเภท 1B) มากกว่าแรงงานในกลุ่มระดับรายได้อื่น แรงงานที่มีรายได้เฉลี่ยระหว่าง 12,001 บาทถึง 15,000 บาทมีสัดส่วนในประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานที่ทำให้รู้สึกเฉื่อยชา (ประเภท 4) มากสูงกว่าแรงงานในกลุ่มระดับรายได้อื่น และแรงงานที่มีรายได้เฉลี่ยต่ำกว่า 12,000 บาท มีสัดส่วนในประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานที่ทำให้มีความเครียดจากการทำงานต่ำ (ประเภท 3) มากกว่าแรงงานในกลุ่มระดับรายได้อื่น

8. วิเคราะห์ผลการศึกษา

การที่ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่ามีแรงงานก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรรสัดส่วนมากถึงร้อยละ 16.21 จัดอยู่ในกลุ่มประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานที่ทำให้มีความเครียดสูงและรู้สึกโดดเดี่ยว (ประเภท 1A) ซึ่งแรงงานในประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานประเภทนี้

มีแนวโน้มจะมีปัญหาทั้งทางด้านจิตใจและด้านสุขภาพกายมากกว่าแรงงานในกลุ่มประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานประเภทอื่นอย่างมีนัยสำคัญ สะท้อนให้เห็นว่าผู้รับเหมาก่อสร้างบ้านจัดสรร ในฐานะนายจ้าง มีแนวโน้มที่จะต้องประสบปัญหาด้านการบริหารปริมาณแรงงาน รวมถึงปัญหาด้านประสิทธิภาพการผลิตและคุณภาพของผลผลิตจากแรงงาน เพื่อบรรเทาปัญหาการมีความเครียดสูงและรู้สึกโดดเดี่ยวของแรงงานในเบื้องต้น ผู้รับเหมาก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรรควรเพิ่มระดับการสนับสนุนทางสังคม อันประกอบไปด้วย การสนับสนุนจากผู้บังคับบัญชาและจากเพื่อนร่วมงาน แก่แรงงานในกลุ่มประเภทสภาพจิตสังคมประเภทนี้โดยเร่งด่วน เพื่อช่วยทุเลาผลกระทบจากความรู้สึกเครียดจากการทำงานของแรงงานกลุ่มนี้ลง

อย่างไรก็ดีเพื่อป้องกันและแก้ไขผลกระทบในระยะยาวจากปัญหาแรงงานมีความเครียดจากการทำงานสูง ผู้รับเหมาก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรรควรพิจารณาปรับลดระดับการเรียกร้องจากงาน และเพิ่มระดับอำนาจการควบคุมในงานให้แก่แรงงานในกลุ่มประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานที่ทำให้มีความเครียดสูงและรู้สึกโดดเดี่ยว (ประเภท 1A) จำนวนร้อยละ 16.21 และในกลุ่มประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานที่ทำให้มีความเครียดสูงแต่ไม่รู้สึกโดดเดี่ยว (ประเภท 1B) จำนวนร้อยละ 21.24

ข้อมูลสัดส่วนแรงงานในสภาพจิตสังคมในการทำงานประเภทต่าง ๆ เมื่อจำแนกกลุ่มแรงงานตามข้อมูลส่วนบุคคล แสดงว่า กลุ่มแรงงานที่มีลักษณะแตกต่างกัน มีสัดส่วนในแต่ละประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานที่แตกต่างกัน ในการวางแผนและจัดสรรทรัพยากร เพื่อแก้ไขปัญหาสภาพจิตสังคมในการทำงานที่ไม่เหมาะสมของแรงงาน ผู้รับเหมาก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรรพึงให้ความสนใจกับกลุ่มแรงงานเพศชาย กลุ่มแรงงานอายุมากกว่า 40 ปี กลุ่มแรงงานระดับการศึกษาสูงกว่ามัธยมต้น กลุ่มแรงงานที่ได้รับการว่าจ้างเป็นรายเดือน กลุ่มแรงงานตำแหน่งช่างไม้และช่างปูน และกลุ่มแรงงานที่มีรายได้ต่อเดือนมากกว่า 15,000 บาท ซึ่งเป็นกลุ่มแรงงานที่มีสัดส่วนแรงงานประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานที่

ทำให้มีความเครียดสูงและรู้สึกโดดเดี่ยว (ประเภท 1A) และประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานที่ทำให้มีความเครียดสูงแต่ไม่รู้สึกโดดเดี่ยว (ประเภท 1B) มากกว่ากลุ่มแรงงานกลุ่มอื่น

9. สรุปผลการศึกษา

ผลการสำรวจระดับการรับรู้ของแรงงานก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรรต่อสามปัจจัยด้านจิตสังคมในการทำงานพบว่า คะแนนการรับรู้ปัจจัยด้านการเรียกร้องจากงานมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.96 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.95 และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 3.90 คะแนนการรับรู้ปัจจัยด้านอำนาจการควบคุมในงานมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.96 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.95 และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 3.90 คะแนนการรับรู้ปัจจัยด้านการสนับสนุนทางสังคมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.04 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 2.00 และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 3.75

ผลการจำแนกกลุ่มแรงงานก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรรตามประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงาน พบว่า มีสัดส่วนกลุ่มตัวอย่างในแต่ละประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานดังนี้ ประเภทสภาพจิตสังคมที่ทำให้แรงงานมีความเครียดสูงและรู้สึกโดดเดี่ยว (ประเภท 1A) จำนวนร้อยละ 16.21 ประเภทสภาพจิตสังคมที่ทำให้แรงงานมีความเครียดสูงแต่ไม่รู้สึกโดดเดี่ยว (ประเภท 1B) จำนวนร้อยละ 21.24 ประเภทสภาพจิตสังคมที่ทำให้แรงงานรู้สึกกระตือรือร้น (ประเภท 2) จำนวนร้อยละ 21.46 ประเภทสภาพจิตสังคมที่ทำให้แรงงานมีความเครียดจากการทำงานต่ำ (ประเภท 3) จำนวนร้อยละ 21.23 และประเภทสภาพจิตสังคมที่ให้แรงงานรู้สึกเฉื่อยชา (ประเภท 4) จำนวนร้อยละ 19.86

ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลส่วนบุคคลและประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงานของแรงงาน พบว่า เพศ ระดับการศึกษา สัญชาติ ประสบการณ์การทำงาน ประเภทการว่าจ้าง ตำแหน่ง และรายได้เฉลี่ยต่อเดือน มีความสัมพันธ์กับประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงาน ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ในขณะที่ อายุ มีความสัมพันธ์กับประเภทสภาพจิตสังคมในการทำงาน ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.10

10. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ทนงศักดิ์ ยิ่งรัตนสุข หัวหน้าภาควิชาสุขศาสตร์อุตสาหกรรมและความปลอดภัย คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ได้อนุญาตให้ผู้วิจัยใช้แบบสอบถามที่ท่านได้แปลจาก Psychosocial Working Condition Questionnaire ของ Maria WindersZal-Bazyl ในงานวิจัยนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณ นายสุรศักดิ์ มอญไหม นายจักษ์กฤษ พวงมาลัย และนายอนันท์ เคนบุบผา นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี มหานคร ที่ช่วยเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่าง

11. เอกสารอ้างอิง

- [1] Bank of Thailand (2019, July 17). EC_EI_009, [Online].Available:http://www.bot.or.th/App/BTWS_STAT/statistics/ReportPage.aspx?reportID=102&language=th
- [2] SCB Economic Intelligence Center (2019, July 17). Bridging Thailand's Labor Gap, [Online].Available:https://www.scbeic.com/en/detail/file/product/1251/e22mxi3krw/ENG_labor_insight_Q1_2015.pdf
- [3] J. A. Häusser, A. Mojzisch, M. Niesel and S. Schulz-Hardt, "Ten years on: A review of recent research on the Job Demand–Control (–Support) model and psychological well-being," *Work & Stress*, vol. 24, no.1, p.1-35, 2010.
- [4] F. Asif, U. Javed and S. Y. Janjua. "The Job Demand-Control-Support Model and Employee Wellbeing: A Meta-Analysis of Previous Research," *Pakistan Journal of Psychological Research*, vol. 33, no.1, p.203-221, 2018.
- [5] M. Van der Doef and S. Maes. "The job demand-control(–support) model and

- physical health outcomes: A review of the strain and buffer hypotheses,” *Psychology & Health*, vol. 13, no.5, p. 909-936, 1998.
- [6] J. Schechter, L. W. Green, L. Olsen, K. Kruse and M. Cargo. “Application of Karasek’s demand/control model a Canadian occupational setting including shift workers during a period of reorganization and downsizing,” *American Journal of Health Promotion*, vol. 11, no.6, p. 394-399, 1997.
- [7] H. M. Hasselhorn, P. M. Conway, M. Widerszal-Bazyl, M. Simon, P. Tackenberg, S. Schmidt, D. Camerino, and B. H. Muller. “Contribution of job strain to nurses’ consideration of leaving the profession--Results from the longitudinal European nurses’ early exit study,” *Scandinavian journal of work, environment & health*, vol.34, no.6, p. 75-82, 2008.
- [8] Y. L. Chiu, R. G. Chung, C. S. Wu and C. H. Ho. “The effects of job demand, control, and social support on hospital clinical nurses’ intention to turn over,” *Applied Nursing Research*, vol.22, no.4, p. 258-263, 2009.
- [9] K. Ekstrand. “The working conditions of the individual – in the interest of the organization? Turnover intentions among Swedish employees,” M.S. Thesis, Department of Sociology/Department of Business Administration, University of Gothenburg., 2015.
- [10] R. A. Karasek, “Job Demands, Job Decision Latitude, and Mental Strain: Implications for Job Redesign,” *Administrative Science Quarterly*, vol. 24, no. 2, p. 285-308, 1979.
- [11] J. V. Johnson, E.M. Hall. “Job strain, work place social support, and cardiovascular disease: a cross-sectional study of a random sample of the Swedish working population,” *Am J Public Health*, vol. 78, no.10, p. 1336–1342, 1988.
- [12] T. Yingratanasuk, P. Serekajornkitcharoen and J. Pusapakdeepob. “An assessment of job stress at work among officer workers at Leam Chanbang Industry Estate Facilities, Chonburi Province,” (In Thai), Faculty of Public Health, Burapha University, 2001.
- [13] N. Praseeratesung. “Assessment of Job Stress of Employees in Northern Region Industrial Estate, Lamphun Province,” (In Thai), M.S. Independent Study, Master of Science (Industrial Management), Graduate School, Chiang Mai University, 2010.
- [14] N. Praseeratesung and N. Praseeratesung. “Assessment of the Work Stress of Employee in Amphoe Muang, Buriram Province.,” (In Thai), Buriram Rajabhat University, 2014.
- [15] S. Tanudsintum. “Job stress among polishing worker using demand-control model,” (In Thai), M.S. Thesis, Faculty of Graduate Study, Mahidol University, 2007.
- [16] P. Piemnithikul. “The relationship between overweight, obesity and sickness absence among workers in an automotive parts factory,” (In Thai), M.S. Thesis, Graduate School, Srinakharinwirot University, 2013.
- [17] C. Thaneerat. “Prevalence and related factors of occupational stress of personnel in Pathumthani hospital,” (In Thai), M.S. thesis, Dept. Preventive and Social Medicine,

- Faculty of Medicine, Chulalongkorn University, 2004.
- [18] T. Saipech. “Job stress and health status among registered nurses under the office of the permanent secretary ministry of public health in Nakhonratchasima Province, Thailand,” (In Thai), M.S. Thesis, Faculty of Graduate Study, Mahidol University, 2009.
- [19] P. Siangpror, T. Rawiworrakul and O. Kaewboonchoo. “Factors correlated to job stress among nurses in specialised cancer hospitals, central region of Thailand,” (In Thai), *J. of Healt. Sci. Res.*, vol. 8, no. 1, p.17 – 27, 2014.
- [20] V. Thangthum. “Job strain among male nurses in Thailand and its related factors,” (In Thai), M.S. Thesis, Faculty of Graduate Study, Mahidol University, 2014.
- [21] O. Kaewboonchoo, B. Yingyud, T. Rawiworrakul and A. Jinayon. “Job Stress and Intent to Stay at Work among Registered Female Nurses Working in Thai Hospitals,” *Journal of Occupational Health*, vol. 56, p. 93-99, 2014.
- [22] N. Maneerung “Occupational Stress and Personality among Professional Nurses in a Private Hospital,” (In Thai), M.S. Thesis, Dept. Psychiatry, Faculty of Medicine, Chulalongkorn University, 2005.
- [23] J. Sakkomonsri, P. Suwan-Ampai, and O. Kaewboonchoo. “Factors Associated with Job Stress among Ambulance Nurses in Bangkok Thailand,” *The Bangkok Medical Journal*, vol. 12, September, p. 33-38, 2016.
- [24] K. Thitaree and W. Chaiwong. “A Study on Prevalence of Work-related Stress and Relating Factors among Staff in a Private Hospital,” *Thammasat Medical Journal*, vol. 19, no. 1, January – March, p. 115-132, 2019.
- [25] D. Pechkwang. “Psychosocial Work Factors and Occupational Stress Among Youth Workers in Convenience Stores,” (In Thai), M.N.S. Thesis, Graduate School, Chiang Mai University, 2008.
- [26] J. Chansin. “Stress and Social Support Effect on Burnout of Municipality Employees in Songkhla Province,” M.P.A. Thesis, Prince of Songkla University, 2015.
- [27] T. Wongwan. “Prevalence and related factors of occupational stress among correctional officers in maximum security prisons,” (In Thai), M.S. Thesis, Dept. Preventive and Social Medicine, Faculty of Medicine, Chulalongkorn University, 2014.
- [28] K. Janyam, “Job stress of employees in Songkhla province: Work-related factors in Demand-Control Model,” *KASETSART JOURNAL OF SOCIAL SCIENCES*, vol. 38, p. 445-456, 2017.
- [29] W. Sh. Therdthoonphuphuch, P. Lueboonthavatchai. “Work stress and burnout among licensed lawyers at Thai Lawyers Council under Royal Patronage,” *Chula Med. J.*, vol. 61, no.5, Sep – Oct, p. 663–76, 2017.
- [30] A. Kidja, U. Jangkloy. “Work Stress of Accountants in the Sub District Administrative Organization in Nakhonratchasima,” (In Thai), *KKBS Journal of Business Administration and Accountancy*, vol. 1, no.1, p. 39-53, 2017.

การจำลองทางเลือกการเดินทางโดยคำนึงถึงมลพิษทางอากาศในเมือง และการประยุกต์ใช้แบบจำลองโลจิตในเขตเมืองนครปฐม Considering Urban Air Pollution in Travel Choice Modeling and Its Application to Logit Model in Nakhon Pathom

ธนกร เมฆิน* ขนิศา รุ่งแจ้ง

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร 10900

Thanakorn Mekin* Kanisa Rungjang

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

*Corresponding author Email: thanakorn.mek@ku.th

(Received: March 17, 2020; Accepted: May 17, 2020)

บทคัดย่อ

สภาวะมลพิษทางอากาศโดยเฉพาะปัญหาด้านฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ซึ่งเป็นปัญหาหลักที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพประชาชนในการเดินทาง งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองโลจิตสำหรับการเลือกรูปแบบการเดินทางในเขตเมืองที่มีสภาวะการของมลพิษทางอากาศด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองโลจิตพหุและโลจิตลำดับชั้น งานวิจัยนี้สามารถจำลองพฤติกรรมทางเลือกรูปแบบการเดินทางในเขตเมืองนครปฐมพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกรูปแบบการเดินทาง (นัยสำคัญที่ร้อยละ 99) ประกอบด้วย 4 ปัจจัย ได้แก่ ค่าใช้จ่ายในการเดินทาง ความถี่ในการให้บริการ เวลาที่รอคอย และเวลาที่ใช้เดินทาง เมื่อพิจารณาปัจจัยด้านรายได้ครัวเรือนพบว่า กลุ่มผู้มีรายได้สูงจะเลือกยานพาหนะที่มีฝุ่นละอองขนาดเล็กในระดับต่ำ ค่าใช้จ่ายในการเดินทางของกลุ่มผู้มีรายได้สูงมีค่ามากกว่ากลุ่มอื่น ประชาชนส่วนใหญ่ไม่นิยมเลือกใช้นยานพาหนะที่มีฝุ่นละอองในท้องโดยสารต่ำหากต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเดินทางเพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาระบบการขนส่งมวลชนสำหรับเขตเมืองที่คำนึงถึงมลพิษทางอากาศ ภาครัฐสามารถส่งเสริมการบริการรถโดยสารที่มีฝุ่นละอองในระดับต่ำโดยกำหนดค่าโดยสารไม่ให้สูงขึ้นมีผลกระทบต่อผู้มีรายได้น้อย

คำสำคัญ: การเลือกรูปแบบการเดินทาง แบบจำลองโลจิตพหุ แบบจำลองโลจิตลำดับชั้น ฝุ่นละอองขนาดเล็ก

ABSTRACT

Air pollution especially the problem particulate matter smaller less than 2.5 microns (PM2.5), which is the main problem affecting public health of commuter travelers. This research aims to develop logit model of travel choice in urban area considering air pollution factor using multinomial logit model and nested logit model. The result shows the model of travel behavior in Nakhon Pathom urban area. There are 4 factors affecting travel choice (significance level of 99 percent): travel cost, service frequency, waiting time and travel time. Based on household income, the high-income level prefers to choose the low-particulate matter vehicle (the low PM vehicle). Travel cost of this group is higher than others. If the cost of traveling increases, people are less likely to choose the low PM vehicle in cabin.

Keyword: Travel choice, Multinomial logit model, Nested logit model, Particulate matter 2.5 (PM2.5)

ภายใต้สภาวะมลพิษทางอากาศโดยเฉพาะปัญหาคับ
ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ส่งผลกระทบต่อ
สุขภาพประชาชนเป็นอย่างมาก[1] หนึ่งในสาเหตุหลักที่
ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศคือ การสัญจรของยานพาหนะ
บนท้องถนน[2] เมื่อกล่าวถึงระบบขนส่งมวลชนสำหรับใน
ประเทศไทยแล้วนั้น ในบางพื้นที่ยังมีการขนส่งมวลชนที่
ยังกระจายไม่ทั่วถึงและขาดประสิทธิภาพ ส่งผลให้ผู้
เดินทางเลือกใช้อยานพาหนะส่วนตัวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลที่
ตามมาคือเมื่อปริมาณจราจรบนท้องถนนเพิ่มมากขึ้นย่อม
ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศสูงขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้
แล้วพฤติกรรมการขับขี่ยานพาหนะของผู้ขับขี้นั้นเป็นตัวแปร
ที่สำคัญต่อการระบายสารมลพิษจากไอเสียยานพาหนะ
บนท้องถนนออกสู่สิ่งแวดล้อมและบรรยากาศ[3] สภาพ
ปัญหาหลักในพื้นที่เขตเมืองใหญ่ทั่วประเทศโดยเฉพาะ
อย่างกรุงเทพมหานคร จากข้อเท็จจริงที่ว่า การแก้ไข
ปัญหาในแต่ละปีไม่ได้ทำให้ฝุ่นละออง PM2.5 ลดลงมีแต่
จะเพิ่มมากขึ้นตามอัตราการใช้รถเครื่องยนต์ดีเซลที่จด
ทะเบียนเพิ่มขึ้นทุกปี[4] ดังนั้นหากมีการพัฒนาระบบการ
ขนส่งมวลชนให้มีประสิทธิภาพ และมีการกระจายที่ทั่วถึง
ในทุกพื้นที่ที่เป็นแหล่งสำคัญก็จะเป็นการช่วยลดปริมาณ
จราจรบนท้องถนนรวมถึงช่วยลดมลพิษทางอากาศได้อีก
ช่องทางหนึ่ง

Map of Chiang Mai Province showing 10 districts: ดอยสะเก็ด, ดอยหล่อ, ดอยเต่า, ดอยช้างมูด, ดอยปุย, ดอยสะเก็ด, ดอยหล่อ, ดอยเต่า, ดอยช้างมูด, ดอยปุย. The map is color-coded and includes a compass rose and a scale bar.

การศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นถึงการพัฒนาระบบการขนส่งมวลชนในเขตเมืองนครปฐม ซึ่งถือว่าเป็นแหล่งพื้นที่เศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ และตัวชี้วัดที่สำคัญทางด้านเศรษฐกิจคือ ผลิตภัณฑ์มวลรวมจังหวัดหรือ (GPP) โดยค่า GPP ในปี 2556, 2557, 2558 และ 2559 มีค่า 2.56, 2.77, 3.00 และ 3.12 ล้านบาท ตามลำดับ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเศรษฐกิจจังหวัดนครปฐมมีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุกปี [5] เนื่องจากสภาพปัจจุบันระบบการขนส่งมวลชนในจังหวัดนครปฐมยังขาดประสิทธิภาพในการเข้าถึงพื้นที่ในเขตเมืองได้อย่างไม่ทั่วถึง โดยเฉพาะการเดินทางไปยังศูนย์กลางราชการจังหวัดนครปฐม ซึ่งเป็นจุดศูนย์กลางที่ประกอบไปด้วยสถานที่หน่วยงานราชการที่สำคัญ ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้ต้องมีการปรับปรุง และพัฒนาระบบขนส่งมวลชนในเขตเมืองนครปฐมให้มีประสิทธิภาพและเข้าถึงพื้นที่ได้อย่างทั่วถึงเพิ่มมากขึ้น

ปัญหาด้านระบบการขนส่งดังกล่าวข้างต้นส่งผลให้
งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาออกแบบเส้นทางการเดินทาง
โดยสารให้ผ่านสถานที่จุดสำคัญต่างๆและศึกษาพฤติกรรม

การเลือกรูปแบบการเดินทางของผู้เดินทางในเขตเมืองนครปฐม อีกทั้งสามารถนำไปปรับใช้กับพื้นที่อื่นๆในเขตเมืองทั่วประเทศให้มีการพัฒนาระบบขนส่งมวลชนให้ดียิ่งขึ้น

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษางานวิจัยนี้ได้มีการรวบรวมทฤษฎีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกรูปแบบการเดินทาง และมลพิษทางอากาศ โดยทางผู้วิจัยให้ความสนใจกับระดับค่าฝุ่นละออง PM2.5 เป็นพิเศษ เพื่อนำปัจจัยด้านนี้ไปใช้ในการศึกษาว่ามีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกรูปแบบการเดินทางของผู้เดินทางหรือไม่อย่างไร

2.1 การกำหนดขนาดกลุ่มตัวอย่าง

การกำหนดขนาดกลุ่มตัวอย่างจะต้องมีขนาดของกลุ่มตัวอย่างที่เหมาะสมและเชื่อถือได้ซึ่งสามารถใช้สูตรการคำนวณ [6] ดังสมการต่อไปนี้

$$n = \frac{N}{1 + Ne^2} \quad (1)$$

เมื่อ n คือขนาดของกลุ่มตัวอย่าง, N คือจำนวนหน่วยทั้งหมดหรือขนาดของประชากร และ e คือความน่าจะเป็นของความผิดพลาดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้

2.2 เทคนิคการสำรวจข้อมูล

ลักษณะของข้อมูลที่ถูกนำมาใช้ในแบบจำลองการวิเคราะห์อุปสงค์ การตัดสินใจ และพฤติกรรมของผู้บริโภค มักจะได้อาจมาจากการสอบถามกลุ่มเป้าหมายที่มีศักยภาพหรือแนวโน้มในการตัดสินใจเลือกตามที่ถูกวิจัยสนใจศึกษา [7] ซึ่งสามารถแยกวิธีการสำรวจและเก็บข้อมูลได้ 2 แบบ คือ แบบที่ 1 Reveled Preference และแบบที่ 2 Stated Preference ซึ่งวิธีการแบบที่ 1 คือ ข้อมูลในสถานการณ์ที่เกิดขึ้นปัจจุบัน และแบบที่ 2 คือ ข้อมูลสถานการณ์ที่ถูกสมมติขึ้นมา เทคนิคการสำรวจทั้ง 2 แบบนี้ยังเป็นที่นิยมสำหรับผู้วิจัยอย่างแพร่หลาย และได้ถูกนำไปใช้สร้างแบบสอบถามเพื่อเป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในการสำรวจข้อมูลโดยทั่วไป[8-11]

2.3 ทฤษฎีอรรถประโยชน์

ทฤษฎีที่นิยมใช้เป็นพื้นฐานการศึกษาการตัดสินใจในการเลือกรูปแบบการเดินทางคือ ทฤษฎีอรรถประโยชน์ (Utility Theory) โดยทฤษฎีอรรถประโยชน์กล่าวว่าบุคคลจะเลือกบริโภคหรือเลือกทางเลือกที่ตนเองพึงพอใจ และทางเลือกนั้นจะต้องให้อรรถประโยชน์สูงสุด (Maximum Utility) [12] ทฤษฎีอรรถประโยชน์จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้กับการเดินทางและการขนส่งได้คือ ผู้เดินทางจะเลือกรูปแบบการเดินทางที่ให้อรรถประโยชน์หรือความพึงพอใจสูงสุด โดยคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ เช่น ค่าใช้จ่ายในการเดินทาง เวลาที่รอคอย และเวลาในการเดินทาง เป็นต้น โดยสามารถเขียนสมการอรรถประโยชน์ได้ดังนี้

$$U_{in} = V_{in} + \varepsilon_{in} \quad (2)$$

โดยที่ U_{in} คืออรรถประโยชน์หรือความพึงพอใจของคนที่ n มีผลต่อทางเลือก i , V_{in} คือส่วนอรรถประโยชน์ที่บุคคล n รับรู้และเห็นได้ประกอบไปด้วยค่าคงที่และพารามิเตอร์แต่ละตัวแปร, ε_{in} คือส่วนของอรรถประโยชน์ที่ไม่แน่นอน

ส่วนอรรถประโยชน์ที่เห็นได้ V_{in} นี้ส่วนใหญ่จะกำหนดให้เป็นฟังก์ชัน ดังสมการที่ 3

$$V_{in} = \beta_0 + \beta_1 X_{in1} + \beta_2 X_{in2} + \dots + \beta_3 X_{in3} \quad (3)$$

โดยที่ $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ คือพารามิเตอร์ค่าคงที่หรือค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการวิเคราะห์สร้างแบบจำลองและ $X_{in1}, X_{in2}, \dots, X_{ink}$ คือตัวแปรที่ต้องการศึกษาเกี่ยวกับอรรถประโยชน์ของทางเลือก i ของบุคคล n

ในกรณีที่ผู้เดินทางมีทางเลือก 2 ทางเลือกคือ i และ j จะสามารถใช้แบบจำลองโลจิตทวินาม (Binary Logit Model) สำหรับคำนวณสัดส่วนของผู้เดินทางที่จะเลือกรูปแบบการเดินทาง ดังสมการที่ 4

$$P(i) = \frac{e^{U_i}}{e^{U_i} + e^{U_j}} \quad (4)$$

โดยที่ U_i และ U_j คือ ฟังก์ชันอรรถประโยชน์ของรูปแบบการเดินทาง i และ j ตามลำดับและ $P(i)$ ความน่าจะเป็นที่ทางเลือก i จะถูกเลือก ในกรณีที่เรากำลังพิจารณาการเดินทางของพื้นที่ศึกษาในภาพรวม ค่าความน่าจะเป็นนี้จะสามารถนำมาใช้คำนวณสัดส่วนผู้เดินทางที่เลือกรูปแบบการเดินทาง i ได้

2.4 แบบจำลองลำดับขั้น (Nested Logit Model)

แบบจำลองลำดับขั้นคือแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับทางเลือกที่ต้องมีการตัดสินใจแบบเป็นลำดับขั้นหรือเมื่อชุดทางเลือกที่ผู้ตัดสินใจต้องการตัดสินใจแบบเป็นลำดับขั้น ซึ่งทางเลือกแต่ละขั้นจะถูกแบ่งเป็นกลุ่มทางเลือกย่อยที่เรียกว่า รัง [13] แบบจำลองลำดับขั้นมีสมมติฐานของโครงสร้างแบบจำลองของผู้ตัดสินใจ n ที่เลือกทางเลือก i ดังนี้

$$P_{nB_k} = \frac{e^{W_{nk} + \lambda_k I_{nk}}}{\sum_{k=1}^K e^{W_{nk} + \lambda_k I_{nk}}} \quad (5)$$

$$P_{ni | B_k} = \frac{e^{Y_{ni}/\lambda_k}}{\sum_{j \in B_k} e^{Y_{nj}/\lambda_k}} \quad (6)$$

$$I_{nk} = \ln \sum_{j \in B_k} e^{Y_{nj}/\lambda_k} \quad (7)$$

โดยที่ P_{nB_k} คือความน่าจะเป็นของผู้ตัดสินใจ n เลือกทางเลือก i , W_{nk} คือตัวแปรที่ใช้อธิบายคุณลักษณะของทางเลือกในแต่ละรัง k , Y_{nj} คือตัวแปรที่ใช้อธิบายทางเลือก j , λ_k คือพารามิเตอร์ที่ได้จากการประมาณค่าจากแบบจำลองทางเลือก I_{nk} คือ Natural logarithm (LN) ผลรวมของ Utility function ของทางเลือกในแต่ละรัง (LNsum) และ $P_{ni | B_k}$ คือความน่าจะเป็นของผู้ตัดสินใจทางเลือก i ต่อความน่าจะเป็นทั้งหมดของทางเลือกในกลุ่มรัง B_k

ระบบสมการที่ได้กล่าวไปข้างต้นสามารถแสดงความน่าจะเป็นแบบไม่มีเงื่อนไขสำหรับแต่ละทางเลือกได้ดังนี้

$$P_{ni} = P_{ni | B_k} \times P_{nB_k} \quad (8)$$

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมทางเลือกรูปแบบการเดินทาง

การศึกษางานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการรวบรวมข้อมูลงานวิจัยในการศึกษาพฤติกรรมทางเลือกของผู้บริโภคในรูปแบบและวิธีการวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน ประกอบไปด้วยพฤติกรรมทางเลือกยานพาหนะส่วนบุคคลและรถรับส่งนักเรียน [14] พฤติกรรมทางเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่ [15] พฤติกรรมการปรับเปลี่ยนรูปแบบการเดินทาง [16] พฤติกรรมการเดินทางด้วยระบบขนส่งสาธารณะ [17] และพฤติกรรมารถจอดและลักษณะการเดินทางของผู้ที่เดินทางมายังสนามบิน [18]

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอนุภาคฝุ่นละอองในอากาศ

ปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็กหรือที่เรียกว่า PM2.5 เมื่อเข้าสู่ร่างกายของมนุษย์โดยการหายใจส่งผลให้เกิดการทำลายอวัยวะของระบบทางเดินหายใจ [19] สำหรับประเทศไทยค่ามาตรฐานในบรรยากาศทั่วไปของ PM2.5 เฉลี่ย 24 ชั่วโมงอยู่ที่ 50 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในขณะที่ข้อแนะนำขององค์การอนามัยโลกอยู่ที่ 25 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [20] ซึ่งปัญหา PM2.5 มักเกิดขึ้นสูงในช่วงระหว่างเดือนธันวาคมถึงเดือนเมษายนของทุกปี [21] ดังนั้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับการศึกษาค้นคว้าจึงประกอบไปด้วยหลากหลายรูปแบบได้แก่ ปริมาณฝุ่นละอองที่อยู่ภายในและภายนอกอาคาร [22] ปริมาณค่าฝุ่นละออง PM10 และ PM2.5 ภายในและภายนอกห้องโดยสารของระบบขนส่งสาธารณะ [23] และการปนเปื้อนของฝุ่นละอองรวมในบรรยากาศที่อยู่ภายในและภายนอกอาคารเรียน [24]

ความแตกต่างของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยในอดีตคือการเพิ่มปัจจัยด้านฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) มาพิจารณาในการสร้างแบบจำลอง และสามารถอธิบายพฤติกรรมตัดสินใจเลือกรูปแบบการเดินทางของผู้เดินทางเมื่อเกิดสภาวะการณ์มลพิษทางอากาศได้อย่างเหมาะสม ด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองโลจิสติกส์สำหรับการวิเคราะห์ทางเลือกทั้งหมด 5 รูปแบบ และสร้าง

แบบจำลองโลจิสต์ลำดับชั้นสำหรับการวิเคราะห์จัดกลุ่มทางเลือก 2 กลุ่มคือ กลุ่มผู้ใช้ระบบขนส่งมวลชน และกลุ่มผู้ใช้รถยนต์ส่วนตัว

3. วิธีการดำเนินการ

การศึกษารวบรวมข้อมูลในหัวข้อทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนำไปสู่การออกแบบสอบถามที่เป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ **ส่วนที่ 1** ข้อมูลคุณลักษณะทางเศรษฐกิจและสังคมของผู้เดินทาง **ส่วนที่ 2** ข้อมูลลักษณะการเดินทางปัจจุบันในเขตเมืองนครปฐมของผู้เดินทาง และ **ส่วนที่ 3** ข้อมูลสถานการณ์ทางเลือก วิธีการดำเนินงานวิจัยสามารถสรุปรายละเอียดแต่ละขั้นตอนได้ดังรูปที่ 2

จากส่วนที่ 3 ข้อมูลสถานการณ์ทางเลือกแบ่งออกเป็นทั้งหมด 3 สถานการณ์ แต่ละสถานการณ์ประกอบด้วยรูปแบบยานพาหนะ 5 ประเภทที่ต่างกัน ได้แก่ประเภท A,B,C,D และ E ซึ่งเป็นชื่อนามสมมุติและมีลักษณะรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดลักษณะยานพาหนะแต่ละประเภท

ชื่อยานพาหนะ	รายละเอียด
รถโดยสารปรับอากาศ, A	เครื่องยนต์ดีเซล, จำนวน 80 ที่นั่งรวมยืน
รถโดยสารปรับอากาศ, B	เครื่องยนต์ก๊าซ NGV, จำนวน 50 ที่นั่งรวมยืน, ติดตั้งเครื่องฟอกอากาศ
รถสองแถว, C	เครื่องยนต์ดีเซล, จำนวน 12 ที่นั่ง
รถมินิบัสปรับอากาศ, D	เครื่องยนต์ดีเซล, จำนวน 20 ที่นั่ง
รถยนต์ส่วนตัว, E	เครื่องยนต์เบนซินและดีเซล, จำนวน 5 ที่นั่ง

3.1 การกำหนดพื้นที่ศึกษาและกลุ่มเป้าหมาย

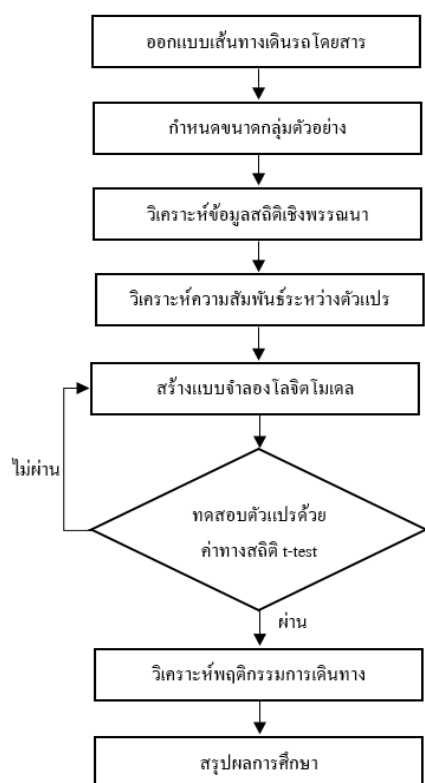
การกำหนดกลุ่มเป้าหมายคือ ผู้ที่สัญจรหรืออาศัยอยู่บริเวณเขตเมืองนครปฐม ทำการสำรวจและออกแบบเส้นทางการเดินทางโดยสารจากสถานีขนส่งจังหวัดไปยังศูนย์ราชการจังหวัดนครปฐม สถานที่ที่สำคัญสำหรับการเก็บข้อมูลมาวิเคราะห์ เช่น ห้างสรรพสินค้าบิ๊กซี ห้างสรรพสินค้าโลตัส องค์พระปฐมเจดีย์ ศูนย์ราชการจังหวัด และมหาวิทยาลัยศิลปากร เป็นต้น

3.2 การกำหนดขนาดกลุ่มตัวอย่าง

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้คำนวณขนาดกลุ่มตัวอย่างดังสมการที่ (1) จากจำนวนประชากรผู้ที่อาศัยในเขตเมืองนครปฐมทั้งหมด 172,016 คน[25] ดังนั้นจะได้ขนาดกลุ่มตัวอย่างทั้งหมดประมาณ 400 ตัวอย่าง ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมทางเลือกเดินทางโดยใช้ระบบขนส่งสาธารณะ[26, 27] ทำให้ผู้วิจัยได้กำหนดตัวแปรที่ใช้ในการสำรวจข้อมูลไว้ทั้งหมด 17 ตัวแปรดังตารางที่ 2 ซึ่งตัวแปรทั้งหมดจะถูกนำไปวิเคราะห์หาค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) เพื่อทำการคัดกรองแล้วนำตัวแปรที่เกี่ยวข้องไปใช้ในการสร้างแบบจำลองโลจิสต์โมเดลในส่วนของงานวิเคราะห์ข้อมูลขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 2 ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัยที่มีผลต่อการเลือกรูปแบบการเดินทาง

ลำดับ	ตัวแปรอิสระ	สัญลักษณ์	คำอธิบาย	มาตรวัดตัวแปร
1	เพศ	gender	ตัวแปรหุ่น; เพศชาย=0, เพศหญิง=1 (คน)	นามบัญญัติ
2	อายุ	age	ช่วงอายุ (ปี)	อันดับ
3	อาชีพ	occ	อาชีพที่ทำในปัจจุบัน	นามบัญญัติ
4	รายได้ครัวเรือน	inc	รายได้ครัวเรือนต่อเดือน (บาท)	อันดับ
5	ขนาดครัวเรือน	nho	จำนวนสมาชิกในครอบครัว (คน)	อันดับ
6	รถยนต์ในครัวเรือน	nco	จำนวนรถยนต์ในครอบครอง (คัน)	อันดับ
7	รถจักรยานยนต์ในครัวเรือน	nmo	จำนวนรถจักรยานยนต์ในครอบครอง (คัน)	อันดับ
8	สมาชิกในครัวเรือนที่ทำงาน	nwo	จำนวนสมาชิกในครอบครัวที่ทำงาน (คน)	อันดับ
9	เส้นทางการเดินทาง	way	เส้นทางการเดินทางโดยสารที่ถูกรูปแบบใหม่	นามบัญญัติ
10	ระยะทาง	dis	ระยะทางจากสถานีขนส่งไปยังศูนย์ราชการนครปฐม (กิโลเมตร)	อัตราส่วน
11	ค่าใช้จ่าย	cost	ค่าใช้จ่ายในการเดินทางต่อเที่ยว (บาท)	อัตราส่วน
12	ความถี่ให้บริการ	freq	ความถี่ให้บริการโดยสาร (นาที่/เที่ยว)	อัตราส่วน
13	เวลาที่รอคอย	wait	เวลาที่จอดรถโดยสารโดยเฉลี่ย (นาที่)	อัตราส่วน
14	เวลาที่ใช้เดินทาง	time	เวลาเดินทางโดยเฉลี่ยที่ใช้ในการเดินทางจากสถานีขนส่งไปยังศูนย์ราชการนครปฐม (นาที่)	อัตราส่วน
15	ฝุ่นละออง PM2.5	pm2.5	ระดับค่าฝุ่นละออง PM2.5 ภายในห้องโดยสารโดยเฉลี่ย (ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตร) ขึ้นอยู่กับยานพาหนะแต่ละรูปแบบจาก 5 ประเภท	อัตราส่วน
16	อุปกรณ์	device	อุปกรณ์อำนวยความสะดวกสบายภายในยานพาหนะ	นามบัญญัติ
17	เครื่องฟอกอากาศ	air_pur	ตัวแปรหุ่น; มีเครื่องฟอกอากาศ =1, ไม่มี =0	นามบัญญัติ

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกเป็นการวิเคราะห์ทางสถิติเชิงพรรณนาทั่วไปของข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถามในส่วนที่ 1 ข้อมูลคุณลักษณะทางเศรษฐกิจและสังคมของผู้เดินทาง และในส่วนที่ 2 ข้อมูลลักษณะการเดินทางปัจจุบันในเขตเมืองนครปฐมของผู้เดินทาง ขั้นตอนที่สองคือ การวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ของตัวแปรทั้งหมด 17 ตัวแปรที่ได้จากแบบสอบถามเฉพาะส่วนที่ 1 และส่วนที่ 3

3.4.1 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเชิงพรรณนา

การวิเคราะห์ข้อมูลคุณลักษณะทางเศรษฐกิจและสังคมของผู้เดินทางในเขตเมืองนครปฐมส่วนแรกแสดงดังตารางที่ 3 พบว่าส่วนใหญ่ของผู้ตอบแบบสอบถามเป็นเพศหญิงคิดเป็นร้อยละ 61.0 เพศชายคิดเป็นร้อยละ 39.0

และส่วนมากอายุ 26-60 ปี (กลุ่มวัยทำงาน) คิดเป็นร้อยละ 61.0 รองลงมาอายุ 18-25 ปี (กลุ่มนักศึกษาและวัยทำงาน) คิดเป็นร้อยละ 25.5 ประกอบอาชีพค้าขายเป็นส่วนใหญ่ คิดเป็นร้อยละ 32.6 รองลงมารับราชการ คิดเป็นร้อยละ 15.3 รายได้ครัวเรือนต่อเดือนของคนในเขตเมืองนครปฐมส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 20,001-50,000 บาท (กลุ่มผู้มีรายได้ครัวเรือนปานกลาง) คิดเป็นร้อยละ 51.5 รองลงมาอยู่ในช่วง 50,000-80,000 บาท (กลุ่มผู้มีรายได้ครัวเรือนสูง) คิดเป็นร้อยละ 23.3 ถัดมาจำนวนสมาชิกในครอบครัวส่วนใหญ่มีจำนวน 2-4 คน คิดเป็นร้อยละ 67.2 รองลงมา มีจำนวนมากกว่า 4 คน คิดเป็นร้อยละ 26.8 ต่อมาในส่วนของจำนวนรถยนต์และรถจักรยานยนต์ในครอบครอง ส่วนใหญ่มีการครอบครองจำนวนทั้งสิ้น 1 คัน คิดเป็นร้อยละ 42.0 และ 55.3 ตามลำดับ และสุดท้าย

ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 เดือน พฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2563

จำนวนสมาชิกในครอบครัวที่ทำงานทำส่วนใหญ่มีจำนวน 2-3 คน คิดเป็นร้อยละ 60.8 รองลงมาจำนวนมากกว่า 3 คน คิดเป็นร้อยละ 18.7 ถัดมาในส่วนที่สองข้อมูลลักษณะการเดินทางปัจจุบันในเขตเมืองนครปฐมแสดงดังตารางที่ 4 พบว่าส่วนใหญ่ใช้รถยนต์ส่วนตัวในการเดินทาง คิดเป็นร้อยละ 47.0 รองลงมาใช้รถจักรยานยนต์ส่วนตัว คิดเป็น

ร้อยละ 31.5 ค่าใช้จ่ายในการเดินทางต่อเดือนส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 500-1,001 บาท คิดเป็นร้อยละ 34.8 และส่วนใหญ่เป็นผู้ที่อาศัยอยู่ในอำเภอเมืองนครปฐม คิดเป็นร้อยละ 65.0

ตารางที่ 3 คุณลักษณะทางเศรษฐกิจและสังคมของผู้เดินทางในเขตเมืองนครปฐม

คุณลักษณะ	รายละเอียด	จำนวน	ร้อยละ
เพศ	ชาย	156	39.0
	หญิง	244	61.0
อายุ	น้อยกว่า 18 ปี	30	7.5
	18-25 ปี	102	25.5
	26-60 ปี	244	61.0
	มากกว่า 60 ปี	24	6.0
อาชีพ	นักเรียน-นักศึกษา	93	23.3
	พนักงานรัฐวิสาหกิจ-เอกชน	47	11.8
	รับราชการ	61	15.3
	ค้าขาย	131	32.6
	รับจ้างทั่วไป	52	13.0
	อื่นๆ เช่น ธุรกิจส่วนตัว	16	4.0
รายได้ครัวเรือนต่อเดือน	น้อยกว่า 20,000 บาท	83	20.8
	20,001-50,000 บาท	206	51.5
	50,001-80,000 บาท	93	23.3
	มากกว่า 80,000 บาท	18	4.4
จำนวนสมาชิกในครอบครัว	น้อยกว่า 2 คน	24	6.0
	2-4 คน	269	67.2
	มากกว่า 4 คน	107	26.8
จำนวนรถยนต์ในครอบครอง	ไม่มี	93	23.2
	1 คัน	168	42.0
	2-3 คัน	127	31.8
	มากกว่า 3 คัน	12	3.0
จำนวนรถจักรยานยนต์ในครอบครอง	ไม่มี	81	20.3
	1 คัน	221	55.3
	2-3 คัน	89	22.3
	มากกว่า 3 คัน	9	2.1
จำนวนสมาชิกในครอบครัวที่ทำงาน	ไม่มี	20	5.0
	1 คน	62	15.5
	2-3 คน	243	60.8
	มากกว่า 3 คน	75	18.7

ตารางที่ 4 ลักษณะการเดินทางปัจจุบันในเขตเมืองนครปฐม

คุณลักษณะ	รายละเอียด	จำนวน	ร้อยละ
ยานพาหนะที่ใช้ เดินทาง	รถเมล์	29	8.8
	รถสองแถว	35	7.2
	รถยนต์ส่วนตัว	188	47.0
	รถจักรยานยนต์ส่วนตัว	126	31.5
	รถจักรยานยนต์รับจ้าง	22	5.5
ค่าใช้จ่ายในการ เดินทางต่อเดือน	น้อยกว่า 500 บาท	131	32.8
	500-1,001 บาท	139	34.8
	1,001-2,000 บาท	63	15.8
	มากกว่า 2,000 บาท	67	16.6
ตำแหน่งที่ตั้งอาศัย	อำเภอเมือง	260	65.0
	อำเภออื่นๆ	84	21.0
	ต่างจังหวัด	56	14.0

3.4.2 การวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ (Correlation)

การหาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งหมด 17 ตัวแปรจากการคำนวณด้วยโปรแกรมทางสถิติ ดังรูปที่ 3 เป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร โดยตัวแปรที่มีเครื่องหมายบวกแสดงถึงความสัมพันธ์ในทิศทางหรือแนวโน้มเดียวกัน และตัวแปรที่มีเครื่องหมายลบแสดงถึงความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามกัน อย่างมี

นัยสำคัญที่ร้อยละ 99 และ 95 ตามลำดับ โดยทำการคัดเลือกตัวแปรที่มีค่าสหสัมพันธ์อยู่ในช่วง 0.2-0.5 เพื่อป้องกันการเกิด Multicollinearity หรือการที่ตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กันในระดับสูง ซึ่งอาจส่งผลให้แบบจำลองที่ใช้ในการพยากรณ์ตัวแปรตามมีความคลาดเคลื่อน[28, 29]

Variable	gender	age	occ	inc	nho	nco	nmo	nwo	way	dis	cost	freq	wait	time	pm2.5	device	air_pur
gender	1																
age	-0.13	1															
occ	-0.086*	0.665**	1														
inc	0.113**	0.105**	-0.13**	1													
nho	0.133**	-0.035	-0.189**	0.257**	1												
nco	0.007	0.24**	0.06	0.536**	0.312**	1											
nmo	-0.089**	0.211**	0.146**	0.163**	0.11**	0.101*	1										
nwo	0.032	-0.051	-0.044	0.226**	0.294**	0.098*	0.023	1									
way	0.01	-0.04	-0.026	-0.086*	-0.049	0.042	-0.056	0.039	1								
dis	0.01	-0.04	-0.026	-0.086*	-0.049	0.042	-0.056	0.039	1.00**	1							
cost	0.046	-0.004	-0.069	0.284**	0.191**	0.243**	0.084*	0.26	0.024	0.024	1						
freq	-0.056	-0.056	-0.025	-0.264**	-0.15**	-0.215**	-0.09*	-0.072	-0.038	-0.038	-0.823**	1					
wait	-0.025	-0.007	0.015	-0.207**	-0.135**	-0.195**	-0.091*	-0.046	-0.038	-0.038	-0.786**	0.898**	1				
time	-0.024	-0.031	-0.005	-0.153**	-0.065	-0.118**	-0.036	-0.015	-0.042	-0.042	-0.612**	0.538**	0.649**	1			
pm2.5	0.055	0.208**	0.277**	-0.044	-0.134**	-0.127**	-0.036	0.085*	0.009	0.009	-0.367**	-0.15	0.104*	0.009	1		
device	-0.064	-0.209**	-0.276**	-0.043	0.07	0.042	-0.011	-0.095*	-0.024	-0.024	0.088*	0.274**	0.146**	0.165**	-0.942**	1	
air_pur	-0.043	-0.128**	-0.217**	-0.042	0.24	0.006	-0.046	-0.111**	-0.024	-0.024	0.014	0.355**	0.275**	0.115**	-0.763**	0.867**	1

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

รูปที่ 3 การทดสอบค่าสหสัมพันธ์ (correlation)

4. ผลการศึกษา

ผลการทดสอบประมาณค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองโลจิสติกแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การทดสอบด้วยแบบจำลองโลจิสติก และการทดสอบด้วยแบบจำลองโลจิสติกลำดับขั้น โดยแบ่งผลการวิเคราะห์ออกเป็น 3 กลุ่มหลักคือ กลุ่มแรกคือผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยรวมทั้งหมด กลุ่มที่สองคือผลการวิเคราะห์ข้อมูลขึ้นอยู่กับกลุ่มรายได้ครัวเรือน กลุ่มที่สามคือผลการวิเคราะห์ข้อมูลขึ้นอยู่กับกลุ่มระดับค่าฝุ่นละออง PM2.5 ภายในห้องโดยสารโดยเฉลี่ย ซึ่งสามารถเขียนฟังก์ชันอรรถประโยชน์ของแต่ละกลุ่มมีรูปแบบดังสมการต่อไปนี้

รูปแบบที่ 1 พิจารณาตัวแปรทั้งหมด

$$U = \beta_1 * cost + \beta_2 * time + \beta_3 * wait + \beta_4 * inc + \beta_5 * age + \beta_6 * occ + \beta_7 * nho + \beta_8 * nco + \beta_9 * nwo + \beta_{10} * device \quad (9)$$

รูปแบบที่ 2 พิจารณาตัวแปรขึ้นอยู่กับกลุ่มรายได้

$$U = \beta_1 * cost + \beta_2 * freq + \beta_3 * wait + \beta_4 * time + \beta_5 * pm2.5 + \beta_6 * device \quad (10)$$

รูปแบบที่ 3 พิจารณาตัวแปรขึ้นอยู่กับกลุ่มระดับค่าฝุ่น PM2.5

$$U = \beta_1 * cost + \beta_2 * freq + \beta_3 * wait + \beta_4 * time \quad (11)$$

เมื่อ U คือ อรรถประโยชน์การเลือกรูปแบบการเดินทางขึ้นอยู่กับผลการวิเคราะห์แต่ละรูปแบบ

β คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระแต่ละตัวที่ส่งผลต่อตัวแปรตาม

4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยรวมทั้งหมด

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยรวมทั้งหมดคือ การวิเคราะห์ตัวแปรทั้งหมดที่ได้ทำการคัดกรองแล้วจากการคำนวณค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) อย่างมีนัยสำคัญเพื่อนำไปสร้างแบบจำลองอรรถประโยชน์การเลือกรูปแบบการเดินทาง 5 ประเภทแสดงดังตารางที่ 5 โดยตัวแปรที่นำมาวิเคราะห์ประกอบไปด้วยตัวแปรทั้งหมด 10 ตัวแปร ดังสมการที่ 9 ระดับนัยสำคัญที่ร้อยละ 99 และ 95 ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าแบบจำลองโลจิสติก และแบบจำลองโลจิสติกลำดับขั้นสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลมีค่า Rho-square เท่ากับ 0.27 และ 0.29 ตามลำดับ รวมทั้งค่าทดสอบสถิติอื่นๆที่แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมของการสร้างแบบจำลอง

