

“วิศวกรรมลาดกระบ้ง”

วิศวกรรมลาดกระบ้งเป็นวารสารทางวิชาการซึ่งจัดทำโดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบ้ง 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) และเพื่อให้รูปแบบการพิมพ์ของทุกบทความมีมาตรฐานเดียวกันจึงขอให้ผู้เขียนจัดเตรียมเอกสารโดยใช้เวิร์ดโปรเซสเซอร์ **Microsoft Word for Windows** สำหรับรูปภาพประกอบ หากมีใช้ภาพถ่ายก็ควรเขียนหรือสเก็ตโดยใช้ซอฟต์แวร์ ที่สนับสนุนการทำงานในระบบ Windows

บทความที่น่าสนใจเสนอเพื่อตีพิมพ์ ควรประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ตามลำดับ ดังนี้

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

กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี)

เอกสารอ้างอิง การอ้างในบทความให้ใช้หมายเลขประจำเอกสารหรือบทความที่อ้างอิง โดยตัวเลขจะอยู่ในวงเล็บใหญ่ โดยรูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิงจะเป็นดังนี้

- [1] P. Choeysuwan 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.

การส่งบทความ

บทความที่จะส่งเปิดรับทั้งจากบุคคลภายในและภายนอกสถาบันฯ โดยเนื้อหาของบทความมีความยาวไม่เกิน 8 หน้า 2 คอลัมน์ ส่วนหน้าที่ 9 เป็นสันไป ต้องเสียค่าตีพิมพ์หน้าละ 500 บาท โดยติดต่อส่งได้ที่ E-mail : kmitl.eng.jnl@gmail.com ส่วนวิศวกรรมลาดกระบ้ง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบ้ง บทความจะได้รับการกลั่นกรองโดยผู้อ่านที่ทรงคุณวุฒิในสาขานั้น ๆ และเมื่อบทความได้รับการแก้ไข (หากมี) อย่างเหมาะสม ผู้เขียนจะต้องส่งต้นฉบับ 1 ชุด และซิดีข้อมูลบทความอีก 1 ชุด

เจ้าของ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบ้ง

กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ (662) 329-8000 # 3464, 3465

โทรสาร (662) 329-8317

ที่ปรึกษา

คณบดี

รศ.ดร.กมลสัน มาลีสี

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ศ.ดร.อิสระชัย งามหุ

กองบรรณาธิการ

นายโกลม วาดเขียน

ออกแบบปกและรูปเล่ม

นางอาทิตย์ดา ขาญวิกรม์

ติดต่อประสานงานและสมาชิกสัมพันธ์

จัดทำต้นฉบับ Artwork

พิสูจน์อักษร

จัดจำหน่ายโดย

คณะวิศวกรรมศาสตร์

นางอาทิตย์ดา ขาญวิกรม์

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 กิตติสุขภกร

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.เควิต 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 เฉลยหาญ

สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง



วิศวกรรมลาดกระบัง

Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วันที่ 30 พฤศจิกายน 2558

เรื่อง ขอเปลี่ยนแปลงเพิ่มเติมเนื้อหาของบทความวิศวกรรมลาดกระบังให้มีความยาวจำนวนหน้าเพิ่มมากขึ้น

เรียน อาจารย์ นักศึกษา นักวิจัย และผู้ที่สนใจ

กองบรรณาธิการทางวิศวกรรมลาดกระบัง ขอเรียนแจ้งให้ท่านทราบว่า ขอเปลี่ยนแปลงเพิ่มเติมเนื้อหา
ของบทความให้มีความยาวจำนวนหน้าเพิ่มมากขึ้นจากเดิม ความยาวไม่เกิน 6 หน้า 2 คอลัมน์ เปลี่ยนเป็น ความยาวไม่
เกิน 8 หน้า 2 คอลัมน์ หากจำนวนหน้าของเนื้อหามากกว่า 8 หน้าขึ้นไป ในส่วนของหน้าที่ 9 เป็นต้นไป คิดราคาค่า
ตีพิมพ์เพิ่มหน้าละ 500 บาท (ห้าร้อยบาทถ้วน) โดยผู้แต่งต้องชำระเงินค่าตีพิมพ์ในจำนวนหน้าที่เกิน 8 หน้า หลังจาก
บทความแก้ไขสมบูรณ์แล้ว และได้รับหนังสือการตอบรับการตีพิมพ์จากงานวารสารวิศวกรรมลาดกระบัง

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ จักขอบพระคุณยิ่ง

ขอแสดงความนับถือ

Handwritten signature of Dr. Issarachai Ngamru.

(ศ.ดร.อิสระชัย งามหุ)
หัวหน้ากองบรรณาธิการ

งานบริหารการวิจัย (วารสารวิศวกรรมลาดกระบัง) คณะวิศวกรรมศาสตร์

โทร. / โทรสาร : 02-329-8317

กระบวนการอบอ่อนหลังความเครียดต่ำ-หนึ่งขั้น สำหรับการเพิ่ม สัดส่วนขอบเกรนแบบ low- Σ CSLB ในเหล็กกล้าไร้สนิม 316L

Single-Step Small Strain Annealing for Low- Σ CSLB Fraction Enhancement in 316L Austenitic Stainless Steels

อัญชลี บุญเลิศ อรุณา สันตวิธ* กรรณชัย กัลยาศิริ** ปัญญา ชันธุ์สุวรรณ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

*ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

**ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาผลกระทบของกระบวนการอบอ่อนหลังความเครียดต่ำ-หนึ่งขั้น ในเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ต่อการเพิ่มสัดส่วนขอบเกรนชนิดพิเศษ Low- Σ coincident site lattice boundary ที่มีค่าซิกม่าอยู่ระหว่าง 3 ถึง 37 ตามเงื่อนไขของ Brandon โดยใช้เทคนิค Electron back scatter diffraction ผลการทดลองพบว่าการให้ความเครียดประมาณ 3% กับชิ้นงานก่อนการอบอ่อนที่ 1000°C สามารถเพิ่มสัดส่วนขอบเกรนชนิดพิเศษ (F_{SB}) จากค่าเฉลี่ยตลอดความหนาชิ้นงานเดิม 23.6% เป็น 34.5% นอกจากนี้ผลการวัดการกระจายตัวของขอบเกรนแต่ละชนิด (GBCD) ยังแสดงถึงปฏิสัมพันธ์กับการกระจายตัวความเครียดถาวรภายในชิ้นงาน เมื่อเทียบกับผลการกระจายตัวความเครียดถาวรด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

คำสำคัญ : วิศวกรรมขอบเกรน, โคอइनซิเดนซ์ไซต์แลตติส, เหล็กกล้าไร้สนิม 316L

Abstract

This research aims to study the effect of one-step small strain annealing process to enhance the length fraction of special grain boundary (F_{SB}) in 316L austenitic stainless steel. Special grain boundaries were defined by low sigma value ($\Sigma 3$ - $\Sigma 27$) and their length fraction in the materials was evaluated by embedded software of SEM equipped with EBSD capability. Brandon's criterion was employed to distinguish type of grain boundary according to Coincident Site Lattice (CSL) model. The result indicated that 3% pre-strain followed by 1000°C annealing gave a possible increment of F_{SB} from 23.6 to 34.5%. Even though the increment was not satisfactory when compared to other publications this work proposed a possibility to implement FEM simulation to assess the influence of plastic strain variation across the cross section area of the deformed samples to the distribution of Grain boundary character distribution (GBCD).

Keywords : Grain boundary engineering, Coincident Site Lattice, Thermomechanical-process, SS316L

1. บทนำ

วัสดุโครงสร้างในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่เป็นวัสดุประเภทพหุผลึก ประกอบด้วยโครงสร้างของหลายผลึกเชื่อมต่อกันเป็นวัสดุก้อน โดยแต่ละผลึกเรียกว่า “เกรน” แต่ละเกรนจะมีแกนผลึกเฉพาะ เมื่อเกรน 2 เกรนที่มีทิศทางผลึกแตกต่างกันมาเชื่อมต่อกัน จะเกิดพื้นที่ระหว่างเกรน แบบข้อบกพร่อง 2 มิติ เรียกว่า “ขอบเกรน” ณ บริเวณนี้ อะตอมจะเรียงตัวเบี่ยงเบนไปจากโครงสร้างผลึก [1] มีความหนาของชั้นประมาณ $5-10\text{ Å}$ [2] แม้ว่าสัดส่วนโดยปริมาตรของขอบเกรนจะต่ำมาก แต่พฤติกรรมมหภาคบางอย่างของวัสดุกลับถูกกำหนดโดยพฤติกรรมของอะตอมในบริเวณขอบเกรน ดังนั้นความเข้าใจพฤติกรรมของอะตอมในบริเวณขอบเกรน จึงมีบทบาทอย่างยิ่งในการพัฒนาวัสดุวิศวกรรม เมื่อพฤติกรรมนั้นถูกกำหนดด้วยกลไกของอะตอมที่ขอบเกรน

ขอบเกรนมีพลังงานอิสระต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่สูงกว่าพื้นที่ระนาบใดๆของผลึกสมบูรณ์ธาตุเดียว ทั้งนี้เนื่องจากอะตอมบริเวณขอบเกรนจะเรียงตัวแบบอสัณฐาน มีระยะห่างระหว่างอะตอมโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจากระยะห่างระหว่างอะตอมภายในผลึก ทำให้พลังงานพันธะและความเค้นยึดหยุ่นสะสมภายในของโลหะสูงขึ้นด้วย ผลรวมของพลังงานเหล่านี้จะมีค่าแตกต่างกันไปตามมุมที่แกนผลึกทั้ง 2 ทำต่อกัน ขอบเกรนที่มีการเรียงตัวของอะตอมอยู่เข้าสู่ความเป็นผลึกจะมีพลังงานขอบเกรนต่ำ และถูกจัดให้เป็นขอบเกรนชนิดพิเศษ [3, 4] แม้ว่าได้มีการนำเสนอเงื่อนไขดังกล่าวมาก่อนหน้านี้แล้ว แต่แนวความคิดในการเพิ่ม F_{SB} ก็ยังไม่ได้ได้รับความสนใจเท่าที่ควร จนกระทั่งในปี 1988 กระบวนการทางความร้อน-ทางกลได้เพิ่ม F_{SB} ขึ้นจนปรับปรุงคุณสมบัติวัสดุได้สำเร็จ จึงเริ่มนิยามกระบวนการนี้ว่า “วิศวกรรมขอบเกรน” ผลของวิศวกรรมขอบเกรนได้เพิ่มความแข็งแรงความเค้นและการยึดอายุการแตกหักเนื่องจากความเค้น [5-7] การลดการแตกตามขอบเกรนจากการลัดกร่อน [8, 9] การเพิ่มความสามารถในการรับพลังงานก่อนการแตกหัก [10] และการยับยั้งการเกิดเซนต์ไทเทเนียมในเหล็กกล้าไร้สนิมได้อีกด้วย [11, 12]

แบบจำลองโครงสร้างอะตอมภายในขอบเกรนมีหลายชนิด แต่ได้รับความสนใจสูงสุดคือแบบจำลอง CSL เนื่องจากข้อมูลของขอบเกรนสามารถวัดได้โดยตรงด้วยเทคนิค EBSD ซึ่งในปัจจุบัน EBSD ก็เป็นเทคนิคมาตรฐานสำหรับ SEM ที่จะต้องติดตั้งไว้ ขอบเกรนแบบ CSL ยังสามารถแบ่งออกได้อีก 3 ประเภท ได้แก่ (1) Low angle GBs (LAGBs) ซึ่งมีมุมเบี่ยงเบนระหว่างแกนผลึกต่ำกว่า 15° (2) Low- Σ CSLBs ซึ่งมีค่าซิกมาอยู่ตั้งแต่ 3 ถึง 37 หรือขอบเกรนพิเศษ และ (3) High Angle GBs (HAGBs) ซึ่งมีค่าซิกมามากกว่า 37 โดยที่ค่าซิกมาหาได้จากสัดส่วนโดยปริมาตรของหนึ่งหน่วยเซลล์ขอบเกรนต่อปริมาตรของหนึ่งหน่วยเซลล์ผลึก

ค่า F_{SB} ของโลหะผลึกแบบ FCC สามารถถูกวิศวกรรมขอบเกรนให้มีค่าได้สูงถึง 85% ในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 [13] และ 316 [9] ด้วยการอบอ่อนหลังความเครียดต่ำ-หนึ่งขึ้น กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมประกอบด้วย 2 ปัจจัยหลัก ได้แก่ (1) ค่าพลังงานสะสมความเครียดยืดหยุ่น ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร (2) การอบอ่อน หรือกระบวนการทางความร้อน ที่กระตุ้นให้มีการจัดเรียงตัวของอะตอมที่ขอบเกรนใหม่ ได้ โครงสร้างพลังงานต่ำ ไปพร้อมกับพลังงานความเครียดยืดหยุ่นที่ลดลง และในงานวิจัยนี้ เราได้แสดงผลการวิศวกรรมขอบเกรนต่อเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ซึ่งยังไม่ได้มีการศึกษามาก่อน นอกจากนี้ผลของการกระจายตัวของชนิดขอบเกรนจะถูกแปลผลร่วมกับผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของความเครียดแบบถาวรสะสม ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ข้อมูลที่ได้บ่งบอกถึงระดับความหนาแน่นของดิสโลเคชันในส่วนต่างๆ เพื่อเพิ่มความเข้าใจต่อผลกระทบของระดับความเครียดต่อกระบวนการวิศวกรรมขอบเกรน

2. วิธีการทดลอง

การทดลองเริ่มจากการเตรียมโครงสร้างจุลภาคของ SS316L (As-received) มีส่วนประกอบทางเคมี 0.02 C, 17.00 Cr, 10.02 Ni, 2.02 Mo, 1.50 Mn, 0.28 Si, 0.03 P, Fe-Balance (wt%) ชิ้นงานจะถูกอบเพื่อละลายสารมลทินที่ 1100°C เป็นเวลา 1.5 ชม. เพื่อให้ได้โครงสร้าง (Based

Materials, BM) หลังกลึงด้วยการเย็นตัวในน้ำ ก่อนนำไปตัดเป็นชิ้นงานทดสอบ 8x10x25 มม. สำหรับการรีดเย็นแบบลดความหนา (Thickness reduction, TR) ให้มีพลังงานสะสมจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร ชิ้นงาน 3 ชิ้นแรกจะถูกรีดด้วยความเครียดต่ำที่ 3%TR ตามด้วยการอบคืนตัวที่ 900, 1000, 1100°C เป็นเวลา 30 นาที และเย็นตัวในน้ำ ทั้งนี้แต่ละชิ้นงานจะถูกประเมินค่า F_{SB} โดยเทคนิค EBSD เพื่อระบุอุณหภูมิการอบที่ทำให้ค่า F_{SB} สูงสุดแล้ว เพื่อการทดลองซ้ำที่อุณหภูมินั้นในการอบชิ้นงานอีก 2 ชิ้นงาน หลังรีดเย็นที่ 5 และ 10% TR

โครงสร้างจุลภาคจะถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องแสง และโครงสร้างขอบเกรนด้วย Orientation

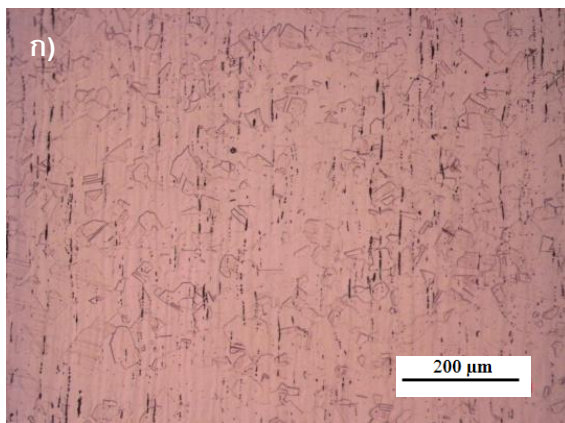
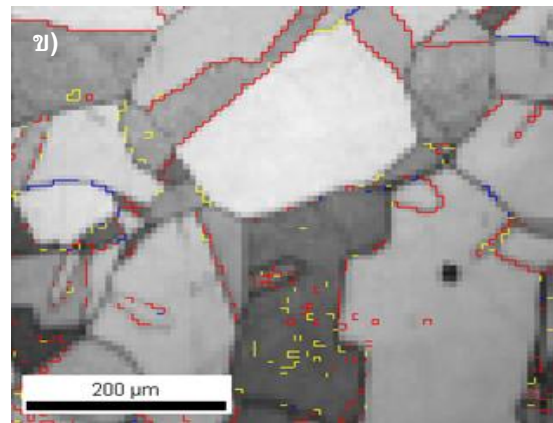


Image Microscope ยี่ห้อ EDAX ที่มาพร้อมกันกับเครื่อง SEM ยี่ห้อ Hitachi รุ่น S3400N โดยอาศัยหลักการหักเหของรังสีเอกซ์กับระนาบของผลึกที่ผิวโลหะ แถบการหักเห Kikuchi ที่ได้สามารถแปลผลกลับทางตัวเลข จนสามารถวิเคราะห์หาทิศทางของแกนผลึกที่กระทำต่อระนาบตั้งฉากพื้นผิวโลหะได้ เมื่อเปรียบเทียบค่าเหล่านี้ของแต่ละคู่เกรนที่อยู่ติดกัน ตามเงื่อนไขของ Brandon $\Delta\theta_{max} = 15\sqrt{\Sigma}^{-1/2}$ [14] เราจะได้ข้อมูลดิบนี้ของแต่ละขอบเกรนตลอดความหนา สำหรับวิเคราะห์ F_{SB} และ GBCD ร่วมกับผลการกระจายตัวค่าความเครียดถาวรตลอดความหนาหลังการรีดเย็นจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

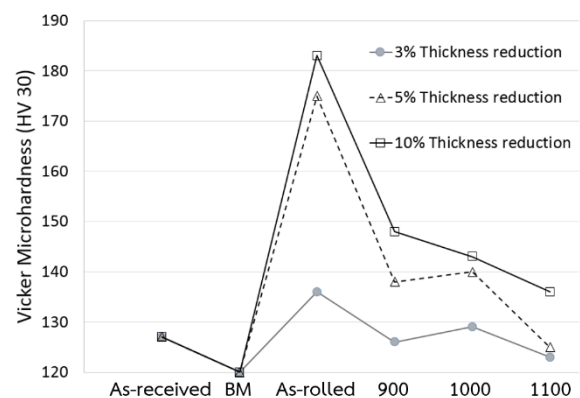


รูปที่ 1: โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน (BM) หลังกระบวนการละลายสารมลทิน
ก) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องแสง ข) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสดงทิศทางแกนผลึก

