

NEnR 2017

National Engineering Research Symposium 2017

การประชุมวิชาการระดับชาติวิศวกรรมวิจัย ครั้งที่ 1



- วิศวกรรมศาสตร์
- เทคโนโลยี และนวัตกรรม
- วิศวกรรมศึกษา
- การจัดการเทคโนโลยีสาขาที่เกี่ยวข้อง

28 - 29 มิถุนายน 2560

ณ โรงแรมการ์เด็น คลิฟ รีสอร์ท แอนด์ สปา พัทยา จังหวัดชลบุรี

จัดการประชุมโดย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

NErR 2017

National Engineering Research Symposium 2017

การประชุมวิชาการระดับชาติวิศวกรรมวิจัย ครั้งที่ 1

วิศวกรรมศาสตร์

เทคโนโลยี และนวัตกรรม

วิศวกรรมศึกษา

การจัดการเทคโนโลยีสาขาที่เกี่ยวข้อง

จัดการประชุมโดย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สารจากคณบดี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



การประชุมวิชาการระดับชาติวิศวกรรมวิจัย ครั้งที่ 1 (National Engineering Research Symposium 2017) จัดขึ้นเพื่อเป็นเวทีในการนำเสนอและแลกเปลี่ยนผลงานด้านวิศวกรรมศาสตร์ ทั้งงานวิจัยพื้นฐาน งานวิจัยประยุกต์ งานวิจัยวิศวกรรมศึกษา และสาขาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง โดยในงานประชุมวิชาการนี้ได้รับการตอบรับการเข้าร่วมของมหาวิทยาลัยต่างๆ ในประเทศไทยมากมาย

ในนามของเจ้าภาพคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิในการพิจารณาบทความ คณะกรรมการจัดงาน วิทยากรผู้ทรงคุณวุฒิ และผู้เข้าร่วมทุกท่าน ที่ได้เป็นส่วนหนึ่งของงานประชุมวิชาการครั้งนี้ หวังว่างานประชุมวิชาการนี้ จะก่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนเรียนรู้ การสร้างเครือข่ายและการพัฒนาขอบข่ายงานวิจัยเพื่อรองรับการพัฒนาอุตสาหกรรม 4.0 ของประเทศต่อไป



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวกร อ่างทอง)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ประธานกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ NEnR 2017

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ

การประชุมวิชาการระดับชาติวิศวกรรมวิจัย ครั้งที่ 1

- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมหมาย ผิวสะอาด มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวกร อ่างทอง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วารุณี อริยวิริยะนันท์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรพงษ์ ภาวสุปรีย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- รองศาสตราจารย์ ดร.ธนพงศ์ สุวรรณศรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณพล อยู่บรรพต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพงษ์ ว่องรัตนะไพศาล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บรรยงค์ รุ่งเรืองด้วยบุญ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
- รองศาสตราจารย์ ดร.อภิรัตน์ เล่าห์บุตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- ดร.วรวัชร วัฒนฐานะ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- รองศาสตราจารย์ ดร.ภาณท์ เกิดชื่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
- ดร.เกตุกาญจน์ ไชยจันทร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
- ดร.บวรกิตต์ เนคมานุรักษ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
- ดร.พิมลพรรณ เนียมกลาง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
- ดร.สุภาภรณ์ ทุมสอน สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
- ดร.ปิยะมาศ ไชนอก สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
- ดร.นริศรา นาคเมธี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

รายชื่อผู้พิจารณาบทความ

การประชุมวิชาการระดับชาติวิศวกรรมวิจัย ครั้งที่ 1

- รองศาสตราจารย์ ดร.อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- ดร.อัษฎรัตน์ วัฒนพานิช มหาวิทยาลัยมหิดล
- ดร.อภิสิทธิ์ ไชยิตชัยรงค์ บริษัท พีทีที โกลบอล เคมิคอล จำกัด (มหาชน)
- ดร.รักษพงศ์ คุณานุรักษ์พงศ์ บริษัท พีทีที โกลบอล เคมิคอล จำกัด (มหาชน)
- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสพิรุณห์ วัชรศรีสำเร็จ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
- ดร.โชคชัย ชื่นวัฒนาประณีติ มหาวิทยาลัยบูรพา
- ดร.นริศรา นาคเมธี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
- ดร.พิมลพรรณ เนียมกลาง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
- ดร.บวรกิตดี เนคมานุรักษ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
- ดร.สันติ กุลการชาย มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
- อาจารย์บพิตร ไชยนอก มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
- อาจารย์ทิพา กองศรีมา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
- ดร.วีรพันธุ์ เจียมมีปรีชา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
- ดร.ภูตินันท์ เอื้อวงศ์สุวรรณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สายชล ชุตเจือจิน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยภพ ศิระวรกุล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- ดร.ศิริชัย เตரியมล้ำเลิศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- ดร.ปรกช สิริสุวัฒน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- ดร.สุมนมาลย์ เนียมกลาง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

กำหนดการ

การประชุมวิชาการระดับชาติวิศวกรรมวิจัย ครั้งที่ 1 (NEnR 2017)

วันที่ 28 - 29 มิถุนายน 2560 ณ โรงแรมการ์เด้น คลิฟ รีสอร์ท พัทยา จังหวัดชลบุรี

วันที่ 28 มิถุนายน 2560

09.00 - 09.30 น.	พิธีเปิด โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวกร อ่างทอง ประธานกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ NEnR 2017
09.30 - 10.15 น.	Keynote Speaker (KS01) : จากห้องปฏิบัติการสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์
10.15 - 10.30 น.	พักรับประทานอาหารว่าง
10.30 - 11.15 น.	Invited Speaker (IN01) : 3,4-Dihydro-1,3-2H-Benzoxazines: สารรีดิวิซ์ ชนิดใหม่สำหรับการเตรียมและการเคลือบพื้นผิวด้วยซิลเวอร์ที่มีอนุภาคในขนาด นาโนเมตรเพื่อการประยุกต์ใช้ในการต้านจุลชีพและตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง โดย ดร.วรวัชร วัฒนฐานะ
11.15 - 11.30 น.	TI01
11.30 - 11.45 น.	TI02
11.45 - 12.00 น.	TI03
12.00 - 13.00 น.	พักรับประทานอาหารกลางวัน
13.00 - 14.15 น.	TI04, TI05, TI06, TI07, TI08, MT02
14.15 - 14.30 น.	พักรับประทานอาหารว่าง
14.30 - 16.00 น.	GE01, GE02, GE03, GE04, ES01, ES02
16.00 - 17.30 น.	นำเสนอโปสเตอร์
17.30 - 17.45 น.	ประกาศผลรางวัลบทความดีเด่น และโปสเตอร์ดีเด่น

วันที่ 29 มิถุนายน 2560

09.00 - 15.00 น.	Workshop เรื่อง “การเขียนบทความเพื่อการตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ” โดย รองศาสตราจารย์ ดร.อภิรัตน์ เลาห์บุตรี และ ดร.วรวัชร วัฒนฐานะ
------------------	--

สารบัญ

GE : วิศวกรรมศาสตร์

GE01	การศึกษาแนวทางการควบคุมกระแสเกินในสายส่งเนื่องจากระบบผลิตหลุดออกจากเครือข่าย วิมลสิริ ลินภูธรณ์ และ เกียรติยุทธ กวีญาณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	1
GE02	การศึกษาความสามารถในการเชื่อมเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงสำหรับงานโครงสร้างเหล็กด้วย กระบวนการเชื่อมแบบ GMAW ณัฐ แก้วสกุล* เรืองศักดิ์ ภูธรราช มานพ ต้นตระกูลตันติย์ อัญญารัตน์ ประสันใจ อมรรัตน์ กงแก้ว ชันทิ สุมั่งสะ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	5
GE03	เส้นลวดทองแดงนำไฟฟ้าโดยการสเปย์ไฟโรไลซิสหมึกสารประกอบเชิงซ้อนคอปเปอร์เอมีน ที่รีดิวซ์ด้วยตัวเอง ศิริพร เกศโพคะศิริ* และ สุรเทพ เขียวหอม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	10
GE04	การประมาณค่าความสกปรกบนแผงโซลาร์เซลล์ด้วยกระบวนการทางภาพ พงษ์ศักดิ์ ทามแก้ว* ประจวบ อินระวงศ์ และ กามพ์ เกิดชื่น สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	14
GE07	ระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังประยุกต์ร่วมกับ FACTS ในระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสสลับของรถไฟฟ้า ทศพร เจริญจันทร์ และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์* ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	18
GE08	การวิเคราะห์คอนเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรม/ขนานของการโอนย้ายพลังงานแบบเหนี่ยวนำสำหรับสถานีประจุ ยานยนต์ไฟฟ้า ปรินต์ป ปิ่นวันนา ภาณุวัฒน์ ราชสิทธิ์ ประภาศิต ปราบพาล และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์ ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	22
GE09	การควบคุมอัตโนมัติสำหรับไบเบลตแบบปรับมุมได้ พิพัฒน์ ปราโมทย์* วินัย จันทร์เพ็ง ปณณธร ศลิขภูธรณ์วัฒน์ ประเสริฐ ทาขานนท์ อภิชาติ ไชยจันทร์ สุเทพ วัชรารื่องวิทย์ สำรวม โกศลานันท์ ณัฐสิทธิ์ พัฒนะอิม นพพร เปรมใจ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	26

สารบัญ

GE10	การศึกษาผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากผลของอุณหภูมิแผง เกียรติศักดิ์ พรหมจำปา รุ่งเพชร ก่องนอก และ บุญยัง ปลั่งกลาง* ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	29
GE11	วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ยุทธนา อุดมสุข ณิชฐพงษ์ ศรีสวัสดิ์ ประกาศิตปราบพาล และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์ ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	32

TI : เทคโนโลยี และนวัตกรรม

TI01	อิทธิพลของโครงสร้างคาร์บอนเมมเบรนที่มีผลต่อการซึมผ่านของไอเมทานอลและเอทานอล แบบแข่งขัน หาญณรงค์ ประกอบธรรม* และ อนวัช สังข์เพชร ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	37
TI02	เอสเทอร์ฟิเคชันของกรดลินอเลอิกในน้ำมันถั่วเหลือง สมชนก ศรอารา* และ อนวัช สังข์เพชร ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	41
TI03	กระเบื้องบุผนังแบบไม่เผาและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจากดินตะกอนน้ำประปา รัชชานนท์ เนียมรัตน์ อุบลรัตน์ หวังรัชต์สกุล ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	45
TI04	การแยกองค์ประกอบของฟูลเลอร์ด้วยเพอเวปพอเรชันโดยใช้เมมเบรนไฮบริดซิลิกา อรุณี นุ่นปล้อง ¹ * อนวัช สังข์เพชร ¹ ปรีดดา ประยูรยงค์ ² และ อัจฉราพร ขำโสภา ³ ¹ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ² ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ³ คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล	49
TI05	การแยกบิวทานอลออกจากน้ำหมักจำลองโดยตัวดูดซับที่มีรูพรุนที่เตรียมจากพอลิอิเทอร์บิล็อกเอไมต์ โดยวิธีการตกตะกอน อดุลยฤทธิ์ สุดทองคง* และ อนวัช สังข์เพชร ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	53
TI06	กระเบื้องบุผนังเผาครั้งเดียวจากดินตะกอนน้ำประปา พีระภัทร์ นาคกนก* อุบลรัตน์ หวังรัชต์สกุล ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	57

สารบัญ

T107	คุณสมบัติด้านเชื้อเพลิงของแท่งเชื้อเพลิงผลิตจากลำต้นปาล์มน้ำมันยืนต้นตาย พิชญา แซ่จั้ง* และ อนวัช สังข์เพ็ชร ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	61
T108	การศึกษาสมรรถนะคาร์บอนเมมเบรนสำหรับการแยกน้ำออกจากฟูลเลอร์ โดยเพอแวนพอเรชัน จเร ยาหอมทอง* และ อนวัช สังข์เพ็ชร ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	65
T109	การผลิตหมอนสุภาพกึ่งน้ำบำบัดบรรจุหลอดพลาสติกที่ย่อยสลายได้ ศรีประไพ จุ้ยน้อย ¹ * สุภาภรณ์ ทุมสอน ² ¹ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ² ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน	69
T116	การออกแบบโครงสร้างการควบคุมแบบแพลนท์ไวด์ของกระบวนการเอทิลเบนซีนด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ ชัยภพ ศิระวารกุล* และ ชนาภา เจริญมิตรภาพ ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	74
T117	การออกแบบและสร้างชุดให้น้ำแบบหยด (Drip Kit) ชนิดต้นทุ่นดำและเคลื่อนย้ายได้ วีระพงษ์ ครุสงส์ สานิตย์ดา เตียวต้อย* และ สิวิมล เล็กกฤษดี ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	79
T118	การปลูกพืชประหยัดน้ำแบบท่อน้ำหยดแนวตั้ง สานิตย์ดา เตียวต้อย* วีระพงษ์ ครุสงส์ สันติภาพ ชันทนต์ และ สุธี จักันทา ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	83
T119	การกำจัดแอมโมเนียในน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบด้วยกระบวนการเติมคลอรีน กุลยา สาริชีวิน* และ สมพิศ ตันตวรนาท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	87
T120	สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่มีการเติมเปลือกแปะก๊วยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน กัณฑ์วี สุขถาวร ¹ อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี ² นัทธมน คุณแสง ³ และ ฉัตรชัย วีระนิติลกุล ^{1*} ¹ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ² ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ³ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	92

สารบัญ

TI21	การขึ้นรูปและสมบัติของเส้นใยพอลิแลกติกแอซิดด้วยระบบอัดรีดเครื่องพิมพ์ 3 มิติ นที ศรีสวัสดิ์ ^{1*} พงษ์ศักดิ์ อำภา ² และ สมชาย เปียนสูงเนิน ³ ¹ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ² ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ³ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	97
TI23	ผลิตภัณฑ์ผนังหลายชั้นจากการขึ้นรูปแบบหมุนในขั้นตอนเดียว ณรงค์ชัย โอเจริญ* ศุภกิตต์ เข้มมงคล ประสิทธิ์ วิชาศรี ไกรวุฒิ ดอกกล้าดดา และ เอกตินัย จันทร์ศรี ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	102

ES : วิศวกรรมศึกษา

ES01	การประเมินการฝึกอบรมด้านความปลอดภัยในรูปแบบ “การฝึกอบรมที่หน้างาน” ศิริัญญา สรรพานิช* และ ดนัย วันทนการ ² ¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและการบริหารงานก่อสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ² ภาควิชาวิศวกรรมโยธาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	106
ES02	การลดอาการปวดหลังของพนักงานบริษัทซีพีออลล์ จำกัด(มหาชน) (ศูนย์กระจายสินค้าเชียงใหม่) ศุภลักษณ์ สุวรรณ* และ กิตติศักดิ์ ฟ้าทอง สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนอร์ท-เชียงใหม่	110

MT : การจัดการเทคโนโลยีสาขาที่เกี่ยวข้อง

MT02	ปัจจัยแวดล้อมที่มีผลต่อการพัฒนาระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนในพื้นที่ห่างไกล พิมพ์นภัส ภูมิภิตติพิชญ์ ^{1*} และ กฤษณชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์ ² ¹ สาขาสังคมศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ² ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	115
------	--	-----

NEhR 2017



การศึกษาแนวทางการควบคุมกระแสเกินในสายส่งเนื่องจากระบบผลิตหลุดออกจากเครือข่าย A Study of Guideline for Control Transmission Line-Overload Due to Generated System Out of Network

วิมลสิริ ลิณภูธรณ์* และ เกียรติยุทธ กวีญาณ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-mail: phynevi@gmail.com*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการศึกษาแนวทางการควบคุมกระแสเกินในสายส่งเนื่องจากระบบผลิตหลุดออกจากเครือข่าย เพื่อแก้ปัญหาการจ่ายโหลดไม่เพียงพอและการเกิดกระแสเกินในระบบสายส่ง โดยติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเข้าไปที่เครือข่ายและตั้งค่ามุมของหม้อแปลง เพื่อควบคุมกระแสที่เกิดขึ้นในสายส่งให้มีค่าไม่เกินพิกัดของสาย โดยใช้การจำลองและทดสอบบนโปรแกรม DigSILENT PowerFactory ผลการวิจัยพบว่า เมื่อทำการเปลี่ยนค่ามุม (phase shift) ของหม้อแปลงไปในช่วงหนึ่ง ก็สามารถจ่ายโหลดได้และสามารถควบคุมไม่ให้เกิดกระแสเกินภายในสายส่งได้ และค่ามุมที่เหมาะสมสำหรับเครือข่ายการจ่ายไฟฟ้าภายในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมาคือ 17.7 องศา

คำสำคัญ: ค่ากระแสเกิน คุณภาพไฟฟ้า ค่ามุมของหม้อแปลง

1. บทนำ

ในปัจจุบันหน่วยงานที่รับผิดชอบด้านการผลิตและจำหน่ายไฟฟ้า คือ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิต เป็นผู้ผลิตไฟฟ้าให้การไฟฟ้านครหลวง และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคไปจำหน่าย การไฟฟ้านครหลวง จะจำหน่ายไฟฟ้าให้ภายในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ส่วนการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จะจำหน่ายไฟฟ้าให้กับต่างจังหวัดของทุกภาคในประเทศ ปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งภายในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร ปริมณฑลและต่างจังหวัดได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง สาเหตุมาจากจำนวนโหลดที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นระบบส่งต้องเผชิญกับปัญหาการจ่ายโหลดไม่เพียงพอและค่ากระแสเกินพิกัดสาย โดยปัญหาดังกล่าวนั้นอาจเกิดขึ้นจากระบบผลิตหลุดออกจากเครือข่าย ซึ่งจะส่งผลไปยังสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคทำให้เกิดปัญหาขาดแหล่งจ่ายพลังงานไปในช่วงขณะ เป็นผลทำให้เกิดการจ่ายโหลดไม่เพียงพอและเกิดกระแสเกินในสายส่ง ปัญหาทั้งสองสามารถแก้ไขได้หลายวิธี เช่น การปลดโหลดที่ไม่จำเป็นออกจากเครือข่าย การเพิ่มจำนวนสายส่งให้เครือข่าย แต่วิธีที่นำมาศึกษาใน

บทความนี้คือติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเข้าไปที่เครือข่ายและตั้งค่ามุม (phase shift) ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

2. ทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

2.1 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power Transformer)

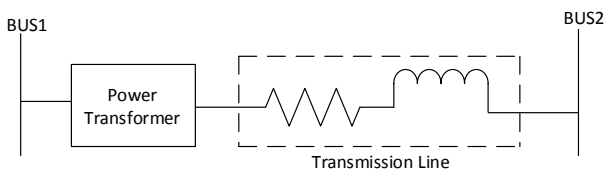
หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจะใช้สำหรับการจ่ายกำลังไฟฟ้าและระบบสายส่ง หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดนี้จะมีกำลังไฟฟ้าในการใช้งานสูงที่สุดและแรงดันไฟฟ้าใช้งานอย่างต่อเนื่องก็จะมีค่าสูงที่สุดด้วย การกำหนดพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าจะเหมือนกับเครื่องจักรไพลัส คือจะกำหนดเป็น โวลต์แอมแปร์ (VA) โดยทั่วไปจะมีขนาดตั้งแต่ 1 MVA ขึ้นไป



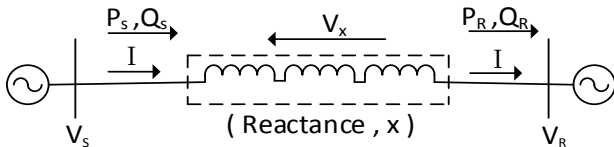
รูปที่ 1 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power Transformer)

2.2 ระบบส่งกำลังไฟฟ้า (Transmission System)

การส่งกำลังไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของสายส่ง ซึ่งจะทำให้วิธีการไหลของกำลังไฟฟ้าในเครือข่ายนั้นเปลี่ยนแปลงไป รูปที่ 2 [1] แสดงถึง การนำหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังมาติดตั้งบนสายส่งระหว่างบัส 1 และ บัส 2 โดยเปลี่ยนค่ามุมภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ทำให้สามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าภายในสายส่งและควบคุมกระแสภายในสายส่งได้



รูปที่ 2 การติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในเครือข่าย



รูปที่ 3 ระบบส่งกำลังไฟฟ้า

จากรูปที่ 3 จะได้สมการ [2]

$$P_s = P_R = \frac{V_s V_R}{X} \sin \delta \quad (1)$$

โดยที่	P_s	คือ	กำลังไฟฟ้าจริงต้นทาง	(MW)
	P_R	คือ	กำลังไฟฟ้าจริงปลายทาง	(MW)
	V_s	คือ	แรงดันไฟฟ้าต้นทาง	(kV)
	V_R	คือ	แรงดันไฟฟ้าปลายทาง	(kV)
	X	คือ	ค่ารีแอกแตนซ์	(Ω / km)
	δ	คือ	ค่ามุมระหว่างแรงดันไฟฟ้าต้นทางกับปลายทาง	($^{\circ}$)

$$Q_s = \frac{V_s V_R}{X} \left[\frac{V_s}{V_R} - \cos \delta \right] \quad (2)$$

โดยที่	Q_s	คือ	กำลังไฟฟ้าเสมือนต้นทาง	(MVAR)
--------	-------	-----	------------------------	--------

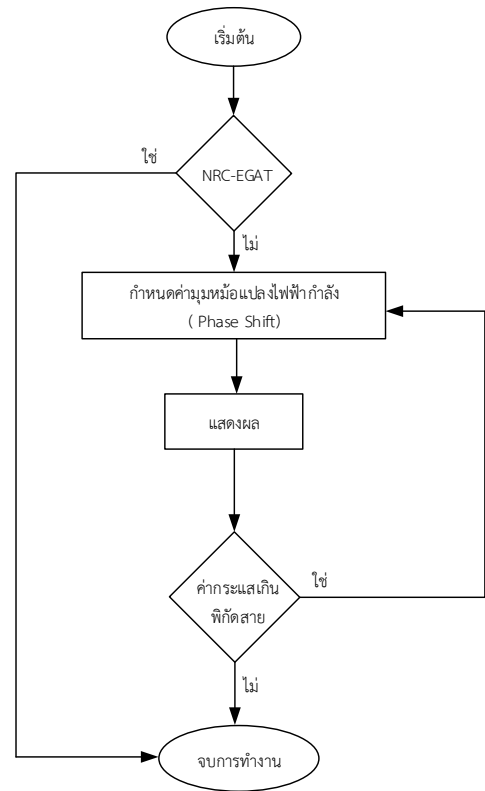
$$Q_R = \frac{V_s V_R}{X} \left[\cos \delta - \frac{V_R}{V_s} \right] \quad (3)$$

โดยที่	Q_R	คือ	กำลังไฟฟ้าเสมือนปลายทาง	(MVAR)
--------	-------	-----	-------------------------	--------

2.3 แบบจำลองของเครือข่าย

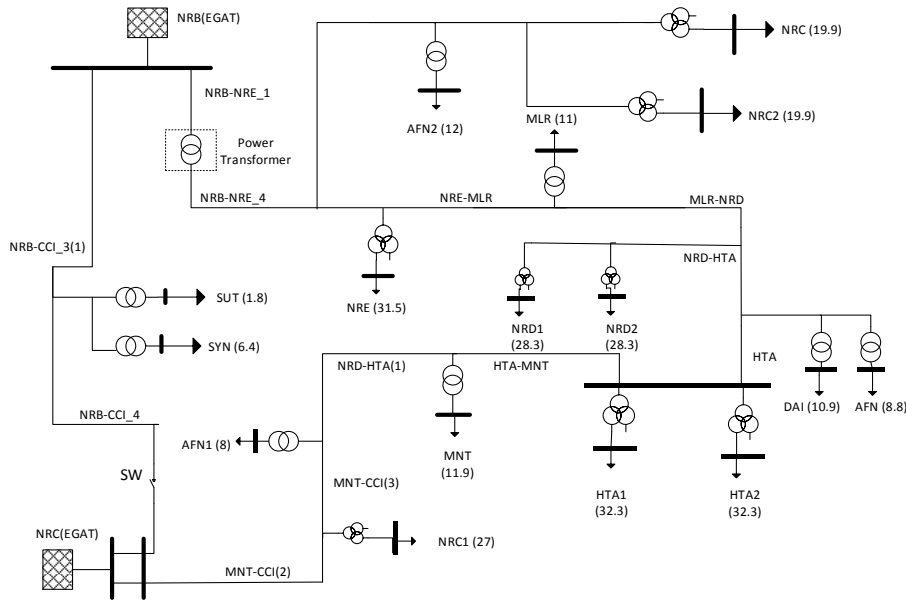
แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาเป็นเครือข่ายการจ่ายไฟฟ้าภายในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมาของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ระดับแรงดัน 115 kV ในโปรแกรม DigSILENT PowerFactory ดังแสดงใน

รูปที่ 5 โดยการเปลี่ยนค่ามุมของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและแสดงแผนผังการคำนวณได้ตามต้องการ ดังรูปที่ 4 [4]



รูปที่ 4 แผนผังการทำงานในโปรแกรม DigSILENT PowerFactory

การจ่ายไฟฟ้าภายในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมาของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจะรับไฟฟ้าจากสถานีต้นทางของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต 2 สถานี เพื่อจ่ายไฟฟ้าให้ภายในพื้นที่ กรณีที่ทั้ง 2 สถานี สามารถจ่ายไฟฟ้าได้ปกติ นั้น จะไม่พบปัญหาการจ่ายโหลดไม่เพียงพอและค่ากระแสไม่เกินพิกัดสาย แต่เมื่อมีการสูญเสียสถานี NRC-EGAT เครือข่ายการจ่ายไฟฟ้าภายในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมาจะเหลือแหล่งจ่ายไฟฟ้าสถานี NRB-EGAT เพียงสถานีเดียวเท่านั้น ซึ่งไม่สามารถจ่ายโหลดได้เพียงพอและเกิดปัญหาค่ากระแสเกินพิกัดสาย จากรูปที่ 4 เมื่อสถานี NRC-EGAT หลุดออกจากเครือข่าย จะทำการกำหนดค่ามุมของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ติดตั้งเข้าไปในเครือข่าย เพื่อนำมาคำนวณหาค่ากระแสภายในสายส่ง ถ้าค่ากระแสที่ได้จากการคำนวณเกินค่ากระแสพิกัดของสาย จะต้องกำหนดค่ามุมของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังใหม่ แต่ถ้าค่ากระแสที่ได้จากการคำนวณมีค่าไม่เกินค่ากระแสพิกัดของสาย แสดงว่าค่ามุมของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่กำหนดข้างต้น สามารถนำมาใช้ในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้ และในรูปที่ 5 จะแสดงเครือข่ายการจ่ายไฟฟ้าภายในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมาที่ติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเข้าไปในเครือข่าย



รูปที่ 5 เครือข่ายการจ่ายไฟฟ้าภายในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา

3. ผลการศึกษา

เมื่อกำหนดค่ามุมของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ติดตั้งเข้าไปที่ เครือข่ายการจ่ายไฟฟ้าภายในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา ในกรณีสถานี NRC-EGAT หลุดออกจากเครือข่าย ค่ามุมของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่สามารถจ่ายโหลดได้เพียงพอและค่ากระแสไม่เกินพิกัดสายจะมีค่าดัง แสดงในตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 1 ค่ากำลังไฟฟ้าในเครือข่ายพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา

Line-Name	Power (MW)				
	Normal Case	No NRC-EGAT	PST 1.2 deg	PST 7.5 deg	PST 17.7deg
NRB_NRE_1	193.67	235.99	225.36	170.48	86.49
NRB_NRE_4	193.10	235.05	224.46	169.80	85.93
NRE_MLR	109.21	150.99	140.43	85.85	1.98
MLR_NRD	98.08	139.73	129.19	74.68	9.20
NRD_HTA	40.93	82.00	71.55	17.30	66.89
HTA	21.16	62.23	51.78	2.46	86.66
HTA_MNT	43.61	2.54	12.99	67.24	151.46
NRD_HTA(1)	55.59	14.48	24.93	79.23	163.63
MNT_CCI(3)	63.65	22.51	32.96	87.29	171.80
MNT_CCI(2)	91.01	49.62	60.09	114.66	200.06
NRB_CCI_4	0.00	50.04	60.63	116.29	205.01
NRB_CCI_3(1)	8.25	58.49	69.14	125.27	215.41

ตารางที่ 2 ค่ากระแสในสายส่งในเครือข่ายพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา

Line-Name	Current (kA)				
	Normal Case	No NRC-EGAT	PST 1.2 deg	PST 7.5 deg	PST 17.7 deg
NRB_NRE_1	1.09	1.41	1.37	1.19	1.08
NRB_NRE_4	1.09	1.41	1.37	1.19	1.09
NRE_MLR	0.60	0.91	0.87	0.72	0.73
MLR_NRD	0.54	0.85	0.81	0.66	0.70
NRD_HTA	0.21	0.50	0.46	0.36	0.61
HTA	0.11	0.39	0.35	0.30	0.64
HTA_MNT	0.33	0.03	0.07	0.35	0.82
NRD_HTA(1)	0.40	0.09	0.14	0.41	0.87
MNT_CCI(3)	0.44	0.14	0.18	0.45	0.91
MNT_CCI(2)	0.60	0.31	0.35	0.60	1.05
NRB_CCI_4	0.01	0.30	0.34	0.60	1.05
NRB_CCI_3(1)	0.04	0.34	0.39	0.64	1.09

ตารางที่ 3 ค่าเปอร์เซ็นต์โหลดของสายส่งในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา

Line-Name	Percentage Loading (%)				
	Normal Case	No NRC-EGAT	PST 1.2 deg	PST 7.5 deg	PST 17.7 deg
NRB_NRE_1	63.60	82.25	79.94	69.80	63.39
NRB_NRE_4	63.64	82.30	79.99	69.86	63.47
NRE_MLR	35.04	53.41	51.15	42.11	42.81
MLR_NRD	31.45	49.82	47.57	38.91	41.28
NRD_HTA	12.16	29.30	27.08	21.10	35.75
HTA	6.41	22.58	20.44	17.32	37.24
HTA_MNT	19.58	1.64	4.01	20.69	47.90
NRD_HTA(1)	23.33	5.53	8.01	24.08	51.03
MNT_CCI(3)	25.81	8.20	10.71	26.48	53.27
MNT_CCI(2)	34.89	17.95	20.36	35.14	61.21
NRB_CCI_4	0.31	17.79	20.22	35.09	61.20
NRB_CCI_3(1)	2.45	20.15	22.65	37.60	63.72

รูปที่ 8 ค่าเปอร์เซ็นต์โหลดของสายส่งในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา

จากตารางที่ 1-3 จะเป็นตารางแสดงค่ากำลังไฟฟ้า ค่ากระแส และเปอร์เซ็นต์โหลดของสายส่งที่เกิดขึ้นในเครือข่ายของแต่ละกรณี เมื่อพิจารณาค่าในตารางกรณีสถานี NRC-EGAT หลุดออกจากเครือข่าย และเหลือเพียงสถานี NRB-EGAT เพียงสถานีเดียวของเครือข่าย สังเกตที่สายส่ง NRB-NRE_1 และ NRB-NRE_4 จะเห็นว่าค่ากำลังไฟฟ้า ค่ากระแสและเปอร์เซ็นต์โหลดของสายส่งมีค่าเพิ่มขึ้นจนเกินค่าพิกัดของสายส่ง ฉะนั้นจึงติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเข้าไปที่สายส่งต้นทางเพื่อทำการปรับค่ามุม ซึ่งค่ามุมที่ควรปรับนั้นจะอยู่ในช่วง 0-20 องศา [5] โดยเริ่มจากค่า 1.2 องศา คือ ค่ามุมเริ่มต้นที่ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์โหลดของสายมีค่าลดลงมาที่ 80 เปอร์เซ็นต์ของสายส่ง ค่ามุม 7.5 องศา คือ ค่ามุมที่ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ลดลงมาที่ 70 เปอร์เซ็นต์ของสาย และค่ามุม 17.7 องศา คือค่ามุมสุดท้ายที่ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์มีค่าลดลงมาถึง 63.4 เปอร์เซ็นต์ของสาย แต่อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ ค่ามุม 17.7 องศา เป็นค่ามุมที่เหมาะสมสำหรับเครือข่ายการจ่ายไฟฟ้าภายในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา หากทำการปรับค่ามุมที่มีขนาดมากกว่านี้ จะทำให้เปอร์เซ็นต์โหลดของสายส่งมีค่าเพิ่มขึ้น

4. สรุปผลการศึกษา

เครือข่ายการจ่ายไฟฟ้าภายในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมาของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ระดับแรงดัน 115 kV กรณีสถานี NRC-EGAT หลุดออกจากเครือข่ายและเหลือสถานี NRB-EGAT เพียงสถานีเดียวของเครือข่าย จากผลการศึกษาพบว่า สายส่ง NRB-NRE_1 และ NRB-NRE_4 มีค่ากำลังไฟฟ้า ค่ากระแสและค่าเปอร์เซ็นต์โหลดของสายส่งสูงขึ้นเกินค่าพิกัดของสายส่ง จึงได้แก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการนำหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังมาติดตั้งระหว่างสายส่ง NRB-NRE_1 และ NRB-NRE_4 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองเครือข่ายการจ่ายไฟฟ้าภายในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมาที่มีการติดตั้งหม้อแปลงและทำการปรับค่ามุม สายส่ง NRB-NRE-1 และ NRB-NRE_4 จะมีค่ากำลังไฟฟ้า ค่ากระแส และค่าเปอร์เซ็นต์โหลดของสายส่งมีค่าไม่เกินค่าพิกัดของสายส่ง [6, 7] เนื่องจากการปรับค่ามุมของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าและกระแสภายในเครือข่ายได้ ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์โหลดของสายส่งมีค่าไม่เกินค่าพิกัดของสายส่ง อย่างไรก็ตาม การติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเพื่อการปรับมุม สามารถใช้ได้กับเฉพาะเครือข่ายที่ลักษณะเป็นลูป (Loop) เท่านั้น ดังนั้นการศึกษาและวิจัยในอนาคตควรศึกษาเพิ่มเติมถึงตำแหน่งที่ติดตั้งที่เหมาะสมและกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้น เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพมากที่สุด

ในบทความนี้ได้นำเสนอการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเพื่อทำการปรับค่ามุมที่เครือข่ายการจ่ายไฟฟ้าภายในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมาเพียงพื้นที่เดียว ทั้งนี้สามารถนำงานวิจัยนี้ไปต่อยอดโดยการนำหม้อแปลงไฟฟ้าไปติดตั้งที่เครือข่ายแบบอื่น เพื่อช่วยลดปัญหาการเกิดค่ากำลังไฟฟ้า ค่ากระแส และค่าเปอร์เซ็นต์โหลดของสายส่งเกินค่าพิกัดของสายส่ง

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ นายอนุวัฒน์ ปัทมศรีรัตน การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเขต 3 ที่ให้ข้อมูลการจ่ายไฟฟ้าภายในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา เพื่อนำมาใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ทำงานวิจัยนี้สามารถดำเนินการสำเร็จเป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. J. Thomas, J. Hernandez and S. Grijalva, "Power flow router sensitivities for post-contingency corrective control," 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Denver, CO, 2013, pp. 2590-2596.
- [2] J. Verboomen, D. Van Hertem, P. H. Schavemaker, W.L. Kling and R. Belmans, "Phase shifting transformers: principles and applications," 2005 International Conference on Future Power Systems, Amsterdam, 2005, pp. 6 pp.-6
- [3] DlgSILENT PowerFactory 15 (2014). User Manual Gomaringen, Germany.
- [4] J. J. Thomas and S. Grijalva, "Flexible Security-Constrained Optimal Power Flow," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 30, no. 3, pp. 1195-1202, May 2015
- [5] S. Sithole, N. Mbuli and J. Pretorius, "Improvement of the Ulco network voltage regulation using a phase shifting transformer," AFRICON, 2011, Livingstone, 2011, pp. 1-6.
- [6] TIS 85-2548
- [7] มาตรฐาน ว.ส.ท. (2001-56)

การศึกษาความสามารถในการเชื่อมเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงสำหรับงานโครงสร้างเหล็กด้วยกระบวนการเชื่อมแบบ GMAW

Study of Weldability of High Strength Steel for Steel Construction by GMAW

ณัฐ แก้วสกุล* เรืองศักดิ์ ภูธรธราช มานพ ตันตระกูล อัญญารัตน์ ประสันใจ อมรรัตน์ กงแก้ว ชันติ สมังสะ

สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

E-mail: nut_k@rmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาตัวแปรการเชื่อมที่ส่งผลกระทบในการเชื่อมเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง และเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกล และโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อเชื่อม โดยทำการศึกษาด้านการเชื่อมได้แก่ กระแสไฟเชื่อม ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม แรงดันในการเชื่อม ศึกษาความสัมพันธ์ของโครงสร้างทางโลหะวิทยา สมบัติทางกลของบริเวณเนื้อเชื่อม บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน และเนื้อโลหะเดิม โดยมีวิธีการทดลองดังนี้ เตรียมชิ้นงานมีขนาดความหนา 10 มิลลิเมตร ใช้ลวดเชื่อมเปลือย ER 110 S-G ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 มิลลิเมตร ใช้กระแสไฟในช่วง 100, 150 และ 200 แอมแปร์ แรงดันในการเชื่อมอยู่ที่ 20, 25 และ 30 โวลต์ ใช้ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่ 20, 40 และ 60 เซนติเมตร/นาที ตามลำดับใช้แก๊สคลุมอาร์กอน (Ar) และระยะห่างหัวทิวกับชิ้นงานที่ 10 มิลลิเมตร ทดสอบความต้านทานแรงดึง ความแข็ง และแรงดัดโค้งได้ผลการทดลองและสรุปผลดังนี้ การเชื่อมด้วยกระแสไฟ 150 แอมแปร์ แรงดัน 25 โวลต์ และความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 60 เซนติเมตร/นาที ให้ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมถูกต้อง การหลอมลึกสมบูรณ์ และให้ค่าสมบัติทางกลที่แข็งแรงที่สุด โดยมีค่าต้านทานแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย 823 นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร บริเวณแนวเชื่อมมีความแข็งแรงกว่าบริเวณชิ้นงานเดิม ตำแหน่งที่เกิดรอยฉีกขาดทั้งหลายอยู่นอกแนวเชื่อม เมื่อทดสอบแรงดัดโค้งชิ้นงานไม่เกิดรอยร้าว และการฉีกขาด เมื่อทดสอบความแข็งด้วยวิธีวิกเกอร์พบว่า บริเวณเนื้อชิ้นงานมีความแข็งมากที่สุด ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาปรากฏว่าบริเวณเนื้อชิ้นงานเดิม (BM) มีลักษณะเกรนที่ละเอียดส่งผลทำให้เนื้อชิ้นงานมีความแข็งแรงมาก เนื่องจากโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นเบนไนท์ (Bainite) ส่วนบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) มีการตกผลึกบริเวณขอบเกรน เกรนมีขนาดโตขึ้น ขอบเกรนลดลง และพบว่าโครงสร้างชิ้นงานบริเวณนี้มี เฟอไรต์ (Ferrite) และเพิร์ลไรต์ (Pearlite) จำนวนมากทำให้ชิ้นงานบริเวณดังกล่าวมีความอ่อนเหนียวสุดท้ายในส่วนของเนื้อแนวเชื่อม (WM) พบว่าบริเวณดังกล่าวมีเกรนละเอียด โครงสร้างหลัก ๆ เป็นวิดแมนสแตตเทน (Widmanstatten ferrite: Wf) โพลีกอนอลเฟอไรต์ (polygonal ferrite: pf) และอซิคูลาเฟอไรต์ (acicular ferrite: af) ให้ความแข็งแรงน้อยกว่าเนื้อชิ้นงาน แต่มีความเหนียวและยึดตัวได้ดี

คำสำคัญ: การเชื่อมมิก, เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง, ตัวแปรการเชื่อม, โครงสร้างจุลภาค

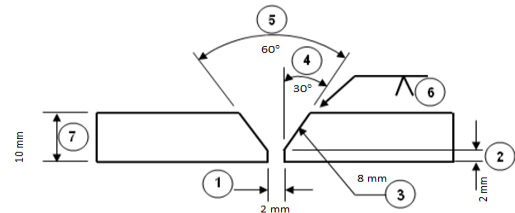
1. บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิต และประกอบโครงสร้างเหล็กกล้าภายในประเทศกำลังได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย ตัวอย่างเช่น การประกอบโครงสร้างอาคารเหล็กกล้า การสร้างสะพาน เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง อุตสาหกรรมการต่อประกอบเรือเดินสมุทร อุตสาหกรรมหุ่นยนต์ และฐานเจาะน้ำมัน เป็นต้นจะเห็นได้ว่ามีการนำเหล็กกล้ามาเชื่อมต่อประกอบเป็นโครงสร้างขนาดใหญ่หลากหลายรูปแบบสืบเนื่องจากความสามารถในการผลิตที่รวดเร็ว การเตรียมชิ้นส่วนไม่ซับซ้อนมาก มีความสามารถในการเชื่อมประกอบได้ดีจึงได้รับความนิยมอย่างรวดเร็ว และแพร่หลายมากขึ้นประกอบกับอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กในปัจจุบันสามารถปรับปรุงกระบวนการผลิตให้เหล็กกล้ามีสมบัติทางกลที่ดียิ่งขึ้น ทำให้ได้เหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงสูงขึ้น นั่นหมายถึงการลดขนาดมิติของชิ้นงานให้เล็กลง ทำให้ได้โครงสร้างที่มีน้ำหนักเบาขึ้นส่งผลให้การลงทุนประกอบโครงสร้างเหล็กได้ถูกลง แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มความแข็งแรงให้กับเหล็กกล้าไม่จำเป็นที่จะเป็นการปรับปรุงด้วยกรรมวิธีเติมธาตุผสมต่ำ (High Strength Low Alloy) การควบคุมขนาดเกรนจากการรีด (Thermo Mechanical Control Process: TMCP Steel) หรือเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบและอบคืนตัว (Quench & Tempered Steel: Q&T Steel) [1] ล้วนแล้วแต่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการเชื่อมทั้งสิ้น เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอาร์กทำให้ชิ้นงานหลอมละลายแล้ว ยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางโลหะวิทยาของโลหะชิ้นงาน ทำให้ความสามารถรับแรงทางกลของชิ้นงานเชื่อมเปลี่ยนแปลงไปด้วย ปัจจัยหลัก ๆ ในการควบคุมคุณสมบัติของงานเชื่อมทั้งแนวเชื่อม บริเวณผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อม และธาตุผสมในชิ้นงานเชื่อมส่วนใหญ่ได้รับอิทธิพลจากกระบวนการเชื่อม โลหะเดิมและตัวแปรอื่น ๆ ที่ส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของงานเชื่อม เช่นการรับภาระแรงกระทำ การต้านทานต่อการกัดกร่อน เป็นต้น[2] จากการวิจัยพบว่าการเชื่อมเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงด้วยเงื่อนไขการเชื่อมที่แตกต่างกันผลจากการใช้พลังงานในการเชื่อมน้อยทำให้ได้งานเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด และการเชื่อมที่ให้พลังงานความร้อนสูงทำให้ได้งานเชื่อมที่มีความต้านทานต่อแรง

กระแทกได้ดีมาก[3] จากการศึกษาการนำเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่ผ่านการชุบแข็งและอบคืนตัวมาเชื่อมประกอบเป็นถังบรรจุแรงดันสูงที่อุณหภูมิต่ำให้ความต้านทานสูงต่อการแตกหักแบบเปราะสามารถนำมาผลิตถังบรรจุแรงดันสูงได้เป็นอย่างดี และมีโอกาสในการประยุกต์ใช้งานอีกหลากหลาย[4] การประยุกต์ใช้งานเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการประกอบโครงสร้างสะพานเหล็ก เนื่องจากเป็นเหล็กที่มีความแข็งแรงสูงทำให้ประหยัดในเรื่องของน้ำหนักวัสดุ การออกแบบ การตรวจสอบ การบำรุงรักษา จึงให้ความสำคัญในการวิจัยเพื่อประยุกต์ใช้เหล็กกลุ่มนี้อย่างต่อเนื่อง[5] แต่อย่างไรก็ตามการนำเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงมาประยุกต์ใช้งานโดยเฉพาะงานเชื่อมมักจะประสบปัญหาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของชิ้นงานเมื่อได้รับความร้อนจากการเชื่อมอย่างเช่นในกรณีของการศึกษาการเย็นตัวอย่างต่อเนื่องของท่อเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง X70 สำหรับงานประกอบโครงสร้างฐานเจาะน้ำมันแบบฐานลอย พบว่าบริเวณผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อมที่มีการเย็นตัวอย่างต่อเนื่องจากอุณหภูมิ 437, 760 และ 920 องศาเซลเซียสตามลำดับที่อัตราการเย็นตัวจากอุณหภูมิ 800-500 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 10 วินาที ปรากฏโครงสร้างจุลภาคของบริเวณผลกระทบร้อนเป็นโครงสร้างเบนไนท์ และมาร์เทนไซต์ การฟอร์มตัวของมาร์เทนไซต์จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเย็นตัวเร็วที่สุด ที่เวลาการเย็นตัวภายใน 20 วินาที ได้โครงสร้างหลักเป็นเบนไนท์ทั้งหมด[6] จะเห็นได้ว่า การนำเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่มีโครงสร้างหลักเป็นเบนไนท์มาผ่านกระบวนการเชื่อมมักจะประสบปัญหาในเรื่องการควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการเชื่อม อาทิเช่นการเชื่อมเหล็กกล้าเบนไนท์ที่ผ่านการรีดและควบคุมการเย็นตัวกับเหล็กกล้าที่ผ่านการรีดควบคุมการเย็นตัวแล้วชุบแข็งและอบคืนตัว จำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิหลังการเชื่อมอย่างเข้มงวดเพื่อให้ได้สมบัติทางกลที่ดีที่สุด จากการทดลองพบว่า การอบชิ้นงานหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสที่เวลาเท่ากันทั้งสองชิ้นงานได้โครงสร้างจุลภาคเป็นโพลีโกลอนอเฟอร์ไรท์ มีเกรนย่อยของเบนไนท์เกิดขึ้นบริเวณขอบเกรน[7] แต่อย่างไรก็ดีการรายงานผลไม่ได้กล่าวถึงการควบคุมอุณหภูมิก่อนการเชื่อม และพลังงานที่ใช้ในการเชื่อมซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญมากที่สุดส่งผลกระทบต่อคุณภาพงานเชื่อมดังจะกล่าวถึงในการวิจัยในเรื่องนี้

2. วิธีการทดลอง

การทดลองนี้ได้ออกแบบชิ้นงานสำหรับการทดสอบชิ้นงานงานเชื่อม ตามมาตรฐานการเชื่อมของอเมริกาซึ่งเป็นที่ยอมรับ และนิยมอย่างแพร่หลาย (American Welding Society : AWS D 1.1 – 2010) โดยการเตรียมชิ้นงานเพื่อทำการทดสอบตามขนาดดังต่อไปนี้ มุมบากร่องวี 60 องศา ระยะห่างชิ้นงานที่ขอบรูป 2 มิลลิเมตร ชิ้นงานมีขนาด 100 (กว้าง) x 150(ยาว) x 10 (หนา) มิลลิเมตร แสดงตามรูปที่ 1



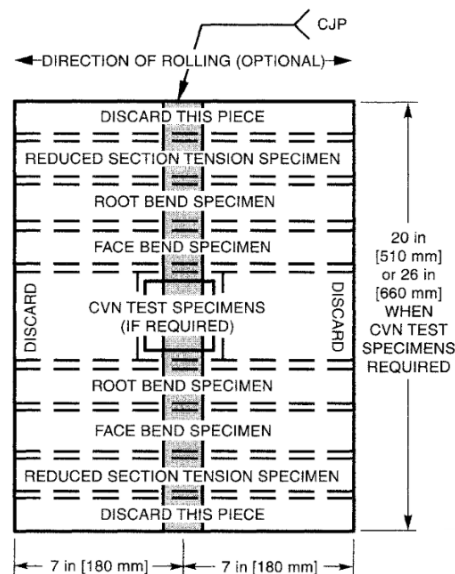
รูปที่ 1 การเตรียมชิ้นงานเชื่อมทดสอบ



รูปที่ 2 การเตรียมเชื่อมชิ้นงานทดสอบตามสภาวะการเชื่อมต่าง ๆ

ก่อนการเชื่อมจะอุ่นชิ้นงานเชื่อมทดสอบทุกชิ้นงานที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และอบชิ้นงานหลังการเชื่อมตามสภาวะการเชื่อมต่าง ๆ

รูปที่ 1 (ก) การเตรียมจับยึดชิ้นงานเพื่อเชื่อมทดสอบ (ข) การปรับตั้งระยะอาร์คของเครื่องช่วยเชื่อม (ค) การอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อม (ง) การเชื่อมชิ้นงานตามสภาวะเงื่อนไขการเชื่อมต่าง ๆ การเตรียมชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานงานเชื่อมของ AWS D1.1 แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ลักษณะการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึง (Tensile test) (American Welding Society D 1.1/D1.1M:2010,Structural Welding Code-Steel)



รูปที่ 4 การเตรียมชิ้นงานทดสอบด้วยแรงดึง

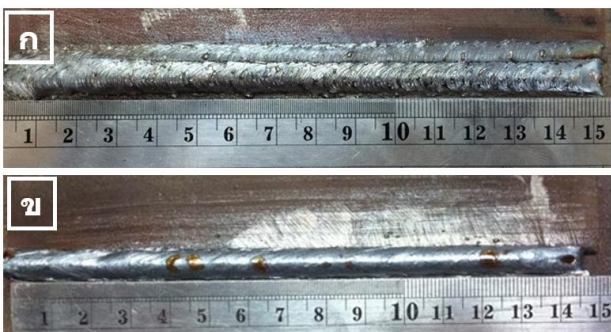
3. ผลการทดลองและการอภิปราย

การศึกษาความสามารถในการเชื่อมเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงสำหรับงานโครงสร้างเหล็กด้วยกระบวนการเชื่อมแบบ GMAW โดยมีสภาวะเงื่อนไขการเชื่อมที่ทำการศึกษาดังต่อไปนี้ กระแสไฟเชื่อม 100 , 150 และ 200 แอมแปร์ตามลำดับ แรงดันไฟเชื่อม 20, 25 และ 30 โวลต์ตามลำดับ ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่ 20, 40 และ 60 เซนติเมตรต่ออนาที และระยะอาร์คความม 90 องศา ระยะห่างระหว่างหัวทิกับชิ้นงานที่ 10 มิลลิเมตร ทำการเชื่อมจนครบทุกสภาวะเงื่อนไขการเชื่อมแล้วนำชิ้นงานเชื่อมไปหาค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดค่าความแข็งแรงและการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน ได้ผลการทดลองมีดังนี้ ตารางที่ 1 แสดงค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานเชื่อมสภาพจำหน่าย

ตารางที่ 1 ความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานเชื่อมในสภาพจำหน่าย

No.	Tensile strength N/mm ²	Yield strength N/mm ²	% Elongation
ชิ้นงานเชื่อม	821.83	453.22	17.95

การจากเชื่อมชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่ผ่านการชุบแข็งและอบคืนตัวด้วยสภาวะการเชื่อมต่าง ๆ พบว่าการเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 150 แอมแปร์ แรงดันไฟเชื่อม 25 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม 60 เซนติเมตรต่ออนาที เชื่อมด้วยลวดเชื่อม ER110-SG ได้ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมดังรูปที่ 5 แสดงลักษณะแนวเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมมีก็มีลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อม เช่นการหลอมละลาย รูปลักษณะ ขนาดความโต และความสูงของแนวเชื่อมความสมบูรณ์ มีเม็ดโลหะกระเด็นค่อนข้างน้อยมาก แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของสภาวะการเชื่อมที่เหมาะสม



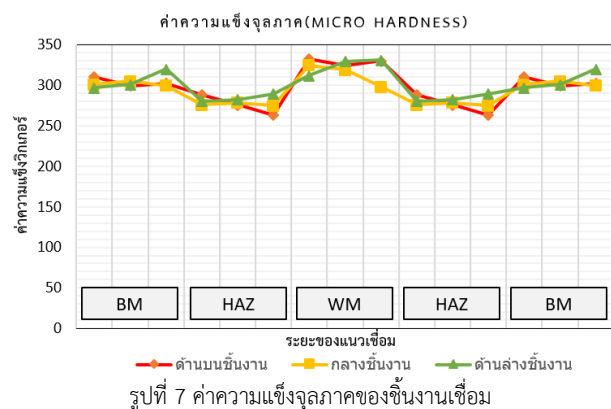
รูปที่ 5 ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อม

รูปที่ 5 (ก) แสดงลักษณะของแนวเชื่อมด้านหน้าชิ้นงาน (ข) แสดงลักษณะของแนวเชื่อมรูทางด้านหลังของชิ้นงาน เมื่อนำชิ้นงานเชื่อมมาเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติทางกลด้วยแรงดึง แรงดัด และความแข็งจุลภาค พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมในสภาวะการเชื่อมดังกล่าว สามารถต้านทานแรงดึงได้เป็นอย่างดีให้ความแข็งแรงของเนื้อแนวเชื่อมมากกว่าบริเวณส่วนอื่นของชิ้นงาน เนื่องจากเกิดการฉีกขาดของชิ้นงานทดสอบบริเวณเนื้อของโลหะงาน และเมื่อนำมาทดสอบด้วยแรงดัดด้านหน้า(Face Bend Test) และด้านหลัง (Root Bend Test) ปรากฏว่าชิ้นงานเกิดการโค้งงอเสียรูปจากการดัด แต่ไม่พบรอยแตกร้าวที่ผิวด้านยึดของชิ้นงานแต่อย่างใด แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของสภาวะการเชื่อมที่เหมาะสม ทำให้เกิดการหลอมละลายได้อย่างสมบูรณ์ระหว่างโลหะเดิมกับชิ้นงานเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 6 ลักษณะการฉีกขาดและเสียรูปของชิ้นงานเชื่อมทดสอบ



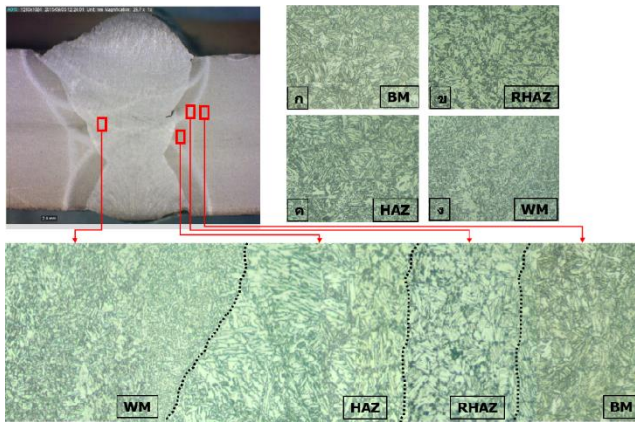
รูปที่ 6 ลักษณะการฉีกขาดและเสียรูปของชิ้นงานเชื่อมทดสอบ

รูปที่ 6 (ก)แสดงผลการทดสอบด้วยแรงดึงเกิดการฉีกขาดบริเวณเนื้อโลหะงานเชื่อม (ข) แสดงการเสียรูปจากการทดสอบด้วยแรงดัดไม่พบการแตกร้าวบริเวณผิวยึดของชิ้นงานทดสอบ การทดสอบความแข็งจุลภาคชิ้นงานเชื่อมพบว่าบริเวณผลกระทบร้อน(Heat Affected Zone) เป็นบริเวณที่มีความแข็งแรงลดลง โดยให้ค่าความแข็งเฉลี่ย 279 HV ส่วนค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานเชื่อมอยู่ที่ 304 HV และค่าความแข็งเฉลี่ยของแนวเชื่อมเท่ากับ 322 HV ดังแสดงในรูปที่ 7 แสดงภาพรวมค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านสภาวะการเชื่อมที่เหมาะสมที่สุด อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าความร้อนที่ได้รับจากการเชื่อมส่งผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ทำให้ได้ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่ไม่เท่ากันตลอดทั้งชิ้นงาน



รูปที่ 7 ค่าความแข็งจุลภาคของชิ้นงานเชื่อม

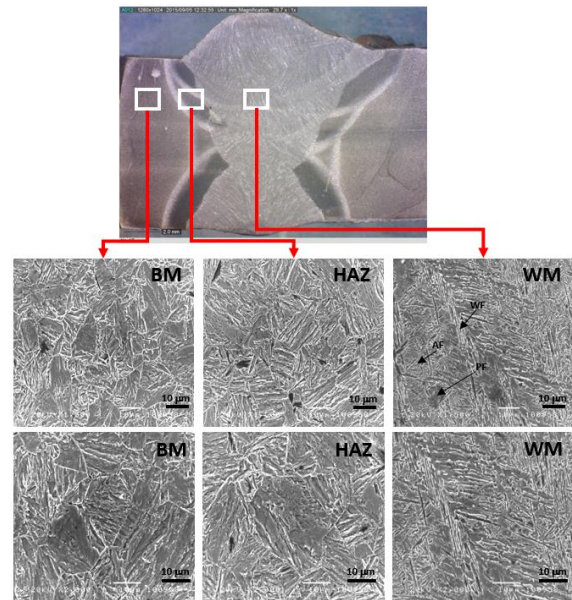
การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค และจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมได้จากการตัดเตรียมชิ้นงานด้านขวางพื้นที่หน้าตัดของแนวเชื่อม



รูปที่ 8 ลักษณะโครงสร้างมหภาค และจุลภาคของชิ้นงานเชื่อม

จากรูปที่ 8 ลักษณะของโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อมที่มีสภาวะการเชื่อมเหมาะสมที่สุด พบว่าลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมมี ความร้อนที่เกิดขึ้นส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างจุลภาคเป็นอย่างมากถึงแม้มีการควบคุมพลังงานความร้อนในการเชื่อมให้เหมาะสมแล้วก็ตามส่งผลทำให้บริเวณผลกระทบความร้อน(HAZ) ค่อนข้างกว้างเกิน 3 มิลลิเมตร บริเวณดังกล่าวจะปรากฏการตกผลึกใหม่(Recrystallisation) และการเติบโตของเกรน(Grain Growth) เห็นได้อย่างชัดเจนการตกผลึกใหม่จะเกิดขึ้นบริเวณขอบเกรนโดยส่วนใหญ่จะเป็นผลึกของเฟอร์ไรต์ตามรูปที่ 8(ข) ส่วนในเกรนจะเป็นเฟสของเฟอร์ไรต์ที่มีขนาดใหญ่ดังรูปที่ 8(ค) การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้สมบัติทางกลด้านความแข็งแรงลดลงด้วยเนื่องจากเกรนมีการเติบโตมากขึ้น แต่ทำให้ได้ความเหนียวเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อนำมาทดสอบด้วยแรงดึงจะทำให้เกิดการฉีกขาดทั้งหลายในบริเวณผลกระทบร้อน ส่วนในเนื้อชิ้นงานที่ไม่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อมยังคงลักษณะโครงสร้างจุลภาคในสภาพจำหน่ายไว้ได้ทั้งหมดเป็นโครงสร้างเบนไนท์ สำหรับโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมมีแสดงให้เห็นลักษณะเกรนที่ค่อนข้างละเอียดเนื่องจากการเย็นตัวเร็วของแนวเชื่อมส่งผลทำให้บริเวณเนื้อแนวเชื่อมมีความแข็งแรงมากกว่าบริเวณอื่น ๆ และสามารถต้านทานต่อแรงดึงได้เป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตามผลกระทบที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลขึ้นอยู่กับสภาวะการเชื่อมที่เหมาะสมด้วยเช่นกัน เนื่องจากมีชิ้นงานบางส่วนที่เกิดการฉีกขาดทั้งหลายบริเวณแนวเชื่อม เกิดการแตกร้าวบริเวณแนวเชื่อมและผลกระทบร้อนเมื่อทดสอบด้วยแรงดึง และแรงดัดตามลำดับ ทั้งนี้เกิดจากกระบวนการเชื่อมในสภาวะเงื่อนไขที่ไม่เหมาะสม สอดคล้องกับการรายงานผลการศึกษารายงานของ H. FURUYA [8] พบว่าการเชื่อมหลาย ๆ แนวกับการเชื่อมแนวเดียวบนเหล็กกล้าโครงสร้างความแข็งแรงสูงทำให้ได้ค่าความเหนียวแน่น (Toughness) ที่แตกต่างกัน การเชื่อมหลายแนวจะให้ค่าความเหนียวแน่นที่มากกว่าการเชื่อมเพียงแนวเดียว รวมถึงการรายงานผลการวิจัยของ Nut

[9] แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของพลังงานความร้อนในการเชื่อมที่ส่งผลกระทบต่อบริเวณผลกระทบร้อน (HAZ) ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง AS3678-A350 ทำให้ค่าความแข็งแรงลดลง และความกว้างของบริเวณผลกระทบร้อนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 9 โครงสร้างจุลภาคตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด

4. สรุปผลการทดลอง

สภาวะการเชื่อมด้วยกระแสไฟ 150 แอมแปร์ แรงดันไฟเชื่อม 25 โวลต์ และความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 60 เซนติเมตรต่อนาที ให้คุณลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมดีที่สุด และให้สมบัติทางกลด้านการต้านทานแรงดึงได้สูงที่สุดเท่ากับ 823 นิวตัน/ตร.มม. เกิดรอยฉีกขาดนอกบริเวณแนวเชื่อม รวมทั้งสามารถต้านทานแรงดัดโค้งได้ดีที่สุด โดยชิ้นงานไม่เกิดรอยร้าว และการฉีกขาด สมบัติทางกลด้านความแข็งแรงแบบวิกเกอร์พบว่ามีความแข็งแรงมากที่สุดโดยการทดสอบแบบวิกเกอร์ ทั้งในบริเวณชิ้นงานเดิม (BM) บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) และบริเวณเนื้อแนวเชื่อม (WM)

การศึกษาคุณลักษณะโครงสร้างจุลภาค พบว่าบริเวณเนื้อเดิมของชิ้นงาน (BM) มีโครงสร้างหลักเป็นเบนไนท์ (Bainite) ซึ่งบริเวณนี้จะมี ความแข็งแรงสูง ส่วนบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) พบว่ามีการตกผลึกใหม่บริเวณขอบเกรนของโครงสร้างเดิม ให้เป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Pearlite) ส่วนภายในเกรนจะปรากฏเป็นเฟสของเฟอร์ไรต์ (Ferrite) ซึ่งโครงสร้างส่วนนี้มีสมบัติทางกลอ่อนเหนียว ยึดตัวได้ดีเมื่อทดสอบด้วยแรงดัดไม่ปรากฏรอยแตกร้าวของขอบแนวเชื่อม แต่มีผลทำให้ความแข็งแรงที่บริเวณผลกระทบร้อน และส่วนที่เป็นเนื้อแนวเชื่อม(WM) บริเวณนี้จะประกอบไปด้วยโครงสร้าง วิดแมนสแตนเทน (Widmanstatten ferrite: Wf) โพลีโกนอลเฟอร์ไรต์ (polygonal ferrite: pf) และอซิคูลาเฟอร์ไรต์ (acicular ferrite: af) มีลักษณะเกรนละเอียด

5. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้คณะผู้จัดทำงานวิจัยขอขอบคุณหน่วยงานต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินงานวิจัย และคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือด้านเครื่องมือ ครุภัณฑ์ในการทดลอง ทดสอบงานวิจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งผู้ร่วมโครงการวิจัย นางสาวอมรรัตน์ กงแก้ว และนายขันติ สุ่มังสะ นักศึกษาครุศาสตร์อุตสาหกรรมที่ให้ความช่วยเหลือในการเตรียมชิ้นงาน ทดสอบ บันทึกผลการทดลอง เตรียมชิ้นงานศึกษาโครงสร้างจุลภาค มา ณ โอกาสนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Willms, “High strength steel for steel constructions” Application and processing, Proceedings of the 5th European Conference on Steel and Composite Structures, EUROSTEEL 2008, Graz, pp. 1083.
- [2] C.C. Chen and Abe Pollack, “Influence of Welding on Steel Weldment Properties” ASM Handbook Volume 6, Welding, Brazing, and Soldering (ASM International), 1993, pp.416 - 428.
- [3] R. Datta, D. Mukerjee, K.L. Rohira, and R. Veeraraghavan, “Weldability Evaluation of High Tensile Plates Using GMAW Process” ASM International, JMEPEG, 1999, Vol. 8, pp. 455-462.
- [4] G. Luxenburgera, I.S. et. Al., “High strength quenched and tempered (Q&T) steels for pressure vessels”, International Journal of Pressure Vessels and Piping 81, 2004, pp. 159–171.
- [5] C. Miki, K. Homma, T. Tominaga, “High strength and high performance steels and their use in bridge structures”, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 58, 2002, pp. 3–20.
- [6] M. I. Onsien, M. M’Hamdi, D A. Mo, A CCT Diagram for an Offshore Pipeline Steel of X70 Type, THE WELDING JOURNAL, 2009, Vol. 88, pp. 1-6.
- [7] ZHANG Jie. et. Al., “Effect of Tempering Temperature on Microstructure and Properties of E690 Offshore Plate Steel”, JOURNAL OF IRON AND STEEL RESEARCH INTERNATIONAL, Science Direct, 2012, Vol. 19(3), pp. 67-72.
- [8] H. FURUYA, S. AIHARA, AND K. MORITA, “A New Proposal of HAZ Toughness Evaluation Method — Part 1: HAZ

Toughness of Structural Steel in Multilayer and Single-Layer Weld Joints”, WELDING JOURNAL, 2007, pp. 1s-8s.

- [9] Nut Kaewsakul, Rungsuk Putrontaraj, Kittipong Kimapong, “The Effects of GMAW Parameters on Penetration, Hardness and Microstructure of AS3678-A350 High Strength Steel” International Journal of Advanced Culture Technology, Vol.3 No.1, 2015, pp. 169-178.

เส้นลายทองแดงนำไฟฟ้าโดยการสเปรย์ไพโรไลซิสหมึกสารประกอบเชิงซ้อน

คอปเปอร์เอมีน ที่รีดิวซ์ด้วยตัวเอง

Conductive Patterns by Spray Pyrolysis of a Self-reducing Copper-amine Complex Ink

ศิริพร เกศโพคะศิริ* และ สุรเทพ เขียวหอม

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

E-mail: soorathep.k@chula.ac.th*

บทคัดย่อ

เส้นลายทองแดงนำไฟฟ้า เตรียมโดยวิธีการสเปรย์ไพโรไลซิสจากหมึกของสารประกอบเชิงซ้อนคอปเปอร์เอมีน บนแผ่นโพลีเอไมด์ในสภาวะบรรยากาศไนโตรเจน หมึกของสารประกอบเชิงซ้อนเตรียมจากคอปเปอร์ฟอร์เมต สารประกอบเอมีน และ ไอโซโพรพานอล งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของชนิดของเอมีน (ไดเอทานอลเอมีน, ไดบิวทิลเอมีน และ ออกทิลเอมีน), สัดส่วนโดยโมลระหว่างคอปเปอร์ฟอร์เมตและเอมีน และ อัตราการสเปรย์หมึก ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการอบ 25 นาที ในสภาวะบรรยากาศไนโตรเจน 6 ลิตร/นาที จากผลการทดลอง พบว่า ที่อัตราการสเปรย์หมึกลดลง อนุภาคของคอปเปอร์ในชั้นฟิล์มจะเชื่อมต่อกันได้ดีขึ้น ค่าความต้านทานไฟฟ้าจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อลดสัดส่วนโดยโมลระหว่างคอปเปอร์ฟอร์เมตและเอมีนลง รวมทั้งการใช้ไดเอทานอลเอมีน เป็นลิแกนด์ก็สามารถลดค่าความต้านทานไฟฟ้าลงได้ด้วยเช่นกัน ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดของเส้นลายทองแดง คือ 2.691 ไมโครโอห์มเซนติเมตร ที่สัดส่วนโดยโมลระหว่างคอปเปอร์ฟอร์เมตและไดเอทานอลเอมีน เท่ากับ 1:0.12, อัตราการสเปรย์หมึก 0.53 มิลลิลิตรต่อนาที, ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการอบ 25 นาที

คำสำคัญ: สเปรย์ไพโรไลซิส, สารประกอบเชิงซ้อนคอปเปอร์เอมีน, เส้นลายทองแดง

1. บทนำ

เส้นลายนำไฟฟ้าเป็นองค์ประกอบสำคัญของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งโดยทั่วไปผลิตด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้มีข้อเสีย เช่น มีขั้นตอนที่ยู้ง่าย ซับซ้อน ราคาแพง ที่สำคัญคือ ทำให้เกิดของเสียในปริมาณมาก การพิมพ์เป็นทางเลือกใหม่ในการขึ้นรูป เนื่องจากวิธีนี้มีขั้นตอนในการทำที่ไม่ซับซ้อน ทำได้ง่าย มีราคาถูก และยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่า วิธีการพิมพ์สามารถ

จำแนกออกได้เป็นอีกหลายวิธี เช่น การพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท การพิมพ์แบบสกรีน และการพิมพ์แบบสเปรย์ เป็นต้น สำหรับวัสดุนำไฟฟ้าที่นิยมนำมาใช้ คือ ทองแดง เนื่องจาก ทองแดงสามารถนำไฟฟ้าได้ดี อีกทั้งยังมีราคาถูก เมื่อเปรียบเทียบกับ เงิน และทอง อย่างไรก็ตามทองแดงสามารถเกิดออกไซด์ได้ง่าย หมึกสารประกอบเชิงซ้อนจึงถูกนำมาใช้เพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์[1],[2],[3],[4],[5]

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมางานวิจัยจำนวนมากได้มุ่งเน้นไปที่การใช้หมึกสารประกอบเชิงซ้อนคอปเปอร์เอมีน หลังจากที่หมึกถูกพิมพ์ลงบนแผ่นรองรับ เมื่อให้ความร้อนภายใต้สภาวะไนโตรเจนไอออนทองแดงจะเปลี่ยนเป็นโลหะทองแดง แนวโน้มของค่าความต้านทานของเส้นลายทองแดงนำไฟฟ้าจะมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิในการอบและเวลาที่ใช้ในการอบเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ชนิดและปริมาณของเอมีนก็ยังมีผลต่อค่าความต้านทานอีกด้วย[2],[6]

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการทำเส้นลายทองแดงนำไฟฟ้าด้วยวิธีการพิมพ์แบบสเปรย์ไพโรไลซิส โดยศึกษาถึงอิทธิพลของชนิดของเอมีนที่มีผลต่อค่าความต้านทานของเส้นลายทองแดงนำไฟฟ้า รวมไปถึงอิทธิพลของอัตราการสเปรย์ ที่มีผลต่อการเชื่อมกันระหว่างอนุภาคของทองแดงในชั้นฟิล์ม

2. วิธีการทดลอง

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

คอปเปอร์ออกไซด์ (99.0%, Sigma Aldrich), เอทานอล (99.9%, QReC), กรดฟอร์มิก (85.0%, QReC), ไดเอทานอลเอมีน ($\text{HN}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})_2$, DEA, 98.5% purity), ไดบิวทิลเอมีน ($(\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2)_2\text{NH}$, DBA, 99% purity), ออกทิลเอมีน ($(\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{NH}_2$, OA, 99% purity), ไอโซโพรพานอล (QReC) และ พอลิไอมายด์ (PI, Dupont Kapton 100HN 25 μm .) สำหรับใช้เป็นแผ่นรองรับ

2.2 เตรียมคอปเปอร์ฟอร์มเมต

คอปเปอร์ออกไซด์ 20 กรัม และกรดฟอร์มิก 200 มิลลิลิตร ถูกผสมเข้าด้วยกันที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง สีของสารจะเปลี่ยนจากสีดำเป็นสีฟ้า จากนั้นล้างด้วยเอทานอล 3 ครั้ง แล้วจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

2.3 สังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อนคอปเปอร์เอมีน

คอปเปอร์ฟอร์มเมต 0.76 กรัม ถูกผสมกับ เอมีน (ไดเอทานอลเอมีน, ไดบิวทิลเอมีน และ ออกทิลเอมีน) ที่สัดส่วนโดยโมลต่างๆ จากนั้นเติมสารละลายไอโซโพรพานอล 4 มิลลิลิตร

สารประกอบเชิงซ้อนคอปเปอร์เอมีนที่ได้นี้ถูกสเปรย์ลงบนแผ่นรองรับที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และอบเป็นเวลา 25 นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ที่อัตราการสเปรย์ 0.53, 0.67 และ 0.8 มิลลิลิตรต่ออนาที

2.4 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

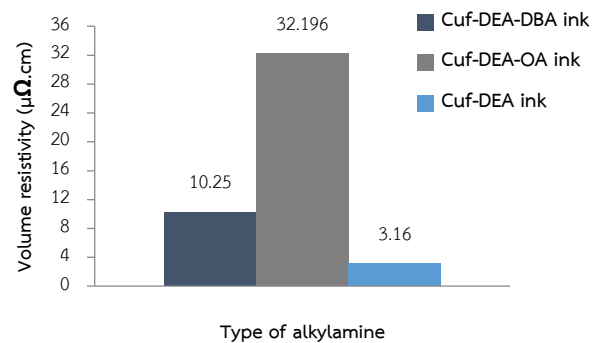
ค่าความต้านทานของเส้นลายทองแดง ถูกวัดด้วยวิธี 4point probe (Keithley Instruments, 2182A digital nanovoltmeter) ลักษณะทางสัณฐานวิทยา ถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง scanning electron microscopy (SEM) การชินเทอร์ริงในชั้นฟิล์มสังเกตได้จากภาพตัดขวางซึ่งถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Field emission scanning electron microscopy (FE-SEM; JEOL, JSM-7610F) โครงสร้างความเป็นผลึกของฟิล์ม ถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD; Bruker, D2 PHASER) โดยวิเคราะห์ที่มุม 2θ จาก 30 ถึง 80 องศา และ อุณหภูมิ การสลายตัวสามารถวิเคราะห์ได้จากเครื่อง thermal gravimetric differential thermal analyzer (TG/DTA; Perkin elmer Instruments, DIAMOND)

3 ผลการทดลอง

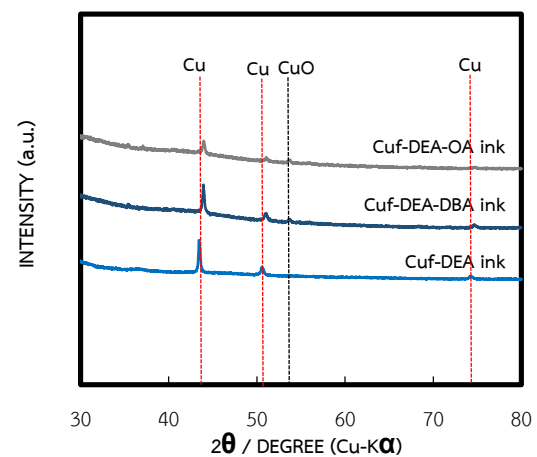
3.1 ผลของชนิดของเอมีน

ผลของชนิดของเอมีนที่มีต่อค่าความต้านทาน ถูกแสดงในรูปที่ 1 จะเห็นว่า ค่าความต้านทานที่ต่ำที่สุด ได้จากคอปเปอร์ฟอร์มเมตทำปฏิกิริยากับไดเอทานอลเอมีน ซึ่งค่าความต้านทานนี้มีค่า 3.16 ไมโครโอห์มเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส อัตราการสเปรย์ 0.8 มิลลิลิตรต่ออนาที เวลาในการอบ 25 นาที และสัดส่วนโดยโมลของคอปเปอร์และไดเอทานอลเอมีนคือ 1:0.012 ในขณะที่เส้นลายนำไฟฟ้าที่ได้จากคอปเปอร์ฟอร์มเมต, ไดเอทานอลเอมีน และ ออกทิลเอมีนหรือไดบิวทิลเอมีน ที่สัดส่วนโดยโมลเท่ากับ 1:0.012:0.034 มีค่าความต้านทานเท่ากับ 32.196 และ 10.25 ไมโครโอห์มเซนติเมตร ตามลำดับ

เนื่องจากไดเอทานอลเอมีน มีหมู่ OH อยู่ในโครงสร้าง ซึ่งอิเล็กตรอนคู่อิสรของออกซิเจนอะตอมสามารถสร้างพันธะอย่างอ่อนกับอะตอมทองแดง และช่วยป้องกันการเกิดออกไซด์ของทองแดงได้ในขณะที่ไดบิวทิลเอมีนและออกทิลเอมีน ไม่มีหมู่ OH อยู่ในโครงสร้างจึงเกิดออกไซด์ได้ง่ายกว่า (แสดงดังรูปที่ 2) ทำให้เส้นลายทองแดงนำไฟฟ้าที่ได้จากหมึกสารประกอบเชิงซ้อนคอปเปอร์ไดเอทานอลเอมีน มีค่าความต้านทานต่ำกว่า[2]

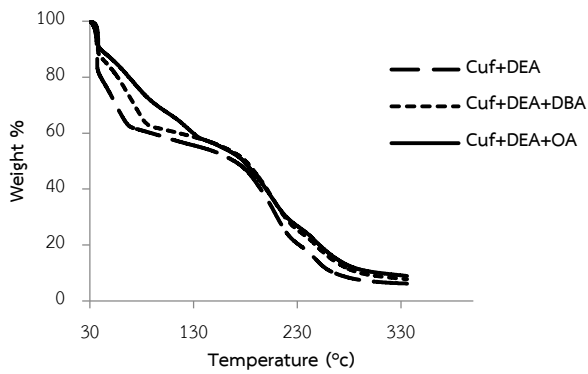


รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานและชนิดของหมึกนำไฟฟ้า



รูปที่ 2 XRD patterns ของเส้นลายทองแดงนำไฟฟ้าที่ได้จากสารประกอบเชิงซ้อนคอปเปอร์เอมีนชนิดต่างๆ

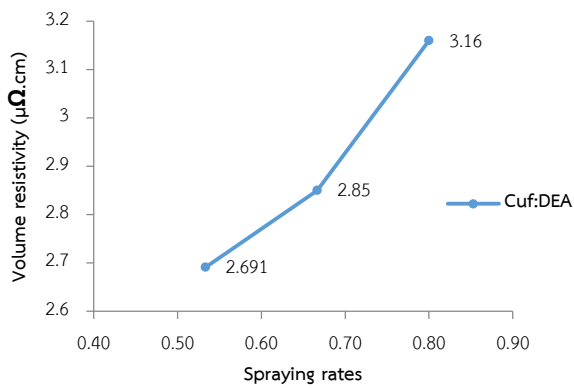
จากรูปที่ 3 จะเห็นว่าอุณหภูมิการสลายตัวของหมึก แบ่งออกเป็น 2 ช่วง ในช่วงแรกเกิดที่อุณหภูมิระหว่าง 30 ถึง 100 องศาเซลเซียส เนื่องจากการระเหยของตัวทำละลายไอโซโพรพานอล และในช่วงที่ 2 เกิดที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นต้นไป ซึ่งในช่วงนี้เป็น การสลายตัวของเอมีนและคอปเปอร์ฟอร์มเมต



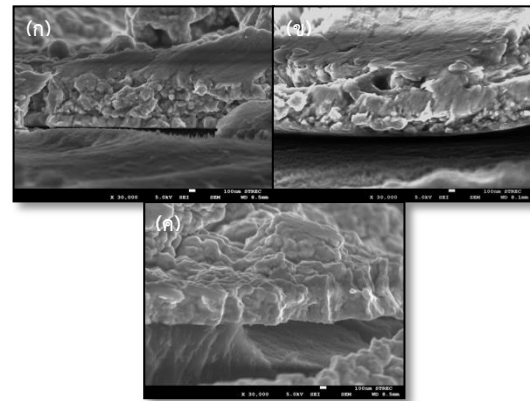
รูปที่ 3 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน ของหมึกนำไฟฟ้าแต่ละชนิด

3.2 ผลของอัตราการสเปรย์

อัตราการสเปรย์หมึกสารประกอบเชิงซ้อนคอปเปอร์เอมีนมีผลต่อค่าความต้านทานของเส้นลายนำไฟฟ้าและการขึ้นเทอริงกันระหว่างอนุภาค กล่าวคือ เมื่ออัตราการสเปรย์ลดลงค่าความต้านทานจะมีค่าลดลง และระดับการขึ้นเทอริงกันระหว่างอนุภาคมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากอนุภาคมีการสะสมบนแผ่นรองรับอย่างช้าๆ ทำให้อนุภาคมีการเชื่อมกันได้มากขึ้น แสดงดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5 ตามลำดับ

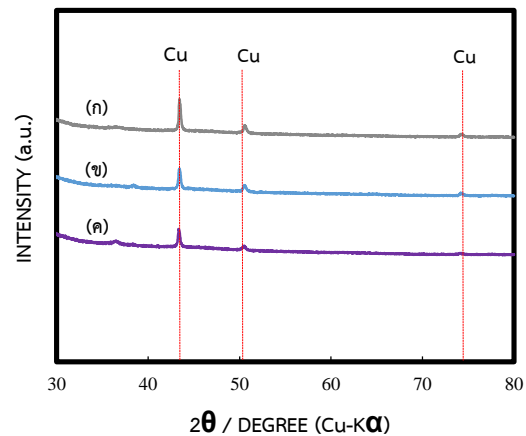


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานและอัตราการสเปรย์ที่ 0.53, 0.67 และ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที



รูปที่ 5 ภาพตัดขวางของเส้นลายนำไฟฟ้าที่อัตราการสเปรย์ (ก) 0.53 (ข) 0.67 และ (ค) 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD สำหรับเส้นลายนองแดงนำไฟฟ้า ที่อัตราการสเปรย์ 0.53, 0.67 และ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที จะเห็นว่า เกิดพีคของโลหะทองแดงที่ตำแหน่ง 43.9°, 51.1° และ 74.55° ทั้งสามกรณี แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 XRD patterns ของเส้นลายนำไฟฟ้าที่อัตราการสเปรย์ (ก) 0.53 (ข) 0.67 และ (ค) 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที

4. สรุป

จากผลการทดลองจะเห็นว่าสามารถสังเคราะห์เส้นลายนองแดงนำไฟฟ้าได้ด้วยวิธีการพิมพ์แบบสเปรย์ไพโรไลซิส โดยการใช้หมึกสารประกอบเชิงซ้อนคอปเปอร์เอมีน ที่รีดิวซ์ด้วยตัวเอง ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลาในการอบ 25 นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน บนแผ่นรองรับ PI ค่าความต้านทานของเส้นลายนองแดงมีค่าลดลงเมื่ออัตรา

การสเปรย์หมึกกลดลง และชนิดหมึกที่พบว่าทำให้ค่าความต้านทานต่ำ คือ หมึกสารประกอบเชิงคอปเปอร์เอมีน ที่ได้จาก ไดเอทานอลเอมีน ที่อัตราส่วนโดยโมลของคอปเปอร์ฟอร์เมตและไดเอทานอลเอมีน เท่ากับ 1:0.012 ค่าความต้านทานที่ต่ำที่สุดที่ได้ คือ 2.691 ไมโครโอห์มเซนติเมตร ที่อัตราการสเปรย์ 0.53 มิลลิลิตรต่ออนาที นอกจากนี้ ระดับการขึ้นเทอริงของอนุภาคภายในชั้นฟิล์มจะเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการสเปรย์ลดลงด้วยเช่นกัน

เอกสารอ้างอิง

- [1]. Suren S, Limkitnuwat W, Benjapongvimon P, Kheawhom S. Conductive film by spray pyrolysis of self-reducing copper-silver amine complex solution. *Thin Solid Films*. 2016;607:36-42.
- [2]. Yabuki A, Tachibana Y, Fathona IW. Synthesis of copper conductive film by low-temperature thermal decomposition of copper-aminediol complexes under an air atmosphere. *Materials Chemistry and Physics*. 2014;148(1-2):299-304.
- [3]. Farraj Y, Grouchko M, Magdassi S, Koch F, Wittkötter M, Müller M, et al. Ink-Jet Printed Copper Complex MOD Ink for Plastic Electronics. *NIP & Digital Fabrication Conference*. 2014;2014(1):191-3.
- [4]. Farraj Y, Grouchko M, Magdassi S. Self-reduction of a copper complex MOD ink for inkjet printing conductive patterns on plastics. *Chemical Communications*. 2015;51(9):1587-90.
- [5]. Yonezawa T, Tsukamoto H, Yong Y, Nguyen MT, Matsubara M. Low temperature sintering process of copper fine particles under nitrogen gas flow with Cu²⁺-alkanolamine metallacycle compounds for electrically conductive layer formation. *RSC Advances*. 2016;6(15):12048-52.
- [6]. Yabuki A, Arriffin N, Yanase M. Low-temperature synthesis of copper conductive film by thermal decomposition of copper-amine complexes. *Thin Solid Films*. 2011;519(19):6530-3.