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ตัวแปรทั้งหมด

ตัวแปร	แบบจำลองโลจิสติก (กรณีที่ 1)			แบบจำลองโลจิสติกลำดับขั้น (กรณีที่ 2)		
	สัมประสิทธิ์ (β)	t-test	p-value	สัมประสิทธิ์ (β)	t-test	p-value
cost	-0.1810**	-12.94	0.000	-0.090**	-7.24	0.000
wait	-0.0319**	-2.99	0.003	0.0005	0.20	0.844
device	5.430**	9.72	0.000	1.6277**	6.61	0.000
time_A	-0.3371**	-8.81	0.000	-0.0656**	-5.14	0.000
time_B	-0.7314**	-14.64	0.000	-0.1629**	-6.44	0.000
time_C	-0.3312**	-6.47	0.000	-0.0493**	-3.54	0.000
time_D	-0.5347**	-12.08	0.000	-0.1194**	-6.14	0.000
time_E	-0.5025**	-10.21	0.000	-0.2398**	-12.01	0.000
inc_A	-1.1037**	-7.44	0.000	-0.9282**	-8.84	0.000
inc_B	-0.9781**	-6.42	0.000	-0.9208**	-8.74	0.000
inc_C	-1.0087**	-6.44	0.000	-0.9250**	-8.77	0.000
inc_D	-0.8289**	-6.80	0.000	-0.8806**	-8.55	0.000
age_A	-0.7509**	-4.69	0.000	-0.6963**	-5.98	0.000
age_B	-0.4918**	-2.96	0.003	-0.6763**	-5.81	0.000

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ตัวแปรทั้งหมด (ต่อ)

ตัวแปร	แบบจำลองโลจิสติกพหุ (กรณีที่ 1)			แบบจำลองโลจิสติกลำดับชั้น (กรณีที่ 2)		
	สัมประสิทธิ์ (β)	t-test	p-value	สัมประสิทธิ์ (β)	t-test	p-value
age_C	-0.4155*	-2.38	0.017	-0.6573**	-5.66	0.000
age_D	-1.0460**	-7.82	0.000	-0.7449**	-6.38	0.000
occ_A	0.1597*	2.14	0.032	0.1724**	3.13	0.002
occ_B	0.0383	0.49	0.623	0.1507**	2.72	0.006
occ_C	0.2669**	3.39	0.001	0.1883**	3.40	0.001
occ_D	0.2165**	3.42	0.001	0.1816**	3.32	0.001
nho_A	-0.3605*	-2.12	0.034	-0.2200	-1.87	0.062
nho_B	0.0047	0.03	0.979	-0.1658	-1.40	0.162
nho_C	-0.1848	-1.05	0.296	-0.2184	-1.85	0.064
nho_D	-0.3381*	-2.36	0.018	-0.2065	-1.77	0.076
nco_A	-0.6792**	-4.97	0.000	-0.7173**	-7.28	0.000
nco_B	-0.7379**	-5.22	0.000	-0.7255**	-7.33	0.000
nco_C	-0.7087**	-4.85	0.000	-0.7120**	-7.20	0.000
nco_D	-0.7098**	-6.20	0.000	-0.7248**	-7.43	0.000
nwo_A	-1.2608**	-9.53	0.000	-1.0181**	-10.06	0.000
nwo_B	-0.8742**	-6.30	0.000	-0.9534**	-9.51	0.000
nwo_C	-1.0604**	-7.64	0.000	-0.9868**	-9.81	0.000
nwo_D	-1.0022**	-8.52	0.000	-0.9680**	-9.75	0.000
ประเมินผล แบบจำลอง	Log likelihood function (0) = -3346.021			Log likelihood function (0) = -3346.021		
	Log likelihood function (β) = -2430.896			Log likelihood function (β) = -2391.453		
	Chi-square= 1830.250, Rho-square= 0.274			Chi-square= 1909.136, Rho-square= 0.285		
	%Correct = 75.20			%Correct = 71.02		

หมายเหตุ: **, * ระดับนัยสำคัญ (Level of significant) ที่ร้อยละ 99 และ 95 ตามลำดับ

พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรค่าใช้จ่ายในการเดินทาง เวลาที่รอคอย และเวลาที่ใช้เดินทาง พบว่าทั้ง 2 กรณี เครื่องหมายหน้าสัมประสิทธิ์ติดลบแสดงว่า เมื่อค่าใช้จ่ายเดินทาง เวลาที่รอคอย และเวลาที่ใช้เดินทาง เพิ่มมากขึ้น มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจของผู้เดินทางเลือกรูปแบบการเดินทางนั้นน้อยลง ยกเว้นกรณีที่ 2 เวลาที่รอคอยไม่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกรูปแบบการเดินทาง

พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอุปกรณ์ และ อาชีพพบว่า ทั้ง 2 กรณีมีเครื่องหมายหน้าสัมประสิทธิ์เป็นบวกแสดงว่า เมื่ออุปกรณ์ภายในห้องโดยสารและการประกอบอาชีพเพิ่มขึ้น มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจของผู้เดินทางเลือกรูปแบบการเดินทางนั้นเพิ่มขึ้น ยกเว้นกรณีที่ 1

การเดินทางด้วยโหมด B ตัวแปรอาชีพไม่ส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกรูปแบบการเดินทาง

พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรรายได้ครัวเรือน อายุ ขนาดของครัวเรือน รถยนต์ในครัวเรือน และสมาชิกในครัวเรือนที่ทำงาน ทั้งหมด 5 ตัวแปรพบว่า เครื่องหมายหน้าสัมประสิทธิ์ติดลบแสดงว่า เมื่อตัวแปรที่กล่าวมาทั้งหมดมีจำนวนเพิ่มขึ้น มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจของผู้เดินทางเลือกรูปแบบการเดินทางนั้นน้อยลง ยกเว้นกรณีที่ 2 ตัวแปรขนาดของครัวเรือน ไม่ส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกรูปแบบการเดินทางรวมถึงกรณีที่ 1 เฉพาะการเดินทางด้วยโหมด B และ C

4.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลขึ้นอยู่กับกลุ่มรายได้ครัวเรือน

การวิเคราะห์ข้อมูลกลุ่มรายได้ครัวเรือนแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มที่ 1 คือผู้มีรายได้ครัวเรือนน้อยหรือน้อยกว่า 20,000 บาท กลุ่มที่ 2 คือผู้มีรายได้ครัวเรือนปานกลางหรืออยู่ในช่วง 20,001-50,000 บาท และกลุ่มที่ 3 คือผู้มีรายได้ครัวเรือนสูงหรือมากกว่า 50,000 บาทขึ้นไป แสดงดังตารางที่ 6, 7 และ 8 ตามลำดับ โดยได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลตัวแปรเฉพาะส่วนที่ 3 ซึ่งเป็นส่วนของข้อมูลคุณลักษณะด้านการขนส่งจากสถานการณ์ทางเลือกเนื่องจากแบบสอบถามส่วนที่ 1 ตัวแปรข้อมูลคุณลักษณะทางเศรษฐกิจและสังคมของผู้เดินทางในเขตเมืองนครปฐมไม่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกรูปแบบการเดินทางของกลุ่มรายได้ครัวเรือนอย่างมีนัยสำคัญ จึงไม่นำมาพิจารณาในครั้งนี้ การวิเคราะห์ประกอบไปด้วย 6 ตัวแปรดังสมการที่ 10 ที่ส่งผลต่อกลุ่มรายได้ ได้แก่ ค่าใช้จ่ายในการเดินทาง ความถี่ให้บริการ เวลาที่รอคอย ฝุ่นละออง PM2.5 และอุปกรณ์

ค่า Rho-square ด้วยวิธีแบบจำลองโลจิสติกของ กลุ่มผู้มีรายได้ครัวเรือนน้อยมีค่าเท่ากับ 0.13 ผู้มีรายได้ครัวเรือนปานกลางมีค่าเท่ากับ 0.07 และผู้มีรายได้ครัวเรือนสูงมีค่าเท่ากับ 0.47 ถัดมาค่า Rho-square ด้วยวิธีแบบจำลองโลจิสติกลำดับขั้นของกลุ่มผู้มีรายได้ครัวเรือนน้อยมีค่าเท่ากับ 0.14 ผู้มีรายได้ครัวเรือนปานกลางมีค่าเท่ากับ 0.08 และผู้มีรายได้ครัวเรือนสูงมีค่าเท่ากับ 0.47 ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลในแต่ละกลุ่มค่อนข้างแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนกลุ่มตัวอย่างของแต่ละกลุ่มรายได้ครัวเรือน ซึ่งเป็นตัวชี้วัดถึงความสามารถในการอธิบายข้อมูลได้ดี

เมื่อพิจารณาการแจกแจงจากค่า Chi-square ของทั้งสามกลุ่มรายได้จากแบบจำลองทั้ง 2 กรณีแล้วพบว่า ค่า Chi-square ที่ได้จากแบบจำลองของกลุ่มผู้มีรายได้ครัวเรือนน้อยมีค่าต่ำสุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการทดสอบนัยสำคัญของตัวแปร

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ตัวแปรของกลุ่มรายได้ครัวเรือนน้อย (กลุ่ม 1, >20,000 บาท)

ตัวแปร	แบบจำลองโลจิสติก (กรณีที่ 1)			แบบจำลองโลจิสติกลำดับขั้น (กรณีที่ 2)		
	สัมประสิทธิ์ (β)	t-test	p-value	สัมประสิทธิ์ (β)	t-test	p-value
cost	-0.1495**	-7.19	0.000	-0.1098**	-8.03	0.000
freq	-0.0067	-0.33	0.740	-0.0087	-1.06	0.288
wait	-0.0047	-0.22	0.826	0.0126	1.47	0.142
time	-0.2015**	-5.47	0.000	-0.0608**	-2.33	0.020
pm2.5	-0.0490**	-4.74	0.000	-0.0189**	-3.05	0.002
device	-0.6097**	-2.91	0.004	-0.0470	-0.40	0.688
ประเมินผล	Log likelihood function (β) = -518.156			Log likelihood function (β) = -514.236		
แบบจำลอง	Chi-square= 157.892, Rho-square= 0.132			Chi-square= 165.732, Rho-square= 0.139		

หมายเหตุ: **, * ระดับนัยสำคัญ (Level of significant) ที่ร้อยละ 99 และ 95 ตามลำดับ

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ตัวแปรของกลุ่มรายได้ครัวเรือนปานกลาง (กลุ่ม 2, 20,000-50,000 บาท)

ตัวแปร	แบบจำลองโลจิสติก (กรณีที่ 1)			แบบจำลองโลจิสติกลำดับขั้น (กรณีที่ 2)		
	สัมประสิทธิ์ (β)	t-test	p-value	สัมประสิทธิ์ (β)	t-test	p-value
cost	-0.1362**	-10.34	0.000	-0.0360**	-10.10	0.000
freq	0.0038	0.27	0.784	-0.0021	-1.37	0.169
wait	-0.0998**	-6.61	0.000	-0.0047	-1.93	0.054
time	-0.2957**	-10.56	0.000	-0.0242**	-4.12	0.000
pm2.5	-0.0706**	-9.18	0.000	-0.0079**	-5.18	0.000
device	-1.1557**	-7.47	0.000	-0.0551*	-2.07	0.038
ประเมินผล	Log likelihood function (β) = -1464.472			Log likelihood function (β) = -1444.334		
แบบจำลอง	Chi-square= 225.554, Rho-square= 0.072			Chi-square= 265.830 Rho-square= 0.084		

หมายเหตุ: **, * ระดับนัยสำคัญ (Level of significant) ที่ร้อยละ 99 และ 95 ตามลำดับ

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ตัวแปรของกลุ่มรายได้ครัวเรือนสูง (กลุ่ม 3, <50,000 บาท)

ตัวแปร	แบบจำลองโลจิสติก (กรณีที่ 1)			แบบจำลองโลจิสติกลำดับขั้น (กรณีที่ 2)		
	สัมประสิทธิ์ (β)	t-test	p-value	สัมประสิทธิ์ (β)	t-test	p-value
cost	-0.0768**	-4.39	0.000	-0.0565**	-3.17	0.002
freq	-0.0241	-0.87	0.385	-0.0234	-1.63	0.103
wait	0.0285	1.05	0.293	0.0013	0.08	0.936
time	-0.4181**	-7.77	0.000	-0.2595**	-4.24	0.000
pm2.5	-0.0818**	-6.58	0.000	-0.0568**	-4.21	0.000
device	-1.5082**	-5.84	0.000	-1.1026**	-4.44	0.000
ประเมินผล	Log likelihood function (β) = -619.334			Log likelihood function (β) = -616.016		
แบบจำลอง	Chi-square= 1104.674, Rho-square= 0.471			Chi-square= 1111.310, Rho-square= 0.474		

หมายเหตุ: **, * ระดับนัยสำคัญ (Level of significant) ที่ร้อยละ 99 และ 95 ตามลำดับ

พิจารณาสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรทุกตัวจากทั้ง 3 กลุ่มและแบบจำลองทั้ง 2 กรณีพบว่า มีเครื่องหมายติดลบทั้งหมด ดังนั้นจึงพิจารณาเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละตัวแปรว่าส่งผลต่อการเลือกรูปแบบการเดินทางของกลุ่มรายได้ใดมากที่สุด โดยเริ่มจากตัวแปรค่าใช้จ่ายในการเดินทางส่งผลต่อกลุ่มผู้มีรายได้น้อยมากที่สุด ตัวแปรเวลาที่รอคอยส่งผลเฉพาะต่อกลุ่มผู้มีรายได้ปานกลางในกรณีที่ 1 ถัดมาตัวแปรเวลาที่ใช้ในการเดินทาง, ตัวแปรฝุ่นละออง PM2.5 และตัวแปรอุปกรณ์ ส่งผลต่อกลุ่มผู้มีรายได้สูงมากที่สุด และส่งผลต่อกลุ่มผู้มีรายได้น้อยค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับกลุ่มอื่น

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรค่าใช้จ่ายการเดินทางเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรเวลาที่ใช้เดินทาง (Value of time, VOT) และเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปร PM2.5 ของแต่ละกลุ่มรายได้ จากแบบจำลองกรณีที่ 2 สามารถคิดเป็นมูลค่าเงินเพื่อแลกกับเวลาที่สูญเสียในการเดินทาง และได้เลือกใชยานพาหนะที่มีระดับค่าฝุ่นละออง PM2.5 อยู่ภายในห้องโดยสารน้อยสุดเฉลี่ยที่ 27 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร รวมทั้งอธิบายถึงคุณลักษณะของบุคคลส่วนใหญ่ในการเลือกรูปแบบการเดินทางของแต่ละกลุ่มรายได้ ดังนี้

4.2.1 กลุ่มรายได้ครัวเรือนน้อย

ค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรค่าใช้จ่ายการเดินทางเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรเวลาที่ใช้เดินทางคิดเป็นมูลค่าเงิน (VOT) คือ 33.22 บาทต่อชั่วโมง ค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรค่าใช้จ่ายการเดินทางเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปร PM2.5 คิดเป็นมูลค่าเงิน 4.65 บาท และประกอบไปด้วยลักษณะส่วนบุคคลดังนี้ เป็นผู้ที่มีรายได้น้อยกว่า 20,000 บาท ประกอบอาชีพพนักงาน-นักศึกษาและค้าขาย มีช่วงอายุอยู่ระหว่าง 18-60 ปี จำนวนสมาชิกในครอบครัว 2-4 คน จำนวนรถยนต์ในครอบครอง 1 คัน และจำนวนสมาชิกในครอบครัวที่ทำงาน 2-3 คน

4.2.2 กลุ่มรายได้ครัวเรือนปานกลาง

ค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรค่าใช้จ่ายการเดินทางเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรเวลาที่ใช้เดินทางคิดเป็นมูลค่าเงิน (VOT) คือ 40.33 บาทต่อชั่วโมง ค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรค่าใช้จ่ายการเดินทางเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปร PM2.5 คิดเป็นมูลค่าเงิน 5.93 บาท และประกอบไปด้วยลักษณะส่วนบุคคลดังนี้ เป็นผู้ที่มีรายได้อยู่ในช่วง 20,000 ถึง 50,000 บาท ประกอบอาชีพค้าขาย มีช่วงอายุอยู่ระหว่าง 26-60 ปี จำนวนสมาชิกในครอบครัว 2-4 คน จำนวนรถยนต์ในครอบครอง 1 คัน และจำนวนสมาชิกในครอบครัวที่ทำงาน 2-3 คน

4.2.3 กลุ่มรายได้ครัวเรือนสูง

ค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรค่าใช้จ่ายการเดินทางเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรเวลาที่ใช้เดินทางคิดเป็นมูลค่าเงิน (VOT) คือ 275.58 บาทต่อชั่วโมง ค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรค่าใช้จ่ายการเดินทางเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปร PM2.5 คิดเป็นมูลค่าเงิน 27.14 บาท และประกอบไปด้วยลักษณะส่วนบุคคลดังนี้ เป็นผู้ที่มีรายได้อยู่ในช่วง 50,000 ถึง 80,000 บาท ประกอบอาชีพพนักงานรัฐวิสาหกิจและเอกชน มีช่วงอายุอยู่ระหว่าง 26-60 ปี จำนวนสมาชิกในครอบครัวมากกว่า 4 คน จำนวนรถยนต์ในครอบครอง 2-3 คัน และจำนวนสมาชิกในครอบครัวที่ทำงาน 2-3 คน

เมื่อพิจารณาทั้ง 3 กลุ่มรายได้จะเห็นได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรค่าใช้จ่ายการเดินทางเทียบกับค่า

สัมประสิทธิ์ตัวแปร PM2.5 และเวลาที่ใช้ในการเดินทางเมื่อแปลงเป็นมูลค่าเงินของแต่ละกลุ่มรายได้ มีค่าค่อนข้างแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งแสดงให้เห็นว่ายานพาหนะที่มีระดับค่าฝุ่น PM2.5 ต่ำส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายในการเดินทางค่อนข้างสูง จึงทำให้ผู้เดินทางที่จัดอยู่ในกลุ่มรายได้น้อยและปานกลาง มีการเลือกใช้ยานพาหนะประเภทนี้ค่อนข้างน้อย เนื่องจากให้ความสำคัญและคำนึงถึงค่าใช้จ่ายในการเดินทางเป็นหลัก ซึ่งแตกต่างจากกลุ่มผู้มีรายได้สูงที่เน้นความสะดวกสบาย และเวลาที่ใช้ในการเดินทางของยานพาหนะ จึงทำให้มีค่าใช้จ่ายในการเดินทางค่อนข้างสูง ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากข้อมูลดังกล่าวนี้ชี้ให้เห็นว่า ภาครัฐควรให้การส่งเสริมการบริการรถโดยสารที่มีระดับค่าฝุ่นละอองต่ำ และไม่ส่งผลกระทบต่อผู้มีรายได้น้อย เพื่อดึงดูดและสร้างความปลอดภัยต่อสุขภาพของผู้เดินทางให้หันมาเลือกใช้บริการเพิ่มมากขึ้น

4.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลขึ้นอยู่กับกลุ่มระดับค่าฝุ่นละออง PM2.5 ภายในห้องโดยสาร

การวิเคราะห์ข้อมูลกลุ่มปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ภายในห้องโดยสารแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ 1 ค่าฝุ่นละออง PM2.5 ต่ำหรือมีค่าอยู่ในช่วง 0-50 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และกลุ่มที่ 2 ค่าฝุ่นละออง PM2.5 สูงหรือมีค่ามากกว่า 50 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตรขึ้นไป แสดงดังตารางที่ 9 ซึ่งประกอบไปด้วย 4 ตัวแปร ดังสมการที่ 11 ที่ส่งผลต่อการเลือกรูปแบบการเดินทางในแต่ละกลุ่ม การวิเคราะห์นี้ได้ทำการสร้างแบบจำลองโลจิสติกเพียงอย่างเดียว เนื่องจากแบบจำลองโลจิสติกลำดับขั้นไม่สามารถจัดกลุ่มทางเลือกของรูปแบบการเดินทาง 5 ประเภทแยกตามกลุ่มระดับค่าฝุ่นละออง PM2.5 ได้ นอกจากนั้นพบว่าค่า Rho-square กลุ่มที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0.54 และกลุ่มที่ 2 มีค่าเท่ากับ 0.19 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองของกลุ่มที่ 1 มีการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ดีกว่าแบบจำลองกลุ่มที่ 2

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลแยกกลุ่มตามระดับค่าฝุ่นละออง PM2.5

ตัวแปร	แบบจำลองโลจิสติก (PM2.5 ต่ำ)			แบบจำลองโลจิสติก (PM2.5 สูง)		
	สัมประสิทธิ์ (β)	t-test	p-value	สัมประสิทธิ์ (β)	t-test	p-value
cost	0.099**	9.30	0.000	-0.1031**	-13.82	0.000
freq	0.1912**	5.83	0.000	0.0742**	6.75	0.000
wait	-0.1123**	-3.73	0.000	-0.0995**	-8.58	0.000
time	-0.2173**	-5.63	0.000	0.0250	1.90	0.057
ประเมินผล	Log likelihood function (β) = -795.272			Log likelihood function (β) = -1305.049		
แบบจำลอง	Chi-square= 1872.966, Rho-square= 0.541			Chi-square= 618.434, Rho-square= 0.192		

หมายเหตุ:**,* ระดับนัยสำคัญ (Level of significant) ที่ร้อยละ 99 และ 95 ตามลำดับ

พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรค่าใช้จ่ายในการเดินทางกลุ่ม PM2.5 ต่ำ เครื่องหมายหน้าสัมประสิทธิ์เป็นบวกแสดงให้เห็นว่า ค่าใช้จ่ายในการเดินทางที่เพิ่มขึ้นผู้เดินทางยินดีจ่ายเพิ่มเพื่อแลกกับปริมาณ PM2.5 ภายในห้องโดยสารที่ต่ำ ในส่วนของกลุ่ม PM2.5 สูง เครื่องหมายหน้าสัมประสิทธิ์เป็นลบแสดงว่า ค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นผู้เดินทางส่วนใหญ่พึงพอใจที่จะจ่ายลดลง จึงเลือกเดินทางยานพาหนะที่มี PM2.5 ภายในห้องโดยสารที่สูงเพื่อแลกกับค่าใช้จ่ายที่ถูกลง สังเกตได้จากค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรค่าใช้จ่าย PM2.5 สูงมีค่ามากกว่า PM2.5 ต่ำ

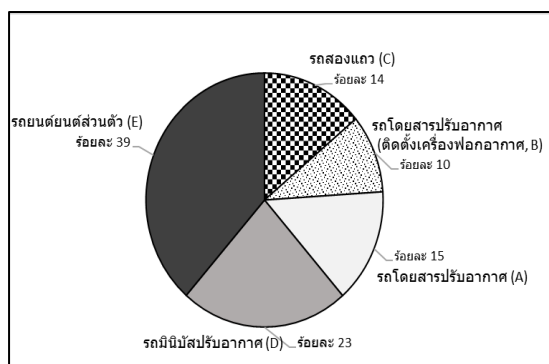
พิจารณาตัวแปรความถี่การให้บริการรถโดยสารทั้ง 2 กลุ่มพบว่า เครื่องหมายหน้าสัมประสิทธิ์เป็นบวก และตัวแปรเวลาที่รอคอยเครื่องหมายหน้าสัมประสิทธิ์เป็นลบ มีความสัมพันธ์กันคือ เมื่อความถี่การให้บริการเพิ่มขึ้นเวลาที่ผู้โดยสารรอรถโดยสารก็จะน้อยลงแสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาที่ผู้เดินทางสัมผัสกับ PM2.5 ภายนอกขณะรอรถโดยสารลดน้อยลงตามไปด้วย ซึ่งความถี่การให้บริการรถโดยสารกับระยะเวลาที่ผู้โดยสารรอรถโดยสารมีผลอย่างมากกับการตัดสินใจของผู้เดินทางในการเลือกยานพาหนะที่มีระดับค่าฝุ่นละออง PM2.5 ภายในห้องโดยสารต่ำ โดยสังเกตได้จากค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรความถี่และเวลาที่รอคอยรถโดยสารของกลุ่ม PM2.5 ต่ำมีค่ามากกว่า PM2.5 สูง

พิจารณาตัวแปรเวลาที่ใช้เดินทางของกลุ่ม PM2.5 ต่ำ เครื่องหมายหน้าสัมประสิทธิ์ติดลบแสดงให้เห็นว่า เวลาเดินทางที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้การเลือกรูปแบบการเดินทางที่ PM2.5 ภายในห้องโดยสารต่ำลดลง

4.4 สัดส่วนความน่าจะเป็นการเลือกรูปแบบการเดินทาง

ผลการวิจัยพบว่าสัดส่วนความน่าจะเป็นการเลือกรูปแบบการเดินทาง 5 ประเภทจากสถานการณ์ทางเลือก ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 4 พบว่า เมื่อทำการปรับเทียบแบบจำลองแล้วมีความใกล้เคียงกับสัดส่วนลักษณะการเดินทางปัจจุบันในเขตเมืองนครปฐม ซึ่งเน้นการศึกษาเส้นทางที่ออกแบบไว้จากสถานีขนส่งจังหวัดไปยังศูนย์ราชการจังหวัดนครปฐม และมีความสอดคล้องกับสัดส่วนข้อมูลจำนวนรถที่จดทะเบียนสะสมของจังหวัดนครปฐมในปัจจุบัน[30] สัดส่วนปริมาณการเลือกใช้รถยนต์ส่วนตัวมีมากที่สุด รองลงมา รถมินิบัสปรับอากาศ รถโดยสารปรับอากาศ รถสองแถว และน้อยสุดรถโดยสารปรับอากาศที่มีการติดตั้งเครื่องฟอกอากาศ คิดเป็นร้อยละ 39, 23, 15, 14 และ 10 ตามลำดับแสดงดังรูปที่ 3

งานวิจัยครั้งนี้ได้มุ่งเน้นการศึกษาในการพัฒนาระบบการขนส่งมวลชนในเขตเมืองนครปฐมเฉพาะในส่วนที่เป็นยานพาหนะประเภทรถโดยสาร เพื่อดึงดูดผู้เดินทางให้ปรับเปลี่ยนการใช้รถยนต์ส่วนตัวหันมาใช้บริการขนส่งมวลชนเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงไม่มีการกำหนดยานพาหนะประเภทรถจักรยานยนต์ส่วนตัว และรับจ้างไว้ในสถานการณ์ทางเลือก แต่เป็นการเพิ่มยานพาหนะทางเลือกใหม่เข้าไปในทางเลือกปัจจุบันนั้นคือ รถมินิบัสปรับอากาศ และรถโดยสารปรับอากาศที่มีการติดตั้งเครื่องฟอกอากาศ



รูปที่ 4 สัดส่วนความน่าจะเป็นการเลือกรูปแบบการเดินทางของยานพาหนะแต่ละประเภท

5. สรุปผลการศึกษา

ผลงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการเลือกรูปแบบการเดินทางภายใต้สภาวะมลพิษทางอากาศพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเลือกรูปแบบการเดินทางเมื่อเกิดสภาวะการณฝุ่นละออง PM2.5 ประกอบไปด้วย 4 ปัจจัยที่ผู้เดินทางให้ความสำคัญมากที่สุดคือ ค่าใช้จ่ายในการเดินทาง ความถี่ให้บริการรถโดยสารเวลาที่ยืดหยุ่น และเวลาที่ใช้เดินทาง อย่างมีนัยสำคัญที่ร้อยละ 99 เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการเดินทางของรถโดยสารปรับอากาศที่มีการติดตั้งเครื่องฟอกอากาศภายในห้องโดยสารค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับการขนส่งมวลชนประเภทอื่นส่งผลให้ผู้เดินทางมีแนวโน้มการเลือกใช้ค่อนข้างน้อย

งานวิจัยนี้สามารถนำแนวทางการวิจัยไปต่อยอดและพัฒนาปรับใช้ในการศึกษากับพื้นที่อื่นๆ ที่เป็นแหล่งการคมนาคมขนส่งมวลชนที่สำคัญ อาทิเช่น กรุงเทพมหานคร เชียงใหม่ ขอนแก่น ภูเก็ต เป็นต้น รวมทั้งเป็นการกระตุ้นนโยบายของภาครัฐให้มีการส่งเสริมการใช้รถโดยสารที่มีฝุ่นละอองในระดับต่ำ และพลังงานสะอาดที่มีค่าโดยสารและบริการที่เพียงพอ ซึ่งจะส่งผลให้ประชาชนมีแนวโน้มมาเลือกใช้ระบบขนส่งมวลชนในเขตเมืองได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นการผลักดันนโยบายจากทางองค์การขนส่งมวลชนกรุงเทพ (ขสมก.) ที่มีการประยุกต์ใช้เครื่องฟอกอากาศมาติดตั้งกับรถโดยสารสาธารณะเพื่อช่วยลดปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 [31]

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Greenpeace. (2020, March 14). "Particulate Matter 2.5 Microns," 2019. [Online]. Available: <https://www.greenpeace.org/thailand/exploration/protect/cleanair/pm25-harm/>
- [2] K. Manwipa, "Diesel Engine Exhaust," *Air&Noise*, vol. 6, pp. 8-9, 2014.
- [3] A. Noochjariya, "Car driving behavior and air pollution," *Air&Noise*, vol. 7, p. 6, 2015.
- [4] Prachachat Online. (2020, March 4) "Particulate Matter in Bangkok City," 2020. [Online]. Available: <https://www.prachachat.net/columns/news-378240>
- [5] The Statistical Nakhon Pathom Provincial Office. (2019, December 20). "Gross Provincial Product," 2019. [Online]. Available: http://www.nakhonpathom.go.th/news_develop_plan.
- [6] T. Yamane, *Statistics: An introductory analysis*, 1973.
- [7] E. P. Kroes and R. J. Sheldon, "Stated preference methods: an introduction," *Journal of transport economics and policy*, pp. 11-25, 1988.
- [8] R. Kaewluengklom, "Influence of psychological factors on mode choice behaviour: Case study of BRT in Khon Kaen City, Thailand," *Transportation Research Procedia*, vol. 25, pp. 5072-5082, 2017.
- [9] L. Yang, "Modeling Preferences for Innovative Mode Services: A Case Study in Lisbon," M.S. thesis, Dept. Civil and Environmental Eng., MIT, 2010.
- [10] D. Dissanayake and T. Morikawa, "Investigating household vehicle ownership, mode choice and trip sharing decisions using a combined revealed preference/stated preference Nested

- Logit model: case study in Bangkok Metropolitan Region," *Journal of Transport Geography*, vol. 18, pp. 402-410, 2010.
- [11] P. Bourgeat, "A revealed/stated preference approach to bus service configuration," *Transportation Research Procedia*, vol. 6, pp. 411-423, 2015.
- [12] M. E. Ben-Akiva and S. R. Lerman, *Discrete choice analysis: theory and application to travel demand*. MIT press, 1985.
- [13] K. Train, *Qualitative choice analysis: Theory, econometrics, and an application to automobile demand*. MIT press, 1986.
- [14] N. Lekawatthana, "Development of Travel Mode Choice Model between School Bus and Passenger Car," *SWU Engineering Journal* vol. 9, pp. 61-67, 2014.
- [15] K. Chanpariyavatevong, "Factor Affecting Customers' Decision on Food Delivery Service: Binary Logistic Regression Approach," *SWU Engineering Journal*, vol. 14, pp. 44-55, May 2019.
- [16] N. Auttapibarn, "Development of Hybrid Choice Models for Modal Shift Study: A Case Study of MRT Green Line Extension Kasetsat University Station " *SWU Engineering Journal*, vol. 13, pp. 1-17, Nov. 2018.
- [17] D. Ling and Z. Ning, "Dynamics in Mode Choice Decisions: A Case Study in Nanjing,China," *Procedia Engineering*, vol. 137, pp. 31-40, 2016.
- [18] Q. Huanmei and G. Jianqiang, "Nested logit model formation to analyze airport parking behavior based on stated preference survey studies," *Journal of Air Transport Management*, vol. 58, pp. 164-175, 2017.
- [19] S. Pongpiajun, "PM2.5 Source and Sink of Air pollution," *Research Community*, vol. 24, pp. 5-9, 2019.
- [20] Greenpeace. (2020 April 24). "Different air quality measurement standards," 2017. [Online]. Available: <https://www.greenpeace.org/thailand/explore/protect/cleanair/air-standard/>
- [21] Pollution Control Department. (2020 April 26). "Report particulate matter situation less than 2.5 microns," 2019. [Online]. Available: <http://www.pcd.go.th/file/pm2.5-2562.pdf>
- [22] C. Renjie, Z. Ang, C. Honglei, and Z. Zhuohui, "Cardiopulmonary Benefits of Reducing Indoor Particles of Outdoor Origin," A Randomized, Double-Blind Crossover Trial of Air Purifiers," *The American College of Cardiology Foundation*, vol. 65, pp. 2279-2287, 2015.
- [23] L. Y. Chan, W. L. Lau, S. C. Lee, and C. Y. Chan, "Commuter exposure to particulate matter in public transportation modes in Hong Kong," *Atmospheric Environment*, vol. 36, pp. 3363-3373, 2002.
- [24] K. Panyaping, "A Study on Contamination of Total Suspended Particulate in and Out of Building," *Srinakharinwirot University (Journal of Science and Technology)*, vol. 6, pp. 1-15, 2014.
- [25] Official Statistics Registration Systems. (2019 April 25). "Population and House Statistics," 2019 [Online]. Available: http://stat.dopa.go.th/stat/statnew/upstat_age.php
- [26] S. Suttipan, "Development of Mode Choice Model between Private Vehicles and University Bus in Prince of Songkla University," M.S. thesis, Dept. Civil Eng., Prince of Songkla University, 2014.

- [27] S. Porpanit, "High Speed Rail Station Access Choice Model for Cross-Regional Commuter Trips: Case Study of the Bangkok - Nong Khai Corridor," M.S. thesis, Dept. Civil Eng., Kasetsart University, 2016.
- [28] L. Rujanee, "The Relationship between Dissemination of Information on The Internet for Investor and Profitability of Listed Companies in The Stock Exchange of Thailand," M.S. thesis, Dept. Faculty of Management Science, Khon Kaen University, 2012.
- [29] S. Chalong. (2020 May 8). "Collinearity and Multicollinearity," 2012 [Online]. Available: <https://sites.google.com/site/mystatistics01/regression-correlation-analysis/collinearity-and-multicollinearity>
- [30] Department of Land Transport. (2020 May 8). "Registered vehicle collector," 2019. [Online]. Available: <https://web.dlt.go.th/statistics/>
- [31] MGRONLINE. (2020 February 18). "Test the air purifier on the roof bus public transit," 2019. [Online]. Available: <https://mgronline.com/business/detail/9630000016137>

**พฤติกรรมของความแข็งและความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีของเหล็กหล่อขาว
เติมธาตุผสมกึ่งหลายชนิดที่มีปริมาณโครเมียมต่างกัน**
**Behavior of Hardness and Abrasive Wear Resistance of Semi-multi-
alloyed White Cast Iron with Different Chromium Contents**

ณัชลิดา โยธาทธณ์¹ สุดสาคร อินธิเดช^{2*}

¹สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

²สาขาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Natchalida Yothathorn¹ Sudsakorn Inthidech^{2*}

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University

² Department of Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University

*Corresponding author Email: natchalida.yot@msu.ac.th

(Received: April 17, 2020; Accepted: May 29, 2020)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมของความแข็งและความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีของเหล็กหล่อขาวเติมธาตุผสมกึ่งหลายชนิดที่มีปริมาณโครเมียม (Cr) ต่างกัน ได้เตรียมเหล็กหล่อที่มีปริมาณ 5% 7% และ 9%Cr โดยน้ำหนัก (แทนด้วย %) ทำการอบอ่อนชิ้นงานที่อุณหภูมิ 950 °C ชุบแข็งชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1050 และ 1100 °C ด้วยพัลคม และ อบคืนตัวชิ้นชุบแข็งที่อุณหภูมิสามระดับในช่วง 450 ถึง 620 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ทำให้ความแข็งสูงสุดในการอบคืนตัว (H_{Tmax}) อุณหภูมิต่ำกว่าและสูงกว่าอุณหภูมิ H_{Tmax} ($L-H_{Tmax}$ และ $H-H_{Tmax}$) ทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีของชิ้นงานด้วยเครื่องชูเกะ ผลการทดลองพบว่าโครงสร้างจุลภาคและความแข็งของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงตามปริมาณ Cr และสถานะของกรรมวิธีทางความร้อน โดยความแข็งสูงสุดพบในชิ้นงานที่เติม 7%Cr ผ่านการชุบแข็งที่ 1100 °C ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียและระยะทางการขัดสีเป็นเส้นตรงในทุกชิ้นงาน อัตราการสึกหรอ (R_w , mg/m) ต่ำสุดพบในชิ้นงานชุบแข็งหรือชิ้นงาน H_{Tmax} ส่วนค่า R_w สูงสุดพบในชิ้นงาน $L-H_{Tmax}$ หรือ $H-H_{Tmax}$ ค่า R_w ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อความแข็งของชิ้นงานเพิ่มขึ้น ค่า R_w ลดลงช้า ๆ จนถึง 7% Cr จากนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ Cr ชิ้นงานที่มีความต้านทานการสึกหรอดีที่สุดคือชิ้นงาน 7%Cr ในสภาพผ่านการชุบแข็งที่ 1100 °C

คำสำคัญ: เหล็กหล่อขาวที่เติมธาตุผสมกึ่งหลายชนิด กรรมวิธีทางความร้อน ความแข็ง ความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสี ผลของโครเมียม

ABSTRACT

In this research, the behavior of hardness and abrasive wear resistance of semi-multi-alloyed white cast iron with different Cr contents was investigated. The cast irons with 5%, 7% and 9 wt% (hereafter wt% is expressed by %) were prepared. The specimens were annealed at 950 °C. The annealed specimens were hardened from 1050 and 1100 °C austenitizing by fan air cooling.

As-hardened specimens were tempered at three level temperatures between 450 and 620 °C: the temperature giving the maximum tempered hardness (H_{Tmax}), the lower and higher temperatures than H_{Tmax} ($L-H_{Tmax}$ and $H-H_{Tmax}$). The abrasive wear resistance was evaluated using Suga abrasion tester. The results showed that the microstructure and hardness of specimens varied depending on Cr content and heat treatment condition. The highest hardness was obtained in the specimen with 7%Cr hardened from 1100 °C. A linear relationship between wear loss and wear distance was obtained in all specimens. The lowest wear rate (R_w , mg/m) was obtained in the as-hardened or H_{Tmax} specimen and the highest value was obtained in the $L-H_{Tmax}$ or $H-H_{Tmax}$ specimen. The R_w decreased progressively as the hardness increased. The R_w decreased slowly as the Cr content rose to 7%Cr and then, increased gradually as the Cr content rose. The highest wear resistance was obtained in the specimen with 7%Cr hardened from 1100 °C.

Keyword: Semi-multi-alloyed white cast iron, heat treatment, hardness, abrasive wear resistance, Cr effect.

1. บทนำ

เหล็กหล่อขาวเติมธาตุผสมหลายชนิด (Multi-alloyed white cast iron) เป็นเหล็กหล่อในกลุ่มเหล็กหล่อทนการสึกหรอแบบขัดสีที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ [1]–[3] ใช้ผลิตเป็นอุปกรณ์บดในอุตสาหกรรมซีเมนต์และลูกรีดในอุตสาหกรรมเหล็กกล้า ส่วนผสมพื้นฐานของเหล็กหล่อขาวเติมธาตุผสมหลายชนิดมีธาตุคาร์บอน (C) ประมาณ 2% โดยน้ำหนัก (จากนี้ไป % โดยน้ำหนัก แทนด้วย %) และธาตุที่สามารถฟอร์คาร์ไบต์ได้แรง เช่น โครเมียม (Cr) วาเนเดียม (V) โมลิบดีนัม (Mo) และทังสเตน (W) อย่างละ 5% [1] โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยคาร์ไบต์หลายชนิดได้แก่ MC M_2C และ M_7C_3 (M คือ อะตอมของธาตุโลหะที่ฟอร์คาร์ไบต์) ซึ่งคาร์ไบต์เหล่านี้มีความแข็งสูงกว่าคาร์ไบต์ในเหล็กกล้ามาก [2] โดยชนิดและปริมาณของคาร์ไบต์จะขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุผสม [1] เนื้อพื้นของเหล็กหล่อชนิดนี้เป็นได้ทั้ง เบไนต์ มาร์เทนไซต์ ออสเทนไนต์ และคาร์ไบต์ลำดับที่สอง เหล็กหล่อชนิดนี้มีสมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอดีกว่าเหล็กโครเมียมสูงและเหล็กหล่อ Ni-hard [1]

ลูกรีดในอุตสาหกรรมเหล็กกล้านิยมผลิตด้วยวิธีหล่อเหวี่ยง [3] โลหะหลอมเหลวจะถูกเหวี่ยงภายในแม่พิมพ์

และเกิดการแข็งตัวในระหว่างที่ถูกเหวี่ยงเนื่องจากเหล็กหล่อขาวเติมธาตุผสมหลายชนิดมีโครงสร้างยูเทคติกหลายประเภทเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการแข็งตัว คาร์ไบต์ยูเทคติกบางชนิดเช่น M_2C หรือ M_6C มีความหนาแน่นสูงกว่าโลหะหลอมเหลวมาก เมื่อเกิดการเหวี่ยงจะทำให้การกระจายตัวของคาร์ไบต์ไม่สม่ำเสมอ [1,3] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องลดธาตุที่ฟอร์คาร์ไบต์ที่มีความหนาแน่นสูงลงจากส่วนผสมพื้นฐาน เหล็กหล่อที่มีการลดธาตุผสมที่ทำให้เกิดคาร์ไบต์ที่มีความหนาแน่นสูงนี้ถูกเรียกว่า “เหล็กหล่อขาวเติมธาตุผสมกึ่งหลายชนิด (Semi-multi-alloyed white cast iron)”[4,5]

โครเมียมเป็นธาตุผสมหลักในเหล็กหล่อ Ni-hard และเหล็กหล่อโครเมียมสูง โดย Cr สามารถฟอร์คาร์ไบต์ยูเทคติกประเภท M_7C_3 ที่ทนการสึกหรอได้ดี [2] เนื่องจากคาร์ไบต์ชนิดนี้มีความแข็งสูง มีขนาดเล็ก และมีความต่อน้อยกว่าคาร์ไบต์ชนิด M_3C ที่พบในเหล็กหล่อขาวทั่วไป นอกจากนี้ Cr ยังสามารถละลายในออสเทนไนต์และเพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง [2] ดังนั้น Cr จึงถูกเลือกให้เป็นธาตุผสมพื้นฐานของเหล็กหล่อขาวที่เติมธาตุผสมหลายชนิด แต่อย่างไรก็ตามปริมาณ Cr ก็ต้องถูกควบคุมไม่ให้มากเกินไป เพื่อให้คาร์ไบต์ชนิดอื่นที่มีความแข็งที่

สูงกว่าสามารถเกิดขึ้นได้ในระหว่างการแข็งตัว [1,6,7]

งานวิจัยของเหล็กหล่อขาวเดิมธาตุผสมหลายชนิดที่มีส่วนผสมพื้นฐานได้มีการศึกษาไปแล้วอย่างเป็นระบบ เช่น กระบวนการแข็งตัว [6,7] กรรมวิธีทางความร้อน [8–11] และความต้านทานการสึกหรอ [11–13] แต่งานวิจัยเกี่ยวกับเหล็กหล่อขาวเดิมธาตุผสมกึ่งหลายชนิดยังมีน้อยมาก [4,5] งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของกรรมวิธีทางความร้อนของเหล็กหล่อขาวเดิมกึ่งธาตุผสมหลายชนิดอย่างเป็นระบบ [4,5] แต่ยังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีของเหล็กหล่อขาวที่เติมธาตุผสมกึ่งหลายชนิด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาพฤติกรรมของความแข็งและความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีของเหล็กหล่อขาวเดิมธาตุผสมกึ่งหลายชนิดที่มีปริมาณ Cr ต่างกันที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนโดยศึกษาในช่วง 5% - 9% Cr เพื่อเป็นแนวทางในการผลิตลูกรีดหรืออุปกรณ์สำหรับงานด้านการสึกหรอแบบขัดสีต่อไป

2. กระบวนการทดลอง

2.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

วัตถุดิบในการเตรียมชิ้นงานทดสอบประกอบด้วย เหล็กดิบ เศษเหล็ก และโลหะผสม ทำการหลอมวัตถุดิบด้วยเตาหลอมไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1580 °C เเทน้ำโลหะที่มีส่วนผสมตามกำหนดลงในแบบหล่อทรายที่มีช่องว่างรูปตัว Y ตามรูปที่ 1 (a) ในช่วงอุณหภูมิ 1500 - 1520 °C ทำการคลุมผิวหน้าไรเซอร์ด้วยผงคายความร้อน (Exothermic powder) เพื่อรักษาอุณหภูมิผิวหน้าของไรเซอร์ ดัดไรเซอร์ออกจากแท่งชิ้นงานหล่อด้วยเครื่อง Wire-cut EDM ให้ได้แท่งชิ้นงานดังรูปที่ 1 (b) และตัดให้มีความหนาชิ้นละ 7 มม ดังรูปที่ 1 (c) เพื่อเป็นชิ้นงานทดสอบ ส่วนผสมทางเคมีและค่าคาร์บอนสมดุล (C_{bal}) ของชิ้นงานทดสอบแสดงดังตารางที่ 1 เนื่องจากชิ้นงานมีการฟอร์มคาร์ไบด์หลายชนิด ทำให้คาร์บอนที่ละลายในเนื้อพื้นลดลง แต่การหาปริมาณคาร์บอนในเนื้อพื้นโดยตรงทำได้ยาก ดังนั้นค่าคาร์บอนสมดุล (C_{bal}) จึงเป็น

ตัวแปรที่ใช้ในการหาปริมาณคาร์บอนที่เหลือในเนื้อพื้นตามทฤษฎี [1,4] โดยมีสมการ คือ

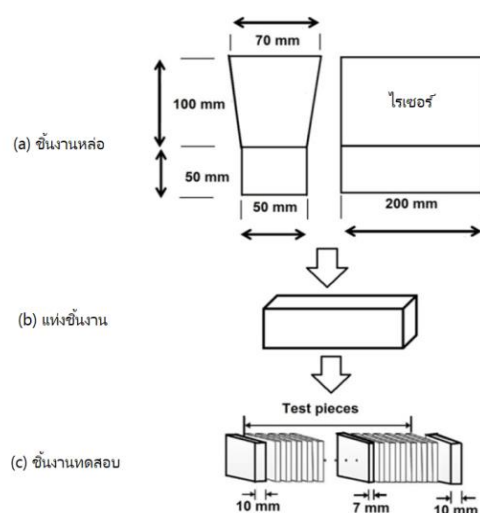
$$\%C_{bal} = \%C - \%C_{stoich} \quad (1)$$

เมื่อ $\%C$ คือ ปริมาณคาร์บอนในเหล็กหล่อ ส่วนค่า $\%C_{stoich}$ คือ ปริมาณคาร์บอนที่ถูกใช้ในการฟอร์มคาร์ไบด์ตามทฤษฎี ในกรณีที่เหล็กหล้อมีคาร์ไบด์ชนิด MC และ M_2C จะสามารถคำนวณค่า $\%C_{stoich}$ จากสมการต่อไปนี้

$$\%C_{stoich} = (0.060 \times \%Cr) + (0.063 \times \%Mo) + (0.033 \times \%W) + (0.235 \times \%V) \quad (2)$$

ส่วนกรณีที่เหล็กหล้อมีคาร์ไบด์ชนิด MC M_2C และ M_7C_3 จะคำนวณจากสมการ คือ

$$\%C_{stoich} = (0.099 \times \%Cr) + (0.063 \times \%Mo) + (0.033 \times \%W) + (0.235 \times \%V) \quad (3)$$



รูปที่ 1 รูปวาดแสดงขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ตารางที่ 1 ส่วนผสมเคมีและค่าคาร์บอนสมดุล (C_{bal}) ของชิ้นงานทดสอบ

ชิ้นงาน	ธาตุผสม (wt%)					C_{bal}
	C	Cr	Mo	W	V	
1	2.05	4.97	2.02	1.02	4.97	+0.42
2	2.01	6.91	1.96	1.00	5.03	-0.01
3	2.02	9.02	2.02	1.00	4.98	-0.20

Si = 0.49 - 0.56%, Mn = 0.42 - 0.53%, S & P < 0.01%

ค่า C_{bal} เป็นเพียงค่าตามทฤษฎีเท่านั้นใช้สำหรับการอธิบายการแปลงเฟสของเนื้อพื้นในระหว่างการทำกรรมวิธีทางความร้อน ในทางปฏิบัติแม้ว่าจะมีค่าเป็นศูนย์หรือลบก็ยังคงมีคาร์บอนละลายในเนื้อพื้นส่วนหนึ่งเนื่องจากการแปลงเฟสเร็วกว่าตามทฤษฎีมาก โดยค่า C_{bal} ของชิ้นงานหมายเลข 1 หาจกสมการที่ (1) และ (2) ส่วนชิ้นงานที่ 2 และ 3 หาจกสมการที่ (1) และ (3)

2.2 กรรมวิธีทางความร้อน

ชิ้นงานในสภาพหล่อถูกอบอ่อนที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง และเย็นตัวในเตา จากนั้นชุบแข็งชิ้นงานโดยอบที่อุณหภูมิ 1050 และ 1100 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและเย็นตัวด้วยพัลคม ชิ้นงานชุบแข็ง (As-hardened) ถูกอบคืนตัวที่อุณหภูมิสามระดับดังแสดงในตารางที่ 2 โดยอ้างอิงจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ [4] ซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิที่ให้ความแข็งแรงสูงสุดในการอบคืนตัว (H_{Tmax}) อุณหภูมิก่อนและหลังอุณหภูมิที่ให้ความแข็งแรงสูงสุด (L- H_{Tmax} และ H- H_{Tmax}) ตามลำดับ ใช้เวลาในการอบคืนตัว 3 ชั่วโมง 20 นาที และเย็นตัวในอากาศ

ตารางที่ 2 อุณหภูมิอบคืนตัวของชิ้นงานทดสอบ

ชิ้นงาน	ชุบแข็งที่ 1050 °C			ชุบแข็งที่ 1100 °C		
	L- H_{Tmax}	H_{Tmax}	H- H_{Tmax}	L- H_{Tmax}	H_{Tmax}	H- H_{Tmax}
1	450	500	550	450	550	590
2	450	500	550	450	550	590
3	450	525	600	450	550	620

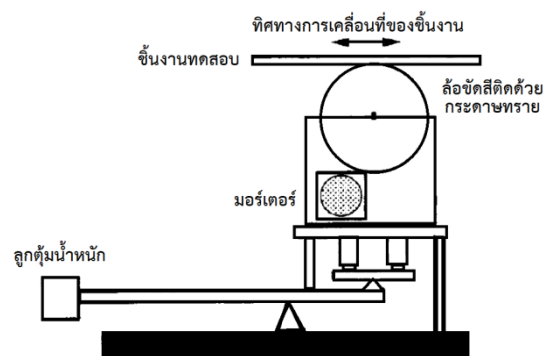
2.3 การทดสอบความแข็งและโครงสร้างจุลภาค

ผิวชิ้นงานถูกเตรียมโดยการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายและขัดละเอียดโดยใช้ผงอะลูมินาบนผ้าสักหลาด ทำการวัดความแข็งแบบมาโคร (Macro-hardness) โดยใช้เครื่อง Vickers hardness tester ด้วยน้ำหนักกดในการทดสอบ 30 กิโลกรัม และวัดความแข็งแบบไมโคร (Micro-hardness) ของเนื้อพื้น โดยใช้เครื่อง Micro-Vickers hardness tester ด้วยน้ำหนักกดทดสอบ 100 กรัม ทำการวัดแบบสุ่มจำนวน 5 จุด และหาค่าเฉลี่ย

กัดผิวหน้าของชิ้นงานด้วยน้ำยา Murakami เพื่อวิเคราะห์ชนิดของคาร์ไบด์ยูเทคติก และกัดด้วยน้ำยา Villella เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างเนื้อพื้น ทำการทดสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

2.4 การทดสอบการสึกหรอแบบขัดสี

ชิ้นงานถูกเตรียมผิวด้วยการขัดละเอียดให้มีความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) น้อยกว่า 1 μm เพื่อป้องกันผลของความหยาบผิวต่อการสึกหรอเริ่มต้น ทดสอบการสึกหรอแบบขัดสีด้วยเครื่องซูกะ (Suga abrasion test) ตามมาตรฐาน ASTM D6037 [14] ดังรูปที่ 2 วัสดุขัดสีเป็นกระดาษทราย (SiC) ขนาดเม็ดผงเบอร์ 180 ติดรอบล้อขัดสีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 44 มม หนา 12 มม ชิ้นงานเคลื่อนที่ไปและกลับภายใต้ น้ำหนักกดทดสอบการขัดสี 1 กิโลกรัม ล้อขัดสีจะหมุนอัตโนมัติเป็นมุม 0.9 องศา ในแต่ละสโตรก เพื่อให้ผิวชิ้นงานสัมผัสกับผงขัดสีใหม่ตลอดการทดสอบ ทำการทดสอบเป็นระยะทาง 24 เมตรต่อรอบ เมื่อครบแต่ละรอบการทดสอบจะล้างชิ้นงานด้วยเครื่อง Ultrasonic โดยใช้ Acetone ทำการวัดน้ำหนักที่สูญเสียด้วยเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ความละเอียดสูง (เทคนิค 4 ตำแหน่ง) ทำการทดสอบซ้ำรอยเดิม 8 รอบต่อชิ้นงาน ทดสอบชิ้นงานละสองรอยขัดสีและหาค่าเฉลี่ยน้ำหนักที่สูญเสียในแต่ละรอบ