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างจุลภาค BM หลังละลายสารมลทิน มีค่า F_{SB} เริ่มต้น 23.6% และขนาดเกรนเฉลี่ย 130 μm เกรนและสารมลทินมีลักษณะปกติเรียวยาวตามแนวการรีด (แนวตั้ง) ความแข็งของชิ้นงานลดลงหลังอบอ่อนได้ค่าเริ่มต้น สำหรับการทดลองที่ 120 HV30 (รูปที่ 2) ซึ่งเป็นสถานะหลังการคลายความเครียด (recovery) ของโลหะ และค่าความแข็งจะสูงขึ้นตามเปอร์เซ็นต์การรีด และความหนาแน่นของดิสโลเคชันที่เกิดจากขอบเกรน โดยที่ดิสโลเคชันมักจะเกาะกลุ่ม ณ บริเวณขอบเกรนที่ระดับความเครียดต่ำ พร้อมจะสนับสนุนการเคลื่อนที่ของขอบเกรน เมื่อมีพลังงานทางความร้อนที่เหมาะสม ขณะที่ระดับความเครียดปานกลาง ดิสโลเคชันเหล่านี้จะย้ายเข้าสู่

ภายในเกรน เกาะพันกันเป็นผนังของ Sub-grains เมื่อได้รับระดับพลังงานความร้อนเพียงพอจะสามารถทำให้วัสดุเกิดการตกผลึกใหม่ได้



รูปที่ 2: ค่าความแข็งวิกเกอร์ (HV 30)

ตารางที่ 1 และรูปที่ 3 แสดงผลกระทบของอุณหภูมิการอบขึ้นงานต่อ GBCD หลังการอบอ่อนความเครียดต่ำหนึ่งชั้น ที่อาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง 2 กลไก ในการเพิ่ม F_{SB} ให้ได้อย่างมีประสิทธิภาพระหว่างถูกกระตุ้นทางความร้อน นั่นคือ (1) กลไกยับยั้งการตกผลึกใหม่ ซึ่งจะลด F_{SB} และเพิ่ม HAGB แทน (2) กลไกส่งเสริมการเกิดใหม่ของขอบเกรนทวินแบบไม่ประกอบ (Incoherent twin boundary, $\Sigma 3_C$) และการเคลื่อนที่ของ $\Sigma 3_C$ ที่เร่งปฏิกิริยาระหว่างขอบเกรนยิ่งขึ้น ขณะเคลื่อนที่เช่นกัน ณ จุดตัดสามเกรน ประกอบกับปัจจัยส่งเสริมจากดิสโลเคชันที่เกาะอยู่

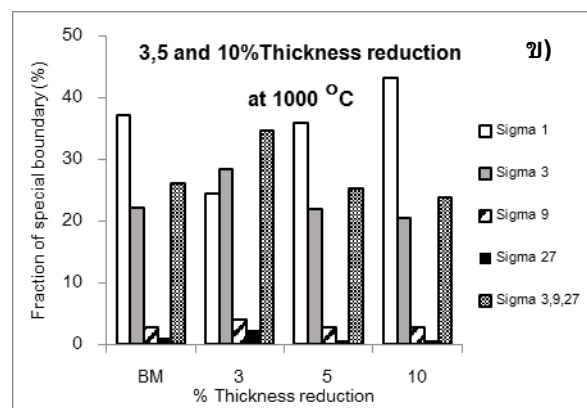
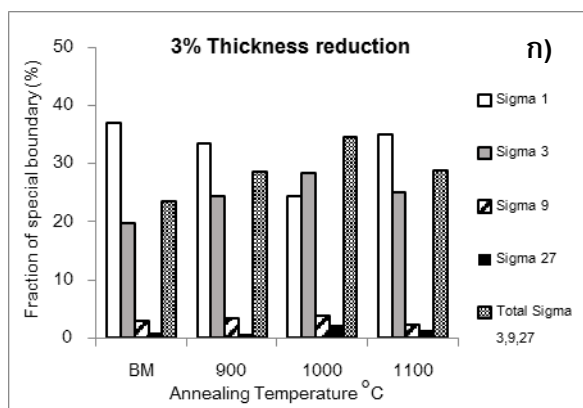
ตารางที่ 1: ผลการกระจายตัวของขอบเกรนจากกระบวนการทางความร้อนแต่ละแบบ *(ST แทนการอบละลายสารมลทิน)

ชิ้นงาน	กระบวนการทางความร้อนทางกล	สัดส่วนขอบเกรนชนิดพิเศษ (%)						
		$\Sigma 1$	$\Sigma 3$	$\Sigma 9$	$\Sigma 27$	$\Sigma 1+\Sigma 3+\Sigma 9+\Sigma 27$	$\Sigma 3+\Sigma 9+\Sigma 27$	$\Sigma 9+\Sigma 27$
BM	ST at 1100 °C X 1.5 h	37.1	19.7	2.9	1	60.7	23.6	3.9
2	ST+ 3%Cold rolled + 900 °C X 0.5h	33.5	24.5	3.5	0.7	62.2	28.7	4.2
3	ST+ 3%Cold rolled + 1000 °C X 0.5h	24.4	28.4	3.9	2.4	59.1	34.7	6.3
4	ST+ 3%Cold rolled + 1100 °C X 0.5h	35	25.1	2.3	1.4	63.8	28.8	3.7

เมื่อวัสดุที่มีพลังงานความเครียดสะสมภายในที่เหมาะสมถูกกระตุ้นทางความร้อน อะตอมจะมีความคล่องตัวสูงขึ้น ช่วยเร่งการจัดเรียงตัวใหม่ภายใน ได้โครงสร้างระดับพลังงานต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอะตอมบริเวณขอบเกรนที่พร้อมจะจัดเรียงตัวใหม่ให้สอดคล้องกับอะตอมภายในผลึกใหม่มากที่สุด และกำจัดโครงสร้าง HAGB แหล่งพลังงานสูงที่ 1.2 J/m^2 ขณะที่ขอบเกรน $\Sigma 3_C$ และ $\Sigma 3_{IC}$ มีพลังงาน 0.01 J/m^2 และ $0.1-0.6 \text{ J/m}^2$ ตามลำดับ [16] อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง

หลักคั่นให้อะตอมจัดเรียงตัวใหม่ในบริเวณที่เกยกันนั้น จนได้โครงสร้างขอบเกรนพิเศษ ซึ่งเป็นกลไกที่การเพิ่ม F_{SB} เรียกว่า Twin-induced GBE [15] ในการทำเงื่อนไขแรกให้เป็นจริง ความเครียดสะสมแบบยืดหยุ่นจากการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร ควรอยู่ในระดับต่ำกว่าค่าวิกฤตการตกผลึกใหม่ ซึ่งโดยทั่วไปสำหรับโลหะ FCC พบว่า ค่าความเครียดสะสมที่เหมาะสมจากการรีดเย็นจะอยู่ในช่วง 3-10%TR และในการทดลองนี้ก็เลือกความเครียดถาวรอยู่ในช่วงดังกล่าว (3, 5, 10% TR)

จาก HAGB เป็น Low- Σ CSLBs โดยตรงจากการจัดเรียงของอะตอม ต้องข้ามผ่านระดับพลังงานกระตุ้นที่สูงมาก ดังนั้นกระบวนการนี้มักจะเกิดขึ้นกับขอบเกรนที่เบี่ยงเบนจากขอบเกรนชนิดพิเศษเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ผ่านกลไกการหมุนของระนาบขอบเกรน ควบคู่ไปกับการหมุนของเกรน ซึ่งสามารถทำได้โดยการอบขึ้นงานที่อุณหภูมิต่ำเป็นเวลานาน หลังจากการให้ความเครียดระดับต่ำ แต่ถ้าไม่ควบคุมปัจจัยรอบข้างให้ดีพอ อาจส่งผลทางลบจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุได้



รูปที่ 3: การกระจายตัวของขอบเกรนแต่ละชนิดของชิ้นงาน

ก) 3%TR หลังการอบอ่อนที่ 900, 1000 and 1100°C ข) 3, 5, 10%TR หลังการอบอ่อนที่ 1000°C

ขอบเกรนทวินสามารถแบ่งเป็น Σ_3 เมื่อ {111} เป็นระนาบขอบเกรน และ Σ_{3C} ถ้าไม่ใช่ ซึ่ง Σ_{3C} ยังสามารถแบ่งออกได้อีก 3 แบบ (1) แบบสมมาตร เมื่อ {211} เป็นระนาบขอบเกรน (2) แบบไม่สมมาตร ถ้ามี $\langle 011 \rangle$ เป็น Zone axis (3) แบบทั่วไป [16] เนื่องจาก Σ_3 ทั้ง 2 แบบมีเลขดัชนี 60°/111 เหมือนกัน ทำให้ไม่สามารถแยกแยะขอบเกรน Σ_3 ออกจาก Σ_{3C} ได้ด้วยเทคนิค EBSD แบบค่าดัชนี 3 ตัวแปรอิสระ อย่างไรก็ตาม ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องแสง Σ_3 จะปรากฏเป็นเส้นตรงมากกว่า Σ_{3C}

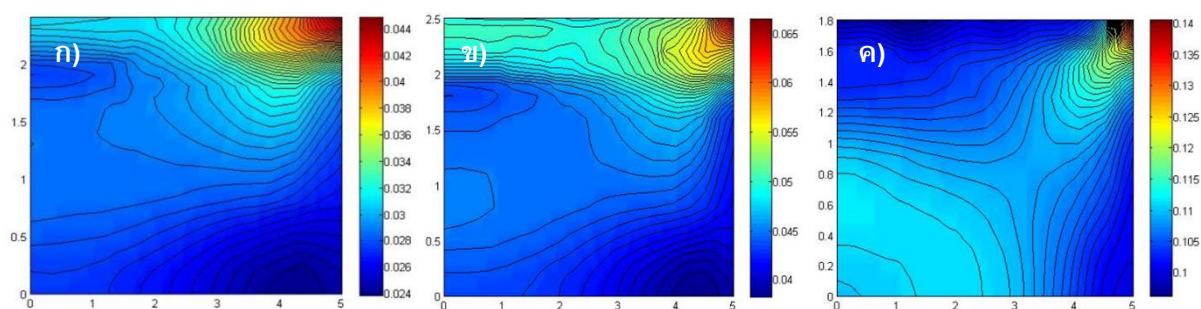
เมื่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจาก HAGB เป็น Low- Σ CSLBs โดยตรงนั้นเป็นไปได้ยาก กลไกสำคัญที่สามารถอธิบายการเพิ่ม F_{SB} จึงขึ้นอยู่กับกลไกระดับพลังงานกระตุ้นลงด้วยกลไก Twin-induced GBE ที่อาศัยแรงผลักดันจากพลังงานขอบเกรนส่วนเกินของดิสโลเคชันเกิดเป็นปฏิสัมพันธ์ระหว่างขอบเกรนขณะเคลื่อนที่ ณ จุดตัดสามเกรน ระหว่าง Σ_3 กับ Σ_3 ได้ Σ_9 หรือกับ Σ_9 ได้ Σ_{27} ดังสมการ (1) [17] โดยที่ m และ n เป็นเลขจำนวนเต็ม และ $m > n$ สำหรับความสัมพันธ์หลังสุด

$$\Sigma_3^m + \Sigma_3^n = \Sigma_3^{m+n} \text{ หรือ } \Sigma_3^{m-n} \quad (1)$$

ถ้าทั้งระดับพลังงานทางความร้อนและความหนาแน่นดิสโลเคชันยังสนับสนุน ขอบเกรนก็ยังคงเคลื่อนที่ไปพร้อมกับปฏิกิริยาที่จุดตัดสามเกรน เพื่อลดระดับพลังงานของระบบผ่านปฏิสัมพันธ์ระหว่างขอบเกรน

HAGB กับ Σ_3 หรือกับ Σ_9 จนกระทั่งมีการจัดเรียงตัวอะตอมใหม่เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างจาก HAGB เป็น Σ_{3C} ซึ่งจะเกิดเร็วขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการเปลี่ยนแปลงจาก Σ_1 เป็น Σ_{3C} ในการทดลองนี้มีค่าสูงที่ 1000°C อย่างไรก็ตาม Σ_{3C} ที่เพิ่งเกิดขึ้นกับมีความคล่องตัวลดลงเนื่องจากความหนาแน่นดิสโลเคชันที่สะสมลดลงระหว่างขบวนการ [13, 15]

จากรูปที่ 3ก GBDC แปรผันตรงระหว่างสัดส่วนตามความยาวของ Σ_3 - Σ_9 - Σ_{27} กับอุณหภูมิการอบ แต่แปรผกผันกับสัดส่วนของ Σ_1 ยกเว้นการอบที่ 1100°C ซึ่งอาจมีค่าสูงเกินไป จากแบบจำลองโครงสร้างขอบเกรนในยุคแรก Σ_1 หรือ LAGB เกิดจากเรียงตัวเป็นแนวเดียวกันของเส้นดิสโลเคชัน ที่ระดับของความเครียดถาวรต่ำ ซึ่งสัดส่วนของ Σ_1 ก็สอดคล้องกับ %TR ซึ่งจะเห็นได้ว่าระดับของความเครียดถาวรที่ให้นอนแรกนั้นมีผลต่อ GBDC (รูปที่ 3ข) ทำให้ต้องพิจารณาการกระจายตัวของระดับความเครียดถาวรตลอดความหนาของชิ้นงานควบคู่กันไปด้วย จากผลการทดลองที่ว่า สัดส่วนของ F_{SB} มีค่าสูงสุดที่ 3%TR นั้น มีค่าน้อยจนกระทั่งระดับความเครียดถาวรเปรียบเทียบมีค่าแตกต่างกันระหว่างบริเวณผิวชิ้นงานกับภายในชิ้นงานสูง ขณะที่ชิ้นงาน 5 และ 10%TR มีกระจายตัวของระดับความเครียดถาวรที่สม่ำเสมอ (รูปที่ 4)



รูปที่ 4: การกระจายตัวค่าความเครียดถาวรของชิ้นงานทดสอบที่ ก) 3%TR ข) 5%TR ค) 10%TR

4. สรุป

กระบวนการทางความร้อน-ทางกล แบบบอบอ่อนหลังความเครียดต่ำ-หนึ่งขึ้น มีผลต่อ GBDC ใน SS316L เมื่อกำหนดให้วัสดุเริ่มต้นมีขนาดเกรนเฉลี่ย 103 μm และ 23.6% F_{SB} ผลการทดลองพบว่าที่ระดับความเครียดเริ่มต้น

เดียวกันที่ 3%TR การอบอ่อนที่ 1000°C สามารถเร่งปฏิกิริยาหลักระหว่างขอบเกรนทั่วไปกับขอบเกรนทวินได้ค่า F_{SB} สูงสุด โดยเริ่มจากการก่อตัวของ Σ_{3C} จาก Σ_1 สอดคล้องกับสัดส่วนที่ลดลงของ Σ_1 ที่อุณหภูมินี้ ขณะที่เดียวกันสัดส่วนของขอบเกรนชนิด Σ_{3C} ที่สูงขึ้นนั้นยิ่งเร่งให้ปฏิกิริยาเกิดระหว่างเกรนเร็วขึ้นและถี่ขึ้น ดังนั้น

เมื่อขึ้นงานถูกอบที่อุณหภูมิสูง ขอบเกรน $\Sigma_{3_{IC}}$ จะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ได้ดีขึ้น ส่งเสริมปฏิสัมพันธ์ระหว่างขอบเกรนที่จุดเชื่อมต่อสามเกรน $\Sigma_3\text{-}\Sigma_3\text{-}\Sigma_9$, $\Sigma_3\text{-}\Sigma_9\text{-}\Sigma_{27}$ นอกจากนี้ผลดังกล่าวยังเร่งให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจาก HAGB เป็น Σ_9 , Σ_{27} อีกด้วย กลไกทั้งหมดนี้เอง จึงเป็นเหตุผลหลักที่ได้ค่า F_{SB} สูงสุด เมื่อขึ้นงานถูกอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1000°C

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทางการเงินจาก กองทุนวิจัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และโปรแกรม DEFORM จาก สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] V. Randle, The Measurement of Grain Boundary Geometry, Institute of Physics Publishing, Philadelphia, 1993.
- [2] I. Kaur, Y. Mishin, et al., Fundamentals of Grain and Interphase Boundary Diffusion. John Wiley & Sons, Chichester, 1995.
- [3] A. P. Sutton, "Grain-boundary structure," Int. Mater. Rev., Vol.29, pp.377-404, 1984.
- [4] E.R. Qian, Y.T. Chou, et al., "The structure dependence of grain boundary corrosion in niobium bicrystals," J. Less-Commn Met., Vol.134, pp.179-185, 1987.
- [5] G.S. Was, V. Thaveepungsriporn, et al., "Grain Boundary Misorientation Effects on Creep and Cracking in Ni-Based Alloys," JOM, Vol.50, pp.44-49, 1998.
- [6] E.M. Lehockey, D. Limoges, et al., "On improving the corrosion and growth resistance of positive Pb-acid battery grids by grain boundary engineering," J. Power Sources, Vol.78, pp.79-83, 1999.
- [7] B. Alexandreanu and G.S. Was, "The role of stress in the efficacy of coincident site lattice boundaries in improving creep and stress corrosion cracking," Scr. Mater., Vol.54, pp.1047-1052, 2006.
- [8] G.S. Was, J.K. Sung, et al., "Effects of grain boundary chemistry on the intergranular cracking behavior of Ni-16Cr-9Fe in high-temperature water," Metall. Trans. A, Vol.23A, pp.3343-3359, 1992.
- [9] M. Michiuchi, H. Kokawa, et al., "Twin-induced grain boundary engineering for 316 austenitic stainless steel," Acta Mater., Vol.54, pp.5179-5184, 2006.
- [10] V. Randle and H. Davies, "Evolution of microstructure and properties in alpha-brass after iterative processing," Metall. Mater. Trans. A, Vol.33, pp.1853-1857, 2002.
- [11] B.W. Bennett and H. W. Pickering, "Effect of Grain boundary structure in sensitization and corrosion of stainless steel," Metall. Trans. A, Vol.18A, pp.1117-1124, 1987.
- [12] H. Kokawa, M. Shimada, et al., "Grain-boundary structure and precipitation in sensitized austenitic stainless steel," JOM, Vol.52, pp.34-37, 2000.
- [13] X. Fang, K. Zhang, et al., "Twin-induced grain boundary engineering in 304 stainless steel," Mat. Sci. Eng. A, Vol.487, pp.7-13, 2008.
- [14] D. G. Brandon, "The structure of high-angle grain boundary," Acta Metall., Vol.14, pp.1479-1484, 1966.
- [15] W. Wang and H. Guo, "Effect of thermo-mechanical iterations on the grain boundary character distribution of Pb-Ca-Sn-Al alloy," Mat. Sci. Eng. A, Vol. 445-446, pp.155-162, 2007.
- [16] V. Randle, "Grain-boundary plane reorientation in copper," Philos. Mag. A, Vol.79, pp.305-316, 1999.
- [17] V. Randle, "Mechanism of twinning-induced grain boundary engineering in Low Stacking-Fault energy materials," Acta Mater., Vol.47, pp.4187-4196, 1999.

การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนบนเส้นใยคาร์บอน

Synthesis of Carbon Nanotubes on Carbon Fibers.

ลลิตา เพียรราษฎร์ พนมกร ขวาทอง อภิชาติ อาจนาสีขาว
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวกับการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนบนเส้นใยคาร์บอนด้วยวิธีการต่าง ๆ ได้แก่ วิธีตกตะกอนไอเคมี วิธีตกตะกอนไอเคมีด้วยความร้อน วิธีตกตะกอนอิเล็กโตรโฟเรติก เทคนิคการใช้เปลวไฟจากการเผาไหม้ การทาบนท่อคาร์บอนบนเส้นใยคาร์บอนด้วยเทคนิคอื่นร่วมเช่น การใช้เดนไดรเมอร์ เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีที่ใช้ในการสังเคราะห์ที่กล่าวมานั้นแสดงผลของการเติบโตของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดขึ้นบนเส้นใยที่ต่างกันออกไป ยกตัวอย่างเช่น ปริมาณที่เกิดท่อนาโน ลักษณะ และความยาวของท่อนาโนคาร์บอน

คำสำคัญ : เส้นใยคาร์บอนเสริมแรง นาโนคอมโพสิต วัสดุนาโน การสังเคราะห์

Abstract

This article aims to review the literature on the synthesis of carbon nanotubes on carbon fibers (CNTs/CF) by various methods such as chemical vapor deposition, thermal chemical vapor deposition, electrophoretic deposition, flame synthesis, grafting carbon nanotube onto carbon fiber by use of dendrimer etc. Each method used in the synthesis of the above, it shows the effect of the growth of carbon nanotubes on carbon fiber. For example, formation, characteristics, and the length of the carbon nanotubes.

Keywords : Carbon fiber reinforced composites, Nano composite, Nano material, Synthesis

1. บทนำ

เส้นใยนาโนคาร์บอนเสริมแรง (Carbon fiber reinforced polymer composites; CFRPs) เป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพสูง นำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านยานอวกาศ เครื่องบิน อุปกรณ์กีฬา และอุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น [1] อย่างไรก็ตามความต้านทานต่อความเสียหายของบริเวณรอยต่อระหว่างเส้นใยกับพลาสติกเรซินนั้นมีข้อจำกัด เพื่อแก้จุดด้อยจึงมองหาวัสดุคอมโพสิตที่มีน้ำหนักเบาและมีคุณสมบัติที่ดี [2] ซึ่งท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes) ถือเป็นตัวเลือกที่ดีเหมาะที่จะนำมาเป็นวัสดุเสริมแรง เนื่องจากมีความต้านทานแรงดึงและค่ามอดูลัสสูง [3-7]

เส้นใยคาร์บอนคอมโพสิตท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube hybridized carbon fiber; CNTs/CF) เป็นวัสดุประสิทธิภาพสูง ที่มีคุณสมบัติที่ดีในด้านต่าง ๆ เช่น เหนียว ไฟฟ้า และความร้อน [8] ซึ่งเส้นใยคาร์บอนคอมโพสิตท่อนาโนคาร์บอนได้มีการศึกษาเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านวัสดุผสมในอากาศยานหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ [9] การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนมีหลายวิธีการ แต่ละวิธีมีปัจจัยในการใช้ที่ต่างกัน ทำให้ผลที่ได้ออกมาต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นความบริสุทธิ์และปริมาณในการเกิดของท่อนาโนคาร์บอน รูปร่าง ลักษณะและขนาดของท่อนาโนคาร์บอน รวมไปถึงคุณสมบัติด้านต่าง ๆ

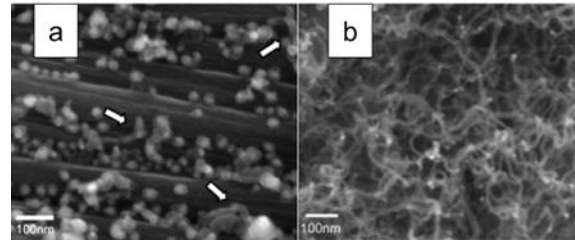
ในบทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวกับการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนบนเส้นใยกระบวนการในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนบนเส้นใยคาร์บอนด้วยวิธีต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการพัฒนาการวิจัย และทราบถึงงานวิจัยที่เกี่ยวกับการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนบนเส้นใยคาร์บอนในปัจจุบันอีกด้วย

2. การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนบนเส้นใยคาร์บอน

กระบวนการในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนบนเส้นใยคาร์บอน สามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธีการตกตะกอนไอเคมี (Chemical vapor deposition) วิธีการตกตะกอนไอเคมีด้วยความร้อน (Thermal chemical vapor deposition) วิธีการตกตะกอนอิเล็กโตรโฟเรติก (Electrophoretic deposition) วิธีการใช้เปลวไฟจากการเผาไหม้ (Flame synthesis) และวิธีการทาบท่อนาโนคาร์บอนบนเส้นใยคาร์บอนโดยใช้เทคนิคอื่นร่วม เป็นต้น

2.1 การใช้เปลวไฟจากการเผาไหม้ (Flame Synthesis)

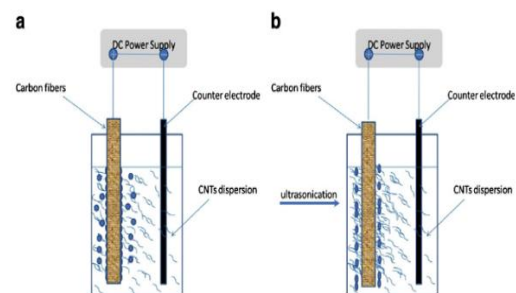
วิธีการสังเคราะห์โดยอาศัยเปลวไฟจากการเผาไหม้เป็นอีกหนึ่งวิธีที่กำลังได้รับความสนใจ เนื่องจากเป็นวิธีที่ประหยัด เรียบง่าย และใช้เวลาน้อย ซึ่งการสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้มีปัจจัยที่มีอิทธิพลหลายปัจจัย ได้แก่ เวลา อุณหภูมิ ตัวเร่งปฏิกิริยา และแหล่งของคาร์บอน เช่น งานวิจัยของ Xusheng Du และคณะ [10] ทำการศึกษาสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนบนเส้นใยคาร์บอน โดยทำการจุ่มเส้นใยคาร์บอนในสารละลายนิกเกิลคลอไรด์ (NiCl_2) นาน 60 วินาที แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ก่อนไปเผาไฟที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วินาที และ 300 วินาที ภาพ SEM จากในรูปที่ 1 พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาณและความยาวของท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้น ซึ่งจากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของปัจจัยด้านเวลาส่งผลต่อการเติบโตและขนาดของท่อนาโนคาร์บอน



รูปที่ 1 ภาพ SEM ของ CNT/CF ที่เวลา 30 วินาที (a) และ 300 วินาที (b) [10]

2.2 การตกตะกอนอิเล็กโตรโฟเรติก (Electrophoretic deposition)

กระบวนการตกตะกอนอิเล็กโตรโฟเรติก (EPD) เป็นหนึ่งในกระบวนการเกี่ยวกับคอลลอยด์ มีหลักการ คือ ทำให้อนุภาคที่มีประจุกระจายหรือแขวนลอยในตัวกลางของของเหลว จากนั้นทำการตกตะกอนอนุภาคดังกล่าวโดยใช้สนามไฟฟ้ากระแสตรงบนฐานรองตัวนำซึ่งมีประจุตรงข้ามกับประจุของอนุภาคนั้น งานวิจัยของ Jinhai Guo และคณะ [6] ได้ทำการเตรียมท่อนาโนคาร์บอนบนเส้นใยคาร์บอนด้วยวิธีตกตะกอนอิเล็กโตรโฟเรติก โดยใช้อัลตราโซนิกร่วมด้วย

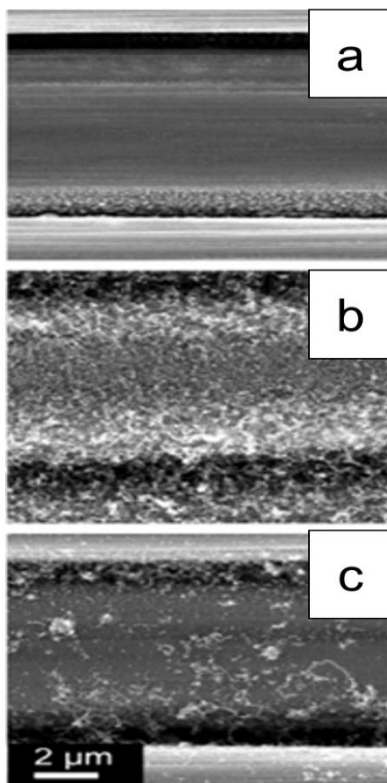


รูปที่ 2 แผนภาพกระบวนการ EPD ของ CNTs/CF โดยไม่ใช้ (a) และใช้อัลตราโซนิก (b) [6]

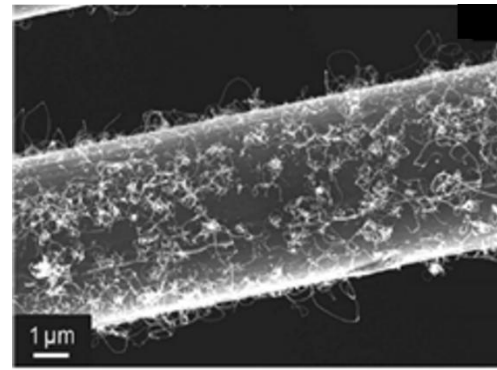
แผนภาพกระบวนการ EPD จากรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าการใช้อัลตราโซนิกร่วมในกระบวนการ EPD นั้นส่งผลต่อปริมาณของท่อนาโนคาร์บอน โดยรูปที่ 2 (a) เกิดการสะสมอย่างเบาบาง เมื่อเทียบกับรูปที่ 2 (b) ที่มีการสะสมของท่อนาโนคาร์บอนอย่างแน่นหนา

2.3 การตกสะสมไอเคมี (Chemical vapor deposition)

วิธีการตกสะสมไอเคมีเป็นกระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ด้วยหลักการของการทำให้สารไอของสารตั้งต้นเกิดการแตกตัวด้วยความร้อน และตกสะสมบนฐานรองรับ เมื่อไอของสารตั้งต้นไหลผ่านท่อที่มีความร้อนสูงในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย ที่อุณหภูมิหนึ่งจะทำให้ไอของสารตั้งต้นที่เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนเกิดการแตกตัว และตกสะสมลงบนฐานรองรับเพื่อสร้างท่อนาโนคาร์บอน งานวิจัยของ Niels de Greef และคณะ [2] ทำการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนบนเส้นใยคาร์บอนที่อุณหภูมิต่างกัน (650 – 750 องศาเซลเซียส) ซึ่งจากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้เกิดท่อนาโนคาร์บอนบนเส้นใยคาร์บอนได้หนาแน่นที่สุด และงานวิจัยของ Hui Qian และคณะ [3] ศึกษาท่อนาโนคาร์บอนเส้นใยคาร์บอนที่สังเคราะห์ด้วยวิธี CVD ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนเส้นใยคาร์บอนมีลักษณะโค้งงอ (รูปที่ 4)



รูปที่ 3 ภาพ SEM ของ CNTs/CF ที่อุณหภูมิ (a) 650°C (b) 700°C และ (c) 750°C [2]

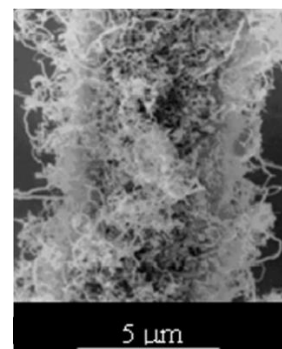


รูปที่ 4 ภาพ SEM ของ CNTs ที่เกิดบนเส้นใยคาร์บอนด้วยวิธี CVD [3]

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ S. Rahmanian และคณะ [8] ทำการปรับปรุงสภาพของเส้นใยคาร์บอนด้วยเอทานอลและอะซิโตน พบว่าเกิดท่อนาโนคาร์บอนเป็นลักษณะกลุ่มและมีลักษณะพันกันยุ่ง

2.4 การตกสะสมไอเคมีด้วยความร้อน (Thermal chemical vapor deposition)

วิธีการนี้จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะชนิด Fe, Ni, Co หรือโลหะผสมทั้งสามชนิด ให้ตกลงบนฐานรองรับ หลังจากนั้นนำไปกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก แล้วนำไปปลูกท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งวิธีนี้จะใช้อุณหภูมิในการเผาประมาณ 750 – 1050 องศาเซลเซียส จากงานวิจัยของ S.P. Sharma และคณะ [4] ทำการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนบนเส้นใยคาร์บอนด้วยวิธี Thermal CVD ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส พบว่าเกิดท่อนาโนคาร์บอนปกคลุมเส้นใยคาร์บอนอย่างหนาแน่น (รูปที่ 5)



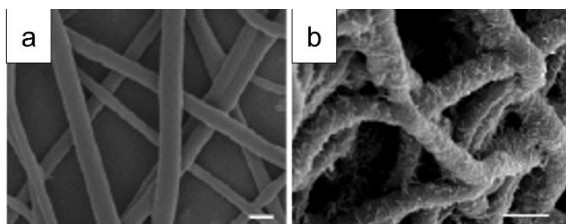
รูปที่ 5 ภาพ SEM ของ ท่อนาโนคาร์บอนบนเส้นใยคาร์บอน [4]

และมีงานวิจัยของ Hu Zhi-hui และคณะ [5] ที่ทำการศึกษาอัตราการเติบโตของท่อนาโนคาร์บอนภายใต้ชนิดของสารละลาย ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ ซึ่งอัตราการเติบโตที่ดีที่สุดนั้นคือ ใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กเข้มข้น 100 มิลลิโมลลาร์ ที่อุณหภูมิ 1023 องศาเซลเซียส และใช้เวลา 30 นาที นอกจากนี้งานวิจัยของ Nilay Kumar Dey และคณะ [11] ทำการศึกษาการเติบโตของท่อนาโนคาร์บอนบนเส้นใยคาร์บอนที่สังเคราะห์จากวิธี Thermal CVD โดยมีนิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าปริมาณ รูปร่าง ความยาวและความกว้างของท่อนาโนคาร์บอนนั้นขึ้นกับอุณหภูมิในการเติบโต เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดคือ ใส่ก๊าซไฮโดรเจน (200 sccm) เป็นเวลา 20 นาที และ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ใส่ก๊าซผสมระหว่างอะเซทิลีน (10 sccm) ไฮโดรเจน (150 sccm) อาร์กอน (50 sccm) และไนโตรเจน (50 sccm) เป็นเวลา 5 นาที

2.5 การทาบท่อนาโนคาร์บอนบนเส้นใยคาร์บอนด้วยวิธีอื่น ๆ (Chemical grafting)

2.5.1 การทาบ CNTs บนเส้นใยนาโนอิเล็กโตรสปินโดยใช้เครื่องสั่นความถี่สูง

จากงานวิจัยของ Jiefeng Gao และคณะ [7] ได้ทำการทาบท่อนาโนคาร์บอนบนเส้นใยนาโน อิเล็กโตรสปินโดยนำท่อนาโนคาร์บอนเดิมลงในน้ำกลั่นและเขย่าด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง เดิมตัวทำละลาย แล้วจุ่มเส้นใยนาโนอิเล็กโตรสปินในสารละลายที่มีท่อนาโนคาร์บอนละลายอยู่ เขย่าด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง ล้างน้ำสะอาด อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ลักษณะของเส้นใยนาโนคอมโพสิต แสดงในรูปที่ 6

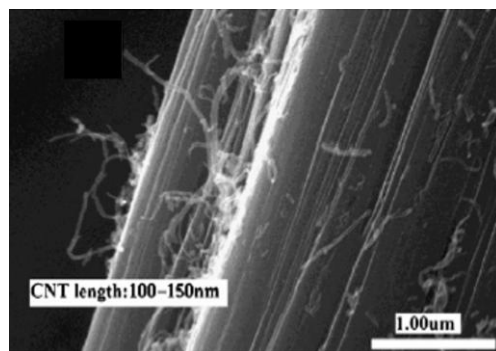


รูปที่ 6 ภาพ SEM (a) ก่อนทาบ และ (b) หลังทาบท่อนาโนคาร์บอน [7]

พบว่าเส้นใยนาโนอิเล็กโตรสปินนั้นถูกปกคลุมด้วยท่อนาโนคาร์บอน มีลักษณะผิวขรุขระและพันกันอยู่รอบพื้นผิวของเส้นใยนาโน

2.5.2 การทาบ CNTs บนเส้นใยนาโนคาร์บอน โดยใช้เดนไดรเมอร์

จากงานวิจัยของ Lei Mei และคณะ [12] ทาบท่อนาโนคาร์บอนบนเส้นใยคาร์บอนโดยนำเส้นใยคาร์บอนลงในสารละลาย Polyamidoamine (PAMAM) เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ล้างแล้วอบให้แห้ง 1 ชั่วโมง จากนั้นละลายท่อนาโนคาร์บอนในอะซิโตนเขย่าด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง นำเส้นใยมาจุ่มในสารละลายเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ล้างแล้วเป่าให้แห้งท่อนาโนคาร์บอนที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นยาวออกมาจากก้อนกลมที่ติดกับเส้นใยคาร์บอน ตามรูปที่ 7



รูปที่ 7 ภาพ SEM ของท่อนาโนคาร์บอนทาบบนเส้นใยคาร์บอนด้วยวิธีเดนไดรเมอร์ [12]

3. สรุป

การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนบนเส้นใยคาร์บอนมีกระบวนการสังเคราะห์หลายวิธี โดยต้องทำความเข้าใจถึงกลไกการเกิดท่อนาโนคาร์บอนบนเส้นใย คำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสังเคราะห์ เช่น เวลา อุณหภูมิ ตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวทำละลาย เป็นต้น เพื่อให้ได้โครงสร้างและคุณสมบัติในการนำไปประยุกต์ใช้ที่แตกต่างกัน ซึ่งข้อมูลดังกล่าวได้รวบรวมในบทความนี้แล้ว สามารถสรุปได้ว่าปริมาณ รูปร่างและขนาดของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดขึ้นบนเส้นใยคาร์บอนนั้น ขึ้นอยู่ปัจจัยสำคัญอย่าง เวลา