การประมาณค่าความสกปรกบนแผงโซลาร์เซลล์ด้วยกระบวนการทางภาพ Soiling Estimation of Solar PV Using Image Processing

พงษ์ศักดิ์ ทามแก้ว* ประจวบ อินระวงศ์ และ กานท์ เกิดขึ้น

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

E-mail: eee36413@hotmail.com*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการประมาณค่าความสกปรกของโซลาร์เซลล์ด้วยกระบวนการทางภาพ โดยทั่วไปการประเมินค่าความสกปรกที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวโซลาร์เซลล์จะใช้การวัดกระแสและแรงดันเปิดวงจรเพื่อดูค่าสมรรถนะ งานวิจัยนี้จะนำกระบวนการทางภาพเข้ามาช่วยในการประเมินค่าโดยการนำภาพถ่ายมาเข้ากระบวนการทางภาพและแปลงให้เป็นฮิสโตแกรมเพื่อดูการกระจายตัวของระดับความเข้มแสงที่ต่างกัน ซึ่งคาดว่าวิธีการนี้สามารถที่จะประเมินค่าความสกปรกได้ใกล้เคียงกับวิธีการเดิมแต่ทำได้ง่ายและสะดวกกว่า

คำสำคัญ : ความสกปรก, ฮิสโตแกรม

1. บทนำ

ผลกระทบของฝุ่นดินฝุ่นละอองและสารปนเปื้อนต่าง ๆ ที่สะสมในแผงโซลาร์เซลล์ปกติจะเรียกว่าเป็นสิ่งสกปรกซึ่งทำให้เกิดการลดลงของกำลังที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลงดังนั้นการทำความสะอาดมีค่าใช้จ่ายซึ่งถ้าหากทำความสะอาดแล้วเกิดความคุ้มค่าต่อราคาค่าพลังงานที่ได้เราก็ควรให้ความสนใจต่อการประเมินค่าความสกปรกของแผง

วิธีที่ง่ายที่สุดเพื่อดูผลของสิ่งสกปรกจะถูกเปรียบเทียบบนพื้นฐานของการวัดกระแส [1] สำหรับการประมาณค่าการลดกำลังที่เกิดจากความสกปรกบนแผงโซลาร์เซลล์และยังมีการวิเคราะห์แบบการถดถอย [2] โดยการนำขนาดของความสกปรกมาแยกองค์ประกอบด้านขนาดและนำมาวิเคราะห์ปริมาณอิทธิพลขนาดอนุภาคสามารถประเมินความสกปรกได้อย่างถูกต้องที่ขนาดของฝุ่นใหญ่เกิน 300 ไมโครเมตรนอกจากนี้ยังมีการประเมินโดยการวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก [3] ของผ้าที่ใช้ในการทำความสะอาดซึ่งพบว่าความสกปรกมีผลต่อการส่งผ่านของรังสีอย่างไรก็ตามวิธีการที่กล่าวมาทั้งหมดนี้มีความไม่สะดวกในการดำเนินการประเมินความสกปรกในสถานการณ์จริง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้เสนอวิธีการประเมินความสกปรกด้วยวิธีการทางภาพโดยใช้ตัวอย่างจากข้อมูลระดับความสกปรกที่แตกต่างกัน

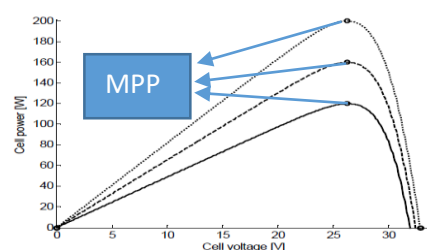
เพื่อแสดงให้เห็นถึงวิธีการประเมินค่าความสกปรกบนแผงโซลาร์เซลล์ที่สามารถเพิ่มความสะดวกในการประเมินค่าและลดขั้นตอนการประเมินค่าของแผงโซลาร์เซลล์

2. ความสกปรกกำลังการผลิตกระแสแสงดวงจร

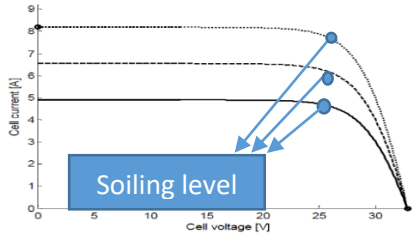
สำหรับการทำงานของแผงโซลาร์เซลล์ที่สัมพันธ์กับปริมาณความเข้มของแสงอาทิตย์ โดยปริมาณความเข้มสูงปริมาณกำลังที่ผลิตได้ก็จะสูงตามด้วย ถ้าหากมีความสกปรกมาบดบังก็จะส่งผลทำให้กำลังที่ผลิตลดลงในรูปที่ 1 เป็นเส้นคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีกำลังการผลิตสัมพันธ์กับแสงอาทิตย์ โดยจุดที่ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดจะเรียกว่าจุด MPP โดยจุด MPP นี้จะมีค่าลดลงเมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบที่เซลล์ลดลงเช่นกันดังรูปที่ 1 ในขณะที่เซลล์ปัจจุบันลดลงจะส่งผลให้มีการลดจุดสูงสุดของกระแสไฟฟ้าด้วยเช่นกัน ดังรูปที่ 2

นอกจากนี้ถ้าความสกปรกนั้นมีความเข้มข้นจะทำให้การเกาะติดของความสกปรกนั้นหนาแน่นมากขึ้น ส่งผลให้กำลังการผลิตได้จากแผงโซลาร์เซลล์นั้นจะมีค่าลดลงมากตั้งแต่ 2% ถึง 60% [4] โดยขึ้นอยู่กับขนาดความสกปรกที่เกาะติดบนแผงโซลาร์เซลล์

สำหรับงานวิจัยส่วนมากทั่วโลกได้พบว่า การลดลงของค่าสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์ขึ้นอยู่กับสถานที่ ในทวีปยุโรปการสูญเสียกำลังการผลิตแบบรายวันในมาลากา (สเปน) เกิดจากการสะสมของฝุ่นละอองที่สะสมบนแผงของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่ประมาณ 4.4% และหากในช่วงเวลาที่อากาศแห้งแล้งการสะสมของฝุ่นจะมีค่าสูงกว่า 20% [5]



รูปที่ 1 การลดลงของจุด MPP ที่เกิดจากความสกปรกของแผง KC200GT [8]



รูปที่ 2 การลดลงของกระแสที่เกิดจากความสกปรกของแผง KC200GT [8]

3. การใช้กระบวนการทางภาพประมาณความสกปรกของแผง

การศึกษานี้ได้นำเสนอวิธีประมาณความสกปรกของแผงด้วยกระบวนการทางภาพโดยใช้โปรแกรม MATLAB เป็นโปรแกรมหลักในการประเมินความสกปรกโดยการแปลงภาพ RGB เป็น Gray Scale แบบฮิสโตแกรม [7]

โดยมีขั้นตอนดังนี้

- ภาพถ่ายความสกปรกแผง
- แปลงข้อมูลภาพ RGB เป็น Gray Scale
- ได้ข้อมูลในรูปแบบฮิสโตแกรม
- นำค่าฮิสโตแกรมที่ได้มาประเมินกับค่า SR^{Isc} และค่า SR^{Pmax}

3.1 วิธีการประเมินความสกปรก

การวัดความสกปรกเรากำหนดระดับความสกปรกไว้ที่การลดเปอร์เซ็นต์โดยเฉลี่ยในโดยการรับรู้ของเซลล์แสงอาทิตย์เนื่องจากการสะสมของสิ่งสกปรก ดังนั้นเพื่อให้สามารถวัดความสกปรกของโมดูลได้จึงกำหนดสัดส่วนการเปรียบเทียบค่าจากแผงที่สกปรกและแผงที่สะอาดจากสมการ (1) [1]

$$SR^{Isc} = \frac{G_2}{G_1} = \frac{C_2^{Isc} \cdot (1 - \alpha \cdot (T_2 - T_{ref})) \cdot I_{sc2}}{C_1^{Isc} \cdot (1 - \alpha \cdot (T_1 - T_{ref})) \cdot I_{sc1}} \quad (1)$$

จากสมการ (1) ตัวห้อย "1" หมายถึงโมดูลที่สะอาดและ ตัวห้อย "2" หมายถึงโมดูลสกปรก ส่วนที่อยู่ในสมการนี้แสดงให้เห็นถึงการรับรู้ของแผงได้ รังสี (G_1) แทนแผงที่สะอาดในขณะที่ตัวเศษเป็นตัวแทนรับรู้รังสี (G_2) แทนแผงที่สกปรกที่ $G_2 < G_1$ เมื่อมีคราบสกปรกค่ากระแส I_{sc_i} และ T_i เป็นกระแสลัดวงจรและอุณหภูมิของแผง ($i = 1$ หรือ 2) ที่เวลาของการวัด T_{ref} คืออุณหภูมิที่อ้างอิงเงื่อนไขและ α เป็นค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของลัดวงจรปัจจุบัน. C_1^{Isc} และ C_2^{Isc} เป็นค่าคงที่ของการสอบเทียบที่เกี่ยวข้องกับกระแสลัดวงจรของแต่ละโมดูล ถ้าค่า $SR^{Isc} = 1$ หมายถึงไม่มีสิ่งสกปรกเกาะอยู่บนแผงโซลาร์เซลล์และยังมี

ความสัมพันธ์ค่ากำลังสูงสุดของแผงโซลาร์เซลล์ที่สกปรกและสะอาดดังสมการที่ (2) [1]

$$SR^{Pmax} = \frac{C_2^{Pmax} \cdot (1 - \gamma \cdot (T_2 - T_{ref})) \cdot Pmax_2}{C_1^{Pmax} \cdot (1 - \gamma \cdot (T_1 - T_{ref})) \cdot Pmax_1} \quad (2)$$

ตัวห้อย "1" หมายถึงโมดูลที่สะอาดและตัวห้อย "2" หมายถึงโมดูลสกปรก $Pmax_i$ และ T_i คือ กำลังส่งออกสูงสุดและอุณหภูมิของแผงที่ ($i = 1$ หรือ 2) ในขณะที่วัด T_{ref} คืออุณหภูมิที่เงื่อนไขและ γ เป็นค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของ กำลังสูงสุด C_1^{Pmax} และ C_2^{Pmax} เป็นค่าคงที่ของการสอบเทียบในกรณีที่ไม่มีสิ่งสกปรก $P^{max2} = 1$

3.2 วิธีการวัดหาค่า SR^{Isc} และ SR^{Pmax}

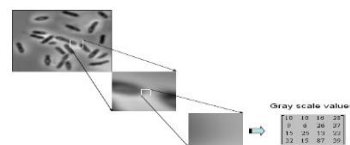


รูปที่ 2 แผงที่ความสกปรกและแผงที่สะอาด

1. รับรังสีที่เดียวกันโดยใช้แผงโซลาร์เซลล์ขนาดเล็ก (ในบทความนี้ใช้ขนาด 10 วัตต์)
2. ทำการวัดกระแสลัดวงจรทั้งสองแผงแผงที่สกปรกและแผงที่ไม่มี ความสกปรกเป็นเวลา 30 วินาทีและบันทึกค่าไว้
3. นำไปประเมินสมการที่ (1)
4. ทำการบันทึกค่า P^{max2} นำไปประเมินในสมการที่ (2)

3.3 รูปแบบของ Gray Scale

ค่าในแต่ละพิกเซลของ Gray Image คือค่าความเข้มของแสง ณ แต่ละตำแหน่งของพิกเซล ซึ่งจะอยู่ในรูปของ Gray Scale (Gray Level) ดังรูปที่ 3 ขั้นตอนการแปลงภาพสีให้เป็นภาพระดับเทา ทำได้โดยแยกระดับสีแต่ละพิกเซล (Pixel) ออกจากกันในรูปแบบสี RGB จากนั้นนำค่าสี RGB มาเข้าสู่สมการเพื่อคำนวณหาค่าสีเทาและนำค่าที่ได้ไปแทนที่จุดพิกเซลเดิม



รูปที่ 3 ภาพเชิงดิจิทัลประเภท Intensity Image [8]

3.3 ค่าเฉลี่ยระดับสีเทา

ตามที่เรารวบรวมไปข้างต้นว่าแต่ละพิกเซลนั้นจะประกอบไปด้วยระดับของแสง R G B วิธีการที่ง่ายที่สุดในการ Convert ภาพสีเป็น Gray Scale นั้นคือการหาค่าเฉลี่ยออกมาสสมการ(3) [8] ที่ได้คือ

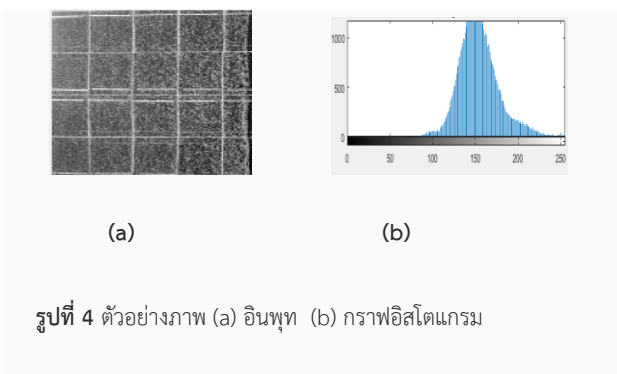
$$Pixel(x, y) = \frac{(R+G+B)}{3} \quad (3)$$

$Pixel(x, y)$ = พิกเซล ณ ตำแหน่ง (x, y)

R = ระดับของแสงสีแดง, G = ระดับของแสงสีเขียว

B = ระดับของแสงสีน้ำเงิน

การแปลงจากปริภูมิ RGB ไปเป็นองค์ประกอบ Gray scale ฮิสโตแกรมซึ่งจะสัมพันธ์กับรูปที่ 4



รูปที่ 4 ตัวอย่างภาพ (a) อินพุท (b) กราฟฮิสโตแกรม

4. ผลการจำแนกความสกปรก

ในที่นี่จะนำค่า SR^{Isc} และค่า SR^{Pmax} ที่วัดได้ว่ามี ความสัมพันธ์กับรูปฮิสโตแกรมที่เราได้จากกระบวนการทางภาพหรือไม่ โดยดูความสกปรกที่มีค่าแตกต่างกันโดยดูจากค่าในตารางที่ 1



รูปที่ 5 ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ

ค่าพารามิเตอร์

Poly 10 W, $V_{oc} = 22 V$, $I_{Isc} = 0.62 A$

ค่ากระแสลัดวงจรบนแผงโซลาร์ที่สะอาด

กระแสลัดวงจรแผงสะอาด $I_{Isc}(clean) = 0.52 A$ กระแสลัดวงจร

แผงสกปรก $I_{Isc}(soiled)(A)$

กำลังที่ผลิตได้แผงสะอาด, $P_{max1(clean)} = 5.875W$

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบ

ตัวอย่าง	กราฟฮิสโตแกรม	แรงดัน	กระแส	P_{max} กำลังที่ผลิตได้	I_{sc} กระแสลัดวงจร	SR^{Isc} ค่าประมาณ	SR^{Pmax} ค่าประมาณ
T1		11.5	0.50	5.75	0.51	0.98	0.978
T2		11.1	0.46	5.10	0.47	0.90	0.86
T3		10.4	0.42	4.36	0.44	0.84	0.74
T4		8.80	0.36	3.16	0.39	0.75	0.53
T5		3.63	0.27	0.98	0.29	0.55	0.166

จากตารางผลการทดลองได้เทียบจากค่าที่ได้จากโปรแกรมและจากการใช้เครื่องวัดเพื่อเปรียบเทียบ ณ เวลานั้น ของตัวอย่างที่ความสกปรกเทียบกับแผงที่สะอาดและโซลาร์เซลล์จะเลือกใช้ในช่วงที่ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เป็นช่วงที่มีแนวโน้มที่เป็นเชิงเส้นช่วงเวลาประมาณ 9.00 – 11.00 ในการทดลองนี้ใช้เวลาช่วง 10.30-10.40 ซึ่งมีตัวอย่างที่เตรียมไว้แล้วในวันที่ต้องฟ้าปลอดโปร่งและในช่วงเวลา 12.00-13.00 จะไม่สามารถทำการเก็บข้อมูลได้เนื่องจากเวลาถ่ายภาพจะมีเงาของเครื่องบันทึกตกลงบนแผง

3. สรุป

วิธีการนี้สามารถประมาณค่าสิ่งสกปรกที่เกิดขึ้นบนแผงได้โดยการนำภาพที่มีการบันทึกและแปลงให้อยู่ในรูปแบบฮิสโตแกรมมาเปรียบเทียบกับค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่ระดับความสกปรกที่มีค่าแตกต่างกันซึ่งสังเกตได้จากการกระจายตัวของพิกเซลทางด้านสีขาวมีขนาดเคลื่อนเข้าหาคู่ค่าช่วงกลางของจากกราฟฮิสโตแกรมในตารางที่ 1 ตามระดับความสกปรกที่เพิ่มขึ้นซึ่งสัมพันธ์กับค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่ลดลงยังมีตัวแปรอีกตัวคือความเข้มแสงซึ่งจะสัมพันธ์กับช่วงเวลาร่วมด้วยดังนั้นวิธีการนี้สามารถประมาณความสกปรกของแผงโซลาร์เซลล์เบื้องต้นได้

วิธีการนี้ยังไม่สามารถประเมินค่าความสกปรกออกมาเป็นตัวเลขได้ดังนั้นการที่จะสามารถบอกค่าความสกปรกได้จะต้องมีการเก็บข้อมูลแต่ละช่วงเวลาของค่ากระแสลัดวงจรจากนั้นจึงและใช้โครงข่ายประสาทเทียมมาช่วยในการประมาณค่าที่สามารถแสดงค่า SR^{Isc} ในช่วง[0-1]

และยังต้องพิจารณาผลของความสกปรกจากกำลังที่ผลิตได้ของแผงโซลาร์เซลล์นำมาประเมินร่วมกันเพื่อวิเคราะห์หาค่าประสิทธิภาพต่อไป

4. กิตติกรรมประกาศ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Michael Gostein, "Comparing PV Power Plant Soiling Measurements Extracted from PV Module Irradiance and Power Measurements," 2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)
- [2] Subrahmanyam Pulipaka , Fani Mani, Rajneesh Kumar," Modeling of soiled PV module with neural networks and regression using particle size composition," Solar Energy 123 (2016) 116–126
- [3] Helene Pedersena), Johann Straus), Josefine Selj ,” Effect of soiling on photovoltaic modules in Norway,”, Energy Procedia 92 (2016) 585 – 589
- [4] M. RezaMaghami, “Power loss due to soiling on solar panel: Areview,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59 (2016) 1307–1316
- [5] E. Urrejola and J. Antonanzas, “Effect of soiling and sunlight exposure on the performance ratio of photovoltaic technologies in Santiago, Chile,” *Energy Conversion and Management*, 114 (2016) 338–347.
- [6] Nand Kishor, "Modeling of PV Module with Consideration of Environmental Factors: Areview" Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 2010 IEEE PES
- [7] Chuong T, "COLOR TO GRAYSCALE IMAGE CONVERSION USING MODULATION DOMAIN: Areview" International Conference on Image Processing (ICIP) , 2015 IEEE
- [8] ณัฐธิดา ลีสสม, โอฟาริก สุรินตะ. "การตัดตัวอักษรลายมือเขียนภาษาไทยออกจากเอกสารภาพเชิงดิจิทัล" การประชุมทางวิชาการ มหาวิทยาลัยมหาสารคามวิจัย ครั้งที่ 3, หน้าที่ 123, มหาสารคาม. กันยายน 2550

ระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังประยุกต์ร่วมกับ FACTS ในระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสสลับของรถไฟไฟฟ้า The Electrical Power System Application with FACTS in Overhead AC Transmission System for Electric Train.

ทศพร เจริญจันทร์ และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์*
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
E-mail: krischonme.b@en.rmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

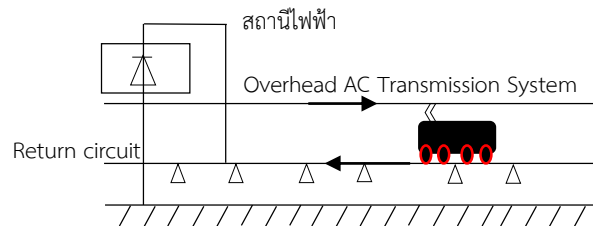
บทความนี้เป็นวิจัยกล่าวถึงเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังคือ โหลดในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงดันปานกลางหรือแรงดันสูงที่รับการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าให้กับโหลดที่เป็นรถไฟไฟฟ้า โดยใช้เทคโนโลยี FACTS ที่มาใช้ร่วมกับปัจจุบันโดย SVC จะทำงานบนพื้นฐานของอุปกรณ์พาสซีฟ ได้แก่ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงดันสูงร่วมกับอุปกรณ์ไทรสเตอร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นสวิตช์ที่สามารถควบคุมมุมของการนำกระแสได้ตามต้องการ ข้อแตกต่างที่สำคัญก็คือ SVC นั้นจะถูกพัฒนามาจากพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์ที่สามารถต่อใช้งานที่ระดับแรงดันสูงได้โดยตรงหรือกรณีที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่บัสบาร์นั้น มีค่าสูงมากก็จะใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นตัวเชื่อมเข้าสู่กริด โดยอินเวอร์เตอร์แรงดันสูงหรือแรงดันปานกลางนี้จะถูกควบคุมให้จ่ายกำลังงานรีแอคทีฟในรูปของ Capacitive หรือ Inductive Current เข้าสู่ระบบไฟฟ้าได้ตามความต้องการ

คำสำคัญ : คุณภาพระบบไฟฟ้า, ระบบส่งจ่าย, อินเวอร์เตอร์

1. บทนำ

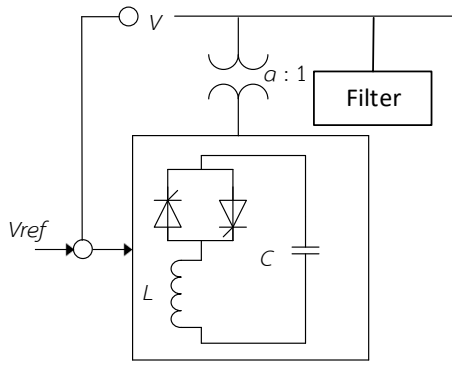
ประเทศไทยมีความต้องการใช้พลังงานที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการจัดสรรพลังงานต้องคำนึงถึงความสอดคล้องกับความต้องการที่เพิ่มสูงขึ้น การจัดสรรพลังงานต้องพิจารณาทั้งทางด้านเศรษฐศาสตร์และความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งพลังงานที่ให้ความสะดวกในการใช้และมีความสำคัญมากที่สุดคือ พลังงานไฟฟ้า เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเป็นอีกเรื่องหนึ่งที่ต้องคำนึง เพราะมีผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยพิจารณาถึงหลักการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลังควรจะต้องวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติที่สำคัญ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องใช้ในการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลัง ประกอบด้วย คุณภาพของไฟฟ้ากำลัง (Power Quality, PQ) เสถียรภาพของกำลังไฟฟ้า (Power Stability, PS) ความน่าเชื่อถือได้ของกำลังไฟฟ้า (Power Reliability, PR) และความยืดหยุ่นของกำลังไฟฟ้า (Power Flexibility, PF) [1] ส่วนประกอบของระบบไฟฟ้ากำลังมี 3 ส่วนคือ ระบบผลิตกำลังไฟฟ้า ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า โดยทั่วไประบบการจ่ายกำลังไฟฟ้าจะเริ่มจากระบบผลิตไฟฟ้า ซึ่งมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตกำลังไฟฟ้าที่มีระดับแรงดันไฟฟ้า 13.8kV ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เพื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าให้มีระดับสูง 69kV-500kV จ่ายผ่านระบบส่งจ่ายไฟฟ้าจากนั้นจะถูกแปลงให้มีระดับแรงดันไฟฟ้าลดลงเหลือ 11-33kV ที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย โดยหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่สถานีจ่ายไฟฟ้าจะจ่ายผ่านสายป้อนในระบบจำหน่ายไฟฟ้า และเดินสายแรงดันต่ำไปยังผู้ใช้ไฟฟ้า[2] ซึ่งระบบรถไฟไฟฟ้าประเภทนี้ใช้ 25kV เพื่อนำไปใช้งาน

ความเร็วของตัวรถไฟไฟฟ้าเป็นประเภทความเร็วปานกลางมีความเร็วที่ 160km/hr มีความเร็วขณะสับเปลี่ยนราง 40km/hr และมีความเร็วขณะสับเปลี่ยนรางเพื่อลงศูนย์ขบวนบำรุงที่ 125km/hr ขับเคลื่อนด้วยระบบไฟฟ้า รับแรงดันไฟฟ้าขนาด 69kV จากสถานีไฟฟ้าย่อยบางกะปิของการไฟฟ้าานครหลวงจำนวนสองแหล่งจ่ายโดยใช้เป็นไฟฟ้าสำรองหนึ่งแหล่ง ระบบไฟฟ้านี้จะถูกแปลงแรงดันให้เหลือ 25kV เพื่อนำไปใช้งาน ทั้งนี้จะทำให้เกิดการไหลของกำลังไฟฟ้าปริมาณมากขึ้นการขยายกำลังระบบส่งไฟฟ้ากำลังให้มีปริมาณเพียงพอกับความต้องการพลังงานที่เพิ่มสูงขึ้นมักถูกจำกัดโดยเงื่อนไขทางด้านสิ่งแวดล้อมและเงื่อนไขทางด้านเศรษฐศาสตร์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องจะมีการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าให้ไหลผ่านโครงข่ายสายส่งอย่างมีประสิทธิภาพแรงดันไฟฟ้าสูงสุดต่อโหลดที่เป็นรถไฟไฟฟ้า



รูปที่ 1 การจ่ายกระแสไฟฟ้าให้รถไฟไฟฟ้า

อีกทั้งในบทความนี้จะมุ่งเน้นศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งแรงดันปานกลางเป็นส่วนใหญ่ใช้ระบบอ้างอิง IEEE 6-Bus, IEEE 8-Bus เป็นต้น สำหรับวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆในวงจรจะใช้วิธีการคำนวณกระแสแบบย้อนกลับ (Current Backward Sweep) และการคำนวณแรงดันแบบไปข้างหน้า (Voltage Forward Sweep) [3] เพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบส่งกำลังไฟฟ้าให้กับรถไฟไฟฟ้าโดยใช้เทคโนโลยี FACTS มาใช้ในการรักษาแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในระดับคงที่หรือใกล้เคียงภายใต้การเปลี่ยนแปลงของโหลดอันเนื่องมาจากเหตุการณ์ที่ไม่พึงประสงค์ เช่น การปลดโหลด ความล้มเหลวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางตัวในระบบไฟฟ้ากำลัง คือ ปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า ณ จุดสำคัญ เช่น จุดกึ่งกลางของสายส่งระยะไกล ช่วยปรับค่าตัวประกอบกำลัง แก้ไขปัญหาเฟสไม่สมดุล ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของ SVC ดังรูปที่ 2 [4]



รูปที่ 2 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของ SVC [4]

2. ทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

2.1 การคำนวณแรงดันแบบไปข้างหน้า (Voltage Forward Sweep)

เริ่มต้นจากบัสอ้างอิง หรือรูตโนด (Root node) หรือรูตบัส (Root bus) โดยที่ค่าแรงดันกำหนดให้มีค่าคงที่และเฟสเป็นศูนย์ ส่วนค่าแรงดันและมุมเฟสของแรงดันที่บัสอื่นๆ ถัดจากบัสอ้างอิงในรอบคำนวณที่ k จะถูกคำนวณค่าแรงดันที่บัส เรื่อยไปสู่อันดับสุดท้ายด้วยสมการที่ (1)

$$V_{L2}^{(k)} = V_{L1}^{(k)} - Z_L J_L^{(k)} \quad (1)$$

เมื่อ Z_L ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งช่วง L ระหว่างโนด L_2 และ L_1 เป็นโนดปลายทาง L_1 เป็นโนดต้นทาง J เป็นกระแสในสาย และ k เป็นรอบการคำนวณ

2.2 การคำนวณกระแสแบบย้อนกลับ (Current Backward Sweep)

โดยเริ่มกระแสที่โนดจะมีค่าดังสมการที่ (2) เมื่อ S_i เป็นกำลังที่โนด $i(S_i = P_i \pm jQ_i)Y_i$ เป็นผลรวมของแอดมิตแตนซ์ส่วนลงดินทั้งหมดที่โนด $i = V_i^{(k-1)}$ เป็นแรงดันที่โนด i รอบการคำนวณที่ $k-1$ การคำนวณกระแสจะเริ่มให้ขนาดแรงดันเป็น 1 p.u. และมุมแรงดันเป็นศูนย์ที่ทุกๆ โหนดส่วนของการคำนวณกระแสในสายจะเริ่มจากการคำนวณที่เรียกว่า การแพร่กระจายถอยหลัง โดยที่รอบคำนวณที่ k จะคำนวณกระแส J ในสายสุดท้ายเรื่อยเข้าสู่รูตโนด หรือรูตบัสโดยที่สาย L หาได้จากสมการที่ (3)

$$I_{(i)}^{(k)} = \left(\frac{S_i}{V_i^{(k-1)}} \right) - Y_i V_i^{(k-1)} \quad (2)$$

$$J_L^* = -I_{L2}^k + \sum L_2 \quad (3)$$

2.3 การเข้าสู่ค่าตอบของแรงดัน

จะทำในลักษณะเวียนซ้ำในแต่ละรอบการคำนวณจะตรวจสอบค่า Mismatch ของแรงดันในแต่ละบัสดังแสดงสมการที่ (4)

$$\Delta V_j^{(k)} = V_j^{(k)} - V_j^{(k-1)} \quad (4)$$

เมื่อ $\Delta V_j^{(k)}$ เป็นค่า ความคลาดเคลื่อนของแรงดันที่พอยอมรับได้ Mismatch ที่บัส j หลังจากรอบการคำนวณที่ k $V_j^{(k)}$ เป็นแรงดันที่บัส j ในรอบการคำนวณที่ $k-1$ การเข้าสู่ค่าตอบของแรงดันอาจหาได้จากผลต่างของค่าอื่นได้จากสมการที่ (5)

$$\left\{ \begin{array}{l} |\text{Re}(\Delta V_j^{(k)})| \leq \epsilon \\ |\text{Im}(\Delta V_j^{(k)})| \leq \epsilon \\ |\Delta V_j^{(k)}| \leq \epsilon \end{array} \right. \quad (5)$$

3. ปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุด [5]

3.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีหลายปัญหาที่นิยมมาพิจารณา เช่น การจ่ายโหลดอย่างประหยัด การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ ในบทความนี้ใช้การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งน้อยที่สุดเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ด้วยสมการที่ (6)

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^{N_L} i, j \{ V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j) \} \quad (6)$$

โดยที่ P_{Loss} คือกำลังไฟฟ้าจริงที่สูญเสียในสายส่งทั้งหมด N_L คือจำนวนสายส่งทั้งหมด V_i คือขนาดแรงดันที่ i V_j คือขนาดแรงดันที่บัส j δ_i คือมุมแรงดันที่บัส i δ_j คือมุมแรงดันที่บัส j และ i, j คือความนำไฟฟ้าจากบัส i ไปยังบัส j

3.2 ระบบเงื่อนไขบังคับ

ตัวแปรที่กำหนดในบทความนี้คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากโรงไฟฟ้า ขนาดแรงดันถูกควบคุมโดยสถานีไฟฟ้าที่หม้อแปลงกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ โดยจะปรับตั้งค่าตัวแปรเหล่านี้เพื่อให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งน้อยที่สุดและยังคงอยู่ในช่วงขีดจำกัดของตัวแปรแต่ตัวโดยมีตัวแปรที่ต้องการควบคุมคือ พิกัดการไหลของกำลังไฟฟ้าของสายส่ง พิกัดช่วงขนาดแรงดันทุกบัสในระบบ เพื่อให้ระบบไฟฟ้าทำงานอยู่ในสภาวะปกติ ระบบเงื่อนไขบังคับทั้งเงื่อนไขสมการและเงื่อนไขอสมการมีดังต่อไปนี้

3.3 เงื่อนไขบังคับสมการเป็นสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า

$$P_{G,i} - P_{D,i} - \sum_{j=1}^{N_b} |V_i| |V_j| |Y_{i,j}| \cos(\theta_{i,j} - \delta_i + \delta_j) = 0 \quad (7)$$

$$Q_{G,i} - Q_{D,i} + \sum_{j=1}^{N_b} |V_i| |V_j| |Y_{i,j}| \sin(\theta_{i,j} - \delta_i + \delta_j) = 0 \quad (8)$$

โดยที่ $P_{G,i}$ คือกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส i $P_{D,i}$ คือความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส i $Q_{G,i}$ คือกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่บัส i $Q_{D,i}$ คือความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่บัส i N_B คือจำนวนบัส θ_i j คือมุมแอตมิตแดนซ์บัส i ไปยังบัส j

3.4 เงื่อนไขบังคับข้อสมการเป็นขอบเขตของตัวแปรที่ต้องการปรับตั้ง

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (9)$$

$$T_i^{\min} \leq T_i \leq T_i^{\max} \quad (10)$$

$$P_{G,i}^{\min} \leq P_{G,i} \leq P_{G,i}^{\max} \quad (11)$$

$$Q_{comp,i}^{\min} \leq Q_{comp,i} \leq Q_{comp,i}^{\max} \quad (12)$$

โดยที่ V_i^{\min}, V_i^{\max} คือขอบเขตแรงดันต่ำสุดและสูงสุดและ T_i^{\min}, T_i^{\max} คือขอบเขตที่หม้อแปลงต่ำสุดและสูงสุด P_G^{\min}, P_G^{\max} คือขอบเขตกำลังไฟฟ้าจริงต่ำสุดและสูงสุดและ $Q_{comi}^{\min}, Q_{comj}^{\max}$ คือขอบเขตกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟต่ำสุดและสูงสุด

4. ปัญหาคุณภาพแรงดันไฟฟ้า

ระบบรถไฟฟ้ามอเตอร์ที่มีสถานีจ่ายไฟฟ้าต้นทางที่อยู่ห่างไกลและจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับขบวนรถไฟฟ้ามอเตอร์ 1 เฟส แต่รับไฟฟ้าจากสถานีจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส จะเกิดปัญหาคุณภาพแรงดันไฟฟ้า [6] โดยสามารถคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าตกและแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลได้จากสมการที่ (12) และสมการที่ (13)

$$VD = 2IL(\cos \theta + X \sin \theta) \quad (12)$$

$$\%VUF = \frac{V_n}{V_p} \times 100 \quad (13)$$

4.1 แบบจำลองระบบรถไฟฟ้ามอเตอร์

แบบจำลองรถไฟฟ้ามอเตอร์ที่ใช้ในเป็นกรณีศึกษานั้นเป็นการศึกษาแบบจำลองการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแบบไฟฟ้าจากสายส่งเหนือหัว [7, 8] (Overhead Catenary) มีความเร็วสูงสุดที่ 160 km/hr ยิ่งไปกว่านั้นระบบยังสามารถรับภาระการลัดวงจรของระบบได้อีกด้วย กำหนดให้สภาพโดยรอบของอุณหภูมิมอเตอร์ตัวนำระยะยาวต่อเนื่องภายใต้เงื่อนไขการทำงานอย่างต่อเนื่องแรงดันไฟฟ้าของระบบจะเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60850 และ EN 50163 ดังนั้นบทความนี้จะกำหนดการจำลองในรูปแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะสั่งให้รถไฟฟ้ามอเตอร์เคลื่อนที่ในระยะทางที่กำหนดและแสดงผลการคำนวณได้ตามต้องการ

4.2 พารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในการจำลองระบบส่งจ่ายให้กับรถไฟฟ้ามอเตอร์

ความต้านทานของสายที่ใช้ในระบบโดยในระบบส่งจ่ายจะใช้สาย CU AC -107 ซึ่งมีความต้านทานสูงสุดที่ 0.171 Ω /km ค่าความต้านทานเนื่องจากความเหนี่ยวนำ (Reactance, x_L) หาได้จากสมการที่ (14) และสมการที่ (15)

$$L = 2 \times 10^{-7} (\ln \frac{D}{r}) \quad (14)$$

$$x_L = 2\pi f \times 2 \times 10^{-7} \quad (15)$$

จะได้เท่ากับ 0.05926 Ω /km Power transformer ที่ใช้ในระบบส่งจ่ายใน Substation ของรถไฟฟ้ามอเตอร์แบบ Single Phase Transformer ขนาด 25 MVA แรงดัน 69 kV /25 kV ขนาดแรงดันสูงสุดที่ยอมให้สามารถจ่ายเข้าสู่ระบบได้คือ 27.5 kV แรงดันต่ำสุด คือ 19 kV กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้ามอเตอร์ ให้ Motor มีขนาด 250 kW โดย 1 ขบวน มี Motor 8 ตัว ดังนั้นขนาดกำลังไฟฟ้า 1 ขบวนจะเท่ากับ 2 MW

5. อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น (FACTS)

5.1 Static VAR Compensator (SVC)

SVC ติดตั้งขนานกับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า รักษาแรงดันให้อยู่ในระดับที่หรือใกล้เคียง ภายใต้การเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆของโหลดแก่ไขการเปลี่ยนแปลงแรงดันเนื่องจากเหตุการณ์ที่ไม่พึงประสงค์ ปรับปรุงเสถียรภาพแรงดัน ณ จุดสำคัญ เช่น จุดกึ่งกลางของสายส่งระยะไกล ช่วยเหลือในการปรับปรุงแคมป์ของระบบ ช่วยปรับปรุงค่าพาวเวอร์แฟกเตอร์แก้ไขปัญหาเฟสไม่สมดุล สามารถแบ่งออกได้เป็นสองชนิด คือ 1. ไทริสโตร์คอนโทรลเลอร์แอคเตอร์ (TCR Thyristor Controlled Reactor) และตัวเหนี่ยวนำ จะใช้ไทริสโตร์ควบคุมรีแอคเตอร์ 2. ไทริสโตร์สวิตซ์คาปาซิเตอร์ (TSC Thyristor Switched Capacitor) และตัวเก็บประจุคงที่ (FC Fixed Capacitor) หรือเรียกย่อว่า TSC / FC ตัวเก็บประจุคงที่จะใช้สวิตซ์ทางกล ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของ SVC ดังรูปที่ 2

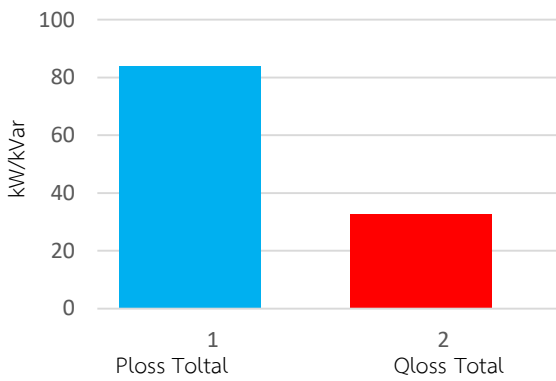
5.2 รูปแบบการไหลกำลังไฟฟ้าด้วย SVC สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$P_{G,i} - P_{D,i} = V \sum_{j=1}^{N_B} V_j (G_{i,j} \cos \theta_{i,j} + B_{i,j} \sin \theta_{i,j}) \quad (16)$$

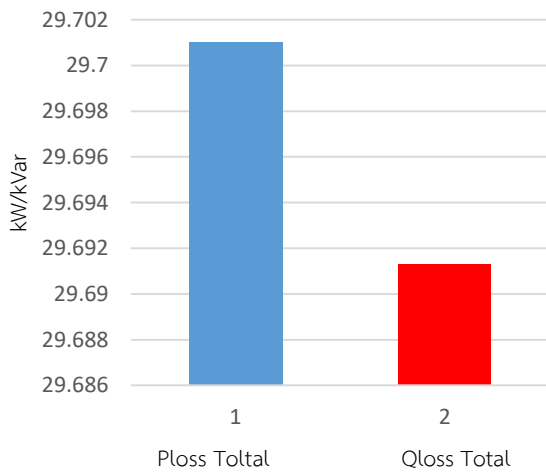
$$Q_{G,i} - Q_{D,i} = V \sum_{j=1}^{N_B} V_j (G_{i,j} \sin \theta_{i,j} + B_{i,j} \cos \theta_{i,j}) \quad (17)$$

6. ผลการจำลอง

จากผลการจำลองพบว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจริงสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 84.008 kw ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรีแอคทีฟที่มีค่าเท่ากับ 32.648 kVar ขณะที่ในระบบมีขบวนรถไฟฟ้ามอเตอร์ใช้งานอยู่ 6 ขบวน โดยติดตั้งหม้อแปลงจำหน่ายกิโลเมตรที่ 19.65 โดยที่ยังไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า SVC แรงดันและกำลังไฟฟ้าจริงบัสเริ่มต้นเท่ากับ 1+j0 (p.u.), 0.1 p.u. ดังรูปที่ 3 และกรณีติดตั้ง SVC เข้าในระบบ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะที่มีขบวนรถไฟฟ้าใช้งาน 6 ขบวน ก่อนติดตั้ง SVC



รูปที่ 4 กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะที่มีขบวนรถไฟฟ้าใช้งาน 6 ขบวน เมื่อติดตั้ง SVC

7. สรุป

จากผลการจำลองพบว่า การไหลของกำลังไฟฟ้าจริงสูญเสียและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสูญเสียทั้งหมดของระบบมีค่าเท่ากับ 84.008 kW และ 32.648 kVar ที่ตำแหน่งเริ่มออกตัวของรถไฟฟ้าตามแบบจำลองที่ออกแบบไว้ ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าตำแหน่งเริ่มต้นรถไฟฟ้าจะอยู่ห่างจากสถานีไฟฟ้ามากที่สุดตามแบบจำลองที่ออกแบบไว้ เมื่อติดตั้ง SVC เข้าไปในระบบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจริงและกำลังไฟฟ้าสูญเสียรีแอกทีฟมีค่าเท่ากับ 29.7010 kW และ 29.6913 kVar ซึ่งในกรณีนี้การเพิ่มจำนวนแหล่งจ่ายเข้าไปในระบบ ตำแหน่งที่ทำการติดตั้งเป็นเพียงตำแหน่งที่ทำการทดลองเท่านั้นเพื่อดูผลของการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงสุดของระบบยังไม่ใช่ตำแหน่งจริงที่ทำให้ระบบมีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลงมากที่สุด

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง และรุ่นพี่ห้องปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ให้คำชี้แนะในการค้นคว้าข้อมูลเพื่อเขียนบทความนี้ และขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ทำงานวิจัยนี้สามารถดำเนินการสำเร็จเป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์ , ‘เทคนิคการควบคุมเสถียรภาพแรงดัน’ โครงการจัดทำตำราและเอกสารวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี หน้า 29-40
- [2] ธวัช เกิดชื่น, ‘การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง. นครราชสีมา:อัดสำเนา. Venkataramana Ajarapu. (2006). Computational Techniques for Voltage Stability Assessment and control. United State of America : Springer Science+Business Media
- [3] ทศพร เจริญจันทร์ และกฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, ‘แนวทางการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้ากรณีศึกษาโหนดรถไฟฟ้ายานยนต์เรลลิงค์’ การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่9 หน้า 92-95
- [4] กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, ‘คุณภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง’ โครงการจัดทำตำราและเอกสารวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี หน้า 84-92
- [5] จักรินทร์ วิเศษยา และกฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, ‘การวิเคราะห์หาตำแหน่งการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสมในระบบจำหน่าย’การประชุมวิชาการเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่3 หน้า123-127 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
- [6] H. Zhengyou, Z. Zheng and H. Hu, ‘Power Quality in High Speed Railway syst’ Int. J. of Rail Transportation 4, no. 2, 2016, pp.71-97
- [7] R. D. White, ‘AC/DC Railway electrification and protection’ In Electric Traction Syst. 2008 IET Professional Develop. Course on, 2008, pp.258-305
- [8] M. Kalantari, M. Sadeghi, S. Fazel and Farshad, ‘Investigation of Power Factor Behavior in AC Railway Syts. Based on Special Yraction Transformer’ J. of Electromagnetic Anal. And Applicat. 2, no. 11,2010, pp.618

การวิเคราะห์คอนเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรม/ขนานของการโอนย้ายพลังงานแบบเหนี่ยวนำสำหรับสถานีประจุยานยนต์ไฟฟ้า

Analysis of series/parallel resonant Converter of Inductive Power Transfer for EV Battery Charging System

ปรินต์ป บัณฑิตภา ภาณุวัฒน์ ราชสิทธิ์ ประกาศิต ปราบพาล และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์*

ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

E-mail: krischonme.b@en.rmutt.ac.th*

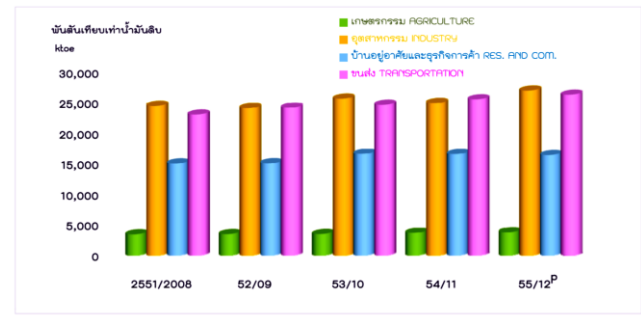
บทคัดย่อ

ปัจจุบันยานยนต์ไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นในประเทศไทย ด้วยมีการพัฒนาเทคโนโลยีด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังและเทคโนโลยีแบตเตอรี่ที่มีความก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว ประกอบกับกระแสความต้องการลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศที่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิบรรยากาศโดยรวมของโลก การพัฒนาสถานีประจุไฟฟ้าที่เช่นกันจำเป็นต้องในรูปแบบต่าง ๆ เช่นสถานีประจุไฟฟ้าแบบธรรมดา สถานีประจุไฟฟ้าแบบประจุเร็ว และสถานีประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์คอนเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรม/ขนานของการโอนย้ายพลังงานแบบเหนี่ยวนำสำหรับสถานีประจุยานยนต์ไฟฟ้า การออกแบบและการควบคุมจะถูกออกแบบจากรูปแบบการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายโดยการชดเชยการเพิ่มกำลังไฟฟ้าด้วยหลักการเรโซแนนซ์ ผลการทดลองสามารถยืนยันถึงวิธีการออกแบบและสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดได้

คำสำคัญ: คอนเวอร์เตอร์, ยานยนต์ไฟฟ้า, การโอนย้ายกำลังไฟฟ้า

1. บทนำ

การเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจส่งผลต่อปัจจัยการใช้พลังงานแหล่งเชื้อเพลิง ในการขับเคลื่อนไม่ว่าจะเป็น ภาคการคมนาคมขนส่ง ภาคอุตสาหกรรม ภาคการสื่อสาร ล้วนใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นหลัก ปัญหาที่ตามมาคือ ปัญหาสิ่งแวดล้อมเกิดมลภาวะ ปัจจัยการใช้พลังงานมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องแปรผันตรงกับอัตราการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจผลของการขยายตัวนั้นเป็นปัจจัยความต้องการแหล่งพลังงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคการขนส่ง ซึ่งมีการอัตราการใช้พลังงานสูงเท่ากับภาคอุตสาหกรรม โดยจะเปรียบเทียบกับกราฟในรูปที่ 1 ขณะที่ภาคการขนส่งทางถนนนับเป็นภาคการขนส่งที่มีการใช้พลังงานสูงสุด โดยส่วนใหญ่ใช้เครื่องยนต์เผาไหม้ภายในและเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นแหล่งพลังงานในการขับเคลื่อน ส่งผลการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีผลต่อวิกฤตโลภ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาพลังงานทดแทน หรือเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงและมีการปลดปล่อยสารมลพิษ ยานยนต์ไฟฟ้าเป็นเทคโนโลยีทางเลือก

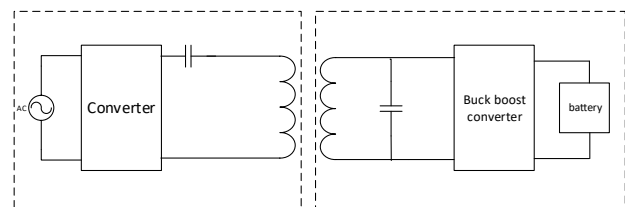


ที่มา: ข้อมูลการบริโภคไฟฟ้ารายปี ข้อมูลการบริโภคไฟฟ้า (Note: Industry includes manufacturing, mining, and construction, เหมืองแร่ และอุตสาหกรรม)

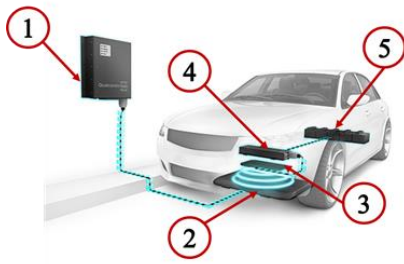
รูปที่ 1 การใช้พลังงานขั้นสุดท้ายจำแนกตามสาขาเศรษฐกิจ [1]

2. การโอนย้ายกำลังไฟฟ้าไร้สายในระบบยานยนต์ไฟฟ้า

เทคโนโลยีการโอนย้ายกำลังไฟฟ้าไร้สาย ระบบการชาร์จไร้สาย [2] ทำงานได้ด้วยการเหนี่ยวนำสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Induction) โดยต้องมีภาคส่งที่ต้องส่งสัญญาณออกมาในช่วงความถี่ (Frequency) ที่กำหนด โดยมีการกำหนดกำลังการส่ง (Power Transmitter) ที่เหมาะสมและต่อเนื่องรวมทั้งต้องมีวงจรควบคุมการส่งสัญญาณดังกล่าว ส่วนภาครับ (Receiver) ก็จะประกอบด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ เพื่อเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (Induction) มาแปลงเป็นกระแสไฟฟ้าโดยจะผ่านวงจรควบคุมและแปลงไฟฟ้าส่งเข้าไปชาร์จแบตเตอรี่



รูปที่ 2 วงจรทั่วไปของการโอนย้ายกำลังไฟฟ้าไร้สาย



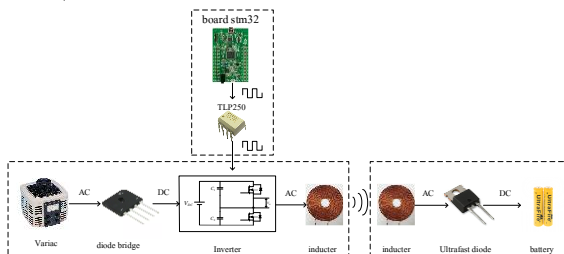
รูปที่ 3 โครงสร้างของการประจุแบตเตอรี่แบบไร้สายสำหรับสถานีประจุนยนต์ไฟฟ้า

จากรูปที่ 3 เป็นโครงสร้างของการประจุแบตเตอรี่แบบไร้สายสำหรับสถานีประจุนยนต์ไฟฟ้าซึ่งจะแสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ภายนอกดังนี้

- 1) Charging Controller
- 2) Transmitter pad
- 3) Receiver pad
- 4) System controller
- 5) Battery

3. การออกแบบชุดวงจรการประจุแบตเตอรี่แบบไร้สายสำหรับสถานีประจุนยนต์ไฟฟ้า

การส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย (Wireless Power Electrical Transfer) [3] อาศัยหลักการสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบด้วยชุดขดลวดตัวนำสองชุด ขดลวดชุด A รับพลังงานจากแหล่งจ่ายกระแสดังกล่าวจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ ขดลวดชุดดังกล่าว โดยขดลวดถูกออกแบบมาพิเศษเพื่อให้สนามแม่เหล็กดังกล่าวส่งผ่านอากาศไปได้ไกลที่สุด ขดลวดอีกชุด B ทำหน้าที่รับเส้นแรงแม่เหล็กที่ส่งผ่านมาทางอากาศแล้วเหนี่ยวนำเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าเพื่อป้อนให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้า[4]



รูปที่ 4 การออกแบบชุดวงจรการประจุแบตเตอรี่แบบไร้สาย

การออกแบบการพันขดลวดเป็นสิ่งที่สำคัญ รูปร่างของขดลวดแบบต่าง ๆ ทั้งวงกลม สี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้าพบว่า แบบวงกลม

จะได้ประสิทธิภาพสูงสุดขณะที่รูปร่างอื่นเกิดการสูญเสียที่มุมของขดลวด [5] ขดลวดเหนี่ยวนำแกนอากาศสามารถออกแบบได้จากสมการ

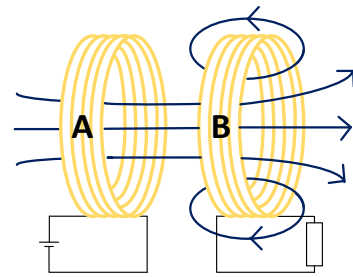
$$L = \frac{(d^2 \times n^2)}{(18d + 40l)} \quad (1)$$

เมื่อ L คือ ความเหนี่ยวนำ (μH)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด (inches)

l คือ ความยาวของขดลวด (inches)

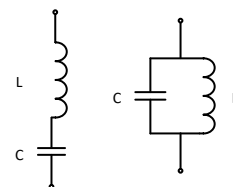
n คือ จำนวนรอบขดลวด



รูปที่ 5 การเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

วงจรเรโซแนนซ์เป็นวงจรผสมระหว่างตัวเก็บประจุกับขดลวดเหนี่ยวนำซึ่งมีความสำคัญในการใช้งานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยผลต่อสัญญาณกระแสสลับของขดลวดและตัวเก็บประจุซึ่งแตกต่างกัน ในทางตรงกันข้ามจะทำให้เกิดผลต่อแรงดันในกระแสตรง และกระแสสลับ ในลักษณะต่าง ๆ เช่น เกิดการจ่ายและรับกระแสให้ซึ่งกันและกันทำให้เกิดสัญญาณกระแสสลับที่คร่อมวงจรขึ้น เมื่อวงจรได้รับแรงดันกระแสตรงจะเกิดการต่อต้านและยอมให้สัญญาณกระแสสลับบางความถี่ผ่าน เป็นต้น [5]วงจรเรโซแนนซ์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

- 1) วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม
- 2) วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน



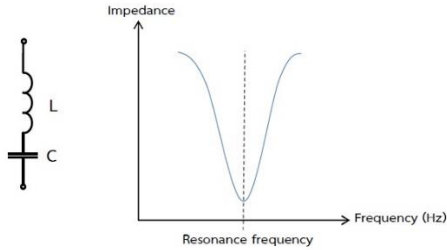
รูปที่ 6 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมและแบบขนาน

ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant frequency) ความถี่เรโซแนนซ์คือความถี่ที่ทำให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ สามารถทำได้โดยการปรับค่าความถี่ของแหล่งจ่ายแรงดันที่ความถี่ค่าหนึ่งทำให้ค่ารีแอคแตนซ์ $X_L = X_C$ ทำให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ $Z = R$ ส่งผลให้แรงดันและกระแสใน

วงจรมีเฟสตรงกันตัวคุณกำลังของวงจรมีค่าเป็นหนึ่งในตามทฤษฎี โดยความถี่เรโซแนนซ์สามารถคำนวณได้จาก

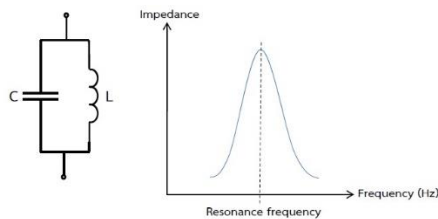
$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

ซึ่งสามารถแสดงผลต่อวงจรอาร์แอลซี (LC) แบบอนุกรม และแบบขนานได้ดังรูปที่ 7 และ รูปที่ 8



รูปที่ 7 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Series resonant)

ที่ความถี่ที่ทำให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ส่งผลให้ผลรวมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำและ ตัวเก็บประจุมีค่าเป็นศูนย์ ทำให้วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมอิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าต่ำสุดกระแสที่ไหลในวงจรจะมีค่าสูงสุด

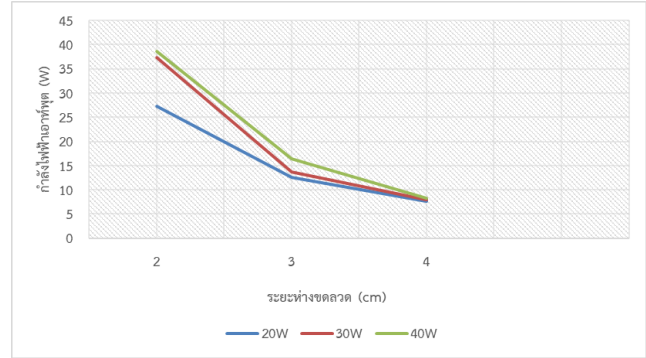


รูปที่ 8 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel resonant)

ที่ความถี่ที่ทำให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ส่งผลให้ผลรวมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำและ ตัวเก็บประจุมีค่าเป็นศูนย์วงจรเรโซแนนซ์แบบขนานอิมพีแดนซ์มีค่าสูงสุด กระแสที่ไหลในวงจรมีค่าต่ำสุดแต่มีค่าแรงดันตกคร่อมสูงสุด

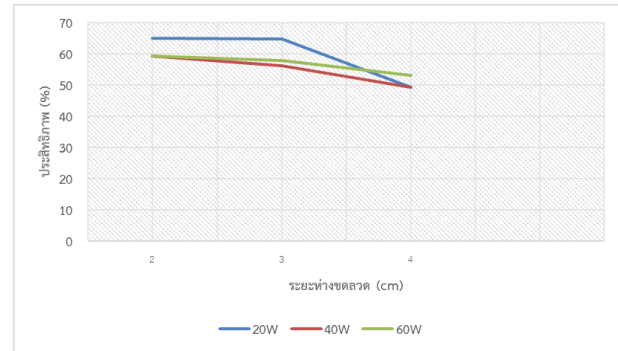
4. ผลการทดลอง

การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศ แบบไร้สาย ที่ระยะห่าง 2, 3 และ 4 เซนติเมตร ได้แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้า และประสิทธิภาพ ดังรูปที่ 9 และรูปที่ 10



รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตและระยะห่างระหว่างขดลวด

จากรูปที่ 9 จะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลดขนาด 20W, 40W และ 60W จะลดลงตามลำดับที่ระยะขดลวดที่ห่างออกไป



รูปที่ 10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและระยะห่างระหว่างขดลวด

จากผลการทดลองการประจุแบตเตอรี่แบบไร้สาย ในรูปที่ 10 จะเห็นได้ว่าที่ระยะ 2-3 เซนติเมตร ได้ค่าประสิทธิภาพจาก

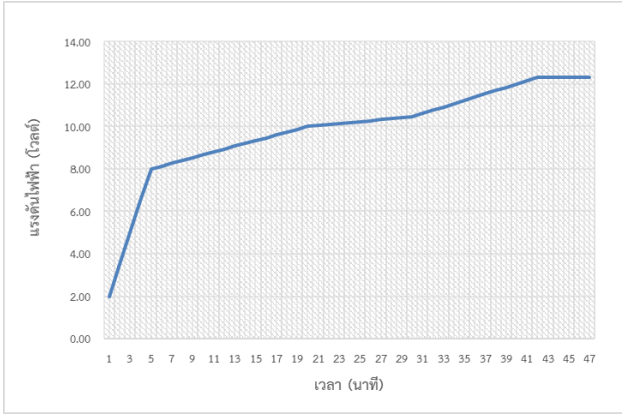
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ η คือ ประสิทธิภาพ

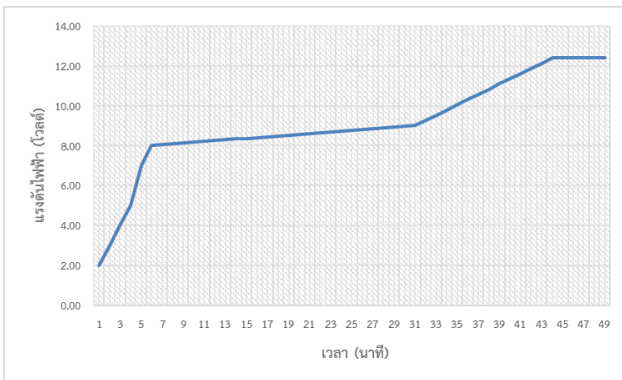
P_{out} คือ กำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุต

P_{in} คือ กำลังไฟฟ้าด้านอินพุต

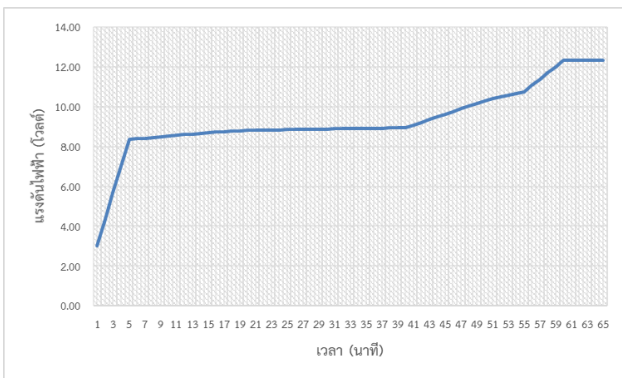
ในการใช้กำลังไฟฟ้าแต่ละค่าจาก 20 วัตต์ 30 วัตต์ และ 40 วัตต์ จะใช้เวลาในการประจุแบตเตอรี่ได้เร็วและมีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อเทียบกับระยะ 3-4 เซนติเมตร



รูปที่ 11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันในการประจุแบตเตอรี่
ในระยะ 1 cm



รูปที่ 12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันในการประจุแบตเตอรี่
ในระยะ 2 cm



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันในการประจุแบตเตอรี่ใน
ระยะ 3 cm

จากผลการทดลองการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย สัญญาณที่ได้จากการเรียงกระแสให้เป็นกระแสตรงเพื่อต่อเข้ากับโหลด กราฟจะเป็นเส้นตรง และเมื่อเปลี่ยนระยะห่างของขดลวดตัวรับให้ห่างออกไป กำลังไฟฟ้าที่ได้

นั้นจะมีค่าลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการส่งนั้นลดลงตามไปด้วย จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่ระยะห่างเท่ากับ 2 เซนติเมตร เป็นผลที่น่าพอใจที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระยะห่างอื่น ๆ

5. สรุป

จากการทดลองจะเห็นว่าค่ากำลังไฟฟ้าจะแปรผันตรงตามระยะทางที่ลดลงตามระยะของขดลวดที่ห่างออกไป และในขณะที่กำลังไฟฟ้าลดลงจะเห็นว่าค่าประสิทธิภาพก็จะลดลงตามไปด้วย ซึ่งในการทดสอบครั้งนี้มีตัวแปรที่สำคัญอยู่หลายส่วนคือ ความถี่เรโซแนนซ์ ขนาดตัวเก็บประจุ ขนาดตัวเหนี่ยวนำ และระยะห่างของขดลวดระหว่างขดส่งและขดรับจากการทดสอบที่ระยะห่าง 2 ถึง 4 เซนติเมตร พบว่าที่ระยะห่างต่างกันมีผลต่อประสิทธิภาพการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายอย่างมาก ซึ่งในขณะที่มีระยะห่าง 2 เซนติเมตร เป็นผลที่น่าพอใจที่สุดสำหรับการทดสอบนี้เพราะได้ประสิทธิภาพสูงกว่าระยะอื่น ในส่วนของแนวทางในการจัดทำโครงการประจุแบตเตอรี่แบบไร้สายสำหรับสถานีประจุนายนต์ไฟฟ้าพอที่จะเป็นแนวทางสำหรับผู้สนใจเพื่อที่จะนำแนวคิดของงานวิจัยชิ้นนี้ไปทำการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นจนอาจจะมีการนำมาประยุกต์หลักการทำงานเพื่อที่จะสามารถสร้างในระบบที่เหมาะสมกับการใช้งานในลักษณะต่าง ๆ ได้ ซึ่งอาจเป็นประโยชน์ในด้านของยานยนต์ไฟฟ้าและการใช้พลังงานทดแทนต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] ยศพงษ์ ลอนนวล และคณะ. “การศึกษาการพัฒนาของเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าและผลกระทบต่อเกิดขึ้นสำหรับประเทศไทย”, รายงานการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรม, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2558.
- [2] จิรวัดน์ ฉายแสงเจริญ. การประมาณประจุแบบออนไลน์ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสำหรับโหนดในระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ .2557
- [3] Zhenshi Wang, Xuezhe Wei “ Design Considerations for Wireless Charging Systems with an Analysis of Batteries” Energies 2015, 8, 10664-10683.
- [4] Kim, J.; Son, H.C.; Kim, D.H.; Park, Y.J. “Optimal design of a wireless power transfer system with multiple self-resonators for an LED TV” IEEE Trans. Consum. Electron. 2012, 58, 775–780.
- [5] Kraisorn Throngnumchai, Akihiro Hanamura, Yuji Naruse, Kazuhiro Takeda. “Design and Evaluation of a Wireless Power Transfer System with Road Embedded Transmitter Coils for Dynamic Charging of Electric Vehicles”

การควบคุมอัตโนมัติสำหรับใบเบลดแบบปรับมุมได้

The Automatic Control for Angle-adjustable Blade

พิพัฒน์ ปราโมทย์* วินัย จันทรเพ็ญ ปณณธร ศลิษฐ์ธนวัฒน์ ประเสริฐ หาขานนท์ อภิชาติ ไชยขันธุ์
สุเทพ วัชรารังวิทย์ สำรวม โกศลานันท์ ณัฐสิทธิ์ พัฒนะอ้อม นพพร เปรมใจ
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
E-mail: pipat.p@en.rmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา ออกแบบ และสร้างชุดควบคุมอัตโนมัติสำหรับใบเบลดแบบปรับมุมได้ เพื่อที่จะไปประยุกต์ใช้สำหรับระบบไฮดรอลิกส์ในรถแทรกเตอร์ โดยการควบคุมอัตโนมัติจะสามารถรักษาระดับแนวระนาบของใบเบลดด้วยการปรับองศาความเอียงของใบในแต่ละทิศทาง ซึ่งการควบคุมองศาอัตโนมัติจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ ระบบควบคุมการทำงานแบบพีไอดี (PID - controller) และระบบควบคุมการทำงานแบบฟuzzy ลอจิก (FUZZY Logic - controller)

การทดลองแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ 1) การทดลองบนซิมูเลชันโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ในการจำลองการทำงานของระบบเพื่อหาระยะเวลาการเข้าสู่แนวระนาบของระบบควบคุมอัตโนมัติแบบพีไอดี และแบบฟuzzy ลอจิก และ 2) การทดลองกับระบบควบคุมอัตโนมัติที่ออกแบบและสร้างขึ้นสำหรับใช้ควบคุมใบเบลด เพื่อหาค่าความแม่นยำและระยะเวลาในการเข้าสู่แนวระนาบของใบเบลด โดยมีการเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมพีไอดี และการควบคุมแบบฟuzzy ลอจิก

ผลการทดลองพบว่า การควบคุมอัตโนมัติทั้งสองลักษณะ ให้ค่าระยะเวลาการเข้าสู่แนวระนาบอยู่ที่ต่ำกว่า 4 วินาที ผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบพีไอดี จะมีการเกิดโอเวอร์ชูท (Overshoot) ก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยไม่เกิดความคลาดเคลื่อนในการควบคุมสำหรับการเปลี่ยนแปลงในทุกองศา ส่วนระบบควบคุมแบบฟuzzy ลอจิก แม้จะไม่เกิดอาการโอเวอร์ชูทแต่จะเกิดค่าการคลาดเคลื่อนในการควบคุม

คำสำคัญ: ใบเบลด ปรับมุมอัตโนมัติ ระบบควบคุมอัตโนมัติ

1. บทนำ

ในปัจจุบันงานทางด้านเกษตรกรรมจำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องจักรกลเข้ามามีส่วนร่วมในการทำงาน แทรกเตอร์ (tractor) นับว่ามีบทบาทอย่างยิ่งต่อการเกษตรกรรมในปัจจุบัน ทั้งนี้เพราะแทรกเตอร์มีความสามารถในการทำงานได้อย่างกว้างขวาง ในปัจจุบันแทรกเตอร์ได้ถูกออกแบบให้สามารถใช้งานบนดินโดยใช้ใบเบลดที่ใช้ในการปรับหน้าดิน ซึ่งขณะที่รถเคลื่อนที่ ตัวรถไม่ได้อยู่ในระนาบเดียวกันตลอดเวลา จึงส่งผลให้หน้าดินที่ทำการปรับไม่ได้รับนาตามต้องการ

ดังนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้ใบเบลดเอียงตามรถแทรกเตอร์ในขณะที่เคลื่อนที่อันเนื่องมาจากสภาพหน้าดินที่ขรุขระ เป็นหลุมเป็นบ่อ มีความลาดเอียงซ้าย/ขวา งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบระบบควบคุมใบเบลดรักษาความเสถียรโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีและฟuzzy ลอจิก และนำข้อมูลที่ได้ออกมาจากระบบควบคุมแผ่นรักษาความเสถียรดังกล่าวมาพัฒนาระบบควบคุมใบเบลดรักษาความเสถียรในแทรกเตอร์ให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นต่อไป

2. กระบวนการ

2.1 ทบทวนวรรณกรรม

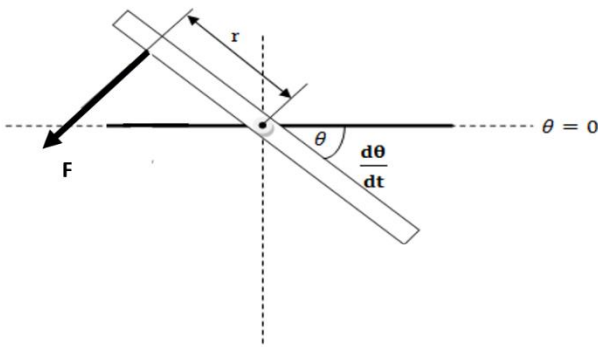
William Wamjohi [1] จาก Swarthmore College ได้ทำการวิจัยเรื่อง Ball and Beam Control Demonstrator ซึ่งเป็นการควบคุมลูกบอลโดยการหารูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์โดยการมองเห็นงานเข้าไปในแบบสองมิติเพื่อทำการหาแรงและองค์ประกอบต่างๆที่กระทำกับชิ้นงานและการเขียนโปรแกรมด้วย Simulink

Mark Readman [2] จาก princeples.co.uk ได้ทำการวิจัยเรื่อง Robust Control เป็นการวิจัยโดยใช้การควบคุมแบบโรบัสต์และทำการซิมูเลชันโดยใช้โปรแกรม MathLab

Ismail H.Altas [3] จาก Karadinis Technical University ได้ทำการวิจัยเรื่อง Ball and Beam เป็นการหาสมการการเคลื่อนที่และบ่งบอกถึงแนวคิดในการมองโมเดลในรูปแบบสองมิติและแสดงวิธีการเขียนสมการการเคลื่อนที่ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) และนำมาทำวิธี เสตรท สเปซ (State Space Equation) โดยกำหนดตำแหน่งจุดหมุนของคานอยู่ที่ปลายสุดและรักษาสถิตของคานให้ได้ตามแนวระนาบ ซึ่งวิธีการหารูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์นี้เป็นแนวทางเดียวกันกับงานวิจัยนี้ จึงควรที่จะศึกษาแนวคิดในการสร้างรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์

N. N. Aziz, M. I. Yusoff และ R Akmeliawati [4] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมความเสถียรในลักษณะ 2DOF ซึ่งใช้หลักการทางพีชคณิตเข้ามาคำนวณในระบบการควบคุมแบบพีดแบ็ค หลักการออกแบบระบบควบคุมจะใช้การออกแบบโดยขึ้นอยู่กับ pole และ integral time absolute error (ITAE)

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การเคลื่อนที่



รูปที่ 1 แผ่นรักษาความเสถียรเมื่อมองในรูปแบบสองมิติ

การพิจารณาแผ่นรักษาความเสถียรในรูปที่ 1 จะต้องพิจารณาแบบสองมิติและจะต้องพิจารณาสองครั้งคือพิจารณาแผ่นรักษาความเสถียรด้าน X และแผ่นรักษาความเสถียรด้าน Y อย่างละครั้ง โดยพิจารณาตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของแผ่นรักษาความเสถียร ดังต่อไปนี้

- L = ความยาวของแผ่นรักษาความเสถียร
- c = ค่าความฝืดของจุดหมุน
- r = ระยะจากแรงที่กระทำกับแผ่นระนาบถึงจุดหมุน
- F = แรงผลักที่กระทำกับแผ่นรักษาความเสถียร

การทำแผ่นรักษาความเสถียรให้ขนานกับแกน (parallel) ซึ่งต้องใช้ทฤษฎีของการหมุน (moment of inertia) แล้วนำมาเขียนเป็นสมการการเคลื่อนที่ของระบบจะได้สมการดังนี้

$$\sum M = J\ddot{\theta} \tag{1}$$

$$Fr - c\dot{\theta} = J\ddot{\theta} \tag{2}$$

$$\frac{L}{r}\ddot{\theta} + \frac{c}{r}\dot{\theta} = F \tag{3}$$

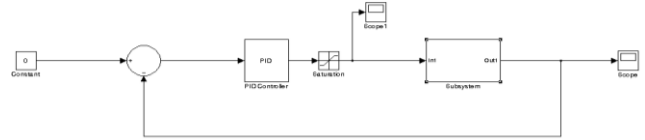
โดยจะค่า $\ddot{\theta}$ จะได้สมการที่ (3)

$$\ddot{\theta} = \frac{r}{J}F - \frac{c}{J}\dot{\theta} \tag{4}$$

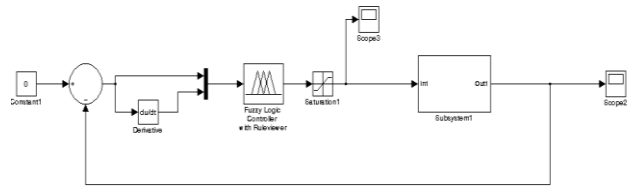
ดังนั้น จะได้สมการที่ (3) ซึ่งเป็นสมการการเคลื่อนที่ของแผ่นระนาบที่ใช้สำหรับแกน X และในทำนองเดียวกันเมื่อต้องการหาสมการการเคลื่อนที่ของแผ่นรักษาความเสถียรที่ใช้สำหรับแกน Y ก็สามารถทำได้โดยใช้สมการเดียวกับที่ใช้สำหรับแกน X

2.3 โปรแกรมควบคุมอัตโนมัติ

โปรแกรมควบคุมการระดับอัตโนมัติของใบเบลตสามารถแบ่งออกเป็นโปรแกรมย่อยได้สองโปรแกรม คือ โปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงานแบบ พีไอดี และพีซี ลอจิก ดังรูปที่ 2 และ 3



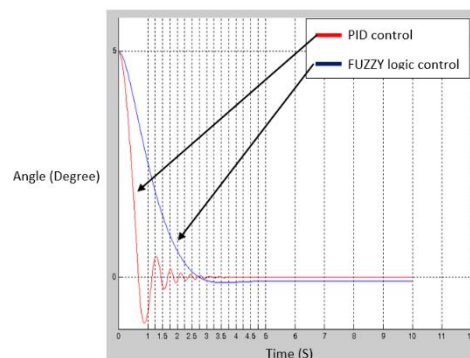
รูปที่ 2 โปรแกรมตัวควบคุมแบบพีไอดี



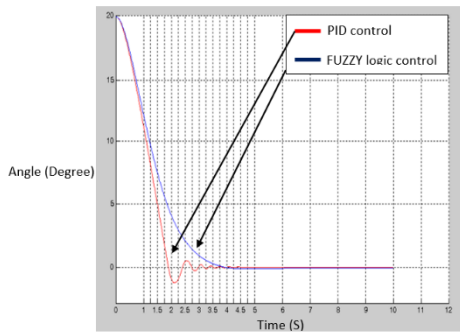
รูปที่ 3 โปรแกรมตัวควบคุมแบบพีซี ลอจิก

2.4 ผลการทดลอง

การทดลองในส่วนนี้ เป็นการจำลองการควบคุมระดับในการเคลื่อนที่ของใบเบลต โดยแสดงผลในรูปแบบของกราฟพุ่มซึ่งมีหน่วยเป็นองศา เทียบ กับเวลาซึ่งมีหน่วยเป็นวินาที โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4 และ 5 แสดงถึงลักษณะการเกิดโอเวอร์ชูทในการควบคุมแบบ PID ในขณะที่การควบคุมแบบ Fuzzy จะเกิดค่าความเคลื่อนหลังจากเข้าแนวระนาบกำหนดไว้ในทุกๆองศาการควบคุม โดยทั้งสองระบบจะเข้าสู่ค่าที่กำหนด ในเวลาดำกว่า 4 วินาที

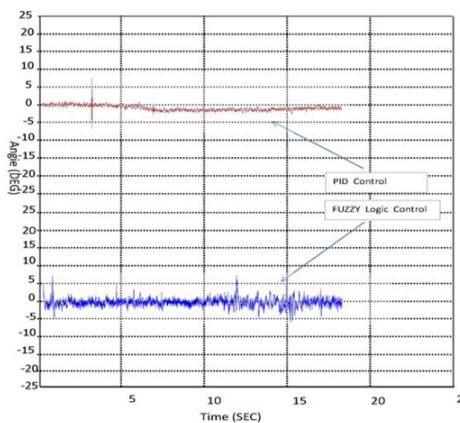


รูปที่ 4 ผลการซิมูเลชั่นที่ 5 องศา

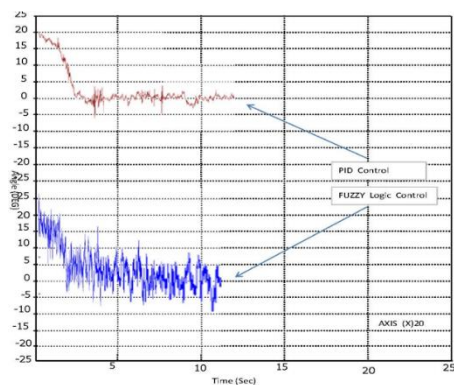


รูปที่ 5 ผลการซิมูเลชันที่ 20 องศา

การทดลองในส่วนนี้ เป็นการควบคุมระบบไฮดรอลิกส์ที่ใช้ควบคุมระดับในการเคลื่อนที่ของใบเบลตโดยบังคับให้อยู่ในแนวระนาบ โดยแสดงผลในรูปแบบของกราฟแสดงลักษณะของสัญญาณควบคุมก่อนและหลังเข้าสู่ค่าที่กำหนด โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6 และ 7 แสดงถึงลักษณะการเกิดสัญญาณรบกวนและความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยสำหรับการควบคุมแบบ PID ในขณะที่การควบคุมแบบ Fuzzy จะเกิดสัญญาณรบกวนและค่าความคลื่อนมากขึ้นตามมุมที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 6 ผลการควบคุมการทำงานเบลตที่ 5 องศา



รูปที่ 7 ผลการควบคุมการทำงานเบลตที่ 20 องศา

3. สรุป

ในการควบคุมอัตโนมัติทั้งสองลักษณะ ให้ค่าระยะเวลาการเข้าสู่แนวระนาบอยู่ที่ต่ำกว่า 4 วินาที ผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบฟuzzy จะมีการเกิดโอเวอร์ชูท (Overshoot) ก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยไม่เกิดความคลาดเคลื่อนในการควบคุมสำหรับการเปลี่ยนแปลงในทุกองศา ทั้งในส่วนของการซิมูเลชันและการควบคุมการทำงานจริงนั้น ถึงแม้ว่าระบบควบคุมแบบฟuzzy ลอจิก จะไม่เกิดอาการโอเวอร์ชูท แต่ผลของการควบคุมจะเกิดการคลาดเคลื่อนของมุมในการควบคุมเมื่อเปลี่ยนแปลงองศา มากกว่า 20 องศา และจะมีลักษณะของสัญญาณรบกวนและค่าความคลื่อนของมุมที่ควบคุมมากกว่าการควบคุมแบบฟuzzy

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ฝ่ายวิจัยและบริการวิชาการของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ในการให้การสนับสนุนในทุกขั้นตอนของการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Wamjohi , W. and Cheever ,E., Ball and beam control theory demonstrator ,senior design ,swartmore college , 2005
- [2] Goodwin , C ., Graebe ,F and Salgado M.E ., control system design . prentice hall , 2001.
- [3] Ismail, H. Altas, Ball and beam ELK 5320 neuro FUZZY system , electrical and electronic engineering , faculty of engineering , Karadiniz technical university , 2007.
- [4] N. N. Aziz, M. I. Yusoff, and R Akmeliawati; “Two Degree of freedom Control of Ball and Beam System” IOP Conference series: 5th international conference on mechatronics, 2013, pp: 1-12.

การศึกษาผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากผลของอุณหภูมิแผง Study of Temperature Effect on PV Output Voltage in a PV Power Plant

เกียรติศักดิ์ พรรณจำปา รุ่งเพชร ก่องนอก และ บุญยัง ปลั่งกลาง
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
E-mail: boonyang.p@en.mutt.ac.th

GE10

บทคัดย่อ

บทความนี้ นำเสนอการศึกษาถึงผลกระทบจากอุณหภูมิแผงโซลาร์เซลล์ ที่ส่งผลต่อการแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ผลิตได้ ในบทความนี้ ข้อมูลที่นำเสนอเป็นข้อมูลจริงที่เก็บจากโรงไฟฟ้า มีค่า อุณหภูมิแผงแรงดันไฟฟ้าที่ได้ กระแสไฟฟ้า โดยข้อมูลเฉลี่ยรอบวัน พบว่า ระบบจะเริ่มผลิตไฟฟ้า ตั้งแต่มีแสงกระทบแผงโซลาร์เซลล์ จนกระทั่งถึงไม่มีแสงตกกระทบ จากการศึกษาพบว่า แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์น้อยลงเมื่ออุณหภูมิแผงโซลาร์เซลล์มีค่าสูงขึ้นเฉลี่ย 0.7%

คำสำคัญ: การผลิตไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์, โซลาร์เซลล์ , ผลอุณหภูมิต่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

1. บทนำ

ประเทศไทย เป็นประเทศที่มีศักยภาพด้านพลังงานแสงอาทิตย์ โดยมีค่าพลังงานจากดวงอาทิตย์เฉลี่ยรังสีจากดวงอาทิตย์สูงสุดระหว่างเดือนเมษายน และพฤษภาคม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 5.56-6.67 kWh/m² [1] ต่อวัน การพลังงานดังกล่าวมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา เป็นจังหวัดที่อยู่ในพื้นที่ภาคกลางของประเทศไทย มีค่าพลังงานที่ได้จากดวงอาทิตย์ได้รับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปี 5.28-5.56 kWh/m² ต่อวัน ในบทความนี้ คณะวิจัยได้ทำการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิแผงโซลาร์เซลล์ ที่มีผลกระทบต่อแรงดันไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยทำการศึกษาในพื้นที่ดังกล่าว ซึ่งมีศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์ที่สูงใกล้เคียงกับค่าพลังงานเฉลี่ยของโลก

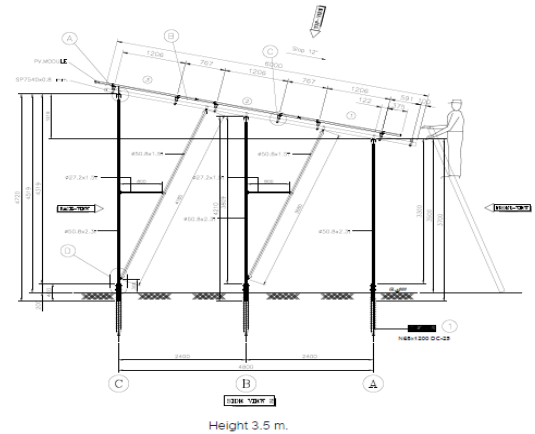
2. การดำเนินงาน

2.1 พื้นที่ดำเนินการ

พื้นที่อำเภอบางปะอิน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ซึ่งตั้งอยู่ในภาคกลางของประเทศไทย โดยมีพิกัดที่ ละติจูด 14.289878 องศาเหนือ และลองจิจูด 100.599028 องศา ได้ ซึ่งพื้นที่ของอำเภอบางปะอิน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา มีโรงไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ กระจายอยู่ทั่วทั้งจังหวัด ดังนั้นคณะวิจัยจึงเลือกพื้นที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา เป็นพื้นที่ในการดำเนินงานเก็บข้อมูล เพื่อทำการวิจัยในส่วนนี้

2.2 การติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์

โครงสร้างสำหรับการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ สำหรับโครงการโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ วัดมุมเอียงแผงโซลาร์เซลล์ 12 องศาจากแนวราบเนื่องจาก เป็นมุมแสงตกกระทบแผง โซลาร์เซลล์ออกแบบตามพื้นที่ติดตั้ง และความสูงจากพื้นถึงปลายแผงโซลาร์เซลล์ 3.50 เมตร



รูปที่ 1 โครงสร้างสำหรับการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์[2]

2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

บทความนี้ให้ความสนใจ และขอนำเสนอเฉพาะที่เกิดผลกระทบโดยตรงสำหรับการผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์โดยตรง ได้แก่ แผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้งานอยู่ เป็นของ บริษัท เจเอโซลาร์ จำกัด โดยมีรายละเอียดของแผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้ แสดงในตารางที่ 1 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 1 รายละเอียดค่ามาตรฐานแผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้ในการทดสอบ

ลำดับ	รายละเอียดแผงโซลาร์เซลล์ STC รุ่น JAM6(K) -72-330/4BB	พิกัด
1	แรงดันเริ่มทำงาน (Vmp)	38.60 V
2	กระแสเริ่มทำงาน (Imp)	8.55 A
3	แรงดันขณะเปิดวงจร (Voc)	47.13 V
4	กระแสขณะลัดวงจร (Isc)	9.14 A
5	ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (Pmax)	330W

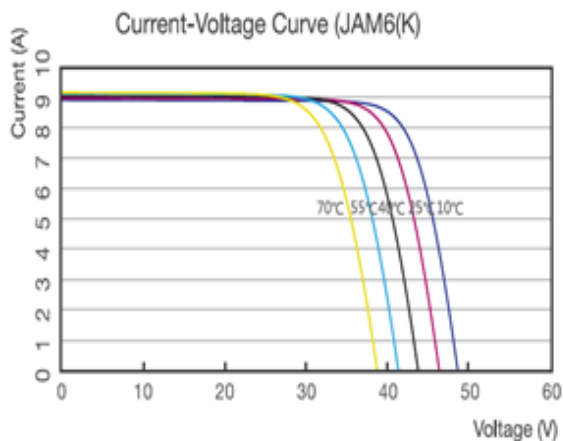
6	ประสิทธิภาพของแผง	17.02%
7	อุณหภูมิทำงานของแผง	-40 °C ถึง +85 °C
8	ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังไฟฟ้า	-0~+5W

หมายเหตุ STC: ที่อุณหภูมิแผงทำงาน 25 °C ค่าความเข้มแสงพลังงานจากดวงอาทิตย์ 1,000 W/m²

ตารางที่ 2 รายละเอียดค่าอุณหภูมิใช้งานแผงโซลาร์เซลล์ อุณหภูมิโดยรอบที่ 20 °C

ลำดับ	รายละเอียดแผงโซลาร์เซลล์ NOCT รุ่น JAM6(K)-72-330/4BB	พิกัด
1	แรงดันทำงาน (Vmp)	34.31 V
2	กระแสเริ่มทำงาน (Imp)	7.03 A
3	แรงดันขณะเปิดวงจร (Voc)	42.68 V
4	กระแสขณะลัดวงจร (Isc)	7.38 A
5	ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (Pmax)	241.23W
6	ประสิทธิภาพของแผง	17.02%
7	อุณหภูมิทำงานสูงสุดของแผง	-40 °C ถึง +85 °C
8	ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังไฟฟ้า	+/- 2°C

หมายเหตุ NOCT: ที่อุณหภูมิแวดล้อมทำงาน 200 °C ค่าความเข้มแสงพลังงานจากดวงอาทิตย์ 800 W/m²



รูปที่ 2 คุณลักษณะของแผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้งาน [3]

กราฟคุณสมบัติของแผงโซลาร์เซลล์ ยี่ห้อ JA Solar ขนาดพิกัดที่ 330 วัตต์ รุ่น JAM6(K)-72-330/4BB ที่ใช้ในการทดสอบและเปรียบเทียบจำนวน 4 ชุด จำนวนชุดละ 20 แผงต่ออนุกรม รวมแผงทดสอบทั้งหมด 80 แผง เพื่อให้เห็นอุณหภูมิรอบโรงไฟฟ้า มีผลกระทบต่อแรงดันไฟฟ้า

2.4 การดำเนินการทดสอบ

ขั้นตอนการดำเนินงานทดลอง ทีมวิจัยติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ทั้งหมด 80 แผง โดยแบ่งการต่อ อนุกรม 20 แผง ทั้งหมด 2 ชุด โดยการปลดวงจรออกทั้งหมด เนื่องจากการวัดทดสอบ ระบบโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแผงโซลาร์เซลล์ เพื่อบันทึกผล โดยทำการทดลองเป็นเวลา ทุกๆ 1 ชั่วโมง เริ่มต้นตั้งแต่ เวลา 10.00 น. จน ถึง เวลา 13.00 น. เพื่อนำผลที่ได้ ไปเปรียบเทียบ โดยใช้วิธีการฉีบน้ำหน้าแผงโซลาร์เซลล์ เพื่อลดอุณหภูมิแผงโซลาร์เซลล์จำนวน 40 แผง เท่ากับ 2 ชุด ดังรูปที่ 3 เปรียบเทียบกับ แผงโซลาร์เซลล์ 40 แผง เท่ากับ 2 ชุด



รูปที่ 3 การทดสอบลดอุณหภูมิแผงโซลาร์เซลล์ 40 แผง [4]



รูปที่ 4 การบันทึกผลการทดสอบ [4]

2.5 ผลการทดสอบเขียนสมการ

จากการทดลอง การฉีบน้ำหน้าแผงโซลาร์เซลล์ เพื่อลดอุณหภูมิแผงโซลาร์เซลล์จำนวน 40 แผง เพื่อลดอุณหภูมิ โดยทำการเปรียบเทียบกันระหว่าง 40 แผง ที่ไม่มีการฉีบน้ำผลการทดสอบพบว่า การฉีบน้ำสามารถช่วยลดอุณหภูมิแผงโซลาร์เซลล์ที่ทดสอบได้ และยังสามารเพิ่มแรงดันไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นด้วยดังแสดงในตาราง ที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบการลดอุณหภูมิแผงโซลาร์เซลล์

วันศุกร์ที่ 17 มีนาคม 2017					
		แผงโซลาร์เซลล์		ทดสอบฉีดน้ำหน้าแผง	
เวลา	ความเข้มแสง	จุดที่1		จุดที่2	
	[W/m ²]	อุณหภูมิแผง	แรงดัน (Vdv)	อุณหภูมิแผง	แรงดัน (Vdv)
10.00 น.	813.49	53	808.31	44.8	823.78
11.00 น.	927.9	53.9	803.97	52.6	807.91
12.00 น.	972.31	51.9	804.35	48.4	808.31
13.00 น.	898.77	52	807.94	50.8	811.59
14.00 น.	853.56	51.2	817.7	48.5	822.51
15.00 น.	727.42	45.8	817.96	42.7	820.22

โดยการทดสอบ ระบบจำนวน 800 แผงได้แรงดัน 815.2 โวลต์ ดีซี และถ้าคิดเป็นพลังงานที่ได้เพิ่มขึ้นจากการทดสอบทั้งหมดในระยะเวลา 1 วัน (กระแสเริ่มทำงาน (Imp) เท่ากับ 8.55แอมป์) รวม 243 วัตต์ ใช้ระยะเวลาทดสอบ และเป็นตามความสัมพันธ์ประสิทธิภาพการทำงานของแผงโซลาร์เซลล์ดัง สมการ

$$\text{แรงดันเปิดวงจร } Voc_max = Voc_stc \times [1 + (\gamma \times (T_{cell_low} - T_{stc}))] \quad (1)$$

เมื่อ Voc_max คือ แรงดันเปิดวงจรสูงสุดของโซลาร์เซลล์ที่อุณหภูมิต่ำสุดของพื้นที่หน่วยเป็น, โวลต์ Volt:V
 Voc_stc คือ แรงดันไฟฟ้าสูงสุดเมื่อเกิดการเปิดวงจร หน่วยเป็น, โวลต์ Volt:V
 γ คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแรงดันเปิดวงจร (Temperature Coefficient of Voc) หน่วยเป็น, %/°C
 T_{cell_low} คือ อุณหภูมิต่ำสุดของพื้นที่ติดตั้ง หน่วยเป็น องศาเซลเซียส, Celsius: °C
 T_{stc} คือ อุณหภูมิตามคุณสมบัติผู้ผลิตที่ติดตั้ง หน่วยเป็น องศาเซลเซียส, Celsius: °C

3. สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาและทดสอบ อุณหภูมิแผงโซลาร์เซลล์ มีผลต่อผลกระทบต่อแรงดันไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ การฉีดน้ำเพื่อลดอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแรงดันที่ได้จากโซลาร์เซลล์น้อยลงจาก

อุณหภูมิปกติ ทำให้เกิดความสูญเสียพลังงาน จากอุณหภูมิการทำงาน ดังนั้น ผลการทดสอบ การลดอุณหภูมิ การทำงานของโซลาร์เซลล์ ช่วยให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 0.7% และทำความสะอาดแผงพร้อมทั้งลดอุณหภูมิแผงโซลาร์เซลล์ จากการทดสอบในโครงการโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน อำเภอบางปะอิน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา และใช้น้ำฉีดหน้าแผงโซลาร์เซลล์ ทำให้เกิดผลกระทบต่อผิวหน้าโซลาร์เซลล์ ให้เกิดคราบน้ำเกาะผิวหน้าอันเนื่องมาจากแร่ธาตุในน้ำที่มาทดสอบระบบ และ ใช้ปริมาณน้ำมากจนเกินความจำเป็นจากการทดสอบในช่วงระยะเวลา ดังนั้นการใช้น้ำที่เหมาะสมและการลดอุณหภูมิให้โซลาร์เซลล์วิธีอื่นก็จะช่วยลดพลังงานสูญเสียได้

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ข้อมูลจาก บริษัท บางจาก โซลาร์เอ็นเนอร์ยี (ปราจีนบุรี) จำกัด, ศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (ศทอ.) และ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พร้อมทั้งอาจารย์ทุกท่าน เป็นอย่างสูง

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] แผนที่พลังงานของประเทศไทย <http://solar-point.blogspot.com/2015/11/Solar-energy.html> สืบค้นเมื่อ 25 มีนาคม 2560
- [2] โครงสร้าง โครงการ บริษัท บางจากโซลาร์เอ็นเนอร์ยี (ปราจีนบุรี) จำกัด
Bangchak Solar Energy (Prachin Buri) Co.,Ltd. 99/1 Moo 9 Bang krasan Sub District, Bang Pa-In District, PhraNakorn Si Ayutthaya 13160 PV Power Plant Bang Pa-In (5MW) สืบค้นเมื่อ 19 เมษายน 2560
- [3] คุณลักษณะของแผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้ งาน [http://www.jasolar.com/uploads/JAM6\(K\)%2072%20320-340%204BB.pdf](http://www.jasolar.com/uploads/JAM6(K)%2072%20320-340%204BB.pdf) สืบค้นเมื่อ 19 เมษายน 2560
- [4] การทดสอบลดอุณหภูมิแผงโซลาร์เซลล์ 40 แผง
Bangchak Solar Energy (Prachin Buri) Co.,Ltd. 99/1 Moo 9 Bang krasan Sub District, Bang Pa-In District, PhraNakorn Si Ayutthaya 13160 PV Power Plant Bang Pa-In (5MW) สืบค้นเมื่อ 19 เมษายน 2560
- [5] การบันทึกผลการทดสอบ
Bangchak Solar Energy (Prachin Buri) Co.,Ltd. 99/1 Moo 9 Bang krasan Sub District, Bang Pa-In District, PhraNakorn Si Ayutthaya 13160 PV Power Plant Bang Pa-In (5MW) สืบค้นเมื่อ 19 เมษายน 2560

วงจรมูลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า Electric Modeling of Lithium-Ion Battery for Electric Vehicle

ยุทธนา อุดมผุย ณ์รัฐพงษ์ ศรีสวัสดิ์ ประภาศิต ปราบพาล และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์*
ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
E-mail: krischonme.b@en.rmutt.ac.th*

GE11

บทคัดย่อ

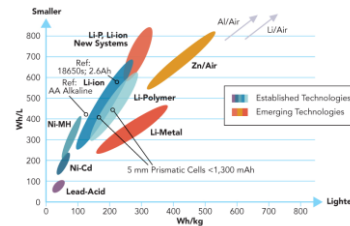
บทความนี้นำเสนอวงจรมูลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเป็นที่นิยมใช้มากในรถยนต์ไฟฟ้าปัจจุบัน แต่ปัญหาการใช้แบตเตอรี่ในรถยนต์ไฟฟ้า คือ อายุการใช้งานอันเนื่องมาจาก อัตราการอัดประจุ การคายประจุ ของแบตเตอรี่ และผลของอุณหภูมิ งานวิจัยนำเสนอวิธีการเพื่อหาค่าตัวแปรทางไฟฟ้า โดยอาศัยองค์ประกอบพื้นฐานของแบตเตอรี่ เพื่อหาค่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อสมการการอัดประจุและสถานะการคายประจุ โดยใช้วิธีการการศึกษาวงจรมูลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนด้วยการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ และการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา ผลที่ได้จากการวิจัยทำให้ทราบค่าตัวแปรที่เกิดขึ้นจากผลการอัดและคายประจุ เพื่อนำค่าตัวแปรทั้งหมดมาวิเคราะห์เพื่อใช้งานจริงกับโหลดยานยนต์ไฟฟ้าต่อไป

คำสำคัญ: แบบจำลอง, แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน, รถยนต์ไฟฟ้า

1. บทนำ

ปัญหาสิ่งแวดล้อมและมลภาวะจากการขยายตัวของเศรษฐกิจ ความต้องการการใช้เชื้อเพลิงจากแหล่งฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ ในประเทศไทย มีการขยายตัวเพิ่มปริมาณการใช้ซึ่งมีนัยสำคัญ ทั้งด้านอุตสาหกรรม การสื่อสาร การคมนาคม และการขนส่ง [1] เลื่อนเป็นปัจจัยการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นส่งผลต่อปัญหาการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีผลต่อวิกฤตสถานะโลกร้อน การใช้พลังงานทดแทนเพื่อลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงจากแหล่งฟอสซิลในภาคการคมนาคมและการขนส่งโดยการใช้เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าที่เน้นการใช้พลังงานสะอาดเป็นแหล่งต้นกำลังหลักในการขับเคลื่อนแหล่งพลังงานดังกล่าวคือแบตเตอรี่

แบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าแบ่งออกเป็นประเภทต่าง ๆ [2] ตั้งแต่แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด (lead-acid battery) แบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียม (Ni-Cd battery) แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮดรอกไซด์ (Ni-Mh battery) แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Li-ion battery) สมบัติของแบตเตอรี่ประเภทต่าง ๆ ด้านค่าความหนาแน่นพลังงานและพลังงานจำเพาะดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ความหนาแน่นพลังงานและพลังงานจำเพาะของแบตเตอรี่ชนิดต่าง ๆ [2]

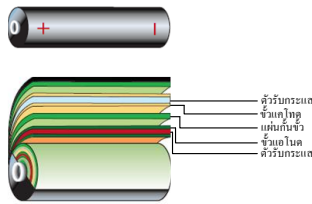
แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีคุณสมบัติการกักเก็บพลังงานจำเพาะสูงเนื่องจากมีน้ำหนักเบา สมรรถนะของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนขึ้นกับวัสดุที่ใช้ทำขั้วแบตเตอรี่และการออกแบบแบตเตอรี่ประเภทนี้ประกอบด้วยขั้วบวกที่ทำจากลิเทียมเมทัลออกไซด์ (LiMO₂) และขั้วลบที่เป็นคาร์บอนและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เป็น LiPF₆ เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบาและสามารถใช้งานได้หลายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พกพา เช่น โทรศัพท์มือถือ แลปทอปคอมพิวเตอร์ ในด้านการวิจัยด้านยานยนต์ไฟฟ้ามีการใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจากบริษัทผู้ผลิตรายต่าง ๆ ในส่วนนี้ ดังนั้นความสำคัญของการวิจัยแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน เพื่อทราบคุณลักษณะสำคัญ ทางเคมี และคุณลักษณะทางไฟฟ้า เพื่อนำคุณลักษณะดังกล่าวมาใช้ในระบบยานยนต์ไฟฟ้า ผู้วิจัยทำการวิจัยด้านคุณลักษณะทางไฟฟ้า ปัจจัยสำคัญของการใช้งานแบตเตอรี่มีการอัดประจุ (State of Charge) การคายประจุ (Depth of Discharge) ซึ่งปัจจัยดังกล่าวมีผลกระทบต่อสถานะภาพของแบตเตอรี่ (State of Health)

อัตราการอัดและคายประจุนั้นจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงวงจรมูลภายในของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ในสภาวะการใช้กับยานยนต์ไฟฟ้าผู้วิจัยมีการวิเคราะห์ทางจรมูลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบพลวัต ทดสอบให้เหมาะสมกับงานด้านยานยนต์ไฟฟ้าและเป็นแนวทางในการหาค่าด้านคุณลักษณะทางไฟฟ้า ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนให้เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้งาน เพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติและการบอกอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนต่อไป

2. ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ 4 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 2 คือ[3]

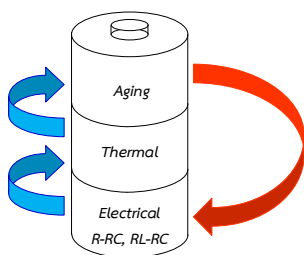
1. ขั้วไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย ขั้วแคโทด (Cathode) และขั้วแอโนด (Anode)
2. แผ่นกั้นในแบตเตอรี่ (Separator) เป็นส่วนที่ป้องกันไม่ให้ขั้วแคโทดสัมผัสกันกับขั้วแอโนดสัมผัสกับขั้วแอโนดจนเกิดการลัดวงจรของกระแส
3. อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ซึ่งเป็นสารละลายที่มีเกลือของลิเทียมผสมอยู่ เป็นตัวนำที่ยอมให้อิออนไหลผ่านแต่ไม่ยอมให้อิเล็กตรอนไหลผ่านจึงเป็นตัวนำไอออนที่ดีแต่เป็นตัวนำอิเล็กตรอนที่เลวและสำหรับขั้วแคโทดในปัจจุบัน ซึ่งประกอบด้วย 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ วัสดุประเภทเลเยอร์ (Layered Structure, $LiMO_2$) เช่น $LiCoO_2$, $LiNiO_2$, $LiCo_{1/3}$
4. ตัวนำกระแส (Current Collector) หรือโลหะตัวนำที่ทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนไหลผ่านออกสู่วงจรภายนอก และเกิดการนำไฟฟ้าไปใช้งาน



รูปที่ 2 ส่วนประกอบหลักของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน [1]

3. วงจรสมมูลไฟฟ้าของแบตเตอรี่

แบบจำลองทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ที่ใช้ในการทดลองผู้วิจัยเลือกแบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นขณะทำงานในช่วงพลวัตเพื่อทดสอบหาค่าตัวแปรที่เกิดขึ้นกับแบตเตอรี่ขณะใช้งานอธิบายได้ตามรูป ส่วนประกอบการหาค่าตัวแปรในแบตเตอรี่

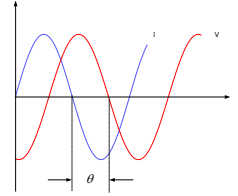


รูปที่ 3 ส่วนประกอบการหาค่าตัวแปรในแบตเตอรี่

3.1 เทคนิคการหาวงจรมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่

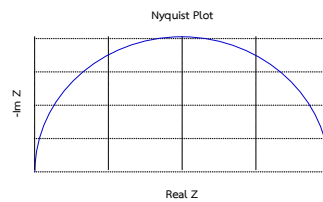
วิธีการทดสอบหาค่าตัวแปรในวงจรมูลของลิเทียมไอออนแบตเตอรี่นำหลักการ Electrochemical Impedance Spectroscopy :

EIS [4] ด้วยการป้อนสัญญาณแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ เพื่อผลตอบแทนของเชิงความถี่ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้วแบตเตอรี่จากทดลองสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่ [4]

จากสัญญาณกระแสไฟฟ้ามีมุมต่างเฟส (Phase Shift) ซึ่งมุมต่างเฟสนี้จะใช้ในการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ ในรูปของขนาดและมุมต่างเฟส ในการหาวงจรมูลและค่าตัวแปรภายในแบตเตอรี่จะใช้แผนภาพไนควิสต์ (Nyquist plot) ในการวิเคราะห์

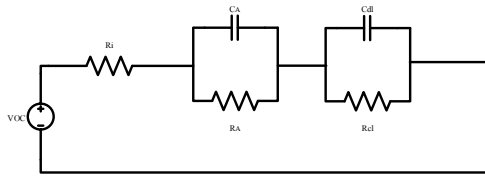


รูปที่ 5 แผนภาพไนควิสต์ [4,5]

จากรูปที่ 5 แผนภาพไนควิสต์ แกน X จะแสดงค่าส่วนจริงและแกน Y จะแสดงค่าส่วนจินตภาพของวงจร RC ที่ต่อขนาดกัน โดยมีลักษณะเป็นรูปครึ่งวงกลม 1 รูป แสดงถึงวงจรนี้มีค่าคงที่เวลา (Time constant) ในแผนภาพไนควิสต์ยังสามารถแสดงทั้งขนาดและมุมเฟส โดยที่ขนาดของอิมพีแดนซ์แสดงด้วยเวกเตอร์ขนาด $|Z|$ ตามสมการ [4]

$$Z = \frac{V \angle 0^\circ}{I \angle \theta} = |Z_m| \angle -\theta \quad (1)$$

วงจรแบบไม่เชิงเส้นขณะทำงานในช่วงพลวัตของแบตเตอรี่พิจารณา การหาค่าตัวแปรจากแรงดันเปิดวงจร (Open-Circuit Voltage : OCV) ด้วยวิธีการค่าอัตราการอัดและคายประจุไฟฟ้าในแบตเตอรี่ เทียบกับเวลา โดยการวิเคราะห์ผลการตอบสนองเชิงเวลา [6] โดยทดสอบผ่านเครื่องทดสอบแบตเตอรี่ (Machine for Test Battery) เพื่อทดสอบหาค่า $R_i, R_A, R_{ct}, C_A, C_{dl}$

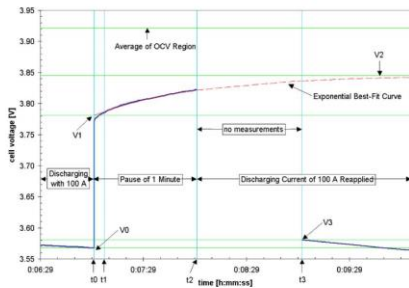


รูปที่ 6 วงจรแบบไม่เชิงเส้นขณะทำงานในช่วงพลวัตของแบตเตอรี่ [6,7]

การวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับเวลาในรูปที่ 7 สามารถนำมาวิเคราะห์หาค่าตัวแปร R_i, R_A, R_{ci} ได้ดังสมการ [7] ตัวอย่างการหาค่าความสัมพันธ์จากกราฟดังแสดงในรูปที่ 7

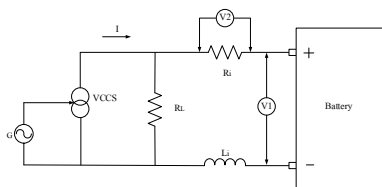
$$R_i = \frac{V_1 - V_0}{I} \quad (2)$$

$$R_A = \frac{V_2 - V_1}{I} \quad (3)$$



รูปที่ 7 ผลตอบสนองเชิงเวลาด้วยการอัดและคายประจุต่อเนื่อง [7]

การวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ กำหนดวิธีการอัดประจุไฟฟ้าแบบพัลส์ (Pulse Charge) ในช่วงความถี่ 3 Hz – 40 kHz ค่าพิคกิตของแบตเตอรี่ กระแสที่ 1.9 Ahr แรงดันที่ 3.7 V การทดสอบใช้วงจรดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 วงจรทดสอบผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบตเตอรี่

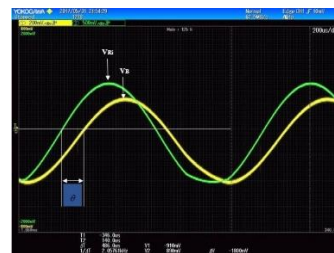
จากรูปวงจรประกอบด้วยสัญญาณความถี่ที่สร้างแรงดันไฟฟ้าควบคุมกระแสไฟฟ้า (Voltage Controlled Current Source: VCCS) ตัวต้านทานตรวจจับกระแสไฟฟ้า (R_i) ตัวต้านทานแบ่งแรงดันไฟฟ้า (R_L)

ตัวเหนี่ยวนำภายนอก สามารถนำมาวิเคราะห์หาค่าตัวแปรค่าความเหนี่ยวนำภายในแบตเตอรี่ได้ดังสมการที่ 4

$$L = \frac{l}{\left(\frac{f_{r1}}{f_{r2}}\right)^2 - 1} \quad (4)$$

เมื่อ L คือ ค่าความเหนี่ยวนำภายในของแบตเตอรี่
 f_{r1} คือ ความถี่ทดสอบขณะที่ไม่ได้ต่อความเหนี่ยวนำภายนอกเข้าไปในวงจร
 f_{r2} คือ ความถี่ทดสอบขณะที่มีการต่อความเหนี่ยวนำภายนอกเข้าไปในวงจร
 l คือ ตัวเหนี่ยวนำภายนอก

ก่อนการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ได้ต้องทำการตรวจสอบผลของวงจรโดยวัดความต่างเฟสของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโหลดความต้านทาน และพบว่าความต่างเฟสในช่วง 3 Hz – 40 kHz เท่ากับ 0 องศา ผลแสดงว่าวงจรนี้ไม่มีผลต่อความต่างเฟสในช่วงความถี่ที่ใช้ในการหาจรรยาสมมูล การเตรียมสภาวะก่อนการทดสอบแบตเตอรี่นั้นจะต้องควบคุมให้แบตเตอรี่อยู่ในอุณหภูมิห้องก่อนที่จะทดสอบในช่วงความถี่แต่ละครั้ง รูปที่ 8 แสดงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่ (V_B) และแรงดันไฟฟ้าคร่อม ความต้านทาน R_i (V_{Ri}) โดยที่ค่าอิมพีแดนซ์ของแบตเตอรี่สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 5



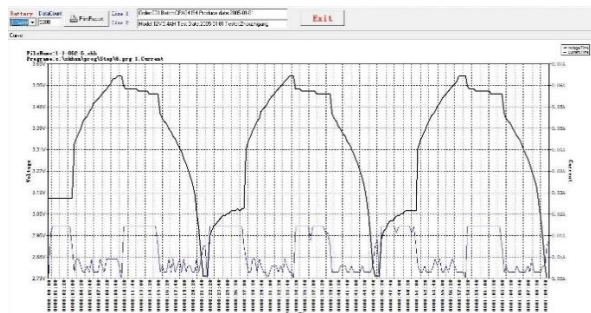
รูปที่ 8 รูปคลื่นสัญญาณมีใช้ในการทดลองหาค่าอิมพีแดนซ์ [4]

$$Z = \frac{V_B \times R_i}{V_{Ri}} \times (\cos \theta + j \sin \theta) \quad (5)$$

เมื่อ Z คือ ค่าอิมพีแดนซ์
 V_B คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมแบตเตอรี่
 V_{Ri} คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทาน
 R_i คือ ตัวต้านทาน

4. ผลการทดลอง

ผลการทดลองผลตอบสนองเชิงเวลาจากการอัดประจุและคายประจุแบบต่อเนื่องจากรูปที่ 9 รูปคลื่นแรก จะยังไม่ถูกนำมาคำนวณเพราะการใช้งานเริ่มต้น รวมทั้งสภาพและสถานะของเซลล์แบตเตอรี่ยังไม่แน่นอนคงที่ รูปคลื่นที่สองสามารถนำมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองของแบตเตอรี่ได้ คือ การทดสอบเริ่มต้นที่วัดค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นของเซลล์แบตเตอรี่ในช่วงเวลาปกติ 1 นาที จะได้ค่า V_0 เท่ากับ 3.11 V จากนั้นแบตเตอรี่จะถูกอัดประจุด้วยค่ากระแสไฟฟ้า 0.1 A ซึ่งจะได้ค่าแรงดัน V_1 เท่ากับ 3.33 V จนถึงแรงดันไฟฟ้าสูงสุด V_2 เท่ากับ 3.6 V จากนั้นแรงดันไฟฟ้าจะคงที่ แต่กระแสไฟฟ้าจะลดลงจนถึงค่าสุดท้าย เมื่ออัดประจุเต็มแล้ว หยุดพักเป็นเวลา 5 นาที ค่อยทำการคายประจุด้วยค่ากระแสไฟฟ้า 0.1 A จนถึงค่าแรงดันสุดท้าย จะได้ค่าแรงดัน V_3 เท่ากับ 3.45 V และจะทำซ้ำหลังจากนั้นอีก 10 นาที เพื่อให้แบตเตอรี่เข้าสู่สภาวะสมดุลและเย็นลงได้ ในรูปคลื่นที่สามจะได้ค่า $V_0 = 3.06$ V, $V_1 = 3.31$ V, $V_2 = 3.6$ V, $V_3 = 3.43$ V



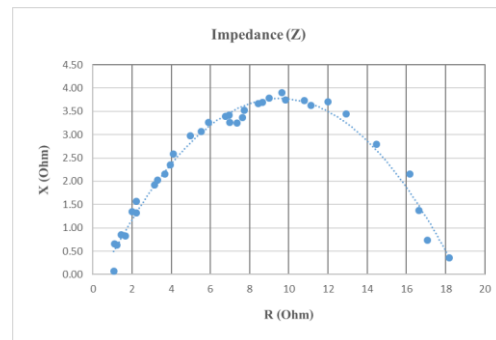
รูปที่ 9 ผลตอบสนองเชิงเวลาจากการอัดประจุและคายประจุแบบต่อเนื่อง

การทดสอบเริ่มต้นที่วัดค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นของเซลล์แบตเตอรี่ในช่วงเวลาปกติ 1 นาที ดังรูปที่ 10 จะได้ค่า V_0 เท่ากับ 3.11 V จากนั้นแบตเตอรี่จะถูกอัดประจุด้วยค่ากระแส 0.1 A ซึ่งจะได้ค่าแรงดัน V_1 เท่ากับ 3.53 V จนถึงแรงดันไฟฟ้าสูงสุด V_2 เท่ากับ 3.7 V จากนั้นแรงดันไฟฟ้าจะคงที่ แต่กระแสไฟฟ้าจะลดลงจนถึงค่าสุดท้าย เมื่ออัดประจุเต็มแล้ว หยุดพักเป็นเวลา 10 วินาที ค่อยทำการคายประจุด้วยค่ากระแส 0.1 A จะได้ค่าแรงดัน V_3 เท่ากับ 3.19 V จนถึงค่าแรงดันสุดท้าย และจะทำซ้ำหลังจากนั้นอีก 3 นาที ในรูปคลื่นที่สามจะได้ค่า $V_0 = 3.13$ V, $V_1 = 3.54$ V, $V_2 = 3.7$ V, $V_3 = 3.2$ V



รูปที่ 10 กราฟการทดสอบการอัดประจุและคายประจุแบบต่อเนื่องที่กระแส 0.1 A

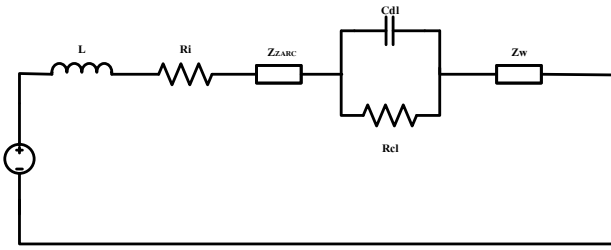
ผลการทดลองในรูปที่ 11 สามารถวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลาจากรูปความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับเวลา นำมาคำนวณวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ภายในแบตเตอรี่ จะได้ ค่าพารามิเตอร์ดังนี้



รูปที่ 10 การทดลองหาค่าอิมพีแดนซ์

ผลการทดสอบการอัดและคายประจุที่กระแส 0.01 A จะได้
 $R_i = 24\Omega$, $R_A = 29\Omega$, $R_{cl} = 29\Omega$, $C_1 = 8.2758F$, $C_{dl} = 16.55178F$
 ผลการทดสอบการอัดและคายประจุที่กระแส 0.1 A จะได้
 $R_i = 4.2\Omega$, $R_A = 1.7\Omega$, $R_{cl} = 1.6\Omega$, $C_1 = 13.529F$, $C_{dl} = 15F$

ผลการทดลองการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ต้องการตรวจสอบผลของวงจรโดยวัดความต่างเฟสของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโหลดความต้านทาน และพบว่าความต่างเฟสในช่วง 3 Hz – 40 kHz นำมาคำนวณหาค่า ความเหนี่ยวนำ $L = 282.85 \mu H$ นำค่าตัวแปรทั้งหมดมาเขียนวงจรสมมูลได้ดังภาพที่ 11



รูปที่ 11 วงจรแบบไม่เชิงเส้นขณะทำงานในช่วงพลวัตของแบตเตอรี่ [1]

5. สรุป

จากการศึกษาจรรยาบรรณทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ขณะทำงานในช่วง พลวัต การทดสอบผลตอบสนองเชิงเวลา เกิดค่าอิมพีแดนซ์เข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งผลการทดลองเปรียบเทียบกับค่าจากแผนภาพในควิตส์พบว่าเกิดรูปครึ่งวงกลม 2 ลูก โดยที่ลูกใหญ่เกิดที่ความถี่ต่ำ 2Hz – 40Hz ซึ่งเป็นผลของ R2 , C2 โดยเฟสของกระแสหน้าหน้าแรงดันไฟฟ้า ทำให้เข้าใจได้มากขึ้นว่าอัตรากระแสอัดประจุและคายประจุไม่เท่ากัน ซึ่งผลการทดลองอัตราการอัดประจุในแบบจำลองจะเห็นได้ว่ามีอัตราการเพิ่มขึ้นแล้วเวลาที่ส่วนการทดสอบการคายประจุจะมีช่วงเวลาในการคายยาวกว่าเมื่อเทียบกับการอัดประจุ ส่วนการทดลองผลตอบสนองเชิงความถี่ได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่ค่าความถี่ยาวทำให้เกิดขึ้นในวงจรสมมูลของแบตเตอรี่สามารถนำค่าอิมพีแดนซ์มาคำนวณหาค่าได้ปัจจัยสำคัญของการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรในการทดลองนั้นคืออัตราการเปลี่ยนแปลงของมุมต่างเฟส ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบการคุณลักษณะการอัดและคายประจุไฟฟ้าเป็นแบบเปลี่ยนแปลงแบบรวดเร็วที่มีผลต่ออุณหภูมิ ซึ่งผู้ทำการวิจัยยังไม่ได้ทดสอบผลดังกล่าวว่ามีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแล้วนั้นค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นผลจะเป็นอย่างไร แต่จากการทดลองผลการเปลี่ยนแปลงอัตราการอัดและคายประจุไฟฟ้าในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีผลต่อค่าตัวแปรแต่อย่างไรก็ถือการนำมาใช้กับโพลิตายอนยนต์ไฟฟ้านั้นต้องนำมาประกอบเซลล์แบตเตอรี่ตามความต้องการกำลังไฟฟ้าในโพลิตายอนยนต์ไฟฟ้านำมาหาจรรยาบรรณทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในรูปแบบการประกอบหลาย ๆ เซลล์ และทดสอบอัตราการอัดประจุการคายประจุและผลของอุณหภูมิ เพื่อสร้างแบบจำลองการทำนายอายุการพุดติกรรมการใช้แบตเตอรี่ในยานยนต์ไฟฟ้าและสร้างระบบบริหารจัดการพลังงานใช้ในระบบยานยนต์ไฟฟ้าต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] ประภาสิต ปราบพาล, กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์. “แบบจำลองของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสำหรับรถยนต์ไฟฟ้าส่วนบุคคล”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9, 2-4 พฤษภาคม 2560

[2] ยศพงษ์ ลอนนวล และคณะ. “การศึกษาการพัฒนาของเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าและผลกระทบที่เกิดขึ้นสำหรับประเทศไทย”, รายงานการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรม, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2558.

[3] นงลักษณ์ มีทอง, “วัสดุสำหรับแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน”, วารสารเทคโนโลยีวัสดุ, ฉบับที่ 60, หน้า 52 – 60, กรกฎาคม-กันยายน 2553

[4] ชนิกันต์ ทอมมาลัย, สุรินทร์ คำฝอย. “การศึกษาวงจรสมมูลของแบตเตอรี่สำหรับระบบกักเก็บพลังงานในโครงข่ายไฟฟ้า” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38, 18-20 พฤศจิกายน 2558.

[5] Stephan Buller, Marc Thele, Rik W. A. A. De Doncker, and Eckhard Karden ,Impedance-Based Simulation Models of Supercapacitors and Li-Ion Batteries for Power Electronic Applications, IEEE Transactions on Industry Application, vol. 41, no.3 pp. 472-477, May/June 2005.

[6] Liao Chenglin, Li Huiju, Wang Lifang “A Dynamic Equivalent Circuit Model of LiFePO₄ Cathode Material for Lithium Ion Batteries on Hybrid Electric Vehicles” Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009 IEEE, Vol., No., pp 1662-1665, 7-10 Sept. 2009

[7] Suleiman Abu-Sharkh, Dennis Doerffel, “Rapid test and non-linear model characterization of solid-state lithium-ion batteries” Journal of Power Sources 130 (2004) 226-274.

อิทธิพลของโครงสร้างคาร์บอนเมมเบรนที่มีผลต่อการซึมผ่านของไอเมทานอลและเอทานอลแบบแข่งขัน Influence of Carbon Membrane Structures on the Competitive Vapor Permeation of Methanol and Ethanol

หาญณรงค์ ประกอบธรรม* และ อนวัช สังข์เพชร

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

E-mail: hannarongprakobthamjay@gmail.com*

บทคัดย่อ

เวเปอเพอมีเอชันสามารถแยกสารอินทรีย์ที่ผสมกันอยู่ได้โดยใช้เมมเบรนที่มีคุณสมบัติเหมาะสม งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อให้ทราบอิทธิพลของโครงสร้างคาร์บอนเมมเบรนที่มีผลต่อการซึมผ่านของไอเมทานอลและไอเอทานอลผ่านคาร์บอนเมมเบรนที่เตรียมจากพอลิอิมิตที่ผ่านการทำให้เป็นคาร์บอนภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 600 °C เมมเบรนชนิด SH ได้จากการเพิ่มอุณหภูมิแบบขั้นระหว่างการทำให้เป็นคาร์บอนที่อัตราเฉลี่ย 15.15 °C/min เมมเบรนชนิด EtOH-SH ได้จากการนำพอลิอิมิตมาแช่ด้วยเอทานอลก่อนทำให้เป็นคาร์บอน ณ สภาวะเดียวกับเมมเบรนชนิด SH และเมมเบรนชนิด KOH-RH ได้จากการแช่พอลิอิมิตด้วยสารละลาย KOH ความเข้มข้น 3 M ก่อนทำให้เป็นคาร์บอนด้วยการเพิ่มอุณหภูมิที่อัตราเฉลี่ย 26.86 °C/min ผลจากการวิเคราะห์ด้วย XRD แสดงให้เห็นว่าคาร์บอนเมมเบรนทั้ง 3 ชนิดมีขนาดรูพรุนและสัณฐานที่แตกต่างกันซึ่งส่งผลต่อสมรรถนะของเมมเบรนในเวเปอเพอมีเอชัน โดยเมมเบรนชนิด KOH-RH ให้ค่าความสามารถซึมผ่านสูงสุด ตามด้วยเมมเบรนชนิด SH และเมมเบรนชนิด EtOH-SH โดยค่าความสามารถซึมผ่านเพิ่มขึ้นตามขนาดรูพรุนที่ใหญ่ขึ้นและเมมเบรนที่มีโครงสร้างเป็นอสัณฐานให้ค่าความสามารถซึมผ่านสูงกว่าเมมเบรนที่มีโครงสร้างเป็นผลึก นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความสามารถซึมผ่านของเอทานอลมีค่าสูงขึ้นหากสารป้อนมีเมทานอลอยู่ด้วย ในขณะที่ค่าความสามารถซึมผ่านของเมทานอลต่ำลง ซึ่งค่าความสามารถซึมผ่านของเอทานอลสูงขึ้นตามความเข้มข้นของเมทานอลที่เพิ่มขึ้น โดยเมมเบรนที่รูพรุนขนาดเล็กและมีโครงสร้างเป็นผลึกส่งผลให้ระดับของการเพิ่มขึ้นและลดลงของค่าความสามารถซึมผ่านนี้เด่นชัดที่สุด ทั้งนี้ การเปลี่ยนอุณหภูมิสารป้อนจาก 35 เป็น 55 °C ไม่ส่งผลให้ระดับการเร่งและการหน่วงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: คาร์บอนเมมเบรน เวเปอเพอมีเอชัน

1. บทนำ

การแยกสารผสมโดยกระบวนการเมมเบรนมีหลากหลายวิธีด้วยกัน หนึ่งในกระบวนการที่สามารถทำให้สารผสมที่อยู่ในรูปของไอมี

ความบริสุทธิ์มากขึ้นคือกระบวนการเวเปอเพอมีเอชัน (vapor permeation) [1] ซึ่งมีข้อดีคือสามารถแยกสารผสมที่เป็นอะซีไอโทรหรือเมื่อสารผสมมีองค์ประกอบที่มีจุดเดือดใกล้เคียงกัน [2] ในปัจจุบันมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเมมเบรนอินทรีย์มากขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีการนำเมมเบรนประเภทนี้มาใช้มากขึ้น โดยสามารถเตรียมเมมเบรนอินทรีย์ได้จากวัสดุหลายประเภท เช่น แก้ว ซีโอไลต์และคาร์บอน [3] วิธีหนึ่งที่มีการนำมาใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนเมมเบรนคือการให้ความร้อนกับพอลิเมอร์ตั้งต้น (precursor) ภายใต้บรรยากาศแก๊สเฉื่อยหรือสุญญากาศซึ่งทำให้ได้เมมเบรนที่ขนาดรูพรุนอยู่ในช่วงนาโนเมตรและมีความเหมาะสมสำหรับนำมาใช้แยกของผสมที่มีขนาดโมเลกุลใกล้เคียงกันได้โดยอาศัยกลไกการดูดซับ-การแพร่ (adsorption-diffusion mechanism) [4] งานวิจัยโดยอัญญาณี เจริญยุทธ [5] ซึ่งเป็นการศึกษาการซึมผ่านคาร์บอนเมมเบรนของสารอินทรีย์สององค์ประกอบ คือ เมทานอล/เอทานอล ด้วยเวเปอเพอมีเอชัน พบว่าค่าความสามารถซึมผ่าน (permeability) ของแต่ละสารมีความแตกต่างไปจากค่าที่ได้จากกรณีที่สารป้อนเป็นสารชนิดเดียว โดยเอทานอลมีค่าความสามารถซึมผ่านสูงขึ้น ในขณะที่เมทานอลมีค่าความสามารถซึมผ่านลดลง ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ด้วยการเกิดการเร่ง/การหน่วงของสารอินทรีย์ในขณะแพร่ผ่านคาร์บอนเมมเบรน งานวิจัยนี้จึงเลือกการสังเคราะห์คาร์บอนเมมเบรนให้มีขนาดรูพรุนและโครงสร้างภายในเมมเบรนที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาอิทธิพลของคุณสมบัติดังกล่าวของคาร์บอนเมมเบรนที่มีต่อปรากฏการณ์ดังกล่าวเมื่อสารป้อนอยู่ในสถานะไอซึ่งคาดว่าเมื่อผลต่อกลไกการซึมผ่านเมมเบรนต่างไปจากกรณีที่สารป้อนอยู่ในสถานะของเหลวหรือเวเปอเพอมีเอชัน

2. วิธีการวิจัย

2.1 สารเคมี

พอลิอิมิต (Kapton® polyimide) ความหนาประมาณ 46 μm เมทานอลบริสุทธิ์ร้อยละ 100 โดยมวล (methanol purity 100 %) เอทานอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 โดยมวล (ethanol purity 99.5) แก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ (high-purity nitrogen gas)

2.2 การเตรียมคาร์บอนเมมเบรน

นำพอลิอิมิตเตาเผาอุณหภูมิสูงแบบท่อ โดยเพิ่มอุณหภูมิแบบขั้นระหว่างการทำให้เป็นคาร์บอนที่อัตราเฉลี่ย 15.15 °C/min จนถึงอุณหภูมิ 600 °C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 60 mL/min เรียกเมมเบรนที่ได้นี้ว่า เมมเบรนชนิด SH

นำแผ่นพอลิอิมิตเตาเผาในเอทานอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 โดยมวล เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำพอลิอิมิตที่ปรับสภาพไปทำให้เป็นคาร์บอนเหมือนเมมเบรนชนิด SH เรียกเมมเบรนที่ได้นี้ว่า เมมเบรนชนิด EtOH-SH โดยคาร์บอนเมมเบรนชนิดนี้และชนิด SH มีความหนาประมาณ 46 μm

นำแผ่นพอลิอิมิตเตาเผาในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 3 M เป็นเวลา 5 นาที ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนพิเอชเป็นกลาง หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจึงนำพอลิอิมิตเตาเผาอุณหภูมิสูงแบบท่อ โดยเพิ่มอุณหภูมิแบบขั้นระหว่างการทำให้เป็นคาร์บอนที่อัตราเฉลี่ย 26.86 °C/min จนถึงอุณหภูมิ 600 °C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 60 mL/min เรียกเมมเบรนที่ได้นี้ว่า เมมเบรนชนิด KOH-RH ซึ่งมีความหนาประมาณ 40 μm

2.3 กระบวนการแยกสารอินทรีย์ออกจากสารอินทรีย์โดยกระบวนการเวเปอเพอมีเอชัน

บรรจุสารป้อนปริมาตร 150 มิลลิลิตร ลงในภาชนะสำหรับเก็บสารป้อนและให้ความร้อนจนได้อุณหภูมิ 35 หรือ 55 °C ปล่อยกระบวนการให้ดำเนินไปเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง และทำการเก็บสารทุก ๆ 15 นาที นำเพอมีเอทที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นขององค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ ทำการทดลองซ้ำโดยดำเนินการเป็นระยะเวลาต่าง ๆ กันเพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างมวลขององค์ประกอบแต่ละชนิดในเพอมีเอทกับเวลา

การประเมินสมรรถนะของเมมเบรนทำได้โดยการพิจารณาค่าความสามารถซึมผ่านซึ่งคำนวณโดยใช้สมการที่ (1)

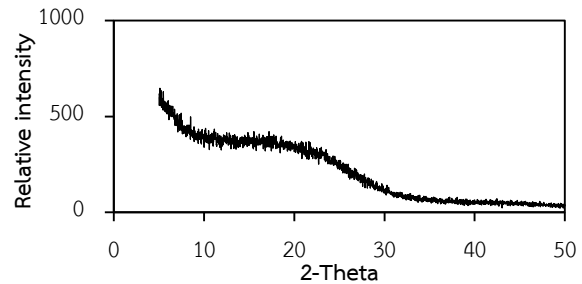
$$P_i = \frac{J_i l}{x_i \gamma_i P_i^{sat} - P_i^P} \quad (1)$$

เมื่อ J_i คือ เพอมีเอทหลักขององค์ประกอบ i l คือ ความหนาของเมมเบรน x_i คือ ความดันย่อยขององค์ประกอบของสาร i ในด้านสารป้อน γ_i คือ สัมประสิทธิ์แอกติวิตีของสาร i P_i^{sat} คือ ความดันของสารบริสุทธิ์ของสาร i P_i^P คือ ความดันย่อยขององค์ประกอบของสาร i ในด้านเพอมีเอท

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 วิเคราะห์โครงสร้างในคาร์บอนเมมเบรนด้วย XRD

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของเมมเบรนชนิด KOH-RH ด้วย XRD แสดงโดยรูปที่ 1



รูปที่ 1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเมมเบรนชนิด KOH-RH

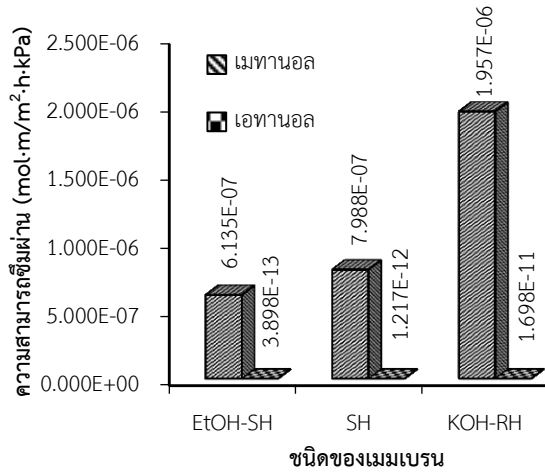
โครงสร้างของคาร์บอนเมมเบรน 3 ชนิด คือ เมมเบรนชนิด SH EtOH-SH และ KOH-RH แสดงอยู่ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 โครงสร้างของเมมเบรนที่วิเคราะห์ได้จากเทคนิค XRD

คาร์บอนเมมเบรน	SH	EtOH-SH	KOH-RH
โครงสร้างของเมมเบรน	ผลึก [6]	ผลึก [6]	อสัณฐาน

จากตารางที่ 1 มีเพียงเมมเบรนชนิด KOH-RH มีโครงสร้างอสัณฐาน เนื่องจากไม่พบพีคจากการวิเคราะห์ด้วย XRD ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 1 สาเหตุที่เป็นเช่นนี้คาดว่าเนื่องจากการเตรียมเมมเบรนโดยนำพอลิอิมิตเตาเผาในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์สั้นลง เมื่อนำไปทำให้เป็นคาร์บอน จึงทำให้ได้เมมเบรนที่มีโครงสร้างซึ่งไม่มีความเป็นระเบียบหรือมีความเป็นไปได้ที่รูพรุนภายในเมมเบรนชนิดนี้มีหลากหลายขนาดและมีขนาดที่ใหญ่กว่ารูพรุนของเมมเบรนอีกสองชนิด นอกจากนี้รูพรุนของเมมเบรนชนิดนี้ยังอาจมีการเชื่อมโยงกันเป็นร่างแหหรือเชื่อมต่อกันมากกว่าของเมมเบรนอีกสองชนิดด้วยเช่นกัน ในขณะที่เมมเบรนชนิด EtOH-SH รูพรุนน่าจะมีขนาดเล็กที่สุด โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ Pei และคณะ [7] ที่แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพพอลิอิมิตก่อนการทำเป็นคาร์บอนด้วยเอทานอลทำให้ได้คาร์บอนเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กกว่าคาร์บอนเมมเบรนที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ

3.2 การซึมผ่านคาร์บอนเมมเบรนของสารป้อนอินทรีย์ องค์ประกอบเดียว

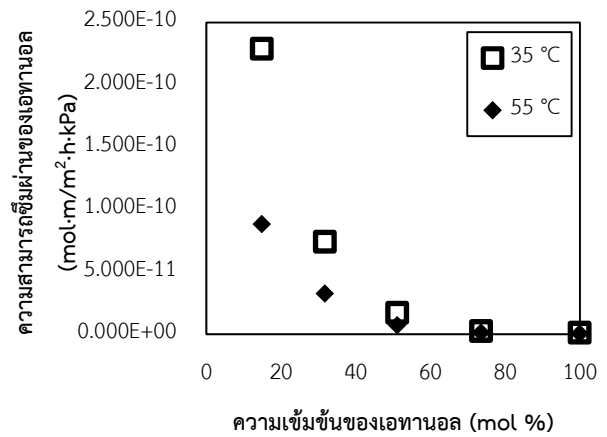


รูปที่ 2 ความสามารถซึมผ่านของสารป้อนองค์ประกอบเดียวที่อุณหภูมิ 35 °C ของเมมเบรน 3 ชนิด

จากค่าความสามารถซึมผ่านของเมทานอลและเอทานอลที่อุณหภูมิ 35 °C ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2 พบว่าเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กที่สุดให้ค่าความสามารถซึมผ่านน้อยที่สุดและเพิ่มขึ้นตามขนาดรูพรุนที่ใหญ่ขึ้นและเพิ่มขึ้นตามการเปลี่ยนโครงสร้างแบบผลึกไปเป็นโครงสร้างแบบอสัณฐาน เมื่อเมมเบรนมีขนาดรูพรุนที่ใหญ่ขึ้นทำให้โมเลกุลที่ดูดซับอยู่บนพื้นผิวเมมเบรนมีโอกาสแพร่ผ่านเข้าไปในเมมเบรนได้มาก สำหรับเมมเบรนที่มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐานโมเลกุลที่ดูดซับอยู่บนพื้นผิวเมมเบรนมีโอกาสแพร่ผ่านเข้าไปในเมมเบรนได้มากขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่ผิวและ/หรือปริมาตรอิสระภายในรูพรุนมากกว่าของเมมเบรนอีกสองชนิด ทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ภายในเมมเบรนต่อหนึ่งหน่วยมวลเมมเบรนชนิดนี้ค่าสูงกว่าของเมมเบรนอีกสองชนิดเช่นกัน ซึ่งผลการทดลองเมื่อทำการเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 55 °C มีลักษณะที่เหมือนกันเพียงแต่ให้ค่าความสามารถซึมผ่านที่ต่ำกว่า

3.3 การซึมผ่านคาร์บอนเมมเบรนของสารป้อนอินทรีย์สององค์ประกอบ

จากงานวิจัยก่อนหน้า [8] พบว่าเมื่อทำการซึมผ่านสารป้อนผสมเมทานอล/เอทานอล โดยใช้เมมเบรนชนิด SH ค่าความสามารถซึมผ่านของเอทานอลมีค่าสูงขึ้นเมื่อสารป้อนมีเมทานอลอยู่ด้วย ในขณะที่ค่าความสามารถซึมผ่านของเมทานอลต่ำลง ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3 เมื่อทำการซึมผ่านสารผสมนั้นกับเมมเบรนอีกสองชนิดพบว่าเกิดปรากฏการณ์เดียวกัน

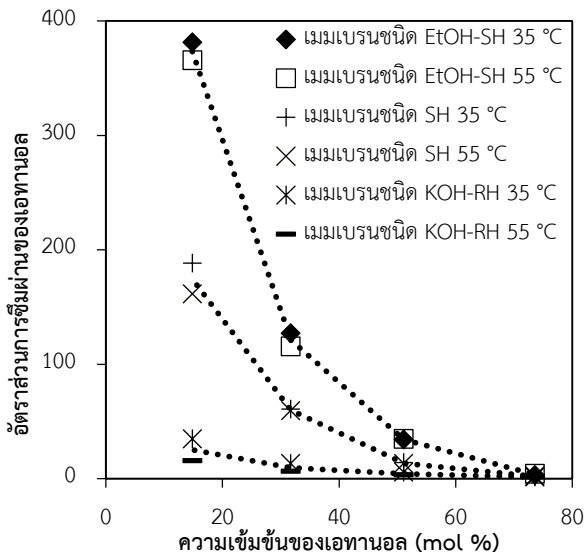


รูปที่ 3 ความสามารถซึมผ่านของเอทานอลกับความเข้มข้น (mol %) จากสารคู่ผสมเมทานอล/เอทานอล ที่ 35 และ 55 °C โดยใช้เมมเบรนชนิด SH

เมื่อค่าความสามารถซึมผ่านเอทานอลเมื่อมีเมทานอลอยู่ในสารป้อนหารด้วยค่าความสามารถซึมผ่านเอทานอลบริสุทธิ์ทำให้ได้ค่าอัตราส่วนการซึมผ่านของเอทานอล โดยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนดังกล่าวกับความเข้มข้นของเอทานอลในสารป้อนแสดงไว้ในรูปที่ 4 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าสัดส่วนความเข้มข้นของสารทั้งสองในเมมเบรนมีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่ออัตราส่วนการซึมผ่านของเอทานอล อัตราส่วนดังกล่าวมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเมทานอลในสารป้อนมีค่ามากขึ้นเนื่องจากการมีเมทานอลในสารป้อนมากขึ้นยอมทำให้สัดส่วนความเข้มข้นเมทานอลต่อเอทานอลภายในโครงสร้างของเมมเบรนสูงขึ้น โอกาสในการเร่งการแพร่ของเอทานอลโดยการชนกันระหว่างโมเลกุลของสารทั้งสองชนิดและการป้องกันการแพร่ย้อนกลับของเอทานอลโดยเมทานอลจึงเพิ่มขึ้น

ค่าอัตราส่วนการซึมผ่านเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ตามชนิดของเมมเบรนคือเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กที่สุดไปใหญ่ที่สุดและจากเมมเบรนที่มีโครงสร้างแบบผลึกไปเป็นโครงสร้างแบบอสัณฐาน อัตราส่วนการซึมผ่านของเอทานอลมีค่ามากที่สุดเมื่อเมมเบรนมีรูพรุนขนาดเล็กอาจเป็นเพราะโมเลกุลมีโอกาสถ่ายเทโมเมนตัมและป้องกันการเคลื่อนที่ย้อนกลับได้มาก ในขณะที่เมมเบรนชนิด SH และเมมเบรนชนิด KOH-RH มีขนาดรูพรุนเพิ่มขึ้นตามลำดับ ทำให้โอกาสที่โมเลกุลถ่ายเทโมเมนตัมและป้องกันการเคลื่อนที่ย้อนกลับได้น้อยลง นอกจากนี้ ยังอาจมีเหตุผลจากการที่เมมเบรนชนิด KOH-RH มีความพรุนที่สูงและการเชื่อมต่อกันระหว่างรูพรุน

อิทธิพลของอุณหภูมิมีผลต่อการเร่งความสามารถในการเร่งการซึมผ่านเอทานอลเพียงเล็กน้อย โดยอัตราส่วนการซึมผ่านมีความใกล้เคียงกัน เหตุผลที่อาจเป็นไปได้คือแม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นช่วยให้เมทานอลแพร่ได้ในอัตราที่สูงขึ้นมากกว่าเอทานอลอันเป็นการเพิ่มการเร่งการแพร่เอทานอลได้มากขึ้น แต่การเพิ่มอุณหภูมิกลับส่งผลให้การดูดซับสารอินทรีย์และความเข้มข้นของสารทั้งสองชนิดในเมมเบรนลดลง



รูปที่ 4 อัตราการซึมผ่านของเอทานอลกับความเข้มข้น (mol %) จากสารคู่ผสมเมทานอล/เอทานอล ที่ 35 และ 55 °C ของเมมเบรน 3 ชนิด

4. สรุป

คาร์บอนเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กให้ค่าความสามารถซึมผ่านน้อยที่สุดและเพิ่มขึ้นตามลำดับความใหญ่ของขนาดรูพรุนและจากการเปลี่ยนโครงสร้างแบบผลึกไปเป็นโครงสร้างแบบอสัณฐาน เมื่อขนาดรูพรุนใหญ่ขึ้นจะทำให้โมเลกุลที่ดูดซับอยู่บนพื้นผิวเมมเบรนมีโอกาสที่จะแพร่ผ่านเข้าไปในรูพรุนได้มาก และเมื่อทำการซึมผ่านของสารป้อนผสมเมทานอล/เอทานอล พบว่าโมเลกุลของเอทานอลถูกเร่งได้ดีที่สุดเมื่อใช้เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็ก เนื่องจากโมเลกุลมีโอกาสถ่ายเทโมเมนตัมและป้องกันการเคลื่อนที่ย้อนกลับได้มาก

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Leemann, G. Eigenberger, and H. Strathmann, "Vapour permeation for the recovery of organic solvents from waste air streams: separation capacities and process optimization", *Journal of Membrane Science*, Vol. 113, pp. 313-322, 1996
- [2] R. Jiratananon, *Membrane Technology*, Chemical Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 2000.
- [3] H. Yoshishige, Y. Syoichi, K. Takuya, S. Nobuaki and F. Toshio, "An efficient ethanol concentration process by vapor permeation through asymmetric polyimide membrane", *Journal of Membrane Science*, vol. 177, pp. 233-239, 2000.

- [4] T.C. Bowen, R.D. Noble and J.L. Falconer, "Fundamentals and Applications of Pervaporation through Zeolite Membranes", *Journal of Membrane Science*, Vol. 245, pp. 1-33, 2004.
- [5] T. Charoenyuth, *Influence of Organic Compound Properties on the Pervaporation by Carbon Membrane*, Chemical Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 2012.
- [6] T. Yaemchuen, *Effect of Pore Size and Surface Chemistry of Carbon Membranes on the Removal of water from Ethanol Solvent by Pervaporation*, Chemical Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 2014.
- [7] S.T. Pei, T.S. Tai, and J.H. Anita, "Advanced Fabrication of Carbon Molecular Sieve Membranes by Nonsolvent Pretreatment of Precursor Polymers", *American Chemical Society*, Vol. 43, pp. 6476-6483, 2004.
- [8] H. Prakobtham and A. Sungpet, "INFLUENCE OF ORGANIC COMPOUNDS PROPERTIES ON THE VAPOR PERMEATION THROUGH CARBON MEMBRANES", *The 42nd Congress on Science & Technology of Thailand (STT42)*, p. 201, 2016.

เอสเทอร์ฟิเคชันของกรดลิโนเลอิกในน้ำมันถั่วเหลือง Esterification of Linoleic Acid in Soybean Oil

สมชนก ศรอารา* และ อนวัช สังข์เพชร

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

E-mail: sornaragif@gmail.com*

บทคัดย่อ

ในการผลิตไบโอดีเซลจากวัตถุดิบที่ประกอบด้วยกรดไขมันอิสระสูง เช่น น้ำมันสบู่ดำ น้ำมันพืชที่ผ่านการใช้งาน ต้องใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อกำจัดกรดไขมันอิสระก่อนนำไปผลิตเป็นไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันต่อไป งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดลิโนเลอิกซึ่งเป็นกรดไขมันอิสระชนิดหนึ่งที่มีในน้ำมันสบู่ดำและน้ำมันพืชใช้แล้วในสัดส่วนที่สูง โดยใช้ Amberlyst -15 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกรดลิโนเลอิกต่อเอทานอล และความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกรดลิโนเลอิก จากผลการทดลองเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1.6 % โดยน้ำหนักและอัตราส่วนโดยโมลระหว่างกรดลิโนเลอิกต่อเอทานอลเท่ากับ 1:9 พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลง ณ จุดสิ้นสุดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 1.59 เมื่อไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 57.45, 81.91, 88.30 และ 91.96 เมื่อความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 10, 50, 100 และ 150 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างกรดลิโนเลอิกต่อเอทานอลเป็น 1:27 พบว่าระยะเวลาเข้าสู่จุดสิ้นสุดของปฏิกิริยาช้ากว่าอัตราส่วนโดยโมลระหว่างกรดลิโนเลอิกต่อเอทานอลที่ 1:9 แม้ว่าค่าการเปลี่ยนแปลง ณ จุดสิ้นสุดปฏิกิริยามีค่าใกล้เคียงกัน การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวเร่งปฏิกิริยาทำโดยใช้ความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 50 กรัมต่อลิตร จากการทดลองพบว่าค่าการเปลี่ยนแปลง ณ จุดสิ้นสุดปฏิกิริยาลดลงตามความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสำหรับอัตราส่วนโดยโมลระหว่างกรดลิโนเลอิกต่อเอทานอลเท่ากับ 1:9 ค่าการเปลี่ยนแปลงลดลงเหลือ 73.04 ถึง 51.66 เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเป็น 3.24 ถึง 11.78 % โดยน้ำหนัก เมื่ออัตราส่วนโดยโมลระหว่างกรดลิโนเลอิกต่อเอทานอลเท่ากับ 1:27 ค่าการเปลี่ยนแปลงลดลงเหลือ 67.58 ถึง 30.55 เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเป็น 4.80 ถึง 12.49 % โดยน้ำหนัก

คำสำคัญ: เอสเทอร์ฟิเคชัน กรดลิโนเลอิก ไบโอดีเซล

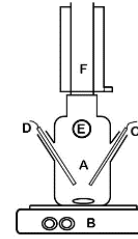
1. บทนำ

ไบโอดีเซลคือพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงจากชีวมวลซึ่งเป็นเชื้อเพลิงเหลวที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติและคุณสมบัติคล้ายกับน้ำมันดีเซลที่ผลิตจากปิโตรเลียม ดังนั้นเครื่องยนต์ดีเซลจึงใช้ไบโอดีเซลได้โดยไม่ต้องผ่านการดัดแปลงเครื่องยนต์ นอกจากนี้ไบโอดีเซลสามารถผลิตได้จากน้ำมันที่ไม่สามารถรับประทานได้ เช่น น้ำมันที่ผ่านการใช้ในการทอดและไขมันสัตว์ แต่วัสดุเหล่านี้มีสิ่งปนเปื้อนอยู่ คือ กรดไขมันอิสระ (Free fatty acid, FFA) และน้ำ ซึ่งเป็นสาเหตุของปัญหาการผลิตไบโอดีเซลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสโดยใช้ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันเนื่องจากกรดไขมันหรือไตรกลีเซอไรด์เกิดปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสได้ผลิตภัณฑ์เป็นสบู่กับน้ำ วิธีการหนึ่งที่ใช้ในแก้ปัญหาของวัตถุดิบที่เจือปนด้วยกรดไขมันอิสระสูง คือ การผลิตไบโอดีเซลโดยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรด กระบวนการผลิตไบโอดีเซลทางการค้าส่วนใหญ่ใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อกำจัดกรดไขมันอิสระก่อน จากนั้นจึงทำการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาต่อไป เพราะอัตราการเกิดปฏิกิริยานั้นสูงกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน [1] อย่างไรก็ตามกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรดมีข้อดีอยู่หลายประการ เช่น ขั้นตอนการผลิตน้อยกว่าสามารถใช้วัตถุดิบที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงได้ กระบวนการแยกไบโอดีเซลเป็นไปได้ง่ายและผลิตภัณฑ์พลอยได้เป็นกลีเซอรอลซึ่งมีคุณภาพสูง Man Kee Lam คณะ [2] ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลและพบว่าวัตถุดิบจะต้องมีปริมาณกรดไขมันอิสระไม่เกิน 0.5 % โดยน้ำหนัก และงานวิจัยโดย Fangrui Ma [3] เสนอว่าวัตถุดิบควรมีน้ำในสัดส่วนที่ต่ำกว่า 0.06 % โดยน้ำหนัก เพื่อให้ได้ไบโอดีเซลในสัดส่วนที่สูง นอกจากนี้ผลการทดลองของ I. M. Atadashi [4] แสดงให้เห็นว่าน้ำและกรดไขมันอิสระถือเป็นปัญหาสำคัญของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระหว่างน้ำกับไตรกลีเซอไรด์เป็นกรดไขมันอิสระ งานวิจัยนี้จึงศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกรดลิโนเลอิกต่อเอทานอล และความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดลิโนเลอิกโดยใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

2. สารเคมีและวิธีการวิจัย

2.1 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ ได้แก่ น้ำมันถั่วเหลือง ยีห้อ QN น้ำมันเอทานอลและอะซิโตนเกรด Analytical reagent (AR) ยีห้อ QRc[®] จากประเทศนิวซีแลนด์กรดลิโนเลอิกเกรด 60-70 % GC และตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Amberlyst-15 ในรูปโปรตอนแบบแห้งและแบบเปียกจากบริษัท Sigma Aldrich ประเทศสิงคโปร์



รูปที่ 1 อุปกรณ์ศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน: A = ถังปฏิกรณ์ B = เครื่องกวนสารละลายพร้อมเตาให้ความร้อน C = แท่งให้ความร้อน D = เทอร์โมสแตต E = ช่องเก็บสารตัวอย่าง F = ชุดควบแน่น

2.2. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Amberlyst -15

นำตัวเร่งปฏิกิริยา Amberlyst -15 แบบเปียกแช่ในอะซิโตนเป็นระยะเวลา 12 ถึง 48 ชั่วโมง จากนั้นทำการกรองแบบสุญญากาศและนำไปอบด้วยเตาอบแบบสุญญากาศเพื่อไล่ความชื้นออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ทำให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีค่าความชื้นอยู่ระหว่าง 3.4 ถึง 13 % โดยน้ำหนัก ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยา Amberlyst -15 แบบแห้ง มีค่าความชื้นเริ่มต้นที่ 1.6 % โดยน้ำหนัก

2.3 การผลิตไบโอดีเซลโดยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Amberlyst -15

บรรจุน้ำมันถั่วเหลือง กรดลิโนเลอิก และเอทานอล ลงในถังปฏิกรณ์ตามรูปที่ 1 ให้มีปริมาตรสุทธิ 300 มิลลิลิตร และค่าความเป็นกรดเท่ากับ 20 โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกรดลิโนเลอิกต่อเอทานอลเท่ากับ 1:9 จากนั้นให้ความร้อนกับสารตัวอย่างจนกระทั่งมีอุณหภูมิเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส จึงทำการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Amberlyst-15 ที่มีค่าความชื้นเริ่มต้น 1.6 % โดยน้ำหนัก โดยความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาในถังปฏิกรณ์เป็น 10 กรัมต่อลิตร ในระหว่างการทดลอง ทำการเก็บสารตัวอย่างปริมาตร 3 มิลลิลิตรทุก ๆ 1 ชั่วโมงและไทเทรตสารตัวอย่างกับสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ซึ่งมีความเข้มข้น 0.1 โมลาร์เพื่อหาค่าการเปลี่ยนแปลง (% Conversion) ของกรดลิโนเลอิกตามสมการที่ 1 จนกระทั่งค่าการเปลี่ยนแปลงคงที่ จากนั้นศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยเปลี่ยนค่าเป็น 50 100 และ 150 กรัมต่อลิตร รวมทั้งทำการทดลองโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อการเปรียบเทียบ สำหรับอิทธิพลของอัตราส่วนของกรดลิโนเลอิกต่อเอทานอลนั้น ทำการศึกษาโดยเปลี่ยนอัตราส่วนดังกล่าวให้เป็น 1:27 สำหรับการศึกษาอิทธิพลของความชื้นเริ่มต้นของตัวเร่งปฏิกิริยานั้น ใช้ความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา 50 กรัมต่อลิตร

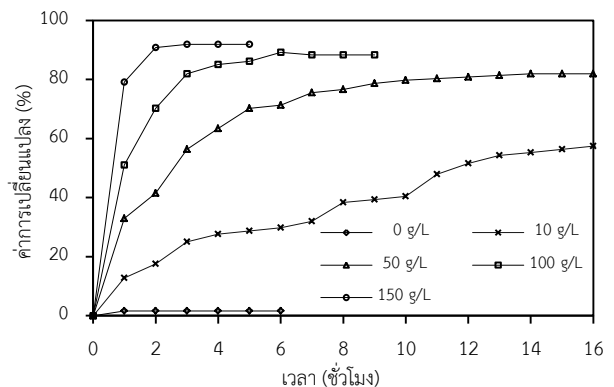
$$[FFA] = \frac{V \times 0.1 \text{ mol/L of KOH}}{3 \text{ mL of sample}} \quad (1)$$

โดยที่ [FFA] = ความเข้มข้นของกรดลิโนเลอิก (mol/L)
V = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน KOH (mL)

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 อิทธิพลของความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดลิโนเลอิก

รูปที่ 2 แสดงผลการทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกรดลิโนเลอิกต่อเอทานอลเท่ากับ 1:9 ความชื้นเริ่มต้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 1.6 % โดยน้ำหนักและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 0, 10, 50, 100 และ 150 กรัมต่อลิตร



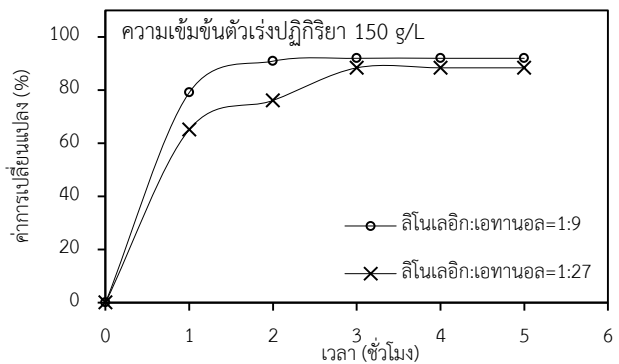
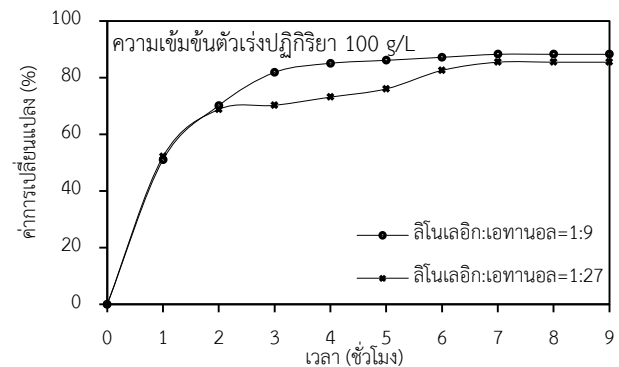
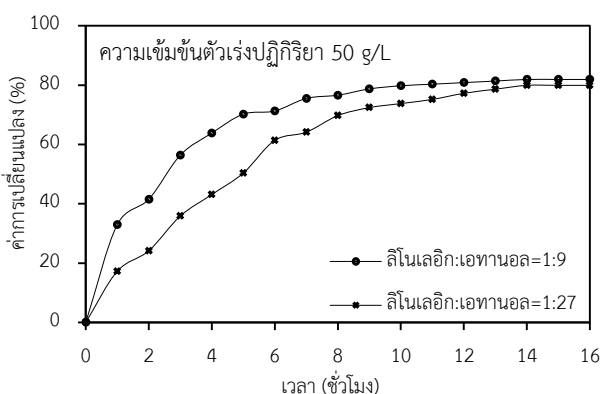
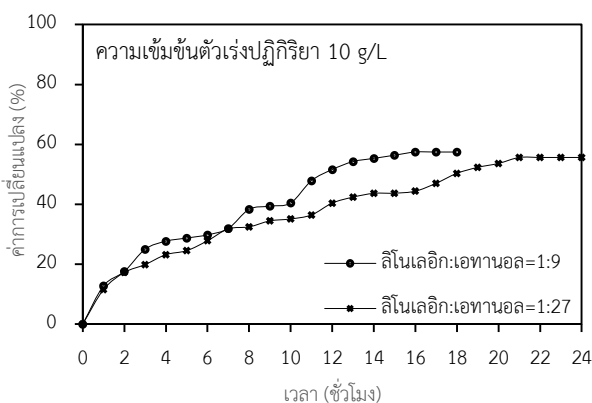
รูปที่ 2 อิทธิพลของการเพิ่มความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 2 เมื่อความเข้มข้นของความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นหรือปฏิกิริยาเลื่อนไปข้างหน้ามากขึ้นทำให้ใช้เวลาอันน้อยลงในการทำปฏิกิริยาจนกระทั่งค่าการเปลี่ยนแปลงมีค่าคงที่ ค่าการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาหรือจุดกัมมันต์เนื่องจากอิทธิพลของการบดบังจุดกัมมันต์โดยเอทานอลลดลงทำให้กรดลิโนเลอิกสามารถเข้าถึงจุดกัมมันต์ได้ในอัตราที่สูงขึ้น การเข้าถึงจุดกัมมันต์ดังกล่าวเป็นขั้นตอนแรกของการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน [5] แต่การเพิ่มความเข้มข้นของตัวเร่ง

ปฏิกิริยาให้มีค่าเท่ากับ 100 และ 150 กรัมต่อลิตร ส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นในสัดส่วนที่น้อยลงเนื่องจากปฏิกิริยาถูกกำหนดด้วยความเข้มข้นของกรดลิโนเลอิกแทนเพราะจุดกัมมันต์มีค่ามากเกินไปหรือมีปริมาณจุดกัมมันต์ที่สามารถจับตัวกับน้ำได้มากกว่าปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถดูดซับน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาได้มากขึ้น ดังนั้นปฏิกิริยาจึงเลื่อนไปข้างหน้าหรือมีค่าการเปลี่ยนแปลงที่มากขึ้น

3.2 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างกรดลิโนเลอิกและเอทานอลที่ส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดลิโนเลอิก

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่สามารถย้อนกลับได้ซึ่งการเพิ่มปริมาณของสารตั้งต้นส่งผลให้ปฏิกิริยาเลื่อนไปข้างหน้า โดยควบคุมโมลของกรดลิโนเลอิกคงที่เท่ากับ 0.1005 โมล และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างกรดลิโนเลอิกต่อเอทานอลเท่ากับ 1:9 และ 1:27 ได้ผลการทดลองดังแสดงโดยรูปต่อไปนี้



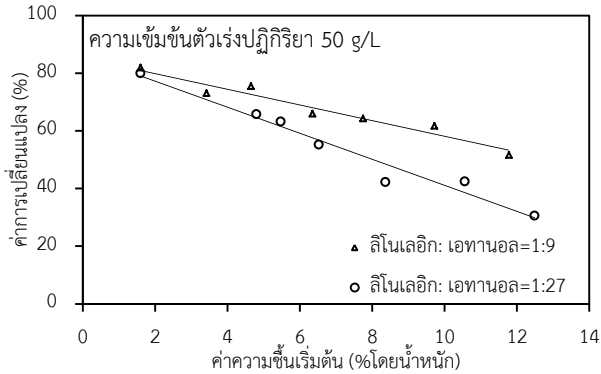
รูปที่ 3 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างกรดลิโนเลอิกต่อเอทานอลที่ความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ

จากรูปที่ 3 พบว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างกรดลิโนเลอิกต่อเอทานอลส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาดำลงทำให้ใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้นซึ่งเป็นผลจากความเข้มข้นของกรดลิโนเลอิกลดลงและการบดบังจุดกัมมันต์ด้วยเอทานอล นอกจากนี้เมื่อความเข้มข้นของเอทานอลเพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากค่าการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาถูกกำหนดด้วยความสามารถในการดูดซับน้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา และปฏิกิริยาหยุดลงเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาอิ่มตัวด้วยน้ำหรือหมดความสามารถในการดูดซับน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาโดยพิจารณาจากจุดกัมมันต์ที่สามารถจับตัวกับน้ำได้ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นที่ค่าเท่ากับ 100 และ 150 กรัมต่อลิตร ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 3 (ค)-(ง) พบว่าผลของการบดบังจุดกัมมันต์ด้วยเอทานอลมีอิทธิพลน้อยลง ซึ่งพิจารณาได้จากอัตราการเกิดปฏิกิริยาและค่าการเปลี่ยนแปลงที่มีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา

3.3 อิทธิพลของค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดลิโนเลอิก

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่สามารถย้อนกลับได้ซึ่งการเพิ่มปริมาณของสารตั้งต้นส่งผลให้ปฏิกิริยาเลื่อนไปข้างหน้า โดยทำ

การเพิ่มปริมาณเอทานอลและควบคุมโมลของกรดลิโนเลอิกคองที่เท่ากับ 0.1005 โมล ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกรดลิโนเลอิกต่อเอทานอลเท่ากับ 1:9 และ 1:27 ได้ผลการทดลองดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4 อิทธิพลของค่าความชื้นเริ่มต้นของตัวเร่งปฏิกิริยา

จากรูปที่ 4 พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงมีค่าลดลงเมื่อค่าความชื้นเริ่มต้นของตัวเร่งปฏิกิริยาสูงขึ้น เพราะจุดกัมมันต์ที่สามารถจับตัวกับน้ำมีปริมาณลดลงซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่แห้งสามารถดูดซับน้ำเข้าสู่ตัวเร่งปฏิกิริยาได้มากจึงมีค่าการเปลี่ยนแปลงที่สูง นอกจากนี้ความชื้นเริ่มต้นของตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาแตกต่างกัน โดยเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าความชื้นจะส่งผลให้เกิดการพองตัวหรือมีการแทรกตัวของน้ำบนโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นจึงเกิดการพาเอทานอลจากสารผสมภายนอกเข้าสู่โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวเร่งปฏิกิริยามีแนวโน้มในการพองตัวมากขึ้นเมื่อความชื้นเริ่มต้นของตัวเร่งปฏิกิริยาสูงขึ้น ทำให้จุดกัมมันต์ที่สามารถจับตัวกับน้ำถูกรบกวนด้วยเอทานอลหรือตัวเร่งปฏิกิริยามีความสามารถในการดูดซับน้ำน้อยลงจึงทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงลดลง

เมื่อพิจารณาปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกรดลิโนเลอิกต่อเอทานอลเท่ากับ 1:9 และ 1:27 ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 50 กรัมต่อลิตร พบว่ามีแนวโน้มที่ต่างกันคือค่าความชื้นที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกรดลิโนเลอิกต่อเอทานอลเท่ากับ 1:9 มีค่าน้อยกว่าหรือค่าการเปลี่ยนแปลงมีค่ามากกว่าเมื่อพิจารณาที่ความชื้นเริ่มต้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากัน ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อเทียบกับปริมาณเอทานอลซึ่งคงที่จึงทำให้แรงขับเคลื่อนในการพาเอทานอลเข้าสู่โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงมีจุดกัมมันต์สำหรับจับตัวกับน้ำที่มากขึ้นส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสูง และเมื่อความชื้นเริ่มต้นของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงหรือผลของการรบกวนการดูดซับน้ำโดยเอทานอลมีอิทธิพลลดลงพบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น หรือพูดอีกนัยหนึ่งได้ว่าเมื่อไม่มีการรบกวนการดูดซับน้ำโดยเอทานอลจะส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงถูกกำหนดด้วยความสามารถในการดูดซับน้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่านั้น

4. สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของปฏิกิริยาเอสเทอร์ิฟิเคชันซึ่งตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วยอัตราส่วนระหว่างกรดลิโนเลอิกต่อเอทานอล ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา และค่าความชื้นเริ่มต้นของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยควบคุมกระบวนการให้ทำงานที่อุณหภูมิ 70 °C จากผลการทดลองพบว่าค่าการเพิ่มความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นเนื่องจากจุดกัมมันต์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้จะพบว่าค่าการเพิ่มปริมาณเอทานอลในอัตราส่วนโดยโมลระหว่างกรดลิโนเลอิกต่อเอทานอลและการเพิ่มความชื้นเริ่มต้นของตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงลดลงเนื่องจากความสามารถในการดูดซับน้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Freedman, B., Pryde, E.H., and Mounts, T.L., 1984, "Variables Affecting the Yields of Fatty Esters from Transesterified Vegetable Oils", **Journal of the American Oil Chemists Society**, Vol. 61, No. 10, pp. 1638-1643.
- [2] Lam, M.K., Lee, K.T., and Mohamed, A.R., 2010, "Homogeneous, Heterogeneous and Enzymatic Catalysis for Transesterification of High Free Fatty Acid Oil (Waste Cooking Oil) to Biodiesel: A Review", **Biotechnology advances**, Vol. 28, No. 4, pp. 500-518.
- [3] Ma, F., Clements, L., and Hanna, M., 1998, "The Effects of Catalyst, Free Fatty Acids, and Water on Transesterification of Beef Tallow", Vol. 41, No. 5, p. 12.
- [4] Atadashi, I.M., Aroua, M.K., and Aziz, A.A., 2011, "Biodiesel Separation and Purification: A Review", **Renewable Energy**, Vol. 36, No. 2, pp. 437-443.
- [5] Liu, W., Yin, P., Zhang, J., Tang, Q., and Qu, R., 2014, "Biodiesel Production from Esterification of Free Fatty Acid over Pa/Nay Solid Catalyst", **Energy Conversion and Management**, Vol. 82, No., pp. 83-91.

