

“วิศวกรรมลาดกระบัง”

วิศวกรรมลาดกระบังเป็นวารสารทางวิชาการซึ่งจัดทำโดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. เป็นเอกสารเผยแพร่งานวิจัยและพัฒนาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์
2. เป็นสื่อแลกเปลี่ยนความรู้ใหม่ ๆ ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ระหว่างนักวิจัยและผู้สนใจ
3. เป็นเอกสารรวบรวมรายงานและบทความทางวิชาการที่น่าสนใจและมีคุณค่าทางวิศวกรรมศาสตร์

วาระที่ออก

ปีละ 4 ฉบับ (ทุก 3 เดือนต่อฉบับ)

นโยบาย

บทความที่จะเสนอตีพิมพ์ จะต้องเป็นบทความที่มีคุณค่าทางวิศวกรรม เช่น เป็นรายงานการวิจัยที่ผู้เขียนได้ทำการทดลอง สร้าง หรือมีส่วนกับงานโดยตรง เป็นบทความที่เสนอถึงความคิดหรือหลักการใหม่ที่เป็นไปได้และมีทฤษฎีประกอบหรือสนับสนุนอย่างเพียงพอ หรือเป็นบทความทางวิชาการที่น่าสนใจ มีประโยชน์ต่อนักศึกษาและนักวิจัย โดยผู้เขียนเป็นผู้รวบรวมและเรียบเรียงเอง

รูปแบบของบทความ

บทความที่เสนอจะเป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษก็ได้ โดยจัดพิมพ์ตามรูปแบบที่กำหนดให้ ซึ่งพร้อมที่จะนำไปถ่ายเพลทเพื่อพิมพ์ได้ทันที (camera ready) และเพื่อให้รูปแบบการพิมพ์ของบทความมีมาตรฐานเดียวกันจึงขอให้ผู้เขียนจัดเตรียมเอกสารโดยใช้เวิร์ดโปรเซสเซอร์ **Microsoft Word for Windows** สำหรับรูปภาพประกอบ หากมีใช้ภาพถ่ายก็ควรเขียนหรือสเก็ตโดยใช้ซอฟต์แวร์ ที่สนับสนุนการทำงานในระบบ Windows

บทความที่น่าเสนอเพื่อตีพิมพ์ ควรประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ตามลำดับ ดังนี้

ชื่อเรื่อง	ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ	
ชื่อผู้เขียนและผู้ร่วมงาน	ไม่ต้องระบุคุณวุฒิหรือตำแหน่งทางวิชาการใด ๆ	
สถานที่ทำงาน	ในกรณีที่ผู้เขียนหรือผู้ร่วมงานเป็นนักศึกษา ให้ใช้คณะและสถาบันที่สังกัดเป็นสถานที่ทำงาน	
บทคัดย่อ	ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ	
เนื้อความ	ควรประกอบไปด้วยหัวข้อต่าง ๆ และมีเลขประจำหัวข้อ ตามลำดับ	
	1. บทนำ	3. การทดลองและผลการทดลอง
	2. ทฤษฎี	4. สรุป
	2.1 หลักการของ.....	
	2.2 หลักการใหม่.....	

กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี)

เอกสารอ้างอิง การอ้างในบทความให้ใช้หมายเลขประจำเอกสารหรือบทความที่อ้างอิง โดยตัวเลขจะอยู่ในวงเล็บใหญ่ โดยรูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิงจะเป็นดังนี้

- [1] P. Choeysuwan and S. Choomchuan, “The Economics Analysis of RFID Implementation in Logistic,” Ladkrabang Engineering Journal, Vol.30, No.1, pp.7-12, March, 2556.
- [2] I. M. Filanovsky and H.P. Baltes, “Simple CMOS Analog Square-Rooting and Squaring Circuits,” IEEE Trans. Circuits and Systems, Vol.39, No.4, pp.312-315, Sept., 1992.
- [3] R. E. Blahut, Theory and Practice of Error Control Codes, Addison-Wesley, Reading, MA, 1983.

การส่งบทความ

บทความที่จะส่งเปิดรับทั้งจากบุคคลภายในและภายนอกสถาบันฯ โดยเนื้อหาของบทความมีความยาวไม่เกิน 6 หน้า 2 คอลัมน์ โดยติดต่อส่งได้ที่ E-mail : kmil.eng.jnl@gmail.com ส่วนวิศวกรรมลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง บทความจะได้รับการกลั่นกรองโดยผู้อ่านที่ทรงคุณวุฒิในสาขานั้น ๆ และเมื่อบทความได้รับการแก้ไข (หากมี) อย่างเหมาะสม ผู้เขียนจะต้องส่งต้นฉบับ 1 ชุด และซีดีข้อมูลบทความอีก 1 ชุด

เจ้าของ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ (662) 329-8000 # 3464, 3465

โทรสาร (662) 329-8317

ที่ปรึกษา

คณบดี

รศ.ดร.คมสัน มาลีสี

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

รศ.ดร.อิสระชัย จามหฺร

กองบรรณาธิการ

นายโกล วาดเขียน

ออกแบบปกและรูปเล่ม

นางอาทิตย์ดา ขาววิกรม

ติดต่อประสานงานและสมาชิกสัมพันธ์

จัดทำต้นฉบับ Artwork

พิสูจน์อักษร

จัดจำหน่ายโดย

คณะวิศวกรรมศาสตร์

นางอาทิตย์ดา ขาววิกรม

โทร. 02-329-8317



วิศวกรรมลาดกระบัง

Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้ทรงคุณวุฒิในกองบรรณาธิการ “วิศวกรรมลาดกระบัง”

ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ

คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.เควิด บรรเจิดพงษ์ชัย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกผาลิน

บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติ

สิรินธร ไทย-เยอรมัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า-

พระนครเหนือ

ศาสตราจารย์ ดร.อภิศักดิ์ วรพิเชฐ

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ชูชีพสกุล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.สราวุฒิ สุจิตรงจร

สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

ศาสตราจารย์ ดร.โมนัย ไกรฤกษ์

สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

ศาสตราจารย์ ดร.วัลลภ สุระกำพลธร

สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีขั้นสูง (THAIST)

สำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์

เทคโนโลยีนวัตกรรมแห่งชาติ (สวทน.)

รองศาสตราจารย์ ดร. กอบชัย เดชหาญ

สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

เครื่องปฏิกรณ์ชนิดหมุนวนสำหรับเพาะเลี้ยงสาหร่าย

Airlift Bioreactor for Algae Cultivation

ณัฐจักร วงศ์คำ จตุพร ภักดี ธนวรรณ พิณรัตน์

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความวิชาการนี้กล่าวถึงชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ระบบปิด ที่สามารถนำมาใช้เพาะเลี้ยงสาหร่ายโดยมีการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของชนิดเครื่องปฏิกรณ์ โดยเครื่องปฏิกรณ์ชนิดหมุนวนมีความเป็นไปได้ในการใช้งานระดับอุตสาหกรรม และได้กล่าวถึงปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวให้มีความเหมาะสมกับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย

คำสำคัญ : เครื่องปฏิกรณ์, การเพาะเลี้ยง, สาหร่าย

Abstract

This article reviews the possible bioreactor in closed system, which can be used for algae cultivation. The advantage and disadvantage of different type of reactor were compared. The airlift bioreactor has high potential to apply in the industrial scale. In addition, the important parameters in bioreactor design for algae cultivation were mentioned.

Keywords : Bioreactor, Cultivation, Algae

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการพัฒนาเทคโนโลยีและแสงสว่างพลังงานทางเลือกเพื่อทดแทนการใช้พลังงานจากปิโตรเลียม นอกจากพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำแล้ว การผลิตน้ำมันจากสาหร่ายนับเป็นแหล่งพลังงานสำคัญอย่างหนึ่ง เพราะสาหร่ายมีอัตราการขยายพันธุ์รวดเร็ว วงจรชีวิตสั้น ใช้พื้นที่และน้ำในการเพาะปลูกน้อยกว่าพืชชนิดอื่นที่ให้น้ำมันทั่วไป [1]และ[2]

การปลูกสาหร่ายจำเป็นต้องใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และธาตุอาหาร ดังนั้นการปลูกสาหร่ายในบริเวณโรงงานจะช่วยลดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และช่วยบำบัดน้ำเสีย [2]และ[3] สาหร่ายนั้นมีองค์ประกอบหลัก 3 อย่างคือ โปรตีน คาร์โบไฮเดรตและไขมัน ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร ยา รักษาโรค ผลิตภัณฑ์อาหารเสริม และเครื่องสำอาง [3]และ[4] การเพาะปลูกสาหร่ายในระบบที่ต้องการความบริสุทธิ์

ของผลิตภัณฑ์และกำลังการผลิตสูงนั้นเครื่องปฏิกรณ์ชนิดหมุนวนเป็นตัวเลือกที่มีความเป็นไปได้เพื่อนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการเพาะเลี้ยง โดยบทความนี้จะเปรียบเทียบความเหมาะสมของเครื่องปฏิกรณ์และเน้นเครื่องปฏิกรณ์ชนิดหมุนวนซึ่งเป็นระบบปิดที่น่าสนใจสำหรับการเพาะปลูกสาหร่ายและกล่าวถึงปัจจัยที่สำคัญที่ควรคำนึงถึงในการเพาะเลี้ยงโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดหมุนวน

2. เครื่องปฏิกรณ์สำหรับเพาะเลี้ยงสาหร่าย

ดังนั้นวิธีการเพาะปลูกสาหร่ายให้มีประสิทธิภาพเป็นงานวิจัยที่น่าสนใจ โดยนักวิจัยได้มีการพัฒนาวิธีการเพาะเลี้ยงสาหร่ายหลากหลายวิธีด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นการเลี้ยงในระบบเปิดหรือระบบปิด ระบบเปิดเป็นเพาะเลี้ยงโดยใช้อุปกรณ์เชิงกลเพื่อช่วยให้สาหร่ายเจริญเติบโตเป็นบ่อเปิดขนาดใหญ่ กลางแจ้ง เพาะเลี้ยงในสภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ เช่น การเพาะเลี้ยงในบ่อเปิด

(open pond) ทะเลสาบ (lagoon) หรืออาจจะเป็นบ่อวน (Raceway pond) ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ให้ระบบหมุนวน ข้อดีของการเพาะเลี้ยงในระบบเปิดคือ การก่อสร้างและการดำเนินการที่ง่ายกว่าการเพาะเลี้ยงในระบบปิด แต่มีข้อจำกัดคือ ปริมาณแสงที่ให้สาหร่าย หรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไม่เพียงพอ และต้องการพื้นที่ติดตั้งบริเวณกว้าง โดยที่การเลี้ยงในระบบเปิดนั้นมีราคาถูกและสร้างได้ง่าย แต่จะใช้เนื้อที่ค่อนข้างมากและควบคุมสิ่งเจือปนได้ยาก จึงมีการพัฒนาการเพาะเลี้ยงในระบบปิด ระบบปิดเป็นการเพาะเลี้ยงในเครื่อง

ปฏิกรณ์โดยควบคุมสภาวะให้เหมาะสมตามความต้องการ ซึ่งสามารถออกแบบได้หลายวิธี ข้อดี ข้อเสียของระบบปิดในแต่ละวิธีแสดงดังตารางที่ 1

จากตารางที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบข้อดี ข้อเสียของเครื่องปฏิกรณ์ในแต่ละชนิด พบว่า เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อให้ประสิทธิภาพการเพาะปลูกที่ต่ำที่สุด เนื่องจากระยะเวลาของแก๊สที่ใช้เดินทางในท่อนาน สาหร่ายจึงมีโอกาสนับสัมผัสกับแก๊สที่ปล่อยเข้าไปได้น้อยและไม่ทั่วถึง อีกทั้งยังมีข้อจำกัดในการขยายขนาดที่ยาก

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเครื่องปฏิกรณ์ระบบปิดแต่ละชนิด

ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์	ประสิทธิภาพการเพาะปลูก	การควบคุมการปนเปื้อน	ขนาดพื้นที่ที่ต้องการ	การขยายขนาด	อ้างอิง
เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ (Tubular Reactor)	ต่ำ	ปานกลาง	ปานกลาง	ยาก	[5]
เครื่องปฏิกรณ์แบบแผ่น (Flat Plate Reactor)	ดีมาก	ยาก	น้อย	ยาก	[6]
เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน (Stir Tank Reactor)	ดี	ยาก	มาก	ง่าย	[7]
เครื่องปฏิกรณ์แบบฟอง (Bubble Column Reactor)	พอใช้	ดี	ปานกลาง	ง่าย	[8]
เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวน (Airlift Reactor)	ดี	ดีมาก	ปานกลาง	ง่าย	[9]

สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบแผ่นให้ประสิทธิภาพ การเพาะปลูกดีมาก ลดปัญหาระยะเวลาการเดินทางของแก๊สเพื่อให้แก๊สสัมผัสกับสาหร่ายในเครื่องปฏิกรณ์ได้ดีขึ้น และมีพื้นที่รับแสงมาก แต่ยังมีปัญหาในการควบคุมการปนเปื้อนและการขยายขนาดเพราะลักษณะที่เป็นแผ่นของเครื่องปฏิกรณ์ที่บาง ทำให้เป็นข้อจำกัดในการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์จะต้องใช้พื้นที่เป็นบริเวณกว้าง ส่วนเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน ให้ประสิทธิภาพการเพาะปลูกสาหร่ายที่ดี และขยายขนาดได้ง่ายกว่าแบบท่อและแบบแผ่น แต่ยังมีปัญหาการปนเปื้อนของระบบและ

ใช้ขนาดพื้นที่กว้าง จึงไม่เหมาะกับการใช้งานจริง เพราะอาจมีผลกับต้นทุนและผลตอบแทนของการผลิต ในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนมีการป้องกันการปนเปื้อนดี และการขยายขนาดที่ง่ายแต่ประสิทธิภาพการเพาะปลูกของเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนดีกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบฟองอากาศเนื่องจากมีการเพิ่มท่อกลางภายในเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหมุนวนแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์ จึงทำให้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดหมุนวนมีประสิทธิภาพในการเพาะปลูกที่ดีที่สุด โดยปกติสำหรับการเพาะเลี้ยง

สำหรับเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์แสงนี้จะมีการให้แสงโดยใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์หรือการใช้แสงเทียมจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ส่องให้แสงสว่างจากภายนอก

เมื่อพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการนำเครื่องปฏิกรณ์เพาะเลี้ยงสาหร่ายมาใช้จริงในระดับอุตสาหกรรม จะเห็นได้ว่าเครื่องปฏิกรณ์ชนิดการหมุนวนนั้นมีความเป็นไปได้สูง เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ถูกใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม ด้วยข้อดีดังนี้คือ การก่อสร้างง่าย มีส่วนที่ไม่เคลื่อนที่ มีการถ่ายเทมวลและความร้อนที่ดี การผสมกันของของเหลวภายในเครื่องมีประสิทธิภาพ

ภาพ ต้องการพลังงานต่ำ และใช้ต้นทุนต่ำในการดำเนินการ โดยในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายจะต้องคำนึงถึงความสามารถในการถ่ายเทแลกเปลี่ยนมวล (Mass transfer) รูปแบบการผสมที่เกิดขึ้น เวลาที่ใช้ในการผสม โดยปัจจัยที่ส่งผลกระทบคือ ลักษณะทางกายภาพของเครื่องปฏิกรณ์ ความเร็วของของเหลวและแก๊ส ความเหมาะสมของปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะกล่าวถึงในรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบการใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดหมุนวนสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย

สายพันธุ์สาหร่าย	ปริมาตร (ลิตร)	A_d/A_r	อัตราการไหลแก๊ส (vvm)	ความเร็วแก๊ส (cm/s)	ความเข้มข้น CO_2 (%)	อัตราการเจริญเติบโต (ต่อวัน)	อ้างอิง
Hematococcus pluvialis	3	3.20	N/A	0.4	1.0	0.31	[10]
Chlorella sorokiniana	N/A	4.40	0.33	N/A	5.0	0.25	[11]
Skeletonema costatum	3	3.27	N/A	1.5	อากาศบริสุทธิ์	1.68	[12]
Chaetoceros calcitrans	17	2.63	N/A	3	อากาศบริสุทธิ์	1.78	[13]
Chlorella sorokiniana	1.4	N/A	0.33	N/A	4.4	N/A	[14]
Anabaena sp	1.4	1.60	0.25	N/A	1.0	N/A	[15]
Spirulina platensis	1.5	2.60	3.3	N/A	อากาศบริสุทธิ์	0.16-0.28	[16]
Spirulina platensis	1.51	1.49	1	N/A	อากาศบริสุทธิ์	0.47	[17]

หมายเหตุ : N/A คือ ไม่มีข้อมูล

: A_d/A_r คือ อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดคาน์คัมเมอร์ต่อพื้นที่หน้าตัดไรเซอร์

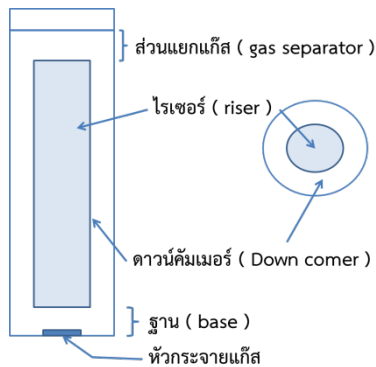
3. ปัจจัยที่มีผลต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวน

3.1 ลักษณะทางกายภาพของเครื่องปฏิกรณ์

ลักษณะเด่นของเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนอากาศคือ ของเหลวจะไหลขึ้นจากใจกลางคอลัมน์ไปตามความสูงเครื่องปฏิกรณ์โดยการใส่ท่อกลวง เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนอากาศประกอบไปด้วย 4 ส่วนหลักตามรูปที่ 1 คือส่วนไรเซอร์ (Riser) ส่วนคาน์คัมเมอร์ (Down-comer) ส่วนฐาน (Base) และส่วนแยกแก๊ส (Gas separa-

tor) ซึ่งการออกแบบตามทฤษฎีของเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนจะต้องมีความสูงของส่วนแยกแก๊สและส่วนฐานที่เท่ากัน อากาศจะถูกป้อนผ่านหัวกระจายแก๊สจากด้านล่างถึงเครื่องปฏิกรณ์ ส่วนที่มีการไหลจากด้านล่างขึ้นด้านบนถูกเรียกว่า ไรเซอร์ และส่วนที่มีทิศการไหลตรงข้ามถูกเรียกว่า คาน์คัมเมอร์ ซึ่งการไหลเวียนเกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของผสม 2 สถานะในไรเซอร์และการไหลเวียนจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่ออัตราการไหลของแก๊สมากพอที่จะทำให้ความเร็วของของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์สามารถพาแก๊สที่

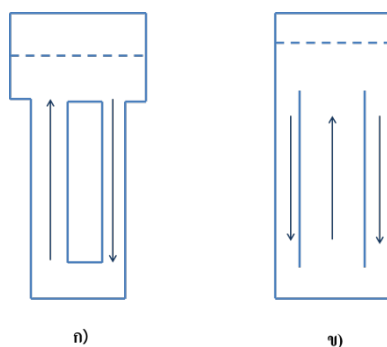
เคลื่อนที่ขึ้นจากส่วนของไรเซอร์ไหลผ่านส่วนของ
ดาวนคัมเมอร์ส่วนทางกลับลงสู่ด้านล่างเครื่องปฏิกรณ์
[18]



รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบสำคัญของเครื่องปฏิกรณ์

แบบหมุนวน

เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ ชนิด
หมุนวนภายในและชนิดหมุนวนภายนอก ซึ่งความ
แตกต่างของทั้งสองชนิด อยู่ที่เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุน
วนภายนอกประกอบด้วยสองคอลัมน์ที่แยกออกจากกัน
มีจุดเชื่อมต่อ 2 จุดอยู่ที่ส่วนบนและส่วนล่างของเครื่อง
ปฏิกรณ์ ซึ่งความต่างนี้ส่งผลให้เกิดการแยกแก๊สในส่วน
ของด้านบนถึง [19] ตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวน ก)
เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนภายนอก ข) เครื่องปฏิกรณ์
แบบหมุนวนภายใน [20]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในตารางที่ 2 พบว่าการ
ออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ทุกขนาดจะต้องคำนึงถึง
อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดดาวนคัมเมอร์ต่อพื้นที่หน้าตัดไร-

เซอร์ (A_d/A_r) ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมของของ
ไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อ A_d/A_r ลดลงจะทำให้
ความเร็วในการไหลวนของของเหลวภายในเครื่อง
ปฏิกรณ์ลดลง ใช้เวลาในการไหลวนครบรอบนานขึ้น
ทำให้การถ่ายเทมวลระหว่างของเหลวและแก๊สดีขึ้น แต่
อย่างไรก็ตามค่า A_d/A_r ที่น้อยมากเกินไป ความเร็วของ
ของไหลในไรเซอร์จะลดลงจนไม่สามารถพาแก๊สกลับสู่
ด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ผ่านทางดาวนคัมเมอร์ทำให้
ถ่ายโอนมวลได้ไม่ดี อัตราส่วน A_d/A_r ที่ส่งผลให้เครื่อง
ปฏิกรณ์มีประสิทธิภาพเหมาะสมกับการเพาะเลี้ยง
สาหร่ายจะอยู่ในช่วง 1-5 [10-13],[15-17]

3.2 ความเร็วของของเหลวและแก๊ส

อัตราการไหลและความเร็วของแก๊สขาเข้าส่งผลต่อ
ความเร็วของของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์ด้วยเช่นกัน
หากแก๊สขาเข้ามีความเร็วที่น้อยเกินไปของเหลวจะ
ไม่สามารถพาฟองแก๊สกลับลงมาในส่วนของดาวนคัมเมอร์
ทำให้ไม่เกิดการไหลเวียนของแก๊ส เวลาในการถ่ายโอน
มวลระหว่างแก๊สกับของเหลวจึงลดลง แต่ถ้าความเร็ว
ของแก๊สขาเข้ามากเกินไปจะเกิดการรวมตัวกันของฟอง
แก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์อย่างรวดเร็วอัตราการป้อน
แก๊สเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์นั้นจะต้องคำนึงถึงปริมาตรของ
เครื่องปฏิกรณ์เป็นหลัก อัตราการไหลของแก๊สจึงมัก
นิยมเขียนในหน่วยของปริมาตรแก๊สต่อปริมาตร
ของเหลวต่อนาที (vvm) โดยส่วนใหญ่อัตราการไหลของ
แก๊สที่ทำให้สาหร่ายเติบโตได้ดีจะอยู่ในช่วง 0.25-3.3
vvm [11],[14-17] แต่อย่างไรก็ตามอัตราการไหลของ
แก๊สที่มากเกินไปจะส่งผลให้เกิดแรงเฉือนภายในเครื่อง
ปฏิกรณ์ทำให้เซลล์สาหร่ายแตกได้ [20]

3.3 ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เป็นอีกปัจจัยหนึ่ง
ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายและเกี่ยวข้องกับ
อัตราการไหลของแก๊สขาเข้าโดยตรงถ้าความเข้มข้นของ
แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงและมีอัตราการไหลที่เร็วจะ
ส่งผลให้สารอาหารภายในเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเป็นกรด

และมีคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่มากเกินความจำเป็น หากความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำในแก๊สขาเข้าที่มีอัตราเร็วต่ำ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์จะน้อยไม่เพียงพอต่อความต้องการของสาหร่าย สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออากาศมักอยู่ในช่วง 1-5 เปอร์เซ็นต์เป็นช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสม [10], [11],[14],[15] การใช้อากาศบริสุทธิ์เป็นแก๊สขาเข้าจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการเพราะในอากาศบริสุทธิ์จะมีคาร์บอนไดออกไซด์ผสมอยู่แต่มีอยู่ปริมาณหนึ่งเท่านั้นสาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้แต่ไม่ดีเท่าการใส่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผสมอากาศในปริมาณที่เหมาะสมต่อสายพันธุ์สาหร่ายแต่ละชนิด

ส่วนการเจริญเติบโตของสาหร่ายนั้นสามารถวัดได้จากความเข้มข้นของเซลล์สาหร่ายภายในเครื่องปฏิกรณ์เทียบกับเวลาโดยใช้เครื่องนับเซลล์ Heamacytometer ซึ่งอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่าย สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\mu = \frac{\ln N_2 - \ln N_1}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

เมื่อ μ คืออัตราการเจริญเติบโตของสาหร่าย (h^{-1}) N_1 และ N_2 ความเข้มข้นของเซลล์สาหร่ายที่เวลา t_1 และ เวลา t_2 ตามลำดับ (cell h^{-1}) t_1 คือเวลาที่เก็บตัวอย่างครั้งแรก (h_1) t_2 คือเวลาที่เก็บตัวอย่างครั้งที่สอง (h_2) [13]และ[14] อย่างไรก็ตามอัตราการเจริญเติบโตยังขึ้นกับปัจจัยอื่นนอกเหนือจากปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้น เช่น สายพันธุ์สาหร่าย สารอาหารที่ใช้เพาะปลูก เป็นต้น

4. สรุป

การเพาะเลี้ยงสาหร่ายในเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนเป็นวิธีที่มีความเป็นไปได้ในการใช้งานในระดับอุตสาหกรรมโดยการออกแบบต้องคำนึงถึงปัจจัยทางกายภาพ ค่าอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดดาวนัลัมเมอร์ต่อพื้นที่หน้าตัดไรเซอร์ อัตราเร็วของการป้อนแก๊ส ความเร็วของของเหลวและแก๊ส ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์และทำการปรับเปลี่ยนให้มีความเหมาะสมกับการเลี้ยงสาหร่ายในแต่ละสายพันธุ์อีกด้วย

5.เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Chisti, "Biodiesel from microalgae beats bioethanol," Trends Biotechnol., vol. 26, no. 3, pp. 126–131, Mar. 2008.
- [2] Y. Li, M. Horsman, N. Wu, C. Q. Lan, and N. Dubois-Calero, "Biofuels from microalgae," Bio technol. Prog., vol. 24, no. 4, pp. 815–820, Aug. 2008.
- [3] T. M. Mata, A. A. Martins, and N. S. Caetano, "Microalgae for biodiesel production and other applications: A review," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 14, no. 1, pp. 217–232, Jan. 2010.
- [4] M. R. Brown, M. Mular, I. Miller, C. Farmer, and C. Trenerry, "The vitamin content of microalgae used in aquaculture," J. Appl. Phycol., vol. 11, no. 3, pp. 247–255, Jun. 1999.
- [5] C. U. Ugwu, H. Aoyagi, and H. Uchiyama, "Photobioreactors for mass cultivation of algae," Bioresour. Technol., vol. 99, no. 10, pp. 4021–4028, Jul. 2008.
- [6] A. Massart, A. Mirisola, D. Lupant, D. Thomas, and A.-L. Hantson, "Experimental characterization and numerical simulation of the hydrodynamics in an airlift photobioreactor for microalgae cultures," Algal Res.
- [7] M. Hernández, G. Quijano, R. Muñoz, and S. Bordel, "Modeling of VOC mass transfer in two-liquid phase stirred tank, biotrickling filter and airlift reactors," Chem. Eng. J., vol. 172, no. 2–3, pp. 961–969, Aug. 2011.
- [8] S. Yadala and S. Cremaschi, "Design and optimization of artificial cultivation units for algae production," Energy, Jun. 2014.
- [9] M. H. Abdel-Aziz, I. Nirdosh, and G. H. Sedahmed, "Liquid–solid mass and heat transfer behavior of a concentric tube airlift reactor," Int.

- J. Heat Mass Transf., vol. 58, no. 1–2, pp.735–739, Mar. 2013.
- [10] K. Kaewpintong, A. Shotipruk, S. Powtongsook, and P. Pavasant, “Photoautotrophic high-density cultivation of vegetative cells of *Haematococcus pluvialis* in airlift bioreactor,” *Bioresour. Technol.*, vol. 98, no. 2, pp. 288–295, Jan. 2007.
- [11] K. Kumar and D. Das, “Growth characteristics of *Chlorella sorokiniana* in airlift and bubble column photobioreactors,” *Bioresour. Technol.*, vol. 116, pp. 307–313, Jul. 2012.
- [12] S. Monksit, S. Powtongsook, and P. Pavasant, “Comparison between Airlift Photobioreactor and Bubblecolumn for *Skeletonema Costatum* Cultivation,” *Eng. J.*, vol. 15, no. 4, pp. 53–64, Mar. 2011.
- [13] S. Krichnavaruk, W. Loataweesup, S. Powtongsook, and P. Pavasant, “Optimal growth conditions and the cultivation of *Chaetoceros calcitrans* in airlift photobioreactor,” *Chem. Eng. J.*, vol. 105, no. 3, pp. 91–98, Jan. 2005.
- [14] K. Kumar, D. Banerjee, and D. Das, “Carbon dioxide sequestration from industrial flue gas by *Chlorella sorokiniana*,” *Bioresour. Technol.*, vol. 152, pp. 225–233, Jan. 2014.
- [15] B. K. Nayak, S. Roy, and D. Das, “Biohydrogen production from algal biomass (*Anabaena* sp. PCC 7120) cultivated in airlift photobioreactor,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 39, no. 14, pp. 7553–7560, May 2014.
- [16] X. Yuan, A. Kumar, A. K. Sahu, and S. J. Ergas, “Impact of ammonia concentration on *Spirulina platensis* growth in an airlift photobioreactor,” *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 3, pp. 3234–3239, Feb. 2011.
- [17] S. Oncel and F. V. Sukan, “Comparison of two different pneumatically mixed column photobioreactors for the cultivation of *Arthrospira platensis* (*Spirulina platensis*),” *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 11, pp. 4755–4760, Jul. 2008.
- [18] L. E. Erickson, “Airlift bioreactors, by M.Y. Chisti. First edition, 1989, 345 pages. Elsevier applied science, London, England and New York, USA \$74.00 (U.S.),” *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 68, no. 2, pp. 349–349, Apr. 1990.
- [19] K. Mohanty, D. Das, and M. N. Biswas, “Hydrodynamics of a novel multi-stage external loop airlift reactor,” *Chem. Eng. Sci.*, vol. 61, no. 14, pp. 4617–4624, Jul. 2006.
- [20] E. Kadic and T. J. Heindel, *An Introduction to Bioreactor Hydrodynamics and Gas-Liquid Mass Transfer*, 1 edition. Wiley, 2014

แนวทางการพัฒนาพื้นที่รอบสถานีขนส่งมวลชนในประเทศไทย

The Guidelines for Transit Oriented Development (TOD)

in Thailand

พรรัตน์ พงษ์ประเสริฐ

สาขาธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ คณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

บทคัดย่อ

การพัฒนาเมืองอย่างฉลาดโดยอาศัยการพัฒนาพื้นที่รอบสถานีขนส่งในรัศมี 400-500 เมตร และใช้ประโยชน์ที่ดินอย่างผสมผสานนั้นเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ใช้ในการจัดระเบียบเมืองใหม่ ซึ่งอาจเป็นเมืองที่เติบโตแบบกระจุกกระจายในอดีต ให้เกิดมีลักษณะการเติบโตของเมืองแบบกระชับขึ้นตามตำแหน่งของสถานีขนส่งมวลชนขนาดใหญ่ เพื่อสร้างความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและเพิ่มแหล่งงานไปสู่ชุมชน ทำให้เกิดการเดินทางด้วยระบบขนส่งแบบรางมากขึ้น และลดการพึ่งพาการใช้รถยนต์ส่วนตัวลง ทำให้ต้นทุนการเดินทางทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในแต่ละวันของประชากรนั้นลดลง โดยสิ่งสำคัญสำหรับแนวทางการพัฒนาพื้นที่รอบสถานีขนส่ง คือ ต้องใช้ประโยชน์ที่ดินแบบผสมผสานให้เกิดความหนาแน่นระดับปานกลางถึงสูงในพื้นที่ มีการออกแบบอาคารที่ผสมผสานกันระหว่างอาคารแนวตั้งและแนวนอน เช่น ที่พักอาศัย, อาคารสำนักงาน, ศูนย์การค้า และพื้นที่เชิงพาณิชย์อื่นๆ เป็นต้น ต้องมีสภาพแวดล้อมที่เอื้อต่อการเดินเท้าและจักรยาน ที่เชื่อมต่อระหว่างอาคารและง่ายต่อการเข้าถึงสถานีขนส่ง ต้องมีทางเลือกที่หลากหลายในการเดินทางด้วยระบบขนส่งสาธารณะ รวมทั้งปรับเปลี่ยนกฎหมาย ระเบียบข้อบังคับต่างๆ เช่น ลดจำนวนที่จอดรถภายในอาคาร เพื่อที่จะสนับสนุนให้โครงการพัฒนาพื้นที่รอบสถานีขนส่งนี้ประสบความสำเร็จ

คำสำคัญ : การพัฒนาพื้นที่รอบสถานีขนส่ง, การใช้ประโยชน์ที่ดินแบบผสมผสาน, ระบบขนส่งแบบราง, การเดินเท้า

Abstract

Smart growth by using Transit oriented development (TOD) approach which is to develop an area of 400-500 meter surrounding transit stations with mixed land use. It can change an urban sprawl to be compact city along the transit stop position. Moreover, it can generate work and enhance economic growth to suburban area. Ridership numbers of rail transit system will increase definitely after implemented TOD. In contrast, car usages will be reduced which significantly impact cost of traveling and daily expense of people who live in suburban areas. Key elements of TOD are mixed land use in moderate to high density development, mixture design of building between vertical and horizontal expression such as residential, office building, shopping mall, and other commercial areas etc. The comfort and safety of pedestrian and bicycle facilities should be provided. The effective connection between all buildings and transportation system will add more performance of area usage. The variety of public transportation mode choices is also important to project. Moreover, an improving the agreement, rule and regulation such a reduction of car parking numbers in building in order to encourage the success of TOD projects.

Keywords : Transit Oriented Development (TOD), Mixed land use, Rail transit system, Pedestrian

1. บทนำ

แนวความคิดในการสร้างเมืองให้เติบโตอย่างชาญฉลาด (Smart Growth) ได้นำมาใช้ในแผนการพัฒนาประเทศระดับภาค เป็นตัวกำหนดแผนยุทธศาสตร์การคมนาคมขนส่ง โดยเริ่มจากการกำหนดลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินให้เกิดความสมดุลระหว่างการส่งเสริมเศรษฐกิจกับการอนุรักษ์พื้นที่ ส่วนแผนยุทธศาสตร์การคมนาคมขนส่งจะมีบทบาทในการสร้างสรรค์การเชื่อมต่อการสัญจรให้เกิดประสิทธิภาพ จึงได้มีการเปลี่ยนบทบาทโครงข่ายคมนาคมขนส่งจากการเป็นปัจจัยในการกระตุ้นการขยายตัวของเมืองแบบไร้รูปแบบ (Urban Sprawl) ให้เป็นการควบคุมการกระจายตัวของเมือง หรือการสร้างเมืองให้เติบโตอย่างเป็นระบบ และให้ความสำคัญกับการคมนาคมขนส่งระบบราง โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบการขนส่งมวลชนภายในเขตเมืองที่เป็นศูนย์กลางทางเศรษฐกิจ (Central Business District: CBD) โดยให้การขนส่งมวลชนระบบรางมีบทบาทหลักในการสนับสนุนการพัฒนารูปทรงของเมืองให้เกิดความกระชับ (Compact city) มีกิจกรรมการใช้ประโยชน์ที่ดินที่มีความหนาแน่น และอนุญาตให้เมืองแผ่ขยายได้ตามแนวโครงข่ายของระบบขนส่งมวลชนแบบราง โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า “การพัฒนาพื้นที่โดยรอบสถานีขนส่ง” (Transit Oriented Development: TOD) ซึ่งมีวัตถุประสงค์ที่สำคัญ เพื่อพัฒนาพื้นที่ให้มีความหนาแน่นปานกลางถึงสูง โดยมีการใช้ประโยชน์ที่ดินแบบผสมผสานสำหรับพื้นที่รอบสถานีขนส่งมวลชนในระยะทางที่เดินทางด้วยเท้าได้ง่าย ซึ่งโครงการ TOD นี้จะเหมือนเป็นการกระจายความเจริญจากเมืองสู่ชานเมืองมากขึ้น ลดความเป็นเมืองศูนย์กลางเดี่ยว (Decentralization) ทางธุรกิจ มีแหล่งงาน และโอกาสในการทำธุรกิจเพิ่มมากขึ้นรอบพื้นที่ของสถานีขนส่งตามแนวเส้นทางระบบขนส่งขนาดใหญ่ ทำให้ประชาชนในพื้นที่ชานเมืองนั้นหางานทำใกล้ที่พักอาศัยมากขึ้น พฤติกรรมในการเดินทางของประชาชนจะถูกเปลี่ยน ลดการพึ่งพาการใช้รถยนต์ส่วนตัวลง มาใช้ระบบขนส่งมวลชนสาธารณะมากขึ้น จะทำให้ต้นทุนการเดินทางทั้ง

เวลาและค่าใช้จ่ายในแต่ละวันลดลงตามมา คุณภาพชีวิตและสังคมจะดีขึ้น ซึ่งในเนื้อหาของบทความนี้ได้แสดงถึงแนวทางในการพัฒนาพื้นที่รอบสถานีขนส่งของประเทศไทย โดยมีการแนะนำถึงปัจจัยในการพัฒนาที่ต้องพิจารณาเพิ่มเติมหรือปรับปรุงแก้ไข ตามลักษณะที่สำคัญของโครงการ TOD ที่ทางองค์กร Institute for Transportation and Development Policy ได้ระบุไว้ [1]

2. Transit Oriented Development: TOD คืออะไร?

ที.โอ.ดี หรือ การพัฒนาพื้นที่รอบสถานีขนส่งมวลชน เป็นกระบวนการจัดการพื้นที่ที่เมืองให้เกิดความกระชับ ส่งเสริมการใช้ประโยชน์ที่ดินแบบผสมผสาน (Mixed land use) ได้แก่ ที่อยู่อาศัย แหล่งพาณิชยกรรม ระบบบริการของเมือง พื้นที่สาธารณะรอบสถานีขนส่งมวลชน โดยการสร้างสรรค์สภาพแวดล้อมที่ดี ปรับปรุงสิ่งอำนวยความสะดวก และทางเดินเท้าให้มีคุณภาพสูง [1] เป้าหมายในการพัฒนาพื้นที่เพื่อใช้โครงสร้างพื้นฐานด้านระบบขนส่งมวลชนที่มีอยู่แล้ว ในการพัฒนาเศรษฐกิจและการเติบโตของสังคมอย่างยั่งยืน ผลักดันให้เกิดการเดินทางด้วยระบบขนส่งมวลชนมากขึ้น เพื่อลดความแออัดของเมือง โดยลักษณะที่สำคัญของโครงการ TOD นั้น มีดังต่อไปนี้

- ใช้ประโยชน์ที่ดินแบบผสมผสาน (Mixed land use) อย่างมีประสิทธิภาพ
- ต้องเป็นพื้นที่ที่มีความหนาแน่นครัวเรือนระดับปานกลางถึงสูง ระหว่าง 7-12 หน่วยต่อเอเคอร์ หรือประมาณ 18-30 หน่วยต่อไร่ [2]
- มีสภาพแวดล้อมที่ดีเอื้อต่อการเดินเท้า และมีเส้นทางเดินต้องเชื่อมต่อในทุกๆ พื้นที่
- มีทางเลือกที่หลากหลายสำหรับการเดินทาง
- มีการรณรงค์ให้ลดจำนวนที่จอดรถยนต์ในพื้นที่โครงการ TOD
- คนทั่วไปทุกระดับรายได้สามารถอยู่อาศัยได้

3. ทำไมประเทศไทยจึงควรเริ่มพัฒนาโครงการ TOD

ประเทศไทยมีความตื่นตัวอย่างมาก ในเรื่องของการพัฒนาระบบขนส่งมวลชน โดยรถไฟฟ้ามหานคร (Bangkok Transit System: BTS) เป็นระบบแรกที่เปิดให้บริการ เมื่อพ.ศ.2542 โดยทั่วไป แผนผังเมืองที่รองรับการพัฒนาพื้นที่รอบสถานีขนส่งต้องถูกนำออกมาใช้ตามมา แต่ผังเมืองฉบับล่าสุด เพิ่งเริ่มตระหนักถึงความจำเป็นในการพัฒนาบริเวณโดยรอบสถานีขนส่งมวลชนสาธารณะ และยังมีความขัดแย้งกับหลักการของ TOD หลายประการในเรื่องของกฎหมาย เช่น เปอร์เซ็นต์จำนวนที่จอดรถขั้นต่ำที่ทุกอาคารต้องมี แต่ในหลักการของ TOD ไม่ได้สนับสนุนให้ประชาชนใช้รถในพื้นที่ จึงทำให้การพัฒนาโครงการ TOD เป็นไปได้ยากมาก อีกประการที่สำคัญ รัฐบาลจำเป็นต้องเปิดโอกาสให้ภาคเอกชนเข้ามามีบทบาทในการพัฒนาโครงการ TOD ให้มากขึ้น

จากที่ภาครัฐนั้นไม่สามารถจัดสรรพื้นที่พักอาศัยให้อยู่บริเวณเดียวกันหรืออยู่ใกล้กับพื้นที่แหล่งงาน ทั้งนี้เพราะความหนาแน่นแออัดในพื้นที่ และมูลค่าที่ดินไม่คุ้มค่าในการลงทุน อีกทั้งแหล่งการจ้างงานส่วนใหญ่อยู่ใจกลางเมืองเพียงเท่านั้น ซึ่งห่างไกลจากแหล่งบริการสาธารณะ ไม่มีทางเลือกในการเดินทาง ไม่สามารถพัฒนาไปสู่การเป็นชุมชนที่มีคุณภาพได้ ดัชนีการอยู่อาศัยอยู่ในระดับสูง ดังนั้นจึงเชื่อว่า หากทางภาครัฐและผู้มีส่วนเกี่ยวข้องสามารถวางแผนและปรับปรุงให้มีที่อยู่อาศัย และตั้งอยู่ใกล้สถานีขนส่งได้ จะก่อให้เกิดความสะดวกในการเดินทางไปยังแหล่งงานได้ง่ายขึ้น ซึ่งจะสามารถลดค่าใช้จ่ายของในครัวเรือนลงได้ โดยข้อมูลสถิติ จะช่วยสนับสนุนว่าการพัฒนาโครงการ TOD ในประเทศไทย ควรเริ่มต้นอย่างจริงจังและเป็นรูปธรรมมากขึ้น ตามแนวทางการพัฒนาอย่างยั่งยืน เพราะพื้นที่ในกรุงเทพมหานครมีจำกัด แหล่งงานส่วนใหญ่อยู่ในพื้นที่ศูนย์กลางเท่านั้น อีกทั้งจำนวนประชากรของประเทศไทยที่เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ แต่ขณะเดียวกัน ยังมีผู้โดยสารจำนวนน้อยอยู่ที่ใช้ระบบขนส่งมวลชนสาธารณะ ตามมาซึ่งปัญหาของการจราจรติดขัด ต้นทุนค่าเดินทางสูงขึ้น คุณภาพชีวิตแย่ลง ดังข้อมูลต่อไปนี้

3.1 จำนวนประชากรในประเทศที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

จำนวนประชากรของประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากปี 2553 ที่มี 63,878,267 คน จนกระทั่งเป็น 64,785,909 คน ในปี 2556 [3] ซึ่งจากข้อมูลตามตารางที่ 1 ส่วนหนึ่งมีผลจากจำนวนประชากรในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลที่เพิ่มขึ้นทุกปีๆ เช่นกัน ตารางที่ 1 จำนวนประชากรในกรุงเทพ และปริมณฑล ระหว่างปี 2553- 2556 [3]

จังหวัด - ปี	2553	2554	2555	2556
กรุงเทพและปริมณฑล	10,326,093	10,371,003	10,455,800	10,538,932
กรุงเทพ	5,701,394	5,674,843	5,673,560	5,686,252
นนทบุรี	1,101,743	1,122,627	1,141,673	1,156,271
ปทุมธานี	985,643	1,010,898	1,033,837	1,053,158
สมุทรปราการ	1,185,180	1,203,223	1,223,302	1,241,610
สมุทรสาคร	491,887	499,098	508,812	519,457

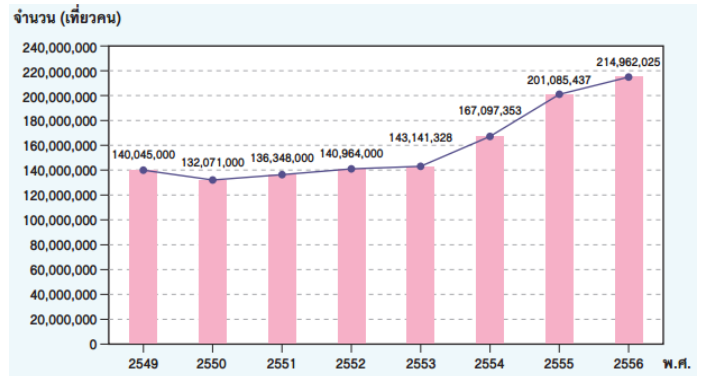
ปัญหาของคนกรุงเทพและปริมณฑลในปัจจุบันที่กระทบต่อคุณภาพชีวิตเป็นอย่างมาก คือ ปัญหาจราจรติดขัด ซึ่งเกิดจากจำนวนรถยนต์บนท้องถนนที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ขณะที่พื้นที่ถนนมีจำกัด ทำให้คนกรุงเทพฯ มีต้นทุนการเดินทางทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในแต่ละวันที่ค่อนข้างสูง โดยสัดส่วนผู้ใช้รถยนต์ส่วนบุคคลในเขตกรุงเทพและปริมณฑลประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์ [4] ใช้เวลาในการเดินทางเฉลี่ยต่อวัน คือ 1 ชั่วโมง 18 นาที (ทั้งขาไป-กลับ) ซึ่งจากสถิติมูลค่าเวลาในการเดินทางของผู้มีงานทำในเขตกรุงเทพมหานคร ปี พ.ศ. 2555 ระบุว่า ต้นทุนในการเดินทางด้วยรถยนต์ส่วนบุคคลในเขตกรุงเทพโดยเฉลี่ย คือ 169.37 บาทต่อชั่วโมง [5] จึงกล่าวได้ว่า 35 เปอร์เซ็นต์ของผู้ที่เดินทางด้วยรถยนต์ส่วนบุคคลเข้ามาทำงานในกรุงเทพฯ มีค่าใช้จ่ายโดยเฉลี่ย 234 บาทต่อวัน ซึ่งสูงมากเมื่อเทียบกับค่าครองชีพเฉลี่ยของคนกรุงเทพและปริมณฑล โดยความเร็วเฉลี่ยของการเดินทางในเขตกรุงเทพทั้งในชั่วโมงเร่งด่วนเช้า (6.00-9.00 น.) และเย็น (16.00-19.00 น.) ด้วยรถยนต์ คือ 16.3 และ 23.5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ [4] โดยเมื่อเปรียบเทียบกับการเดินทางด้วยรถไฟฟ้า ซึ่งมีความเร็วเฉลี่ยที่ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ค่าเดินทางต่อเที่ยวของผู้โดยสารบุคคลทั่วไปก็ถูกกว่า โดยราคาเฉลี่ย