อุณหภูมิ ตัวเร่งปฏิกิริยา และตัวทำละลาย นอกจากนี้แต่ละวิธีก็มีจุดเด่นหรือข้อจำกัดในการใช้งานที่ต่างกัน เช่น วิธีการใช้เปลวไฟจากการเผาไหม้ เป็นวิธีที่ประหยัดและใช้เวลาน้อย วิธิตกสะสมไอเคมีเป็นวิธีที่ต้องมีตัวเร่งปฏิกิริยา โดยวิธิตกสะสมไอเคมีด้วยความร้อนจะใช้อุณหภูมิสูงและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น

4. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Feng, L. Chunxiang, L. Yonghong, G. Jinhai, L. Xiaoxuan, L. Huibin, H. Shuqing, Y. Yu, "Preparation and characterization of carbon nanotube- hybridized carbon fiber to reinforce epoxy composite," *Materials and Design*, Vol.33, pp.197-202, July, 2011.
- [2] N. De Greef, Z. Luman, M. Arnaud, F. László, L. Jean-Pierre, V. Ignaas, S. Jin Won, "Direct growth of carbon nanotubes on carbon fibers: Effect of the CVD parameter on the degradation of mechanical properties of carbon fibers," *Diamond & Related Materials*, Vol. 51, pp. 39-48, November, 2014.
- [3] H. Qian, B. Alexander, S.G. Emile, S. Milo S.P, "Carbon nanotube grafted carbon fibres: A study of wetting and fibre fragmentation," *Composites: Part A*, Vol. 41, pp.1107-1114, April, 2010.
- [4] S.P. Sharma, S.C. Lakkad, "Effect of CNTs growth on carbon fibers on the tensile strength of CNTs grown carbon fiber-reinforced polymer matrix composites," *Composites: Part A*, Vol. 42, pp.8-15, September, 2010.
- [5] H. Zhi-hui, D. Shao-ming, H. Jian-bao, W. Zhen, L. Bo, Y. Jin-shan, L. Qing-gang, W. Bin, G. Le, Z. Xiang-yu, "Synthesis of carbon nanotubes on carbon fibers by modified chemical vapor deposition," *New Carbon Materials*, Vol. 27, pp. 352-361, October, 2012.
- [6] G. Jinhai, L. Chunxiang, A. Feng, H. Shuqing, "Preparation and characterization of carbon nanotubes/carbon fiber hybrid material by ultrasonically assisted electrophoretic deposition," *Materials Letters*, Vol. 66, pp. 382-384, November, 2011.
- [7] G. Jiefeng, L. Wan, S. Hengchong, H. Mingjun, L. Robert K.Y, "Preparation, morphology, and mechanical properties of carbon nanotube anchored polymer nanofiber composite," *Composites Science and Technology*, Vol. 92, pp. 95-102, December, 2013.
- [8] S. Rahmanian, A.R. Suraya, R. Zahari, E.S. Zainudin, "Synthesis of vertically aligned carbon nanotubes on carbon fiber," *Applied Surface Science*, Vol. 271, pp. 424-428, February, 2013.
- [9] M.S. Islam, Y. Deng, L. Tong, S. N. Faisal, A. K. Roy, A. I. Minett, V. G. Gomes, " Grafting carbon nanotubes directly onto carbon fibers for superior mechanical stability: Towards next generation aerospace composites and energy storage application," *Carbon*, Vol. 96, pp. 701-710, October, 2015.
- [10] D. Xusheng, L. Hong-Yuan, Z. Cuifeng, M. Steven, M. Yiu-Wing, "On the flame synthesis of carbon nanotubes grafted onto carbon fibers and the bonding force between them," *Carbon*, Vol. 50, pp. 2347-2374, January, 2012.
- [11] D. Nilay Kumar, H. Eun Mi, C. Kang Ho, K. Young Dok, L. Jae-Hong, L. Kyu Hwan, L. Dong Chan, "Growth of Carbon Nanotubes on Carbon Fiber by Thermal CVD Using Ni Nanoparticles as Catalysts," *Procedia Engineering*, Vol. 36, pp. 556-561, 2012.
- [12] M. Lei, H. Xiaodong, L. Yibin, W. Rongguo, W. Chao, P. Qingyu, "Grafting carbon nanotubes onto carbon fiber by use of dendrimers," *Materials Letters*, Vol. 64, pp.2505-2508, July, 2010.

การศึกษาหาพื้นที่ที่เหมาะสมต่อการพัฒนา เป็นเมืองอุตสาหกรรมเชิงนิเวศโดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ Site Suitability Evaluation for EcoIndustrial Town Using GIS

ดวงดาว โหมควัฒนะ¹ ชุมพล ยวงไข² สุพัฒรา เกษราพงศ์³ สมลักษณ์ บุญณรงค์⁴

^{1,2}คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

³คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

⁴คณะเทคโนโลยีและการจัดการอุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บทคัดย่อ

ปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมมีการเติบโตอย่างต่อเนื่อง การพัฒนาพื้นที่สู่การเป็นเมืองอุตสาหกรรมเชิงนิเวศจึงเป็นแนวทางการพัฒนาที่ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อการอยู่ร่วมกันของอุตสาหกรรม ชุมชน และสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอกรอบแนวคิดและศึกษาหาพื้นที่ที่เหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นเมืองอุตสาหกรรมเชิงนิเวศ โดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ร่วมกับการกำหนดปัจจัยที่ใช้เป็นตัวชี้วัดความเหมาะสมของพื้นที่ 7 ปัจจัย ซึ่งได้แก่ ความหนาแน่นของโรงงานอุตสาหกรรม การรวมกลุ่มของอุตสาหกรรมประเภทเดียวกัน การเข้าถึงพื้นที่สวนสาธารณะและแหล่งนันทนาการพื้นที่ที่มีข้อร้องเรียนการเข้าถึงถนนสายหลัก โรงงานที่ได้รับมาตรฐานด้านสิ่งแวดล้อม และพื้นที่เสี่ยงต่อภัยพิบัติทางธรรมชาติ กำหนดเกณฑ์การประเมินและให้คะแนนแบบระดับในแต่ละปัจจัย จากนั้นประมวลผลด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์พบว่าเขตอุตสาหกรรมที่ศึกษาในจังหวัดสมุทรปราการ ได้บริเวณที่มีความเหมาะสมของพื้นที่ 4 ตำแหน่ง โดยพื้นที่ที่มีความเหมาะสมต่อการพัฒนาสู่เมืองอุตสาหกรรมเชิงนิเวศมากที่สุดมีขนาดพื้นที่ 2,063 ไร่

คำสำคัญ : การคัดเลือกพื้นที่ที่เหมาะสม, เมืองอุตสาหกรรมเชิงนิเวศ, ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

Abstract

Currently the industry is continuing to grow, the development of eco-industrial town is necessary to sustainably and beneficially coexist among industries and nearby communities. This research aims to provide a framework to identify suitable areas for the development of ecoindustrial Town using Geographic Information Systems (GIS) with seven decision criteria. These criteria including industrial density, degree of industrial cluster, accessing to green and recreation area, areas with degree of complaints, accessing to main roads, number of factory certified by environmental standards, and areas with natural disasters risk are ranked by rating scale. Subsequently, data obtained from targeted industrial area are analyzed using geographic information software. It was found that a selected industrial area in Samutprakarn province can be categorized and prioritized to four sub-areas. The most suitable area accounted for 2,063 Rai. This area should be developed first to attain ecoindustrial town standard.

Keywords : Area Selection, EcoIndustrial Town, Geographic Information System (GIS)

1. บทนำ

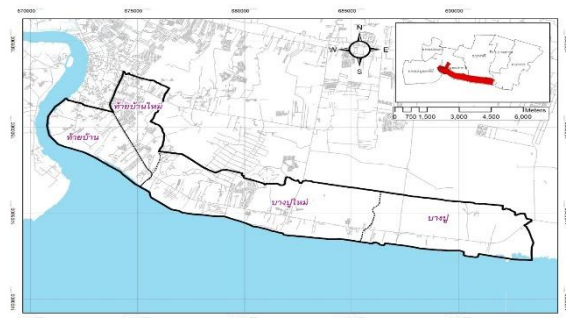
จากสังคมยุคปัจจุบัน การพัฒนาภาคอุตสาหกรรม มุ่งเน้นการลดต้นทุนการผลิตโดยไม่คำนึงถึงผลกระทบที่มีต่อสังคม ชุมชน และสิ่งแวดล้อม จึงก่อเกิดเป็นปัญหาตามมามากมาย ซึ่งการพัฒนาพื้นที่เพื่อมุ่งสู่การเป็นเมืองอุตสาหกรรมเชิงนิเวศจึงเป็นอีกหนึ่งแนวทางการพัฒนาที่เน้นการบูรณาการระหว่างแนวคิดเชิงเศรษฐศาสตร์ที่มุ่งแสวงหาผลกำไรกับแนวคิดเชิงนิเวศที่มุ่งเน้นการอยู่ร่วมกันของอุตสาหกรรม ชุมชน และสิ่งแวดล้อมอย่างสมดุล [1] “อุตสาหกรรมเชิงนิเวศ (Eco Industry)” คือ กลุ่มธุรกิจที่รวมตัวกัน มีการบริหารจัดการทรัพยากรร่วมกัน อย่างมีประสิทธิภาพส่งผลให้เกิดคุณภาพในมิติเชิงเศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม และสังคม มุ่งเน้นการพัฒนาที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [2], [3] โดยเริ่มเกิดขึ้นจากการพัฒนาโรงงานสีเขียว (Green Factory) คือ โรงงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีความรับผิดชอบต่อสังคม มีการปรับปรุงกระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่อง เพื่อการพัฒนาสู่อุตสาหกรรมที่ยั่งยืน [4], [5] ซึ่งถือเป็นจุดเริ่มต้นการพัฒนาอุตสาหกรรมให้สามารถอยู่ร่วมกับสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ และชุมชนได้อย่างมีความสุขและยั่งยืน ต่อยอดไปสู่การเป็น “เมืองอุตสาหกรรมเชิงนิเวศ (Eco Industrial Town)” ที่มีความเชื่อมโยงของพื้นที่อุตสาหกรรมกับกลุ่มโรงงานองค์กร หน่วยงานท้องถิ่น และชุมชนโดยรอบ [6] ซึ่งมีความจำเป็นต้องสร้างความร่วมมือในระดับกลุ่มโรงงาน เพื่อสร้างเครือข่ายของอุตสาหกรรมเชิงนิเวศ และมีความเหมาะสมทางด้านพื้นที่ โดยต้องไม่เป็นพื้นที่เสี่ยงต่อภัยพิบัติทางธรรมชาติ มีความพร้อมของโครงสร้างพื้นฐาน ตลอดจนโครงข่ายการจราจรรวมทั้งเป็นเมืองที่ส่งเสริมการมีปฏิสัมพันธ์ของคนในชุมชน [7] ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการพัฒนาเมืองอุตสาหกรรมเชิงนิเวศ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการวิเคราะห์พื้นที่ที่มีความเหมาะสม เพื่อให้มั่นใจได้ว่าพื้นที่ดังกล่าวนี้จะมีศักยภาพเพียงพอที่จะสามารถพัฒนาให้เกิดเป็นเมืองอุตสาหกรรมเชิงนิเวศได้

จุดประสงค์ของบทความนี้คือ หาพื้นที่ที่เหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นเมืองอุตสาหกรรมเชิงนิเวศโดยใช้เครื่องมือทางระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ที่เป็นการจัดการข้อมูลให้

อยู่ในระบบข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial Data) [8], [9] ใช้เทคนิควิเคราะห์ซีฟ (SIEVE Analysis) โดยการนำข้อมูลปัจจัยมาแปลงลงในรูปแบบแผนที่ จากนั้นนำแผนที่ทั้งหมดซ้อนกันตามหลักพีชคณิตบูลีน (Boolean Algebra) บริเวณที่มีการซ้อนทับกันของค่าคะแนนมากย่อมแสดงลงบนตำแหน่งแผนที่ และลดหลั่นค่าคะแนนลงตามข้อมูลที่ได้มีการศึกษา โดยผลจากการวิเคราะห์จะแสดงในรูปของแผนที่

2. พื้นที่ศึกษา

เลือกเขตเทศบาลตำบลบางปูจังหวัดสมุทรปราการ เป็นพื้นที่ศึกษา ดังรูปที่ 1 เนื่องจากเป็นเขตเศรษฐกิจที่สำคัญ ภาคอุตสาหกรรมเติบโตอย่างรวดเร็ว มีโรงงานอุตสาหกรรมและชุมชนอยู่ร่วมกันและมีปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมมาโดยตลอด [10] อีกทั้งพื้นที่ดังกล่าวได้มีการศึกษาจัดทำแผนแม่บทเพื่อพัฒนาพื้นที่สู่การเป็นเมืองอุตสาหกรรมเชิงนิเวศไว้แล้ว [11] ด้วยเหตุนี้จึงเป็นเหตุผลสำคัญที่เลือกพื้นที่ดังกล่าว โดยงานวิจัยนี้จะศึกษาและวิเคราะห์ความเหมาะสมของพื้นที่โดยพัฒนาและต่อยอดปัจจัยเพิ่มเติมจากที่มีการวิเคราะห์ไว้ก่อนหน้านี้



รูปที่ 1 ฟังที่ตั้งทางภูมิศาสตร์เขตเทศบาลตำบลบางปู

3. วิธีการดำเนินงาน

3.1 แหล่งข้อมูล

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษานี้มาจากหลายแหล่งที่มา ข้อมูลส่วนหนึ่งดังตารางที่ 1 และได้จากการสำรวจภาคสนามที่ได้มีการเก็บรวบรวมผ่านการสัมภาษณ์ข้อมูล Global Positioning System (GPS) และชุดข้อมูล GIS อื่นๆ รวมทั้งวิเคราะห์การใช้ที่ดินจาก Google Map โดยนำข้อมูลทั้งหมดนี้มาวิเคราะห์ร่วมกัน

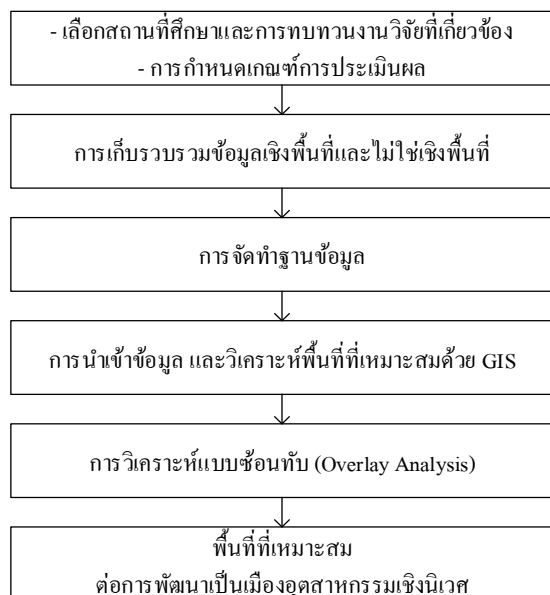
ตารางที่ 1 การใช้ประโยชน์ข้อมูลและมาตราส่วนแผนที่

การใช้ประโยชน์ข้อมูล	มาตราส่วน
อาคารประเภทอุตสาหกรรม	1:4,000
อาคารประเภทที่พักอาศัย	1:4,000
อาคารประเภทแหล่งนันทนาการ	1:4,000
แผนที่ถนน	1:4,000
พื้นที่การกีดขวางชายฝั่ง	1:4,000

ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง

3.2 วิธีการดำเนินงาน

ใช้ซอฟต์แวร์ Arcview GIS 3.3 ในการสร้างแผนที่ความเหมาะสมของพื้นที่ โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนการดำเนินงาน ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขั้นตอนการหาพื้นที่ที่เหมาะสม (พัฒนาจาก[12])

3.3 การกำหนดปัจจัยและเกณฑ์

ปัจจัยที่ใช้เป็นตัวชี้วัดความเหมาะสมของพื้นที่ในการพัฒนาเป็นเมืองอุตสาหกรรมเชิงนิเวศ กำหนดมาจากการรวบรวมข้อมูลในพื้นที่ การสำรวจ สัมภาษณ์ รวมทั้งการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องดังตารางที่ 2

3.4 แนวคิดการกำหนดปัจจัยและค่าคะแนน

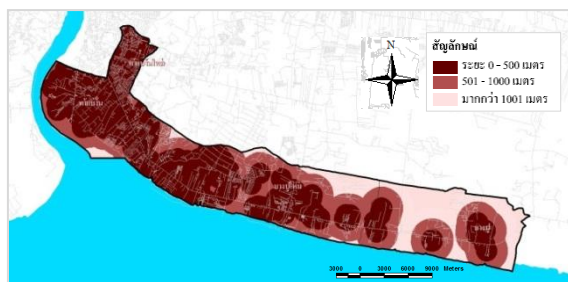
มีแนวคิดมาจากทุกภาคส่วนในพื้นที่ ไม่ว่าจะเป็นโรงงานอุตสาหกรรมหรือชุมชน ต้องมีการสร้างเครือข่ายหรือการแลกเปลี่ยนข้อมูลข่าวสารที่มีความสะดวก ประหยัดพลังงานมีความร่วมมือเกื้อหนุนซึ่งกันและกัน [3] มีทรัพยากรในพื้นที่ เช่น สวนสาธารณะและแหล่งนันทนาการที่จะสามารถพัฒนาเป็นพื้นที่กันชนเชิงนิเวศ (Green Buffer Zone) ซึ่งจะช่วยซึมซับมลพิษและฝุ่นละอองที่ตกค้างในเขตอุตสาหกรรมและสามารถใช้เป็นแหล่งนันทนาการของคนในชุมชน [13] มีการเฝ้าระวังเรื่องสิ่งแวดล้อมโดยพิจารณาจากข้อร้องเรียน ซึ่งพื้นที่ที่มีข้อร้องเรียนย่อมแสดงถึงความเสี่ยงต่อระบบนิเวศเมืองควรจัดทำแนวทางแก้ไขเพื่อลดผลกระทบร่วมกัน[11] อีกทั้งการได้รับมาตรฐานด้านสิ่งแวดล้อมของโรงงานอุตสาหกรรมก็จะเป็นแนวทางการพัฒนาพื้นที่ที่สำคัญ [14] ระบบการขนส่งที่ประหยัดพลังงาน มีการเข้าถึงถนนสายหลักได้อย่างสะดวกรวดเร็วย่อมแสดงถึงการคมนาคมในโซ่อุปทานที่มีประสิทธิภาพ [15] รวมทั้งพิจารณาถึงความเหมาะสมของพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อภัยพิบัติทางธรรมชาติ [16] แนวคิดเหล่านี้จะสามารถกำหนดปัจจัยที่ใช้เป็นตัวชี้วัดการคัดเลือกพื้นที่สู่การพัฒนาเป็นเมืองอุตสาหกรรมเชิงนิเวศได้