กระเบื้องบุผนังแบบไม่เผาและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจากดินตะกอนน้ำประปา

Eco-friendly Non-fired Wall Tiles Produced by Sediment Soil from Water Supply Treatment Process

รัชชานนท์ เนียมรัตน์* อุบลรัตน์ หวังรัชชิตสกุล

ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

E-mail: pinkmutnb@hotmail.com*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ อรรถประโยชน์ดินตะกอนน้ำประปา จากโรงงานผลิตน้ำประปามหาสวัสดิ์ เพื่อผลิตกระเบื้องบุผนังแบบไม่เผา เนื่องจากดินตะกอนน้ำประปามี ส่วนประกอบทางเคมี คือ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นองค์ประกอบสำคัญซึ่ง สามารถผลิตเป็นวัสดุเซรามิกได้ โดยวัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ดิน ตะกอนน้ำประปาจากโรงผลิตน้ำมหาสวัสดิ์ ปูนพอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทราายแม่น้ำ และดินลูกรัง ซึ่งทรายจะเป็นโครงสร้างให้กับชิ้นงาน ดินลูกรัง ช่วยเรื่องการขึ้นรูป และ ปูนพอร์ตแลนด์เป็นตัวประสานระหว่างวัตถุดิบทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงขึ้น ในการทดลองนี้จะทำการขึ้นรูปวัตถุดิบแต่ละ สูตรด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปทางเดียว ด้วยแรงดัน 100 บาร์ ได้ชิ้นงานขนาด $50 \times 100 \times 7$ มิลลิเมตร จากนั้นทำการบ่มเป็นเวลา 7 และ 28 วัน เพื่อให้ ปูนมีระยะเวลาทำปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงขึ้น แล้ว ทำการทดสอบคุณสมบัติชิ้นงาน ได้แก่ ค่าความต้านแรงดัด ค่าการดูดซึมน้ำ และ วิเคราะห์ SEM ผลการทดลองพบว่า สูตรการทดลองกลุ่มที่ 1 สูตร 8 ที่ 28 วัน ใช้ดินตะกอน 35 % มีค่าความต้านแรงดัด 3.51 เมกะ ปาสคาล และมีค่าดูดซึมน้ำ 10.12 % ซึ่งผ่านมาตรฐาน มอก.2508-2555 เฉพาะค่าการดูดซึมน้ำ ผลการวิเคราะห์ SEM พบว่าเวลาในการบ่มมีผลทำให้ปูนกับวัสดุในชิ้นงานมีการประสานตัวกันดีขึ้น ทำให้ชิ้นงานแข็งแรงขึ้น ค่าดูดซึมน้ำลดลง

คำสำคัญ : อรรถประโยชน์, ดินตะกอน, กระเบื้องบุผนังแบบไม่เผา

1. บทนำ

การบริโภคน้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการดำรงชีวิตประจำวันของมนุษย์ และจากจำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้นเป็นลำดับในเขตกรุงเทพฯ และ ปริมณฑล ทำให้ความต้องการน้ำมีปริมาณที่สูงขึ้นเป็นลำดับ หน่วยงานที่ ให้บริการน้ำเพื่อบริโภค คือ การประปานครหลวง ในปัจจุบันการประปานครหลวงมีโรงงานผลิตน้ำประปาที่อยู่ในความรับผิดชอบ 4 แห่งคือ โรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน โรงงานผลิตน้ำประปามหาสวัสดิ์ โรงงานผลิตน้ำประปาสามเสน และ โรงงานผลิตน้ำประปาธนบุรี มีกำลัง

การผลิตต่อวัน คือ 3,600,000 1,600,000 700,000 และ 170,000 ลบ.ม ตามลำดับ ซึ่งในกระบวนการผลิตน้ำประปา ก่อให้เกิดดินตะกอนมากถึง วันละ 90-126 ตัน ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ดินตะกอนน้ำประปาจากโรงผลิตน้ำ มหาสวัสดิ์

จากการศึกษาพบว่าดินตะกอนน้ำประปามีส่วนประกอบทางเคมี คือ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นหลัก ซึ่งสามารถนำมาทำกระเบื้องบุผนังแบบไม่เผา ได้ เพื่อทดแทนดินตามธรรมชาติ ซึ่งจะ ช่วยลดต้นทุน ประหยัดพลังงาน เนื่องจากไม่เผา และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

มีนักวิจัยหลายท่านให้ความสำคัญ ในกลุ่มของการนำดินตะกอนมาใช้ ให้เกิดประโยชน์ เช่น อิฐบล็อกประสานผสมตะกอนประปา [1], การ ประยุกต์ใช้ตะกอนดินจากน้ำประปาไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์เซรามิกต่างๆ [2], การใช้ดินตะกอนจากน้ำประปาเพื่อเป็นส่วนผสมในการผลิตกระเบื้อง หลังคาดินซีเมนต์ [3], การปรับปรุงคุณภาพอิฐดิน ซีเมนต์ที่ผสมดินตะกอน ประปาด้วยดินลูกรังและ ทราย [4], การศึกษาคุณสมบัติของอิฐดิน ซีเมนต์ ที่ใช้ดินตะกอนประปาสมกับดินเหนียวทราย [5], การพัฒนาอิฐอัดจาก ใ้ข้าวมวลและตะกอนน้ำประปา [6] ในกลุ่มของการเผา เช่น การพัฒนา อิฐมวลเบาจากเศษแก้ว [7], การทำกระเบื้องตกแต่งจากเศษแก้ว [8] ซึ่ง การทดลองใช้ดินตะกอนน้ำประปาเพื่อผลิตกระเบื้องบุผนังแบบไม่เผา ยังไม่มีการทำวิจัย จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

2. วัตถุดิบ และ วิธีการทดลอง

2.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

ประกอบด้วย 4 ชนิด คือ ดินตะกอนน้ำประปา ปูนซีเมนต์พอร์ต แลนด์ ประเภท 1 ทราายแม่น้ำ และ ดินลูกรัง จากจังหวัดกาญจนบุรี

2.2 ส่วนประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ (Chemical Analysis)

โดยการนำตัวอย่างดินทั้ง 4 ชนิดไปวิเคราะห์ที่ สถาบันเทคโนโลยี นิวเคลียร์แห่งชาติ ด้วยวิธีการ X-ray Fluorescence (XRF) ได้ผล การวิเคราะห์ตาม ตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุดิบ

Compound	Concentration (%)			
	ดินลูกรัง	ดินตะกอน	ทราย แม่น้ำ	พอร์ต แลนด์ ประเภท 1
SiO ₂	71.00	58.15	78.05	18.13
Al ₂ O ₃	21.79	27.84	10.96	4.60
Fe ₂ O ₃	4.45	7.17	1.44	3.36
K ₂ O	1.16	2.76	6.35	0.77
TiO ₂	0.64	0.86	0.23	0.24
MgO	0.43	1.37	0.44	1.11
CaO	0.24	0.94	1.35	66.63
Na ₂ O	0.09	0.14	0.95	0.22
P ₂ O ₅	0.09	0.23	-	0.08
SO ₃	0.03	0.15	0.03	4.65

2.3 วิธีการทดลอง

2.3.1 เตรียมวัสดุดิบโดยการ นำดินตะกอนและดินลูกรังมาค้ำให้ละเอียดจากนั้นทำการบดด้วยหม้อบด เมื่อได้วัสดุดิบที่บดละเอียดแล้วให้นำมาร่อนผ่านตะแกรง 20 เมช (อนุภาคซึ่งมีขนาดน้อยกว่า 841 ไมโครเมตร) จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักแต่ละส่วนผสม โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ 1 ทดแทนดินตะกอนในดินลูกรัง และ กลุ่มที่ 2 ทดแทนดินตะกอนในทราย เพิ่มจากสูตรตั้งต้นที่ละ 5% ดังตารางที่ 2 และ ตามตารางที่ 3

ตารางที่ 2 สูตรการทดลองกลุ่มที่ 1 แทนดินตะกอนในดินลูกรังเพิ่มครั้งละ 5%

สูตรที่	วัสดุดิบ (%)			
	ดินตะกอน	ดินลูกรัง	ทราย	พอร์ตแลนด์ ประเภท 1
1-1	0	62.5	15	22.5
1-2	5	57.5	15	22.5
1-3	10	52.5	15	22.5
1-4	15	47.5	15	22.5
1-5	20	42.5	15	22.5
1-6	25	37.5	15	22.5
1-7	30	32.5	15	22.5
1-8	35	27.5	15	22.5
1-9	40	22.5	15	22.5
1-10	45	17.5	15	22.5
1-11	50	12.5	15	22.5
1-12	55	7.5	15	22.5
1-13	60	2.5	15	22.5

ตารางที่ 3 สูตรการทดลองกลุ่มที่ 2 แทนดินตะกอนในทรายเพิ่มครั้งละ 5%

สูตรที่	วัสดุดิบ (%)			
	ดินตะกอน	ดินลูกรัง	ทราย	พอร์ตแลนด์ ประเภท 1
2-1	0	62.5	15	22.5
2-2	5	62.5	10	22.5
2-3	10	62.5	5	22.5
2-4	15	62.5	0	22.5

2.3.2 ผสมวัสดุดิบตามสูตรแต่ละสูตรด้วยการผสมแห้งในกะละมัง คลุกให้เข้ากันเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทำการสเปรย์น้ำสัดส่วน 15% ของน้ำหนักวัสดุดิบ

2.3.3 อัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปทางเดียว ด้วยแรงดัน 100 บาร์ ได้ชิ้นงานขนาด 50×100×7 มิลลิเมตร

2.3.4 บ่มชิ้นงานด้วยการคลุมด้วยถุงพลาสติก เป็นเวลา 7 และ 28 วัน

2.3.5 เมื่อครบเวลาที่กำหนดแล้วทำการทดสอบ ค่าความต้านแรงดัด (Bending Strength) ค่าการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) และ วิเคราะห์ SEM (Scanning Electron Microscope)

2.3.6 ทดสอบค่าความต้านทานแรงดัด (Bending Strength) อ้างอิง มาตรฐาน มอก.2398 เล่ม 4-2553

$$\text{Bending Strength} = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (1)$$

P คือ แรงกดที่ทำให้ชิ้นงานหัก (นิวตัน)

L คือ ความกว้างของบารอง (มิลลิเมตร)

b คือ ความกว้างของชิ้นงานบริเวณที่หัก (มิลลิเมตร)

d คือ ความหนาของชิ้นงานบริเวณที่หัก (มิลลิเมตร)

2.3.7 ทดสอบค่าดูดซึมน้ำ (% Water Absorption) อ้างอิง มาตรฐาน มอก.2398 เล่ม 3-2553

$$\text{Water Absorption} = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100 \quad (2)$$

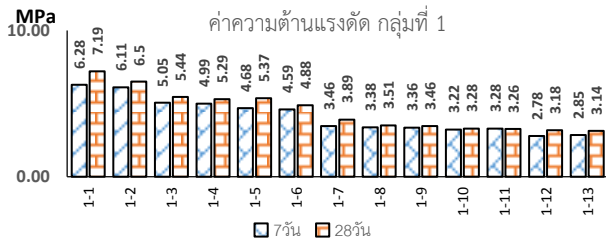
W_d คือ น้ำหนักก่อนต้ม (กิโลกรัม)

W_w คือ น้ำหนักหลังต้ม (กิโลกรัม)

3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

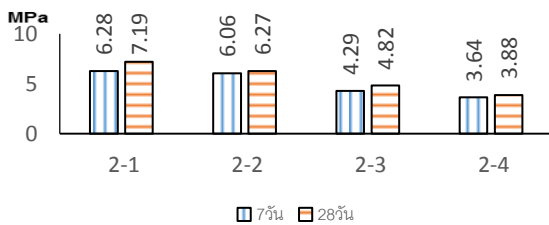
3.1 ทดสอบค่าความต้านทานแรงดัด (Bending Strength)

ค่าความต้านทานแรงดัดของทั้ง 2 กลุ่มเป็นไปตาม รูปที่ 1 และรูปที่ 2



รูปที่ 1 ค่าความต้านแรงอัด ทดแทนดินตะกอนในดินลูกรัง

จาก รูปที่ 1 การทดลองแทนดินตะกอนลงในดินลูกรังที่ละ 5% จนถึง 60% พบว่าการเพิ่มจำนวนดินตะกอนทำให้ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานลดลง การบ่มชิ้นงานมีผลทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น ที่ 28 วัน การแทนดินตะกอน 5% ให้ค่าความต้านแรงอัดสูงสุดคือ 6.5 เมกะปาสกาล โดยไม่บ่มสูตรตั้งต้น 1-1 ที่ไม่มีดินตะกอนเป็นส่วนประกอบ

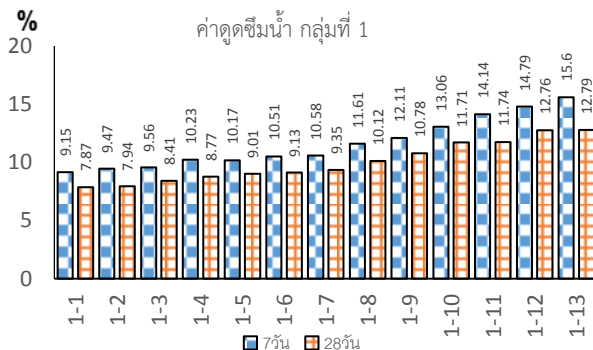


รูปที่ 2 ค่าความต้านแรงอัด ชิ้นงานที่ทดแทนดินตะกอนในทราย

จาก รูปที่ 2 การทดลองแทนดินตะกอนลงในทรายที่ละ 5% จนถึง 15% พบว่าการเพิ่มจำนวนดินตะกอนทำให้ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานลดลง การบ่มชิ้นงานมีผลทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น ที่ 28 วัน การแทนดินตะกอน 5% ให้ค่าความต้านแรงอัดสูงสุดคือ 6.27 เมกะปาสกาล โดยไม่บ่มสูตรตั้งต้น 2-1 ที่ไม่มีดินตะกอนเป็นส่วนประกอบ

3.2 ทดสอบค่าดูดซึมน้ำ (% Water Absorption)

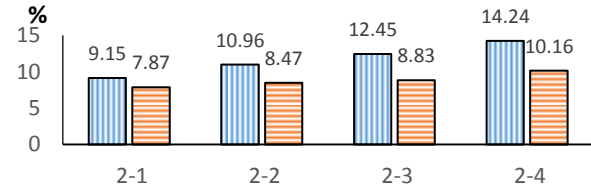
ค่าดูดซึมน้ำของทั้ง 2 กลุ่มเป็นไปตาม รูปที่ 3 และรูปที่ 4



รูปที่ 3 ค่าดูดซึมน้ำ ทดแทนดินตะกอนในดินลูกรัง

จาก รูปที่ 3 การทดลองแทนดินตะกอนลงในดินลูกรังที่ละ 5% จนถึง 60% พบว่าการเพิ่มจำนวนดินตะกอนทำให้ค่าดูดซึมน้ำสูงขึ้น การบ่ม

ชิ้นงานมีผลทำให้ชิ้นงานมีค่าดูดซึมน้ำน้อยลง ที่ 28 วัน การแทนดินตะกอน 5% ให้ค่าดูดซึมน้ำน้อยที่สุดคือ 7.94% โดยไม่บ่มสูตรตั้งต้น 1-1 ที่ไม่มีดินตะกอนเป็นส่วนประกอบ

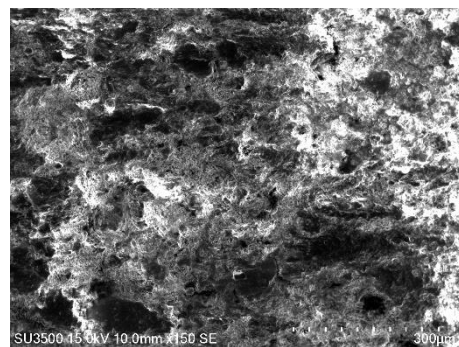


รูปที่ 4 ค่าดูดซึมน้ำ ชิ้นงานที่ทดแทนดินตะกอนในทราย

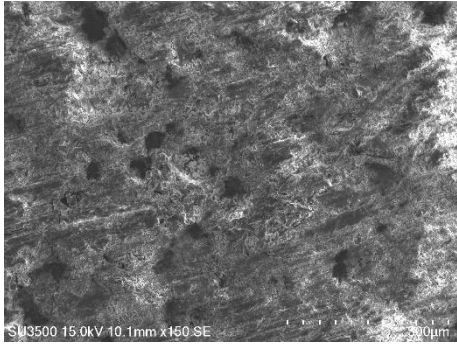
จาก รูปที่ 4 การทดลองแทนดินตะกอนลงในทรายที่ละ 5% จนถึง 15% พบว่าการเพิ่มจำนวนดินตะกอนทำให้ค่าดูดซึมน้ำสูงขึ้น การบ่มชิ้นงานมีผลทำให้ชิ้นงานมีค่าดูดซึมน้ำน้อยลง ที่ 28 วัน การแทนดินตะกอน 5% ให้ค่าดูดซึมน้ำน้อยที่สุดคือ 8.47% โดยไม่บ่มสูตรตั้งต้น 2-1 ที่ไม่มีดินตะกอนเป็นส่วนประกอบ

3.3 วิเคราะห์ชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Scanning Electron Microscope หรือ SEM)

จากการวิเคราะห์ชิ้นงานด้วยการ SEM พบว่าการบ่มมีผลทำให้รูพรุนของชิ้นงานลดลง ซึ่งเป็นผลทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้น ค่าดูดซึมน้ำลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการบ่มชิ้นงานนานขึ้น ปูนซีเมนต์มีการทำปฏิกิริยากับอนุภาคควัตถุดิบในชิ้นงานได้ดีขึ้น ซึ่งแสดงภาพการวิเคราะห์ SEM 7 วัน และ 28 วัน ในรูปที่ 5 และ รูปที่ 6 โดยเลือกสูตรที่ 1-8 เนื่องจากมีการแทนค่าดินตะกอนในดินลูกรัง 35% และมีค่าการดูดซึมน้ำประมาณ 10% ซึ่งผ่านมาตรฐาน มอก.2508-2555



รูปที่ 5 วิเคราะห์ SEM สูตรที่ 1-8 บ่ม 7 วัน



รูปที่ 6 วิเคราะห์ SEM สูตรที่ 1-8 ป่ม 28 วัน

3.4 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบ และค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบ สูตรการทดลองที่ 1-1 และ 1-8

สูตรที่	ต้นทุน (บาท)				
	ดินลูกรัง	ดินตะกอน	ทรายแม่น้ำ	ปูนพอร์ตแลนด์ประเภท 1	รวม (บาท/ตัน)
1-1	156.25	ไม่ใช่	37.5	630	823.75
1-8	68.75	0	37.5	630	736.25
ส่วนต่าง					87

จากตารางที่ 4 สรุปว่าการใช้ดินตะกอนทดแทนในดินลูกรัง เป็นการลดต้นทุนวัตถุดิบ 87 บาท/ตัน

4. สรุปผล

4.1 สูตรที่ 1-8 ซึ่งแทนดินตะกอน 35% ในดินลูกรัง ให้ค่าความต้านแรงดัด 3.51 เมกะปาสคาล และมีค่าดูดซึมน้ำ 10.12% ตามมาตรฐาน มอก.2508-2555 ระบุว่า ค่าความต้านทานแรงดัดต้องไม่น้อยกว่า 12 เมกะปาสคาล และ %ค่าการดูดซึมน้ำต้องมากกว่า 10 % แต่ไม่เกิน 20 % ซึ่งผ่านมาตรฐานเฉพาะค่าการดูดซึมน้ำ ถึงแม้ค่าความต้านแรงดัดไม่สูง แต่ผลิตภัณฑ์สามารถผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ชุมชน ได้ การที่เลือกสูตร 1-8 นี้ เนื่องจากมีสัดส่วนการใช้ดินตะกอนน้ำประปา 35% ซึ่งเป็นปริมาณที่มากกว่าในสูตร 1-2 ซึ่งใช้เพียง 5%

4.2 ดินตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปาสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนในการผลิตกระเบื้องบุผนังได้

4.3 ค่าความต้านแรงดัดแปรผัน กับ ค่าดูดซึมน้ำ หากค่าความต้านทานแรงดัดสูง ค่าดูดซึมน้ำจะต่ำ

4.4 ระยะเวลาบ่ม มีผลทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น ค่าดูดซึมน้ำน้อยลง เนื่องจากการวิเคราะห์ SEM พบว่า ระยะเวลาบ่มที่นาน ทำให้ความพรุนตัวของชิ้นงานลดลง

4.5 การเพิ่มดินตะกอนส่งผลให้ความแข็งแรงลดลง และค่าดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้น

4.6 ผลได้ของงานวิจัยนี้ ช่วยลดภาระในการกำจัดดินตะกอน นอกจากนี้ยังเป็นการใช้ดินตะกอนให้เกิดประโยชน์ และช่วยเพิ่มมูลค่าอีกด้วย

4.7 ช่วยประหยัดพลังงานเนื่องจากเป็นกระเบื้องบุผนังแบบไม่เผา ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือในการทำวิจัยและขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่อุดหนุนทุนวิจัยช่วยให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] จรูญ เจริญเนตรกุล (2011) อิฐบล็อกประสานผสมตะกอนประปา การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ครั้งที่ ๙ ภูเก็ต
- [2] ดวงกมล สุริยฉัตร, ภาสันต์ วิจิตอมรพันธ์ และวรรณนะ เรืองสำเร็จ. (2002). การประยุกต์ใช้ตะกอนดินจากน้ำประปา. สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.
- [3] กิตติพงษ์ สูตรสุคนธ์. (2550) การใช้ดินตะกอนจากน้ำประปา เพื่อเป็นส่วนผสมในการผลิตกระเบื้อง หลังคาดินซีเมนต์. วิทยานิพนธ์ครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [4] ภาคภูมิ กลั่นไพบรี. (2551). การปรับปรุงคุณภาพอิฐดิน ซีเมนต์ที่ผสมดินตะกอนประปาด้วยดินลูกรังและ ทราย. วิทยานิพนธ์ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [5] วินัย ชัยเพชร (2552). การศึกษาคุณสมบัติของอิฐดิน ซีเมนต์ที่ใช้ดินตะกอนประปาผสมกับดินเหนียวทราย. วิทยานิพนธ์ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [6] เอกชัย แก่นวงศ์คำ, มีศักดิ์ พัวพิทยธร, มณีรัตน์ องค์กรธรณี, สหลาภ หอมวุฒิวังศ์ (2014) การพัฒนาอิฐอัดจากเถ้าชีวมวลและตะกอนน้ำประปา ประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยมหาสารคามวิจัย ครั้งที่ 10
- [7] วรรณมา ต.แสงจันทร์ (2009) การพัฒนาอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ
- [8] วรรณมา ต.แสงจันทร์ (2010) การทำกระเบื้องตกแต่งจากเศษแก้ว วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ

การแยกองค์ประกอบของฟิวเซลอยล์ด้วยเพอแวปอเรชันโดยใช้เมมเบรนไฮบริดซิลิกา

Separation of Components in Fusel Oil by Pervaporation Using Hybrid Silica Membrane

อรุณี นุ่นปล่อง^{1*} อนวัช สังข์เพชร¹ ปรีดา ประยูรวงศ์² และ อัจฉราพร ขำโสภา³

¹ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

²ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

³คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

E-mail: a.nunplong@gmail.com*

บทคัดย่อ

ฟิวเซลอยล์เป็นผลผลิตพลอยได้ที่ได้จากกระบวนการกลั่นเอทานอลที่มีองค์ประกอบหลัก คือ ไอโซเอมิลแอลกอฮอล์และแอกทิฟเอมิลแอลกอฮอล์ ซึ่งเป็นแอลกอฮอล์ที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจสูง อย่างไรก็ตาม ฟิวเซลอยล์ยังประกอบด้วยน้ำซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ฟิวเซลอยล์เป็นของผสมอะซิโโทรป ดังนั้นในการกลั่นแยกเอมิลแอลกอฮอล์ซึ่งเป็นองค์ประกอบในฟิวเซลอยล์จึงต้องใช้พลังงานสูง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการแยกน้ำออกจากองค์ประกอบอื่น ๆ ของฟิวเซลอยล์สังเคราะห์ด้วยเพอแวปอเรชันที่ใช้เมมเบรนชนิดไฮบริดซิลิกา ซึ่งมีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ โดยเมมเบรนมีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 0.3–0.5 นาโนเมตร และมีพื้นที่ 0.005 ตารางเมตร จากการทดสอบสมรรถนะของเมมเบรนชนิดนี้โดยการใช้น้ำปราศจากไอออน อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นสารป้อนที่อัตราการไหล 300 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าค่าฟลักซ์ของน้ำมีค่าเท่ากับ 15.2 kg/(m² h) ฟิวเซลอยล์สังเคราะห์ที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของเมมเบรนประกอบด้วยไอโซเอมิลแอลกอฮอล์ 57.038 เปอร์เซ็นต์โดยมวล แอกทิฟเอมิลแอลกอฮอล์ 11.407 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ไอโซบิวทานอล 10.888 เปอร์เซ็นต์โดยมวล เอทานอล 7.283 เปอร์เซ็นต์โดยมวล และน้ำ 13.384 เปอร์เซ็นต์โดยมวล โดยการทดลองเพอแวปอเรชันเป็นแบบกะ สารป้อนมีอัตราการไหล 300 ลิตรต่อชั่วโมง เมื่อเวลาผ่านไป 12.5 ชั่วโมง ความเข้มข้นของน้ำลดลงเหลือ 6.266 โดยมวล และ 0.072 โดยมวล สำหรับอุณหภูมิสารป้อน 50 และ 70 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งการลดลงของความเข้มข้นน้ำดังกล่าวทำให้ค่าฟลักซ์ของน้ำลดลงตาม โดยมีค่า ณ ชั่วโมงที่ 12.5 เท่ากับ 1.641 kg/(m²h) และ 2.828 kg/(m²h) สำหรับอุณหภูมิสารป้อน 50 และ 70 องศาเซลเซียส ตามลำดับ การลดลงของความเข้มข้นและค่าฟลักซ์ของน้ำส่งผลให้ค่าฟลักซ์ของแอลกอฮอล์มีค่าลดลงแม้ว่าความดันไอด้านสารป้อนของแอลกอฮอล์มีค่าค่อนข้างคงที่ก็ตาม

คำสำคัญ: ฟิวเซลอยล์ เพอแวปอเรชัน เมมเบรน

1. บทนำ

ฟิวเซลอยล์เป็นผลผลิตพลอยได้ที่เกิดขึ้นในระหว่างการกลั่นเพื่อให้ได้เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์สูง ในการผลิตเอทานอลที่กำลังการผลิต 150,000 ลิตรต่อวัน จะทำให้ได้ฟิวเซลอยล์ในอัตรา 300 ถึง 600 ลิตรต่อวัน [1] องค์ประกอบหลักของฟิวเซลอยล์ได้แก่ไอโซเอมิลแอลกอฮอล์ ซึ่งมีอยู่ประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์โดยมวล [2] และแอกทิฟเอมิลแอลกอฮอล์ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้อย่างมากมายเช่น ใช้เป็นส่วนประกอบหลักของ Kovac's Reagent ที่ใช้ในการทดสอบอินโดล (indole test) ใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์สารแต่งกลิ่น และใช้เป็นสารเติมแต่งในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ [3, 4] กระนั้น การที่จะนำฟิวเซลอยล์มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดนั้น จำเป็นต้องแยกองค์ประกอบต่าง ๆ ออกจากกัน แต่จากการที่ฟิวเซลอยล์มีน้ำเป็นองค์ประกอบมากถึง 13-15 เปอร์เซ็นต์โดยมวล [2] ทำให้ฟิวเซลอยล์เป็นของผสมอะซิโโทรป ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำกระบวนการเพอแวปอเรชัน (Pervaporation หรือ PV) มาใช้ในการแยกน้ำออกจากองค์ประกอบต่าง ๆ ของฟิวเซลอยล์โดยใช้เมมเบรนชนิดไฮบริดซิลิกาที่มีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 0.3–0.5 nm ซึ่งเป็นเมมเบรนที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ โดยกระบวนการเพอแวปอเรชันเป็นกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับที่จะนำมาใช้แยกน้ำออกจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอน โดยเฉพาะอย่างยิ่งของผสมแอลกอฮอล์กับน้ำที่เป็นอะซิโโทรป [5] นอกจากนี้การนำกระบวนการเพอแวปอเรชันมาช่วยให้กระบวนการแยกมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำลงเนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการกลั่นเพียงอย่างเดียว [6]

2. วิธีกรวิจัย

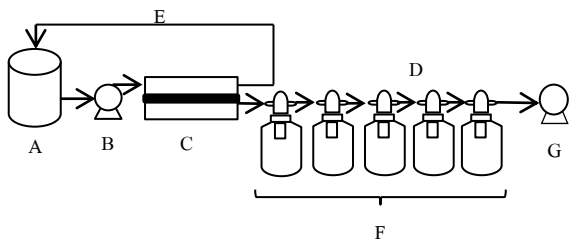
2.1 สารเคมี

ฟิวเซลอยล์สังเคราะห์ที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของเมมเบรนเตรียมจากสารเคมีบริสุทธิ์ ประกอบด้วยไอโซเอมิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 57.038 โดยมวล แอกทิฟเอมิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 11.407 โดยมวล ไอโซบิวทานอลความเข้มข้นร้อยละ 10.888 โดยมวล

เอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 7.283 โดยมวล และน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้นร้อยละ 13.384 โดยมวล ตามลำดับ

2.2 เพอแวนพอเรชัน

เตรียมฟูเซลอยล์สังเคราะห์ปริมาตร 1,600 มิลลิลิตร บรรจุลงในถังสารป้อนแล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส แล้วจึงป้อนสารป้อนเข้าสู่เมมเบรนชนิดไฮบริดซิลิกาซึ่งมีพื้นที่ 0.005 ตารางเมตร ด้วยอัตราการไหลของสารป้อน 300 ลิตรต่อชั่วโมง สารป้อนส่วนที่ไม่ผ่านเมมเบรนหรือรีเทนเททไหลกลับไปสู่ถังบรรจุสารป้อน ส่วนด้านเพอเมอเทอนั้นมีการใช้ปั๊มสุญญากาศเพื่อช่วยการระเหยเป็นไอขององค์ประกอบที่ผ่านเมมเบรน โดยความดันด้านเพอเมอเทอนี้ค่าประมาณ 39 mmHg การควบคุมเพอเมอเทอทำโดยชุดอุปกรณ์ควบคุมแรงดันแสดงในรูปแบบที่ 1 โดยควบคุมชุดอุปกรณ์ควบคุมแรงดันให้มีอุณหภูมิประมาณ -15 องศาเซลเซียส การทดสอบสมรรถนะของเมมเบรนมีการดำเนินการเป็นแบบกะที่มีระยะเวลาการทดลองเท่ากับ 2.5, 5, 7.5 และ 12.5 ชั่วโมง เมื่อสิ้นสุดการทดลองแต่ละครั้งจึงทำการวัดมวลทั้งหมดของเพอเมอเทอที่ได้หลังจากเพอเมอเทอมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30-33 องศาเซลเซียส) รวมทั้งนำเพอเมอเทอไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบและความเข้มข้นด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีที่มีอุปกรณ์ตรวจวัดชนิด FID และหาค่าฟลักซ์ขององค์ประกอบด้านเพอเมอเทอที่แสดงในสมการที่ 1



รูปที่ 1 ชุดอุปกรณ์เพอแวนพอเรชัน

ชุดอุปกรณ์เพอแวนพอเรชันประกอบด้วย (A) ถังบรรจุสารป้อน (B) ปั๊มรีดท่อ (C) เมมเบรนไฮบริดซิลิกา (D) เพอเมอเทอ (E) รีเทนเทท (F) เครื่องควบคุมแรงดัน (G) ปั๊มสุญญากาศ

$$J = \frac{m}{At} \quad (1)$$

เมื่อ J = ฟลักซ์ (กิโลกรัม/ตารางเมตร(ชั่วโมง))
 m = มวลที่ผ่านเมมเบรน (กิโลกรัม)
 A = พื้นที่ของเมมเบรน (ตารางเมตร)
 t = เวลาที่ใช้ในการทดลอง (ชั่วโมง)

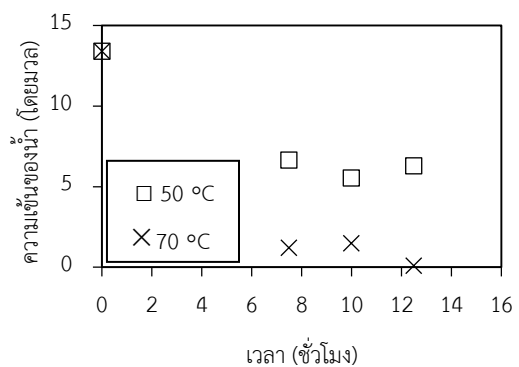
3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 ทดสอบสมรรถนะของเมมเบรนด้วยการใช้น้ำปราศจากไอออน

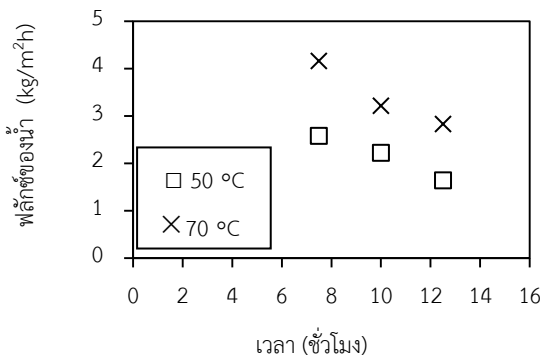
เมื่อใช้สารป้อนเป็นน้ำปราศจากไอออนและดำเนินการเพอแวนพอเรชันในลักษณะเดียวกันกับเมื่อสารป้อนเป็นฟูเซลอยล์ กราฟที่พลอตระหว่างมวลของน้ำด้านเพอเมอเทอกับระยะเวลาการทดลอง คือ 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมงมีลักษณะเป็นเส้นตรงซึ่งแสดงให้เห็นว่าการซึมผ่านเมมเบรนอยู่ในสถานะคงตัว (steady state) เมื่อนำค่าความชันของกราฟเส้นตรงไปหาค่าฟลักซ์ด้วยการหารด้วยพื้นที่ของเมมเบรนพบว่าค่าฟลักซ์ของน้ำมีค่าเท่ากับ 15.2 กิโลกรัม/(ตารางเมตร ชั่วโมง)

3.2 ศึกษากระบวนการแยกฟูเซลอยล์ด้วยเพอแวนพอเรชันแบบกะ

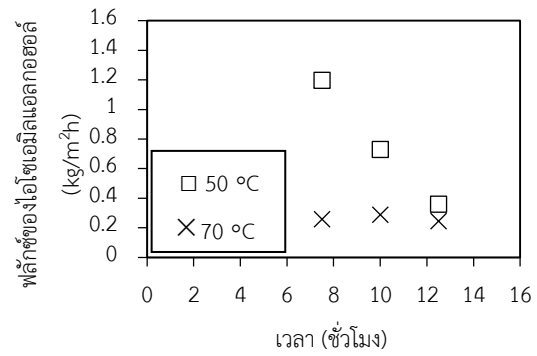
จากผลการศึกษาพบว่าที่ระยะเวลาเริ่มต้นความเข้มข้นของน้ำในด้านสารป้อนลดลงจากค่าเริ่มต้นคือ 13.383 เปอร์เซ็นต์โดยมวลอย่างรวดเร็ว เมื่อความเข้มข้นของน้ำในด้านสารป้อนต่ำลงดังแสดงในรูปที่ 2 น้ำจึงสามารถซึมผ่านเมมเบรนได้ในอัตราที่ต่ำลงเพราะผลต่างระหว่างความดันย่อยของน้ำด้านสารป้อนและด้านเพอเมอเทอหรือแรงขับเคลื่อนลดลง ฟลักซ์ของน้ำจึงมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดดังแสดงในรูปที่ 3 การลดลงของความเข้มข้นและค่าฟลักซ์ของน้ำนี้ส่งผลให้ค่าฟลักซ์ของเอทานอล ไอโซบิวทานอล ไอโซเอมิลแอลกอฮอล์ และแอคทีฟเอมิลแอลกอฮอล์มีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 4 ถึง 7 ตามลำดับ แม้ว่าความเข้มข้นและความดันไอของด้านสารป้อนของแอลกอฮอล์แต่ละชนิดมีค่าคงที่ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของน้ำในด้านสารป้อนมีอิทธิพลอย่างมากต่อการซึมผ่านเมมเบรนของแอลกอฮอล์ น้ำที่อยู่ในสารป้อนมีอิทธิพลต่อการซึมผ่านเมมเบรนของแอลกอฮอล์จากการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของแอลกอฮอล์ ซึ่งส่งผลให้แอลกอฮอล์ถูกดูดซับลงบนผิวหน้าเมมเบรนมากขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งเอมิลแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้นต่ำ เมื่อความเข้มข้นของน้ำในสารป้อนลดลง การดูดซับแอลกอฮอล์ลงบนผิวหน้าของเมมเบรนและค่าฟลักซ์ของแอลกอฮอล์จึงลดลงตาม



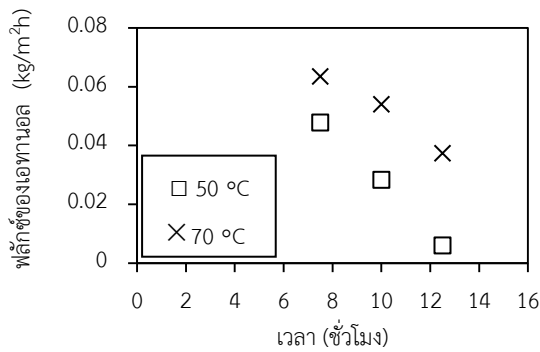
รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำกับเวลา



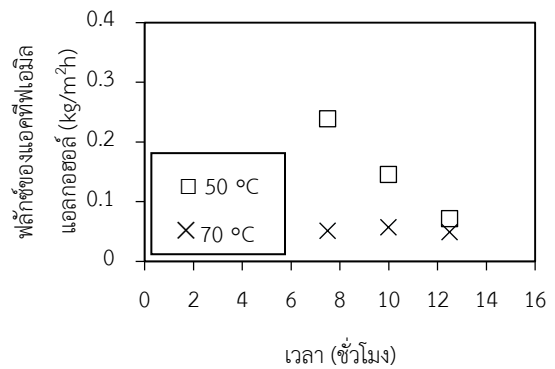
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ของน้ำกับเวลา



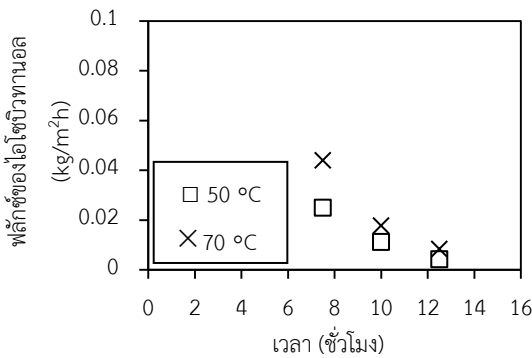
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ของไอโซเอมิลแอลกอฮอล์กับเวลา



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ของเอทานอลน้ำกับเวลา



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ของแอคทีฟเอมิลแอลกอฮอล์กับเวลา



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ของไอโซบิวทานอลกับเวลา

ตารางที่ 1 ความเข้มข้นและความดันไอของฟูเซลอยล์จากเมมเบรนชนิดไฮบริดซิลิกา ที่ระยะเวลา 0 7.5 10 และ 12.5 ชั่วโมง

องค์ประกอบ	อุณหภูมิ 50 °C	
	ความเข้มข้น (wt %)	ความดันไอ* (kPa)
เอทานอล	7.283 – 8.044	2.175 – 8.047
ไอโซบิวทานอล	10.888 – 12.050	0.653 – 0.774
ไอโซเอมิลแอลกอฮอล์	57.038 – 61.367	1.104 – 1.226
แอคทีฟเอมิลแอลกอฮอล์	11.407 – 12.272	0.183 – 0.204
องค์ประกอบ	อุณหภูมิ 70 °C	
	ความเข้มข้น (wt %)	ความดันไอ* (kPa)
เอทานอล	7.283 – 8.353	5.454 – 11.092
ไอโซบิวทานอล	10.888 – 12.751	1.895 – 2.817
ไอโซเอมิลแอลกอฮอล์	57.038 – 65.687	3.512 – 4.584
แอคทีฟเอมิลแอลกอฮอล์	11.407 – 13.137	0.632 – 0.824

* คำนวณโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แอคทีวิตีจากแบบจำลอง NRTL

เมื่อพิจารณารูปที่ 6 และ 7 พบว่าค่าฟลักซ์ของไอโซเอมิลแอลกอฮอล์และแอคทีฟเอมิลแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เนื่องจากความเข้มข้นของน้ำในด้านสารป้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีค่าต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นอย่างมาก ปรากฏการดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าการส่งเสริมการดูดซับแอลกอฮอล์ลงบนผิวหน้าของเมมเบรนโดยน้ำมีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อการซึมผ่านเมมเบรนของแอลกอฮอล์

4. สรุป

เมมเบรนชนิดไฮบริดซีลิกามีความสามารถในการแยกน้ำออกจากองค์ประกอบอื่น ๆ ของฟูเซลอยล์ได้ โดยค่าฟลักซ์ของแอลกอฮอล์ลดลงตามความเข้มข้นของน้ำในสารป้อนแม้ว่าความเข้มข้นและความดันไอของแอลกอฮอล์ในด้านสารป้อนมีค่าค่อนข้างคงที่โดยมีสาเหตุที่เป็นไปได้คือน้ำทำให้แอลกอฮอล์ถูกดูดซับลงบนผิวหน้าของเมมเบรน

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติผ่านงบประมาณประจำปี.ศ. 2558-2559 ภายใต้ชุดโครงการ “การใช้ประโยชน์จากผลผลิตพลอยได้จากกระบวนการผลิตเอทานอลจากการหมักกากน้ำตาล”

เอกสารอ้างอิง

- [1] สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร,มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, การนำของเสียจากการผลิตเอทานอลมาใช้ประโยชน์เพื่อเพิ่มมูลค่า, ตุลาคม 2549 หน้า 14.
- [2] C. Vauclair, H. Tarjus, P. Schaetzel, “Permselective properties of PVA-PAA blended membrane used for dehydration of fusel oil by pervaporation”, Journal of Membrane Science 125 (1997), pp. 293-301.
- [3] M. C. Ferreira., A. Antonio., and E. A. C. Batista., “Study of the Fusel Oil Distillation Process” I & EC Research, Vol. 52, 2013, pp. 2336-2356.
- [4] J. M. Miller., and J. W. Wright., “Spot Indole Test Evaluation of Four Reagents” Journal of clinical microbiology, Vol.15, No. 4, 1982, pp. 589-592.
- [5] N. Wynn., 2001, “Pervaporation comes of ages”, Sulzer Chemtech, Membrane Systems, CEP.
- [6] F. Lipnizki., R.Field, and K.,Ten, 1999“Pervaporation-based hybrid process: a review of process design”, applications and economics, J. Membr. Sci., 153, pp. 183-210.

การแยกบิวทานอลออกจากน้ำหมักจำลองโดยตัวดูดซับที่มีรูพรุนที่เตรียม จากพอลิเอเทอร์บล็อกเอไมด์โดยวิธีการตกตะกอน

Separation of Butanol from Synthetic Fermentation Broth by Porous Adsorbent Prepared from Poly(ether block amide) Using Precipitation Method

อดุลยฤทธิ์ สุดทองคง* และ อนวัช สังข์เพ็ชร

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

E-mail: adunyarit.s@gmail.com*

บทคัดย่อ

บิวทานอลที่ได้จากการหมักถือเป็นเชื้อเพลิงยั่งยืนชนิดหนึ่ง แต่ยังคงมีปัญหาสำคัญในกระบวนการผลิตคือความเป็นพิษของบิวทานอลที่มีต่อแบคทีเรียที่ผลิตบิวทานอลขึ้นมา งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการสังเคราะห์ตัวดูดซับที่มีความพรุนซึ่งเตรียมมาจากการตกตะกอนพอลิเอเทอร์บล็อกเอไมด์เพื่อนำมาใช้ในการศึกษาการดูดซับบิวทานอล ออกจากน้ำหมักจำลองหรือสารละลายผสมที่มีความเข้มข้นของอะซิโตน บิวทานอล และเอทานอลเป็น 1.0, 19.2 และ 1.7 กรัมต่อลิตรตามลำดับ การเตรียมตัวดูดซับทำโดยใช้โพพรานอลเป็นตัวทำละลายเม็ดพอลิเอเทอร์บล็อก เอไมด์ที่ใช้คือ PEBAX[®] 2533 และมีสารเติมตัวทำละลายคือเมทานอลและเอทานอลลงในสารละลายพอลิเมอร์ก่อนทำการตกตะกอนด้วยน้ำ โดยตัวทำละลายที่เติมไปมีปริมาตร 1 ถึง 2 เท่าของปริมาตรของโพพรานอล จากการศึกษาวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับด้วยเทคนิค SEM พบว่าโครงสร้างที่มีความพรุนของตัวดูดซับมีลักษณะที่คล้ายกัน การดูดซับบิวทานอลจากน้ำหมักจำลองเป็นการทดลองแบบกะที่อุณหภูมิ 37 °C โดยใช้ตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กกว่า 840 μm ตัวดูดซับที่เตรียมจากการเติมเมทานอลเข้าไปในสารละลายพอลิเมอร์มีความจุการดูดซับอยู่ในช่วง 15-32 มิลลิกรัมบิวทานอลต่อกรัมตัวดูดซับ ในขณะที่การเติมเอทานอลก่อนการตกตะกอนพอลิเมอร์ทำให้ได้ตัวดูดซับที่มีความจุการดูดซับเพิ่มขึ้นเป็น 33-46 มิลลิกรัมบิวทานอลต่อกรัมตัวดูดซับ ส่วนความจุการดูดซับอะซิโตนและเอทานอลมีค่าต่ำมาก ในส่วนการดูดซับบิวทานอลแบบต่อเนื่องโดยใช้หลอดดูดซับแบบแพคเพื่อที่จะหา Breakthrough curve เพื่อที่ใช้ในการคำนวณหา bed capacity และ length of unused bed เพื่อใช้ในการคำนวณทางวิศวกรรมในการออกแบบและขยายคอลัมน์ดูดซับเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมต่อไป

คำสำคัญ: บิวทานอล การดูดซับ ตัวดูดซับ พอลิเอเทอร์บล็อกเอไมด์

1. บทนำ

ปัจจุบันเชื้อเพลิงฟอสซิลและน้ำมันดิบมีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็วและการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้าน

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ซึ่งพลังงานทดแทนที่เป็นพลังงานยั่งยืนหรือสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบที่ไม่ใช่อาหารของมนุษย์และเป็นพลังงานที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยจึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ไบโอบิวทานอลนับเป็นพลังงานทดแทนชนิดหนึ่งที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ และสามารถผลิตได้โดยการใช้สายโซ่ตรงของลิกโนเซลลูโลสเช่น น้ำตาลเยือกแข็ง และน้ำตาลเพนโทส ทำปฏิกิริยากับแบคทีเรีย [1] แต่การผลิตไบโอบิวทานอลยังไม่เกิดขึ้นในเชิงอุตสาหกรรมได้เนื่องจากการที่บิวทานอลในถังหมักมีความเข้มข้นสูงจะเป็นพิษต่อผนังเซลล์ของแบคทีเรียจนเกิดการสลายตัวของเซลล์เกิดขึ้นซึ่งเหตุการณ์ดังกล่าวเรียกว่า “การยับยั้งของผลิตภัณฑ์” การยับยั้งของผลิตภัณฑ์ส่งผลให้อัตราการผลิตของบิวทานอลมีค่า 0.1 ถึง 0.6 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ที่ผ่านมามีการคิดค้นวิธีการในการยืดอายุของแบคทีเรียโดยการลดความเข้มข้นของบิวทานอลโดยใช้วิธีต่าง ๆ มากมายโดย Oudshorn และคณะ ได้ศึกษาพลังงานในการแยกบิวทานอลของกระบวนการสกัดด้วยของเหลว การใช้เมมเบรน การไล่แก๊ส การดูดซับพบว่ากระบวนการดูดซับใช้พลังงานแยกบิวทานอลน้อยที่สุดโดยใช้พลังงาน 1.3 MJ/kg butanol [2] Lui และคณะ ได้ศึกษากระบวนการเพอแวปพอร์ชันโดยใช้พอลิเอเทอร์บล็อกเอไมด์ (PEBA) พบว่า PEBA มีค่าการดูดซับ 6.83 กรัมของบิวทานอลต่อกรัมของพอลิเอเทอร์บล็อกเอไมด์ [3] โดยงานวิจัยนี้ใช้ตัวดูดซับที่มีรูพรุนที่ไม่ชอบน้ำซึ่งเตรียมมาจากการตกตะกอนของพอลิเอเทอร์บล็อกเอไมด์

2. วิธีวิจัย

2.1 สารเคมี

พอลิเอเทอร์บล็อกเอไมด์ที่ใช้รู้จักกันในชื่อ PEBAX[®] 2533 ผลิตโดย Arkema Inc สหรัฐอเมริกา ตัวทำละลายที่ใช้ในการละลายพอลิเมอร์คือโพพรานอลบริสุทธิ์ เกรดวิเคราะห์ ในส่วนของตัวไม่ทำละลายที่ใช้เติมคือเมทานอลและเอทานอลบริสุทธิ์ที่มีความเข้มข้น 99.99 % โดยปริมาตร

2.2 การเตรียมตัวดูดซับ

นำพอลิเมอร์ PEBAX[®] 2533 ละลายในโพพรานอลที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส โดยให้ความเข้มข้นของพอลิเอเทอร์บล็อกเอ-

ไมด์เป็น 15 % โดยน้ำหนัก เมื่อละลายจนเป็นเนื้อเดียวกันจึงทำการลดอุณหภูมิให้เท่ากับอุณหภูมิห้องหลังจากนั้นก็ทำการเติมเมทานอลหรือเอทานอลที่อัตราส่วนโพรพานอลต่อเมทานอลหรือเอทานอลเป็น 1:1 ถึง 1:2 แล้วทำการตกตะกอนด้วยน้ำโดยทำการหยดน้ำปราศจากไอออนที่มากเกินพอในอัตราการหยด 15 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อทำการตกตะกอนพอลิเมอร์ออกจากสารละลาย จากนั้นแยกพอลิเมอร์ที่ตกตะกอนออกจากสารละลายด้วยการกรองและนำไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสจนกว่าน้ำหนักน้ำหนักจะคงที่ก่อนนำไปคัดขนาดโดยเลือกตัวดูดซับที่มีขนาดน้อยกว่า 0.841 มิลลิเมตร

2.3 การวิเคราะห์ลักษณะของตัวดูดซับ

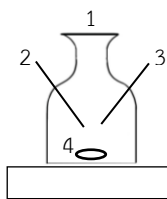
ตัวดูดซับที่ได้จะตรวจวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิค SEM และการหาพื้นที่ผิวด้วย BET

2.3 การดูดซับแบบกะ

ซึ่งตัวดูดซับใส่ในชุดอุปกรณ์ดูดซับแบบกะซึ่งแสดงดังรูปที่ 1 โดยใช้ตัวดูดซับที่มีขนาดน้อยกว่า 0.841 มิลลิเมตร ความเข้มข้นของอะซิโตน, บิวทานอลและเอทานอลในสารละลายน้ำหมักสังเคราะห์ปริมาณ 100 มิลลิลิตร คือ 1 กรัมต่อลิตร, 19.2 กรัมต่อลิตร และ 1.7 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ การดูดซับดำเนินการที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส และใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลาย

2.4 การดูดซับแบบต่อเนื่องโดยใช้หอดูดซับแบบแพค

น้ำหมักสังเคราะห์ถูกเตรียมไว้ในถังป้อนที่มีความเข้มข้นอะซิโตน บิวทานอลและเอทานอล 1กรัมต่อลิตร, 19.2 กรัมต่อลิตร และ 1.7 กรัมต่อลิตรตามลำดับที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส สารละลายไหลเข้าสู่หอดูดซับแบบแพคด้านล่างที่อัตราการไหล 2 มิลลิลิตรต่อนาที การวิเคราะห์หาความเข้มข้นขององค์ประกอบแต่ละชนิดที่ออกจากหอดูดซับด้านบน ณ เวลาต่าง ๆ ทำโดยการใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี และนำผลที่ได้ไปพลอตกราฟระหว่างอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นขาออกต่อความเข้มข้นขาเข้ากับเวลา

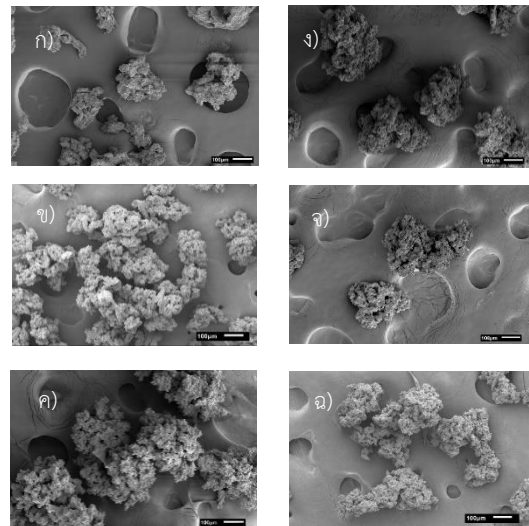


รูปที่ 1 ชุดอุปกรณ์ดูดซับแบบกะ: (1) ถังป้อน (2) แท่งให้ความร้อน (3) เทอร์โมสตัท (4) เครื่องกวนสาร

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยปริมาตรของตัวทำละลายต่อตัวไม่ทำละลาย

ลักษณะของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่มีรูพรุนโดยการเติมเมทานอลและเอทานอลที่สัดส่วนต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งพบว่าลักษณะโดยรวมของตัวดูดซับมีความพรุนตัว ซึ่งรูพรุนที่เกิดขึ้นเกิดจากเมทานอลหรือเอทานอลที่เติมไปทำให้เกิดอนุภาคพอลิเมอร์ขนาดเล็ก สังเกตได้จากสารละลายมีลักษณะขาวขุ่นหรือเป็นสารละลายคอลลอยด์ ขั้นตอนการตกตะกอนพอลิเมอร์ด้วยน้ำทำให้เกิดการเพิ่มขนาดของอนุภาคและอาจเกิดการซ้อนทับกันของพอลิเมอร์จนเกิดเป็นรูพรุนขึ้น อย่างไรก็ตาม ผลจากการวิเคราะห์ด้วย SEM ไม่ทำให้เห็นความแตกต่างระหว่างตัวดูดซับที่เตรียมจากอัตราส่วนตัวทำละลายต่อตัวไม่ทำละลายที่แตกต่างกันแม้ว่าความสามารถดูดซับบิวทานอลมีความแตกต่างกันดังแสดงโดยตารางที่ 1



รูปที่ 2 ตัวดูดซับที่กำลังขยาย 100 เท่า อัตราส่วนโพรพานอลต่อเมทานอล ก) 1:1 ข) 1:1.5 ค) 1:2 อัตราส่วนโพรพานอลต่อเอทานอล ง) 1:1 จ) 1:1.5 ฉ) 1:2

ตารางที่ 1 ผลของตัวไม่ทำละลายที่มีต่อความสามารถดูดซับบิวทานอล

อัตราส่วน	ความสามารถดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ)	
	เมทานอล	เอทานอล
1:1	22.7	46.4
1:1.5	32.5	45.7
1:2	15.3	46.0

3.2 อิทธิพลของตัวไม่ทำละลาย

ปริมาณการดูดซับของตัวดูดซับที่เตรียมจากการเติมเมทานอลหรือเอทานอลในอัตราส่วนต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งเห็นได้ว่าปริมาณการดูดซับจะไม่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของของตัวไม่ทำละลายที่เติมลงไป แต่ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวไม่ทำละลาย โดยที่เอทานอลมีค่าการละลายของพอลิเมอร์บล็อกโพลีเมอร์มากกว่าจึงทำให้ความสามารถในการละลายของพอลิเมอร์ลดลงน้อยกว่าการเติมด้วยเมทานอล ส่งผลทำให้เกิดอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าและเมื่อตกตะกอนด้วยน้ำจึงทำให้เกิดตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากกว่าดังแสดงโดยพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET ดังแสดงค่าในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 พื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่ได้จากการเติมตัวไม่ทำละลายก่อนการตกตะกอนที่อัตราส่วน 1:1.5

ตัวไม่ทำละลาย	พื้นที่ผิว (ตารางเมตร)
เมทานอล	17.7±3.40
เอทานอล	23.40±3.49

3.3 การดูดซับแบบต่อเนื่อง

การดูดซับสารละลายจำลองในถังหมักแบบต่อเนื่องด้วยหอดูดซับแบบแพคที่บรรจุด้วยตัวดูดซับ 48.14 กรัม ทำให้ได้ breakthrough curve ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยที่สารละลายเริ่มไหลออกจากหอดูดซับที่เวลา 145 นาที และเมื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นพบว่าสารละลายไม่มีการปะปนของบิวทานอลออกมา แต่มีอะซิโตนและเอทานอลออกมากับสารละลาย หรือหมายความว่าตัวดูดซับที่บรรจุในหอดูดซับแบบแพคนั้นไม่สามารถดูดซับอะซิโตนและเอทานอลไว้ได้

โดยการทดลองนี้ได้หาความจุของเบด (BC) ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก breakthrough curve โดยใช้สมการที่ 1

$$BC = G \int_0^t (C_0 - C) dt \quad (1)$$

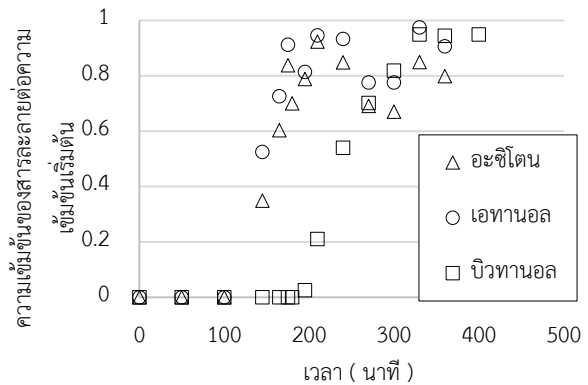
โดยที่ G คือ อัตราการป้อนสารละลาย
C₀ คือ ความเข้มข้นของสารป้อน

และสามารถคำนวณความยาวของเบดส่วนที่ไม่ได้ใช้งาน (Length of unused bed หรือ LUB) ได้จากสมการที่ 2

$$LUB = \frac{Z}{T_s} (T_s - T_b) \quad (2)$$

โดยที่ Z คือ ความสูงของเบด
T_b คือ breakthrough time

T_s คือ ระยะเวลาในการทำตัวดูดซับเต็มทั้งเบด



รูปที่ 3 breakthrough curve ของการดูดซับ

โดยพบว่าค่าความจุของเบดมีค่าเท่ากับ 3.03 กรัมของบิวทานอล และมีความยาวของเบดส่วนที่ไม่ได้ใช้งานมีค่าเท่ากับ 33.29 เซนติเมตร

4. สรุป

การเตรียมตัวดูดซับที่มีรูพรุนจาก PEBAX[®] 2533 ด้วยวิธีการเติมตัวไม่ทำละลายก่อนการตกตะกอนด้วยน้ำทำให้ได้ตัวดูดซับที่มีโครงสร้างที่มีความพรุน โดยตัวไม่ทำละลายเอทานอลทำให้ได้ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวที่มากกว่าการเติมด้วยเมทานอล ซึ่งตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากกว่าให้ค่าความสามารถดูดซับบิวทานอลที่สูงกว่า การดูดซับด้วยตัวดูดซับที่บรรจุในแพคเบด แสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับบิวทานอลได้โดยมีความจุของเบดเท่ากับ 3.03 กรัมของบิวทานอล

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีในการให้ทุนสนับสนุนการวิจัย ประจำปี พ.ศ. 2559

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Qureshi and Ezeji, "Butanol, 'a superior biofuel' Production from Agriculture Residues (Renewable Biomass): Recent Progress in Technology.Biofuels", Bioprod. Biorefin., Vol.2, 2008, pp. 319-330.
- [2] A. Oudshoorn and et al., "Assessment of Options for Selective 1-Butanol Recovery from Aqueous Solution", Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 48, pp. 7325-7336.

- [3] F. Liu, L and Feng, “Separation of acetone–butanol–ethanol (ABE) from dilute aqueous solutions by pervaporation”, Sep. Purif. Technol., Vol. 42, pp. 273-282.

กระเบื้องบุผนังเผาครั้งเดียวจากดินตะกอนน้ำประปา One Fired Wall Tiles from Sediment Soil Water Supply Treatment Process

พีระภัทร์ นาคกนก* อุบลรัตน์ หวังรักษาศีลกุล

ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

E-mail: peerapat.nakkanok@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้
อรรถประโยชน์จากดินตะกอนน้ำประปาในการผลิตกระเบื้องบุผนังแบบ
เผาครั้งเดียวและไม่ผ่านการเคลือบวัสดุที่ใช้ในการทดลองนี้
ประกอบด้วย ดินตะกอนน้ำประปามหาสวัสดิ์ ดินสำเร็จรูป เศษแก้ว
กำหนดสูตรการทดลองโดยพิจารณาจากแผนภาพสามแกน แบ่งสูตรได้
5 กลุ่ม จำนวน 15 สูตร จากนั้นทำการขึ้นรูปวัตถุดิบแต่ละสูตร ด้วย
แรงดัน 100 บาร์ ได้ชิ้นงานขนาด 50x100x7 มม. แล้วทำการเผา
ชิ้นงานด้วยอัตรา 200 °C/hr ขึ้นไฟที่อุณหภูมิสูงสุด 850 °C เป็นเวลา
1 ชั่วโมง แล้วทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน คือ ค่า
ความต้านแรงดัด , น้ำหนักที่สูญเสียหลังการเผา , การหดตัว และ การ
ดูดซึมน้ำ ผลจากการทดลองพบว่า สูตร 1A คือ สูตรที่ดีที่สุด ซึ่งใช้
วัตถุดิบประกอบด้วย ดินตะกอนน้ำประปา 30 % ดินสำเร็จรูป 10 %
และเศษแก้ว 60 % มีคุณสมบัติด้านค่าความต้านแรงดัด 10.29 MPa
ค่าการหดตัว 3.17 % , ค่าการดูดซึมน้ำ 14.29% ค่าน้ำหนักที่สูญเสีย
หลังการเผา 5.06 % สามารถผ่านมาตรฐาน มอก.2508-2555 สรุปได้
ว่าสามารถใช้ดินตะกอนน้ำประปา 30% ในการผลิตกระเบื้องบุผนัง
แบบเผาครั้งเดียวและไม่เคลือบได้

คำสำคัญ : ดินตะกอนน้ำประปา กระเบื้องบุผนังแบบเผาครั้งเดียว และ
ไม่เคลือบ อรรถประโยชน์

1. บทนำ

ปัจจุบันการประปานครหลวง มีโรงงานผลิตน้ำประปาใน
ความรับผิดชอบ 4 แห่ง โรงงานผลิตน้ำประปาสามเสน โรงงานผลิต
น้ำประปาบางเขน โรงงานผลิตน้ำประปาธนบุรี และ โรงงานผลิต
น้ำประปามหาสวัสดิ์ เพื่อผลิตน้ำประปาให้ประชาชนใช้เพื่ออุปโภคหรือ
บริโภค ซึ่งในกระบวนการผลิตน้ำประปานี้ พบว่าจะเกิดดินตะกอน
เหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก และก่อให้เกิดเป็นปัญหาต่อการกำจัด งานวิจัย
นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ประโยชน์จากดิน

ตะกอนน้ำประปาในการผลิตกระเบื้องบุผนังแบบเผาครั้งเดียวและไม่
ผ่านการเคลือบ ซึ่งได้นำดินตะกอนจากโรงงานผลิตน้ำประปามหาสวัสดิ์
โรงงานผลิตน้ำประปามหาสวัสดิ์สามารถผลิตน้ำประปา 584
ล้านลบ.ม./ปี และมีดินตะกอนเกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตน้ำประปา
52,300 ตัน/ปี ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาในด้านการจัดการและกำจัด ซึ่งหาก
สามารถนำดินตะกอนเหล่านี้กลับไปใช้ประโยชน์ได้ย่อมเป็นการลด
ปัญหาของการจัดการตะกอน รวมทั้งลดต้นทุนการผลิตน้ำประปาได้ [1]
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ประโยชน์
จากดินตะกอนน้ำประปาในการผลิตกระเบื้องบุผนัง และเพื่อเป็นการ
ลดปัญหาการจัดการลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดดินตะกอน อีกทั้งยัง
สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอีกด้วย

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาของงานวิจัยก่อนหน้าที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ พบว่า
ไพบูลย์ แยมเนียน และคณะ ได้ใช้อรรถประโยชน์ดินตะกอนจาก
โรงงานเซรามิค เพื่อผลิตกระเบื้องบุผนังแบบเคลือบ เผาสองครั้งที่
อุณหภูมิ 1,100 °C [2] จรุงญ เจริญเนตรกุล ผลิตอิฐบล็อกประสานผสม
ดินตะกอนจากระบบน้ำประปา แล้วทำการบ่ม 28 วัน เพื่อศึกษากำลัง
อัด และการดูดกลืนน้ำ [3] เอกชัย แก่นวงศ์คำและคณะ ได้พัฒนาอิฐ
อัดจากเถ้าชีวมวลและตะกอนน้ำประปาทำการบ่มจนครบอายุการใช้งาน
จากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติ ได้แก่ กำลังอัด การดูดซึมน้ำ และ
การนำความร้อน[4] ศศิกร ประสารการ และคณะ ได้ทำการวิจัยสมบัติ
ของกระเบื้องดินเผาผสมเฟอร์ไรต์ดิบ ได้ศึกษาผลการเติมเฟอร์ไรต์ดิบ
ในอัตราส่วนร้อยละ 0,10,20,30 โดยน้ำหนัก จากนั้นเผาที่อุณหภูมิ
1,000 และ 1,100°C ทดสอบคุณสมบัติ ได้แก่ ความได้ฉาก ความ
หนาแน่นรวม น้ำหนักที่สูญเสีย การหดตัวหลังการเผา การดูดซึมน้ำ
และความแข็งแรงแบบชอร์[5] ดนุพล ตันนโยภาส และคณะ ได้ใช้
ประโยชน์ทางแร่ดินขาวและเถ้าลอยไม่ยางพารา เพื่อผลิตกระเบื้อง
เซรามิคมวลเบา โดยใช้อุณหภูมิในการเผา 1,050 1,100 และ 1,150°C
ทดสอบคุณสมบัติ ได้แก่ ความได้ฉาก ความหนาแน่นรวม น้ำหนักที่
สูญเสีย การหดตัวหลังการเผา การดูดซึมน้ำ ความแข็งแรงแบบชอร์ และ
ความคงทนต่อสารเคมี [6]

จากงานวิจัยที่กล่าวข้างต้นยังไม่พบว่ามีการใช้ อรรถประโยชน์จากดินตะกอนน้ำประปาเพื่อใช้ในการผลิตกระเบื้องบุผนังแบบเผาครั้งเดียวและไม่ผ่านการเคลือบ ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ประโยชน์จากดินตะกอนน้ำประปาในการผลิตกระเบื้องบุผนัง เพื่อเพิ่มมูลค่าการใช้อรรถประโยชน์จากดินตะกอน และแนวทางเลือกให้กับผู้บริโภคในการเลือกใช้กระเบื้องบุผนังอีกด้วย

3. วิธีการศึกษา

3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้แก่ ดินตะกอนน้ำประปา ดินสำเร็จรูป แก้ว โดยส่วนประกอบเคมีแสดงในตารางที่ 1 ซึ่ง K_2O , CaO , Na_2O = Fluxing Agent

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบทางเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารประกอบ	วัตถุดิบ %		
	ดินตะกอนน้ำประปา	ดินสำเร็จรูป	แก้ว
SiO_2	58.15	47.8	72.1
Al_2O_3	27.84	14.9	1.6
Fe_2O_3	7.17	0.62	0.1
K_2O	2.76	1.51	0.2
CaO	0.94	8.86	10.6
MgO	1.37	7.22	2.4
TiO_2	0.86	0.08	0.05
MnO	0.19		
P_2O_5	0.23		
Na_2O	0.14	0.73	12.9
SO_3	0.15		0.15

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 นำวัตถุดิบทั้งหมดบดไล่ความชื้น 2 ชั่วโมง จากนั้นนำ วัตถุดิบมาบดด้วยเครื่องบด (Ball mill) โดยดินตะกอน ดินสำเร็จรูป ใช้เวลาในการบด 15 นาที ส่วน แก้ว จะใช้เวลาในการบด 1 ชั่วโมง เนื่องจากแก้วมีความแข็งมากกว่าดิน

3.2.2 นำวัตถุดิบผ่านการบด มาร้อนผ่านตะแกรง 50 เมช (อนุภาคซึ่งมีขนาดน้อยกว่า 297 ไมครอน) และชั่งน้ำหนักวัตถุดิบตามสูตรส่วนผสมในตารางที่ 2 ซึ่งการกำหนดสัดส่วนของสูตรการทดลอง พิจารณาจากแผนภาพสามแกน ซึ่งแสดงในรูปที่ 1 โดยกำหนดขอบเขตดังนี้

- ใช้ดินตะกอนจากโรงประปามหาสวัสดิ์ ≥ 30 % ต่อน้ำหนักของสูตรการทดลอง
 - ใช้เศษแก้วจากโรงงานบางกอกกลีาสจำกัด ≥ 20 % ต่อน้ำหนักของสูตรการทดลอง
 - ใช้ดินสำเร็จรูป จากบริษัทคอมพาวด์เคลย์
- เหตุผลของการกำหนดปริมาณการใช้วัตถุดิบนี้เพื่อใช้ดินตะกอนน้ำประปาในสัดส่วนที่มาก และ ใช้เศษแก้วมากกว่า 20% เนื่องจาก

ต้องการให้ได้ชิ้นงานที่มีความแข็งแรงเมื่อเผาที่อุณหภูมิต่ำ และด้วยต้นทุนการผลิตต่ำ

ตารางที่ 2 สูตรการทดลอง 15 สูตร

สูตรที่	วัตถุดิบ (%)		
	ดินตะกอน	แก้ว	ดินสำเร็จรูป
1A	30	60	10
2A	40	50	10
3A	50	40	10
4A	60	30	10
5A	70	20	10
6B	30	50	20
7B	40	40	20
8B	50	30	20
9B	60	20	20
10C	30	40	30
11C	40	30	30
12C	50	20	30
13D	30	30	40
14D	40	20	40
15E	30	20	50

3.2.3 ผสมวัตถุดิบตามสูตรเข้าด้วยกันจากนั้นสเปรย์น้ำอัตราส่วน 10% ของน้ำหนักวัตถุดิบ และร่อนผ่านตะแกรง 20 เมช (อนุภาคซึ่งมีขนาดน้อยกว่า 841 ไมครอน)

3.2.4 ทำการอัดขึ้นรูปผงวัตถุดิบด้วยวิธีอัดขึ้นรูปทางเดียว (Uni-Axial Pressing) ด้วยแรงดันขนาด 100 บาร์จะได้ชิ้นงานทดสอบที่มีขนาด $50 \times 100 \times 7$ mm.