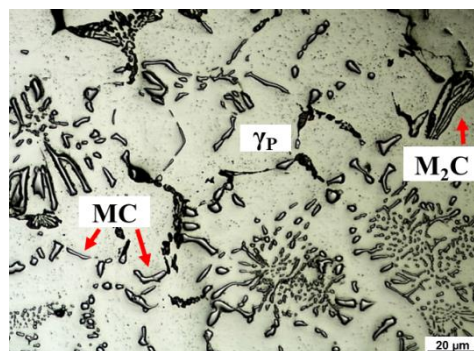
รูปที่ 2 เครื่องทดสอบการสึกหรอซูกะ

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

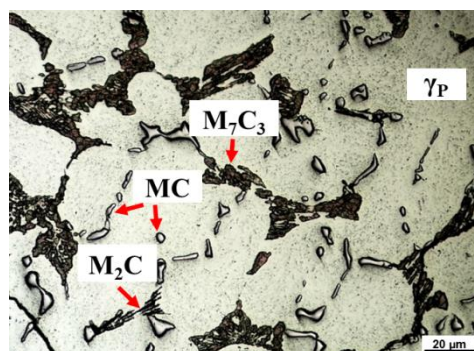
3.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบ

ตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคโดยรวมของชิ้นงานทดสอบ แสดงดังรูปที่ 3 (ก) สำหรับชิ้นงาน 5%Cr และ (ข) สำหรับชิ้นงาน 7%Cr ผ่านการชุบแข็งที่ 1100 °C โดยใช้ น้ำยา Murakami พบว่าโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วย เดนไดรต์ของออสเทนไนต์ปฐมภูมิ (γ_P) และโครงสร้าง ยูเทกติก (γ +คาร์ไบด์) Wu และคณะ [6] ได้รายงานว่ ชนิดของคาร์ไบด์ยูเทกติกในเหล็กหล่อขาวเดิมธาตุผสม หลายชนิดสามารถแยกแยะได้ด้วยกล้อง OM โดยใช้ น้ำยา Murakami ซึ่งคาร์ไบด์ชนิด MC จะมีลักษณะเป็นก้อน สีขาวหรือเทา คาร์ไบด์ชนิด M_2C จะมีลักษณะเป็นเส้น ขนาน (lamellar) สีดำ ส่วนคาร์ไบด์ชนิด M_7C_3 จะมี ลักษณะเป็นกลุ่มก้อนหรือตาข่ายแบบ ledeburite สีดำ หรือน้ำตาล ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าคาร์ไบด์ยูเทกติก ในรูปที่ 3 ประกอบด้วยชนิด MC และ M_2C ในชิ้นงาน 5%Cr และชนิด MC M_2C และ M_7C_3 ในชิ้นงาน 7%Cr ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอ้างอิง [4,5] Jatupon และคณะ [9] ได้รายงานว่าการเพิ่มปริมาณ Cr มากกว่า 5% ใน เหล็กหล่อขาวเดิมธาตุผสมหลายชนิดที่มีส่วนผสมพื้นฐาน จะลดการเกิดคาร์ไบด์ชนิด M_2C เนื่องจาก Cr ส่งเสริมเกิด คาร์ไบด์ยูเทกติกชนิด M_7C_3 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเป็นไป ได้ว่าปริมาณของคาร์ไบด์ชนิด M_7C_3 เพิ่มขึ้นแต่ปริมาณ คาร์ไบด์ชนิด M_2C ลดลงเมื่อปริมาณ Cr เพิ่มขึ้น

ตัวอย่างโครงสร้างเนื้อพื้นในสภาพชุบแข็งของชิ้นงาน 5% และ 7% Cr ด้วยกล้อง SEM แสดงดังรูปที่ 4 (ก) และ (ข) ตามลำดับ พบว่าเนื้อพื้นประกอบด้วย มาร์เทนไซต์ (M) และคาร์ไบด์ลำดับที่สอง(SC) และ ออสเทนไนต์เหลือค้าง (γ_R) บางส่วน การตกตะกอนของ คาร์ไบด์ลำดับที่สองเกิดขึ้นในระหว่างการแช่ชิ้นงานไว้ใน อุณหภูมิชุบแข็งคาร์ไบด์ลำดับที่สองจะลดธาตุผสมใน ออสเทนไนต์ลง ทำให้ออสเทนไนต์ขาดเสถียรภาพ และ เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ได้ในระหว่างการเย็นตัว ชิ้นงานที่ มี Cr สูงจะมีออสเทนไนต์เหลือค้างหลังการชุบแข็งน้อยกว่า ชิ้นงานที่มี Cr ต่ำกว่า

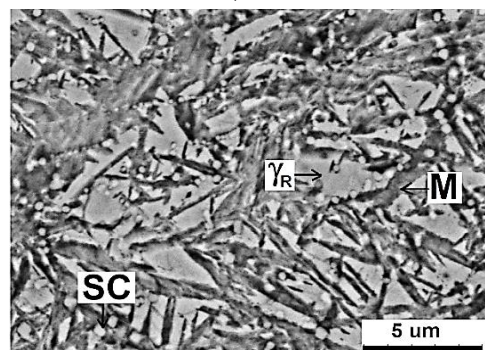


(ก) No.1 (5%Cr)

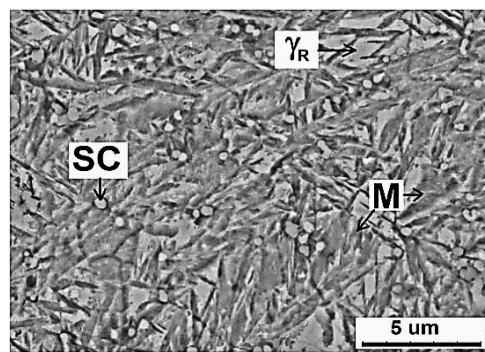


(ข) No. 2 (7%Cr)

รูปที่ 3 โครงสร้างจุลภาคโดยรวมของชิ้นงาน 5% และ 7%Cr ในสภาพชุบแข็งที่ 1100 °C



(ก) No.1 (5%Cr)



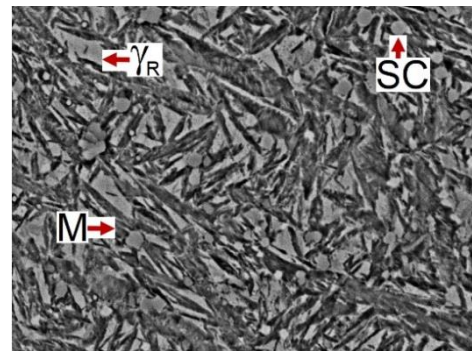
(ข) No. 2 (7%Cr)

รูปที่ 4 โครงสร้างเนื้อพื้นของชิ้นงาน 5% และ 7%Cr ในสภาพชุบแข็งที่ 1100 °C

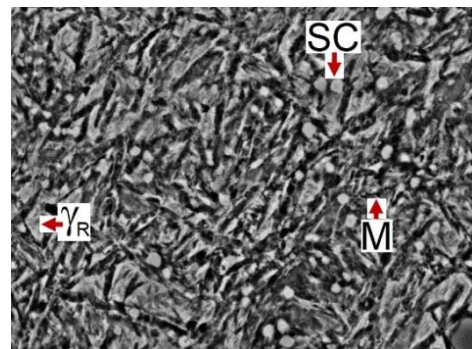
โครงสร้างเนื้อพื้นในสภาพอบคืนตัวของชิ้นงาน 5%Cr ผ่านการชุบแข็งที่ 1050 °C แสดงดังรูปที่ 5 พบว่า โครงสร้างเนื้อพื้นของชิ้นงาน L-H-T_{max} ประกอบด้วย คาร์ไบด์ลำดับที่สองขนาดเล็ก (SC) มาร์เทนไซต์ (M) และมีปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้าง (γ_R) จำนวนมาก ซึ่งเกิดจากการใช้อุณหภูมิต่ำในการอบคืนตัว ทำให้ลดเสถียรภาพของออสเทนไนต์เหลือค้างจากการชุบแข็งได้เพียงเล็กน้อย ในชิ้นงาน H-T_{max} พบว่ามีคาร์ตกตะกอนของคาร์ไบด์ลำดับที่สองจำนวนมากและเนื้อพื้นส่วนใหญ่เป็นมาร์เทนไซต์ โดยมีออสเทนไนต์เหลือค้างเพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิอบคืนตัวนี้สามารถลดเสถียรภาพของออสเทนไนต์เหลือค้างได้อย่างมาก ส่วนชิ้นงาน H-H-T_{max} พบว่ามีคาร์ไบด์ลำดับที่สองขนาดใหญ่จำนวนมากและเนื้อพื้นส่วนใหญ่คาดว่าเป็นเพอร์ไลต์ (P) หรือเฟอร์ไรต์ (α) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอ้างอิง [4] จากการเกิด Over-tempering เนื่องจากใช้อุณหภูมิในการอบคืนตัวสูงเกินไป

3.2 ความแข็งของชิ้นงานทดสอบ

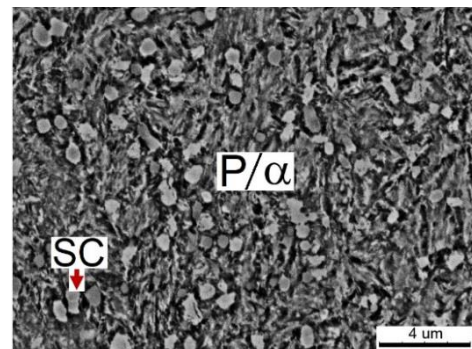
ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Cr และความแข็งแบบมาโครของชิ้นงานทดสอบแสดงดังรูปที่ 6 ความแข็งในสภาพชุบแข็ง (As-hardened) เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ Cr เพิ่มขึ้น 7% จากนั้นจะลดลงในทั้งสองอุณหภูมิชุบแข็ง ความแข็งที่เพิ่มขึ้นในช่วงแรกเกิดจากการที่มีปริมาณของมาร์เทนไซต์เพิ่มขึ้นและมีออสเทนไนต์เหลือค่าน้อยลง เนื่องจากการเพิ่ม Cr ทำให้มีการตกตะกอนของคาร์ไบด์ลำดับที่สองในเนื้อพื้นเพิ่มขึ้น ทำให้เสถียรภาพของออสเทนไนต์เหลือค้างลดลงและเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ได้มากขึ้น ส่วนความแข็งลดลงในช่วงหลังเกิดจากการที่มีโครเมียมสูงเกินไปทำให้เกิดคาร์ไบด์ชนิด M_7C_3 จำนวนมาก ทำให้เหล็คาร์บอนในเนื้อพื้นน้อยลง ส่งผลให้มาร์เทนไซต์ที่เกิดขึ้นหลังการชุบแข็งมีความแข็งต่ำเพราะมีคาร์บอนน้อย นอกจากนี้คาร์ไบด์ประเภท M_7C_3 ที่เพิ่มขึ้นนี้มีความแข็งต่ำกว่าคาร์ไบด์ทุกชนิดอื่น จึงเป็นอีกหนึ่งเหตุผลที่ทำให้ความแข็งลดลง ความแข็งในสภาพอบคืนตัวแสดงพฤติกรรมเดียวกันกับในสภาพชุบแข็ง ความแข็งในสภาพอบคืนตัวสูงสุดได้รับในชิ้นงาน



(ก) L-H-T_{max}



(ข) H-T_{max}

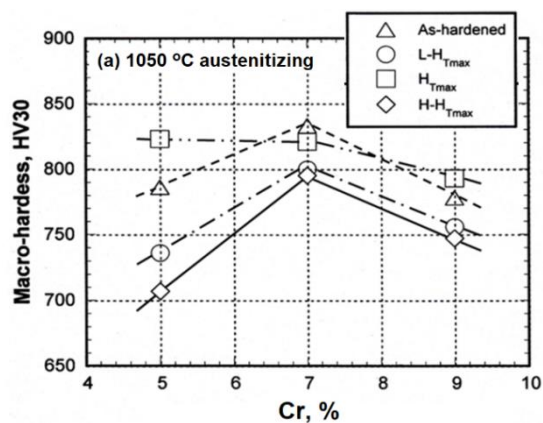


(ค) H-H-T_{max}

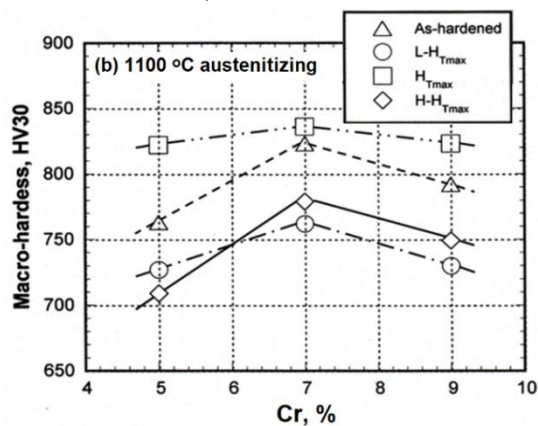
รูปที่ 5 โครงสร้างเนื้อพื้นของชิ้นงาน 5%Cr ชุบแข็งที่ 1050 °C ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่างกัน

H-T_{max} ส่วนความแข็งต่ำสุดในการทดลองนี้ได้รับที่ชิ้นงาน L-H-T_{max} หรือ H-H-T_{max} ซึ่งสอดคล้องกับการแปลงเฟสในรูปที่ 5 ความแข็งของชิ้นงาน H-T_{max} ส่วนใหญ่จะสูงกว่าสภาพชุบแข็ง เนื่องจากการแข็งขึ้นลำดับที่สอง (Secondary hardening) จากการตกตะกอนของคาร์ไบด์ลำดับที่สองและการแปลงเฟสของออสเทนไนต์เหลือค้างเป็นมาร์เทนไซต์ นอกจากนี้ยังพบว่าการชุบแข็งที่อุณหภูมิสูงจะให้ความแข็งสูงกว่าชิ้นงานชุบแข็งที่อุณหภูมิต่ำ

ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 เดือน พฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2563



(ก) ชุบแข็งที่ 1050 °C



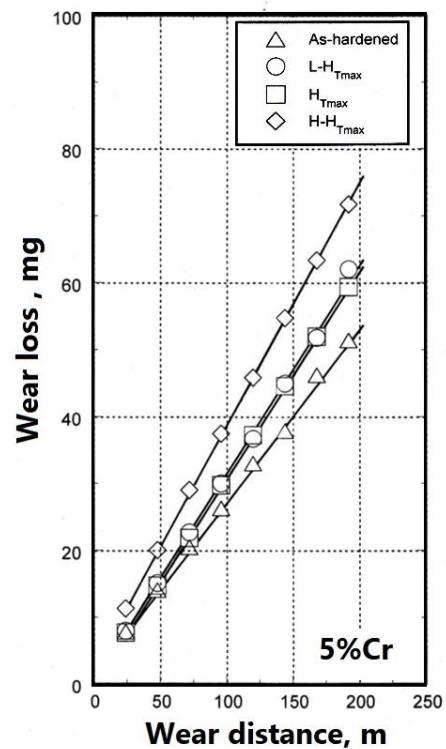
(ข) ชุบแข็งที่ 1100 °C

รูปที่ 6 ผลของโครเมียมต่อความแข็งแบบมาโคร
ของชิ้นงานทดสอบ

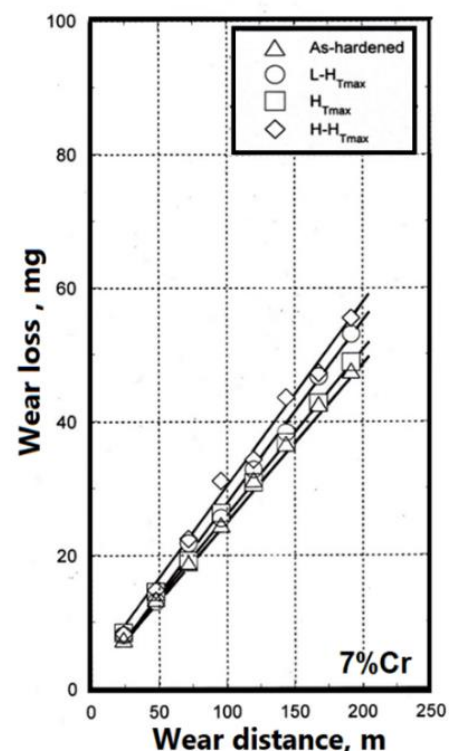
เล็กน้อย ซึ่งเกิดจากการใช้อุณหภูมิชุบแข็งสูงจะทำให้มีธาตุผสมละลายในเนื้อพื้นมากขึ้น ทำให้มาร์เทนไซต์มีธาตุผสมสูงขึ้นและเกิดปฏิกิริยาคาร์ไบด์ (Carbide reaction) เป็นคาร์ไบด์ชนิดพิเศษ เช่น MC และ M₂C ที่มีความแข็งสูงในระหว่างการอบคืนตัว [4,5,7-11] นอกจากนี้การที่มีออกซิเจนที่เหลือค้างมากหลังการชุบจะส่งเสริมการแข็งขึ้นลำดับที่สองในขั้นตอนการอบคืนตัว [4,5]

3.3 พฤติกรรมการสึกหรอแบบขัดสี

ชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมผิวได้ถูกทดสอบการสึกหรอเพื่อประเมินความต้านทานการสึกหรอ ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสีย (Wear loss) และระยะทางในการขัดสี (Wear distance) ของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 7 สำหรับชิ้นงานที่ 5% และ 7% Cr พบว่าความ



(ก) ชิ้นงาน 5% Cr

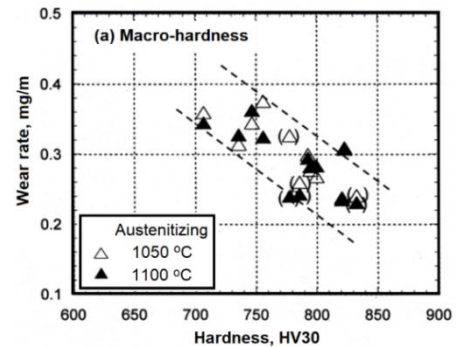


(ข) ชิ้นงาน 7% Cr

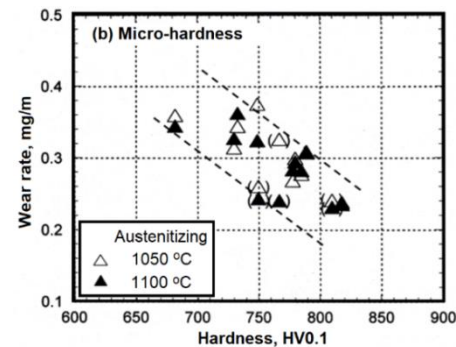
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสีย (W_l) และระยะทางการขัดสี (W_d) ของชิ้นงาน 5% และ 7% Cr ในสภาพชุบแข็งที่ 1050 °C และอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่างกัน

สัมพันธ์เป็นเส้นตรงในทุกชิ้นงานโดยไม่ขึ้นกับกรรมวิธีทางความร้อน ซึ่งแนวโน้มของกราฟนี้สอดคล้องกับงานวิจัยอ้างอิงอื่น [11–13] โดยชิ้นงานที่มีน้ำหนักสูญเสียมากที่สุดคือ ชิ้นงาน L-H_{Tmax} หรือ H-H_{Tmax} ส่วนชิ้นงานที่มีน้ำหนักสูญเสียน้อยที่สุดคือ ชิ้นงานในสภาพชุบแข็ง หรือ ชิ้นงาน H_{Tmax} อย่างไรก็ตามน้ำหนักสูญเสียรวมยังไม่เหมาะสมที่จะนำมาเปรียบเทียบความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีเนื่องจากการสึกหรอเริ่มต้นของชิ้นงาน เกี่ยวข้องกับการเตรียมผิวก่อนการทดสอบ ดังนั้นตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการประเมินความต้านทานการสึกหรอคืออัตราการสึกหรอของชิ้นงานตลอดการทดสอบ เนื่องจากกราฟความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงในทุกชิ้นงาน ดังนั้นอัตราการสึกหรอ (Rw, mg/m) จึงหาได้จากความชันกราฟความสัมพันธ์ของแต่ละชิ้นงาน

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแบบมาโครและไมโครต่อค่า Rw ของชิ้นงาน พบว่าค่า Rw มีแนวโน้มลดลงเมื่อความแข็งของชิ้นงานเพิ่มขึ้น โดยความแข็งแบบไมโครแสดงพฤติกรรมคล้ายกับความแข็งแบบมาโคร ซึ่งยืนยันว่าความแข็งของเนื้อพื้นมีผลต่อพฤติกรรมการสึกหรอเช่นเดียวกับความแข็งโดยรวมของชิ้นงาน ชิ้นงานที่มีความแข็งต่ำ คือชิ้นงาน H-H_{Tmax} ซึ่งเนื้อพื้นส่วนใหญ่เกิด Over-tempering ส่วนชิ้นงานที่มีความแข็งสูงคือชิ้นงานในสภาพชุบแข็งหรือ H_{Tmax} ซึ่งเนื้อพื้นประกอบด้วยมาร์เทนไซต์ คาร์ไบด์ลำดับที่สอง และออสเทนไนต์ เหลือค้ำ จากผลการทดลองนี้จึงสามารถกล่าวได้ว่า เหล็กหล่อที่มีความแข็งสูงจะสามารถต้านทานการสึกหรอได้ดีเนื่องจากเนื้อพื้นของเหล็กหล่อที่มีความแข็งสูงจะช่วยให้คาร์ไบด์ยูเทคติกไม่หลุดเมื่อได้รับการขัดสีนอกจากนี้ยังพบว่าชิ้นงานที่มีความแข็งเท่ากันไม่จำเป็นต้องมีความต้านทานการสึกหรอได้เท่ากันเพราะความต้านทานการสึกหรอไม่ได้ขึ้นกับความแข็งเพียงอย่างเดียวแต่จะขึ้นกับตัวแปรอื่น เช่น ชนิดและปริมาณของคาร์ไบด์หรือปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้ำซึ่งสามารถเกิด Work-hardening ได้ในขณะที่ได้รับการขัดสี เป็นต้น



(ก) ความแข็งแบบมาโคร

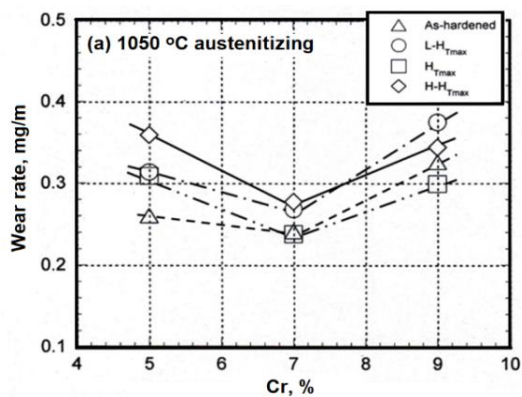


(ข) ความแข็งแบบไมโคร

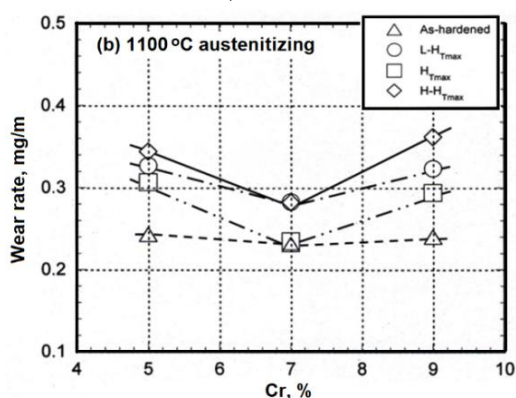
รูปที่ 8 ผลของความแข็งแบบมาโครและแบบไมโคร
ต่ออัตราการสึกหรอ (Rw) ของชิ้นงาน

ผลของปริมาณ Cr ต่อค่า Rw ของชิ้นงานแสดงรูปที่ 9 โดยพบว่าค่า Rw ลดลงช่วงแรกและกลับมาเพิ่มขึ้นอีกเมื่อปริมาณ Cr เพิ่มขึ้นในทั้งสองอุณหภูมิชุบแข็ง โดยค่า Rw ต่ำสุดได้รับที่ 7%Cr ค่า Rw ลดลงในช่วงแรกเกิดจากการที่เหล็กหล่อมีความแข็งเพิ่มขึ้นจากการที่มีมาร์เทนไซต์มากขึ้นและมีออสเทนไนต์เหลือค้ำลดลงนอกจากนี้ยังได้ว่าการที่มีมาร์เทนไซต์จากการชุบแข็งมากขึ้นเมื่ออบคืนตัวจะเกิดปฏิกิริยาคาร์ไบด์กล่าวคือ จะทำให้คาร์บอนในมาร์เทนไซต์รวมกับธาตุที่ฟอร์เมอร์คาร์ไบด์ได้แรงเช่น Mo W หรือ V เกิดเป็นคาร์ไบด์ชนิดพิเศษ VC Mo₂C และ W₂C ที่มีความแข็งสูง [4,5,7–11] ซึ่งคาร์ไบด์เหล่านี้จะส่งเสริมการแข็งขึ้นลำดับที่สองในระหว่างรอบอบคืนตัว ทำให้เนื้อพื้นมีความแข็งสูง การที่ค่า Rw กลับมาเพิ่มขึ้นในช่วงที่ Cr มากกว่า 7% เกิดจากมี Cr มากเกินไป ทำให้เกิดคาร์ไบด์ชนิด M₇C₃ ที่มีความแข็งต่ำปริมาณมากขึ้น ดังนั้นจึงเหลือคาร์บอนในเนื้อพื้นน้อยลง ส่งผลให้มาร์เทนไซต์ที่เกิดขึ้นมีความแข็งต่ำ นอกจากนี้การที่มี Cr สูงจะส่งเสริมการ

ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 เดือน พฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2563



(ก) ชุบแข็งที่ 1050 °C



(ข) ชุบแข็งที่ 1100 °C

รูปที่ 9 ผลของโครเมียม (Cr) ต่ออัตราการสึกหรอ (Rw) ของชิ้นงาน

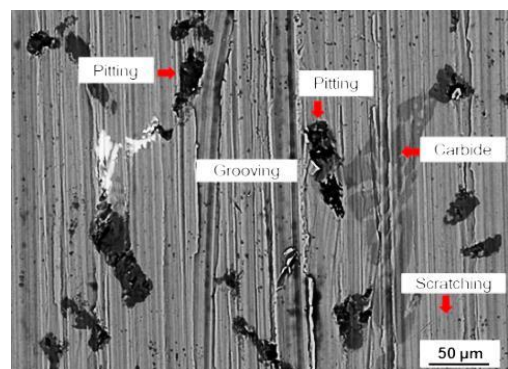
ตกตะกอนของคาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$ [2,6,9] ที่มีความแข็งต่ำกว่าคาร์ไบด์ลำดับที่สองชนิดอื่น ๆ จึงเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ทำให้ความแข็งแรงของเนื้อพื้นต่ำ เมื่อได้รับการขัดสีจึงเกิดการสึกหรอได้ง่าย

เมื่อพิจารณาถึงผลของสภาวะของการทำกรรมวิธีทางความร้อน พบว่าการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1100 °C จะมีค่า Rw ต่ำกว่าการชุบแข็งที่ 1050 °C เล็กน้อย เกิดจากการเพิ่มอุณหภูมิชุบแข็งจะช่วยส่งเสริมการแข็งขึ้นลำดับที่สองในระหว่างการอบคืนตัวดังที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ เมื่อพิจารณาในแต่ละอุณหภูมิชุบแข็งพบว่าค่า Rw ต่ำสุดในชิ้นงานชุบแข็งที่ 1050 °C ได้รับในชิ้นงาน H_{Tmax} ที่เติม 7%Cr ซึ่งใกล้เคียงกับสภาพชุบแข็ง โดยชิ้นงานที่มีค่า Rw สูงสุดคือ ชิ้นงาน $L-H_{Tmax}$ ที่ 9%Cr ส่วนกรณีของการชุบแข็งที่ 1100 °C พบว่าชิ้นงานที่มีค่า Rw ต่ำสุดคือชิ้นงานในสภาพชุบแข็งที่เติม 7%Cr และมีค่าใกล้เคียงกับ

ชิ้นงาน H_{Tmax} ส่วนชิ้นงานที่มีค่า Rw สูงสุดคือ ชิ้นงาน $H-H_{Tmax}$ ที่เติม 9%Cr ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของเฟสในเนื้อพื้น ทำให้ความแข็งแรงเนื้อพื้นในแต่ละชิ้นงานแตกต่างกันดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 8 (ข)

จากผลการทดลองนี้แม้ว่าในสภาพชุบแข็งจะมีความต้านทานการสึกหรอดีที่สุด แต่ในทางปฏิบัติไม่นิยมนำไปใช้งานเพราะมีความเค้นตกค้างสูง และมีออสเทนไดต์เหลือค้างจำนวนมาก เมื่อนำไปขัดสีจะส่งเสริมการสึกหรอแบบหลุดร่วน (Spalling wear) [2] ดังนั้นการใช้งานในสภาพอบคืนตัวจึงมีความเหมาะสม โดยชิ้นงาน H_{Tmax} ที่ 7%Cr จะมีความเหมาะสมมากที่สุด

ตัวอย่างภาพถ่ายผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอดังตัวอย่างในรูปที่ 10 พบว่าพื้นผิวแสดงรอยขีดสีเป็นแนวอย่างชัดเจน ผงขัดสี (SiC) มีความแข็งแรงสูงจะตัดผ่านทั้งคาร์ไบด์ยูเทคติกและเนื้อพื้น โดยรอยขีดสีจะหยาบและมีร่องขนาดใหญ่ (Grooving) ในบริเวณเนื้อพื้น แต่จะเป็นรอยเรียบ (Scratching) ในบริเวณของโครงสร้างยูเทคติกและบริเวณโดยรอบ จากการร่อนการสึกหรอนี้จึงสามารถกล่าวได้ว่าบริเวณเนื้อพื้นมีการสึกหรอมากกว่าบริเวณของคาร์ไบด์ยูเทคติก เนื่องจากคาร์ไบด์ในโครงสร้างยูเทคติกมีความแข็งแรงสูงกว่าเนื้อพื้นมาก คาร์ไบด์ยูเทคติกจะช่วยป้องกันเนื้อพื้นจากการสึกหรอ นอกจากนี้ยังพบการสึกหรอแบบหลุม (Pitting) ในบริเวณของโครงสร้างยูเทคติก ซึ่งเกิดจากการหลุดของคาร์ไบด์ที่แตกหักจากการขัดสี



รูปที่ 10 ภาพถ่ายพื้นผิวที่ผ่านการขัดสีของชิ้นงาน 5%Cr ในสภาพชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1050 °C

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมของความแข็งแรงและการสึกหรอแบบขัดสีของเหล็กหล่อขาวเติมธาตุผสมกึ่งหลายชนิด ที่เติม 5% 7% และ 9%Cr ได้ทำการอบอ่อนชิ้นงานที่ 950 °C และเย็นตัวในเตา ชุบแข็งชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1050 และ 1100 °C ด้วยพัลลัม ทำการอบคืนตัวชิ้นงานชุบแข็งที่อุณหภูมิสามระดับในช่วง 450 ถึง 620 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ให้ความแข็งแรงสูงสุดในการอบคืนตัว (H_{Tmax}) อุณหภูมิต่ำกว่าและสูงกว่าอุณหภูมิ H_{Tmax} ($L-H_{Tmax}$ และ $H-H_{Tmax}$) ทำการทดสอบโครงสร้างจุลภาคความแข็งแรงและความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสี จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. โครงสร้างจุลภาคโดยรวมของชิ้นงานเป็นไฮโปยูเทคติกในทุกส่วนผสม ประกอบด้วยเดนไดรต์ของออสเทนไนต์ปฐมภูมิและโครงสร้างยูเทคติก ($\gamma + \text{คาร์ไบด์}$) โดยพบโครงสร้างยูเทคติกชนิด ($\gamma + MC$) และ ($\gamma + M_2C$) ในทุกชิ้นงาน ส่วนโครงสร้างยูเทคติกชนิด ($\gamma + M_7C_3$) จะพบในชิ้นงานที่เติม 7% และ 9%Cr
2. เนื้อพื้นในสภาพชุบแข็งของทุกชิ้นงานประกอบด้วยมาร์เทนไซต์ คาร์ไบด์ลำดับที่สองและออสเทนไนต์เหลือค้างบางส่วน โดยปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้างลดลงเมื่อปริมาณ Cr เพิ่มขึ้น แต่จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิชุบแข็ง การอบคืนตัวจะทำให้ชิ้นงานมีปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้างลดลงและมีปริมาณคาร์ไบด์ลำดับที่สองและมาร์เทนไซต์ในเนื้อพื้นเพิ่มมากขึ้น
3. ความแข็งแรงของชิ้นงานในสภาพชุบแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม Cr เป็น 7% จากนั้นจะลดลง โดยความแข็งแรงในสภาพอบคืนตัวแสดงพฤติกรรมคล้ายกันกับสภาพชุบแข็ง ความแข็งแรงในสภาพอบคืนตัวที่ H_{Tmax} ส่วนใหญ่จะสูงกว่าสภาพชุบแข็ง การเพิ่มอุณหภูมิชุบแข็งจะทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานในสภาพอบคืนตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

4. ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียและระยะทางการขัดสีเป็นเส้นตรงในทุกชิ้นงาน โดยอัตราการสึกหรอ (R_w , mg/m) ต่ำสุด ได้รับในชิ้นงานชุบแข็งหรือ H_{Tmax} ส่วนค่า R_w สูงสุดได้รับในชิ้นงาน $L-H_{Tmax}$ หรือ $H-H_{Tmax}$
5. ค่า R_w ลดลงเมื่อความแข็งแรงของชิ้นงานเพิ่มขึ้น โดยชิ้นงานชุบแข็งที่ 1100 °C มีค่า R_w ต่ำกว่าชิ้นงานชุบแข็งที่ 1050 °C เล็กน้อย
6. ค่า R_w ลดลงช้า ๆ จนถึง 7%Cr จากนั้นจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Cr ที่เพิ่มขึ้น ชิ้นงานที่มีความต้านทานการสึกหรอดีที่สุดคือชิ้นงาน 7%Cr ในสภาพชุบแข็งที่ 1100 °C

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนในวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประจำปีงบประมาณ 2563 ทางผู้วิจัยขอขอบพระคุณ Prof. Yasuhiro Matsubara และ Prof. Kaoru Yamamoto แห่ง National Institute of Technology-Kurume College ประเทศญี่ปุ่น สำหรับชิ้นงานทดสอบทุนวิจัย และความช่วยเหลือในการวิเคราะห์ผลการทดลอง และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยมหาสารคาม สำหรับอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Matsubara, N. Sasaguri, M. Hashimoto, Y. Honda, and H. Wu, "A new material for rolling mill rolls multi component white cast iron.," *Proc. Int. Symp. Tribol. Beijing China*, 1993, pp. 501–510.
- [2] G. Laird, R. Gundlach, and K. Rohrig, *Abrasion-Resistance Cast Iron Handbook*. American Foundry Society, 2000.
- [3] M. Hashimoto, "Development of multi-

- component cast iron roll and rolling technology in steel rolling,” *Proc. Int. Conf. ABRASION WEAR RESISTANT ALLOYED WHITE CAST IRONS ROLL AND PULVERIZING MILLS, Univ. OF TRENTO*, 2008, pp. 1–23.
- [4] S. Inthidech, and Y. Matsubara, “Effects of Carbon Balance and Heat Treatment on Hardness and Volume Fraction of Retained Austenite of Semi-multi-alloyed White Cast Iron,” *Inter J. Met.*, vol. 14, pp. 132–143, 2020.
- [5] S. Inthidech, K. Yamamoto, and Y. Matsubara, “Effect of Tungsten Equivalent on Heat Treatment Behavior of Semi-multi-alloyed White Cast Iron for Abrasive Wear Resistance,” *Int. J. Met.*, 2020. (to be published)
- [6] Wu. HQ, N. Sasaguri, M. Hashimoto, and Y. Matsubara, “Solidification of Multi – Alloyed White Cast Iron: Type Morphology Carbides”, *AFS Trans.*, vol. 140, pp. 103–108, 1996.
- [7] M. Hashimoto, O. Kubo, and Y. Matsubara, “Analysis of carbides in multi-component white cast iron for hot rolling mill rolls,” *ISIJ Int.*, vol. 44, no. 2, pp. 372–380, 2004.
- [8] Y. Matsubara, Y. Yokomizo, N. Sasaguri, and M. Hashimoto, “Effect of Carbon Content and Heat-treating Condition on Retained Austenite and Hardness of Multi-component White Cast Iron,” *J. Japan Foundry Eng. Soc.*, vol. 72, no. 7, pp. 471–477, 2000.
- [9] J. Opapaiboon, M. Supradist Na Ayudhaya, P. Sricharoenchai, S. Inthidech, and Y. Matsubara, “Effect of Chromium Content on Heat Treatment Behavior of Multi-Alloyed White Cast Iron for Abrasive Wear Resistance,” *Mater. Trans.*, vol. 60, no. 2, pp. 346–354, 2017.
- [10] W. Khanitnantharak, M. Hashimoto, K. Shimizu, K. Yamamoto, N. Sasaguri, and Y. Matsubara, “Effects of Carbon and Heat Treatment on the Hardness and Austenite Content of a Multi-Component White Cast Iron,” *AFS Trans.*, vol. 117, pp. 435–444, 2009.
- [11] W. Chang, Y. Pan, N. Sasaguri, and Y. Matsubara, “Effect of C and W content and heat treatment condition on microstructure and wear resistance of multi-component white cast iron,” *Proc. Int. Conf. ABRASION WEAR RESISTANT ALLOYED WHITE CAST IRONS ROLL AND PULVERIZING MILLS, Univ. OF TRENTO*, 2008, pp. 35–48.
- [12] M. Yasuhiro, S. Nobuya, S. Kazumichi, Sung and Y. Kon, “Solidification and abrasion wear of white cast irons alloyed with 20% carbide forming elements,” *Wear*, vol. 250, no. 1–12, pp. 502–510, 2001.
- [13] H. Mitsuo, N. Yasuyuki, S. Nobuya, and M. Yasuhiro, “Influence of Carbon and Vanadium on Mechanical and Hot Wear Properties of Multi-component White Cast Irons for Steel Rolling Mill Rolls,” *J. Japan Foundry Eng. Soc.*, vol. 78, no. 5, pp. 238–244, 2006.
- [14] website J. JONES (1991, MAY10). Networks (2nd ed). [Online]. Available: <https://www.astm.org/Standards/D6037.htm>.

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู

โดยใช้วัสดุดูดซับที่เตรียมจากผักตบชวา

A Study on Adsorption Efficiency of Methylene Blue Dye using Adsorbent Material Prepared from Water Hyacinth

ชาญชัย คหาปนนะ^{1, 2} และ ณภัทร โพธิ์วัน^{1*}

¹ คณะวัฒนธรรมสิ่งแวดล้อมและการท่องเที่ยวเชิงนิเวศ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

114 สุขุมวิท 23 แขวงคลองเตยเหนือ เขตวัฒนา กรุงเทพฯ 10110

² ห้องปฏิบัติการทดสอบการสลายตัวของวัสดุ ศูนย์พัฒนาและวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

Chanchai Kahapana^{1, 2} and Naphat Phowan^{1*}

¹ Faculty of Environmental Culture and Ecotourism, Srinakharinwirot University

114 Sukhumvit 23, Khlong Toei Nuea Subdistrict, Wattana District, Bangkok 10110

² Material Biodegradation Testing Laboratory, Material Properties Analysis and Development Centre

Thailand Institute of Scientific and Technological Research

35 Moo 3 Technopolis, Khlong Ha Subdistrict, Khlong Luang District, Pathum Thani 12120

*Corresponding author Email: naphat@gs.swu.ac.th

(Received: March 6, 2020; Accepted: June 1, 2020)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการเตรียมวัสดุดูดซับจากผักตบชวาสำหรับดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำเสีย โดยผักตบชวาถูกนำไปเตรียมดังนี้ 1) เตรียมเป็นผงขนาดเล็กกว่า 2 มิลลิเมตร 2) ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ 3) เตรียมเป็นถ่านชีวภาพ ผลการศึกษาพบว่า ถ่านชีวภาพสามารถดูดซับปริมาณไอโอดีนได้สูงสุด คือ 636.30 ± 4.16 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับโครงสร้างทางเคมีของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิดที่เตรียมขึ้นถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูรีเออร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พบว่า สเปกตรัมของวัสดุดูดซับมีลักษณะที่คล้ายกัน โดยแสดงหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของเซลลูโลส นอกจากนี้ยังได้ศึกษาปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส ปริมาณวัสดุดูดซับ และไอโซเทอร์มของการดูดซับ พบว่า เวลาในการดูดซับที่เหมาะสมเท่ากับ 8 ชั่วโมง ปริมาณวัสดุดูดซับเท่ากับ 20 กรัมต่อลิตร ในขณะที่ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด พบว่า ไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ ซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว โดยถ่านชีวภาพมีค่าความจุในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 21.88 มิลลิกรัมต่อกรัม

คำสำคัญ: การดูดซับ สีย้อมเมทิลีนบลู ผักตบชวา ถ่านชีวภาพ

ABSTRACT

An adsorbent for methylene blue dye (MB) adsorption in wastewater was prepared from water hyacinth. The adsorbent is prepared from water hyacinth powder with a particle size smaller than 2 mm, water hyacinth pretreated with sodium hydroxide (NaOH) and water hyacinth modified to biochar. Highest Iodine Number (I.N.) is $636.30 \pm 4.16 \text{ mg g}^{-1}$ was obtained when water hyacinth was modified to biochar. The chemical structure of the three adsorbents was characterized by the Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT – IR) also found similar spectra of the adsorbents that showed important functional groups in cellulose. Moreover, the effects of contact time, adsorbents dose on the adsorption capacity, and adsorption isotherm were studied. The results indicated that the optimum conditions were the contact time of eight hours and the adsorbents dose of 20 g L^{-1} . The adsorption isotherm of MB by the adsorbents was best described by the Langmuir isotherm which indicated the monolayer. The adsorption capacity of MB by biochar was the best efficiency, with an adsorption capacity of 21.88 mg g^{-1} .

Key words: adsorption, Methylene blue dye, water hyacinth, Biochar

1. บทนำ

ปัญหามลภาวะทางสิ่งแวดล้อมของประเทศไทยในปัจจุบันนับวันยิ่งทวีความรุนแรงขึ้น อันเนื่องมาจากการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมที่เติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว อาทิ อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมสิ่งทอ และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ จำเป็นต้องใช้น้ำในกระบวนการผลิต เช่น โรงงานฟอกย้อมสีในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ที่มักจะมีสีย้อมตกค้างอยู่ในน้ำทิ้ง เป็นผลกระทบวงกว้างกับชุมชนที่อยู่รอบโรงงาน อย่างไรก็ตามแม้ว่าสีย้อมจะมีความเป็นพิษในระดับต่ำ แต่สีย้อมที่ใช้โดยทั่วไปเป็นสีที่ยากต่อการสลายตัวทางชีวภาพและเป็นสารที่มีสีเข้ม ดังนั้น แม้มีปริมาณสีย้อมอยู่ในน้ำเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้น้ำมีสีที่น่ายังเกียดแก่ผู้พบเห็น [1] หากมีการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โดยที่ไม่ได้รับการบำบัดที่ดีเพียงพอก็จะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำบริเวณนั้น อีกทั้งยังลดอัตราการถ่ายเทของออกซิเจนที่เข้าสู่ผิวหน้าของแหล่งน้ำ และบดบังปริมาณแสงอาทิตย์ที่ตกลงสู่ผิวน้ำทำให้ให้พืชน้ำไม่สามารถ สังเคราะห์แสงได้ ส่งผลให้ปริมาณ

ออกซิเจนในน้ำลดลง สัตว์น้ำอาจตายได้เนื่องจากขาดออกซิเจนละลายน้ำ [2]

ประเภทของสีที่ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีหลายชนิด เช่น สีรีแอคทีฟ สีเอซิด สีเบสิก สีไดเรกต์ สีแวลต์ สีดิสเพอร์ส [3], [4] เมทิลีนบลูเป็นสีเบสิก (Basic Dyes) ที่ละลายน้ำได้มีโครงสร้างเป็นแคทไอออนในส่วนประกอบที่ให้สี ส่วนใหญ่นำไปใช้ประโยชน์โดยเป็นสีในกระดาษ สีย้อมผม ฝ้าย-ขนสัตว์ย้อมสี เป็นต้น [5] เมื่อสีมีการปนเปื้อนในน้ำเสียจะก่อให้เกิดมลภาวะในแหล่งน้ำ ดังนั้น จึงควรมีการบำบัดสีในน้ำเสียก่อนที่จะปล่อยลงแหล่งน้ำธรรมชาติ

วิธีการบำบัดน้ำเสียมียหลายวิธี อาทิ การใช้กระบวนการทางชีวภาพในการย่อยสลาย (Biodegradation) การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) การใช้กระบวนการทางกายภาพ (Physical treatment) เป็นต้น แต่ยังคงมีปัญหาในเรื่องของค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นและอาจไม่เหมาะสมกับโรงงานขนาดเล็ก มีการลงทุนสูง และต้องใช้ผู้ที่มีความรู้และความชำนาญเป็นพิเศษ ดังนั้น วิธีการดูดซับ (Adsorption) จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการบำบัด

น้ำเสีย เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย เงินลงทุน และใช้สถานที่ในการดำเนินการน้อย

วัสดุชีวภาพหรือวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรสามารถทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีค่าเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด แต่ยังมีข้อจำกัด คือ ความจุในการดูดซับยังมีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถเพิ่มขึ้นได้ด้วยการปรับสภาพวัสดุ อาทิ การลดขนาด การใช้สารเคมี การใช้ความร้อนในการปรับปรุงโครงสร้างหรือสมบัติของวัสดุดูดซับ

มีงานวิจัยการใช้ผักตบชวา (*Eichornia crassipes*; Water hyacinth) มาปรับสภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำเสีย โดยการปรับสภาพผักตบชวากับกรดไนตริก [6] กรดไฮโดรคลอริก [7] รวมถึงการเตรียมเป็นถ่านชีวภาพโดยเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสด้วยกระบวนการไพโรไลซิสและกระตุ้นด้วยเชิงเคมีด้วยกรดซิตริก [8] อย่างไรก็ตามการปรับสภาพด้วยวิธีดังกล่าวอาจมีต้นทุนสูงในการเตรียมวัสดุ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับที่เตรียมจากผักตบชวาโดยการปรับสภาพด้วยสารละลายเบสซึ่งมีราคาถูก และการเตรียมเป็นถ่านชีวภาพ (Biochar) โดยไม่ผ่านการกระตุ้นเชิงเคมี เพื่อบำบัดสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำเสีย เนื่องจากผักตบชวามีองค์ประกอบที่เป็นเส้นใยโดยเฉพาะอย่างยิ่งเซลลูโลสในปริมาณสูง [9] ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้จะเป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหา น้ำเสียและยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของวัสดุดังกล่าวให้สูงขึ้น

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมวัสดุดูดซับ

2.1.1 การเตรียมผักตบชวา

นำต้นผักตบชวาที่เก็บจากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก มาล้างให้สะอาดด้วยน้ำประปา แล้วล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน ตากให้แห้ง จากนั้นบดให้มีขนาดเล็กด้วยเครื่องบดแบบใบมีด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร

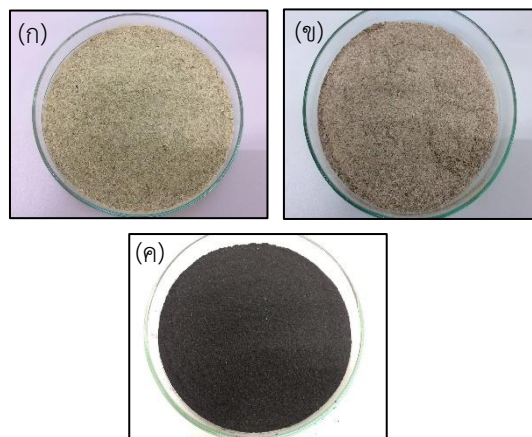
อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เก็บในภาชนะที่แห้งและปิดสนิท (รูปที่ 1 (ก))

2.1.2 การปรับสภาพผักตบชวากับ NaOH

นำผักตบชวาที่เตรียมได้จากข้อ 2.1.1 มาผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.7 โมลาร์ ที่อัตราส่วน 1:20 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 และล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนสารละลายมีค่าพีเอชใกล้เคียงกับค่าพีเอชของน้ำปราศจากไอออน นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (รูปที่ 1 (ข))

2.1.3 การเตรียมถ่านชีวภาพ

นำผักตบชวามาตากแห้ง เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาทีด้วยกระบวนการไพโรไลซิส [10] จากนั้นบดให้มีขนาดเล็กด้วยเครื่องบดแบบใบมีด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร (รูปที่ 1 (ค))



รูปที่ 1 ภาพถ่ายวัสดุดูดซับที่เตรียมจากผักตบชวา (ก) ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ข) ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH 0.7 M (ค) ผักตบชวาที่เตรียมเป็นถ่านชีวภาพ

2.2 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของวัสดุดูดซับ

การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย [11] ปริมาณคาร์บอนคงตัว [12] และวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะตามทฤษฎีของเบ็ต (BET,

The Brunauer-Emmett-Teller) ด้วยก๊าซไนโตรเจน นอกจากนี้ นำไปศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Micro-scope; SEM) โดยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพส่งวิเคราะห์ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ส่วนถ่านชีวภาพส่งวิเคราะห์ที่ศูนย์พัฒนาและวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

2.3 การวิเคราะห์สมบัติและโครงสร้างทางเคมีของวัสดุดูดซับ

การวิเคราะห์สมบัติทางเคมี ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน (CHNS/O Analyzer) ยี่ห้อ Perkin รวมถึงวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของวัสดุดูดซับด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FT-IR) ยี่ห้อ Perkin

2.4 การวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine number) ของวัสดุดูดซับ

การทดลองนี้เป็นการหาปริมาณการดูดซับของวัสดุดูดซับจากความสามารถการดูดซับไอโอดีนบนพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับ นำวัสดุดูดซับที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์หาค่าการดูดซับไอโอดีนตามมาตรฐาน ASTM D4607-94 [13]

2.5 การเตรียมสารละลายเมทิลีนบลูสำหรับการดูดซับ

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการศึกษา คือ สารละลายเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเตรียมจากผงเมทิลีนบลู ยี่ห้อ Fluka, AR grade

2.6 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลู

2.6.1 ระยะเวลาในการดูดซับ

ชั่งวัสดุดูดซับปริมาณ 0.1 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ที่เติมสารละลายเมทิลีนบลู ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิตร จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็น

เวลา 1, 4, 8, 12 และ 24 ชั่วโมง ทำการแยกวัสดุดูดซับออกจากน้ำเสียด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 แล้วนำน้ำเสียที่ผ่านการดูดซับมาวิเคราะห์ปริมาณเมทิลีนบลู

2.6.2 ปริมาณวัสดุดูดซับ

ชั่งวัสดุดูดซับปริมาณ 0.1, 0.2, 0.4, 0.8 และ 1.0 กรัม เติมน้ำอย่างช้าๆ ปริมาตร 50 มิลลิตร จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที โดยใช้ระยะเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 2.6.1 ทำการแยกวัสดุดูดซับออกจากน้ำเสียด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 แล้วนำน้ำเสียที่ผ่านการดูดซับมาวิเคราะห์ปริมาณเมทิลีนบลู

2.6.3 การวิเคราะห์ปริมาณเมทิลีนบลู

ทำการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลีนบลูในน้ำเสียโดยนำไปตรวจวัดที่ความยาวคลื่น 663 นาโนเมตร ด้วยเครื่องยูวี – วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV – Visible Spectrophotometer) ยี่ห้อ SECOMAM คำนวณค่าร้อยละการดูดซับเมทิลีนบลู ตามสมการที่ (1)

$$\text{ร้อยละการดูดซับ} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลีนบลู (mg L^{-1})

C_e คือ ความเข้มข้นสมดุลของเมทิลีนบลู (mg L^{-1})

2.7 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

การวิเคราะห์ไอโซเทอร์มเพื่อใช้อธิบายรูปแบบของการดูดซับเมทิลีนบลู ประกอบด้วยสมการแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) และสมการของฟรุนดลิช (Freundlich adsorption isotherm) ดังสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม (mg g^{-1})

q_m คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับที่อิ่มตัวบนตัวดูดซับ 1 กรัม (mg g^{-1})

C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg L^{-1})