ตารางที่ 2 ปัจจัยและเกณฑ์ในการวิเคราะห์ความเหมาะสมของพื้นที่เพื่อพัฒนาสู่เมืองอุตสาหกรรมเชิงนิเวศ

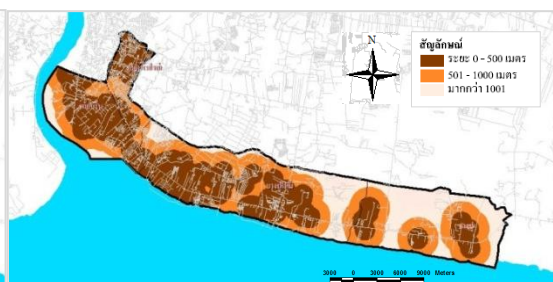
ปัจจัย	หน่วย	การกำหนดเกณฑ์		
		สูง	กลาง	ต่ำ
ความหนาแน่นของโรงงานอุตสาหกรรม	เมตร	0-500	501-1,000	>1,001
การรวมกลุ่มของอุตสาหกรรมประเภทเดียวกัน	เมตร	0-500	501-1,000	>1,001
การเข้าถึงพื้นที่สวนสาธารณะและแหล่งนันทนาการ	เมตร	0-500	501-1,000	>1,001
พื้นที่ที่มีข้อร้องเรียน	เมตร	0-50	51-150	>151-500
การเข้าถึงถนนสายหลัก	เมตร	0-300	301-600	>601
โรงงานที่ได้รับมาตรฐานด้านสิ่งแวดล้อม	เมตร	0-500	501-1,000	>1,001
พื้นที่เสี่ยงต่อภัยพิบัติทางธรรมชาติ	-	เสี่ยงน้อย	เสี่ยงปานกลาง	เสี่ยงมาก

สำหรับเกณฑ์การกำหนดระดับที่ใช้กำหนดค่าคะแนนนั้น พิจารณาจากรูปแบบการเดินทางที่ประหยัดพลังงานมากที่สุดคือ “การเดินเท้า” จากเกณฑ์มาตรฐานการวางผังเมืองรวมของกรมโยธาธิการและผังเมือง (2551) เกณฑ์คะแนนที่ให้เป็นการให้คะแนนแบบระดับ (Rating) ซึ่งเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ได้รับความนิยม[17]โดยการลดหลั่นค่าคะแนนลงตามระดับความสำคัญของปัจจัยที่ได้ศึกษาเกณฑ์ระดับสูง 3 คะแนน เกณฑ์ระดับกลาง 2 คะแนน

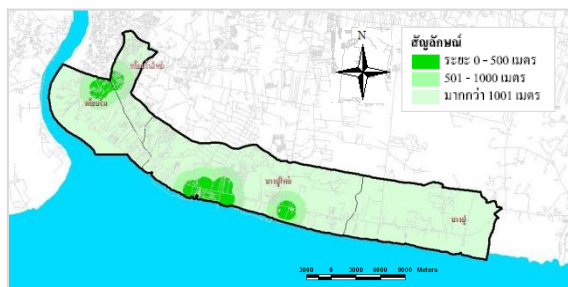
และเกณฑ์ระดับต่ำ 1 คะแนน จากนั้นนำเข้าสู่ข้อมูลด้วย GIS เพื่อสร้างแผนที่พื้นที่ที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย เช่น สร้างแผนที่ความหนาแน่นของโรงงานอุตสาหกรรม แสดงพื้นที่ความหนาแน่นเป็นระดับสี 3 ระดับ โดยสีเข้มมากหมายถึงระยะห่างระหว่างโรงงาน 0-500 เมตร สีเข้มน้อยหมายถึงระยะห่างระหว่างโรงงาน 501-1,000 เมตร และสีอ่อน หมายถึงระยะห่างระหว่างโรงงาน มากกว่า 1,000 เมตร เป็นต้น ผลการสร้างแผนที่ทั้ง 7 ปัจจัยแสดงดังรูปที่ 3



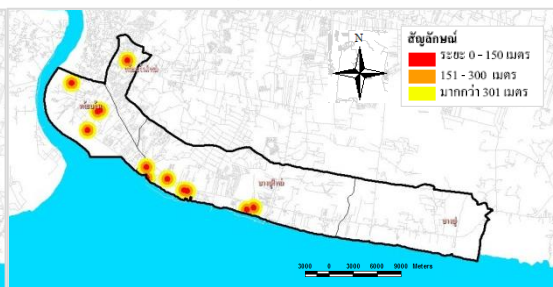
(ก) ความหนาแน่นของโรงงานอุตสาหกรรม



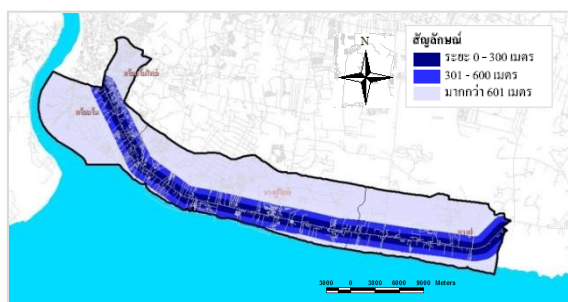
(ข) การรวมกลุ่มของอุตสาหกรรมประเภทเดียวกัน



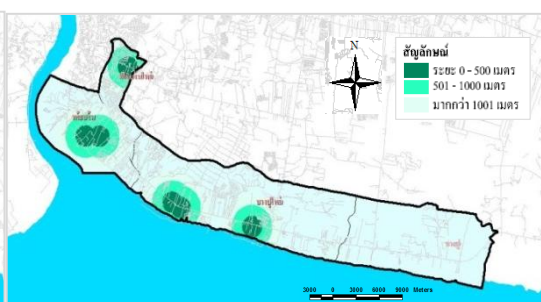
(ค) การเข้าถึงพื้นที่สวนสาธารณะและแหล่งนันทนาการ



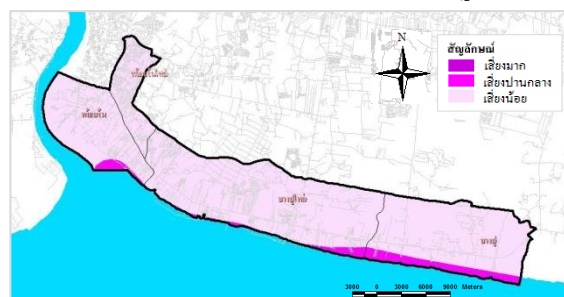
(ง) พื้นที่ที่มีข้อร้องเรียน



(จ) การเข้าถึงถนนสายหลัก



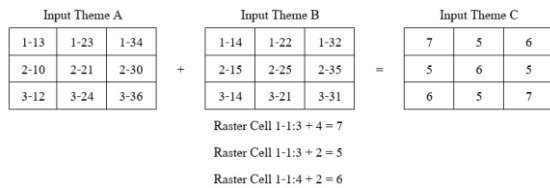
(ฉ) โรงงานที่ได้รับมาตรฐานด้านสิ่งแวดล้อม



(ช) พื้นที่เสี่ยงต่อภัยพิบัติทางธรรมชาติ

รูปที่ 3 (ก)-(ช) แผนที่ผลการวิเคราะห์พื้นที่ที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย

นำแผนที่ทั้งหมดซ้อนกัน[18] ตามหลักพีชคณิตบูลีน[19] ซึ่งมีแนวคิดดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 เทคนิควิเคราะห์ชีฟ แบบ Overlay ด้วยการบวก

จากนั้นคำนวณค่าคะแนนความเหมาะสมรวมของทุกปัจจัย โดย " S " คือคะแนนความเหมาะสมรวม " n " คือจำนวนของปัจจัย และ " R_i " ค่าน้ำหนักคะแนนความเหมาะสมของปัจจัยที่ 1 ถึง n ดังสมการที่ (1)

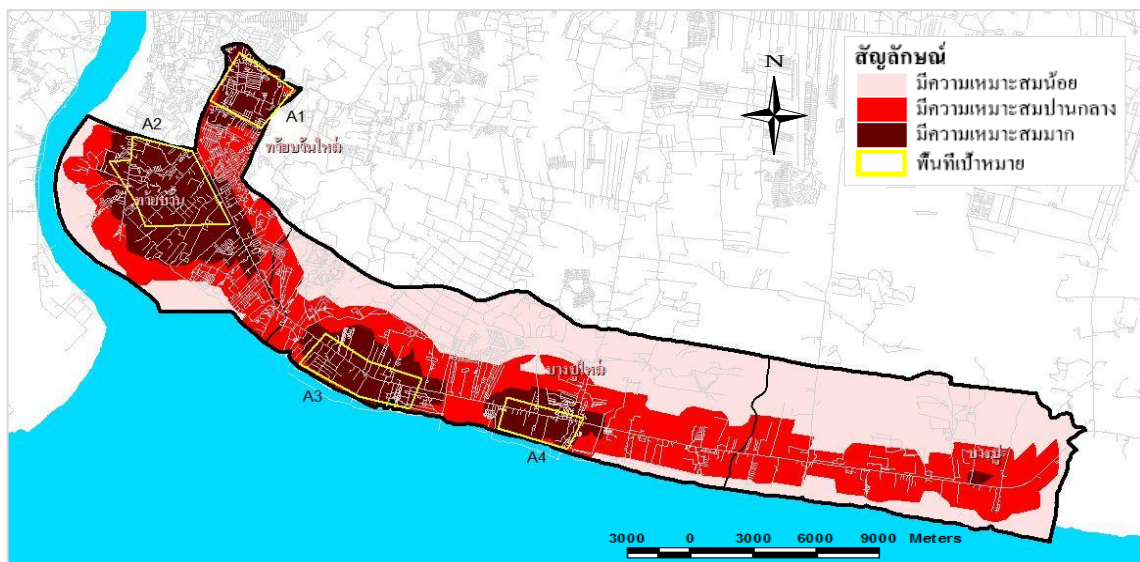
$$S = \sum_{i=1}^n R_i \quad (1)$$

แล้วจัดกลุ่มพื้นที่โดยแบ่งออกเป็น 3 ระดับ (หรือ 3 อันดับ-

ภาคชั้น) คือ พื้นที่ที่มีความเหมาะสมมาก พื้นที่ที่มีความเหมาะสมปานกลาง และพื้นที่ที่มีความเหมาะสมน้อย

4. ผลการดำเนินงานและอภิปรายผล

จากการประมวลผลด้วย GIS โดยการแบ่งแยกพื้นที่ออกเป็น 3 อันดับภาคชั้น โดยแบ่งค่าคะแนนแบบกระจายสม่ำเสมอ (Equal Interval) นำมาสู่การกำหนดขอบเขตของพื้นที่เป้าหมาย โดยพิจารณาจากบริเวณที่มีความเหมาะสมมาก บริเวณที่มีความเหมาะสมปานกลาง และบริเวณที่มีความเหมาะสมน้อย พบว่า สามารถกำหนดพื้นที่เป้าหมายได้ 4 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 4 ได้แก่ พื้นที่ A1 A2 A3 และ A4 จะเห็นว่าพื้นที่ A2 ครอบคลุมพื้นที่ที่มีความเหมาะสมในระดับมากที่สุดซึ่งมีขนาดพื้นที่ 2,063 ไร่ รองลงมาได้แก่ พื้นที่ A3 มีขนาดพื้นที่ 1,273 ไร่ พื้นที่ A1 มีขนาดพื้นที่ 1,080 ไร่ และ พื้นที่ A4 มีขนาดพื้นที่ 817 ไร่ ตามลำดับ



รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ที่เหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นเมืองอุตสาหกรรมเชิงนิเวศ

ซึ่งจากงานวิจัยนี้จะเห็นว่าการกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการวิเคราะห์การคัดเลือกพื้นที่เพิ่มเติม นั้น ส่งผลให้ได้พื้นที่ที่เหมาะสม 4 ตำแหน่ง ซึ่งลดลงจากการศึกษาก่อนหน้านี้ที่ได้พื้นที่ที่เหมาะสม 5 ตำแหน่ง [10], [11] นั้น แสดงถึงการเพิ่มปัจจัยที่ใช้เป็นตัวชี้วัด สามารถส่งผลให้มีการกำหนดพื้นที่ได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

5. สรุป

จากงานวิจัยการศึกษาหาพื้นที่ที่เหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นเมืองอุตสาหกรรมเชิงนิเวศ ได้ทำการศึกษาโดย

กำหนดปัจจัยที่ใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่เป้าหมาย 7 ปัจจัย ได้แก่ ความหนาแน่นของโรงงานอุตสาหกรรม การรวมกลุ่มของอุตสาหกรรมประเภทเดียวกัน การเข้าถึงพื้นที่สวนสาธารณะและแหล่งนันทนาการ พื้นที่ที่มีข้อร้องเรียน การเข้าถึงถนนสายหลัก โรงงานที่ได้รับมาตรฐานด้านสิ่งแวดล้อม และพื้นที่เสี่ยงต่อภัยพิบัติทางธรรมชาติ จากนั้นประมวลผลด้วย GIS พบว่า ได้บริเวณที่มีความเหมาะสมของพื้นที่ 4 ตำแหน่ง โดยบริเวณพื้นที่ที่มีความเหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นเมืองอุตสาหกรรมเชิงนิเวศมาก

ที่สุด คือ พื้นที่ A2ครอบคลุมบริเวณตำบลท้ายบ้าน มีพื้นที่ประมาณ 2,063 ไร่ซึ่งการคัดเลือกพื้นที่นี้จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อหน่วยงานในเขตเทศบาลตำบลบางปู เพื่อนำไปใช้ในการวางแผนพัฒนาพื้นที่สู่เมืองอุตสาหกรรมเชิงนิเวศในอนาคต และจะเป็นประโยชน์แก่พื้นที่อื่นๆ ในด้านวิธีการดำเนินงาน รวมทั้งแนวคิดการกำหนดปัจจัยที่ใช้เป็นตัววัดความเหมาะสมของพื้นที่เป้าหมายที่ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Seeboonrueng, "Public - Private Partnership to Increase the Degree Competition of the National Set Six Team Urgent Action Plan," Naewna News Online, [Online] <http://www.naewna.com>, 2015.
- [2] X. Dou, S. Li and J. Wang, "Ecological Strategy of City Sustainable Development," APCBEE Procedia 5, pp. 429 – 434, 2013.
- [3] Industrial Estate Authority of Thailand, "Starting of Eco Industrial Town," [Online] <http://www.ieat.go.th/eco/>, 2009.
- [4] Department of Industrial Works, "Eco Industrial Town Development," Eco Industrial Town Development Manual, [Online] http://www.iei.or.th/media/www/Eco_Manual%202012.pdf, 2012.
- [5] W. Simachockdee, "Why Must the Green Industry," TPA News, No.186, pp.26, June 2012.
- [6] P. Pechpakdee, "Principles and Definitions of Eco Industrial Town," Seminars to Exchange Knowledge of Eco Industrial Town, [online] <http://www.iei.or.th/>, 2013.
- [7] B. Kang, "Effects of Open Spaces on the Interpersonal Level of Resident Social Capital: A Comparative Case Study of Urban Neighborhoods in Guangzhou, China," Texas, USA: A & M University, pp. 11, 2006.
- [8] S. Ongsomwang, "Monitoring Changes Forest Area in Forest Demonstration Areas by Means Remote Sensing and GIS: A Case Study of Ngao District, Lampang Province," Bangkok: Forestry Office, Royal Forest Department, 1995.
- [9] U. Suksingha, "Database Geographic Information Systems (GIS) Management by ArcView 3.2a-3.3. Software," Bangkok: Technology Promotion Association (Thailand-Japan), 2005.
- [10] S. Ketsarapong, "Eco Industrial Town: Samutprakarn Province," Final Report Eco Industrial Town: Samutprakarn Project, Faculty of Engineering, Sripatum University, pp. 4-41 – 4-66, 2013.
- [11] S. Ketsarapong, "Eco Industrial Town: Samutprakarn," Master Plan Eco Industrial Town: Samutprakarn Project, Printing and Published by Faculty of Engineering, Sripatum University and Samutprakarn Industry Office, Bangkok: M&M Laser Print Part., Ltd., pp. 2-11 – 2-24, 2013.
- [12] K. Bunruamkaew and Y. Murayama, "Site Suitability Evaluation for Ecotourism Using GIS & AHP: A Case Study of Suratthani Province, Thailand," Procedia Social and Behavioral Sciences, pp. 269-278, 2011.
- [13] P. Ativitavas and S. Thongsukplang, "Potential Surface Analysis (PSA) for Urban Development in Samutsakorn, Nakornathom, Samutsongkram, Petchaburi and Huahin, Prajuabkirkhan," Journal of Architectural/Planning Research and Studies, Vol.4, pp.37-50, 2006.
- [14] Brownson et al., "Measuring the built environment for physical activity," American Journal of Preventive Medicine, 36(4), pp.1-53, 2000.
- [15] R. Passabut, "Eco Town to Sustainable Society," Faculty of Business Administration, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, [Online] <http://www.mtp.rmutt.ac.th>, 2010.
- [16] P. Iamtrakulet et al., "An Evaluation Framework for Sustainable Development: The Challenge for Planners and Development," JARS 10(1), pp.85-106, 2013.
- [17] M. Javadian, H. Shamskooshki and M. Momeni, "Application of Sustainable Urban Development in Environmental Suitability Analysis of Education Land Use by Using AHP and GIS in Tehran," Procedia Engineering, pp. 72-80, 2011.
- [18] N. Baniya, "Land Suitability Evaluation Using GIS for Vegetable Crops in Kathmandu Valley, Nepal," Faculty of Agriculture and Horticulture, Humboldt University zu Berlin, 2008.
- [19] NC Division of Coastal Management, "Land Suitability Analysis User Guide for ArcView 3.x and ArcGIS 9.x," NC Center for Geographic Information and Analysis, 2005.