3.2.5 นำชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปมาอบไล่ความชื้น 2 ชั่วโมง

3.2.6 เผาชิ้นงานด้วยอัตรา $200 \text{ }^\circ\text{C/hr}$ และขึ้นไฟที่อุณหภูมิสูงสุดที่ $850 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.2.7 นำชิ้นงานที่เผาแล้วไปทดสอบคุณสมบัติ ความต้านแรงดัด (Bending Strength) เปอร์เซ็นต์การหดตัว (% Shrinkage) เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักที่สูญเสียหลังการเผา (%Weight Loss) เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ(%Water Absorption)

3.2.8 นอกจากนี้ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบคุณสมบัติของดินตะกอนน้ำประปา กับ ดินสำเร็จรูป ในด้านความแข็งแรง โดยเผาที่อุณหภูมิ $850 \text{ }^\circ\text{C}$

3.3 สมการ

3.3.1 ค่าความต้านแรงดัด(Bending Strength) หน่วยเมกะปาสคาล (MPa)

$$\text{Bending Strength} = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (1)$$

P คือ แรงกดที่ทำให้แท่งทดสอบหัก (N)

L คือ ความกว้างของปารอง (mm)

b คือ ความกว้างของแท่งทดสอบบริเวณที่หัก (mm)

d คือ ความหนาของแท่งทดสอบบริเวณที่หัก (mm)

3.3.2 ค่าการหดตัวหลังเผา (% Shrinkage)

$$\% \text{shrinkage} = \frac{L_0 - L}{L_0} \times 100 \quad (2)$$

L_0 คือ ยาวก่อนเผา (mm)

L คือ ความยาวหลังเผา (mm)

3.3.3 ค่าน้ำหนักที่สูญเสียหลังการเผา (%Weight Loss)

$$\% \text{Weight Loss} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (3)$$

W_1 คือ น้ำหนักก่อนเผา (g)

W_2 คือ น้ำหนักหลังเผา (g)

3.3.4 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%Water Absorption)

$$W = \frac{(w_w - w_d)}{w_d} \times 100 \quad (4)$$

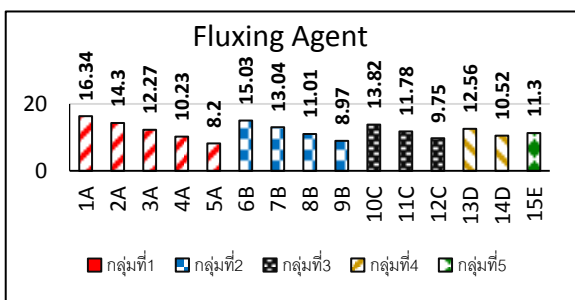
W_d คือ น้ำหนักชิ้นงานแห้งหลังเผา (g)

W_w คือ น้ำหนักชิ้นงานหลังต้มทิ้งไว้ในน้ำ 24 ชั่วโมง (g)

4. ผลการทดลองและอภิปราย

4.1 การวิเคราะห์ Fluxing Agent ในแต่ละสูตร

Fluxing Agent หมายถึง ธาตุ หรือ ออกไซด์ที่มีธาตุในกลุ่ม อัลคาไลน์ หรืออัลคาไลน์เอิร์ท เช่น K_2O , CaO , Na_2O ซึ่งมีจุดหลอมตัวต่ำ ดังนั้นวัตถุดิบใดที่มีธาตุเหล่านี้ จะทำให้อุณหภูมิในการเผาต่ำลง หรือ เพิ่มค่าความต้านทานแรงดัด ในอุณหภูมิเท่าเดิม ปริมาณ fluxing agent ในสูตรการทดลองทั้ง 15 สูตรแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ผลรวมปริมาณ fluxing agent ในแต่ละสูตร

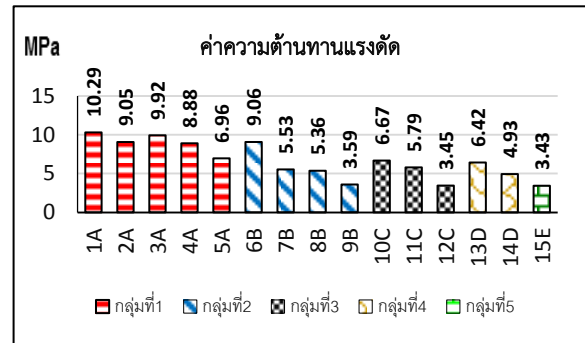
4.2 ค่าความต้านทานแรงดัด ของวัตถุดิบ ดินสำเร็จรูป และ ดิน

ตะกอน เเผาที่อุณหภูมิ 850°C แต่ไม่ทดสอบแก้วเนื่องจากหลอมตัวก่อนถึง อุณหภูมิ 850°C ผลการทดสอบความแข็งแรงแสดงในตารางที่ 3 สรุปได้ว่าดินตะกอนน้ำประปาให้ค่าความต้านทานแรงดัด มากกว่า ดินสำเร็จรูป

ตารางที่ 3 ค่าความต้านทานแรงดัดดินสำเร็จรูป และดินตะกอนน้ำประปา

	ดินสำเร็จรูป	ดินตะกอนน้ำประปา
ค่าความต้านทานแรงดัด (MPa)	2.45	7.74

4.2.1 ค่าความต้านทานแรงดัดของ 15 สูตรการ



ทดลอง

รูปที่ 2 ค่าความต้านทานแรงดัดของ 15 สูตร

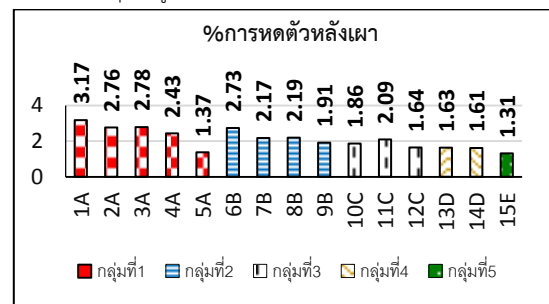
จาก รูปที่ 2 ค่าความต้านทานแรงดัดจะแปรผันตามค่าของ fluxing agent พบว่าค่าความต้านทานแรงดัดสูงเมื่อสูตรนั้นมีค่า fluxing agent สูง สูตรที่ 1A มีค่า fluxing agent สูงสุด

ในขณะที่กลุ่มอื่น คือ กลุ่ม 2,3,4, และ 5 แสดงให้เห็นว่า สูตรที่มีค่าความต้านทานแรงดัดสูง จะมีปริมาณ fluxing agent สูง ด้วยเช่นกัน

อย่างไรก็ตามถึงแม้สูตรที่ 15E จะมีปริมาณ fluxing agent สูง คือ > 10% แต่กลับมีค่าความต้านทานแรงดัดต่ำสุด ทั้งนี้ผลเนื่องจากมีปริมาณดินสำเร็จรูปในสูตรมากถึง 50% ซึ่งดินสำเร็จรูปส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดัดลดลง ซึ่งอ้างอิงจากผลการทดลองในตารางที่ 2

4.3 ค่าการหดตัวหลังเผา ทำเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบ

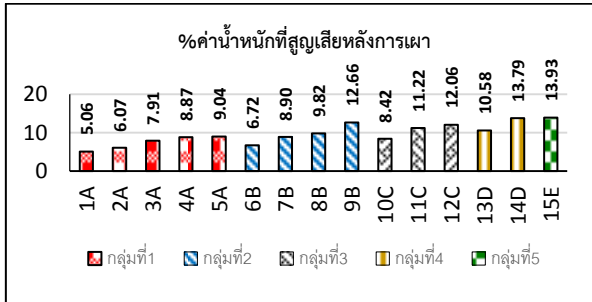
แม่พิมพ์เพื่อให้ได้ขนาดชิ้นงานหลังเผาใกล้เคียงกับขนาดชิ้นงานที่ต้องการผลิต สรุปในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ค่าการหดตัวหลังเผาของชิ้นงาน

จาก รูปที่ 3 การใช้ดินตะกอนเพิ่มขึ้น ของกลุ่ม A ถึงกลุ่ม E พบว่าการลดปริมาณแก้ว ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวลดลง ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวน้อยที่สุดคือ 1.31 % ซึ่งการหดตัวน้อย หมายถึง ชิ้นงานยังมีรูพรุนอยู่ในโครงสร้างสูง และสอดคล้องกับค่าความต้านทานแรงดัด เมื่อหดตัวน้อย ค่าความต้านทานแรงดัดต่ำ

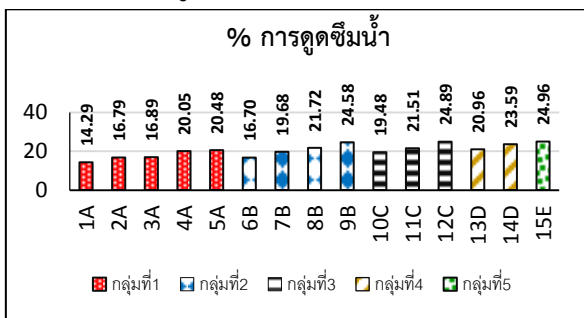
4.4 ค่าน้ำหนักที่สูญเสียหลังการเผา



รูปที่ 4 ค่าน้ำหนักที่สูญเสียหลังการเผาของชิ้นงาน

จาก รูปที่ 4 การใช้ดินตะกอนเพิ่มขึ้น ของกลุ่ม A ถึงกลุ่ม E พบว่าการลดปริมาณแก้ว และเพิ่มปริมาณทั้งดินตะกอน และดินสำเร็จรูป ทำให้ค่าน้ำหนักที่สูญเสียหลังการเผาเพิ่มขึ้น ค่าน้ำหนักที่สูญเสียหลังการเผาที่น้อยที่สุดคือ 5.06 % คือ สูตร 1A ซึ่งมีค่าความต้านทานแรงดัดสูง แสดงว่าทั้งดินตะกอนน้ำประปาและ ดินสำเร็จรูปมีสารคาร์บอน เมื่อเผาด้วยความร้อนจะทำให้สารคาร์บอนเผาไหม้สูญเสีย น้ำหนัก และมักจะทิ้งรูพรุนไว้ในชิ้นงาน

4.5 ค่าการดูดซึมน้ำ



รูปที่ 5 ค่าการดูดซึมน้ำ

จาก รูปที่ 5 การใช้ดินตะกอนที่เพิ่มขึ้น ของกลุ่ม A ถึงกลุ่ม E พบว่าการเพิ่มจำนวนดินตะกอนและดินสำเร็จรูป ทำให้ค่าดูดซึมน้ำสูงขึ้นค่าดูดซึมน้ำที่น้อยที่สุดคือ 14.29 % ซึ่งจะสอดคล้องกับค่าความต้านทานแรงดัดเมื่อค่าความต้านทานแรงดัดสูง ค่าการดูดซึมน้ำจะมีแนวโน้มลดต่ำลง

5. สรุปผล

5.1 ดินตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปาสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนในการผลิตกระเบื้องปูผนังได้ โดยเทียบกับ มอก. 2508-2555 ประเภท BIII ซึ่งมีค่าความต้านแรงดัด 12 (MPa) และค่าดูดซึมน้ำ ซึ่งมีค่ามากกว่า 10% แต่ไม่เกิน 20%

5.2 สูตร 1A มีค่าความต้านแรงดัด 10.29 MPa ค่าการหดตัว 3.17 % ค่าการดูดซึมน้ำ 14.29% ค่าน้ำหนักที่สูญเสียหลังการเผา 5.06 % เป็นสูตรที่เหมาะสมที่สุด แสดงภาพชิ้นงานที่ผ่านการเผาแล้ว ซึ่งมีสีสรรแนวส้มอมแดง ถึงแม้ค่าความต้านแรงดัดยังไม่ผ่าน มาตรฐานแต่

สามารถเพิ่มค่าได้ด้วยการทำการทดลองต่อโดยเพิ่มอุณหภูมิในการเผา เป็น 950°C

5.3 ค่าความต้านแรงดัดแปรผกผัน กับ ค่าดูดซึมน้ำ หากค่าความต้านทานแรงดัดสูง ค่าดูดซึมน้ำจะต่ำ

5.4 การเพิ่มปริมาณดินตะกอน ทำให้ความแข็งแรงลดลง และค่าดูดซึมน้ำ ค่าน้ำหนักที่สูญเสียหลังการเผาเพิ่มมากขึ้น

5.5 ค่าความต้านแรงดัดจะแปรผันตามค่าของ fluxing agent

5.6 สูตรที่มี ดินสำเร็จรูปปริมาณมากกว่า 40% ทำให้ค่าความต้านทานแรงดัดไม่สูงขึ้นแม้ว่า ค่า fluxing agent จะมีค่ามากก็ตาม เช่น สูตร 15E

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือในการทำวิจัยและขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่อุดหนุนทุนวิจัย ให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] สมบูรณ์ คงสมศักดิ์ศิริ อติสรณ พงษ์สุวรรณ (2009) “บล็อกประสานปูพื้นผสมตะกอนดินจากน้ำประปา” ชุดโครงการสนับสนุนผู้ปฏิบัติการวิจัยในภาคอุตสาหกรรม สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
- [2] ไพบุลย์ แยมเฟื่อน และคณะ. (2555). การใช้ตะกอนดินเซรามิกเป็นส่วนผสมในการผลิตกระเบื้องปูผนัง. การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี .
- [3] จริญญา เจริญเนตรกุล .(2553) “อิฐบล็อกประสานผสมดินตะกอนจากระบบน้ำประปา”. การประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 3
- [4] เอกชัย แก่นวงศ์ และคณะ. (2557). “การพัฒนาอิฐอัดจากเถ้าชีวมวลและตะกอนน้ำประปา”. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. ครั้งที่10
- [5] ศศิกร ประสารการ , ดนุพล ตันนโยภาส . (2557). คุณสมบัติของกระเบื้องดินเผาผสมเพอร์ไลต์ดิบ. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่ 33 ฉบับที่ 6 .
- [6] ดนุพล ตันนโยภาส , กัญยานี คุปตานนท์ , พหทัยพิทย์ พันฤทธิ์ดำ , สุชาติ จันทร์มณี. (2557). “กระเบื้องเซรามิกมวลเบาชนิดใหม่ทำจากหางแร่ดินขาว”. วารสารวิชาการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี ปีที่ 7 ฉบับที่ 1 .

คุณสมบัติด้านเชื้อเพลิงของแท่งเชื้อเพลิงผลิตจากลำต้นปาล์มน้ำมันยืนต้นตาย

Fuel Properties of Briquettes Produced from the Trunk of a Dead Oil Palm Tree

พิชญา แซ่จั้ง* และ อนวัช สังข์เพชร

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

E-mail: aom_tus@hotmail.com*

บทคัดย่อ

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ แต่เมื่อทำการเก็บเกี่ยวผลผลิตไปจนถึงอายุขัยของต้นปาล์มน้ำมัน ซึ่งมีระยะเวลาโดยประมาณ 25 ปี ลำต้นปาล์มน้ำมันจะถูกโค่นทิ้งและปล่อยให้ค่อย ๆ ฝุพังไปเองตามธรรมชาติ ทำให้ซากปาล์มเหล่านี้ถูกทิ้งไว้โดยเปล่าประโยชน์ ดังนั้นการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากลำต้นปาล์มน้ำมันยืนต้นตายจึงเป็นการแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับลำต้นปาล์มน้ำมันยืนต้นตายและเป็นแนวทางในการลดวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการผลิตและทดสอบแท่งเชื้อเพลิงจากลำต้นปาล์มน้ำมันยืนต้นตายแบบไม่ใช้ตัวประสาน โดยทำการศึกษาถึงแรงดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกที่ความดัน 2.5, 5, 10 และ 15 เมกะปาสคาล และรูปทรงคือ ทรงกระบอกกลวง ทรงกระบอกตัน และทรงสี่เหลี่ยม ที่มีผลต่อคุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิง ได้แก่ ความหนาแน่น ค่าความร้อน ระยะเวลาการจุดติดไฟ และระยะเวลาติดไฟ รวมทั้งเวลาที่น้ำเดือด ค่าความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงมีค่าอยู่ระหว่าง 404 ถึง 710 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงมีค่าอยู่ระหว่าง 3,656 ถึง 4,041 แคลอรีต่อกรัม โดยรูปทรงในการอัดขึ้นรูปไม่มีผลต่อค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง แต่มีผลต่อระยะเวลาจุดติดไฟของแท่งเชื้อเพลิงซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 58 ถึง 139 วินาที โดยแท่งเชื้อเพลิงทรงกระบอกกลวงใช้ระยะเวลาสั้นที่สุดในขณะที่ทรงกระบอกตันใช้ระยะเวลานานที่สุด โดยระยะเวลาจุดติดไฟนานขึ้นเมื่อความดันที่ใช้อัดแท่งเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ส่วนระยะเวลาติดไฟของแท่งเชื้อเพลิงอยู่ในช่วง 17 ถึง 41 นาที เชื้อเพลิงรูปทรงสี่เหลี่ยมมีระยะเวลาติดไฟนานที่สุด รองลงมาคือทรงกระบอกตันและทรงกระบอกกลวงตามลำดับ เมื่อความดันที่ใช้อัดแท่งเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นทำให้ระยะเวลาติดไฟนานขึ้น เมื่อนำแท่งเชื้อเพลิงมาทดสอบการต้มน้ำเดือด พบว่าเวลาที่น้ำเดือดอยู่ในช่วง 1.23 ถึง 4.20 นาที โดยแท่งเชื้อเพลิงทรงกระบอกกลวงใช้เวลาทำให้น้ำเดือดสั้นที่สุด รองลงมาเป็นทรงกระบอกตัน ส่วนแท่งเชื้อเพลิงทรงสี่เหลี่ยมไม่สามารถทำให้น้ำเดือดได้ เมื่อความดันที่ใช้อัดแท่งเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นทำให้เวลาที่น้ำเดือดเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: แท่งเชื้อเพลิง ลำต้นของต้นปาล์มน้ำมันยืนต้นตาย

1. บทนำ

จากสภาวะทางเศรษฐกิจที่เติบโตขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงที่ผ่านมาของประเทศไทยนั้น ทำให้ภาคอุตสาหกรรมเข้ามามีบทบาทเพื่อรองรับความต้องการของมนุษย์ที่มีเพิ่มมากขึ้น ประกอบกับวัตถุดิบหลักในการผลิตสินค้าในอุตสาหกรรมเป็นวัสดุที่มาจากกาเกษตรเป็นส่วนใหญ่ จึงทำให้มีชีวมวลเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก เช่น ชังข้าวโพด ชานอ้อย แกลบ รวมทั้งลำต้นปาล์มน้ำมันยืนตาย ซึ่งเป็นชีวมวลที่มาจากธุรกิจน้ำมันปาล์ม และเป็นพืชน้ำมันที่ยังคงมีแนวโน้มความต้องการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งจากการบริโภคโดยตรงในรูปของน้ำมันพืช อุตสาหกรรมต่อเนื่องที่ใช้น้ำมันปาล์มเป็นวัตถุดิบ และยังเป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงานทดแทน คือ ไบโอดีเซลเพื่อเป็นการช่วยลดการใช้แก๊สธรรมชาติและเพิ่มความมั่นคงทางด้านพลังงานให้กับประเทศ ในปัจจุบันมีการใช้น้ำมันปาล์มแทนน้ำมันชนิดอื่น ๆ เนื่องจากราคาที่ถูกลง จึงทำให้การเกษตรน้ำมันปาล์มมีการขยายพื้นที่การเพาะปลูกที่เพิ่มมากขึ้น จากข้อมูลทางสถิติปี พ.ศ. 2558 และปี พ.ศ. 2559 ประเทศไทยมีการปลูกปาล์มทั้งทางภาคใต้และภาคตะวันออกโดยพื้นที่ในการปลูกปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้น ร้อยละ 5.3 เมื่อทำการเก็บเกี่ยวผลผลิตไปจนถึงอายุขัยของต้นปาล์มน้ำมันแล้ว จะต้องมีกรากำจัดต้นปาล์มเพื่อทำให้ต้นปาล์มยืนต้นตายและปล่อยให้ค่อย ๆ ฝุพังไป เพื่อที่จะได้ปลูกปาล์มใหม่ทดแทน แต่ซากปาล์มเหล่านี้ก็จะถูกทิ้งไว้โดยไม่มีการนำมาใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่ สำหรับปริมาณชีวมวลที่เกิดจากลำต้นปาล์มน้ำมันในปี 2558 และ 2559 มีปริมาณโดยเฉลี่ย 11.34 ล้านตันต่อปี [1] การนำลำต้นปาล์มน้ำมันยืนต้นตายมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงแท่งถือได้ว่าเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่วัสดุชนิดนี้ นอกจากนี้ยังนับได้ว่าเชื้อเพลิงชนิดนี้เป็นเชื้อเพลิงที่ก่อให้เกิดความยั่งยืนของแหล่งพลังงาน ช่วยลดการใช้พลังงานที่ไร้แล้วหมดไป เช่น แก๊สธรรมชาติได้ และลดปัญหาต่าง ๆ ที่มีสาเหตุมาจากการใช้พลังงานเหล่านี้

ในปัจจุบันยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการนำเอาต้นปาล์ม น้ำมันที่ตายแล้วมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงแข็ง งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงแท่งจากลำต้นปาล์มน้ำมันโดยกระบวนการอัดเย็นแบบไม่ใช้ตัวประสานซึ่งมีข้อดีคือมีขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยาก [2] โดยเป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปและรูปทรงของแท่งเชื้อเพลิงที่มีต่อคุณสมบัติต่าง ๆ

2. วิธีการวิจัย

2.1 การเตรียมตัวอย่างและการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากกากลำตันปาล์มน้ำมันยีนตันตาย

บดลดขนาดลำตันปาล์มน้ำมันยีนตันตายให้มีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 0.85 ถึง 2.36 มิลลิเมตร จากนั้นนำมาตากแดดเพื่อลดความชื้นแล้วทำการขึ้นรูปเชื้อเพลิงโดยใช้มวลลำตันปาล์ม 30 กรัม ไปอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิงรูปทรงกระบอกกลวงโดยใช้แม่พิมพ์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2 เซนติเมตร ทรงกระบอกตันโดยใช้แม่พิมพ์มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 5 เซนติเมตร และทรงสี่เหลี่ยมด้วยแม่พิมพ์ที่มีความกว้างและยาว 3 เซนติเมตร การอัดขึ้นรูปใช้เครื่องอัดไฮดรอลิกโดยมีความดันในการขึ้นรูปเท่ากับ 2.5, 5, 10 และ 15 เมกะปาสคาล เมื่อได้แท่งเชื้อเพลิงแล้วจึงเก็บแท่งเชื้อเพลิงไว้ในถุงซิปล็อคแล้วบรรจุในกล่องเก็บแท่งเชื้อเพลิงที่มีซิกลิกาเจล

2.2 การวัดความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิง

ทำการวัดขนาดของแท่งเชื้อเพลิงแข็งด้วยเวอร์เนียร์-คาลิเปอร์เพื่อคำนวณหาปริมาตรของแท่งเชื้อเพลิงแข็งแต่ละก้อน จากนั้นคำนวณหาความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงดังสมการที่ 1

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงแข็ง (g/cm^3)
 m คือ มวลของแท่งเชื้อเพลิงแข็ง (g)
 V คือ ปริมาตรของแท่งเชื้อเพลิงแข็ง (cm^3)

2.3 การวัดค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง

การหาค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงแข็งใช้วิธีตาม ASTM D5865 ด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter ยี่ห้อ IKA รุ่น C5000

2.4 การหาระยะเวลาการจุดติดไฟและระยะเวลาติดไฟของแท่งเชื้อเพลิง

การทดสอบหาระยะเวลาการจุดติดไฟ (Ignition time) และระยะเวลาติดไฟ (Burning time) ทำโดยใช้แท่งเชื้อเพลิงหนึ่งก้อนแล้วทำการจุดไฟบนผิวหน้าแท่งเชื้อเพลิงด้วยเทียนไข จากนั้นเริ่มจับเวลาไปจนกระทั่งสังเกตเห็นว่าแท่งเชื้อเพลิงสามารถติดไฟแล้วเผาไหม้ต่อเองได้ ช่วงระยะเวลาดังกล่าวคือระยะเวลาการจุดติดไฟ เมื่อแท่งเชื้อเพลิงจุดติดไฟได้แล้วจึงเริ่มจับเวลาใหม่และรอจนกระทั่งเชื้อเพลิงมอดดับหมดซึ่งทำให้ทราบระยะเวลาติดไฟ

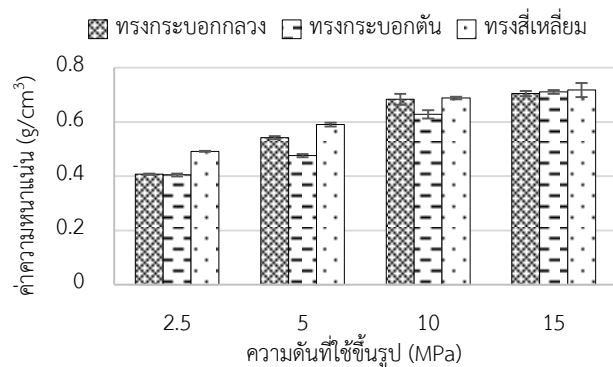
2.5 การทดสอบการต้มน้ำเดือด

การทดสอบการต้มน้ำเดือดเป็นการหาระยะเวลาที่น้ำเดือดโดยใช้แท่งเชื้อเพลิง 120 กรัม ซึ่งแท่งเชื้อเพลิงทรงกระบอกกลวง ทรงกระบอกตันจะจัดเรียงห่างกัน 1 เซนติเมตร ส่วนแท่งเชื้อเพลิงสี่เหลี่ยม นั้นมีการจัดเรียงแบบห่างกันและชิดติดกัน ปริมาตรน้ำเริ่มต้นที่ใช้ในการทดสอบคือ 200 มิลลิลิตร ระยะเวลาที่น้ำเดือดเริ่มนับจากเวลาที่เกิดฟองจากการเดือดขึ้นจนกระทั่งถึงเวลาที่ไม่มีฟอง

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 ความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิง

รูปที่ 1 แสดงผลจากการอัดขึ้นรูปของแท่งเชื้อเพลิงลำตันปาล์ม น้ำมันยีนตันตาย โดยค่าของความดันที่ใช้ในการอัด คือ 2.5, 5, 10 และ 15 เมกะปาสคาล และที่รูปทรงที่แตกต่างกัน คือ ทรงกระบอกตัน ทรงกระบอกกลวง ทรงสี่เหลี่ยม

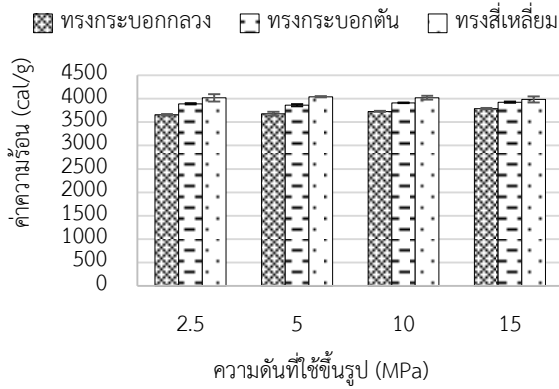


รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับความดันที่ใช้ขึ้นรูป

จากผลการทดสอบพบว่าความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นเมื่อความดันที่ใช้ในการขึ้นรูปสูงขึ้น โดยรูปทรงของแท่งเชื้อเพลิงมีผลต่อความหนาแน่นน้อยกว่าความดันที่ใช้ในการขึ้นรูป แท่งเชื้อเพลิงทรงสี่เหลี่ยมมีความหนาแน่นมากที่สุด รองลงมาคือแท่งเชื้อเพลิงทรงกระบอกกลวงและทรงกระบอกตัน ตามลำดับ เนื่องจากพื้นที่รองรับแรงระหว่างการอัดของแท่งเชื้อเพลิงทรงสี่เหลี่ยมมีค่าน้อยที่สุดจึงทำให้แท่งเชื้อเพลิงรูปทรงสี่เหลี่ยมมีความหนาแน่นมากที่สุด ในขณะที่เชื้อเพลิงแท่งรูปทรงกระบอกตันมีพื้นที่รองรับแรงมากที่สุด ซึ่งความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นของแท่งเชื้อเพลิงส่งผลให้อากาศที่ซึ่งอยู่ภายในแท่งเชื้อเพลิงมีปริมาตรต่ำลง

3.2 ค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง

รูปที่ 2 แสดงผลการทดสอบค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงแข็งจากลำตันปาล์มน้ำมันอินต้นตาย ซึ่งเป็นคุณสมบัติบ่งบอกถึงการเป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพ

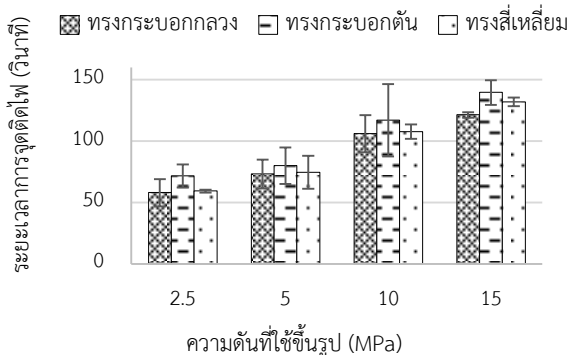


รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับความดันที่ใช้ขึ้นรูป

ค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงจากลำตันปาล์มน้ำมันมีค่าระหว่าง 3,656 ถึง 4,041 แคลอรีต่อกรัม เมื่อพิจารณาความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปที่แตกต่างกัน พบว่าความดันที่ใช้ในการอัดไม่มีผลต่อค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง และพบว่าค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงที่มีรูปทรงต่างกันมีผลต่อค่าความร้อนเล็กน้อยซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากความชื้นของวัสดุที่มีพื้นที่ผิวมากทำให้สามารถดูดซับความชื้นจากอากาศไว้ได้มากกว่า

3.3 ระยะเวลาการจุดติดไฟ

ความดันที่ใช้ในการขึ้นรูปมีอิทธิพลต่อระยะเวลาการจุดติดไฟของแท่งเชื้อเพลิงมากกว่ารูปทรงดังแสดงโดยรูปที่ 3



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการจุดติดไฟกับความดันที่ใช้ขึ้นรูป

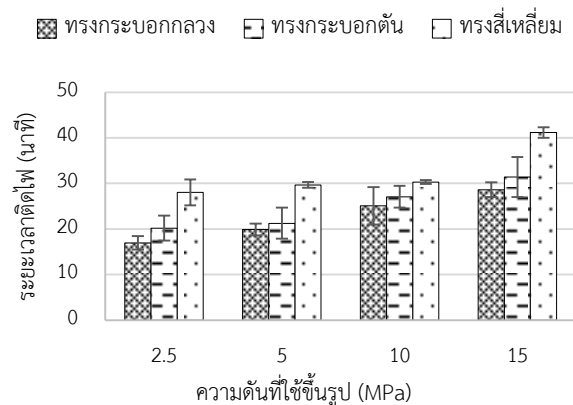
จากการทดสอบพบว่าเชื้อเพลิงแข็งจากลำตันปาล์มน้ำมันมีระยะเวลาการจุดติดไฟอยู่ในช่วง 58 ถึง 139 วินาที เมื่อความดันที่ใช้ในการอัดแท่งเชื้อเพลิงสูงขึ้น ระยะเวลาที่ต้องใช้ในการทำให้แท่งเชื้อเพลิงจุดติดไฟนานขึ้นด้วยเช่นกัน เนื่องจากแท่งเชื้อเพลิงมีความหนาแน่นมากขึ้นส่งผลให้ปริมาตรอากาศที่อยู่ภายในแท่งเชื้อเพลิงน้อยลง เมื่อพิจารณาที่ความดันในการขึ้นรูปเชื้อเพลิงเท่ากัน พบว่าแท่งเชื้อเพลิงทรงกระบอกตันมีระยะเวลาการจุดติดไฟนานที่สุด ในขณะที่แท่งเชื้อเพลิงทรงกระบอกกลวงมีระยะเวลาการจุดติดไฟสั้นที่สุด เนื่องจากมีค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสอากาศต่อปริมาตรมากที่สุดโดยตารางที่ 1 [3]

ตารางที่ 1 พื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศต่อปริมาตรของแท่งเชื้อเพลิง

ความดัน	พื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศต่อปริมาตร (cm ⁻¹)		
	ทรงกระบอกกลวง	ทรงกระบอกตัน	ทรงสี่เหลี่ยม
2.5	1.62	1.06	1.52
5	1.68	1.15	1.57
10	1.77	1.23	1.61
15	1.82	1.28	1.61

3.4 ระยะเวลาติดไฟ

รูปที่ 4 แสดงผลการทดลองการหาระยะเวลาติดไฟของแท่งเชื้อเพลิง โดยศึกษาอิทธิพลของความดันที่ใช้ในอัดขึ้นรูปและรูปทรงของแท่งเชื้อเพลิง



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาติดไฟกับความดันที่ใช้ขึ้นรูป

ระยะเวลาติดไฟของแท่งเชื้อเพลิงอยู่ในช่วง 17 ถึง 41 นาที โดยแท่งเชื้อเพลิงทรงสี่เหลี่ยมมีระยะเวลาติดไฟนานกว่าแท่งเชื้อเพลิงทรงกระบอกตันและทรงกระบอกกลวงค่อนข้างชัดเจน เนื่องจากแท่งเชื้อเพลิงรูปทรงสี่เหลี่ยมมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศน้อยที่สุด ในขณะที่แท่ง

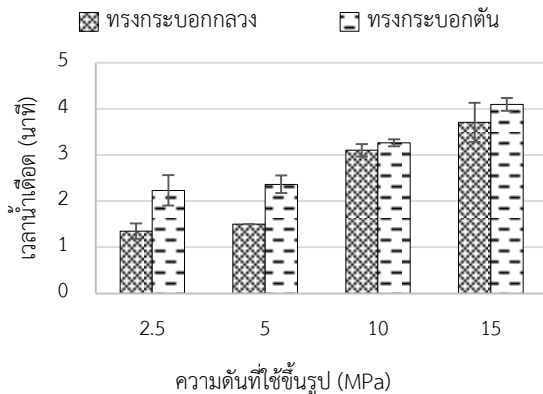
เชื้อเพลิงทรงกระบอกกลวงมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศมากที่สุดดังแสดงโดยตารางที่ 2 การที่แท่งเชื้อเพลิงสัมผัสกับอากาศได้มากทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้เร็ว เมื่อพิจารณาอิทธิพลของค่าความดันที่ใช้ในการขึ้นรูปพบว่าระยะเวลาติดไฟเพิ่มขึ้นตามความดันที่สูงขึ้น [4] เนื่องจากแท่งเชื้อเพลิงมีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อากาศภายในช่องว่างระหว่างรูพรุนของแท่งเชื้อเพลิงน้อยลง

ตารางที่ 2 พื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศเฉลี่ยต่อแท่งเชื้อเพลิงหนึ่งแท่ง

ความดัน	พื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศเฉลี่ย (ตารางเซนติเมตร)		
	ทรงกระบอกกลวง	ทรงกระบอกตัน	ทรงสี่เหลี่ยม
2.5	100.93	79.33	69.48
5	79.37	71.47	59.48
10	67.10	58.38	52.20
15	65.24	54.19	51.72

3.5 ระยะเวลาที่น้ำเดือด

รูปที่ 5 แสดงผลการทดสอบเพื่อให้ทราบอิทธิพลของความดันที่ใช้ในการขึ้นรูปและรูปร่างที่แตกต่างกันของแท่งเชื้อเพลิงที่มีต่อระยะเวลาที่น้ำเดือด



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่น้ำเดือดกับความดันที่ใช้ขึ้นรูป

จากการทดลองพบว่าแท่งเชื้อเพลิงรูปทรงกระบอกตันสามารถทำให้น้ำบางส่วนเดือดได้เป็นระยะเวลานานกว่าแท่งเชื้อเพลิงรูปทรงกระบอกกลวง เนื่องจากทรงกระบอกตันมีระยะเวลาคิดไฟที่นานกว่าทรงกระบอกกลวง ส่วนแท่งเชื้อเพลิงทรงสี่เหลี่ยมไม่สามารถทำให้น้ำเดือดได้ เนื่องจากอัตราการเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงไม่สูงพอ เมื่อค่าความดันในการขึ้นรูปสูงขึ้น แท่งเชื้อเพลิงจะมีระยะเวลาคิดไฟที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เวลาที่น้ำเดือดเพิ่มขึ้นเช่นกัน [5]

4. สรุป

การผลิตแท่งเชื้อเพลิงแข็งจากลำต้นปาล์มน้ำมันยืนต้นตายด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปแบบเย็นโดยไม่ใช้ตัวประสาน การเพิ่มขึ้นของความดันที่ใช้ขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงซึ่งมีค่าตั้งแต่ 2.5 ถึง 15 เมกะปาสกาลส่งผลให้ระยะเวลาการจุดไฟและระยะเวลาการติดไฟเพิ่มขึ้น ระยะเวลาการจุดไฟเพิ่มขึ้นตามรูปทรงของแท่งเชื้อเพลิงดังนี้ คือ ทรงกระบอกกลวง ทรงสี่เหลี่ยม และทรงกระบอกตัน ซึ่งเป็นไปตามพื้นที่ผิวสัมผัสอากาศต่อปริมาตรที่ลดลงของแท่งเชื้อเพลิง แท่งเชื้อเพลิงรูปทรงสี่เหลี่ยมมีระยะเวลาคิดไฟนานที่สุดและแท่งเชื้อเพลิงรูปทรงกระบอกกลวงมีระยะเวลาคิดไฟสั้นที่สุด และเมื่อทดสอบหาระยะเวลาที่น้ำเดือด พบว่าแท่งเชื้อเพลิงรูปทรงกระบอกตันสามารถทำให้น้ำบางส่วนเดือดได้เป็นระยะเวลานานกว่าแท่งเชื้อเพลิงรูปทรงกระบอกกลวง ส่วนแท่งเชื้อเพลิงทรงสี่เหลี่ยมไม่สามารถทำให้น้ำเดือดได้ เพราะฉะนั้นลำต้นปาล์มน้ำมันยืนต้นตายจึงมีศักยภาพที่นำมาทำเป็นแท่งเชื้อเพลิงแข็งได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยระดับอุดมศึกษา จากสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) ประจำปี 2559

เอกสารอ้างอิง

- [1] ศูนย์สารสนเทศการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, ปาล์มน้ำมัน: เนื้อที่ให้ผล ผลผลิต และผลิตต่อไร่ ปี 2557-2559, แหล่งที่มา : <http://www.oae.go.th/main.php?filename=situationpalm>, [18 มีนาคม 2559]
- [2] นฤภัทร ตั้งมันคงวรกุล, 2557, "การผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากวัสดุเหลือใช้ในอุตสาหกรรมการเกษตรและครัวเรือน,"วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, ปีที่ 6, ฉบับที่ 1, หน้า 66-77.
- [3] Sadhan, M., and Dasappa S. 2014, " Influence of surface area to volume ratio of fuel particles on gasification process in a fixed bed. Energy for Sustainable Development, Vol. 19, pp.122-129.
- [4] Davies, R. M., & Abolude, D. S., 2013, "Ignition and burning rate of water hyacinth briquettes". Journal of Scientific Research & Report, Vol. 2, No. 1, pp.111-120.
- [5] อัญชลี อุดตมะเวทิน, 2559, การผลิตเชื้อเพลิงแข็งจากผลผลิตพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาลจากอ้อย,วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

การศึกษาสมรรถนะคาร์บอนเมมเบรนสำหรับการแยกน้ำออกจากฟิวเซลอยล์ โดยเพอแวปอเรชัน

A Study on Performance of Carbon Membranes for Removal of Water from Fusel Oil by Pervaporation

จเร ยาหอมทอง* และ อนวัช สังข์เพ็ชร

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

E-mail: yahomthong@gmail.com*

T108

บทคัดย่อ

ฟิวเซลอยล์เป็นผลผลิตพลอยได้จากระบวนการกลั่นเอทานอล ประกอบด้วย น้ำ เอทานอล ไอโซบิวทานอล และมีแอลกอฮอล์ที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจ ได้แก่ ไอโซเอมิลแอลกอฮอล์และแอคทีฟเอมิลแอลกอฮอล์เป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องจากน้ำทำให้ฟิวเซลอยล์เป็นของผสมอะซิโโทรป การแยกน้ำออกจากของผสมก่อนด้วยเพอแวปอเรชันเป็นวิธีหนึ่งที่ทำให้สามารถนำองค์ประกอบที่เหลือไปแยกต่อได้ด้วยกระบวนการกลั่นแบบธรรมดา งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมรรถนะของคาร์บอนเมมเบรนที่เตรียมจากพอลิอิมิดในการแยกน้ำออกจากองค์ประกอบอื่น ๆ ในฟิวเซลอยล์ด้วยเพอแวปอเรชันที่อุณหภูมิ 70 °C โดยใช้คาร์บอนเมมเบรน 2 ชนิด คือ คาร์บอนเมมเบรนชนิด SH ซึ่งเตรียมจากการเพิ่มอุณหภูมิแบบขั้นระหว่างการทำให้เป็นคาร์บอนที่อัตราเฉลี่ย 15.15 °C/min จนถึง 600 °C ส่วนคาร์บอนเมมเบรนชนิด 3MKOH-RH24 เตรียมจากการแช่พอลิอิมิดในสารละลาย KOH ความเข้มข้น 3 M ก่อนทำให้เป็นคาร์บอนโดยการเพิ่มอุณหภูมิที่อัตราเฉลี่ย 26.86 °C/min แล้วคงที่ที่ 600 °C เป็นเวลา 24 นาที ผลจากการวิเคราะห์เมมเบรนด้วย XRD แสดงให้เห็นว่าเมมเบรนชนิด SH มีโครงสร้างแบบผลึก ขณะที่เมมเบรนชนิด 3MKOH-RH24 มีโครงสร้างอสัณฐาน เมื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเมมเบรนด้วยเทคนิค ATR-FTIR พบว่าเมมเบรนทั้ง 2 ชนิดมีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วชนิดเดียวกัน เมื่อทำการทดสอบเมมเบรนด้วยเพอแวปอเรชันโดยใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นสารป้อน พบว่าเมมเบรนชนิด 3MKOH-RH24 ให้ค่าฟลักซ์น้ำเท่ากับ 363.58 g/(m²·h) ซึ่งสูงกว่าของเมมเบรนชนิด SH ซึ่งมีค่า 152.08 g/(m²·h) เมื่อทดสอบเมมเบรนโดยใช้ฟิวเซลอยล์เป็นสารป้อน พบว่าเมมเบรนชนิด 3MKOH-RH24 ให้ค่าฟลักซ์และค่าความสามารถซึมผ่านของแต่ละองค์ประกอบของฟิวเซลอยล์สูงกว่าของเมมเบรนชนิด SH อย่างไรก็ตาม เมมเบรนชนิด 3MKOH-RH24 มีค่าการเลือกผ่านน้ำ/เอมิลแอลกอฮอล์เท่ากับ 7684 ซึ่งต่ำกว่าค่าที่ได้จากเมมเบรนชนิด SH ซึ่งมีค่าเท่ากับ 24471

คำสำคัญ: คาร์บอนเมมเบรน เพอแวปอเรชัน ฟิวเซลอยล์

1. บทนำ

ฟิวเซลอยล์เป็นผลผลิตพลอยได้จากการผลิตเอทานอล โดยในกระบวนการกลั่นเอทานอล 1,000 ลิตร จะให้ฟิวเซลอยล์มากถึง 2.5 ลิตร ซึ่งฟิวเซลอยล์เป็นของผสมที่ประกอบด้วยน้ำและแอลกอฮอล์ที่มีจำนวนคาร์บอนระหว่าง 2 ถึง 5 อะตอม มีองค์ประกอบหลัก คือ ไอโซเอมิลแอลกอฮอล์และแอคทีฟเอมิลแอลกอฮอล์ ซึ่งเป็นสารเคมีที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจ เนื่องจากใช้เป็นส่วนประกอบหลักของ Kovac's Reagent ที่ใช้ในการทดสอบอินโดล (indole test) ใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์สารแต่งกลิ่น และใช้เป็นสารเติมแต่งในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ [1, 2] แต่เนื่องจากน้ำทำให้ฟิวเซลอยล์เป็นของผสมอะซิโโทรป จึงไม่สามารถแยกองค์ประกอบในฟิวเซลอยล์ด้วยกระบวนการกลั่นธรรมดาเพียงอย่างเดียวได้ การนำเอาเพอแวปอเรชันซึ่งเป็นเทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรนประเภทหนึ่งมาใช้แยกน้ำออกจากฟิวเซลอยล์ก่อน จากนั้นนำส่วนที่ไม่ผ่านเมมเบรนหรือรีเทนเททไปแยกต่อด้วยกระบวนการกลั่นเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีศักยภาพ เนื่องจากเทคโนโลยีเมมเบรนใช้พลังงานต่ำและมีประสิทธิภาพสูง ปัจจุบันเมมเบรนชนิดอนินทรีย์ได้รับความนิยมสำหรับนำมาใช้ในเพอแวปอเรชันสำหรับการแยกน้ำออกจากสารประกอบอินทรีย์ เช่น Yang และคณะ ศึกษาการแยกน้ำออกจากแอลกอฮอล์ด้วยเพอแวปอเรชัน โดยใช้เมมเบรนชนิดอนินทรีย์ที่เตรียมจาก SiO₂-ZrO₂ พบว่าสมรรถนะการแยกของสารขึ้นอยู่กับขนาดรูพรุนของเมมเบรนและแรงอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของสาร [3] ทั้งนี้ วัสดุที่ใช้เตรียมเมมเบรนชนิดอนินทรีย์มีหลายชนิด เช่น แก้ว ซีโอไลต์และคาร์บอน [4, 5] เป็นต้นสำหรับคาร์บอนเมมเบรนนั้น พอลิเมอร์ตั้งต้นชนิดหนึ่งที่มีความนิยมในการนำมาใช้ในการเตรียม คือ พอลิอิมิด (polyimide) โดยมีงานวิจัยที่ผ่านมา เช่น Hatori และคณะ นำ Kapton[®] Polyimide มาทำให้เป็นคาร์บอนภายใต้อุณหภูมิสูง ทำให้ได้คาร์บอนเมมเบรน ที่มีขนาดรูพรุนต่ำกว่า 1 nm [6] Suda และ Haraya ศึกษาการซึมผ่านโมเลกุลแก๊สผ่านคาร์บอนเมมเบรน ที่ได้จากการนำ Kapton[®] Polyimide ไปทำให้เป็นคาร์บอนที่อุณหภูมิ 873-1273 K ที่มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิระหว่างการทำให้เป็นคาร์บอนที่แตกต่างกัน ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ต่ำเป็นสาเหตุทำให้เมมเบรนมีค่าความสามารถซึมผ่านแก๊สลดลง

เนื่องมาจากการลดลงของขนาดรูพรุนของคาร์บอนเมมเบรน [7] เนื่องมาจากคาร์บอนเมมเบรนมีการกระจายตัวของรูพรุนต่ำ ขนาดรูพรุนอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการใช้แยกน้ำออกจากองค์ประกอบอื่น ๆ ในฟลูเอลอยล์ งานวิจัยนี้จึงศึกษาสมรรถนะการแยกน้ำออกจากฟลูเอลอยล์ด้วยเพอแวกพอเรชัน และใช้คาร์บอนเมมเบรนที่เตรียมจากวิธีการทำให้เป็นคาร์บอนสองวิธี

2. วิธีการวิจัย

2.1 สารเคมี

พอลิอิมิตดั่งต้นมีชื่อทางการค้า Kapton[®] ความหนา 46 μm ผลิตโดย ARGON Masking Inc สหรัฐอเมริกา ฟลูเอลอยล์สังเคราะห์เตรียมจากสารเคมีบริสุทธิ์ เกรตวิเคราะหฺ์ ซึ่งประกอบด้วย ไอโซเอมิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 57.04 โดยมวล แอคทีฟเอมิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 11.41 โดยมวล ไอโซบิวทานอลความเข้มข้นร้อยละ 10.89 โดยมวล เอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 7.28 โดยมวล และน้ำปราศจากไอออนความเข้มข้นร้อยละ 13.38 โดยมวล

2.2 การเตรียมเมมเบรน

นำแผ่นพอลิอิมิตดั่งต้นรูปร่างกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.8 cm มาขนาบด้านบนและด้านล่างพอลิอิมิตด้วยแผ่นแก้วควอทซ์และแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 cm ตามลำดับ และนำไปใส่ในภาชนะทรงกระบอกที่จากเหล็กกล้าที่มีแก๊สไนโตรเจนไหลผ่านด้วยอัตราการไหล 60 cm^3/min เป็นระยะเวลา 30 นาที ก่อนการเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราเฉลี่ย 15.15 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จนถึง 600 $^{\circ}\text{C}$ โดยการใช้เตาเผาแบบท่อ จากนั้นจึงปล่อยให้เมมเบรนมีอุณหภูมิต่ำลงเป็นอุณหภูมิห้องอย่างช้า ๆ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เมมเบรนที่เตรียมได้นี้เรียกว่าคาร์บอนเมมเบรนชนิด SH

คาร์บอนเมมเบรนอีกชนิดหนึ่งคือ 3MKOH-RH24 เตรียมโดยการนำแผ่นพอลิอิมิตที่ตัดเป็นรูปร่างกลมแล้ว มาแช่ในสารละลาย KOH ความเข้มข้น 3 M เป็นเวลา 5 นาที แล้วล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนกระทั่งสารละลายมีค่า pH เป็นกลาง จากนั้นนำเมมเบรนที่ปรับสภาพแล้วไปอบด้วยคูบความร้อนอุณหภูมิ 50 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปบรรจุลงในชุดอุปกรณ์การทำให้เป็นคาร์บอนเช่นเดียวกับข้างต้น โดยเพิ่มอุณหภูมิเตาเผาจากอุณหภูมิห้องจนถึง 600 $^{\circ}\text{C}$ ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเฉลี่ย 26.86 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ แล้วคงที่ที่ 600 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 นาที จากนั้นจึงปล่อยให้เมมเบรนมีอุณหภูมิต่ำลงเป็นอุณหภูมิห้องอย่างช้า ๆ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

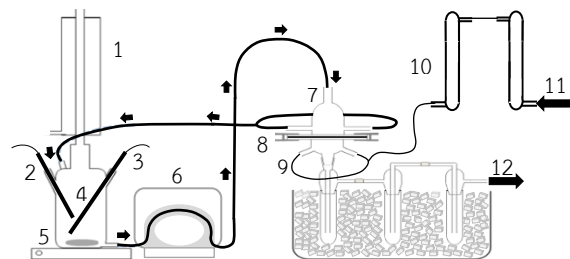
2.3 การวิเคราะห์ลักษณะของเมมเบรน

เอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ใช้วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของเมมเบรน โดยใช้แหล่งพลังงานจาก Cu-K α radiation ที่ความยาวคลื่น

0.1541 nm และมุมของการสะท้อน 0.002 nm ขณะที่การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันบนผิวเมมเบรนใช้แอมเทนนูเอเทดโททัลรีเฟลกชันฟูเรียร์ทราน-ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (ATR-FTIR)

2.4 เพอแวกพอเรชัน

ชุดอุปกรณ์เพอแวกพอเรชัน แสดงดังรูปที่ 1 โดยมีเมมเบรนบรรจุอยู่ระหว่างเมมเบรนเซลล์และด้านเพอมีเอท ซึ่งมีวงโอริงขนาบด้านบนและด้านล่างของแผ่นเมมเบรน เมมเบรนมีพื้นที่สุทธิ เท่ากับ $7.0686 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ การทดสอบสมรรถนะคาร์บอนเมมเบรนด้วยเพอแวกพอเรชัน ทำโดยเติมสารป้อนปริมาตร 600 cm^3 ลงในถังป้อนที่ตั้งอยู่บนเครื่องกวนสารและควบคุมอุณหภูมิสารป้อนให้คงที่ที่ 70 $^{\circ}\text{C}$ จากนั้นเติมน้ำแข็งและเกลือลงในหลอดควบแน่นด้านบนถึงป้อนเพื่อควบแน่นไอระเหยของสารป้อนขณะเดียวกันทำการปรับอัตราการไหลของอากาศปราศจากไอน้ำที่ต่อเข้ากับด้านเพอมีเอทให้มีอัตราการไหลคงที่ที่ 40 cm^3/min จากนั้นเปิดปั๊มดูด-จ่ายสารละลายแบบรีดท้อ ให้ปั๊มดูดสารป้อนจากถังป้อนเข้าสู่เมมเบรนเซลล์ด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 388.89 cm^3/min หลังจากดำเนินการกระบวนการเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จึงเติมน้ำแข็งและเกลือลงในภาชนะที่บรรจุชุดควบแน่น เพื่อควบแน่นสารในเพอมีเอท โดยควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง -15 ถึง -20 $^{\circ}\text{C}$ ระยะเวลาทำการทดสอบเมมเบรนอยู่ในช่วง 4 ถึง 10 ชั่วโมง จากนั้นเก็บสารตัวอย่างในชุดควบแน่นไปชั่งน้ำหนักและวิเคราะห์หาปริมาณโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ



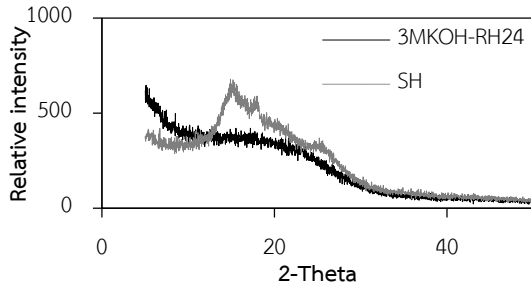
รูปที่ 1 ชุดอุปกรณ์เพอแวกพอเรชัน: (1) หลอดแก้วควบแน่น (2) แท่งให้ความร้อน (3) เทอร์โมสตัท (4) ถังป้อน (5) เครื่องกวนสารละลาย (6) ปั๊มดูด-จ่ายสารละลายแบบรีดท้อ หัวปั๊มชนิด Easy-Load[®] (7) เมมเบรนเซลล์ (8) เมมเบรนที่ขนาบด้วยวงโอริง (9) ชุดควบแน่น (10) หลอดแก้วบรรจุซิลิกาเจล (11) ทางเข้าอากาศ (12) ทางออกอากาศ

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของเมมเบรน

จากการวิเคราะห์ด้วย XRD คาร์บอนเมมเบรนชนิด SH มีพีคแหลมและชัน ขณะที่คาร์บอนเมมเบรนชนิด 3MKOH-RH24 ไม่ปรากฏพีคดังรูปที่ 2 แสดงว่าคาร์บอนเมมเบรนชนิด SH มีโครงสร้างเป็นผลึก ส่วนคาร์บอนเมมเบรนชนิด 3MKOH-RH24 มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย ATR-FTIR เมมเบรนสองชนิดมีการดูดกลืนคลื่นอินฟราเรดที่ความยาวคลื่น 1713 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งหมู่คาร์บอนิล นอกจากนี้ยังปรากฏหมู่ฟังก์ชัน C=O C-O และ -OH โดยความเข้มพีคที่ปรากฏของทั้งสองเมมเบรนมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ทำให้ระบุได้ว่าเมมเบรนสองชนิดนี้เป็นเมมเบรนประเภทชอบน้ำที่มีขั้วชนิดเดียวกัน



รูปที่ 2 กราฟ XRD ของคาร์บอนเมมเบรนชนิด SH และ 3MKOH-RH24

3.2 สารป้อนเป็นน้ำปราศจากไอออน

จากการทดสอบสมรรถนะคาร์บอนเมมเบรนชนิด SH และ 3MKOH-RH24 โดยการใช้ น้ำปราศจากไอออนเป็นสารป้อน ผลปรากฏว่าเมมเบรนทั้งสองชนิดให้มวลน้ำเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงกับการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบซึ่งแสดงว่าการซึมผ่านอยู่ในสภาวะคงตัว (steady state) โดยค่าฟลักซ์น้ำของคาร์บอนเมมเบรนชนิด 3MKOH-RH24 มีค่าเท่ากับ 363.58 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ และของชนิด SH มีค่าเท่ากับ 152.08 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ซึ่งอาจเกิดจากการที่คาร์บอนเมมเบรนชนิด 3MKOH-RH24 มีโครงสร้างที่มีความพรุนสูงกว่าหรือมีโครงข่ายรูพรุนเชื่อมต่อกัน

3.3 สารป้อนเป็นฟูเซลอยล์สังเคราะห์

ค่าฟลักซ์และค่าความสามารถซึมผ่านของแต่ละองค์ประกอบในฟูเซลอยล์แสดงโดยตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับ โดยทั้งสองค่าเพิ่มขึ้นตามการเปลี่ยนโครงสร้างจากผลึกเป็นอสัณฐาน

ตารางที่ 1 ค่าฟลักซ์ของแต่ละองค์ประกอบในฟูเซลอยล์สังเคราะห์ของคาร์บอนเมมเบรนชนิด SH และ 3MKOH-RH24

องค์ประกอบฟูเซลอยล์	ค่าฟลักซ์ ($\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)	
	SH	3MKOH-RH24
น้ำ	88.28	169.84
เอทานอล	0.10	1.13
ไอโซบิวทานอล	0.02	0.13
เอมิลแอลกอฮอล์	0.02	0.14
รวม	88.42	171.18

ตารางที่ 2 ค่าความสามารถซึมผ่านของแต่ละองค์ประกอบในฟูเซลอยล์สังเคราะห์ของคาร์บอนเมมเบรนชนิด SH และ 3MKOH-RH24

องค์ประกอบฟูเซลอยล์	ค่าความสามารถซึมผ่าน ($\text{g}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{kPa})$)	
	SH	3MKOH-RH24
น้ำ	4.25×10^{-4}	7.15×10^{-4}
เอทานอล	9.70×10^{-7}	1.00×10^{-5}
ไอโซบิวทานอล	3.31×10^{-7}	2.04×10^{-6}
แอกทีฟเอมิลแอลกอฮอล์	2.73×10^{-7}	1.60×10^{-6}
ไอโซเอมิลแอลกอฮอล์	1.44×10^{-7}	7.50×10^{-7}

จากตารางที่ 1 และ 2 แสดงให้เห็นว่า เมมเบรนทั้ง 2 ชนิดมีค่าฟลักซ์น้ำและค่าความสามารถซึมผ่านน้ำสูงกว่าค่าฟลักซ์และค่าความสามารถซึมผ่านขององค์ประกอบอื่นในฟูเซลอยล์ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมมเบรนสองชนิดนี้เป็นเมมเบรนประเภทชอบน้ำ ทำให้โมเลกุลของน้ำซึ่งมีสภาพความมีขั้วสูงสุดดูดซับลงบนผิวคาร์บอนเมมเบรนได้ดีกว่าโมเลกุลเอทานอล ไอโซบิวทานอล และเอมิลแอลกอฮอล์ ที่มีสภาพความมีขั้วต่ำตามจำนวนคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นในโมเลกุล ยิ่งไปกว่านั้น การที่เมมเบรนดูดซับน้ำได้ดีกว่านี้ยังส่งผลให้น้ำสามารถเกิดเป็นกลุ่มก้อน (cluster) ผ่านการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลและปกคลุมผิวหน้าของเมมเบรน ทำให้การดูดซับแอลกอฮอล์ลงบนผิวหน้าของเมมเบรนต่ำลงมากขึ้น

เนื่องจากกลไกการแยกน้ำออกจากองค์ประกอบอื่น ๆ ในฟูเซลอยล์ยังเกิดจากการคัดขนาดโมเลกุลที่มีขนาดโมเลกุลของสารที่ซึมผ่านเมมเบรน และคุณสมบัติของเมมเบรน เช่น ขนาดรูพรุน การกระจายตัวของขนาดรูพรุน รวมไปถึงความพรุนของเมมเบรนเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการคัดขนาด เนื่องจากน้ำมีขนาดโมเลกุลเพียง 0.26 nm [8] จึงทำให้โมเลกุลน้ำแพร่ภายในรูพรุนของเมมเบรนได้ในอัตราที่สูงกว่าองค์ประกอบอื่น ๆ ของฟูเซลอยล์ เช่น เอทานอลและไอโซบิวทานอลซึ่งมีขนาดโมเลกุล 0.44 nm และ 0.55 nm ตามลำดับ [8] ค่าฟลักซ์ของน้ำจึงสูงสุด

การเปลี่ยนโครงสร้างจากผลึกเป็นอสัณฐานส่งผลโดยตรงต่อการซึมผ่านเมมเบรนดังจะเห็นได้จากค่าฟลักซ์ของคาร์บอนเมมเบรนชนิด 3MKOH-RH24 มีค่าฟลักซ์และค่าความสามารถซึมผ่านสูงกว่า ซึ่งอาจเกิดจากการที่คาร์บอนเมมเบรนชนิด 3MKOH-RH24 มีขนาดรูพรุนที่ใหญ่กว่า นอกจากนี้ คาร์บอนเมมเบรนชนิดนี้ยังอาจมีรูพรุนที่เชื่อมต่อกันในลักษณะที่เป็นโครงข่ายหรือมีความพรุนสูงกว่าด้วยเช่นกัน ทั้งนี้ อิทธิพลดังกล่าวส่งผลต่อการเพิ่มค่าฟลักซ์และค่าความสามารถซึมผ่านของแอลกอฮอล์มากกว่าน้ำโดยสังเกตได้จากสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของค่าฟลักซ์และค่าความสามารถซึมผ่านของแอลกอฮอล์นั้นสูงกว่าน้ำ นอกจากนี้ค่าการเลือกผ่านน้ำ/เอมิลแอลกอฮอล์ของคาร์บอนเมมเบรนชนิด 3MKOH-RH24 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7684 ยังต่ำกว่าค่าการเลือกผ่านน้ำ/เอมิลแอลกอฮอล์ 24471 ที่ได้จากคาร์บอนเมมเบรนชนิด SH

ขนาดรูพรุนของคาร์บอนเมมเบรนชนิด 3MKOH-RH24 ที่อาจใหญ่กว่านั้น ส่งผลให้แอลกอฮอล์ชนิดอื่น ๆ สามารถแพร่เข้าสู่โครงสร้างภายในของเมมเบรนได้ง่ายขึ้นจึงเป็นการลดอิทธิพลของน้ำที่สามารถแพร่เข้าสู่รูพรุนของเมมเบรนได้ในอัตราที่สูงกว่าแอลกอฮอล์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่า

เมื่อรูพรุนภายในโครงสร้างของคาร์บอนเมมเบรนชนิด 3MKOH-RH24 มีการเชื่อมต่อกันในลักษณะที่เป็นโครงข่ายหรือโครงสร้างของเมมเบรนมีความพรุนสูงกว่า องค์ประกอบต่าง ๆ จึงแพร่จากผิวหน้าของเมมเบรนเข้าสู่โครงสร้างภายในของเมมเบรนได้ในปริมาณที่มากขึ้น ลักษณะดังกล่าวทำให้แอลกอฮอล์มีความสามารถซึมผ่านเมมเบรนในสัดส่วนที่สูงขึ้นมากกว่าน้ำเนื่องจากน้ำมีขนาดโมเลกุลที่เล็กกว่าขนาดรูพรุนของเมมเบรนทั้งสองชนิดอยู่แล้ว การแพร่ผ่านเมมเบรนจึงมิได้มีขนาดรูพรุนเป็นปัจจัยที่ก่อให้เกิดความแตกต่างอย่างชัดเจน ในทางตรงกันข้าม ขนาดรูพรุนและความพรุนที่สูงขึ้นย่อมทำให้แอลกอฮอล์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าสามารถแพร่ผ่านคาร์บอนเมมเบรนชนิด 3MKOH-RH24 ได้ในสัดส่วนที่สูงกว่าได้

4. สรุป

คาร์บอนเมมเบรนที่เตรียมจาก Kapton[®] polyimide ด้วยวิธีการทำให้เป็นคาร์บอน 2 วิธี ทำให้ได้คาร์บอนเมมเบรนมีขั้วชนิดเดียวกันแต่มีโครงสร้างแตกต่างกัน เมื่อสารป้อนเป็นน้ำปราศจากไอออน คาร์บอนเมมเบรนที่มีโครงสร้างอสัณฐานให้ค่าฟลักซ์และค่าความสามารถซึมผ่านน้ำสูงกว่าคาร์บอนเมมเบรนที่มีโครงสร้างผลึก เมื่อสารป้อนเป็นฟูเซลอลอยล์สังเคราะห์ คาร์บอนเมมเบรนที่มีโครงสร้างอสัณฐานให้ค่าฟลักซ์และค่าความสามารถซึมผ่านของน้ำสูงกว่าคาร์บอนเมมเบรนอีกชนิดเช่นกัน แต่คาร์บอนเมมเบรนโครงสร้างอสัณฐานมีค่าการเลือกผ่านน้ำ/เอมิลแอลกอฮอล์ ต่ำกว่าคาร์บอนเมมเบรนโครงสร้างผลึก โดยคาดว่าเกิดจากกลไกการคัดขนาดมีอิทธิพลต่ำลงเนื่องจากมาจากขนาดรูพรุนของคาร์บอนเมมเบรนโครงสร้างอสัณฐานใหญ่ขึ้น นอกจากนี้ ยังอาจมีสาเหตุมาจากความพรุนที่สูงขึ้นด้วยเช่นกัน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการสนับสนุนทุนวิจัยแก่นักศึกษาระดับอุดมศึกษา กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำหรับนักศึกษาระดับอุดมศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2558

เอกสารอ้างอิง

[1] M. C. Ferreira, A. J. A. Antonio, and E. A. C. Batista, "Study of the Fusel Oil Distillation Process" I & EC Research, Vol. 52, 2013, pp. 2336-2356.

- [2] J. M. Miller, and J. W. Wright, "Spot Indole Test: Evaluation of Four Reagents" JOURNAL OF CLINICAL MICROBIOLOGY, Vol. 15, No. 4, 1982, pp. 589-592.
- [3] J. Yang, T. Yoshioka, and M. Asaeda, "Pervaporation characteristics of aqueous-organic solutions with microporous SiO₂-ZrO₂ membranes" Journal of Membrane Science, Vol. 284, 2006, pp. 205-213.
- [4] S. H. Wee, and S. Bhatia, "Membrane separation process- Pervaporation through zeolite membrane" Separation and Purification Technology, Vol. 63, 2008, pp. 500-516.
- [5] M. Yoshimune, and K. Haraya, "Alcohol dehydration by pervaporation using a carbon hollow fiber membrane derived from sulfonated poly(phenylene oxide)" Journal of Membrane Science, Vol. 425, 2013, pp. 149-155.
- [6] H. Hatori, H. Takagi, Y. Yamada, "Gas separation properties of molecular sieving carbon membranes with nanopore channels" Carbon, Vol. 42, 2004, pp. 1169-1173.
- [7] H. Suda, and K. Haraya, "Gas Permeation through Micropores of Carbon Molecular Sieve Membranes Derived from Kapton Polyimide", Journal of Physical Chemistry, Vol. 101, 1997, pp. 3988-3994.
- [8] B. Huang, Q. Liu, and A. Huang, "Iso-butanol dehydration by pervaporation using zeolite LTA membranes prepared on 3-aminopropyltriethoxysilane-modified alumina tube" Journal of Membrane Science, Vol. 455, 2014, pp. 200-206.

การผลิตหมอนสุภาพกลิ่นบำบัดบรรจุหลอดพลาสติกที่ย่อยสลายได้ Production of Aroma Pillow with Biodegradable Plastic Pipe

ศรีประไพ จุ้ยน้อย^{1*} สุภากรณ์ ทุมสอน²

¹ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

²ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

E-mail: sriprapai.j@en.mutt.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตหมอนสุภาพกลิ่นบำบัดบรรจุหลอดพลาสติกที่ย่อยสลายได้ โดยเตรียมปลอกหมอนจากผ้า 3 ชนิด ได้แก่ ผ้าฝ้าย ผ้าชีซ และผ้าโพลีเอสเตอร์ ทำการบำบัดกลิ่นของปลอกหมอน โดยใช้กลิ่นบำบัด 2 กลิ่น คือ กลิ่นกุหลาบและกลิ่นลาเวนเดอร์ จากนั้นบรรจุปลอกหมอนด้วยหลอดจากพลาสติกย่อยสลายได้ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร และมีความยาว 1 - 1.5 เซนติเมตร จำนวน 2 กิโลกรัม ทำการศึกษาความพึงพอใจในการทดลองใช้หมอนของผู้บริโภคจำนวน 400 คน ด้วยแบบสอบถาม และใช้โปรแกรม SPSS ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง พบว่า ค่าความพึงพอใจในด้านความชื่นชอบหมอนที่ใส่กลิ่นบำบัดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.89 ค่าความพึงพอใจในกลิ่นลาเวนเดอร์มีค่าเฉลี่ยที่ 3.88 ค่าความพึงพอใจในด้านกลิ่นกุหลาบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.81 ค่าความพึงพอใจในด้านความรู้สึกผ่อนคลายหลังตื่นนอนมีค่าเฉลี่ยที่ 3.78 ค่าความพึงพอใจในด้านความชื่นชอบหมอนที่บรรจุหลอดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.77 และค่าความพึงพอใจโดยรวมของความชื่นชอบหมอนหลอดที่ใส่กลิ่นบำบัดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.00 และการแปรผลอยู่ในระดับดี

คำสำคัญ: หมอนสุภาพ พลาสติกย่อยสลายได้ กลิ่นบำบัด หมอนอัจฉริยะ

1. บทนำ

อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อการดำรงชีวิตประจำวัน มีการใช้งานสิ่งทออย่างหลากหลาย ได้แก่ เครื่องนุ่งห่ม เครื่องแต่งตัว งานด้านกีฬา และอุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นต้น สิ่งสำคัญของผลิตภัณฑ์จากสิ่งทอนั้น ต้องคำนึงถึงคุณภาพ ประโยชน์ การใช้สอย ความคุ้มค่า เพื่อสามารถใช้ผลิตภัณฑ์จากสิ่งทอให้เกิดประโยชน์สูงสุด หนึ่งในงานที่สำคัญทางด้านสิ่งทอ คือ การเลือกวัสดุที่นำมาผลิตได้อย่างเหมาะสม เช่น เสื้อที่ผลิตจากผ้าฝ้ายทำให้สวมใส่สบาย เสื้อจากผ้าไหมดูหรูหรา และเพิ่มความโดดเด่นให้กับผู้สวมใส่ เส้นใยที่นำมาผลิตเป็นงานด้านสิ่งทอ ได้มาจากธรรมชาติ หรือจากการสังเคราะห์ ในปัจจุบันเส้นใยสังเคราะห์เข้ามามีบทบาทอย่างมากต่องานด้านสิ่งทอ เนื่องจากสามารถปรับปรุงเส้นใยให้มีสมบัติต่าง ๆ ตามความต้องการ เช่น

เส้นใยพอลิเอสเตอร์ เส้นใยไนลอน เส้นใยอะคริลิก เป็นต้น เส้นใยดังกล่าวสามารถนำไปถัก ทอ และตัดเย็บได้อย่างเหมาะสม [1-3]

ปัจจุบัน จากภาวะการทำงานที่เคร่งเครียด ทำให้การพักผ่อนโดยเฉพาะการนอนหลับอย่างสบายเต็มที่เป็นสิ่งสำคัญมาก เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงาน หรือบุคคลทั่วไป สามารถใช้ชีวิตได้อย่างมีความสุข และไม่มีปัญหาด้านสุขภาพจากการพักผ่อนที่ไม่เพียงพอ หมอน คือ อุปกรณ์ที่มีส่วนสำคัญต่อการนอนหลับพักผ่อน ปัจจุบันหมอนที่ภายในบรรจุเส้นใยธรรมชาติ เช่น นุ่น หรือเส้นใยสังเคราะห์ เช่น พอลิเอสเตอร์ หรือไนลอน มีผลทำให้เกิดการแพ้ไรฝุ่น จากทั้งปลอกหมอน และนุ่นหรือเส้นใยที่บรรจุอยู่ในปลอกหมอน รวมไปถึงปัญหาการปวดเมื่อย และปัญหาด้านการหมุนเวียนของระบบโลหิตที่เกิดจากการนอนได้

หมอนอัจฉริยะ หรือหมอนที่บรรจุด้วยหลอดพลาสติก เริ่มเป็นที่รู้จักจากประเทศญี่ปุ่น ภายในหมอนบรรจุด้วยหลอดพลาสติกขนาดประมาณ 2 เซนติเมตร หมอนที่บรรจุด้วยหลอดนี้ มีความคงตัวตามรูปศีรษะของผู้นอน จึงช่วยลดปัญหาอาการปวดเมื่อยที่เกิดขึ้นจากการนอนได้ ช่วยลดปัญหาการสะสมและการแพร่เชื้อของไรฝุ่นได้อีกด้วย ถึงแม้ว่าในปัจจุบันมีผู้ผลิตหมอนบรรจุหลอดใช้งานแล้วก็ตาม หมอนบรรจุหลอดนี้ยังไม่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย และปลอกหมอนพิเศษที่มีสมบัติลดปัญหาจากไรฝุ่น และหมอนอัจฉริยะที่ผลิตจากวัสดุเฉพาะนั้นมีราคาแพง [4-7] จากการศึกษาข้อมูลทางวิชาการ ยั้ขตข้อมูลในการวิจัยเกี่ยวกับหมอนบรรจุหลอดพลาสติก โดยทั่วไปหลอดที่ใช้ในการบรรจุ ผลิตจากพลาสติกชนิดโพลีโพรพิลีน (polypropylene, PP) ซึ่งเป็นพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นประโยชน์อย่างมากต่อข้อมูลทางวิชาการในการประยุกต์การใช้งานหลอดผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ชนิดโพลีบิวทิลีนซัคซิเนต (poly(butylene succinate), PBS) เป็นวัสดุบรรจุหมอน

งานวิจัยนี้ ทำการตัดเย็บปลอกหมอนที่ผลิตจากผ้าเส้นใยสังเคราะห์ หรือผ้าจากเส้นใยธรรมชาติ ที่มีผ่านการปรับปรุงสมบัติพิเศษด้านกลิ่นบำบัด โดยภายในของหมอนบรรจุด้วยหลอดพลาสติกที่ผลิตจากพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ และเป็นพลาสติกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และเป็นหมอนสุภาพ ซึ่งหมอนสุภาพจากงานวิจัยนี้ สามารถส่งเสริมให้มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง และเป็นทางออกสำหรับผู้มีปัญหาจากไรฝุ่นและอาการปวดเมื่อยจากการนอน ให้มีสุขภาพ และคุณภาพชีวิตที่ดี และสามารถยกระดับการผลิตจากชุมชน สู่อุตสาหกรรมต่อไป

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

2.1 การเตรียมปลอกหมอน

ใช้ผ้าทดลองในการทำหมอนประกอบด้วยผ้า 3 ชนิดคือ ผ้าฝ้าย (ผ้าสีเหลือง) ผ้าทีซี (ผ้าสีเขียว) และผ้าโพลีเอสเตอร์ 100 % (ผ้าสีฟ้า) ทำการเตรียมแบบตัดปลอกหมอน และตัดเย็บเป็นปลอกหมอนขนาด 20 นิ้ว x 29 นิ้ว

2.2 การปรับปรุงปลอกหมอนให้มีกลิ่นบำบัด

ทำการปรับปรุงปลอกหมอนให้มีกลิ่นบำบัด 2 กลิ่น คือ 1. กลิ่นกุหลาบ ช่วยในเรื่องเปลี่ยนความเหนื่อยล้า มีความสดชื่น และผ่อนคลาย 2. กลิ่นลาเวนเดอร์ ช่วยให้การนอนหลับดี โดยทั่วไปน้ำมันหอมระเหยกลิ่นลาเวนเดอร์ช่วยผ่อนคลายร่างกายและจิตใจ ลดความเครียด และส่งผลให้นอนหลับพักผ่อนได้เต็มที่ นำกลิ่นบำบัดผสมกับสารช่วยยึดติด ละลายในน้ำกลั่น 1 ลิตร โดยนำปลอกหมอนซึบสารกลิ่นบำบัดและใช้ลูกกลิ้งยางรีดให้สารกลิ่นบำบัดติดกับปลอกหมอน ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส และอบให้กลิ่นบำบัดติดปลอกหมอนที่อุณหภูมิ 140-150 องศาเซลเซียส รูปที่ 1 แสดงปลอกหมอนที่ตัดเย็บและผ่านการปรับปรุงกลิ่นบำบัด



รูปที่ 1 ปลอกหมอนที่ทำการปรับปรุงกลิ่น

2.3 การผลิตไส้หมอนจากผ้าฝ้าย

ทำการผลิตไส้หมอน ขนาด 20 x 29 นิ้ว ทำการเย็บโดยการเปิดช่องสำหรับบรรจุหลอดพลาสติกย่อยสลายได้



รูปที่ 2 ไส้หมอน

2.4 การขึ้นรูปหลอดพลาสติกย่อยสลายได้

ทำการขึ้นรูปหลอดพลาสติกจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยกระบวนการอัดรีด กำหนดอุณหภูมิในการขึ้นรูป 120-160 องศาเซลเซียส หลอดพลาสติกจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร และตัดให้มีความยาว 1-1.5 เซนติเมตร ทำการบรรจุหลอดในไส้หมอนผ้าฝ้าย น้ำหนักบรรจุหลอดพลาสติก 2 กิโลกรัม ต่อหมอน 1 ใบ

2.5 การทดสอบความแข็งแรงดึงของหลอดพลาสติกย่อยสลายได้

ทำการทดสอบความแข็งแรงดึงของหลอดพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) และหลอดพลาสติกพอลิพรอพิลีน (PP) ที่ใช้ในทางการค้า โดยหลอดทั้ง 2 ชนิด มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร เตรียมชิ้นงานและทดสอบตามมาตรฐาน ASTM 882 โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง (Instron universal testing machine) อัตราการดึง 100 mm/min



รูปที่ 3 ไส้หมอนที่บรรจุหลอดพลาสติกย่อยสลายได้



รูปที่ 4 หมอนสุขภาพบำบัดกลิ่นบรรจุหลอดพลาสติกย่อยสลาย

2.6 การทดสอบลักษณะของเส้นใยในปลอกหมอน

ทำการศึกษาลักษณะของเส้นใยในปลอกหมอนตัวอย่างก่อนทำการซึบกลิ่นบำบัด และหลังการซึบกลิ่นบำบัด ดึงเส้นใยในปลอกหมอน

นำไปศึกษาลักษณะของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล (Digital optical microscope)

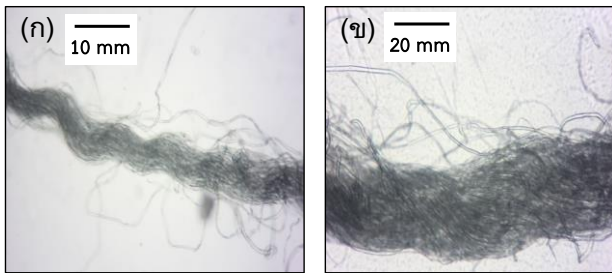
2.7 การวิเคราะห์แบบสอบถาม

ทำการวิเคราะห์ข้อมูล และความพึงพอใจในการทดลองใช้งาน หมอนสุขภาพกลิ่นบำบัดบรรจุหลอดพลาสติกย่อยสลายได้ของผู้บริโภค จำนวน 400 คน จากกลุ่มบุคลากรและนักศึกษาจากภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และกลุ่มบุคคลในพื้นที่ชอยพรธินสาร ต.คลองหก อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี โดยให้กลุ่มผู้บริโภคทดลองใช้หมอน และทำแบบสอบถาม จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลความพึงพอใจของผู้บริโภค ด้วยโปรแกรม SPSS

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการส่องกล้องจุลทรรศน์การชุกถันบำบัดของผ้าฝ้าย

รูปที่ 5 (ก) และ รูปที่ 5 (ข) แสดงตัวอย่างของเส้นใยจากผ้าฝ้าย ก่อนและหลังชุกถันบำบัด ตามลำดับ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล จากรูปที่ 5 (ก) จะพบลักษณะขั้วของเส้นใยฝ้าย และเมื่อทำการชุกถัน Aroma ball กลิ่นกุหลาบ พบว่ามีเม็ดสาร Aroma กลิ่นกุหลาบ ขนาดเล็กบนเส้นใยผ้าฝ้าย ดังรูปที่ 5 (ข) แสดงว่าสารกลิ่นบำบัดที่ติดอยู่กับเส้นใยฝ้าย



รูปที่ 5 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของผ้าฝ้ายชุกถันกุหลาบ
(ก) ก่อนชุกถันบำบัด (ข) หลังชุกถันบำบัด

3.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงของหลอดพลาสติก

ตารางที่ 1 แสดงผลการทดสอบแรงดึงของหลอดพลาสติกย่อยสลายได้พอลิพิวทีลีนซัคซิเนต (PBS) เทียบกับความแข็งแรงดึงของหลอดพลาสติกพอลิพรอพิลีน (PP) ที่นิยมใช้บรรจุหมอนหลอด พบว่าความแข็งแรงดึงและค่าโมดูลัสของหลอด PBS มากกว่าหลอด PP แสดงว่าหลอด PBS มีความแข็งแรง แต่มีความยืดหยุ่นที่น้อยกว่าหลอด PP

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบความแข็งแรงของหลอดพลาสติกย่อยสลาย

ตัวอย่าง	ความแข็งแรงดึง (N/mm ²)	โมดูลัส (N/mm ²)	ความยืดหยุ่น (%)
หลอด PBS	48.0 ± 5.0	712.0 ± 9.0	230.0 ± 15.0
หลอด PP	33.0 ± 3.0	655.0 ± 8.0	720.0 ± 20.0

4. ผลการทดลองใช้งาน

ผลการทดลองใช้งานจริงจากผู้บริโภค และทำแบบสอบถาม จำนวน 400 คน โดยแบบสอบถามแบ่งเป็น 3 ตอน ได้แก่ ตอนที่ 1 ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม ตอนที่ 2 ข้อมูลเกี่ยวกับพฤติกรรมการใช้หมอน และตอนที่ 3 ความพึงพอใจหลังการใช้หมอน และใช้โปรแกรม SPSS ในการประมวลผลค่าความพึงพอใจมีผลดังนี้

4.1 ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม

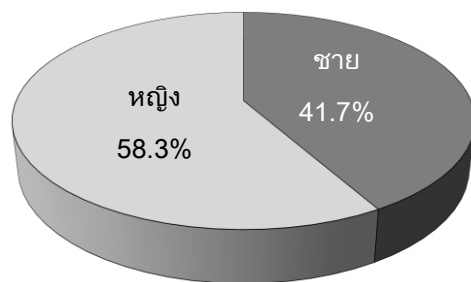
ทำการรวบรวมแบบสอบถามจากผู้ใช้นอนกลิ่นบำบัดบรรจุหลอดพลาสติกย่อยสลายได้ จำนวน 400 คน ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากผู้ตอบแบบสอบถามในส่วนข้อมูลทั่วไป โดยใช้โปรแกรม SPSS พบว่าผู้ตอบแบบสอบถามไม่ได้ตอบข้อมูลทั่วไปทั้งหมดในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ข้อมูลทั่วไปจากผู้ตอบแบบสอบถาม

	เพศ	อายุ	อาชีพ	การศึกษา	รายได้
N Valid	393	398	397	395	390
Missing	7	2	3	5	10
Mean	1.58	3.29	4.95	1.71	2.17
Std. Deviation	0.49	1.53	2.89	0.70	1.277

4.2 เพศผู้ตอบแบบสอบถาม

จากการวิเคราะห์ สรุปข้อมูลทั่วไปจากผู้ตอบแบบสอบถาม พบว่าจำนวนผู้ตอบแบบสอบถามที่เป็นเพศชาย 41.7% และจำนวนผู้ตอบแบบสอบถามที่เป็นเพศหญิง 58.3% ดังรูปที่ 6

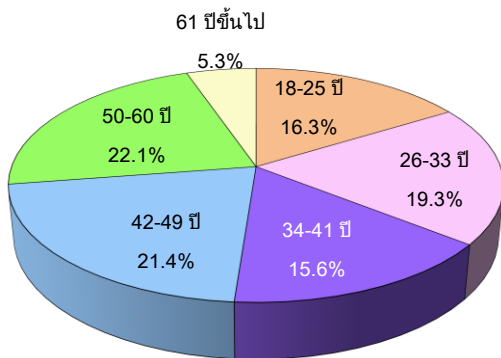


รูปที่ 6 เพศผู้ตอบแบบสอบถาม

4.3 อายุผู้ตอบแบบสอบถาม

ทำการสรุปข้อมูลด้านอายุจากผู้ตอบแบบสอบถาม พบว่า ช่วงอายุของผู้ตอบแบบสอบถาม แบ่งได้ดังนี้ ลำดับที่ 1 ช่วงอายุ 50-60 ปี 22.1% ลำดับที่ 2 คือช่วงอายุ 42-49 ปี จำนวน 21.4% ลำดับที่ 3 คือช่วงอายุ 26-33 ปี จำนวน 19.3% ลำดับที่ 4 คือ ช่วงอายุ 18-25 ปี

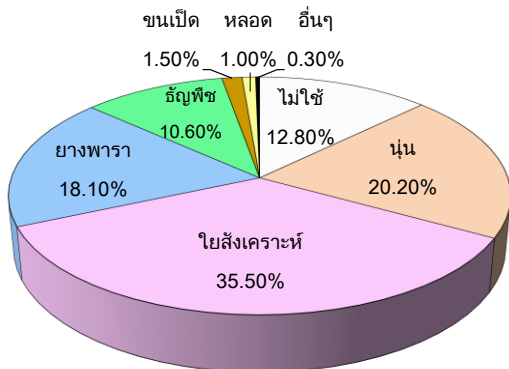
จำนวน 16.3% ลำดับที่ 5 คือ ช่วงอายุ 34-41 ปี จำนวน 15.6% และลำดับที่ 6 คือ ช่วงอายุ 61 ปี ขึ้นไป จำนวน 5.3% ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 อายุผู้ตอบแบบสอบถาม