K_L คือ ค่าคงที่ของแลงเมียร์ที่อุณหภูมิหนึ่ง (L mg^{-1})

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (3)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม (mg g^{-1})

n คือ ค่าคงที่แสดงถึงความแข็งแรงในการดูดซับ

C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg g^{-1})

K_F คือ ค่าคงที่ของฟรอนด์ลิชที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับ (L mg^{-1})

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 ศึกษาสมบัติทางกายภาพของวัสดุดูดซับ

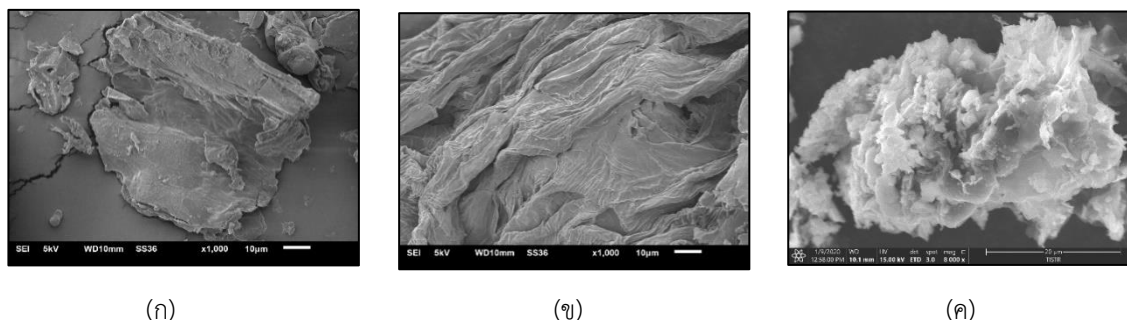
จากตารางที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบค่าต่างๆ พบว่า ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพจะมีค่าปริมาณสารระเหยสูงที่สุด รองลงมาคือผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพและถ่านชีวภาพ แสดงให้เห็นว่าสารอินทรีย์ที่สลายตัวได้ง่ายส่วนใหญ่จะระเหยได้ที่อุณหภูมิสูง โดยอาจเกิดจากการสลายตัวของส่วนประกอบจำพวกเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส [14] ในขณะที่ปริมาณเถ้าจะสัมพันธ์แบบผกผันกับปริมาณคาร์บอนคงตัว กล่าวคือ ถ้า

มีปริมาณเถ้าต่ำ จะมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง ในที่นี้พบว่า ถ่านชีวภาพจะมีปริมาณเถ้าต่ำและปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง ซึ่งจะส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านชีวภาพที่เตรียมได้สูงตามไปด้วย สำหรับพื้นที่ผิวจำเพาะของผักตบชวาไม่ผ่านการปรับสภาพ ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพและถ่านชีวภาพมีค่า 16.16, 19.62 และ 66.17 ตารางเมตรต่อกรัมตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการไพโรไลซิสมีผลต่อการเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านชีวภาพ

เมื่อนำวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด ไปศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาโดยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า (สำหรับผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ) และที่กำลังขยาย 8,000 เท่า (สำหรับถ่านชีวภาพ) พบว่า ลักษณะพื้นผิวของผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพแตกต่างจากผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ โดยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเป็นแผ่นเรียบและซ้อนกันเป็นชั้นๆ ส่วนผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH มีพื้นผิวขรุขระมากขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นผลจากความสามารถของ NaOH ในการย่อยสลายองค์ประกอบจำพวกลิกนิน อีกทั้งยังสามารถทำลายความเป็นโครงสร้างแบบผลึกของเซลลูโลส (Cellulose crystalline) ส่งผลให้ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพอาจมีความเป็นรูพรุนมากกว่า ผักตบชวาที่ไม่ผ่านปรับสภาพ ส่วนพื้นผิวของถ่านชีวภาพจะมีพื้นผิวที่ขรุขระและมีรูพรุนมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 2

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของวัสดุดูดซับ

ชนิดวัสดุดูดซับ	สมบัติของวัสดุดูดซับ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	ปริมาณสารระเหย	ปริมาณเถ้า	ปริมาณคาร์บอนคงตัว
ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ	73.94±1.11	7.75±0.18	18.31±1.14
ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ	68.87±1.06	11.18±0.37	19.95±1.43
ถ่านชีวภาพ	22.81±0.50	19.48±0.23	57.70±0.30



รูปที่ 2 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของ (ก) ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ข) ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH 0.7 M และ (ค) ถ่านชีวภาพ

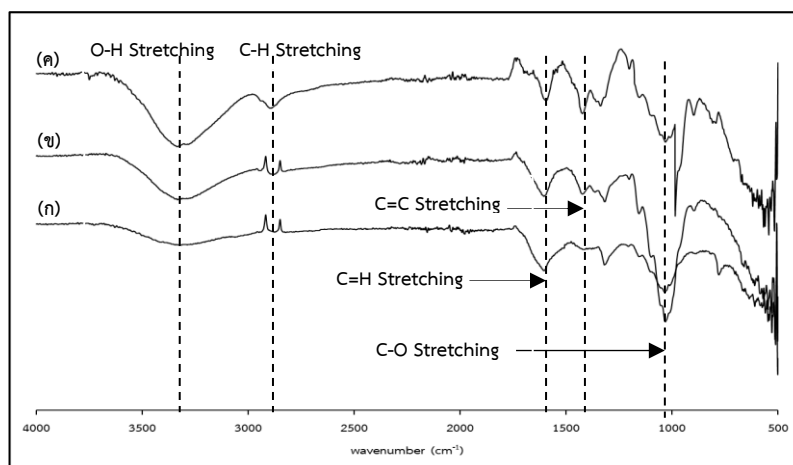
3.2 ศึกษาสมบัติและโครงสร้างทางเคมีของวัสดุดูดซับ

จากตารางที่ 2 พบว่า เมื่อเปรียบเทียบปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุดูดซับแต่ละชนิดซึ่งประกอบด้วย คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) และออกซิเจน (O) พบว่า ถ่านชีวภาพมีปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนสูงกว่าวัสดุดูดซับทั้ง 2 ชนิด สำหรับปริมาณออกซิเจน พบว่า ถ่านชีวภาพมีปริมาณที่ต่ำกว่าวัสดุดูดซับทั้ง 2 ชนิด ทั้งนี้อาจมาจากกระบวนการไพโรไลซิสที่มีการใช้อุณหภูมิสูงทำให้องค์ประกอบของถ่านชีวภาพมีการเปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมี มีปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจนที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ ค่าดัชนีความมีขั้ว (Polarity index) ที่คำนวณจากอัตราส่วน $(O+N)/C$ มีค่าลดลงเนื่องจากกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งบ่งบอกถึงการลดลงของกลุ่มฟังก์ชันที่อยู่บริเวณพื้นผิวของวัสดุดูดซับ [15]

สำหรับผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิดด้วย FT-IR (รูปที่ 3) ปรากฏพีก O-H Stretching ที่เลขคลื่นประมาณ $3300-3400\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นสารประกอบฟีนอล (Phenolic compounds) แต่ลักษณะพีกของถ่านชีวภาพจะแตกต่างจากวัสดุดูดซับทั้ง 2 ชนิดเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากกระบวนการไพโรไลซิสที่มีการใช้อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการสูญเสียโมเลกุลน้ำ [16] พีก C-H Stretching ที่เลขคลื่นประมาณ $2800-3000\text{ cm}^{-1}$ เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทแอลเคนหรือแอลคีน (Alkane or Alkene) พีก C=O Stretching ที่เลขคลื่นประมาณ $1600-1700\text{ cm}^{-1}$ เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทคาร์บอนิล (Carbonyl compounds) พีก C-O Stretching ที่เลขคลื่นประมาณ $1100-1200\text{ cm}^{-1}$ เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทเอสเทอร์ (Ester compounds) ซึ่งหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดูดซับ

ชนิดวัสดุดูดซับ	ปริมาณธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)				(O+N)/C ratio
	C	H	N	O	
ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ	35.39±0.64	3.39±0.07	2.08±0.03	63.98±0.75	1.87±0.05
ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ	35.08±0.42	3.46±0.03	2.01±0.03	63.40±0.16	1.92±0.03
ถ่านชีวภาพ	47.91±0.26	3.75±0.07	2.18±0.03	45.93±0.71	1.00±0.02



รูปที่ 3 โครงสร้างทางเคมีของ (ก) ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ
(ข) ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH 0.7 M และ (ค) ถ่านชีวภาพ

3.3 การดูดซับค่าไอโอดีนของวัสดุดูดซับ

การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ผักตบชวาที่การปรับสภาพด้วย NaOH และ ถ่านชีวภาพ ด้วยการหาความสามารถในการดูดซับไอโอดีน (Iodine Number, I.N.) ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 3 โดยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีค่าเท่ากับ 282.04 ± 4.15 มิลลิกรัมต่อกรัม ในขณะที่ ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพมีค่าเท่ากับ 546.80 ± 7.21 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนถ่านชีวภาพมีค่าเท่ากับ 636.30 ± 4.16 มิลลิกรัมต่อกรัม ทั้งนี้จะเห็นได้ว่า ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH จะมีค่า I.N. มากกว่าผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากการที่ NaOH มีผลต่อพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับ โดยเฉพาะส่วนที่เป็นเยื่อใย ดังนั้นการใช้ NaOH จะทำให้องค์ประกอบจำพวกเซลลูโลสเกิดการบวมตัวมากขึ้น อีกทั้งยังเพิ่มการย่อยสลายลิกนินบนพื้นผิวของวัสดุ ดังนั้นวิจัยของ Polpasert [17] ที่พบว่า การปรับสภาพวัสดุดูดซับจะมีผลให้พื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับเพิ่มขึ้นและสามารถดูดซับไอโอดีนได้มากกว่าวัสดุดูดซับที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ สำหรับถ่านชีวภาพมีค่า I.N. สูงสุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพมีรูพรุนขนาดเล็กจึงสามารถดูดซับ

โมเลกุลของไอโอดีนที่มีขนาดเล็กได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ประเทศไทย (มอก.900-2547) [18] สำหรับถ่านชนิดผง จัดได้ว่าถ่านชีวภาพที่ผ่านการไพโรไลซิสเป็นไปตามเกณฑ์ขั้นต่ำที่กำหนดสำหรับค่าไอโอดีน คือ 600 มิลลิกรัมต่อกรัม

ตารางที่ 3 ค่าการดูดซับไอโอดีนของวัสดุดูดซับ

วัสดุดูดซับ	ค่า I.N. (mg g^{-1})
ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ	282.05 ± 4.15
ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ	546.80 ± 7.21
ถ่านชีวภาพ	636.30 ± 4.16

3.4 ผลของระยะเวลาสัมผัสที่มีต่อการดูดซับเมทิลีนบลู

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลูของวัสดุดูดซับ คือ ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ผักตบชวาที่ผ่านปรับสภาพด้วย NaOH และถ่านชีวภาพ ด้วยการเติมวัสดุดูดซับ 0.1 กรัม ในตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีปริมาณเมทิลีนบลู 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร มีค่าพีเอชเริ่มต้น 4.32 ± 0.09 นำเข้าเครื่องเขย่าเป็นเวลาต่างๆ และทำการวิเคราะห์

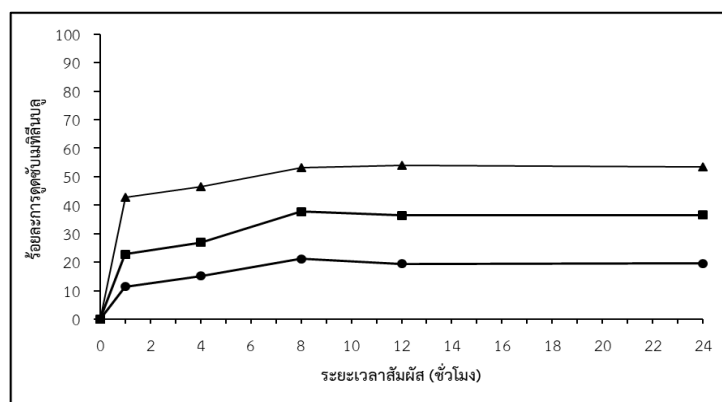
ปริมาณเมทิลีนบลูหลังการดูดซับที่เวลาต่างๆเพื่อนำมาคำนวณร้อยละการดูดซับของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด ซึ่งพบว่า ถ่านชีวภาพมีค่าร้อยละการดูดซับเมทิลีนบลูสูงกว่า ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะพื้นผิวของถ่านชีวภาพสามารถดูดซับโมเลกุลของเมทิลีนบลูได้มากกว่า โดยค่าร้อยละการดูดซับเมทิลีนบลูจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงชั่วโมงแรก หลังจากนั้นร้อยละการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆจนเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ระยะเวลา 8 ชั่วโมง และมีค่าคงที่จนถึง 24 ชั่วโมง เมื่อคำนวณร้อยละประสิทธิภาพการดูดซับพบว่ามีความเท่ากับร้อยละ 53.31 (รูปที่ 4) ดังนั้นจึงเลือกใช้ระยะเวลาของการดูดซับที่ 8 ชั่วโมง ทำการศึกษาปริมาณของวัสดุดูดซับในหัวข้อต่อไป

3.5 ผลของปริมาณวัสดุและไอโซเทอร์มการดูดซับ

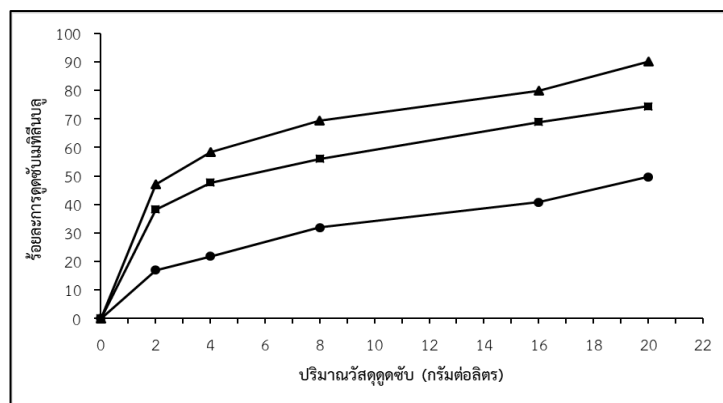
การใช้งานวัสดุดูดซับในทางอุตสาหกรรมต้องพิจารณาถึงจุดคุ้มทุนร่วมกับประสิทธิภาพการดูดซับ ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับเป้าหมายการลดต้นทุน จึงต้องศึกษาปริมาณวัสดุดูดซับ (Adsorbent dose) เพื่อให้ทราบถึงปริมาณวัสดุดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการลดปริมาณเมทิลีนบลูในน้ำเสีย การศึกษานี้ใช้ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเติมวัสดุดูดซับปริมาณ 0.1-1.0 กรัม ในตัวอย่างน้ำเสียปริมาตร 50 มิลลิลิตร มีค่าพีเอชเริ่มต้น 4.83 ± 0.11 นำเข้าเครื่องเขย่าเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ทำการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลีนบลูหลังการดูดซับ พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุ

ดูดซับจาก 2 กรัมต่อลิตร เป็น 20 กรัมต่อลิตร ร้อยละการดูดซับของผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 17.00 เป็น 49.66 ในขณะที่ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 38.27 เป็น 74.48 ส่วนถ่านชีวภาพมีค่าร้อยละการดูดซับสูงสุด โดยเพิ่มขึ้นจาก 46.91 เป็น 90.01 (รูปที่ 5) ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับมีมากขึ้นและบริเวณที่เกิดการดูดซับมีสูงขึ้น โดยพื้นที่ผิวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณวัสดุดูดซับ [19] ดังนั้นการเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับจึงมีผลทำให้ร้อยละการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามปริมาณวัสดุดูดซับที่เหมาะสมต่อการดูดซับอาจมีปริมาณมากกว่า 20 กรัมต่อลิตร เนื่องจากค่าร้อยละการดูดซับยังมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ ประสิทธิภาพในการดูดซับสีของวัสดุดูดซับขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ซึ่งปัจจัยที่สำคัญอีกปัจจัยหนึ่ง คือ ประจุของสีย้อมและประจุบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับ [20] ค่าพีเอชของเมทิลีนบลูในการทดลองนี้มีค่าอยู่ในช่วง 4.32-4.83 มีผลทำให้วัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิดมีประสิทธิภาพการดูดซับที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sukadjasakul (2012) ที่รายงานว่า การดูดซับสีย้อมผสมด้วยผักตบชวาที่ค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 4 มีร้อยละเฉลี่ยการดูดซับดีที่สุด ซึ่งอาจเป็นเพราะในสภาวะที่เป็นกรดทำให้โครงสร้างของสีมีประจุบวก สามารถยึดเหนี่ยวกับเซลล์ลอสซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลโควาเลนต์ได้ดี [21]



รูปที่ 4 ประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูในน้ำเสียสังเคราะห์ของวัสดุดูดซับที่ระยะเวลาต่างกัน เมื่อ (●) คือ ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (■) คือ ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ และ (▲) คือ ถ่านชีวภาพ



รูปที่ 5 ประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูในน้ำเสียสังเคราะห์ของวัสดุดูดซับที่มีปริมาณต่างกัน เมื่อ (●) คือ ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพ (■) คือ ผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงสภาพ และ (▲) คือ ถ่านชีวภาพ

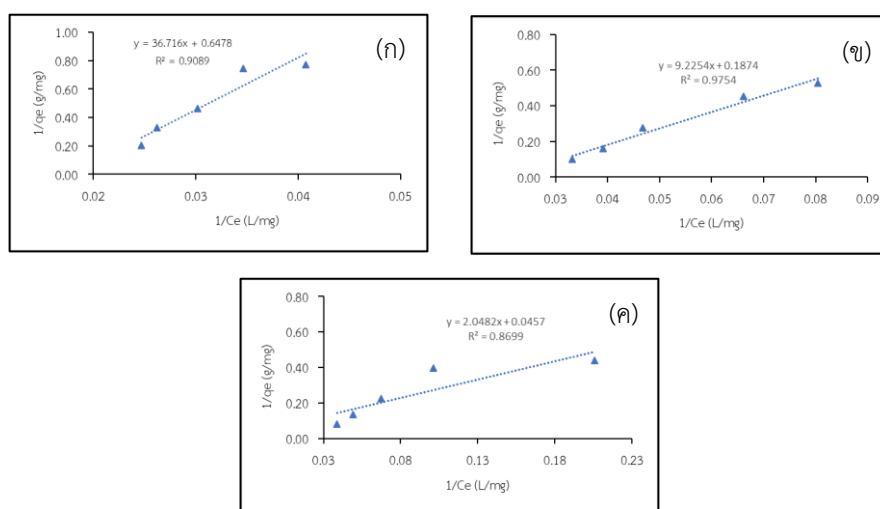
สำหรับการศึกษาแบบจำลองการดูดซับเมทิลีนบลูในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพ ผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงสภาพและถ่านชีวภาพ เป็นการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของวัสดุดูดซับกับความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ ณ สภาวะสมดุล โดยการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณความจุในการดูดซับเมทิลีนบลูของวัสดุดูดซับ (q_e) และความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่สภาวะสมดุล (C_e) อาศัยรูปแบบสมการของไอโซเทอรัมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และรูปแบบสมการของไอโซเทอรัมแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm) ผลการศึกษารูปแบบการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยไอโซเทอรัมแบบแลงเมียร์และไอโซเทอรัมแบบฟรอนด์ลิช พบว่าแบบจำลองการดูดซับแบบแลงเมียร์มีความเหมาะสมในการใช้อธิบายรูปแบบการดูดซับเมทิลีนบลูของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด มากกว่าแบบจำลองการดูดซับของฟรอนด์ลิช โดยเปรียบเทียบจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient; R^2) ของสมการเข้าใกล้ 1 มากกว่า [22] ซึ่งการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) ที่มีความสม่ำเสมอ (Homogenous) ที่อยู่บนพื้นที่ของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด อีกทั้งตำแหน่งในการดูดซับมีปริมาณที่แน่นอน [23] โดยรูปแบบสมการแบบแลงเมียร์จะเป็นการ

สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/q_e$ กับ $1/C_e$ สามารถคำนวณหาค่าปริมาณการดูดซับเมทิลีนบลูสูงสุดของวัสดุดูดซับ (q_m) และค่า K_L ซึ่งเป็นค่าคงที่การดูดซับแบบชั้นเดียว และเป็นสัดส่วนระหว่างอัตราการดูดซับต่ออัตราการคายการดูดซับได้จากค่าจุดตัดแกน y และค่าความชันของกราฟ จากผลการทดลองสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ตามรูปแบบสมการแบบแลงเมียร์ได้ดังรูปที่ 6 ในขณะที่รูปแบบสมการแบบฟรอนด์ลิชจะเป็นการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log q_e$ กับ $\log C_e$ สามารถหาค่าคงที่ของสมการแบบฟรอนด์ลิชที่แสดงปริมาณการดูดซับเมทิลีนบลูของวัสดุดูดซับ (K_F) และค่า Adsorption Intensity ($1/n$) ได้จากค่าจุดตัดแกน y และค่าความชันของกราฟ จากผลการทดลองสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ตามรูปแบบสมการแบบฟรอนด์ลิชได้ดังรูปที่ 7 โดยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพ ผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงสภาพ และถ่านชีวภาพมีค่าความจุสูงสุดในการดูดซับ (q_m) เท่ากับ 1.54, 5.34 และ 21.88 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และมีค่าคงที่ของแลงเมียร์ (K_L) เท่ากับ 0.018, 0.02 และ 0.022 ลิตรต่อมิลลิกรัม ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพมีความจุการดูดซับเมทิลีนบลูมากกว่าวัสดุดูดซับทั้ง 2 ชนิดอย่างเห็นได้ชัด ดังตารางที่ 4 และ 5 เมื่อพิจารณาการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านชีวภาพ อธิบายได้ว่า ถ่านชีวภาพมีความจุการดูดซับสูง

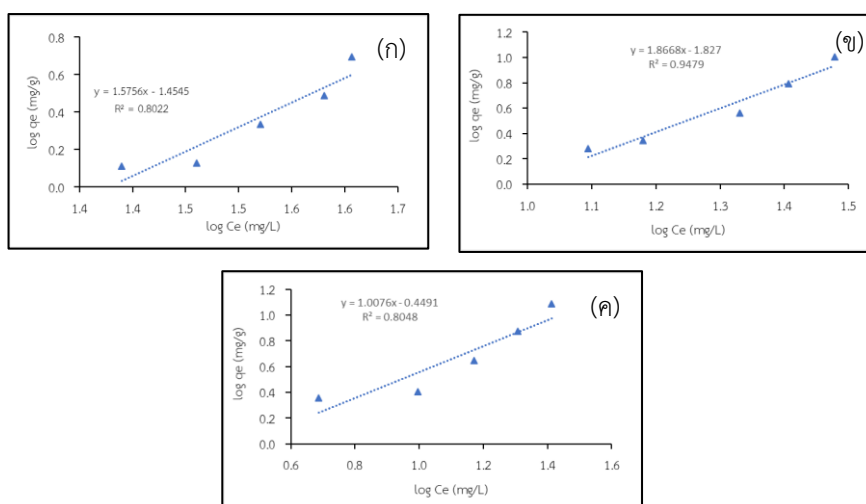
ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 เดือน พฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2563

โดยมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 66.17 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่ค่อนข้างสูงและค่าความสามารถในการดูดซับไอโอดีน 636.30 มิลลิกรัมต่อกรัม เมทิลีนบลูที่มีขนาดโมเลกุลขนาดเล็กถึงปานกลาง (ประมาณ 1 นาโนเมตร) [24] จึงถูกดูดซับด้วยกลไกทางกายภาพ คือ การดูดติดผิวโดยถ่านชีวภาพด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์เป็นกลไกหลัก [25] ทั้งนี้ โมเลกุลของเมทิลีนบลูบางส่วนอาจเกิดจากการ

ดูดซับทางเคมีเนื่องจากการทำปฏิกิริยากับหมู่กรดที่ผิวของถ่านชีวภาพด้วย [26] เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิดในงานวิจัยนี้กับวัสดุดูดซับจากผักตบชวาจากงานวิจัยอื่นๆ พบว่า ยังมีค่าความจุสูงสุดการดูดซับเมทิลีนบลูที่ค่อนข้างต่ำ แต่ถ่านชีวภาพมีค่าความจุสูงสุดการดูดซับสูงกว่าถ่านกัมมันต์ ดังตารางที่ 6



รูปที่ 6 ไอโซเทอรัมแบบแลงเมียร์ของการดูดซับเมทิลีนบลู เมื่อ (ก) คือ ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ข) ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ และ (ค) ถ่านชีวภาพ



รูปที่ 7 ไอโซเทอรัมแบบฟรุนดลิชของการดูดซับเมทิลีนบลู เมื่อ (ก) คือ ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ข) ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ และ (ค) ถ่านชีวภาพ

ตารางที่ 4 ค่าคงที่ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ของการดูดซับเมทิลีนบลู

ชนิดวัสดุดูดซับ	ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์			
	สมการเส้นตรง	K_L (L mg ⁻¹)	q_m (mg g ⁻¹)	R^2
ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ	$y = 36.716x + 0.6478$	0.018	1.54	0.9089
ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ	$y = 9.2254x + 0.1874$	0.020	5.34	0.9754
ถ่านชีวภาพ	$y = 2.0482x + 0.0457$	0.022	21.88	0.8699

ตารางที่ 5 ค่าคงที่ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิชของการดูดซับเมทิลีนบลู

ชนิดวัสดุดูดซับ	ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช			
	สมการเส้นตรง	K_F (L mg ⁻¹)	1/n	R^2
ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ	$y = 2.6197x - 3.6093$	2.459	2.6197	0.8909
ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ	$y = 1.8668x - 1.827$	0.015	1.8668	0.9479
ถ่านชีวภาพ	$y = 1.0076x - 0.4491$	0.356	1.0076	0.8048

ตารางที่ 6 ค่าความจุสูงสุด (q_m) ของการดูดซับเมทิลีนบลู

ชนิดวัสดุดูดซับเตรียมจากผักตบชวา	q_m (mg g ⁻¹)	เอกสารอ้างอิง
ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก	63.30	[7]
ถ่านชีวภาพที่ปรับสภาพด้วยกรดซิตริก	395.00	[8]
ถ่านกัมมันต์	2.90	[27]
ถ่านชีวภาพ	21.88	งานวิจัยนี้
ปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์	5.34	งานวิจัยนี้
ไม่ผ่านการปรับสภาพ	1.54	งานวิจัยนี้

4. สรุป

จากการศึกษาสมบัติของวัสดุดูดซับ คือ ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายเบส และผักตบชวาที่เตรียมเป็นถ่านชีวภาพ เมื่อมีการปรับสภาพวัสดุดูดซับทำให้ลักษณะสัณฐานวิทยาเปลี่ยนแปลงไป อีกทั้งสมบัติของวัสดุดูดซับมีความเหมาะสมในการดูดซับและเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลูได้ สำหรับสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับเมทิลีนบลูในน้ำเสียสังเคราะห์ของผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลาย

เบส และถ่านชีวภาพ คือ ระยะเวลาสัมผัสที่ 8 ชั่วโมง และที่ปริมาณวัสดุดูดซับ 1 กรัม มีประสิทธิภาพการดูดซับถึงร้อยละ 46.66, 74.48 และ 90.01 ตามลำดับ โดยถ่านชีวภาพมีประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูอย่างเห็นได้ชัด อีกทั้งยังมีคุณสมบัติที่เป็นไปตามเกณฑ์ขั้นต่ำที่กำหนดใน มอก.900-2547 นอกจากนี้ รูปแบบการดูดซับเมทิลีนบลูของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด สอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ซึ่งอธิบายได้ว่า การดูดซับเป็นแบบชั้นเดียวและพื้นที่ผิวของการดูดซับเป็น

ปัจจัยการดูดซับที่สำคัญ จากผลการศึกษาข้างต้น กล่าวได้ว่าผักตบชวาที่เตรียมเป็นถ่านชีวภาพสามารถดูดซับเมทิลีนบลูได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดสีย้อมผ้าที่ปนเปื้อนในน้ำเสียก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวัฒนธรรมสิ่งแวดล้อมและการท่องเที่ยวเชิงนิเวศ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัย ขอขอบคุณศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และสถานที่สำหรับการเตรียมถ่านชีวภาพ และขอขอบคุณห้องปฏิบัติการทดสอบการสลายตัวทางชีวภาพของวัสดุ ศูนย์พัฒนาและวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์วิทยาศาสตร์

6. เอกสารอ้างอิง

[1] A. Ritthichai and S. Muncharoen, "Dye Removal of Textile Wastewaters using Crab Shell Activated Carbon," *Burapha Science Journal*, vol. 19, pp. 131-140, 2014. (in Thai).

[2] P. Daengbutdee, et al., "Adsorption of Methylene Blue Dye by Rice-husk in Fixed-bed Column," *The Journal of KMUTNB*, vol. 24(2), pp. 398-408, 2014. (in Thai).

[3] V.K. Gupta and Suhas, "Application of low-cost adsorption for dye-removal: A review," *Journal of Environmental Management*, vol. 90(8), pp. 2313-2342, 2009.

[4] I.D. Mall, et al, "Removal of orange-G and methyl violet dyes by adsorption onto bagasse fly ash-kinetic study and equilibrium

isotherm analyses," *Dyes and Pigments*, vol. 69, pp. 210-223, 2006.

- [5] O. Hamdaoui, "Dynamic sorption of methylene blue by cedar sawdust and crushed brick in fixed bed column," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 138, pp. 293-303, 2006.
- [6] M. I. El-Khaiary, "Kinetics and mechanism of adsorption of methylene blue from aqueous solution by nitric-acid treated water-hyacinth," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 147 (1-2), pp. 28-36, 2007.
- [7] M.N. Uddin, "A Novel Biosorbent, Water-Hyacinth, Uptaking Methylene Blue from Aqueous Solution: Kinetics and Equilibrium Studies," *International Journal of Chemical Engineering* vol. 2014, pp. 1-13, 2014.
- [8] X. Yan, et al., "Enhanced adsorption of methylene blue by citric acid modification of biochar derived from water hyacinth (*Eichornia crassipes*)," *Environ Sci Pollut Res*, vol. 23, pp. 23606–23618, 2016.
- [9] P. Prasannam, "Removal of heavy metal ions from solution using ion exchangers based on hydroxyethyl cellulose," M.S. thesis, Dept. Eng., Silpakorn Univ. , Nakhon Pathom, Thailand, 2004. (in Thai)
- [10] R.E. Mastro, et al., "Biochar from water hyacinth (*Eichornia crassipes*) and its impact on soil biological activity," *Catena*, vol.111, pp.64-71, 2013.
- [11] ASTM for Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal, ASTM Standards D1762-84, 2007.

- [12] ASTM for Standard Test Method for Analysis of Wood Fuels, ASTM Standards E870-82, 2019.
- [13] ASTM for Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbons, ASTM Standard D4607-94, 1998.
- [14] J. Guo and A.C. Lua, "Kinetic Study on Pyrolysis Process of Oil-Palm Stone Using Two-Step Consecutive Reaction Model," *Biomass and Bioenergy*, vol.20, pp.223-233, 2001.
- [15] F. Li, et al., "Preparation and Characterization of Biochars from *Eichornia crassipes* for Cadmium Removal in Aqueous Solutions," *PLoS ONE*, vol. 11(2), pp. 1-13, 2016.
- [16] T. Mimmo, et al., "Effect of Pyrolysis Temperature on Miscanthus (*Miscanthus x Giganteus*) Biochar Physical, Chemical and Functional Properties," *Biomass and Bioenergy*, vol. 6(March), pp. 149-157, 2014.
- [17] S. Polpasert, "Pretreatment of lignocellulose materials for ethanol production," *Journal of Science and Technology*, vol. 5, pp. 641-649, 2014. (in Thai)
- [18] TISI for Thai Industrial Standard: Activated Carbon, TISI Standard 900-2547, 2547. (in Thai)
- [19] D. Özer, et al., "Methylene blue adsorption from aqueous solution by dehydrated peanut hull," *Journal of Hazardous Materials*, vol.144, pp.171-179, 2007.
- [20] R. Srimoon. "Dyes treatment in wastewater using adsorption processes," *KKU Sci. J.*, vol. 44(3), pp. 419-434, 2016. (in Thai).
- [21] A. Sukadjasakul. "Dyes removal from Doi Tung development project textile wastewater utilizing adsorbent from water hyacinth and *Cyperus corymbosus* Rottb.," M.S. thesis, Env. Sci., Kasetsart Univ., Bangkok, Thailand, 2012. (in Thai).
- [22] S. Waiyasusri. "Phosphate removal in wastewater by adsorption on calcium carbonate and calcium oxide from eggshell," *The Journal of KMUTNB*, vol. 26(3), pp. 475-486, 2016. (in Thai).
- [23] F. Nady, et al., "Effectiveness of alkali-acid treatment in enhancement the adsorption capacity for rice straw: The removal of methylene blue dye," *Physical chemistry*, vol. 2013, pp. 1-15, (2013).
- [24] J. d. S. Macedo, et al., "Kinetic and calorimetric study of the adsorption of dyes on mesoporous activated carbon prepared from coconut coir dust," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 298, pp. 515-522, 2006
- [25] J. Zhang, and Q. Wang, "Sustainable mechanisms of biochar derived from brewer's spent grain and sewage for ammonia-nitrogen capture," *J. Cleaner. Prod.*, vol. 112, pp. 3927-3934, 2016.
- [26] X.L. Long, et al., "Adsorption of ammonia on activated carbon from aqueous solutions," *Environ. Prog.*, vol. 27(2), pp. 225-233, 2008.
- [27] G. Nibret, et al., "Removal of Methylene Blue Dye from Textile Wastewater using Water Hyacinth Activated Carbon as Adsorbent: Synthesis, Characterization and Kinetic studies," *International Conference on Sustainable Computing in Science, Technology & Management*, Jaipur, India, 2019, pp. 1959-1969.

การสร้างแบบจำลองสถานการณ์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตซาลาเปา

Simulation Modeling to Improve the Efficiency of the Steamed Stuffed Buns Production

ธนพนธ์ คงทอง^{1,2} เพ็ญสุดา พันธุ์ดำ^{1,2,*} เชษฐา ชำนาญหล่อ^{1,2}

¹ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

²กลุ่มวิจัยการจัดการการผลิตและอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Thanapun Kongtong^{1,2} Pensuda Phanritdum^{1,2,*} Chettha Chamnanlor^{1,2}

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University

²Industrial and Production Management Research Group, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University

*Corresponding author Email: pensuda@eng.src.ku.ac.th

(Received: November 12, 2019; Accepted: May 30, 2020)

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการขยายตัวของธุรกิจอาหารประเภทต่างๆ ส่งผลให้สถานการณ์การแข่งขันทวีความรุนแรงยิ่งขึ้น ดังนั้น โรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องโดยส่วนใหญ่จึงให้ความสำคัญต่อคุณภาพการผลิตเพื่อให้ได้รับการยอมรับจากลูกค้า แม้แต่โรงงานผลิตซาลาเปากรณีศึกษา ซึ่งจากการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น พบว่า กระบวนการไหลของการผลิตซาลาเปา ยังมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอในพื้นที่ที่จำกัด ดังนั้น การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตซาลาเปา ของโรงงานกรณีศึกษา โดยใช้หลักการวิเคราะห์ปัญหา การศึกษางาน และการวางแผนโรงงานอย่างมีระบบ (SLP) นอกจากนี้ ยังมีการจำลองสถานการณ์การผลิตเพื่อแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างทางเลือกต่างๆ ผลจากการศึกษา พบว่า ทางเลือกที่นำเสนอสามารถลดระยะทางการเคลื่อนที่และเวลาการผลิตโดยรวม ซึ่งทำให้อัตราการผลิตเพิ่มขึ้นจากเดิม 7.73 ลูก/นาที เป็น 11.04 ลูก/นาที

คำสำคัญ: การจำลองสถานการณ์, แผนผังโรงงาน, ประสิทธิภาพ, ซาลาเปา

ABSTRACT

Currently, the enlargement of various types of food businesses has resulted in an increasingly competitive situation. Therefore, most of the related industrial factories have focused on the production quality to be accepted by customers, even a case study of the steamed bun factory. From the preliminary data analysis, it is found that the processing flow of the steamed bun production is still not efficient enough on the limited space. Accordingly, this study focuses on improving the efficiency of the steamed bun production of the case-study factory by using the principles of problem analysis, work study, and systematic layout planning (SLP). Also, the production simulation is conducted to demonstrate the comparison results between various options. The results show that the proposed alternative could reduce total moving distance and production time, resulting in increased production rate from 7.73 pieces per minute to 11.04 pieces per minute.

Keyword: Simulation, Plant layout, Efficiency, Steamed stuff bun.

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีการดำเนินธุรกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (Small and Medium Enterprises: SMEs) เกิดขึ้นมากมายตามการขยายตัวทางเศรษฐกิจ ซึ่งส่งผลให้เกิดการแข่งขันทางการค้าที่สูงขึ้นตามไปด้วย ไม่เว้นแม้แต่ในอุตสาหกรรมอาหาร อาทิเช่น การผลิตซาลาเปาที่มีการดำเนินงานภายในโรงงานอุตสาหกรรมครอบครัวขนาดเล็กที่มีการนำเครื่องจักรเข้ามาช่วยในการผลิต ซึ่งกำลังประสบปัญหาการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตเพื่อพัฒนาศักยภาพทางการแข่งขัน จึงได้รับความสนใจในการศึกษา

โดยในปัจจุบัน บริษัทกรณีศึกษาผลิตซาลาเปาที่มีชื่อเสียงมาอย่างยาวนาน เนื่องจากสูตรที่ใช้ในการผลิตเป็นสูตรที่มาจากมณฑลกว่างตุงประเทศจีนที่ตกทอดกันมาสู่รุ่นหลาน อีกทั้งยังได้รับเลือกให้เป็นสินค้า OTOP ได้รับการรับรองจากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา และมาตรฐานอาหารจากกระทรวงอุตสาหกรรม มีผลิตภัณฑ์ซาลาเปาที่ผลิตเพื่อจำหน่ายทั้งหมด 6 แบบ (ขนาดเท่ากัน) โดยมีไส้แตกต่างกัน ได้แก่ ซาลาเปาไส้หมูสับ ซาลาเปาไส้หมูแดง ซาลาเปาไส้ผัก ซาลาเปาไส้ถั่วดำ ซาลาเปาไส้ครีม และซาลาเปาไส้เผือกแปะก๊วย อย่างไรก็ตาม ในสายการผลิตมีพนักงาน 5 คน ใช้พื้นที่ในการผลิตขนาดประมาณ 105.17 ตารางเมตร ใช้เวลาผลิตประมาณ 10 ชั่วโมงต่อวัน และมีการผลิต 5 รอบต่อวัน ผลผลิตที่ควรจะได้เป็น 4,360 ลูกต่อวัน แต่สามารถผลิตได้ประมาณ 3,200 ลูกต่อวันเท่านั้น โดยผลิตรายการใช้พื้นที่จะได้เท่ากับ 30.427 ลูกต่อตารางเมตร ซึ่งจากการศึกษาเบื้องต้น พบว่า มีปัญหาเรื่องความไม่คล่องตัวของการไหลในกระบวนการผลิต ได้แก่ เกิดความล่าช้าเนื่องจากการรอคอยตรงจุดจอดรถขึ้นก่อนบรรจุซาลาเปาด้วยเวลารอคอยเฉลี่ย 19.3 นาที จากเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการผลิต 583.16 นาที ทำให้มีอัตราผลผลิต เท่ากับ 7.73 ลูกต่อนาที

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการปรับปรุงผังโรงงานใหม่โดยมุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พื้นที่ เนื่องจากผัง

การผลิตในปัจจุบัน หลายสถานียังอยู่ในตำแหน่งที่ไม่เหมาะสม เช่น ตำแหน่งของวัตถุดิบและตำแหน่งของเครื่องผสมแป้งอยู่ห่างกันในขณะที่กิจกรรมทั้ง 2 มีความสัมพันธ์ระดับสูง ในทำนองเดียวกัน สถานีนวดแป้งและสถานีขึ้นรูปที่มีความสัมพันธ์ระดับสูงได้ถูกจัดผังให้อยู่ห่างกันอีกด้วย เป็นต้น ดังนั้น การศึกษาวางผังโรงงานที่เหมาะสมกับระดับความสำคัญของกิจกรรมต่างๆ จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่จะทำให้บริษัทกรณีศึกษาสามารถดำเนินการผลิตซาลาเปาได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงมากขึ้น

2. ทบทวนวรรณกรรม

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาเพื่อปรับปรุงผังโรงงานและกำหนดวิธีการทำงานที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งถือเป็นประเด็นหนึ่งทางการบริหารจัดการผลิตที่ได้รับความสนใจจากหลายงานวิจัย ซึ่งมีการประยุกต์ใช้วิธีการจำลองสถานการณ์และเทคนิคการปรับปรุงการทำงานต่างๆ เช่น การปรับปรุงผังโรงงานและการจัดวางตำแหน่งเครื่องจักรใหม่เพื่อช่วยเพิ่มผลผลิต ลดเวลาการเคลื่อนย้ายและเวลารอคอยระหว่างการผลิต โดยใช้วิธีการจำลองสถานการณ์ที่มีการพัฒนาขึ้นทั้งหมด 4 แบบ [1] การหารูปแบบการลดความสูญเสียที่ยั่งยืน โดยใช้วิธีการวางผังอย่างมีระบบ (Systematic Layout Planning) และทฤษฎีกราฟ นอกจากนี้ ยังใช้วิธีการแลกเปลี่ยนแบบคู่ (Pairwise Exchange) ในการปรับปรุงรูปแบบที่ให้ค่าอัตราประสิทธิภาพที่ดีเพื่อพัฒนาคำตอบให้เหมาะสมยิ่งขึ้น [2] การออกแบบและวางผังโรงงานให้เหมาะสมกับสายการผลิต ข้อมูลทุกกลุ่มผลิตภัณฑ์ถูกรวบรวมและกำหนดผังโรงงานทางเลือกทั้งหมด 3 แบบโดยใช้วิธีการวางผังโรงงานอย่างมีระบบ (Systematic Layout Planning : SLP) และวิธีการกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytical Hierarchy Process: AHP) ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการตัดสินใจเลือกผังโรงงาน จากนั้นวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ของผังโรงงานทางเลือก สุดท้ายทำการประเมินและสรุปผังทางเลือกที่เหมาะสม [3] การ

ออกแบบผังโรงงานและปรับปรุงกระบวนการผลิตประตูไม้บานเลื่อน โดยประยุกต์ใช้หลักการวางผังโรงงานอย่างมีระบบ (SLP) และหลักปรับปรุงการทำงาน (ECRS) เพื่อลดเวลาการผลิตรวมต่อชุดให้น้อยลง โดยมีการใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์สำหรับการเปรียบเทียบผล ซึ่งพบว่าสามารถลดเวลาการทำงาน เวลาเฉลี่ยการเคลื่อนที่ และระยะเวลาการผลิตรวมลงได้ [4] การวางผังโรงงานแบบพลวัต (Dynamic Plant Layout) ที่มีการไหลแบบทิศทางเดียว (Unidirectional Flow) ได้รับการศึกษาและแก้ปัญหาโดยการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization) ที่มีการพิจารณาการแจกแจงโคชี (Cauchy Distribution) [5] การออกแบบผังโรงงานเพื่อเพิ่มกำลังการผลิตและลดเวลาในการเคลื่อนที่ โดยการวิเคราะห์ผังที่มีอยู่ ทำการออกแบบผังทางเลือก และประเมินผังโรงงานโดยใช้แบบจำลองด้วยการพิจารณา 2 เกณฑ์ คือ ต้นทุนและเวลา ผลการศึกษาพบว่า กำลังการผลิตเพิ่มขึ้น และช่วยลดต้นทุนในการจัดการวัสดุได้อีกด้วย [6] การศึกษาการปรับเปลี่ยนผังโรงงาน โดยใช้การจำลอง 3 มิติในบริษัทกรณีศึกษาในอุตสาหกรรมเป้าหมาย และการแสดงสมการประมาณพื้นที่ ผลที่ได้จากการศึกษามีประโยชน์ต่อผู้ผลิตในการแก้ปัญหาการวางผังการผลิตในปัจจุบัน [7]

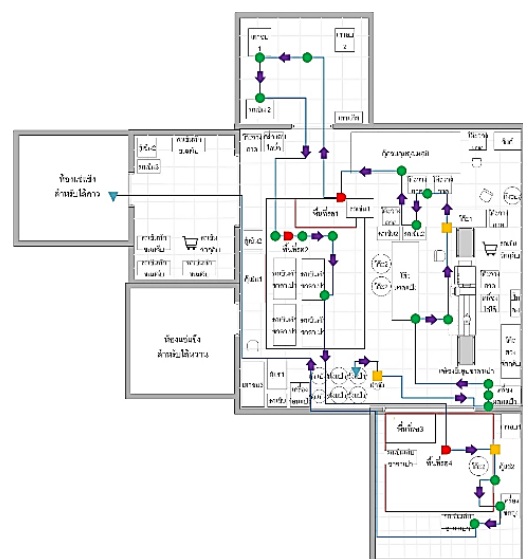
3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย 7 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การศึกษาสภาพการดำเนินงานในปัจจุบัน 2) การรวบรวมข้อมูล 3) การวิเคราะห์การแจกแจง 4) แนวคิดในการสร้างแบบจำลอง 5) การทดสอบแบบจำลอง 6) การหาจำนวนรอบที่เหมาะสม และ 7) การเสนอแนวทางการปรับปรุง โดยมีรายละเอียด ดังนี้

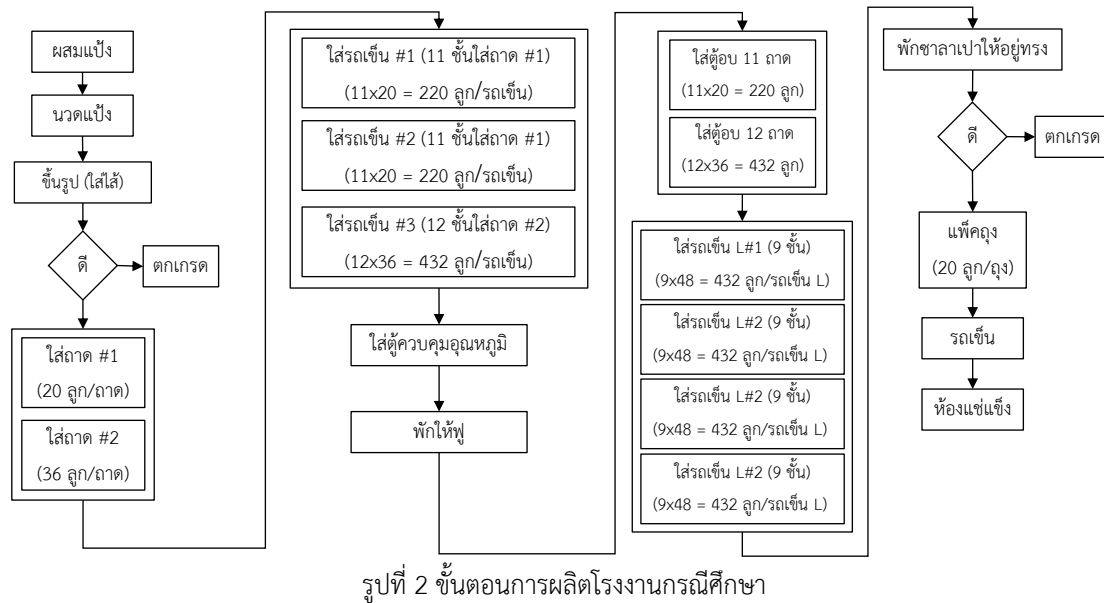
3.1 การศึกษาสภาพการดำเนินงานในปัจจุบัน

โรงงานกรณีศึกษาดำเนินการผลิตซาลาเปาด้วยพนักงานทั้งหมด 5 คน ภายในพื้นที่การผลิตประมาณ 105.17 ตารางเมตร ตามผังโรงงานที่แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยสถานีงานทั้งหมด 12 สถานี ตามขั้นตอนการ

ผลิตที่แสดงดังรูปที่ 2 โดยเริ่มต้นจากการนำแป้งมาชั่งน้ำหนัก นำแป้งไปผสมที่เครื่อง นำแป้งที่ผสมแล้วไปนวด นำแป้งที่นวดแล้วไปขึ้นรูปเป็นซาลาเปา นำซาลาเปาไปตรวจสอบน้ำหนัก จากนั้นนำซาลาเปาไปเรียงในถาดและนำไปใส่รถเข็น นำไปยังเครื่องควบคุมอุณหภูมิและทำให้ฟู และนำไปพักรอไว้ในพื้นที่พักซาลาเปา ขั้นตอนถัดไปรถเข็นจะถูกย้ายไปยังเตาอบ ซาลาเปาแต่ละถาดจะถูกนำเข้าเตาอบ หลังจากการอบตามกระบวนการแล้ว ซาลาเปาแต่ละถาดจะถูกจัดเรียงในรถเข็นและย้ายไปยังพื้นที่พักซาลาเปา หลังจากพักซาลาเปาให้อยู่ทรงแล้ว นำใส่ตะแกรงและรถเข็นเพื่อย้ายซาลาเปาไปยังพื้นที่พักซาลาเปา ซาลาเปาบนรถเข็นจะได้รับการคัดแยก บรรจุใส่ถุง และย้ายไปยังรถเข็นสำหรับเก็บซาลาเปา จากนั้นย้ายรถเข็นดังกล่าวไปยังห้องแช่แข็งเพื่อเก็บรักษารอการขนส่งไปยังลูกค้าต่อไป ซึ่งกระบวนการผลิตทั้งหมดใช้เวลาไม่ต่ำกว่า 10 ชั่วโมงต่อวัน มีการผลิต 5 รอบต่อวัน ตั้งแต่ 8.00 น. ถึง 18.00 น. ดังนั้น ผลผลิตที่ควรจะได้รับ คือ 4,360 ลูกต่อวัน แต่ผลิตได้ 3,200 ลูกต่อวัน เนื่องจากเกิดคอขวด (Bottleneck) ในสายการผลิตตรงตำแหน่งการเรียงซาลาเปาใส่รถเข็นเพื่อนำซาลาเปาไปบรรจุใส่ถุง ซึ่งมีจำนวนซาลาเปารอคอยโดยเฉลี่ย 152.12 ลูก และมีเวลารอคอยเฉลี่ย 19 นาที



รูปที่ 1 แผนผังโรงงานกรณีศึกษา



3.2 การรวบรวมข้อมูล

งานวิจัยนี้ ได้รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องในช่วงเดือนกันยายน 2561 - กุมภาพันธ์ 2562 ตั้งแต่ข้อมูลเวลาการทำงานของแต่ละสถานีนงาน จำนวนพนักงานและจำนวนเครื่องจักรในแต่ละสถานีนงาน ขนาดพื้นที่ของโรงงาน ไปจนถึงจำนวนผลผลิตที่ได้ในแต่ละวัน

3.3 การวิเคราะห์การแจกแจง

การสร้างแบบจำลองสถานการณ์ที่เสมือนจริง ข้อมูลการผลิตที่ใช้ประกอบการสร้างโมเดล มาจากค่าการแจกแจงที่เหมาะสม

ตารางที่ 1 การแจกแจงข้อมูลที้นำมาใช้ในแบบจำลอง

ข้อมูล	สูตรคำนวณการแจกแจง
เครื่องผสมแป้ง	UNIF(720, 867)
การนวดแป้ง	UNIF(720, 867)
การตรวจสอบน้ำหนัก	$1.39 + \text{ERLA}(0.0714, 7)$
หยิบชالاเปาใส่ถาด	$2.05 + \text{ERLA}(0.0714, 7)$
หยิบถาดชالاเปา 1 ถาด	$2.85 + \text{ERLA}(0.0714, 7)$
หยิบถาดใส่รถเข็น	$5.46 + \text{ERLA}(0.0714, 7)$
รถเข็นถาด	$3.2 + \text{ERLA}(0.0714, 7)$
หยิบชالاเปา 20 ลูกใส่ถุง	$1.04 + \text{LOGN}(1.02, 0.547)$
การชั่งถุงชالاเปา	$5 + \text{ERLA}(0.0714, 7)$

ดังนั้น การศึกษานี้ได้ทำการเก็บข้อมูล ณ สถานประกอบการ โดยการจับเวลาการทำงานจริง จำนวน 50 ค่าในแต่ละสถานีนงานตามขั้นตอนการผลิต และวิเคราะห์การแจกแจงด้วยวิธี Chi-squared test โดยเครื่องมือของโปรแกรมสำเร็จรูปอาร์โนน่า ได้แก่ ตัววิเคราะห์ข้อมูลรับเข้า (Input Analyzer) ได้ถูกนำมาใช้ในการประมวลผลข้อมูลเวลาการผลิตในแต่ละจุดของโรงงาน ดังตารางที่ 1