อิทธิพลของสายพันธุ์ไม้และขนาดความหนาต่อสมบัติทางกลและ ทางกายภาพของแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสาน

Influence of Wood Species and Thickness Sizes on Mechanical and Physical Properties of Binderless Particleboard

ชาตรี หอมเขียว^{1*} สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์¹ วรพงศ์ บุญช่วยแทน¹

¹สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

¹หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ (Materials Processing Technology Research Unit)

* Corresponding Author, E-mail: chatree.h@rmutsv.ac.th

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษาอิทธิพลของสายพันธุ์ไม้และขนาดความหนาต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสาน ในการขึ้นรูปแผ่นใยไม้อัดเป็นชิ้นงานตัวอย่างกระทำโดยใช้เครื่องอัดร้อน เพื่อให้ได้แผ่นใยไม้อัดที่มีความหนาแน่นเฉลี่ย 0.8 กรัมต่อเซนติเมตร³ และจากการทดลองพบว่า แผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานจากผงไม้ยางพารามีสมบัติความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า ความแข็งแรงดัด การดูดซับน้ำ และการพองตัวสูงกว่าแผ่นใยไม้อัดจากผงไม้ปาล์มน้ำมัน นอกจากนี้พบด้วยว่า การเพิ่มขึ้นของขนาดความหนา (6, 9 และ 12 มิลลิเมตร) แผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสาน ส่งผลให้ความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า เบอร์เซ้นต์การดูดซับน้ำ และอัตราการพองตัวมีค่าลดลงตามความหนาที่เพิ่มขึ้น แต่ทว่าการเพิ่มขึ้นของขนาดความหนา ส่งผลให้แผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานมีความแข็งแรงดัดเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : แผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสาน ไม้ยางพารา ไม้ปาล์มน้ำมัน สายพันธุ์ไม้

Abstract

The objective of this research was to study influence of wood species and thickness sizes on mechanical and physical properties of binderless particleboard. The materials were manufactured into sample particleboards that have an average density 0.8 gram per centimeter³ by using a hot press machine. According to the testing results, the binderless particleboard produced from rubberwood flour (RWF) gave higher internal bond strength, modulus of rupture, water absorption and thickness swelling than the particleboard produced from oil palm trunk flour (OPTF). In addition, an increase in thickness sizes (6, 9 and 12 millimeter) of binderless particleboard resulting in the internal bond strength, water absorption and thickness swelling decreased. However, the modulus of rupture of particleboard increased with increasing thickness sizes.

Keywords : binderless particleboard, rubberwood, oil palm trunk, wood species

1. บทนำ

แผ่นใยไม้อัด (Fiberboard) เป็นผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่งที่ถูกผลิตขึ้นมาเพื่อทดแทนไม้ธรรมชาติที่มีปริมาณลดน้อยลง มีการขาดแคลน และราคาสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแผ่นใยไม้อัดสามารถผลิตได้โดยการนำเส้นใยธรรมชาติผสมตัวประสานหรือกาวที่ได้มาจากวัสดุธรรมชาติหรือวัสดุสังเคราะห์ จากนั้นขึ้นรูปด้วยการอัดร้อนเพื่อให้เกิดการประสานตัวระหว่างเส้นใยธรรมชาติเป็นแผ่นใยไม้อัด [1] นอกจากนี้ในปัจจุบันตัวประสานที่ใช้ผลิตแผ่นใยไม้อัดในเชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่จะมีส่วนผสมของสารฟอร์มาลดีไฮด์ ซึ่งเป็นสารที่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและสุขภาพของคน [2] ดังนั้นแนวโน้มของการวิจัย การผลิต และการตลาดในอนาคตจะเป็นการผลิตแผ่นใยไม้อัดที่ปราศจากสารฟอร์มาลดีไฮด์หรือมีปริมาณเพียงเล็กน้อย [1] ซึ่งตรงกับคุณลักษณะของแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสาน (Binderless particleboard) เพราะเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไม่มีสารเคมีเจือปน สามารถย่อยสลายได้ และผลิตจากวัสดุธรรมชาติ 100 % อย่างไรก็ตามจากการสำรวจงานวิจัยพบว่า สมบัติการดูดซับน้ำ การพองตัว และความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าของแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานขึ้นอยู่กับขนาดของผงไม้ที่ใช้เป็นส่วนผสม [3] เช่นเดียวกัน Okuda และ Sato [4] กล่าวว่า ความแข็งแรงดัด มอดูลัสการดัด และความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าของแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นของแผ่นใยไม้อัดที่เพิ่มขึ้น

สายพันธุ์ของเส้นใยธรรมชาติถือได้ว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญและมีผลกระทบเป็นอย่างมากต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสาน เนื่องจากสายพันธุ์ของเส้นใยธรรมชาติแต่ละชนิดจะมีส่วนประกอบทางเคมี โครงสร้าง ผิว และรูพรุนภายในที่แตกต่างกัน [5, 6] และมีนักวิจัยจำนวนน้อยมากที่ศึกษาผลกระทบของสายพันธุ์ไม้ต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสาน Nadhari และคณะ [7] ศึกษาสมบัติของแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานที่มีส่วนผสมของผงไม้ปาล์มน้ำมันและผงไม้กระถิน ซึ่งพบว่าแผ่นใยไม้อัดที่ผลิตจากผงไม้ปาล์มน้ำมันมีความ

แข็งแรงดัด และความแข็งแรงดึงตั้งฉากสูงกว่าที่ผลิตจากผงไม้กระถิน Lamaming และคณะ [8] พบว่าแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานที่ผลิตจากผงไม้ปาล์มน้ำมันอายุ 11 ปี มีความแข็งแรงดัด และความแข็งแรงดึงตั้งฉากสูงกว่าที่ผลิตจากผงไม้ปาล์มน้ำมันอายุ 27 ถึง 38 ปี ซึ่งจากการสำรวจงานวิจัยยังไม่พบการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานที่ผลิตจากผงไม้ปาล์มน้ำมันและผงไม้ยางพารา ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษาผลกระทบของสายพันธุ์ไม้และขนาดความหนาต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสาน ซึ่งผลจากงานวิจัยนี้จะให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อนักวิจัย นักพัฒนา และผู้ผลิตแผ่นใยไม้อัด

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

2.1 วัสดุ

วัสดุที่นำมาใช้ผลิตแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานคือ ี่เลื่อยจากต้นปาล์มน้ำมัน ซึ่งได้รับจากโรงงานแปรรูปเฟอร์นิเจอร์ไม้ปาล์มน้ำมันในจังหวัดสตูล (ประเทศไทย) และ ี่เลื่อยจากต้นยางพาราที่ได้รับจากโรงงานเฟอร์นิเจอร์ไม้ยางพาราในจังหวัดสงขลา (ประเทศไทย) วัสดุทั้ง 2 ชนิดนี้ มีองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1 ก่อนนำไปขึ้นรูปวัสดุเหล่านี้ถูกร้อนให้ผ่านตะแกรงขนาด 70 เมช (210 μm), 100 เมช (149 μm), 140 เมช (105 μm), 200 เมช (74 μm) และ 270 เมช (53 μm) เพื่อให้ได้ผงไม้ทั้ง 2 ชนิด ที่มีการกระจายตัวของขนาดเท่าๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของไม้ในแต่ละสายพันธุ์

Wood species	Chemical composition (%)			
	Cellulose	Hemicellulose	Lignin	Ash
Oil palm trunk [10]	37.14	31.8	22.3	4.3
Rubberwood [11]	39.0	29.0	28.0	4.0

2.2 การขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่าง

ก่อนนำผงไม้ปาล์มน้ำมันและผงไม้ยางพาราไปขึ้นรูปเป็นแผ่นขึ้นงานตัวอย่าง ผงไม้เหล่านี้ถูกรอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 110 $^{\circ}\text{C}$ เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อลดความชื้นในผงไม้ให้เหลือ 1–2 % จากนั้นนำผงไม้เทใส่ในกรอบ (Frame) และแม่พิมพ์ที่มีขนาดกว้าง 200 มม. $\times$ ยาว 250 มม. และมีความหนาต่างๆ คือ 6, 9 และ 12 มม. ต่อจากนั้น

อัดขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดร้อนด้วยอุณหภูมิ 200 °C แรงดันอัด 1,500 psi เป็นระยะเวลา 15 นาที และได้แผ่นขึ้นงานตัวอย่างที่มีความหนาแน่นเฉลี่ย 0.8 g/cm³ ในแต่ละสภาวะการทดลองขึ้นรูปแผ่นขึ้นงานแบบสุ่ม 5 แผ่นตัวอย่าง

2.3 การทดสอบแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า

แรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า (Internal Bond Strength; IBS) ถูกทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ รุ่น NRI-TS500-50 จากบริษัท นรินทร์ อินสตรูเมนต์ จำกัด และปฏิบัติตามมาตรฐาน JIS A 5905 ซึ่งขึ้นงานทดสอบมีขนาดกว้าง 50 มม. × ยาว 50 มม. ความเร็วที่ใช้ทดสอบดึงคือ 2 มม.ต่อนาที และทดสอบในอุณหภูมิห้อง 25 °C

2.4 การทดสอบความแข็งแรงดัด

การทดสอบความแข็งแรงดัดเป็นการทดสอบดัดแบบ 3 จุด โดยใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ และปฏิบัติตามมาตรฐาน JIS A 5905 ซึ่งขึ้นงานทดสอบมีขนาดกว้าง 50 มม. × ยาว 200 มม. ระยะห่างระหว่างแท่นรองรับขึ้นงาน มีระยะ 150 มม. ความเร็วในการทดสอบดัดคือ 10 มม.ต่อนาที และทดสอบในอุณหภูมิห้อง 25 °C

2.5 การทดสอบการดูดซับน้ำและการพองตัว

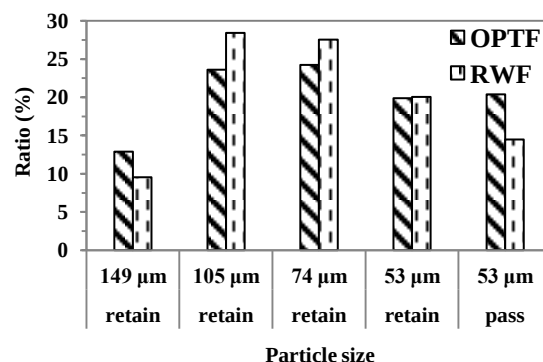
การทดสอบการดูดซับน้ำเป็นการปฏิบัติตามมาตรฐาน JIS A 5905 ซึ่งขึ้นงานทดสอบมีขนาด 50 มม. × 50 มม. ก่อนการทดสอบขึ้นงานถูกอบที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นชั่งน้ำหนักและวัดขนาดขึ้นงานก่อนการทดสอบทันทีด้วยเครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.01 กรัม และเวอร์เนียสริคิโดลที่มีความละเอียด 0.01 มม. ตามลำดับ จากนั้นขึ้นงานทดสอบถูกแช่ในน้ำจนครบเวลา 24 ชั่วโมง ขึ้นงานถูกหยิบขึ้นจากน้ำและถูกซับด้วยกระดาษ จากนั้นนำขึ้นงานชั่งน้ำหนักและวัดขนาดทันที เพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักและขนาดความหนา

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 การกระจายตัวของขนาดผงไม้

อัตราการกระจายตัวของขนาดผงไม้ปาล์มน้ำมันและไม้ยางพาราสำหรับใช้ผลิตแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานถูกแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเห็นได้ว่าผงไม้ประมาณ 70 % มีขนาดอยู่ในช่วง 53-105 µm และมีการกระจายตัวเป็นแบบ

ปกติ (Normal curves) เช่นเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบขนาดของผงไม้ทั้ง 2 สายพันธุ์ พบว่ามีอัตราการกระจายตัวที่ใกล้เคียงกัน แต่ดูเหมือนว่าผงไม้ปาล์มน้ำมันจะมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าเล็กน้อย ในทางทฤษฎีการกระจายตัวของขนาดผงไม้เป็นปัจจัยสำคัญที่จำเป็นต้องพิจารณาและควบคุมเมื่อต้องการผลิตแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสาน เพราะขนาดผงไม้มีผลกระทบโดยตรงต่อความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า และความแข็งแรงดัด [8] เนื่องจากผงไม้ที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าจะมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอและมีการยึดเกาะหรือการประสานกันระหว่างอนุภาคผงไม้ที่แน่นหนาแน่นกว่าผงไม้แบบหยาบ Lamaming และคณะ [8] กล่าวว่าแผ่นใยไม้อัดที่ผลิตจากผงไม้ที่มีอนุภาคเล็ก (100-500 µm) มีความแข็งแรงดัดและความแข็งแรงดึงสูงกว่าแผ่นใยไม้อัดที่ผลิตจากผงไม้แบบหยาบกว่า (500-1000 µm)

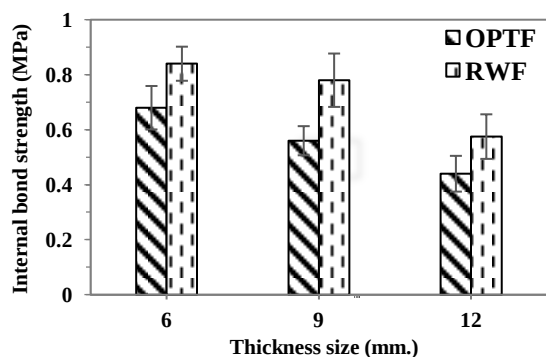


รูปที่ 1 การกระจายตัวของขนาดผงไม้ปาล์มน้ำมันและผงไม้ยางพารา สำหรับผลิตแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสาน

3.2 ความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า

ผลกระทบของสายพันธุ์ไม้และขนาดความหนาต่อสมบัติความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าของแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานถูกแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งพบว่าค่าความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าของแผ่นใยไม้อัดจากผงไม้ยางพารามีค่าสูงกว่าแผ่นใยไม้อัดจากผงไม้ปาล์มน้ำมัน 19.04 %, 28.20 % และ 23.47 % ที่ขนาดความหนาของแผ่นใยไม้อัด 6, 9 และ 12 มม. ตามลำดับ สิ่งนี้เกิดจากผงไม้ยางพารามีองค์ประกอบทางเคมีคือ ลิกนิน (Lignin) ที่สูงกว่าผงไม้ปาล์มน้ำมัน ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่า การยึดเกาะระหว่างอนุภาคของผงไม้เกิดขึ้นจากการเชื่อมโยงของลิกนิน (Cross-linking of lignin) ภายในโครงสร้างแผ่นใยไม้อัด [11, 12] ดังนั้นผงไม้ที่มี

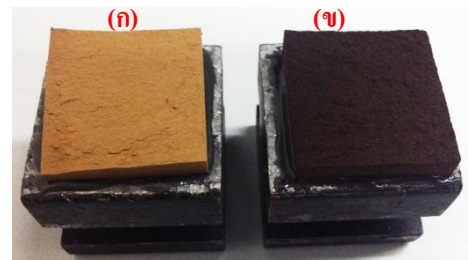
ปริมาณลิกนินสูงกว่าจึงมีความสามารถการยึดเกาะภายในโครงสร้างที่ดีกว่า ส่งผลให้แผ่นใยไม้อัดมีความแข็งแรงสูงขึ้น หรือมีความสามารถต้านทานแรงที่มากระทำได้เพิ่มขึ้น นอกจากนี้จากการทดลองยังพบว่า ผงไม้ปาล์มน้ำมันมีความหนาแน่นมากกว่าผงไม้ยางพารา ทำให้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปผงไม้ทั้ง 2 สายพันธุ์ ด้วยน้ำหนักที่เท่ากัน ผงไม้ยางพาราที่มีปริมาตรมากกว่า เมื่อถูกอัดจะมีการอัดแน่นภายในโครงสร้างสูงกว่าผงไม้ปาล์มน้ำมัน ตลอดจนมีรูพรุนหรือช่องว่างภายในโครงสร้างลดลง ดังนั้นความแข็งแรงของแผ่นใยไม้อัดจากผงไม้ยางพาราจึงมีความแข็งแรงสูงกว่าที่ผลิตจากผงไม้ปาล์มน้ำมัน



รูปที่ 2 ผลกระทบของสายพันธุ์ไม้และขนาดความหนาต่อความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า

จากการวิเคราะห์ผลกระทบขนาดความหนาของแผ่นใยไม้อัดต่อสมบัติความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าพบว่า การเพิ่มขึ้นของขนาดความหนาแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสาน ส่งผลให้ความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้ามีค่าลดลงตามความหนาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากแผ่นใยไม้อัดที่มีขนาดความหนาน้อยกว่า มีอัตราการอัดแน่นภายในโครงสร้างที่สูงกว่า [13] เช่นเดียวกันเมื่อแผ่นใยไม้อัดมีความหนาเพิ่มขึ้น บริเวณชั้นแกนกลาง (Core layer) ของแผ่นใยไม้อัดมีความแข็งแรงลดลง เพราะอุณหภูมิการหลอมเหลวลิกนินบริเวณชั้นแกนกลางเพื่อประสานระหว่างอนุภาคผงไม้ลดลงตามความหนาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในการขึ้นรูปแผ่นใยไม้อัดเป็นการถ่ายเทความร้อนจากฮีตเตอร์ไปยังแม่พิมพ์ และจากแม่พิมพ์ถ่ายเทไปยังผงไม้ ซึ่งบริเวณขอบนอกสุดทั้งสองด้านของแผ่นใยไม้อัดจะได้รับความร้อนสูงสุด และบริเวณชั้นแกนกลางจะได้รับความร้อนต่ำสุด ทำให้ความสามารถการเชื่อมโยงของลิกนินระหว่างอนุภาคผงไม้

ลดลงตามอุณหภูมิที่ต่ำลง Homkiew และคณะ [12] กล่าวว่า เมื่ออุณหภูมิการอัดร้อนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ลิกนินเกิดการหลอมเหลวและเกิดการเชื่อมโยง เปรียบเสมือนเป็นกาวหรือเมทริกซ์ที่ประสานอนุภาคผงไม้ให้ยึดเกาะกัน [11] จากข้อมูลเหล่านี้สามารถพิสูจน์ได้จากรูปที่ 3 ซึ่งเห็นได้ว่าการเสียหายหรือการขาดออกจากกันของแผ่นใยไม้อัดจากผงไม้ทั้ง 2 สายพันธุ์ เกิดขึ้นที่บริเวณชั้นแกนกลางของแผ่นใยไม้อัด ซึ่งเป็นบริเวณที่แข็งแรงน้อยสุด ดังที่กล่าวข้างต้น