4.4 การเลือกใช้วัสดุบรรจุหมอน

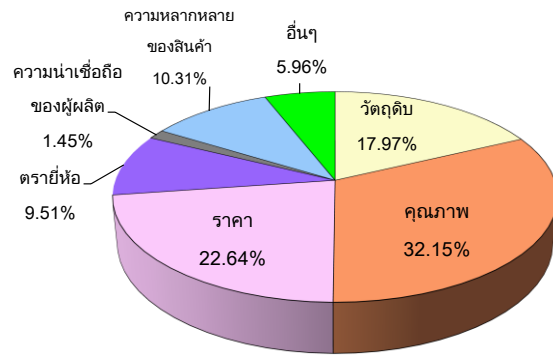
จากการวิเคราะห์ผลจากแบบสอบถามในส่วนของวัสดุบรรจุหมอนที่ผู้บริโภคเลือกใช้ พบว่า อันดับที่ 1 คือ โยสังเคราะห์ 35.50% อันดับที่ 2 คือ นุ่น 20.20% อันดับที่ 3 คือ ยางพารา 18.10% อันดับที่ 4 คือ ไม่เลือกใช้วัสดุบรรจุหมอน 12.8% อันดับที่ 5 คือ ัญพิช 10.6% อันดับที่ 6 คือ ขนเป็ด 1.5% อันดับที่ 7 คือ หลอด 1.0% และอันดับที่ 8 วัสดุอื่น 0.30% ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 การเลือกใช้วัสดุบรรจุหมอน

4.5 ปัจจัยในการตัดสินใจซื้อหมอน

ในด้านปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจซื้อหมอนของผู้ตอบแบบสอบถาม พบว่า ปัจจัยที่ส่งผลมากที่สุด คือ ปัจจัยด้านคุณภาพ 32.20% ปัจจัยที่ 2 คือ ราคา 22.70% ปัจจัยที่ 3 คือ วัสดุดิบ 17.9% ปัจจัยที่ 4 คือ ความหลากหลายของสินค้า 10.3% ปัจจัยที่ 5 คือ ตรายี่ห้อ 9.5% ปัจจัยอื่นๆ 6.0% และปัจจัยที่ส่งผลน้อยที่สุดต่อการตัดสินใจซื้อหมอน คือ ความน่าเชื่อถือของผู้ผลิต 1.4% ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ปัจจัยในการตัดสินใจซื้อหมอน

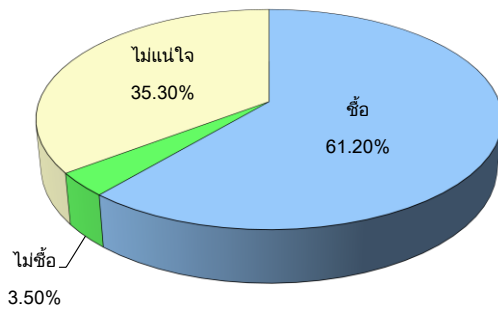
4.6 ความพึงพอใจของการใช้หมอนสุขภาพกลิ่นบำบัดบรรจุหลอดพลาสติกย่อยสลายได้

ตารางที่ 3 เป็นผลสรุปค่าเฉลี่ย และระดับความพึงพอใจของการใช้หมอนสุขภาพกลิ่นบำบัดบรรจุหลอดพลาสติกย่อยสลายได้ของผู้บริโภค พบว่า กลิ่นกุหลาบจะช่วยผ่อนคลาย เพิ่มความสดชื่น และกลิ่นลาเวนเดอร์ช่วยผ่อนคลาย ลดความเครียด และช่วยให้นอนหลับพักผ่อนได้ดีขึ้น โดยมีค่าเฉลี่ยของระดับความพึงพอใจในระดับที่ดี

ตารางที่ 3 ความพึงพอใจหลังการใช้หมอนพลาสติกย่อยสลายได้

ความพึงพอใจ	ค่าเฉลี่ย	ระดับความพึงพอใจ
ความชื่นชอบหมอนที่ใส่กลิ่นบำบัด	3.89	ดี
กลิ่นที่ชื่นชอบ กลิ่นลาเวนเดอร์	3.88	ดี
กลิ่นที่ชื่นชอบ กลิ่นกุหลาบ	3.81	ดี
ความรู้สึกรู้สึกผ่อนคลายหลังตื่นนอน	3.78	ดี
ความชื่นชอบหมอนที่บรรจุหลอด	3.77	ดี
ความชื่นชอบหมอนหลอดที่ใส่กลิ่นบำบัดโดยรวม	4.00	ดี

เมื่อพิจารณาในส่วนของทางเลือกซื้อหมอนสุขภาพ จากผลการตอบแบบสอบถาม พบว่า ผู้บริโภคตัดสินใจซื้อหมอนสุขภาพกลิ่นบำบัดบรรจุหลอดพลาสติกย่อยสลายได้ที่ 61.20% ไม่แน่ใจในการเลือกซื้อ 35.30% และไม่ซื้อหมอนสุขภาพกลิ่นบำบัดบรรจุหลอดพลาสติกย่อยสลายได้ 3.50% ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 การตัดสินใจซื้อหอมอน

5. สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้หลอดพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นวัสดุบรรจุหอมอนสุภาพกลิ่นบำบัด ทดแทนการใช้ปูนหรือวัสดุโยสังเคราะห์ที่ใช้ทางการค้า เพื่อลดปัญหาการแพ้ฝุ่น และความเมื่อยล้าจากการศึกษาพบว่า หอมอนสุภาพกลิ่นบำบัดบรรจุหลอดพลาสติกย่อยสลายได้ สร้างความพึงพอใจให้กับผู้ทดสอบอยู่ในระดับที่ดี การใช้กลิ่นบำบัดหอมอนสุภาพด้วยกลิ่นกุหลาบ และกลิ่นลาเวนเดอร์ ช่วยสร้างความผ่อนคลาย บรรเทาความตึงเครียด ให้ความสบาย รู้สึกสดชื่นเมื่อตื่นนอน และช่วยให้นอนหลับพักผ่อนได้เต็มที่ ดังนั้นผู้บริโภคมีความพึงพอใจ และมีแนวโน้มที่จะซื้อหอมอนสุภาพกลิ่นบำบัดบรรจุหลอดพลาสติกย่อยสลายได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ในการให้คำปรึกษา ขอขอบคุณบริษัททานตะวันอุตสาหกรรมจำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการขึ้นรูปหลอดพลาสติกย่อยสลายได้ ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ช่วยตอบแบบสอบถามความพึงพอใจการใช้หอมอนสุภาพกลิ่นบำบัดบรรจุหลอดพลาสติกย่อยสลายได้ และการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยด้วยเงินงบประมาณรายได้สะสมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ประจำปี 2558

เอกสารอ้างอิง

- [1] วีรวัฒน์ เทพน้อยและคณะ. การศึกษาการผลิตหอมอนสุภาพจากหลอด. ปรินานิพนธ์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรญาณบุรี, 2557
- [2] วีรวัฒน์ ตันเดชาพันธุ์. 2552. ชุดกันยุงสมุนไพร. รายงานการวิจัยสถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ (สืบค้นเมื่อ 15 พฤศจิกายน 2557)
- [3] ศูนย์พัฒนาผลิตภัณฑ์สิ่งทอ. การเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์สิ่งทอด้วยเทคโนโลยีตกแต่งสำเร็จ. คู่มือเอกสารการอบรมสถาบันสิ่งทอ, 2558
- [4] <http://hubpages.com/health/How-To-Sleep-Better-At-Nights-Without-Using-Sleeping-Pills>
- [5] <http://www.netherfield.co.nz/lavender-uses.php>
- [6] <https://draxe.com/rose-essential-oil-benefits-skin-depression-hormones/>
- [7] <http://www.dallasfeldenkrais.com/2014/07/28/many-pillows-sound-sleep/>

การออกแบบโครงสร้างการควบคุมแบบแพลนที่ไวต์ของกระบวนการเอทิลเบนซินด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์

Plantwide Control Structure Design of Ethyl Benzene Process via Mathematical Method

ชัยภพ ศิระวรกุล* และ ชนาภา เจริญมิตรภาพ

ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

E-mail: chaiyapop.s@en.mutt.ac.th*

T116

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบโครงสร้างการควบคุมแบบแพลนที่ไวต์ของกระบวนการเอทิลเบนซินโดยใช้วิธีการประเมินสมรรถนะการควบคุมด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ การจำลองการควบคุมกระบวนการเอทิลเบนซินมุ่งเน้นไปทางด้านประสิทธิภาพโดยภาพรวมของทั้งกระบวนการผลิต ซึ่งประกอบด้วยเครื่องปฏิกรณ์เคมีจำนวน 2 เครื่องที่มีการเกิด 3 ปฏิกิริยาเคมี หอกลับจำนวน 2 หอ และมีกระแสป้อนกลับ 2 กระแสของสารตั้งต้นเพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุด ปัจจัยเหล่านี้ทำให้กระบวนการนี้มีความซับซ้อนและยากต่อการควบคุมกระบวนการเพื่อให้ได้ค่าเป้าหมายที่เหมาะสม ผู้วิจัยได้ออกแบบโครงสร้างการควบคุมแบบใหม่ เปรียบเทียบกับโครงสร้างการควบคุมดั้งเดิม โดยใช้ตรรกะนี้ชี้วัดสมรรถนะการควบคุมแบบผลรวมค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ (Integral of the Absolute value of the Error, IAE) เป็นตัวเปรียบเทียบ โดยผลการจำลองกระบวนการแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างการควบคุมที่ได้ออกแบบใหม่ มีค่าดัชนีชี้วัดสมรรถนะการควบคุมดีกว่า โครงสร้างการควบคุมแบบดั้งเดิม

คำสำคัญ: โครงสร้างการควบคุม การควบคุมกระบวนการ วิธีการทางคณิตศาสตร์ การจำลองกระบวนการ

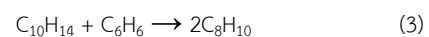
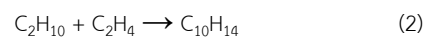
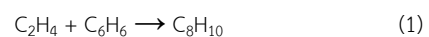
1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เอทิลเบนซินเป็นสารเคมีที่ถูกนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตสไตรีน กระบวนการผลิตเอทิลเบนซินเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนทั้งในด้านการเกิดปฏิกิริยาเคมีในเครื่องปฏิกรณ์ และการรีไซเคิลสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ ปฏิกิริยาของกระบวนการนี้มีการเกิดทั้งหมด 3 ปฏิกิริยาเกิดในเครื่องปฏิกรณ์จำนวน 2 เครื่อง และ ในการกระบวนการผลิตมีกระแสรีไซเคิลจำนวนสองกระแสถูกนำกลับมาทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสอง เนื่องจากมีการหมุนเวียนสารและพลังงานในกระบวนการผลิตทำให้กระบวนการผลิตนี้ยากต่อการควบคุม งานวิจัยชิ้นนี้ได้ศึกษาแนวทางการออกแบบโครงสร้างการควบคุมแบบแพลนที่ไวต์ของกระบวนการผลิตเอทิลเบนซินโดยใช้การจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม Aspen Plus และ Aspen Dynamics และประเมินสมรรถนะการควบคุมด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ โดยมีการเปรียบเทียบผลการตอบสนองการควบคุมกับงานวิจัยอ้างอิงของไลเบน [1]

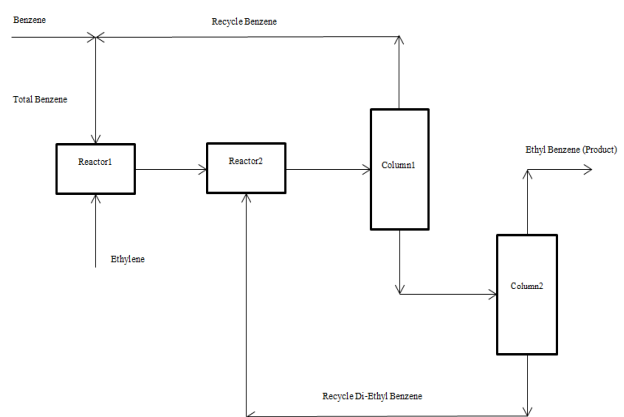
2. กระบวนการและขั้นตอนการวิจัย

2.1 กระบวนการผลิตเอทิลเบนซิน

กระบวนการผลิตเอทิลเบนซินแสดงในรูปที่ 1 เป็นกระบวนการที่ประกอบด้วยปฏิกิริยาเคมี 3 ปฏิกิริยาคือ



จากปฏิกิริยาข้างต้นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการคือ เอทิลเบนซิน และ ไดเอทิลเบนซินเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ มีการรีไซเคิลเบนซินกับไดเอทิลเบนซินกลับมาใช้เป็นสารตั้งต้นในขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา ในขั้นตอนการแยกสารใช้หอกลับ 2 เครื่องเพื่อแยกเอทิลเบนซินออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ หอแรกเป็นการแยกเบนซินเพื่อรีไซเคิลกลับมาเป็นสารตั้งต้น และหอที่สองเป็นการแยกไดเอทิลเบนซินเพื่อรีไซเคิลกลับมาทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์และแยกผลิตภัณฑ์เป็นเอทิลเบนซินสุดท้าย



รูปที่ 1 แผนภาพโครงสร้างกระบวนการผลิตเอทิลเบนซิน

2.2 ขั้นตอนการวิจัย

ใช้โปรแกรม Aspen Plus ในการจำลองกระบวนการที่สภาวะคงตัวซึ่งในกระบวนการมีเครื่องปฏิกรณ์ 2 เครื่อง หอกลิ้น 2 หอ กระแสรีไซเคิล 2 กระแส เป็นต้น ซึ่งในการสร้างแบบจำลอง ต้องใช้ข้อมูลพื้นฐานต่างๆ ในการจำลองกระบวนการดังแสดงตารางที่ 1 และ 2 ซึ่งอ้างอิงจากโลเบน [2]

ตารางที่ 1 องค์ประกอบสารในแต่ละกระแส

กระแส	องค์ประกอบ			
	Ethylene	Benzene	Ethyl benzene	Diethyl benzene
FFE	1	0	0	0
FFB	0	1	0	0
R1OUT	0.0039	0.6568	0.2891	0.0501
R2OUT	0.0001	0.5146	0.3354	0.1500
C1RE	0.0001	0.9989	0.001	0
C2RE	0	0	0.001	0.999
EBPro	0	0.0005	0.999	0.0005

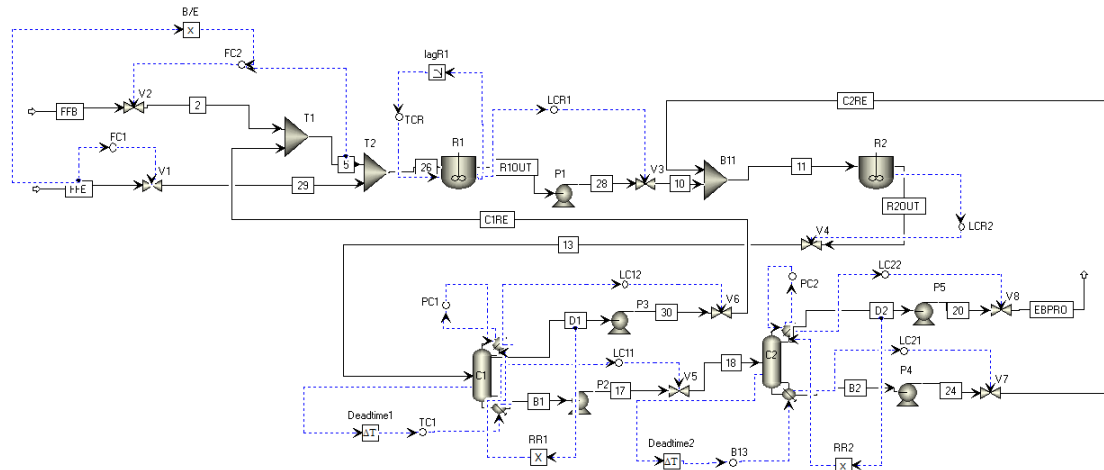
ตารางที่ 2 สภาวะการทำงานในแต่ละกระแส

กระแส	สภาวะการทำงาน		
	T (K)	P (atm)	Total mole flow (kmol/h)
FFE	320	11	360.6
FFB	320	11	360.6
R1OUT	434	20	1696
R2OUT	432	19	1882
C1RE	380.8	2	969.4
C2RE	496	5	282.2
EBPro	439.7	2	630.6

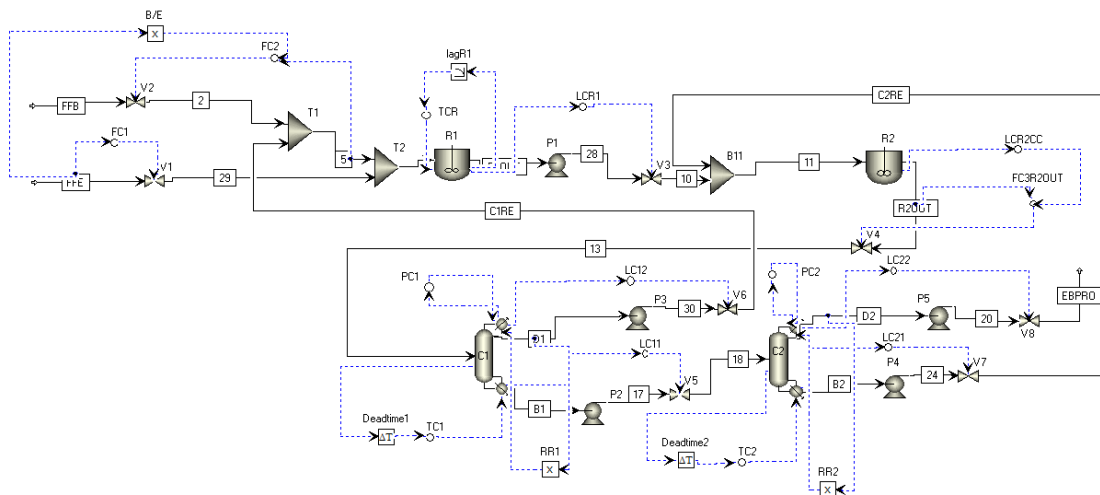
ใช้โปรแกรม Aspen Dynamics ในการจำลองการควบคุมกระบวนการ โดยเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมของโครงสร้างการควบคุมแบบดั้งเดิม (CS0) ของโลเบน [2] ตามรูปที่ 2 และออกแบบโครงสร้างการควบคุมแบบแพลนท์วัตใหม่ (CS1) ดังรูปที่ 3 โดยการเพิ่ม Cascade control ที่ระดับของเหลวทางออกจากเครื่องปฏิกรณ์ตัวที่สอง เพื่อแก้ปัญหาการควบคุมระดับของเหลวก่อนเข้าสู่หอกลิ้นตัวแรก หลังจากนั้นปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อให้เหมาะสมกับโครงสร้างการควบคุมนี้ เพื่อเพิ่มสมรรถนะการควบคุมให้ดีกว่าการควบคุมแบบดั้งเดิม (CS0) ดังรูปที่ 3 โดยคู่ตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุมและค่าพารามิเตอร์เครื่องควบคุมของโครงสร้างการควบคุมแบบดั้งเดิมแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คู่ตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุม ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมของโครงสร้างการควบคุมแบบดั้งเดิม (CS0)

ตัวแปรควบคุม	ตัวแปรปรับ	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม	
		K _c	τ _i (min)
Ethylene Flow	Feed Flowrate	0.5	0.3
Benzene Flow	Feed Flowrate	0.5	0.3
Reactor Temp.	Cooling water Flowrate	15	26
Reactor1 Level	R1out Flowrate	5	-
Reactor2 Level	R2out Flowrate	5	-
C ₁ Pressure	Condenser CW	20	12
C ₂ Pressure	Condenser CW	20	12
C ₁ Base Level	C ₁ Bottom Flowrate	2	-
C ₂ Base Level	C ₂ Bottom Flowrate	2	-
C ₁ Reflux Level	C ₁ Distillate Rate	2	-
C ₂ Reflux Level	C ₂ Distillate Rate	2	-
C ₁ St.14 Temp.	Reboiler Heat Input	0.54	13
C ₂ St.20 Temp.	Reboiler Heat Input	1.5	9.2



รูปที่ 2 แผนภาพโครงสร้างการควบคุมแบบดั้งเดิม (CS0)



รูปที่ 3 แผนภาพโครงสร้างการควบคุมแบบปรับปรุงใหม่ (CS1)

2.3 ผลการจำลองกระบวนการ

ผลการตอบสนองของการควบคุมของโครงสร้างการควบคุมทั้งสองแบบที่สำคัญแสดงในตารางที่ 5 ระบุกระบวนการโดยการอัตราการไหลสารป้อนเพิ่มขึ้น และ ลดลง 20% จากค่าเดิม พบว่าโครงสร้างการควบคุมทั้งสองโครงสร้างสามารถควบคุมตัวแปรต่างๆให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพ นั่นคือสามารถรักษาค่าเป้าหมาย (Setpoint) เมื่อมีการรบกวนกระบวนการ แต่อย่างไรก็ตามโครงสร้างการควบคุมที่ได้ออกแบบใหม่มีสมรรถนะโดยรวมดีกว่าแบบดั้งเดิม เพื่อให้เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนขึ้น งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะการควบคุมคือค่า Integral of the Absolute of the Error (IAE) ซึ่งมีการประเมินเชิงปริมาณ ดังแสดงในสมการที่ 4

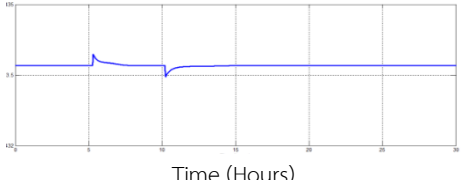
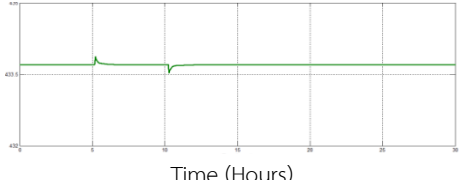
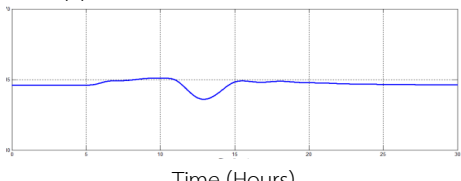
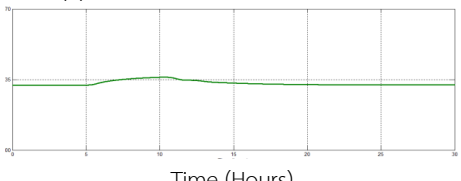
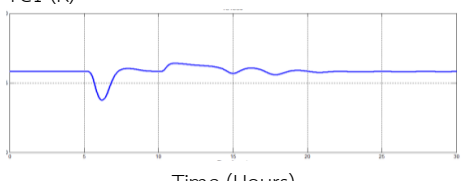
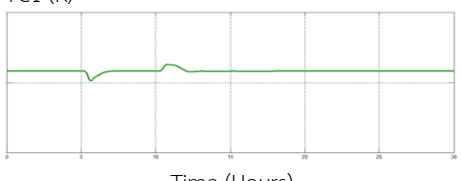
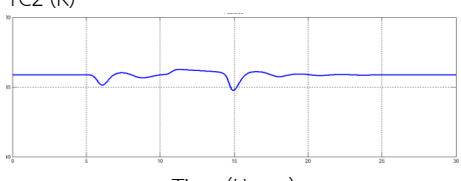
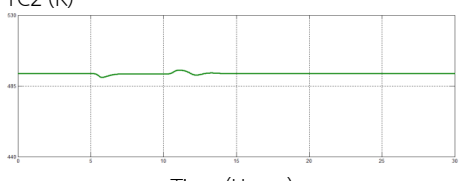
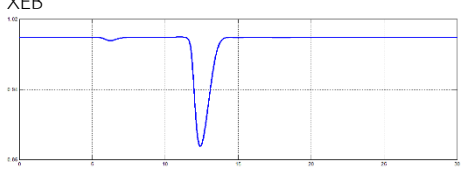
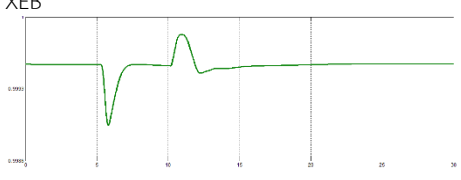
$$IAE = \int_0^t |Y_{sp} - Y(t)| dt \quad (4)$$

ซึ่งค่า IAE ที่น้อยกว่าแสดงถึงสมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าเพราะมีค่าเบี่ยงเบนจากค่าเป้าหมายน้อยกว่า โดยค่า IAE ในวงควบคุมต่างๆ แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่า IAE ของโครงสร้างการควบคุมทั้งสองแบบ

เครื่องควบคุม	IAE	
	CS0	CS1
PC1	0.0045	0.0039
PC2	0.0066	0.0031
TCR1	0.1603	0.0556
TCR2	24.1238	17.7165
TC1	32.1333	7.1222
TC2	15.3447	2.7328
LC11	2.5381	1.9031
LC12	2.1023	1.8140
LC21	3.5543	2.3208
LC22	1.7489	1.4109

ตารางที่ 5 ผลการตอบสนองของโครงสร้างการควบคุมแบบดั้งเดิม (CS0) และโครงสร้างการควบคุมแบบปรับปรุงใหม่ (CS1)

Controller	CS0	CS1
TCR1 SP = 433.7	 <p>Time (Hours)</p> <p>IAE = 0.1603</p>	 <p>Time (Hours)</p> <p>IAE = 0.0556</p>
TCR2 SP = 432	 <p>Time (Hours)</p> <p>IAE = 24.1238</p>	 <p>Time (Hours)</p> <p>IAE = 17.7165</p>
TC1 SP = 475.58	 <p>Time (Hours)</p> <p>IAE = 32.1333</p>	 <p>Time (Hours)</p> <p>IAE = 7.1222</p>
TC2 SP = 492.79	 <p>Time (Hours)</p> <p>IAE = 15.3447</p>	 <p>Time (Hours)</p> <p>IAE = 2.7328</p>
XEB SP = 0.999	 <p>Time (Hours)</p> <p>IAE = 0.0784</p>	 <p>Time (Hours)</p> <p>IAE = 0.0093</p>

3. สรุปผลการจำลองกระบวนการ

งานวิจัยนี้ศึกษาการออกแบบโครงสร้างการควบคุมแบบพหุหน้าที่ของกระบวนการเอทิลเบนซินโดยใช้วิธีการประเมินสมรรถนะการควบคุมด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ กระบวนการดังกล่าวมีความซับซ้อนยากต่อการควบคุมเนื่องจากมีการรีไซเคิลสาร และพลังงาน โดยออกแบบโครงสร้างการควบคุมเปรียบเทียบกับโครงสร้างการควบคุมดั้งเดิม จากผล

การตอบสนองพบว่า โครงสร้างการควบคุมใหม่มีสมรรถนะดีกว่าแบบดั้งเดิม ทั้งโดยภาพรวมเชิงคุณภาพ และค่า IAE ซึ่งเป็นตัวชี้วัดสมรรถนะการควบคุมเชิงปริมาณที่สามารถใช้วิเคราะห์สมรรถนะได้อย่างเป็นระบบมากยิ่งขึ้น

4. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้สนับสนุนเงินทุนวิจัยสำหรับงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] William L. Luyben. 1999. "Plantwide process control". USA : McGraw-Hill.
- [2] William L. Luyben. 2011. "Principles and case studies of simultaneous design" (pp. 159-183). USA : Wiley-Interscience.
- [3] William L. Luyben. 2006. "DISTILLATION DESIGN AND CONTROL USING ASPENTM SIMULATION". USA : Wiley-Interscience.
- [4] William L. Luyben. 1989. "PROCESS MODELING SIMULATION AND CONTROL FOR CHEMICAL ENGINEERS". USA : McGRAW-Hill Book Company.
- [5] Dale E. Seborg. 2011. "Process Dynamic and Control". USA : Wiley-Interscience

การออกแบบและสร้างชุดให้น้ำแบบหยด (Drip Kit) ชนิดต้นทุนต่ำและเคลื่อนย้ายได้

Design and Fabrication of Low-Cost and Portable Drip Kit

วิระพงษ์ ครุสง์ สานิตย์ตา เตียวต้อย* และ สิวิมล เล็กกฤษดี

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

E-mail: sanidda.t@en.rmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างชุดให้น้ำแบบหยด (Drip Kit) ชนิดต้นทุนต่ำและเคลื่อนย้ายได้ ส่วนประกอบหลักของชุดให้น้ำแบบหยดนี้ประกอบด้วย 1) กระจาสำหรับใส่ น้ำ ความจุ 20-25 ลิตร และใช้เก็บอุปกรณ์ด้วย 2) ขาดังถอดประกอบได้สำหรับแขวนกระจา สามารถปรับระดับความสูงได้ ระหว่าง 100-150 เซนติเมตร และ 3) ชุดท่อส่งน้ำ ท่อน้ำหยด และวาล์ว จากการทดลองพบว่า อุปกรณ์มีน้ำหนักรวม 6.3 กิโลกรัม ใช้เวลาในการติดตั้งชุดให้น้ำประมาณ 10 นาที และใช้เวลาในการเก็บอุปกรณ์ประมาณ 8 นาที อัตราการไหลเฉลี่ยของหัวน้ำหยด 0.37, 0.43 และ 0.54 ลิตรต่อชั่วโมง และเวลาในการให้น้ำจนหมดกระจา 4 ชั่วโมง 7 นาที, 2 ชั่วโมง 46 นาที และ 1 ชั่วโมง 53 นาที ที่ระดับความสูงกระจา 100, 120 และ 150 เซนติเมตร ตามลำดับ ในการทดลองปลูกต้นดาวกระจายในถุงจำนวน 30 ต้น โดยวาง 6 แถวละ 5 ต้น ต้องเติมน้ำใส่กระจาเป็นจำนวน 6 ครั้งตลอดช่วงเวลาการปลูก 9 สัปดาห์ ค่าใช้จ่ายในการสร้างชุดให้น้ำ ประมาณ 2,000 บาท

คำสำคัญ: ให้น้ำแบบหยด ต้นทุนต่ำ เคลื่อนย้ายได้

1. บทนำ

ภาวะภัยแล้งในประเทศไทยมีความรุนแรงมากขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้น้ำในเขื่อนมีปริมาณที่น้อยลงอย่างรวดเร็วจนต้องมีการประกาศใช้มาตรการประหยัดน้ำอย่างจริงจัง เพื่อให้มีน้ำใช้ได้เพียงพอที่จะผ่านช่วงหน้าแล้งไปได้ เช่น การประกาศห้ามไม่ให้ชาวนาทำนาปรังโดยให้เปลี่ยนไปปลูกพืชที่ใช้น้ำน้อยแทนการปลูกข้าว นั่นทำให้เกษตรกรได้รับผลกระทบโดยตรงในการใช้น้ำเพื่อปลูกพืช ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนวิธีการให้น้ำจากแบบดั้งเดิมซึ่งสูญเสีย น้ำมากมาเป็นแบบที่ประหยัดน้ำและมีการสูญเสียน้ำน้อย

ระบบให้น้ำแบบหยดสามารถให้น้ำพืชได้อย่างสม่ำเสมอและใช้ปริมาณน้ำน้อยเมื่อเทียบกับระบบอื่น มีการสูญเสียน้ำน้อย ทำให้ใช้ทรัพยากรน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยเพิ่มปริมาณและคุณภาพของผลผลิตจากการรักษาความชื้นที่เหมาะสมกับสิ่งแวดล้อมรอบๆ ต้นพืชซึ่งสามารถให้น้ำโดยตรงไปถึงรากพืชได้ [1] แต่ต้องใช้ต้นทุนสูงในการติดตั้ง ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญออกแบบ ติดตั้งและมาให้คำแนะนำ จึงควรมีการ

ออกแบบระบบน้ำหยดที่มีต้นทุนต่ำ ติดตั้งและใช้งานง่าย และสามารถเคลื่อนย้ายไปติดตั้งในแปลงอื่นๆ ได้ โดยไม่ต้องใช้พลังงานภายนอกในการทำงาน เพื่อให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการลงทุน

2. วิธีการ

รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการออกแบบระบบน้ำหยดที่มีต้นทุนต่ำ และสามารถเคลื่อนย้ายได้ ทำการออกแบบชุดให้น้ำโดยการทำเป็นกระจาใส่น้ำที่สามารถบรรจุน้ำได้ 20 - 25 ลิตร ออกแบบโครงเหล็กเพื่อแขวนกระจาใส่น้ำที่สามารถปรับเลื่อนขึ้นเลื่อนลงได้ วางแนวท่อเบื้องต้นเลือกอุปกรณ์ที่จะใช้ในระบบน้ำหยด จากนั้น สร้างชุดให้น้ำแบบหยดที่ได้ออกแบบและทำการทดสอบชุดให้น้ำแบบหยด

2.1 ส่วนประกอบของชุดให้น้ำแบบหยด

ส่วนประกอบของชุดให้น้ำแบบหยดชนิดต้นทุนต่ำและเคลื่อนย้ายได้ มีส่วนประกอบดังนี้ (แสดงในภาพที่ 1)

- 1) กระจาใส่น้ำ สามารถบรรจุน้ำได้ 20 - 25 ลิตร เมื่อบรรจุน้ำระดับน้ำในกระจาจะมีความสูง 35 เซนติเมตรเหนือช่องจ่ายน้ำ
- 2) โครงเหล็กสำหรับแขวนกระจา มีความสูงรวม 160 เซนติเมตร สามารถปรับระดับการแขวนกระจาใส่น้ำได้ต่างกัน 6 ระดับ ตั้งแต่ 100 - 150 เซนติเมตร
- 3) ท่อประธานขนาด 20 มิลลิเมตร ที่ต่อวาล์วและข้อต่อแล้วพร้อมใช้งาน
- 4) ท่อแขน แบบเป็นท่อน้ำหยดรุ่น Family Drip จำนวน 6 เส้น แต่ละเส้นมีรูจ่ายน้ำจำนวน 5 รู ระยะห่างระหว่างรู 30 เซนติเมตร



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของชุดให้น้ำแบบหยดชนิดต้นทุนต่ำและเคลื่อนย้ายได้

2.2 การประกอบชุดให้น้ำแบบหยด

การประกอบชุดให้น้ำแบบหยดชนิดต้นทุนต่ำและเคลื่อนย้ายได้ มีวิธีการประกอบอุปกรณ์ต่างๆเข้าด้วยกันดังนี้ (แสดงในรูปที่ 2)

- 1) ประกอบโครงเหล็กสำหรับแขวนกระเป๋าดูดน้ำโดยการหมุนเกลียว
- 2) แขวนกระเป๋าดูดน้ำบนโครงเหล็กเลือกความสูงตามต้องการ
- 3) ต่อท่อประธานเข้าด้วยกันโดยใช้ข้อต่อสามทาง
- 4) ต่อท่อประธานเข้ากับท่อที่ต่อกับวาล์วเปิด - ปิด
- 5) ต่อท่อประธานเข้ากับกระเป๋าดูดน้ำสำหรับบรรจุน้ำ
- 6) ต่อท่อแขนงซึ่งเป็นท่อน้ำหยดเข้ากับท่อประธาน และ
- 7) เติมน้ำใส่กระเป๋าดูดน้ำ



ก) ประกอบโครงเหล็ก



ข) การแขวนกระเป๋าดูดน้ำ



ค) การต่อท่อประธาน



ง) การต่อท่อประธานเข้ากับวาล์วเปิด - ปิด



ฉ) การต่อท่อประธานเข้ากับกระเป๋าดูดน้ำ



ช) เติมน้ำใส่กระเป๋าดูดน้ำ

รูปที่ 2 วิธีการประกอบชุดให้น้ำแบบหยด

การประกอบชุดให้น้ำพร้อมใช้งานและติดตั้งชุดให้น้ำกับต้นไม้ (แสดงในรูปที่ 3) ใช้เวลาในการประกอบอุปกรณ์ทั้งหมดประมาณ 9-10 นาที และเวลาในการเก็บอุปกรณ์ทุกอย่างเข้ากระเป๋าประมาณ 8 นาที พร้อมเคลื่อนย้ายได้สะดวก ดังแสดงในรูปที่ 4



ก) ชุดให้น้ำพร้อมใช้งาน



ข) ติดตั้งชุดให้น้ำกับต้นไม้

รูปที่ 3 ชุดให้น้ำแบบหยดประกอบเสร็จพร้อมใช้งาน



รูปที่ 4 การจัดเก็บเคลื่อนย้ายชุดให้น้ำแบบหยด

2.3 ความต้องการน้ำของต้นดาวกระจาย

ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ใช้โปรแกรม CROPWAT 8.0 ที่พัฒนาขึ้นมา โดยองค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ (FAO)[2] คำนวณค่าการคายระเหยน้ำของพืชจากสมการดังต่อไปนี้

$$ET_c = K_c \times ET_o \quad (1)$$

โดยที่

ET_c คือ การคายระเหยน้ำของพืช

ET_o คือ ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงโปรแกรม CROPWAT 8.0

K_c คือ สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช

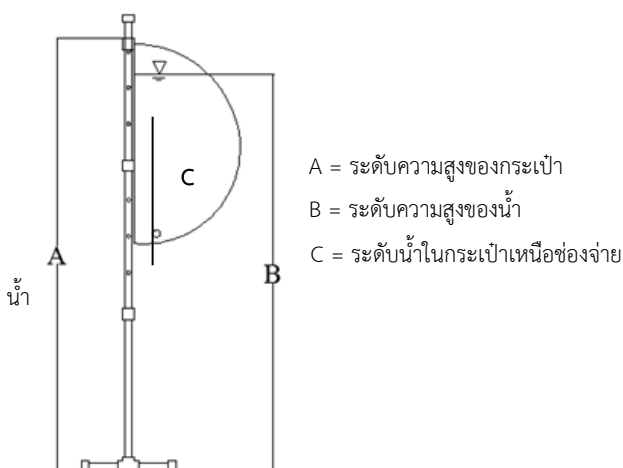
การหาค่าความต้องการน้ำของต้นดาวกระจายโดยใช้โปรแกรม CROPWAT 8.0 คำนวณจากสมการที่ 1 โดยในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำ (K_c) ของต้นบานชื่น [3] แทนต้นดาวกระจาย เนื่องจากไม่มีค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของต้นดาวกระจายโดยตรง ได้ปริมาณความต้องการน้ำของต้นดาวกระจายต่อต้นรายสัปดาห์ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณความต้องการน้ำของพืชต่อต้นรายสัปดาห์

สัปดาห์	Kc	ETo (มม./วัน)	ETc (มม./วัน)	ปริมาณน้ำ (ลิตร/วัน)
1	0.36	2.9	1.04	0.0184
2	0.58	2.9	1.68	0.0297
3	0.77	2.9	2.23	0.0394
4	0.93	2.90	2.70	0.0476
5	1.07	3.83	4.10	0.0724
6	1.18	3.83	4.52	0.0798
7	1.27	3.83	4.86	0.0859
8	1.33	3.83	4.71	0.0832
9	1.38	3.54	4.89	0.0863

2.4 อัตราการไหลเฉลี่ยของหัวน้ำหยดและเวลาการให้น้ำจนหมดกระเปาะที่ความสูงของกระเปาะระดับต่างๆ

โครงเหล็กสำหรับแขวนกระเปาะสูง 160 เซนติเมตร สามารถปรับระดับการแขวนกระเปาะใส่ได้ต่างกัน 6 ระดับคือที่ระดับความสูง 100,110,120,130,140 และ 150 เซนติเมตร ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบอัตราการไหลของหัวน้ำหยดและเวลาการให้น้ำจนหมดกระเปาะ ที่ระดับความสูงกระเปาะ 3 ระดับ ได้แก่ 100,120 และ 150 เซนติเมตร ดังรูปที่ 5 ผลการทดสอบอัตราการไหลของหัวน้ำหยดและเวลาการให้น้ำจนหมดกระเปาะ ที่ระดับต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2



รูปที่ 5 ระดับความสูงของกระเปาะและระดับความสูงของน้ำ

ตารางที่ 2 อัตราการไหลเฉลี่ยของหัวน้ำหยดและเวลาที่น้ำหมดกระเปาะที่ระดับความสูงต่างๆของกระเปาะ

ความสูงของกระเปาะ (เซนติเมตร)	อัตราการไหลเฉลี่ย (ลิตร/ชั่วโมง)	เวลาที่น้ำหมด กระเปาะ
100	0.37	4 ชั่วโมง 7 นาที
120	0.43	2 ชั่วโมง 46 นาที
150	0.54	1 ชั่วโมง 53 นาที

2.5 ค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอของการให้น้ำและความสม่ำเสมอของการแผ่กระจายน้ำ

การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการประเมินค่าความสม่ำเสมอของการให้น้ำจากค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอของการให้น้ำ (The coefficient of uniformity, CU) และค่าความสม่ำเสมอของการแผ่กระจายน้ำ (Distribution uniformity, DU) [4] จากสมการ 2 และ 3

$$CU = 100 \left(1 - \frac{E|z-m|}{Ez} \right) \quad (2)$$

โดยที่

Z คือ ความลึกของน้ำในภาชนะรองรับน้ำแต่ละจุด (มม.)

m คือ ความลึกเฉลี่ยของน้ำในภาชนะทั้งหมด (มม.)

$$DU = \frac{\text{ค่าเฉลี่ยของความลึกน้ำในภาชนะต่ำสุดจำนวน } \frac{1}{4} \text{ ของภาชนะ}}{\text{ค่าความลึกเฉลี่ยของน้ำในภาชนะทั้งหมด}} \times 100 \quad (3)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง CU และ DU แสดงดังสมการ 4 และ 5

$$CU \approx 100 - 0.63 (100 - DU) \quad (4)$$

หรือ

$$DU \approx 100 - 1.59 (100 - CU) \quad (5)$$

สำหรับผลของค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอของการให้น้ำและค่าความสม่ำเสมอของการแผ่กระจายน้ำแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอของการให้น้ำและค่าความสม่ำเสมอของการแผ่กระจายน้ำ

ความสูงของกระเป่า (เซนติเมตร)	CU (%)	DU (%)
150	93	90
120	95	92
100	94	91

2.6 ปริมาณน้ำที่ใช้และเวลาในการให้น้ำต่อวันในแต่ละสัปดาห์ที่ความสูงของกระเป่าระดับต่างๆ

จากข้อมูลความต้องการใช้น้ำของพืชที่ได้ออกมาที่น้ำหมักกระเป่าและอัตราการไหลเฉลี่ยที่ระดับความสูง 100,120 และ 150 เซนติเมตร ทำการทดลองปลูกต้นดาวกระจาย ระหว่างวันที่ 4 ตุลาคม ถึง 5 ธันวาคม พ.ศ. 2558 ใช้เวลา 9 สัปดาห์ จำนวน 30 ต้น ในถุงปลูกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ครั้ง ปริมาณน้ำที่ใช้และเวลาในการให้น้ำต่อวันในแต่ละสัปดาห์ ที่ระดับความสูงต่างๆของกระเป่า แสดงในตารางที่ 3 และมีการเติมน้ำใส่กระเป่าสำหรับใช้ปลูกพืชตลอดระยะเวลา 9 สัปดาห์ จำนวน 6 ครั้ง

ตารางที่ 3 ปริมาณน้ำที่ใช้และเวลาในการให้น้ำต่อวัน

สัปดาห์ที่	ปริมาณน้ำที่ใช้ (ลิตร/วัน)	เวลาในการให้น้ำ(นาที่/วัน)		
		ระดับความสูงของกระเป่า (เซนติเมตร)		
		150	120	100
1	0.55	2.04	2.57	2.99
2	0.89	3.30	4.15	4.82
3	1.18	4.38	5.50	6.40
4	1.43	5.29	6.65	7.72
5	2.17	8.04	10.10	11.74
6	2.39	8.87	11.14	12.94
7	2.58	9.55	11.99	13.93
8	2.49	9.24	11.60	13.49
9	2.59	9.59	12.04	13.99

3. สรุปผลการทดลอง

จากการออกแบบ กระเป่าใส่น้ำสามารถบรรจุน้ำได้ 20 – 25 ลิตร เมื่อบรรจุน้ำระดับน้ำในกระเป่าจะมีความสูง 35 เซนติเมตรเหนือช่องจ่ายน้ำ โครงเหล็กสำหรับแขวนกระเป่า มีความสูงรวม 160 เซนติเมตร สามารถปรับระดับการแขวนกระเป่าใส่น้ำได้ต่างกัน 6 ระดับ ตั้งแต่ 100,110,120,130,140 และ 150 เซนติเมตร สำหรับงานวิจัยนี้ทำการทดสอบการให้น้ำพืชที่ระดับความสูงของกระเป่าเพียง 3 ระดับคือ 100,120 และ 150 เซนติเมตร พบว่าค่าระดับความสูง 120 เซนติเมตรมีค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอของการให้น้ำและค่าความสม่ำเสมอของการแผ่กระจายน้ำสูงที่สุดคือ 95% และ 92% ตามลำดับ มีการเติมน้ำใส่กระเป่าสำหรับใช้ปลูกพืชตลอดระยะเวลา 9 สัปดาห์ จำนวน 6 ครั้ง ระยะเวลาที่ใช้ในการติดตั้งชุดให้น้ำแบบหยด (Drip Kit) ชนิดต้นทุ่นต่ำและเคลื่อนย้ายได้ประมาณ 9 – 10 นาที และใช้เวลาในการเก็บอุปกรณ์ 8 นาที น้ำหนักรวมของกระเป่าเมื่อบรรจุอุปกรณ์ทุกอย่างอยู่ในเท่ากับ 6.3 กิโลกรัม ค่าใช้จ่ายในการสร้างชุดให้น้ำ ประมาณ 2,000 บาท ชุดให้น้ำแบบหยดชนิดต้นทุ่นต่ำและเคลื่อนย้ายได้นี้สามารถให้น้ำแก่พืชได้ทุกชนิดของพืชและดินโดยไม่ต้องใช้พลังงานในการทำงาน สามารถเคลื่อนย้ายไปติดตั้งในแปลงอื่นๆได้ ประหยัดค่าใช้จ่ายในการลงทุน สะดวกและติดตั้งง่ายได้ด้วยตนเอง

4. กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ ได้รับทุนการสนับสนุนจากภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] วีระพงษ์ ครูสง, เอกสารประกอบการสอนวิชา “การออกแบบระบบชลประทานแบบฉีดฝอยและแบบหยด” ปทุมธานี : คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554.
- [2] FAO, “CROPWAT 8.0 Model,” Food and Agriculture Organization. Rome, Italy, 2009.
- [3] กรมชลประทาน, “สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Kc),” กองจัดสรรน้ำและบำรุงรักษา กรมชลประทาน, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2539.
- [4] Keller, J., and Bliesner, R.D., “Sprinkle and trickle irrigation,.” An AVI Book, New York, Van Nostrand Reinhold, 1990.

การปลูกพืชประหยัดน้ำแบบท่อน้ำหยดแนวตั้ง

Water Saving for Cropping by using Vertical Drip Irrigation

सानิดดา เตียวต้อย* วีระพงษ์ ครูสง สันติภาพ ชันทนต์ และ สุธี จักันทา

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

E-mail: sanidda.ta@en.rmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

การปลูกพืชประหยัดน้ำแบบท่อน้ำหยดแนวตั้ง มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและออกแบบท่อน้ำหยดแนวตั้ง เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับการให้น้ำแก่พืช ขั้นตอนการดำเนินงานแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ 1) ออกแบบท่อน้ำหยดแนวตั้ง 2) หาค่าการซึมกับเวลาที่อัตราการไหลต่างๆ และ 3) นำท่อน้ำหยดแนวตั้งที่ได้จากการออกแบบไปประยุกต์ใช้กับการให้น้ำต้นมะนาว

จากการออกแบบท่อน้ำหยดแนวตั้งเป็นท่อ PVC ขนาด 4 นิ้ว ความยาว 80 เซนติเมตร ติดตั้งหัวน้ำหยด 1 ลิตรต่อชั่วโมง จำนวน 12 หัวบนท่อ PVC ทำการประเมินค่าความสม่ำเสมอของการให้น้ำจากค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอของการให้น้ำ (CU) และความสม่ำเสมอของการแผ่กระจายน้ำ (DU) มีค่า (CU) และ ค่า (DU) เท่ากับ 84 เปอร์เซ็นต์และ 81 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

หาค่าการซึมกับเวลาที่อัตราการไหล 4 ค่าคือ อัตราการไหล 1, 5, 10 ลิตรต่อชั่วโมง และอัตราการไหลแบบผสม (ปรับหัวน้ำหยด บนกลาง และล่าง ที่อัตราการไหล 10, 5 และ 1 ลิตรต่อชั่วโมง) จากผลการทดสอบการซึมพบว่าที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อชั่วโมงสามารถให้น้ำได้นานที่สุด 540 นาที คำนวณความต้องการน้ำของต้นมะนาวจากการคำนวณค่าการคายระเหยน้ำของพืชโปรแกรม CROPWAT ผลจากการคำนวณความต้องการน้ำของต้นมะนาวสรุปได้ว่ามะนาวมีความต้องการน้ำเฉลี่ย 15 ลิตรต่อสัปดาห์ ท่อมีความจุ 5.1 ลิตร ดังนั้นควรให้น้ำต้นมะนาวสัปดาห์ละ 3 ครั้งโดยการบรรจุน้ำเต็มท่อให้น้ำวันเว้นวัน การวิจัยครั้งนี้เป็นการออกแบบท่อน้ำหยดแนวตั้งเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับการให้น้ำพืชในบ่อหรือกระถางเพื่อการประหยัดน้ำ ผลจากการทดสอบการให้น้ำกับมะนาวระหว่างการทดลอง สามารถใช้ท่อน้ำหยดแนวตั้งได้ มะนาวเจริญเติบโตดี แต่ควรจะมีการทดสอบการใช้ท่อน้ำหยดแนวตั้งกับตลอดการเจริญเติบโตของต้นมะนาวสำหรับการศึกษาต่อไป

คำสำคัญ: ท่อน้ำหยดแนวตั้ง มะนาว

1.บทนำ

เนื่องจากปริมาณน้ำในฤดูแล้งมีอยู่อย่างจำกัด และไม่เพียงพอต่อความต้องการน้ำของพืชตลอดการเพาะปลูกจึงมีผล ทำให้พืชชะงักการเจริญเติบโต ผลผลิตลดลง จากปัญหาที่กล่าวมาหากเรามีการจัดการน้ำที่ดีก็จะสามารถให้น้ำแก่พืชในปริมาณที่เหมาะสมกับความต้องการของพืชในแต่ละช่วงการเจริญเติบโต และสามารถให้น้ำให้เกิดประโยชน์มากที่สุด

ระบบให้น้ำแบบหยดสามารถให้น้ำพืชได้อย่างสม่ำเสมอและใช้ปริมาณน้ำน้อยเมื่อเทียบกับระบบอื่น ทำให้ใช้ทรัพยากรน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยเพิ่มปริมาณและคุณภาพของผลผลิตจากการรักษาความชื้นที่เหมาะสมกับสิ่งแวดล้อมรอบๆ ต้นพืชซึ่งสามารถให้น้ำโดยตรงไปถึงรากพืชได้ [1] จุดมุ่งหมายสำคัญของการให้น้ำแบบนี้คือจะรักษาระดับความชื้นของดินบริเวณเขตรากพืชให้อยู่ในระดับที่พืชสามารถดูดความชื้นไปใช้ เพื่อสร้างความเจริญเติบโตได้อย่างสมบูรณ์พอเหมาะกับความ ต้องการตลอดเวลา

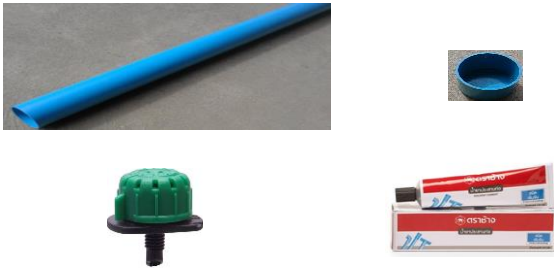
ดังนั้นในการศึกษานี้ จึงได้ศึกษาเกี่ยวกับการซึมของท่อน้ำหยดแนวตั้งและแก้ไขปัญหาค่าการซึมที่มีความจำเป็นต่อการทดสอบการให้น้ำแบบประหยัดน้ำสำหรับการปลูกมะนาว

2.วิธีการ

วิธีการดำเนินงานวิจัยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้คือ รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการปลูกมะนาวในบ่อซีเมนต์ ออกแบบและทดสอบท่อน้ำหยดแนวตั้ง ทดสอบการซึมลงดินแนวนอนและแนวตั้งด้วยการปรับอัตราการไหลของหัวน้ำหยดที่อัตราการไหลต่างๆ ทดสอบการให้น้ำเพื่อสังเกตความชื้นในวินสุดท้ายของสัปดาห์ หาค่าการคายระเหยของน้ำของพืชด้วยโปรแกรม CROPWAT 8.0 [2] และขั้นตอนสุดท้ายทดลองการให้น้ำแก่พืช

2.1 การออกแบบท่อน้ำแบบหยดแนวตั้ง

ท่อน้ำหยดแนวตั้งมีส่วนประกอบดังนี้ 1) ท่อ PVC ขนาด 4 นิ้ว ความยาว 80 เซนติเมตร 2) ฝาครอบท่อ PVC ขนาด 4 นิ้ว 3) หัวน้ำหยด A-Drip 1-100L/H จำนวน 12 หัว และ 4) น้ำยาประสานท่อ PVC (แสดงในรูปที่ 1) เจาะท่อ PVC เพื่อติดตั้งหัวน้ำหยดให้สมมาตร แล้วปิดฝาครอบท่อด้านล่างจะได้ท่อน้ำหยดแนวตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของท่อน้ำหยดแนวตั้ง



รูปที่ 2 ท่อน้ำหยดแนวตั้ง



รูปที่ 3 การหาค่าความสม่ำเสมอของการให้น้ำ

2.2 ค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอของการให้น้ำและความสม่ำเสมอของการแผ่กระจายน้ำ

การศึกษาค้นคว้านี้ได้ทำการประเมินค่าความสม่ำเสมอของการให้น้ำจากค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอของการให้น้ำ (The coefficient of uniformity, CU) และค่าความสม่ำเสมอของการแผ่กระจายน้ำ (Distribution uniformity, DU) [2] หาค่าความสม่ำเสมอของการให้น้ำโดยการรองน้ำด้วยแก้วที่ไหลจากหัวน้ำหยดทั้งหมด 12 หัว เป็นเวลา 1 นาที (แสดงในรูปที่ 3) แล้วนำค่าที่ได้คำนวณโดยใช้สมการที่ 1 และ 2 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอของการให้น้ำ (CU) และค่าความสม่ำเสมอของการแผ่กระจายน้ำ (DU) มีค่าเท่ากับ 84 เปอร์เซ็นต์ และ 81 เปอร์เซ็นต์ เป็นค่าที่ยอมรับได้ [2]

$$CU = 100 \left(1 - \frac{\sum |z - m|}{\sum z} \right) \quad (1)$$

โดยที่

Z คือ ความลึกของน้ำในภาชนะรองรับน้ำแต่ละจุด (มม.)

m คือ ความลึกเฉลี่ยของน้ำในภาชนะทั้งหมด (มม.)

$$DU = \frac{\text{ค่าเฉลี่ยของความลึกน้ำในภาชนะค่าสุดจำนวน 14 ของภาชนะ}}{\text{ค่าความลึกเฉลี่ยของน้ำในภาชนะทั้งหมด}} \times 100 \quad (2)$$

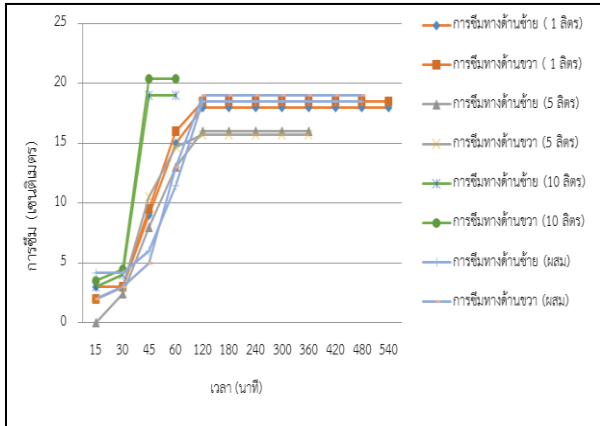
2.3 ทดสอบการซึมของน้ำที่อัตราการไหลต่างๆ

เพื่อศึกษาลักษณะการซึมของท่อน้ำหยดแนวตั้ง จึงได้ทำการหาค่าการซึมด้านซ้าย ด้านขวาและการซึมในแนวตั้งที่อัตราการไหล 4 ค่า คือ 1,5,10 ลิตรต่อชั่วโมงและอัตราการไหลแบบผสม (ปรับหัวน้ำหยดที่อยู่บนสุด ตรงกลาง และล่าง ที่อัตราการไหล 10,5 และ 1 ลิตรต่อชั่วโมง) ทำการทดลองด้วยการฝังท่อน้ำหยดแนวตั้งลงในดิน เติมน้ำให้เต็มท่อ ปรับหัวน้ำหยดที่อัตราการไหลต่างๆ จากนั้นทำการจับเวลาและสังเกตดูค่าการซึมจากการทดลองพบว่าที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อชั่วโมงท่อน้ำหยดแนวตั้งสามารถให้น้ำได้ 540 นาที มีค่าการซึมทางด้านซ้าย ด้านขวา และในแนวตั้งสูงสุดที่ 18, 18.5 และ 30 เซนติเมตรตามลำดับ (ดังรูปที่ 4) สำหรับค่าการซึมอัตราการไหลต่างๆแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 4 การซึมที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อชั่วโมง (ที่เวลา 540 นาที)

สำหรับค่าการซึมอัตราการไหลต่างๆ 4 ค่า คือ 1,5,10 ลิตรต่อชั่วโมงและอัตราการไหลแบบผสม มีค่าการซึมทางด้านซ้ายและด้านขวาดังแสดงในรูปที่ 5 สำหรับการซึมทางด้านซ้ายและด้านขวาของท่อที่อัตราการไหลต่างๆมีค่าการซึมไม่แตกต่างกันมาก



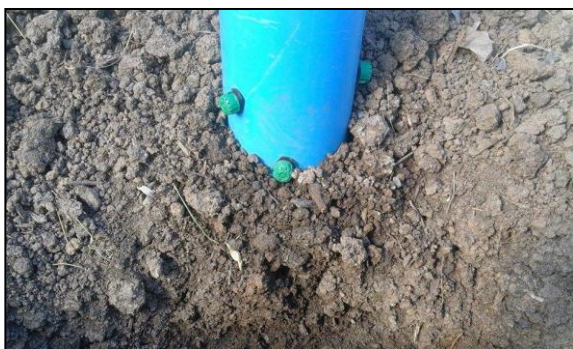
รูปที่ 5 การซึ่มกับเวลาที่อัตราการไหลต่างๆ

2.4 ทดสอบการให้น้ำเพื่อสังเกตความชื้นในวันสุดท้ายของสัปดาห์

ทดสอบการให้น้ำเพื่อสังเกตความชื้นในวันสุดท้ายของสัปดาห์ โดย ทำการทดลอง 2 แบบ คือ แบบเติมน้ำติดต่อกัน 3 วัน และ แบบเติมน้ำวันเว้นวัน เป็นเวลา 3 วันและสังเกตความชื้นในวันสุดท้ายของสัปดาห์ พบว่าแบบวันเว้น เป็นเวลา 3 วันมีความชื้นหลงเหลืออยู่มากกว่า ความชื้นในวันสุดท้ายของสัปดาห์ของการให้น้ำ 2 แบบดังแสดงรูปที่ 6 และ 7



รูปที่ 6 ความชื้นในวันสุดท้ายของสัปดาห์ของการให้น้ำแบบ 3 วันติดต่อกัน



รูปที่ 7 ความชื้นในวันสุดท้ายของสัปดาห์ของการให้น้ำแบบวันเว้นวันเป็นเวลา 3 วัน

2.5 ความต้องการน้ำของพืช

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้โปรแกรม CROPWAT 8.0 ที่พัฒนาขึ้นมา โดยองค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ (FAO)[3] คำนวณค่าการคายระเหยน้ำของพืช ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของมะนาว[4] จากสมการดังต่อไปนี้

$$ET_c = K_c \times ET_o \quad (3)$$

โดยที่

ET_c คือ การคายระเหยน้ำของพืช

ET_o คือปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงโปรแกรม CROPWAT 8.0

จะทำการคำนวณค่า ET_o ตามวิธีการของ FAO Penman Montieith

K_c คือ สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช

คำนวณความต้องการน้ำของต้นมะนาวเริ่มปลูกตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม ถึง 31 ธันวาคม 2559 เป็นระยะเวลาทั้งสิ้น 52 สัปดาห์ ผลจากการคำนวณสรุปได้ว่ามะนาวมีความต้องการน้ำเฉลี่ยสัปดาห์ละ 15 ลิตรต่อสัปดาห์ ที่มีความจุ 5.1 ลิตร ดังนั้นควรให้น้ำแก่ต้นมะนาวสัปดาห์ละ 3 ครั้งโดยประมาณ

2.6 ทดสอบการให้น้ำกับมะนาว

ทดสอบการให้น้ำกับมะนาวโดยนำท่อน้ำหยดแนวตั้งมาใช้กับต้นมะนาวอายุ 3- 4 เดือน (รูปที่ 7) ตามความต้องการน้ำของต้นมะนาวที่ได้จากคำนวณค่าการคายระเหยน้ำของพืชโปรแกรม CROPWAT ให้น้ำแก่ต้นมะนาวสัปดาห์ละ 3 ครั้งโดยการใส่น้ำให้เต็มท่อน้ำวันเว้นวัน สำหรับการเจริญเติบโตของมะนาวที่ให้น้ำแบบท่อน้ำหยดแนวตั้ง หลังการให้น้ำ 2, 6 และ 16 สัปดาห์ดังแสดงรูปที่ 8 ถึง 10



รูปที่ 7 นำท่อน้ำหยดแนวตั้งมาใช้กับต้นมะนาวอายุ 3- 4 เดือน



รูปที่ 8 ต้นมะนาว (หลังการให้น้ำ 2 สัปดาห์)



รูปที่ 9 ต้นมะนาว (หลังการให้น้ำ 6 สัปดาห์)



รูปที่ 10 ต้นมะนาว (หลังการให้น้ำ 16 สัปดาห์)

3. สรุปผลการทดลอง

จากการออกแบบท่อน้ำหยดแนวตั้ง เป็นท่อ PVC ขนาด 4 นิ้ว ความยาว 80 เซนติเมตร (สามารถบรรจุน้ำได้ 5.1 ลิตร) หัวน้ำหยด 1 ลิตร ต่อชั่วโมง จำนวน 12 หัว ทำการประเมินค่าความสม่ำเสมอของการให้น้ำ จากค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอของการให้น้ำ (CU) และค่าความสม่ำเสมอของการแผ่กระจายน้ำ (DU) พบว่าค่า (CU) และ ค่า (DU) เท่ากับ 84 เปอร์เซ็นต์และ 81 เปอร์เซ็นต์ สำหรับงานวิจัยนี้ทำการทดสอบ

การซีมกับเวลาที่อัตราการไหลทั้ง 4 แบบ จากการทดลองพบว่าที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อชั่วโมงนั้นท่อน้ำหยดแนวตั้งสามารถให้น้ำได้นานสูงสุด 540 นาที มีการซีมทางด้านซ้าย ด้านขวา และในแนวตั้งสูงสุดที่ 18, 18.5 และ 30 เซนติเมตรตามลำดับ ค่าความความต้องการน้ำของต้นมะนาวจากการคำนวณค่าการคายระเหยน้ำของพืชโปรแกรม CROPWAT ผลจากการคำนวณสรุปได้ว่ามะนาวมีความต้องการน้ำเฉลี่ยสัปดาห์ละ 15 ลิตรต่อสัปดาห์ ท่อมีความจุ 5.1 ลิตร ดังนั้นควรให้น้ำต้นมะนาวสัปดาห์ละ 3 ครั้ง โดยการบรรจุน้ำเต็มท่อน้ำวันเว้นวัน ผลจากการทดสอบการให้น้ำกับมะนาวระหว่างการทดลองประมาณ 4 เดือน สรุปได้ว่าสามารถใช้ท่อน้ำหยดแนวตั้งได้ มะนาวเจริญเติบโตดี ต้นมะนาวมีผลแต่ใบจะมีสีเหลืองบ้างเล็กน้อยและหน้าดินจะแห้ง ควรจะมีการทดสอบการใช้ท่อน้ำหยดแนวตั้งกับตลอดการเจริญเติบโตของต้นมะนาวสำหรับการศึกษาต่อไป

4. กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ ได้รับทุนการสนับสนุนจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] มนตรี คำชู, “หลักการชลประทานแบบหยด,” กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน, 2531.
- [2] Keller, J., and Bliesner, R.D., “Sprinkle and trickle irrigatio.,” An AVI Book, New York, Van Nostrand Reinhold, 1990.
- [3] FAO, “CROPWAT 8.0 Model,” Food and Agriculture Organization. Rome, Italy, 2009.
- [4] กรมชลประทาน, “สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (KC),” กองจัดสรรน้ำและบำรุงรักษา กรมชลประทาน, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2539.

การกำจัดแอมโมเนียในน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบด้วยกระบวนการเติมคลอรีน Ammonia Removal From Landfill Leachate by Chlorination Process

กุลยา สาริชีวิน* และ สมพิศ ตันตวรนาท

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

E-mail: kullaya.s@en.rmutt.ac.th*

TL19

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณความเข้มข้นของคลอรีนที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียในน้ำชะขยะ และประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในน้ำชะขยะด้วยการเติมสารคลอรีนในรูปแบบของแคลเซียมไฮโปคลอไรท์ ($\text{Ca}(\text{ClO})_2$) โดยน้ำชะขยะที่ใช้เป็นน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบขยะชุมชน ในการทดลองนี้ทำการหาปริมาณความเข้มข้นของคลอรีนที่เหมาะสม โดยการแปรผันปริมาณความเข้มข้นของ $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ในช่วงกว้าง เท่ากับ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 กรัม/ลิตร และแปรผันระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมเท่ากับ 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที ผลการศึกษพบว่า ปริมาณ $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 42 กรัม/ลิตร ที่ระยะเวลาสัมผัส 5 นาที โดยประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียเท่ากับ 99.9%

คำสำคัญ: การกำจัดแอมโมเนียในน้ำชะขยะ คลอรีน กระบวนการคลอรีเนชัน

1. บทนำ

น้ำชะขยะ (Leachate) เป็นของเหลวที่ไหลชะล้างผ่านหรือออกมาจากขยะมูลฝอยที่เกิดจากการฝังกลบขยะ เนื่องจากน้ำชะขยะมีความสกปรกสูงมาก มีทั้งเชื้อโรค สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ โลหะหนักต่างๆ โดยเฉพาะค่าแอมโมเนียไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$) จะมีค่าสูงมาก หากน้ำชะขยะไม่ได้รับการดูแลหรือขั้นตอนในการเตรียมหลุมฝังกลบอย่างดี ก็อาจเกิดการรั่วไหลลงปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม จะก่อให้เกิดปัญหาผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมบริเวณใกล้เคียงบริเวณหลุมฝังกลบ เช่น การรั่วไหลลงดิน การรั่วไหลลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน และการรั่วไหลลงสู่แหล่งน้ำบริเวณใกล้ๆ น้ำชะขยะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก รวมทั้งยังทำลายระบบนิเวศทางน้ำอีกด้วย การบำบัดสารอินทรีย์ และแอมโมเนียไนโตรเจนจากน้ำชะขยะก่อนปล่อยลงสู่ธรรมชาติจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ค่าความเข้มข้นแอมโมเนียไนโตรเจนที่สูงในน้ำชะขยะ ก็อาจมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพด้วยเช่นเดียวกัน เนื่องจากแอมโมเนียมีค่าความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบบำบัดน้ำเสีย จึงทำให้ประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพลดลงได้ ดังนั้นจึงควรลด

ค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำชะขยะลงก่อนโดยการบำบัดขั้นต้นก่อนที่จะบำบัดในขั้นต่อไป

การกำจัดแอมโมเนียในน้ำชะขยะมีหลายวิธี ได้แก่ กระบวนการกำจัดทางกายภาพ ตัวอย่างเช่น กระบวนการเป่าไล่แอมโมเนีย (Ammonia Stripping) สำหรับการกำจัดแอมโมเนียทางชีวภาพ ได้แก่ ระบบบำบัดแบบเอสบีอาร์ (Sequencing batch reactor; SBR) และระบบคูวนเวียน (Oxidation ditch) เป็นต้น ส่วนกระบวนการทางเคมี ได้แก่ การตกตะกอนสตรูไวท์ (Struvite) ที่มีการใช้ฟอสเฟตแมกนีเซียม และกระบวนการเติมคลอรีน (Chlorination) ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถกำจัดแอมโมเนียในน้ำชะขยะได้

ในการศึกษครั้งนี้ได้นำเอากระบวนการเติมคลอรีนเพื่อมากำจัดแอมโมเนียในน้ำชะขยะ โดยทำการศึกษากำหนดปริมาณคลอรีนที่เหมาะสมและระยะเวลาสัมผัส ในกระบวนการบำบัดน้ำชะขยะที่มีแอมโมเนียสูงโดยใช้กระบวนการคลอรีเนชัน ซึ่งเป็นการบำบัดแอมโมเนียออกจากน้ำชะขยะก่อนที่จะเข้าระบบบำบัดทางชีวภาพ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 คลอรีน (Chlorine)

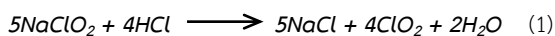
คลอรีน (Chlorine) เป็นสารอนินทรีย์ในกลุ่มฮาโลเจน ที่ใช้สำหรับเป็นสารฆ่าเชื้อ (Sanitizer) ซึ่งนิยมใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมอาหาร เพื่อลดปริมาณจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย ยีสต์ รา รวมทั้งจุลินทรีย์ก่อโรค (Pathogen) การใช้คลอรีนมีความปลอดภัยสูง และสามารถสลายตัวได้รวดเร็วในธรรมชาติ ราคาถูก ข้อเสียของคลอรีนคือมีกลิ่น และมี pH เป็นด่าง ทำให้มีฤทธิ์กัดกร่อนสูง ในกระบวนการผลิต เช่น น้ำหล่อเย็น อาหารกระป๋อง หลังการฆ่าเชื้อในหม้อฆ่าเชื้อ (Retort) น้ำที่ใช้หลอมละลาย (Thawing) อาหารแช่เยือกแข็ง (Frozen Food) ใช้ในการทำความสะดวกวัดดูดิบทำความสะอาดผิวอาหาร เช่น ผักผลไม้ เนื้อสัตว์ อาหารทะเล ใช้เป็นสารฆ่าเชื้อ (Sanitizer) เพื่อการฆ่าเชื้อเครื่องครัวเครื่องอุปกรณ์แปรรูปอาหารและเครื่องตมพื้นผิวที่ต้องสัมผัสกับอาหาร (Food Contact Surface) รวมทั้งเสื้อผ้า ถุงมือ รองเท้า พนักงานใช้ฆ่าเชื้อพื้นโรงงานบริเวณที่ผลิต ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย (Wastewater Treatment) [1] คลอรีนที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมี 4 ประเภท ได้แก่

ก) ก๊าซคลอรีน (Chlorine Gas, Cl₂) ก๊าซคลอรีน มีราคาถูก แต่เหมาะกับการใช้ปริมาณมาก จึงเหมาะกับการบำบัดน้ำดื่มขนาดใหญ่ เพราะการใช้ก๊าซคลอรีน ต้องการระบบควบคุมความปลอดภัยสูง ต้องมีระบบควบคุม ระบบจ่ายก๊าซอัตโนมัติ และการควบคุม pH แบบ On Line ซึ่งก๊าซคลอรีนลดค่า pH ของน้ำให้ต่ำกว่า 6.5 มักใช้กับการฆ่าเชื้อ โดยผสมกับน้ำล้างวัตถุดิบ

ข) แคลเซียมไฮโปคลอไรต์ (Calcium Hypochlorite, CaCl₂O₂) เป็นรูปแบบของคลอรีนที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร ใช้สำหรับฆ่าเชื้อวัตถุดิบและฆ่าเชื้อน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต เช่น น้ำหล่อเย็น น้ำหอมละลายวัตถุดิบที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง (Thawing) มีชนิดที่เป็นผง หรืออัดเป็นเม็ด ความเข้มข้นของคลอรีนออกฤทธิ์ (Active Ingredient) 65% หรือ 68% นอกจากการใช้เพื่อการฆ่าเชื้อแล้ว แคลเซียมไฮโปคลอไรต์ยังให้ผลคือ เกลือแคลเซียม (Calcium Salt) รวมตัวกับเพกทิน (Pectin) ในผนังเซลล์ของผักผลไม้ ทำให้ผนังเซลล์แข็งแรงขึ้น และต้านทานโรคได้ดี

ค) โซเดียมไฮโปคลอไรต์ (Sodium Hypochlorite, NaOCl) หรือ คลอรีนน้ำ เป็นประเภทของคลอรีนที่นิยมใช้กันสำหรับเป็นน้ำยาซักผ้าขาว มีการนำมาในอุตสาหกรรม เช่น อาหารทะเลแช่เยือกแข็ง โซเดียมไฮโปคลอไรต์พบอยู่ในรูปสารละลาย เพราะโซเดียมไฮโปคลอไรต์ในรูปของแข็ง ดูดความชื้นจากอากาศได้รวดเร็วและจะสลายตัวเป็นก๊าซคลอรีน สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์มีความเข้มข้นของคลอรีนออกฤทธิ์ 5.25% หรือ 12.75%

ง) คลอรีนไดออกไซด์ (Chlorine Dioxide, ClO₂) คลอรีนไดออกไซด์เกิดจาก 7.5% โซเดียมคลอไรต์ (Sodium Chlorite, NaClO₂) ผสมกับ 9% กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid, HCl) ในอัตราส่วน 1:1 การเกิดปฏิกิริยาแสดงได้ดังสมการที่ (1) คือ



การออกฤทธิ์ของคลอรีน คลอรีนมีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดส์ที่รุนแรง เมื่อละลายน้ำจะเกิดปฏิกิริยากับน้ำ ไฮโปคลอไรต์ภายหลังละลายในน้ำ จะแตกตัวให้ไฮโปคลอไรต์ไอออน (Hypochlorite Ion, OCl⁻) และกรดไฮโปคลอรัส (Hypochlorous Acid, HOCl) ซึ่ง HOCl จะออกฤทธิ์ได้รุนแรงกว่า OCl⁻ ประมาณ 80-200 เท่า ทำลายเชื้อจุลินทรีย์ รวมทั้งสิ่งมีชีวิตต่างๆ ในน้ำ สามารถทำให้พันธะเคมีในโมเลกุลของสารอินทรีย์ และ สารอนินทรีย์แตกออก และเกิดเป็นโมเลกุลขนาดเล็กที่ละลายน้ำได้ จึงช่วยเพิ่มความเร็วและประสิทธิภาพในการทำความสะอาดใช้เป็นสารฟอกสี (Bleaching Agent) ไปทำลายสารอินทรีย์ ที่ทำให้เกิดสีช่วยตกตะกอน

2.2 ปฏิกิริยาของคลอรีนและแอมโมเนีย

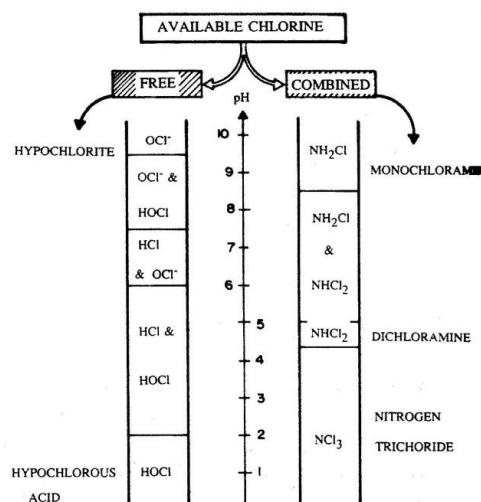
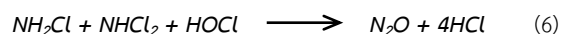
ในกรณีที่มีสารละลายหรือตะกอนแขวนลอย ปฏิกิริยาของคลอรีนจะเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากคลอรีนสามารถทำปฏิกิริยากับสารต่างๆ ได้แทบทุกชนิด เมื่อเติมคลอรีนหรือสารประกอบคลอรีนให้กับน้ำที่มีแอมโมเนีย กรดไฮโปคลอรัส (HOCl) จะทำปฏิกิริยากับแอมโมเนีย ทำให้เกิดสารประกอบโมโนคลอรามิน (NH₂Cl), ไดคลอรามิน (NHCl₂) และไตรคลอรามิน (NCl₃) ดังแสดงในสมการที่ (2), (3) และ (4)



อัตราส่วนระหว่างสารคลอรามินทั้งสามชนิดขึ้นอยู่กับปริมาณของตัวทำปฏิกิริยาทั้งคู่ และพีเอช เมื่ออัตราส่วนของจำนวนโมลระหว่างคลอรีนและแอมโมเนียไม่เกิน 1:1 โมโนคลอรามินและไดคลอรามินจะเกิดขึ้นได้ทั้งคู่ อย่างไรก็ตาม ปริมาณของสารทั้งสองขึ้นอยู่กับพีเอช ดังสมการที่ (5)



เมื่อพีเอชต่ำจะมีสารไดคลอรามินมาก แต่ถ้าพีเอชสูงจะมีสารโมโนคลอรามินมากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 1 เมื่ออัตราส่วนระหว่างคลอรีนและแอมโมเนียสูงกว่า 1:1 จะมีไตรคลอรามินเกิดขึ้นสำหรับในน้ำที่มีแอมโมเนียอยู่น้อย เมื่ออัตราส่วนระหว่างคลอรีนและแอมโมเนียเท่ากับ 2:1 จะได้ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (N₂O) เกิดขึ้น ดังสมการที่ (6)



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช และสารประกอบคลอรีนชนิดต่างๆ [2]

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการเติมคลอรีน

การเติมคลอรีนแบบคลอรีนตกค้างอิสระ ได้รับผลกระทบโดยตรงจากค่า pH ของน้ำ ค่าคลอรีนตกค้างอิสระ หมายความว่าถึงค่ารวมของกรดไฮโปคลอรัสซึ่งไม่แตกตัว ทั้งนี้จากเหตุผลที่ว่ากรดไฮโปคลอรัส มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคสูงกว่าไฮโปคลอไรต์ไอออน 100 เท่า สัดส่วนของการเกิดกรดไฮโปคลอรัส และไฮโปคลอไรต์ไอออนจะมากน้อยเท่าใด ขึ้นกับค่า pH ของน้ำ ในขณะที่เติมคลอรีน น้ำที่ pH เท่ากับ 5 จะให้กรดไฮโปคลอรัสสูงถึง 99.74% ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส แต่ที่น้ำ pH เท่ากับ 8 จะให้กรดไฮโปคลอรัสเพียง 27.69% ส่วนที่เหลือเมื่อหักจาก 100 จะเป็นส่วนของไฮโปคลอไรต์ไอออน [3]

การทำลายสารประกอบแอมโมเนียในโตรเจนด้วยคลอรีนจะเสร็จสมบูรณ์โดยใช้เวลาไม่เกิน 30 นาที ในโตรเจนจะลดลงไป 75-80 % ในกรณีที่มีแอมโมเนียในโตรเจนในช่วง 0.3-0.5 มก./ล. ทั้งนี้ขึ้นกับอุณหภูมิของน้ำด้วย ในขณะที่การทำปฏิกิริยาของสารอินทรีย์ในโตรเจนกับคลอรีน ใช้เวลาหลายวันกว่าจะเสร็จสมบูรณ์ สารอินทรีย์ในโตรเจนเป็นผลโดยตรงจากการปนเปื้อนของน้ำเสีย แหล่งที่มาของสารอินทรีย์ในโตรเจนส่วนใหญ่ อยู่ในสารประกอบพวกโปรตีน และยูรีน ซึ่งทั้งสองพบพบในน้ำ

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

ในการทดลองนี้ได้ทำการทดลองโดยใช้เครื่องจาร์เทสต์ ยี่ห้อ Phipps & Bird รุ่น PB-700 JARTESTER โดยทำการกวนเร็วด้วยความเร็วรอบ 150 รอบ/นาที ตามระยะเวลาสัมผัสที่ทำการแปรผัน และตามด้วยการตกตะกอน 30 นาที

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

ในการดำเนินการทดลอง ได้ทำการศึกษาหาปริมาณคลอรีนที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียในน้ำชะขยะ โดยใช้คลอรีนในรูปของแคลเซียมไฮโปคลอไรต์ ($\text{Ca}(\text{ClO})_2$) โดยทำการแปรผันปริมาณ $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ เท่ากับ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 กรัม/ลิตร และแปรผันระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 5, 10, 15, 20 และ 25 นาที ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การแปรผันค่า COD และเวลาในการสัมผัส

การทดลองที่	$\text{Ca}(\text{ClO})_2$, g/L	เวลาสัมผัส (นาที)
1	10	5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที
2	20	
3	30	
4	40	
5	50	
6	60	

3.3 น้ำชะขยะที่ใช้ในการทดลอง

น้ำชะขยะที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำชะขยะที่มาจากหลุมฝังกลบขยะชุมชนซึ่งมีอายุการฝังกลบประมาณ 3 ปี โดยมีค่าคุณลักษณะของน้ำชะขยะดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณลักษณะของน้ำชะขยะที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย
COD	มก./ล.	6,800
BOD	มก./ล.	2,038
pH	-	7.9
$\text{NH}_3\text{-N}$	มก./ล.	1,729
สี	หน่วยสี Pt-Co	485

คุณลักษณะของน้ำชะขยะมีค่าต่าง ๆ ดังนี้ ค่า pH เฉลี่ยเท่ากับ 7.9 ค่า COD เฉลี่ยเท่ากับ 6,800 มก./ล. ค่า BOD เฉลี่ยเท่ากับ 2,038 มก./ล. ค่าแอมโมเนียในโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$) เฉลี่ยเท่ากับ 1,729 มก./ล. และค่าสีเฉลี่ยเท่ากับ 485 หน่วยสี Pt-Co

3.4 วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์

วิธีการวิเคราะห์ค่า COD, BOD, $\text{NH}_3\text{-N}$ และสี ใช้วิธีตามมาตรฐาน Standard Methods for Examination of Water and Wastewater [1] และค่า pH ใช้เครื่องวัดแบบ Combined meter ยี่ห้อ Martini รุ่น Mi805

4. ผลการวิจัย

4.1 การศึกษาปริมาณการเติมคลอรีนที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียในน้ำชะขยะ

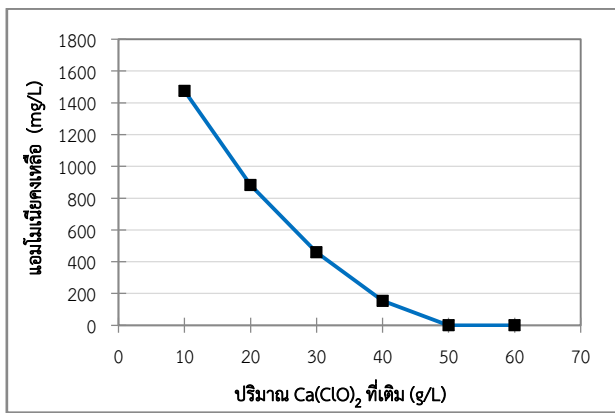
ก) การหาปริมาณ $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ในการกำจัดแอมโมเนีย โดยการแปรผันปริมาณ $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ในช่วงกว้าง

ในการศึกษาหาปริมาณ $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ที่เหมาะสม โดยแปรผันปริมาณ $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ในช่วงกว้างเท่ากับ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 กรัม/ลิตร ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3 และรูปที่ 2

จากผลการทดลอง ค่าแอมโมเนียเริ่มต้นของน้ำชะขยะก่อนนำมาทดลอง มีค่าเท่ากับ 1,729 มก./ล. เมื่อแปรผันเติม $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ลงในน้ำชะขยะในช่วงกว้าง ดังแสดงในรูปที่ 1 พบว่าแอมโมเนียในน้ำชะขยะได้ถูกกำจัด และมีค่าคงเหลือลดลงเรื่อยๆ แปรผันตามปริมาณ $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ที่เพิ่มขึ้น โดย $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ จะทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียได้หมดในช่วงการเติม $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ที่ 40 - 50 กรัม/ลิตร ดังนั้นจึงเลือกช่วงปริมาณ $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ เท่ากับ 40 - 50 กรัม/ลิตร เพื่อทำการทดลองแปรผันค่าปริมาณ $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ในช่วงที่ละเอียดต่อไป เพื่อให้ได้ค่าปริมาณ $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ที่มีความละเอียดแม่นยำมากขึ้น

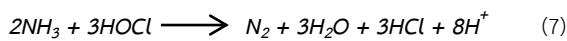
ตารางที่ 3 การกำจัดแอมโมเนียเมื่อแปรผันปริมาณ $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ในช่วงกว้าง

ปริมาณ $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ (g/L)	pH		แอมโมเนีย (mg/L)		% การกำจัด $\text{NH}_3\text{-N}$
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	
10	7.8	5.8	1,729	1,475	14.7
20	7.8	5.4	1,729	882	49
30	7.8	5.4	1,729	459	73.5
40	7.8	5.2	1,729	154	91.1
50	7.8	5.3	1,729	0	100
60	7.8	5.6	1,729	0	100



รูปที่ 2 ค่าแอมโมเนียคงเหลือเมื่อแปรผันค่าปริมาณ $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ในช่วงกว้าง

จากตารางที่ 3 จะเห็นว่าค่า pH ของน้ำชะขยะหลังจากที่มีการเติม $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ลงไปทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียจะทำให้ค่า pH ในน้ำชะขยะลดลง เนื่องจากผลผลิตที่ได้จากการทำปฏิกิริยาจะได้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) จึงมีผลทำให้ pH ของน้ำชะขยะหลังจากเติม $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ มีค่าลดลงดังปฏิกิริยาระหว่าง $\text{NH}_3\text{-N}$ กับ HOCl แสดงในสมการที่ (7)

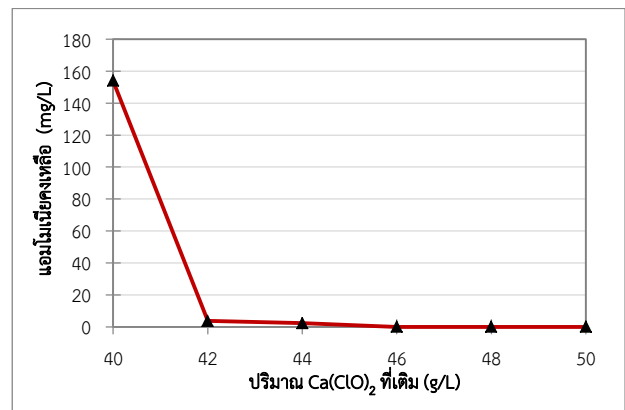


ข) การหาปริมาณ $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ในการกำจัดแอมโมเนีย โดยการแปรผันปริมาณ $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ในช่วงละเอียด

จากการทดลองหาปริมาณคลอรีนในการกำจัดแอมโมเนีย โดยแปรผันปริมาณ $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ในช่วงกว้าง พบว่าปริมาณ $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ที่สามารถกำจัดแอมโมเนียได้มีประสิทธิภาพที่สุดอยู่ในช่วง 40 - 50 กรัม/ลิตร ดังนั้นจึงนำค่าปริมาณของ $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ในช่วงดังกล่าวมาแปรผันค่าในช่วงที่มีความละเอียดขึ้น ได้แก่ 40, 42, 44, 46, 48 และ 50 กรัม/ลิตร เพื่อหาปริมาณ $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ที่มีช่วงค่าที่เหมาะสมและแม่นยำยิ่งขึ้น โดยผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4 และรูปที่ 3

ตารางที่ 4 การกำจัดแอมโมเนียเมื่อแปรผันปริมาณ $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ในช่วงละเอียด

ปริมาณ $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ (g/L)	pH		แอมโมเนีย (mg/L)		% การกำจัด $\text{NH}_3\text{-N}$
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	
40	7.8	5.6	1,729	154	91.1
42	7.8	5.7	1,729	3.7	99.8
44	7.8	5.8	1,729	2.3	99.9
46	7.8	5.8	1,729	0	100
48	7.8	5.8	1,729	0	100
50	7.8	6.1	1,729	0	100



รูปที่ 3 ค่าแอมโมเนียคงเหลือเมื่อแปรผันค่าปริมาณ $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ในช่วงละเอียด

จากตารางที่ 4 และรูปที่ 3 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียมีแนวโน้มลดลง โดยแอมโมเนียจะสามารถถูกกำจัดได้หมด 100% ที่ปริมาณ $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ตั้งแต่ 46 กรัม/ลิตรเป็นต้นไป ในขณะที่ปริมาณ $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ เท่ากับ 42 และ 44 กรัม/ลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมากกว่า 99% และมีค่าปริมาณแอมโมเนียคงเหลือน้อยกว่า 3.7 มก./ล. ซึ่งเหลือในปริมาณน้อย ดังนั้นปริมาณ $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ที่เหมาะสมในการใช้กำจัดแอมโมเนียได้อย่างมีประสิทธิภาพ ควรใช้ปริมาณ $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ เท่ากับ 42 กรัม/ลิตร

4.2 การศึกษาระยะเวลาสัมผัสคลอรีนที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนีย

ในการศึกษาระยะเวลาสัมผัสคลอรีนที่เหมาะสม ได้ใช้ค่าปริมาณ $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ที่เหมาะสมเท่ากับ 42 กรัม/ลิตรที่ได้จากการทดลองในหัวข้อ 4.1 มาทำการแปรผันระยะเวลาสัมผัสคลอรีนที่ 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การกำจัดแอมโมเนียที่ระยะเวลาสัมผัสคลอรีนต่างๆ

เวลา (นาที)	pH		แอมโมเนีย (mg/L)		% การ กำจัด NH ₃ -N
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	
5	7.8	5.6	1,701	1.3	99.92
10	7.8	5.6	1,701	1.3	99.92
15	7.8	5.6	1,701	1.1	99.94
20	7.8	5.6	1,701	0.9	99.95
25	7.8	5.7	1,701	0.6	99.96
30	7.8	5.7	1,701	0.6	99.96

จากผลการทดลองจะพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียในทุกระยะเวลาสัมผัสจะมากกว่า 99% แสดงว่าการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแอมโมเนียและคลอรีนเกิดขึ้นได้รวดเร็วภายใน 5 นาทีแรก ดังนั้นระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียโดยใช้ Ca(ClO)₂ สำหรับการศึกษาจึงเลือกใช้ค่าระยะเวลาสัมผัสที่ 5 นาที

5. สรุปผลการทดลอง

ในการศึกษาปริมาณความเข้มข้นของคลอรีนที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียในน้ำชะขยะ และประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในน้ำชะขยะด้วยการเติมสารคลอรีนในรูปของแคลเซียมไฮโปคลอไรท์ (Ca(ClO)₂) นั้นพบว่าปริมาณ Ca(ClO)₂ ที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียในน้ำชะขยะมีค่าเท่ากับ 42 กรัม/ลิตร และมีระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 5 นาที ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียเท่ากับ 99.92% ซึ่งในการทดลองนี้เป็นการศึกษาเพื่อเป็นแนวทางบำบัดน้ำชะขยะขั้นต้นเพื่อลดปริมาณแอมโมเนียก่อนที่จะเข้าระบบบำบัดน้ำเสียในขั้นตอนการบำบัดต่อไป เนื่องจากความเข้มข้นแอมโมเนียที่สูงจะมีความเป็นพิษต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพได้ ทั้งนี้หลังจากที่มีการเติมคลอรีนลงไปเพื่อกำจัดแอมโมเนียนั้น ค่า pH ของน้ำชะขยะจะมีค่าลดลงอยู่ในช่วง 5.4 - 6.1 ซึ่งเป็นช่วงค่าที่มีความเป็นกรด ดังนั้นในการนำเอาวิธีการนี้ไปประยุกต์ใช้จริงในระบบบำบัดน้ำชะขยะจึงต้องทำการปรับค่า pH ให้เป็นกลางก่อนที่จะนำชะขยะไปบำบัดในขั้นตอนต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ด้วยเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2559 คณะผู้ทำวิจัยจึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] A.K. Saroha, "Safe handling of chlorine," *J. Chem. Health & Safety*, vol. 13(2), pp. 5-11, 2006.
- [2] มั่นสิน ตันกุลเวศม์ และ มั่นรัชต์ ตันกุลเวศม์, *เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย*. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ, 2547.
- [3] บุญชัย วิจิตรเสถียร, *รายงานวิจัยการบำบัดน้ำชะขยะมูลฝอยชุมชนด้วยวิธีทางเคมี*, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2549.
- [4] APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 18th edition, American Public Health Association, 1992.

สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่มีการเติมเปลือกแปะก๊วยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน Mechanical Properties of Alkali-Treated Gingko Shell Filled Natural Rubber

กัณฑ์วี สุทธาวาร¹ อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี² นัทธมน คุณแสง³ และ ฉัตรชัย วีระนิตสกุล^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

²ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

³ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-mail: chatchai.v@en.rmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่มีการเติมผงเปลือกแปะก๊วยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 7 ในเวลา 8 ชั่วโมง โดยผงเปลือกแปะก๊วยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันจะถูกนำมาเติมลงในยางธรรมชาติในปริมาณ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 ส่วนในร้อยส่วนของยางธรรมชาติ ตามลำดับ โดยใช้เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง แล้วทำการทดสอบลักษณะการคงรูปยางคอมพาวด์ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบคายเคสชั่นที่หลังจากนั้นจะทำการคงรูปยางด้วยเครื่องอัดคงรูปยางที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และศึกษาสมบัติเชิงกลของยางคอมโพสิต จากการทดลองพบว่ายางคอมพาวด์มีระยะเวลาก่อนการคงรูปและเวลาในการคงรูปลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณผงเปลือกแปะก๊วย ความแข็งและมอดูลัสที่ร้อยละ 100 และ 300 ของยางคอมโพสิตเพิ่มขึ้น แต่ความต้านทานต่อแรงดึงและร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณผงเปลือกแปะก๊วย

คำสำคัญ: สมบัติเชิงกล ยางธรรมชาติ เปลือกแปะก๊วย อัลคาไลน์เซชัน

1. บทนำ

ปัจจุบันความสนใจในการนำวัสดุทางธรรมชาติมาใช้เป็นสารเสริมแรงสำหรับยางธรรมชาตินั้นได้รับการศึกษาอย่างแพร่หลาย เนื่องจากจะช่วยให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค มีราคาถูก และวัสดุจากธรรมชาติบางชนิดอาจจะเป็นวัสดุเหลือใช้ ทำให้เป็นการช่วยลดปัญหาขยะได้อีกด้วย นอกจากนี้ในงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตยังพบว่าการใช้วัสดุจากธรรมชาติสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลบางประการให้กับวัสดุคอมโพสิตได้ [1,2,3] ตัวอย่างของสารเสริมแรงที่มาจากธรรมชาติ เช่น เส้นใยไผ่ [1] ผงไม้จากปาล์มน้ำมัน [2,3] เส้นใยปอติ [4] เส้นใยใบสับปะรด [5] และเส้นใยป่านศรนารายณ์ [6] เป็นต้น

แปะก๊วยเป็นพืชสมุนไพรจีนชนิดหนึ่งที่มีประโยชน์มากมาย ผลของมันใช้เป็นยาจีนมาตั้งแต่สมัยโบราณ [7] ปัจจุบันในประเทศไทยได้มีการบริโภคผลแปะก๊วยกันอย่างแพร่หลาย ยิ่งไปกว่านั้นเปลือกแปะก๊วยที่ถูกทิ้งจากการบริโภคมีเป็นจำนวนมากตามไปด้วย ดังนั้นทางคณะวิจัยจึง

มีความสนใจนำเปลือกแปะก๊วยที่ถูกทิ้งมาใช้ประโยชน์เป็นสารเติมแต่งชนิดใหม่ให้กับยางธรรมชาติ โดยจากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของเปลือกแปะก๊วยพบว่ามีส่วนประกอบของเซลลูโลสอยู่ถึง 44.7% [8]

อย่างไรก็ตามปัญหาหลักที่พบในการเตรียมวัสดุคอมโพสิตคือความเข้ากันได้ระหว่างสมบัติไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) ของสารตัวเติมและสมบัติไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) ของพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งอาจส่งผลให้วัสดุคอมโพสิตที่เตรียมได้มีสมบัติที่ไม่ดี [9] หนึ่งในวิธีที่สำคัญที่ช่วยในการปรับปรุงความเข้ากันได้ดังกล่าวก็คือการทำอัลคาไลน์เซชัน (Alkalization) [5] ซึ่งเป็นกระบวนการทางเคมีที่ใช้ปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม เพื่อให้สารตัวเติมมีการยึดติดกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดียิ่งขึ้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีความสนใจที่จะพัฒนาทางคอมโพสิตระหว่างผงเปลือกแปะก๊วยกับยางธรรมชาติ และทำการศึกษาอิทธิพลของผงเปลือกแปะก๊วยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันต่อสมบัติการคงรูปและสมบัติเชิงกลของยางคอมโพสิต

2. ขั้นตอนการทดลอง

2.1 วัสดุและสารเคมี

วัสดุที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยเมทริกซ์คือยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) เกรด STR 5L สารตัวเติมคือผงเปลือกแปะก๊วย (Gingko shell powders) และสารเคมีที่ใช้ประกอบด้วยสารปรับปรุงพื้นผิวคือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) สารคงรูปยางคือกำมะถัน (Sulfur, S) สารตัวเร่งปฏิกิริยา คือ เอ็น-เทอร์เชียรี-บิวทิล-2-เบนโซไทอะโซลซัลฟีนามิด (N-tert-butyl-2-benzothiazole sulfenamide, TBBS) และเตตระเมทิลไทยรัมไดซัลไฟด์ (Tetramethylthiuram disulfide, TMTD) สารกระตุ้นปฏิกิริยา คือ ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) และ กรดสเตียริก (Stearic acid)

2.2 การเตรียมและวิเคราะห์หึ่งเปลือกแปะก๊วย

เปลือกแปะก๊วยถูกนำมาบดและคัดขนาดผ่านตะแกรง 325 Mesh ได้ผงเปลือกแปะก๊วยที่มีขนาดต่ำกว่า 45 ไมครอน จากนั้นอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วจึงทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกระบวนการอัลคาไลน์เซชัน โดยเตรียมสารละลาย

โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 7 แล้วนำผงเปลือกแปะก๊วยที่ผ่านการคัดขนาดแล้วไปแช่เป็นเวลา 8 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีสภาพเป็นกลางให้สะอาดและอบให้แห้ง

ผงเปลือกแปะก๊วยที่ผ่านและไม่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันจะถูกวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยใช้เลขคลื่นที่ $4000-500\text{ cm}^{-1}$

ผงเปลือกแปะก๊วยที่ผ่านและไม่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันจะถูกวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลท์ กำลังขยาย 1,000 เท่า

2.3 การเตรียมและทดสอบยางคอมพาวนด์

ผงเปลือกแปะก๊วยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์ เซชันถูกนำไปผสมกับยางธรรมชาติและสารเคมีต่างๆ ดังตารางที่ 1 ด้วยเครื่องบดผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง (Two-rolls mill) ยางคอมพาวนด์ที่ได้จะถูกเก็บไว้ในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อคลายความเครียดที่เกิดขึ้นในระหว่างการบดผสม หลังจากนั้นยางคอมพาวนด์จะถูกทดสอบสมบัติการคงรูปด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบตายเคลื่อนที่ (Moving die rheometer, MDR) ตามมาตรฐาน ASTM D5289 ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

2.4 การเตรียมและทดสอบยางคอมโพสิต

ยางคอมพาวนด์ที่เตรียมได้จะถูกขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปยาง (Rubber compression molding) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการคงรูปยางเท่ากับค่า t_{90} ที่ได้จากการทดสอบสมบัติการคงรูปยางคอมพาวนด์

ยางคอมโพสิตจะถูกทดสอบสมบัติความแข็งด้วยเครื่องดูโรมิเตอร์ (Durometer) แบบ Shore A ตามมาตรฐาน ASTM D2240 และสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Universal tensile testing machine) ตามมาตรฐาน ASTM D412 ใช้ความเร็วในการดึงที่ 500 มิลลิเมตรต่อนาที

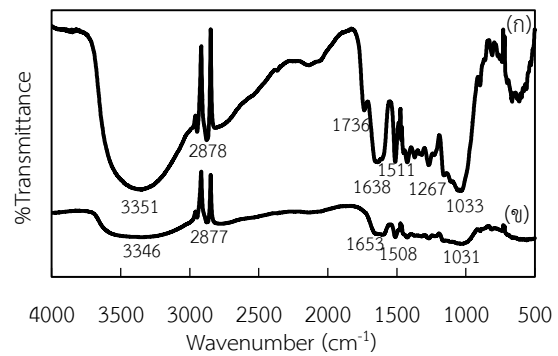
พฤติกรรมการแตกหักของยางคอมโพสิตจะถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) โดยชิ้นงานถูกเตรียมหลังจากการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง โดยสถานะที่ใช้ในการทดสอบคือความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 กิโลโวลท์ และกำลังขยาย 500 เท่า

ตารางที่ 1 สัดส่วนการผสมผงเปลือกแปะก๊วยและสารเคมีต่างๆ กับยางธรรมชาติ

วัสดุ	ปริมาณ (phr)
Natural rubber	100
Zinc oxide	3
Stearic acid	2
TBBS	1
TMTD	0.3
Ginkgo shell powder	0, 10, 20, 30, 40, 50
Sulfur	2

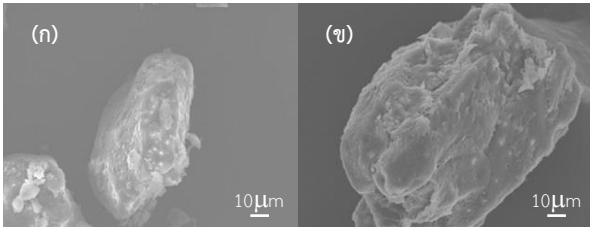
3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของผงเปลือกแปะก๊วย



รูปที่ 1 FTIR สเปกตรัมของผงเปลือกแปะก๊วยที่ (ก) ไม่ผ่านและ (ข) ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน

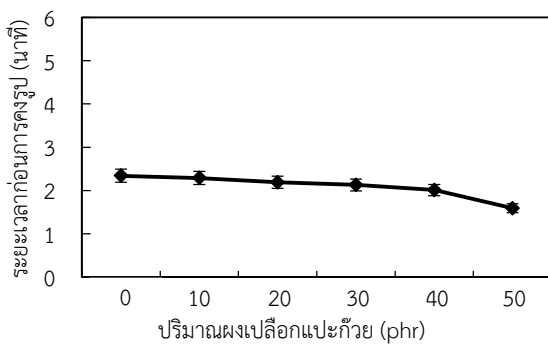
จากรูปที่ 1 (ก) พบว่าผงเปลือกแปะก๊วยที่ไม่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีพีคการสั่นเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 3351 cm^{-1} ซึ่งสัมพันธ์กับรูปแบบการสั่นของ O-H stretching ที่ตำแหน่ง 2878 cm^{-1} ซึ่งสัมพันธ์กับรูปแบบการสั่นของ C-H stretching ที่ตำแหน่ง 1736 cm^{-1} ซึ่งสัมพันธ์กับรูปแบบการสั่นของ C-O stretching ที่ตำแหน่ง 1511 และ 1267 cm^{-1} ซึ่งบ่งบอกถึงการมีอยู่ของลิกนินและเฮมิเซลลูโลส [5] สำหรับผงเปลือกแปะก๊วยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันดังรูปที่ 1 (ข) พบการลดลงของพีคที่ตำแหน่ง 1511 และ 1267 cm^{-1} ทั้งนี้อาจเกิดจากการทำอัลคาไลน์เซชันช่วยกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสออกจากผงเปลือกแปะก๊วย



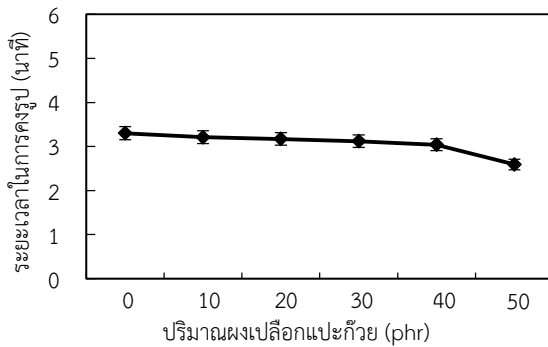
รูปที่ 2 ภาพถ่าย SEM ของผงเปลือกอะเกียที่ (ก) ไม่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันที่กำล้งขยาย 1,000 เท่า (ข) ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันที่กำล้งขยาย 1,000 เท่า

จากรูปที่ 2 (ก) พบว่าผงเปลือกอะเกียที่ไม่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีรูปร่างไม่แน่นอน พื้นผิวค่อนข้างเรียบเนียน สำหรับผงเปลือกอะเกียที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันพบว่ารูปร่างไม่แน่นอน พื้นผิวไม่เรียบเนียนและขรุขระมากขึ้นดังรูปที่ 2 (ข) อาจเนื่องมาจากกลไกการและเอมิเซลลูโลสถูกกำจัดออกไปหลังการทำอัลคาไลน์เซชัน

3.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติของยางคอมพาวนด์



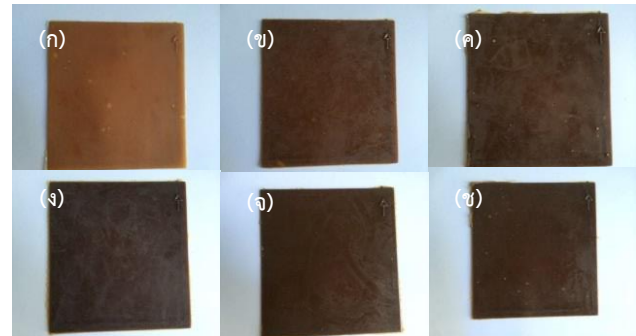
รูปที่ 3 ผลของปริมาณผงเปลือกอะเกียต่อระยะเวลาก่อนการคงรูป



รูปที่ 4 ผลของปริมาณผงเปลือกอะเกียต่อระยะเวลาในการคงรูป

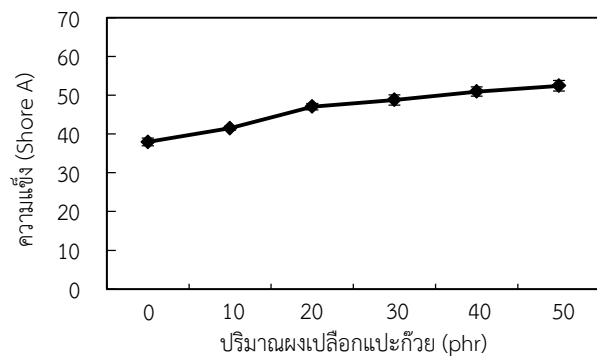
จากรูปที่ 3 และ 4 พบว่าระยะเวลาก่อนการคงรูปและระยะเวลาในการคงรูปลดลงเล็กน้อยตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของผงเปลือกอะเกีย [10,11]

3.3 ผลการเตรียมและทดสอบสมบัติเชิงกลของยางคอมโพสิต



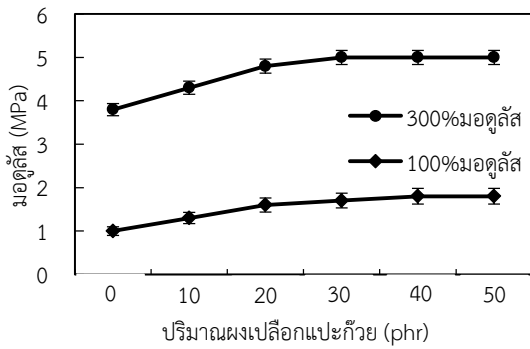
รูปที่ 5 ยางคอมโพสิตที่มีการเติมผงเปลือกอะเกียในปริมาณ (ก) 0, (ข) 10, (ค) 20, (ง) 30, (จ) 40 และ (ช) 50 ส่วนในร้อยส่วนของยางธรรมชาติ

ยางคอมโพสิตที่มีการเติมผงเปลือกอะเกียที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันในปริมาณที่เพิ่มขึ้น พบว่ามีสีเปลี่ยนจากสีน้ำตาลอ่อนจนเป็นสีน้ำตาลเข้มดังรูปที่ 5

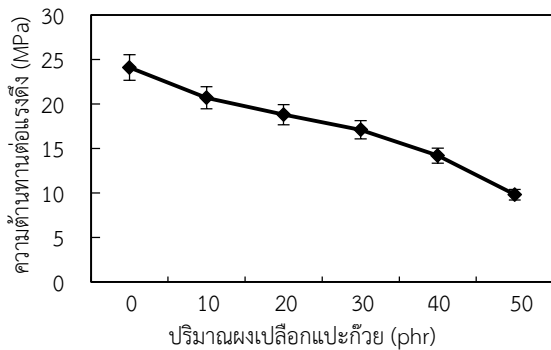


รูปที่ 6 ผลของปริมาณผงเปลือกอะเกียต่อความแข็ง

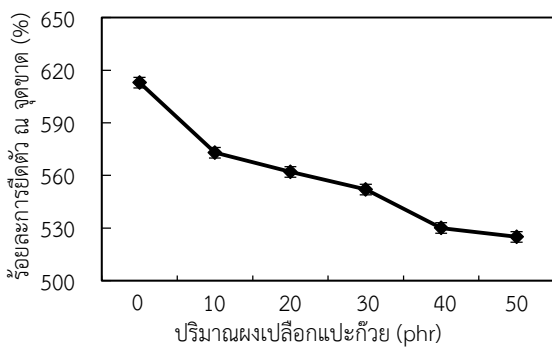
จากรูปที่ 6 และ 7 พบว่าความแข็งและมอดูลัสของยางคอมโพสิตเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของผงเปลือกอะเกียเพิ่มขึ้น [10] ซึ่งอาจเกิดจากการรวมตัวกันของผงเปลือกอะเกียภายในเนื้อยางจะช่วยเพิ่มความแข็งให้กับยางคอมโพสิต ส่งผลให้ความแข็งและมอดูลัสสูงขึ้น



รูปที่ 7 ผลของปริมาณผงเปลือกแปะก๊วยต่อมอดูลัส

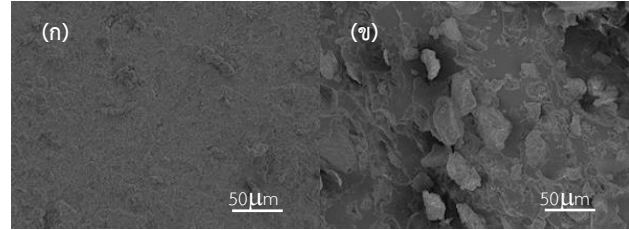


รูปที่ 8 ผลของปริมาณผงเปลือกแปะก๊วยต่อความต้านทานต่อแรงดึง



รูปที่ 9 ผลของปริมาณผงเปลือกแปะก๊วยต่อร้อยละการยัดตัว ณ จุดขาด

จากรูปที่ 8 และ 9 พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงและร้อยละการยัดตัว ณ จุดขาดของยางคอมโพสิตลดลงเมื่อปริมาณของผงเปลือกแปะก๊วยเพิ่มขึ้น [10] ซึ่งอาจเกิดจากการที่ผงเปลือกแปะก๊วยมีรูปร่างไม่แน่นอนเข้าไปแทรกตัวอยู่ในเนื้อยาง ทำให้การถ่ายโอนความเค้นของยางเมื่อได้รับแรงกระทำไปยังสารตัวเติมลดลง ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงและร้อยละการยัดตัว ณ จุดขาดลดลง



รูปที่ 10 ภาพถ่าย SEM ของยางคอมโพสิตที่ได้หลังจากการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงที่มีการเติมผงเปลือกแปะก๊วยที่ (ก) 0 และ (ข) 50 ส่วนในร้อยละของยางธรรมชาติ

หลังจากทำการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง ชิ้นงานที่ขาดนั้นจะถูกนำมาวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหักที่บริเวณพื้นผิว พบว่ายางที่ไม่มีเติมผงเปลือกแปะก๊วย (รูปที่ 10 (ก)) มีลักษณะการแตกหักแบบเรียบเนียน เนื่องจากไม่มีสารตัวเติมเข้าไปแทรกตัวอยู่ในเนื้อยาง แต่ยางคอมโพสิตที่มีการเติมผงเปลือกแปะก๊วยในปริมาณ 50 ส่วนในร้อยละของยางธรรมชาติ (รูปที่ 10 (ข)) มีลักษณะการแตกหักแบบไม่เรียบเนียนอนุภาคของสารตัวเติมกระจายอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบ ยิ่งไปกว่านั้นสามารถสังเกตเห็นการยึดเกาะกันที่ติระหว่างสารตัวเติมกับเมทริกซ์เนื่องจากพบการหลุดออกจากกันของสารตัวเติมกับเมทริกซ์น้อยมากหลังจากชิ้นงานแตกหัก จึงสามารถสรุปได้ว่าการทำอัลคาไลน์เซชันจะช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ของสารตัวเติมและเมทริกซ์

4. สรุปผลการทดลอง

ยางคอมโพสิตระหว่างผงเปลือกแปะก๊วยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันกับยางธรรมชาติถูกเตรียมได้สำเร็จ โดยสมบัติความแข็งและมอดูลัสที่ร้อยละ 100 และ 300 เพิ่มขึ้นตามปริมาณผงเปลือกแปะก๊วยที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการปรับปรุงพื้นผิวของผงเปลือกแปะก๊วยด้วยการทำอัลคาไลน์เซชันจะสามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างสารตัวเติมกับเมทริกซ์ อย่างไรก็ตามสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและร้อยละการยัดตัว ณ จุดขาดลดลงตามปริมาณผงเปลือกแปะก๊วยที่เพิ่มขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัย ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับสถานที่และเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย และขอขอบคุณนายทรัพย์สิน รัตนสุขจิตต์ ที่ได้ให้การช่วยเหลือสำหรับการทำวิจัยนี้

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Ismail, M. R. Edyham and B. Wirjosentono, Bamboo fibre filled natural rubber composites: the effects of filler loading and bonding agent. *Polym. Test.*, 21 (2002) 139-144.
- [2] H. Ismail and R. M. Jaffri, Physico-mechanical properties of oil palm wood flour filled natural rubber composites: the effects of filler loading and bonding agent. *Polym. Test.*, 18 (1999) 381-388.
- [3] H. Ismail and H. P. S. A. Khalil, The effect of partial replacement of oil palm wood flour by silica and silane coupling agent on properties of natural rubber compounds. *Polym. Test.*, 20 (2001) 33-41.
- [4] L. Mathew and R. Joseph, Mechanical properties of short-isora fiber-reinforced natural rubber composites: effects of fiber length, orientation, and loading; alkali treatment; and bonding agent. *J. Appl. Polym. Sci.*, 103 (2007) 1640-1650.
- [5] N. Lopattananon, K. Panawarangkul, K. Sahakara and B. Ellis, Performance of pineapple leaf fiber-natural rubber composites: the effect of fiber surface treatments. *J. Appl. Polym. Sci.*, 102 (2006) 1974-1984.
- [6] M. Jacob, S. Thomas and K. T. Varughese, Natural rubber composites reinforced with sisal/oil palm hybrid fibers: tensile and cure characteristics. *J. Appl. Polym. Sci.*, 93 (2004) 2305-2312.
- [7] P. E. Ch'ng, M. H. R. O. Abdullah, E. J. Mathai and N. A. Yunus, Some physical properties of ginkgo nuts and kernels, *International Agrophysics*, 27 (2013) 485-489.
- [8] J. Oda, Z. Liu and S. Sintaku, Structural and material composition of a ginkgo nut shell and its mechanical evaluations, *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineering Series A*, 64 (1998) 2217-2222.
- [9] H. Ismail and F. S. Haw, Effects of palm ash loading and maleated natural rubber as a coupling agent on the properties of palm-ash-filled natural rubber composites. *J. Appl. Polym. Sci.*, 110 (2008) 2867-2876.
- [10] H. Ismail, S. Shuhelmy and M. R. Edyham, The effect of a silane coupling agent on curing characteristics and mechanical properties of bamboo fibre filled natural rubber composites, *Eur. Polym. J.*, 38 (2002) 39-47.
- [11] S. Ngamsurat, K. Boonkerd, U. L. Adisorn and P. Potiyaraj, Curing characteristic of natural rubber filled with gypsum, *Energy Procedia*, 9 (2011) 452-458.

การขึ้นรูปและสมบัติของเส้นใยพอลิแลกติกแอซิดด้วยระบบอัดรีดเครื่องพิมพ์ 3 มิติ Polylactic Acid Fiber Forming and Properties from 3D Printer Extruding System

นที ศรีสวัสดิ์^{1*} พงษ์ศักดิ์ อ่ำภา² และ สมชาย เปียนสูงเนิน³

¹ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

²ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

³ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

E-mail: natee.s@en.rmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

การขึ้นรูปเส้นใยพอลิแลกติกแอซิดด้วยระบบการอัดรีดเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยได้มีการดัดแปลงอุปกรณ์จากเครื่องอัดรีดเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ให้เหมาะสมกับการอัดรีดเส้นใย การขึ้นรูปเส้นใยแบบหลอมเหลวเส้นใยพอลิแลกติกแอซิดด้วยอุปกรณ์ดังกล่าว สามารถขึ้นรูปเส้นใยได้เป็นอย่างดี เหมาะสมในการขึ้นรูป เพื่อเป็นการศึกษาพื้นฐานในการผลิตเส้นใยแบบหลอมเหลว โดยเส้นใยพอลิแลกติกแอซิดที่ขึ้นรูปได้เป็นเส้นใยเดี่ยวจากการทดลองขึ้นรูปด้วยการใช้เส้นใย 3 มิติ ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1.75 มิลลิเมตร เส้นใยพอลิแลกติกแอซิดขึ้นรูปด้วยความเร็วหมุนเก็บที่แตกต่างกัน 3 ระดับ พบว่า เมื่อมีความเร็วหมุนเก็บเส้นใยที่สูงขึ้น ความแข็งแรงของเส้นใยสูงขึ้น และความสามารถในการยืดตัวลดลง สมบัติทางความร้อนเปลี่ยนแปลง

คำสำคัญ: เส้นใยพอลิแลกติกแอซิด เส้นใย 3 มิติ การขึ้นรูปเส้นใย

1. บทนำ

เครื่องพิมพ์ 3 มิติ (3D Printer) ปัจจุบันถือได้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญเป็นอย่างสูงในการพัฒนาทางด้ายวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ซึ่งสามารถสร้าง ประดิษฐ์วัสดุอุปกรณ์ได้อย่างรวดเร็ว เป็นเครื่องมือแห่งอนาคต ผู้ผลิตสามารถผลิตหรือสร้างสรรค์ ได้จากความคิด แปรเป็นข้อมูลคอมพิวเตอร์ แล้วแปลงค่าตัวแปรต่างๆ ให้เครื่องพิมพ์ เครื่องพิมพ์ก็สามารถผลิตได้อย่างง่ายดาย โดยการพิมพ์ 3 มิติ ในการผลิตเชิงอุตสาหกรรมก็ได้มีการพัฒนากันอย่างต่อเนื่อง ทั้งที่เป็น อาคาร โลหะ อาหาร แต่อย่างไรก็ตาม การผลิตผลิตภัณฑ์ที่เป็นพอลิเมอร์หรือพลาสติก ก็ยังเป็นการพิมพ์ 3 มิติที่สำคัญ โดยการผลิตจะเปลี่ยนเส้นพลาสติก 3 มิติ (3D Filament) ที่เป็นเส้นพลาสติก ที่นิยมคือ พอลิแลกติกแอซิด และ พอลิอะคริโลไนไตรน์บิวตะไดอินสไตรน (ABS) อย่างก็ตามก็มีพอลิเมอร์ชนิดอื่นอีก เช่น ไนลอน และอีลาสโตเมอร์

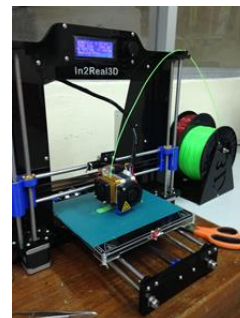
การปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ที่เป็นการพิมพ์ 3 มิติ พื้นฐานให้สามารถมาใช้ในการผลิตเส้นใยเป็นการเบื้องต้น และสามารถเรียนรู้ มีทักษะพื้นฐานทั้งระบบการพิมพ์ 3 มิติ และการผลิตเส้นใยสังเคราะห์ ด้วยระบบพื้นฐานในการอัดรีดในเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เปลี่ยนจากเส้นพลาสติก 3

มิติ มาเป็นชิ้นงานต่าง ๆ โดยการนำพอลิเมอร์หลอมเหลวซ้อนทับกันเป็นชั้น ๆ จนได้เป็นชิ้นงาน ซึ่งเรียกการผลิตชิ้นงานนี้ว่า “Additive Manufacturing” ซึ่งการเปลี่ยนเส้นพลาสติก 3 มิติ ให้เป็นพอลิเมอร์หลอมเหลวมีลักษณะที่เหมือนกับการผลิตเส้นใย โดยการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ และการปรับโปรแกรมที่เหมาะสม สามารถนำมาเป็นการขึ้นรูปเส้นใยสังเคราะห์ได้ ซึ่งการศึกษาในครั้งนี้จะเป็นการพัฒนาเครื่องขึ้นรูปเส้นใยจากระบบการอัดรีดของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ พร้อมกับเส้นพลาสติก 3 มิติ ที่ขึ้นรูปได้เองในห้องปฏิบัติการพอลิเมอร์และเส้นใย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จะได้รับการขึ้นรูปเป็นเส้นใย โดยสมบัติของเส้นใยที่ขึ้นรูปได้จะได้รับการทดสอบในด้านต่าง ๆ ดังนี้

2. เครื่องพิมพ์ 3 มิติ และการขึ้นรูปเส้นใยจากระบบอัดรีดเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

2.1 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ

ระบบการทำงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ มีอยู่ 2 ส่วนด้วยกันคือ ระบบควบคุมไฟฟ้า ชุดอัดรีด และระบบการขับเคลื่อน ดังรูปที่ 1 ซึ่งการผลิตเส้นใยจากระบบเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ได้ตัดส่วนระบบขับเคลื่อนออก โดยใช้เฉพาะส่วนที่เป็นระบบควบคุมไฟฟ้า และชุดอัดรีด พร้อมกับการปรับเปลี่ยนโปรแกรม ในการสั่งงานควบคุม และเพิ่มชุดขาตั้งที่เหมาะสม ดังรูปที่ 2 พร้อมกับชุดม้วนเก็บเส้นใย ในการม้วนเก็บเส้นใยที่อัดรีดได้ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 1 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ



รูปที่ 2 เครื่องขึ้นรูปเส้นใย จากระบบอัตโนมัติเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

โปรแกรมในการควบคุมของการอัดรีดเส้นใย เป็นการปรับเปลี่ยนจากโปรแกรมเดิม ซึ่งเป็นการปรับเพื่อความเหมาะสม ตัดส่วนที่ไม่ต้องการออก โดยการควบคุมจะมีการควบคุมได้เป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ ความเร็วในการอัดรีดเส้นพลาสติก 3 มิติ และอุณหภูมิของหัวโหนด (die) ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การปรับตั้งตัวแปรในการขึ้นรูปเส้นใย

2.2 การขึ้นรูปเส้นใยจากระบบอัตโนมัติเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

โปรแกรม อุปกรณ์ที่ได้รับการปรับแต่ง ให้เหมาะสมในการผลิตเส้นใย ซึ่งประกอบด้วยชุดควบคุมไฟฟ้า ชุดอัดรีด และชุดม้วนเก็บเส้นใย ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การขึ้นรูปเส้นใยจากระบบการอัดรีดเครื่อง 3 มิติ

3. พอลิเมอร์ และการทดสอบ

พอลิเมอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูปเป็นเส้นพลาสติก 3 มิติ ในห้องปฏิบัติการฯ คือ Ingeo™ Biopolymer 4043D ซึ่งเป็น PLA สำหรับงานผลิตเป็นเส้นพลาสติก 3 มิติ และใช้ทั่วไป

การขึ้นรูปเส้นพลาสติก 3 มิติ ขึ้นรูปในห้องปฏิบัติการ ด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวเดี่ยว (ThermoHaake Single Screw Extruder) ใช้ Die ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร อุณหภูมิปรับตั้งคือ T1=170, T2=175, T3=180 (Extruder), T4=185 (Connector) และ T5=190 (Die) °C ความเร็วรอบสปูร์ 80 rpm ความเร็วในการดึง 21.60 เมตร/นาที โดยควบคุมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.75 มิลลิเมตร

การทดสอบการควบคุมเครื่องขึ้นรูปเส้นใยจากระบบอัตโนมัติเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ด้วยการปรับตั้งอุณหภูมิ die ที่เหมาะสม และความเร็วในการป้อนเส้นพลาสติก 3 มิติ โดย die มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.4 mm

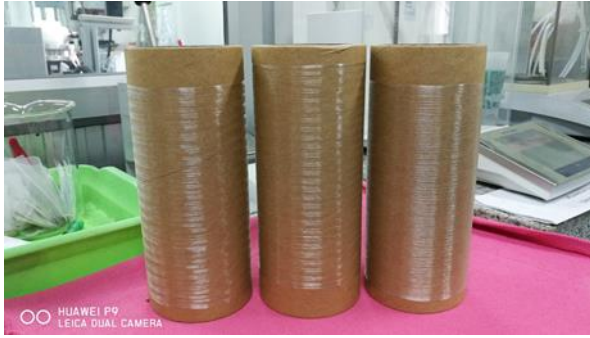
การขึ้นรูปเส้นใยด้วยสภาวะที่เหมาะสม จากความเร็วป้อนเส้นใย และอุณหภูมิ die ที่เหมาะสม โดยใช้ความเร็วม้วนเก็บ 50, 75 และ 100 เมตร/นาที

การทดสอบการไหลตัวของพอลิเมอร์ ด้วยเครื่อง Melt flow indexer ที่ 210, 230 และ 240°C น้ำหนักทดสอบ 2.16 กิโลกรัม ในเวลาตัดพอลิเมอร์ 5 วินาที

การทดสอบสมบัติของเส้นใยที่ขึ้นรูปได้ ทดสอบขนาดด้วย Optical microscope ทดสอบความแข็งแรง ที่ขนาดเส้นใย 2.5 มิลลิเมตร ความเร็วทดสอบ 25 มิลลิเมตร/นาที ทดสอบการเรียงตัวของเส้นใยด้วยเครื่อง Sonic modulus tester ทดสอบการหดตัวของเส้นใยที่อุณหภูมิ 88°C เวลา 5 นาที และทดสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วย Differential Scanning Calorimetry (DSC) ที่อุณหภูมิเพิ่ม (heating rate) และ ลดอุณหภูมิ (cooling rate) 10°C/นาที จากอุณหภูมิ 30 – 200°C โดยทิ้งพอลิเมอร์ หลอมเหลวที่ 200°C เป็นเวลา 5 นาที



รูปที่ 5 เครื่องขึ้นรูปเส้นใย 3 มิติ และเส้นพลาสติก 3 มิติ (PLA) ที่ขึ้นรูปได้



รูปที่ 6 เส้นใย PLA ที่ขึ้นรูปได้

4. ผลการศึกษา

การทดสอบพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ขึ้นรูปพลาสติก 3 มิติ ในห้องปฏิบัติการพอลิเมอร์และเส้นใย เป็นพอลิเมอร์ชนิด PLA เกรดใช้สำหรับการผลิตเส้นพลาสติก 3 มิติ โดยสมบัติการไหลตัว (MFI) ผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 1 ผลการทดสอบพบว่า PLA เกรด 4043D มีค่า MFI ที่สูงขึ้นตามอุณหภูมิในการทดสอบ ทำให้ทราบว่าการเพิ่มอุณหภูมิมีผลต่อการไหลของพอลิเมอร์เป็นอย่างมาก แม้ว่าอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเมอร์จะมี 150°C ซึ่งจำเป็นต้องมีการใช้อุณหภูมิประมาณ 230°C จึงจะได้มีค่า MFI ประมาณ 25 กรัม/10 นาที ซึ่งเหมาะสมในการผลิตเส้นใยยาวต่อเนื่อง (filament)

ตารางที่ 1 ค่า Melt Flow Index ของเม็ด PLA 4043D ที่อุณหภูมิทดสอบต่าง ๆ

อุณหภูมิทดสอบ	average (g/10min)
210°C	13.66
230°C	25.06
240°C	38.48

เส้นใย 3 มิติ ที่ขึ้นรูปในห้องปฏิบัติการฯ โดยขึ้นรูปให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 1.75 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นเส้นใยจาก PLA โดยไม่ได้ผสมสารเติมแต่งใดเพิ่มเติม โดยการทดสอบเส้นพลาสติก 3 มิติ โดยตัดเส้นให้มีความยาว 50 เซนติเมตร แล้วนำมาชั่งน้ำหนัก จะได้น้ำหนักเท่ากับ 1.246 กรัม/50 เซนติเมตร ตามตารางที่ 2 โดยมีค่าเท่ากับ 2.492 กรัม/เมตร โดยน้ำหนักเส้นพลาสติก 3 มิติ จะสามารถนำไปใช้ในการคำนวณในหาขนาดของเส้นใยได้ โดยเทียบกับความเร็วหมุนเก็บ

ในการทดสอบเครื่องที่ได้รับการปรับแต่งโปรแกรม ตามตารางที่ 3 ทดสอบการใช้งานอัตราการไหลโดยมวล ด้วยการตั้งอัตราการป้อนเส้นใยจากโปรแกรม 15 มิลลิเมตร/นาที โดยใช้อุณหภูมิ 230 และ 240°C โดยเส้นใยที่ถูกอัดรีดจาก die จะนำไปชั่งน้ำหนักจากการอัดรีด

1 นาที โดยผลจากการใช้เครื่องอัดรีด พบว่ามีปัญหาในการอัดรีด ซึ่งสังเกตได้ว่ามีการกระตุกของเส้นใยขณะชุดอัดทำงาน ทำให้มีพอลิเมอร์ที่ผ่าน die ได้มีค่าที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะอุณหภูมิต่ำ (230°C) จึงทำให้ทราบว่าอุณหภูมิในการอัดรีดที่เป็นไปอย่างต่อเนื่องมีการกระตุกน้อยที่สุดคือ ที่อุณหภูมิ 240°C ซึ่งใช้ในการผลิตเส้นใยต่อไป

ตารางที่ 2 การทดสอบน้ำหนักของเส้นพลาสติก 3D โดยตัดยาวเส้น 50 เซนติเมตร

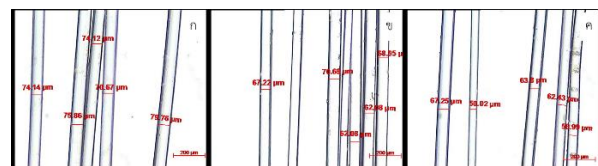
	Weight (g)
1	1.5261
2	1.5054
3	1.5423
average	1.5246

ตารางที่ 3 การทดสอบอัตราการไหลโดยมวล (กรัม) ที่ความเร็วปรับตั้งเครื่อง 15 เซนติเมตร/นาที จับเวลา 1 นาที

	น้ำหนักพอลิเมอร์ (กรัม) ที่อุณหภูมิปรับตั้ง Die (°C)		
	230	230	240
1	0.3742	0.269	0.4226
2	0.3475	0.2496	0.4195
3	0.3755	-	0.4316
average	0.365733	0.2593	0.424567
	ไม่กระตุก	กระตุก	ไม่กระตุก

เส้นใยที่ขึ้นรูปได้จากความเร็วในการอัดรีด 15 เซนติเมตร/นาที อุณหภูมิ die ที่ 240°C ใช้ความเร็วในการหมุนเก็บที่ 50, 75 และ 100 เมตร/นาที โดยเส้นใยที่ขึ้นรูปได้ดังรูปที่ 6 และนำเส้นใยที่ขึ้นรูปได้มาทดสอบสมบัติต่าง ๆ

เส้นใยที่ขึ้นรูปได้นำมาทดสอบลักษณะของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical microscope: OM) Olympus CX41 เก็บภาพด้วย CCD และวัดขนาดเส้นใยด้วยโปรแกรม AxioVision Rel. 4.8



รูปที่ 7 เส้นใย PLA จากเส้นพลาสติก 3D ที่ขึ้นรูปในห้องปฏิบัติการที่ความเร็ว 50 (ก), 75 (ข) และ 100 (ค) เมตร/นาที

ตารางที่ 4 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใย PLA จากเส้นพลาสติก 3 มิติ ที่ขึ้นรูปในห้องปฏิบัติการ ที่ความเร็ว 50, 75 และ 100 เมตร/นาที

Spinning speed (m/min)	average (micron)
50 m/min	74.91
75 m/min	66.20
100 m/min	60.09

เส้นใย PLA ที่ขึ้นรูปได้ เส้นใยมีลักษณะใส เรียบ และกลม โดยความเร็วหมุนเก็บที่สูงขึ้น ด้วยอัตราการไหลโดยมวลคงที่ เส้นใยจะมีขนาดที่เล็กลงจาก 74.91, 66.20 และ 60.09 ไมโครเมตร ที่ความเร็วหมุนเก็บ 50, 75 และ 100 เมตร/นาที ตามลำดับ

ตารางที่ 5 ความแข็งแรงของเส้นใย PLA ที่ขึ้นรูปได้

Spinning speed (m/min)	Max force (cN)	Diameter (micron)	Stress ($\times 10^6 \text{ N/m}^2$, MPa)	Elongation (%)
50 m/min	51.26	74.91	91.37	488.30
75 m/min	45.11	66.20	94.89	457.60
100 m/min	41.58	60.09	124.94	439.60

โดยที่ Pa (pascal): stress value = N/m

การทดสอบความแข็งแรงของเส้นใย ตามผลทดสอบตารางที่ 5 ความเค้น (stress) จะมีค่าที่สูงขึ้นเมื่อมีความเร็วหมุนเก็บที่สูงขึ้น การยืดตัวที่จุดขาด (elongation) นั้นมีค่าที่ลดลง ซึ่งเป็นสมบัติโดยทั่วไปของพอลิเมอร์เมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นเส้นใย ทั้งที่เป็น polypropylene, nylon และ polyester

โดยความเร็วหมุนเก็บที่ต่ำและไม่ได้รับการลดขนาด เส้นใยที่ขึ้นรูปได้จะมีลักษณะที่เป็น LOY (low orientation) เส้นใยจำเป็นต้องมีผ่านขั้นตอนการลดขนาด และการปรับสภาพด้วยความร้อน เส้นใยที่ได้จึงจะสามารถใช้งานได้ ซึ่งสมบัติความแข็งแรงและการยืดตัวเป็นสมบัติที่สำคัญ

การเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลตามความยาวของเส้นใย ทำการทดสอบได้จากเครื่อง Sonic modulus tester ผลการทดสอบตามตารางที่ 6 เป็นไปตามสมบัติของเส้นใยที่มีการขึ้นรูปด้วยความเร็วหมุนเก็บที่แตกต่างกัน ในพอลิเมอร์ชนิดเดียวกัน ความเร็วหมุนเก็บสูงจะมีผลทำให้การเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลมีค่าสูงขึ้น โดยเส้นใยจากการขึ้นรูปเส้นพลาสติก 3 มิติ (PLA) จะมีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกัน

สมบัติการหดตัวของเส้นใยที่ขึ้นรูปได้ที่ความเร็วต่าง ๆ ดังตารางที่ 7 พบว่าเส้นใยที่มีการหมุนเก็บที่สูงขึ้น การเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลที่สูงขึ้น จะมีสมบัติการหดตัวด้วยความร้อนที่สูงขึ้นในแนวทางเดียวกัน โดยการหดตัวของเส้นใยจะแสดงถึงลักษณะการคงรูปในสถานะ

การทดสอบ คือความร้อน ดังนั้นการนำเส้นใยที่ขึ้นรูปได้ผ่านกระบวนการที่เหมาะสม จะสามารถทำให้เส้นใยคงรูปด้วยความร้อนได้ดีขึ้นซึ่ง หากต้องการพัฒนาเครื่องฯ ต่อไป เครื่องมือที่สำคัญคือชุด heat setting

ตารางที่ 6 ค่า Sonic velocity และ sonic modulus ของเส้นใย PLA ที่ขึ้นรูปได้

Spinning speed (m/min)	Sonic Velocity (km/sec)	Sonic Modulus (gram/denier)
50	1.25	17.66
75	1.31	19.39
100	1.68	31.89

ตารางที่ 7 ค่าการหดตัว (%Shrinkage) ของเส้นใย PLA ที่ขึ้นรูปได้

Spinning speed (m/min)	average (%Shrinkage)
50	34.90
75	44.57
100	55.86

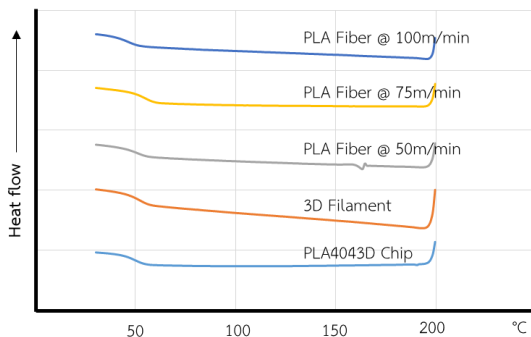
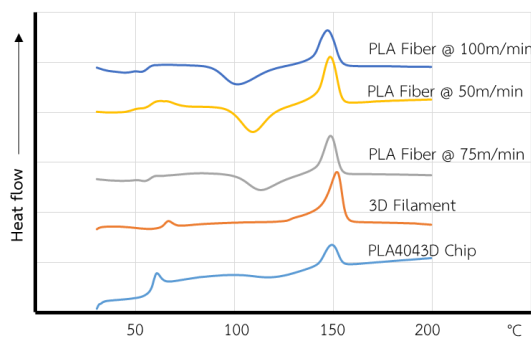
ตารางที่ 8 สมบัติเชิงความร้อนของพอลิเมอร์และเส้นใย PLA ที่ขึ้นรูปได้

	Peak (°C)	Onset (°C)	Area (J/g)	Crystallinity (%)
PLA4043D Chip	151.50	144.20	30.38	32.67
3D Filament	149.20	143.10	9.91	10.66
Fiber 50 m/min	148.20	142.20	17.67	19.00
Fiber 75 m/min	147.90	142.40	22.21	23.88
Fiber 100 m/min	146.40	139.80	19.95	21.45

การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของทั้งพอลิเมอร์และเส้นใยที่ขึ้นรูปได้ เป็นสมบัติที่สำคัญที่บ่งบอกถึงการใช้งานในสถานะต่าง ๆ การทดสอบด้วย DSC เม็ด PLA เส้นพลาสติก 3 มิติที่ขึ้นรูปได้ และเส้นใยที่ขึ้นรูปได้ ตามตารางที่ 8 มีค่าอุณหภูมิการหลอมตัว (melting point) ประมาณ 150°C ที่มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย แต่ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ลดลง ซึ่งเป็นผลของการผ่านความร้อนและกระบวนการขึ้นรูปเส้นใย โดยเส้นใย 3 มิติ จะมีการขึ้นรูปโดยการใช้อ่างน้ำ เส้นพลาสติก 3 มิติ จะถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้ความเป็นผลึกที่ต่ำคือ 10.66% แต่อย่างไรการขึ้นรูปเส้นใยจะทำให้มีความเป็นผลึกที่สูงขึ้น ด้วยการเย็นตัว

ของเส้นใยที่ผ่าน die เป็นไปตามอุณหภูมิของอากาศ (ห้องปฏิบัติการ) โดยค่า heat of fusion ของ 100% crystalline PLA มีค่าเท่ากับ 93 จูล/กรัม [4]

ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงความร้อน ตามรูปที่ 8 ซึ่งเป็น DSC Thermogram ทั้งเม็ดพอลิเมอร์ เส้นพลาสติก 3 มิติ และเส้นใยที่ขึ้นรูปได้ พบว่าพฤติกรรมที่เกิดขึ้นพบว่ามีความแตกต่างกัน ในส่วนการคายความร้อนก่อนการเปลี่ยนแปลงจากของแข็งเป็นของเหลว ลักษณะจะมีมากขึ้นเมื่อมีการม้วนเก็บที่สูงขึ้น ซึ่งพฤติกรรมนี้ เป็นการแสดงให้เห็นว่า ระบบของพอลิเมอร์มีการคายความร้อน ซึ่งสามารถนำไปใช้พิจารณาในการผลิตต่อไป



รูปที่ 8 DSC Thermogram ของเม็ด PLA, เส้น 3D และเส้นใย PLA ที่ขึ้นรูปได้

5. สรุปผลการพัฒนาเครื่องขึ้นรูปเส้นใยจากระบบอัตโนมัติ เครื่องพิมพ์ 3 มิติ และเส้นใยที่ขึ้นรูปได้

การศึกษาทั้งในการปรับแต่งอุปกรณ์การอัดรีดจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ การขึ้นรูปเส้นพลาสติก 3 มิติในห้องปฏิบัติการพอลิเมอร์และเส้นใย และการขึ้นรูปเส้นใยที่ได้ เครื่องมือที่ได้รับการปรับแต่งให้เหมาะสมกับการขึ้นรูปเส้นใย ซึ่งเป็นเส้นใยจากระบบการผลิตเส้นใยแบบหลอมเหลว (melt spinning process) ซึ่งการศึกษาในสาขาวิชานี้เป็นอย่างจำกัด ด้วยเครื่องมือที่มีราคาสูง การศึกษาครั้งนี้เป็นการใช้เครื่องที่สามารถผลิตได้เอง

ในงบประมาณไม่สูงมากนัก โดยมีการปรับแต่งให้เหมาะสมในการเรียนรู้สาขาพอลิเมอร์และเส้นใย ซึ่งเส้นใยที่ขึ้นรูปได้มีลักษณะและสมบัติที่เพียงพอในการศึกษา อย่างไรก็ตามเครื่องมือที่สำคัญคือ ส่วนการลดขนาด (drawing unit) และเครื่องม้วนเก็บเส้นใย (filament winding machine) ก็เป็นส่วนที่สำคัญ ซึ่งการศึกษาในครั้งนี้ไม่ได้พัฒนา ซึ่งต้องมีการพัฒนาด้วยวัสดุและเครื่องมือที่เหมาะสมต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาในครั้งนี้ได้ทุนสนับสนุนจาก เงินรายได้สะสมคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ประจำปี 2558

เอกสารอ้างอิง

- [1] V.B. Gupta and V.K. Kothari (ed.), *Manufactured Fibre Technology*, Chapman & Hall India, printed in Great Britain, 1997.
- [2] NatureWorks, Ingeo™ Biopolymer 4043D Technical Data Sheet, www.natureworks.com
- [3] Anna Kazianus France, *Make: 3D Printing*, Maker Media, Inc., Sebastopol, CA, 2014.
- [4] L.-T. Lim et al., "Processing Technologies for Poly(lactic acid)", *Progress in Polymer Science*, 33 (2008), 820–852.

ผลิตภัณฑ์ผนังหลายชั้นจากการขึ้นรูปแบบหมุนในขั้นตอนเดียว Multi-Layers Products from One Step Rotational Molding

ณรงค์ชัย โอเจริญ* ศุภกิตต์ เข้มมงคล ประสิทธิ์ วิษาศรี ไกรวุฒิ ตอกัดตา และ เอกคินัย จันทร์ศรี
ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
E-mail: narongchai.o@en.mutt.ac.th*

บทคัดย่อ

จากข้อจำกัดในการเลือกใช้วัสดุดิบในอุตสาหกรรมขึ้นรูปพลาสติกด้วยการหมุนแม่พิมพ์ ทำให้นักวิจัยต่างหาวิธีทางเทคนิคใหม่ๆมาเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ผลิตในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน การใช้เทคนิคในการทำผลิตภัณฑ์ที่มีผนัง 2 ชั้นก็เป็นอีกวิธีหนึ่ง ซึ่งโดยทั่วไปทั่วไปแล้วจำเป็นต้องใช้เครื่องมือเฉพาะทางบางชนิด ที่มีราคาค่อนข้างสูง จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจสำหรับนักวิจัยที่จะหาเทคนิคอย่างง่าย ไม่ซับซ้อน ราคาไม่แพง ไม่ต้องใช้เครื่องมือเฉพาะทางใดให้ยุ่งยาก ในโครงการวิจัยนี้จึงได้ทดลองขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีผนัง 2 ชั้น ด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนที่พัฒนาขึ้นในห้องวิจัยการขึ้นรูปพลาสติก เรียกว่าการขึ้นรูปแบบหมุนในขั้นตอนเดียว (One Step Rotational Molding) จากผลการศึกษาเบื้องต้นพบว่า จุดหลอมเหลว ขนาดและรูปร่างของอนุภาควัสดุที่ใช้ขึ้นรูปล้วนเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน รอบการหมุนของเครื่องขึ้นรูปน่าจะส่งผลกระทบต่อกระจายความหนาของชั้นงานที่ได้ ซึ่งน่าจะทำให้วัสดุที่ขึ้นรูปด้วยการหมุนได้ยากมีแนวโน้มที่จะปรับปรุงให้สามารถขึ้นรูปได้ในที่สุด

คำสำคัญ: การขึ้นรูปแบบหมุนขั้นตอนเดียว ผลิตภัณฑ์ผนังหลายชั้น รูปร่าง และขนาดของอนุภาค

1. บทนำ

กระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุน (Plastic Rotational Molding) เป็นกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกวิธีหนึ่งสำหรับผลิตภัณฑ์ท่อกว้างและมีขนาดค่อนข้างใหญ่ เช่น ถังน้ำพลาสติก ถังบำบัดน้ำเสีย เครื่องเล่นของเด็กกลางแจ้ง เป็นต้น โดยมีจุดเด่นหลายประการเช่น มีราคาเครื่องจักรและแม่พิมพ์ค่อนข้างถูกเมื่อเทียบกับกระบวนการผลิตแบบอื่นๆ มีเทคโนโลยีที่ง่าย ไม่ซับซ้อนสำหรับการขึ้นรูป ไม่ต้องการแรงงานที่มีทักษะมากนัก ฯลฯ แต่ก็มีข้อจำกัดหลายประการเช่น กระบวนการผลิตใช้เวลาค่อนข้างนาน ทำให้มีกำลังการผลิตต่ำ มีวัสดุให้เลือกใช้ไม่มากนัก และวัสดุที่ใช้จำเป็นต้องใช้ในรูปแบบของผงพลาสติก ทำให้มีต้นทุนวัสดุเพิ่มขึ้น และจากการที่วัสดุที่เลือกใช้ไม่มากนัก ทำให้มีข้อจำกัดในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์บางอย่าง เช่นในโครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงให้ผิวชิ้นงานให้มีความนิ่มมากกว่าการใช้พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) แบบที่ถูกใช้ในอุตสาหกรรมการขึ้น

รูปแบบหมุนทั่วไป โดยจะทำการขึ้นรูปแบบหมุนโดยใช้ขั้นตอนเดียวเพื่อให้ได้ผนังสองชั้น (Double walls from One Step Process) โดยใช้วัสดุสองชนิดแตกต่างกัน โดยที่ชั้นนอกจะเป็นวัสดุที่มีความ

นิ่มคล้ายยางซึ่งในงานวิจัยนี้ทดลองใช้วัสดุในกลุ่มเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Elastomer; TPE) และ เอทิลีนไวนิลอะซิเตท (Ethylene vinyl acetate ; EVA) แตกต่างกัน 3 ชนิด ที่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน ในขณะที่ชั้นในจะเป็นวัสดุพลาสติกชนิด LLDPE เกรดทางการค้าสำหรับการขึ้นรูปแบบหมุน โดยจะใส่พลาสติกทั้งสองชนิดลงในแม่พิมพ์พร้อมกัน จากนั้นเมื่อให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ขณะที่หมุน น่าจะทำให้เกิดการแยกชั้นของวัสดุทั้งสองได้ซึ่งเป็นกระบวนการที่ไม่ต้องใช้เครื่องมือหรือขั้นตอนพิเศษใดๆ เพียงแต่ใช้ขั้นตอนขึ้นรูปแบบผนังชั้นเดียวตามปกติทั่วไป โดยอาศัยสมบัติความแตกต่างของการไหลขณะที่เป็นของแข็ง (Solid State) และของเหลว (Melt State) ภายในแม่พิมพ์ระหว่างการขึ้นรูป[1]

2. วิธีการทดลอง

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ในการดำเนินงานครั้งนี้ได้ใช้ผงพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นตรง (Linear Low Density Polyethylene; LLDPE) เกรด M3204RUP จากบริษัท Thai Polyethylene Co., Ltd. ซึ่งมีการผสมสารเพิ่มความทนทานต่อแสงแดดหรือรังสีแล้ว และใช้สำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนโดยเฉพาะมีค่าดัชนีการไหลเท่ากับ 4 ที่อุณหภูมิทดสอบ 190°C น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม เป็นวัสดุชั้นใน และใช้วัสดุที่มีลักษณะนิ่ม และยืดหยุ่นได้ดีกว่า LLDPE ในการทดลองให้ขึ้นรูปเป็นผิวชั้นนอกได้แก่ EVA โดยวัสดุชั้นนอกชนิด EVA ได้รับการสนับสนุนจาก บริษัท โกลบอล คอนเน็คชั่นส์ จำกัด (มหาชน) และทำการบดลดขนาดและคัดขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า 500 ไมโครเมตร

2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย

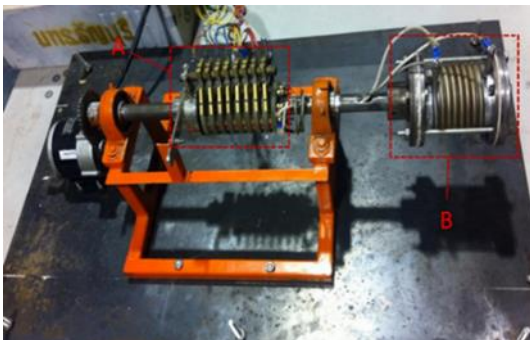
2.2.1 เครื่องทดสอบการไหลแบบหมุนแกนเดียว (Axial Powder Flow Apparatus)

ทดสอบสมบัติการไหลขณะขึ้นรูปแบบหมุนด้วยเครื่องทดสอบการไหลแบบหมุนแกนเดียว [1] ที่พัฒนาขึ้นมาใช้งานเองในห้องวิจัยการขึ้น

รูปพลาสติก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.ธัญบุรี ดังแสดงในรูปที่ 1 เพื่อทดสอบความสามารถในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนสำหรับพลาสติกชนิดต่างๆ โดยมีหลักการพื้นฐานของการทำงานได้แก่การทำให้ตัวอย่างเทอร์โมพลาสติก (รูปทรงเริ่มต้นที่เป็นเม็ด, ผง หรือ ชิ้นย่อย) เปลี่ยนสภาวะในรูปแบบของเหลวโดยใช้ความร้อนในแม่พิมพ์ทรงกระบอกที่หมุนในแนวนอน ที่สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศภายในแม่พิมพ์ขณะที่ให้ความร้อนได้ และสามารถมองเห็นการไหลและการเปลี่ยนแปลงสถานะของวัสดุในแม่พิมพ์ขณะที่ทำการทดสอบได้ และยังสามารถบันทึกภาพขณะทดสอบได้ทั้งเป็นภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหว สามารถปรับรอบความเร็วในการหมุนขณะทดสอบได้จาก 0-360 รอบต่อนาที สามารถเพิ่มอุณหภูมิในการทดสอบได้ถึง 400 °C โดยใช้อุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าชนิดเข็มขัดให้ความร้อนขนาด 2500 วัตต์

2.2.2 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุน (Rotational Molding)

เป็นเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิด Shuttle-Style-Machine ออกแบบและจัดสร้างขึ้นใช้งานในภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี [2] ซึ่งใช้แก๊สหุงต้ม (Liquid Petroleum Gas; LPG) เป็นเชื้อเพลิง สามารถให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ขณะขึ้นรูปได้สูงถึง 240 °C แสดงได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 เครื่องทดสอบสมบัติการไหลแบบหมุนแกนเดียว (Axial Powder Flow Apparatus)



รูปที่ 2 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิด Shuttle-Style

2.2.3 เครื่องทดสอบอัตราการหลอม (Sintering Rate)

เครื่องทดสอบอัตราการหลอมประกอบด้วย 3 ส่วนหลักได้แก่ ก) ส่วนการให้ความร้อน ซึ่งเครื่องนี้สามารถให้ความร้อนแก่วัสดุที่จะศึกษาได้สูงถึง 350 °C ข) ส่วนการบันทึกภาพและประมวลผล มีกำลังขยายสูงสูงถึง 200 เท่า และใช้คอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ ImageJ ในการประมวลผลจากภาพที่บันทึก ซึ่งสามารถบันทึกได้ทั้งภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหว ค) ส่วนของการวัดและบันทึกค่าอุณหภูมิ สามารถเลือกชนิดหัววัดค่าอุณหภูมิได้หลายชนิดตามช่วงอุณหภูมิที่ต้องการ และสามารถบันทึกข้อมูลอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงได้มากกว่า 5 ข้อมูลต่อวินาที ดังแสดงในรูปที่ 3

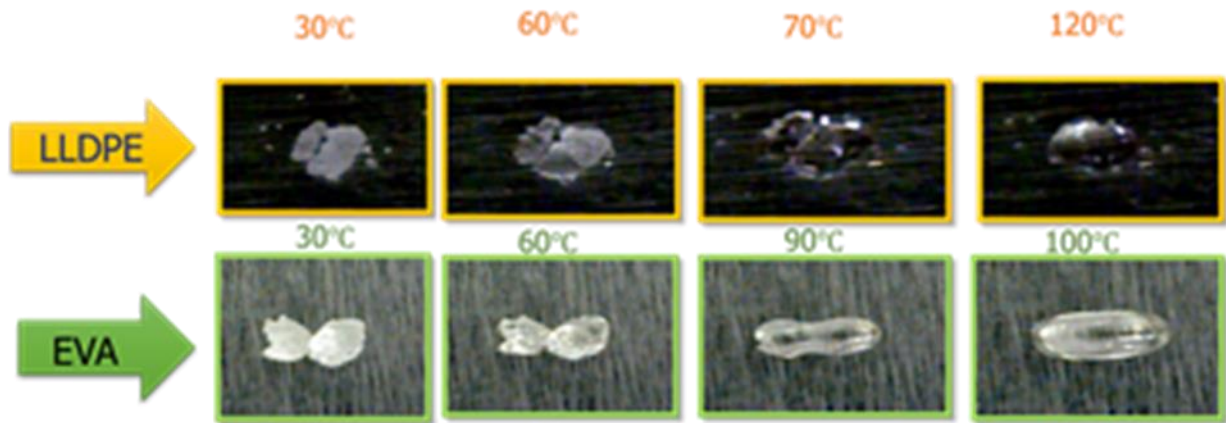


รูปที่ 3 เครื่องมือวัดอัตราการหลอมของพลาสติก

3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

3.1 อัตราการหลอม

จากรูปที่ 4 และตารางที่ 1 แสดงค่าอุณหภูมิการหลอมละลายที่สังเกตได้จากการทดลองจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า EVA ล้วนแต่เป็นวัสดุที่หลอมละลายได้ง่ายกว่า LLDPE ซึ่งอาจจะทำให้ยากกว่าในการพยายามขึ้นรูปวัสดุโดยให้ LLDPE อยู่ชั้นใน เพราะจากงานวิจัยของเอกตินัยและณรงค์ชัย [1,3] ได้อธิบายไว้ว่าในการขึ้นรูปแบบหมุนด้วยวัสดุ 2 ชนิดในชั้นตอนเดียว วัสดุชั้นในควรมีค่าอุณหภูมิการหลอมละลายสูงกว่าวัสดุที่เป็นชั้นนอก ซึ่งจะทำให้วัสดุที่หลอมละลายง่ายกว่าเกิดการหลอมละลายและติดผนังแม่พิมพ์ก่อน จากนั้นเมื่ออุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ที่ยังสูงจะทำให้วัสดุอีกชนิดหนึ่งซึ่งหลอมละลายยากกว่าเกิดการหลอมละลายและไหลเคลือบลงไปอีกเป็นชั้นที่สองหรือเป็นผิวชั้นใน ซึ่งในขั้นตอนต่อไปจะดำเนินการทดสอบวัสดุที่ต้องการใช้เป็นผิวชั้นนอกกว่ามีความสามารถในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการแบบหมุนหรือไม่ เนื่องจากการขึ้นรูปแบบหมุนนี้มีค่าแรงเฉือนต่ำมากเมื่อเทียบกับการขึ้นรูปพลาสติกด้วยการอัดรีด (Extrusion) หรือการฉีด (Injection Molding) [4]



รูปที่ 4 ค่าอุณหภูมิขณะที่วัสดุเกิดการหลอมแยกตามชนิดของวัสดุทดลอง

ตารางที่ 1 ค่าอุณหภูมิเริ่มหลอมละลายของวัสดุแต่ละชนิด

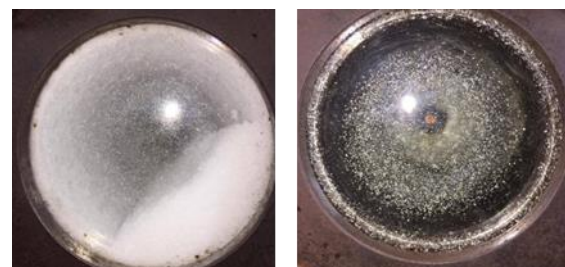
ลำดับที่	ชนิดของวัสดุ	อุณหภูมิเริ่มหลอมละลาย (°C)
1	Linear Low Density Polyethylene	70
2	Ethylene Vinyl Acetate	60

3.2 การทดลองขึ้นรูปด้วยเครื่องทดสอบการไหลแบบหมุนแกนเดียว

ในการทดลองหาความสามารถในการขึ้นรูปแบบหมุนของวัสดุพลาสติกชนิดต่างๆกันในโครงการวิจัยนี้ใช้เครื่องทดสอบการไหลแบบหมุนแกนเดียวเป็นเครื่องมือวิจัย เนื่องจากมีขนาดเล็กทำให้ใช้วัสดุเพื่อศึกษาไม่มากนัก และสามารถควบคุมและวัดค่าตัวแปรในการขึ้นรูปได้ง่าย โดยในงานวิจัยนี้ใช้แม่พิมพ์รูปทรงกระบอกแสดงข้อมูลที่ใช้ในการทดลองในตารางที่ 2 โดยที่ฝาแม่พิมพ์ด้านหน้าใช้กระจกทนความร้อนและรับแรงได้ดี เพื่อให้สามารถมองเห็นในแม่พิมพ์ขณะที่ขึ้นรูป ดังแสดงในภาพที่ 5 ขณะที่เริ่มให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ เพื่อให้ได้ความหนาขึ้นงานที่ 3 มม. จะต้องใช้วัสดุจำนวน 47 กรัม ในรูปของผงพลาสติกบรรจุใส่ในแม่พิมพ์ก่อนเริ่มการให้ความร้อน โดยควบคุมให้อุณหภูมิของอากาศภายในแม่พิมพ์เท่ากับ 190 °C ในทุกกรณี จากรูปที่ 5 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าวัสดุที่ใช้ยังคงเป็นของแข็งขาวขุ่นแต่เริ่มมีการเกาะติดกับผนังแม่พิมพ์แล้ว ในขณะที่ภาพขาวมือแสดงภายในแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 180 °C ที่ซึ่งวัสดุส่วนใหญ่กลายเป็นของเหลวที่เห็นได้อย่างชัดเจนว่าอยู่ในสภาวะอสัณฐาน (Amorphous phase)

ตารางที่ 2 ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องทดสอบการไหลแบบหมุนแกนเดียว

Component data	value
Mold dimensions (mm), wall thickness = 4 mm	D=63 ,h=90
Rotation speed, rpm	7-300
Resolution borescope, (pixel)	640 x 480
Max. temperature (°C)	400
Heating power 220 volt, (Watt)	2,000
Motor 24 volt, (Watt)	10



รูปที่ 5 วัสดุในแม่พิมพ์ขณะที่ให้ความร้อนระหว่างขึ้นรูป (ซ้าย) อุณหภูมิ 70 °C และ (ขวา) 180 °C

นอกจากนี้ยังพบว่า ในการใช้วัสดุตัวอย่าง EVA สามารถขึ้นรูปได้แต่พบว่า ชิ้นงานที่ได้ค่อนข้างนิ่มมาก และการกระจายความหนาของชิ้นงานไม่ค่อยดีนัก เมื่อเทียบกับการใช้ LLDPE (รูปที่ 6) ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากการไหลของวัสดุ EVA ในขณะที่เป็นของเหลวไม่เหมาะกับการขึ้นรูปแบบหมุนที่ไม่มีแรงกระทำใดมาช่วยในการไหลของวัสดุ จึงพบการกระจายความหนาที่ต่ำกว่าเมื่อใช้ LLDPE ขึ้นรูป ดังนั้นในขั้นต่อมาจะทำการผสมวัสดุ EVA เข้ากับ LLDPE อย่างละ 50%wt แล้วจึงทำการขึ้นรูป พบว่าในกรณีของ EVA/LLDPE 50/50 สามารถขึ้นรูปได้และมีการแยกชั้นระหว่างกันอย่างชัดเจนกล่าวคือผิวชิ้นงานนิ่มยืดหยุ่น แต่ผิวชั้นในค่อนข้างแข็งแบบ LLDPE ดังแสดงในภาพของชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปในรูปที่ 6

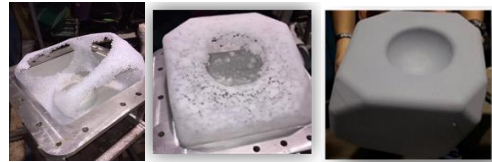


รูปที่ 6 ชิ้นงานหลังการขึ้นรูปด้วยเครื่องทดสอบการไหลแบบหมุนแกนเดียวของ neat LLDPE, neat EVA และ LLDPE/EVA ผสม ในอัตราส่วนผสม 50/50 (จากซ้ายไปขวาตามลำดับ)

3.3 การขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิดกระสวยเดี่ยว

หลังจากทดสอบในหัวข้อที่ 3.2 ทำให้ได้ข้อสรุปว่าจะทดลองขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จริงแบบภาคอุตสาหกรรม โดยใช้เครื่องขึ้นรูปแบบกระสวยเดี่ยว (Single Shuttle Style) ใช้แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปของเล่นเด็กเลือกใช้วัสดุ EVA เป็นผิวชิ้นงานชั้นนอก และใช้ LLDPE เป็นผิวชิ้นงานด้านใน โดยเริ่มที่อัตราส่วนผสมระหว่าง LLDPE:EVA เป็น 50:50 และอัตราผสมที่ 64:36 ดังแสดงในรูปที่ 7 รวมผลการทดลองขึ้นรูปที่อัตราส่วนของ EVA ที่ 100, 50 และ 36 %wt จากซ้ายไปขวาตามลำดับ โดยทุกกรณีเติมวัสดุผงน้ำหนักรวม 1 กิโลกรัม ใช้อุณหภูมิขึ้นรูปที่ 240 °C เป็นเวลา 30 นาที (อุณหภูมิของอากาศร้อนในเตาอบ ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของอากาศในแม่พิมพ์อยู่ระหว่าง 190-200 °C) และลดอุณหภูมิที่ผิวแม่พิมพ์จนเหลือ 60 °C จึงเปิดแม่พิมพ์เพื่อนำชิ้นงานออก โดยพบว่าสามารถขึ้นรูปได้ทุกกรณี แต่มีตำหนิที่ชิ้นงานแตกต่างกันดังนี้ ในกรณีที่มีสัดส่วนของ EVA ค่อนข้างเยอะ (40-50%) พบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้จะไม่ค่อยเต็มชิ้นงานที่ตำแหน่งกลางกล่อ่งเองมาจาก EVA มีความหนืดค่อนข้างสูงเมื่อเป็นของเหลว เปรียบเทียบกับ LLDPE ที่เป็นของเหลวจะไหลไปบนผิวแม่พิมพ์ได้ง่ายกว่า สอดคล้องกับผลในภาพที่ 7 แสดงการขึ้นรูปในแม่พิมพ์ของเล่นเด็กเหมือนกัน สภาวะการขึ้นรูปเหมือนกัน แตกต่างที่ใช้วัสดุ EVA 100% พบว่าไม่สามารถขึ้นรูปได้ ซึ่งขัดแย้งกับผลที่ทดสอบได้จากเครื่องทดสอบการไหลแบบหมุนแกนเดียวที่สามารถขึ้นรูปได้ น่าจะมีสาเหตุมาจากรูปทรงแม่พิมพ์ของเล่นเด็กมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมมากกว่าแม่พิมพ์ทรงกระบอกของเครื่องทดสอบการไหลแบบหมุนแกนเดียว ทำให้ EVA

ไหลลงไหลได้ยากกว่า และเมื่อใช้ปริมาณ EVA น้อยลง (ต่ำกว่า 40%) ก็พบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้เต็มชิ้นมากขึ้น แต่ก็เริ่มมีผิวชิ้นงานแข็งขึ้นจนกระทั่งเมื่อใช้ EVA น้อยกว่า 30% จะได้ชิ้นงานที่แทบจะไม่เหลือความนิ่มที่ผิวชิ้นงานเลย เหมือนกับขึ้นรูปด้วย LLDPE มากกว่า และผิวชิ้นงานบางจุดจะมีลักษณะเหมือนยางเกิดฉีกขาดเป็นรอยเล็กๆ ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากกรณีที่มี EVA น้อยเกินไปจนไม่สามารถกระจายได้ทั่วชิ้นงาน



รูปที่ 7 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิดกระสวยเดี่ยวของ neat EVA, LLDPE/ EVA ผสม ในอัตราส่วนผสม 50/50 และ 64/36 (จากซ้ายไปขวาตามลำดับ)

4. บทสรุป

จากการทดลองปรับปรุงผิวชิ้นงานจากการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุนแม่พิมพ์ในขั้นตอนเดียวสามารถทำได้จริงโดยพบว่าสามารถทำให้ผิวชิ้นงานนิ่มและยืดหยุ่นได้มากขึ้นโดยใช้วัสดุ LLDPE ผสมกับ EVA ในสัดส่วน LLDPE:EVA ที่ 64:36 จะได้ชิ้นงานที่มีความสมบูรณ์มากที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนด้านวัสดุจากบริษัท โกลบอล คอนเน็คชั่นส์ จำกัด (มหาชน)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Jansri E, O-Charoen N and Hamada H (2015). Polypropylene/Polyethylene hybrid in Rotational molding. In: Proceedings of the 12th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium (EMSES2015), Krabi, Thailand, pp. 257-261
- [2] สุภัทรา โพธิ์พวง, วิชระ อาภาณูวัตติ, จิรวุฒิ เกตุโรภาส, ณรงค์ชัย โอเจริญ, อติเทพ สหธรรมปกรณ์ และวิวัฒน์ ไชยนาพงษ์ (2541). การสร้างเครื่องขึ้นรูปพลาสติกแบบเหวี่ยง. การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 (วทท 24), กรุงเทพฯ, ประเทศไทย, หน้า 940-941
- [3] O-Charoen N and Jansri E (2016). PP/PE Bi-layers One Step Rotational Molding. In: Proceedings of the 13th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium (EMSES2016), Udon Thani, Thailand.
- [4] Nugent PJ and Crawford R J (1992). Rotational Molding of Plastics, Crawford R J. ed., John Wiley and Sons Inc., New York.