คือ 24.25 บาทต่อเที่ยว [6] ซึ่งมีความสะดวก ปลอดภัย มากกว่าการเดินทางด้วยรถยนต์ แต่ทั้งนี้แล้ว เส้นทางของรถไฟฟ้าในปัจจุบันไม่ครอบคลุมทุกพื้นที่การเดินทาง ดังนั้น ถ้าประเทศไทยสามารถผลักดันการขยายเส้นทางรถไฟฟ้าหรือรถรางไฟฟ้าขนาดเบาได้ พร้อมกับพัฒนาพื้นที่รอบสถานีรถไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพ จะสนับสนุนให้เกิดการเดินทางด้วยระบบขนส่งแบบรางมากขึ้น ลดการพึ่งพารถยนต์ส่วนบุคคลได้

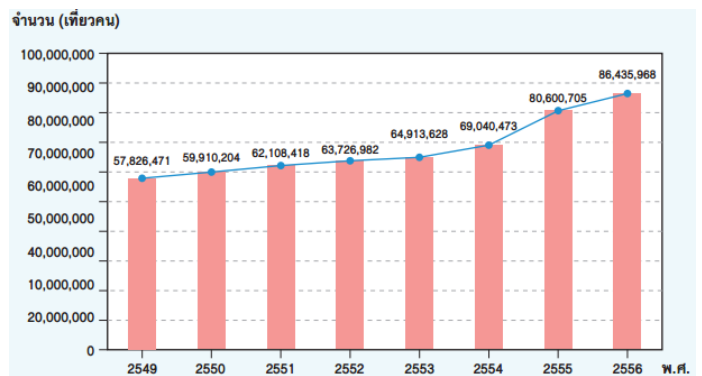
3.2 จำนวนผู้ใช้ระบบขนส่งมวลชนทางรางน้อยกว่าที่คาดการณ์

ผู้โดยสารที่ใช้รถไฟฟ้าในการเดินทางระหว่างกรุงเทพและปริมณฑลนั้นมีสัดส่วนเฉลี่ยประมาณ 4% จากจำนวนการเดินทางทั้งหมด ซึ่งถือว่าเป็นตัวเลขที่น้อยมากเทียบกับเม็ดเงินลงทุนในการสร้างระบบขนส่งมวลชนขนาดหนัก (Heavy rapid transit) ทั้งหมดในกรุงเทพฯ จากรายงานสถิติกรุงเทพ ปี พ.ศ. 2556 แสดงให้เห็นถึงจำนวนผู้โดยสารในแต่ละระบบ โดยมีเพียงรถไฟฟ้ากรุงเทพ (Bangkok Transit System: BTS) เท่านั้น ที่มีจำนวนผู้โดยสารเข้าใช้บริการมากกว่าที่คาดการณ์ โดยในปี พ.ศ.2556 มีจำนวนผู้โดยสารเฉลี่ย 5.8 แสนคน-เที่ยวต่อวัน ซึ่งเกินกว่าที่ตั้งเป้าหมายไว้ที่ 4.5 แสนคน-เที่ยวต่อวัน (รูปที่ 1) แต่ถึงอย่างไรก็ตาม อัตราการเติบโตของจำนวนผู้โดยสารในรถไฟฟ้า BTS ก็ยังถือว่าน้อยอยู่ ประมาณ 7-8% ต่อปี จากที่ตั้งเป้าหมายเอาไว้ที่ 10-15% ต่อปี [7] ซึ่งสาเหตุส่วนหนึ่งเกิดจากการขยายเส้นทางรถไฟฟ้า BTS ที่ไม่ได้ตามเป้า ส่วนในรายชื่อของระบบขนส่งรถไฟฟ้ามหานคร (Metropolitan Rapid Transit: MRT) และ Airport Rail Links หรือ ARL ที่มีจำนวนผู้ใช้บริการเฉลี่ยในปี พ.ศ. 2556 คือ 2.36 แสนคน-เที่ยวต่อวัน และ 42,775 คน-เที่ยวต่อวัน ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าเป้าหมายที่ตั้งเอาไว้คือ 2.6 แสนคน-เที่ยวต่อวัน และ 13,000 คน-เที่ยวต่อวัน [8] (รูปที่ 2 และ 3) ซึ่งทำให้ผลประกอบการทั้งรถไฟฟ้าใต้ดิน MRT และ ARL ขาดทุนในทุกๆปี ภาครัฐต้องช่วยเหลือและจ่ายเงินชดเชย เพื่อให้ระบบขนส่งมวลชนทั้งสองนี้สามารถให้บริการต่อไปได้ ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อประเทศในระยะ

ยาว เนื่องจากระบบขนส่งนี้ไม่ถูกแก้ไขปรับปรุงไปในทางที่ถูกต้อง เพื่อดึงดูดผู้โดยสารให้เข้ามาใช้บริการมากขึ้น ทั้งปัญหาการตรงต่อเวลา ความจุ ความปลอดภัย สิ่งอำนวยความสะดวกระหว่างสถานีและชานชาลา การเชื่อมต่อระหว่างระบบขนส่งมวลชนอื่นๆ เป็นต้น



รูปที่ 1: จำนวนผู้โดยสารที่ใช้บริการรถไฟฟ้าบีทีเอส พ.ศ. 2549-2556 [9]



รูปที่ 2: จำนวนผู้โดยสารที่ใช้บริการรถไฟฟ้ามหานคร (MRT) สายเฉลิมรัชมงคล [9]

เดือน	ปี	จำนวนผู้โดยสาร			
		2553	2554	2555	2556
มกราคม	-	-	992,426	1,216,133	1,256,434
กุมภาพันธ์	-	-	888,613	1,243,382	1,135,328
มีนาคม	-	-	1,055,725	1,304,846	1,345,795
เมษายน	-	-	877,908	1,169,020	1,166,413
พฤษภาคม	-	-	930,725	1,221,292	1,204,605
มิถุนายน	-	-	997,047	1,192,397	1,216,334
กรกฎาคม	-	-	1,049,727	1,271,248	1,315,918
สิงหาคม	270,081	1,126,026	1,290,198	1,393,708	
กันยายน	963,853	1,070,476	1,299,917	1,327,563	
ตุลาคม	1,120,743	1,100,149	1,241,098	1,381,704	
พฤศจิกายน	1,194,007	1,117,439	1,268,643	1,472,087	
ธันวาคม	1,192,080	1,215,375	1,213,833	1,397,145	
รวม		4,740,764	12,421,636	14,932,007	15,613,034

รูปที่ 3: จำนวนผู้โดยสารที่ใช้บริการรถไฟฟ้าแอร์พอร์ต เรลลิงค์ พ.ศ. 2553-2556 [9]

จากที่กล่าวมา ทำให้เห็นถึงปัญหาการตอบรับนโยบายการพัฒนาเมืองด้วยระบบขนส่งทางรางในประเทศไทย ที่มีสัดส่วนน้อยมาก ไม่สอดคล้องกับจำนวนประชากรในพื้นที่ที่เพิ่มขึ้นทุกปี โดยส่วนหนึ่งมาจากแผนผังเมือง

และแผนแม่บทของโครงข่ายระบบขนส่งไม่สอดคล้อง และขาดความต่อเนื่อง ชัดเจน จากปัญหาดังกล่าว สามารถตอบคำถามได้ว่าทำไมจึงควรสนับสนุน โครงการพัฒนาพื้นที่รอบสถานีขนส่ง (TOD) ซึ่งจะสร้างเมืองกระชับในทุกๆ ตำแหน่งสถานีขนส่ง ตามแนวเส้นทางรถไฟฟ้า สร้างความหลากหลายรอบพื้นที่ สร้างเศรษฐกิจและการจ้างงาน ทำให้ประชาชนเดินทางเข้าเมืองเพื่อทำงานลดลง การพึ่งพาการใช้รถยนต์ก็จะลดลง ได้ตามไป คุณภาพชีวิตและสังคมจะดีขึ้นตามลำดับ

4. แนวทางการพัฒนาพื้นที่โดยรอบสถานีขนส่ง

ประกอบด้วยกลไกเชิงนโยบายจากทางภาครัฐและแนวทางการวางแผนเพื่อพัฒนาโครงการ TOD โดยมีรายละเอียดทั้งหมด 13 ข้อดังต่อไปนี้ คือ

1. กระจายอำนาจ เพิ่มการมีส่วนร่วมในการวางแผนโครงการ TOD กับหน่วยงานปกครองส่วนท้องถิ่น สร้างความเข้าใจ และร่วมผลักดันโครงการด้วยคนท้องถิ่นเอง ซึ่งมีความเข้าใจในข้อจำกัดของพื้นที่มากที่สุด
2. ขับเคลื่อนนโยบายโดยใช้ผังเมืองภาค หรือผังเมืองจังหวัด เพื่อให้ผู้เกี่ยวข้องส่วนท้องถิ่นนำเอานโยบายการพัฒนาโครงการ TOD ไปใช้
3. กำหนดผังเมืองให้มีความหนาแน่นของครัวเรือนในระดับปานกลางถึงสูงที่ประมาณ 18-30 หน่วยที่พักต่อไร่ และใช้ประโยชน์ที่ดินแบบผสมผสาน มีการออกแบบอาคารให้ผสมผสานทั้งแนวตั้งและแนวนอน รวมทั้งมีกระตุ้นการใช้ที่ดินให้เกิดประสิทธิภาพด้วย Incentive Zoning และนวัตกรรมปรับปรุงฟื้นฟูเมือง (Form-Based Codes: FBCs) [10] โดยยังคงเอกลักษณ์ในแต่ละพื้นที่ไว้
4. กำหนดประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินที่สนับสนุนการใช้ระบบขนส่งมวลชนให้สอดคล้องกับลักษณะของพื้นที่ ครอบคลุมรัศมีจากสถานีประมาณ 400-500 เมตร ซึ่งเป็นระยะทางที่คนเต็มใจที่จะเดินเท้าเพื่อเข้าถึงสถานี
5. กำหนดตำแหน่งและสัดส่วนพื้นที่ในโซนต่างๆ ให้เหมาะสม รวมทั้งข้อบังคับในการใช้พื้นที่รอบสถานีขนส่งมวลชน
6. ปรับปรุงกฎหมาย หรือกฎระเบียบต่างๆ ที่จะสนับสนุนให้โครงการ TOD ประสบความสำเร็จ เช่น

การกำหนดโบนัสความหนาแน่นสำหรับการพัฒนาโครงการ TOD, ลดเงื่อนไขจำนวนที่จอดรถขั้นต่ำในพื้นที่สูง เพื่อเปลี่ยนพฤติกรรมการเดินทางของอาศัยให้เกิดการใช้ระบบขนส่งมวลชนสาธารณะมากขึ้น เป็นต้น

7. กำหนดมาตรฐานการออกแบบสิ่งอำนวยความสะดวกเพื่อเอื้อต่อการเดินเท้าและจักรยาน เช่น การขยายทางเดินเท้าและ กำหนดเส้นแบ่งเขตทางรถจักรยาน สร้างที่จอดรถจักรยานที่มีความปลอดภัย และพอเพียงต่อความต้องการของผู้อาศัยในพื้นที่ เป็นต้น

8. สร้างทางเลือกการเดินทางที่หลากหลาย ที่เน้นการลงทุนและการปรับปรุงฟื้นฟูระบบขนส่งมวลชน โดยเฉพาะการขนส่งทางราง (Rail transit system)

9. กำหนดนโยบายการลงทุนสาธารณะ และการสร้างแรงจูงใจในการพัฒนาโครงการ TOD เช่น ให้รางวัลสำหรับเมืองที่มีการใช้ประโยชน์ที่ดินได้ดีที่สุด หรือโครงการฟื้นฟูสภาพพื้นที่ (Redevelopment) ในชุมชนนั้น เพื่อดำเนินโครงการพัฒนารอบสถานีขนส่ง (TOD) ในเชิงรุกต่อไป

10. กำหนดเกณฑ์การส่งเสริมการลงทุนที่อยู่อาศัยสำหรับประชาชนทุกระดับรายได้ (Affordable Housing) เช่น ให้ประชาชนไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 สามารถซื้อหาที่อยู่อาศัยได้ และให้เหลือพื้นที่อยู่อาศัยประมาณร้อยละ 30 สำหรับการเช่า รวมทั้งกำหนดเปอร์เซ็นต์ขั้นต่ำของจำนวนที่พักอาศัยสำหรับผู้มีรายได้น้อยในพื้นที่ เป็นต้น

11. สนับสนุนรูปแบบการออกแบบอาคารให้กระชับในเชิงแนวดิ่ง (Compacted building design) และรูปแบบประหยัดพลังงาน เช่น การออกแบบระบบอาคารเขียว (Green building design) หรือเป็นอาคารที่ใช้พลังงานทดแทน เป็นต้น

12. แก้ไขระบบเครดิตภาษีสำหรับบ้านผู้มีรายได้น้อยที่ตั้งอยู่รอบพื้นที่สถานีขนส่งมวลชนอยู่แล้ว โดยเสนอรางวัลและผลตอบแทนการคงอยู่ของที่อยู่อาศัยในพื้นที่

13. เพิ่มภาษีทางการเงิน (Tax increment financing-TIF) ตามมูลค่าจริง จากการพัฒนาพื้นที่รอบสถานีขนส่ง

5. บทสรุป

โครงการพัฒนาพื้นที่รอบสถานีขนส่ง (TOD) ในประเทศไทยเริ่มมีบทบาทในแผนผังเมืองมากขึ้น ภายหลังจากรัฐบาลมีแผนจะสร้างโครงการรถไฟฟ้าใหม่ 10 สาย เพื่อให้ประชาชนเกิดการอยู่อาศัย และใช้ชีวิตได้สะดวกสบายมากขึ้น ลดการใช้รถยนต์ส่วนบุคคล และกระตุ้นให้เกิดจำนวนผู้ใช้ระบบขนส่งมวลชนแบบราง ทั้ง BTS, MRT และ ARL กันมากขึ้นกว่าปัจจุบัน โดยโครงการ TOD ที่ประสบความสำเร็จ จะช่วยกระจายความเจริญทางเศรษฐกิจและรายได้ไปยังชุมชนตามแนวเส้นทางรถไฟฟ้า เปรียบเสมือนเป็นเครื่องมือหนึ่งสำหรับการจัดระเบียบเมืองใหม่ ให้เกิดการใช้ประโยชน์ที่ดินอย่างผสมผสานรอบสถานีขนส่ง ซึ่งแนวทางการพัฒนาโครงการ TOD ที่สำคัญ คือ การสร้างความหลากหลายในการใช้ประโยชน์ที่ดินในระยะรัศมี 400-500 เมตรรอบสถานีขนส่ง กำหนดสัดส่วนพื้นที่โซนต่างๆ ให้สมดุลทั้งพื้นที่อยู่อาศัย พื้นที่พาณิชยกรรม พื้นที่จัดแสดง พื้นที่พักผ่อน และพื้นที่การเดินทาง เป็นต้น รวมทั้งต้องแก้ไขกฎระเบียบต่างๆ เพื่อให้สนับสนุนการพัฒนาโครงการ TOD มากขึ้น ผู้รับผิดชอบหลักต้องเข้าใจการลงทุนโดยมองถึงบริบทของการสร้างเมืองโดยรวมมากกว่าการลงทุนเฉพาะพื้นที่ เป็นต้น ซึ่งนอกจากคุณภาพชีวิตของคนเมืองจะดีขึ้นแล้ว ความเป็นระเบียบ และสวยงามของเมืองจะมีเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Institute for Transportation and Development Policy (ITDP). (2011). What is TOD [Online]. Available: <https://www.itdp.org/library/standards-and-guides/transit-oriented-development-are-you-on-the-map/what-is-tod/>
- [2] Common wealth of Massachusetts (2011). Transit-Oriented Development: Making It Happen. Smart Growth/Smart Energy Toolkit. [Online]. Available: http://www.mass.gov/envir/smart_growth_toolkit/pages/mod-tod.html
- [3] The Bureau of Registration Administration, Department of Provincial Administration, Ministry

of Interior (2014). A Statistic of updated population numbers in Thailand. [Online]. Available: http://stat.dopa.go.th/stat/statnew/upstat_m.php

- [4] Office of Transport and Traffic Policy and Planning, Ministry of Transport. The Guidelines for Infrastructure planning of Thailand in 2013. [Online]. Available: http://www.otp.go.th/images/stories/8-OTPJournal/otpjournal5_04_56.pdf
- [5] National Statistic Office, Information and Communication Technology Center (2012), Time values of travelling of employee in Bangkok city.
- [6] Bangkok Mass Transit System Public Company Limited. Ticket information; BTS 30-Day Smartpass [Online]. Available: <http://www.bts.co.th/customer/th/01-conditions-thirtyday-person.aspx>
- [7] Bangkok Metro Company Limited (BMCL) (December 23, 2011). New BMCL boss eyes boosting commercial revenue [Online]. Available: <http://www.nationmultimedia.com/business/New-BMCL-boss-eyes-boosting-commercial-revenue-30172472.html>
- [8] State Railway of Thailand, Ministry of Transport (2004). Detailed Design of Bangkok Airport and Suvarnabhumi airport rail link project, Executive summary report. [Online]. Available: http://www.otp.go.th/images/stories/7/projectotp/2551/16/Arlex_ExecutivesummaryEng.pdf
- [9] Strategy and Evaluation Department, Bangkok (2013). Statistics of Bangkok 2013. [Online]. Available: http://office.bangkok.go.th/pipd/07Stat%28Th%29/Stat_57_6M/Stat_Detail.html
- [10] Thapana Bunyapavit (2012). An Innovation of Urban Re-development for Thailand. [Online]. Available: <http://asiamuseum.co.th/upload/forum/FormBasedCodes.pdf>

การวิเคราะห์การแผ่พลังงานจากแหล่งกำเนิดบนวัสดุพื้นผิว อิมพีแดนซ์โค้งทรงกระบอกโลหะสำหรับระบบอาร์เอฟไอดี ย่านความถี่เอชเอฟ

Radiation Analysis from Sources on Cylindrical Curved Impedance Surface for UHF RFID Systems

พิชานันท์ วงศ์ศิริธร⁽¹⁾ ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์⁽¹⁾ กิตติศักดิ์ แพบัว⁽²⁾ จูติพงษ์ เลิศวิริยะประภา⁽²⁾

⁽¹⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

⁽²⁾ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นโดยใช้ฟังก์ชันไอเกนของแหล่งกำเนิดบนพื้นผิวโค้ง ทรงกระบอกโลหะที่เคลือบด้วยชั้นวัสดุไดอิเล็กตริก ผลการวิเคราะห์จะถูกนำมาประยุกต์ใช้งานกับระบบอาร์เอฟไอดี ในกรณีที่แท็กถูกนำไปติดกับโครงสร้างทรงกระบอกโลหะที่เคลือบด้วยชั้นไดอิเล็กตริกเช่นถังแก๊ส หรือถังน้ำมัน สาขอากาศแท็กที่นำเสนอมีขนาดเล็กและสร้างง่ายและสามารถใช้งานได้ตามมาตรฐานภายในประเทศ (920-925 MHz) สาขอากาศที่นำเสนอเหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในการลงทะเบียนในภาคอุตสาหกรรม

คำสำคัญ : พื้นผิวโค้ง พื้นผิวอิมพีแดนซ์ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ สาขอากาศแท็ก

Abstract

Radiation pattern analysis using eigen function of source located on cylindrical curved surface coated with dielectric layers is presented in this paper. The analysis results will be used for UHF RFID applications in case of the tag is affixed on cylindrical curved structure with the coated dielectric layer such as gas tank or oil tanks. The proposed tag antenna is relatively small with easy fabrication and can be used for Thailand standard (920-925 MHz). The proposed antenna is suitable for the actual identification of industrial applications.

Keywords: Curve Surface, Impedance Surface, Radiation Pattern, RFID, Tag Antenna

1. บทนำ

ระบบอาร์เอฟไอดีหรือระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ (RFID: Radio Frequency Identification) เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการกล่าวถึงเป็นอย่างมากในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ (UHF RFID) เนื่องจากความสามารถในการติดต่อสื่อสารโดยไม่ต้องใช้การสัมผัส ความสะดวกในการอ่านและเขียนข้อมูลมีความรวดเร็ว ทนต่อสถานะความเสียหายอันเนื่องมาจากการขนส่งและสิ่งสกปรกและความสามารถสื่อสารได้ในระยะไกลในทุกทิศทาง [1]-[2] ทำให้อุตสาหกรรมหลายประเภทเช่นการขนส่งสินค้า การจัดเก็บสินค้า หรือแม้กระทั่งอุตสาหกรรมการค้าปลีก ได้สนใจนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้งาน

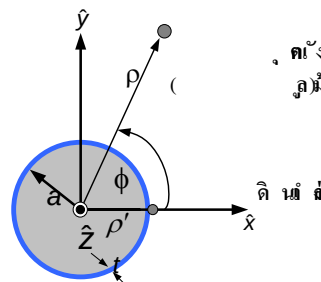
โครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีประกอบด้วย เครื่องอ่านข้อมูล (Reader) แท็ก (Tag) และอุปกรณ์ควบคุม (Controller) โดยเครื่องอ่านข้อมูลจะเชื่อมต่อกับส่วนควบคุมซึ่ง ส่วนมากจะเป็นคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการอ่านและเก็บข้อมูลที่รับมาจากแท็ก โดยแท็กประกอบไปด้วยสายอากาศแท็กและชิปวงจรรวม โดยระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟสามารถใช้หลักการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการรับและส่งข้อมูล โดยใช้การติดต่อสื่อสารในสนามระยะไกล ซึ่งอยู่บนพื้นฐาน การจัดกระจายย้อนกลับ [3]

จากความต้องการในการใช้งานระบบอาร์เอฟไอดีมีการใช้งานที่หลากหลาย เช่นการนำไปติดกับกล่องสินค้า ตู้คอนเทนเนอร์ ลังไม้และถังแก๊สเป็นต้น [4-5] ซึ่งส่วนมากสายอากาศแท็กจะถูกสร้างโดยใช้หลักการพื้นฐานของสายอากาศไดโพล สายอากาศขดลวด [6-7] ซึ่งทำงานเสมือนเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้า [8] แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นด้านหลังของสายอากาศแท็กดังกล่าวจะถูกลดทอนเป็นอย่างมากเมื่อนำไปติดกับวัสดุโลหะพื้นผิวโค้งที่เคลือบด้วยพื้นผิวอิมพีแดนซ์ไดอิเล็กตริก เช่น ถังน้ำมันหรือถังแก๊ส ดังนั้นการทำนายสนามแพร่กระจายจากแหล่งกำเนิดบนพื้นผิวโค้งที่ประกอบไปด้วยพื้นผิวอิมพีแดนซ์ไดอิเล็กตริก [10] นั้นมีความจำเป็นอย่างมากในการออกแบบสายอากาศแท็ก นอกจากนั้นสำหรับ

ปัญหาการจำลองเมื่อสายอากาศติดอยู่บนวัสดุที่มีขนาดใหญ่ มักจะใช้เวลาในการประมวลผลที่นานมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นโดยใช้วิธีฟังก์ชันไอเกน จากนั้นคำนวณการแพร่กระจายจากแหล่งกำเนิด ไฟฟ้าและแม่เหล็กที่วางอยู่บนพื้นผิวด้านทรงกระบอกโลหะที่เคลือบด้วยอิมพีแดนซ์ไดอิเล็กตริกเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบสายอากาศแท็กที่มีความเหมาะสมกับการใช้งานจริงต่อไป

2. การวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดเชิงเส้นที่วางอยู่บนพื้นผิวไดอิเล็กตริก

จากโจทย์วิจัยของสายอากาศแท็กที่ติดกับถังโลหะหรือถังน้ำมันขนาดใหญ่ ถังน้ำมันหรือถังโลหะจะพิจารณาให้เป็นวัสดุพื้นผิวทรงกระบอกขนาดใหญ่ที่เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก โดยในขั้นตอนแรกนี้จะพิจารณาในรูปแบบสองมิติ การวิเคราะห์แท็กสามารถกำหนดให้เป็นแหล่งกำเนิดเชิงเส้นยาวอนันต์ที่วางบนพื้นผิวไดอิเล็กตริก (Z_0) ดังแสดงในรูปที่ 1 ดังนั้นสนามรวม (E_z^t) เกิดจากสนามตกกระทบ (E_z^i) และสนามกระจาย (E_z^s)



รูปที่ 1 แหล่งกำเนิดเชิงเส้นที่วางอยู่บนพื้นผิวด้านทรงกระบอกโลหะ

สนามกระจายเกิดจากกระแสเหนี่ยวนำบนพื้นผิวของทรงกระบอกโลหะซึ่งประพฤติตัวเสมือนเป็นตัวแพร่กระจายคลื่นอีกตัวหนึ่ง เมื่อกำหนดให้แหล่งกำเนิดเชิงเส้นเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามีโพลาไรซ์ของแม่เหล็กตามขวางในแนวแกน Z (TM^z polarization) วางบนพื้นผิวด้านทรงกระบอกโลหะตามแนวแกน Z สนามกระจายจะมีเพียงองค์ประกอบในทิศ Z (E_z) ซึ่งจะไม่มีส่วนประกอบที่เป็นโพลาไรซ์ไขว้เกิดขึ้น ซึ่งแสดงได้ดัง

สมการที่ (1) สนามตกกระทบแสดงในสมการที่ (2) และ
สนามรวมแสดงในสมการที่ (3) ตามลำดับ

$$E_z^s = -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\epsilon} \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n H_n^{(2)}(\beta\rho) \quad (1)$$

$$E_z^i = -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\epsilon} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta\rho) H_n^{(2)}(\beta\rho') e^{jn(\phi-\phi')} \quad (2)$$

$$E_z^t = -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\epsilon} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\begin{array}{l} J_n(\beta a) H_n^{(2)}(\beta\rho') e^{jn(\phi-\phi')} \\ + c_n H_n^{(2)}(\beta a) \end{array} \right] \quad (3)$$

ρ' คือ ระยะจากจุดกำเนิดถึงแหล่งกำเนิดในทิศ $\hat{\rho}$ (m)

ρ คือ ระยะจากจุดกำเนิดถึงจุดสังเกตในทิศ $\hat{\rho}$ (m)

ϕ คือ มุมอิมิทของจุดสังเกต (rad)

ϕ' คือ มุมอิมิทของแหล่งกำเนิด (rad)

a คือ รัศมีทรงกระบอกโลหะ (m)

β คือ ค่าคงที่เฟส (rad/m) เมื่อ $\beta^2 = \omega^2 \mu\epsilon$

ω คือ ความเร็วเชิงมุม (rad/s)

I_e คือค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ (A)

ϵ คือค่าสภาพยอม (F/m)

μ คือค่าความซึมซาบได้ (H/m)

$J_n(\beta\rho)$ คือ ฟังก์ชันเบสเซลชนิดที่หนึ่งอันดับที่ n

$H_n^{(2)}(\beta\rho)$ คือ ฟังก์ชันเฮนเซลชนิดที่สองอันดับที่ n

โดยค่าอิมพีแดนซ์พื้นผิวจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของ
สนามที่มาตกกระทบ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์กับค่าอิมพีแดนซ์ของพื้นผิวที่รอยต่ออื่นๆ
ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตที่รอยต่ออื่นๆ ดังสมการ

$$\hat{n} \times \hat{n} \times \bar{E} = -Z_s \hat{n} \times \bar{H} \quad (4)$$

เมื่อ $\hat{n}$ เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับพื้นผิว
ทรงกระบอกโลหะ สำหรับวัสดุใดๆ ที่เคลือบอยู่บนพื้นผิว
ตัวนำ นั้นสามารถประมาณค่าอิมพีแดนซ์ของพื้นผิว
(Z_s) [10] ดังสมการที่ (5)

$$Z_s \approx -jZ_0 \beta t \left[\frac{1 - \epsilon_r \mu_r}{\epsilon_r} \right] \left[1 + \frac{(\beta t)^2}{2} (1 - \epsilon_r \mu_r) \right]^{-1} \quad (5)$$

Z_s = อิมพีแดนซ์พื้นผิว (Ω)

Z_0 = อิมพีแดนซ์ของช่องว่างอิสระ (Ω)

t = ความหนาวัสดุเคลือบ (m)

ϵ_r = ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์

μ_r = ค่าความซึมซาบได้สัมพัทธ์

c_n คือค่าสัมประสิทธิ์ที่สามารถหาได้จาก การ
ประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตดังแสดงในสมการที่ (2) เมื่อ
พิจารณาในระบบพิกัดทรงกระบอก โดยมีเวกเตอร์หนึ่ง
หน่วยตั้งฉาก ($\hat{n}$) อยู่ในแนวรัศมี กล่าวคือ $\hat{n} = \hat{\rho}$
องค์ประกอบสนามแม่เหล็กสามารถหาได้จาก
ความสัมพันธ์ของสมการแมกซ์เวลล์ โดยองค์ประกอบ
สนามแม่เหล็กสามารถเขียนในรูปดังสมการที่ (6)

$$H^t = -\hat{\rho} \frac{1}{j\omega\mu} \frac{1}{\rho} \frac{\partial E_z^t}{\partial \phi} + \hat{\phi} \frac{1}{j\omega\mu} \frac{\partial E_z^t}{\partial \rho} \quad (6)$$

จากสมการที่ (6) สามารถหาค่าสนามแม่เหล็กในทิศ
 $\hat{\phi}$ ได้จากสนามไฟฟ้าในทิศ $\hat{z}$ โดยการแทนสมการที่ (3)
ลงในสมการที่ (6) ซึ่งผลลัพธ์ดังสมการที่ (7) เมื่อ $' = \frac{\partial}{\partial \rho}$

$$H_\phi^t = \frac{jI_e \beta}{4} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\begin{array}{l} J_n'(\beta\rho) H_n^{(2)}(\beta\rho') e^{jn(\phi-\phi')} \\ + c_n H_n'^{(2)}(\beta\rho) \end{array} \right) \quad (7)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ c_n หาจากสมการที่ (4)
 $E_z \hat{z} = Z_s H_\phi \hat{\phi}$ ที่พื้นผิว สมการที่ (3) และสมการที่ (6)
โดยมีค่าดังสมการที่ (8) ดังนั้นสามารถหาสนามรวมได้ดัง
สมการที่ (9) เมื่อกำหนดให้ $\eta = 1/Z_s$

$$c_n = - \frac{[J_n'(\beta a) - j\eta^{-1} J_n(\beta a)]}{[H_n^{(2)}(\beta a) - j\eta^{-1} H_n^{(2)}(\beta a)]} \quad (8)$$

$$E_z^t = -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\epsilon} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\begin{array}{l} J_n(\beta\rho) \\ \frac{[J_n'(\beta a) - j\eta^{-1} J_n(\beta a)]}{[H_n^{(2)}(\beta a) - j\eta^{-1} H_n^{(2)}(\beta a)]} \\ \times H_n^{(2)}(\beta\rho) \\ \times H_n^{(2)}(\beta\rho') e^{jn(\phi-\phi')} \end{array} \right] \quad (9)$$

ในการพิจารณาแหล่งกำเนิดแม่เหล็กเชิงเส้นด้วยกระแสแม่เหล็ก I_m เราสามารถหาค่าสนามได้จากการประยุกต์ใช้ทฤษฎี [11] จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า โดยสนามแม่เหล็กจะมีค่าดังสมการที่ (10)

$$H_z^t = -\frac{\beta^2 I_m}{4\omega\epsilon} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\frac{J_n(\beta a) H_n^{(2)}(\beta \rho') e^{jn(\phi-\phi')}}{+d_n H_n^{(2)}(\beta a)} \right] \quad (10)$$

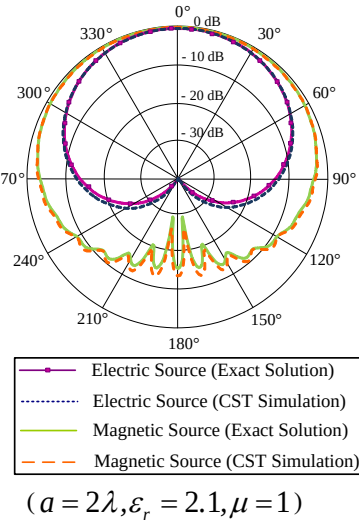
ค่าสัมประสิทธิ์ d_n สามารถหาได้โดยใช้หลักการเช่นเดียวกับการหาค่าสัมประสิทธิ์ c_n โดยค่าสัมประสิทธิ์ d_n จะแสดงดังสมการที่ (11) และสนามรวมจะแสดงในสมการที่ (12) โดยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (9) และ (12) โดยพิจารณาความแม่นยำจากการเปรียบเทียบกับผลการจำลองโดยโปรแกรม CST Microwave Studio ดังแสดงในรูปที่ 2 และเวลาในการคำนวณเทียบกับการจำลองแสดงในตารางที่ 1 ตามลำดับ

$$d_n = -\frac{[J_n(\beta a) + j\eta^{-1}J_n'(\beta a)]}{[H_n^{(2)}(\beta a) + j\eta^{-1}H_n'^{(2)}(\beta a)]} \quad (11)$$

$$H_z^t = -\frac{\beta^2 I_m}{4\omega\epsilon} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\frac{J_n(\beta \rho')}{[H_n^{(2)}(\beta a) + j\eta^{-1}H_n'^{(2)}(\beta a)]} \right] \times H_n^{(2)}(\beta \rho') \times H_n^{(2)}(\beta \rho) e^{jn(\phi-\phi')} \quad (12)$$

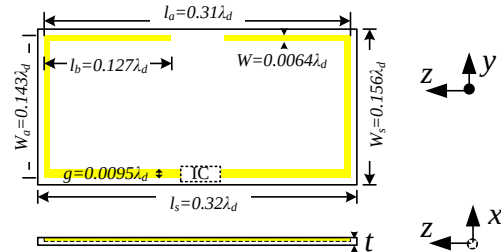
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ XY ($a = 2\lambda, \epsilon_r = 2.1, \mu = 1$) ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าและแม่เหล็กที่วางบนตัวนำทรงกระบอกสามารถยืนยันว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแหล่งกำเนิดแม่เหล็กมีการแพร่กระจายด้านหลังที่มีการถูกลดทอนน้อยกว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นจึงสามารถนำข้อดีของการใช้แหล่งกำเนิดแม่เหล็กที่วางอยู่บนตัวนำทรงกระบอกที่เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็ก

ตริกไปใช้เป็นแนวทางในการพิจารณาเสาอากาศเปิดติดกับวัสดุตัวนำทรงกระบอกขนาดใหญ่ที่เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริกเช่นชั้นสีที่ทาบบนตัวถัง เป็นต้น



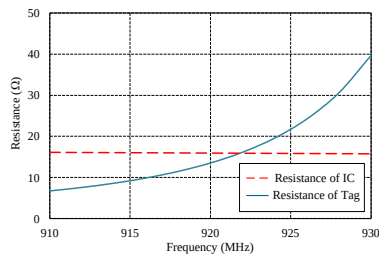
รูปที่ 2 ผลการคำนวณเปรียบเทียบผลจากการจำลอง แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ XY ของแหล่งกำเนิดแม่เหล็กและไฟฟ้าเชิงเส้น เมื่อแหล่งกำเนิดวางตัวอยู่บนวัสดุทรงกระบอกโลหะที่เคลือบด้วยสารไดอิเล็กตริก

3. การออกแบบและจำลองเสาอากาศแท่งชนิดช่องเปิดขนาดเล็ก

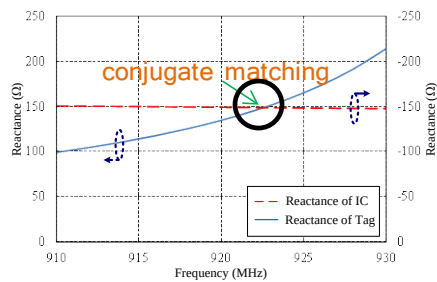


รูปที่ 3 โครงสร้างของเสาอากาศแท่งชนิดช่องเปิดขนาดเล็ก

โครงสร้างของเสาอากาศที่น่าเสนอคือ เสาอากาศชนิดช่องเปิดเนื่องจากเสาอากาศดังกล่าวสามารถที่จะสมมูลให้แหล่งกำเนิดชนิดแม่เหล็ก [9] โดยการออกแบบจะมุ่งเน้นให้เสาอากาศมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนเหมาะสมกับการนำไปใช้ร่วมกับชิปวงจรรวมรุ่น NXP G2XL [12] โดยพิจารณาความถี่กลางตามมาตรฐานในประเทศไทย (920-925 MHz) คือ 922.5 MHz ชิปวงจรรวมจะมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ 15.87-j148.7 โอห์ม วัสดุฐานรองที่ใช้ในการออกแบบเป็นชนิด FR-4 หนา 1.6 มิลลิเมตร

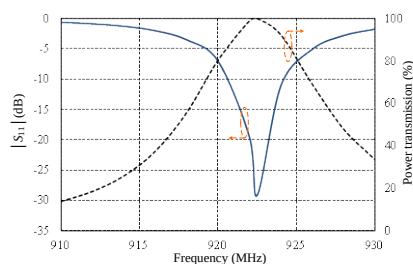


(ก) ความต้านทาน



(ข) รีแอ็กแตนซ์

รูปที่ 4 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กชนิดช่องเปิด

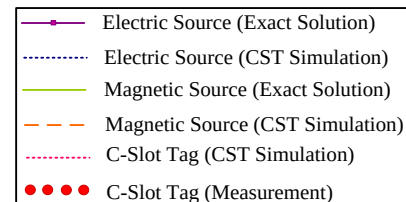
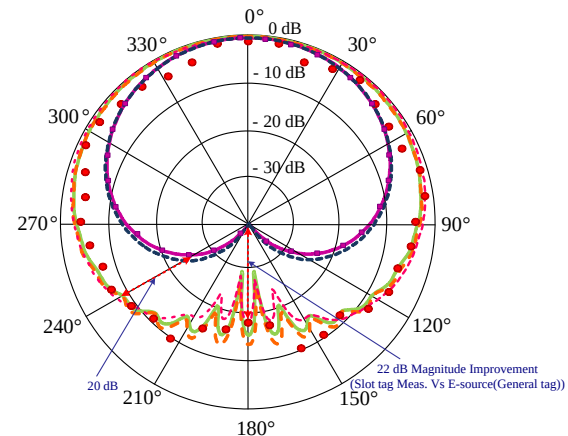
รูปที่ 5 ค่า $|S_{11}|$ และค่าเปอร์เซ็นต์กำลังงานการส่งผ่านของสายอากาศแท็กชนิดช่องเปิดขนาดเล็ก

โครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอแสดงดังรูปที่ 3 มีค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าเท่ากับ $17.01 + j148.53$ โอห์ม ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยสายอากาศที่นำเสนอสามารถทำงานได้ครอบคลุมย่านความถี่ภายในประเทศเมื่อพิจารณาที่ค่ากำลังงานลดลงไม่เกินครึ่งหนึ่ง โดยมีค่าอัตราขยายสูงสุดที่ประมาณ -4 dB

4. ผลการจำลองและการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น สายอากาศแท็กชนิดช่องเปิดขนาดเล็กบนวัสดุตัวนำทรงกระบอกที่หุ้มด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก

สายอากาศแท็กชนิดช่องเปิดขนาดเล็กที่ได้ทำการออกแบบร่วมกับตัวนำทรงกระบอกขนาดใหญ่ รัศมี 1.1 ที่เคลือบด้วยเทฟลอน (Teflon) ($\epsilon_r = 2.1, \mu_r = 1$) หนา 0.02λ จำลองด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากวิธี

ฟังก์ชันไอเกนในรูปที่ 6 เพื่อยืนยันว่าสายอากาศแท็กชนิดช่องเปิดขนาดเล็กที่ออกแบบมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทางด้านหลังที่ไม่ถูกลดทอนจากการนำไปติดบนวัสดุทรงกระบอกตัวนำขนาดใหญ่ที่หุ้มด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก โดยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะแสดงในระนาบ XY



$$(\epsilon_r = 2.1, \tan \delta = 0.025)$$

รูปที่ 6 ผลการคำนวณเปรียบเทียบผลจากการจำลองและผลการทดสอบ

ตัวนำทรงกระบอกที่หุ้มด้วยเทฟลอน ($\epsilon_r = 2.1, \mu_r = 1$) เปรียบเทียบกับกรณีที่น่าเอาแท็กชนิดช่องเปิดขนาดเล็กมาติดกับวัสดุดังกล่าว จะเห็นได้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท็กที่ออกแบบไม่เกิดการลดทอนที่ด้านหลังมากนัก ซึ่งมีความเหมาะสมกับการนำไปใช้งานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการนำเอาแท็กดังกล่าวไปใช้กับวัสดุตัวนำที่เคลือบด้วยชั้นวัสดุไดอิเล็กตริกเช่น แก้ว แก้วหรือถ่านน้ำมัน เป็นต้น

5. บทสรุป

บทความนี้เสนอการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าและแหล่งกำเนิดแม่เหล็กเชิงเส้นที่วางอยู่บนวัสดุอิมพีแดนซ์บนผิวโค้งรูปทรงกระบอก จากการใช้วิธีการคำนวณฟังก์ชันไอเกนและจากการจำลองโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ผลการคำนวณและผลการจำลองมีความสอดคล้อง

กัน โดยเวลาในการประมวลผลที่ได้จากวิธีฟังก์ชันไอเกน จะใช้เวลาสั้นกว่าการจำลองโดยโปรแกรมสำเร็จรูปเป็นอย่างมาก จากการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าและแม่เหล็กบนพื้นผิวดังกล่าว แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในขอบเขตเงา(ด้านหลังทรงกระบอกโลหะ) ของแหล่งกำเนิดแม่เหล็กจะมีการลดทอนน้อยกว่าแหล่งกำเนิดไฟฟ้าประมาณ 25 dB ที่มุม 180° ดังนั้นสายอากาศแท่งที่ทำการออกแบบจึงควรออกแบบให้สายอากาศมีลักษณะเป็นช่องเปิดซึ่งสามารถสมมูลให้เป็นแหล่งกำเนิดแม่เหล็ก จากนั้นสายอากาศได้ถูกจำลองและทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โดยจากผลการจำลอง การคำนวณและการทดสอบจะเห็นว่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นด้านหลังของแท่งที่นำเสนอมีการลดทอนที่น้อยกว่าแท่งที่สร้างอยู่บนพื้นฐานของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า พิจารณาที่ 180° เท่ากับ 22 dB ซึ่งจะสามารถสรุปได้ว่าหลักการที่นำเสนอมีความสะดวกที่จะนำไปใช้งานและสายอากาศที่ออกแบบมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้บนวัสดุผิวโค้งรูปทรงกระบอกที่เคลือบด้วยชั้นไดอิเล็กตริก

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก สัญญาเลขที่ PHD/0073/2553

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Bolic, D. Simplot-Ryl, I. Stojmenovic, RFID Systems: Research Trends and Challenges, John Wiley & Sons, 2010, Chapter 1.
- [2] S. Preradovic, Advanced Radio Frequency Identification Design and Applications, InTech, 2011, Chapter 1.
- [3] Z. N. Chen, RFID tag antenna, antennas for portable devices, England, John Wiley & Sons, 2007, Chapter 3.
- [4] D. M. Dobkin, The RF in RFID passive UHF in practice, United States of America, Newnes, 2008, Chapter 2.
- [5] M.A.Ziai, J.C.Batchelor, "Curved RFID tags for metallic gas cylinders," Electronics Letters, vol.45, no.17, pp.867-869, Aug. 13 2009
- [6] G. Marrocco, "The art of UHF RFID antenna design: impedance matching and size-reduction techniques," IEEE Antennas Propagation Magazine., vol. 50, no. 1, pp. 66-79, 2008. 5
- [7] H.M.S Tashi and H.Yu, "Design and simulation of UHF RFID tag antennas and performance evaluation in presence of a metallic surface," Software, Knowledge Information, Industrial Management and Applications (SKIMA), pp.1-5, 8-11 Sept. 2011
- [8] Y. Huang, K. Boyle, Antennas from Theory to Practice, John Wiley & Sons, 2008, Chapter 5.
- [9] P. Wongsiritor, T. Lertwiriaprapa, C. Phongcharoenpanich and K. Phaebua, "Characteristics of RFID C-slot tag antenna on a coated metallic cylindrical surface," IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems 2012, pp.1-4, Nov. 2012.
- [10] T.B.A. Senior, J.L. Volakis, "Generalized impedance boundary conditions in scattering," Proceedings of the IEEE, vol. 79, issue 10, pp. 1413-1420, 1991.
- [11] C.A. Balanis, Advanced Engineering Electromagnetics (Second edition), John Wiley & Sons, 2012 p.632.
- [12] NXP Semiconductors, Ultra High Frequency smart label ICs [online] Available www.nxp.com/acrobat_download/literature/9397/75016225.pdf

การศึกษาคุณภาพแผ่นป้ายทะเบียนรถ กรณีศึกษาไทย สิงคโปร์ และรัฐเท็กซัสประเทศสหรัฐอเมริกา

The Study on Quality of Raw-License Plate : Case Study of Thai, Singapore and Texas, USA.