3.4 แนวคิดในการสร้างแบบจำลอง

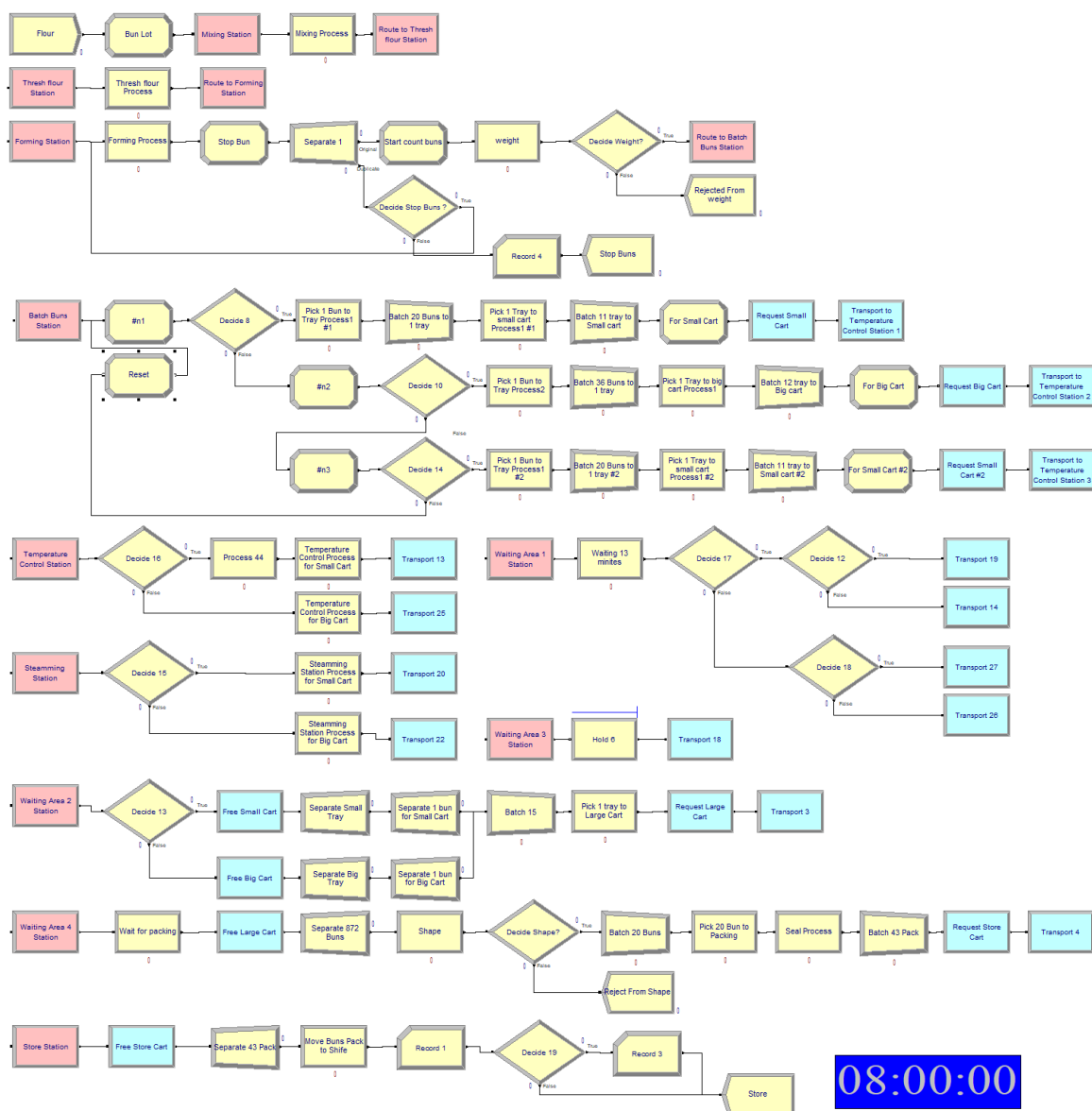
จากการศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลสภาพปัจจุบันของกระบวนการผลิตชالاเปา โดยเริ่มจากการผสมแป้ง การนวดแป้ง การขึ้นรูปชالاเปา การตรวจสอบน้ำหนักชالاเปา การย้ายชالاเปาลงถาด การย้ายถาดชالاเปาไปที่รถเข็น การนำรถเข็นไปเข้าตู้ควบคุมอุณหภูมิ การพักชالاเปาครั้งที่ 1 (เพื่อให้ชالاเปาขึ้นฟู) การอบชالاเปา การย้ายชالاเปาจากรถเข็นไปยังรถพักชالاเปา การพักชالاเปาครั้งที่ 2 (เพื่อให้ชالاเปาอยู่ทรง) การตรวจสอบรูปทรงของชالاเปา การแพ็คชالاเปาใส่ถุง และการจัดเก็บชالاเปาที่ห้องแช่แข็ง

แบบจำลองสถานการณ์การผลิตจริงได้ถูกสร้างขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3 มีจำนวนทั้งหมด 106 โมดูล (Modules) โดยกำหนดให้แบ่งเป็นวัตถุที่สนใจในระบบ (Entity) ซึ่งจะถูกผสมทุกๆ 1 ชั่วโมง จึงได้จำนวนชالاเปารอบละ 872

ลูก ในขณะที่สถานีนงานหลักมีทั้งหมด 12 สถานี ได้แก่ (1) สถานีผสมแป้ง (2) สถานีนวดแป้ง (3) สถานีขึ้นรูปซาลาเปา (4) สถานีรถเข็นถาด (5) สถานีพักซาลาเปา 1 (6) สถานีพักซาลาเปา 2 (7) สถานีพักซาลาเปา 3 (8) สถานีพักซาลาเปา 4 (9) สถานีควบคุมอุณหภูมิซาลาเปา (10) สถานีอบซาลาเปา (11) สถานีแพ็คถุงซาลาเปา และ (12) สถานีแช่แข็งซาลาเปา ซึ่งแต่ละสถานีจะมีจำนวนพนักงานไม่เท่ากัน บางสถานีไม่มีเครื่องจักร และการ

เคลื่อนย้ายระหว่างสถานีจะมีระยะทางและเส้นทางการเดินที่ไม่เท่ากัน

ในการสร้างแบบจำลองสำหรับสถานการณ์การผลิต ปัจจุบัน พนักงานมีค่าอัตราประโยชน์ร้อยละ 32 เครื่องอบซาลาเปาเครื่องเล็กมีค่าอัตราประโยชน์ร้อยละ 27 ในขณะที่เครื่องอบซาลาเปาเครื่องใหญ่มีค่าอัตราประโยชน์ร้อยละ 13 ซึ่งจะเห็นว่า เครื่องเล็กได้รับการใช้งานมากกว่าเครื่องใหญ่ 2 เท่า



รูปที่ 3 แบบจำลองการผลิตปัจจุบัน

3.5 การทดสอบแบบจำลอง

การตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลอง ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การทวนสอบแบบจำลอง (Verification) คือ การตรวจสอบว่าแบบจำลองในกรอบความคิด (Conceptual Model) ตรงกับแบบจำลองสถานการณ์ในคอมพิวเตอร์หรือไม่ และ 2) การตรวจสอบแบบจำลองอย่างละเอียด (Validation) คือ การทดสอบว่าแบบจำลองเป็นตัวแทนของพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของระบบได้จริงหรือไม่ โดยทำการเปรียบเทียบซ้ำๆ ระหว่างตัวแบบจำลองกับระบบจริง ซึ่งการศึกษานี้ ทำการทวนสอบโดยการนำผลที่ได้จากการรันแบบจำลองตามจำนวนรอบที่เหมาะสม ได้แก่ ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการผลิตหนึ่งวัน และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ไปเปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการผลิตจริง 600 นาที และทำการทดสอบทางสถิติ (t -test) ซึ่งจากการคำนวณได้ค่า $t = -0.701$ (ค่าจากตาราง $t = 2.086$) แสดงให้เห็นว่า ค่าที่ได้จากสถานการณ์จริงและแบบจำลองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ ยังมีการตรวจสอบแบบจำลองอย่างละเอียด ด้วยการวิเคราะห์การไหลของซาลาเปาในแต่ละ Modules ที่สร้างขึ้นในแบบจำลอง เพื่อให้แน่ใจว่าตรงกับกระบวนการผลิตซาลาเปาจริงในสถานการณ์ปัจจุบัน

3.6 การหาจำนวนรอบที่เหมาะสม

การสร้างและการตรวจสอบแบบจำลองสถานการณ์ในบทความนี้ กำหนดระดับความแม่นยำของระบบที่ 0.05 และกำหนดจำนวนรอบของการประมวลผลครั้งแรก คือ 10 รอบ โดยคำนวณจำนวนรอบในการประมวลผลที่เหมาะสมจากสมการดังต่อไปนี้

$$n \cong n_0 \frac{h_0^2}{h^2}$$

โดยที่

n คือ จำนวนรอบ

n_0 คือ จำนวนรอบของการประมวลผลครั้งแรก

h คือ ค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้

h_0 คือ ค่าความผิดพลาดจากการประมวลผลครั้งแรก

ผลจากโปรแกรมสำเร็จรูปจะได้ค่า h_0 เท่ากับ 41.49 ค่า h เท่ากับ 29.011 ซึ่งมาจาก 5% ของค่าเฉลี่ยที่รันโมเดลในรอบแรก ($mean = 580.22$) ค่า n_0 เท่ากับ 10 ดังนั้น เมื่อแทนค่าทั้งหมดในสูตรการคำนวณจะได้

$$n = 10 \times (41.49^2 / 29.001^2)$$

$$n = 20.45 \approx 21 \text{ รอบ}$$

จากครึ่งช่วงความเชื่อมั่น (Haft width) จำนวนรอบทำซ้ำเบื้องต้นมีค่าน้อยกว่าช่วงความเชื่อมั่นที่กำหนดไว้ ดังนั้น จำนวนรอบทำซ้ำ 21 รอบเพียงพอแล้ว ซึ่งค่าจริงที่เก็บข้อมูลมามีค่าเท่ากับ 613.75 และเมื่อคำนวณขอบล่าง (Lower bound) และขอบบน (Upper bound) ของการรัน ได้ขอบล่างเท่ากับ 533.02 และได้ขอบบนเท่ากับ 633.3 จะเห็นได้ว่าค่าจริงอยู่ในช่วงระหว่างขอบบนและขอบล่าง แสดงว่าค่าจริงกับค่าในโมเดลเท่ากันทางสถิติ

3.7 การเสนอแนวทางการปรับปรุง

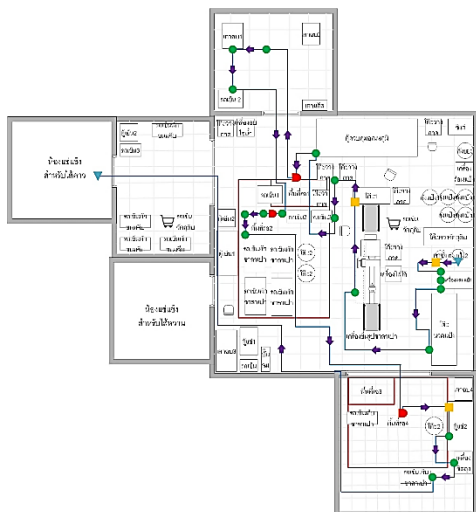
แนวทางการปรับปรุงที่นำเสนอในการศึกษานี้ ประกอบด้วย 2 ประเด็นหลักๆ คือ การปรับปรุงผังโรงงาน และการปรับเปลี่ยนวิธีการทำงาน โดยสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

1) การปรับปรุงผังโรงงาน มุ่งเน้นการปรับเปลี่ยนตำแหน่งการวางเครื่องจักรและสถานีงาน ซึ่งสามารถกำหนดแนวทางการปรับปรุงผังโรงงานได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบแรก (ผังทางเลือกที่ 1) มุ่งเน้นการวางผังการผลิตแบบเส้นตรงตามแนวตั้ง ดังรูปที่ 4 และรูปแบบที่ 2 (ผังทางเลือกที่ 2) มุ่งเน้นการวางผังการผลิตแบบเส้นตรงตามแนวนอน ดังรูปที่ 5 ดังนั้น จึงมีผังทางเลือกทั้งหมด 3 ผัง ได้แก่ (1) ผังโรงงานปัจจุบัน (2) ผังทางเลือกที่ 1 และ (3) ผังทางเลือกที่ 2

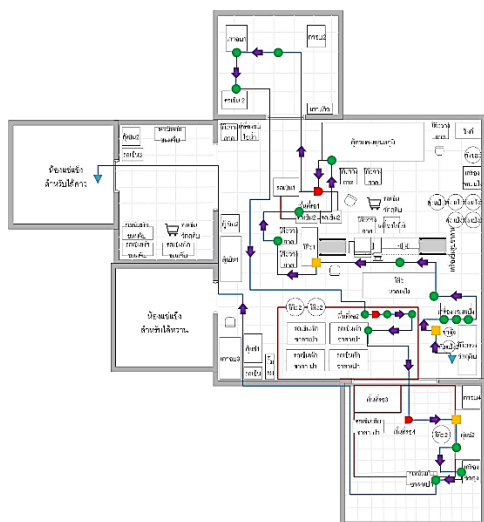
2) การปรับวิธีการทำงาน มุ่งเน้นการปรับจำนวนทรัพยากร เช่น จำนวนอุปกรณ์และคนงานในกระบวนการผลิตให้เหมาะสม ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้ ส่วนที่ 1 คือ การปรับเพิ่ม/ลดจำนวนรถเข็นซาลาเปา เพื่อให้ล้อรถประโยชน์ของเครื่องอบใหญ่เพิ่มขึ้นและใกล้เคียงกับเครื่องอบเล็ก โดยรูปแบบที่ 1 กำหนดให้มี

ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 เดือน พฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2563

รถเข็นซาลาเปาค้นเล็ก จำนวน 2 คัน และรถเข็นซาลาเปาค้นใหญ่ จำนวน 2 คัน ในขณะที่รูปแบบที่ 2 กำหนดให้มีรถเข็นซาลาเปาค้นเล็ก 1 คัน และรถเข็นซาลาเปาค้นใหญ่ 1 คัน



รูปที่ 4 ผังโรงงานทางเลือกที่ 1



รูปที่ 5 ผังโรงงานทางเลือกที่ 2

ส่วนที่ 2 คือ การปรับเพิ่ม/ลดจำนวนพนักงานในสายการผลิต เพื่อเพิ่มอรรถประโยชน์ของพนักงาน โดยรูปแบบที่ 1 กำหนดให้มีพนักงาน 5 คน รูปแบบที่ 2 กำหนดให้มีพนักงาน 4 คน และรูปแบบที่ 3 กำหนดให้มีพนักงาน 3 คน

ดังนั้น จากทางเลือกทั้งหมดจึงสามารถสรุปแผนการปรับปรุงการทำงานได้ ทั้งหมด 27 แผน (รวมรูปแบบปัจจุบัน) ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แผนการปรับปรุงการทำงาน

แผนการปรับปรุง	รูปแบบผังโรงงาน	จำนวนรถเข็น		จำนวนพนักงาน
		รถเล็ก	รถใหญ่	
1	ผังปัจจุบัน	2	1	5
2	ผังปัจจุบัน	2	1	4
3	ผังปัจจุบัน	2	1	3
4	ผังทางเลือก 1	2	1	5
5	ผังทางเลือก 1	2	1	4
6	ผังทางเลือก 1	2	1	3
7	ผังทางเลือก 2	2	1	5
8	ผังทางเลือก 2	2	1	4
9	ผังทางเลือก 2	2	1	3
10	ผังปัจจุบัน	2	2	5
11	ผังปัจจุบัน	2	2	4
12	ผังปัจจุบัน	2	2	3
13	ผังทางเลือก 1	2	2	5
14	ผังทางเลือก 1	2	2	4
15	ผังทางเลือก 1	2	2	3
16	ผังทางเลือก 2	2	2	5
17	ผังทางเลือก 2	2	2	4
18	ผังทางเลือก 2	2	2	3
19	ผังปัจจุบัน	1	1	5
20	ผังปัจจุบัน	1	1	4
21	ผังปัจจุบัน	1	1	3
22	ผังทางเลือก 1	1	1	5
23	ผังทางเลือก 1	1	1	4
24	ผังทางเลือก 1	1	1	3
25	ผังทางเลือก 2	1	1	5
26	ผังทางเลือก 2	1	1	4
27	ผังทางเลือก 2	1	1	3

4. ผลการทดลอง

การศึกษานี้ได้ทำการทดลองการจำลองสถานการณ์ตามแนวทางการแก้ปัญหาที่นำเสนอ ดังตารางที่ 2 ทั้งหมด 27 แผนการ (Scenarios) ด้วยคอมพิวเตอร์ที่มีขนาด 2.60 GHz สำหรับ CPU และ 12.0 GB สำหรับ RAM โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปอาร์โนว่า ซึ่งได้แสดงผลลัพธ์ของแต่ละแผนการในตารางที่ 3 ตามตัวชี้วัดที่สำคัญ ได้แก่

เวลาผลิตรวม (นาที) อรรถประโยชน์เฉลี่ยพนักงาน (%)
อรรถประโยชน์เฉลี่ยเครื่องอบเล็ก (%) อรรถประโยชน์
เฉลี่ยเครื่องอบใหญ่ (%) และอัตราการผลิต (ลูกต่อนาที)

ตารางที่ 3 ผลลัพธ์จากแบบจำลองในแผนต่างๆ

แผนการ ปรับปรุง	เวลาผลิต [นาที]	อัตราผลิต [ลูก/นาที]	เครื่องอบ [%]		พนักงาน [%]
			ใหญ่	เล็ก	
1	583.16	7.73	0.13	0.27	0.32
2	592.13	7.69	0.13	0.26	0.39
3	617.28	7.34	0.13	0.25	0.50
4	576.74	7.80	0.13	0.27	0.32
5	600.34	7.45	0.13	0.26	0.38
6	620.21	7.31	0.13	0.25	0.50
7	625.85	7.41	0.13	0.26	0.30
8	601.93	7.44	0.13	0.26	0.38
9	598.57	7.48	0.13	0.26	0.51
10	591.81	11.31	0.26	0.26	0.44
11	620.60	10.83	0.25	0.25	0.53
12	664.46	10.02	0.23	0.23	0.65
13	602.38	11.21	0.26	0.26	0.44
14	602.09	11.04	0.25	0.25	0.54
15	655.08	10.12	0.23	0.23	0.66
16	591.77	11.30	0.26	0.26	0.44
17	632.50	10.66	0.25	0.25	0.52
18	672.57	10.06	0.23	0.23	0.65
19	553.01	8.27	0.19	0.19	0.36
20	566.63	8.08	0.19	0.19	0.44
21	614.77	7.47	0.17	0.17	0.54
22	516.26	8.93	0.21	0.21	0.39
23	530.21	8.71	0.20	0.20	0.47
24	579.66	7.97	0.18	0.18	0.57
25	531.21	8.70	0.20	0.20	0.38
26	537.37	8.60	0.20	0.20	0.46
27	585.15	7.92	0.18	0.18	0.57

นอกจากนี้ ยังมีการประเมินทางเลือกทั้งการปรับปรุง
ผังโรงงาน การเพิ่มลดจำนวนรถเข็น และการปรับเพิ่มลด
จำนวนพนักงาน โดยทำการหาเวลาเฉลี่ยการผลิตรวมที่
มุ่งเน้นให้มีความสนใจในแต่ละรูปแบบ และได้แสดงผลการ
ประเมินผังทางเลือกที่มีการเปรียบเทียบผังโรงงานทั้ง 3
รูปแบบจากผลลัพธ์ทุกแผนการ (ดังตารางที่ 4) การ
เปรียบเทียบจำนวนรถเข็นทั้ง 3 รูปแบบจากผลลัพธ์ทุก

แผนการ (ดังตารางที่ 5) และการประเมินจำนวนพนักงาน
ทั้ง 3 รูปแบบจากผลลัพธ์ทุกแผนการ (ดังตารางที่ 6) โดย
ผลลัพธ์ทั้งหมดที่แสดงในตารางที่ 4 – 6 ได้ผ่านการทำ
การทดสอบความแปรปรวน (ANOVA) ที่ระดับความ
เชื่อมั่น 95% และ p-value = 0.05 เพื่อใช้ประกอบการ
วิเคราะห์ผลทางสถิติ

ตารางที่ 4 การประเมินผังทางเลือก-ผังโรงงาน

ทางเลือก	ผังปัจจุบัน	ผังทางเลือก 1	ผังทางเลือก 2
เวลาผลิตรวม (นาที)	600.40±14.22	587.00±14.35	597.40±16.60
อัตราการผลิต (ลูก/นาที)	8.75±0.28	8.95±0.28	8.84±0.29

ตารางที่ 5 การประเมินผังทางเลือก-จำนวนรถเข็น

ทางเลือก	รูปแบบ ปัจจุบัน	รูปแบบที่ 1 (เพิ่มรถเข็นใหญ่)	รูปแบบที่ 2 (ลดรถเข็นเล็ก)
เวลาผลิตรวม (นาที)	601.80±17.18	625.90±15.94	557.10±9.27
Av. Utilization เครื่องอบเล็ก	0.259±0.007	0.247±0.008	0.191±0.003
Av. Utilization เครื่องอบใหญ่	0.129±0.003	0.247±0.006	0.191±0.003
อัตราการผลิต (ลูก/นาที)	7.52±0.20	10.73±0.26	8.29±0.13

ตารางที่ 6 การประเมินผังทางเลือก-จำนวนพนักงาน

ทางเลือก	รูปแบบ ปัจจุบัน	รูปแบบที่ 1 (พนักงาน 4 คน)	รูปแบบที่ 2 (พนักงาน 3 คน)
เวลาผลิตรวม (นาที)	574.70±15.12	587.10±14.25	623.10±15.10
Av. Utilization พนักงาน	0.376±0.011	0.457±0.013	0.573±0.015
อัตราการผลิต (ลูก/นาที)	9.18±0.30	8.95±0.28	8.41±0.25

จากตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่า ผังทางเลือกที่ 1 มี
ค่าเฉลี่ยของเวลาการผลิตรวม คือ 587.00 นาที ซึ่งมีเวลา
การผลิตเฉลี่ยที่มีค่าน้อยที่สุด อย่างไรก็ตาม การทดสอบทาง
สถิติ พบว่า ผังทางเลือกทั้งหมดให้ผลลัพธ์ไม่แตกต่างกัน
อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น ควรมีการประยุกต์ใช้ผังทางเลือก
ที่ 1 ร่วมกับแนวทางการปรับปรุงอื่นๆ

จากตารางที่ 5 การทดสอบทางสถิติ พบว่า การปรับปรุงจำนวนรถเข็นทุกรูปแบบให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยการปรับจำนวนรถเข็นรูปแบบที่ 1 มีค่าอัตราประโยชน์เฉลี่ยของเครื่องอบใหญ่เพิ่มขึ้นและมีอัตราการผลิตที่สูงที่สุด แต่ต้องลงทุนเพิ่มสำหรับรถเข็นคันใหญ่ 1 คัน และเครื่องผสมแบ่งที่รองรับแบ่งจำนวน 31 กิโลกรัมด้วย อย่างไรก็ตาม การปรับจำนวนรถเข็นรูปแบบที่ 2 ไม่ต้องลงทุนเพิ่มในขณะที่ยังมีค่าอัตราประโยชน์เฉลี่ยของเครื่องอบใหญ่เพิ่มขึ้น ดังนั้น การเลือกรูปแบบจำนวนรถเข็นจะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของแต่ละสถานการณ์

จากตารางที่ 6 การทดสอบทางสถิติ พบว่า การปรับปรุงจำนวนพนักงานทุกรูปแบบให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน โดยอัตราประโยชน์เฉลี่ยของพนักงานในรูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้น มีอัตราการผลิตที่ใกล้เคียงกัน จึงต้องพิจารณาที่เวลาการผลิตรวม ซึ่งรูปแบบที่ 1 มีเวลาการผลิตรวมน้อยกว่ารูปแบบที่ 2 ประมาณ 36 นาที และสามารถลดพนักงานได้ 1 คนจากรูปแบบปัจจุบัน ดังนั้น การปรับจำนวนพนักงานรูปแบบที่ 1 จึงเป็นรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดจากรูปแบบทั้งหมดที่ทำการศึกษา

5. สรุปและเสนอแนะ

การจำลองสถานการณ์การผลิตชาลาเปาที่สร้างขึ้นสำหรับศึกษานี้ ได้รับการตรวจสอบแล้วว่าสามารถนำมาใช้จำลองแทนระบบจริงได้ เนื่องจากผลลัพธ์จากการทดสอบไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากนี้ การศึกษาผังโรงงานที่เหมาะสมสำหรับการผลิตชาลาเปากรณีศึกษา ได้ออกแบบแนวทางการปรับปรุงทั้งหมด 27 ทางเลือก โดยทางเลือกที่ 14 ได้แก่ การใช้ผังทางเลือกที่ 1 รถเข็นคันเล็ก 2 คัน รถเข็นคันใหญ่ 2 คัน พนักงานจำนวน 4 คน ซึ่งทำให้เวลาในการผลิตรวมเพิ่มขึ้น 18.93 นาที กลายเป็น 602.09 นาที ผลผลิตเพิ่มขึ้น 2,160 ลูกต่อวัน กลายเป็น 6,520 ลูกต่อวัน ค่าอัตราประโยชน์เฉลี่ยของเครื่องอบเล็กและใหญ่เท่ากัน คือ 0.25 ค่าอัตราประโยชน์เฉลี่ยของพนักงาน

เพิ่มขึ้น 0.22 กลายเป็น 0.54 และอัตราการผลิตประมาณ 11.04 ลูกต่อนาที ซึ่งทางเลือกนี้ มีการปรับผังโรงงานที่อาจส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายในส่วนอื่นๆ เพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ดี หากพิจารณาเฉพาะการใช้ผังเดิม ที่มีพนักงาน 5 คน จะมี 2 ทางเลือกที่น่าสนใจ คือ (1) ทางเลือกที่ 10 ได้แก่ การใช้รถเข็นคันเล็ก 2 คัน และรถเข็นคันใหญ่ 2 คัน ซึ่งทำให้เวลาในการผลิตรวมเพิ่มขึ้น 9 นาที กลายเป็น 591.81 นาที ผลผลิตเพิ่มขึ้น 2,160 ลูกต่อวัน กลายเป็น 6,520 ลูกต่อวัน และอัตราการผลิตประมาณ 11.31 ลูกต่อนาที ซึ่งในกรณีนี้ เครื่องผสมแบ่งจะต้องเพิ่มปริมาณแบ่งจาก 21 กิโลกรัม เป็น 31 กิโลกรัม ต่อรอบด้วย (2) ทางเลือกที่ 19 ได้แก่ การใช้รถเข็นคันเล็ก 1 คัน และรถเข็นคันใหญ่ 1 คัน ซึ่งทำให้เวลาในการผลิตรวมลดลง 38.8 นาที กลายเป็น 553.01 นาที ผลผลิตเพิ่มขึ้น 204 ลูกต่อวัน กลายเป็น 4,564 ลูกต่อวัน และอัตราการผลิตประมาณ 8.27 ลูกต่อนาที

ดังนั้น การประยุกต์ใช้ทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ในแต่ละสถานการณ์ที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งสามารถสรุปได้ ดังนี้ 1) การปรับปรุงกรณีใช้ผังแบบปัจจุบัน ต้องซื้อรถเข็นขนาดใหญ่เพิ่ม 1 คัน จะทำให้มีรถเข็นทั้งหมด 2 คันเล็ก และ 2 คันใหญ่ โดยจะต้องเพิ่มการผสมแบ่งจาก 21 กิโลกรัม เป็น 31 กิโลกรัม (ทางเลือกที่ 10) หรือกำหนดให้มีการใช้รถเข็นใหญ่และเล็กอย่างละ 1 คัน (ทางเลือกที่ 19) 2) การปรับปรุงกรณีใช้ผังแบบใหม่ ต้องใช้ผังทางเลือกที่ 1 ซื้อรถเข็นขนาดใหญ่เพิ่ม 1 คัน ลดคนงานเหลือ 4 คน (ทางเลือกที่ 14)

สามารถสรุปผลได้ว่า ความไม่คล่องตัวของการไหลจากผังแบบเดิมที่มีเวลารอคอยเฉลี่ย 19.3 นาที และอัตราผลผลิต 7.73 ลูกต่อนาที จะสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ในกรณีไม่ปรับเปลี่ยนผังด้วยทางเลือกที่ 10 ที่มีเวลารอคอยเฉลี่ย 16.42 นาที และอัตราผลผลิต 11.31 ลูก/นาที หรือด้วยทางเลือกที่ 19 ที่มีเวลารอคอยโดยเฉลี่ย 14.58 นาที และอัตราผลผลิต 8.27 ลูก/นาที ในขณะที่ กรณีปรับเปลี่ยนผังใหม่ด้วยทางเลือกที่ 14 มีเวลารอคอยโดย

เฉลี่ย 19.38 นาที โดยสามารถผลิตได้มากขึ้นในอัตรา
ผลผลิต 11.04 ลูก/นาที

งานวิจัยในลำดับถัดไป ควรให้ความสำคัญต่อการ
พัฒนาคนงานให้มีความสามารถในการทำงานได้
หลากหลาย (Multitasking skill) เพื่อให้สามารถทำงาน
ทดแทนกันได้ นอกจากนี้ การเพิ่มอรรถประโยชน์
(Utilization) ของเตาอบ ถือเป็นอีกเรื่องหนึ่งที่ควรมุ่งเน้น
ศึกษา แต่จะต้องมีการเพิ่มศักยภาพขีดความสามารถของ
การผลิตในส่วนอื่นๆ ด้วย เช่น การใช้ระบบอัตโนมัติใน
การเรียงกระดาซองชาลาเปาแทนการทำงานโดยคน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัทกรณีศึกษาที่ให้ความอนุเคราะห์
ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ และขอขอบคุณคุณสุทธิมนต์พร
เขาวนชัยวงศ์ และคุณสุรัชฎาภรณ์ เนื่องไวยยศ ที่ช่วยเก็บ
รวบรวมข้อมูลสำหรับการศึกษา นอกจากนี้ ขอขอบคุณ
กลุ่มวิจัยการจัดการการผลิตและอุตสาหกรรม คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้
การสนับสนุน

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] สมภัสสร เอื้ออารีมิตร และ ธาตุทัศน์ โมกขมรรคกุล,
“การปรับปรุงผังโรงงานโดยใช้แบบจำลอง
สถานการณ์: กรณีศึกษาของโรงงานผลิตเสื้อผ้า
สำเร็จรูป,” *การประชุมวิชาการด้านการวิจัย
ดำเนินงานแห่งชาติประจำปี 2551*, 2551, หน้า
175-183.
- [2] Y. Ojaghi, A. Khademi, NM. Yusof, NG. Renani
and SAHS. Hassan, “Production Layout
Optimization for Small and Medium Scale
Food Industry,” *Procedia CIRP*, vol. 26, pp.
247-251, 2015.
- [3] ลักขพล อุปะทะ, “การออกแบบและวางผังโรงงาน
ของ ห้างหุ้นส่วนจำกัด ที.ที.เอ็น.สแตนเลส,”

วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชา
การจัดการวิศวกรรม, มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2558.

- [4] กฤต จันทรสมัย และ อรุมา ลาสุนนท์, “การ
ออกแบบผังโรงงานและปรับปรุงกระบวนการผลิต
ประตูไม้บานเลื่อน,” *วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร:
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, ปีที่ 25 (ฉบับที่ 3),
หน้าที่ 146-155, 2560.
- [5] T. Jamrus and C. Chamnanlor, “Dynamic
Unidirectional Flow Path Design Problem
with Hybrid Particle Swarm Optimization,”
*International Conference on Simulation and
Modelling*, Pattaya, Chonburi, 2017.
- [6] D. Suhardini, W. Septiani and S. Fauziah,
“Design and Simulation Plant Layout Using
Systematic Layout Planning,” *IOP Conf. Ser.
Mater. Sci. Eng.*, vol. 277, pp. 1-8, 2017.
- [7] GMN. Chidambaram and S. Shunmugarajan,
“Comparison of Flexsim and Delmia
simulation software to reduce current
manufacturing layout planning problem,”
Int. J. Eng. Res., vol. 9, pp. 1706-1739. 2018.

การไพโรไลซิสแบบเร็วของถ่านทอรรีไฟด์จากไม้กระถินยักษ์
ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบฟอง
Fast Pyrolysis of Torrefied *Leucaena leucocephala* Wood
in a Bubbling Fluidised-Bed Reactor

นันท์ปรีชา สิงห์ทอง¹ นวรงค์ ชลลคุป² อติศักดิ์ ปัตติยะ^{3*}

¹นักศึกษาปริญญาโท ³รองศาสตราจารย์ หน่วยปฏิบัติการวิจัยพลังงานชีวภาพและทรัพยากรหมุนเวียน
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

²นักวิจัย ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ 114 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถนนพหลโยธิน

ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

Nanthapreecha Singthong¹ Nuwong Chollacoop² Adisak Pattiya^{3*}

¹Student ³Associate Professor, Bio-Energy and Renewable Resources Research Unit, Faculty of
Engineering, Mahasarakham University, Khamriang, Kantharawichai, Maha Sarakham, 44150

²Researcher, National Metal and Materials Technology Center (MTEC),

114 Thailand Science Park, Paholyothin Rd., Klong 1, Klong Luang, Pathumthani, 12120

*Corresponding author: Email: adisak_pattiya@yahoo.com

(Received: January 17, 2020; Accepted: June 2, 2020)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการใช้กระบวนการทอรรีแฟกชันเพื่อเตรียมไม้กระถินยักษ์ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว โดยกระบวนการทอรรีแฟกชันทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลเพื่อผลิตถ่านทอรรีไฟด์ จากนั้นนำถ่านทอรรีไฟด์ที่ได้ไปใช้เป็นวัตถุดิบในเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเร็วชนิดฟลูอิดซ์เบดแบบฟองเพื่อผลิตไบโอออยล์ ถ่านชาร์ และแก๊ส อุณหภูมิทอรรีแฟกชันที่ใช้มี 5 ระดับ ได้แก่ 240 260 280 300 และ 320 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าช่วงอุณหภูมิดังกล่าวให้ปริมาณผลได้ของถ่านทอรรีไฟด์ร้อยละ 50-98 ซึ่งสอดคล้องกับระดับที่อุณหภูมิสูง ไบโอออยล์ที่ผลิตได้ในขั้นตอนไพโรไลซิสแบบเร็วแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ ไบโอออยล์หนักและไบโอออยล์เบา ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์รวมลดลงจากร้อยละ 69 เมื่อใช้ชีวมวลที่ไม่ผ่านการทอรรีแฟกชัน เป็นร้อยละ 16-64 เมื่อใช้ถ่านทอรรีไฟด์ที่อุณหภูมิ 240-320 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามไบโอออยล์หนักกลับพบว่ามีปริมาณที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 30 เป็นสูงสุดร้อยละ 33 เมื่อใช้ถ่านทอรรีไฟด์ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณผลได้ทางพลังงานของไบโอออยล์ส่วนนี้จากร้อยละ 34 เป็น 38 งานวิจัยนี้ได้ค้นพบประเด็นที่น่าสนใจเกี่ยวกับการนำไม้กระถินยักษ์มาผ่านกระบวนการทอรรีแฟกชันที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส ว่าสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงพลังงานของการไพโรไลซิสแบบเร็วให้ดีขึ้นได้ในแง่ของการแปลงพลังงานร้อยละ 65 ของชีวมวลเริ่มต้นให้อยู่ในรูปของเชื้อเพลิงเหลวและเชื้อเพลิงแข็งชีวภาพได้

คำสำคัญ: ชีวมวล ไพโรไลซิสแบบเร็ว ฟลูอิดซ์เบด ทอรรีแฟกชัน

ABSTRACT

In this work, torrefaction was proposed as a mean to pretreat *Leucaena leucocephala* wood prior to fast pyrolysis process. Torrefaction was carried out in a continuous tubular flow reactor to produce torrefied biomass which was subsequently fast pyrolysed in a bubbling fluidised bed reactor to produce bio-oil, char and gas. Five different torrefaction temperatures (240, 260, 280, 300 and 320°C) were applied. The results showed that the torrefied biomass yields were 50-98% depending on the torrefaction severity. After fast pyrolysis process, the bio-oils were separated into two fractions (heavy and light fractions). The total bio-oil yields were reduced from 69% for non-torrefied biomass to 16% for biomass torrefied at 320°C and 64% for biomass torrefied at 240°C. Nevertheless, the heavy bio-oil yield appeared to increase from 30% for non-torrefied biomass to a maximum of 33% for biomass torrefied at 280°C. This corresponds to the increase of energy yield from 34 to 38%. Intriguingly, torrefaction of *Leucaena leucocephala* at 280°C was also proved to ameliorate the energy efficiency of fast pyrolysis process as up to 65% of energy in biomass could be recovered in the form of liquid and solid biofuels.

Keyword: Biomass, Fast pyrolysis, Fluidised bed, Torrefaction.

1. บทนำ

ปัจจุบันนี้ความต้องการใช้พลังงานเชื้อเพลิงมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น สวนทางกับปริมาณของเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีแนวโน้มลดลงและไม่สามารถผลิตได้ทันตามความต้องการได้ การนำเชื้อเพลิงฟอสซิลมาใช้เป็นพลังงานส่งผลกระทบต่อธรรมชาติ ทำให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลกเพิ่มขึ้น และก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน ซึ่งเป็นภัยคุกคามต่อมวลมนุษยชาติเป็นอย่างยิ่ง เช่น ภัยพิบัติทางธรรมชาติที่รุนแรงขึ้นไม่ว่าจะเป็น ภัยแล้ง น้ำท่วม แผ่นดินไหว และการเปลี่ยนแปลงฤดูกาลไม่ตรงตามช่วงเวลา เป็นต้น จากปัญหาดังกล่าวจึงมีการค้นหาพลังงานทดแทนอื่น ๆ ที่เป็นพลังงานสะอาดและสามารถทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลได้

ชีวมวล (biomass) เป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่สำคัญ เนื่องจากชีวมวลเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายและสามารถแปลงสภาพเป็นพลังงานได้หลายรูปแบบ เช่น เชื้อเพลิงอัดแท่ง เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงแก๊ส เป็นต้น ในประเทศไทย ชีวมวลเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมต่อการนำมาเป็น

พลังงานทดแทน เนื่องจากประเทศไทยมีการทำเกษตรกรรมเป็นจำนวนมาก ตัวอย่างชีวมวลที่สามารถมาใช้ได้ คือ เศษใบไม้ ชี้เส้อย ชานอ้อย ฟางข้าว กากปาล์ม กากมันสำปะหลัง ชังข้าวโพด หรือพืชพลังงานต่าง ๆ เป็นต้น ชีวมวลเหล่านี้สามารถนำมาแปลงสภาพให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วได้

ไพโรไลซิสแบบเร็ว (fast pyrolysis) คือการย่อยสลายชีวมวลโดยให้ความร้อนอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส ในสภาวะปราศจากออกซิเจนหรือควบคุมให้มีออกซิเจนน้อยที่สุด ทำให้ชีวมวลสลายตัวเป็นไอไพโรไลซิสอย่างรวดเร็ว มีระยะเวลาคงอยู่ของไอสั่นที่ 2-5 วินาที และถูกพาไปควบแน่นที่อุณหภูมิต่ำอย่างรวดเร็ว ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นของเหลวที่เรียกว่าไบโอออยล์ (bio-oil) ประมาณร้อยละ 50-70 โดยน้ำหนัก หากระยะเวลาคงอยู่นานกว่าที่กำหนดนี้จะส่งผลให้ไอไพโรไลซิสส่วนหนึ่งแตกตัวขึ้นที่ห้อง (secondary cracking) กลายเป็นแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ ไบโอออยล์ที่ได้สามารถติดไฟได้และเหมาะต่อการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง

ในหม้อกำเนิดไอน้ำ เครื่องยนต์ หรือกังหันแก๊สเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าได้ อีกทั้งยังสามารถนำไปสกัดเป็นสารเคมีได้นอกจากนี้ยังได้ผลิตภัณฑ์รองซึ่งได้แก่ ถ่านชาร์ (char) ประมาณร้อยละ 10-15 ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งได้ และแก๊ส (gas) ประมาณร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนัก [1-4] การไพโรไลซิสแบบเร็วสามารถทำได้ในเครื่องปฏิกรณ์หลายรูปแบบ หนึ่งในนั้นคือเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรซ์เบดแบบฟอง (bubbling fluidised bed reactor: BFB) ซึ่งเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีหลักการทำงานไม่ซับซ้อนและสามารถขยายกำลังการผลิตได้ง่าย เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกแนวตั้งภายในบรรจุตัวกลางถ่ายเทความร้อน เช่น ทราย ซึ่งมีลักษณะการเคลื่อนที่คล้ายฟองสบู่ ทำหน้าที่สำหรับถ่ายเทความร้อนให้กับชีวมวล เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรซ์เบดแบบฟองให้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์สูงถึงร้อยละ 70-75 [1-3, 5] โดยน้ำหนัก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและองค์ประกอบของชีวมวลที่ใช้ในกระบวนการด้วย

ชีวมวลที่มีปริมาณความชื้นสูง เช่น ร้อยละ 14-24 โดยน้ำหนัก [6-8] และมีสัดส่วนของออกซิเจนสูง เช่น ร้อยละ 41-53 โดยน้ำหนัก [5-13] เป็นอุปสรรคต่อการนำไปใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว เนื่องจากสมบัติดังกล่าวส่งผลให้ไบโอออยล์ที่ได้มีปริมาณน้ำสูงถึงร้อยละ 10-24 โดยน้ำหนัก และปริมาณออกซิเจนสูงถึงร้อยละ 28-53 โดยน้ำหนัก [5-8, 11] ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการนำชีวมวลมาผ่านกระบวนการเตรียม (pretreatment) ด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชัน (torrefaction) ก่อนนำไปเข้ากระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว

ทอรรีแฟกชันเป็นกระบวนการไพโรไลซิสแบบอ่อน (mild pyrolysis) ในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจน โดยการให้ความร้อนกับชีวมวลที่อุณหภูมิ 200-320 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็งประมาณ 1-90 นาที [10-20] ความร้อนทำให้โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนินถูกย่อยสลายไปบางส่วน ส่งผลให้ชีวมวลเปลี่ยนสภาพเป็นของแข็งที่เรียกว่า ถ่านทอรรีไฟด์ (torrefied biomass) ที่มีสมบัติทางกายภาพและเคมี

ดีกว่าชีวมวลดั้งเดิม เช่น ปริมาณความชื้นลดลงจากร้อยละ 5-14 เป็น 0.01-2 โดยน้ำหนัก ออกซิเจนลดลงจากร้อยละ 20-46 เป็น 8-40 โดยน้ำหนักฐานเปียก และค่าความร้อนสูง (higher heating value: HHV) เพิ่มขึ้นจาก 12-20 เป็น 13-27 เมกะจูลต่อกิโลกรัม [7, 9, 14, 21-25] เป็นต้น นอกจากนี้ยังทำให้ง่ายต่อการเก็บรักษาเนื่องจากทนต่อการถูกย่อยสลายทางชีวภาพ (biologically stable) นอกจากนี้การนำถ่านทอรรีไฟด์ไปบดละเอียดทำได้ง่ายกว่าชีวมวลดั้งเดิม โดยใช้พลังงานในการบดน้อยลง

งานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของชีวมวลด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชัน จากนั้นใช้ถ่านทอรรีไฟด์ที่ได้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดแบบเบดนิ่ง พบว่าได้ไบโอออยล์เพียงร้อยละ 24-42 โดยน้ำหนัก [10, 11, 17, 19] ทั้งนี้เนื่องมาจากอัตราการถ่ายโอนความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งมีค่าต่ำ ทำให้กระบวนการมีแนวโน้มเป็นการไพโรไลซิสแบบช้า ต่อมามีการทดลองใช้ถ่านทอรรีไฟด์เป็นวัตถุดิบในเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเร็วชนิดฟลูอิดไรซ์เบดแบบฟองและแบบท่อไหลลง (entrained down flow reactor) ทำให้ได้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์สูงกว่าการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งประมาณเกือบ 2 เท่า อย่างไรก็ตามการไพโรไลซิสถ่านทอรรีไฟด์ทำให้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์ลดลงเมื่อเทียบกับการใช้ชีวมวลดั้งเดิมที่ไม่ผ่านกระบวนการทอรรีแฟกชัน โดยลดลงจากร้อยละ 44-71 เป็น 31-55 โดยน้ำหนัก ถึงกระนั้นก็ดีสมบัตียบางประการของไบโอออยล์ดีขึ้นกว่าการไม่ผ่านกระบวนการทอรรีแฟกชัน เช่น ปริมาณน้ำลดลงจากร้อยละ 10-30 เป็น 4-21 โดยน้ำหนัก ปริมาณออกซิเจนในไบโอออยล์ลดลงจากร้อยละ 36-46 เป็น 30-40 โดยน้ำหนักฐานแห้ง ค่าความร้อนสูงเพิ่มขึ้นจาก 15-20 เป็น 17-23 เมกะจูลต่อกิโลกรัม [5, 6, 26, 27] ความเป็นกรดของไบโอออยล์ลดลง และยังส่งผลให้ไบโอออยล์มีเสถียรภาพ (stability) ดีขึ้น [5, 28] จากงานวิจัยที่ผ่านมาดังกล่าวแม้ว่าเป็นที่ทราบแล้วว่ากระบวนการทอรรีแฟกชันส่งผลดีต่อสมบัติบางประการของไบโอออยล์ แต่ก็พบข้อจำกัดด้านปริมาณผลได้ของไบโอออยล์ที่ลดลง แม้ว่าการลดลง

ของไบโอออยล์จะสามารถป้องกันได้ด้วยการเพิ่มขั้นตอนการล้างชีวมวล (biomass leaching) ร่วมกับการทำทอร์รีแฟกชัน [26] แต่ความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของตัวแปรของกระบวนการทอร์รีแฟกชันที่ส่งผลต่อปริมาณผลได้และสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วยังมีอยู่อย่างจำกัด การศึกษาเพื่อเข้าใจความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถช่วยควบคุมกระบวนการทอร์รีแฟกชันที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นขั้นตอนการเตรียมชีวมวลก่อนเข้าสู่กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาความสัมพันธ์ดังกล่าวโดยการนำไม้กระถินยักษ์ไปผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชันที่อุณหภูมิ 240 260 280 300 และ 320 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งคงที่ 3 นาที จากนั้นนำถ่านทอร์รีไฟต์ที่ได้ไปไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบพองที่มีการควบคุมอัตราการป้อนชีวมวลให้คงที่ที่ 130 กรัมต่อชั่วโมง และอุณหภูมิไพโรไลซิสคงที่ที่ 500 องศาเซลเซียส จากนั้นวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของไบโอออยล์ที่ผลิตได้ ซึ่งรวมถึง ค่าพีเอช ความหนาแน่น ปริมาณของแข็ง ปริมาณเถ้า ค่าความร้อน สัดส่วนของธาตุพื้นฐาน (C, H, N และ O) และปริมาณน้ำ

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การเตรียมชีวมวล

ชีวมวลที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือไม้กระถินยักษ์ที่มีอายุประมาณ 1 ปี ได้จากพื้นที่ในแถบภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยนำส่วนของลำต้น กิ่งก้านรวมทั้งเปลือกไปตากแดดเพื่อลดความชื้น จากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องบดหยาบ ตามด้วยเครื่องบดบดละเอียด แล้วนำไปคัดแยกขนาดให้ได้ 0.212-0.600 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 105 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้มีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และเก็บบรรจุในภาชนะที่ปิดสนิท เพื่อป้องกันไม่ให้ความชื้นหรือฝุ่นเข้าสู่ชีวมวล

ชีวมวลที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ได้แก่ การวิเคราะห์แบบประมาณ การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ค่า

ความร้อนสูงและต่ำ และค่าความหนาแน่นทั้งค่าความหนาแน่นรวม (bulk density) และความหนาแน่นอนุภาค (particle density) ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติของไม้กระถินยักษ์

การวิเคราะห์	งานวิจัยนี้	Huang Y.-F. [29]
แบบประมาณ (wt%, dry basis)		
ความชื้น ¹ (moisture)	3.7	10.5
สารระเหย (volatile matter)	85.1	78.8
คาร์บอนคงที่ ² (fixed carbon)	13.2	18.7
เถ้า (ash)	1.7	2.5
แบบแยกธาตุ (wt%, dry basis)		
คาร์บอน (C)	47.4	46.7
ไฮโดรเจน (H)	6.6	6.6
ไนโตรเจน (N)	0.3	7.2
ออกซิเจน ³ (O)	44.0	37.0
ค่าความร้อน (MJ/kg, dry basis)		
ค่าความร้อนสูง (HHV)	19.5	19.3
ค่าความร้อนต่ำ (LHV)	18.1	17.8
ความหนาแน่น (kg/m³)		
ความหนาแน่นรวม	193.7	-
ความหนาแน่นอนุภาค	682.0	-

¹ฐานเปียก

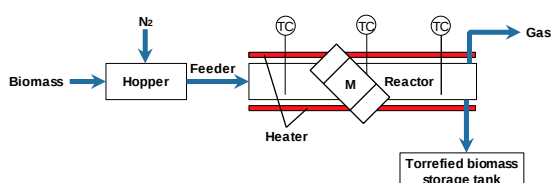
²คำนวณโดยความแตกต่าง fixed carbon = 100 - volatile matter - ash

³คำนวณโดยความแตกต่าง O = 100 - C - H - N - S - ash

2.2 การผลิตถ่านทอร์รีไฟต์

ไม้กระถินยักษ์ที่ผ่านการเตรียมในหัวข้อ 2.1 ถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการทอร์รีแฟกชัน โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลต่อเนื่อง (continuous tubular flow reactor) ซึ่งรายละเอียดของเครื่องปฏิกรณ์นี้ได้กล่าวไว้โดยละเอียดแล้วในงานวิจัยก่อนหน้า [30]

โดยสามารถสรุปได้ว่าเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้คือเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่องในท่อวางแนวนอน ดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยถังป้อน (hopper) มีสกรูด้านล่างเพื่อป้อนเข้าสู่ชุดลำเลียง (feeder) เข้าไปยังท่อปฏิกรณ์ทอรรีแฟกชัน (torrefactor) วัตถุดิบในท่อปฏิกรณ์ถูกทำให้เคลื่อนที่โดยการสั่นของมอเตอร์สั่นและถูกผลักไปยังถังเก็บถ่านทอรรีไฟด์ (torrefied biomass storage tank) ชีวมวลรับความร้อนในท่อปฏิกรณ์เกิดการสลายตัวในสภาวะไร้ออกซิเจน เนื่องจากการใช้แก๊สไนโตรเจน (N_2) ปริมาณ 4 ลิตรต่อนาที่ เพื่อพาไอไฟโรไลซิสออกจากท่อปฏิกรณ์ อุณหภูมิทอรรีแฟกชันที่ใช้ในครั้งนี้คือ 240 260 280 300 และ 320 องศาเซลเซียส ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ ± 5 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ของของแข็งคงที่ที่ 3 นาที ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากชั้นทอรรีแฟกชันนี้ ได้แก่ ถ่านทอรรีไฟด์ (torrefied biomass) ของเหลวทอรรีไฟด์ (tor-liquid) และแก๊สทอรรีไฟด์ (tor-gas)



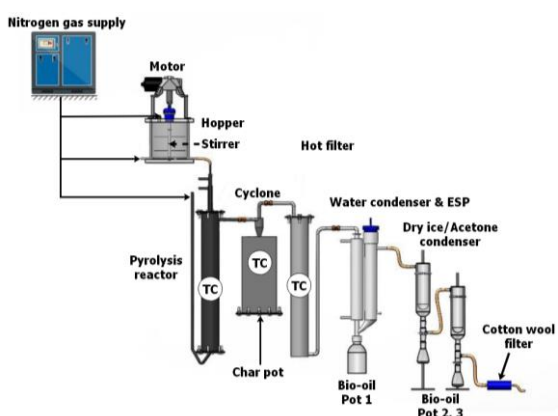
รูปที่ 1 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกชัน

2.3 การไฟโรไลซิสแบบเร็ว

การไฟโรไลซิสแบบเร็วของไม้กระถินยักษ์และถ่านทอรรีไฟด์ดำเนินการโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบพองดังรูปที่ 2 ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้ (1) ถังเก็บชีวมวลเตรียมป้อน (hopper) ใช้ในการเก็บอนุภาคของชีวมวลที่ผ่านการอบแห้งและคัดขนาดแล้ว โดยใช้แก๊สไนโตรเจนที่มีความดัน 1 บาร์ ควบคุมให้ชีวมวลเคลื่อนที่จากถังเก็บลงท่อป้อนชีวมวล สามารถควบคุมอัตราป้อนของชีวมวลได้โดยปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ (motor) ที่ยึดติดกับใบกวน (stirrer) สำหรับกวาดอนุภาคของวัตถุดิบเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสทางด้านบน (2) เตาปฏิกรณ์ไฟโรไลซิส (pyrolysis reactor) เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ชีวมวลเกิดการสลายตัวกลายเป็นไอ