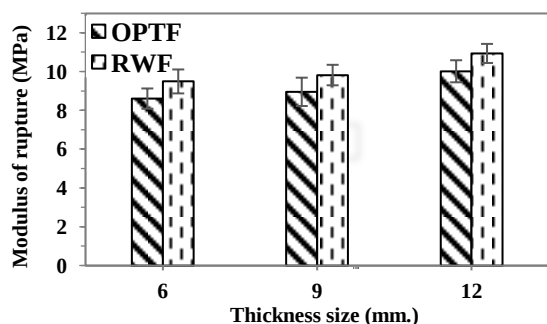
รูปที่ 3 การเสียหายของแผ่นใยไม้อัดที่ผลิตจาก (ก) ผงไม้ยางพารา และ (ข) ผงไม้ปาล์มน้ำมัน หลังจากทดสอบดึง

3.3 ความแข็งแรงดัด

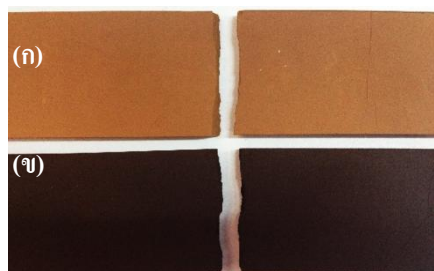
ความแข็งแรงดัดเป็นสมบัติที่จำเป็นต้องพิจารณา เมื่อมีการพัฒนาแผ่นใยไม้อัด เพราะการประยุกต์ใช้งานของแผ่นใยไม้อัดส่วนใหญ่จะรับแรงในลักษณะของการดัด รูปที่ 4 แสดงผลกระทบของสายพันธุ์ไม้และขนาดความหนาต่อความแข็งแรงดัด ซึ่งพบว่าแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานที่ผลิตจากผงไม้ยางพารามีความแข็งแรงดัดมากกว่าที่ผลิตจากผงไม้ปาล์มน้ำมัน 9.37 %, 8.76 % และ 8.41 % ที่ขนาดความหนาของแผ่นใยไม้อัด 6, 9 และ 12 มม. ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลของความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า สิ่งนี้เกิดจากผงไม้ยางพารามีการเชื่อมโยงของลิกนินที่ดีกว่า หรือการยึดเกาะภายในโครงสร้างที่แข็งแรงกว่า ดังที่ได้อธิบายในสมบัติความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า

อย่างไรก็ตามเมื่อขนาดความหนาของแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานเพิ่มขึ้น พบว่าความแข็งแรงดัดของแผ่นใยไม้อัดจากผงไม้ทั้ง 2 สายพันธุ์ เพิ่มขึ้นตามขนาดความหนา เนื่องจากแผ่นใยไม้อัดที่มีขนาดความหนาสูงกว่า จำเป็นต้องใช้ขนาดของแรงที่สูงกว่าเช่นกัน เพื่อจะทำให้แผ่นใยไม้อัดเกิดการแตกหัก [13] เช่นเดียวกันในทางทฤษฎีของการทดสอบดัด จุดที่รับแรงสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณขอบนอกสุดของแผ่นใยไม้อัด ดังนั้นการต้านทานของแรงดัดที่มา

กระทำจึงขึ้นอยู่กับความแข็งแรงที่ขอบนอกของแผ่นใยไม้อัดเป็นหลัก ซึ่งจะแตกต่างจากการทดสอบแรงดึงที่การขาดออกจากกันของแผ่นใยไม้อัดจะเกิดขึ้นตรงจุดที่แข็งแรงน้อยที่สุด นอกจากนี้ลักษณะการแตกหักของแผ่นใยไม้อัดจากผงไม้ทั้ง 2 สายพันธุ์ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5



รูปที่ 4 ผลกระทบของสายพันธุ์ไม้และขนาดความหนาต่อความแข็งแรงคด

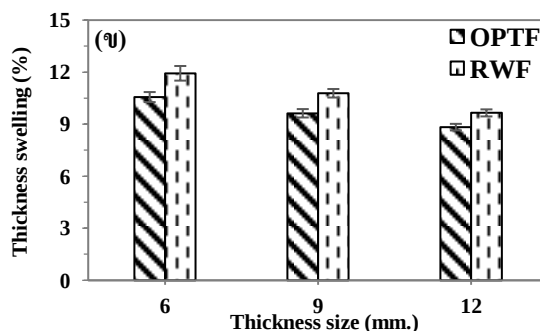
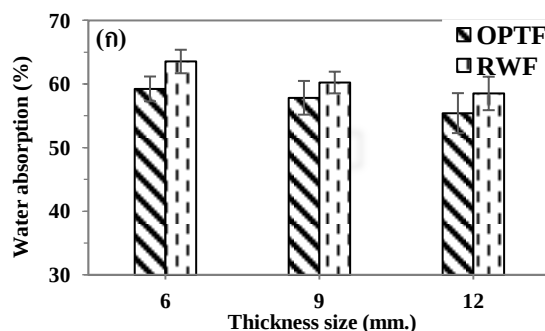


รูปที่ 5 การแตกหักของแผ่นใยไม้อัดที่ผลิตจาก (ก) ผงไม้ยางพารา และ (ข) ผงไม้ปาล์มน้ำมัน หลังจากทดสอบคด

3.4 การดูดซับน้ำและการพองตัว

เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำและการพองตัวของแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานที่ผลิตจากผงไม้ยางพาราและที่ผลิตจากผงไม้ปาล์มน้ำมันหลังจากถูกแช่น้ำเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ถูกแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งพบว่าแผ่นใยไม้อัดจากผงไม้ยางพาราดูดซับน้ำมากกว่าแผ่นใยไม้อัดจากผงไม้ปาล์มน้ำมัน 6.76 %, 3.98 % และ 5.28 % ที่ขนาดความหนาของแผ่นใยไม้อัด 6, 9 และ 12 มม. ตามลำดับ เนื่องจากไม้ยางพารามีองค์ประกอบทางเคมีคือ เซลลูโลส มากกว่าไม้ปาล์มน้ำมันดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่า เซลลูโลสเป็นสารที่ชอบดูดซับน้ำ (Hydrophilic) [5, 14] ทำให้เส้นใยธรรมชาติที่มีสารเซลลูโลสมากกว่า มีอัตราการดูดซับน้ำสูงกว่า เช่นเดียวกันจากที่ได้กล่าวในสมบัติความแข็งแรงดึงตั้งจากกับผิวหน้าว่า ผงไม้ปาล์มน้ำมันมีความหนาแน่นมากกว่าผงไม้ยางพารา นั้นหมายความว่า ใน

การขึ้นรูปแผ่นใยไม้อัด 1 แผ่น ปริมาตรผงไม้ยางพาราที่ต้องใช้จะมากกว่าปริมาตรผงไม้ปาล์มน้ำมัน เมื่อเปรียบเทียบกันด้วยน้ำหนักที่เท่ากัน ดังนั้นด้วยปริมาตรผงไม้ยางพาราก่อนการขึ้นรูปที่มากกว่า แผ่นใยไม้อัดจากผงไม้ยางพาราจึงมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำสูงกว่าจากผงไม้ปาล์มน้ำมัน



รูปที่ 6 ผลกระทบของสายพันธุ์ไม้และขนาดความหนาต่อสมบัติ (ก) การดูดซับน้ำ และ (ข) การพองตัว

นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ผลกระทบของขนาดความหนาต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ พบด้วยว่าการเพิ่มขึ้นของขนาดความหนาส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำลดลงอย่างช้าๆ ตามความหนาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อชิ้นงานมีขนาดหนาขึ้น การแทรกซึมของน้ำเข้าสู่โครงสร้างภายในเป็นไปได้ยากขึ้นและต้องใช้เวลาในการแทรกซึมเพิ่มขึ้นเพื่อให้มีการดูดซับน้ำทั่วทั้งชิ้นงาน ซึ่งจะต่างจากแผ่นใยไม้อัดขนาดบางที่การดูดซับน้ำให้ทั่วทั้งชิ้นงานจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ด้วยระยะเวลาการแช่น้ำ 24 ชม. เท่ากัน แผ่นใยไม้อัดขนาดหนากว่ามีอัตราการดูดซับน้ำน้อยกว่า ในความเป็นจริงการแทรกซึมของน้ำเข้าสู่แผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานสามารถแยกได้เป็น 3 กลไก คือ 1) การแทรกซึมของน้ำเข้าสู่ผงไม้บริเวณผิวของแผ่นใยไม้อัดโดยตรง 2) การแทรกซึมของน้ำเข้าสู่รูพรุนต่างๆ ภายในโครงสร้าง และ 3) การแทรกซึมเข้าสู่ผิวหน้าระหว่างอนุภาคผงไม้ เนื่องจากการยึดเกาะที่ไม่ดีระหว่างอนุภาคผงไม้

เช่นเดียวกันเมื่อวิเคราะห์ผลกระทบของสายพันธุ์ไม้ต่อเปอร์เซ็นต์การพองตัว พบว่ามีพฤติกรรมที่สอดคล้องกับสมบัติการดูดซับน้ำคือ แผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานจากผงไม้ยางพารามีอัตราการพองตัวมากกว่าแผ่นใยไม้อัดจากผงไม้ปาล์มน้ำมัน และการเพิ่มขึ้นของขนาดความหนาส่งผลให้อัตราการพองตัวลดลงอย่างช้าๆ ตามความหนาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเหตุผลของพฤติกรรมเหล่านี้สามารถอธิบายได้ เช่นเดียวกับสมบัติการดูดซับน้ำ เพราะอัตราการพองตัวของแผ่นใยไม้อัดขึ้นอยู่กับปริมาณการดูดซับน้ำของแผ่นใยไม้อัด ถ้าแผ่นใยไม้อัดดูดซับน้ำมากจะส่งผลให้การพองตัวของแผ่นใยไม้อัดสูงตามไปด้วย

4. สรุป

อิทธิพลของสายพันธุ์ไม้และขนาดความหนาต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานถูกศึกษา ซึ่งพบว่าแผ่นใยไม้อัดที่ผลิตจากผงไม้ยางพารามีสมบัติความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าและความแข็งแรงดัดสูงกว่าแผ่นใยไม้อัดที่ผลิตจากผงไม้ปาล์มน้ำมัน เนื่องจากผงไม้ยางพารามีองค์ประกอบทางเคมีคือลิกนินที่สูงกว่า ทำให้การยึดเกาะภายในโครงสร้างที่ดีกว่า เช่นเดียวกันแผ่นใยไม้อัดจากผงไม้ยางพารามีเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำและการพองตัวสูงกว่าแผ่นใยไม้อัดจากผงไม้ปาล์มน้ำมัน เพราะไม้ยางพารามีองค์ประกอบทางเคมีคือเซลลูโลส มากกว่าไม้ปาล์มน้ำมัน ซึ่งเซลลูโลสเป็นสารที่ชอบดูดซับน้ำ นอกจากนี้พบด้วยว่า การเพิ่มขึ้นของขนาดความหนาแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสาน ส่งผลให้ความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้ามีค่าลดลงตามความหนาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากแผ่นใยไม้อัดที่มีขนาดบางกว่า มีอัตราการอัดแน่นภายในโครงสร้างที่สูงกว่า แต่ทว่าการเพิ่มขึ้นของขนาดความหนา ส่งผลให้แผ่นใยไม้อัดมีความแข็งแรงดัดเพิ่มขึ้น และยังพบด้วยว่าการเพิ่มขึ้นของขนาดความหนาส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำและการพองตัวลดลงอย่างช้าๆ ตามความหนาที่เพิ่มขึ้น เพราะการแทรกซึมของน้ำเข้าสู่โครงสร้างภายในเป็นไปได้ยากขึ้น สุดท้ายผลจากงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่ออุตสาหกรรมผลิตแผ่นใยไม้อัด สำหรับใช้เป็นข้อมูลพัฒนาสมรรถนะทางวิศวกรรมของแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสาน

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Hashim, W.W. Nadhari, O. Sulaiman, et al., "Characterization of Raw Materials and Manufactured Binderless Particleboard from Oil Palm Biomass," *Materials and Design*, Vol.32, pp.246-254, 2011.
- [2] R. Hashim, N. Said, J. Lamaming, M. Baskaran, et al., "Influence of Press Temperature on the Properties of Binderless Particleboard Made from Oil Palm Trunk," *Materials and Design*, Vol.32, pp.2520-2525, 2011.
- [3] M.W. Marashdeh, R. Hashim, A.A. Tajuddin, et al., "Effect of Particle Size on the Characterization of Binderless Particleboard Made from Rhizophora SPP," *BioResources*, Vol.6, pp.4028-4044, 2011.
- [4] N. Okuda and M. Sato, "Manufacture and Mechanical Properties of Binderless Boards from Kenaf Core," *Journal of Wood Science*, Vol.50, pp.53-61, 2004.
- [5] H. Bouafif, A. Koubaa, P. Perre and A. Cloutier, "Effects of Fiber Characteristics on the Physical and Mechanical Properties of Wood Plastic Composites," *Composites: Part A*, Vol.40, pp.1975-1981, 2009.
- [6] C. Homkhiew, "Development and Applications of Natural Fiber/Thermoplastic Composites for Industrial," *The Journal of Industrial Technology*, Vol.10, pp.97-110, 2014.
- [7] W.W. Nadhari, R. Hashim, S. Hiziroglu, et al., "Measurement of Some Properties of Binderless Composites Manufactured from Oil Palm Trunks and Acacia Mangium," *Measurement*, Vol.50, pp.250-254, 2014.
- [8] J. Lamaming, R. Hashim, O. Sulaiman, et al., "Measurement of Some Properties of Binderless Particleboard made from Young and Old Oil Palm Trunks," *Measurement*, Vol.47, pp.813-819, 2014.
- [9] V. Punsuvon, P. Vaithanomsat, P. Pumiput, et al., "Fractionation of Chemical Components of Oil Palm Trunk by Steam Explosion for Xylitol and Alcohol Production," *Proceedings of 59th Appita Annual Conference*, New Zealand, 16-19 May 2005, pp.301-307.
- [10] P. Petchpradab, T. Yoshida, T. Charinpanitkul and Y. Matsumura, "Hydrothermal Pretreatment of Rubber Wood for the Saccharification Process," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol.48, pp.4587-4591, 2009.
- [11] N. Saadaoui, A. Rouilly, K. Fares and L. Rigal, "Characterization of Date Palm Lignocellulosic by-Products and Self-Bonded Composite Materials Obtained thereof," *Materials and Design*, Vol.50, pp.302-308, 2013.
- [12] C. Homkhiew, S. Rawangwong and W. Boonchouytan, "Optimizing Condition for Manufacturing the Binderless Particleboard by Response Surface Methodology," *The Journal of Industrial Technology*, Vol.11, pp.40-55, 2015.
- [13] M. Baskaran, R. Hashim, O. Sulaiman, et al., "Optimization of Press Temperature and Time for Binderless Particleboard Manufactured from Oil Palm Trunk Biomass at Different Thickness Levels," *Materials Today Communications*, Vol.3, pp.87-95, 2015.
- [14] C. Homkhiew, T. Ratanawilai, S. Rawangwong and W. Boonchouytan, "Effect of Temperatures and Water Types on Water Absorption of Rubberwood Flour-Polypropylene Composites," *Ladkrabang Engineering Journal*, Vol.32, pp.49-54, 2015.

อิทธิพลของลวดตาข่ายสแตนเลสต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน ของเตาแก๊สหุงต้ม

แบบ Vertical port

Effect of Stainless Steel Wire Mesh on The Thermal Efficiency of Vertical Port Gas Cooking Stove

อนิรุตต์ มัทธจักร* บงกช บุญเพชร อมรพันธุ์ แสงส่อง วีรยุทธ จันทะโยทา

ห้องปฏิบัติการการประยุกต์ใช้ลำเจ็ทและการเผาไหม้ (CJART) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ตำบลเมืองศรีโค อำเภวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190

*E-mail: Anirut.M@ubu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มที่ใช้ในครัวเรือนแบบ Vertical port ที่มีปริมาณการใช้แก๊สแอลพีจี (Liquefied Petroleum Gas, LPG) สูงสุดไม่เกิน 5.78 Kw ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.2312-2549 โดยศึกษาอิทธิพลของขนาดของวัสดุพรุนที่ทำมาจากลวดตาข่ายสแตนเลสบนหัวเตาต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน โดยการทดสอบดัดน้ำตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2312-2549 และทำการตรวจวัดมลพิษที่เกิดจากเผาไหม้ นอกจากนี้ยังศึกษาอิทธิพลของ Firing rate และขนาดของภาชนะต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนอีกด้วย จากการทดลองพบว่า ลวดตาข่าย สแตนเลสขนาด 16 mpi เป็นขนาดที่มีความเหมาะสมที่สุดที่ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงที่สุด และเมื่อ Firing rate เพิ่มสูงขึ้น ประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะมีค่าต่ำลง อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อภาชนะมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นจากลวดตาข่ายสแตนเลสขนาด 16 mpi Firing rate เท่ากับ 0.89 และหม้อขนาด 32 cm ซึ่งให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดถึงร้อยละ 77.06 และมีการปลดปล่อย CO และ NO_x สูงสุดไม่เกิน 600 ppm และ 80 ppm ตามลำดับ ในทุกกรณี

คำสำคัญ: ตาข่ายสแตนเลส, ประสิทธิภาพเชิงความร้อน, เตาแก๊สแบบ Vertical port, การปลดปล่อยมลพิษ.

Abstract

The objective of this research is to improve the thermal efficiency of vertical port gas stove, which consumes the highest amount of Liquefied Petroleum Gas (LPG) not excess 5.78 kW, in accordance with Thai Industrial Standard 2312-2549 (TIS. 2312-2549). In this study, effect of porous media made from stainless steel wire mesh installed on stove head on the thermal efficiency of the stove was investigated. The thermal efficiency and pollutant emission of the gas stove were investigated by

boiling test based upon TIS 2312-2549. Moreover, effect of firing rate and container sizes on thermal efficiency and pollutant emission was also studied. From the experimental results, it was found that mesh size of 16 mpi was the most suitable caused the highest thermal efficiency. The firing rate increased, the thermal efficiency decreased. However, the thermal efficiency increased when the container size increased. The maximum thermal efficiency of 77.06 % was obtained from the wire mesh of 16 mpi, the pot of 32 cm and the firing rate of 0.89 kW. The CO and NOx emission were not more than 600 ppm and 80 ppm, respectively, in all cases.

Keywords : Stainless steel wire mesh, thermal efficiency, vertical port cooking stove, pollutant emission.