สุพจน์ ศรีนิล แหลมทอง เหล่าคงถาวร

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

ป้ายทะเบียนรถยนต์ ประโยชน์ในการแสดงข้อมูลยานพาหนะ และช่วยในการบริหารจัดการยานพาหนะ การเปิดประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน หรือ AEC ในปลายปี 2558 มีผลทำให้มียานพาหนะวิ่งข้ามแดนเป็นจำนวนมาก ดังนั้นคุณภาพและระบบของป้ายทะเบียนจึงมีความสำคัญในการบริหารจัดการยานพาหนะ แต่ในปี พ.ศ. 2553-2554 กรมขนส่งทางบกประสบปัญหาป้ายทะเบียนแตกหลายราย และได้คุณภาพกว่า 3 แสนแผ่น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาข้อกำหนดคุณภาพแผ่นป้ายทะเบียนรถ โดยเปรียบเทียบระหว่าง ประเทศไทย ประเทศสิงคโปร์ และ รัฐเท็กซัส ประเทศสหรัฐอเมริกา การศึกษาดำเนินการโดยสัมภาษณ์เจ้าหน้าที่กรมขนส่งทางบกที่เกี่ยวข้องกับขบวนการประมูล การศึกษาเอกสารการประมูล มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม การดูงานที่กรมขนส่งทางบก สิงคโปร์ และ ข้อกำหนดป้ายทะเบียนของรัฐเท็กซัส จากการศึกษาพบว่ามาตรฐาน มอก. มีข้อกำหนดเกี่ยวกับการทดสอบการเสื่อมสภาพของอายุยังไม่เพียงพอสำหรับการเสื่อมสภาพของสติกเกอร์สะท้อนแสงเคลือบแผ่นป้ายทะเบียน และข้อกำหนดประกอบการประมูลของไทยไม่มีการทดสอบ เกี่ยวกับอายุการใช้งาน และการยึดเกาะของสติกเกอร์เคลือบแผ่นป้ายทะเบียน

คำสำคัญ : การศึกษา,คุณภาพ,ป้ายทะเบียน, ยานพาหนะ, การประมูล

Abstract

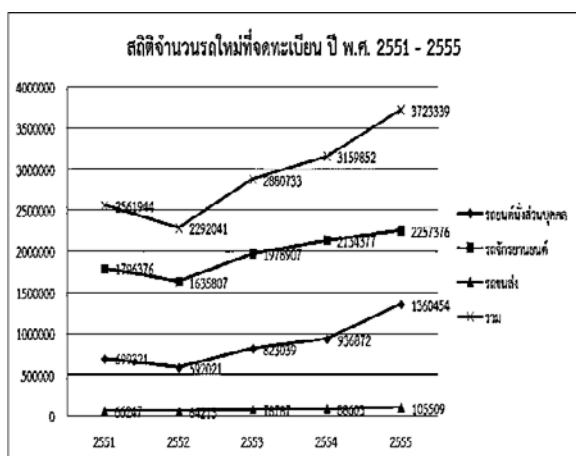
Car license plates are used to identify car information and to manage car. The Asian Economic Community that will begin at the end of 2014, causes many vehicles running across border. So quality of license plate and system is important to manage crossing border. During 2009-2010, the Department of Land Transport (DLT) faced surface of over 300,000 license plates cracking and low quality glaze problem. So this research aims to study quality specification of raw license plate by comparing between Thai, Singapore and Texas, USA. The study was done by interviewing DLT officers who is responsible for the procurement, establish the requirements for license plate auction. Then it was compared to cases study of Singapore and Texas, USA. These collected data were analyzed by content analysis. The result of study indicates that Thai Industrial Standard doesn't specify enough deteriorated resistant of license plate and specification of DLT doesn't include testing about life and cohesion of license plate sticker.

Keywords : Education, Quality, License plate, Vehicles, Auction

1. บทนำ

ป้ายทะเบียนรถ(License Plate) ใช้ประโยชน์ในการแสดงข้อมูลของยานพาหนะได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว รวมถึงการลงทะเบียนยานพาหนะตามกฎหมาย การช่วยระบุด และ การดำเนินการทางกฎหมายต่างๆ ที่เกี่ยวกับรถ จากสถิติของการจดทะเบียนพาหนะใหม่ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2551-2555[1] มีค่าเฉลี่ยของการจดทะเบียนต่อปีประมาณ 2,900,000 คัน/ปี (ดูรูปที่ 1 และตารางที่ 1) ซึ่งหมายถึงปริมาณแผ่นป้ายทะเบียนที่กรมการขนส่งทางบกต้องจดทะเบียนให้ในแต่ละปี โดยมีอัตราเติบโตเฉลี่ยเท่ากับ 8%

การเปิดประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน (Asian Economic Community, AEC) ในปลายปี พ.ศ. 2558 มีผลทำให้มีรถจากประเทศไทย และกลุ่มสมาชิก AEC วิ่งข้ามแดนจำนวนมาก ดังนั้นป้ายทะเบียนที่มีคุณภาพ และมีความเป็นสากล จึงเป็นพื้นฐานที่สำคัญต่อปริมาณการสัญจร และการขนส่งที่จะเกิดขึ้นนี้ ซึ่งจะมีผลต่อการขับเคลื่อนเศรษฐกิจต่อไป แต่เมื่อรถยนต์ที่ได้รับจดทะเบียนในปี 2553-2554 ประสบปัญหาแผ่นป้ายทะเบียนแตกกลางงา และไม่ได้คุณภาพกว่า 3 แสนแผ่น การพัฒนาคุณภาพของแผ่นป้ายทะเบียนจึงควรเป็นประเด็นสำคัญที่กรมการขนส่งทางบก ต้องทำการพัฒนาให้ได้มาตรฐาน และก็ต้องมีความเป็นสากลในเรื่องของรูปแบบแผ่นป้ายทะเบียนและหมายเลขทะเบียน และควรสามารถตรวจสอบและควบคุมได้ง่ายในเวลาอันรวดเร็ว และ ทำการปลอมแปลงได้ยาก ซึ่งการพัฒนาแผ่นป้ายทะเบียนในประเทศไทยยังขาดการศึกษาวิจัยปัจจัยที่ใช้ในการพัฒนา



รูปที่ 1. สถิติการจดทะเบียนพาหนะใหม่ของปี 2551-2555 [1]

ตารางที่ 1. สถิติการจดทะเบียนรถยนต์ 2550-2555 [1]

ปี	จำนวนรถที่จดทะเบียน	อัตราการเติบโต
2550	2,407,502	
2551	2,561,944	6%
2552	2,292,041	-12%
2553	2,880,733	20%
2554	3,159,852	9%
2555	3,723,339	15%
ค่าเฉลี่ย		8%

2. วัตถุประสงค์การศึกษา

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบแผ่นป้ายทะเบียนดินรถยนต์ส่วนบุคคลของประเทศไทย กับกรณีศึกษาป้ายทะเบียนในประเทศต่างๆ ในเรื่องของรูปแบบ และคุณภาพ เพื่อให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องนำไปใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาระบบของแผ่นป้ายทะเบียนต่อไป

3. ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 ศึกษางานวิจัยและเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการผลิตแผ่นป้ายทะเบียน

3.2 ศึกษารูปแบบป้ายทะเบียนของประเทศไทย ดังนี้

3.2.1 สัมภาษณ์เจ้าหน้าที่กรมการขนส่งทางบกในระดับหัวหน้าแผนกงานจำนวน 3 ท่าน ที่ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับประเด็นเกี่ยวกับ รูปแบบ ข้อกำหนด วัสดุ และราคา

3.2.2 ศึกษาจากกฎหมายที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ พระราชบัญญัติรถยนต์ พ.ศ. 2522 และพระราชบัญญัติการขนส่งทางบก พ.ศ. 2522

3.3 ศึกษารูปแบบป้ายทะเบียนของต่างประเทศ ได้แก่ ประเทศสหรัฐอเมริกา รัฐเทกซัส และ สิงคโปร์

3.4 ดูงานที่กรมการขนส่งทางบก (Land Transportation Authority) ประเทศสิงคโปร์ เพื่อเป็นกรณีศึกษาด้านระบบป้ายทะเบียนที่มีการขนส่งข้ามพรมแดนระหว่างสิงคโปร์-มาเลเซีย

3.5 นำข้อมูลในข้อ 3.2 - 3.4 มาทำการวิเคราะห์เนื้อหา (Content Analysis) และสรุปผลการศึกษาด้านรูปแบบ และวัสดุ เพื่อเสนอแนวทางการปรับปรุงระบบทะเบียนรถยนต์ของประเทศไทย เพื่อป้องกันป้ายทะเบียนรถด้อยคุณภาพและแตกกลางงา

4. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

4.1 ความเป็นมาของแผ่นป้ายทะเบียนรถ [2]

แผ่นป้ายทะเบียนรถเพิ่งเริ่มนำมาใช้กว่า 100 ปีที่ผ่านมา ซึ่งถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ประโยชน์ในการแสดงข้อมูลของยานพาหนะได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว รวมถึงการลงทะเบียนยานพาหนะตามกฎหมาย ในปัจจุบันในหลายประเทศการจัดทำแผ่นป้ายทะเบียนนี้ได้กลายมาเป็นแหล่งรายได้ของกองทุนทางหลวงหน่วยงานเก็บค่าผ่านทางและองค์กรที่ให้การสนับสนุน

ป้ายทะเบียนแผ่นแรกเกิดขึ้นที่อเมริกาในฟิลาเดเฟีย ในปี ค.ศ. 1850 สำหรับรถม้าลาก เป็นตัวเลขสูงไม่น้อยกว่า 4 นิ้ว อย่างไรก็ตาม ตัวเลขเหล่านี้ใช้ระบุเพื่อรายงานเหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการจับจีที่ไม่เหมาะสม หรือ ประมาท ทุกวันนี้ในสหรัฐอเมริกาเหลือแค่รัฐอินเดียนา เท่านั้นที่ยังต้องใช้แผ่นป้ายทะเบียนรถม้า ในยุคแรกๆ แผ่นป้ายทะเบียนทำจากไม้ ทองเหลือง หรือโลหะอื่นๆ ขึ้นอยู่กับเจ้าของรถ ถัดมาอีก 50 ปี หลายๆ เมืองเริ่มมีการลงทะเบียนและเก็บค่าธรรมเนียมเล็กน้อย ในปี 1903 แคลิฟอร์เนียก็เริ่มบังคับให้ใช้แผ่นป้ายทะเบียนแต่ทางรัฐไม่ได้ผลิตเอง แต่เป็นทางกลุ่ม Automobile Club of Southern California ได้จัดทำแผ่นป้ายทะเบียนที่เรียกว่า “Mouse Ear” ออกมาจำหน่ายในราคา 1 Dollar จนกระทั่งทางรัฐมาทำแผ่นป้ายทะเบียนเอง ในปี 1910 เป็นต้นมา แผ่นป้ายทะเบียนก็ได้รับการพัฒนามาหลากหลายรูปแบบ จนกระทั่งทุกวันนี้ กลายเป็นระบบตัวอักษรผสมตัวเลข (Alphanumeric)



รูปที่ 2. แผ่นป้ายทะเบียน “Mouse Ear” ที่ใช้ในปี 1903

4.2 การศึกษารูปแบบแผ่นป้ายทะเบียน

Al-Haboubi [3] ได้ศึกษาเรื่องการออกแบบแผ่นป้ายทะเบียนของประเทศซาอุดีอาระเบีย ซึ่งเดิมใช้ป้าย

ทะเบียนแบบตัวเลข 7 หลัก ที่แสดงถึงจำนวนรถยนต์ที่จดทะเบียน ซึ่งยากต่อการอ่าน และการจดจำได้ในระยะเวลาอันสั้น เช่น กรณีเกิดอุบัติเหตุชนแล้วหนี ในการศึกษาได้นำเสนอให้ใช้ระบบป้ายทะเบียนแบบ 3 ตัวอักษร และ 3 ตัวเลข โดยระบบนี้จะทำให้ได้แผ่นป้ายทะเบียนเกือบ 20 ล้านหมายเลข ซึ่งจะครอบคลุมถึงจำนวนรถที่จะจดทะเบียนได้ถึงปี 2012 โดยทำการทดสอบการจดจำหมายเลขทะเบียนรถ กับ ผู้เข้าร่วมทดสอบที่เป็นชาย วุฒิปริญญาตรี จำนวน 60 คน โดยใช้คอมพิวเตอร์แสดงผลหมายเลขบนแผ่นป้ายทะเบียนแบบสุ่ม และระยะเวลาแสดงภาพป้ายทะเบียนเท่ากับ 1, 2 และ 3 วินาที หรือเท่ากับรถวิ่งด้วยความเร็ว 105 kph, 53 kph และ 35 kph ตามลำดับ โดยอักษรบนแผ่นป้ายทะเบียนเป็นอักษรภาษาอังกฤษหมด (แม้ว่าภาษาประจำชาติจะเป็นภาษาอารบิก โดยผู้วิจัยให้เหตุผลว่า คนซาอุดีอาระเบีย ทุกคนเรียนภาษาอังกฤษตั้งแต่อายุ 12 ปี ดังนั้นภาษาไม่ใช่อุปสรรคในการอ่าน) จากการศึกษาพบว่า แผ่นป้ายทะเบียนแบบ \$\$\$\$## มีประสิทธิภาพการจดจำได้ดีกว่าแบบ ##### (หมายเหตุ \$\$\$ คือ ตัวอักษร, ## คือ ตัวเลข) และผู้วิจัยยังได้แนะนำสีพื้นหลังที่เหมาะสมของแผ่นป้ายทะเบียนของรถแต่ละประเภทด้วย นอกจากงานวิจัยของ Al-Haboubi [3] แล้ว ก็ยังไม่พบงานวิจัยอื่นที่ทำการศึกษาเรื่องการออกแบบระบบป้ายทะเบียน และ การศึกษาการอ่านออกได้และการจดจำของป้ายทะเบียนในระบบฐานข้อมูลที่สามารถสืบค้นได้ออนไลน์

ตารางที่ 2. ระบบทะเบียนรถที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยของ Al-Haboubi. [3]

ระบบทะเบียน	รูปแบบระบบทะเบียน	จำนวนเลขทะเบียน
1st	#####	999,999
2nd	SS####	729,000
3rd	SSS###	1,968,000
4th	SSS####	19,683,000

กฤติน เหล่าประไพพรรณและคณะ[4] ได้ศึกษาปัญหาการประมวลผลแผ่นป้ายทะเบียนรถยนต์ และการวิเคราะห์ต้นทุนแผ่นป้ายทะเบียนดิบ โดยการเก็บข้อมูลวัสดุที่ใช้ในการผลิตแผ่นป้ายทะเบียน เพื่อนำไปคำนวณหาต้นทุนที่ใช้ในการผลิตแผ่นป้ายทะเบียนดิบสำหรับรถแต่ละประเภท

สุพจน์ ศรีนิล[5] ได้ทำการศึกษาการอ่านออกได้และการจดจำป้ายทะเบียนรถ สำหรับรูปแบบระบบทะเบียนรถ 6 แบบ ผลการศึกษาพบว่าทำให้ Prefix เป็นตัวอักษรไทย 3 ตัว ให้ผลการจดจำหมายเลขทะเบียน และการระบุตัวรถใกล้เคียงกับที่ใช้ Prefix เป็นตัวเลข 1 ตัว และ ตัวอักษรไทย 2 ตัว เมื่อนำมารวมกับ Suffix ที่เป็นเลข 4 ตัว จะได้จำนวนหมายเลขทะเบียนทั้งหมด 385,875,000 หมายเลข

5. ผลการวิจัย

5.1 ข้อมูลคุณลักษณะเฉพาะของแผ่นป้ายทะเบียนติดของประเทศไทย

จากการศึกษาเอกสารประกอบการประชุมเพื่อว่าจ้างผลิตแผ่นป้ายทะเบียนติดของกรมขนส่งทางบก และ มอก.715-2553[6] ได้ระบุรายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะของแผ่นป้ายทะเบียนติด (แผ่นป้ายอะลูมิเนียมอัดวัสดุสะท้อนแสงรถยนต์) ไว้ โดยมีรายละเอียดเกี่ยวกับข้อกำหนดคุณภาพของวัสดุอะลูมิเนียม และแผ่นสติ๊กเกอร์สะท้อนแสงเคลือบแผ่นป้ายทะเบียนดังนี้

แผ่นป้ายอะลูมิเนียมอัดวัสดุสะท้อนแสง ต้องมีคุณสมบัติดังนี้

1. ต้องสามารถรับแรงอัดในการอัดตัวเลข ตัวอักษร เครื่องหมายและขอบตามแบบของทางราชการโดยไม่แตกร้าว หลุดล่อน ย่น เป็นชั้นหรือบิดงอ และแผ่นสะท้อนแสงต้องไม่หลุดล่อนออกจากแผ่นอะลูมิเนียม การทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดให้ใช้เครื่องผลิตแผ่นป้ายของกรมการขนส่งทางบก ด้วยแรงอัด 150 บาร์

2. ต้องสามารถติดสีตัวเลข ตัวอักษร เครื่องหมายและขอบตามแบบของทางราชการที่ใช้อยู่ตามปกติ และเมื่อผ่านการอบความร้อนแล้ว สีจะต้องติดแน่นชัดเจนไม่จางและไม่หลุดออก การทดสอบการติดสีจะใช้เทปกาวรีดติดบริเวณตัวเลขและตัวอักษรไม่น้อยกว่า 10 นาที แล้วดึงออก โดยสีต้องไม่ติดมากับเทปกาว

3. ต้องมีความทนต่อความร้อน 130 ± 10 องศาเซลเซียส ในเวลา 2 นาที โดยแผ่นป้ายและวัสดุสะท้อน

แสงต้องไม่เกิดรอยร้าว หลุดล่อน ย่น แยกเป็นชั้น หรือแยกเป็นชั้น และแผ่นวัสดุสะท้อนแสงต้องไม่หลุดล่อนจากแผ่นอะลูมิเนียม

4. ต้องผ่านการทดสอบการตรวจวิเคราะห์ทางเคมีการสะท้อนแสง การทนสารเคมี ตาม มอก. 715-2553 [6]

5.2 กรณีศึกษาประเทศสิงคโปร์ [7]

1. เลขทะเบียนทาง Land Transportation Authority (LTA) จะเป็นผู้ออกให้ เจ้าของยานพาหนะ จะต้องไปจัดทำแผ่นป้ายและรหัสตัวเลขทะเบียนตามขนาดและสีที่ LTA กำหนด

2. รูปแบบสีแผ่นป้ายทะเบียน ความสูงและความกว้างแผ่นป้ายทะเบียน ถูกกำหนดโดยกฎของ Road Traffic (Motor Vehicles, Registration & Licensing) โดยเจ้าของยานพาหนะต้องติดตั้งแผ่นป้ายทะเบียนไว้ที่ด้านหน้าและด้านหลังของยานพาหนะ ซึ่งต้องสังเกตได้ง่าย

3. การติดตั้งแผ่นป้ายทะเบียนเข้ากับยานพาหนะต้องติดตั้งด้วย น็อต ซึ่งมีเลขรหัส (Serial Number) และเป็นชนิดปลายแทปล็อก (Tamper-proof seal) (ดูรูปที่3) ซึ่งมีการตรวจสอบโดย หน่วยงานที่ได้รับการรับรองโดย LTA โดยจะมีการตรวจสอบปีละ 1 ครั้ง ในขั้นตอนชำระภาษีรถ



รูปที่ 3. แสดงน็อตที่ใช้ยึดแผ่นป้ายทะเบียน ซึ่งมีเลขรหัสประจำ

5.3 กรณีศึกษา รัฐเทกซัสประเทศสหรัฐอเมริกา [8]

1. มีการจัดทำ Material Producer List (MPL) ที่ดูแลโดย Pavements Section of the Construction Division (CST/M&P) ซึ่งแสดงรายชื่อผู้ผลิตวัสดุที่ผ่านการทดสอบ และมีรายละเอียดวัสดุเป็นไปตามข้อกำหนด โดยผู้ประกอบการผลิตแผ่นป้ายทะเบียนที่จะเข้าเสนอราคาและร่วมประมูลได้จะต้องมีรายชื่ออยู่ใน MPL

2. ผู้ประกอบการที่เข้าร่วมประมูลทุกรายจะต้องผ่านขั้นตอน Pre-approval ก่อน โดยจัดส่งตัวอย่างวัสดุตามกำหนดไปทดสอบ ผู้ประกอบการเป็นผู้รับผิดชอบค่าใช้จ่ายในการทดสอบทั้งหมด และต้องทำการทดสอบทุกๆ 5 ปี และ ทดสอบซ้ำ เมื่อผู้ประกอบการมีการเปลี่ยนแปลงรายละเอียดการผลิต

3. รายการทดสอบของ DMS-8390 แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3. เปรียบเทียบรายการทดสอบ DMS-8390 กับ มอก. 715-2553

DMS-8390	เปรียบเทียบกับ มอก. 715-2553
A. การทดสอบวัสดุเคลือบแผ่นป้ายสะท้อนแสง	
A1. ทดสอบการขีดเกา	ไม่มีการทดสอบ
B. การทดสอบแผ่นป้ายทะเบียน	
B2. การทดสอบสี	มีการทดสอบเหมือนกัน
B3. การทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง	มีการทดสอบเหมือนกัน
B4. ความทนต่อสภาพลมฟ้าอากาศโดยวิธีเร่งสภาวะ	มีการทดสอบเหมือนกัน
B5. การทดสอบความทนสารเคมี	มีการทดสอบเหมือนกัน
B6. การทดสอบความทนความร้อนและความชื้น	มีการทดสอบ แต่ DMS-8390 กำหนดอุณหภูมิที่ -1°C และ 66°C โดยคงอุณหภูมิแต่ละค่าไว้รวม 1 ชั่วโมง แต่ มอก. 715-2553 กำหนดช่วงอุณหภูมิทดสอบที่ 38°C และ 121°C โดยคงอุณหภูมิแต่ละค่าไว้รวม 24 ชั่วโมง และ 30 นาที ตามลำดับ
B7. การทดสอบ Abrasion Resistant	ไม่มีการทดสอบ
B8. Effective Performance Life	ไม่มีการทดสอบ เพราะต้องใช้ระยะเวลาทดสอบ 5 ปี

6. วิเคราะห์ผลการศึกษา

สามารถวิเคราะห์ในแต่ละประเด็นได้ดังนี้

6.1 รายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะของแผ่นป้ายทะเบียนดิบของประเทศไทย

เมื่อวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของแผ่นป้ายทะเบียนดิบประกอบการประมูล ถึงแม้ว่าจะมีข้อกำหนดเกี่ยวกับการทดสอบคุณสมบัติของแผ่นป้ายทะเบียนดิบและวัสดุเคลือบแผ่นป้ายสะท้อนแสง (สติกเกอร์) แต่ไม่มีข้อกำหนดเกี่ยวกับการทดสอบการเสื่อมสภาพ และความคงทนของวัสดุสะท้อนแสงเคลือบ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้แผ่นป้ายทะเบียนแตกสลาย หากผู้ประกอบการใช้วัสดุสะท้อนแสงเคลือบแผ่นป้ายทะเบียนที่มีคุณภาพต่ำแล้วคุณสมบัติในการขีดเกากับแผ่นอะลูมิเนียม และการสะท้อนแสงเป็นไปตามข้อกำหนดก็ตาม นอกจากนั้น การทดสอบคุณสมบัติตามข้อกำหนดรายละเอียดนี้ จะดำเนินการหลังจากที่ผู้ชนะการประมูลผลิตแผ่นป้าย

ทะเบียนดิบแล้วเท่านั้น ไม่ใช่ผู้เข้าร่วมประมูลทุกรายที่ต้องทดสอบคุณสมบัติเหล่านี้ ซึ่งทำให้เกิดความเสี่ยงต่อกรณีผู้ชนะการประมูลได้ผลิตแผ่นป้ายทะเบียนดิบไปแล้ว แต่ผลการทดสอบคุณสมบัติไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด ก่อให้เกิดความเสียหายต่อผู้ประกอบการ และผู้ยื่นขอจดทะเบียนรถต้องได้รับแผ่นป้ายทะเบียนล่าช้า

6.2 กรณีศึกษาของประเทศสิงคโปร์

1. แผ่นป้ายทะเบียนถูกผลิตโดย ผู้ประกอบการจำหน่ายรถยนต์ ทำให้ LTA ไม่ต้องรับผิดชอบในการผลิตและการประมูลผลิตแผ่นป้ายทะเบียน

2. การควบคุมป้ายทะเบียน LTA ควบคุมเพียงแต่ลักษณะทางกายภาพของแผ่นป้ายทะเบียน สำหรับการป้องกันการปลอมแปลง ก็ควบคุมโดยการตรวจสอบหมุดยึดที่ผลิตโดย LTA และมีเลขรหัสกำกับเอาไว้ ถ้าหากหมุดยึดมีความเสียหายหรือถูกเปลี่ยน ก็แสดงถึงป้ายทะเบียนที่ตรวจสอบผ่านและอนุมัติแต่แรกแล้ว ถูกทำการเปลี่ยนแปลง และต้องตรวจสอบใหม่

6.3 กรณีศึกษาของรัฐบาลสหรัฐอเมริกา

1. ผู้เข้าร่วมประมูลจะต้องผ่าน Pre-approval ซึ่งเป็น Pre-qualification แบบหนึ่ง และต้องอยู่ใน MPL และมี การประเมินผลทดสอบซ้ำๆ ทุกๆ 5 ปี ทำให้ได้ ผู้ประกอบการผลิตแผ่นป้ายทะเบียนที่มีคุณภาพมาเป็นผู้แข่งขันราคา ซึ่งเป็นการแข่งขันกันในเรื่องของการบริหารจัดการ มากกว่าการแข่งขันในด้านต้นทุนและคุณภาพ

2. เนื่องจากการแตกสลายและสีของแผ่นป้ายทะเบียนที่ซีดจางและไม่สะท้อนแสง เกิดจากการเสื่อมสภาพของวัสดุสะท้อนแสงเคลือบแผ่นป้าย ต้องอาศัยการทดสอบการเสื่อมสภาพที่ต้องใช้ระยะเวลาการทดสอบนาน ดังนั้น จึงมีการกำหนดให้ผู้ประกอบการต้องมี Pre-approval และอยู่ในรายชื่อ MPL ก่อนเข้าร่วมประมูลได้

3. จากตารางที่ 3 DMS-8390 มีการทดสอบในรายการ A1, B7 และ B8 ซึ่งมีผลในการตรวจสอบการเสื่อมสภาพของแผ่นสติกเกอร์ ขณะที่ มอก. 715-2553 ไม่มี จึงเป็นสาเหตุที่ผู้เข้าร่วมประมูลผลิตแผ่นป้ายทะเบียนดิบก่อนปี พ.ศ. 2555 สามารถทดสอบคุณสมบัติแผ่นป้ายทะเบียนดิบผ่าน เพราะใช้แผ่นสติกเกอร์สะท้อนแสงที่มีอายุการใช้งานสั้น

และมีต้นทุนถูกกว่า เมื่อมีอายุการใช้งานมากกว่า 1 ปี และเจอสภาพอากาศรุนแรงของประเทศไทย แผ่นป้ายทะเบียนจึงเสื่อมสภาพเร็ว และแตกหลายา

4.การเปรียบเทียบผลการศึกษาคูณภาพแผ่นป้ายทะเบียนตารางที่ 4. เปรียบเทียบรูปแบบป้ายทะเบียนประเทศไทยกับประเทศต่างๆ

ประเทศ	รายละเอียดแผ่นป้ายทะเบียน		
	ขนาด (mm.)	วัสดุแผ่นป้าย	การป้องกันการปลอมแปลง
TH	340x150	อลูมิเนียมเคลือบสติกเกอร์สะท้อนแสง	มีลายน้ำแนวอนตรงกลางแผ่นป้าย มี ขส ด้านล่างขวามือ มีหมายเลขกำกับแผ่นป้ายด้านล่างซ้าย
USA	305x152	อลูมิเนียม หรือ กัลวาไนซ์เคลือบแผ่นสติกเกอร์สะท้อนแสง	ทำลายน้ำแนวตั้งตรงกลางแผ่นป้าย
SG	520x120	อลูมิเนียมเคลือบสติกเกอร์ตัวอักษรสะท้อนแสง หรือ พลาสติก ตัวอักษรสะท้อนแสง	ต้องติดด้วย น๊อต ซึ่งมีเลขรหัส (Serial Number) และไม่สามารถแกะได้ง่าย

7. สรุปผลการศึกษา สามารถสรุปผลได้ ดังนี้

1. จากการศึกษากการประมวลการผลิตแผ่นป้ายทะเบียนดิบ พบว่ารายละเอียดประกอบแบบตามมาตรฐาน มอก. มีข้อกำหนดเกี่ยวกับการทดสอบการเสื่อมสภาพของอายุยังไม่เพียงพอ สำหรับการเสื่อมสภาพของสติกเกอร์สะท้อนแสงเคลือบแผ่นป้ายทะเบียน

2. เนื่องจากการประมวลก่อนปี พ.ศ.2555 ก่อนการประมวลกรรมการจะคัดเลือกผู้เข้าร่วมประมวลโดยพิจารณาคุณสมบัติเบื้องต้นของแผ่นป้ายทะเบียนเท่านั้น ไม่ได้มีการพิจารณาผลทดสอบวัสดุประกอบอย่างละเอียด แต่วัสดุแผ่นป้ายทะเบียนดิบ จะถูกส่งนำไปทดสอบคุณสมบัติหลังจากผู้ชนะการประมวลได้ผลิตแผ่นป้ายทะเบียนดิบและเตรียมเพื่อส่งมอบของให้กับกรมการขนส่งทางบกแล้ว ทำให้ผู้ที่ประสงค์จะผลิตแผ่นป้ายเข้าร่วมประมวลได้ทุกราย

3. การกำหนดรายละเอียดประกอบแบบให้มีการทดสอบสติกเกอร์สะท้อนแสงเคลือบแผ่นป้ายทะเบียนเกี่ยวกับการขีดเกาะ Abrasion Resistant และ Effective Performance Life การกำหนดให้มี MPL และ Pre-approval จะช่วยให้สามารถคัดเลือกผู้ประกอบการผลิตที่ใช้วัสดุที่ได้คุณภาพ และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานไม่น้อยกว่า 5 ปี

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอธิบดีและเจ้าหน้าที่ทุกคนในกรมการขนส่งทางบก อาจารย์และเจ้าหน้าที่สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบ้ง

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Interview Mrs. S.Wittayanun, Head of Working Capital Section for the making of license plate, and Mrs. S.Somsup, Head of Inventory and License Plates, Department of Land Transport, 31 July 2013 .
- [2] American Association of Motor Vehicle Administrators (AAMVA), “Best Practices Guide for Improving Automated License Plate Reader Effectiveness through Uniform License Plate Design and Manufacture”, October 2012.
- [3] M. H.Al-Haboubi, “Designing a License Plate,”Applied Ergonomics,Vol.30, pp.421-428 , 1999.
- [4] K.Laoprapaipun, and L.Laokongtavorn, “Issues of License Plates Auction and Raw License Plates Cost Analysis,” The 19th National Convention on Civil Engineering,pp.1403-1411, May,2014.
- [5] S. Srinil, L. Laokongtavorn, and S. Kwanpruek, “Study on License Plates Legibility and Recollection,” The 19th National Convention on Civil Engineering, pp.1421-1427, May,2014.
- [6] TIS 715-2553, “Thai Industrial Standards, Photo Luminescent Sheeting for making License Plates,” Thai Industrial Standards Institute, 2553.
- [7] M. Wong, “Registration & Licensing of Vehicles,” Quota & Registration VRL Service Operation Division, Land Transport Authority, Singapore ,18 October., 2013.
- [8] DMS-8390, “Motor Vehicle License Plate Face Materials,” Department Material Specification, Texas Department of Transportation, 2005.

การเตรียมไมโครสเฟียร์แว็กซ์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

Preparation of Microsphere Wax

by Supercritical Carbon Dioxide

วาริพร พิริยะวิวัฒน์วงศ์ วรรัตน์ รัตนชัย สุรัตน์ อารีรัตน์

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมไมโครสเฟียร์แว็กซ์ด้วยเทคนิคการขยายตัวอย่างรวดเร็วของสารละลายเหนือวิกฤต (Rapid Expansion of Supercritical Solution, RESS) โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นตัวทำละลาย นิดพ่นสารละลายเหนือเดือระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และพาราฟินแว็กซ์ไปยังสารกลุ่ม Anti-Solvent จากนั้นศึกษาขนาดและลักษณะพื้นฐานวิทยาของอนุภาคด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าสามารถเตรียมอนุภาคแว็กซ์ทรงกลมขนาด 400-7,000 nm ขึ้นกับสภาวะการดำเนินการ พบว่าอนุภาคที่ได้จากการฉีดพ่นไปยังน้ำมีลักษณะเป็นทรงกลมและมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคที่ได้จากการฉีดพ่นไปยังอากาศ เนื่องจากการฉีดพ่นไปยังน้ำจะช่วยป้องกันการเติบโตและการรวมตัวกันของอนุภาค โดยสามารถอธิบายได้ด้วยตัวเลขเวเบอร์ การเพิ่มอุณหภูมิและความดันก่อนการขยายตัว 70-90°C และ 120-160 bar ส่งผลให้อนุภาคนาขนาดลดลงจาก 1,000 เป็น 400 nm อธิบายได้จากอัตราส่วนการละลายอิมตัวยังยวด การเติมซอร์บิทอล 0.3 wt% เป็นสารก่อผลึกพบว่าอนุภาคมีขนาดลดลงจาก 1,000 เป็น 400-600 nm และมีการกระจายตัวของขนาดลดลง นอกจากนี้การฉีดพ่นสารละลายเหนือเดือระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และพาราฟินแว็กซ์ผ่านหัวฉีดแบบเกลียวไปยังสารละลายผสมระหว่างน้ำและเอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol, EG) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิวและสารรักษาเสถียรภาพการเติบโตของอนุภาคที่ความเข้มข้น 5-15 v/v% การปั่นกวน 150 rpm พบว่าสามารถเตรียมพาราฟินแว็กซ์ที่มีลักษณะเป็นทรงกลมโดยไม่ติดกันเป็นกลุ่มก้อน ขนาดอนุภาคของพาราฟินแว็กซ์ลดลงจาก 7 เป็น 1 μm เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ EG

คำสำคัญ : การขยายตัวอย่างรวดเร็วของสารละลายเหนือวิกฤต ไมโครสเฟียร์แว็กซ์ การรวมตัวกันของอนุภาค

Abstract

This research studies preparation of microsphere wax by Rapid Expansion of Supercritical Solutions (RESS) method. Supercritical carbon dioxide was used as a solvent. scCO_2 -paraffin wax homogeneous solution was sprayed into anti-solvent. Particle size and morphology of particle were analyzed by SEM. Microsphere wax with particle sizes of 400-7,000 nm could be prepared which depending upon experimental conditions. The obtained particles by spray into water were shown spherical shape and smaller than those produced by spray into air. Spraying into water impedes particle's growth and agglomeration. It could be described by *We* number. Increasing of pre-expansion temperature 70-90°C and pre-expansion pressure 120-160 bar resulted to the particle size reduction from 1,000 to 400 nm. It could be described by supersaturation ratio. Adding 0.3 wt% of sorbitol as a nucleating agent the particle sizes decrease from 1,000 to 400-600 nm with the narrow size distribution. In addition, scCO_2 -Paraffin wax homogeneous solution was sprayed through spiral nozzle into 150 rpm spinning of 5-15 v/v% mixture of water and ethylene glycol solution as a surfactant and stabilizing of particles growth. It was found that paraffin wax become spherical shape and particle agglomeration can be retarded. The particle size was decreased from 7 to 1 μm when the concentration of ethylene glycol increased.

Keywords: The Rapid Expansion of Supercritical Solutions, Microsphere Wax, Particle Agglomeration

1. บทนำ

ไมโครสเฟียร์แว็กซ์ [1] เป็นอนุภาคที่มีสมบัติพิเศษ คือ สามารถเพิ่มสมบัติการไหลลื่นแก่ของไหล ลดแรงเสียดทาน แพร่กระจายในตัวทำละลายได้ดีในของไหล สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น การเคลือบผิว อุตสาหกรรมการพิมพ์แบบกราเวียร์ วัสดุเปลี่ยนวัฏภาคเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อน และอุตสาหกรรมการฉีดโลหะพ่นขนาดเล็ก เป็นต้น ด้วยสมบัติพิเศษนี้อนุภาคแว็กซ์ที่มีลักษณะดังกล่าวจึงมีมูลค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับแว็กซ์ที่ผลิตได้และขายในท้องตลาดทั่วไป

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (Supercritical Carbon Dioxide, scCO_2) ด้วยเทคนิค RESS [2] ในการลดขนาดอนุภาค เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารที่มีราคาถูก และมีจุดวิกฤตต่ำ คือ 31.0°C และ 73.8 bar โดยมีหลักการเบื้องต้นที่สำคัญ คือ แว็กซ์หรือสารที่ต้องการลดขนาดจะต้องมีความสามารถละลายใน scCO_2 เกิดเป็นสารละลายเนื้อเดียวที่สภาวะความดันสูง จากนั้นฉีดพ่นสารละลายดังกล่าวผ่านท่อขนาดเล็กเพื่อลดความดันและมีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว เกิดการแยกวัฏภาคของแว็กซ์ออกจาก scCO_2 การผสมเข้ากันดีและการขยายตัวของ scCO_2 ที่รวดเร็วดังกล่าวนี้อำนาจอนุภาคที่แยกตัวออกจาก scCO_2 ที่ได้มีขนาดเล็กและมีการกระจายตัวของขนาดแคบ

Kiyoshi Matsuyama และคณะ [3] ศึกษาผลของตัวกลางในการฉีดพ่น คือ อากาศและน้ำ ต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของอนุภาค PLA (l-Polylactic Acid) พบว่าเมื่อฉีดพ่นสารละลายไปยังอากาศอนุภาคที่ได้มีลักษณะไม่เป็นทรงกลม เนื่องจากเกิดการรวมตัวกันของอนุภาค ส่วนการฉีดพ่นสารละลายไปยังน้ำสามารถเตรียมอนุภาค PLA ที่มีลักษณะเป็นทรงกลมได้ Sameer V. Dalvi และคณะ [4] ศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิค RESS ในการเตรียมเฟอโรไฟเบรต (Ferrofibrate, FNB) ฉีดพ่นสารละลายผสมระหว่าง FNB และ scCO_2 ไปยังสารละลายที่เป็นของเหลวผสมระหว่างน้ำและ Tween80 ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิว พบว่าสามารถลดขนาดอนุภาค FNB เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Tween80

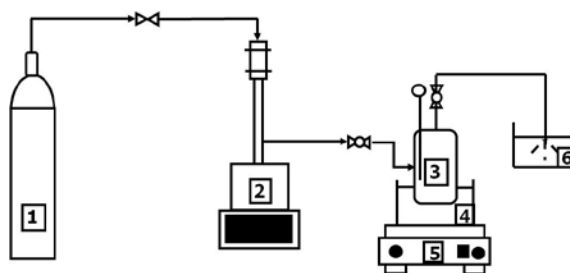
งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาและออกแบบกระบวนการเตรียมไมโครสเฟียร์แว็กซ์ด้วยเทคนิค RESS โดยใช้ scCO_2 เป็นตัวทำละลายโดยการฉีดพ่นไปยังสารละลายในกลุ่ม Anti-Solvent เช่น น้ำ และสารละลายผสมระหว่างสารลดแรงตึงผิวกับน้ำ เป็นตัวกลางในการดักเก็บ จากนั้นศึกษาขนาดและลักษณะพื้นฐานวิทยาของอนุภาคด้วยเทคนิค SEM ทั้งนี้เพื่อเป็นทางเลือกในกระบวนการลดขนาดอนุภาค และเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์แก่พาราฟินแว็กซ์

2. การทดลอง

2.1 วัสดุและสารเคมี

พาราฟินแว็กซ์ ($\text{C}_{28}\text{H}_{58}$) จุดหลอมเหลว $59-65^\circ\text{C}$ จาก Sigma-Aldrich (Analytical Standard Grade) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 99.95 % (Purity grade) จากบริษัท United Gas ซอร์บิทอล และสารเอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol, EG) ($\geq 99\%$ Purity, Analytical Grade จาก Sigma Aldrich)

2.2 กระบวนการลดขนาดด้วยเทคนิค RESS



1. ถังแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 2. บีบอัดแรงดัน (รุ่น Syringe Pump Isco Model 260D) 3. ภาชนะทนแรงดันสูง (Taiatsu Techno) 4. อ่างน้ำมันซิลิโคน 5. เครื่องปั่นกวและให้ความร้อน 6. ภาชนะดักเก็บอนุภาค

รูปที่ 1 จำลองกระบวนการลดขนาดด้วยเทคนิค RESS

ชั่งพาราฟินแว็กซ์ปริมาณ 0.25 g บรรจุลงในภาชนะทนความดันสูง โดยติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 1 อัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ภาชนะทนความดันสูงที่ความดันก่อนการขยายตัว 120-160 bar ควบคุมอุณหภูมิก่อนการขยายตัว $70-90^\circ\text{C}$ ด้วยการให้ความร้อนจากเครื่องทำความร้อนผ่านอ่างน้ำมันซิลิโคน เป็นเวลา 2 h จากนั้นฉีดพ่นสารละลายผสมระหว่างพาราฟินแว็กซ์และ scCO_2 ผ่านหัวฉีดขนาด 1/16" ไปยังน้ำ (30°C , 200 ml) ด้วยอัตราการไหล 1.0-1.5 ml/s นอกจากนี้ศึกษาผลการเติมสารก่อผลึกโดยเติมซอร์บิทอล 0.3 wt% (ระบบ 3 องค์ประกอบในภาชนะทนความดันสูง) และศึกษาผลของสารละลายผสมเป็นตัวกลางดักเก็บอนุภาค (EG และน้ำ 5-15 v/v%, 30°C , 200 ml)

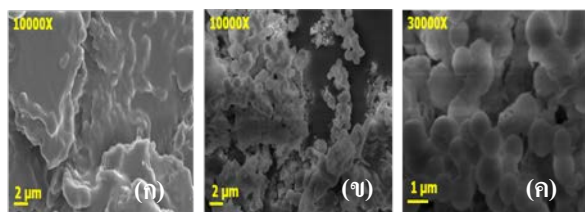
2.3 การวิเคราะห์ผล

วิเคราะห์พื้นฐานวิทยาด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และวัดขนาดอนุภาคด้วยโปรแกรม Image-J โดยวัดอนุภาคอย่างน้อยจำนวน 100 อนุภาค

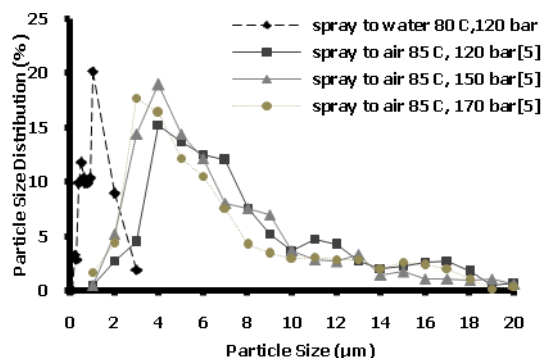
3. ผลการทดลองและการอภิปราย

3.1 การศึกษาเปรียบเทียบลักษณะพื้นฐานวิทยาของพาราฟินแว็กซ์จากกระบวนการลดขนาดด้วยเทคนิค RESS โดยการฉีดพ่นไปยังอากาศและน้ำ

ลักษณะพื้นฐานวิทยาของพาราฟินแว็กซ์จากการลดขนาดด้วยเทคนิค RESS โดยการฉีดพ่นไปยังอากาศ [5] อุณหภูมิและความดันก่อนการขยายตัว 85°C และ 120 bar เปรียบเทียบกับการฉีดพ่นไปยังน้ำที่สภาวะก่อนการขยายตัว 80°C และ 120 bar ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 2 พบว่าการฉีดพ่นไปยังอากาศพาราฟินแว็กซ์มีลักษณะเป็นแผ่นผลึกหลายเหลี่ยมดังรูปที่ 2 (ก) ขนาด 3,000-5,000 nm ส่วนจากการฉีดพ่นไปยังน้ำสามารถเตรียมพาราฟินแว็กซ์ที่มีลักษณะเป็นทรงกลมดังรูปที่ 2 (ข) และ (ค) ขนาด 700-1,000 nm และมีการกระจายตัวของขนาดผลึกดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของพาราฟินแว็กซ์หลังการลดขนาดด้วยเทคนิค RESS ที่ได้จาก (ก) ฉีดพ่นไปยังอากาศ [5] (ข) และ (ค) ฉีดพ่นไปยังน้ำ



รูปที่ 3 ขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์หลังกระบวนการลดขนาดด้วยเทคนิค RESS โดยการฉีดพ่นไปยังอากาศและน้ำ

■ อภิปรายผลการศึกษาเปรียบเทียบลักษณะพื้นฐานวิทยาของพาราฟินแว็กซ์จากกระบวนการลดขนาดด้วยเทคนิค RESS โดยการฉีดพ่นไปยังอากาศและน้ำ

ผลของการลดขนาดพาราฟินแว็กซ์ด้วยเทคนิค RESS โดยการฉีดพ่นผ่านอากาศและน้ำต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาและขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์สามารถอธิบายได้ 2 ส่วน

ดังนี้ ส่วนที่ 1 ผลของความสามารถในการแพร่กระจายของ scCO_2 ในตัวกลางของการฉีดพ่น การฉีดพ่นไปยังอากาศที่มีความหนาแน่นต่ำ CO_2 สามารถละลายและแพร่กระจายตัวได้อย่างอิสระ ทั้งนี้เนื่องจาก CO_2 เป็นตัวทำละลายของพาราฟินแว็กซ์ ส่งผลให้ระหว่างการผลิตอนุภาคมีโอกาสในการเกิดแรงเชื่อม (Binding Force) ของอนุภาคเกิดการรวมตัวกันภายใน CO_2 จึงทำให้อนุภาคที่ได้มีลักษณะไม่เป็นทรงกลมและมีขนาดอนุภาคใหญ่ ในขณะที่การฉีดพ่นผ่านไปยังน้ำ CO_2 จะแพร่และละลายในตัวกลางที่เป็นน้ำได้น้อย เนื่องจากน้ำทำหน้าที่เป็น Anti-Solvent ส่งผลให้อนุภาคมีโอกาสในการรวมตัวกันลดลง อนุภาคจึงมีลักษณะเป็นทรงกลมและมีขนาดเล็กกว่าการฉีดพ่นผ่านอากาศ ส่วนที่ 2 เป็นผลของความหนาแน่นของตัวกลางการฉีดพ่น การฉีดพ่นไปยังน้ำซึ่งเป็นตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากกว่าอากาศจะเกิดแรงเฉื่อย (Inertia Force) ด้านการไหลของของไหล ละอองของสารผสมที่ฉีดพ่นออกมาเกิด Droplet Jet Break Up [3] มากกว่า ละอองจึงมีขนาดเล็ก ส่งผลให้อนุภาคมีโอกาสเกิดการรวมตัวกันภายในละอองน้อย อนุภาคจึงมีลักษณะเป็นทรงกลมและมีขนาดเล็กกว่าการฉีดพ่นผ่านอากาศ

ตัวเลขเวเบอร์ (Weber Number, We) [3] เป็นค่าที่อธิบายระดับของการเกิด Droplet Jet Break Up ของของไหล เมื่อ We มีค่ามาก ระดับการเกิด Droplet Jet Break Up สูง ขนาดของละอองสารผสมจะมีขนาดเล็ก We เป็นสัดส่วนระหว่าง Fluid Inertia/Surface Tension ดังสมการที่ (1)