ไฟโรไลซิส เตาปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ที่มีความหนา 1.2 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 5 เซนติเมตร และมีความสูง 40 เซนติเมตร ภายในบรรจุทราย ที่มีขนาดอนุภาค 0.250-0.425 มิลลิเมตร ประมาณ 150 กรัม สำหรับถ่ายเทความร้อนให้ชีวมวลที่ป้อนเข้าไปในเตาปฏิกรณ์ (3) ไชโคลน (cyclone) ทำหน้าที่แยกอนุภาคถ่านชาร์ออกจากไอไฟโรไลซิส และถ่านชาร์ที่ได้นี้ตกลงไปในถังเก็บถ่านชาร์ (char pot) (4) ชุดกรองไอร้อน (hot filter) มีขนาดเท่ากับเตาปฏิกรณ์ไฟโรไลซิส ภายในกรองไอร้อนบรรจุใยแก้วประมาณ 10 กรัม สำหรับกรองอนุภาคถ่านชาร์ขนาดเล็กที่หลุดมาจากไชโคลน ซึ่งการให้ความร้อนกับเตาปฏิกรณ์ไฟโรไลซิส ไชโคลน และชุดกรองไอร้อนใช้ขดลวดความร้อนที่ควบคุมอุณหภูมิด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิ (temperature control) ที่เชื่อมต่อกับเทอร์โมคัปเปิลที่อยู่ภายในอุปกรณ์ดังกล่าว (5) ชุดควบแน่นด้วยน้ำ (water-cooled condenser) มีลักษณะเป็นท่อสองชั้น ทำหน้าที่ควบแน่นไอไฟโรไลซิสที่อุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส โดยชั้นแรกเป็นท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2 เซนติเมตร ความยาว 40 เซนติเมตร สำหรับให้ไอไฟโรไลซิสไหลผ่าน ชั้นที่สองมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 5 เซนติเมตร ความยาว 30 เซนติเมตร สำหรับให้น้ำหล่อเย็นไหลผ่าน ทำให้ไอไฟโรไลซิสเกิดการควบแน่นกลายเป็นของเหลว (6) ชุดดักจับด้วยไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator: ESP) อยู่ต่อกับชุดควบแน่นด้วยน้ำ ทำหน้าที่ดักจับไอไฟโรไลซิสที่ไม่สามารถควบแน่นด้วยน้ำได้ (7) ชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมแอซีโตน (dry ice/acetone condenser) เป็นชุดควบแน่นที่มีอุณหภูมิต่ำประมาณ -70 องศาเซลเซียส ทำหน้าที่ควบแน่นไอไฟโรไลซิสที่ไม่สามารถควบแน่นด้วยน้ำและชุดดักจับด้วยไฟฟ้าสถิต ทำให้ได้ไบโอออยล์เฟสเบา ชุดควบแน่นนี้ทำจากแก้วที่มีลักษณะเป็นกระเปาะสองชั้น โดยชั้นแรกเป็นส่วนที่มีไว้สำหรับใส่น้ำแข็งแห้งกับแอซีโตน ส่วนชั้นที่สองเป็นช่องว่างสำหรับให้ไอไฟโรไลซิสไหลผ่านทำให้เกิดการควบแน่น และแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ถูกกรองด้วยชุดกรองสำลิก่อนถูกปล่อยทิ้ง

การทดลองผลิตไบโอออยล์มีการควบคุมอุณหภูมิไฟโรไลซิสและกรองไอร้อนที่ 500 และ 420 องศาเซลเซียสตามลำดับ โดยมีความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิแต่ละจุด ± 5 องศาเซลเซียส ใช้ไนโตรเจนเป็นแก๊สพาที่อัตราการไหลส่วนฟลูอิดซ์เบด 6 ลิตรต่อนาที และส่วนป้อนชีวมวล 4 ลิตรต่อนาที ผลผลิตที่ได้แบ่งเป็น ไบโอออยล์หนัก (heavy bio-oil) ไบโอออยล์เบา (light bio-oil) ถ่านชาร์ (char) และแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ (non-condensable gas)



รูปที่ 2 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบพอง

2.4 การวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์

ไบโอออยล์ที่ผลิตได้นำมาทดสอบหาค่าพีเอช ความหนาแน่น ปริมาณของแข็ง ปริมาณเถ้า ปริมาณน้ำ ปริมาณธาตุพื้นฐานคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน ค่าความร้อน โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้

ค่าพีเอชหาได้โดยการใช้อนุมาตรวัดค่าพีเอช (pH meter) ยี่ห้อ Hanna Instruments รุ่น HI 2211 ที่สามารถวัดค่าพีเอชได้ตั้งแต่ -2.0 ถึง 16.0

ค่าความหนาแน่นสามารถวัดได้โดยใช้อุปกรณ์อย่างง่ายเพื่อประมาณค่าสัดส่วนระหว่างมวลต่อปริมาตร

ปริมาณของแข็งในไบโอออยล์วิเคราะห์ด้วยวิธีการแบบสูญญากาศ โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 3 เส้นผ่านศูนย์กลาง 90 มิลลิเมตร ที่สามารถกรองอนุภาคของแข็งได้เล็กสุดประมาณ 6 ไมโครเมตร และใช้เอทานอลในการทำละลายไบโอออยล์ ของแข็งที่ไม่สามารถละลายผ่าน

กระดาษกรองไปได้คือปริมาณของแข็งที่มีอยู่ในไบโอออยล์

ปริมาณเถ้าในไบโอออยล์วิเคราะห์โดยนำไบโอออยล์ใส่ถ้วยกระเบื้องแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 775 ± 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที โดยน้ำหนักที่เหลืออยู่หลังการเผาคือปริมาณเถ้าในไบโอออยล์

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำในไบโอออยล์ใช้หลักการของคาลฟีชเชอร์ไทเทรต (Karl Fischer titration) โดยใช้เครื่องมือยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น V20 1 ที่ใช้หลักการตรวจวัดความเข้มข้นของตัวละลายด้วยสาร HYDRANAL-Composite 5 และเปรียบเทียบกับสาร HYDRANAL-Medium K

การวิเคราะห์หาองค์ประกอบธาตุพื้นฐาน ได้แก่ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) และออกซิเจน (O) ทำได้โดยใช้เครื่อง CHN Analyzer ยี่ห้อ Leco รุ่น 628 จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) โดยปริมาณธาตุออกซิเจนสามารถคำนวณได้จากความแตกต่าง

การวิเคราะห์ค่าความร้อนของไม้กระถินยักษ์ ถ่านทอร์รีไฟด์ ไบโอออยล์และถ่านชาร์ สามารถวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง (bomb calorimeter) หรือคำนวณได้จากปริมาณธาตุพื้นฐานของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการวิเคราะห์ โดยสามารถแบ่งค่าความร้อนออกเป็น 2 แบบ คือ ค่าความร้อนสูง (higher heating value, HHV) และค่าความร้อนต่ำ (lower heating value, LHV) สามารถคำนวณได้จากสมการ 1 [31] และ 2 [32]

$$\text{HHV}_{\text{dry}} (\text{MJ/kg}) = 0.3491\text{C} + 1.1783\text{H} + 0.1005\text{S} - 0.1034\text{O} - 0.0151\text{N} - 0.0211\text{ash} \quad (1)$$

$$\text{LHV}_{\text{dry}} (\text{MJ/kg}) = \text{HHV}_{\text{dry}} - 2.443 \times 8.936 \left(\frac{\text{H}}{100} \right) \quad (2)$$

2.5 ปริมาณผลได้เชิงพลังงานของผลิตภัณฑ์

ปริมาณผลได้เชิงพลังงานของผลิตภัณฑ์ (energy yield: $EY_{product}$) คือ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนของไม้กระถินยักษ์ กับปริมาณผลได้เชิงมวลและค่าความร้อนผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทราบ โดยคำนวณหาได้จากสมการ 3 [33]

$$EY_{product} (\%) = \frac{HHV_{product} \times \text{mass yield}}{HHV_{raw \text{ biomass}}} \quad (3)$$

เมื่อ $HHV_{product}$ = ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์
(เมกะจูลต่อกิโลกรัม)

$HHV_{raw \text{ biomass}}$ = ค่าความร้อนของชีวมวล
(เมกะจูลต่อกิโลกรัม)

mass yield = ปริมาณผลได้เชิงมวล
(ร้อยละโดยน้ำหนัก, ฐานแห้ง)

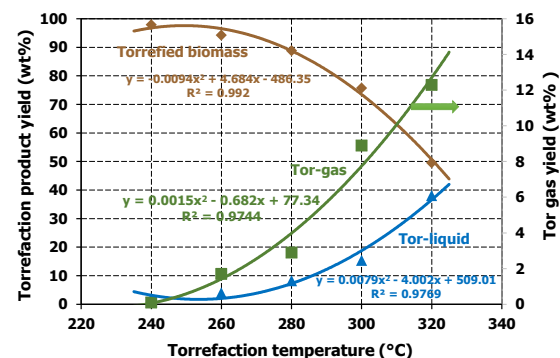
3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 ผลการผลิตถ่านทอร์รีไฟด์

ในการผลิตถ่านทอร์รีไฟด์ด้วยกระบวนการทอร์รีแฟกชัน นอกจากได้ถ่านแล้ว ยังได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว (tor-liquid) และแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ (tor-gas) โดยผลของอุณหภูมิทอร์รีแฟกชันต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์แสดงได้ดังรูปที่ 3 ซึ่งพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิทอร์รีแฟกชันจาก 240 เป็น 320 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอร์รีไฟด์ลดลงจากร้อยละ 97.9 เป็น 49.6 โดยน้ำหนักฐานแห้ง ส่วนปริมาณผลได้เชิงมวลของของเหลวทอร์รีไฟด์และแก๊สเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 2.0 เป็น 38.1 และ 0.1 เป็น 12.3 โดยน้ำหนักฐานแห้ง ตามลำดับ แนวโน้มความสัมพันธ์ของปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์กับอุณหภูมิแสดงได้ดังสมการพหุนามอันดับที่ 2 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มากกว่า 0.97

ไม้กระถินยักษ์ที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชันมีการสูญเสียมวลบางส่วนไป โดยสารระเหยสลายตัวไปตามความร้อนของกระบวนการ ผลชัดเจนที่สุดเมื่อใช้อุณหภูมิทอร์รีแฟกชันที่ 320 องศาเซลเซียส ส่วนที่เป็นเอมิเซลลูโลสและ

เซลลูโลสสลายตัวมากกว่าส่วนลิกนิน เนื่องจากลิกนินมีช่วงการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า [34]



รูปที่ 3 ผลของอุณหภูมิทอร์รีแฟกชันต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการทอร์รีแฟกชัน

ผลการวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของถ่านทอร์รีไฟด์ที่ผลิตได้เมื่อใช้อุณหภูมิทอร์รีแฟกชันต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2 ถ่านทอร์รีไฟด์ที่ได้มีค่าความชื้นลดลงจากชีวมวลตั้งต้นที่มีความชื้นร้อยละ 3.7 เป็น ร้อยละ 0.5-1.5 และมีสารระเหยลดลงจากร้อยละ 85.1 (ข้อมูลจากตารางที่ 1) เป็น 53.3-82.8 โดยอุณหภูมิทอร์รีแฟกชันที่สูงขึ้นส่งผลให้ถ่านทอร์รีไฟด์มีสารระเหยลดลง สารระเหยที่สลายตัวส่วนใหญ่นั้นเป็นเอมิเซลลูโลส เพราะสลายตัวได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 150-350 องศาเซลเซียส ส่วนเซลลูโลสและลิกนินนั้นสลายตัวไปบางส่วนเนื่องจากสลายตัวได้ยากกว่าเอมิเซลลูโลส โดยเซลลูโลสและลิกนินสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 275-350 และ 250-500 องศาเซลเซียส [34-38] ตามลำดับ คาร์บอนคงที่และเถ้าในชีวมวลมีสัดส่วนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับไม้กระถินยักษ์จากร้อยละ 13.2 เป็น 43.1 และจากร้อยละ 1.7 เป็น 3.5 โดยน้ำหนักฐานแห้ง ตามลำดับ เนื่องจากคาร์บอนคงที่ไม่สลายตัวในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจน และเถ้าเป็นองค์ประกอบประเภทโลหะ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียม เป็นต้น ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่สลายตัวในกระบวนการทอร์รีแฟกชันและการเผาไหม้ [38] เหตุที่สองส่วนนี้มีสัดส่วนเพิ่มขึ้นเนื่องจากการลดลงของสารระเหยที่สลายตัวไป

ตารางที่ 2 สมบัติของถ่านทอร์รีไฟต์

สมบัติ	อุณหภูมิทอร์รีแฟกชัน (°C)				
	240	260	280	300	320
ความหนาแน่น (kg/m^3)					
ความหนาแน่นรวม	193.6	183.9	183.2	182.6	181.9
ความหนาแน่นอนุภาค	645.4	634.2	628.8	620.4	613.6
การวิเคราะห์แบบประมาณ (wt%, dry basis)					
ความชื้น (moisture)	1.5	0.5	0.5	0.5	0.5
สารระเหย (volatile matter)	82.8	80.5	77.6	71.5	53.3
คาร์บอนคงที่ (fixed carbon)	15.4	17.6	20.0	25.7	43.2
เถ้า (ash)	1.8	1.9	2.4	2.8	3.5
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (wt%, dry basis)					
คาร์บอน (C)	48.6	49.5	50.5	53.6	61.3
ไฮโดรเจน (H)	6.3	6.3	6.1	5.9	5.2
ไนโตรเจน (N)	0.3	0.3	0.4	0.5	0.8
ออกซิเจน (O)	43.0	42.0	40.6	37.2	29.2
ค่าพลังงานความร้อน (MJ/kg, dry basis)					
ค่าพลังงานความร้อนสูง (HHV)	19.7	20.1	20.3	21.4	24.1
ค่าพลังงานความร้อนต่ำ (LHV)	18.29	18.7	19.0	20.2	23.0
ปริมาณผลได้เชิงพลังงาน (%)	98.5	97.2	92.5	83.3	61.4

ตารางที่ 2 ยังแสดงองค์ประกอบธาตุพื้นฐานของถ่านทอร์รีไฟต์ที่ผลิตได้ โดยพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิทอร์รีแฟกชันจาก 240 เป็น 320 องศาเซลเซียส ทำให้สัดส่วนของธาตุคาร์บอนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 48.6 เป็น 61.3 โดยน้ำหนักฐานแห้ง และออกซิเจนลดลงจากร้อยละ 43.0 เป็น 29.2 โดยน้ำหนักฐานแห้ง เนื่องจากออกซิเจนในไม้กระถินยักษ์ถูกสลายตัวออกไปอยู่ในรูปของของเหลวและแก๊ส เช่น น้ำ กรด น้ำส้ม น้ำตาล แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นต้น [5, 34, 37] ส่วนธาตุไฮโดรเจนมีสัดส่วนลดลงเล็กน้อยจากร้อยละ 6.3 เป็น 5.2 โดยน้ำหนักฐานแห้ง และธาตุไนโตรเจนมีสัดส่วนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากร้อยละ 0.3 เป็น 0.8 โดยน้ำหนักฐานแห้ง

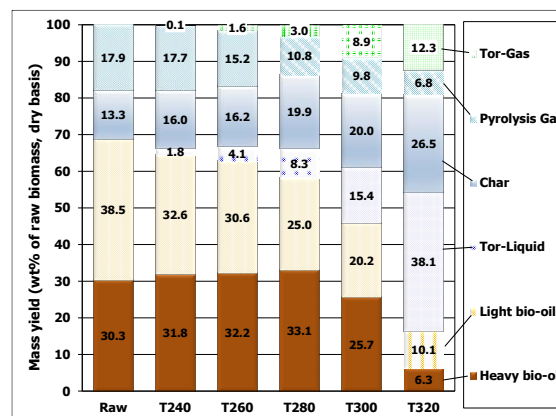
นอกจากนี้ตารางที่ 2 ยังแสดงค่าความร้อนสูงของถ่าน

ทอร์รีไฟต์ที่ผลิตได้ โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิทอร์รีแฟกชันสูงขึ้น ค่าความร้อนสูงของถ่านทอร์รีไฟต์เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับไม้กระถินยักษ์จาก 19.5 (จากตารางที่ 1) เป็น 24.1 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เนื่องจากระบวนการทอร์รีแฟกชันทำให้วัตถุดิบสูญเสียธาตุออกซิเจนและไฮโดรเจนไปอยู่ในของเหลวและแก๊ส ส่วนธาตุคาร์บอนมีสัดส่วนเพิ่มขึ้นจึงทำให้ค่าความร้อนของถ่านทอร์รีไฟต์เพิ่มขึ้น [37] ขณะที่ปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟต์ลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิทอร์รีแฟกชันจาก 240 เป็น 320 องศาเซลเซียส โดยลดลงจากร้อยละ 98.4 เป็น 61.4 ส่วนความหนาแน่นรวมของถ่านทอร์รีไฟต์ลดลงเล็กน้อยจาก 193.7 (กรณีไม้กระถินยักษ์ดังตารางที่ 1) เป็น 181.9 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

3.2 ผลการไพโรไลซิสแบบเร็วของถ่านทอรรีไฟต์

เมื่อนำไม้กระถินยักษ์ (Raw) และถ่านทอรรีไฟต์ที่ได้จากกระบวนการทอรรีแฟกชันของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิทอรรีแฟกชัน 240-320 องศาเซลเซียส (T240, T260, T280, T300 และ T320) มาใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วเพื่อผลิตไบโอออยล์และได้ถ่านชาร์ และแก๊สเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์สุดท้ายทั้งหมดทั้งจากกระบวนการทอรรีแฟกชันและกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วเมื่อเทียบกับวัตถุดิบชีวมวลตั้งต้นแห้งแสดงได้ดังรูปที่ 4 โดยไบโอออยล์ที่ได้แบ่งเป็นไบโอออยล์หนัก (heavy bio-oil) และไบโอออยล์เบา (light bio-oil) การเพิ่มอุณหภูมิทอรรีแฟกชันจาก 240 เป็น 320 องศาเซลเซียส ทำให้ปริมาณของเหลวรวม (light bio-oil, heavy bio-oil และ tor-liquid) มีแนวโน้มลดลงจากร้อยละ 66.2 เป็น 54.5 โดยน้ำหนักของไม้กระถินยักษ์แห้ง ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณของเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วที่ลดลงจากร้อยละ 64.4 เป็น 16.4 โดยน้ำหนักของไม้กระถินยักษ์แห้ง ส่วนปริมาณของเหลวจากกระบวนการทอรรีแฟกชันเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1.8 เป็น 38.1 โดยน้ำหนักของไม้กระถินยักษ์แห้ง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wigley T และคณะ [6] ที่ศึกษาผลของการไพโรไลซิสแบบเร็วของถ่านทอรรีไฟต์ โดยใช้อุณหภูมิทอรรีแฟกชันที่ 230-280 องศาเซลเซียส พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิทอรรีแฟกชันส่งผลให้ของเหลวรวมจากกระบวนการทอรรีแฟกชันและไพโรไลซิสแบบเร็วมีแนวโน้มลดลงจากร้อยละ 45 เป็น 34 โดยน้ำหนัก การเพิ่มอุณหภูมิทอรรีแฟกชันทำให้โครงสร้างของสารระเหยของไม้กระถินยักษ์สลายตัวไปบางส่วนจึงทำให้ของเหลวจากกระบวนการทอรรีแฟกชันเพิ่มขึ้นและของเหลวจากกระบวนการไพโรไลซิสมีแนวโน้มลดลง

ผลดังรูปที่ 4 มีประเด็นที่น่าสนใจอยู่ที่การพิจารณาปริมาณผลได้ของไบโอออยล์แยกย่อยลงไปเป็นไบโอออยล์หนักและไบโอออยล์เบา ซึ่งพบว่า ไบโอออยล์เบา มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิทอรรีแฟกชัน และการลดลงนี้สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของของเหลวทอรรีไฟต์ ประเด็นนี้ไม่เป็นที่น่าแปลกใจ เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิ



รูปที่ 4 ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการทอรรีแฟกชันตามด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว

ทอรรีแฟกชันย่อมทำให้ชีวมวลสลายตัวได้มากขึ้น แต่ประเด็นที่น่าสนใจอยู่ที่ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์หนัก ซึ่งเป็นส่วนไบโอออยล์ที่สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวชีวภาพได้ แผนภูมิในรูปที่ 4 แสดงให้เห็นได้ชัดว่าการเพิ่มอุณหภูมิทอรรีแฟกชันจาก 240 ถึง 280 องศาเซลเซียส ทำให้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์หนักเพิ่มขึ้นและมีค่ามากกว่าการใช้ชีวมวลตั้งต้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิทอรรีแฟกชันอีกเป็น 300 และ 320 องศาเซลเซียส ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์หนักลดลงอย่างมาก ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า การใช้อุณหภูมิทอรรีแฟกชันที่ 280 องศาเซลเซียส ในการเตรียมชีวมวลไม้กระถินยักษ์มีส่วนช่วยทำให้ได้ไบโอออยล์หนักเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ร้อยละ 33.1 โดยน้ำหนักของไม้กระถินยักษ์แห้ง ซึ่งมากกว่าไบโอออยล์หนักที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์ถึงร้อยละ 2.8 โดยน้ำหนักของไม้กระถินยักษ์แห้ง แสดงให้เห็นประโยชน์ของกระบวนการทอรรีแฟกชันต่อกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว ซึ่งการค้นพบนี้แตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมาเนื่องจาก งานวิจัยที่ผ่านมาพิจารณาเพียงของเหลวโดยรวม ไม่ได้แบ่งย่อยเป็นไบโอออยล์หนักและไบโอออยล์เบาเหมือนงานวิจัยนี้

การเปลี่ยนแปลงปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวในกระบวนการสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลได้ของของแข็งหรือก็คือ ถ่านชาร์ ซึ่งเป็นของแข็งรูปสุดท้ายหลังการแปลงจากถ่านทอรรีไฟต์ รูปที่

4 แสดงให้เห็นชัดเจนว่าอุณหภูมิทอรรีแฟกชันที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณถ่านชาร์เพิ่มขึ้น ปริมาณผลได้ของถ่านชาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 13.3 กรณีใช้ชีวมวลตั้งต้นเป็นร้อยละ 26.5 กรณีใช้ถ่านทอรรีไฟต์ที่ผลิตจากอุณหภูมิทอรรีแฟกชัน 320 องศาเซลเซียส เนื่องจากไม้กระถินยักษ์ที่ผ่านการเตรียมด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชันมีส่วนของปริมาณคาร์บอนคงที่และเถ้าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 12.7 เป็น 42.9 และ 1.7 เป็น 3.5 โดยน้ำหนักฐานแห้ง ซึ่งคาร์บอนคงที่และเถ้าเป็นส่วนที่ไม่สลายตัวในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วจึงทำให้มีปริมาณผลได้ของถ่านชาร์เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zheng A. และคณะ [27] และงานวิจัยของ Wigley T. และคณะ [6] ที่ศึกษาผลของอุณหภูมิทอรรีแฟกชันต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของซังข้าวโพดและไม้สนที่เตรียมด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชันที่อุณหภูมิ 250-300 และ 230-280 องศาเซลเซียส แล้วนำไปไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟองที่อุณหภูมิ 470 และ 500 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิทอรรีแฟกชันส่งผลให้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์รวมลดลงขณะที่ถ่านชาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยอธิบายว่าการเพิ่มอุณหภูมิทอรรีแฟกชันส่งผลต่อปริมาณสารระเหยของวัตถุดิบทำให้มีปริมาณลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่งผลต่อโครงสร้างของเซลลูโลสทำให้โครงสร้างเกิดการเชื่อมต่อกัน (cross linking) กลายเป็นถ่านชาร์มากขึ้น

3.3 สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว

ไบโอออยล์หนักเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วและเป็นส่วนที่สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวชีวภาพได้ ดังนั้นจึงนำไบโอออยล์ส่วนนี้ไปวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 3 เทียบกับสมบัติของน้ำมันไพโรไลซิส (pyrolysis oil) ตามมาตรฐาน ASTM D7544-12 ผลการทดสอบพบว่าไบโอออยล์หนักที่ผลิตได้ในงานวิจัยนี้มีสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐานด้านค่าความหนาแน่น ปริมาณของแข็ง ปริมาณเถ้า ปริมาณน้ำ และค่าความร้อนสูง เมื่อพิจารณา

ผลของการทำทอรรีแฟกชันก่อนกระบวนการไพโรไลซิสพบว่า ค่าพีเอช ความหนาแน่น ปริมาณของแข็ง และปริมาณเถ้าของไบโอออยล์ที่ได้แทบไม่เปลี่ยนแปลงไปจากการใช้ชีวมวลตั้งต้น แต่ปริมาณน้ำและค่าความร้อนของไบโอออยล์เปลี่ยนไปในทางที่ดีขึ้น โดยปริมาณน้ำลดลงจากร้อยละ 23.4 เป็นร้อยละ 6.2-17.9 และค่าความร้อนสูงเพิ่มขึ้นเกือบทุกกรณีจาก 22.0 MJ/kg เป็นร้อยละ 22.3-22.9 MJ/kg ยกเว้นกรณีใช้อุณหภูมิทอรรีแฟกชันเป็น 320 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนสูงของไบโอออยล์หนักมีค่าลดลง

นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิทอรรีแฟกชันที่ส่งผลดีต่อสมบัติของไบโอออยล์นี้อยู่ในช่วง 260-280 องศาเซลเซียส โดยทำให้ได้ปริมาณผลได้เชิงพลังงานเพิ่มขึ้นจากกรณีชีวมวลตั้งต้นที่มีคาร์บอนร้อยละ 34 เป็นประมาณร้อยละ 38 ซึ่งเป็นการสะท้อนให้เห็นผลดีของการนำชีวมวลไปผ่านกระบวนการทอรรีแฟกชันก่อนนำมาผลิตเป็นไบโอออยล์ ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ตามรูปที่ 4

Wigley T. และคณะ [6] ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิทอรรีแฟกชันต่อปริมาณผลได้และสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบเร็วของไม้สน โดยนำไม้สนไปผ่านกระบวนการทอรรีแฟกชันที่อุณหภูมิ 230-280 องศาเซลเซียส แล้วนำไปไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟองที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส พบว่าไบโอออยล์ที่ได้มีความหนาแน่นและค่าความร้อนสูงไม่แตกต่างกันอยู่ในช่วง 1,210-1,290 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 20.9-21.9 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และปริมาณน้ำของไบโอออยล์มีแนวโน้มลดลงจากร้อยละ 24.0 เป็น 3.7 โดยน้ำหนัก ซึ่งผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยดังตารางที่ 3 แต่ผลการศึกษาที่อุณหภูมิสูงกว่า 280 องศาเซลเซียส หรือก็คือที่ 300-320 องศาเซลเซียส ทำให้เห็นถึงข้อจำกัดและจุดสูงสุดของอุณหภูมิทอรรีแฟกชันที่ควรใช้ในการเตรียมวัตถุดิบชีวมวลซึ่งได้ค้นพบและนำเสนอในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 3 สมบัติของไบโอออยล์หนักที่ได้จากการใช้ไม้กระถินยักษ์และถ่านทอรรีไฟต์

การวิเคราะห์	ไม้กระถินยักษ์	ถ่านทอรรีไฟต์ที่ได้จากกระบวนการทอรรีแฟกชันที่อุณหภูมิต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)					มาตรฐาน ASTM D7544-12
		240	260	280	300	320	
ค่าพีเอช (pH)	3.6	3.2	3.3	3.2	3.3	3.4	-
ความหนาแน่น	1.14	1.24	1.16	1.13	1.14	1.13	1.1-1.3
ปริมาณของแข็ง	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	ไม่สูงกว่า
ปริมาณเถ้า (wt%)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	ไม่สูงกว่า
ปริมาณน้ำ (wt%)	23.4	7.6	6.3	6.2	11.4	17.9	ไม่สูงกว่า 30
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (wt%)							
คาร์บอน (C)	53.4	53.7	54.2	52.9	52.1	47.4	-
ไฮโดรเจน (H)	6.4	6.8	6.8	6.9	7.1	7.3	
ไนโตรเจน (N)	0.6	0.5	0.5	0.5	0.6	1.1	
ออกซิเจน (O)	39.6	39.0	38.5	39.7	40.2	44.2	
ค่าความร้อน (MJ/kg)							
ค่าความร้อนสูง	22.0	22.7	22.9	22.5	22.3	20.6	ไม่ต่ำกว่า 15
ค่าความร้อนต่ำ	20.7	21.2	21.4	21.0	21.8	18.9	-
ปริมาณผลได้เชิงพลังงาน (%)	34.3	37.0	37.9	38.1	29.4	6.6	-

นอกจากไบโอออยล์หนักที่เป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วแล้ว ถ่านชาร์ก็เป็นผลิตภัณฑ์รองที่น่าสนใจ ผลการวิเคราะห์สมบัติของถ่านชาร์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของชีวมวลและถ่านทอรรีไฟต์แสดงได้ดังตารางที่ 4 ร้อยละของเถ้าในถ่านชาร์ที่ได้จากการใช้ถ่านทอรรีไฟต์เป็นวัตถุดิบมีค่าต่ำกว่าการใช้ชีวมวลที่ไม่ผ่านกระบวนการทอรรีแฟกชัน และการเพิ่มอุณหภูมิทอรรีแฟกชันทำให้ถ่านชาร์ที่ได้มีสัดส่วนของปริมาณเถ้าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าที่อยู่ในชีวมวลเริ่มต้นแทบจะไม่มีการสลายไปแต่คงอยู่ในรูปของของแข็งเหตุที่สัดส่วนของเถ้าลดลงก็เนื่องมาจากสัดส่วนของถ่านชาร์เพิ่มขึ้นหรือก็คือเนื่องจากการทำทอรรีแฟกชันทำให้ได้ถ่านชาร์เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4 นอกจากนี้ตารางที่ 4 ยังแสดงผลการวิเคราะห์ค่าคาร์บอนในถ่านชาร์ที่น่าสนใจมาก เนื่องจากการนำชีวมวลมาผ่านการทอรรีแฟกชันทำให้ถ่านชาร์ที่ได้มีร้อยละของคาร์บอนเพิ่มขึ้นอย่างมากจาก

ร้อยละ 45.9 เป็นประมาณร้อยละ 69 โดยน้ำหนักฐานแห้ง และมีสัดส่วนของออกซิเจนลดลงจากร้อยละ 39.0 เป็น 16.1-20.5 โดยน้ำหนักฐานแห้ง จากผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณเถ้าและปริมาณคาร์บอนและออกซิเจนในโครงสร้างของถ่านชาร์ดังกล่าวทำให้ค่าความร้อนของถ่านชาร์ที่ได้จากถ่านทอรรีไฟต์เพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า ของถ่านชาร์ที่ได้จากไม้กระถินยักษ์ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 13.5 เป็น 25-26 เมกะจูลต่อกิโลกรัม นอกจากนี้แล้วยังทำให้ปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านชาร์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 9.2 เป็นร้อยละ 21-35 ถ่านชาร์ที่ได้การไพโรไลซิสถ่านทอรรีไฟต์มีคุณภาพสูงกว่าถ่านชาร์ที่ได้จากไม้กระถินยักษ์ ซึ่งถ่านชาร์นั้นสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับโรงไฟฟ้าถ่านหินก็ได้ หรือนำไปปรับปรุงสมบัติเพื่อนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง อาหาร ยา และการบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น

ถึงแม้ว่าค่าความร้อนของถ่านชาร์ที่ได้จากถ่านทอรรีไฟต์ที่ผลิตจากการใช้ถ่านทอรรีไฟต์แพกซ์ต่าง ๆ มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ปริมาณผลได้ของถ่านชาร์ดังรูปที่ 4 แตกต่างกันอย่างมาตามถ่านทอรรีไฟต์แพกซ์ที่ใช้ ซึ่งผลนี้เป็นตัวแปรที่กำหนดให้ปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านชาร์เหล่านี้แตกต่างกัน หากพิจารณาเพียงปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านชาร์ที่ผลิตได้นี้พบว่าถ่านทอรรีไฟต์แพกซ์ที่เหมาะสมคือ 280-300 องศาเซลเซียส เนื่องจากให้สัดส่วนเชิงพลังงานในถ่านชาร์สูงที่สุดประมาณร้อยละ 27 และหากนำผลนี้ไปพิจารณาร่วมกับ

ค่าร้อยละของพลังงานในชีวมวลที่แปลงมาเป็นไบโอออยล์หนักดังตารางที่ 3 พบว่าถ่านทอรรีไฟต์แพกซ์ที่เหมาะสมคือ 260-280 องศาเซลเซียส เนื่องจากให้ผลได้เชิงพลังงานสูงถึงร้อยละ 38 จากผลดังกล่าวนี้สามารถสรุปได้ว่าถ่านทอรรีไฟต์แพกซ์ที่เหมาะสมต่อการเตรียมถ่านทอรรีไฟต์เพื่อนำมาผลิตเป็นไบโอออยล์หนักและถ่านชาร์คือ 260 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้ผลได้เชิงพลังงานรวมของผลิตภัณฑ์ทั้งสองส่วนนี้มีค่าเป็นร้อยละ 65

ตารางที่ 4 สมบัติของถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสไม้กระถินยักษ์และถ่านทอรรีไฟต์

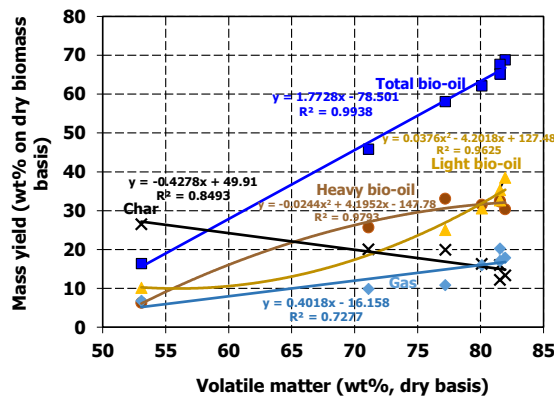
การวิเคราะห์	ไม้กระถินยักษ์	ถ่านทอรรีไฟต์ที่ได้จากกระบวนการทอรรีไฟต์แพกซ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)				
		240	260	280	300	320
ปริมาณเถ้า (wt%)	12.2	10.2	9.9	8.2	8.1	6.1
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (wt%, ฐานแห้ง)						
คาร์บอน (C)	45.9	69.3	69.4	69.5	69.0	68.6
ไฮโดรเจน (H)	2.2	3.5	3.5	3.5	3.6	3.7
ไนโตรเจน (N)	0.7	0.9	0.9	0.9	1.0	1.1
ออกซิเจน (O)	39.0	16.1	16.3	17.9	18.3	20.5
ค่าความร้อน (MJ/kg)						
ค่าความร้อนสูง (HHV)	13.5	26.0	24.9	26.0	25.9	25.6
ค่าความร้อนต่ำ (LHV)	13.1	25.3	24.1	25.2	25.1	24.8
ปริมาณผลได้เชิงพลังงาน (%)	9.2	21.3	20.7	26.5	26.6	34.7

3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของถ่านทอรรีไฟต์กับปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว

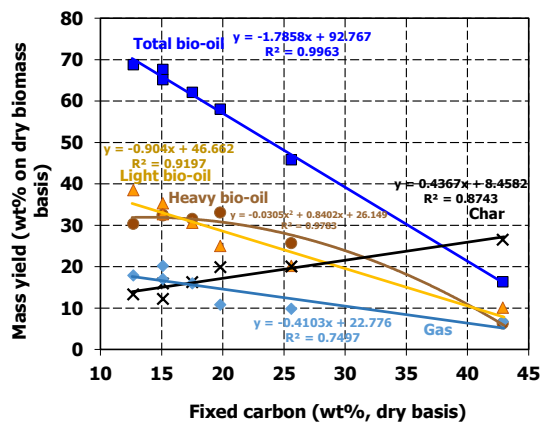
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของถ่านทอรรีไฟต์กับปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว พบว่าการเตรียมถ่านทอรรีไฟต์ด้วยกระบวนการทอรรีไฟต์แพกซ์ส่งผลให้ถ่านทอรรีไฟต์ที่ได้มีองค์ประกอบเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว จากรูปที่ 5 (ก) พบว่า

ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์รวม ไบโอออยล์เบาและไบโอออยล์หนักมีค่าสูงขึ้น เมื่อปริมาณสารระเหยของถ่านทอรรีไฟต์มีค่าสูง หรือก็คือถ่านทอรรีไฟต์มีสารระเหยมากก็ทำให้ได้ไบโอออยล์เพิ่มขึ้น

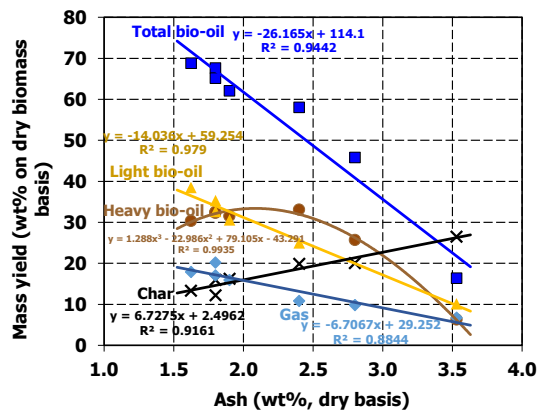
นอกจากนี้ยังพบว่ากระบวนการไพโรไลซิสถ่านทอรรีไฟต์ที่มีปริมาณสารระเหยอยู่ในช่วงร้อยละ 75 ถึง 85 โดยน้ำหนักฐานแห้ง ทำให้มีปริมาณผลได้ของไบโอออยล์พหุนี้นิดไม่แตกต่างกันมากนัก และยังช่วยลดปริมาณน้ำของไบโอออยล์อีกทั้งช่วยเพิ่มปริมาณผลได้เชิงพลังงานอีกด้วย



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบเร็วกับ (ก) ปริมาณสารระเหย (ข) คาร์บอนคงที่ และ (ค) เถ้าของถ่านทอร์รีไฟด์

รูปที่ 5 (ข) และ (ค) แสดงให้เห็นว่าปริมาณผลได้ของถ่านชาร์ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อไพโรไลซิสถ่านทอร์รีไฟด์ที่มีปริมาณคาร์บอนคงที่และเถ้าสูง เมื่อพิจารณาโดยรวม

พบว่าปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสประเภทของเหลวและแก๊สมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อวัตถุดิบมีสารระเหยสูงและมีแนวโน้มลดลงเมื่อวัตถุดิบมีคาร์บอนคงที่และเถ้าสูงขึ้น ในทำนองกลับกัน ผลได้ของของแข็งหรือถ่านชาร์มีแนวโน้มตรงกันข้ามกับผลดังกล่าว โดยถ่านชาร์มีค่าลดลงเมื่อวัตถุดิบมีสารระเหยสูง และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อวัตถุดิบมีคาร์บอนคงที่และเถ้าสูง

4. สรุป

งานวิจัยนี้ใช้ไม้กระถินยักษ์เป็นวัตถุดิบในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วเพื่อผลิตไบโอออยล์ ถ่านชาร์และแก๊ส โดยมีการศึกษาผลของการเตรียมวัตถุดิบด้วยกระบวนการทอร์รีแฟกชันเพื่อเปลี่ยนไม้กระถินยักษ์ให้เป็นถ่านทอร์รีไฟด์ก่อนนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการไพโรไลซิส อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทอร์รีแฟกชันในช่วง 240-320 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ได้ถ่านทอร์รีไฟด์ที่มีสมบัติต่างกัน โดยปริมาณผลได้ของถ่านทอร์รีไฟด์อยู่ในช่วงร้อยละ 50-98 ของชีวมวลแห้งเริ่มต้น เมื่อนำถ่านทอร์รีไฟด์ไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วเพื่อแปลงสภาพเป็นไบโอออยล์และได้ถ่านชาร์เป็นผลิตภัณฑ์รอง ผลการศึกษาพบประเด็นที่น่าสนใจคือแม้ว่ากระบวนการทอร์รีแฟกชันส่งผลให้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์รวมลดลง แต่ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์หนักซึ่งเป็นส่วนที่สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพได้กลับเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 30 เป็น 33 ของชีวมวลแห้ง ส่งผลให้ปริมาณผลได้เชิงพลังงานเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 34 เป็นร้อยละ 38 เมื่อใช้อุณหภูมิทอร์รีแฟกชันที่ 280 องศาเซลเซียสในการเตรียมชีวมวล นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้อุณหภูมิทอร์รีแฟกชันนี้ยังส่งผลดีต่อปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านชาร์ โดยทำให้มีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 9.2 กรณีใช้ชีวมวลที่ไม่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชันเป็นร้อยละ 27 จากผลเหล่านี้สามารถสรุปได้ว่าการทำทอร์รีไฟด์ไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 นาที สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วได้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช) โครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (Thailand Graduate Institute of Science and Technology, TGIST) เลขที่สัญญาทุน SCA-CO-255-2336-TH

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Pattiya and S. Suttibak, "Fast pyrolysis of sugarcane residues in a fluidised bed reactor with a hot vapour filter," *Journal of the Energy Institute*, vol. 90, no. 1, pp. 110-119, 2017.
- [2] A. Pattiya and S. Suttibak, "Production of bio-oil via fast pyrolysis of agricultural residues from cassava plantations in a fluidised-bed reactor with a hot vapour filtration unit," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 95, pp. 227-235, 2012.
- [3] S. A. Raja, Z. R. Kennedy, B. C. Pillai, and C. L. R. Lee, "Flash pyrolysis of jatropa oil cake in electrically heated fluidized bed reactor," *Energy*, vol. 35, no. 7, pp. 2819-2823, 2010.
- [4] A. V. Bridgwater, "Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading," *Biomass and Bioenergy*, vol. 38, pp. 68-94, 2012.
- [5] A. A. Boateng and C. A. Mullen, "Fast pyrolysis of biomass thermally pretreated by torrefaction," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 100, pp. 95-102, 2013.
- [6] T. Wigley, A. C. K. Yip, and S. Pang, "Pretreating biomass via demineralisation and torrefaction to improve the quality of crude pyrolysis oil," *Energy*, vol. 109, pp. 481-494, 2016.
- [7] R. N. Hilten, R. A. Speir, J. R. Kastner, S. Mani, and K. C. Das, "Effect of Torrefaction on Bio-oil Upgrading over HZSM-5. Part 1: Product Yield, Product Quality, and Catalyst Effectiveness for Benzene, Toluene, Ethylbenzene, and Xylene Production," *Energy & Fuels*, vol. 27, no. 2, pp. 830-843, 2013.
- [8] R. N. Hilten, R. A. Speir, J. R. Kastner, S. Mani, and K. C. Das, "Effect of Torrefaction on Bio-oil Upgrading over HZSM-5. Part 2: Byproduct Formation and Catalyst Properties and Function," *Energy & Fuels*, vol. 27, no. 2, pp. 844-856, 2013.
- [9] M. Atienza-Martínez, I. Fonts, L. Lázaro, J. Ceamanos, and G. Gea, "Fast pyrolysis of torrefied sewage sludge in a fluidized bed reactor," *Chemical Engineering Journal*, vol. 259, pp. 467-480, 2015.
- [10] D. Chen, K. Cen, X. Jing, J. Gao, C. Li, and Z. Ma, "An approach for upgrading biomass and pyrolysis product quality using a combination of aqueous phase bio-oil washing and torrefaction pretreatment," *Bioresource Technology*, vol. 233, pp. 150-158, 2017.
- [11] D. Chen *et al.*, "Combined pretreatment with torrefaction and washing using torrefaction liquid products to yield upgraded biomass and pyrolysis products," *Bioresource Technology*, vol. 228, pp. 62-68, 2017.

- [12] R. Mahadevan *et al.*, "Effect of torrefaction temperature on lignin macromolecule and product distribution from HZSM-5 catalytic pyrolysis," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 122, pp. 95-105, 2016.
- [13] A. Zheng *et al.*, "Catalytic Fast Pyrolysis of Biomass Pretreated by Torrefaction with Varying Severity," *Energy & Fuels*, vol. 28, no. 9, pp. 5804-5811, 2014.
- [14] B. Mi, Z. Liu, W. Hu, P. Wei, Z. Jiang, and B. Fei, "Investigating pyrolysis and combustion characteristics of torrefied bamboo, torrefied wood and their blends," *Bioresource Technology*, vol. 209, pp. 50-55, 2016.
- [15] W.-H. Chen, K.-M. Lu, S.-H. Liu, C.-M. Tsai, W.-J. Lee, and T.-C. Lin, "Biomass torrefaction characteristics in inert and oxidative atmospheres at various superficial velocities," *Bioresource Technology*, vol. 146, pp. 152-160, 2013.
- [16] S.-W. Du, W.-H. Chen, and J. A. Lucas, "Pretreatment of biomass by torrefaction and carbonization for coal blend used in pulverized coal injection," *Bioresource Technology*, vol. 161, pp. 333-339, 2014.
- [17] S. Zhang, B. Hu, L. Zhang, and Y. Xiong, "Effects of torrefaction on yield and quality of pyrolysis char and its application on preparation of activated carbon," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 119, pp. 217-223, 2016.
- [18] S. Zhang, Q. Dong, T. Chen, and Y. Xiong, "Combination of Light Bio-oil Washing and Torrefaction Pretreatment of Rice Husk: Its Effects on Physicochemical Characteristics and Fast Pyrolysis Behavior," *Energy & Fuels*, vol. 30, no. 4, pp. 3030-3037, 2016.
- [19] S. Zhang, T. Chen, Y. Xiong, and Q. Dong, "Effects of wet torrefaction on the physicochemical properties and pyrolysis product properties of rice husk," *Energy Conversion and Management*, 2016.
- [20] V. Srinivasan, S. Adhikari, S. A. Chattanathan, and S. Park, "Catalytic Pyrolysis of Torrefied Biomass for Hydrocarbons Production," *Energy & Fuels*, vol. 26, no. 12, pp. 7347-7353, 2012.
- [21] W. Cai, A. Fivga, O. Kaario, and R. Liu, "Effects of Torrefaction on the Physicochemical Characteristics of Sawdust and Rice Husk and Their Pyrolysis Behavior by Thermogravimetric Analysis and Pyrolysis-Gas Chromatography/Mass Spectrometry," *Energy & Fuels*, vol. 31, no. 2, pp. 1544-1554, 2017.
- [22] Y. Chen, H. Yang, Q. Yang, H. Hao, B. Zhu, and H. Chen, "Torrefaction of agriculture straws and its application on biomass pyrolysis poly-generation," *Bioresource Technology*, vol. 156, pp. 70-77, 2014.
- [23] E. B. Hassan, I. Elsayed, and A. Eseyin, "Production high yields of aromatic hydrocarbons through catalytic fast

- pyrolysis of torrefied wood and polystyrene," *Fuel*, vol. 174, pp. 317-324, 2016.
- [24] J. Li, G. Bonvicini, L. Tognotti, W. Yang, and W. Blasiak, "High-temperature rapid devolatilization of biomasses with varying degrees of torrefaction," *Fuel*, vol. 122, pp. 261-269, 2014.
- [25] Z. Yang, M. Sarkar, A. Kumar, J. S. Tumuluru, and R. L. Huhnke, "Effects of torrefaction and densification on switchgrass pyrolysis products," *Bioresource Technology*, vol. 174, pp. 266-273, 2014.
- [26] T. Wigley, A. C. K. Yip, and S. Pang, "A detailed product analysis of bio-oil from fast pyrolysis of demineralised and torrefied biomass," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 123, pp. 194-203, 2017.
- [27] A. Zheng *et al.*, "Effect of torrefaction on structure and fast pyrolysis behavior of corncocks," *Bioresource Technology*, vol. 128, pp. 370-377, 2013.
- [28] J. Meng, A. Moore, D. C. Tilotta, S. S. Kelley, S. Adhikari, and S. Park, "Thermal and storage stability of bio-oil from pyrolysis of torrefied wood," *Energy & Fuels*, vol. 29, no. 8, pp. 5117-5126, 2015.
- [29] Y.-F. Huang, H.-T. Sung, P.-T. Chiueh, and S.-L. Lo, "Microwave torrefaction of sewage sludge and leucaena," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 70, pp. 236-243, 2017.
- [30] S. Sonsupap and A. Pattiya, "Improvement of sugarcane leaves property by torrefaction in a continuous tubular flow reactor," *Srinakharinwirot Engineering Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 106-115, 2019.
- [31] S. A. Channiwala and P. P. Parikh, "A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels," *Fuel*, vol. 81, no. 8, pp. 1051-1063, 2002.
- [32] ECN.NTO (2020, June 1) Phyllis2, database for (treated) biomass, algae, feedstocks for biogas production and biochar [Online]. Available: <https://phyllis.nl/>
- [33] M. Ahiduzzaman and A. K. M. S. Islam, "Energy Yield of Torrefied Rice Husk at Atmospheric Condition," *Procedia Engineering*, vol. 105, pp. 719-724, 2015.
- [34] P. Basu, "Chapter 3 - Pyrolysis and Torrefaction," in *Biomass Gasification and Pyrolysis* Boston: Academic Press, 2010, pp. 65-96.
- [35] G. Almeida, J. O. Brito, and P. Perré, "Alterations in energy properties of eucalyptus wood and bark subjected to torrefaction: The potential of mass loss as a synthetic indicator," *Bioresource Technology*, vol. 101, no. 24, pp. 9778-9784, 2010.
- [36] F. Shafizadeh, "Pyrolytic Reactions and Products of Biomass," in *Fundamentals of Thermochemical Biomass Conversion*. R.P. Overend, T.A. Milne, L.K. Mudge, Ed., Dordrecht: Springer Netherlands, 1985, pp. 183-217.

- [37] J. Shankar Tumuluru, S. Sokhansanj, J. R. Hess, C. T. Wright, and R. D. Boardman, "REVIEW: A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications," *Industrial Biotechnology*, vol. 7, no. 5, pp. 384-401, 2011.
- [38] P. Basu, " Biomass Cofiring and Torrefaction," in *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction (Second Edition)* P. Basu, Ed. Boston: Academic Press, 2013, pp. 353-373.

การจัดการพลังงานสำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย บนพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียม

Energy System Management for Substation of Electricity Generating Authority of Thailand base on Artificial Neural Network

ศิริพงษ์ ลือชัย กวิน สอนิเพิ่มพูน*

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

99 หมู่ 9 ถนนสีหราชเดโชชัย อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000

Siraphong Luechai, Kawin Sonthipermpon*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University,

99 Moo9, Siharajdachochai Road, Moug, Phitsanulok 65000

*Corresponding author Email: Sonkawin@nu.ac.th

(Received: February 24, 2020; Accepted: July 8, 2020)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการแก้ปัญหาความไม่สม่ำเสมอของแรงดันไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้าโดยใช้วิธีการเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ค่าระดับแรงดันไฟฟ้ามีความเสถียรเพิ่มมากขึ้น โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ อนึ่งหลังจากได้แบบจำลองแล้วเปรียบเทียบผลการศึกษาค้นคว้า พบว่าค่าทางไฟฟ้าที่ได้จากวิธีการโครงข่ายประสาทเทียมกับค่าทางไฟฟ้าเดิมนั้น มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานลดลงจาก 2.4503 เหลือ 0.7559 หรือลดลง 69.15 % และความแปรปรวนลดลงจาก 6.0041 เหลือ 0.5714 หรือลดลง 90.48 % ดังนั้นวิธีการโครงข่ายประสาทเทียมจึงมีประสิทธิภาพสามารถทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้ามีความเสถียรเพิ่มมากขึ้น

คำสำคัญ: การหาค่าที่เหมาะสม ปัญญาประดิษฐ์ โครงข่ายประสาทเทียม ตัวปรับแรงดันหม้อแปลงไฟฟ้า

ABSTRACT

The Irregular and unstable Electrical Power Problems solving of Power Station with Artificial Neural Network Technique aims make the voltage value to stable and to create the mathematics model. From the comparison result found that the obtainable electrical value of the artificial neural network method with the initial electrical value. The standard deviation has decreased from 2.4503 to 0.7559 , representing 69.15% and the variance has decreased from 6.0041 to 0.5714 , representing 90.48%. Therefore, the artificial neural network method has increased voltage stability.