การประเมินการฝึกอบรมด้านความปลอดภัยในรูปแบบ “การฝึกอบรมที่หน้างาน” Evaluation of Safety Training Programme Using “On The Job Training”

ศิริัญญา สรรพานิช^{1*} และ ดนัย วันทนากร²

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและการบริหารงานก่อสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

²ภาควิชาวิศวกรรมโยธาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

E-mail: sirunya_sun@hotmail.com*

บทคัดย่อ

อุบัติเหตุจากการทำงานในการก่อสร้างมีสถิติการเกิดขึ้นค่อนข้างมาก เมื่อเกิดอุบัติเหตุขึ้นแล้วย่อมส่งผลให้เกิดความเสียหายทั้งในทางตรงและทางอ้อม ซึ่งทำให้เกิดผลเสียต่อการดำเนินงาน อุบัติเหตุจากการทำงานนั้นมักมีสาเหตุหลักมาจากการรู้เท่าไม่ถึงการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน สภาพแวดล้อมของสถานที่ และอุปกรณ์ชำรุด รวมทั้งการไม่กำหนดมาตรการป้องกันและควบคุมอันตรายให้เหมาะสมและชัดเจน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเข้าใจของพนักงานก่อสร้างจากการฝึกอบรมด้านความปลอดภัยก่อนเริ่มปฏิบัติงาน และสำรวจการเกิดอุบัติเหตุในที่ทำงานเพื่อเปรียบเทียบสถิติทั้งก่อนและหลังการฝึกอบรมของกลุ่มตัวอย่างจำนวน 100 คน ผลการศึกษาพบว่าภายหลังจากที่พนักงานได้ผ่านการฝึกอบรมที่หน้างานแล้ว ทำให้เกิดความรู้ความเข้าใจด้านความปลอดภัยเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 60 เป็นร้อยละ 72 และสถิติการเกิดอุบัติเหตุลดลงจากร้อยละ 60 โดยลดลงจากเดิม 102 ครั้ง เหลือเพียง 40 ครั้ง

คำสำคัญ: การฝึกอบรมที่หน้างาน, คนงานก่อสร้าง, การประเมินความปลอดภัย, อุบัติเหตุในงานก่อสร้าง

1. บทนำ

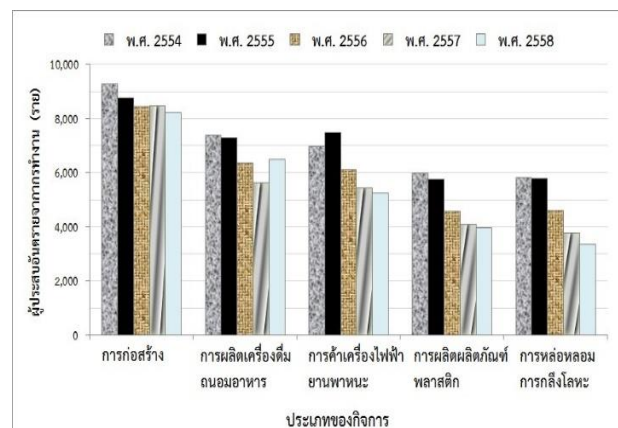
การก่อสร้างของไทยในปัจจุบันมีความก้าวหน้าไปค่อนข้างมาก ดังจะเห็นได้ว่ามีการนำเทคโนโลยี และเครื่องมืออันทันสมัยมาดำเนินการเพื่อช่วยให้สามารถก่อสร้างโครงการได้รวดเร็ว และมีต้นทุนที่ต่ำ อย่างไรก็ตามการก่อสร้างเป็นงานเฉพาะตัวที่แต่ละโครงการจะมีลักษณะการดำเนินงานที่ไม่เหมือนกัน อีกทั้งต้องทำงานในที่โล่งแจ้งภายใต้สภาวะอากาศที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งมีผู้ที่เกี่ยวข้องหลายฝ่ายรวมทั้งแรงงานฝีมือและไร้ฝีมือเข้าร่วมดำเนินการเป็นจำนวนมาก และมีการเคลื่อนย้ายแรงงานเหล่านั้นไปมาอยู่ตลอดเวลา นอกจากนี้แผนและขั้นตอนในการปฏิบัติงานไม่อาจจัดทำให้เป็นระบบระเบียบและเป็นมาตรฐานได้อย่างเด่นชัด สิ่งเหล่านี้เป็นเหตุให้บุคลากรในงานก่อสร้างโดยเฉพาะกลุ่มคนงานมีความเสี่ยงสูงที่จะประสบอุบัติเหตุจากการทำงานได้ง่ายกว่าการประกอบกิจการประเภทอื่นๆ เมื่ออุบัติเหตุเกิดขึ้นแล้วอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายมากมายทั้งในทางตรงและทางอ้อม ได้แก่ความเสียหายด้านทรัพย์สิน ค่ารักษาพยาบาลอันเนื่องจากการบาดเจ็บ การเจ็บป่วย หรือแม้กระทั่งความพิการ หรือการเสียชีวิตของคนงาน เป็นต้น ดังนั้นการจัดการความปลอดภัยในงานก่อสร้างที่ีจะช่วยทำให้สามารถป้องกันการเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้าง และสามารถลดจำนวนลงได้

การบริหารความปลอดภัยมีความสำคัญไม่น้อยไปกว่าการจัดการงานก่อสร้าง ทั้งนี้การกระตุ้นและสร้างจิตสำนึกด้านความปลอดภัย

ให้แก่ผู้ปฏิบัติงานมีอยู่หลากหลายวิธีเช่น การติดป้ายประกาศข่าวสารด้านความปลอดภัยไว้ที่หน่วยงาน การรณรงค์ให้ผู้ปฏิบัติงานใช้อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคล การจัดทำแผ่นป้ายแสดงสถิติอุบัติเหตุของหน่วยงาน และการประกวดคำขวัญด้านความปลอดภัย ฯลฯ แต่เป็นที่ทราบกันดีว่ากิจกรรมก่อสร้างเป็นงานพลวัตรที่มีความก้าวหน้าของโครงการ และมีการเปลี่ยนแปลงภายในสถานที่ทำงานอยู่ตลอดเวลา ทำให้การใช้วิธีการดังกล่าวข้างต้นไม่ค่อยได้ผลดี ด้วยเหตุนี้การฝึกอบรมและฝึกปฏิบัติที่หน้างาน (On the Job Training) จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่ผู้ปฏิบัติงานนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในโครงการก่อสร้าง อย่างไรก็ตามอุบัติเหตุในงานก่อสร้างก็ยังคงมีสถิติที่สูง รวมทั้งก่อให้เกิดความเสียหายและอันตรายที่ร้ายแรง และมีคนงานจำนวนมากที่ยังคงเสี่ยงต่อการเกิดอันตรายจากงานก่อสร้าง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการศึกษาเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการอบรมและฝึกปฏิบัติที่หน้างาน กับสถิติของอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นหลังจากที่ได้ทำการอบรมและฝึกปฏิบัติแล้ว อันจะช่วยให้ผู้บริหารโครงการก่อสร้างสามารถกำหนดมาตรการด้านความปลอดภัยในการทำงานได้อย่างเหมาะสม

2. ทฤษฎีด้านความปลอดภัย

งานก่อสร้างเป็นงานที่จัดว่าอยู่ในกลุ่มงานที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดอันตรายอย่างสูง จากข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเผยแพร่โดยสำนักงานประกันสังคม[1] ตั้งแต่ปี 2554-2558 โดยแยกตามประเภทของกิจการพบว่า งานก่อสร้างเป็นกิจการที่ลูกจ้างมีสถิติการประสบอันตรายจากการทำงานหรือเจ็บป่วยมากที่สุดเป็นอันดับหนึ่งเมื่อเทียบกับการทำงานในกิจการอื่นๆ



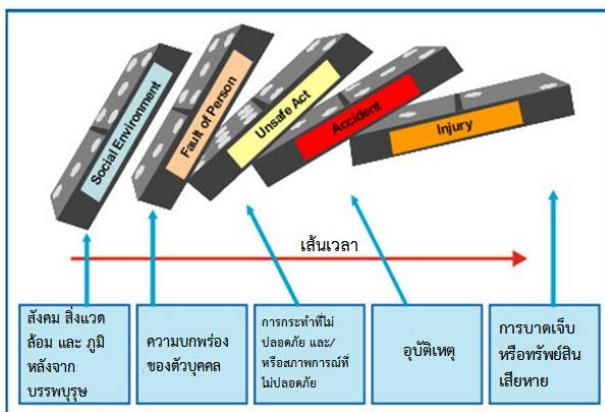
รูปที่ 1 สถิติการประสบอุบัติเหตุหรือเจ็บป่วยจากการทำงานของลูกจ้าง โดยจำแนกตามประเภทของกิจการที่มีอัตราสูงสุด 5 อันดับแรก

ถึงแม้จะสังเกตได้ว่าจำนวนการประสบอุบัติเหตุจากงานก่อสร้างในช่วง 5 ปีที่ผ่านมามีแนวโน้มลดลงโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 3 ต่อปี แต่จะเห็นได้จากตารางที่ 1 ว่าอัตราการได้รับอุบัติเหตุถึงแก่ความตายในการทำงานยังคงมีจำนวนที่สูงมากและมีแนวโน้มคงที่ โดยมีอัตราเฉลี่ยปีละ 79 ราย หรือคิดเป็นร้อยละ 12.66 ของจำนวนลูกจ้างที่ได้รับอุบัติเหตุถึงแก่ความตายของทุกกิจการรวมกัน

ตารางที่ 1 สถิติการได้รับอุบัติเหตุถึงแก่ความตายจากงานก่อสร้าง

ปี พ.ศ.	สถิติการประสบอุบัติเหตุในแต่ละปี (คน)		
	อุบัติเหตุที่เกิดขึ้นรวม	อุบัติเหตุถึงแก่ความตายรวม	อุบัติเหตุถึงแก่ความตายจากงานก่อสร้าง
2554	129,632	590	80
2555	131,826	717	74
2556	111,894	635	67
2557	100,234	603	94
2558	95,674	575	80
เฉลี่ย	113,852	624	79

อุบัติเหตุจากการทำงานนั้นเกิดจากสาเหตุหลัก 2 ประการคือ (1) เกิดจากการกระทำที่ไม่ปลอดภัย ซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับตัวผู้ปฏิบัติงานเอง เช่น การรู้เท่าไม่ถึงการณ์ การลัดขั้นตอนการทำงาน ความพลั้งเผลอ ความประมาท ความใจลอย การขาดจิตสำนึกด้านความปลอดภัย และ (2) สาเหตุจากสภาพการณ์ที่ไม่ปลอดภัยซึ่งก็คือสภาพแวดล้อมของสถานที่ทำงาน เช่น อุปกรณ์ต่างๆชำรุด หรือบกพร่อง เครื่องจักรไม่มีอุปกรณ์ป้องกันอันตราย คนงานไม่มีอุปกรณ์ป้องกันภัยส่วนบุคคล และการจัดวางสิ่งของไม่เป็นระเบียบ เป็นต้น [2]



รูปที่ 2 แนวทางในการป้องกันอุบัติเหตุตามทฤษฎีโดมิโน

Heinrich [3] ได้เสนอทฤษฎีโดมิโนด้วยการใช้โดมิโน 5 แห่งแทนลูกโซ่แห่งการเกิดอุบัติเหตุ ดังรูปที่ 2 ซึ่งเขาให้แนวคิดที่ว่า การป้องกันบุคคลไม่ให้ประสบกับอุบัติเหตุ จนเกิดการบาดเจ็บแก่ร่างกายหรือเสียชีวิตนั้น สามารถทำได้ด้วยการควบคุมอย่างมีประสิทธิภาพ โดยการขจัดการกระทำที่ไม่ปลอดภัย และสภาพการณ์ที่ไม่ปลอดภัยนั้นออกไป นั่นคือการดึงโดมิโนตัวกลาง (ตัวที่ 3) ออกไป ก็จะทำให้ผลขององค์ประกอบเบื้องต้น (ตัวที่ 1 & 2) ไม่ส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบที่อยู่

ตามหลัง (ตัวที่ 4 & 5) ดังนั้นอุบัติเหตุและการบาดเจ็บ รวมถึงการเสียชีวิต และความเสียหายต่างๆก็จะไม่เกิดขึ้น

เกสรา สุขสว่าง [4] ได้จัดแบ่งกระบวนการในการป้องกันการประสบอุบัติเหตุจากการทำงานออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การชี้ชัดถึงอันตราย ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ 3 ทางคืออันตรายจากบริเวณพื้นที่ทำงาน (Work area) เช่นความไม่เป็นระเบียบเรียบร้อย อันตรายจากวิธีการทำงาน (Work method) เช่นการบำรุงรักษาเครื่องจักรไม่ถี่ และอันตรายจากตัวบุคคล (Worker) เช่น การขาดความรู้เรื่องกฎแห่งความปลอดภัย การไม่ปฏิบัติตามกฎของความปลอดภัย การแต่งกายในการทำงานที่ไม่เหมาะสม และการไม่ใช้อุปกรณ์ป้องกันภัยส่วนบุคคล

ขั้นตอนที่ 2 ควบคุมอันตรายและการกระทำโดยการดำเนินงานต่างๆที่เป็นไปได้คือ ขจัด (Eliminate) นั่นคือขจัดแหล่งต้นตอของอันตรายที่เกิดขึ้น ควบคุม (Guard) หากไม่สามารถขจัดแหล่งต้นตอของอันตรายที่เกิดขึ้นได้ให้ควบคุมระดับความรุนแรงของอุบัติเหตุให้มีระดับต่ำสุด ตักเตือน (Warn) เป็นการออกกฎระเบียบและสร้างแรงจูงใจ และสุดท้ายคือรายงาน (Report) นั่นคือมีระบบการรายงานที่ดีสำหรับรายงานอันตรายต่างๆเพื่อหาสาเหตุและการป้องกันไม่ให้เกิดอันตรายซ้ำ

ขั้นตอนที่ 3 การป้องกันไม่ให้เกิดอุบัติเหตุซ้ำด้วยการวิเคราะห์ค้นหาสาเหตุและวิธีการป้องกัน การดำเนินการด้วยวิธีการที่ปลอดภัย การจัดการอบรมให้มีวิธีการทำงานที่ถูกต้องและคำนึงถึงความปลอดภัยเป็นหลัก

ขั้นตอนที่ 4 การติดตามผล (Follow up) เพื่อให้ได้ผลในทางที่ดีขึ้น โดยการป้องกันการเกิดอุบัติเหตุจากการทำงานนั้น ซึ่งมีข้อควรระมัดระวังอยู่ 3 ส่วนด้วยกัน คือ

1) การจัดการระบบทางวิศวกรรมความปลอดภัย โดยหมายถึงการใช้ความรู้ทางวิศวกรรม เพื่อออกแบบให้สภาพการทำงานมีความปลอดภัยมากที่สุด

2) การให้ความรู้เกี่ยวกับอุบัติเหตุ หมายถึง การให้การศึกษารวมถึงการฝึกอบรมพนักงาน ให้เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับสาเหตุการเกิดอุบัติเหตุจากการทำงาน และวิธีการป้องกันการเกิดอุบัติเหตุจากการทำงานนั้น

3) การวางระเบียบควบคุมดูแลสภาพการใช้งานเครื่องจักร โดยจัดแบ่งลำดับความรู้ความเข้าใจด้านความปลอดภัยในการทำงาน คือ ความรู้ ความเข้าใจ การประยุกต์ใช้ความรู้ การวิเคราะห์ปัญหาหน้างาน โดยนำทั้งหมดมาควบรวมกันเพื่อการทำงานที่มีประสิทธิภาพและปลอดภัย

3. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อประเมินความเข้าใจของคณาจารย์จากภาคการฝึกอบรมทางด้านความปลอดภัยก่อนเริ่มปฏิบัติงานและสำรวจอัตราการเกิดอุบัติเหตุในสถานที่ปฏิบัติงานเพื่อเปรียบเทียบสถิติทั้งก่อนและหลังการฝึกอบรม การศึกษาวิจัยนี้ได้ใช้กลุ่มตัวอย่างจำนวน 100 คน โดยเป็นกลุ่มคณาจารย์จากงานก่อสร้างในโครงการปรับปรุงภาพลักษณ์และระบบไฟฟ้าของสถานีบริการน้ำมัน วิธีการดำเนินงานแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เก็บสถิติการเกิดอุบัติเหตุในสถานที่ก่อสร้างที่เกิดขึ้นก่อนทำการฝึกอบรมด้านความปลอดภัยให้แก่กลุ่มคณาจารย์

ขั้นตอนที่ 2 ประเมินความรู้เบื้องต้นของคณาจารย์กลุ่มตัวอย่างก่อนเริ่มทำการฝึกอบรมด้วยการทำแบบทดสอบ โดยแบบทดสอบนั้นจะสอบถามในเรื่องความรู้ความเข้าใจพื้นฐานที่จำเป็นต่อการปฏิบัติงาน เช่น

ป้ายเตือน ป้ายแนะนำ อันตรายจากการทำงาน พดติกรรมที่ถูกต้องของผู้ปฏิบัติงาน

ขั้นตอนที่ 3 ทำการฝึกอบรมและฝึกปฏิบัติการทำงานอย่างปลอดภัยของคอนกรีตกลุ่มนี้ ดังแสดงในรูปที่ 3 - 4 หลังจากทีคนงานได้ผ่านการอบรมและฝึกปฏิบัติงานเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงใช้แบบทดสอบชุดเดิมทำการประเมินผลความรู้ความเข้าใจของคนงานกลุ่มนี้อีกครั้งเพื่อวิเคราะห์ผลว่ากลุ่มคนงานตัวอย่างมีความรู้ในการปฏิบัติงานดีขึ้นเพียงใด

ขั้นตอนที่ 4 เก็บรวบรวมสถิติการเกิดอุบัติเหตุที่เกิดขึ้น หลังจากทีคนงานกลุ่มตัวอย่างได้รับการฝึกอบรมด้านความปลอดภัยแล้ว

ขั้นตอนที่ 5 ทำการเปรียบเทียบจำนวนการเกิดอุบัติเหตุจากการปฏิบัติก่อนทีจะทำการฝึกอบรมด้านความปลอดภัยให้แก่คนงาน และหลังจากทีทำการฝึกอบรมแล้ว



รูปที่ 3 สภาพการทำงานก่อนการฝึกอบรมด้านความปลอดภัย



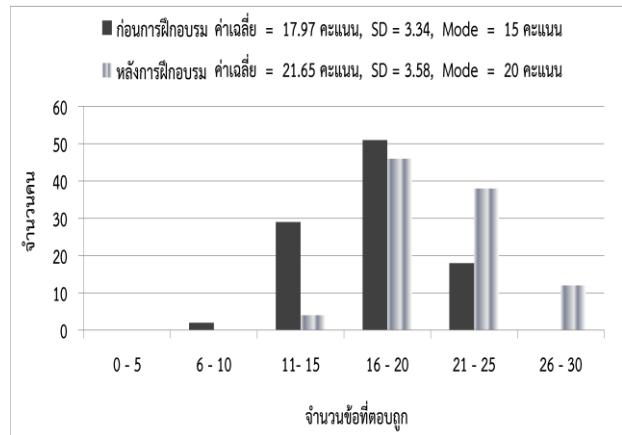
รูปที่ 4 สภาพการทำงานหลังจากที่มีการฝึกอบรมด้านความปลอดภัย

4. ผลการศึกษา

ในการศึกษาเรื่องการประเมินการฝึกอบรมด้านความปลอดภัยในรูปแบบ “การฝึกอบรมที่หน้างาน” นั้น ผลการศึกษาคือเป็นดังนี้

4.1 ความรู้ความเข้าใจพื้นฐานที่จำเป็นต่อการปฏิบัติงาน

ผลการเปรียบเทียบความรู้ความเข้าใจต่อการปฏิบัติงานให้เกิดความปลอดภัยของกลุ่มคนงานตัวอย่างดังรูปที่ 5 พบว่า ก่อนทีจะทำการฝึกอบรม คนงานมีความรู้ความเข้าใจเรื่องการทำงานด้วยความปลอดภัยอยู่ในช่วงคะแนนตั้งแต่ 9 - 25 คะแนน ทั้งนี้กลุ่มคนงานส่วนใหญ่มีความเข้าใจด้านความปลอดภัยอยู่ที่ 15 คะแนน โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 17.97 คะแนนจากคะแนนเต็ม 30 คะแนน แต่หลังจากทีได้รับการอบรมและฝึกปฏิบัติเบื้องต้นแล้ว กลุ่มคนงานมีความรู้ความเข้าใจในการทำงานด้วยความปลอดภัยเพิ่มขึ้นโดยมีคะแนนเบี่ยงไปทางขวาในช่วง 15 - 29 คะแนน และผู้ที่ตอบถูกส่วนใหญ่มีคะแนนเท่ากับ 20 โดยมีค่าเฉลี่ยของคะแนนเท่ากับ 21.65 หรือเพิ่มขึ้นจากก่อนทีจะได้รับการฝึกอบรมที่หน้างานโดยเฉลี่ยร้อยละ 20.48



รูปที่ 5 ผลเปรียบเทียบความเข้าใจด้านความปลอดภัยของคนงานก่อนและหลังการอบรมและฝึกปฏิบัติ

4.2 สถิติการเกิดอุบัติเหตุของคนงานจากปฏิบัติงาน

ผลการเปรียบเทียบจำนวนการเกิดอุบัติเหตุจากการปฏิบัติก่อนทีจะทำการฝึกอบรมด้านความปลอดภัยให้แก่คนงานก่อสร้าง และหลังจากทีได้ทำการฝึกอบรมแล้ว แสดงดังตารางที่ 2 จะพบว่าหลังจากทีคนงานผ่านการฝึกอบรมด้านการทำงานด้วยความปลอดภัยแล้ว อุบัติเหตุของทุกรายการมีอัตราการลดลงมากกว่าร้อยละ 50 หรืออีกนัยหนึ่งคือ การเกิดอุบัติเหตุโดยรวมในการปฏิบัติงานของคนงานก่อสร้างมีจำนวนลดลงจากเดิมถึงร้อยละ 60.78 โดยอุบัติเหตุทีลดลงมากที่สุดสองอันดับแรกคือ การถูกวัตถุสิ่งของมีคมบาด และจากการตกจากที่สูง ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าการอบรมและฝึกปฏิบัติงานให้แก่คนงานก่อนการทำงานจริงจะช่วยให้คนงานเกิดความรู้ความเข้าใจในการทำงานได้อย่างปลอดภัย อันเป็นผลให้จำนวนการประสบอุบัติเหตุลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุบัติเหตุทีมีความรุนแรงอันอาจทำให้งถึงแก่ทุพพลภาพหรือเสียชีวิต อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าอุบัติเหตุจากการลื่นหรือหกล้มยังคงมีอัตราการลดลงน้อยทีสุด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าตามธรรมชาติของโครงการก่อสร้างนั้น มักจะมีการวางวัสดุสิ่งของ และเครื่องมือต่างๆทีใช้สำหรับทำงานอยู่

โดยรอบพื้นที่โครงการ สภาพแวดล้อมที่ไม่เป็นระเบียบเรียบร้อยย่อมนำให้มีโอกาสที่จะเกิดการสะดุด หรือลื่นล้มได้ง่ายขึ้น

ตารางที่ 2 สถิติการเกิดอุบัติเหตุก่อนและหลังการฝึกอบรมด้านความปลอดภัย

รายการอุบัติเหตุ	ก่อนการฝึกอบรม	หลังการฝึกอบรมด้านความปลอดภัย	อัตราอุบัติเหตูลดลง (%)
ตกจากที่สูง	15	3	80.00
หกล้ม หรือลื่นล้ม	16	10	37.50
ไฟดูด	24	12	50.00
วัตถุสิ่งของมีคมบาด	13	1	92.31
สัมผัสของร้อนจัด	3	1	66.67
สัมผัสของเย็นจัด	0	0	0.00
ตะปูตำ	18	8	55.56
การสูดดมสารเคมี	13	5	61.54
รวม	102	40	60.78

5. สรุปผลการศึกษา

ภาคการก่อสร้างจัดเป็นกลุ่มกิจการที่มีการประสบอันตรายค่อนข้างสูง และคนงานจำนวนมากยังคงเสี่ยงต่อการได้รับอันตรายเหล่านั้น การเกิดอุบัติเหตุในแต่ละครั้งโดยเฉพาะอุบัติเหตุที่มีความรุนแรงย่อมก่อให้เกิดความสูญเสียมากมาย ทั้งชีวิต และทรัพย์สิน ดังนั้นการหามาตรการป้องกัน และวิธีการลดจำนวนอุบัติเหตุในงานก่อสร้าง จึงเป็นเรื่องที่จำเป็น และควรเอาใจใส่อย่างจริงจังเพื่อช่วยให้คนงานสามารถปฏิบัติงานได้อย่างปลอดภัย

ผลการประเมินการฝึกอบรมด้านความปลอดภัยในรูปแบบ “การฝึกอบรมที่หน้างาน” พบว่าหลังจากที่คนงานผ่านการอบรมและฝึกปฏิบัติด้านความปลอดภัยแล้ว อุบัติเหตุที่เกิดจากการทำงานมีสถิติที่ลดลงอย่างชัดเจนถึงร้อยละ 61 ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความรู้ความเข้าใจในการปฏิบัติงานด้วยความปลอดภัยที่เพิ่มขึ้นของกลุ่มคนงาน โดยจะเห็นได้ว่าภายหลังจากที่มีการฝึกอบรมด้านความปลอดภัยให้แก่กลุ่มตัวอย่างแล้ว ทำให้กลุ่มคนงานมีความรู้ความเข้าใจจากเดิมร้อยละ 60 หรือ 17.97 คะแนนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 72 หรือ 21.65 คะแนน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการฝึกอบรมด้านความปลอดภัยในรูปแบบ “การฝึกอบรมที่หน้างาน” สามารถทำให้กลุ่มตัวอย่างมีความรู้ความเข้าใจในการทำงานอย่างปลอดภัยได้ดีขึ้น อันส่งผลให้สถิติการเกิดอุบัติเหตุจากการทำงานลดลงตามไปด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผศ.ดร.दनัย วันทนากกร ที่ให้คำปรึกษาแนะนำ ตลอดจนตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆในงานวิจัยนี้ และประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า อันนับเป็นประสบการณ์ที่มีค่ายิ่ง

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อศักดิ์ชาย และคุณแม่สุภา สรรพานิช ที่คอยให้กำลังใจ เป็นที่ปรึกษาแนะนำมาด้วยดีโดยตลอด

เอกสารอ้างอิง

- [1] กลุ่มงานกำหนดอัตราเงินสมทบกองทุนเงินทดแทน, รายงานประจำปี กองทุนเงินทดแทน, สำนักงานกองทุนเงินทดแทน, สำนักงานประกันสังคม, กระทรวงแรงงาน, 2554 - 2558
- [2] วิฑูรย์ สิมะโชคดี, คู่มือความปลอดภัยสำหรับพนักงานใหม่, สำนักพิมพ์ ส.ส.ท., 2557
- [3] Heinrich, H. W., "The Domino Theory: An incident analysis tool", cited by Andrew McGiffert, <http://andrew.mcgiffert.id.au/blog/the-domino-theory-an-incident-analysis-tool/>, February 2013
- [4] เกสรฯ สุขสว่าง, ความสัมพันธ์ระหว่างจิตสำนึกกับสภาพความปลอดภัยของบุคลากรในโรงงานอุตสาหกรรมเซรามิก จังหวัดปทุมธานี, ปรียญานิพนธ์มหาบัณฑิต. (อุตสาหกรรมศึกษา), บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒประสานมิตร, 2535

การลดอาการปวดหลังของพนักงานบริษัทซีพีออลล์ จำกัด(มหาชน) (ศูนย์กระจายสินค้าเชียงใหม่) Reducing Lower Back Pain of Operators in CP ALL CO., LTD. (Chiang Mai Distribution Center)

ศุภลักษณ์ สุวรรณ* และ กิตติศักดิ์ พิทักษ์ทอง

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนอร์ท-เชียงใหม่

E-mail: supaluck@northcm.ac.th*

ES02

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดระดับความเสี่ยงของท่าทางการทำงานของพนักงานที่ทำงานในบริษัท ซีพี ออลล์ จำกัด(มหาชน) (ศูนย์กระจายสินค้าเชียงใหม่) ในกลุ่มตัวอย่าง เพศชาย จำนวน 62 คน จาก 3 แผนก (แผนกปฏิบัติการคลัง แผนกส่งมอบสินค้าและแผนกรับสินค้า) หลังจากการปรับปรุงวิธีการทำงานโดยการเพิ่มอุปกรณ์ช่วยในการทำงานแล้วผลที่ได้จากการประเมินความเสี่ยงด้านการยศาสตร์ด้วยวิธี RULA ในส่วน แผนกปฏิบัติการคลังในขั้นตอนการเคลื่อนย้ายสินค้ามายังพื้นที่จัดสินค้าและขั้นตอนการจัดสินค้าลงลัง แผนกส่งมอบสินค้าในขั้นตอนตรวจสอบลังบนชั้นวางสินค้าและแผนกรับสินค้าในขั้นตอนจัดสินค้าคืนของร้านสาขา มีคะแนนความเสี่ยงจากเดิม 7 คะแนน หลังจากรับปรุงคะแนนลดลงเหลือ 5, 4, 6 และ 4 ตามลำดับ

คำสำคัญ: การยศาสตร์ การปรับปรุงวิธีการทำงาน วิธีRULA

1. บทนำ

ประเทศไทยมีการขยายตัวของธุรกิจอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวางและมีอุตสาหกรรมหลายแห่งที่ยังใช้แรงงานคนในการยกหรือเคลื่อนย้ายวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักมาก รวมทั้งการยกหรือเคลื่อนย้ายด้วยท่าทางที่ไม่ถูกต้อง ส่งผลให้มีผู้บาดเจ็บจากสุขภาพอนามัยในการทำงาน เช่น การปวดบริเวณหลัง การปวดบริเวณเอว เป็นต้น บริษัทซีพีออลล์ จำกัด(มหาชน) (ศูนย์กระจายสินค้าเชียงใหม่) ได้มีการสนับสนุนการทำวิจัยเพื่อลดอาการปวดหลังของพนักงานในบริษัทฯ เพื่อลดอัตราการลางานอันเนื่องมาจากการบาดเจ็บหรือเจ็บป่วยจากการทำงาน

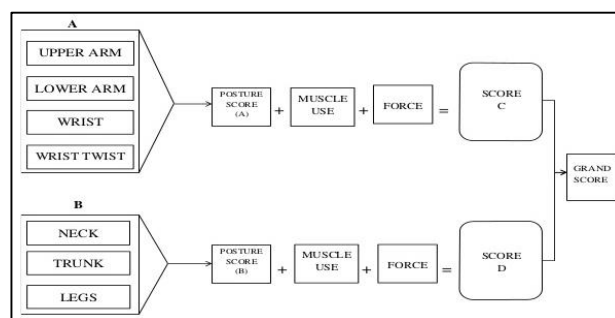
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การประเมินความเสี่ยงของท่าทางการทำงานโดยวิธี Rapid Upper Limb Assessment (RULA)

วิธี RULA เป็นการประเมินด้านการยศาสตร์ โดยประเมินจากท่าทางการทำงานของคน การออกแรงและการทำงานของกล้ามเนื้อ รวมทั้งความเครียดจากการทำงานซ้ำๆ จนอาจทำให้เกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อ โดยแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนคือ

- กลุ่ม A ประเมิน ข้อมือ แขนส่วนล่าง แขนส่วนบน ข้อมือและการบิดหมุนของข้อมือ ร่วมกับการใช้แรง
- กลุ่ม B ประเมิน คอ ลำตัวและขา ร่วมกับการใช้แรง

จากนั้นนำคะแนนของทั้งสองกลุ่มมาพิจารณาร่วมกับการใช้แรงของกล้ามเนื้อแล้วนำไปเปิดตารางเพื่อพิจารณาระดับความเสี่ยงของงานนั้นๆ ขั้นตอนการประเมินการทำงานดังแสดงในรูปที่ 1 และขั้นตอนการวิเคราะห์ท่าทางการทำงานดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 ขั้นตอนการประเมินการทำงานด้วยวิธี RULA^[1]

A. Arm & Wrist Analysis

Step 1: Locate Upper Arm Position

Step 1a: Adjust...
 If shoulder is raised: +1
 If upper arm is abducted: +1
 If arm is supported or person is leaning: -1
 Final Upper Arm Score =

Step 2: Locate Lower Arm Position

Step 2a: Adjust...
 If arm is working across midline of the body: +1
 If arm out to side of body: +1
 Final Lower Arm Score =

Step 3: Locate Wrist Position

Step 3a: Adjust...
 If wrist is bent from the midline: +1
 Final Wrist Score =

Step 4: Wrist Twist
 If wrist is twisted mainly in mid-range = 1;
 If twist at or near end of twisting range = 2
 Wrist Twist Score =

Step 5: Look-up Posture Score in Table A
 Use values from steps 1, 2, 3 & 4 to locate Posture Score in Table A.
 Posture Score A =

Step 6: Add Muscle Use Score
 If posture mainly static (i.e. held for longer than 1 minute) or:
 If action repeatedly occurs 4 times per minute or more: +1
 Muscle Use Score =

Step 7: Add Force/load Score
 If load less than 2 kg (intermittent): +0;
 If 2 kg to 10 kg (intermittent): +1;
 If 2 kg to 10 kg (static or repeated): +2;
 If more than 10 kg load or repeated or shocks: +3
 Force/load Score =

Step 8: Find Row in Table C
 The completed score from the Arm/Wrist analysis is used to find the row on Table C.
 Final Wrist & Arm Score =

SCORES

Table A

Upper Arm	Lower Arm	Wrist			
		1	2	3	4
1	1	1	2	3	3
1	2	2	3	3	3
2	1	2	3	3	4
2	2	3	3	4	4
3	1	3	4	4	5
3	2	4	4	4	5
4	1	4	4	4	5
4	2	4	4	4	5
5	1	5	5	5	6
5	2	5	5	5	6
6	1	7	7	7	8
6	2	8	8	8	9
7	1	9	9	9	9
7	2	9	9	9	9

Table B

Neck	Trunk Posture Score					
	1	2	3	4	5	6
1	1	2	3	4	5	6
2	2	3	4	5	6	7
3	3	4	5	6	7	8
4	4	5	6	7	8	9
5	5	6	7	8	9	9
6	6	7	8	9	9	9

Table C

1	2	3	4	5	6	7
1	1	2	3	4	5	5
2	2	3	4	4	5	5
3	3	3	4	4	5	6
4	3	3	4	4	5	6
5	4	4	5	5	7	7
6	4	4	5	5	7	7
7	5	5	6	6	7	7
8	5	5	6	6	7	7

Table D

Neck	Trunk Posture Score					
	1	2	3	4	5	6
1	1	2	3	4	5	6
2	2	3	4	5	6	7
3	3	4	5	6	7	8
4	4	5	6	7	8	9
5	5	6	7	8	9	9
6	6	7	8	9	9	9

Final Score =

B. Neck, Trunk & Leg Analysis

Step 9: Locate Neck Position
 in extension

Step 9a: Adjust...
 If neck is twisted: +1; If neck is side-bending: +1
 = Final Neck Score

Step 10: Locate Trunk Position
 1 also if trunk is well supported while seated -2°

Step 10a: Adjust...
 If trunk is twisted: +1; If trunk is side-bending: +1
 = Final Trunk Score

Step 11: Legs
 If legs & feet supported and balanced: +1;
 If not: +2
 = Final Leg Score

Step 12: Look-up Posture Score in Table B
 Use values from steps 9, 10 & 11 to locate Posture Score in Table B.
 = Posture B Score

Step 13: Add Muscle Use Score
 If posture mainly static or:
 If action 4/minute or more: +1
 = Muscle Use Score

Step 14: Add Force/load Score
 If load less than 2 kg (intermittent): +0;
 If 2 kg to 10 kg (intermittent): +1;
 If 2 kg to 10 kg (static or repeated): +2;
 If more than 10 kg load or repeated or shocks: +3
 = Force/load Score

Step 15: Find Column in Table C
 The compiled score from the Neck/Trunk & Leg analysis is used to find the column on Chart C.
 = Final Neck, Trunk & Leg Score

รูปที่ 2 การวิเคราะห์ท่าทางการทำงานโดยวิธี RULA^[2]

2.2 การสำรวจปัจจัยเสี่ยงด้านการยศาสตร์

การสำรวจปัจจัยเสี่ยงด้านการยศาสตร์เป็นการสำรวจอาการบาดเจ็บหรือเมื่อยล้าจากส่วนของร่างกาย 12 ส่วน โดยผู้ประเมินจะหาคะแนนตามความเจ็บปวดหรือเมื่อยล้า 5 ระดับจาก 0 - 4 (ไม่รู้สึกละเลย ถึง รู้สึกเจ็บมากเกินทนไหว) ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การประเมินระดับความเจ็บปวด/เมื่อยล้าของร่างกายแต่ละส่วน

ส่วนของร่างกาย	คะแนน
1. คอ	
2. ไหล่	
3. หลังส่วนบน	
4. หลังส่วนล่าง	
5. แขนส่วนบน	
6. ข้อศอก	
7. แขนส่วนล่าง	
8. มือ/ข้อมือ	
9. สะโพก/ต้นขา	
10. หัวเข่า	
11. น่อง	
12. เท้า	

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่ศึกษาด้านปัจจัยของท่าทางการทำงานกับภาวะกล้ามเนื้อหลัง (อำนาจ, 2535)^[3] โดยใช้กลุ่มตัวอย่างคนงานเหมืองแร่ที่ต้องยืนทำงานในท่าก้มเป็นเวลานาน ในคนงานผู้ชาย 34 คน จาก 5 แผนก จากงาน 46 งาน เพื่อหาว่างานใดเป็นงานหนักและมีอันตราย การทดลองได้เก็บข้อมูลโดยใช้การสัมภาษณ์เพื่อประเมินความรุนแรงของปัญหาการถ่วงวิถีโอเทปเพื่อวิเคราะห์ท่าการทรงตัวขณะทำงาน และการวัดค่า EMG ของกล้ามเนื้อหลัง ส่วนบน (elector spinae) เพื่อเปรียบเทียบค่า EMG จากการทำงานกับค่า MVE (maximum voluntary electromyography) ของคนงานนั้นว่าเป็นสัดส่วนเท่าไร ผลการทดลองพบว่า ท่าการก้มของหลัง น้ำหนักชิ้นงาน ความสูงในการทำงาน และระยะเวลาในการทำงานมีผลต่อค่า EMG อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

กฤษฎา (2556)^[4] ได้ทำการศึกษาปัจจัยเสี่ยงทางยศาสตร์ในกระบวนการผลิตเฟอร์นิเจอร์ โดยใช้แบบสำรวจการยศาสตร์ ILO Ergonomic Checkpoints และประเมินความเสี่ยงของท่าทางการทำงานโดยวิธี RULA ผลการศึกษาพบว่ากระบวนการจัดชิ้นงาน กระบวนการประกอบชิ้นงานลักษณะบรณประกอบเก้าอี้มีความเสี่ยงสูงที่สุดมีการเสนอแนวทางแก้ไขวิธีการทำงานเพื่อใช้เป็นแนวทางการปรับปรุงต่อไป

วิภาจรรย์ (2537)^[5] ได้มีการศึกษาน้ำหนักหรือแรงที่กระทำต่อกระดูกสันหลัง 3 ส่วนคือ น้ำหนักของร่างกาย แรงที่เกิดจากการทำงานของกล้ามเนื้อ และแรงที่มาจากภายนอกร่างกาย ในงานวิจัยกล่าวถึงการ

รับแรงหรือน้ำหนักต่อกระดูกสันหลังส่วนบั้นเอวในการยื่นในท่าที่สบาย กระดูกสันหลังระดับบั้นเอวจะรับน้ำหนักประมาณ ร้อยละ 60 ของน้ำหนักตัว แต่ถ้ามีการก้มตัวมาด้านหน้าน้ำหนักที่กระทำต่อหมอนรองกระดูกสันหลังจะเพิ่มขึ้น มีการเสนอให้ใช้เชือกพุงเอว เพื่อลดแรงกระทำต่อกระดูกสันหลังขณะที่มีการออกแรง ซึ่งได้ผลในทางที่ดี

3. วิธีการดำเนินวิจัยและผลการดำเนินงาน

3.1 การประเมินความเสี่ยงของท่าทางการทำงาน

ทำการประเมินความเสี่ยงของท่าทางการทำงานโดยวิธี RULA ในพนักงานบริษัทซีพีออลส์ฯ เพศชาย 100 คน ใน 9 แผนก จากนั้นคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างในแผนกและชั้นตอน ที่มีความเสี่ยงของท่าทางการทำงานสูงสุด (คะแนน RULA เท่ากับ 7 คะแนน) ซึ่งได้ 62 คนจาก 4 ชั้นตอนใน 3 แผนก ดังนี้

1. ชั้นตอนการเคลื่อนย้ายสินค้า ในแผนกปฏิบัติการคลัง 25 คน
2. ชั้นตอนการจัดสินค้าลงลัง ในแผนกปฏิบัติการคลัง 18 คน
3. ชั้นตอนการตรวจสอบลังบนชั้นวางสินค้า ในแผนกส่งมอบสินค้า จำนวน 9 คน
4. ชั้นตอนการจัดสินค้าคืนของร้านสาขา ในแผนกรับสินค้า 10 คน

3.2 การประเมินระดับความเจ็บปวดของร่างกาย

ทำการประเมินระดับความเจ็บปวด/เมื่อยล้าของร่างกายแต่ละส่วน ในกลุ่มตัวอย่าง 62 คน จาก 4 ชั้นตอนใน 3 แผนก สามารถแสดงผลดังตารางที่ 2

ซึ่งจากตารางที่ 2 พบว่า กลุ่มตัวอย่างมีการบาดเจ็บ/เมื่อยล้าบริเวณหลังส่วนล่างมากที่สุด ด้วยค่าเฉลี่ย 3.03 คะแนน รองลงมาคือ บริเวณหลังส่วนบน ด้วยค่าเฉลี่ย 2.56 คะแนน

ตารางที่ 2 ผลการประเมินระดับความเจ็บปวด/เมื่อยล้าของร่างกายในแต่ละส่วน

ส่วนของร่างกาย	คะแนนเฉลี่ย	ส่วนของร่างกาย	คะแนนเฉลี่ย
1. คอ	0.71	7. แขนส่วนล่าง	0.58
2. ไหล่	0.74	8. มือ/ข้อมือ	1.41
3. หลังส่วนบน	2.56	9. สะโพก/ต้นขา	1.20
4. หลังส่วนล่าง	3.03	10. หัวเข่า	1.37
5. แขนส่วนบน	1.00	11. น่อง	1.45
6. ข้อศอก	0.32	12. เท้า	1.55

3.3 การปรับปรุงงานและสถานีงาน

1. ชั้นตอนการเคลื่อนย้ายสินค้า ในแผนกปฏิบัติการคลัง

เดิมผู้ปฏิบัติงานต้องเคลื่อนย้ายลังสินค้า (น้ำหนักมากกว่า 5 กิโลกรัมต่อลัง) ด้วยวิธีดึงและยกลังสินค้าที่ละลังและวางซ้อนกันหลายๆชั้น จากนั้นลากชั้นลังสินค้านั้นไปยังบริเวณที่ต้องการซึ่งชั้นตอนนี้ผู้ปฏิบัติงานมีการก้ม-เงย และใช้แรงในการยก อาจทำให้เกิดอาการบาดเจ็บสะสมบริเวณหลังส่วนบนและล่างได้ การปรับปรุงงานในชั้นตอนนี้ ผู้วิจัยได้เสนอให้ผู้ปฏิบัติงานใส่เข็มขัดช่วยพุงหลังและยืนบนชั้นวางที่มีความสูงเหมาะสมสำหรับการทำงานและการใช้รถลาก (Hand Jack) เพื่อช่วยในการยกลังสินค้าที่วางซ้อนกันหลายๆชั้น ดังแสดงในรูปที่ 3

ภายหลังปรับปรุงดังกล่าว พบว่าค่าคะแนนการประเมินความเสี่ยงของท่าทางการทำงาน ลดลง จาก 7 เหลือ 5 คะแนน



(ก) ก่อนการปรับปรุง



(ข) หลังการปรับปรุง



รูปที่ 3 ชั้นตอนการเคลื่อนย้ายสินค้า ในแผนกปฏิบัติการคลัง

2. ชั้นตอนการจัดสินค้าลงลัง ในแผนกปฏิบัติการคลัง

เดิมผู้ปฏิบัติงานมีการเอี้ยวตัว ก้มตัว เพื่อหยิบสินค้าจากลังหนึ่งไปใส่อีกลังหนึ่ง (วางอยู่ที่พื้น) ตามใบจัดสินค้า ซึ่งอาจทำให้ผู้ปฏิบัติงานเกิดความเมื่อยล้าและเกิดอาการบาดเจ็บสะสมบริเวณหลังได้ ผู้วิจัยได้เสนอให้ปรับพื้นที่ทำงานให้มีความสูงพอเหมาะสำหรับปฏิบัติงาน (ความสูงระดับศอก) โดยการนำลังเปล่าที่ไม่ได้ใช้งานมาวางเสริมทำให้ผู้ปฏิบัติงานมีความสะดวกสบายมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4

ภายหลังปรับปรุงดังกล่าว พบว่าค่าคะแนนการประเมินความเสี่ยงของท่าทางการทำงาน ลดลง จาก 7 เหลือ 4 คะแนน



(ก) ก่อนการปรับปรุง



(ข) หลังการปรับปรุง

รูปที่ 4 ชั้นตอนการจัดสินค้าลงลัง ในแผนกปฏิบัติการคลัง

3. ขั้นตอนการตรวจสอบถังบนชั้นวางสินค้า ในแผนกส่งมอบสินค้า

เดิมผู้ปฏิบัติงานต้องก้มและใช้มือลากถังสินค้าที่ซ้อนกันอยู่หลายๆชั้น (5 - 7 ชั้นตามที่ผู้ปฏิบัติงานลากไหว) (น้ำหนักมากกว่า 30 กิโลกรัม) ส่งผลให้เกิดการบาดเจ็บสะสมบริเวณหลัง ผู้วิจัยเสนอให้ผู้ปฏิบัติงานใส่เข็มขัดพยุงหลังและใช้เหล็กตะขอช่วยดึงสิ่งที่ยกขึ้นไม่เกิน 4 ชั้น (ความสูงไม่เกิน 160 เซนติเมตร น้ำหนักไม่เกิน 20 กิโลกรัม) ดังแสดงในรูปที่ 5

ภายหลังปรับปรุงดังกล่าว พบว่าค่าคะแนนการประเมินความเสี่ยงของท่าทางการทำงาน ลดลง จาก 7 เหลือ 6 คะแนน (เนื่องจากยังมีการก้มและลากถังที่มีน้ำหนักมากอยู่)



(ก) ก่อนการปรับปรุง



(ข) หลังการปรับปรุง

รูปที่ 5 ขั้นตอนการตรวจสอบถังบนชั้นวางสินค้า ในแผนกส่งมอบสินค้า

4. ขั้นตอนการจัดสินค้าคืนของร้านสาขา ในแผนกรับสินค้า

เดิมผู้ปฏิบัติงานมีการเอี้ยวตัว ก้มตัว เพื่อหยิบสินค้าจากลังหนึ่งไปใส่อีกลังหนึ่ง (วางอยู่ที่พื้น) คล้ายๆขั้นตอนการจัดสินค้าลงลัง ในแผนกปฏิบัติการคลัง ผู้วิจัยได้เสนอให้ปรับพื้นที่ทำงานให้มีความสูงพอเหมาะสำหรับปฏิบัติงาน (ความสูงระดับศอก) โดยการนำลังเปล่าที่ไม่ได้ใช้งานมาวางเสริมทำให้ผู้ปฏิบัติงานมีความสะดวกสบายมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6

ภายหลังปรับปรุงดังกล่าว พบว่าค่าคะแนนการประเมินความเสี่ยงของท่าทางการทำงาน ลดลง จาก 7 เหลือ 4 คะแนน



(ก) ก่อนการปรับปรุง



(ข) หลังการปรับปรุง

รูปที่ 6 ขั้นตอนการจัดสินค้าคืนของร้านสาขา ในแผนกรับสินค้า

3.5 สรุปผลการดำเนินงาน

ผลการประเมินความเสี่ยงของท่าทางการทำงานโดยวิธี RULA ก่อนและหลังการปรับปรุงงานแสดงได้ในตารางที่ 3 ดังนี้

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบผลการประเมินความเสี่ยงของท่าทางการทำงานก่อนและหลังการปรับปรุง

ขั้นตอนการทำงาน	ก่อนการปรับปรุง (คะแนน)	หลังการปรับปรุง (คะแนน)
1. การเคลื่อนย้ายสินค้า ในแผนกปฏิบัติการคลัง	7	5
2. การจัดสินค้าลงลัง ในแผนกปฏิบัติการคลัง	7	4
3. การตรวจสอบถังบนชั้นวางสินค้า ในแผนกส่งมอบสินค้า	7	6
4. การจัดสินค้าคืนของร้านสาขา ในแผนกรับสินค้า	7	4

ในขั้นตอนการทำงานที่ 1 และ 3 ที่มีระดับความเสี่ยง 5 และ 6 นั้นยังเป็นระดับความเสี่ยงที่มีปัญหาด้านการยศาสตร์และควรปรับปรุงงาน เนื่องจากงานนั้นยังเป็นงานยืนและต้องมีการออกแรงกล้ามเนื้อในการเอี้ยวตัว การยก การดึงและการลากวัตถุอยู่ จึงควรออกแบบงานและสถานที่งานเพื่อลดความเสี่ยงของท่าทางการทำงานให้ดียิ่งขึ้นในงานวิจัยครั้งต่อไป

ผลการประเมินระดับความเจ็บปวด/เมื่อยล้าของร่างกายแต่ละส่วนก่อนและหลังการปรับปรุงแสดงได้ในตารางที่ 4 และจากผลการประเมินฯ พบว่าการบาดเจ็บ/เมื่อยล้าบริเวณหลังส่วนล่าง มีค่าลดลงเฉลี่ยถึง 0.64 คะแนน (จาก 3.03 คะแนน เป็น 2.39 คะแนน) และรองลงมาคือ บริเวณหลังส่วนบนค่าลดลงเฉลี่ยถึง 0.63 คะแนน (จาก 2.56 คะแนน เป็น 1.91 คะแนน)

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบผลการประเมินระดับความเจ็บปวด/เมื่อยล้าของร่างกายแต่ละส่วนก่อนและหลังการปรับปรุง

ส่วนของร่างกาย	คะแนนเฉลี่ย		
	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	ลดลง
1. หลังส่วนล่าง	3.03	2.39	0.64
2. หลังส่วนบน	2.56	1.91	0.63
3. เท้า	1.55	1.34	0.21
4. น่อง	1.45	1.32	0.13
5. มือ/ข้อมือ	1.41	1.22	0.19
6. หัวเข่า	1.37	1.00	0.37
7. สะโพก/ต้นขา	1.20	1.09	0.11
8. แขนส่วนบน	1.00	0.94	0.06
9. ไหล่	0.74	0.53	0.21
10. คอ	0.71	0.51	0.20
11. แขนส่วนล่าง	0.58	0.42	0.16
12. ข้อศอก	0.32	0.24	0.08

หมายเหตุ: เข็มขัดพยุงหลัง (Back belt) ดัดแปลงมาจากเฝือกพยุงเอว (Lumbosacral Support) ^[6] ซึ่งเป็นอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ควรใช้เมื่อจำเป็น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประคองหลังเมื่อมีการบาดเจ็บบริเวณหลัง และช่วยกระชับบริเวณแผ่นหลังอาการปวดหลังลดลง

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัทซีฟือออลล์ จำกัด(มหาชน) (ศูนย์กระจายสินค้า เชียงใหม่) ที่สนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Massaccesi, A. Pagnotta, A. Soccetti, M. Masali, C. Masiero, and F. Greco, "Investigation of work-related disorders in truck drivers using RULA method," *Applied Ergonomics*, 2003, pp. 303-307.
- [2] L. McAtamney, and E. Nigel Corlett, "RULA : a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders", *Applied ergonomics*, 1993, pp. 91-99.
- [3] อำนาจ เสตสุวรรณและกิตติ อินทรานนท์, "ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการทำงานภาระกล้ามเนื้อหลังโดยใช้การวัดคลื่นไฟฟ้าของกล้ามเนื้อ: กรณีศึกษาของสายการประกอบรถบรรทุกขนาดเล็ก 1 ตัน", *วิศวกรรมสาร มก.*, 2541, ปีที่ 12 ฉบับที่ 36 หน้า 87-92
- [4] กลุซดา วรรณภาและปรีชา ชันศรี, "การศึกษาปัจจัยเสี่ยงทางการยศาสตร์ในกระบวนการผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้," *ปริญญาภิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนอร์ท-เชียงใหม่*, 2556.
- [5] วิภาจรีย์ ศัลยพงษ์, "การใช้เฝือกพยุงเอวเพื่อป้องกันโรคปวดหลัง" , การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2537
- [6] สุดาว เลิศวิสุทธิไพบูลย์, "เข็มขัดพยุงหลังช่วยให้ออกกำลังกายได้ปลอดภัยจริงหรือ", การจัดการความรู้สาขาวิทยาศาสตร์สุขภาพ ด้านอาชีวอนามัยและความปลอดภัย, มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช, มปป

ปัจจัยแวดล้อมที่มีผลต่อการพัฒนาระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนในพื้นที่ห่างไกล

Environmental Impact Factors Affecting the Development of Electricity Generation System from Renewable Energy in Remote Areas

พิมพันธ์ ภูมิภักดีพิชญ์^{1*} และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์²

¹สาขาสังคมศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
E-mail: pimnapat_i@rmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอปัจจัยแวดล้อมที่มีผลต่อการพัฒนาระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนในพื้นที่ห่างไกล กรณีศึกษาระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Home System: SHS) กลุ่มตัวอย่างในการวิจัย คือ ตัวแทนครัวเรือนที่ได้รับการติดตั้ง SHS ชุมชนแม่สลองโน จังหวัดเชียงราย 97 ครัวเรือน ผู้ให้ข้อมูลสำคัญ 18 ท่าน เก็บข้อมูลโดยการสำรวจประกอบกับการใช้แบบสัมภาษณ์ วิเคราะห์ข้อมูลด้วยค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน วิเคราะห์หากลุ่มปัจจัยแวดล้อมที่มีผลต่อการพัฒนา SHS ด้วยการใช้วิเคราะห์ความสัมพันธ์และการวิเคราะห์ปัจจัยสำหรับการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณ กำหนดค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 ผลการวิจัยพบว่า ครัวเรือนผู้ใช้ไฟฟ้าจาก SHS ส่วนใหญ่ประสบปัญหาแบตเตอรี่เสื่อมและการดูแล/รักษา SHS ระดับมาก มีความพึงพอใจต่อการพัฒนา SHS ในภาพรวมระดับน้อย ปัจจัยแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อการพัฒนา SHS คือปัจจัยด้านเทคโนโลยีที่มีผลต่อการได้รับประโยชน์ของชุมชน ผลการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางการพัฒนาพลังงานทดแทนในอนาคต

คำสำคัญ: พลังงานทดแทน, ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์, พื้นที่ห่างไกล

1. บทนำ

"พลังงานทางเลือก" "พลังงานทดแทน" "พลังงานหมุนเวียน" คำศัพท์เหล่านี้เริ่มมีบทบาทในระบบไฟฟ้าของประเทศไทยอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ แม้ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าของพลังงานทางเลือกมีราคาสูงกว่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าหลักประเภทอื่นๆ เช่น โรงไฟฟ้าถ่านหิน โรงไฟฟ้าก๊าซธรรมชาติ ประกอบกับภาวะโลกร้อนที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas: GHG) ซึ่งส่วนใหญ่คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) อันเกิดจากกระบวนการสันดาปของเชื้อเพลิงฟอสซิลจากโรงงานอุตสาหกรรม รวมถึงอุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้าที่ต้องอาศัยเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นเชื้อเพลิงหลักในการผลิตกระแสไฟฟ้า ดังนั้นรัฐบาลแต่ละสมัยมีความพยายามในการผลักดันแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกให้เป็นรูปธรรมมากขึ้นเพื่อการก้าวไปสู่สังคมคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Society) [1]

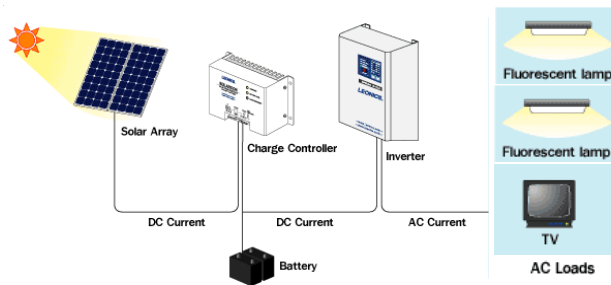
พลังงานทดแทน ถือเป็นหนึ่งในเชื้อเพลิงเป้าหมายที่คาดว่าจะสามารถนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าทดแทนก๊าซธรรมชาติได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลมแบบทุ้งกังหันลม พลังน้ำขนาดเล็ก ชีวมวล ก๊าซชีวภาพและขยะ รัฐบาลโดยกระทรวงมหาดไทยมอบหมายให้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเป็นผู้ดำเนินโครงการเร่งรัดขยายบริการไฟฟ้าโดยระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (ฟพอ.) ในปี พ.ศ. 2548-2549 โดยมีการติดตั้งระบบผลิตกระแสไฟฟ้าแบบอิสระระบบละ 120 วัตต์ ทั่วประเทศไทยในบริเวณที่ไม่มีสายส่งไฟฟ้าเข้าถึงจำนวน 203,000 ครัวเรือน ส่วนใหญ่อยู่ทางภาคเหนือถึงประมาณร้อยละ 90 และอีกร้อยละ 10 กระจายอยู่ตามภาคต่างๆ ของประเทศ พื้นที่เหล่านี้ส่วนมากตั้งอยู่ในพื้นที่เขตป่าสงวน เขตพื้นที่หวงห้ามและพื้นที่ห่างไกลตามภูเขา ซึ่งไม่สามารถดำเนินการติดตั้งระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยวิธีปกติ ด้วยเหตุผลทางเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม จากการติดตามผลโครงการ SHS ในพื้นที่ห่างไกล พบว่า ไม่ค่อยประสบความสำเร็จเท่าที่ควร เนื่องจากชุมชนผู้ใช้ไฟฟ้าขาดงบประมาณดำเนินการดูแลและรักษา SHS การขาดความต่อเนื่องของนโยบายส่งเสริมการใช้ไฟฟ้าจาก SHS ของหน่วยงานภาครัฐ รวมถึงขาดการมีส่วนร่วมของภาคประชาชน ซึ่งการพัฒนาที่เหมาะสมจะต้องประกอบด้วยปัจจัยแวดล้อมภายนอกของโครงการ ได้แก่ ปัจจัยด้านการเมือง ปัจจัยด้านกฎหมาย ปัจจัยด้านเศรษฐกิจ ปัจจัยด้านเทคโนโลยี และปัจจัยด้านสังคม ซึ่งควรได้รับการศึกษาวิจัย [2] หากเทคโนโลยีพลังงานทดแทนเหล่านี้ได้รับการยอมรับจากสังคม อาจสามารถพัฒนาให้เป็นพลังงานหลักในการผลิตไฟฟ้าสำหรับประเทศไทยได้ในอนาคต ซึ่งวิธีการศึกษาดังกล่าวจำเป็นต้องมีศึกษาแบบบูรณาการในทุกด้าน เช่น ทักษะการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้เทคโนโลยีพลังงานทดแทนที่ยั่งยืน ด้วยศึกษาถึงขั้นตอนและวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพโดยการออกแบบ วางแผน และควบคุมปัญหาด้านการใช้พลังงานทดแทนด้วยการพัฒนารูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับการใช้พลังงานทดแทนที่เหมาะสม [3] ศึกษาแนวทางการตัดสินใจเพื่อกำหนดนโยบายการพัฒนาระบบพลังงานทดแทนภายใต้ศักยภาพด้านกายภาพ ความคุ้มค่าด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม [4] ศึกษาบทบาทพลังงานทดแทนในการคุ้มครองสิ่งแวดล้อมภายใต้แนวคิดการพัฒนาที่ยั่งยืน โดยเปรียบเทียบการใช้เทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียนประเภทต่างๆ เพื่อนำเสนอภาพรวมของการพัฒนาและขอบเขตของการลดการปลดปล่อย

CO₂ เพื่อการพัฒนาที่สะอาดและยั่งยืน [5] ซึ่งพบว่ายังขาดการศึกษาปัจจัยแวดล้อมที่มีผลต่อการพัฒนาระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนในพื้นที่ห่างไกล บทความนี้ได้เลือกโครงการการพัฒนา SHS ในประเทศไทยเป็นกรณีศึกษา มีหัวข้อการนำเสนอบทความประกอบด้วยแนวคิดทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง วิธีการและผลการศึกษา สรุปและอภิปรายผลการวิจัย และข้อเสนอแนะจากผลการวิจัย ดังนี้

2. แนวคิดทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ระบบ ได้แก่ 1) ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand alone system) 2) ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย (PV Grid connected system) และ 3) ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV Hybrid system) แต่ระบบที่ได้รับการออกแบบสำหรับใช้งานในพื้นที่ชนบทที่ไม่มีระบบสายส่งไฟฟ้า คือระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ ที่มีกรอกแบบ SHS เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ คือ แสงสว่างในเวลาค่ำคืนและการได้รับข้อมูลข่าวสาร มีโหนดของ SHS ประกอบด้วย หลอดฟลูออเรสเซนต์ 10 วัตต์ จำนวน 2 หลอด และโทรทัศน์สี 14 นิ้ว จำนวน 1 เครื่อง มีอุปกรณ์ระบบที่สำคัญประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Module) อุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่ (Charge Controller)



รูปที่ 1 ส่วนประกอบ SHS สำหรับบ้านพักอาศัย

แบตเตอรี่ (Battery Box) และอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบอิสระ (Control Panel) ดังรูปที่ 1 ที่ได้ดัดแปลงรูป SHS-00130 ของบริษัท ลีโอนิคส์ เอลโก้ จำกัด. [6]

2.2 การวิเคราะห์สภาพแวดล้อมภายนอก

แนวคิดการวิเคราะห์สภาพแวดล้อมภายนอกเป็นแนวคิดที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวแปรแวดล้อมเชิงมหภาค (Macro-Environment Analysis) เพื่อการวางแผนกลยุทธ์ในเชิงธุรกิจด้วยการแบ่งกลุ่มตัวแปรแวดล้อมออกเป็น 4 กลุ่ม (ตามตัวย่อ P-E-S-T) ได้แก่ ตัวแปรทางการเมือง (Political-P) ตัวแปรทางด้านเศรษฐกิจ (Economics-E) ตัวแปรทางด้านสังคม (Social-S) และตัวแปรทางด้านเทคโนโลยี (Technology-T) [7] การศึกษาครั้งนี้ประยุกต์ใช้แนวคิดดังกล่าวเป็นแนวทางสร้างตัวชี้วัดปัจจัย

แวดล้อมที่มีผลกระทบต่อการพัฒนา SHS ที่ยั่งยืน เพื่อเป็นกรอบแนวคิดในการสนทนากลุ่มและสัมภาษณ์ผู้นำหรือตัวแทนหมู่บ้านที่ได้รับการติดตั้ง SHS ผู้ปฏิบัติงานในพื้นที่และนักวิชาการที่เกี่ยวข้อง รวม 18 ท่าน นำข้อมูลที่ได้มาสังเคราะห์เพื่อออกแบบสัมภาษณ์ครัวเรือนที่ได้รับการติดตั้ง SHS จำนวน 98 ครัวเรือน โดยสามารถสรุปปัจจัยแวดล้อมที่มีผลต่อการพัฒนา SHS ได้ดังนี้

- ปัจจัยด้านการเมือง ได้แก่ นโยบายของรัฐบาลต่อการพัฒนา SHS ในชุมชนพื้นที่ห่างไกล, กฎระเบียบต่าง ๆ เกี่ยวกับการดูแลรักษา SHS ที่ชัดเจน, บทบาทของกลุ่มพลังทางการเมืองท้องถิ่นหรือองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น (อบต.)

- ปัจจัยด้านเศรษฐกิจ ได้แก่ ฐานะทางเศรษฐกิจของครัวเรือนผู้ใช้ไฟฟ้าจาก SHS, ค่าลงทุนเริ่มต้นเพื่อการติดตั้ง SHS ใหม่, ค่าดูแลรักษา SHS ต่อเดือน, ค่าซ่อมบำรุง/เปลี่ยนอุปกรณ์ SHS ที่ชำรุด

- ปัจจัยด้านสังคม ได้แก่ ระดับการศึกษาของครัวเรือนผู้ใช้ไฟฟ้าจาก SHS, จำนวนประชากร/ครัวเรือนผู้ใช้ไฟฟ้าจาก SHS ที่เพิ่มขึ้น, แบบแผนการดำเนินชีวิตและพฤติกรรมชุมชน (การยอมรับ/ต่อต้าน SHS), ระบบสาธารณสุข (มีไฟฟ้าเข้าถึง/ไม่มีไฟฟ้าเข้าถึง), การคมนาคม (การเดินทางเข้าหมู่บ้านโดยรถยนต์ส่วนตัว/รถมอเตอร์ไซด์/เดินเท้า), การติดต่อสื่อสารกับเจ้าหน้าที่เมื่อมีปัญหาการใช้งาน SHS

- ปัจจัยด้านเทคโนโลยี ได้แก่ วิธีการใช้งานจาก SHS, วิธีการบำรุงรักษา SHS, วิธีการซ่อมแซมอุปกรณ์ที่ชำรุดของ SHS

3. วิธีการและผลการศึกษา

3.1 สถานภาพ SHS ในชุมชนพื้นที่ห่างไกล

จากการสำรวจพื้นที่ด้านลักษณะภูมิประเทศ เพื่อศึกษาสถานภาพเบื้องต้นของการดำเนินการ SHS (รูปที่ 2) และสัมภาษณ์ถึงสถานภาพ SHS ในปัจจุบัน โดยกำหนดค่าการประเมินใน 3 ระดับ คือ มาก = 3 ปานกลาง = 2 และน้อย = 1 ผลการศึกษาพบว่า ภายหลังจากติดตั้ง SHS ผู้ให้สัมภาษณ์ส่วนใหญ่ไม่เคยได้รับการประชาสัมพันธ์ด้านการดูแลรักษา SHS ร้อยละ 79.38 ปัจจุบัน SHS ที่ได้รับการติดตั้งยังคงใช้งานได้ระดับน้อย ร้อยละ 74.13 คิดเป็นค่าเฉลี่ย ($\bar{X}=1.33, S.D.=0.57$) พบปัญหาการใช้งาน SHS ที่ด้านแบตเตอรี่เสื่อมมากที่สุด ร้อยละ 43.30 ประสบปัญหาอยู่ในระดับมากเกี่ยวกับการดูแล/รักษา SHS ($\bar{X}=3.16, S.D.=0.40$) ซึ่งสามารถเรียงลำดับของปัญหาจากมากไปน้อยใน 5 อันดับแรก ได้แก่ 1) ขาดงบประมาณเพื่อติดตั้ง SHS ใหม่ 2) ขาดการประสานงานหรือการปรึกษากับเจ้าหน้าที่ของรัฐด้านดูแล SHS 3) ขาดการติดต่อกับร้านค้าที่สามารถซ่อมบำรุง/รักษา SHS 4) ขาดงบประมาณเพื่อการซ่อมบำรุง/รักษา SHS และ 5) ขาดความรู้ด้านการซ่อมบำรุง SHS ที่ชำรุด เป็นต้น



รูปที่ 2 การสำรวจสถานภาพเบื้องต้นของการดำเนินการ SHS

3.2 พึงพอใจต่อการพัฒนา SHS

ผลการศึกษาคำตอบของพึงพอใจของผู้ให้สัมภาษณ์ต่อการพัฒนา SHS จำนวน 16 ข้อคำถาม ในภาพรวมพบว่า ผู้ให้สัมภาษณ์มีความพึงพอใจในระดับน้อย ($\bar{X}=1.36, S.D.=0.32$) เมื่อพิจารณาในประเด็นย่อยพบว่า มีความพึงพอใจในระดับปานกลางต่อ SHS ที่เหมาะสมกับพื้นที่ห่างไกล ($\bar{X}=1.87, S.D.=0.85$) เพียงข้อเดียว ส่วนข้อคำถามด้านอื่นมีผลคำตอบความพึงพอใจในระดับน้อย เช่น กฎระเบียบต่างๆ เกี่ยวกับการดูแลรักษา SHS การจัดเก็บค่าบริการรักษา เดือนละ 50 บาท/เดือน ($\bar{X}=1.66, S.D.=0.60$), SHS เป็นระบบสาธารณสุขโลกที่เหมาะสมกับชุมชน ($\bar{X}=1.55, S.D.=0.58$), ค่าดูแลรักษา SHS เช่น การซื้อน้ำกลั่น ($\bar{X}=1.54, S.D.=0.58$), การดำเนินชีวิตและพฤติกรรมแบบพอเพียงที่เหมาะสมกับการใช้ไฟฟ้า SHS ($\bar{X}=1.52, S.D.=0.52$) เป็นต้น

3.3 ปัจจัยแวดล้อมภายนอกที่มีผลต่อการพัฒนา SHS

ผู้ให้สัมภาษณ์มีความคิดเห็นต่อปัจจัยแวดล้อมภายนอกที่มีผลต่อการพัฒนา SHS ในภาพรวมอยู่ในระดับปานกลาง ($\bar{X}=2.24, S.D.=0.47$) โดยผลการศึกษาในประเด็นย่อยพบว่ามีความคิดเห็นระดับมากต่อปัจจัยด้านการเมือง ($\bar{X}=2.54, S.D.=0.65$) ระดับปานกลางต่อปัจจัยด้านเศรษฐกิจ ($\bar{X}=2.25, S.D.=0.54$) ปัจจัยด้านสังคม ($\bar{X}=2.15, S.D.=0.51$) และปัจจัยด้านเทคโนโลยี ($\bar{X}=2.07, S.D.=0.75$) ตามลำดับ

เมื่อทดสอบเพื่อวัดระดับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร โดยใช้วิธีการทางสถิติด้วยวิธีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson Correlation Coefficient (r) หรือ Pearson's Product Moment Correlation Coefficient) ที่มีเกณฑ์การพิจารณาค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เกณฑ์การพิจารณาค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r)	ระดับความสัมพันธ์
0.10 – 0.39	ต่ำ
0.40 – 0.59	ปานกลาง
0.60 – 0.80 ขึ้นไป	สูง

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ใกล้เคียง 1 หรือ -1 แสดงว่าตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันสูง และถ้าค่า r = 1 หรือ -1 แสดงว่า ตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันแบบสมบูรณ์

ผลการศึกษา ระดับความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการพัฒนา SHS พบว่า ปัจจัยด้านเทคโนโลยีและประโยชน์ของ SHS มีความสัมพันธ์กันระดับปานกลาง ($r = 0.471$) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 เมื่อพิจารณาปัจจัยย่อยพบว่าด้านสังคม ($r = 0.547$) และด้านเทคโนโลยี ($r = 0.427$) ต่างมีระดับความสัมพันธ์ปานกลางกับปัจจัยการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีและประโยชน์ของ SHS ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 ส่วนปัจจัยด้านเศรษฐกิจ ($r = 0.270$) มีระดับความสัมพันธ์ต่ำกับปัจจัยการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีและประโยชน์ของ SHS ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 ส่วนปัจจัยด้านการเมือง ($r = 0.180$) ไม่มีความสัมพันธ์กับการพัฒนา SHS

เมื่อวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณแบบขั้นตอน (Multiple Regression Analysis-Enter) ระหว่างปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการพัฒนา SHS กับระดับปัจจัยการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีและประโยชน์ของ SHS ต่อชุมชน พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R Square) มีค่าเท่ากับ 0.354 สามารถอธิบายได้ว่า ตัวแปรอิสระคือ ปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการพัฒนา SHS มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามคือ ระดับปัจจัยการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีและประโยชน์ของ SHS ต่อชุมชน โดยสามารถอธิบายความผันแปรของตัวแปรได้ร้อยละ 31.40 (Adjusted R Square = 0.314) เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Beta) พบว่า ปัจจัยด้านสังคม (Beta = 1.810) ในทิศทางบวก มีความสัมพันธ์ส่งผลทำให้ปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการพัฒนา SHS มีอิทธิพลส่งผลต่อระดับปัจจัยการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีและประโยชน์ของ SHS ต่อชุมชนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

4. สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

การติดตั้ง SHS ในชุมชนแม่สองใน อำเภอแม่ฟ้าหลวง จังหวัดเชียงราย พบปัญหาด้านการประชาสัมพันธ์ SHS อาจเนื่องจากจำนวนเจ้าหน้าที่ อบต. ไม่เพียงพอต่อการทำงานที่มีความรับผิดชอบหลายด้าน ประกอบกับพื้นที่ติดตั้ง SHS มีความยากลำบากในการเดินทาง อีกทั้งประชากรส่วนใหญ่เป็นชาวเขาเผ่าอาข่าและไม่ได้รับการศึกษา จึงทำให้ชุมชนขาดความรู้ความเข้าใจในการดูแลรักษาและซ่อมบำรุง SHS เท่าที่ควร ซึ่งควรได้รับการพัฒนาศักยภาพด้านความรู้ดังกล่าวที่เหมาะสมกับบริบทชุมชน รวมถึงควรกระตุ้นให้เกิดการมีส่วนร่วมในการพัฒนาของภาคประชาชนและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง โดยภาครัฐจะต้องมีบทบาทในการติดตามตรวจสอบและประเมินผลการดำเนินงาน SHS อย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ พบว่า ความพึงพอใจต่อการพัฒนา SHS ในภาพรวมระดับน้อย มีความพึงพอใจระดับปานกลางต่อ SHS เป็นระบบที่เหมาะสมกับพื้นที่ห่างไกล โดยชุมชนมีความคิดเห็นว่าการนำ SHS มาใช้อาจมีความเหมาะสมกับการพัฒนาคุณภาพชีวิตของตนเองก็จริง แต่การขาดความรู้ความเข้าใจเรื่องพลังงานทดแทนและชุมชนไม่มีส่วนร่วมในการบริหารจัดการ SHS เมื่ออุปกรณ์ SHS ชำรุดหรือใช้งานไม่ได้

จึงส่งผลให้ชุมชนไม่สามารถดูแลรักษาและซ่อมบำรุง SHS ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ประกอบกับการได้รับการดูแลจากผู้มีส่วนเกี่ยวข้องน้อย เป็นผลทำให้คนในชุมชนเกิดทัศนคติที่ไม่ดีต่อ SHS

ด้านปัจจัยแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อการพัฒนา SHS คือ ปัจจัยแวดล้อมด้านเทคโนโลยีและประโยชน์ของ SHS ที่สังคมได้รับ เมื่อพิจารณาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการพัฒนา พบว่า ปัจจัยด้านสังคมได้รับอิทธิพลในทิศทางบวก ซึ่งปัจจัยสังคมประกอบด้วยระดับการศึกษา จำนวนผู้ต้องงการใช้ไฟฟ้าจาก SHS ที่เพิ่มขึ้น การยอมรับ/การต่อต้าน SHS ระบบสาธารณูปโภค การคมนาคม และการติดต่อสื่อสารกับเจ้าหน้าที่เมื่อมีปัญหาการใช้งาน SHS ทั้งนี้ อาจเนื่องจากเทคโนโลยี SHS มีความยากต่อการซ่อมบำรุง เมื่อเปรียบเทียบกับระดับความรู้ของชุมชนชาวเขาเผ่าอาข่า ทำให้ต้องได้รับการแนะนำ ปรีกษา และความช่วยเหลือจากผู้ที่มีความรู้และประสบการณ์ตรง ทั้งนี้ประสบการณ์และความรู้ของชุมชนต่อ SHS จะมีผลต่อความคิดเห็นด้านการยอมรับและการใช้เทคโนโลยีเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ [7] นอกจากนี้การมีพลังงานไฟฟ้าที่เพียงพอต่อความต้องการพื้นฐานของคนในชุมชนนั้น จะต้องมีการศึกษาปรับปรุงเทคโนโลยีและกระบวนการจัดการที่เหมาะสม และการติดตามประเมินผลอย่างต่อเนื่อง อันจะนำมาซึ่งการจัดการพลังงานชุมชนอย่างยั่งยืนได้ [8]

5. ข้อเสนอแนะจากผลการวิจัย

ผลการวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางการส่งเสริมให้ประชาชนมีแนวคิดและทัศนคติที่ดีต่อการใช้ไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน โดยภาครัฐควรมีนโยบายสนับสนุนงบประมาณ กำลังคน และพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานอย่างต่อเนื่อง รวมถึงมีการดำเนินงานด้านพลังงานทดแทนในชุมชนที่เป็นรูปธรรม ตลอดจนส่งเสริมให้ชุมชนมีส่วนร่วมในการพัฒนาพลังงานทดแทนในชุมชนภายใต้แนวคิดหลักปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง ซึ่งควรได้รับการศึกษาลำดับต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปีงบประมาณ 2557 และประจำปีงบประมาณ 2560

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, *แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2558 – 2579 (PDP2015)*. กระทรวงพลังงาน, 2558. หน้า 3-5.
- [2] พิมพ์นภัศ เอี่ยมสมบูรณ์, นงลักษณ์ ไหว้พรหม, สุรินทร์ แหงมงาม และกฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์, *รายงานการวิจัยการจำลองแบบปัจจัยแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อพัฒนาระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ยั่งยืนในประเทศไทย*, 2558.

- [3] R. Ba'nosa, F. Manzano-Agugliarob, F.G. Montoyab, C. Gila, A. Alcaydeb, and J. Gomez, "Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp.1753–1766, 2011.
- [4] S. Annika, L. Mats, R. Alf, L. Marcus, and W. Rafael, "On the physics of power, energy and economics of renewable electric energy sources - Part II," *Renewable Energy*, vol. 35 pp. 1735–1740, 2010.
- [5] N.L. Panwara, S.C. Kaushikb, K. Surendra, "Role of renewable energy sources in environmental protection: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15 pp. 1513–1524, 2011.
- [6] บริษัท ลีโอนิกส์ เอสโก้ จำกัด. (15 พฤษภาคม 2560). *ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อบ้านพักอาศัย*. สืบค้นจาก http://www.leonics.co.th/html/th/pd_ecs/sys_shs/shs_00130.php.
- [7] สุริยพันธุ์ สิงหนนิยม และภูมิพร ธรรมสถิตเดช, "ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมกรยอมรับการใช้เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์" ใน *Graduate Research Conference 2014*, ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2556, หน้า 536-544.
- [8] สมศักดิ์ มีนคร, *รายงานการวิจัยเรื่องการศึกษาารูปแบบการจัดการพลังงานที่เหมาะสมในพื้นที่อำเภออัมพวา*. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา. 2555.