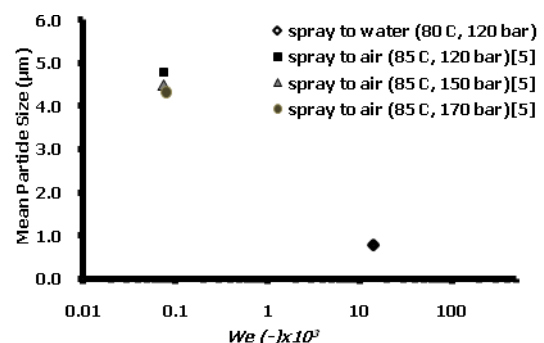
$$We = \frac{\rho v^2 d}{\sigma} \quad (1)$$

ρ คือ ความหนาแน่นของตัวกลางในการฉีดพ่น (kg/m^3)

v คือ ความเร็วของของไหล (m/s)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของละออง (m)

σ คือ แรงตึงผิวระหว่างอนุภาคและตัวกลางหรือละอองและตัวกลาง (N/m)

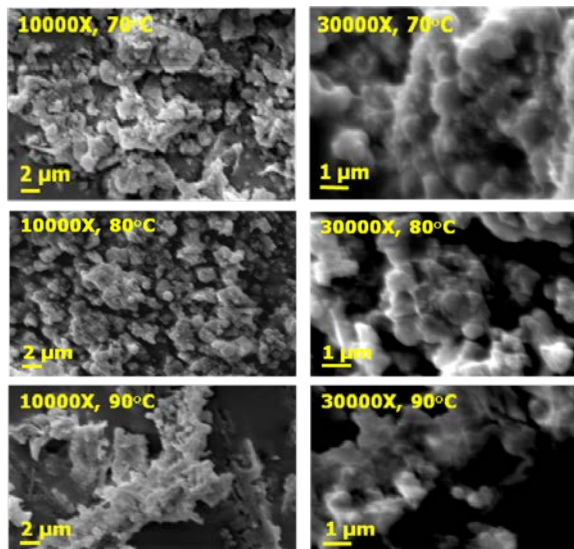


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเวเบอร์กับขนาดอนุภาคเฉลี่ยของพาราฟินแว็กซ์

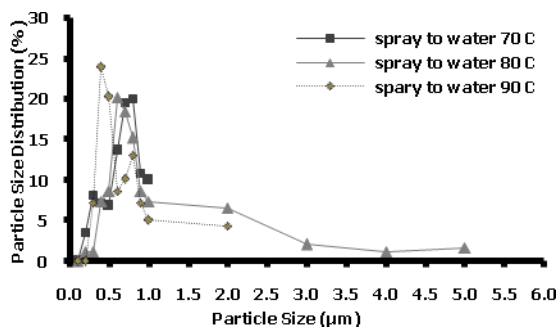
จากรูปที่ 4 การพุ่งไปยังน้ำมีค่า We มากกว่าอากาศประมาณ 200 เท่า และขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์เล็กกว่าประมาณ 5 เท่า เนื่องจากเกิด Droplet Jet Break up ได้ดีกว่า

3.2 การศึกษาผลของอุณหภูมิและความดันก่อนการขยายตัวต่อขนาดของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ที่ได้จากกระบวนการลดขนาดด้วยเทคนิค RESS โดยการฉีดพ่นไปยังน้ำ

ผลของอุณหภูมิก่อนการขยายตัวของระบบต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ด้วยเทคนิค RESS โดยการฉีดพ่นไปยังน้ำ ความดันก่อนการขยายตัวคงที่ 160 bar อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 70, 80 และ 90°C พบว่าพาราฟินแว็กซ์ที่ได้มีลักษณะเป็นทรงกลมติดกันเป็นกลุ่มก้อน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิก่อนการขยายตัว ขนาดอนุภาคของพาราฟินแว็กซ์มีขนาดเล็กลงจาก 800 เป็น 400 nm ดังรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ

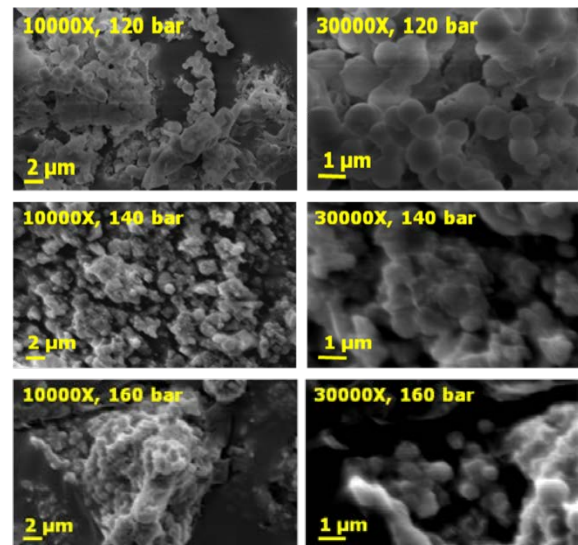


รูปที่ 5 ผลของอุณหภูมิก่อนการขยายตัวต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของพาราฟินแว็กซ์ด้วยเทคนิค RESS โดยการฉีดพ่นไปยังน้ำที่ความดันก่อนการขยายตัวคงที่ 160 bar

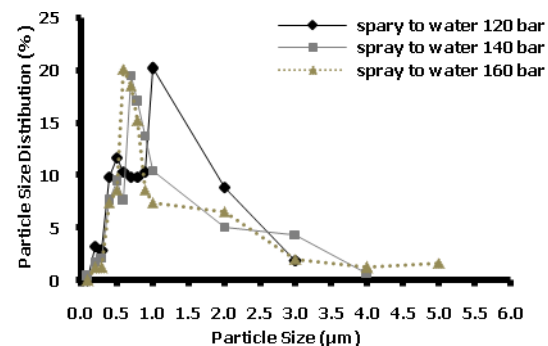


รูปที่ 6 ผลของอุณหภูมิก่อนการขยายตัวต่อขนาดอนุภาคของพาราฟินแว็กซ์ด้วยเทคนิค RESS โดยการฉีดพ่นไปยังน้ำที่ความดันก่อนการขยายตัว 160 bar

ผลของความดันก่อนการขยายตัวของระบบต่อขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ด้วยเทคนิค RESS โดยการฉีดพ่นไปยังน้ำ อุณหภูมิก่อนการขยายตัวคงที่ 80°C ความดันก่อนการขยายตัว 120, 140 และ 160 bar ตามลำดับ แสดงได้ดังรูปที่ 7 พบว่าพาราฟินแว็กซ์ที่ได้มีลักษณะเป็นทรงกลมเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน เมื่อเพิ่มความดันก่อนการขยายตัวขนาดอนุภาคของพาราฟินแว็กซ์จะมีขนาดเล็กลงจาก 1,000 เป็น 600 nm และมีการกระจายตัวของขนาดลดลงตามลำดับ ดังรูปที่ 8



รูปที่ 7 ผลของความดันก่อนการขยายตัวต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของพาราฟินแว็กซ์ด้วยเทคนิค RESS โดยการฉีดพ่นไปยังน้ำที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัวคงที่ 80°C



รูปที่ 8 ผลของความดันก่อนการขยายตัวต่อขนาดอนุภาคของพาราฟินแว็กซ์ด้วยเทคนิค RESS โดยการฉีดพ่นไปยังน้ำที่อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 80°C

■ อภิปรายผลของอุณหภูมิและความดันก่อนการขยายตัวต่อขนาดของพาราฟินแว็กซ์ด้วยเทคนิค RESS โดยการฉีดพ่นไปยังน้ำ

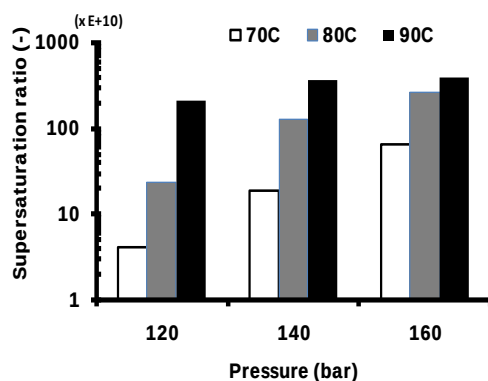
ผลของอุณหภูมิและความดันก่อนการขยายตัวต่อขนาดของพาราฟินแว็กซ์หลังผ่านเทคนิค RESS โดยการฉีดพ่นไป

ยังน้ำ สามารถอธิบายได้จากค่าอัตราส่วนการละลายอิ่มตัว ยิ่งขาด (Supersaturation Ratio, S) [5, 6] ค่า S เปรียบเสมือน แรงขับ (Driving Force) ของการเกิดนิวเคลียสในการเกิดอนุภาค ค่า S สารละลายในอุดมคติแสดงได้ดังสมการที่ (2)

$$S = \frac{y_{pe}(T_{pe}, P_{pe})}{y^*(T, P)} \quad (2)$$

$y_{pe}(T_{pe}, P_{pe})$ คือ สัดส่วนโมลของตัวถูกละลายที่สภาวะก่อนการขยายตัว (-)

$y^*(T, P)$ คือ สัดส่วนโมลของตัวถูกละลายที่สภาวะหลังการขยายตัว (-)

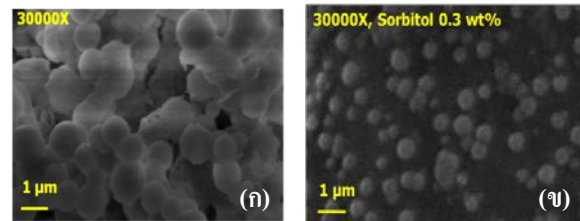


รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิ ก่อนการขยายตัวกับอัตราส่วนการละลายยิ่งขาด

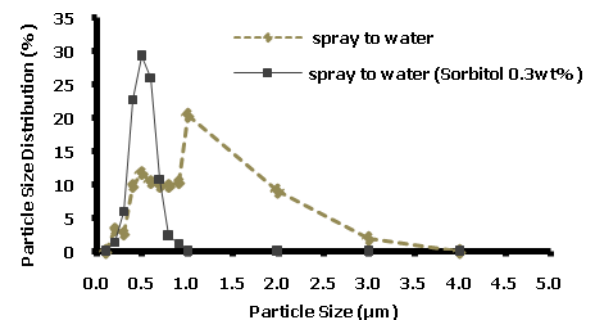
จากรูปที่ 9 สรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความดัน ก่อนการขยายตัว ส่งผลให้พาราฟินแว็กซ์มีความสามารถในการละลายใน scCO_2 มากขึ้น [5] ค่า S เพิ่มสูงขึ้น ระบบมีแรงขับในการเกิดอนุภาคหรืออัตราในการเกิดนิวเคลียสเร็วขึ้นทำให้อนุภาคพาราฟินแว็กซ์มีขนาดเล็กลง [6]

3.3 การศึกษาผลของการเติมสารก่อผลึกต่อลักษณะสัณฐานวิทยาและขนาดของพาราฟินแว็กซ์ที่ได้จากกระบวนการลดขนาดด้วยเทคนิค RESS โดยการฉีดพ่นไปยังน้ำ

ผลของการเติมสารก่อผลึกต่อลักษณะสัณฐานวิทยาและขนาดของพาราฟินแว็กซ์ด้วยเทคนิค RESS ฉีดพ่นไปยังน้ำ อุณหภูมิและความดันก่อนการขยายตัวคงที่ 80°C และ 120 bar โดยใช้ซอร์บิทอลเป็นสารก่อผลึกประมาณ 0.3 wt% ผลการศึกษาแสดงได้ดังรูปที่ 10 และ 11 พบว่าพาราฟินแว็กซ์ที่ได้มีลักษณะเป็นทรงกลมและขนาดเล็กลดลงจาก 700-1,000 nm เป็น 400-600 nm มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคลดลง โดยการเติมสารก่อผลึกจะไปกระตุ้นให้อัตราการเกิดนิวเคลียสเร็วขึ้น [7] พาราฟินแว็กซ์จึงมีขนาดเล็กลง



รูปที่ 10 ลักษณะสัณฐานวิทยาของพาราฟินแว็กซ์หลังผ่านเทคนิค RESS โดยการฉีดพ่นไปยังน้ำที่อุณหภูมิและความดันก่อนการขยายตัว 80°C และ 120 bar (ก) ไม่เติมสารก่อผลึก (ข) เติมซอร์บิทอลเป็นสารก่อผลึก 0.3 wt%



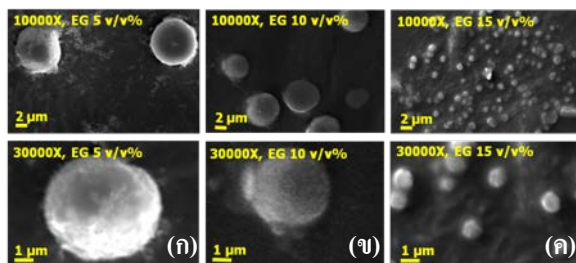
รูปที่ 11 ผลของสารก่อผลึกต่อขนาดอนุภาคของพาราฟินแว็กซ์ด้วยเทคนิค RESS โดยการฉีดพ่นไปยังน้ำที่อุณหภูมิและความดันก่อนการขยายตัว 80°C และ 120 bar

3.4 การศึกษาผลของกระบวนการลดขนาดพาราฟินแว็กซ์ด้วยเทคนิค RESS โดยการฉีดพ่นไปยังสารละลายผสมระหว่างน้ำและเอทิลีนไกลคอลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพาราฟินแว็กซ์

ผลการศึกษาการลดขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ด้วยเทคนิค RESS ที่ความดันและอุณหภูมิก่อนการขยายตัว 120 bar 80°C ฉีดพ่นไปยังสารละลายผสมระหว่างน้ำและ EG สัดส่วน EG ต่อ น้ำ 5, 10 และ 15 v/v% ปั่นกวน 150 rpm โดยใช้หัวฉีดแบบเกลียว เป็ดควาล์วเพื่อฉีดพ่นสาร 1/4 รอบ เพื่อป้องกันการกระเด็นของสารขณะฉีดพ่น ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 12 พบว่าสามารถเตรียมพาราฟินแว็กซ์ที่มีลักษณะเป็นทรงกลมและไม่ติดกันเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งเป็นผลจากสารลดแรงตึงผิวหรือ EG ทำหน้าที่เป็นสารรักษาเสถียรภาพ โดยสารลดแรงตึงผิวจะมีสมบัติพิเศษ คือ การเข้าล้อมรอบสารใดๆ ในลักษณะที่เรียกว่า Micelle [8] จึงมีความสามารถในการทำหน้าที่เป็นสารรักษาเสถียรภาพ (Stabilizer) [4] ของการเกิดอนุภาคโดยจะเข้าไปล้อมรอบพาราฟินแว็กซ์ในขั้นตอนของการเติบโต [4] และการรวมตัว

กันของอนุภาคส่งผลให้ขนาดอนุภาคเล็กลงและไม่ติดกันเป็นกลุ่มก้อน รวมทั้งแรงเฉือนของการปั่นกวนในสารละลายผสมดังกล่าวทำให้ลดการรวมตัวกันหรือติดกันเป็นกลุ่มของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์

นอกจากนี้พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ EG จาก 5-15 v/v% อนุภาคพาราฟินแว็กซ์มีขนาดเล็กลงจาก 7 เป็น 1 μm ซึ่งเป็นผลมาจากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ EG ส่งผลให้ Interfacial Tension ระหว่างพาราฟินแว็กซ์และ EG ลดลง ทำให้ EG แพร่เข้าล้อมรอบพาราฟินแว็กซ์ได้เร็วขึ้น อนุภาคจึงมีความเสถียรตัวอย่างรวดเร็วทำให้ระดับการรวมตัวกันของอนุภาคลดลง อนุภาคพาราฟินแว็กซ์จึงมีขนาดเล็กลง



รูปที่ 12 ผลของความเข้มข้นของ EG ในสารละลายผสมระหว่างน้ำและ EG ที่ใช้เป็นตัวกลางฉีดพ่นในกระบวนการลดขนาดด้วยเทคนิค RESS ที่ EG ต่อน้ำสัดส่วน (ก) 5 v/v% (ข) 10 v/v% และ (ค) 15 v/v%

4. สรุปผลการทดลอง

กระบวนการลดขนาดพาราฟินแว็กซ์ด้วยเทคนิค RESS โดยการฉีดพ่นไปยังสารละลายกลุ่ม Anti-Solvent สามารถเตรียมไมโครสเฟียร์แว็กซ์ที่มีขนาด 400-7,000 nm ในช่วงของอุณหภูมิและความดันก่อนการขยายตัว 70-90°C และ 120-160 bar จากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาและการลดลงของขนาดของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์มี 4 ปัจจัยที่สำคัญ คือ (1) ผลของความหนาแน่นหรือสมบัติความเป็น Anti-Solvent ของตัวกลางการฉีดพ่นโดยอธิบายจาก We (2) การเพิ่มอัตราส่วนการละลายอิมัลชันด้วยตัวกลางโดยการเพิ่มอุณหภูมิและความดันก่อนการขยายตัวของระบบ (3) การกระตุ้นอัตราเร็วของการเกิดนิวเคลียสโดยใช้ซอร์บิทอลเป็นสารก่อผลึก และ (4) การเพิ่มความเข้มข้นของสัดส่วน EG ที่ทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิวและสารรักษาเสถียรภาพ

จากการศึกษาสามารถเตรียมพาราฟินแว็กซ์ที่มีลักษณะเป็นทรงกลมหรือไมโครสเฟียร์แว็กซ์ที่มีลักษณะไม่ติดกันเป็นกลุ่มก้อน ด้วยการฉีดพ่นไปยังสารละลายผสมระหว่างน้ำและ EG โดยใช้หัวฉีดแบบเกลียวและเพิ่มการปั่นกวน ซึ่งลักษณะของอนุภาควัดแล้วนี้มีมูลค่าสูงเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในงานวิจัยและอุตสาหกรรมต่างๆ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุน โครงการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. ปี พ.ศ. 2557

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A.S. Luyt and I. Krupa, "Thermal behaviour of low and high molecular weight paraffin waxes used for designing phase change materials." *Thermochimica Acta*, vol.467, pp. 117-120. Nov., 2008.
- [2] S.D. Yeo and E. Kiran, "Formation of polymer particles with supercritical fluids: A review." *J. of Supercritical Fluids*, vol.34, pp.287-308, Oct., 2004.
- [3] K. Matsuyama, Z. Donghui, T. Urabe and K. Michima, "Formation of L-poly (lactic acid) Microspheres by Rapid Expansion of CO₂ Saturated Polymer Suspensions." *J. of Supercritical Fluids*, vol. 33, pp. 275-281. Sep., 2008.
- [4] S. V. Dalvi, M. A. Azad and R. Dave, "Precipitation and stabilization of ultrafine particles of Fernofibrate in aqueous suspensions by RESOLV." *Powder Technology*, vol. 236, pp. 75-84, May, 2012
- [5] P. Muanchan, A. Veerachayaporn, S. Sanburan, and S. Areerat, "Superhydrophobic Surface Preparation by Rapid Expansion Supercritical Carbon Dioxide Solution Method." *Ladkrabang Engineering Journal*, vol. 2, pp. 67-73, Jun., 2013
- [6] R. B. Gupta and J. Shim. *Solubility in Supercritical Carbon Dioxide*. 1st ed. New York : Taylor & Francis Group, Inc. 2007.
- [7] Y. Jin, A. Hiltner and E. Baer, "Effect of a Sorbitol Nucleating Agent on Fractionated Crystallization of Polypropylene Droplets." *J. of Polymer Science*. vol. 45, pp. 1,788-1,797, Mar., 2007.
- [8] B. Sinha, R. H. Müller and J. P. Möschwitzer, "Bottom-up approaches for preparing drug nanocrystals : Formulations and factors affecting particle size." *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 453, pp. 126-141, Jan., 2013.

การทำแห้งเหนือวิกฤตของคาร์บอนแอโรเจล

Supercritical Drying of Carbon Aerogel

สุทธชา รื่นรส* สุรัชย์ อ้อถาวรพัฒน์* จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์** สุรัตน์ อารีรัตน์*

*สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ผ่านกระบวนการโซลเจลพอลิคอนเดนเซชัน ตามด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายกับน้ำภายในรูพรุน พร้อมทั้งกระบวนการทำแห้งแบบเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ และกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน โดยศึกษาอิทธิพลของตัวทำละลายในกระบวนการแลกเปลี่ยนระหว่างน้ำกับตัวทำละลายต่างๆ ได้แก่ เอทานอล อะซิโตน และไอโซโพรพานอล และศึกษาอิทธิพลของความดันในการทำแห้งแบบเหนือวิกฤตที่ความดัน 105 125 และ 145 bar ต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาและสมบัติรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ โดยพบว่าตัวทำละลายในกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายมีผลกับพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักสามารถอธิบายได้จากค่าการละลายและค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ซึ่งคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลายในกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและใช้ความดันในการทำแห้งแบบเหนือวิกฤต 145 bar มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยช่วง 54 – 56 μm และมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักเท่ากับ 927 m^2/g เมื่อนำคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและใช้ความดันในการทำแห้งแบบเหนือวิกฤต 105 bar ไปทดสอบการดูดซับฟีนอล พบว่าคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้ไอโซโพรพานอลในกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายมีปริมาณการดูดซับฟีนอลที่อุณหภูมิ 30 °C ที่สมดุลมีค่า 91 mg/g

คำสำคัญ : การแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย, คาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์, ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก, พื้นที่ผิวต่อน้ำหนัก

Abstract

This research studied the preparation of carbon aerogel microspheres by the sol-gel polycondensation. This process is followed by solvent exchange, supercritical carbon dioxide drying method and carbonization. The effects of solvent type such as ethanol, acetone and isopropanol in solvent exchange process and pressure in supercritical carbon dioxide drying of 105, 125 and 145 bar on the particle and porous properties were studied. The result shows that solvent in solvent exchange process affects on the surface area of carbon aerogel significantly. This could be explained by solubility and dielectric constant. Carbon aerogel microsphere by using isopropanol as solvent in solvent exchange process and pressure in supercritical carbon dioxide drying of 145 bar has average diameter of 54 - 56 μm and BET surface area of 927 m^2/g . Carbon aerogel microspheres by solvent exchange process and pressure in supercritical carbon dioxide drying of 105 bar was observed for phenol adsorption. The result shows that carbon aerogel microspheres by using isopropanol as solvent had adsorption capacity 91 mg /g at constant temperature 30 °C.

Keywords : Solvent Exchange, Carbon Aerogel Microspheres, Dielectric Constant, Surface Area

1. บทนำ

การสังเคราะห์คาร์บอนแอโรเจลเริ่มจากปฏิกิริยาโซลเจลพอลิคอนเดนเซชัน (Sol-gel Polycondensation) ของรีซอร์ซินอล (Resorcinol) และฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) โดยมีสารละลายเบสโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium Carbonate) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [1] กระบวนการโซลเจลเป็นการเกิดอนุภาคคอลลอยด์ที่เรียกว่า โซล (Sol) แล้วโซลจะรวมกันเป็นร่างแหกลายเป็นเจล (Gel) จากนั้นนำเจลที่ได้เข้าสู่กระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย (Solvent Exchange) ซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญในการสังเคราะห์ โดยใช้ตัวทำละลายแลกเปลี่ยนกับน้ำที่เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชันภายในรูพรุน โดยตัวทำละลายจะต้องมีค่าแรงดึงดูดน้อยกว่าน้ำและช่วยลดแรงคาปิลลารี (Capillary Force) ที่เกิดขึ้นระหว่างขั้นตอนของการทำแห้ง ดังนั้นชนิดของตัวทำละลายจะส่งผลต่อโครงสร้างของเจล เพราะตัวทำละลายจะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในรูพรุนซึ่งส่งผลต่อลักษณะพื้นฐานวิทยา (Morphology) และสมบัติรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ [2]

กระบวนการทำแห้งเป็นกระบวนการกำจัดตัวทำละลายที่อยู่ภายในรูพรุน ซึ่งกระบวนการทำแห้งมีหลายวิธี [3] ได้แก่ การทำแห้งแบบซับคริติคัล (Subcritical Drying) เป็นการทำให้แห้งภายใต้สภาวะต่ำกว่าจุดวิกฤตที่อาศัยการระเหยของตัวทำละลาย ซึ่งเกิดแรงคาปิลลารีเนื่องจากแรงดึงดูดของตัวทำละลาย เรียกว่าวัสดุที่ได้จากกระบวนการนี้ว่าซีโรเจล (Xerogel) การทำแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze Drying) เป็นการทำให้แห้งโดยอาศัยหลักการระเหิดโดยตัวทำละลายจะกลายเป็นของแข็งและเมื่อลดความดันลงอย่างรวดเร็วทำให้ตัวทำละลายระเหิดกลายเป็นไอเรียกว่าวัสดุที่ได้จากกระบวนการนี้ว่าไครโอเจล (Cryogel) และการทำแห้งแบบเหนือวิกฤต (Supercritical Drying) เป็นการทำให้แห้งที่สภาวะอุณหภูมิและความดันสูงกว่าจุดวิกฤต ของไหลเหนือวิกฤต (Supercritical Fluid) มีแรงดึงดูดน้อยมากจึงทำให้มีการหดตัวของโครงสร้างน้อยและยังรักษาโครงสร้างของรูพรุนไว้ได้ โดยการทำแห้งเหนือวิกฤตนั้นนิยมใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวสกัดตัวทำละลายที่อยู่ภายในรูพรุนเรียกว่าวัสดุที่ได้จากกระบวนการนี้ว่า

แอโรเจล (Aerogel) จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้เข้าสู่กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ที่อุณหภูมิ 1,000 °C ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนเพื่อเปลี่ยนเจลให้เป็นคาร์บอนทำให้มีความเสถียรและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานต่างๆ ได้

งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาอิทธิพลของตัวทำละลายในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย และศึกษาอิทธิพลของความดันในกระบวนการทำแห้งแบบเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (Supercritical Carbon Dioxide Drying, sc-CO₂) ที่มีผลต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของอนุภาคและสมบัติรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจล หลังจากนั้นนำคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้ไปทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอล

2. การทดลอง

2.1 วัสดุและสารเคมี

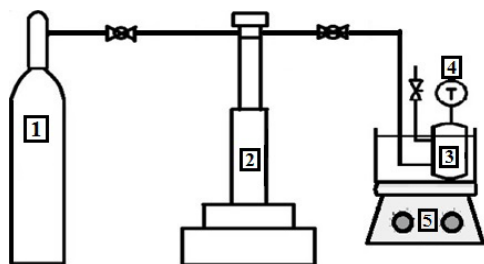
รีซอร์ซินอล (C₆H₄(OH)₂ จากบริษัท Fluka) ฟอร์มัลดีไฮด์ (HCHO จากบริษัท RCI Labscan) โซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃ จากบริษัท Ajax Finechem) Sorbitan Monooleate (C₂₄H₄₄O₆ จากบริษัท SIGMA) โซโคเลเฮเซน (C₆H₁₂ จากบริษัท RCI Labscan) อะซิโตน (CH₃COCH₃ จากบริษัท RCI Labscan) เอทานอล (C₂H₅OH จากบริษัท RCI Labscan) ไอโซโพรพานอล (C₃H₇OH จากบริษัท RCI Labscan) น้ำกลั่น ฟีนอล (C₆H₅OH จากบริษัท BDH Chemicals) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ความบริสุทธิ์ 99.95% และแก๊สไนโตรเจน ความบริสุทธิ์ 99.999%

2.2 ขั้นตอนการทดลองและการวิเคราะห์ผล

2.2.1 การเตรียมคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์

กำหนดอัตราส่วนรีซอร์ซินอลต่อฟอร์มัลดีไฮด์ (R/F) 1:2 mol:mol รีซอร์ซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต (R/C) 50:1 mol:mol และรีซอร์ซินอลต่อน้ำ (R/W) 25:100 g/cm³ จากนั้นผสมโดยปั่นกวนสารละลาย (สารละลายอาร์เอฟ) ที่ 25 °C เป็นเวลา 1 h แล้วฉีดสารละลายอาร์เอฟผ่านเมทิลซินเตอร์ลงไปในสารละลายอินทรีย์ผสม (โซโคเลเฮเซนและ Span 80 ประมาณ 7 %wt) ด้วยอัตราการฉีด 0.5 ml/h เป็นเวลา 2 h ซึ่งสารละลายอินทรีย์จะถูกปั่นกวนด้วยอัตราเร็ว 180 rpm [4] หลังจากนั้นปั่นกวนอิมัลชันที่ได้ เป็นเวลา 24 h ที่อุณหภูมิ

25 °C แยกเจลออกจากสารละลายอินทรีย์ แล้วนำเจลไปแช่ในตัวทำละลายเป็นเวลา 24 h เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวทำละลายโดยตัวทำละลายที่ศึกษามี 3 ชนิดคือ เอทานอล อะซิโตน และไอโซโพรพานอล โดยกำหนดให้ผลิตภัณฑ์คาร์บอนแอโรเจลที่เปลี่ยนตัวทำละลายในข้างต้นใช้ตัวย่อคือ CA-EtOH, CA-Act และ CA-IPA ตามลำดับ จากนั้นนำอาร์เอฟเจลเข้าสู่กระบวนการทำแห้งแบบเหนือวิกฤตด้วย sc-CO₂ ดังรูปที่ 2.1 โดยบรรจุสารอาร์เอฟเจลที่ขังน้ำหนักแล้วลงในภาชนะทนความดันสูง ใช้ความดัน 105, 125 และ 145 bar ที่อุณหภูมิ 40 °C ทิ้งไว้เป็นเวลา 8 h



รูปที่ 2.1 แผนภาพกระบวนการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต 1. ถังแก๊ส CO₂ 2. ปั๊มความดันสูง (Syringe Pump) 3. ภาชนะทนแรงดันสูง (High Pressure Vessel) 4. เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) 5. อุปกรณ์ให้ความร้อนและขูดปั่นกวน (Stirrer)

จากนั้นตรวจสอบประสิทธิภาพในการทำแห้งโดยคำนวณหาปริมาณตัวทำละลายที่สกัดได้ (% Wet Basis) ดังสมการที่ 2.1

$$\%WetBasis = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \quad (2.1)$$

โดยที่ W_1 คือ น้ำหนักอาร์เอฟเจลก่อนทำแห้ง (g)

W_2 คือ น้ำหนักอาร์เอฟเจลหลังทำแห้ง (g)

นำอาร์เอฟแอโรเจลผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน โดยเตรียมเตาเผาให้อยู่ในสภาวะบรรยากาศเฉื่อย ด้วยการป้อนแก๊สไนโตรเจนด้วยอัตราการไหล 900 ml/min และเผาที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 12 h

2.2.2 การวิเคราะห์สมบัติของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์

นำคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์มาวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ยี่ห้อ

ZEISS รุ่น MA10 จากนั้นวิเคราะห์สมบัติของรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ โดยใช้เครื่องดูดซับไนโตรเจน ยี่ห้อ Quantachome รุ่น Autosorp-1

2.2.3 การทดลองดูดซับฟีนอลโดยใช้คาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์

นำคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ผ่านการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและทำแห้งแบบเหนือวิกฤตด้วย sc-CO₂ ที่ความดัน 105 bar อุณหภูมิ 40 °C มาทดลองดูดซับฟีนอลความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/l โดยเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 rpm ที่อุณหภูมิ 30 °C โดยเก็บตัวอย่างที่เวลา 30, 60, 90, 120, 240, 420 และ 720 min แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง UV-Vis Spectrophotometer ยี่ห้อ HEXIOS

3. ผลการทดลองและการอภิปราย

3.1 อิทธิพลของตัวทำละลาย

3.1.1 ประสิทธิภาพการทำแห้งเหนือวิกฤต

เมื่อนำอาร์เอฟเจลเข้าสู่กระบวนการทำแห้งแบบเหนือวิกฤตด้วย sc-CO₂ ที่ความดัน 105 bar อุณหภูมิ 40 °C พบว่าเมื่อเปลี่ยนชนิดตัวทำละลายเป็นไอโซโพรพานอล ทำให้สามารถสกัดตัวทำละลายออกจากโครงสร้างเจล (%Wet Basis) เพิ่มขึ้น เนื่องจากไอโซโพรพานอลมีค่าการละลาย (Solubility) ใน sc-CO₂ สูงดังตารางที่ 1 โดยการคำนวณหาปริมาณของตัวทำละลายที่สกัดได้เป็นการคำนวณแบบ %Wet Basis เนื่องจากค่าความดันไอของตัวทำละลายที่นำมาศึกษามีค่าแตกต่างกัน เป็นผลทำให้น้ำหนักอาร์เอฟเจลก่อนทำแห้งมีค่าแตกต่างกัน

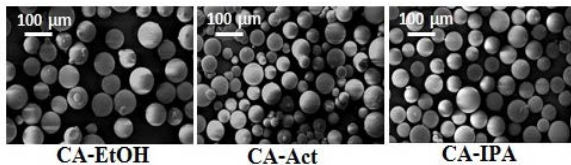
ตารางที่ 1 อิทธิพลของตัวทำละลายต่อประสิทธิภาพการทำแห้ง (%Wet Basis)

Sample	Vapor pressure (mmHg) [5]	Solubility (mol/mol)*	%Wet Basis
CA-EtOH	60	1.10×10^{-3}	73%
CA-Act	231	1.03×10^{-2}	80%
CA-IPA	45	1.20×10^{-2}	81%

หมายเหตุ : ค่า Solubility รายงานในหน่วยของโมลของตัวทำละลายต่อโมลของสารละลาย เป็นค่าที่ได้จากการประมาณโดยสมการ Peng-Robinson ที่อุณหภูมิ 40 °C และความดัน 105 bar

3.1.2 ลักษณะสัณฐานวิทยาของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์

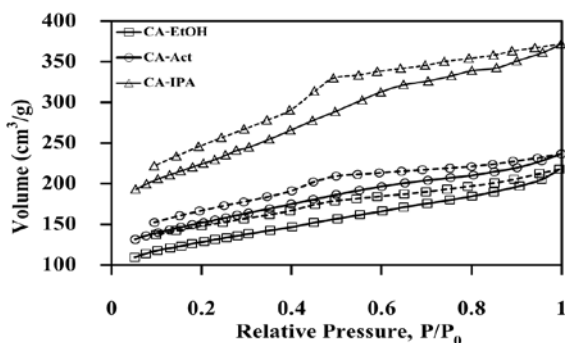
ภาพสัณฐานวิทยาของคาร์บอนแอโรเจลเมื่อเปลี่ยนชนิดของตัวทำละลายในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย แสดงในรูปที่ 3.1 พบว่าการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายที่ศึกษาไม่ส่งผลต่อลักษณะของคาร์บอนแอโรเจล โดยอนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลมและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคอยู่ในช่วง 54-56 μm



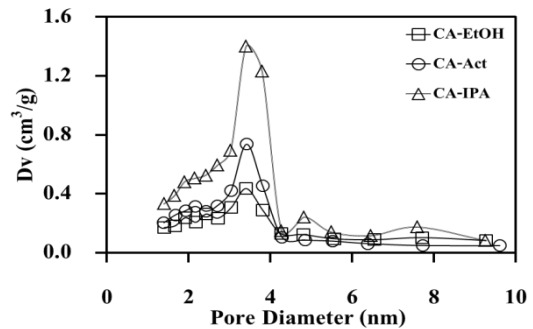
รูปที่ 3.1 ภาพสัณฐานวิทยาของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์เมื่อเปลี่ยนชนิดตัวทำละลาย

3.1.3 สมบัติรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์

จากการพิจารณาไอโซเทอมของการดูดซับและคายซับของแก๊สไนโตรเจนแสดงในรูปที่ 3.2 พบว่า CA-IPA มีการดูดซับและคายซับของแก๊สไนโตรเจนสูง โดยช่วงการเกิดฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) มีความชันของกราฟในการคายซับของแก๊สไนโตรเจนมาก เนื่องจากมีปริมาณของรูพรุนอยู่ในช่วงไมโครพอร์ สามารถอธิบายได้จากการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจล ดังรูปที่ 3.3 พบว่าเมื่อเปลี่ยนชนิดตัวทำละลาย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนใกล้เคียงกันประมาณ 3 nm แต่ชนิดตัวทำละลายที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อช่วงการกระจายตัวของขนาดรูพรุน เนื่องจากค่า Solubility ของตัวทำละลายใน sc-CO_2 มีค่าไม่เท่ากัน ส่งผลให้มีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนที่แตกต่างกัน



รูปที่ 3.2 อิทธิพลของตัวทำละลายต่อไอโซเทอมของการดูดซับและการคายซับของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์



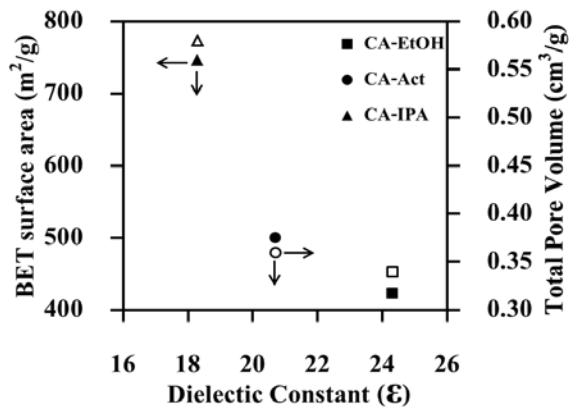
รูปที่ 3.3 อิทธิพลของตัวทำละลายที่มีผลต่อการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์

จากการวิเคราะห์สมบัติของรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ดังตารางที่ 2 พบว่าเมื่อเปลี่ยนชนิดตัวทำละลายเป็นไอโซโพรพานอล ทำให้คาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์มีปริมาตรไมโครพอร์ ปริมาตรเมโซพอร์ และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดมาก ส่งผลทำให้มีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักคือ 746 m^2/g เนื่องจากไอโซโพรพานอลมีค่า Solubility ใน sc-CO_2 มาก เมื่อสร้างความสัมพันธ์ของพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักและปริมาตรของรูพรุนทั้งหมดของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์กับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant, ϵ) ดังรูปที่ 3.4 พบว่าเมื่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกลดลงจะทำให้คาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์มีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักเพิ่มขึ้น โดยผลต่างของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกระหว่างตัวทำละลายไอโซโพรพานอลและคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าน้อยกว่าตัวทำละลายอื่น จึงทำให้สามารถสกัดตัวทำละลายออกจากโครงสร้างเจลได้มาก เนื่องจากค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะแสดงความเป็นขั้วของตัวทำละลาย ซึ่งเมื่อมีค่าผลต่างน้อยจะทำให้ความเป็นขั้วมีความใกล้เคียงกันและจะสามารถละลายเข้ากันได้

ตารางที่ 2 อิทธิพลของตัวทำละลายต่อสมบัติรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลในการทำแห้งแบบเหนือวิกฤตด้วย sc-CO_2 ที่ความดัน 105 bar และอุณหภูมิ 40 $^{\circ}\text{C}$

Sample	ϵ [6]	S_{BET} (m^2/g)	V_{mic} (cm^3/g)	V_{mes} (cm^3/g)	V_{total} (cm^3/g)
CA-EtOH	24.3	423	0.17	0.24	0.34
CA-Act	20.7	500	0.21	0.24	0.37
CA-IPA	18.3	746	0.30	0.41	0.58

หมายเหตุ : ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคาร์บอนไดออกไซด์ คือ 1.5 [6]

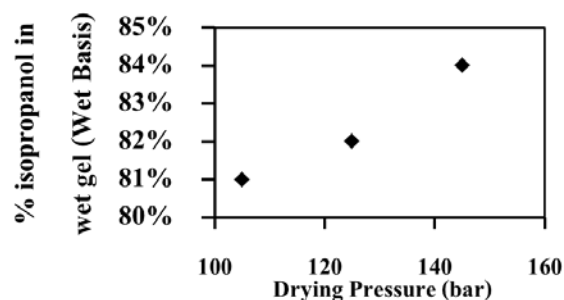


รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ของพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักและปริมาตรของรูพรุนทั้งหมดของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์กับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

3.2 อิทธิพลของความดันในการทำแห้งแบบเหนือวิกฤตด้วย sc-CO₂

3.2.1 ประสิทธิภาพการทำแห้งและลักษณะพื้นฐานวิทยาของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์

เมื่อนำอาร์เอพเจลที่ใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลายในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายผ่านกระบวนการทำแห้งแบบเหนือวิกฤตด้วย sc-CO₂ โดยใช้ความดันในการทำแห้งคือ 105 125 และ 145 bar ที่อุณหภูมิ 40 °C พบว่าสามารถสกัดไอโซโพรพานอลออกจากโครงสร้างเจลได้มากขึ้นคือ 81 82 และ 84% (%Wet Basis) ตามลำดับดังรูปที่ 3.5 เนื่องจากค่า Solubility ของไอโซโพรพานอลใน sc-CO₂ มีค่าต่ำกว่าเส้นค่า Solubility จึงทำให้ไอโซโพรพานอลที่อยู่ในโครงสร้างเจลสามารถละลายใน sc-CO₂ ได้เป็นอย่างดี



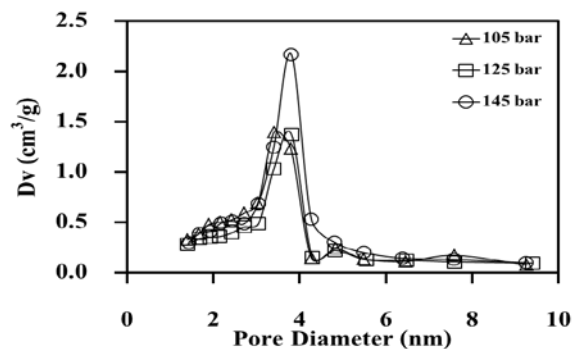
รูปที่ 3.5 อิทธิพลของความดันต่อประสิทธิภาพการทำแห้งแบบเหนือวิกฤตด้วย sc-CO₂

เมื่อพิจารณาถึงลักษณะพื้นฐานของอนุภาคเมื่อปรับเปลี่ยนความดันในการทำแห้งแบบเหนือวิกฤตด้วย sc-CO₂ พบว่าความดันในการทำแห้งไม่ส่งผลต่อลักษณะ

และขนาดของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของปฐมพร [7]

3.2.2 สมบัติรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์

จากการศึกษาอิทธิพลของความดันในการทำแห้งเหนือวิกฤต เมื่อวิเคราะห์ไอโซเทอมของของการดูดซับและคายซับของแก๊สไนโตรเจนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ พบว่าเมื่อเพิ่มความดันในการทำแห้ง ปริมาณการดูดซับและการคายซับไนโตรเจนสูงขึ้น ซึ่งอนุภาคมีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนอยู่ในช่วงของไมโครพอร์ สามารถอธิบายได้จากการกระจายตัวของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ดังรูปที่ 3.6 พบว่ามีช่วงการกระจายตัวอยู่ในลักษณะเดียวกันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความดันในการทำแห้งแต่ยังคงเป็นตัวทำละลายชนิดเดิม จึงไม่ส่งผลต่อช่วงการกระจายตัวของขนาดรูพรุน การเพิ่มความดันส่งผลทำให้มีปริมาณของขนาดรูพรุนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากไอโซโพรพานอลละลายใน sc-CO₂ เพิ่มขึ้น โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนมีค่าใกล้เคียงกับการเปลี่ยนชนิดตัวทำละลายซึ่งกล่าวมาแล้วในข้างต้น



รูปที่ 3.6 อิทธิพลของความดันที่มีผลต่อการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์

จากการวิเคราะห์สมบัติของรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจล พบว่าเมื่อเพิ่มความดันในการทำแห้งแบบเหนือวิกฤต ส่งผลทำให้มีปริมาณไมโครพอร์ ปริมาตรเมโซพอร์ และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเพิ่มมากขึ้น ความดัน 145 bar ทำให้คาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์มีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักคือ 927 m²/g เนื่องจากการเพิ่มความดันเป็นการเพิ่มค่า Solubility ระหว่าง sc-CO₂ กับไอโซโพรพานอล ในลักษณะการเพิ่มจำนวนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์

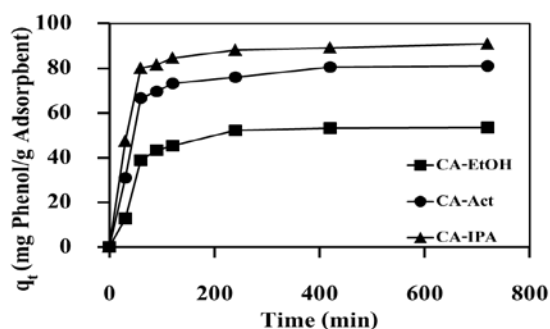
เข้าไปในระบบซึ่งทำให้เพิ่มความสามารถในการสกัดตัวทำละลายได้มากขึ้นดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 อิทธิพลของความดันต่อสมบัติรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลในการทำแห้งแบบเหนือวิกฤตที่อุณหภูมิ 40° C

P (bar)	S _{BET} (m ² /g)	V _{mic} (cm ³ /g)	V _{mes} (cm ³ /g)	V _{total} (cm ³ /g)
105	746	0.30	0.41	0.58
125	697	0.28	0.38	0.54
145	927	0.38	0.45	0.70

3.3 ความสามารถในการดูดซับฟีนอลของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์

คาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่มีการแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย โดยใช้ตัวทำละลายคือ เอทานอล อะซิโตน และไอโซโพรพานอล ผ่านการทำแห้งแบบเหนือวิกฤตด้วย sc-CO₂ ที่ความดัน 105 bar อุณหภูมิ 40 °C นำมาทดสอบเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับฟีนอลของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์พบว่า CA-IPA มีปริมาณการดูดซับฟีนอล 91 mg/g โดยเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 420 min ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ปริมาณการดูดซับฟีนอลของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาอิทธิพลของตัวทำละลายในกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย และการศึกษาอิทธิพลของความดันในกระบวนการทำแห้งแบบเหนือวิกฤตด้วย sc-CO₂ พบว่าเมื่อที่ใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลายซึ่งมีค่า Solubility สูงและผลต่างของค่าคงที่ไดอิลิกตริกมีค่าน้อยทำให้มีประสิทธิภาพการทำแห้งดีกว่าตัวทำละลาย

ชนิดอื่น เมื่อทำแห้งแบบเหนือวิกฤตด้วยความดัน 145 bar อุณหภูมิ 40° C ที่มีโครงสร้างของคาร์บอนแอโรเจลได้มากขึ้น ทำให้มีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนัก 927 m²/g เนื่องจากมีปริมาตรเมโซพอร์ 0.38 cm³/g ปริมาตรไมโครพอร์ 0.45 cm³/g และปริมาตรรูพรุนทั้งหมด 0.70 cm³/g และจากการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับ พบว่ามีปริมาณการดูดซับฟีนอล 91 mg/g

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่นที่สนับสนุนทุนวิจัย และขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่สนับสนุนการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Tamon, H. Ishizaka, T. araki and M. okazaki. "Control of Mesoporous of Organic and Carbon Aerogels," Carbon, Vol.36, pp.1257-1262, Oct., 1987.
- [2] Y. Jun-Bing, L. Li-Cheng, L. Lang, K. Fei-Yu, H. Zheng-Hong and W. Hui "Preparation and Properties of Phenolic Resin-Based Activated Carbon Spheres with Controlled Pore Size Distribution," Carbon, Vol. 40, pp. 911-916, Aug., 2002.
- [3] S. A. A-Muhtaseb and J. A. Ritter "Preparation and Properties of Resorcinol-Formaldehyde Organic and Carbon Gel," Adv. Mater., Vol.15, pp.101-114, Jan., 2003.
- [4] J. Chaichanawong, K. Kongcharoen and S. Areerat "Preparation of carbon aerogel microspheres by a simple-injection emulsification method," Adv. Power Tech., Vol. 24, pp.891-896, May, 2013
- [5] J. A. Dean, LANGE'S HANDBOOK OF CHEMISTRY, New York, MC Graw -Hill, 1999
- [6] A. A. Maryott and E. R. Smith. "Table of Dielectric Constants of Pure Liquids" National Bureau of Standards Circular 514, 1951.
- [7] P. Klueapsuwan, "Preparation of Carbon Aerogel Microspheres by Supercritical Carbon Dioxide Drying Process" Master of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 2013.

พฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมีบนผิวขัดลาดเอียงของเหล็กชุบเคลือบ โลหะผสมอลูมิเนียมรีไซเคิลด้วยวิธีการจุ่มร้อน

Electrochemical Behavior on Gradient Polished Surface of Hot Dipped Aluminum Recycle Coated Steel.

ลลิตา เพียรราษฎร์ พนมกร ขาวทอง อภิชาติ อาจนาสีขาว
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมีในระดับจุลภาคบนผิวขัดลาดเอียงของเหล็กชุบเคลือบโลหะผสมอลูมิเนียมรีไซเคิลด้วยวิธีการจุ่มร้อน ที่ทำการศึกษาระดับต่าง ๆ ของชั้นเคลือบที่ได้จากการขัดทำมุมน้อยกว่า 6 องศา เพื่อเปิดผิวของชั้นเคลือบให้เห็นบริเวณ intermetallic compound, บริเวณ interface และบริเวณ coating โดยทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโครงสร้างด้วยเทคนิค energy dispersive x – ray spectroscopy ศึกษาพฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิค anodic polarization measurement และ open circuit potential ผลการทดลองพบว่า บริเวณ intermetallic compound มีความไวในการทำปฏิกิริยาค่าต่ำสุด ในขณะที่บริเวณ coating มีความไวในการเกิดปฏิกิริยามากที่สุด และจากข้อมูลของ anodic polarization curve แสดงให้เห็นว่าบริเวณต่าง ๆ ของชั้นเคลือบมีความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนแบบพาสซีฟฟิล์ม

คำสำคัญ : พฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมี เหล็กชุบเคลือบอลูมิเนียมรีไซเคิล โพเทนชิโอสแตท อลูมิเนียมรีไซเคิล

Abstract

This research is study the localized coating regions of hot-dipped aluminum coated steel from recycled aluminum. The specimens were polished with an angle lower than 6° to display intermetallic compound region, interface region and coating region. The microstructure and phase constitution were characterized by scanning electron microscope and energy dispersive x – ray spectroscopy, respectively. The electrochemical behavior was investigated using an open circuit potential and anodic polarization measurement. The results showed that the intermetallic compound region has the less noble. The coating region was more susceptible to corrosion than the other regions. Hot-dipped aluminum coated steel can show passive film ability, shown in anodic polarization curve.

Keywords : Electrochemical behavior, Aluminum coated steel, Potentiostat, Aluminum recycle

1. บทนำ

ความต้องการในการใช้เหล็กชุบเคลือบสังกะสีในปัจจุบันมีปริมาณที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในงานด้านอุตสาหกรรมได้หลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมเหล็ก อุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมพวกโครงสร้างเหล็ก และอุตสาหกรรมอื่น ๆ เป็นต้น อีกทั้งโลหะสังกะสีมีราคาถูก

และมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดี แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณสังกะสีมีอยู่อย่างจำกัด [1-5] โลหะผสมอลูมิเนียมจึงเป็นวัสดุทางเลือกใหม่ที่เหมาะสมจะใช้เคลือบผิวเหล็กแทนสังกะสี เนื่องจากอลูมิเนียม เป็นโลหะที่สามารถนำรีไซเคิลได้อย่างไม่สิ้นสุด มีความแข็งแรง ทนทานต่อการกัดกร่อนได้เป็นอย่างดี เพราะอลูมิเนียมทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นชั้นสารประกอบออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ สามารถใช้ป้องกันการกัดกร่อนได้ [2] อย่างไรก็ตามถึงแม้อลูมิเนียมจะสามารถสร้างฟิล์มป้องกันตัวเองได้ แต่อลูมิเนียมไม่มีความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนแบบแคโทดิกเมื่อเทียบกับเหล็ก (Cathodic protection) [2, 4-5]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาและพัฒนาผิวเคลือบอลูมิเนียม เพื่อเพิ่มความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนแบบเป็นตัวเลขสละแทน ด้วยวิธีการเดิมธาตุอื่น ๆ ลงไปในอลูมิเนียมหลอมเหลว [1-6, 8] หรือการชุบเคลือบผิวด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น การจุ่มร้อน (Hot dip process) [2, 5, 7-8] และการเคลือบผิวแข็งด้วยไอระเหยทางกายภาพ (PVD) [1, 3] เป็นต้น Enokida และคณะ [4] ศึกษาอิทธิพลของปริมาณซิลิกอนต่อความสามารถในการเป็นตัวเลขสละของโลหะผสม Al-Mg-Si พบว่าปริมาณซิลิกอนที่เพิ่มขึ้นมีผลให้ความสามารถในการป้องกันแบบเป็นตัวเลขสละเพิ่มขึ้นและมีการเกิดรูเข็มน้อยลง Chihara และคณะ [5] อธิบายว่าผิวเคลือบโลหะผสมอลูมิเนียมที่มีปริมาณแมกนีเซียมและซิลิกอนน้อย จะมีความต้านทานการกัดกร่อนสูง เนื่องจากมีอนุภาค Mg_2Si น้อย Birbilis และ Buchheit [5] อธิบายว่าค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (E_{corr}) และศักย์ไฟฟ้าการเกิดรูเข็ม (E_{pit}) มีการเปลี่ยนแปลงไปตามองค์ประกอบของ intermetallic นั้น ๆ

Kruehong และคณะ [7] อธิบายว่าการกระจายตัวของซิลิกอนและเหล็กมีความสำคัญต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของผิวเคลือบ และมีอิทธิพลต่อความไวของการเกิดรูเข็ม

อลูมิเนียมรีไซเคิลมีธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่ ซึ่งธาตุบางชนิด เช่น แมกนีเซียม และซิลิกอนมีส่วนช่วยในการเพิ่มคุณสมบัติด้านการต้านทานการกัดกร่อน ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาเหล็กชุบเคลือบโลหะผสมอลูมิเนียมจากอลูมิเนียมรีไซเคิลด้วยกระบวนการจุ่มร้อน ทำการตรวจสอบพฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมีที่บริเวณต่าง ๆ ที่ได้จากการจัดเปิดผิวแบบลาดเอียง ใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมีขนาดไมครอนในการทดสอบโดยใช้เทคนิค open circuit potential และ anodic polarization measurement ในการศึกษา

2. วิธีการทดลอง

2.1 เหล็กชุบเคลือบโลหะผสมอลูมิเนียมรีไซเคิล

นำแผ่นเหล็กขาว (0.077 wt.% C) ขนาด 70 x 35 x 0.7 มิลลิเมตร ด้านบนเจาะรูตรงกลางมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2 มิลลิเมตร มาล้างคราบไขมันด้วย NaOH เข้มข้น 1 M แล้วล้างทำความสะอาดด้วยเอทานอลและน้ำในเครื่องล้างความถี่สูง ก่อนจะนำไปกระตุ้นผิวด้วย H_2SO_4 เข้มข้น 1 M แล้วล้างด้วยเอทานอลและน้ำอีกครั้ง ก่อนเป่าให้แห้ง

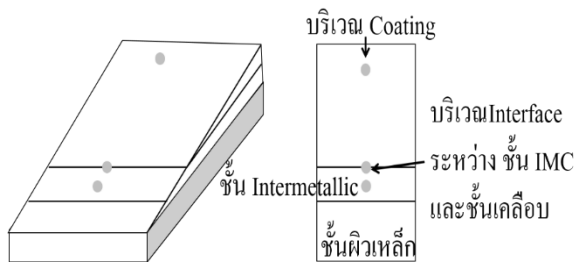
ทำการหลอมโลหะผสมอลูมิเนียมด้วยอลูมิเนียมรีไซเคิลที่มีองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 ใช้อุณหภูมิเตาหลอม 700 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะบรรยากาศก๊าซอาร์กอนแล้วจุ่มแผ่นเหล็กลงในอลูมิเนียมหลอมเหลวเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นทำให้ชิ้นงานเย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของปริมาณธาตุในโลหะผสมอลูมิเนียมรีไซเคิล

ธาตุ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
อลูมิเนียม	87.76
สังกะสี	4.03
เหล็ก	3.57
ทองแดง	2.31
ซิลิกอน	0.95
แมงกานีส	0.65
อื่นๆ	0.73

2.2 การเตรียมผิวชิ้นงาน

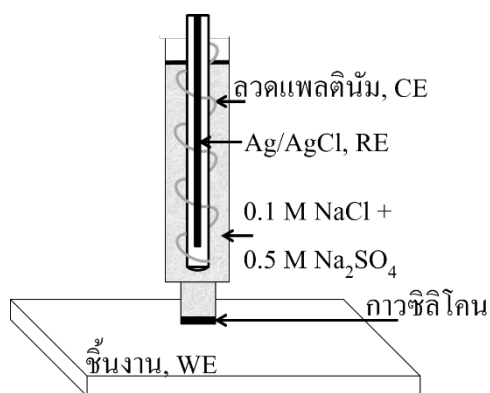
ขัดผิวชิ้นงานให้ทำมุมน้อยกว่า 6 องศา [8] ด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1000 และ 2000 ตามลำดับ โดยใช้น้ำเป็นตัวหล่อลื่น แล้วขัดละเอียดด้วยผงอลูมินาขนาด 0.05 ไมครอน ล้างทำความสะอาดด้วย เอทานอลในเครื่องสั่นความถี่สูง ก่อนจะเป่าให้แห้ง จากนั้นถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคของบริเวณต่าง ๆ บนชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 1 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณนั้นด้วยเทคนิคการวิเคราะห์แบบ EDX



รูปที่ 1 แผนภาพชิ้นงานหลังการขัดผิว

2.3 การตรวจสอบพฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมี

เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำจากหลอดแก้ว ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลายขนาด (3, 1 และ 0.2 มม.) เซลล์ไฟฟ้าเคมีประกอบด้วยลวดแพลตินัมเป็นขั้วตรงข้าม (CE), ขั้วทำงาน (WE) และขั้วอ้างอิงชนิดซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ (RE) ทำการติดตั้งชุดทดสอบตามรูปที่ 2 โดยใช้สารละลายผสมระหว่าง $0.5 \text{ M Na}_2\text{SO}_4 + 0.1 \text{ M NaCl}$ เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในการทดสอบ



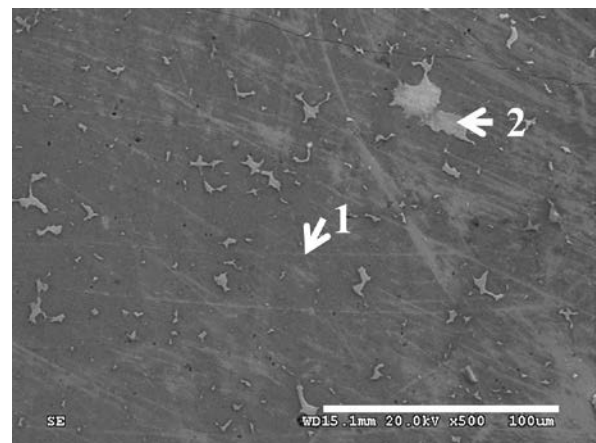
รูปที่ 2 การติดตั้งชุดทดสอบพฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมี

ด้วยวิธี Micro - electrochemical cell

3. ผลการทดลอง

3.1 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

บริเวณ Intermetallic compound (IMC) เกิดจากธาตุเหล็ก (Fe) ในพื้นผิวเหล็ก ทำปฏิกิริยากับอลูมิเนียมหลอมเหลว กลายเป็นชั้นสารประกอบเชิงโลหะของอลูมิเนียม – เหล็ก ในรูปที่ 3 แสดงให้เห็นโครงสร้างพื้น (สีเทาเข้ม) และ second phase (สีเทาสว่าง) กระจายอยู่ทั่วโครงสร้างพื้น เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ในตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งที่ 1 มีปริมาณของอลูมิเนียม 52.15 %wt. ปริมาณของเหล็ก 38.49 %wt. เป็นสารประกอบเชิงโลหะชนิด Al-Fe (Al-Fe IMC) และตำแหน่งที่ 2 มีปริมาณของเหล็ก 93.70 %wt. เป็นเฟสของเหล็ก (Fe phase) โดยจากรูปที่ 3 การกระจายตัวของ Al-Fe IMC และ Fe phase สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kruehong และคณะ [7] ที่พบว่าบริเวณ IMC ประกอบด้วย Al-Fe IMC และ Fe phase ประมาณ 30 %

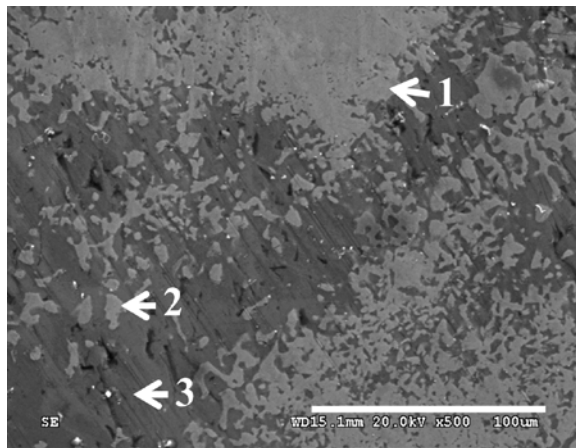


รูปที่ 3 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณ IMC

ตารางที่ 2 องค์ประกอบของธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ตามตำแหน่งในรูปที่ 3

ตำแหน่ง ที่	องค์ประกอบของธาตุ (Wt.%)			
	C	Fe	Al	Si
1	6.55	38.49	52.15	2.81
2	6.30	93.70	-	-

รูปที่ 5 แสดงโครงสร้างบริเวณ Interface ซึ่งบริเวณระหว่างชั้น IMC และชั้น Coating จากรูปจะพบโครงสร้างพื้น (สีเทาเข้ม) บริเวณสีเทาสว่างที่เป็นแผ่น และอนุภาคที่กระจายตัวออกมา ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 2 มีปริมาณของอลูมิเนียมใกล้เคียงกัน โดยที่ตำแหน่งที่ 1 มีปริมาณของเหล็กสูงกว่าแต่มีปริมาณของซิลิกอนน้อยกว่า จึงสามารถบ่งชี้ได้ว่าตำแหน่งที่ 1 เป็นสารประกอบเชิงโลหะชนิด Al-Fe ในขณะที่ตำแหน่งที่ 2 มีปริมาณของซิลิกอนสูงถึง 6.93 %wt. เป็นสารประกอบเชิงโลหะชนิด Al-Fe-Si [9] และตำแหน่งที่ 3 เป็นโครงสร้างพื้นอลูมิเนียม เนื่องจากมีปริมาณของอลูมิเนียมสูงถึง 89.60 %wt.

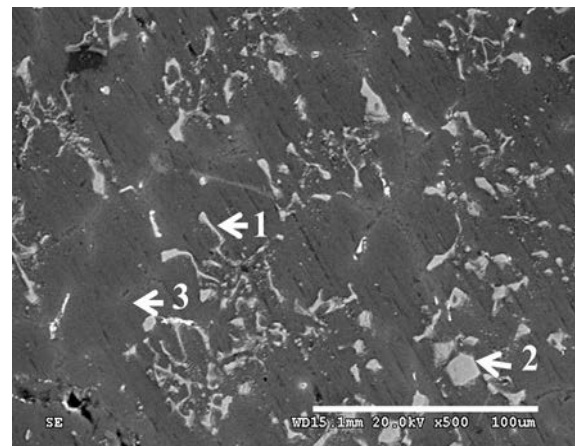


รูปที่ 4 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณ Interface

ตารางที่ 3 องค์ประกอบของธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ตามตำแหน่งในรูปที่ 4

ตำแหน่ง ที่	องค์ประกอบของธาตุ (Wt.%)				
	C	Fe	Al	Si	O
1	3.70	32.98	60.39	2.93	-
2	5.42	24.23	63.82	6.93	-
3	5.43	2.61	89.60	0.57	1.79

โครงสร้างจุลภาคของบริเวณ Coating ในรูปที่ 7 ปรากฏโครงสร้างลักษณะคล้ายเข็ม (Needle-like) และโครงสร้างลักษณะคล้ายหกเหลี่ยม (Hexagonal like) บนโครงสร้างพื้น เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX พบว่าโครงสร้างลักษณะคล้ายเข็มในตำแหน่งที่ 1 และโครงสร้างลักษณะคล้ายหกเหลี่ยมในตำแหน่งที่ 2 มีปริมาณของอลูมิเนียม (62.29 และ 64.18 %wt.) ปริมาณของเหล็ก (26.02 และ 23.39 %wt.) และปริมาณของซิลิกอน (7.32 และ 8.51 %wt.) อยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 2 นั้นถึงจะมีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกันก็เป็นสารประกอบเชิงโลหะชนิด Al-Fe-Si เช่นเดียวกัน [9] โดยที่ลักษณะโครงสร้างคล้ายเข็มมีปริมาณของเหล็กมากกว่าโครงสร้างลักษณะคล้ายหกเหลี่ยม ส่วนตำแหน่งที่ 3 ที่มีปริมาณของอลูมิเนียมสูงถึง 92.84 %wt. แสดงว่าเป็นบริเวณของโครงสร้างพื้นอลูมิเนียม



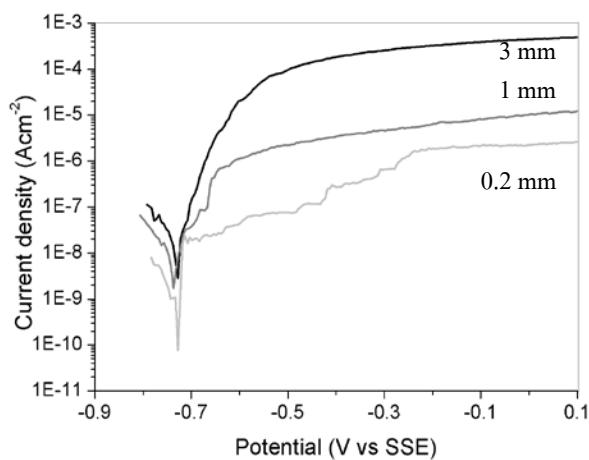
รูปที่ 5 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณ Coating

ตารางที่ 4 องค์ประกอบของธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ตามตำแหน่งในรูปที่ 5

ตำแหน่ง ที่	องค์ประกอบของธาตุ (Wt.%)				
	C	Fe	Al	Si	O
1	4.07	26.02	62.29	7.32	-
2	3.92	23.39	64.18	8.51	-
3	3.63	-	92.84	1.09	2.44

2.2 พฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมีของผิวเคลือบโลหะผสมอลูมิเนียมเมื่อขนาดอิเล็กโทรดต่างกัน

การศึกษาอิทธิพลของขนาดพื้นที่ต่อพฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดต่างกันสามขนาด คือ ขนาด 3 , 1 และ 0.2 มิลลิเมตร รูปที่ 6 แสดงเส้นโค้ง แอโนดิกโพลาไรซ์เซชัน (Anodic polarization curve) ของบริเวณ Coating พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้ากักกร่อนทั้งสามมีค่าประมาณ -730 mV ซึ่งจากผลที่ได้ทำให้สามารถสรุปได้ว่าบริเวณ Coating มีการกระจายตัวของ defect อย่างสม่ำเสมอ ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้ากักกร่อนใกล้เคียงกัน

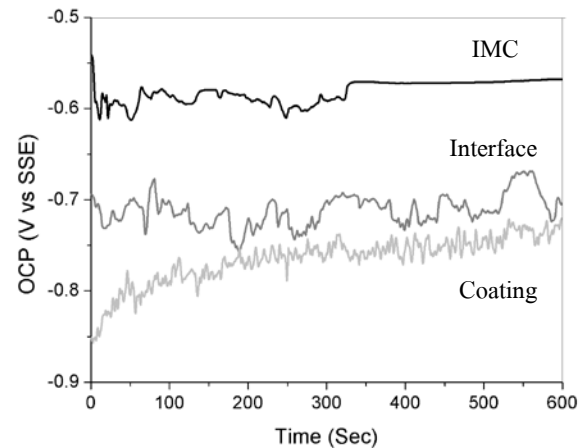


รูปที่ 6 Anodic polarization curve บริเวณ Coating ด้วยขั้วอิเล็กโทรดขนาด 3, 1 และ 0.2 มม.

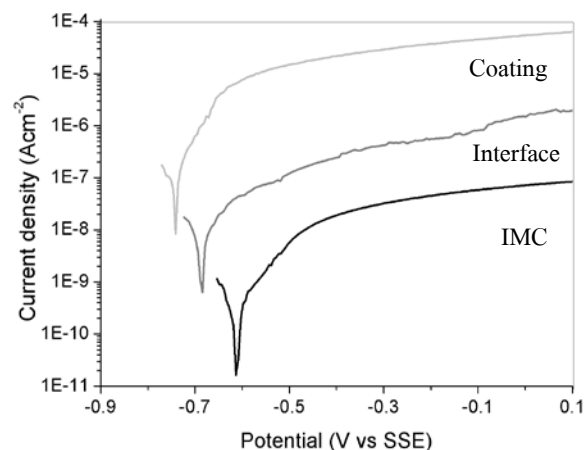
2.3 พฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมีในระดับจุลภาค

การทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (OCP) ของบริเวณ IMC, บริเวณ Interface และบริเวณ Coating ในรูปที่ 7 พบว่าที่บริเวณ IMC มีค่าศักย์ไฟฟ้าที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาค้ำ (noble) กว่าทุกบริเวณ คือ -540 mV และบริเวณ Coating มีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ลดลงมากที่สุด คือ -850 mV ซึ่งแสดงถึงความว่องไว (active) ของการเกิดปฏิกิริยาที่บริเวณนี้มากกว่าบริเวณ Interface และบริเวณ IMC ตามลำดับ นอกจากนี้ความผันผวนที่เกิดขึ้นของศักย์ไฟฟ้าทั้งสามบริเวณเกิดจากความไม่เสถียรของพาสซีฟฟิล์ม (passive film) ซึ่ง Hariyanti และคณะ [10] อธิบายว่าเกิดจากการแข่งขันระหว่างการเกิดการกัดกร่อน (pitting) และ การเกิดฟิล์มเคลือบซ้ำ (re-passivation) ไปจนถึงสิ้นสุดการทดสอบสำหรับบริเวณ interface และบริเวณ

Coating ในขณะที่บริเวณ IMC เริ่มคงที่ในเวลา 330 วินาที เนื่องจากถูกกัดกร่อนไปจนทะลุถึงเนื้อเหล็กแล้วไม่สามารถเกิดฟิล์มเคลือบซ้ำได้อีก เพราะเหล็กจะกลายเป็นตัวที่ถูกกัดกร่อนแทนอลูมิเนียม



รูปที่ 7 ค่า OCP ที่บริเวณ IMC, บริเวณ Interface และบริเวณ Coating



รูปที่ 8 Anodic Polarization Curve ที่บริเวณ IMC, บริเวณ Interface และบริเวณ Coating

รูปที่ 8 แสดงเส้นโค้งแอโนดิกโพลาไรซ์เซชัน (Anodic polarization curve) ที่บริเวณ IMC, บริเวณ Interface และบริเวณ Coating จากข้อมูลพบว่าบริเวณ Coating มีค่าศักย์ไฟฟ้ากักกร่อนเลื่อนไปด้านลบมากที่สุด (-750 mV) ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความสามารถในการป้องกันแบบแคโทดิก (Cathodic protection) [4] ต่อพื้นผิวเหล็กมากกว่าบริเวณ interface และบริเวณ IMC ตามลำดับ นอกจากนี้จากพฤติกรรมของเส้นโค้งแอโนดิกโพลาไรซ์เซชันในรูปที่ 8 ที่แสดงให้เห็นเพียงช่วงคงที่ของกระแสที่แม้จะเพิ่ม

ศักย์ไฟฟ้ามากขึ้น ค่าความหนาแน่นของกระแสก็ยังคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ทำให้สามารถอธิบายลักษณะของการป้องกันได้ว่า เป็นการป้องกันการกัดกร่อนแบบพาสซีฟฟิล์ม (Passive film)

4. สรุปผลการทดลอง

1. บริเวณ IMC ปรากฏสารประกอบเชิงโลหะชนิด Al-Fe ในขณะที่บริเวณ Interface พบทั้งสารประกอบเชิงโลหะชนิด Al-Fe, Al-Fe-Si และบริเวณ Coating พบสารประกอบเชิงโลหะชนิด Al-Fe-Si เท่านั้น

2. บริเวณ Coating มีการกระจายตัวของ defect อย่างสม่ำเสมอ

3. บริเวณ IMC มีความเฉื่อยในการเกิดปฏิกิริยามากที่สุดในขณะที่บริเวณ Coating มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากที่สุด

4. บริเวณ Coating มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนมากที่สุด รองลงมาคือบริเวณ Interface และบริเวณ IMC

5. บริเวณ IMC, บริเวณ Interface และบริเวณ Coating มีความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนแบบพาสซีฟฟิล์ม

5. เอกสารอ้างอิง

[1] Y.Kyo, A.P. Yadav, A. Nishikata, T. Tsuru, "Hydrogen Entry Behavior of Newly Developed Al-Mg-Si Coating by Physical Vapor Deposition," Corrosion Science, Vol.53, pp. 3043 – 3047, July, 2011.

[2] Y.Kyo, A.P. Yadav, A. Nishikata, T. Tsuru, "Hydrogen Entry Behavior of Hot-Dip Al-Mg-Si Coated Steel," Corrosion Science, Vol.53, pp. 3866-3871, July, 2011.

[3] Hariyanti, G.A. El-Mahdy, A.Nishikata, T. Tsuru, "Electrochemical Behavior of Al-Mg-Si PVD Coating," Proceedings of Japan-China join seminar on marine corrosion, pp. 38 – 41, October, 2008.

[4] M.Enokida, Y. Kyo, G.A. El-Mahdy, A.Nishikata, T. Tsuru, "Effect of Mg and Si Content on the Electrochemical Behavior of Al-Mg-Si Alloy," Proceedings of Japan-China join seminar on marine corrosion October, pp. 87 - 92, 2008.

[5] K. Chihara, Y. Kyo, E. Tada, A.Nishikata, T. Tsuru, "Corrosion Behavior and Sacrificial Ability of Hot – Dip Al-Mg-Si Coated Steel," Proceedings of the sixth Japan-China joint seminar on marine corrosion and control, pp. 229 -232, March, 2012.

[6] N. Birbilis and R.G. Buchheit, "Electrochemical Characteristics of Intermetallic Phases in Aluminum Alloys," Journal of Electrochemical Society, Vol.152, No. 4, pp. B140 – B151, March, 2005.

[7] C. Kruehong, G.A. El-Mahdy, A.Nishikata, T. Tsuru, "Electrochemical Behavior of Gradient Polished Surface of Hot Dipped Al-Si Coated Steel," Electrochemistry, Vol. 78, No. 3, pp. 188 – 190, December, 2009.

[8] C. Kruehong, G.A. El-Mahdy, A.Nishikata, T. Tsuru, "Influence of Second Phases on the Electrochemical Behavior of Hot-Dipped Al-Mg-Si Coated Steel," Corrosion Science, Vol. 52, pp. 2379-2386, July, 2010.

[9] N.A. Belov, D.G. Eskin, A.A. Aksenov, "Multicomponent Phase Diagrams: Application for Commercial Aluminum Alloys," Elsevier Science, First edition, 2005.

[10] Hariyanti, G.A. El-Mahdy, A.Nishikata, T. Tsuru, "Effect of Scratching of Coating Surface on the Electrochemical Behavior of PVD Al-Mg-Si Coated Steel," Electrochemistry, Vol. 80, No. 4, pp. 214 – 217, April, 2012.

การศึกษากลยุทธ์ทางธุรกิจของมิเตอร์อัจฉริยะ

The Business Strategy Study of The Smart Meter

ธนพินท์ มังคละภาณุพงศ์

สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

บทความนี้จะเป็นการศึกษาแผนกลยุทธ์ทางธุรกิจของมิเตอร์อัจฉริยะ ที่ใช้ Balanced Scorecard ในการแปลงกลยุทธ์ไปสู่ภาคปฏิบัติ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาตัวชี้วัด (Key Performance Indicator: KPI) และ ปัจจัยหลักแห่งความสำเร็จ (Critical Success Factor: CSF) สำหรับขั้นตอนในการทำ Balanced Scorecard จะเริ่มจากการกำหนดวิสัยทัศน์ และพันธกิจ ของธุรกิจมิเตอร์อัจฉริยะ หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ SWOT Analysis แล้วจับคู่ให้อยู่ในรูปแบบ TOWS Matrix เพื่อหาวัตถุประสงค์และตัวชี้วัดในการจัดทำแผนที่เชิงกลยุทธ์ (Strategy Map) โดยมีกรอบการวัดและประเมินผลของธุรกิจ ผ่านมุมมองการวัดผล 4 ด้าน คือ มุมมองการเรียนรู้และการเติบโต มุมมองกระบวนการภายใน มุมมองด้านลูกค้า และมุมมองด้านการเงิน โดยขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการกำหนดแผนปฏิบัติการ (Action Plan) ของธุรกิจเพื่อกำหนดหน้าที่ความรับผิดชอบ ขั้นตอนในการดำเนินงานและสามารถควบคุมและติดตามผลการดำเนินงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : กลยุทธ์ / การวัดผลดุลยภาพ / ตัวชี้วัด / ปัจจัยหลักแห่งความสำเร็จ

Abstract

This paper is a study of the business strategy study of the smart meter by implementation Balance Scorecard from strategy part into practical part. The objective of a case study is to find Key Performance Indicator (KPI) and Critical Success Factor (CSF). Processes of the study are begun from determination vision and mission of the business of smart meter. Afterwards analyzing SWOT and match into the form of TOWS Matrix to find objectives and Key Performance Indicators for creating strategy mapping. The concept of measurement and evaluation in this case study is through 4 perspectives; Learning and Growth perspective, Internal Process perspective, Customer perspective and Financial perspective. The last step is determination action plan of the business for assigning responsibilities, algorithm, controlling and monitoring efficiency of operation.

Keywords : Strategy / Balanced Scorecard / Key Performance Indicator / Critical Success Factor

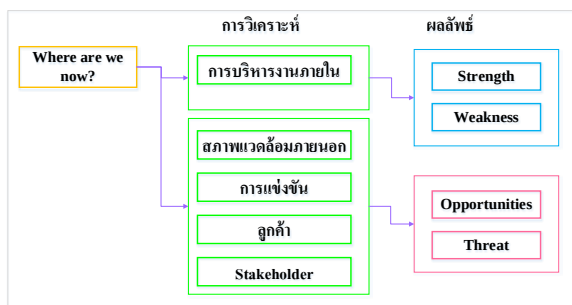
1. บทนำ

บริษัทกรณิศศึกษาเดิมได้ประกอบธุรกิจเกี่ยวกับบริการจำหน่ายไฟฟ้าให้แก่ประชาชน มีความต้องการในการขยายธุรกิจเพื่อที่จะสนับสนุนกับโครงการโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ หรือ Smart Grid จึงเป็นที่มาของบริษัทกรณิศศึกษาในการศึกษาความเป็นไปได้ของธุรกิจมิเตอร์อัจฉริยะแล้วพบว่า มูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนสุทธิ (NPV) เท่ากับ 1,700 ล้านบาท , อัตราผลตอบแทนจากการลงทุน เท่ากับ 43% และระยะเวลาในการคืนทุน (Payback Period) เท่ากับ 3 ปี 2 เดือน ซึ่งบอกได้ว่าเป็นธุรกิจมิเตอร์อัจฉริยะมีความน่าสนใจในการลงทุน จึงเป็นที่มาของการศึกษาแผนกลยุทธ์ของธุรกิจมิเตอร์อัจฉริยะ หาดัชนีชี้วัด (Key Performance Indicator) และ ปัจจัยหลักแห่งความสำเร็จ (Critical Success Factor) เพื่อให้ธุรกิจบรรลุตามวิสัยทัศน์ที่ได้ตั้งไว้

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 SWOT Analysis

เป็นการวิเคราะห์สภาพแวดล้อมภายใน[1]และสภาพแวดล้อมภายนอก[2]ที่มีผลต่อธุรกิจองค์กรในขณะนั้น โดยวิเคราะห์ให้อยู่ในรูปแบบของจุดแข็ง (Strength) จุดอ่อน(Weakness) โอกาส(Opportunities) และอุปสรรค(Threat) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การวิเคราะห์สภาพแวดล้อม

2.2. TOWS Matrix

เป็นการนำปัจจัยทั้ง 4 อย่างของ SWOT (Strength, Weakness, Opportunities และ Threat) มาจับคู่ในรูปของเมทริกซ์ (Matrix)[3] เพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการวางแผนกลยุทธ์ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2

Factor		External Environment	
		Opportunities 1. 2. 3.	Threat 1. 2. 3.
Internal Environment	Strength 1. 2. 3.	SO	ST
	Weakness 1. 2. 3.	WO	WT

รูปที่ 2 รูปแบบการวิเคราะห์ TOWS Matrix

โดยมีรายละเอียดของ TOWS Matrix มีดังต่อไปนี้

1.จุดแข็งและโอกาส (SO) เป็นการนำจุดแข็งของธุรกิจมาสร้างเป็นโอกาส เพื่อให้ธุรกิจสามารถเติบโตต่อไปได้

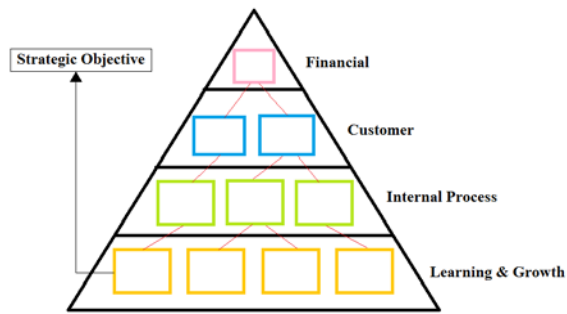
2.จุดแข็งและอุปสรรค (ST) เป็นการนำจุดแข็งของธุรกิจ มาป้องกันเพื่อหลีกเลี่ยงอุปสรรค

3.จุดอ่อนและโอกาส (WO) เป็นการใช้องค์กรที่มีอยู่เพื่อชนะจุดอ่อน

4.จุดอ่อนและอุปสรรค (WT) เป็นการลดจุดอ่อนของธุรกิจเพื่อทำการหลีกเลี่ยงอุปสรรคหรือภัยคุกคามที่จะเกิดขึ้น

2.3 การวัดผลดุลยภาพ (Balance Scorecard)

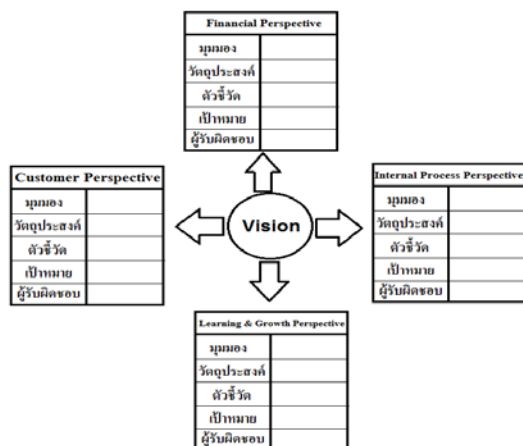
เป็นการแปลงกลยุทธ์ไปสู่ภาคปฏิบัติ [4]โดยผ่านมุมมองการวัดและประเมินผล 4 ด้าน คือ 1. มุมมองด้านการเรียนรู้และเติบโต ตัวชี้วัดด้านนี้เป็นการลงทุนเพื่ออนาคตขององค์กร และเป็นการวัดความสามารถในการเรียนรู้ขององค์กร 2. มุมมองด้านกระบวนการภายใน เป็นตัวชี้วัดด้านกระบวนการทำงานภายในขององค์กร เพื่อสามารถตอบสนองต่อผู้ถือหุ้นและลูกค้าได้ 3. มุมมองด้านลูกค้า เป็นตัวชี้วัดด้านความพึงพอใจของลูกค้าและการรักษาความสัมพันธ์ของลูกค้าได้ยืนยาว 4. มุมมองด้านการเงิน เป็นตัวชี้วัดผลสำเร็จด้านการเงินขององค์กร โดยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ภาพแสดงความสัมพันธ์ของแผนที่เชิงกลยุทธ์

จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าในแต่ละมุมมองจะมีแต่ละวัตถุประสงค์ (Strategic Objective) และในแต่ละวัตถุประสงค์จะมีดัชนีชี้วัด (KPI) โดยรายละเอียดของตัวชี้วัดแต่ละตัวจะมีรายละเอียดดังตารางที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วย 4 ตัวคือ 1. วัตถุประสงค์ของตัวชี้วัด คือสิ่งที่องค์กรต้องการที่จะบรรลุในแต่ละด้าน 2. ตัวชี้วัด คือ ตัวชี้วัดผลการดำเนินงาน 3. เป้าหมาย คือ ค่าของตัวเลขที่องค์กรต้องการให้บรรลุในตัวชี้วัดในแต่ละวัตถุประสงค์ 4. ความรับผิดชอบ คือ หน่วยงานหรือแผนกที่มีส่วนรับผิดชอบเกี่ยวข้องกับการดำเนินงานนั้น

โดยรูปแบบรายละเอียดของตัวชี้วัดแต่ละมุมมอง 4 ด้าน คือ มุมมองด้านการเรียนรู้และเติบโต, มุมมองด้านการกระบวนการภายใน, มุมมองด้านลูกค้าและมุมมองด้านการเงิน สามารถที่จะโยงความสัมพันธ์ของแต่ละวัตถุประสงค์ในแต่ละมุมมองทั้ง 4 มุมมองให้สัมพันธ์กันในรูปของแผนที่เชิงกลยุทธ์ (Strategy Map) ได้ดังรูปที่ 4 โดยเป็นการแปลงวิสัยทัศน์และกลยุทธ์ให้อยู่ในรูปของการวัดและประเมินผลของการปฏิบัติการ ที่มีกรอบในการดำเนินงาน 4 ด้าน



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของแต่ละมุมมอง

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กริช แรงสูงเนิน [5] ศึกษาการวางกลยุทธ์ให้ได้สัมฤทธิ์ผล พบว่า การจัดการเชิงกลยุทธ์ (Balanced Scorecard) สามารถสะท้อนถึงวิสัยทัศน์และกลยุทธ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ, สุเมธ งามกนก [6] นำเสนอวิธีการวางแผนกลยุทธ์ในการจัดทำแผนพัฒนาโรงเรียน เพื่อหาตัวชี้วัดระดับบุคคล โดยการวัดผลแบบคุณภาพ (Balanced Scorecard) ทำให้สามารถสะท้อนผลลัพธ์แต่ละหน่วยงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ, Su Peng, Hu Yaoguang, Liu Yuecheng และ Zhang Ruijun [8] ได้พัฒนาทฤษฎีของตัวชี้วัดแบบสมดุล (Balanced Scorecard) ในการนำไปปฏิบัติงาน งานวิจัยนี้เป็นการค้นพบในการปฏิบัติที่ทำให้เป็นจริงได้โดยการดูความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่จำเป็น 4 ตัว คือ ปัจจัยแห่งความสำเร็จ, ตัวชี้วัดประสิทธิภาพของกลยุทธ์, แผนในการปฏิบัติงาน และกรอบการทำงานของทรัพยากร, Michael L. Werner และ Fuyuan Xu [9] ได้สำรวจตัวชี้วัดขององค์กร เพื่อทำการพัฒนาตัวชี้วัดพบว่าการกำหนดวัตถุประสงค์เป็นสิ่งสำคัญมากที่จะทำให้องค์กรประสบความสำเร็จได้ตามกลยุทธ์และเป้าหมายที่วางไว้, ภาณุมาศ สุวรรณรัตน์ และสมภพ ดลบัลแกว [7] ได้ศึกษาตัวชี้วัดของการบริหาร โครงการก่อสร้างทั่วไป พบว่า การกำหนดเป้าหมายที่ดีจะต้องมีความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ และมีความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ รวมทั้งต้องกำหนดระยะเวลาให้สอดคล้องเป้าหมายของโครงการ และต้องมีการประเมินผลตัวชี้วัดตลอดอายุโครงการด้วย

3. ขั้นตอนการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ศึกษาภาพรวมของธุรกิจของมิเตอร์อัจฉริยะ
2. กำหนดวิสัยทัศน์และพันธกิจของธุรกิจมิเตอร์อัจฉริยะเพื่อกำหนดทิศทางขององค์กรที่จะไปในอนาคต
3. วิเคราะห์สภาพแวดล้อมทั้งภายในและภายนอกของธุรกิจให้อยู่ในรูปของ SWOT
4. นำการวิเคราะห์ SWOT มาจับคู่ให้อยู่ในรูปของ TOWS Matrix เพื่อทำการกำหนดวัตถุประสงค์ขององค์กร
5. นำวัตถุประสงค์ที่ได้มาจัดทำแผนที่เชิงกลยุทธ์เพื่อให้โยงความสัมพันธ์ในแต่ละมุมมอง

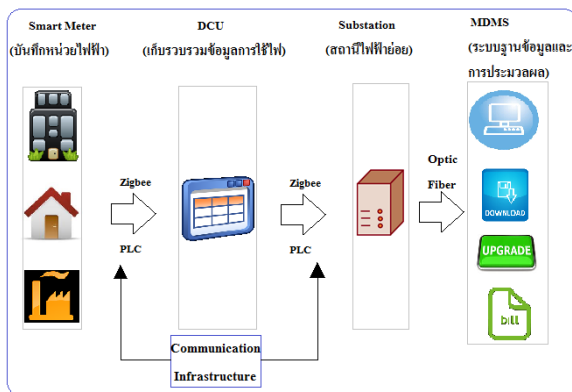
6. กำหนดตัวชี้วัด (Key Performance Indicator: KPI) และเป้าหมายของตัวชี้วัด (Target)

7. กำหนด แผนปฏิบัติการ (Action Plan) สำหรับแต่ละตัวชี้วัด พร้อมบอกปัจจัยหลักแห่งความสำเร็จและกำหนดผู้รับผิดชอบ (Responsibilities) ในตัวชี้วัดนั้น

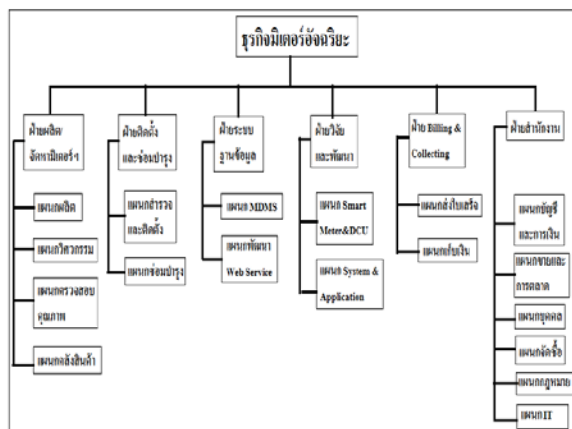
4. ผลการศึกษา

4.1 ภาพรวมของธุรกิจมิเตอร์อัจฉริยะ

ธุรกิจมิเตอร์อัจฉริยะเป็นธุรกิจในการวางระบบมิเตอร์อัจฉริยะ (Advance Metering Infrastructure: AMI) ประเภทการผลิต ติดตั้งและซ่อมบำรุงมิเตอร์อัจฉริยะ พร้อมบริหารจัดการข้อมูล โดยธุรกิจมีองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน คือ 1. มิเตอร์อัจฉริยะและอุปกรณ์เก็บรวบรวมข้อมูล (Data Concentrator Unit: DCU) 2. โครงข่ายการติดต่อสื่อสาร (Communication Infrastructure) 3. ระบบฐานข้อมูลและประมวลผล (Meter Data Management System: MDMS) ดังแสดงในรูปที่ 5 และโครงสร้างองค์กรของธุรกิจ ดังรูปที่ 6



รูปที่ 5 องค์ประกอบของธุรกิจมิเตอร์อัจฉริยะ



รูปที่ 6 โครงสร้างองค์กร

4.2 กำหนดวิสัยทัศน์และพันธกิจ

วิสัยทัศน์ (Vision)

เป็นองค์กรชั้นนำในระดับอาเซียน ในธุรกิจการประกอบ ติดตั้ง และให้บริการของมิเตอร์อัจฉริยะ

ภารกิจ (Mission)

ประกอบ ติดตั้ง และให้บริการมิเตอร์อัจฉริยะทั้งในประเทศและประเทศในแถบอาเซียน เพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้า ทั้งในด้านการให้บริการและคุณภาพ โดยมีการพัฒนาองค์กรในด้านบุคลากรและเทคโนโลยี เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพตลาด รวมทั้งมีความรับผิดชอบต่อสังคมและสิ่งแวดล้อม

4.3 การวิเคราะห์สภาพแวดล้อมของธุรกิจ

การประเมินสภาพแวดล้อมของธุรกิจข้างต้นในรูป SWOT Analysis ได้ดังตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์สภาพแวดล้อมของธุรกิจ