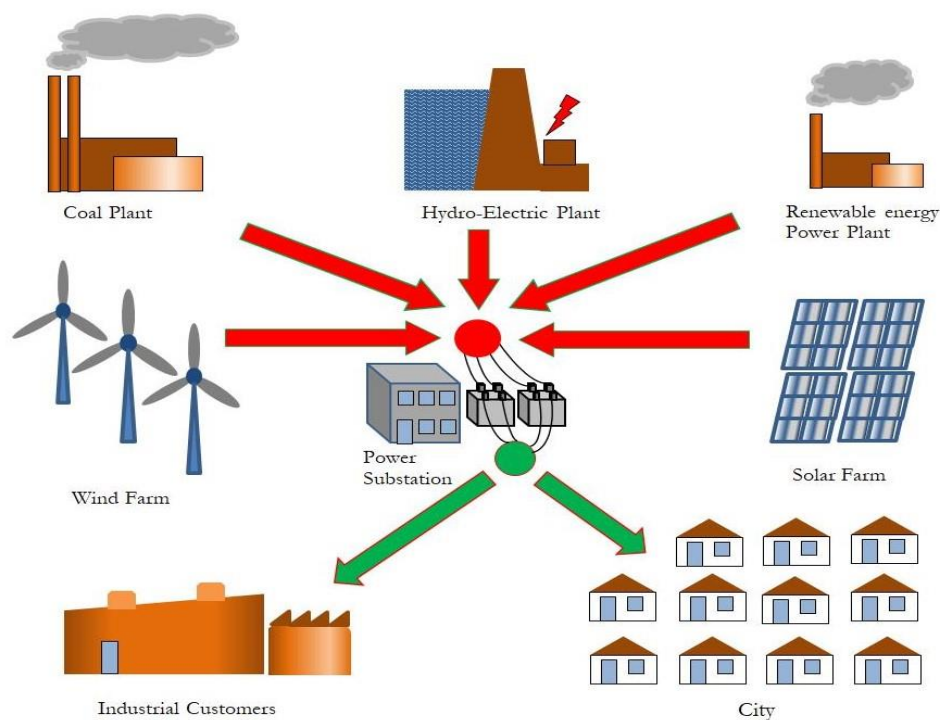
Keyword: Optimization, Artificial intelligence, Artificial neural network, Tap changer

1. บทนำ

เนื่องจากสถานีไฟฟ้าย่อย (Power Sub Station) ได้ประสบปัญหาแรงดันไฟฟ้าขาเข้าที่ผลิตจากแหล่งธรรมชาติมีความไม่มีความสม่ำเสมอ [1] ซึ่งมาจากหลายสาเหตุ ดังเช่น ในกรณีศึกษาสถานีไฟฟ้าย่อยจังหวัดพิษณุโลก โดยหม้อแปลงไฟฟ้ารับแรงดันไฟฟ้าขาเข้า 230 kVA จ่ายออก 115 kVA แต่มีแหล่งส่งกำลังไฟฟ้าหลายแหล่ง ไม่ว่าจะเป็น จากสายส่งหลักจากเหมืองแม่เมาะ จากโซลาร์ฟาร์ม (Solar Farm) จากโซลาร์บนหลังคา (Solar Roof Top) ซึ่งมีความไม่แน่นอนของแสงแดดในแต่ละวัน พลังงานลม (Wind Farm) จากกังหันลมซึ่งมีความไม่เท่ากันในแต่ละวัน การผลิตกระแสไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าที่ใช้ก๊าซชีวภาพ (Biomass) การผลิตไฟฟ้าโดยเครื่องจักรไอน้ำที่ใช้ถ่านหิน น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติโดยเอเจนและแหล่งอื่น ๆ โดยแสดงดังรูปที่ 1 กราฟแรงดันไฟฟ้า ซึ่งการที่แรงดันไฟฟ้าได้รับมาจากหลายแหล่งมาสู่สถานีไฟฟ้าย่อยนี้มีค่าที่สูงต่ำมากมาย การปรับค่าแรงดันไฟฟ้าภายในสถานีไฟฟ้านั้นเจ้าหน้าที่จะทำการปรับค่าด้วยมือตามความชำนาญของแต่ละคน ที่ถึงแม้จะ

ได้รับการฝึกฝนมาใกล้เคียงกันแต่ก็จะไม่คงที่ ซึ่งการปรับค่าที่ไม่คงที่ดังกล่าวนี้เอง ทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบได้ และอาจเกิดปัญหาอื่นตามมาอีก อย่างไรก็ตามในการปรับค่าจะกำหนดให้ค่าแรงดันขาเข้าและขาออกไม่ใหเกินค่าที่กำหนดคือ -3% ถึง $+7\%$ [2] เพื่อให้เครื่องมือทางไฟฟ้าทำงานได้ตามปกติ ในการปรับค่านั้นจะมีการตรวจสอบและบันทึกค่าทุก 15 นาที เมื่อรวมทั้ง 365 วันทำให้มีค่าที่ทำการบันทึกไว้ใน 1 ปีทั้งหมดประมาณ 35,040 ชุดข้อมูล ซึ่งเป็นข้อมูลจำนวนมากและยากแก่การนำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการจ่ายไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้า

วิธีการโครงข่ายประสาทเทียมถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย มีการนำมาใช้กับ ค่า PID ในการปรับค่าเครื่องปรับอากาศ [3] การสร้างแอปพลิเคชันเพื่อการทำงานแบบอัตโนมัติของ PID กับวิธีการโครงข่ายประสาทเทียม [4] การออกแบบตัวควบคุม PID ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติในโปรแกรม Matlab [5] และการออกแบบระบบควบคุม PID ร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมแก้ปัญหาแบบไม่เชิงเส้น



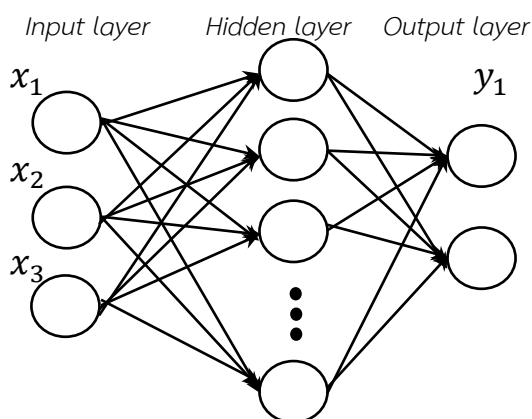
รูปที่ 1 ภาพแสดงผังของแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลายแหล่ง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองการคิดของสมองในการหาค่าที่เหมาะสมในการปรับแรงดันไฟฟ้าซึ่งจะทำให้ค่าระดับแรงดันไฟฟ้ามีความสม่ำเสมอ โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อให้การปรับค่าแรงดันไฟฟ้าให้มีความเสถียรมากขึ้น

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network : ANN)

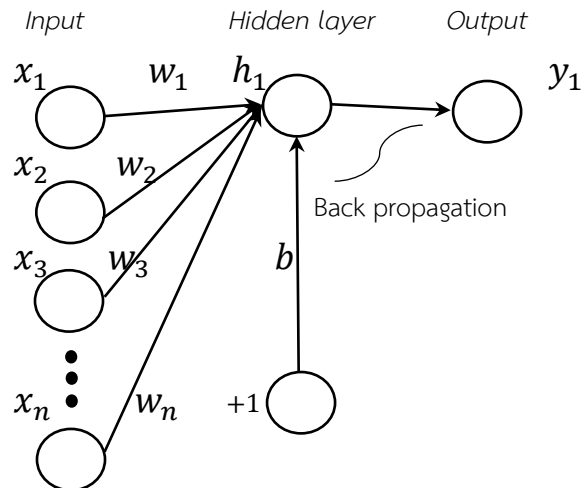
โครงข่ายประสาทเทียมเป็นการทำให้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) ประเภทการเรียนรู้โดยมีผู้สอน (Supervised learning) โดยการให้คอมพิวเตอร์จำค่าที่ได้จากการปรับทั้งหมด ซึ่งวิธีการโครงข่ายประสาทเทียมนี้จะมี การแบ่งส่วนที่ต้องคำนวณออกเป็น 3 ส่วนคือ Input layer, Hidden layer, Output layer [6] [7] ดังรูปที่ 2 โดยส่วน Input layer จะใส่ข้อมูลดิบลงไป แล้วนำมาประมวลผลที่ Hidden layer และวิเคราะห์ค่าที่ Output layer โดยที่เส้นลูกศรคือค่าน้ำหนัก (w : weight) ซึ่งในการหาโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมนั้นต้องทำการหาค่าน้ำหนักจนกว่าจะได้ค่าน้ำหนัก (w : weight) ที่เหมาะสม



รูปที่ 2 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียม

โดยแต่ละส่วนนั้นจะมีโหนด (Node) อยู่จำนวนหนึ่ง โดยการป้อนค่าเริ่มต้น (x : Input) โดยแต่ละโหนดนั้นจะมีการกำหนดน้ำหนัก (w : weight) ที่

เหมาะสมเพื่อให้ค่าผลลัพธ์ (y : output) ซึ่งในกระบวนการทั้งหมดก็จะมีการทวนสอบ (Back propagation) เพื่อปรับให้ค่าน้ำหนักที่ออกมาเข้าใกล้ถูกต้องให้มากที่สุด [8] ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม

โดยในส่วนของการข้อมูล Input จะนำมาจากข้อมูลค่า ระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ PID ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อ 2.2

2.2 ระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID Controller)

วิธีการปรับค่าใดก็ได้ก็ตามให้เข้าสู่ค่าที่เราตั้ง (Set point) ด้วยความรวดเร็วและนุ่มนวลมากที่สุด เนื่องจากการปรับกระแสไฟฟ้าและแรงดันนั้นต้องหลีกเลี่ยงไฟกระชากให้ได้มากที่สุด โดย PID (Proportional-Integral-Derivative Controller) คือวิธีคำนวณ ขึ้นอยู่กับสามตัวแปรคือค่าสัดส่วน ปริพันธ์ และ อนุพันธ์ โดยการปรับค่าคงที่ใน PID ตัวควบคุมสามารถปรับรูปแบบการควบคุมให้เหมาะสมกับที่กระบวนการต้องการได้ การตอบสนองของตัวควบคุมจะอยู่ในรูปของการไหวตัวของตัวควบคุมจนถึงค่าความผิดพลาด ค่าโอเวอร์ชูต (Overshoots) และ ค่าแกว่งของระบบ (Oscillation)

โดยการควบคุมแบบ PID ใช้สมการที่ 1 [1]

ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 เดือน พฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2563

$$u(t) = P_{out}(t) + I_{out}(t) + D_{out}(t) \quad (1)$$

เมื่อ $P_{out}(t)$, $I_{out}(t)$, $D_{out}(t)$ เป็นผลของสัญญาณขาออกจากระบบควบคุม PID โดยเทอมค่าสัดส่วน ปริพันธ์ และอนุพันธ์ จะเป็นไปตามสมการ (2) (3) (4)

$$P_{out} = K_p e(t) \quad (2)$$

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (3)$$

$$D_{out} = K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (4)$$

เมื่อ

$u(t)$: ผลรวมของสัญญาณขาออก

P_{out} : สัญญาณขาออกของเทอมสัดส่วน

I_{out} : สัญญาณขาออกของเทอมปริพันธ์

D_{out} : สัญญาณขาออกของเทอมอนุพันธ์

K_p : อัตราขยายสัดส่วน, ตัวแปรปรับค่าได้

K_i : อัตราขยายปริพันธ์ ตัวแปรปรับค่าได้

K_d : อัตราขยายอนุพันธ์ ตัวแปรปรับค่าได้

τ : ตัวปริพันธ์หุน

e : ค่าความผิดพลาด คือ $SP - PV$

t : เวลา

มีการเปรียบเทียบการเลือกจำนวน Hidden layer โดยใช้สูตรค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (Mean Square Error: MSE) ตามสมการ (5)

$$MSE = \frac{(a_1 - b_1)^2 + \dots + (a_n - b_n)^2}{n} \quad (5)$$

โดยที่

MSE: คือค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง

ตัวแปร $a_1 \dots a_n$: คือค่าข้อมูลที่แท้จริง

ตัวแปร $b_1 \dots b_n$: คือผลลัพธ์ที่ได้จากการพยากรณ์

ตัวแปร $c_1 \dots c_n$: คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด

หลังจากได้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแล้วจะเปรียบเทียบความเสถียรของแรงดันไฟฟ้าโดยใช้ สูตรการหาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล ตามสมการ (6)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}} \quad (6)$$

โดยที่

σ : คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$: เป็นข้อมูลทั้งหมด

จำนวน n หน่วย

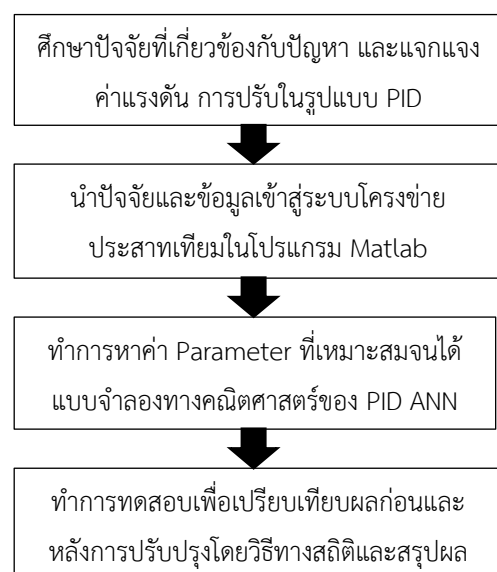
μ : แทนค่าเฉลี่ยเลขคณิตของข้อมูลแรงดันไฟฟ้า

n : คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด

2.3 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Matlab ซึ่งเป็นปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) โดยจะประยุกต์นำเอาวิธีการและเทคนิคในข้อ 2.1 และ ข้อ 2.2 มาใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมโดยนำค่าทางไฟฟ้าของระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ PID Controller มาเข้าประมวลผลด้วยเทคนิควิธีโครงข่ายประสาทเทียม [9] โดยใช้โปรแกรม Matlab [10] [11] เพราะเจ้าหน้าที่เป็นมนุษย์อาจมีความผิดพลาด (Human Error) จากการทำงานซ้ำเดิม จากความเมื่อยล้าในการทำงานหรือจากสาเหตุต่าง ๆ การปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเหล่านี้จึงควรต้องใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) ให้คอมพิวเตอร์ปรับค่าแทนทำให้มีความเสถียรของระบบที่มากกว่าการทำงานของมนุษย์

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

การใช้วิธีการทำให้ค่าที่ปรับมีความเสถียรสม่ำเสมอมากขึ้นมี 4 ขั้นตอน ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 วิธีการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนที่ 1 วิเคราะห์จากข้อมูลค่าแรงดันไฟฟ้าโดยมีแรงดันขาเข้าคือ 230 kVA และขาออกคือ 115 kVA ที่ได้ปี พ.ศ.2561 ทุก 15 นาทีตลอดทั้งปี เป็นจำนวน 35,040 ชุด รวมถึงการศึกษาข้อจำกัดต่าง ๆ ทั้งทางไฟฟ้าด้านทางปลายทาง ความปลอดภัย และทางกฎหมาย

ขั้นตอนที่ 2 นำข้อมูลมาเข้ารูปแบบฟังก์ชัน PID Controller จะได้ค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ของ PID แล้วนำค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้ที่เหมาะสมปรับเข้ากับระบบโครงข่ายประสาทดัดเทียม โดยใช้ชุดคำสั่งสำเร็จรูป (Toolbox) โครงข่ายประสาทดัดเทียม และมีการเขียนฟังก์ชันเพิ่มเติมเข้าไปเพื่อให้ได้รูปแบบที่เหมาะสม โดยโครงข่ายประสาทดัดเทียมให้ค่า Input ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$) คือแรงดันไฟฟ้าขาเข้า (230 kVA) การปรับตัวด้านทาน (TAP Changer) ความคลาดเคลื่อนขาเข้า (E_p, E_i, E_d) ค่าคงที่ (K_p, K_i, K_d) และกำหนดค่า Output คือแรงดันไฟฟ้าขาออก (115 kVA) ความคลาดเคลื่อนขาออก (E_p, E_i, E_d) ค่าคงที่ (K_p, K_i, K_d) [12] [13]

ขั้นตอนที่ 3 ทำการทดสอบหาค่า parameter ที่เหมาะสม หา Hidden layer โดยในส่วนของ Hidden layer นั้นต้องการหาเพื่อหาจำนวนที่เหมาะสมโดยใช้ MSE เทียบกับเวลาที่ใช้ในการคำนวณด้วย โดยใช้โปรแกรม Matlab โดยใช้คอมพิวเตอร์ Laptop ยี่ห้อ ACER รุ่น Aspire VX 15, CPU 7th Generation Intel Core i7-7700HQ up to 3.8GHz 6MB cache, NVIDIA GeForce GTX 1050 4GB GDDR5, 8 GB RAM DDR4, 128GB SSD, 1TB HDD ซึ่งมีสมรรถนะใกล้เคียงกับเครื่องคอมพิวเตอร์ของสถานีไฟฟ้าในการวิเคราะห์ ซึ่งจะ Input ($V_{A_{input}}, K_p, K_i, K_d, E_p, E_i, E_d$) และ Output ($KVA_{Output}, K_p, K_i, K_d, E_p, E_i, E_d, \text{Tap Changer Number}$) ในการสุ่มหาจำนวนของ hidden layer จะใช้องค์ประกอบอยู่ 2 ส่วนคือเวลาที่ใช้ในการคำนวณ และเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำ

ขั้นตอนที่ 4 ได้แบบจำลองโครงข่ายประสาทดัดเทียมที่ต้องการ นำไปเขียนเป็นฟังก์ชัน เพื่อนำไปใช้ในการพยากรณ์และปรับค่าแรงดันไฟฟ้า รวมทั้ง เปรียบเทียบ

ผลก่อนและหลังการปรับปรุงโดยใช้วิธีทางสถิติและสรุปผลต่อไป

ทั้งนี้ในกระบวนการดำเนินการวิจัยทั้งหมดนั้นต้องคำนึงถึงความปลอดภัย ความแปรปรวนของผู้ผลิต ความต้องการไฟฟ้าของผู้ซื้อ กฎหมายทางไฟฟ้าและวิธีการปฏิบัติงานจริงของเจ้าหน้าที่สถานที่ไฟฟ้าเป็นหลัก

4. ผลการทดลอง

การทดสอบโดยการแบ่งข้อมูลแรงดันไฟฟ้า 115 kVA จำนวน 35,040 ชุด (364 วัน $\times$ 24 ชั่วโมง $\times$ 4 ค่า) ออกเป็นสัดส่วน Train Ratio, Validation Ratio, Test Ratio เป็น 70, 15, 15 ตามลำดับ

4.1 หาจำนวน Hidden layer

โดยแบ่ง hidden layer เพื่อทดสอบเป็น 5, 10, 50, 100, 200 และเปรียบเทียบโดยใช้สูตรค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (Mean Square Error: MSE) [14] โดยผลที่ได้เป็นดังตารางที่ 1

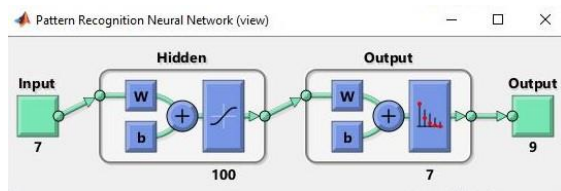
ตารางที่ 1 การหาจำนวน Hidden Layer

จำนวน HIDDEN LAYER	เวลาที่ใช้	MSE
5	1.21 นาที	36.57
10	1.81 นาที	28.42
50	2.47 นาที	17.26
<u>100</u>	<u>4.78 นาที</u>	<u>3.24</u>
200	10.68 นาที	3.10

พิจารณาแล้ว Hidden layer ที่เหมาะสมคือ 100 นำมาใช้ในการคำนวณต่อไป เพราะค่า MSE มีค่า 3.24 มีความแม่นยำสูง Hidden layer มากกว่านี้ค่า MSE ก็ไม่เปลี่ยนแปลงจากเดิมมาก และเกินไปจะเกิดความจำป็นและใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้น

4.2 ผลจากโปรแกรม Matlab

ข้อมูลประกอบการอ้างอิงผลจากการใช้ Input layer จำนวน 7 โหนด Hidden layer จำนวน 100 โหนด และ Output layer จำนวน 9 โหนด ดังรูปที่ 5



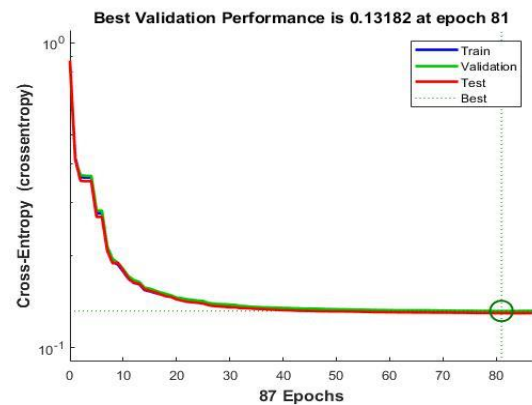
รูปที่ 5 แสดงการเลือก Hidden Layer จำนวน 100

จากนั้นใช้การกำหนดค่าโหนดโครงข่ายประสาทเทียม ในรูปที่ 5 เพื่อ Run หาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งจะสุ่มหาตัวเลขค่าน้ำหนักของแต่ละโหนดซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกว่าแบบจำลองดังกล่าวจะมีความแม่นยำเป็นที่น่าพอใจ โดยการวิเคราะห์ความแม่นยำใช้ Confusion Matrix เพื่อหาอัตราส่วนระหว่างค่าพยากรณ์กับผลลัพธ์ โดยค่าพยากรณ์มีความตรงกันและเกาะกลุ่มใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังรูปที่ 6

Confusion Matrix									
Output Class	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	38 0.1%	84 0.2%	14 0.0%	3 0.0%	0 0.0%
2	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	NaN% NaN%
3	0 0.0%	0 0.0%	93 0.3%	72 0.2%	30 0.1%	4 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	46.7% 53.3%
4	0 0.0%	0 0.0%	495 1.4%	3308 9.6%	2134 6.2%	988 2.9%	96 0.3%	0 0.0%	47.1% 52.9%
5	0 0.0%	0 0.0%	46 0.1%	3916 11.3%	10568 30.6%	5313 15.4%	1544 4.5%	65 0.2%	49.3% 50.7%
6	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	73 0.2%	1384 4.0%	2858 8.3%	1148 3.3%	187 0.5%	50.5% 49.5%
7	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	3 0.0%	3 0.0%	4 0.0%	2 0.0%	33.3% 66.7%
8	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	2 0.0%	3 0.0%	8 0.0%	47.1% 52.9%
9	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	NaN% NaN%
Target Class	NaN% NaN%	NaN% NaN%	14.7% 85.3%	44.9% 55.1%	74.6% 25.4%	30.9% 69.1%	0.1% 99.9%	3.0% 97.0%	48.8% 51.2%

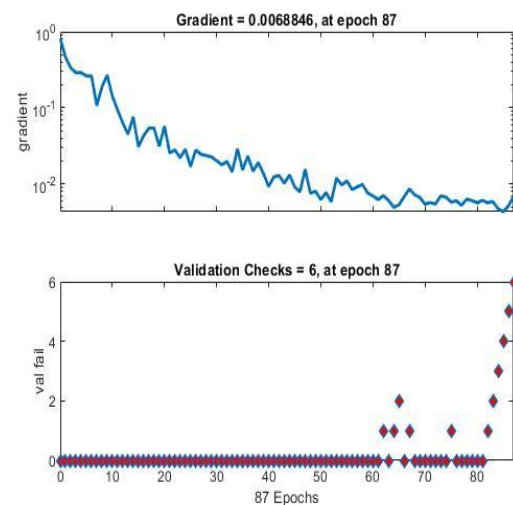
รูปที่ 6 แสดง Confusion Matrix (Total)

การสุ่มโดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 3 กลุ่มคือ Train, Validation, Test และสุ่มค่าน้ำหนักไปเรื่อย ๆ โดยทำซ้ำจนกว่าจะได้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม โดยการตรวจสอบค่าตัวแปรในแบบจำลองจนได้ Best Validation Performance เท่ากับ 0.13182 ที่การสุ่มครั้งที่ 81 ดังรูปที่ 7



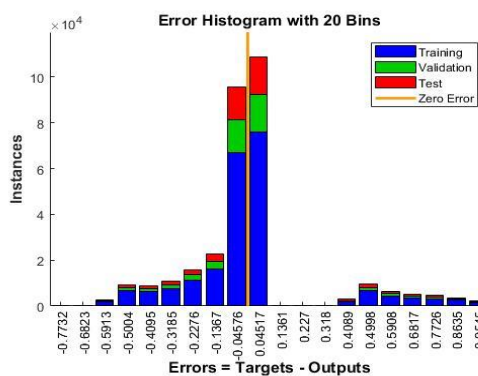
รูปที่ 7 แสดง Best Validation Performance

หลังจากได้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม แล้วจะทำ Validation Check อีก 6 ครั้งหาค่าพยากรณ์กับผลลัพธ์โดยรวมตรงกัน 6 ครั้งถือว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมนี้เชื่อถือได้ โดยรวมจำนวนการสุ่มทั้งหมดตั้งแต่เริ่มคือ 87 ครั้ง ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แสดง Training State

จากการสุ่มข้อมูลที่แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ Test จำนวนร้อยละ 15 , Validation จำนวนร้อยละ 15 และ Train จำนวนร้อยละ 70 จะทำการตรวจสอบค่าความผิดพลาด Error โดยแสดงเป็นแผนภูมิแท่ง โดยค่าที่ได้ส่วนใหญ่ เข้าใกล้ค่า 0 คือค่าที่ค่ามีความผิดพลาดน้อย น่าเชื่อถือ ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 แสดง Error Histogram

แบบรายวัน แสดงดังรูปที่ 10 และกราฟแสดงผลแบบรายปีแสดงดังรูปที่ 11

โดยที่

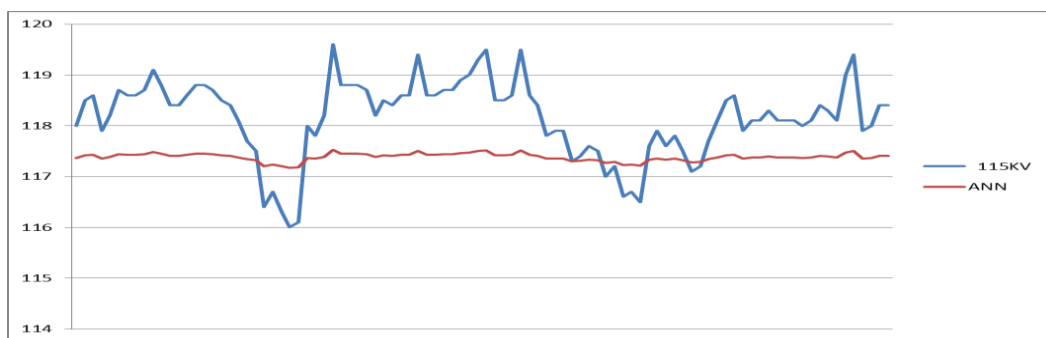
115KV MAIN BUS#1: คือค่าแรงดันไฟฟ้าจริง(เดิม)

ANN: คือค่าแรงดันไฟฟ้าที่ปรับตามกระบวนการ

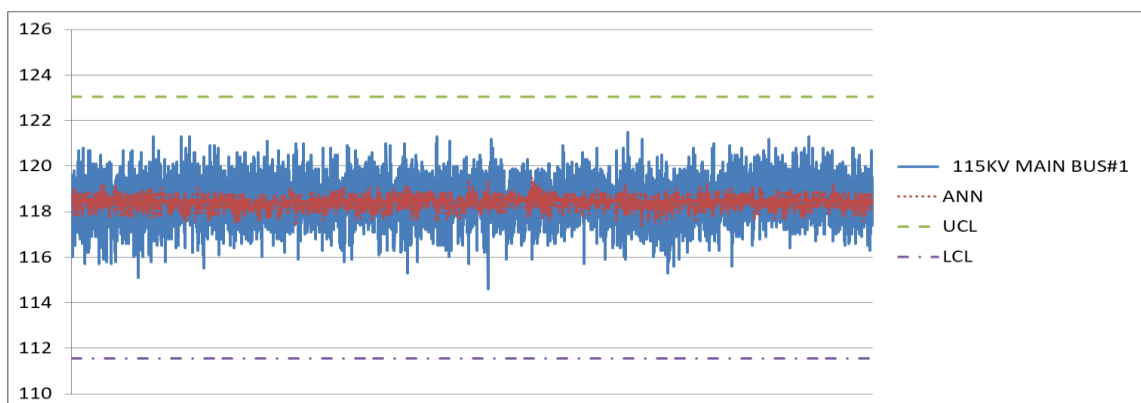
โครงข่ายประสาทเทียม Artificial Neural Network

UCL: เขตควบคุมบน Upper Control Limit

LCL: เขตควบคุมล่าง Lower Control Limit



รูปที่ 10 ค่าเดิมที่ปรับด้วยมือคน (น้ำเงิน) และค่าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (แดง) ใน 1 วัน



รูปที่ 11 ค่าเดิมที่ปรับด้วยมือคน(เส้นทึบสีน้ำเงิน) และค่าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (เส้นจุดสีแดง) ใน 1 ปี

หลังจากที่ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายประสาทเทียมแล้ว เมื่อนำค่าแรงดันไฟฟ้าเดิมมาเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลอง จะเห็นได้ว่ากราฟมีความเรียบและเสถียรมากขึ้น โดยผลส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานลดลงจาก 2.4503 เหลือ 0.7559 และ ความแปรปรวนลดลงจาก 6.0041 เหลือ 0.5714 โดยได้กราฟแสดงผล

5. สรุป

จากค่าที่ได้จากกระบวนการที่ใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียมเปรียบเทียบกับค่าทางไฟฟ้าแรกเริ่ม จะเห็นได้ว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานลดลงจาก 2.4503 เหลือ 0.7559 คิดเป็นลดลง 69.15 % และ ความแปรปรวนลดลงจาก 6.0041 เหลือ 0.5714 คิดเป็นลดลง 90.48 % แสดงว่าวิธีการปรับโดยใช้พื้นฐานโครงข่ายประสาทเทียมสามารถทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้ามีความเสถียรเพิ่มมากขึ้น

6. ข้อเสนอแนะและงานที่จะทำต่อไป

จากงานวิจัยจะเห็นได้ว่า สามารถทำให้แรงดันไฟฟ้ามีความเสถียรขึ้น การไฟฟ้าฝ่ายผลิตที่สามารถที่จะนำงานวิจัยนี้ไปขยายผลสู่สถานอื่นต่อไปได้

นอกจากนี้งานที่ควรจะทำต่อไปคือการนำแบบจำลองโครงข่ายประสาทดัดแปลงที่ได้นี้ ไปพัฒนาเป็นแอปพลิเคชันหรือปรับปรุงเป็นระบบอัตโนมัติต่อไปเพื่อให้สถานีไฟฟ้าอยู่ใช้งานง่ายขึ้น

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้บริหารและบุคลากรในสถานีไฟฟ้าพิษณุโลก2 การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอนุเคราะห์ข้อมูลในการทำวิจัยเป็นอย่างดีและรองศาสตราจารย์ ดร.กวิณ สนธิเพิ่มพูนอาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำปรึกษาตลอดการทำวิจัยจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Mercier, Cherkaoui, & Oudalov, "Optimizing a battery energy storage system for frequency control application in an isolated power system.", *IEEE transactions on Power Systems*, 24 (3), pp. 1469-1477, 2009
- [2] Handbook for Power System Control Center, Electricity Generating Authority of Thailand in Northern Region, 2017, pp. 71
- [3] M. Malekabadi, M. Haghparast and F. Nasiri, "Air Condition's PID Controller Fine-Tuning Using Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms", *Molecular Diversity Preservation International (MDPI)*, 2018
- [4] D. Sui and Z. Jiao, "Application of Neural Network in Optimization of PID Controller", *Metallurgical and Mining Industry (MMI)*, No. 7, 2015
- [5] R. Rattanawaorahirunkul, J. Seekuka, S. Supannarach and P. Kutchomsri, "Optimal PID Controller design for Automatic Voltage Regulator Systems", *Journal of Information Science and Technology* 4 (1), pp. 21-26, 2013
- [6] D. Jetpipattanapong and R. Tanapattanadol, "A Comparative Impact Study of the Changing Number of Outputs in Artificial Neuron Network on Yom River Tide Forecasting, Phrae Province", *Journal of Environmental Management*, Volume 6, No. 2, Jul-Dec 2010
- [7] A. Zribi, M. Chtourou, M. Djemel, "A New PID Neural Network Controller Design for Nonlinear Processes", *Journal of Circuits, Systems and Computers*, Vol. 27, No. 04, 2018
- [8] M. Hemmatinezhad, A. G. Zahedi. S. Shafiee, "Prediction the success of Nation in Asian Games using neural network", *Sport SPA Vol.* 8, Issue 1, pp. 33-42, 2011
- [9] G. W. Irwin, K. Warwick and K. J. Hunt (1995)., "Neural Network Applications in Control", *European Journal of Engineering Education*, 21(2), p. 216, 2010
- [10] L. Wuttisittikulkij, "MATLAB Books for Electrical Engineering Applications", Chulalongkorn University Press, 2010.
- [11] S. Srikasem, M. Songchaikul, S. Srisuphaprida, "MATLAB book for solving engineering problems", Rangsit University Press, 2nd edition, 1999.
- [12] S. Supharat, Handbook of Water Forecasting by Artificial Neural Networks, Irrigation Development Institute, 2001.
- [13] N. Somchaiwong, Control System Book 2, Khongchang Publisher, 2009.
- [14] N. Umdee, Thesis, Optimization of activity based costing based on artificial neural network, Naresuan University, 2015.

แบบจำลอง 4D CAD สำหรับจัดการความปลอดภัยและลดผลกระทบการจราจรใน โครงการซ่อมบำรุงถนนบริเวณทางแยกต่างระดับ: กรณีศึกษาแยกต่างระดับนครราชสีมา 4D CAD Model for Safety Management and Traffic Impact Reduction in Road Maintenance Project at the Interchange: Case Study of the Nakhon Ratchasima Interchange

วิชา รังคะนันท์¹ วชรภูมิ เบญจโอฬาร^{2*}

¹สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.
เมือง จ. นครราชสีมา 30000

²สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา
30000

Whichaya Ringkananont ¹ Vacharapoom Benjaoran^{2*}

¹Construction and Infrastructure Management, Institute of Engineering, Suranaree University of
Technology, Mueang, Nakhon Ratchasima, 30000

²School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Mueang,
Nakhon Ratchasima, 30000

*Corresponding author Email: vacharapoom@sut.ac.th

(Received: January 22, 2020; Accepted: August 10, 2020)

บทคัดย่อ

โครงการซ่อมบำรุงถนนบริเวณทางแยกต่างระดับมีการดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ ที่มีความซับซ้อนมากกว่าการซ่อมบำรุงถนนทั่วไป เนื่องจากพื้นที่โครงการมีความต่างระดับทำให้เกิดข้อจำกัดในการใช้พื้นที่ทำงานของเครื่องจักร และมีการจราจรสัญจรผ่านพื้นที่ จึงมีความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุต่อผู้ปฏิบัติงานและเกิดผลกระทบต่อการจราจร การศึกษานี้จึงสร้าง 4D CAD ที่สามารถแสดงภาพจุดเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุและผลกระทบต่อการจราจรในระหว่างดำเนินโครงการซ่อมบำรุงตามแผนปฏิบัติงานในแต่ละช่วงเวลา และสามารถแสดงภาพการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ก่อสร้างในช่วงเวลาต่าง ๆ ตามขั้นตอนการซ่อมบำรุง เพื่อกำหนดมาตรการจัดการความปลอดภัยและลดผลกระทบการจราจรอย่างเหมาะสมในโครงการซ่อมบำรุงถนนบริเวณทางแยกต่างระดับ ซึ่งพบว่า 4D CAD ที่สร้างขึ้นสามารถแสดงภาพจุดเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุและผลกระทบต่อการจราจรในระหว่างดำเนินโครงการซ่อมบำรุง ที่เกิดจากการใช้พื้นที่ของเครื่องจักรขนาดใหญ่ อย่างรถเครนและการเข้าออกพื้นที่ของรถบรรทุก ซึ่งทับซ้อนกับการใช้ประโยชน์ที่ดินโดยรอบและช่องจราจรข้างเคียง รวมถึงช่องจราจรด้านล่างของโครงสร้างของทางแยกต่างระดับ และ 4D CAD แสดงภาพเหตุการณ์ของพื้นที่ก่อสร้างในอนาคตทำให้เห็นความจำเป็นต้องปิดช่องจราจรอื่น ๆ นอกเหนือจากช่องจราจรที่ทำการซ่อมบำรุง ซึ่งผู้วางแผนโครงการสามารถเห็นภาพจุดเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุและผลกระทบนั้น ๆ ทำให้สามารถปรับแผนการดำเนินงานโครงการซ่อมบำรุงดังกล่าวให้มีความเหมาะสมกับช่วงเวลาต่าง ๆ ได้ก่อนที่จะเริ่มดำเนินโครงการ ซึ่งสามารถจัดเตรียมงบประมาณในการดำเนินโครงการได้อย่างเพียงพอในการจัดการความปลอดภัยและลดผลกระทบที่เกิดขึ้น ทำให้บริหารโครงการซ่อมบำรุงดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: แบบจำลอง 4 มิติ การจัดการความปลอดภัย โครงการซ่อมบำรุงถนน ทางแยกต่างระดับ

ABSTRACT

The interchange maintenance projects are more complicated than the general road maintenance since the site area has different elevations and the current traffic flows through the area. Such constraints on the working space create a risk of accidents to workers and the negative impacts on traffic. Therefore, this study created a 4D CAD to visualize the risk of accidents and the impact on traffic at different project times. Also, it can visualize changes in the area at different times according to the maintenance procedures. This tool assists a project manager to determine appropriate safety management measures and reduce traffic impact in road maintenance projects at interchange. The results showed that the 4D CAD is able to demonstrate the risk of accidents and impact on traffic during the maintenance project caused by the use of large types of machinery such as cranes and trucks. Their working spaces overlap with the surrounding land uses, and the lanes adjacent and below the constructing parts of the interchange structure. The project planner can visualize these risks of accidents and impacts. The 4D CAD developed in this study makes it possible to adjust the construction schedule for the maintenance project and to wisely close the lanes affected by the construction at different project time even before starting the project. This also helps to allocate a sufficient budget for safety management and to reduce the impact on current traffic. All results in the effective management of the interchange maintenance project.

Keyword: 4D CAD model, safety management, road maintenance projects, interchange.

1. บทนำ

การดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ ในโครงการซ่อมบำรุงถนนบริเวณทางแยกต่างระดับมีความซับซ้อนมากกว่าการซ่อมบำรุงถนนทั่วไป เนื่องจากพื้นที่โครงการมีความต่างระดับทำให้เกิดข้อจำกัดในการใช้พื้นที่ทำงานของเครื่องจักรประกอบกับมีกระแสจราจรสัญจรผ่านพื้นที่ จึงมีความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุต่อผู้ปฏิบัติงานและเกิดผลกระทบต่อการจราจรได้หลายกรณี ซึ่งเกิดจากการทับซ้อนกันของพื้นที่ระหว่างรถที่สัญจรผ่านกับพื้นที่ที่เครื่องจักรจำเป็นต้องใช้ในการปฏิบัติงาน ผู้วางแผนโครงการจำเป็นต้องมองเห็นภาพของจุดเสี่ยงและผลกระทบต่าง ๆ ที่จะเกิดขึ้น จึงจะสามารถวางแผนโครงการซ่อมบำรุงทางแยกต่างระดับได้อย่างเหมาะสม ซึ่งอาจใช้โปรแกรมสำเร็จรูป เช่น CORSIM[®] VISSIM[®] หรือ AIMSUN[®] ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของการจราจรที่ได้รับผลกระทบ [1], [2], [3], [4] เพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจเลือกแผนการปฏิบัติงานที่เหมาะสม

ที่สุด แต่โปรแกรมห้างกล่าวมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถแสดงภาพการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ของพื้นที่ก่อสร้างตามขั้นตอนการซ่อมบำรุงที่เกิดการทับซ้อนกันของพื้นที่ได้ ทำให้ไม่สามารถกำหนดแผนการซ่อมบำรุงและมาตรการการจัดการความปลอดภัยที่เหมาะสมได้ แบบจำลอง 4D CAD จึงเป็นเครื่องมือที่สามารถนำมาใช้กำจัดข้อจำกัดดังกล่าวได้

1.1. 4D CAD

4D CAD หรือ แบบจำลอง 4 มิติ เป็นแบบจำลอง ที่สร้างขึ้นโดยบูรณาการการสร้างแบบจำลอง 3 มิติจากข้อมูลเชิงพื้นที่ทางวิศวกรรม เข้ากับตารางเวลาการก่อสร้าง [5] โดยที่ผ่านมาโครงการก่อสร้างหลายโครงการได้นำ 4D CAD มาใช้ประโยชน์ในโครงการก่อสร้างและซ่อมบำรุง ทั้งงานอาคาร งานทาง เช่น ใช้ในการจัดตารางเวลาการทำงาน วางแผนบริหารจัดการด้านพื้นที่ [5] การจำลองภาพในขั้นตอนของการออกแบบ ใช้ในการสร้างความเข้าใจที่ตรงกันในการติดต่อสื่อสารในขั้นตอน

ตรวจสอบการออกแบบ รวมถึงใช้ในการประเมินค่าใช้จ่าย สำหรับเตรียมการเสนอราคาและการจัดซื้อจัดจ้าง [6] ใช้เป็นเครื่องมือในการตรวจสอบความก้าวหน้าในระหว่างดำเนินงาน [7] อีกทั้งใช้ในการจัดการระบบในพื้นที่ก่อสร้างก่อสร้าง [8] และวางแผนบริหารจัดการด้านความปลอดภัยของพื้นที่ก่อสร้าง [9], [10], [11] ยังสามารถใช้แสดงภาพผลกระทบจากการก่อสร้างถนนต่อประชาชนตลอดแนวพื้นที่โครงการ [12] การแสดงภาพของโครงการก่อสร้างทางหลวงสายใหม่ในบริเวณที่ตัดผ่านถนนสายเดิมที่มีการจราจรสัญจรผ่านในขณะดำเนินโครงการ [13] เป็นต้น

มีการแสดง 4D ของโครงการก่อสร้างทางหลวง โดยนำ 4D CAD มาใช้งานของการสร้างภาพเสมือนจริงที่แปรผันตามตารางเวลาปฏิบัติงานของโครงการก่อสร้างทางต่างระดับในออสเตรเลีย ในช่วงที่กำลังทำการดำเนินการก่อสร้างโครงการทางหลวงเพื่ออำนวยความสะดวกในการทำงานร่วมกันของทีมงาน และช่วยในการตัดสินใจเกี่ยวกับการก่อสร้าง การจัดการเวลา และการวางแผนการจราจร โดยใช้ข้อมูลการแสดงผลในส่วนของกิจกรรมต่าง ๆ ที่ดำเนินงานในโครงการมาสร้างความเข้าใจของทีมงานในขั้นตอนของการออกแบบให้มีความเข้าใจที่ตรงกัน รวมถึงใช้เป็นข้อมูลในการจัดผังโครงสร้างกิจกรรมและตารางเวลาปฏิบัติงานของโครงการ และใช้การแสดงผลในส่วนของการจำลองภาพเคลื่อนไหวของการจราจรที่เดินทางผ่านโครงการระหว่างที่มีการดำเนินโครงการ มาใช้ในการประชาสัมพันธ์สร้างความเข้าใจที่ตรงกันในมาตรการความปลอดภัยและลักษณะการจัดการจราจรให้กับประชาชนทั่วไป [5]

การใช้ 4D CAD เพื่อสนับสนุนการประสานงานในกิจกรรมการก่อสร้างระหว่างผู้รับเหมา ในโครงการปรับปรุงสถานีรถไฟในประเทศเนเธอร์แลนด์ ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นให้สามารถรองรับผู้โดยสาร 40,000 คนต่อวันและขณะที่ดำเนินโครงการ สถานีจะต้องสามารถเปิดให้บริการตามปกติ ซึ่งมีผู้รับเหมาหลักที่รับผิดชอบประสานงานกับผู้รับเหมาภายนอกอีก 4 บริษัท ให้เข้ามารับเหมาก่อสร้างทั้งการติดตั้งและการรื้อถอนในส่วนองงานโครงสร้างเหล็ก งานกระจัดและการติดตั้งผ้าม่าน ผับ ไฟฟ้าและ

เครื่องกล จึงจำเป็นต้องมีการวางแผนกิจกรรมการก่อสร้างจำนวนมาก ที่จะต้องมีความสอดคล้องกับตารางเวลาเดินรถไฟและเงื่อนไขต่าง ๆ ในสถานที่ดำเนินโครงการ รวมถึงข้อจำกัดของสถานที่ สำหรับพื้นที่วางเครื่องจักรที่จำเป็นต้องใช้ เริ่มต้นสร้างแบบจำลอง 4 มิติด้วยการเก็บรวบรวมข้อมูลที่มีอยู่ในสถานที่ที่จะต้องดำเนินโครงการ สำหรับใช้ในการออกแบบรูปแบบ 2 มิติจากหน่วยงานที่มีส่วนเกี่ยวข้องในโครงการ แล้วแปลงข้อมูลเหล่านี้ให้อยู่ในรูปแบบ 3 มิติโดยใช้ AutoCAD 2010 จากนั้นรวบรวมแผนตารางเวลาการก่อสร้างที่แตกต่างกัน จากหน่วยงานที่มีส่วนเกี่ยวข้องในโครงการ เพื่อรวมแผนตารางเวลาการก่อสร้างเหล่านี้เข้าด้วยกัน โดยการใช้แบบจำลอง 3 มิติของ Autodesk Navisworks Manage 2010 ใช้ฟังก์ชันการจัดเวลาของซอฟต์แวร์ Navisworks Authorwas [9]

การใช้ 4D CAD เพื่อจะแสดงผลกระทบจากการก่อสร้างทางหลวงที่ส่งผลต่อพื้นที่และประชาชนโดยรอบโครงการขยายทางหลวงดัตช์ โดยพัฒนาวิธีการสร้าง 4D CAD ให้สามารถแสดงผลกระทบต่อบริบทของโครงการพบว่าพื้นที่โครงการก่อสร้างแปรผันตามระยะเวลาในการดำเนินโครงการ การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระหว่างวิธีการแบบ 2 มิติ กับแบบจำลอง 4 มิติ ซึ่งแบบจำลอง 4 มิติ สามารถแสดงผลของพื้นที่ขอบเขตของผลกระทบที่แตกต่างกันของงานก่อสร้าง โดยแสดงผลการใช้พื้นที่ให้เห็นภาพขอบเขตของผลกระทบจากเสียง ในบริเวณพื้นที่โดยรอบ แสดงผลของอาคารที่ได้รับผลกระทบในพื้นที่แสดงผลบางส่วนโครงการภายใต้ผลกระทบจากการจราจร จากนั้นวิเคราะห์แบบจำลองว่าผลกระทบที่จะเกิดขึ้นจากการดำเนินโครงการตามตารางเวลาทำงานนั้นจะเกิดในลักษณะใดบ้าง และมีความรุนแรงเท่าใด แล้วหาวิธีการป้องกันหรือแก้ไขที่มีประสิทธิภาพที่สุด ซึ่งเป็นการนำ 4D CAD ไปประยุกต์ใช้ในขั้นตอนของการให้ข้อมูลเพื่อคาดการณ์ผลกระทบสำหรับการเสนอราคา และสร้างความเข้าใจที่ตรงกันกับบุคคลทั่วไปในการทำประชาสัมพันธ์ [10]

การนำ 4D CAD มาประยุกต์ใช้กับโครงการก่อสร้างระบบสาธารณูปโภคในลักษณะเทคโนโลยีการแสดงผลภาพ

4 มิติสำหรับการจัดการความปลอดภัยในการก่อสร้างโครงการก่อสร้างสถานีรถไฟใต้ดิน Wuhan Mingdu ในประเทศจีน โดยเสนอแนวทางในการบริหารจัดการความปลอดภัย ด้วยการใช้เทคโนโลยีการสร้างภาพ 4 มิติจากการบูรณาการมาตรการความปลอดภัยกับการจัดการก่อสร้างตลอดการดำเนินโครงการ จากการสร้าง 4D CAD ของสถานีรถไฟใต้ดินโดยโปรแกรม AutoDesk Revit® และ Navisworks® และขั้นตอนสุดท้ายพัฒนาการเชื่อมต่อข้อมูลระหว่าง 4D CAD และข้อมูลความเสี่ยงของโครงการสถานีรถไฟใต้ดิน Wuhan Mingdu ในการก่อสร้างจริง [11]

การใช้ 4D CAD เพื่อจะแสดงผลกระทบจากการก่อสร้างทางหลวงที่ส่งผลต่อพื้นที่และประชาชนโดยรอบโครงการขยายทางหลวงตัดซ์ โดยพัฒนาวิธีการสร้าง 4D CAD ให้สามารถแสดงผลกระทบต่อบริบทของโครงการพบว่าพื้นที่โครงการก่อสร้างแปรผันตามระยะเวลาในการดำเนินโครงการ การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระหว่างวิธีการแบบ 2 มิติ กับแบบจำลอง 4 มิติ ซึ่งแบบจำลอง 4 มิติ สามารถแสดงผลของพื้นที่ขอบเขตของผลกระทบที่แตกต่างกันของงานก่อสร้าง โดยแสดงผลการใช้พื้นที่ให้เห็นภาพขอบเขตของผลกระทบจากเสียง ในบริเวณพื้นที่โดยรอบ แสดงผลของอาคารที่ได้รับผลกระทบในพื้นที่แสดงผลบางส่วนของโครงข่ายที่ได้รับผลกระทบจากการจราจร จากนั้นวิเคราะห์แบบจำลองว่าผลกระทบที่จะเกิดขึ้นจากการดำเนินโครงการตามตารางเวลาทำงานนั้นจะเกิดในลักษณะใดบ้าง และมีความรุนแรงเท่าใด แล้วหาวิธีการป้องกันหรือแก้ไขที่มีประสิทธิภาพที่สุด ซึ่งเป็นการนำ 4D CAD ไปประยุกต์ใช้ในขั้นตอนของการให้ข้อมูลเพื่อคาดการณ์ผลกระทบสำหรับการเสนอราคา และสร้างความเข้าใจที่ตรงกันกับบุคคลทั่วไปในการทำประชาพิจารณา [12]

มีการแสดง 4D ของโครงการก่อสร้างทางหลวง โดยนำ 4D CAD มาใช้ในการสร้างภาพเสมือนจริงที่แปรผันตามตารางเวลาปฏิบัติงานของโครงการก่อสร้างทางต่างระดับในออสเตเลีย ในช่วงที่กำลังดำเนินการก่อสร้างโครงการทางหลวงเพื่ออำนวยความสะดวกในการทำงานร่วมกันของทีมงาน และช่วยในการตัดสินใจเกี่ยวกับการ

ก่อสร้าง การจัดตารางเวลา และการวางแผนการจราจร โดยใช้ข้อมูลการแสดงผลในส่วนของกิจกรรมต่าง ๆ ที่ดำเนินงานในโครงการมาสร้างความเข้าใจของทีมงานในขั้นตอนของการออกแบบให้มีความเข้าใจที่ตรงกัน รวมถึงใช้เป็นข้อมูลในการจัดผังโครงสร้างกิจกรรมและตารางเวลาปฏิบัติงานของโครงการ และใช้การแสดงผลในส่วนของการจำลองภาพเคลื่อนไหวของการจราจรที่เดินทางผ่านโครงการระหว่างที่มีการดำเนินโครงการ มาใช้ในการประชาสัมพันธ์สร้างความเข้าใจที่ตรงกันในมาตรการความปลอดภัยและลักษณะการจัดการจราจรให้กับประชาชนทั่วไป [13]

การใช้ 4D CAD เพื่อสนับสนุนการประสานงานในกิจกรรมการก่อสร้างระหว่างผู้รับเหมา ในโครงการปรับปรุงสถานีรถไฟในประเทศเนเธอร์แลนด์ ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นให้สามารถรองรับผู้โดยสาร 40,000 คนต่อวันและขณะที่ดำเนินโครงการ สถานีจะต้องสามารถเปิดให้บริการตามปกติ ซึ่งมีผู้รับเหมาหลักที่รับผิดชอบประสานงานกับผู้รับเหมาภายนอกอีก 4 บริษัท ให้เข้ามารับเหมาก่อสร้างทั้งการติดตั้งและการรื้อถอนในส่วนองงานโครงสร้างเหล็ก งานกระจุกและการติดตั้งผ้าม่าน ผัง ไฟฟ้าและเครื่องกล จึงจำเป็นต้องมีการวางแผนกิจกรรมการก่อสร้างจำนวนมาก ที่จะต้องมีความสอดคล้องกับตารางเวลาเดินรถไฟและเงื่อนไขต่าง ๆ ในสถานที่ดำเนินโครงการ รวมถึงข้อจำกัดของสถานที่ สำหรับพื้นที่วางเครื่องจักรที่จำเป็นต้องใช้ เริ่มต้นสร้างแบบจำลอง 4 มิติด้วยการเก็บรวบรวมข้อมูลที่มีอยู่ในสถานที่ที่จะต้องดำเนินโครงการ สำหรับใช้ในการออกแบบรูปแบบ 2 มิติจากหน่วยงานที่มีส่วนเกี่ยวข้องในโครงการ แล้วแปลงข้อมูลเหล่านี้ให้อยู่ในรูปแบบ 3 มิติโดยใช้ AutoCAD 2010 จากนั้นรวบรวมแผนตารางเวลาการก่อสร้างที่แตกต่างกัน จากหน่วยงานที่มีส่วนเกี่ยวข้องในโครงการ เพื่อรวมแผนตารางเวลาการก่อสร้างเหล่านี้เข้าด้วยกัน โดยการใช้แบบจำลอง 3 มิติของ Autodesk Navisworks Manage 2010

1.2. การจัดการความปลอดภัย

การจัดการความปลอดภัย (Safety Management) ในการก่อสร้าง คือการกำหนดมาตรการที่จะกำจัดจุดเสี่ยงต่อ

การเกิดอุบัติเหตุระหว่างปฏิบัติงาน ซึ่งอาจมีสาเหตุจากการนำเอาเทคโนโลยี อุปกรณ์เครื่องมือ เครื่องจักร อันทันสมัยมาใช้เพื่อทุนแรงและประหยัดเวลา แต่ความปลอดภัยในการก่อสร้างไม่ได้วิวัฒนาการตามเทคโนโลยีนั้น ๆ อีกทั้งความปลอดภัยพื้นฐานในงานก่อสร้างยังถูกละเลย นอกจากนี้ คนงานยังขาดความรู้ ความเข้าใจ อย่างถูกต้องเหมาะสม อุบัติเหตุจึงยังคงเกิดขึ้น ซึ่งองค์ประกอบของความปลอดภัยในงานก่อสร้างมี 3 ส่วน คือ ความปลอดภัยในสถานที่ ความปลอดภัยในการใช้เครื่องมือเครื่องจักร และความปลอดภัยส่วนบุคคล ที่ผ่านมาจึงมีการศึกษาปัจจัยที่ก่อให้เกิดอุบัติเหตุ ต้นทุนในการบริหารความเสี่ยงด้านความปลอดภัย [15], [16], [17]

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องที่กล่าวมา ยังไม่พบการใช้แบบจำลอง 4D CAD สำหรับจัดการความปลอดภัยในโครงการซ่อมบำรุงถนนบริเวณทางแยกต่างระดับ มีเพียงการใช้แสดงภาพผลกระทบจากการก่อสร้างกับโครงการก่อสร้างถนนสายใหม่เท่านั้น การศึกษาครั้งนี้จึงสนใจการใช้แบบจำลอง 4D CAD สำหรับแสดงภาพจุดเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุ เพื่อกำหนดมาตรการจัดการความปลอดภัยที่เหมาะสมในโครงการซ่อมบำรุงถนนบริเวณทางแยกต่างระดับ

2. วัตถุประสงค์

สร้าง 4D CAD ที่สามารถแสดงภาพจุดเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุ ผลกระทบต่อการจราจรและการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ก่อสร้างในระหว่างดำเนินโครงการซ่อมบำรุงตามแผนปฏิบัติงานในแต่ละช่วงเวลา เพื่อปรับแผนการปฏิบัติงาน กำหนดมาตรการจัดการความปลอดภัยและลดผลกระทบการจราจรที่เหมาะสมในโครงการซ่อมบำรุงถนนบริเวณทางแยกต่างระดับ

3. วิธีการศึกษา

การวิจัยนี้มีขั้นตอนการศึกษาดังต่อไปนี้

3.1 การคัดเลือกแผนการซ่อมบำรุงที่มีความเหมาะสมที่สุด

โดยทำการสำรวจ คัดเลือกทางแยกต่างระดับที่ต้องการศึกษาวิจัย และเก็บข้อมูลปริมาณจราจร ในช่วง

เวลาปกติในวันธรรมดา วันหยุดสุดสัปดาห์ และการจราจรติดขัดในช่วงวันหยุดนักขัตฤกษ์ ซึ่งมีสภาพการจราจรในแต่ละช่วงเวลาที่แตกต่างกัน โดยเลือกโครงการซ่อมบำรุงผิวทางบริเวณแยกต่างระดับบนถนนราชสีมา จ.นครราชสีมา ประเทศไทย เป็นกรณีศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะภูมิประเทศ และการใช้ประโยชน์พื้นที่โดยรอบทางแยกต่างระดับบนถนนราชสีมา

ลงพื้นที่ศึกษาเก็บข้อมูลปริมาณจราจรในช่วงเวลาต่าง ๆ ได้แก่ วันธรรมดา วันหยุดสุดสัปดาห์ และวันหยุดนักขัตฤกษ์ โดยการใช้คนนับ (Manual Counts) ในลักษณะทราบจำนวนในแต่ละทิศทางของการจราจรโดยมีตัวอย่างข้อมูลจราจรที่จัดเก็บดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวอย่างข้อมูลปริมาณจราจรในวันหยุดช่วงเวลา 17.00 - 18.00 น. ในหน่วยคันต่อชั่วโมง

	N	S	W	E	SUM
N	-	5163	5737	1147	12047
S	2599	-	780	1949	5328
W	2649	530	-	2119	5297
E	1281	3629	4270	-	9180
SUM	6529	9322	10786	5216	31852

จากนั้นกำหนดแผนการซ่อมบำรุงทางแยกต่างระดับที่คาดว่าจะดำเนินงานในลักษณะต่าง ๆ จากข้อมูลกิจกรรมที่จะต้องดำเนินงานในขั้นตอนต่าง ๆ ในการซ่อมบำรุงให้มีหลากหลายแผนงานทางเลือก เพื่อนำมาวิเคราะห์หาแผนงานที่มีความเหมาะสมมากที่สุด โดยการกำหนดแผนการซ่อมบำรุงทางแยกต่างระดับให้มีหลากหลายแผนงานทางเลือก จากข้อมูลกิจกรรมที่จะต้องดำเนินงานในขั้นตอนต่าง ๆ ในการซ่อมบำรุง โดยโครงการซ่อมบำรุงทางแยกต่างระดับนี้จึงมีระยะเวลาในการดำเนินงาน 125 วัน โดยมีแผนการปฏิบัติงานที่มีความเป็นไปได้ 3 แผน ดังแสดงในตารางที่ 2, 3, และ 4 โดยในแผนงานทั้ง 3 แผนกิจกรรมต่าง ๆ ด้วยตัวอักษร a ถึง i

ตารางที่ 2 แผน A เริ่มซ่อมบำรุงจากทิศตะวันตกมุ่งทิศเหนือ

Month	1	2	3	4	5
Activity					
a	■				
b	■				
c	■				
d		■			
e		■			
f		■			
g		■	■	■	■
h			■	■	■
i					■

ตารางที่ 3 แผน B เริ่มซ่อมบำรุงจากทิศเหนือมุ่งทิศตะวันตก

Month	1	2	3	4	5
Activity					
a	■				
b	■				
c		■			
d	■				
e		■	■		
f		■			
g		■	■	■	■
h			■	■	■
i					■

ตารางที่ 4 แผน C ช่วงเช้าให้เข้าทำงานจากทิศตะวันตกและช่วงบ่ายให้เข้าทำงานพื้นที่ทางทิศเหนือ

Month	1	2	3	4	5
Activity					
a	■				
b	■				
c	■	■			
d	■	■			
e		■	■		
f		■	■		
g		■	■	■	■
h			■	■	■
i					■

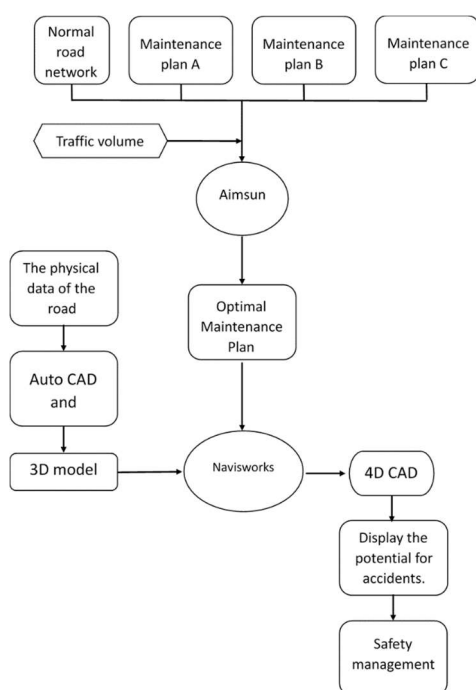
หมายเหตุ: a คือปิดกั้นช่องจราจร b คือกำหนดพื้นที่เสียหาย c คือเจาะสกัดผิวทางคอนกรีตเสริมเหล็กเดิมออก Sta. 0+000 ถึง Sta. 0+510 d คือเจาะสกัดผิวทางคอนกรีตเสริมเหล็กเดิมออก Sta. 0+510 ถึง Sta. 1+135 e คือปรับปรุงซ่อมแซมชั้นรองพื้นทาง Sta. 0+000 ถึง Sta. 0+510 f คือปรับปรุงซ่อมแซมชั้นรองพื้นทาง Sta. 0+510 ถึง Sta. 1+135 g คือก่อสร้างผิวทางคอนกรีตเสริมเหล็กใหม่ h คืองานรอยต่อถนน i คืองานสีตีเส้น

จากนั้นนำเข้าข้อมูลปริมาณจราจร เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการไหลของกระแสจราจรในสภาวะปกติ เทียบกับกรณีที่มีการปิดช่องจราจรบางส่วนในบริเวณทางแยกต่างระดับในแต่ละชั่วโมง ตามแผนการซ่อมบำรุงที่มีหลากหลายแผนงานทางเลือกในโปรแกรม Aimsun® แล้วนำค่าพารามิเตอร์ของการจราจร 3 ตัว ได้แก่ 1) ความล่าช้าในการเดินทางผ่านแยกต่างระดับ (Delay Time) 2) ความเร็วที่ใช้ในการเดินทางผ่านแยกต่างระดับ (Speed) และ 3) ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทางผ่านแยกต่างระดับ (Travel Time) ที่ได้ ไปใช้เป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบแผนงานทั้ง 3 เพื่อคัดเลือกแผนการซ่อมบำรุงทางแยกต่างระดับที่มีความเหมาะสมที่สุด

3.2 การสร้าง 4D CAD

ในการสร้าง 4D CAD ทำการสร้างแบบจำลอง 3 มิติในโปรแกรม Auto CAD® ร่วมกับโปรแกรม SketUp® จากข้อมูลเชิงพื้นที่ทางวิศวกรรมของทางแยกต่างระดับและลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินโดยรอบพื้นที่ โดยใน

แบบจำลอง 3 มิติที่สร้างขึ้นกำหนดให้รูปทรงทางเรขาคณิตแทนสิ่งปลูกสร้างและสาธารณูปโภคพื้นฐานต่าง ๆ ในพื้นที่ และแทนเครื่องจักร เช่น เครน รถปูน รถบรรทุก ด้วยรูปทรงสี่เหลี่ยม โดยรูปทรงเหล่านี้จะแสดงให้เห็นภาพพื้นที่ที่เครื่องจักรเหล่านั้นจำเป็นต้องใช้ ในขณะที่ปฏิบัติงานทั้งในแนวราบและแนวดิ่ง จากนั้นผนวกแบบจำลอง 3 มิติ ดังกล่าวเข้ากับแผนการซ่อมบำรุงทางแยกต่างระดับที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้โปรแกรม Navisworks® เพื่อสร้าง 4D CAD โดยนำเข้าแบบจำลอง 3 มิติ ของทางแยกต่างระดับที่สร้างขึ้น ด้วยคำสั่ง Append ซึ่งสามารถเปิดไฟล์ได้หลากหลายนามสกุล จากนั้นใช้คำสั่ง Time Liner ในการกำหนดพื้นที่ในการปฏิบัติงานซ่อมบำรุงตามระยะเวลาที่จะต้องดำเนินงานตามกิจกรรมต่าง ๆ ของแผนการซ่อมบำรุงที่มีความเหมาะสมที่สุด จากนั้นใช้คำสั่ง Add Task โดยในขั้นตอนนี้สามารถกำหนดวันเริ่มดำเนินงานและวันเสร็จสิ้นของแต่ละกิจกรรมที่จะต้องทำตามปฏิทินของแผนการซ่อมบำรุงได้ โปรแกรมดังกล่าวจะสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ก่อสร้างตามแผนการซ่อมบำรุง ซึ่งทำให้สามารถเห็นภาพจุดเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุได้ ดังแผนภาพของขั้นตอนการวิจัยที่แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภาพของขั้นตอนการศึกษา

จากนั้นพิจารณาจุดเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุและผลกระทบต่อการจราจรที่แสดงให้เห็นใน 4D CAD ที่สร้างขึ้น ว่าเกิดจุดเสี่ยงขึ้นที่ใดในช่วงเวลาใดบ้าง เพื่อปรับแผนการปฏิบัติงานและกำหนดมาตรการความปลอดภัยที่เหมาะสมสำหรับแต่ละจุดในช่วงเวลานั้น ๆ

ซึ่งการศึกษานี้มีข้อจำกัดในการนำมาตรการการจัดการความปลอดภัยที่ได้ไปทดลองใช้กับการปฏิบัติงานจริง เนื่องจากโครงการซ่อมบำรุงดังกล่าวยังเป็นเพียงแผนที่คาดการณ์ว่าจะดำเนินการในอนาคต

4. ผลการศึกษา

4.1 ผลการคัดเลือกแผนปฏิบัติงานที่เหมาะสมที่สุด

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณจราจรในสภาพโครงข่ายถนนปกติที่ไม่มีการปิดกั้นช่องจราจร เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ปริมาณจราจร ฯ ในขณะมีการปิดกั้นช่องจราจรตามแผนซ่อมบำรุง A B และ C โดยค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลในโปรแกรมหักแล้ว ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณจราจรในช่วงเวลาที่มีปริมาณจราจรหนาแน่นที่สุดในสภาพโครงข่ายถนนปกติที่ไม่มีการปิดกั้นช่องจราจร กับผลการวิเคราะห์ปริมาณจราจร ฯ ในขณะมีการปิดกั้นช่องจราจรตามแผนซ่อมบำรุง A B และ C

ช่วงเวลา	17.00–18.00 น. วันธรรมดา	11.00–12.00 น. วันหยุดสุดสัปดาห์
พารามิเตอร์		
กรณีโครงข่ายถนนสภาพปกติ		
Delay Time (sec/km)	24.84	90.48
Speed (km/hr)	44.00	30.46
Travel Time (sec/km)	90.63	156.18

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณจราจรในช่วงเวลาที่มีปริมาณจราจรหนาแน่นที่สุดในสภาพโครงข่ายถนนปกติที่ไม่มีการปิดกั้นช่องจราจร กับผลการวิเคราะห์ปริมาณจราจร ฯ ในขณะที่มีการปิดกั้นช่องทางจราจรตามแผนซ่อมบำรุง A B และ C (ต่อ)

กรณีปิดกั้นถนนตามแผนซ่อมบำรุง A			
Delay Time (sec/km)	53.92	115.78	
Speed (km/hr)	35.77	25.22	
Travel Time (sec/km)	119.75	181.76	
กรณีปิดกั้นถนนตามแผนซ่อมบำรุง B			
Delay Time (sec/km)	62.11	111.89	
Speed (km/hr)	34.72	25.56	
Travel Time (sec/km)	127.95	177.92	
กรณีปิดกั้นถนนตามแผนซ่อมบำรุง C			
Delay Time (sec/km)	49.87	107.08	
Speed (km/hr)	37.24	26.23	
Travel Time (sec/km)	108.61	165.40	

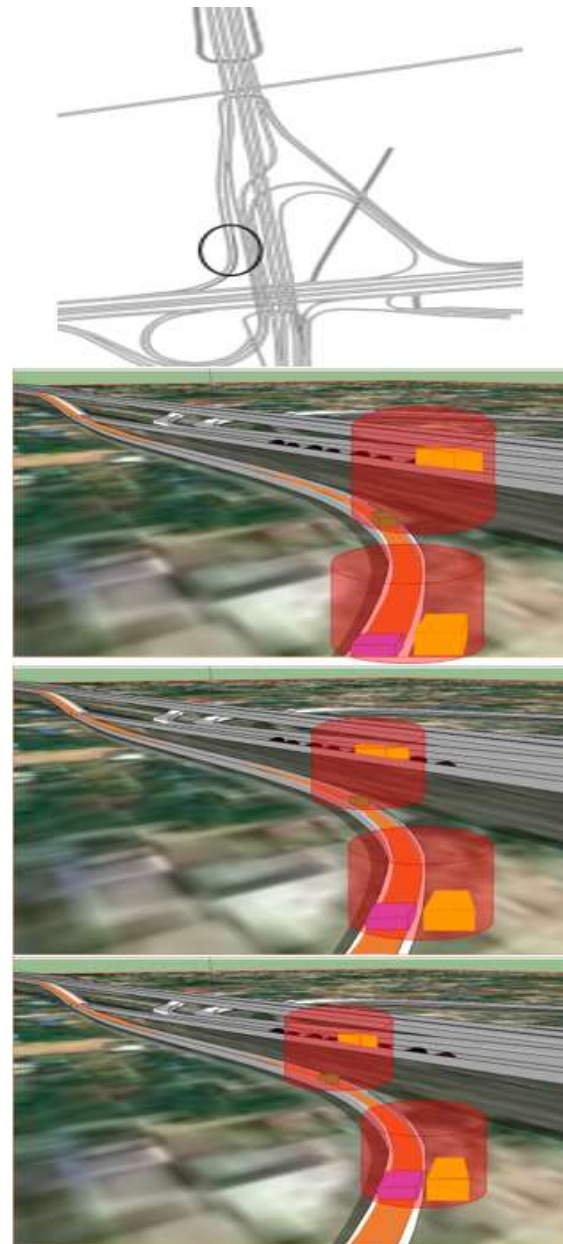
เมื่อเปรียบเทียบแผนซ่อมบำรุงทั้ง 3 แผน กับโครงข่ายถนนสภาพปกติ ซึ่งพิจารณาในวันธรรมดาและวันหยุดสุดสัปดาห์เท่านั้น เนื่องจากแผนการซ่อมบำรุงมีการกำหนดให้ปฏิบัติงานวันจันทร์ – วันเสาร์ พบว่าค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ 1) ความล่าช้าในการเดินทางผ่านแยกต่างระดับ (Delay Time) 2) ความเร็วที่ใช้ในการเดินทางผ่านแยกต่างระดับ (Speed) และ 3) ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทางผ่านแยกต่างระดับ (Travel Time) ของกระแสจราจรของแผนซ่อมบำรุง C เริ่มซ่อมบำรุงจากทิศตะวันตกมุ่งทิศเหนือ มีค่าความล่าช้าในการเดินทางผ่านแยกต่างระดับ ในช่วงเวลา 17.00–18.00 น. วันธรรมดา 49.87 sec/km ในช่วงเวลา 11.00–12.00 น. วันหยุดสุด

สัปดาห์ 107.08 sec/km มีค่าน้อยกว่าแผนการซ่อมบำรุง A ในช่วงเวลา 17.00–18.00 น. วันธรรมดา 53.92 sec/km ในช่วงเวลา 11.00–12.00 น. วันหยุดสุดสัปดาห์ 115.78 sec/km และแผนซ่อมบำรุง B ในช่วงเวลา 17.00–18.00 น. วันธรรมดา 62.11 sec/km ในช่วงเวลา 11.00–12.00 น. วันหยุดสุดสัปดาห์ 111.89 sec/km มีค่าความเร็วที่ใช้ในการเดินทางผ่านแยกต่างระดับเร็วกว่าแผนการซ่อมบำรุง A และ B โดยแผนซ่อมบำรุง C ในช่วงเวลา 17.00–18.00 น. วันธรรมดา 37.24 km/hr ในช่วงเวลา 11.00–12.00 น. วันหยุดสุดสัปดาห์ 26.23 km/hr แผนการซ่อมบำรุง A ในช่วงเวลา 17.00–18.00 น. วันธรรมดา 35.77 km/hr ในช่วงเวลา 11.00–12.00 น. วันหยุดสุดสัปดาห์ 25.22 km/hr และแผนซ่อมบำรุง B ในช่วงเวลา 17.00–18.00 น. วันธรรมดา 34.72 km/hr ในช่วงเวลา 11.00–12.00 น. วันหยุดสุดสัปดาห์ 25.56 km/hr และมีค่าระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทางผ่านแยกต่างระดับน้อยกว่าแผนการซ่อมบำรุง A และ B โดยแผนซ่อมบำรุง C ในช่วงเวลา 17.00–18.00 น. วันธรรมดา 108.61 sec/km ในช่วงเวลา 11.00–12.00 น. วันหยุดสุดสัปดาห์ 165.40 sec/km แผนการซ่อมบำรุง A ในช่วงเวลา 17.00–18.00 น. วันธรรมดา 119.75 sec/km ในช่วงเวลา 11.00–12.00 น. วันหยุดสุดสัปดาห์ 181.76 sec/km และแผนซ่อมบำรุง B ในช่วงเวลา 17.00–18.00 น. วันธรรมดา 127.95 sec/km ในช่วงเวลา 11.00–12.00 น. วันหยุดสุดสัปดาห์ 177.92 sec/km แผนซ่อมบำรุง C จึงเป็นแผนงานที่มีความเหมาะสมที่สุด

การคัดเลือกแผนงานที่เหมาะสมที่สุดนั้นพิจารณาจาก 3 ตัวแปร คือ เวลาล่าช้า ความเร็ว และเวลาเดินทาง ซึ่งเป็นตัวแปรหลักของการประเมินประสิทธิภาพของการจราจร โดยแผน C ซึ่งเป็นแผนงานเหมาะสมที่สุด และคาดว่าจะมีความปลอดภัยสูงสุด เมื่อเทียบกับอีก 2 แผนงานคือแผน A และ B เนื่องจากแผน C ทำให้การจราจรที่สัญจรผ่านทางแยกต่างระดับมีความคล่องตัวมากที่สุด น่าจะเกิดจุดเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุที่จะส่งผลกระทบต่อจราจรที่สัญจรผ่านน้อยที่สุดด้วย

4.2 ผลการสร้าง 4D CAD

หากยกตัวอย่างผลการแสดงผลภาพของ 4D CAD ที่สร้างขึ้นจะเห็นว่า ตามขั้นตอนการซ่อมบำรุงในช่วงเช้าวันที่ 16 วันที่ 17 และวันที่ 18 ของการดำเนินโครงการซ่อมบำรุง อยู่ในระหว่างการดำเนินกิจกรรมเจาะสกัดผิวทางคอนกรีตเสริมเหล็กเดิมออกที่ Sta. 0+342 ที่ Sta. 0+367 และที่ Sta. 0+392 ตามลำดับ บริเวณพื้นที่บล็อกสี่เหลี่ยม โดยในขั้นตอนนี้จะทำการเจาะสกัดด้วยเครื่องสกัดคอนกรีตขนาดเล็ก (Jackhammer) เนื่องจากถนนบริเวณทางแยกต่างระดับเป็นโครงสร้างสะพานซึ่งต่างจากถนนบริเวณอื่นบนพื้นราบ จึงไม่สามารถใช้เครื่องจักรหนักในการเจาะสกัด เพราะอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างสะพานได้ และเมื่อดำเนินการเจาะสกัดผิวทางออกจะต้องทำการขนย้ายผิวทางเดิมออกจากพื้นที่ก่อสร้าง แต่ด้วยข้อจำกัดด้านพื้นที่จึงไม่สามารถให้รถบรรทุกวิ่งเข้าไปขนวัสดุภายในพื้นที่ก่อสร้างเหมือนถนนบนพื้นราบทั่วไปได้ จำเป็นต้องใช้เครนในการขนย้ายวัสดุจากช่องจราจรที่ซ่อมบำรุงมาใส่รถบรรทุกที่ช่องจราจรอื่น จึงต้องปิดช่องจราจรอื่นเพื่อให้รถบรรทุกจอดปฏิบัติงานและให้รถบรรทุกวิ่งเข้ามารับวัสดุออกไปจากพื้นที่ก่อสร้างได้ ซึ่งแสดงด้วยบล็อกสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3 การแสดงผลภาพของ 4D CAD ที่แสดงผลจุดเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุและผลกระทบต่อการจราจรของแผน C และการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ก่อสร้างในช่วงเวลาต่าง ๆ ตามขั้นตอนการซ่อมบำรุง

และเนื่องจากเครนมีรัศมีการทำงานในแนวราบและแนวตั้งมากกว่า 10 เมตร ซึ่งจะเห็นพื้นที่ทับซ้อนในการทำงานของเครื่องจักรกับพื้นที่ก่อสร้าง ช่องทางคู่ขนานที่เข้าสู่ชุมชนและพื้นที่ข้างเคียงในพื้นที่ทรงกระบอกสีแดง และในขณะเดียวกันก็มีการดำเนินการปรับปรุงซ่อมแซมชั้นรองพื้นทาง ที่ Sta. 0+327 ที่ Sta. 0+344 และที่ Sta. 0+361 ตามลำดับพื้นที่บล็อกสีม่วง ไปพร้อมกัน โดยในกิจกรรมนี้จำเป็นต้องใช้รถเครนและรถบรรทุกในการขนส่งวัสดุที่จะใช้ในการซ่อมแซมชั้นรองพื้นทางด้วยเช่นกัน ซึ่งแสดงด้วยบล็อกสีเหลือง และเนื่องจากเครนมีรัศมีการทำงานในแนวราบและแนวตั้งมากกว่า 10 เมตร ซึ่งจะเห็นพื้นที่ทับซ้อนในการทำงานของเครื่องจักรกับพื้นที่ก่อสร้าง ช่องทางคู่ขนานที่เข้าสู่ชุมชนและพื้นที่ข้างเคียงในพื้นที่ทรงกระบอกสีแดง 4D CAD จึงแสดงภาพให้เห็นจุดเสี่ยงที่อาจก่อให้เกิดอุบัติเหตุและผลกระทบต่อการจราจรทั้งสอง ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งแสดงพื้นที่ที่รถเครนและรถบรรทุกต้องใช้ในการปฏิบัติงานทั้งในแนวราบและแนวตั้ง ส่งผลกระทบต่อการจราจรคือต้องเปลี่ยนไปใช้ช่องทางอื่น ๆ ในการเดินทางจากทิศตะวันตกมุ่งทิศเหนือ และผลกระทบต่อการจราจรในช่องทางที่เดินทางจากทิศตะวันออกมุ่งทิศเหนือเพราะจำเป็นต้องปิดกั้นช่องทางในช่วงเวลาปฏิบัติงาน รวมถึงเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุจาก 2 กรณีคือ 1. ในการขนย้ายเศษวัสดุเดิมที่เจาะสกัดออกจากพื้นที่ก่อสร้าง และการขนย้ายวัสดุที่ใช้ในการซ่อมแซมพื้นทางเข้ามายังพื้นที่ก่อสร้าง อาจมีวัสดุตกจากที่สูงลงมายังพื้นที่ก่อสร้างในขณะที่รถเครนและรถบรรทุกปฏิบัติงาน ซึ่งเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานได้ และ 2. อาจเกิดอุบัติเหตุต่อรถที่สัญจรผ่านช่องจราจรที่ติดกับพื้นที่ที่รถเครนและรถบรรทุกใช้ปฏิบัติงาน จากการหมุนของเครนต่อช่องทางทิศเหนือมุ่งตะวันตกที่อยู่ในช่องทางข้างเคียงและการเข้าออกพื้นที่ของรถบรรทุกในบริเวณช่องทางคู่ขนานของถนนมิตรภาพในทิศมุ่งเข้าจังหวัดนครราชสีมา

จากการที่ผู้วางแผนโครงการสามารถเห็นจุดเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุดังกล่าว ทำให้สามารถกำหนดมาตรการความปลอดภัยและประมาณการงบประมาณสำหรับบริหารจัดการความปลอดภัย นอกจากนี้ที่จำเป็นต้อง

จัดเตรียมตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงดังนี้

1. ผู้ปฏิบัติงานจำเป็นต้องมีเครื่องป้องกันวัสดุที่อาจตกจากที่สูง คืออุปกรณ์ป้องกันศีรษะ (Head Protection Devices) นอกเหนือจากอุปกรณ์ป้องกันหู (Ear Protection) แวนนิรภัย (Eye protection) ถุงมือนิรภัย (Hand Protection) รองเท้านิรภัย (Foot Protection) หน้ากากกรองฝุ่นละอองเพื่อป้องกันฝุ่นละออง ในพื้นที่การทำงานที่มีฝุ่นละอองมากกว่าปกติ และเสื้อสะท้อนแสง 2. จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ป้องกันวัสดุตกลงมาบริเวณช่องจราจรด้านล่าง คือตาข่ายเซฟตี้กันตก (Safety Net) ทำจากวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษ จะมีความเหนียว ทนทาน ไม่ฉีกขาดง่าย สำหรับใช้กันคนพลัดตกจากที่สูงขณะก่อสร้าง หรือกันสิ่งของตกลงมาจากด้านบน โดยติดตั้งสลิ้งหุ้มยางร้อยผ่ากลางตลอดแนวตาข่ายในตาข่ายที่มีแนวยาวมาก ๆ หรืออาจร้อยสลิ้งเป็นกากบาทระหว่างมุมตาข่ายเพื่อให้ตาข่ายเกิดความตึง และมีการปูสแลนไว้ด้านล่างของแนวตาข่ายเนื่องจากโครงการซ่อมบำรุงทางต่างระดับเป็นพื้นที่ก่อสร้างก่อสร้างที่มีการรื้อถอนผิวทางคอนกรีตเสริมเหล็กจึงมีเศษปูนในปริมาณมากขณะดำเนินงาน รวมถึงต้องทำการจัดเตรียมอุปกรณ์ควบคุมการจราจรบริเวณพื้นที่ก่อสร้าง ทั้งป้ายเตือน แผงกันเครื่องจัดช่องจราจร อุปกรณ์ส่องสว่าง และเครื่องให้สัญญาณ ให้เพียงพอต่อการบริหารจัดการจุดเสี่ยงจากการเข้าออกพื้นที่ของรถบรรทุกและการบริหารจัดการความปลอดภัยในพื้นที่ก่อสร้างซ่อมบำรุงได้อย่างเหมาะสม

นอกจาก 4D CAD จะมีความสามารถในการแสดงภาพดังที่กล่าวมาแล้วนั้น แบบจำลองยังแสดงให้เห็นความแตกต่างของผลกระทบต่อการจราจรในช่วงเวลาเดียวกันระหว่างวันธรรมดา กับวันหยุดสุดสัปดาห์ จึงทำให้ผู้วางแผนโครงการสามารถทำการปรับแผนการเข้าปฏิบัติงานในพื้นที่ให้สอดคล้องกับการจราจรในช่วงเวลานั้น ๆ โดยการปรับแผนการปฏิบัติงานเฉพาะในวันหยุดสุดสัปดาห์ของแผน C ช่วงเช้าให้เข้าทำงานพื้นที่ทางทิศเหนือและช่วงบ่ายให้เข้าทำงานจากพื้นที่ทางทิศตะวันตก ซึ่งช่วยลดผลกระทบต่อการจราจรในวันหยุดสุดสัปดาห์ได้

5. สรุปผล

ผลการคัดเลือกแผนการซ่อมบำรุงทางแยกต่างระดับที่มีความเหมาะสมที่สุดนั้น คือแผนการซ่อมบำรุง C ที่ได้ปรับแผนการปฏิบัติงานหลังจากพิจารณาจุดเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุและผลกระทบต่อการจราจรที่แสดงให้เห็นใน 4D CAD โดยในวันธรรมดาช่วงเช้าให้เข้าทำงานจากพื้นที่ทางทิศตะวันตกและช่วงบ่ายให้เข้าทำงานพื้นที่ทางทิศเหนือ แต่ในวันหยุดสุดสัปดาห์ช่วงเช้าให้เข้าทำงานพื้นที่ทางทิศเหนือและช่วงบ่ายให้เข้าทำงานจากพื้นที่ทางทิศตะวันตก ซึ่งสามารถทำการคัดเลือกจากการพิจารณาเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของกระแสจราจรทั้ง 3 ตัว คือ มีความล่าช้าในการเดินทางผ่านแยกต่างระดับน้อยกว่าแผน A และ B มีความเร็วที่ใช้ในการเดินทางผ่านแยกต่างระดับเร็วกว่าแผน A และ B รวมถึงมีค่าระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทางผ่านแยกต่างระดับน้อยกว่าแผน A และ B

4D CAD ที่สร้างขึ้นสามารถแสดงภาพการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ก่อสร้างในช่วงเวลาต่าง ๆ ตามขั้นตอนการซ่อมบำรุงได้จริง ทำให้สามารถเห็นภาพจุดเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุในระหว่างดำเนินโครงการซ่อมบำรุง ที่เปลี่ยนตำแหน่งตามแผนปฏิบัติงานในแต่ละช่วงเวลาได้ ทำให้สามารถปรับแผนการปฏิบัติงานกำหนดมาตรการความปลอดภัยและลดผลกระทบต่อการจราจรที่เหมาะสมกับจุดเสี่ยง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในแต่ละช่วงเวลาได้ เช่น การปรับแผนการเข้าปฏิบัติงานในพื้นที่ของวันหยุดสุดสัปดาห์เพื่อลดผลกระทบที่เกิดขึ้นรวมถึงสามารถทำการจัดเตรียมอุปกรณ์ในการป้องกันเศษวัสดุที่อาจตกจากที่สูงลงมายังพื้นที่ด้านล่างได้อย่างเพียงพอและเหมาะสม รวมถึงจัดเตรียมอุปกรณ์ปิดกั้นเส้นทางที่เหมาะสมและเป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง ในจุดเสี่ยงที่เกิดจากการปิดกั้นพื้นที่ที่เครื่องจักรต้องใช้ในการปฏิบัติงาน ซึ่งทำให้สามารถประมาณการงบประมาณในการดำเนินโครงการได้อย่างใกล้เคียงความเป็นจริง และป้องกันการเกิดความสูญเสียต่อผู้มีส่วนได้ส่วนเสียที่อาจเกิดขึ้นได้ ซึ่งเป็นการจัดการความปลอดภัยของโครงการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดคือการนำมาตรการจัดการความปลอดภัยที่ได้ไปทดลองใช้กับการปฏิบัติงานจริง

เนื่องจากโครงการซ่อมบำรุงกรณีศึกษาเป็นเพียงแผนโครงการที่จะดำเนินการในอนาคต และควรเพิ่มศึกษาผลกระทบด้านอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างดำเนินโครงการซ่อมบำรุงทางแยกต่างระดับที่มีต่อผู้ใช้ประโยชน์ที่ดินโดยรอบ เช่น ผลกระทบจากเสียงและฝุ่นละออง เพื่อสามารถเตรียมมาตรการป้องกันได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] F. C. Fang and L. Elefteriadou, "Some guidelines for selecting microsimulation models for interchange traffic operational analysis," *Journal of Transportation Engineering* © ASCE, pp. 535-543, 2005.
- [2] J. Wang, Y. Kong, T. Fu and J. Stipanovic, "The impact of vehicle moving violations and freeway traffic flow on crash risk: An application of plugin development for microsimulation," *PLOS ONE*, vol. 8, pp. 1-22, Sep. 2017.
- [3] Ľ. Černický, A. Kalašová and J. Kapusta, "Signal controlled junctions calculations in traffic capacity assessment - aimsun, omnitrans, webster and tp 10/2010 results comparison," *Transport Problems*, vol. 11, pp. 121-130, 2016.
- [4] S. Moridpour, E. Mazloumi1 and M. Mesbah, "Impact of heavy vehicles on surrounding traffic characteristics," *Journal of Advanced Transportation*, vol. 49, pp. 535-552, 2015.
- [5] R. Jongeling and T. Olofsson, "A method for planning of work-flow by combined use of location-based scheduling and 4D CAD," *Automation in Construction*, vol. 16, pp. 189-198, 2007.

- [6] T. Hartmann, J. Gao and M. Fischer, “Areas of application for 3d and 4d models on construction projects,” *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 134, pp. 776–785, 2008.
- [7] T. Hartmann and M. Fischer, “Supporting the constructability review with 3d/4d models,” *Building Research and Information*, vol. 35, pp. 70–80, 2007.
- [8] K. Chau, M. Anson and J. Zhang, “Four-dimensional visualization of construction scheduling and site utilization,” *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 130, pp. 598–606, 2004.
- [9] V. Benjaoran and S. Bhokha, “An integrated safety management with construction management using 4D CAD model,” *Safety Science*, vol. 48, pp. 395–403, 2010.
- [10] W. Zhou, J. Whyte and R. Sacks, “Construction safety and digital design: a review,” *Automation in Construction*, vol. 22, pp. 102–111, 2012.
- [11] Y. Zhou, L.Y. Ding and L.J. Chen, “Application of 4D visualization technology for safety management in metro construction,” *Automation in Construction*, vol. 34, pp. 25–36, 2013.
- [12] P.P.A. Zanen, T. Hartmann, S.H.S. Al-Jibouri and H.W.N. Heijmans, “Using 4D CAD to visualize the impacts of highway construction on the public,” *Automation in Construction*, vol. 32, pp. 136–144, 2013.
- [13] K. A. Liapi, “4D visualization of highway construction projects,” *Proceedings of the Seventh International Conference on Information Visualization*, Los Alamitos, Calif., 2003, pp. 639–644.
- [14] M. Trebbe a, T. Hartmann and A. Dorée, “4D CAD models to support the coordination of construction activities between contractors,” *Automation in Construction*, vol. 49, pp. 83–91, 2015.
- [15] A. Carbonari, A. Giretti and B. Naticchia, “A proactive system for real-time safety management in construction sites,” *Automation in Construction*, vol. 20, pp. 686–698, 2011.
- [16] E. Jazayeri and G. B. Dadi, “Construction safety management systems and methods of safety performance measurement: A review,” *Journal of Safety Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 15–28, 2017.
- [17] M. Behm, “Linking construction fatalities to the design for construction safety concept,” *Safety Science*, vol. 43, pp. 589–611, Oct. 2005.

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 (เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2563) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

- | | |
|--|---|
| 1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด | ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 2. อาจารย์ ดร.พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| 3. อาจารย์ ดร.ณัฐฐา แสงนรินทร์ เหมจินดา | สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต |
| 4. อาจารย์ ดร.สิริลักษณ์ ประเสริฐกุลศักดิ์ | สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ |
| 5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรเมศวร์ เหลือเทพ | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ |
| 6. อาจารย์ ดร.ณพล ศรีศักดิ์ | สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยพะเยา |
| 7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติมา ศิลปษา | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 8. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สารัมภ์ บุญมี | สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี |
| 9. รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญฟ้า อุ่นอบ | ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 10. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิสิทธิ์ เอียดเอื้อ | วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 11. รองศาสตราจารย์ ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์ | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 12. รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชัย ฤตวิรุฬห์ | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| 13. อาจารย์ ดร.มังกร แวหะยี่ | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ |
| 14. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมมาส แก้วล้วน | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 15. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนกกรณ์ ลีโรจนาประภา | ภาควิชาสถิติ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 16. รองศาสตราจารย์ ดร. กาญจน์ภา อมรัชกุล | สาขาวิชาเอกการจัดการโลจิสติกส์ คณะสถิติประยุกต์
สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์ |

คำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความลงตีพิมพ์
วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒจัดพิมพ์ปีละ 3 ฉบับ ฉบับที่ 1 ช่วงเดือนมกราคม – เมษายน ฉบับที่ 2 ช่วงเดือนพฤษภาคม – สิงหาคม และฉบับที่ 3 ช่วงเดือนกันยายน – ธันวาคม โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะให้เป็นการรวบรวมผลงานทางวิชาการและงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ซึ่งบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ทุกบทความจะผ่านความการพิจารณาและความเห็นชอบจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้องและสงวนสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พุทธศักราช 2521 และเผยแพร่แบบออนไลน์ทั่วประเทศ

1. การเตรียมต้นฉบับ

- 1) เป็นบทความวิจัย หรือบทความวิชาการ ที่มีความยาวไม่ควรน้อยกว่า 7 หน้า และไม่ควรเกิน 10 หน้า กระดาษ A4 พิมพ์ห่างจากขอบกระดาษด้านซ้าย 1.25 นิ้ว ด้านอื่น ๆ 1 นิ้ว
- 2) เป็นบทความที่ไม่ได้อยู่ระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ของสื่อสิ่งพิมพ์อื่น ๆ และไม่เคยได้รับการตีพิมพ์ในวารสารใด ๆ มาก่อน
- 3) ต้องไม่มีการละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่น ไม่มีการลอกเลียน หรือตัดทอนผลงานวิจัยของผู้อื่นโดยที่ไม่ได้รับอนุญาตและมีการอ้างอิงที่เหมาะสม
- 4) ชนิดและขนาดตัวอักษร ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษให้ใช้ตัวอักษร TH Sarabun New ซึ่งขนาดตัวอักษร มีรายละเอียดดังนี้
 - 6.1) ชื่อบทความ ใช้ตัวอักษรขนาด 18 pt. ตัวหนา
 - 6.2) ชื่อ-สกุลผู้เขียนบทความ ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวปกติ
 - 6.3) หัวข้อหลัก ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวหนา
 - 6.4) หัวข้อรอง ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวเอียง
 - 6.5) เนื้อเรื่องในหัวข้อหลักและหัวข้อรอง ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวปกติ
 - 6.6) เนื้อเรื่องในตาราง ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวปกติ

รูปแบบการเขียนบทความ ควรมีหัวข้อเรียงตามลำดับดังต่อไปนี้

ชื่อเรื่อง ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยมีข้อความที่กระชับ ได้ใจความ และบ่งบอกบทความได้อย่างชัดเจน

ชื่อผู้เขียน ให้ระบุชื่อ นามสกุล ตำแหน่ง หน่วยงานและที่อยู่ของผู้เขียนทุกคน โดยหากบทความเป็นภาษาไทยให้ระบุชื่อผู้เขียนเฉพาะภาษาไทยเท่านั้น

บทคัดย่อ บทคัดย่อต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

คำสำคัญ (Keyword) คำสืบค้นที่เกี่ยวข้องกับบทความ ต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

บทนำ กล่าวถึงความสำคัญของปัญหาและภูมิหลังของการวิจัย รวมไปถึงวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ตัวเนื้อหา อธิบายถึงอุปกรณ์ หรือวิธีการที่ใช้ในการวิจัย บรรยายผล และวิจารณ์ผล สามารถแตกออกเป็นหลายหัวข้อได้

สรุป บรรยายถึงบทสรุปของงานวิจัย

กิตติกรรมประกาศ ขอขอบคุณสนับสนุน หรือบุคคล (ถ้ามี)

เอกสารอ้างอิง ให้เขียนเอกสารอ้างอิงโดยใช้วิธีเรียงตามลำดับก่อนหลังที่พบในบทความ ในรูปแบบตัวเลขในวงเล็บเหลี่ยม สำหรับรูปแบบการพิมพ์รายการเอกสารอ้างอิง ใช้รูปแบบ IEEE ดังรายละเอียดและตัวอย่างในไฟล์แม่แบบ (template) ซึ่งดาวน์โหลดได้ที่ <http://eng.swu.ac.th/re.html>

2. วิธีการส่งบทความ

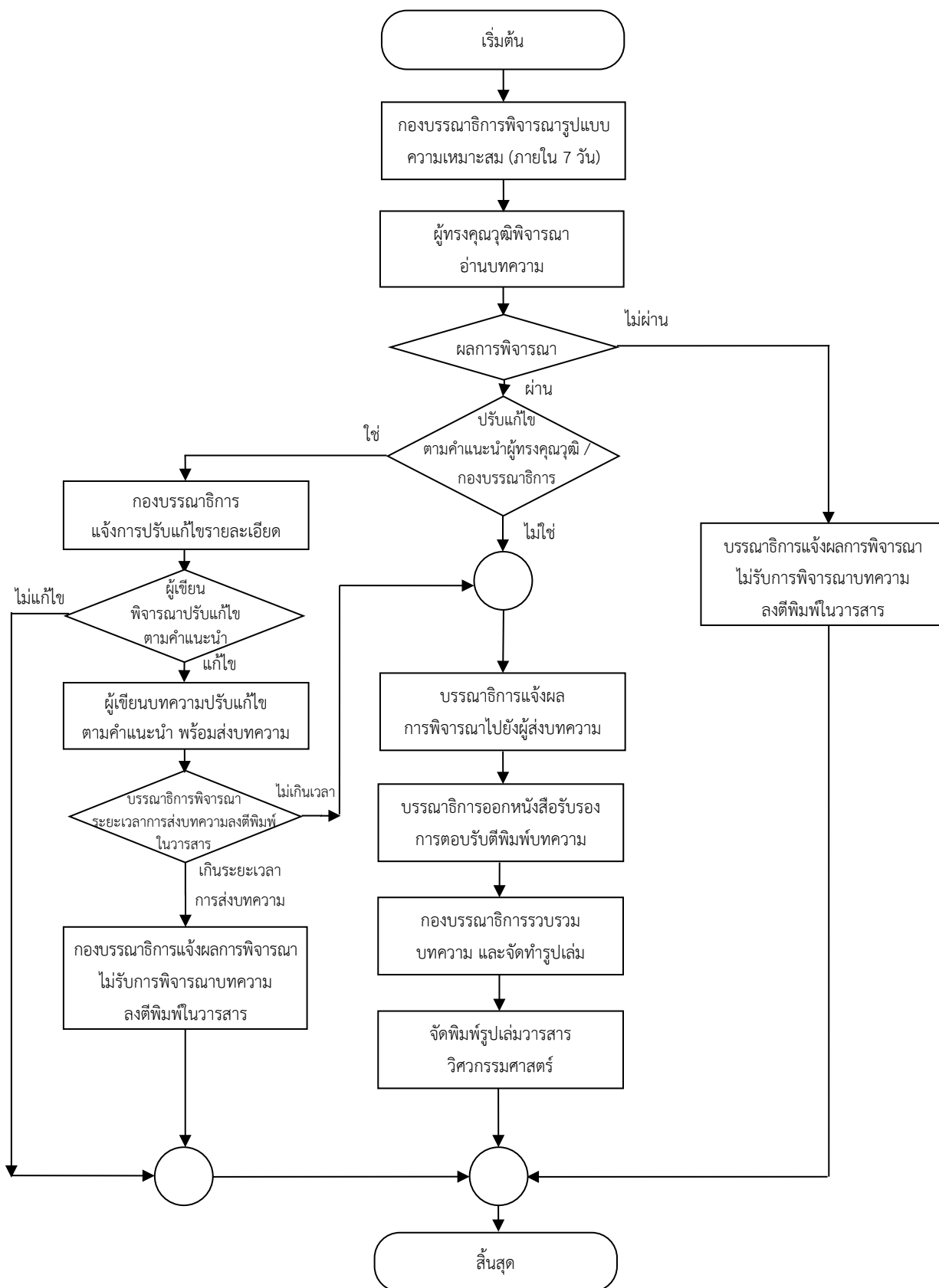
- 1) ส่งต้นฉบับบทความ ไฟล์ Microsoft Word และ pdf พร้อมแนบไฟล์สแกนแบบเสนอผลงานวิชาการเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- 2) ส่งไฟล์ต้นฉบับทางออนไลน์ที่
<https://www.tci-thaijo.org/index.php/sej/login>
- 3) ดูข้อมูลวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒเพิ่มเติม และดาวน์โหลดแบบฟอร์มประกอบการส่งบทความ ได้ที่ <http://eng.swu.ac.th/re.html>

3. ขั้นตอนการประเมินบทความ

การประเมินบทความวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ มีขั้นตอนดังนี้

- 1) การทบทวนโดยผู้รู้เสมอกัน (peer review) โดยผู้ทรงคุณวุฒิน้อยสองคนในสาขาที่เกี่ยวข้องแบบอำพรางฝ่ายเดียว (double-blind)
- 2) การเขียนตอบข้อซักถามและการแก้ไขปรับปรุงต้นฉบับตามข้อคิดเห็น (comments) ของผู้ทรงคุณวุฒิ โดยผู้เขียน และการพิจารณาอีกครั้งโดยผู้ทรงคุณวุฒิคนเดิม หากผู้ทรงคุณวุฒิได้แจ้งความประสงค์ขอพิจารณาอีกครั้งไว้
- 3) การประชุมกองบรรณาธิการเพื่อพิจารณาผลการทบทวนโดยผู้รู้เสมอกันจากผู้ทรงคุณวุฒิ และการแก้ไขปรับปรุงต้นฉบับ เพื่อตัดสินใจว่าจะตอบรับหรือไม่ในขั้นสุดท้าย
- 4) สำหรับบทความที่ได้รับการตอบรับ กองบรรณาธิการจะพิจารณาความถูกต้องของรูปแบบเพื่อแจ้งผู้เขียนแก้ไข
- 5) บรรณาธิการออกหนังสือรับรองการเผยแพร่ให้ผู้เขียน โดยมอบไว้กับผู้เขียนหลัก

ขั้นตอนการพิจารณาผลงานเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ





คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

เลขที่ 63 หมู่ 7 ถนนรังสิต - นครนายก
อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120

โทร 0 2649 5000 ต่อ 27560 27070

โทรสาร 0 3739 5527

<http://eng.swu.ac.th>

บทความวิจัย

- การใช้ประโยชน์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุประสานสำหรับคอนกรีตบล็อก
Utilization of Calcium Carbide Residue and Bottom Ash as a Binder for Solid Load-bearing Concrete Block
โดย กมล ตรีมวง วีรพันธุ์ เจียมมีปรีชา อรรถเดช อับดุลมาดิน
- สภาพจิตสังคมในการทำงานของแรงงานก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรร
Psychosocial Working Condition of Construction Labor Working in Subdivision Housing Project
โดย นที สุรียานนท์ นคร สุรียานนท์ วนิดา สุรียานนท์
- การจำลองทางเลือกการเดินทางโดยคำนึงถึงมลพิษทางอากาศในเมืองและการประยุกต์ใช้แบบจำลองโลจิสติกในเขตเมืองนครปฐม
Considering Urban Air Pollution in Travel Choice Modeling and Its Application to Logit Model in Nakhon Pathom
โดย ธนกร เมธิน วนิดา รุ่งแจ้ง
- พฤติกรรมของความแข็งและความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีของเหล็กหล่อขาวเติมธาตุผสมกึ่งหลายชนิดที่มีปริมาณโครเมียมต่างกัน
Behavior of Hardness and Abrasive Wear Resistance of Semi-multi-alloyed White Cast Iron with Different Chromium Contents
โดย ณัฏฐิศา โยธาธรณ์ สุดสาคร อินธิเดช
- การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้วัสดุดูดซับที่เตรียมจากผักตบชวา
A Study on Adsorption Efficiency of Methylene Blue Dye using Adsorbent Material Prepared from Water Hyacinth
โดย ชาญชัย คหาปะนะ ณภัทร โพธิ์วัน
- การสร้างแบบจำลองสถานการณ์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตซาลาเปา
Simulation Modeling to Improve the Efficiency of the Steamed Stuffed Buns Production
โดย ธนพันธ์ คงทอง เพ็ญสุดา พันธุธิดา เชษฐา ชำนาญหล่อ
- การไพโรไลซิสแบบเร็วของถ่านทอร์รีไฟด์จากไม้กระถินยักษ์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไซ์เบดแบบฟอง
Fast Pyrolysis of Torrefied Leucaena leucocephala Wood in a Bubbling Fluidised-Bed Reactor
โดย นันทปรีชา สิงห์ทอง นวรงค์ ชลคุป อติศักดิ์ ปัตติยะ
- การจัดการพลังงานสำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย บนพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียม
Energy System Management for Substation of Electricity Generating Authority of Thailand base on Artificial Neural Network
โดย ศิระพงศ์ ลือชัย กวิน สนธิเพิ่มพูน
- แบบจำลอง 4D CAD สำหรับจัดการความปลอดภัยและลดผลกระทบการจราจรใน โครงการซ่อมบำรุงถนนบริเวณทางแยกต่างระดับ: กรณีศึกษาแยกต่างระดับนครราชสีมา
4D CAD Model for Safety Management and Traffic Impact Reduction in Road Maintenance Project at the Interchange
: Case Study of the Nakhon Ratchasima Interchange
โดย วิชยา รังคะนันทน์ วรภูมิ เบญจโอฬาร