จุดแข็ง (Strength)	โอกาส (Opportunities)
S1. ธุรกิจมีความน่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับในระดับประเทศ S2. มีทีมงานที่แข็งแกร่งเป็นระบบ S3. บริษัทที่ร่วมทุนเป็นบริษัทที่มีชื่อเสียงและมีความเชี่ยวชาญเฉพาะด้าน S4. มีเครือข่ายในการให้บริการทั่วภูมิภาค	O1. ธุรกิจมิเตอร์อัจฉริยะยังไม่มีคู่แข่งในประเทศ O2. ปริมาณความต้องการมิเตอร์มีปริมาณสูงมาก O3. ประเทศในแถบอาเซียนเริ่มมีการวางโครงข่ายอัจฉริยะมาใช้ในการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าระหว่างประเทศ O4. คู่แข่งขันที่จะเข้ามาในธุรกิจนี้คือ เพราะมีการลงทุนสูงและต้องมีความรู้เกี่ยวกับมิเตอร์อัจฉริยะ (Know How) O5. โอกาสที่ไร้เงินที่ทดแทนเป็นไปได้อย่างรวดเร็วเพราะระบบขอค่าไฟฟ้าเฉพาะในการวางระบบติดตั้ง
จุดอ่อน (Weakness)	อุปสรรค (Threat)
W1. ในช่วงแรกพนักงานมีทักษะในการประกอบมิเตอร์อัจฉริยะ W2. การดำเนินงานในช่วงแรก อาจไม่สอดคล้องตามแผนที่ตั้งไว้ W3. บุคลากรและพนักงานจากบริษัทมีศึกษาไม่ยอมย้ายมาอยู่ธุรกิจมิเตอร์อัจฉริยะ	T1. คู่แข่งจากต่างประเทศมีราคาถูกมาก T2. การแข่งขันรุนแรง เนื่องจากโรงงานตั้งอยู่ในนิคมอุตสาหกรรม T3. ธุรกิจต้องพึ่งพาผู้ขายเข้าเป็นหลัก ทำให้เป็นอุปสรรคด้านราคา T4. การเมืองในประเทศยังไม่มีความแน่นอน

4.4 การกำหนดวัตถุประสงค์

การกำหนดแนวทาง วัตถุประสงค์ของธุรกิจโดยจากความสัมพันธ์ของ SWOT ให้อยู่ในรูป TOWS Matrix ดังตารางที่ 2 ดังนี้

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ TOWS Matrix ของธุรกิจ

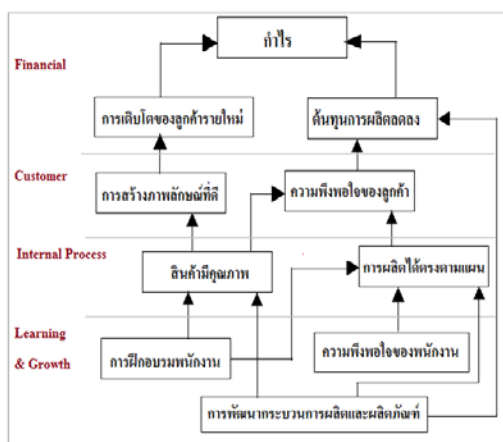
External Environment	Opportunities	Threat
Internal Environment		
Strength	<u>แนวทาง SO</u> - การสร้างภาพลักษณ์ที่ดีให้แก่องค์กร (S1O1) - การขยายการลงทุน (S1O1O3)	<u>แนวทาง ST</u> - การตั้งรางวัลให้กับพนักงานที่มีผลงานดี (S1T1) - การสร้างนวัตกรรม, พัฒนากระบวนการผลิต (S3T3)
Weakness	<u>แนวทาง WO</u> - การวางแผนและควบคุมติดตามการทำงาน (W2O2O3O4) - การควบคุมคุณภาพสินค้าก่อนที่จะนำไปเก็บในคลัง (W1O2)	<u>แนวทาง WT</u> - การจัดตารางเก็บของบรรมพนักงาน (W1T3) - สร้างสวัสดิการที่ดีให้แก่พนักงาน (W3T1T2)

4.5 จัดทำแผนที่เชิงกลยุทธ์

จากที่ได้กำหนดวัตถุประสงค์ข้างต้นแล้วเราสามารถ
จัดวัตถุประสงค์ได้ในแต่ละมุมมองดังตารางที่ 3 และ
จัดทำเป็นแผนที่เชิงกลยุทธ์ เพื่อใช้เป็นแนวทางที่จะทำให้อ
องค์กรสามารถบรรลุตามวิสัยทัศน์ที่ตั้งไว้ ซึ่งแสดงได้
ดังรูปที่ 7

ตารางที่ 3 การกำหนดวัตถุประสงค์ในแต่ละมุมมอง

มุมมอง (Perspective)	วัตถุประสงค์ (Objective)
1. การเรียนรู้และเติบโต	- การฝึกอบรมพนักงาน - ความพึงพอใจของพนักงาน - การพัฒนากระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์
2. ด้านกระบวนการภายใน	- การผลิตได้ตรงตามแผน - สินค้ามีคุณภาพ
3. ด้านลูกค้า	- ความพึงพอใจของลูกค้า - การสร้างภาพลักษณ์ที่ดี
4. ด้านการเงิน	- ต้นทุนการผลิตลดลง - การเติบโตของลูกค้ารายใหม่



รูปที่ 7 แผนที่เชิงกลยุทธ์ของธุรกิจไมเตอร์อัจฉริยะ

4.6 กำหนดตัวชี้วัดและเป้าหมาย

หลังจากที่กำหนดวัตถุประสงค์แล้ว จะทำการกำหนดตัวชี้วัด และเป้าหมายในแต่ละมุมมอง เพื่อให้องค์กรสามารถวัดผลการดำเนินงาน และบรรลุผลได้ตามวิสัยทัศน์ที่ตั้งไว้ โดยสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การกำหนดตัวชี้วัดของธุรกิจ

มุมมอง	ตัวชี้วัด	Baseline	เป้าหมาย	กรอบการดำเนินงาน	แผนกที่รับผิดชอบ
ด้านการเงิน	รายได้ในส่วนของลูกค้ารายใหม่	-	30%	1 ปี	แผนกการตลาดและการขาย
	ต้นทุนการผลิต	-	ลดลง 1%	6 เดือน	แผนกซัพพลาย, แผนกบุคคล, แผนกวิศวกรรม
ด้านลูกค้า	ความพึงพอใจของลูกค้า	80%	> 90%	6 เดือน	แผนกคุณภาพ
	จำนวนข้อร้องเรียน	7%	< 5%	1 ปี	แผนกคุณภาพ
	การคืนสินค้า	0%	< 5%	1 ปี	แผนกผลิต, แผนกวิศวกรรม
ด้านกระบวนการภายใน	อัตราของเสีย	7%	< 5%	1 เดือน	แผนกผลิต, แผนกวิศวกรรม
	การผลิตได้ตามแผน	90%	> 95%	1 เดือน	แผนกบุคคล
ด้านการเรียนรู้และเติบโต	การลาออกของพนักงาน	14%	< 5%	6 เดือน	แผนกบุคคล
	จำนวนชั่วโมงการฝึกอบรม	15 ชม./	30 ชม./	1 ปี	แผนกบุคคล
	จำนวนพนักงานที่ผ่านเกณฑ์ประเมิน	78%	> 80%	1 ปี	แผนกบุคคล
	จำนวนงานวิจัยที่เข้าჭักธุรกิจได้จริง	70%	> 80%	1 ปี	แผนก Smart Meter และ DCU, แผนกวิศวกรรม

4.7 กำหนดแผนปฏิบัติการและปัจจัยหลักแห่งความสำเร็จ

แผนปฏิบัติการและปัจจัยหลักแห่งความสำเร็จของ
ตัวชี้วัดในแต่ละมุมมอง มีรายละเอียดดังตารางที่ 5 ดังนี้

ตารางที่ 5 การกำหนดปัจจัยหลักแห่งความสำเร็จและแผนปฏิบัติการ

มุมมอง	ตัวชี้วัด	ปัจจัยหลักที่วัดความสำเร็จ	แผนปฏิบัติการ
ด้านการเงิน	รายได้ในส่วนของผู้ด้อยรายใหม่	จำนวนผู้ด้อยรายใหม่ที่เกิดขึ้น	ประชาสัมพันธ์ให้ครัวเรือนที่เข้าครัวเรือนใหม่, สนับสนุนสิทธิการเข้าถึงบริการสุขภาพ, ประโยชน์ต่อสังคมและช่วยเหลือขององค์กร, ผู้ด้อยรายใหม่ที่การเจรจาธุรกิจเป็นไปอย่างราบรื่น
	ต้นทุนการผลิต	ต้นทุนการผลิต	หาซื้อวัตถุดิบราคาต่ำที่มีประสิทธิภาพ, ศึกษาตลาดที่มีแนวโน้ม, เชิญชวนผู้ให้บริการมาลงทุน, พัฒนาทางด้านกระบวนการผลิต
ด้านลูกค้า	ความพึงพอใจของลูกค้า	คะแนนการประเมิน	หาข้อมูลที่มีต่อความพึงพอใจของลูกค้า, ศึกษาข้อมูลลูกค้า, นำข้อเสนอแนะที่ได้จากลูกค้ามาทำการปรับปรุงต่อไป
	จำนวนข้อร้องเรียน	จำนวนข้อร้องเรียน	นำข้อร้องเรียนมาหาสาเหตุ เพื่อแก้ไขต่อไป
	การคืนสินค้า	จำนวนสินค้าที่ลูกค้าคืน	หาวิธีปรับปรุงสินค้า, ศึกษาข้อบกพร่องที่ลูกค้าของสินค้าที่เพิ่งออกตัวอย่างแก้ไขข้อบกพร่อง
ด้านการตลาดและการขาย	อัตราการเติบโต	จำนวนของเสียที่เกิดจากการผลิต	ตรวจสอบข้อผิดพลาดและอุปสรรคทุกครั้งก่อนที่จะเริ่มการผลิต, จัดให้มีหัวหน้างานดูแลกระบวนการทำงานของพนักงานในองค์กร
	การผลิตได้ตามแผน	จำนวนผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้	จัดให้มีการเตรียมความพร้อมในการผลิต, การทำงานของพนักงาน, จัดให้มีหัวหน้างานที่คอยชี้แจงการติดตามผลของงาน, การทำงานของพนักงาน
ด้านการวิจัยและนวัตกรรม	การทดลองของพนักงาน	จำนวนพนักงานที่ลาออก	สร้างบรรยากาศ และสภาพแวดล้อมที่ปลอดภัยในการทำงานต่อพนักงาน, การอำนวยความสะดวกด้านการเดินทาง, ส่งเสริมด้านการดูแลสุขภาพประจำปีของพนักงาน
	การฝึกอบรมพนักงาน	จำนวนชั่วโมงการฝึกอบรม	จัดการฝึกอบรมเป็นแบบ, วิทยากรที่มีความเชี่ยวชาญถ่ายทอดความรู้ให้กับพนักงาน

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการศึกษากลยุทธ์ของธุรกิจมีเตอร์อัจฉริยะ โดยผ่านกรอบการวัดและประเมินผล 4 มุมมอง สามารถสรุปแผนในการปฏิบัติงานได้ดังนี้ คือ

1. มุมมองด้านการเงิน มีตัวชี้วัด 2 ตัว คือ รายได้ในส่วนของลูกค้ารายใหม่ และต้นทุนในการผลิตมีเตอร์อัจฉริยะ
2. มุมมองด้านลูกค้า มีตัวชี้วัด 3 ตัว คือ แบบสำรวจความพึงพอใจของลูกค้า, จำนวนข้อร้องเรียน และอัตราการส่งคืนสินค้า
3. มุมมองด้านกระบวนการภายใน มีตัวชี้วัด 3 ตัวคือ อัตราของเสีย และจำนวนมีเตอร์อัจฉริยะที่ผลิตได้ตามแผน
4. มุมมองด้านการเรียนรู้และเติบโต มีตัวชี้วัด 3 ตัว คือ การลาออกของพนักงาน, การฝึกอบรมพนักงาน และการผ่านเกณฑ์ประเมินจากการฝึกอบรม

จากการศึกษากลยุทธ์ของธุรกิจมีเตอร์อัจฉริยะเบื้องต้นพบว่า สามารถนำไปใช้กับธุรกิจได้จริง เนื่องจากการวางกลยุทธ์ข้างต้นนั้น สามารถที่จะวัดผลการดำเนินงานของธุรกิจได้ทั้งหมดขององค์กร โดยดูจากตัวชี้วัดและเป้าหมาย อีกทั้งยังให้ทราบถึงประสิทธิภาพการทำงานและวิธีการปรับปรุงแก้ไขในด้านต่างๆ ได้อย่างรวดเร็ว

5.2 ข้อเสนอแนะ

การวัดผลคุณภาพในช่วงแรกจะต้องมีการติดตามการทำงานอย่างใกล้ชิด โดยดูจากการวัดผลของการปฏิบัติงานของมุมมองแต่ละด้านว่าสามารถนำไปใช้ได้ อย่างมีประสิทธิภาพได้มากน้อยเพียงใด เพื่อให้องค์กรได้มีการพัฒนาและปรับปรุงให้สอดคล้องกับสถานการณ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งตัวชี้วัดจะบรรลุได้ตามเป้าหมายจะต้องอาศัยความร่วมมือของทุกคนในองค์กร

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Achara Chandrachai, Guide strategic planning and preparation of BSC (Balanced Scorecard). 12 ed.: Printery of Chulalongkorn University 2010.
- [2] Arthur a. Thompson, Margaret A. Peteraf, John E. Gamble, and A. J. Strickland III, Crafting and Executing Strategy Concept and Cases, 18 ed. McGraw-Hill/Irwin, 2012.
- [3] Ekkamon Iamsri. (25 April 2013). Using the TOWS matrix Available: <http://eiamsri.wordpress.com/2011/06/07/%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%83%E0%B8%8A%E0%B9%89-tows-matrix/>
- [4] Surasit Wachirakhajorn, Balanced Scorecard: Concepts and Pactices: Thanaeseun (1999) company LTD., 2010.
- [5] Gris Rangsungrern, "Using the BSC strategy to succeed. ," Journal of Academic Services Center, vol. 12, pp. 39-45, 2004.
- [6] Sumate Nghanok, "Strategic Planning: Key performance Indicators at the Personal Level," Journal of Education, vol. 22, pp. 1-12, 2011
- [7] Panumart Suwannarat and Sompob Talubkeaw, "Project Monitoring Indicators to Achieve the Construction Project Objectives," Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok, vol. 19, pp. 266-273, 2009.
- [8] Su Peng, Hu Yaoguang, Liu Yuecheng, and Zhang Ruijun, "Study on Enterprise Strategy Implementation Framework based on Balance Scorecard " vol. 46, pp. 869-873, 2009.
- [9] Michael L. Werner and Fuyuan Xu, "Successfully Executing Strategy by Implementing the Balanced Scorecard," vol. 48, pp. 1-5, 2011.

การประเมินสมรรถนะทางด้านเทคนิคและการลงทุนติดตั้ง เซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาخانชาลารถไฟฟ้าบีทีเอส

Assessment of the Technical Performance and Investment Economics of the Photovoltaic Rooftop of the BTS Sky Train Station

ประพิศาริ ธนารักษ์* ฉัตรชัย ศิริสัมพันธ์

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: prapitat@nu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประเมินสมรรถนะทางด้านเทคนิคและความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาของสถานชารถไฟฟ้าบีทีเอส การประเมินสมรรถนะโดยใช้โปรแกรม PVSYST พบว่า สมรรถนะของระบบ มีค่าเท่ากับร้อยละ 77.2 พลังงานที่ผลิตได้ต่อกำลังการติดตั้ง 1,380 kWh/kWp การสูญเสียในระบบเซลล์แสงอาทิตย์และการสูญเสียในระบบมีค่าเท่ากับ 0.78 kWh/kWp.d และ 0.34 kWh/kWp.d ตามลำดับ เงินลงทุนเริ่มต้นของโครงการ 9,444,000 บาท นโยบายรับซื้อไฟฟ้า (Feed in Tariff: FIT) 6.55 บาท/kWh ระยะเวลาโครงการ 25 ปี และอัตราคิดลดร้อยละ 6.875 ต่อปี โดยใช้หลักเกณฑ์ในการตัดสินใจ ประกอบด้วย มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (B/C) ระยะเวลาคืนทุนแบบปรับค่าเวลา (DPB) และต้นทุนต่อหน่วย (COE) พบว่า NPV เท่ากับ 3,966,819.10 บาท IRR เท่ากับร้อยละ 4.46 B/C เท่ากับ 1.34 DPB เท่ากับ 8.78 ปี และ COE 2.39 บาท/kWh แต่เนื่องจาก IRR น้อยกว่าค่า MLR จึงเกิดความไม่คุ้มค่าแก่การลงทุน การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการสำหรับนโยบายรับซื้อไฟฟ้า พบว่า หากน้อยกว่า 5 บาท/kWh ค่า NPV และ IRR จะติดลบ ส่วนต้นทุนของระบบ 50 บาท/W โครงการจะมีค่า NPV, IRR, B/C DPB และ COE ที่ผ่านเกณฑ์ยอมรับโครงการได้ โดยต้นทุนไม่ควรเกิน 80 บาท/W หากพลังงานที่ผลิตได้อยู่ในช่วง 1,550-1,600 kWh/kWp จะสามารถยอมรับโครงการได้ ส่วนอัตราคิดลด ไม่ควรเกินร้อยละ 10.875 ต่อปี

คำสำคัญ : เซลล์แสงอาทิตย์ สมรรถนะ เศรษฐศาสตร์ การลงทุน การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา

Abstract

This paper presents assessment of the technical performance assessment and investment economics of the photovoltaic rooftop of the BTS Sky Train Station. The performance assessment using the PVSYST software, found that the performance ratio of the system is 77.2 while the specific energy is 1,380 kWh/kWp. The capture loss and System loss are 0.78 kWh/kWp d and 0.34 kWh/kWp d, respectively. The initial investment cost was 9,444,000 Baht with an electricity purchasing price (Feed in

Tariff: FIT) of 6.55 Baht/kWh over the 25 year projected life time and discount rate at 6.875%, which were the criteria for the decision making to constructed the roof. The investment economics were evaluated using measures of Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit-Cost ratio (B/C), Discount payback period (DPB) and Cost of Energy (COE). The results show NPV of 3,966,819.10 Baht, IRR 4.46%, B/C 1.34, DPB 8.78 years and COE 2.39 Baht/kWh. However, the IRR was less than the MLR, indicating that the project was not worth the investment. The sensitivity analysis of the project for FIT found that less than 5 baht/kWh, the NPV and IRR were negative. With a system cost of 50 Baht/W, the project would be economically viable, or a positive NPV, IRR, B/C DPB and COE the system cost should not exceed 80 Baht/W. The project also would be feasible if the specific energy production was in the range 1,550-1,600 kWh/kWp with the discount rate not exceeding 10.875%.

Keywords: Photovoltaic, Performance, Economic, Investment, Photovoltaic Rooftop

1.บทนำ

โครงข่ายรถไฟฟ้าทั้งที่ดำเนินการเปิดให้บริการและกำลังก่อสร้างในปัจจุบัน รวมถึงแผนการก่อสร้างในอนาคตนอกจากการเอื้ออำนวยความสะดวกสบายในการเดินทางภายใต้ปัญหาสภาพจราจรในเขตเมืองและช่วยลดระยะเวลาในการเดินทางแล้ว เมื่อพิจารณาอย่างละเอียดพบว่าภายใต้โครงการดังกล่าวหากจะพัฒนาให้เกิดการใช้ประโยชน์สูงสุดจากโครงการ สามารถใช้พื้นที่บนหลังคาชานชาลาติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อผลิตไฟฟ้า ลดการใช้พลังงานจากแหล่งพลังงานหลัก นอกจากสร้างภาพลักษณ์จากการดำเนินการแล้ว ยังช่วยสนับสนุนการแสวงหาแหล่งพลังงานสะอาดจากพลังงานทดแทนภายใต้สถานการณ์ปัจจุบันที่ประเทศประสบกับปัญหาด้านพลังงานและการนำเข้าพลังงาน เป็นการส่งเสริมนโยบายของรัฐบาลในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนภายใต้แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (พ.ศ.2555-2564) [1]

ในการศึกษาครั้งนี้นำเสนอข้อมูลการศึกษาสมรรถนะทางเทคนิคและการลงทุนติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาชานชาลารถไฟฟ้าบีทีเอส โดยใช้หลังคาชานชาลาจอร์เจียทีเอสโฮมอิตี ระยะเวลาวิเคราะห์โครงการ 25 ปี โดยการประเมินสมรรถนะใช้โปรแกรม PVSYST การวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทน (Cost-

Benefit analysis) จะพิจารณาทางการเงิน ผลการศึกษาจะมุ่งนำไปสู่ข้อเสนอแนะในการลงทุนใช้ประโยชน์พื้นที่หลังคาเพื่อการผลิตไฟฟ้า

2.แนวคิดการวิเคราะห์ทางการลงทุนของโครงการ

ขั้นตอนในการวิเคราะห์โครงการประกอบด้วย การกำหนดขอบเขตและวัตถุประสงค์ของโครงการที่จะวิเคราะห์ให้ชัดเจน ระบุและวัดต้นทุนและผลประโยชน์ของโครงการในแต่ละปี ประเมินค่าต้นทุนและผลประโยชน์ของโครงการเป็นตัวเลข เปรียบเทียบต้นทุนผลประโยชน์ของโครงการ วิเคราะห์ความอ่อนไหว และสรุปผลการวิเคราะห์

ข้อกำหนดในการวิเคราะห์ทางการลงทุน ระยะเวลาโครงการ 25 ปี การพิจารณาค่าใช้จ่ายและรายรับของโครงการจะอ้างอิงราคาตลาดและพิจารณาเฉพาะค่าใช้จ่ายและรายรับทางตรงของโครงการเท่านั้น การเลือกอัตราคิดลดของโครงการจะยึดหลักค่าเสียโอกาสของเงินทุนที่ร้อยละ 6.875 อ้างอิงจากอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ MLR ของธนาคารกรุงไทย ณ วันที่ 3 ธันวาคม 2556 โดยหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจสำหรับการศึกษานี้ประกอบด้วยค่าดัชนี ดังต่อไปนี้

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) เป็นการคำนวณมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์สุทธิของโครงการ หากค่า NPV มากกว่าศูนย์ หมายถึงโครงการนั้นคุ้มค่าทางเศรษฐกิจและอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ถ้าค่าน้อยกว่าศูนย์ โครงการนั้นก็ไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คำนวณค่า NPV ได้จากสมการที่ 1

$$NPV = \sum_{n=0}^N \frac{B_n - C_n}{(1+i)^n} \quad (1)$$

โดยที่ B_n คือ มูลค่าของผลประโยชน์จากโครงการที่เกิดขึ้นในปีที่ n , C_n คือ มูลค่าของต้นทุนจากโครงการที่เกิดขึ้นในปีที่ n , N คือ ระยะเวลาโครงการหรือปีที่สิ้นสุดอายุของโครงการ และ i คือ อัตราคิดลด (discount rate)

อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return : IRR) อัตราผลตอบแทนการลงทุน หรืออัตราคิดลดสูงสุดที่โครงการจะสามารถจ่ายให้กับทรัพยากรต่างๆ ที่เมื่อจ่ายแล้ว โครงการนั้นจะยังคงมีผลประโยชน์เท่ากับต้นทุนพอดี การตัดสินใจที่จะยอมรับโครงการให้พิจารณาจากค่า IRR เปรียบเทียบกับอัตราคิดลด ถ้าสูงกว่าจะอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ เพราะอัตราผลตอบแทนโครงการสูงกว่าอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำที่สังคมยอมรับได้ ย่อมได้รับความพอใจเพิ่มขึ้น ภายใต้หลักคิดนี้ IRR จึงเป็นการหาอัตราคิดลดที่จะมีผลให้มูลค่าปัจจุบันของต้นทุนเท่ากับมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์ ดังสมการที่ 2

$$NPV = \sum_{n=1}^N \frac{B_n - C_n}{(1+i)^n} = 0 \quad (2)$$

โดยที่ i คือ อัตราผลตอบแทนภายใน

อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (Benefit-Cost ratio, B/C) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์ต่อมูลค่าปัจจุบันของต้นทุนทั้งหมด โครงการที่ยอมรับได้ตามหลักเกณฑ์นี้ คือ โครงการที่มีมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์มากกว่ามูลค่าปัจจุบันของต้นทุน นั่นคือ B/C มีค่ามากกว่าหนึ่ง ค่า B/C คำนวณได้จากสมการที่ 3

$$\frac{B}{C} \text{ Ratio} = \left\{ \sum_{n=1}^N \frac{B_n}{(1+i)^n} \right\} \div \left\{ \sum_{n=0}^N \frac{C_n}{(1+i)^n} \right\} \quad (3)$$

ระยะเวลาคืนทุนแบบปรับค่าเวลา (Discounted Payback Period: DPB) คือ ระยะเวลาที่ผลตอบแทนสุทธิสะสมตั้งแต่เริ่มดำเนินการมีค่าเท่ากับมูลค่าในการลงทุนทั้งหมด โครงการที่ยอมรับได้จะมี DPB น้อยกว่าระยะเวลาโครงการ

ต้นทุนต่อหน่วย (Cost of Energy: COE) คือ ต้นทุนของโครงการทั้งหมดต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ของโครงการ โดยใช้เปรียบเทียบกับค่าไฟฟ้าที่ต้องเชื่อมกับสายส่งของการไฟฟ้า

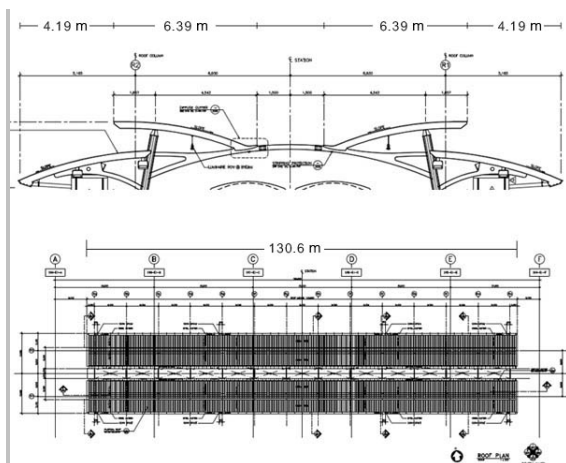
การศึกษาในครั้งนี้ยังรวมถึงการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการเพื่อดูทิศทางแนวโน้มของโครงการเมื่อปัจจัยที่ใช้ในการวิเคราะห์เปลี่ยนแปลง เช่น นโยบาย FIT ต้นทุนระบบต่อวัตต์ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ อัตราคิดลดของโครงการซึ่งอาจส่งผลให้ผลการวิเคราะห์เปลี่ยนแปลงได้

3.วิธีการวิเคราะห์และข้อมูล

ในส่วนนี้ให้รายละเอียดเกี่ยวกับโครงการที่วิเคราะห์ แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ สมรรถนะทางด้านเทคนิคของโครงการ ต้นทุนและผลประโยชน์ของโครงการ

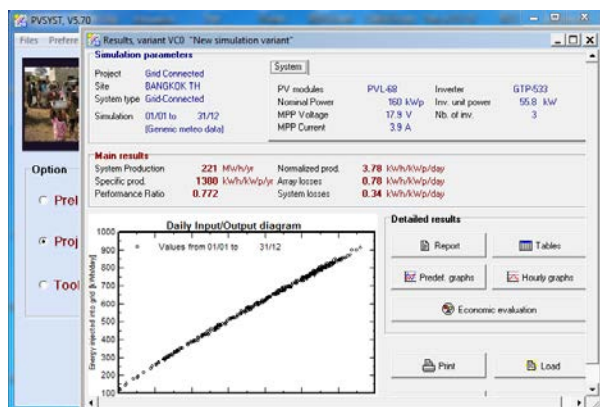
3.1 สมรรถนะทางด้านเทคนิคของโครงการ

จำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะใช้ติดตั้งในพื้นที่กรณีศึกษา ใช้ข้อมูลพื้นที่ขานชาลาจอร์เจียที่เอสหมอซิด คำนวณเทียบกับขนาดพื้นที่ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เลือกใช้ต่อ 1 โมดูล (ดังภาพที่ 1) เป็นพื้นที่ของหลังคาขานชาลาที่ทำการศึกษามีพื้นที่ 2,636.75 ตารางเมตรจากข้อมูลพื้นที่ของหลังคาขานชาลาตามภาพที่ 1 สามารถคำนวณหาจำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุดที่ใช้ในการติดตั้งได้เท่ากับ ประมาณ 2,350 แผง โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนขนาด 68 วัตต์ ซึ่งใช้พื้นที่ติดตั้ง 1.12 ตารางเมตรต่อแผง เป็นขนาดติดตั้ง 159.80 หรือ 160 kWp



ภาพที่ 1 พื้นที่หลังคาخانชาลาปีที่เอส

โดยใช้โปรแกรม PVSYS Version 5.70 ซึ่งเป็นลิขสิทธิ์ของวิทยาลัยพลังงานทดแทน หมายเลขลูกค้าที่ 30051902 นั้นถูกนำมาใช้ในการประเมินสมรรถนะทางเทคนิคของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (ดังภาพที่ 2)



ภาพที่ 2 โปรแกรม PVSYS Version 5.70

จากการประเมินด้วยโปรแกรม PVSYS พบว่าระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตพลังงานรายปี (Yearly Produced Energy) ได้เท่ากับ 220.7 MWh/year พลังงานที่ผลิตได้ต่อกำลังการติดตั้ง (Specific Energy) เท่ากับ 1,380 kWh/kWp สมรรถนะของระบบ (Performance Ratio) มีค่าเท่ากับร้อยละ 77.2 การสูญเสียในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (Capture Loss) และการสูญเสีย

ในระบบ (System Loss) มีค่าเท่ากับ 0.78 kWh/kWp.d และ 0.34 kWh/kWp.d ตามลำดับ (ดังภาพที่ 3)

3.2 ต้นทุนและผลประโยชน์ของโครงการ

เงินลงทุนของโครงการจะใช้ราคาอ้างอิงจากท้องตลาด ณ วันที่ 3 ธันวาคม 2556 ประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า อุปกรณ์อื่นๆ ตามมาตรฐานการติดตั้ง เช่น ตู้เบรกเกอร์ สวิตช์ มิเตอร์ไฟฟ้า ระบบสายดิน และค่าติดตั้งประมาณ 58.40 บาทต่อวัตต์ ค่าใช้จ่ายในการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้า การตรวจสอบระบบ อุปกรณ์และค่าใช้จ่ายอื่นๆที่เกี่ยวข้องของการไฟฟ้านครหลวง 100,000 บาท ส่วนค่าใช้จ่ายรายปีของโครงการ ประกอบด้วย ค่าดำเนินการและบำรุงรักษารายปี 0.6% ของเงินลงทุนเริ่มต้น [1] ค่าเปลี่ยนเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า 1,600,000 บาท ในปีที่ 8 และ 16

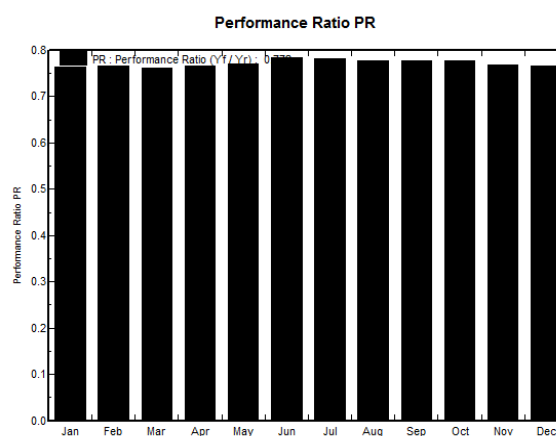
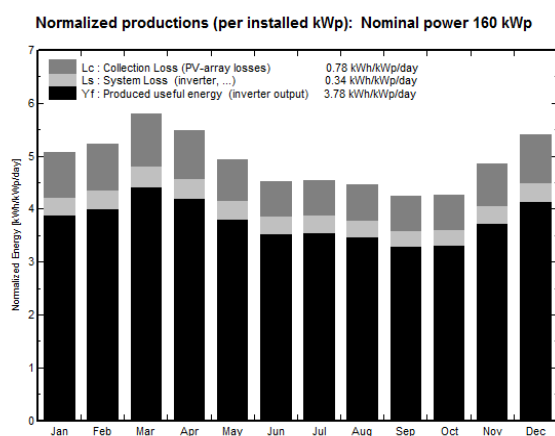
ผลประโยชน์ของโครงการคิดจากการขายไฟฟ้า เนื่องจากปัจจุบันรัฐบาลมีนโยบายปรับเปลี่ยนการรับซื้อไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานทดแทนแต่ผู้รับซื้อไฟฟ้าที่ติดตั้งบนหลังคาخانชาลาโรงไฟฟ้ายังไม่มีประกาศอย่างเป็นทางการ มีเพียงการรับซื้อขายไฟฟ้าที่ติดตั้งบนหลังคา กลุ่มบ้านที่อยู่อาศัย กำลังการผลิตติดตั้งไม่เกิน 10 kWp (FIT 6.96 บาท/kWh) กลุ่มอาคารธุรกิจขนาดเล็กที่กำลังการผลิตติดตั้งมากกว่า 10-250 kWp (FIT 6.55 บาท/kWh) และอาคารธุรกิจขนาดกลาง-ใหญ่/โรงงาน กำลังการผลิตติดตั้งมากกว่า 250-1,000 kWp (FIT 6.16 บาท/kWh) ดังนั้นการศึกษานี้จะใช้แนวทางของนโยบายใหม่ที่ประกาศใช้โดยอัตรารับซื้อไฟฟ้าจะเป็นตัวเลขประมาณการ กำหนดอยู่ที่ 6.55 บาท/kWh ระยะเวลา 25 ปี โดยจะคำนวณอัตรารายได้รวมของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ร้อยละ 1 ต่อปี

Main simulation results

System Production

Produced Energy
Performance Ratio PR**220.7 MWh/year**
77.2 %

Specific prod. 1380 kWh/kWp/year



ภาพที่ 3 ผลการประเมินสมรรถนะทางด้านเทคนิคของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม PVSYS

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการกำหนดการวิเคราะห์ความอ่อนไหว 4 กรณีดังต่อไปนี้

- 1) กรณีการรับซื้อของนโยบาย FIT เปลี่ยนแปลง
- 2) กรณีต้นทุนระบบโดยรวมเปลี่ยนแปลง
- 3) กรณีพลังงานที่ผลิตได้ต่อปีเปลี่ยนแปลง
- 4) กรณีอัตราคิดลดเปลี่ยนแปลง

4.ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ผลการประเมินสมรรถนะของระบบ มีค่าเท่ากับร้อยละ 77.2 และพลังงานที่ผลิตได้ต่อกำลังการติดตั้งเท่ากับ 1,380 kWh/kWp ผลการวิเคราะห์ด้านการลงทุน ณ อัตราดอกเบี้ยร้อยละ 6.875 ต้นทุนระบบ 58.40 บาท/W พบว่า โครงการมีค่า NPV เป็นบวก ค่า B/C มากกว่า 1 DPB อยู่ในช่วงอายุของโครงการ ต้นทุนต่อหน่วยไฟฟ้ามีค่า 2.39 บาท/kWh แต่ค่า IRR น้อยกว่าค่า MLR จึงไม่ยอมรับโครงการ (ตารางที่ 1)

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการกำหนดให้นโยบายรับซื้อไฟฟ้า ต้นทุนระบบ พลังงานที่ผลิตได้และอัตราคิดลดเปลี่ยนแปลง พบว่า สำหรับนโยบายรับซื้อไฟฟ้า หาก FIT น้อยกว่า 5 บาท/kWh ค่า NPV และ IRR จะติดลบ ส่วนต้นทุน 50 บาท/W โครงการจะมีค่า NPV, IRR, B/C, DPB และ COE ที่ผ่านเกณฑ์

ยอมรับโครงการได้ ต้นทุนไม่ควรเกิน 80 บาท/W หากพลังงานที่ผลิตได้ต่อกำลังการติดตั้งอยู่ในช่วง 1,550-1,600 kWh/kWp จะสามารถยอมรับโครงการได้ ส่วนอัตราคิดลดไม่ควรเกินร้อยละ 10.875 ต่อปี

อย่างไรก็ตามหากโครงการนี้มีการพิจารณาผลประโยชน์ภายนอก (Externality benefit) จากปริมาณการลดก๊าซเรือนกระจกซึ่งสามารถหาได้จากผลคูณของปริมาณไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้ กับค่าสัมประสิทธิ์การปล่อย CO₂ สำหรับไฟฟ้าจากสายส่ง (Grid Emission) โดยไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จะมีค่าเท่ากับ 0.5980 tCO₂/MWh ดังนั้นโครงการนี้จะสามารถลดการปล่อย CO₂ ได้ปีละ 132 tCO₂ และเป็นการสร้างภาพลักษณ์ในการมีส่วนร่วมลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคการผลิตไฟฟ้าได้

5.สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ประเมินสมรรถนะทางด้านเทคนิคและวิเคราะห์การลงทุนติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาخانชาลารถไฟฟ้าบีทีเอสหมอชิต ระยะเวลาโครงการ 25 ปี และภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ของโครงการ พบว่าระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตพลังงานรายปีได้เท่ากับ 220.7 MWh/year พลังงานที่ผลิตได้ต่อกำลังการติดตั้งเท่ากับ 1,380 kWh/kWp สมรรถนะของระบบมีค่าเท่ากับร้อยละ 77.2

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์การลงทุนของโครงการและความอ่อนไหวของโครงการ

ข้อกำหนด	NPV (บาท)	IRR (ร้อยละ)	B/C	DPB (ปี)	COE (บาท/kWh)
กรณีปกติ	3,966,819.10	4.46	1.34	8.78	2.39
กรณี 1 นโยบายรับซื้อไฟฟ้า					
Feed in Tariff 6.16 บาท/kWh	3,040,121.97	3.45	1.26	9.34	2.39
Feed in Tariff 5.00 บาท/kWh	283,792.03	0.34	1.02	11.50	2.39
Feed in Tariff 4.50 บาท/kWh	(904,281.22)	(1.10)	0.92	12.78	2.39
กรณี 2 ต้นทุนระบบ					
ต้นทุน 82 บาท/W	(76,204.39)	(0.06)	1.00	11.84	3.22
ต้นทุน 80 บาท/W	266,424.72	0.23	1.02	11.58	3.15
ต้นทุน 70 บาท/W	1,979,570.27	1.91	1.15	10.29	2.80
กรณี 3 พลังงานที่ผลิตได้รายปี					
พลังงานที่ผลิตได้รายปี 1,400 kWh/kWp	4,192,380.83	4.70	1.36	8.66	2.35
พลังงานที่ผลิตได้รายปี 1,300 kWh/kWp	3,064,572.17	3.48	1.26	9.32	2.53
พลังงานที่ผลิตได้รายปี 1,200 kWh/kWp	1,936,763.50	2.24	1.17	10.10	2.75
กรณี 4 อัตราคิดลด					
อัตราคิดลดร้อยละ 7.875 ต่อปี	2,915,979.93	3.49	1.26	8.59	2.35
อัตราคิดลดร้อยละ 9.875 ต่อปี	1,194,535.85	1.60	1.11	8.27	2.28
อัตราคิดลดร้อยละ 11.875 ต่อปี	(142,472.91)	(0.21)	0.99	8.20	2.22

หมายเหตุ: เลขในวงเล็บมีค่าติดลบ

การวิเคราะห์การลงทุนโครงการ ณ อัตราดอกเบี้ยร้อยละ 6.875 ซึ่ง ต้นทุน 58.4 บาทต่อวัตต์ จะเกิดความไม่คุ้มค่าแก่การลงทุน เนื่องจาก IRR น้อยกว่าค่า MLR อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาต้นทุนของระบบที่ 50 บาท/W โครงการจะผ่านเกณฑ์ยอมรับของโครงการ

การศึกษานี้ วิเคราะห์ให้เห็นเชิงประจักษ์ว่า ต้นทุนของระบบ เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการยอมรับของโครงการ ส่วน FIT และอัตราคิดลดขึ้นอยู่กับนโยบายภาครัฐ อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาเปรียบเทียบเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิดที่จะเลือกใช้เนื่องจากมีสมรรถนะทางด้านเทคนิคที่แตกต่างกันและมีผลต่อการลงทุนเช่นกัน นอกจากนี้วิกฤตการณ์ด้านพลังงานส่งผลให้ราคาของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงอย่างต่อเนื่องและหากพิจารณาผลประโยชน์จากการลดการปล่อย CO₂ จะเป็นปัจจัยสำคัญหนึ่งที่ทำให้การลงทุนติดตั้ง

เซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาชนชาลารถไฟฟ้าบีทีเอสมีความคุ้มค่าในการลงทุนมากขึ้น

6.กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการการทำธุรกิจผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบต่อเชื่อมเข้าระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวง ผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัท ระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพ จำกัด (มหาชน) และคุณสรศักดิ์ หนูเอี่ยม สำหรับข้อมูลพื้นที่หลังคาชนชาลารถไฟฟ้า

7.เอกสารอ้างอิง

- [1] Tawarath Sutabutr, "Alternative Energy Development Plan; AEDP 2012-2021," International Journal of Renewable Energy, Vol.7, No.1, pp.1-10, June, 2012.

สมบัติของคอนกรีตมวลรวมหินทรายเกาะยอ

ผสมเถ้าแกลบสังข์หยด

Properties of Koh Yor Sandstone Aggregate Concrete

Blended with Song Yod Rice Husk Ash

คุณพล ตันนโยภาส ชลายุทธ สุวรรณะ

ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

บทคัดย่อ

ศึกษาเชิงทดลองดำเนินการประเมินประสิทธิภาพของเถ้าแกลบสังข์หยดที่มีต่อสมบัติคอนกรีตและแรงตัวที่ใส่มวลรวมจากหินทรายเกาะยอ เถ้าแกลบสังข์หยดบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ 15 20 และ 25% โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงไว้ 0.55 ทุกส่วนผสม หล่อคอนกรีตขนาด 10×10×10 ซม. บ่มแบบความชื้นเป็นเวลา 7 วัน 28 วัน และไม่บ่ม สมบัติที่ตรวจสอบประกอบด้วย ความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ ความแข็งแรงแบบชอร์ และกำลังอัด พบว่าค่าคอนกรีตที่กำลังอัดสูงสุดวัดจากส่วนผสมประกอบด้วยเถ้าแกลบสังข์หยด 15% บ่ม 28 วัน ในขณะที่สังเกตว่ากำลังอัดต่ำสุดอยู่ในส่วนผสมเถ้าแกลบสังข์หยด 25% ที่ไม่บ่ม บ่งได้ว่าเถ้าแกลบสังข์หยดสามารถใช้เป็นวัสดุสารปอซโซลานแทนปูนซีเมนต์ที่มีหินทรายเกาะยอเป็นมวลรวมหยาบทำเป็นคอนกรีตกำลังสูงได้

คำสำคัญ : เถ้าแกลบสังข์หยด, มวลรวมหินทราย, ปฏิกิริยาปอซโซลาน, อุณหภูมิไฮเดรชัน

Abstract

The experimental investigation was carried out to evaluate the effectiveness of Song Yod rice husk ash (SYRHA) on the properties of fresh and hardened concrete containing Koh Yor sandstone coarse aggregates (KYSCA). The SYRHA was ground and partially replaced the ordinary Portland cement with the proportion of 15, 20 and 25% by weight. The water to cementitious material ratio is maintained at 0.55 for all mixtures. The KYSCA concrete samples cast in the mould of 10×10×10 cm and cured in water for 7 and 28 days and uncured. The examined properties include the bulk density, water absorption, Shore hardness and compressive strength. The highest compressive strength value was measured in the mixture containing 15% SYRHA cured 28 days while the lowest compressive strength value was noted in 25%SYRHA uncured. It is indicated that the SYRHA can be used as a pozzolanic material, replacing cement containing KYSCA as high strength concrete.

Keywords : Song Yod rice husk ash, Sandstone aggregate, Pozzolanic reaction, Hydration temperature

1. บทนำ

ประชากรที่เพิ่มขึ้น การเติบโตทางเศรษฐกิจ และการรวมตัวเป็นประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน (ASEAN Economics Community) จึงทำให้แนวโน้มการก่อสร้างในจังหวัดสงขลาเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีความต้องการในการใช้คอนกรีตในปริมาณเพิ่มมากขึ้น ราคาและต้นทุนของคอนกรีตจึงเพิ่มขึ้นไปด้วย ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการนำหินทรายเกาะขอมที่มีการผลิตหลายแห่ง ซึ่งนำไปใช้ทำเป็นหินกันคลื่นและก่อสร้าง และจากข้อมูลที่ได้จะมีการผลิตหินทรายเกาะขอมประมาณ 6,000-8,000 ตัน/เดือน ส่วนประกอบในหินทรายแปรผันได้ง่ายด้วยเหตุนี้เมื่อนำมาใช้ในคอนกรีตเป็นมวลรวมอาจเป็นสาเหตุทำให้กำลังของคอนกรีตแตกต่างกันได้ นอกจากนี้ข้อมูลเกี่ยวกับสหสัมพันธ์ถึงผลกระทบของคอนกรีตมวลรวมหินทรายต่างชนิดกันยังมีน้อย ดังนั้นจึงมีความคิดที่จะศึกษามวลรวมหินทรายเกาะขอมทำเป็นมวลรวมในคอนกรีต [1] ได้ใช้หินทรายยุคต่างๆ (ออร์โดวิเซียน ดีโวเนียน คาร์บอนิเฟอรัส เพอร์โม-ไทรแอสสิก) ทำเป็นมวลรวมหยาบในคอนกรีตมาเปรียบเทียบกัน พบว่าให้คอนกรีตกำลังต่ำ โดยเฉพาะหินทรายยุคออร์โดวิเซียน นอกจากนี้ยังพบว่าหินทรายชนิดกึ่งอาร์โคสถึงอาร์โคส (subarkose and arkose) ให้คอนกรีตกำลังต่ำเช่นเดียวกัน [2] หินทรายในรัฐเซาธ์เปาโล ประเทศบราซิล มีการทดสอบเป็นมวลรวมในคอนกรีตโครงสร้างพบว่าหินทรายสีเหลืองและแดงสามารถนำมาใช้ได้ [3] ยังพบว่าคอนกรีตที่ใส่มวลรวมหินทรายชนิดเกรย์แวกมีการหดตัวแบบแห้งสูง [4] ขณะที่มวลรวมหิน 5 ชนิด คือ แกบโบร บะซอลต์ ควอร์ตไซต์ หินปูนและหินทราย ผสมกับเขม่าซิลิกาบ่มสามเดือน พบว่ากำลังคอนกรีตมวลรวมหินทรายเพิ่มขึ้นจนใกล้เคียงกับกำลังของหินทรายเอง [5] หากบดเจ้าแกลบเป็นเวลา 1.30 ชม. จนขนาดละเอียดมีขนาด 9.52 ไมครอน ผสมในคอนกรีตให้กำลังอัดและดัชนีกำลัง (strength activity index) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ [6] ข้าวพันธุ์สังข์หยดปลูกกันมากในท้องถิ่นภาคใต้ เช่น จังหวัดพัทลุง สงขลา มีพื้นที่ปลูกประมาณ 12,886 ไร่ ทั้งภาคใต้ผลิตได้ประมาณ 7113 ตัน/ปี [7] จากวรรณกรรมปริทัศน์ที่กล่าวมา จึงมี

ความคิดเอาเจ้าแกลบพันธุ์ดังกล่าวนำมาใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วน เพื่อเสริมกำลังคอนกรีตหินทรายเกาะขอมและลดต้นทุนในการผลิต โดยกำหนดให้ได้สมบัติทางด้านวิศวกรรมของคอนกรีตดีหรือไม่ด้อยไปกว่าคอนกรีตโครงสร้างทั่วไป

2. อุปกรณ์และวิธีการ

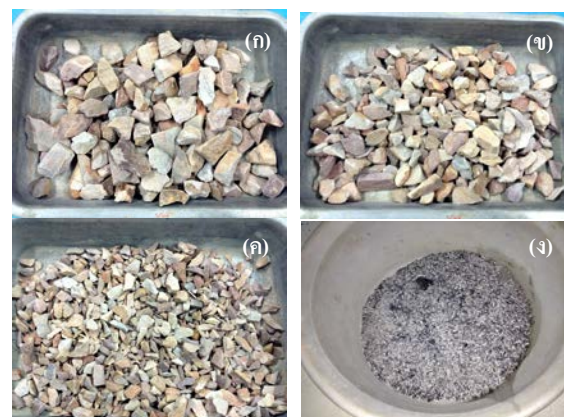
2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

1. หินทรายหัวเขาแดง เกาะขอม จังหวัดสงขลา สีเหลืองปนขาว เนื้อขนาดเม็ดเล็กถึงปานกลาง เนื้อพื้นเป็นควอตซ์ส่วนใหญ่ เป็นชนิดลิตทิกอริไนต์ (lithic arenite) ถึงกึ่งลิตทิกอริไนต์ (sublithic arenite) มวลรวมมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมดังในรูปที่ 1 (ก) ถึง 1 (ค) ก่อนล้างเบน

2. เจ้าแกลบสังข์หยด (รูปที่ 1 (ง)) ที่นำมาใช้นั้นได้นำมาจากแกลบสังข์หยดที่ถูกเผาแล้ว เพื่อไล่ความชื้นของข้าวที่สีและเก็บไว้ในโรงสีข้าวในวิสาหกิจชุมชน จังหวัดพัทลุง ซึ่งเป็นของเสียที่เกิดขึ้นภายหลังใช้เป็นเชื้อเพลิง

3. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และ

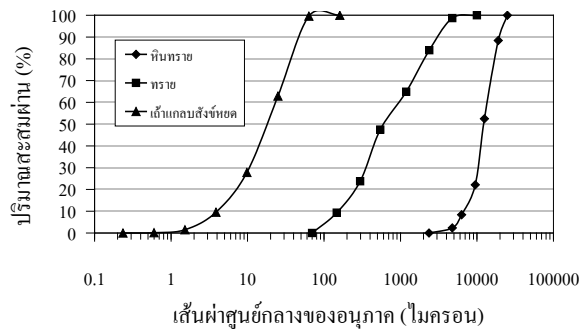
4. น้ำประปาสะอาด



รูปที่ 1: วัสดุที่ใช้ (ก) หินทรายขนาด 19 มม. (ข) หินทรายขนาด 12.5 มม. (ค) หินทรายขนาด 9.5 มม. และ (ง) เจ้าแกลบสังข์หยด

2.2 การเตรียมและหล่อตัวอย่าง

หินทรายเกาะขอมนำมาบดด้วยเครื่องบดปากงับ (jaw crusher) และคัดขนาดโดยใช้ตะแกรงขนาด 19 12.5 และ 9.5 มม. ตามลำดับ มีการกระจายตัวดังรูปที่ 1 (ก) (ข) และ (ค) ซึ่งการคัดขนาดไม่ดี (รูปที่ 2) มีค่าความถ่วงจำเพาะ



รูปที่ 2: การกระจายขนาดของวัสดุที่ใช้หล่อคอนกรีต

เท่ากับ 2.2 มีค่าโมดูลัสความละเอียด (modulus of fineness-F.M.) เท่ากับ 2.5 แต่ละขนาดมีน้ำหนัก 300 600 และ 300 กรัม ตามลำดับ น้ำหนักมวลรวมหยาบหล่อเป็นคอนกรีตทดลองครั้งนี้เท่ากับ 1,200 กรัม (ตารางที่ 1)

ส่วนเถ้ากลบสังกะยค่นำไปบดด้วยเครื่องคัขนาดให้ผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช (45 ไมครอน) มีสีเทาเข้มเป็นการเผาแบบไม่ควบคุม จึงทำให้เถ้าไม่ระอุเปลี่ยนเป็นเถ้าสีขาวหมด ดังในรูปที่ 1 (ง) มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.89 เถ้ากลบและทรายที่ใช้มีการกระจายตัวพอใช้ดังในรูปที่ 2 สูตรผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ากลบ 3 อัตราส่วนคือ 15%, 20% และ 25% โดยน้ำหนัก (ตารางที่ 1) เป้าโลหะหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 10×10×10 ซม. อัตราส่วนปูนซีเมนต์: ทราย: มวลรวม เท่ากับ 1:2:4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ตลอดเท่ากับ 0.55 ตัวอย่างคอนกรีตทั้งหมดแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือบ่มในน้ำ 7 วัน 28 วัน และไม่บ่ม

ตารางที่ 1: การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตที่ศึกษา

แทนปูนซีเมนต์ วัสดุผสม	ปริมาณเถ้ากลบ (กิโลกรัม/ม. ³)			
	0%	15%	20%	25%
ปูนซีเมนต์	400	340	320	300
ปอร์ตแลนด์				
ทรายหยาบ	750	750	750	750
กรวด	1200	1200	1200	1200
เถ้ากลบ	-	60	80	100
น้ำ (w)	220	220	220	220

2.3 การทดสอบตัวอย่าง

วัดการกระจายขนาดของเถ้ากลบด้วยเครื่องวัดอนุภาคด้วยแสงเลเซอร์ และทดสอบความหนาแน่นรวม [8] และการดูดซึมน้ำ [9] ทดสอบความแข็งแบบชอร์ (Shore hardness) ด้วยเครื่อง Hardness Tester (EQUO TIP) รุ่น CA 6525 ทดสอบกำลังอัดปรับแก้ขนาดและทดสอบตาม ASTM C109 [10] วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธีรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence-XRF) วิเคราะห์แร่ประกอบด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) และโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope)

2.4 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดิบ

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้ากลบสังกะยหัดด้วย XRF แบบกึ่งปริมาณ (ตารางที่ 2) มีผลรวมของปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับ 74.93% มีปริมาณของ SO_3 0.92% และน้ำหนักสูญหายหลังเผา (Loss on Ignition-LOI) เท่ากับ 2.51% เมื่อรวมปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มากกว่า 70% มีปริมาณ SO_3 น้อยกว่า 5% และมีปริมาณ LOI น้อยกว่า 10% ดังนั้นเถ้ากลบขาวสังกะยจึงจัดอยู่ในข่ายเป็นวัสดุพอชโซลาน เทียบเคียงได้กับเถ้าลอยชั้น Class F ตามเกณฑ์กำหนดใน ASTM D5370 [11] และ ASTM C618 [12]

ตารางที่ 2: องค์ประกอบสำคัญทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้ากลบสังกะยหัด

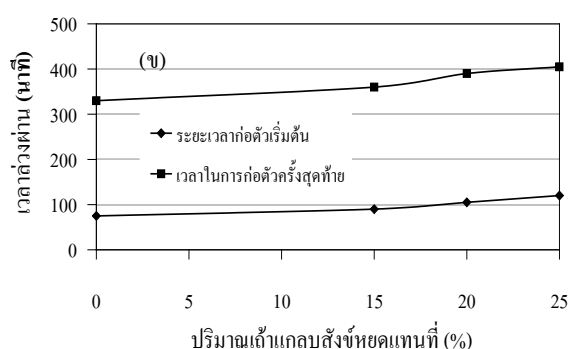
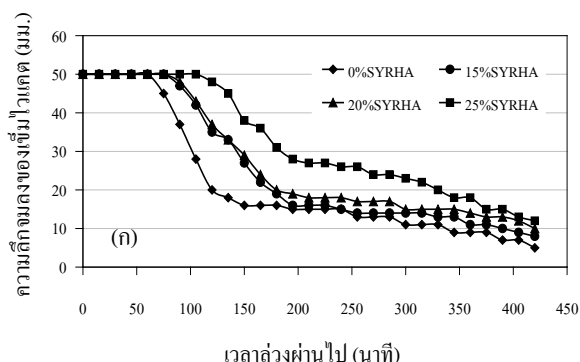
องค์ประกอบทางเคมี	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	SO_3	CaO
SYRHA	66.13	5.48	3.32	8.35	0.92	1.94
OPC	21.30	4.96	3.10	0.50	2.72	66.61

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 การก่อตัวของเพสต์

ผลการก่อตัวของเพสต์ พบว่าการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ใช้เวลาก่อตัวเร็วสุด 75 นาที เมื่อเติมเถ้ากลบ 25% เวลาในการก่อตัวช้าที่สุดคือ 120 นาที (รูปที่ 3 (ก)) เป็น

การบ่งชี้ว่า เวลาก่อตัวของเพสต์แปรผกผันกับปริมาณเถ้าแกลบที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3 (ก) ซึ่งชะลอเวลาการก่อตัวนานขึ้นเพียงเล็กน้อย

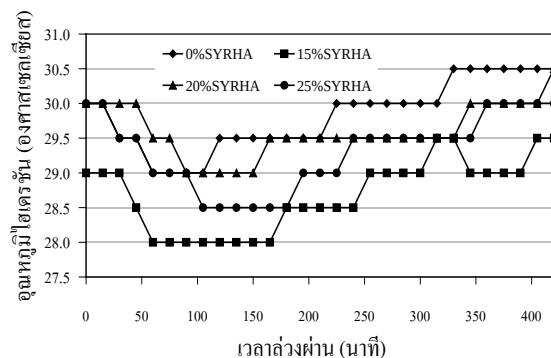


รูปที่ 3: เพสต์ (ก) พฤติกรรม และ (ข) ระยะเวลาก่อตัว

อุณหภูมิไฮเดรชันของการก่อตัวของเพสต์ (รูปที่ 4) โดยทดลองที่อุณหภูมิห้อง 29 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 41% พบว่าอุณหภูมิได้ลดลงจนถึงนาที่ที่ 150 โดยประมาณ อุณหภูมิเริ่มสูงขึ้นแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและคายความร้อนออกมา ขณะเดียวกันเพสต์เริ่มแข็งตัวขึ้นเป็นลำดับ เห็นได้ว่าเพสต์ผสมเถ้าแกลบเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่อุณหภูมิต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ ซึ่งมีข้อดีทำให้การหล่อคอนกรีตหนา (mass concrete) ได้เนื้อคอนกรีตแน่นมีรูพรุนน้อย

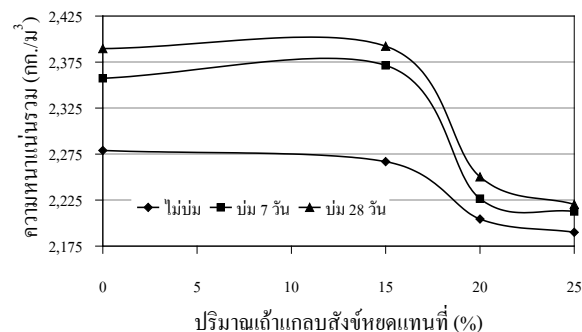
3.2 ความหนาแน่นรวม

ความหนาแน่นรวมเฉลี่ยของคอนกรีตมวลรวมหินทรายหิวเขาแดงอายุบ่มที่ 28 วัน ที่เติมเถ้าแกลบสังขยทดแทน 15% มีค่ามากที่สุดประมาณ 2,392 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร (รูปที่ 5) ทั้งนี้อาจเกิดจากการแทนที่ของน้ำในช่องว่างหรือโพรงอากาศหรืออาจเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในเนื้อคอนกรีต อันเนื่องมาจากปฏิกิริยา



รูปที่ 4: อุณหภูมิไฮเดรชันในช่วงก่อตัวของเพสต์

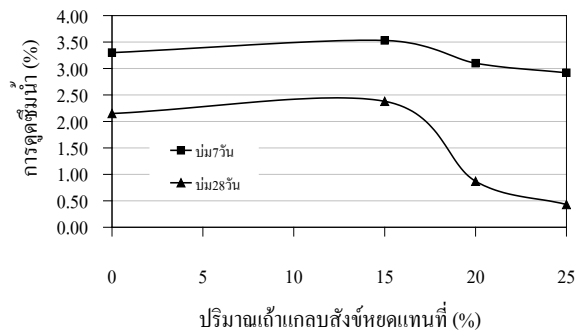
ค่าเพิ่มขึ้น ส่วนคอนกรีตที่มีค่าความหนาแน่นน้อยที่สุดคือประมาณ 2,190 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ที่ผสมเถ้าแกลบ 25% ไม่บ่ม ซึ่งพบว่าเมื่อปริมาณเถ้าแกลบเพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่นรวมของคอนกรีตมีค่าลดลงตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบสังขยทดแทน (1.89) น้อยกว่าของปูนซีเมนต์ (3.15) จึงเป็นสาเหตุให้คอนกรีตที่ถูกแทนที่ด้วยเถ้าแกลบมีค่าความหนาแน่นลดลง



รูปที่ 5: ความหนาแน่นรวมของคอนกรีตมวลรวมหินทรายผสมเถ้าแกลบสังขยทดแทน

3.3 การดูดซึมน้ำ

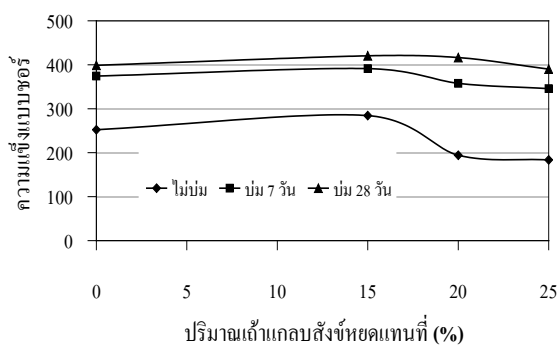
พบว่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตที่อายุบ่ม 7 วัน ที่เติมเถ้าแกลบสังขยทดแทน 15% มีค่าการดูดซึมน้ำสูงสุดคือ 3.53% และที่อายุบ่ม 28 วัน ที่ปริมาณเถ้าแกลบ 25% พบว่ามีค่าการดูดซึมน้ำต่ำสุดคือ 0.43% พบว่าปริมาณเถ้าแกลบเพิ่มขึ้นแนวโน้มการดูดซึมน้ำของคอนกรีตลดลง (รูปที่ 6) ซึ่งเป็นการบ่งชี้ว่าเนื้อคอนกรีตเติมเถ้าแกลบมากนั้นมีความพรุนลดลง สันนิษฐานว่าน่าเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานขึ้นภายในทำให้เนื้อที่บวมมากขึ้น



รูปที่ 6: การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลรวมหินทรายผสมเถ้าเคลือบสังกะสี

3.4 ความแข็งแรงแบบชอร์

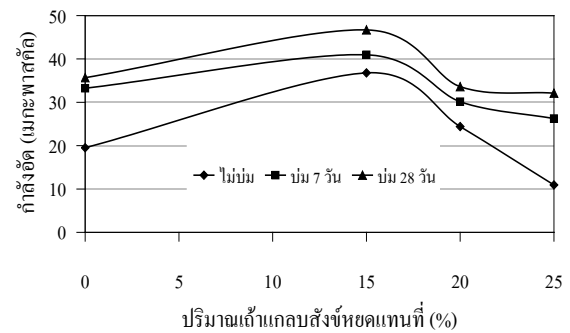
ค่าความแข็งแรงแบบชอร์ของคอนกรีตแปรผันตามอายุบ่ม (รูปที่ 7) ค่าสูงสุดคือ 420 สำหรับคอนกรีตเดิมเถ้าเคลือบ 15% บ่ม 28 วัน และค่าต่ำสุดประมาณ 183 สำหรับคอนกรีตผสมเถ้าเคลือบ 25% ไม่บ่ม ค่านี้อาจแปรผันกับปริมาณเถ้าเคลือบสังกะสีทดแทนที่ปูนซีเมนต์หลังจากอัตราส่วนที่ 15% เป็นต้นไป ซึ่งแนวโน้มการแปรปรวนนี้เป็นลักษณะเดียวกันกับค่าความหนาแน่นรวม (รูปที่ 5) และการดูดซึมน้ำ (รูปที่ 6)



รูปที่ 7: ความแข็งแรงแบบชอร์ของคอนกรีตมวลรวมหินทรายผสมเถ้าเคลือบสังกะสี

3.5 กำลังอัด

ผลทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตแทนที่เถ้าเคลือบสังกะสีที่ 15% 20% และ 25% อายุบ่มต่างกันพบว่าที่ 15% มีค่ากำลังอัดสูงสุดที่ 46.71 เมกะพาสคัล บ่ม 28 วัน ส่วนค่าที่มีกำลังอัดต่ำสุดอยู่ที่ 10.95 เมกะพาสคัล ซึ่งผสมเถ้าเคลือบสังกะสี 25% และไม่บ่ม (รูปที่ 8) ซึ่งแนวโน้มของกำลังอัดมีค่าสูงสุดที่ 15% ของการแทนที่เถ้าเคลือบข้าว

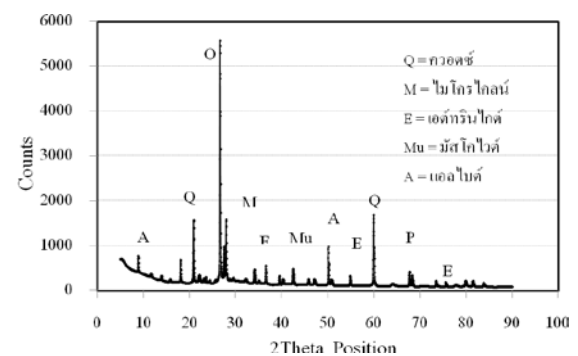


รูปที่ 8: กำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมหินทรายผสมเถ้าเคลือบสังกะสี

สังกะสี และหากเติมเถ้าเคลือบสูงกว่านี้ค่ากำลังมีแนวโน้มลดลงตามลำดับ โดยเฉพาะคอนกรีตไม่บ่มใส่เถ้าเคลือบ 25% มีค่ากำลังอัดลดลงอย่างมาก สันนิษฐานว่าเถ้าเคลือบยังไม่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานขึ้น จึงกลับกลายเป็นผลเสียแก่พัฒนาการกำลังคอนกรีตในช่วงระยะต้น

3.6 วัฏภาคแร่ประกอบขึ้นใหม่

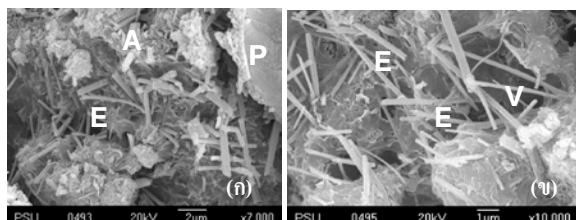
ผลวิเคราะห์แร่ประกอบขึ้นในตัวอย่างคอนกรีตเดิมเถ้าเคลือบ 15% บ่ม 28 วัน พบว่ามีแร่ 6 ชนิด (รูปที่ 9) และผลคำนวณปริมาณแร่ของแต่ละชนิดจากพื้นที่ใต้กราฟ XRD ได้ ควอตซ์ (quartz-Q) 29.18% ไมโครไคลน์ (microcline-M) 23.17% มัสโคไวต์ (muscovite-Mu) 22.21% แอลไบต์ (albite-A) 11.87% เอตทริไนท์ (ettringite-E) 8.88% พอร์ตแลนด์ (portlandite-P) 4.69% แร่ที่เกิดขึ้นใหม่ได้แก่ แร่เอตทริไนท์และพอร์ตแลนด์ที่ได้รับอิทธิพลมาจากปูนซีเมนต์ อันเนื่องมาจากมีปริมาณสารประกอบ CaO สูงทำปฏิกิริยากับน้ำได้เป็นแร่ทั้งสองดังกล่าว



รูปที่ 9: ลายพิมพ์ของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของคอนกรีตมวลรวมหินทรายผสมเถ้าเคลือบ 15% บ่ม 28 วัน

3.7 โครงสร้างจุลภาค

ผลถ่ายภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเนื้อคอนกรีตมวลรวมหินทรายผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ทดแทนที่ 15% บ่ม 28 วัน พบว่ามีโพรงน้อย (V) เอ็ดทรินไกต์เป็นรูปผลึกแท่งยาว แผ่นแบนหนาของมัสโคไวต์และควอตซ์ปลายขอบคมปริมาณมาก ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10: ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ทดแทนที่ 15% บ่ม 28 วัน ด้วยกำลังขยาย (ก) 8,000 เท่า และ (ข) 10,000 เท่า

4. สรุป

1. ความละเอียดและองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบสังเคราะห์จัดอยู่ในเกณฑ์สารปอซโซลานชนิด F [11,12]
2. ปริมาณเถ้าแกลบเพิ่มขึ้นทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าแกลบเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิไฮเดรชันของเพสต์ผสมเถ้าแกลบลดลง
3. ความหนาแน่น มีค่าอยู่ในช่วง 2190-2392 กก./ม³ การดูดซึมน้ำในช่วง 0.43-3.53% ขึ้นกับปริมาณเถ้าแกลบผสมลงไปและอายุบ่ม ซึ่งเถ้าแกลบเพิ่มขึ้นและอายุบ่มนานขึ้นค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและการดูดซึมน้ำลดลง
4. ความแข็งแรงแบบชอร์ตสตรัคเจอร์กับกำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมหินทรายเกาะของผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ทดแทน 15% บ่ม 28 วัน มีค่าความแข็งแรงแบบชอร์ตและกำลังอัดสูงสุดที่ 420 และ 46.71 เมกะพาสคัล ตามลำดับ
5. แร่ประกอบขึ้นใหม่ภายหลังปฏิกิริยาปอซโซลาน ได้แก่ เอ็ดทรินไกต์และฟอร์ตแลนไต์ และยืนยันจากโครงสร้างจุลภาคด้วย XRD ที่พบแร่ทั้งสองฝังในเนื้อ

5. เอกสารอ้างอิง

[1] A. Tugrul and M. Yilmaz, "Assessing the Quality of Sandstones for Use as Aggregate in Concrete," Magazine of Concrete Research, Vol.64, No.12, pp. 1067-1078, Dec., 2012.

[2] M. Yilmaz and A. Tugrul, "The Effects of Different Sandstone Aggregates on Concrete Strength," Construction and Building Materials, Vol.35, pp. 294-303, Oct., 2012.

[3] P. S. P. Fontanini, L. L. Pimentel, A. E. Jacintho and C. L. Migliato, "Brazilian Geological Sandstone Characterization and Its Utilization as Aggregate in Structural Concrete," Applied Mechanics and Materials, Vol.271-272, pp.141-146, 2012.

[4] J. R. Mackechnie, "Shrinkage of Concrete Containing Greywacke Sandstone Aggregate," Materials Journal, Vol.103, Issue5, pp.390-396, 2006.

[5] A. Kılıç, C. D. AtiŞ, A. Teymen, O. Karahan, F. Özcan, C. Bilim and M. Özdemir, "The Influence of Aggregate Type on The Strength and Abrasion Resistance of High Strength Concrete," Cement and Concrete Composites, Vol.30, Issue4, pp.290-296, April, 2008.

[6] B. H. Abu Bakar, P. J. Ramadhansyah and M. J. Megat Azmi, "Effect of Rice husk Ash Fineness on the Chemical and Physical Properties of Concrete," Magazine of Concrete Research, Vol.63, Issue5, pp.313-320, 2011.

[7] www.ricethailand.go.th Retrieved 21 March 2013

[8] ASTM C138/C138M-13 "Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete," 2013.

[9] ASTM C1585-13 "Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes," 2013.

[10] ASTM C109/C109M-12. "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)," 2012.

[11] ASTM D5370-14. "Standard Specification for Pozzolanic Blended Materials in Construction Application," 2014.

[12] ASTM C618-12a. "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete," 2012.

ตัวรับรังสีอาทิตย์ชนิดรวมแสงแบบ 3 มิติ

A Solar Collector with 3D Compound Parabolic Concentrator

สงกรานต์ บุตตะวงศ์¹⁾ สุรจิตร พระเมือง²⁾ วีระศักดิ์ ชอมขุนทด³⁾

¹⁾ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย Email : songkran_tuy@hotmail.com

²⁾ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย Email : Surajitr@lru.ac.th

³⁾ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย Email : weerasak1963@yahoo.co.th

บทคัดย่อ

ตัวรับรังสีอาทิตย์ชนิดรวมแสงแบบ 3 มิติ ถูกออกแบบและสร้าง จำนวน 2 เครื่อง โดยเครื่องที่ 1 เป็นแบบตัดบางส่วน อัตรา 1 ใน 5 และเครื่องที่ 2 เป็นแบบเต็มส่วน ที่มีอัตราการรวมรังสี เท่ากัน 2.4 เท่า เพื่อผลิตน้ำร้อน และหาประสิทธิภาพทางความร้อนของตัวรับรังสี โดยนำไปทดสอบตามมาตรฐาน ASHRAE 93-77 และในสภาพใช้งานจริง ที่อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ ระหว่าง 0.005 kg/s – 0.007kg/s ทำการวัดค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า อุณหภูมิของน้ำขาออก อุณหภูมิของอากาศ และค่าปริมาณรังสีอาทิตย์รวมที่ตกกระทบบนตัวรับรังสี พบว่าตัวรับรังสีอาทิตย์ชนิดรวมแสงแบบตัดบางส่วน สำหรับการทดสอบตามมาตรฐาน ASHRAE 93-77 มีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำขาเข้า 52.95 °C อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำขาออก 58.32 °C ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนเฉลี่ย 47.00% ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศ 38.30 °C และปริมาณรังสีอาทิตย์รวมเฉลี่ย 848.37W/m² ส่วนการทดลองในสภาพใช้งานจริง จะมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำขาเข้า 50.62 °C อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำขาออก 57.37 °C ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนเฉลี่ย 65.50% ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศ 38.25 °C และปริมาณรังสีอาทิตย์รวมเฉลี่ย 881.78W/m² ส่วนตัวรับรังสีอาทิตย์ชนิดรวมแสง แบบเต็มส่วน ในการทดสอบตามมาตรฐาน ASHRAE 93-77 มีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำขาเข้า 52.95 °C อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำขาออก 56.17 °C ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนเฉลี่ย 24.17% ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศ 38.30 °C และปริมาณรังสีอาทิตย์รวมเฉลี่ย 848.37W/m² ส่วนการทดลองในสภาพใช้งานจริง จะมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำขาเข้า 50.62 °C อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำขาออก 59.48 °C ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนเฉลี่ย 56.00% ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศ 38.25 °C และปริมาณรังสีอาทิตย์รวมเฉลี่ย 881.78 W/m² จะเห็นได้ว่า ตัวรับรังสีอาทิตย์ชนิดรวมแสงแบบบางส่วน จะมีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงกว่า และผลิตน้ำร้อนได้อุณหภูมิใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ: ตัวรับรังสีอาทิตย์ชนิดรวมแสงพาราโบลา 3 มิติ พลังงานแสงอาทิตย์

Abstract

Solar collectors with compound parabolic concentrator in three-dimensions were designed and constructed by 2 types including a truncated collector with 1 by 5 parts and a full size in the same of the

concentrator ratio of 2.4. They were made to produce hot water and to determine the thermal efficiency by the method of ASHRAE 93-77 standard and the real condition using at the water mass flow rates range of 0.005 kg/s - 0.007 kg/s. The inlet water temperature, outlet water temperature, ambient temperature, and solar irradiation falling onto the collectors were measured. The results were found for each type of collectors as following :

The truncated collector was tested using ASHRAE 93-77 standard obtaining the water inlet temperature by average of 52.95 °C, the water outlet temperature by average of 58.32 °C, the average thermal efficiency of 47.00% at the ambient temperature by average of 38.30 °C and the solar irradiation by average of 848.37 W/m². The real condition using was obtained the inlet water temperature by average of 50.62 °C, the outlet water temperature by average of 57.37 °C, the average thermal efficiency of 65.50% at the ambient temperature by average of 38.25 °C and the solar irradiation by average of 881.78 W/m².

The full size collector was tested by ASHRAE 93-77 standard obtaining the inlet water temperature by average of 52.95 °C, the outlet water temperature by average of 56.17 °C, the average thermal efficiency of 24.17% at the ambient temperature by average of 38.30 °C and the solar irradiation by average of 848.37 W/m². The real condition using was obtained the inlet water temperature by average of 50.62 °C, the outlet water temperature by average of 59.48 °C, the average thermal efficiency of 56.00% at the ambient temperature by average of 38.25 °C and the solar irradiation by average of 881.78 W/m².

It was showed that the thermal efficiency of truncated collector was higher than that of the full size collector while the hot water obtained was nearly same.

Keywords : Parabolic Concentrator Collector, , Solar energy.

1. บทนำ

ประเทศไทยอยู่ในเขตร้อนชื้นที่มีปริมาณรังสีอาทิตย์กระจายเฉลี่ยทั้งปีประมาณ 60% ของปริมาณรังสีรวม [1, 2] จึงเป็นข้อจำกัดของตัวรับรังสีอาทิตย์ชนิดรวมจุดโฟกัส ในการรวบรวมรังสีอาทิตย์ และส่งผ่านพลังงานความร้อนไปสู่

สารทำงาน ที่สามารถรวมรังสีได้น้อยกว่าตัวรับรังสีอาทิตย์ชนิดไม่รวมจุดโฟกัส โดยตัวรับรังสีอาทิตย์ชนิดรวมแสงแบบพาราโบลา (CPC) เป็นตัวรับรังสีอาทิตย์ที่รวบรวมรังสีตรง และรังสีกระจายได้ดี ทำให้ปริมาณรังสีตกกระทบแผ่นดูดกลืนรังสีได้เพิ่มขึ้นตามอัตราการรวมรังสี (CR) [3]

ตัวรับรังสีอาทิตย์ชนิดรวมแสง จะถูกนำไปใช้งานทั้งในรูปความร้อน เพื่อผลิตความร้อนในช่วงอุณหภูมิปานกลางระหว่าง $70-200^{\circ}\text{C}$ และการเพิ่มปริมาณรังสีอาทิตย์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อการผลิตไฟฟ้า โดยช่วยทำให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น 16.8% มากกว่าการใช้เซลล์แสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว โดยใช้น้ำเป็นสารทำงานเพื่อระบายความร้อนบริเวณครีป แต่ก็พบว่าความเข้มของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าไม่สม่ำเสมอ [4] จึงมีการลดขนาดของครีปให้เล็กลง และใช้ผงทองแดงผสมในน้ำเพื่อลดอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้นมากกว่าเดิม และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนของน้ำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นได้อีกด้วย [5]

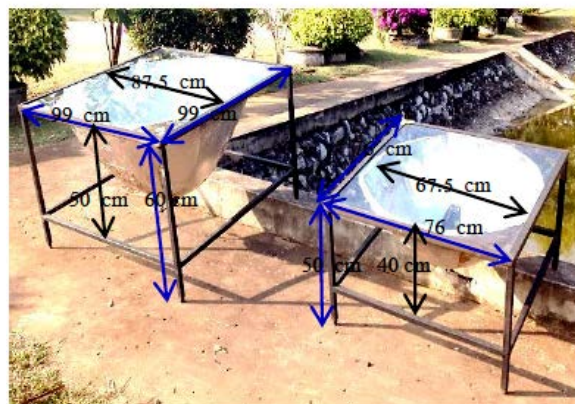
ตัวรับรังสีอาทิตย์ชนิดรวมแสงแบบ 3 มิติ เป็นตัวรับรังสีอาทิตย์ที่มีการศึกษาสำหรับการเพิ่มปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบตัวดูดกลืนรังสี โดยเฉพาะประเทศที่อยู่ในเขตร้อนชื้นอย่างประเทศไทย เนื่องจากสามารถรวบรวมรังสีกระจายได้ดี และไม่ต้องหันตามดวงอาทิตย์ แต่มีข้อจำกัดในด้านขนาดของตัวรับรังสีที่ค่อนข้างมีขนาดใหญ่ เมื่อเทียบกับตัวรับรังสีแบบแผ่นราบ จากการใช้ตัวรับรังสีอาทิตย์ชนิดรวมแสง แบบ 2 มิติที่มีอัตราการรวมรังสีอาทิตย์ 3 เท่า พื้นที่ 1.44 m^2 สำหรับการผลิตอากาศร้อนในการลดความชื้นของซิลิกาเจล เพื่อการคืนรูปของซิลิกาเจล สามารถผลิตอากาศร้อนที่อุณหภูมิสูงสุด 75°C ที่ระดับความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ย 650 W/m^2 อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ 0.01 kg/s [6]

ในการวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างตัวรับรังสีอาทิตย์ชนิดรวมแสงแบบ 3 มิติ ที่มีอัตราการรวมรังสีอาทิตย์ 2.4 เท่า เพื่อผลิตน้ำร้อน ศึกษาประสิทธิภาพทางความร้อนและแนว

ทางการประยุกต์ตัวรับรังสี สำหรับผลิตไอน้ำร้อนในการนึ่งข้าวเหนียว

2. การออกแบบและสร้างตัวรับรังสี

การสร้างตัวรับรังสีอาทิตย์ชนิดรวมแสงแบบ 3 มิติ มีแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่มีความโค้งแบบพาราโบลา โดยใช้แผ่นสแตนเลสและใช้เป่ารับรังสีเป็นชนิดกริบบแบบทรงกระบอกทำจากท่อทองแดง ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm ซึ่งสร้าง 2 เครื่องคือ แบบตัดบางส่วน โดยมีพื้นที่ของเป่าดูดรังสี 0.008 m^2 พื้นที่ของตัวรับรังสี 0.36 m^2 ความสูง 40 cm และความกว้างของช่องรับรังสี 67.50 cm และแบบเต็มส่วน โดยมีพื้นที่ของเป่าดูดรังสี 0.030 m^2 พื้นที่ของตัวรับรังสี 0.60 m^2 ความสูง 50 cm และความกว้างของช่องรับรังสี 87.50 cm ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตัวรับรังสีอาทิตย์ชนิดรวมแสงแบบ 3 มิติ แบบเต็มส่วน (ซ้าย) และแบบบางส่วน (ขวา)

3. การทดสอบตัวรับรังสีอาทิตย์

การทดสอบตัวรับรังสีอาทิตย์ด้วยมาตรฐาน ASHRAE 93-77 [7] ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร ติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์

กำหนดอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ ที่ไหลเข้าปารับรังสี 3 ระดับระหว่าง 0.005 – 0.007 kg/s โดยใช้ปั๊มน้ำหมุนเวียน วัดค่าปริมาณรังสีอาทิตย์รวม รังสีกระจาย ที่ตกกระทบ ตัวรับรังสี (I_t) โดยใช้ไพราโนมิเตอร์ (Pyranometer) ทุกๆ 5 นาที วัดอุณหภูมิของอากาศ (T_{amb}) อุณหภูมิของน้ำขาเข้า (T_{in}) และขาออก (T_{out}) ที่อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำคงที่ โดยใช้ Thermocouple หาผลต่างของอุณหภูมิ (ΔT) ภายใต้สภาพภูมิอากาศร้อนชื้น ทุกๆ 5 นาที โดยบันทึกข้อมูลด้วย Data Logger มีระบบควบคุมอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ เครื่องมือวัดความเร็วลม และ Auxiliary unit

สำหรับการทดลองในสภาพการใช้งานจริง ณ โรงเรียน จุฬารัตนราชวิทยาลัย จะทำการวัดอุณหภูมิ น้ำขาออก อากาศแวดล้อม ด้วย thermocouple วัดปริมาณรังสีดวงอาทิตย์รวม ด้วยเครื่อง solarimeter และควบคุมอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำด้วยวาล์วควบคุม ทำการวัดทุกๆ 5 นาที ด้วย datalogger

ในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าประสิทธิภาพทางความร้อนขณะใดขณะหนึ่ง (η) ของตัวรับรังสีอาทิตย์ชนิดรวมแสงแบบ จะหาได้จากสมการ (1) และ (2)

$$\eta = \frac{\dot{m}c_w(T_{out} - T_{in})}{IA_a} = \frac{\dot{m}c_w\Delta T}{IA_a} \quad (1)$$

$$\text{และ } \frac{(T_{av} - T_{amb})}{IA_a} = \frac{\Delta T}{IA_a} \quad (2)$$

เมื่อ η_o คือค่าประสิทธิภาพทางแสง (Optical efficiency)

U_L คือค่าความร้อนที่สูญเสียรวมจากตัวรับรังสี (W/m^2)

A_a คือพื้นที่ช่องรับแสง (Aperture area) (m^2)

$\dot{m}$ คืออัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ (kg/s)

c_w คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (4.187 kJ/kg.K)

T_{av} คืออุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำขาเข้า และขาออก ($^{\circ}C$)

T_{amb} คืออุณหภูมิของอากาศ ($^{\circ}C$)

T_{in} คืออุณหภูมิของน้ำขาเข้า ($^{\circ}C$)

T_{out} คืออุณหภูมิของน้ำขาออก ($^{\circ}C$)

I_t คือค่าปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ (W/m^2)

เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพทางความร้อน (η) กับ $\frac{\Delta T}{IA_a}$ จะได้ค่าประสิทธิภาพทาง

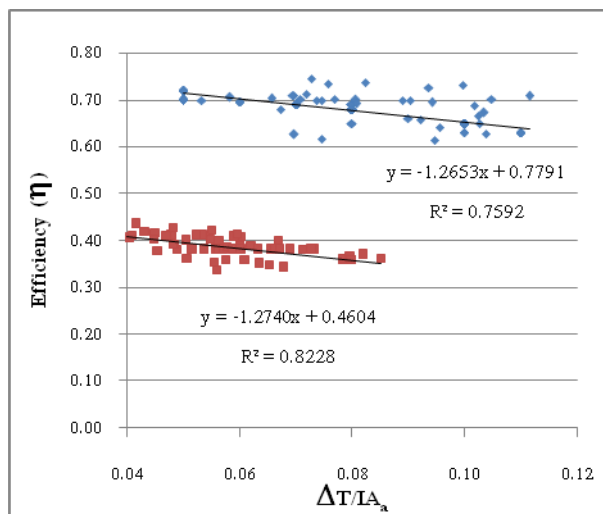
ความร้อน ดังสมการ (3)

$$\eta = \eta_o - \frac{U_L \Delta T}{I_t A_a} \quad (3)$$

จะได้กราฟเส้นตรงที่ค่าความชันเป็น $-U_L$ และจุดตัดแกน Y เป็น η_o

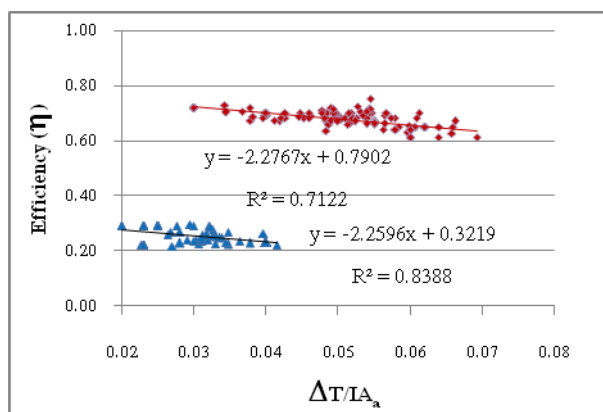
4. ผลการวิจัย

ผลการทดสอบ ตัวรับรังสีอาทิตย์ชนิดรวมแสงแบบ 3 มิติ แบบตัดบางส่วน ตามมาตรฐาน ASHRAE 93-77 มีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศ $38.30^{\circ}C$ อุณหภูมิของน้ำขาเข้าและขาออกเฉลี่ย $52.95^{\circ}C$ และ $58.32^{\circ}C$ ตามลำดับ อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำขาออกสูงสุด $61.62^{\circ}C$ ส่วนการทดลองในสภาพใช้งานจริง จะมีค่าอุณหภูมิของอากาศเฉลี่ย $38.25^{\circ}C$ อุณหภูมิของน้ำขาเข้าและขาออกเฉลี่ย $50.62^{\circ}C$ และ $57.37^{\circ}C$ ตามลำดับ อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำขาออกสูงสุด $60.82^{\circ}C$ โดยเขียนกราฟระหว่าง η กับ $\Delta T/IA_a$ ได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของตัวรับรังสีแบบตัดบางส่วน

ตัวรับรังสีอาทิตย์ชนิดรวมแสงแบบ 3 มิติ แบบเต็มส่วน ในการทดสอบตามมาตรฐาน ASHRAE 93-77 ค่าอุณหภูมิของอากาศเฉลี่ย 38.30°C อุณหภูมิของน้ำขาเข้าและขาออกเฉลี่ย 52.95°C และ 56.17°C ตามลำดับ อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำขาออกสูงสุด 61.12°C ส่วนการทดลองในสภาพใช้งานจริง ค่าอุณหภูมิของอากาศเฉลี่ย 38.25°C อุณหภูมิของน้ำขาเข้าและขาออกเฉลี่ย 50.62°C และ 59.48°C ตามลำดับ อุณหภูมิของน้ำขาออกสูงสุด 63.53°C โดยเขียนกราฟระหว่าง η กับ $\Delta T/IA_u$ ได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของตัวรับรังสีแบบเต็มส่วน

เมื่อนำอุณหภูมิที่ผลิตได้ของตัวรับรังสีแต่ละแบบมาคำนวณระยะเวลาในการนึ่งข้าวเหนียว 1 kg ให้สุก จะได้ระยะเวลาและความร้อนที่ใช้ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการคำนวณระยะเวลาและปริมาณความร้อนสำหรับการนึ่งข้าวเหนียว

ชนิดของ ตัวรับรังสี	อุณหภูมิ ขาออก ($^{\circ}\text{C}$)	เวลานึ่งข้าว (นาท.)	พลังงานความร้อนในการนึ่ง (kJ)
ตัดบางส่วน	58.32	159.25	26.25
เต็มส่วน	56.17	166.48	23.44

5. สรุปผลการวิจัย

ตัวรับรังสีอาทิตย์ชนิดรวมแสง (CPC) แบบ 3 มิติ ยังมีการศึกษาน้อยในประเทศไทย โดยการวิจัยนี้ได้สร้างตัวรับรังสี CPC แบบตัดบางส่วน และแบบเต็มส่วนที่มีอัตราการรวมรังสี 2.4 เท่า ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASHRAE 93-77 ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนเฉลี่ย 47.0% ที่ปริมาณรังสีอาทิตย์รวมเฉลี่ย 848.37 W/m^2 ได้สมการประสิทธิภาพทางความร้อน (η) กับ $\frac{\Delta T}{IA_u}$ ดังสมการ (4)

$$\eta = -1.2740 \left(\frac{\Delta T}{IA_u} \right) + 0.4604, R^2 = 0.8228 \quad (4)$$

และประสิทธิภาพทางความร้อนเฉลี่ยสำหรับการใช้งานในสภาพจริง มีค่าเท่ากับ 65.5% ที่ปริมาณรังสีอาทิตย์รวมเฉลี่ยเท่ากับ 881.78 W/m^2 ได้สมการประสิทธิภาพทางความร้อน (η) กับ $\frac{\Delta T}{IA_u}$ ดังสมการ (5)

$$\eta = -1.2653 \left(\frac{\Delta T}{IA_u} \right) + 0.7791, R^2 = 0.7592 \quad (5)$$

ในขณะที่ตัวรับรังสีอาทิตย์ชนิดรวมแสงแบบ 3 มิติ แบบเต็มส่วน ในการทดสอบตามมาตรฐาน ASHRAE 93-77

ประสิทธิภาพทางความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 24.17% ที่ปริมาณรังสีอาทิตย์รวมเฉลี่ย 848.37 W/m^2 ได้ผลการประสิทธิภาพ

ทางความร้อน (η) กับ $\frac{\Delta T}{IA_g}$ ดังสมการ (6)

$$\eta = -2.2596 \left(\frac{\Delta T}{IA_g} \right) + 0.3219, R^2 = 0.8388 \quad (6)$$

ประสิทธิภาพทางความร้อนเฉลี่ยสำหรับการทดลองในสภาพจริง เท่ากับ 56.0% ที่ปริมาณรังสีอาทิตย์รวมเฉลี่ย 881.78 W/m^2

ได้ผลการประสิทธิภาพทางความร้อน (η) กับ $\frac{\Delta T}{IA_g}$ ดัง

สมการ (7)

$$\eta = -2.2767 \left(\frac{\Delta T}{IA_g} \right) + 0.7902, R^2 = 0.7122 \quad (7)$$

ความแปรปรวนของบรรยากาศ ส่งผลให้ค่า R^2 มีค่า 0.7 – 0.8

ซึ่งจำเป็นต้องเพิ่มการเก็บข้อมูลมากขึ้นในสภาพท้องฟ้าที่

แตกต่างกันให้มีจำนวนข้อมูลเพิ่มขึ้น เพื่อเพิ่มค่า R^2

6. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้ ได้รับการสนับสนุนการวิจัย ทุนวิจัยนักศึกษา มหาบัณฑิต สำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ประจำปี 2553 ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้เป็นอย่างสูง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] R.H.B. Exell, “The Fluctuation of Solar Radiation of Thailand” Solar Energy, Vol. 18, p. 549 – 554, 1976.
- [2] J. Hiranlab, et al. “Evaluation of Solar Radiation from the Satellite Data.” Faculty of Energy and Material, King Mongkut’s University of Technology Thonburi, 1997.

- [3] M. Pituwan, “ Designing and Testing the Solar Collector with Parabolic Concentrator”. Thesis: Master of Engineering in Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology North Bangkok, 2000.
- [4] J. Klinchuen “Solar Cell Performance increasing with Compound Parabolic Concentrator”. Thesis, Master of Engineering in Energy Technology, Faculty of Energy and Material, King Mongkut’s University of Technology Thonburi, 2002.
- [5] M. Sungglinhom, “Vegetable and Fruit Solar Dryer Using Parabolic Concentrator combined with Reflection Mirror and Phase Changing Solar Storage”. Thesis, Master of Engineering in Energy Technology, Faculty of Energy and Material, King Mongkut’s University of Technology Thonburi, 2005.
- [6] S. Pramuang and R.H.B Exell.. “The Regeneration of Silica Gel Desiccant by Air from a Solar Heater with a Compound Parabolic Concentrator,” Renewable Energy, vol. 32, p. 173-182, 2007.
- [7] M.. Amer, et al., ASHRAE 93-77 :Handbook of Fundamental. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, 1993.

เทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ ในการต่อต้านการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่เชื่อมต่อหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวด้วย Matlab/Simulink

Over/Under-Voltage Islanding Detection Technique of Anti-Islanding for Grid-Connected Distributed Generation on Matlab/Simulink

มานพ ยิ่งรัมย์

ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ ในการต่อต้านการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่เชื่อมต่อหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวด้วย Matlab/Simulink เพื่อแสดงให้เห็นถึง ประสิทธิภาพ และเนื้อหาที่เกี่ยวข้อง ในการนำเทคนิคนี้ไปใช้งาน จากผลการจำลองการทำงาน แสดงให้เห็นว่า เทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถต่อต้านการแยกตัวอิสระได้อย่างรวดเร็ว ไม่มีการฉีดสัญญาณรบกวนไปยังโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลัง การนำไปดำเนินการใช้งานไม่ยาก แต่ยังมีจุดอ่อนเพราะมีพื้นที่ไร้การตรวจจับกว้าง คือ ถ้ากำลังไฟฟ้าจริงเข้าไปสู่ขอบเขต $-24.39\% \leq \Delta P/P \leq 38.41\%$ เมื่อสภาวะการแยกตัวอิสระเกิดขึ้นเทคนิคนี้ไม่สามารถตรวจจับสภาวะการแยกตัวอิสระได้

คำสำคัญ : การตรวจจับการแยกตัวอิสระ, หน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว, เชื่อมต่อกริด

Abstract

This paper presents an over/under-voltage islanding detection technique of anti-islanding for grid-connected distributed generation on Matlab/Simulink. To demonstrate the effectiveness and relevant content for this technology bring to use. The simulation results show that the over/under-voltage islanding detection technique is a high efficiency, can the fast anti-islanding, has not signal injection of perturbation into the power system network, usability dose not difficult. But the technique has a weakness because it has a wide nondetection zone, if active powers to be inside $-24.39\% \leq \Delta P/P \leq 38.41\%$ when islanding condition occurs, the technique cannot detect islanding condition.

Keywords : Islanding Detection, Distributed Generation, Grid-Connected

1. บทนำ

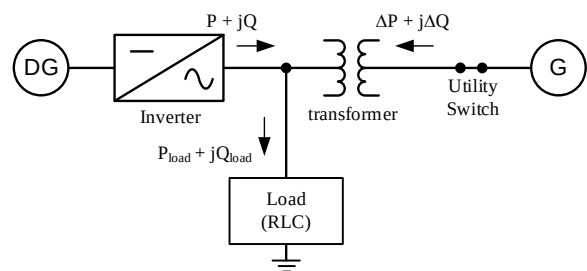
สถานการณ์การจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระเป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ให้เกิดขึ้นในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่เชื่อมต่อหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distributed Generation; DG) เพราะเมื่อเกิดขึ้นแล้วจะส่งผลให้ แรงดันและความถี่ ณ จุดที่เกิดการแยกตัวออกไปนั้นเปลี่ยนแปลงซึ่งเป็นไปได้ที่ขนาดของแรงดันและความถี่ที่เกิดขึ้นจะไม่อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับของอุปกรณ์เป็นผลให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์นั้น ๆ อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของการไฟฟ้า อาจสร้างอันตรายให้เกิดขึ้นกับผู้ปฏิบัติงาน ณ สายส่งที่สัมพันธ์กับการเกิดสถานะแยกตัวอิสระเพราะในสายส่งยังมีไฟฟ้าที่ส่งมาจากหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวแต่มีการสันนิษฐานว่าไม่มีไฟฟ้าในสายส่งนั้นแล้ว เมื่อมีการกลับเข้ามาเชื่อมต่อในโครงข่ายระบบไฟฟ้าอีกครั้งหลังจากที่แยกออกไปก่อนหน้านี้ อาจส่งผลให้เกิดการ รีทริป (Re-Tripping) หรือ เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ต่าง ๆ เพราะ เกิดความต่างเฟส [1]

ในหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวขนาดใหญ่ เช่น หน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวของ บริษัท ผลิตไฟฟ้าและน้ำเย็น จำกัด นั้น สามารถจัดการกับปัญหาการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระนี้ได้โดยการควบคุมแรงดันและความถี่ให้อยู่ในสถานะใช้งานปกติแล้วทำการจ่ายไฟฟ้าแบบไม่เชื่อมต่อการไฟฟ้าหรือเป็นการจ่ายไฟฟ้าแบบอิสระนั่นเอง โดยเรียกการใช้งานแบบนี้ว่า โหมดแยกตัวอิสระ (Island Mode) แต่ในหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวขนาดเล็กไม่เหมาะสมอย่างยิ่งที่จะใช้งานใน โหมดแยกตัวอิสระ เพราะมีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้องโดยเฉพาะราคาที่เพิ่มสูงขึ้นมาก ส่วนเทคนิคที่นำมาใช้ในการตรวจจับสถานะการแยกตัวอิสระเพื่อทำการต่อต้านการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระในหน่วยผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กนั้น (หน่วยผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก คือ ขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 kW [2]) เป็นเทคนิคในกลุ่ม เทคนิคการตรวจจับแบบโลคอล (Local Islanding Detection Techniques) ซึ่งเทคนิคการตรวจจับแบบโลคอลนี้สามารถแบ่งได้อีก 3 แบบ คือ เทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระแบบพาสซีฟ (Passive Islanding Detection Techniques) เทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระแบบแอคทีฟ (Active Islanding Detection Techniques) และ เทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระแบบไฮบริด (Hybrid Islanding Detection Techniques)

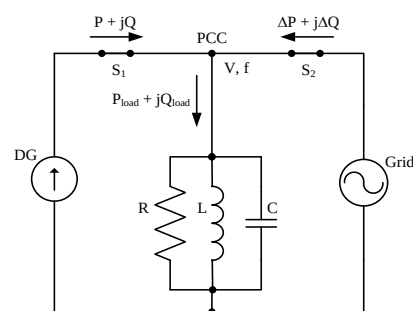
ในบทความนี้จะนำเสนอ เทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูง โดยเทคนิคนี้อยู่ในกลุ่มของเทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระแบบพาสซีฟ เพื่อแสดงให้เห็นถึง ประสิทธิภาพ และเนื้อหาที่เกี่ยวข้องในการนำเทคนิคนี้ไปใช้งาน รายละเอียดต่าง ๆ ของบทความมีดังต่อไปนี้

2. พื้นที่ไร้การตรวจจับของเทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ

พื้นที่ไร้การตรวจจับ (Non-Detection Zone; NDZ) เป็นขอบเขตของความแตกต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาของหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวกับการบริโภคกำลังไฟฟ้าของโหลด ซึ่งหากดำเนินการตรวจจับการแยกตัวอิสระ ภายใต้อุปกรณ์การตรวจจับจะล้มเหลว [3] ในกรณีเทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ สามารถหาพื้นที่ไร้การตรวจจับได้ดังต่อไปนี้ [4]



รูปที่ 1 การต่อ DG เข้า Grid ผ่านอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของ DG ต่อเข้า Grid ผ่านอินเวอร์เตอร์

โดยทั่วไปสามารถสันนิษฐานได้ว่าโหลดเป็นโครงสร้างของวงจร RLC ขนาน และสามารถแปลงวงจรในรูปที่ 1 เป็นวงจรสมมูลในรูปที่ 2 [4],[5]

จากรูปที่ 2 จะเห็นโหนด “PCC” หรือ จุด PCC ซึ่งจุดนี้เป็นจุดที่จะทำการวัดค่าต่าง ๆ ทั้งก่อนและหลังการเกิด

สภาวะการแยกตัวอิสระ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกัน

เมื่อ กริดของการไฟฟ้า ต่อเข้ามา (S_2 is closed) เพื่อจ่ายโหลด $P + jQ$ จะไหลจาก DG system ผ่านจุด “PCC” และ $P_{load} + jQ_{load}$ จะไหลจากจุด “PCC” เข้าไปสู่โหลด โดยที่ กำลังไฟฟ้าที่มาจาก กริดของการไฟฟ้า เข้าสู่จุด “PCC” คือ $\Delta P + j\Delta Q$ ดังนั้นสามารถวิเคราะห์ได้ดังสมการที่ (1)

$$\begin{aligned} P_{load} &= P + \Delta P \\ Q_{load} &= Q + \Delta Q \end{aligned} \quad (1)$$

มุมของโหลด ความถี่รีโซแนนซ์ และแฟกเตอร์คุณภาพ ดังสมการที่ (2)

$$\begin{aligned} |z| &= \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right)^2}} \\ \phi_{load} &= \tan^{-1}\left[Q_f \left(\frac{f_0}{f} - \frac{f}{f_0}\right)\right] \\ f_0 &= \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \\ Q_f &= R\sqrt{\frac{C}{L}} \end{aligned} \quad (2)$$

วิเคราะห์แล้วได้ พื้นที่เฝ้าการตรวจจับของกำลังไฟฟ้าจริง

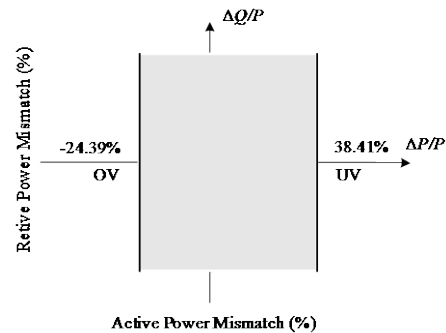
$$\left(\frac{V}{V_{max}}\right)^2 - 1 \leq \frac{\Delta P}{P} \leq \left(\frac{V}{V_{min}}\right)^2 - 1 \quad (3)$$

จาก IEC 62116 กำหนดค่า $V_{max} = 115\%$, $V_{min} = 85\%$ แทนค่าที่ได้ในสมการที่ 3 [1] (เลือกค่า IEC 62116 แทนค่าเพราะ ประเทศไทยใช้ความถี่ 50 Hz ซึ่งมาตรฐานที่เลือกนี้ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับความถี่ไม่ได้ระบุถึงความถี่ไว้อย่างเฉพาะเจาะจง ซึ่งมาตรฐาน อื่น ๆ มักระบุในส่วนที่ใช้กับความถี่เป็น 60 Hz)

$$-24.39\% \leq \frac{\Delta P}{P} \leq 38.41\%$$

ดังนั้นสามารถวาด พื้นที่เฝ้าการตรวจจับ ได้ดังรูปที่ 3

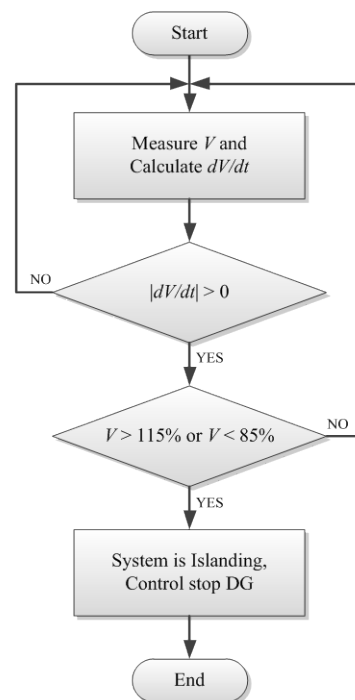
ในรูปที่ 3 แสดงให้เห็นถึงทั้งสามพื้นที่ หากเกิดสภาวะการแยกตัวอิสระเกิดขึ้นเมื่อกำลังไฟฟ้าจริงเข้าไปอยู่ในแต่ละพื้นที่ที่จะเกิดเหตุการณ์ต่าง ๆ กันคือ กรณี $\Delta P/P < -24.39\%$ จะเกิด แรงดันเกิน (OV) กรณี $-24.39\% \leq \Delta P/P \leq 38.41\%$ จะเกิด แรงดันใกล้เคียงแรงดันปกติ และ กรณี $\Delta P/P > 38.41\%$ จะเกิด แรงดันต่ำ (UV)



รูปที่ 3 พื้นที่เฝ้าการตรวจจับของ OUV

3. ขั้นตอนการแก้ปัญหาการแยกตัวอิสระ

ในส่วนนี้จะแสดงให้เห็นถึง ฟังก์ชันขั้นตอนการแก้ปัญหาการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระของ เทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ ก่อนนำไปเขียนโปรแกรมในบล็อกของ Matlab/Simulink



รูปที่ 4 ขั้นตอนของเทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ

จากรูปที่ 4 สามารถอธิบายแต่ละขั้นตอนได้ดังนี้ เริ่มจากระบบจะทำการวัดแรงดัน ณ จุด PCC (V_{PCC}) ในทุก ๆ คาบเวลา และทำการคำนวณ dV/dt ของ V_{PCC} ต่อมาเปรียบเทียบ $|dV/dt| > 0$ หรือไม่ หากมากกว่าจะดำเนินการในขั้นตอนต่อไป แต่หากไม่มากกว่าจะเป็นการกลับไปเริ่มต้นใหม่ตั้งแต่ขั้นตอนแรก (ในทางปฏิบัติ เนื่องจากระดับของแรงดันมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยอยู่

เสนอตั้งนั้นการกำหนดการเปรียบเทียบค่าอาจไม่ใช่ศูนย์ ซึ่งควรจะมีค่ามากกว่าศูนย์เล็กน้อย นอกจากนี้ยังสามารถใช้ความถี่แทนที่แรงดันในการเปรียบเทียบ)

ในขั้นตอนต่อมาจะทำการเปรียบเทียบ $V > 115\%$ (ถ้ากำหนดแรงดันก่อนการเกิดสภาวะการแยกตัวอิสระให้คงที่เท่ากับ 220 V จะได้ $220 \times 115\% = 253$ V) หรือ $V < 85\%$ ($220 \times 85\% = 187$ V) หรือไม่ ถ้ามากกว่าหรือน้อยกว่าตามเงื่อนไข จะกระทำในขั้นตอนต่อไปคือ ระบบควบคุมจะทำการปลด DG ออกจากโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลัง แต่ถ้าไม่เป็นจริงจะไปเริ่มต้นใหม่ตั้งแต่ขั้นตอนแรก

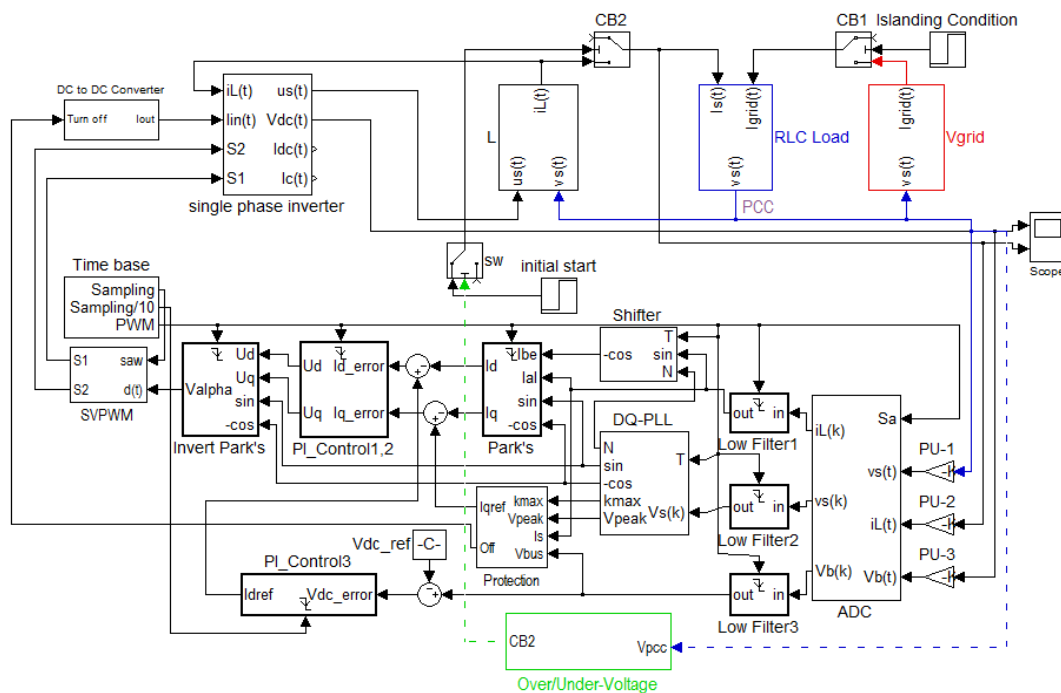
4. เทคนิคการตรวจจบบการแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำด้วย Matlab/Simulink

ในหัวข้อนี้จะเป็นการสาธิตการทำงานของเทคนิคการตรวจจบบการแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำด้วย Matlab/Simulink โดยแบบจำลองที่ใช้ในการสาธิตแสดงใน

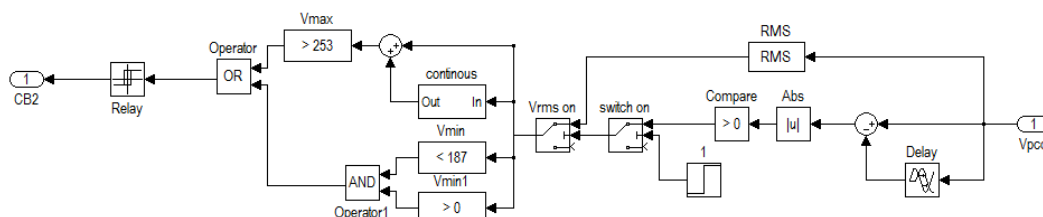
รูปที่ 5 เป็นแบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส สำหรับเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่แรงดัน 220 V_{rms} / 50 Hz ขนาดกำลังด้านเอาต์พุต 1.5 kW [6] ส่วนโหลดที่ใช้ในแบบจำลองเป็นการขนาน RLC ที่มีค่าที่ และความถี่โชนแนซของโหลดเท่ากับความถี่ของโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลัง ดังเหตุในรูปที่ 5 จะมีบล็อกที่เชื่อมต่อบล็อกอื่น ๆ เป็นเส้นปะอยู่หนึ่งบล็อกเพื่อแสดงว่าในการจำลองการทำงานจะมีทั้งการใช้และไม่ใช้บล็อกต่อต้านการแยกตัวอิสระ

ในรูปที่ 6 แสดงภายในบล็อกของเทคนิคการตรวจจบบการแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ ซึ่งเป็นบล็อกที่อยู่ในรูปที่ 5 การเขียนโปรแกรมภายในบล็อกมาจากขั้นตอนตามรูปที่ 4

การจำลองการทำงานแบ่งเป็น 3 กรณี ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 3 โดยสามารถอธิบาย ทั้ง 3 กรณี ได้ดังนี้ กรณี $\Delta P/P < -24.39\%$ จะเกิดขึ้นเมื่อ กำลังไฟฟ้าจริงของ DG



รูปที่ 5 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส สำหรับเชื่อมต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้วย Matlab/Simulink



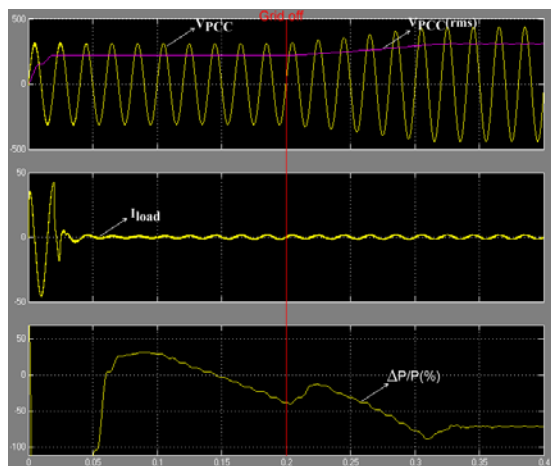
รูปที่ 6 บล็อกของเทคนิคการตรวจจบบการแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ [7]

(P) มีปริมาณมากกว่า กำลังไฟฟ้าจริงของโหลด (P_{load}) มาก หากเกิดการแยกตัวอิสระขึ้น แรงดัน V_{PCC} จะมีค่ามากกว่า 253 V กรณี $-24.39\% \leq \Delta P/P \leq 38.41\%$ จะเกิดขึ้นเมื่อ กำลังไฟฟ้าจริงของ DG (P) มีค่าใกล้เคียงกับ กำลังไฟฟ้าจริงของโหลด (P_{load}) หากเกิดการแยกตัวอิสระขึ้น แรงดัน V_{PCC} จะมีค่าไม่มากกว่า 253 V และไม่น้อยกว่า 187 V กรณี $\Delta P/P > 38.41\%$ จะเกิดขึ้นเมื่อ กำลังไฟฟ้าจริงของ DG (P) มีปริมาณน้อยกว่า กำลังไฟฟ้าจริงของโหลด (P_{load}) มาก หากเกิดการแยกตัวอิสระขึ้น แรงดัน V_{PCC} จะมีค่าน้อยกว่า 187 V

จากนี้จะแสดงผลการทำงานของการทำงานของใช้เทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ ในการต่อต้านการแยกตัวอิสระ โดยในการจำลองการทำงานจะสร้างสถานะการแยกตัวอิสระให้เกิดขึ้น (Grid หยุดจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่โหลด) ณ เวลา 0.2 s

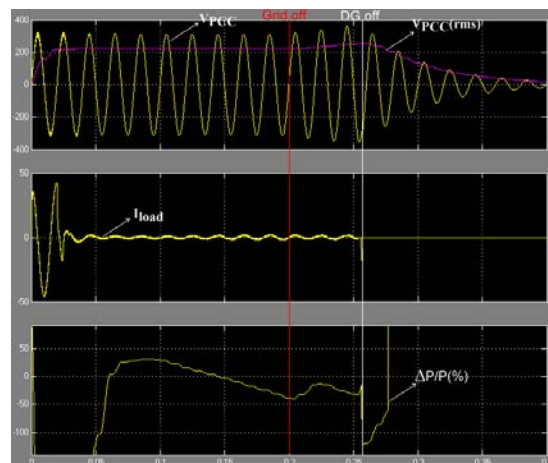
ก). กรณี $\Delta P/P < -24.39\%$

ในสภาวะปกติแรงดันและความถี่จะคงที่ เมื่อมีเหตุการณ์ผิดปกติเกิดขึ้นจึงจะส่งผลกระทบต่อแรงดันและความถี่ ในที่นี้เหตุการณ์ผิดปกติที่จะสร้างให้เกิดขึ้นคือการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ ณ เวลา 0.2 s



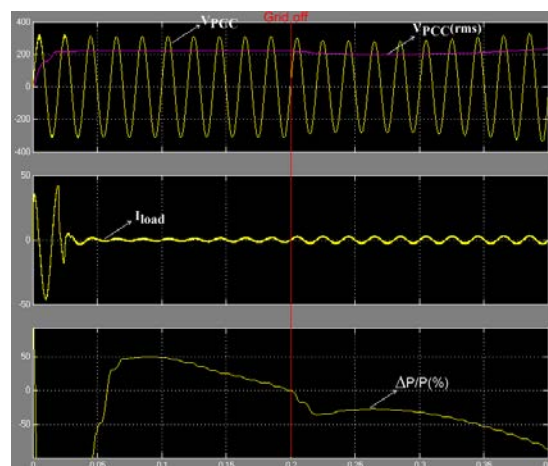
รูปที่ 7 กรณี $\Delta P/P < -24.39\%$ ไม่มีบล็อกต่อต้าน

รูปที่ 7 แสดงภายหลังสภาวะการแยกตัวอิสระเกิดขึ้น ณ เวลา 0.2 s ระดับของแรงดันจะเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากอยู่ในขอบเขต $\Delta P/P < -24.39\%$ จึงทำให้ $V_{PCC} > 253\text{ V}$ ส่วนรูปที่ 8 แสดง กรณี $\Delta P/P < -24.39\%$ และมีบล็อกต่อต้านการแยกตัวอิสระ จะเห็นได้ว่า สามารถหยุดการจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่โครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังที่เวลา 0.257 s หรือ หยุดได้ภายใน 3 รูปคลื่น นับแต่เกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ

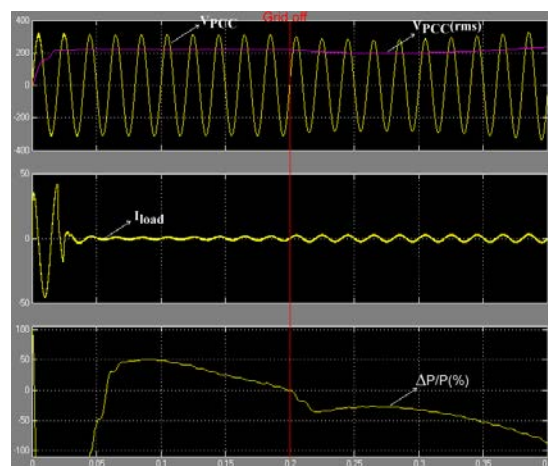


รูปที่ 8 กรณี $\Delta P/P < -24.39\%$ มีบล็อกต่อต้าน

ข). กรณี $-24.39\% \leq \Delta P/P \leq 38.41\%$



รูปที่ 9 กรณี $-24.39\% \leq \Delta P/P \leq 38.41\%$ ไม่มีบล็อกต่อต้าน

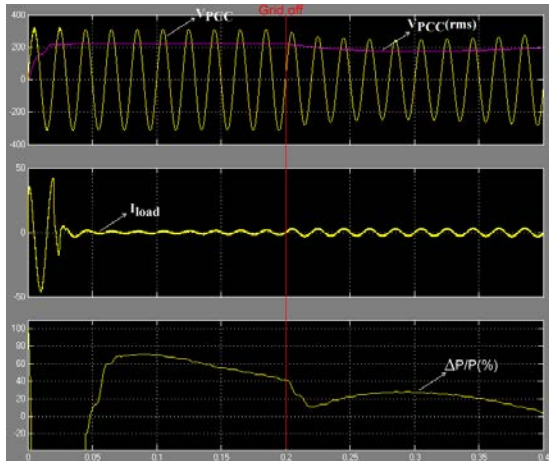


รูปที่ 10 กรณี $-24.39\% \leq \Delta P/P \leq 38.41\%$ มีบล็อกต่อต้าน

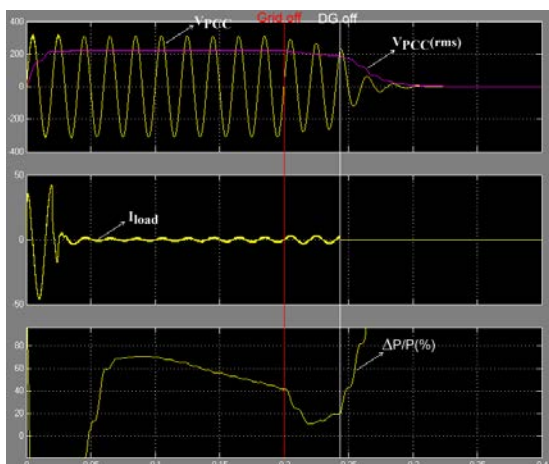
ในกรณีนี้จะเห็นได้ว่าทั้งรูปที่ 9 และรูปที่ 10 มีความคล้ายคลึงกัน เนื่องจากภายหลังการเกิดการแยกตัวอิสระ ณ เวลา 0.2 s แรงดัน V_{PCC} มีค่าไม่มากกว่า 253 V และไม่น้อยกว่า 187 เพราะ $\Delta P/P$ อยู่ในพื้นที่ที่ได้รับการตรวจจับ ดังนั้นการมีบล็อกการต่อต้านการแยกตัวอิสระก็ไม่

สามารถจะหยุดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระนี้ได้ ซึ่งถือได้ว่าเป็นจุดอ่อนของเทคนิคนี้

ค). กรณี $\Delta P/P > 38.41\%$



รูปที่ 11 กรณี $\Delta P/P > 38.41\%$ ไม่มีบล็อกต่อต้าน



รูปที่ 12 กรณี $\Delta P/P > 38.41\%$ มีบล็อกต่อต้าน

รูปที่ 11 แสดงภายหลังสถานะการแยกตัวอิสระ ณ เวลา 0.2 s ระดับของแรงดันจะลดลงเนื่องจากอยู่ในขอบเขตที่ $\Delta P/P > 38.41\%$ จึงทำให้ $V_{PCC} < 187\text{ V}$ ส่วนรูปที่ 12 แสดง กรณี $\Delta P/P > 38.41\%$ และมีบล็อกต่อต้านการแยกตัวอิสระ จะเห็นได้ว่า สามารถหยุดการจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบที่เวลา 0.244 s หรือ หยุดได้ภายใน 3 วัฏคลื่น นับแต่เกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ

5. สรุป

เทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถต่อต้านการแยกตัวอิสระได้อย่างรวดเร็ว ไม่มีการฉีดสัญญาณรบกวนไปยังโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลัง การนำไปดำเนินการใช้งานไม่ยาก แต่ยังมีจุดอ่อนเพราะมี

พื้นที่ใ้การตรวจจับกว้าง คือ ถ้ากำลังไฟฟ้าจริงเข้าไปสู่ขอบเขต $-24.39\% \leq \Delta P/P \leq 38.41\%$ เมื่อสถานะการแยกตัวอิสระเกิดขึ้นเทคนิคนี้ไม่สามารถตรวจจับสถานะการแยกตัวอิสระได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ผศ. ดร.พิสิษฐ์ ลีวชนกุล และนายสาขาร ม่วงโพธิ์เงิน สำหรับคำแนะนำต่าง ๆ ในการสร้างแบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส สำหรับเชื่อมต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้วย Matlab/Simulink

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Yingram, "Passive Islanding Detection Techniques of Anti-Islanding for Grid-Connected Distributed Generation," *Ladkrabang Engineering Journal*, Vol.30, No.3, pp.19-24, September, 2556.
- [2] IEEE recommended practice for grid interface of photovoltaic (PV) systems, IEEE Std. 929, 2000.
- [3] D. Velasco, C.L. Trujillo, G. Garcera and E. Figueres, "Review of anti-islanding techniques in distributed generators," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, pp.1608–1614, February 2010.
- [4] Zhihong Ye, Amol Kolwalkar, Yu Zhang, Pengwei Du and Reigh Walling, "Evaluation of Anti-Islanding Schemes Based on Nondetection Zone Concept," *IEEE Transactions on Power Electronics* 19, pp.1171-6, September 2004.
- [5] M. Valentini, S. Munk-Nielsen, F. Valderrey Sanchez and U. Martinez De Estibariz, "A New Passive Islanding Detection Method for Grid-Connected PV Inverters," *International Symposium on Power Electronics*, 2008.
- [6] S. Muangpongoen, "Anti-islanding for Grid-connected Single Phase Inverter," M.Eng Thesis, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand, 2554.
- [7] M. Yingram, "Passive Islanding Detection Techniques of Anti-Islanding for Grid-Connected Distributed Generation on Matlab/Simulink," *Research Report*, Rajabhat Chaiyaphum University, Thailand, September 2557.

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิผู้พิจารณาบทความฉบับนี้

ทางกองบรรณาธิการวิศวกรรมลาดกระบัง ขอขอบพระคุณท่านผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการพิจารณาบทความด้วยความขอบคุณยิ่ง และหวังว่าคงได้รับความอนุเคราะห์จากท่านด้วยดีในโอกาสต่อไป

รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา

ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์

รศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง

ผศ.ดร.อภินันท์ นัมคณิสสรณ์

ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์

ผศ.รีณฤติ เบญจางคประเสริฐ

ดร.จรัส พิทักษ์ศฤงคาร

ผศ.ดร.นันทวัฒน์ จรัสโรจน์ธนเดช

รศ.แหลมทอง เหล่าคงถาวร

ผศ.ดร.พิชญ์ สุพรรณกุล

ดร.กิตติวัฒน์ สิริสุขเกษม

รศ.ดร.อิสระชัย งามหุ

ดร.ชาย ชมภูอินไหว

รศ.ดร.มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์

ดร.วรวรรณ นาคะวิโร

ดร.สมภาพ ผลไม้

ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร

ดร.สุรัชย์ ชัยทัศนีย์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผศ.ดร.ชัยวัฒน์ ประไพยนา

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ

ดร.ศราวุธ ชัยมูล

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ

ผศ.ดร.เหมือนมาศ วิเชียรสินธุ์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รศ.ดร.มานพ เจริญไชยตระกูล

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดร.สุรียน เปรมปราโมทย์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผศ.ดร.พัชราภรณ์ จิตติวงศ์เสวต

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ดร.จักราวุธ เดชวิเศษ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและ

คอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับบทความ

“บทความทางวิชาการ” หมายความว่า บทความที่เขียนขึ้นในลักษณะวิเคราะห์ วิจัย หรือเสนอแนวความคิดใหม่ ๆ จากพื้นฐานทางวิชาการที่ได้เรียบเรียงจากผลงานทางวิชาการของตนเอง หรือของผู้อื่น หรือเป็นบทความทางวิชาการที่เขียนขึ้นเพื่อเป็นความรู้ทั่วไปสำหรับประชาชน

“บทความวิจัย” หมายความว่า บทความที่มีลักษณะเป็นเอกสารที่มีรูปแบบของการวิจัยตามหลักวิชาการ เช่น มีการตั้งสมมติฐาน หรือมีการกำหนดปัญหาที่ชัดเจนสมเหตุสมผล โดยจะต้องระบุถึงวัตถุประสงค์ที่ชัดเจนแน่นอน มีการค้นคว้าอย่างมีระบบ มีการรวบรวมข้อมูลพิจารณาวิเคราะห์ ตีความ และสรุปผลการวิจัยที่สามารถให้คำตอบบรรลุวัตถุประสงค์ หรือหลักการบางอย่างที่จะนำไปสู่ความก้าวหน้าทางวิชาการ หรือการนำวิชาการนั้นมาประยุกต์ใช้

รูปแบบในการพิมพ์บทความ

บทความที่เสนอการจัดพิมพ์ด้วย **Microsoft Word** (หรือซอฟต์แวร์อื่นที่ขนาดตัวอักษรกำหนดได้ใกล้เคียงกัน) ขนาดกระดาษที่จัดพิมพ์จะเป็นขนาด A4 โดยกำหนดขอบ (Margins) ในการตั้งหน้ากระดาษ (Page Setup) ดังนี้

- ระยะบน (Top Margin) 1" หรือ 2.54 ซม.
- ระยะล่าง (Bottom Margin) 1" หรือ 2.54 ซม.
- กั้นซ้าย (Left Margin) 1" หรือ 2.54 ซม.
- กั้นขวา (Right Margin) 1" หรือ 2.54 ซม.

การแบ่งส่วน (Section) ควรแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนแรก กำหนด (format) เป็นคอลัมน์เดี่ยว ส่วนที่สอง กำหนดเป็น 2 คอลัมน์ โดยระยะห่างระหว่างคอลัมน์เป็น 0.26" หรือ 0.7 ซม. เนื้อเรื่อง ผู้เขียนและผู้ร่วมงาน สถานที่ทำงาน และบทคัดย่อจะอยู่ในส่วนแรก ส่วนอื่น ๆ ที่เหลือของบทความจะอยู่ในส่วนที่สอง

ขนาดตัวอักษร

รูปแบบของตัวอักษรให้ใช้ **Angsana UPC** สำหรับบทความที่มีภาษาไทยปนกับภาษาอังกฤษ และให้ใช้รูปแบบตัวอักษร **Times New Roman** สำหรับบทความซึ่งเป็นภาษาอังกฤษล้วน ขนาด (Pica Size) ของแบบตัวอักษรแบบ Angsana UPC กำหนดดังนี้ (หากเป็นรูปแบบ Times New Roman ให้ใช้ขนาดของตัวอักษรที่มีความสูงเท่ากัน)

- ชื่อเรื่องทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
ขนาด 26 ตัวหนา
- ชื่อผู้เขียนและผู้ร่วมงาน
ขนาด 14 ตัวปกติ
- สถานที่ทำงาน
ขนาด 12 ตัวปกติ
- คำว่า “บทคัดย่อ”
ขนาด 16 ตัวหนา
- ส่วนของเนื้อความในบทคัดย่อ และส่วนของเนื้อความทั้งหมด
ขนาด 14 ตัวปกติ
- คำว่า “Abstract”
ขนาด 16 ตัวหนา
- ส่วนของเนื้อความใน Abstract
ให้ใช้ Angsana UPC ขนาด 16 ตัวปกติ

- หัวข้อและหมายเลขประจำหัวข้อ
ขนาด 16 ตัวหนา
- หัวข้อย่อยและหมายเลขประจำหัวข้อย่อย
ขนาด 14 ตัวหนา
- คำว่า “กิตติกรรมประกาศ” หรือ “Acknowledgement”
ขนาด 16 ตัวหนา
- คำว่า “เอกสารอ้างอิง” หรือ “Reference”
ขนาด 16 ตัวหนา

การพิมพ์บทความ

ให้ใช้ระยะห่างบรรทัดปกติ (Single space) เมื่อขึ้นหัวข้อใหม่ให้เว้น 1 บรรทัด ในกรณีเมื่อเอกสารจัดพิมพ์ด้วย Times New Roman ทั้งหมด ให้ใช้ระยะห่างบรรทัดเป็นหนึ่งบรรทัด (Single space) หรือ หนึ่งบรรทัดครึ่ง

ชื่อบทความ ชื่อผู้เขียน และสถานที่ทำงาน

ให้จัดพิมพ์ในตำแหน่งกลางหน้ากระดาษ

บทคัดย่อและเนื้อเรื่อง

ให้จัดพิมพ์แบบเต็มขอบ (Left & Right Justified)

คำสำคัญ (Keywords)

ให้ใส่คำสำคัญ 3 – 5 คำ ซึ่งเกี่ยวข้องกับบทความที่นำเสนอ โดยให้จัดพิมพ์ได้บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

หัวข้อและหมายเลขหัวข้อ

ให้จัดพิมพ์แบบชิดซ้าย (Right Justified)

สมการ หรือ พจน์ทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน

ควรเขียนโดยใช้ **Equation Editor** (รวมอยู่ใน Microsoft Word แล้ว) โดยจัดแยกบรรทัด และมีเลขกำกับสมการซึ่งอยู่ในวงเล็บเล็ก

การส่งบทความ

บทความที่จะส่งเปิดรับทั้งจากบุคคลภายในและภายนอกสถาบันฯ โดยเนื้อหาของบทความมีความยาวไม่เกิน 6 หน้า 2 คอลัมน์ โดยติดต่อขอส่งได้ที่ E-mail : kmitl.eng.jnl@gmail.com ส่วนวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต บทความจะได้รับการกลั่นกรองโดยผู้อ่านที่ทรงคุณวุฒิในสาขานั้น ๆ และเมื่อบทความได้รับการแก้ไข (หากมี) อย่างเหมาะสม ผู้เขียนต้องส่งต้นฉบับ 1 ชุด และซีดีข้อมูลบทความอีก 1 ชุด

แบบฟอร์มการส่งบทความ

เลขที่อ้างอิง.....

วันที่ส่ง.....

ชื่อบทความ (ภาษาไทย).....

.....

ชื่อบทความ (ภาษาอังกฤษ).....

.....

ประเภทบทความ



บทความวิชาการ



บทความวิจัย

Keywords (คำสำคัญ).....

.....

ชื่อ - นามสกุล ผู้เขียน (ภาษาไทย) และ (ภาษาอังกฤษ)

1..... 1.....

2..... 2.....

3..... 3.....

4..... 4.....

5..... 5.....

6..... 6.....

จำนวนหน้า.....หน้า

ชื่อและที่อยู่ผู้เขียนที่สามารถติดต่อได้

ชื่อ - นามสกุล.....

ที่อยู่.....

.....

เบอร์โทรศัพท์.....

เอกสารประกอบการส่งบทความ

บทความต้นฉบับ 1 ชุด และ

สำเนา 3 ชุด (พร้อมลบชื่อผู้แต่งและที่อยู่)

แบบฟอร์มสั่งซื้อวัสดุสารลาดกระบัง และ สมุดรสมาชิก

ชื่อ.....นามสกุล.....

สถานที่จัดส่งหนังสือ.....

จังหวัด.....รหัสไปรษณีย์.....โทรศัพท์.....

สมุดรสมาชิกวัสดุสารลาดกระบัง

- | | |
|--|--|
| ☐ ปี 2553 ค่าสมัคร 200 บาท | ☐ ปี 2556 ค่าสมัคร 200 บาท |
| ☐ ปี 2554 ค่าสมัคร 200 บาท | ☐ ปี 2557 ค่าสมัคร 200 บาท |
| ☐ ปี 2555 ค่าสมัคร 200 บาท | ☐ ปี 2558 ค่าสมัคร 200 บาท |

หมายเหตุ ปีละ 4 ฉบับ (รวมค่าจัดส่ง)

ต้องการซื้อวัสดุสารลาดกระบัง

- | | |
|---|--|
| ☐ เล่มที่ 1 / 2557 ราคา 100 บาท | ☐ เล่มที่ 1 / 2558 ราคา 100 บาท |
| ☐ เล่มที่ 2 / 2557 ราคา 100 บาท | ☐ เล่มที่ 2 / 2558 ราคา 100 บาท |
| ☐ เล่มที่ 3 / 2557 ราคา 100 บาท | ☐ เล่มที่ 3 / 2558 ราคา 100 บาท |
| ☐ เล่มที่ 4 / 2557 ราคา 100 บาท | ☐ เล่มที่ 4 / 2558 ราคา 100 บาท |
| ☐ อื่น ๆ ปีที่.....ฉบับที่.....ประจำเดือน.....พ.ศ..... | |

รวมรายการทั้งหมด.....รายการ เป็นเงิน.....บาท

ชำระค่าสั่งซื้อโดย

- ☐ เงินสด แผนกตำรา วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....
- ☐ ธนาคารที่ส่งจ่ายในนาม แผนกตำรา
เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง
กรุงเทพมหานคร 10520 ที่ทำการเคาน์เตอร์บริการเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 00016
- ☐ ผ่านบัญชีออมทรัพย์ธนาคารไทยพาณิชย์ สาขาซอยเทคโนโลยีฯ เจ้าคุณทหาร
เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง
กรุงเทพมหานคร 10520
ชื่อบัญชี “แผนกตำราและประชาสัมพันธ์” เลขที่ 088 – 2 15272 – 2

ถ่ายสำเนาใบสั่งซื้อ และส่งเอกสารการชำระค่าสั่งซื้อมาที่ :

งานบริหารการวิจัย ส่วนสนับสนุนวิชาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทร. 0-2329-8000 ต่อ 3464, 3465

(ท่านสามารถแฟกซ์ใบสั่งซื้อ และ เอกสารการชำระค่าสั่งซื้อมาที่เบอร์แฟกซ์ : 0-2329-8317

การจัดส่งหนังสือจะรวดเร็วขึ้น)

Ladkrabang Engineering Journal

The Ladkrabang Engineering Journal is a technical journal belonging to the Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, (KMITL).

Contents:

The journal contains research reports, articles concerning development work and research activities carried out by the faculty staff. The objectives are to publicize and promote the research contributions and innovative works in the field of engineering.

Frequency:

The journal is published quarterly.

Policy:

Articles and reports should have engineering research values whether containing substantial supported theories, innovative works, substantial experiment results and/or fulfilled with useful and constructive discussions or reviews standardized to regional or international acceptance.

Manuscripts:

Four copies not exceed 6 two-column-pages (one copy with author names, three copies without author names) of either Thai or English manuscript are to be submitted in camera ready form. To ensure that all papers are at the same standard, authors are asked to prepare their manuscripts in computerized format. Microsoft Word for windows[®] is recommended as a text processor. Others associated components such as graphs or figures should be prepared using windows-based packages.

Manuscripts are to be reviewed by at least 3 referees who are specialists in that fields. Comments and suggestions (if any) are summarized before they are passed to authors. Revised form of the manuscripts have to be resubmitted with a copy of the manuscript in a disk file.

For convenience in printing and to common standard in publication, submitted manuscripts should conform to the following orders.

Titles: Should be given in both Thai and English.

Author and co-authors: Are given without any title.

Correspondent address: Specify short address of authors. If authors are students, institution address (department, faculty and institution) is required.

Abstract: Should be given in both Thai and English.

Main theme: Should contain the following sections.

- 1.Introduction
- 2.Theory
- 3.Construction and experimental procedures
- 4.Experimental results and discussions
- 5.Conclusion or Summary

Acknowledgement: (if required)

References: Should follow the pattern given below.

- [1] P. Choeksuwan and S. Choomchuay, "The Economics Analysis of RFID Implementation in Logistic," Ladkrabang Engineering Journal, Vol.30, No.1, pp.7-12, March, 2556.
- [2] I. M. Filanovsky and H.P. Baltes, "Simple CMOS Analog Square-Rooting and Squaring Circuits," IEEE Trans. Circuits and Systems, Vol.39, No.4, pp.312-315, Sept., 1992.
- [3] R. E. Blahut, Theory and Practice of Error Control Codes, Addison-Wesley, Reading, MA, 1983.

Submission:

1. Submit two pdf files Manuscript with and without authors / affiliation at the first page.
2. Submit the pdf file of the paper submission form.

At E-mail : kmitl.eng.jnl@gmail.com

Published by

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

Tel : (662) 329-8000 Ext 3464,3465

Fax : (662) 329-8317

Advisors

Dean of Engineering

Assoc.Prof. Dr.Komsan Maleesee

Editor-in-chief

Assoc.Prof. Dr. Issarachai Ngamroo

Editorial Staff

Mr.Kamol Wadkhean

Cover Design and Photo Books

Mrs.Atisuda Chanvikorn

Liaise & Member Relationships

Create Original Artwork & Proofreading

Distributed by

Faculty of Engineering,

Mrs.Atisuda Chanvikorn

Tel : (662) 329-8317