1. บทนำ

ปัจจุบันทั่วโลกประสบปัญหาสถานการณ์วิกฤติด้านพลังงานที่มีแนวโน้มทวีความรุนแรงมากขึ้นทุกปี จากสถิติการใช้พลังงานของกระทรวงพลังงาน [1] พบว่าประเทศไทยมีการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่เป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะ แก๊สปิโตรเลียมเหลว หรือ แอลพีจี (Liquefied Petroleum Gas, LPG) จากสถิติปริมาณการใช้แก๊สแอลพีจีของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2553-2557 พบว่า ภาคครัวเรือนใช้แก๊สแอลพีจีคิดเป็นร้อยละ 31 ในขณะที่ภาคขนส่งหรือรถยนต์ใช้แก๊สแอลพีจีคิดเป็นร้อยละ 25 ซึ่งจากปัญหาวิกฤติด้านพลังงานดังกล่าวข้างต้น ก็ส่งผลกระทบต่อแก๊สแอลพีจีเช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งภาคครัวเรือน หรือ อุตสาหกรรมด้านอาหารที่ต้องใช้เตาแก๊สหุงต้มเป็นแหล่งให้ความร้อนในเตาแก๊สหุงต้ม ซึ่งการถ่ายเทความร้อนในเตาแก๊สหุงต้มจะเป็นลักษณะของเปลวไฟพุ่งชน (Impinging flame jet) ซึ่งจะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูง [2] และต้องใช้แก๊สแอลพีจีค่อนข้างมาก ซึ่งเตาแก๊สหุงต้มที่ใช้ในครัวเรือนมีการเผาไหม้แบบเปิด (Open combustion) จึงไม่สามารถนำความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้มาใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มที่ เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจากเปลวไฟไปยังภาชนะถูกจำกัดด้วยการพาความร้อน (Convection) เป็นส่วนใหญ่ ทั้งยังมีการสูญเสียความร้อนเป็นจำนวนมากไปกับแก๊สไอเสียโดยการพาความร้อน (Convection) และสูญเสียความร้อนของเปลวไฟจากแผ่รังสีความร้อน (Radiation) อีกด้วย ซึ่งทำให้เตา

แก๊สหุงต้มที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจึงมีงานวิจัยเพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มอย่างต่อเนื่อง อาทิ ในปี ค.ศ. 1996 S.Jugjai และ S.Sanijai [3] ได้ปรับปรุงเตาแก๊สหุงต้มที่ใช้ในครัวเรือนให้มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้น โดยใช้หลักหมุนเวียนความร้อนของแก๊สไอเสียนำไปอุ่นอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (Preheat) จากหลักการนี้เองทำให้เกิดแนวความคิดของเตาต้นแบบเตาแก๊สประสิทธิภาพสูง (Porous Radiant Recirculated Burner, PRRB) แต่เนื่องจากหัวเตาแก๊สที่อยู่ นั้นเป็นหัวเตาขนาดเล็กไม่เหมาะสมกับการใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร

ต่อมา ณัฐดิ รังสิมันตุชาติ [4] จึงขยายขนาดให้ใหญ่ขึ้นโดยใช้กับหัวเตาแก๊สขนาด KB-10 พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนให้สูงขึ้นได้โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 12 และคิดเป็นอัตราการประหยัดโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 30 เมื่อเปรียบเทียบกับเตา KB-10 ทั่วไป และได้ปรับปรุงหัวเตาให้เปลวไฟที่พุ่งออกมามีลักษณะของการหมุนวนสู่ศูนย์กลาง พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนให้สูงขึ้นได้โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 20 เมื่อเปรียบเทียบกับเตาแบบ Swirl burner ที่ยังไม่ได้มีการประกอบเข้ากับโครงสร้างที่ออกแบบไว้ และเมื่อเปรียบเทียบกับเตา KB-10 ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนให้สูงขึ้นได้โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 30 และคิดเป็นอัตราการประหยัดโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 51

ถึงแม้ว่ามีการวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มแอลพีจี [2-4] แต่งานวิจัยส่วนใหญ่จะเน้นหนัก หรือสนใจศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สแรงดันสูง หรือตามท้องตลาดเรียกว่า เตาหัวฟู หรือ เตา KB ซึ่งเป็นเตาแก๊สที่มีใหญ่กว่าเตาแก๊สหุงต้มที่ใช้ในครัวเรือน เช่น เตาแก๊ส KB-5, KB-8 และ KB-10 ซึ่งเป็นเตาที่มีการใช้แก๊สแอลพีจีสูงมากกว่า 5.78 kW ต่อหัวเตา ในขณะที่เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.2312-2549 [5] ซึ่งเป็นเตาแก๊สหุงต้มที่ใช้ตามครัวเรือน มีปริมาณการใช้แก๊สแอลพีจีสูงสุด 5.78 กิโลวัตต์ ต่อ 1 หัวเตา โดยมีการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนอย่างจริงจังน้อยมาก ทั้งที่เป็นเตาแก๊สหุงต้มแอลพีจีที่ใช้ในทุกครัวเรือน และยังใช้ในอุตสาหกรรมอาหารขนาดเล็ก อาทิ ร้านอาหารต่างๆ ไปอีกด้วย

ดังนั้น การศึกษานี้จึงมีแนวความคิดในการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนตามมาตรฐาน มอก. 2312-2549 แบบ Vertical port โดยทำการศึกษาหาคุณสมบัติของวัสดุพรุน (Porous media) ชนิดลวดตาข่ายสแตนเลส (Stainless steel wire mesh) นั้นคือขนาดรูต่อความยาว 1 นิ้ว (Mesh size มีหน่วยเป็น mesh per inch, mpi) ที่เหมาะสม ที่ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มแบบ Vertical port มีค่าเพิ่มขึ้นและปลอดภัยต่อผู้ใช้ที่เหมาะสม

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง เพื่อทดสอบหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนตามมาตรฐาน มอก. 2312-2549 ซึ่งใช้หลักการ Boiling test เริ่มจากการอุ่นหัวเตาให้ร้อนเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำน้ำที่ชั่งมวล 2.7 kg ในหม้อเบอร์ขนาด 22 cm พร้อมทั้งวัดอุณหภูมิน้ำก่อนต้ม ปรับอัตราการไหลของแก๊สตามต้องการแล้วบันทึกค่าไว้เพื่อนำไปหาอัตราการเผาไหม้ นำหม้อที่ใส่น้ำแล้วตั้งบนเตาพร้อมทั้งจับเวลา และวัดอุณหภูมิของน้ำด้วย ต้มจนกระทั่งน้ำมีอุณหภูมิถึง 90 °C แล้ววัดค่า

อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับปริมาณความร้อนที่ได้รับจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งหาได้จากเวลาที่ใช้ในการต้มและอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง แล้วนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพที่ 1

$$\eta_{th} = \left\{ \frac{m \times C \times (t_2 - t_1)}{V \times Q} \times \frac{273 + t_g}{298} \times \frac{101.3}{B + P_m - S} \right\} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ m คือ มวลของน้ำที่ใช้ในการทดสอบ (kg)

C คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (MJ/kg·K)

t_1 คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ (K)

t_2 คือ อุณหภูมิสุดท้ายของน้ำ (K)

V คือ ปริมาณของแก๊สที่ใช้ทดสอบ (m³)

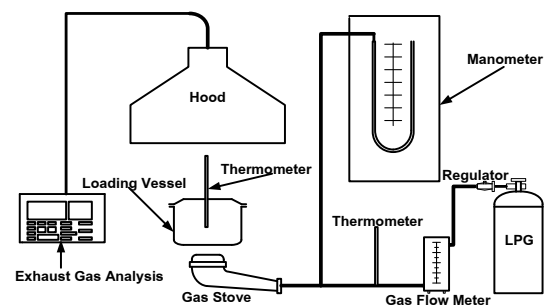
Q คือ LHV_{LPG} ที่ความดัน 101.3 kPa (MJ/m³)

t_g คือ อุณหภูมิของแก๊สที่ใช้ทดสอบ (°C)

B คือ ความดันบรรยากาศขณะทดสอบ (kPa)

P_m คือ ความดันของแก๊สที่ใช้ทดสอบ (kPa)

S คือ ความดันของไอน้ำอิ่มตัวที่ t_g °C (kPa)



รูปที่ 1 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง

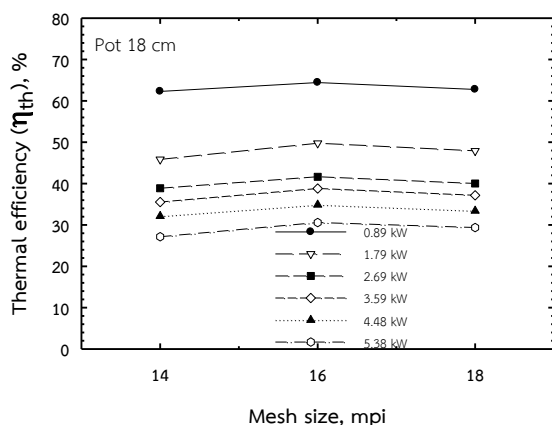


รูปที่ 2 ลักษณะหัวเตาแบบ Vertical port

โดยทำการทดสอบ 3 ซ้ำในแต่ละกรณีเพื่อความถูกต้องของข้อมูล ในการศึกษานี้จะทำการเปลี่ยนขนาดของลวดตาข่ายสแตนเลสทั้งหมด 7 ports ของหัวเตาดังรูปที่ 2 โดยทำการศึกษา mesh size ทั้งหมด 3 ขนาดคือ 14, 16 และ 18 mpi

3. ผลการทดลอง

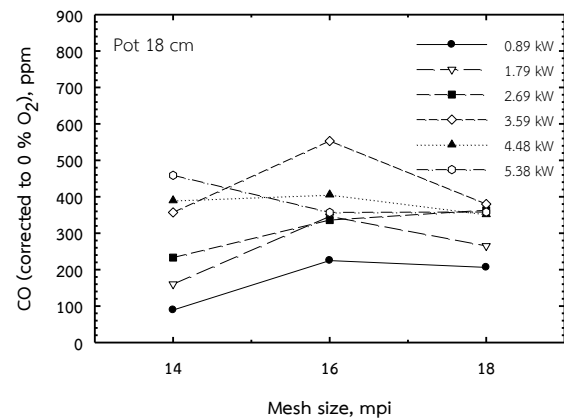
3.1 อิทธิพลของขนาดลวดตาข่ายสแตนเลส



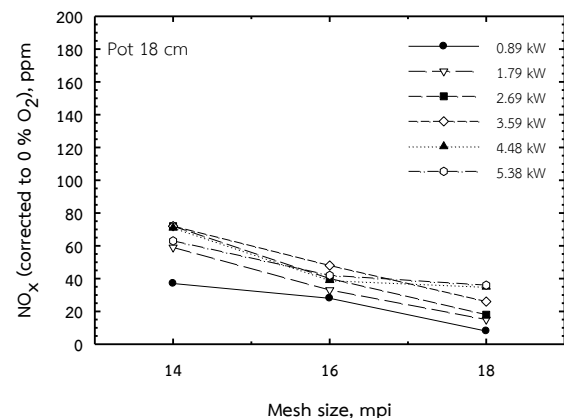
รูปที่ 3 อิทธิพลของขนาดลวดตาข่ายสแตนเลส (Mesh size) ต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) ที่ Firing rate ต่างๆ โดยทดสอบกับหม้อ 18 cm

รูปที่ 3 แสดงอิทธิพลของขนาดลวดตาข่ายสแตนเลส (Mesh size) ต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) ที่ Firing rate ต่างๆ โดยทดสอบกับหม้อ 18 cm เมื่อพิจารณาที่ Firing rate (Fr) เท่ากับ 0.89 kW (เมื่อ Fr มีค่าเท่ากับ $V \times Q$) พบว่า η_{th} มีค่าสูงที่สุดเมื่อใช้ลวดตาข่ายสแตนเลส (Wire mesh) เท่ากับ 16 mpi และเป็นในลักษณะเดียวกันที่ทุก Fr นั้นแสดงว่า wire mesh เท่ากับ 16 mpi เป็นขนาดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับนำมาใช้ติดตั้งกับเตาแบบ Vertical port ซึ่งขนาดเดิมที่ติดตั้งมากับเตา Vertical port มาตรฐาน (Conventional burner, CB) จะใช้ขนาด 14 mpi ทั้งนี้ในการทดสอบได้ลองเปลี่ยนขนาด Wire mesh ลดลงเป็น 12 mpi และทำการทดสอบพบว่า เกิดการเป่าดับ (Blow off) ที่ทุกเงื่อนไขการทดลอง จึงไม่สามารถทดสอบได้ และเมื่อพิจารณาที่ทุก wire mesh พบว่า เมื่อ

Fr เพิ่มขึ้น η_{th} จะมีค่าลดลง อาจเนื่องมาจากปริมาณความร้อน (Firing rate) ที่มากขึ้นไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์ แต่กลับเพิ่มปริมาณความร้อนสูญเสีย (Heat loss) ให้สูงขึ้น โดย η_{th} สูงสุดมีค่าเท่ากับร้อยละ 64 ที่ wire mesh เท่ากับ 16 mpi และ Fr เท่ากับ 0.89 kW



รูปที่ 4 อิทธิพลของขนาดลวดตาข่ายสแตนเลส (Mesh size) ต่อปริมาณ CO ที่ Firing rate ต่างๆ โดยทดสอบกับหม้อ 18 cm



รูปที่ 5 อิทธิพลของขนาดลวดตาข่ายสแตนเลส (Mesh size) ต่อปริมาณ NOx ที่ Firing rate ต่างๆ โดยทดสอบกับหม้อ 18 cm

รูปที่ 4 แสดงอิทธิพลของขนาดลวดตาข่ายสแตนเลส (Mesh size) ต่อปริมาณ CO ที่ Firing rate ต่างๆ โดยทดสอบกับหม้อ 18 cm เมื่อพิจารณาพบว่า ปริมาณ CO มีลักษณะเดียวกันคือ มีค่าสูงที่สุดที่ Wire mesh เท่ากับ

16 mpi สำหรับทุก Fr (ยกเว้น Fr เท่ากับ 5.38 kW) ถึงแม้ว่าที่ Wire mesh นี้จะให้ η_{th} สูงที่สุดก็ตาม อาจเนื่องมาจากที่ Wire mesh เท่ากับ 16 mpi ได้รับการถ่ายเทความร้อนไปยังกันภาชนะ จึงทำให้ได้รับอิทธิพลของ Quenching effect สูงที่สุดส่งผลให้ปริมาณ CO มีค่าสูง ในขณะที่ Fr เท่ากับ 5.38 kW ปริมาณ CO มีค่าต่ำสุดที่ Wire mesh เท่ากับ 16 mpi อาจเนื่องมาจากที่ Fr นี้ เปลวไฟมีลักษณะยาวและสั้นกันหมี 18 cm มาก จึงทำให้พฤติกรรมการเผาไหม้แตกต่างจาก Fr อื่น ซึ่งเปลวไฟไม่สั้นกันหมี 18 cm จนเกินไป แต่อย่างไรก็ตามปริมาณ CO ก็ไม่ได้มีค่าสูงเกิน 560 ppm สำหรับทุกกรณี

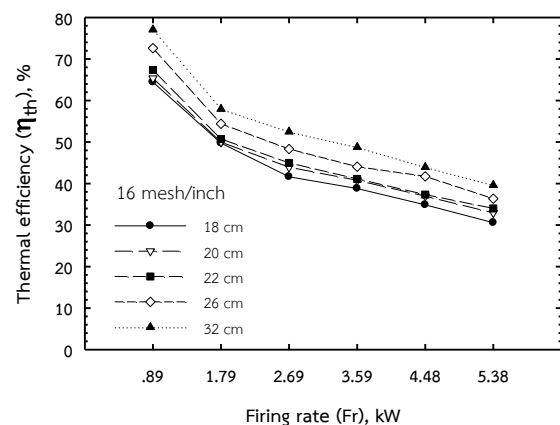
รูปที่ 5 แสดงอิทธิพลของขนาดหลอดฉายสแตนเลส (Mesh size) ต่อปริมาณ NO_x ที่ Firing rate ต่างๆ โดยทดสอบกับหมี 18 cm เมื่อพิจารณาพบว่า NO_x มีค่าต่ำมาก โดยมีค่าไม่เกิน 75 ppm ที่ทุกสภาวะและมีค่าใกล้เคียงกันทุกกรณี

3.2 อิทธิพลของขนาดภาชนะ

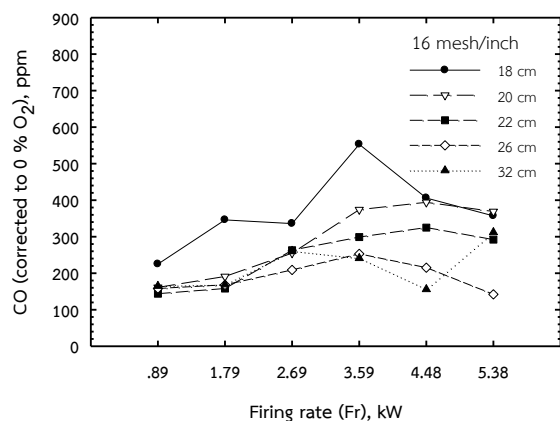
รูปที่ 6 แสดงอิทธิพลของขนาดภาชนะต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) ที่ Firing rate ต่างๆ เมื่อใช้ Wire mesh 16 mpi พบว่า เมื่อ Firing rate มีค่าเพิ่มขึ้น η_{th} มีค่าลดลง ซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันสำหรับภาชนะทุกขนาด เนื่องจากปริมาณความร้อน (Fr) ที่มากขึ้นไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์ แต่กลับเพิ่มปริมาณความร้อนสูญเสีย (Heat loss) ให้สูงขึ้นและเมื่อพิจารณา Firing rate เดียวกันพบว่า เมื่อหมีขนาดใหญ่ขึ้นจะมี η_{th} สูงขึ้น เนื่องจากพื้นที่ในการรับความร้อนสูงขึ้น โดยหมี 32 cm มี η_{th} สูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 77.06 รองลงมาคือหมี 26, 22, 20 และ 18 cm มีค่าเท่ากับร้อยละ 72.60, 67.36, 65.35 และ 64.43 ตามลำดับ

รูปที่ 7 แสดงอิทธิพลของภาชนะต่อปริมาณ CO ที่ Firing rate ต่างๆ เมื่อใช้ wire mesh 16 mpi พบว่า ปริมาณ CO มีค่าเพิ่มขึ้นแล้วลดลงเมื่อ Firing rate เพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันของทุกภาชนะ อาจเนื่องมาจากความสามารถในการระบายไอเสียออกจากบริเวณเผาไหม้ได้กับหมีแต่ละเมื่อ Fr ถึงค่าๆ หนึ่ง โดยจะสังเกต

พบว่า ปริมาณ CO ที่จุดสูงสุดของหมีแต่ละขนาดจะเกิดขึ้นที่ Fr ต่างกัน นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณ CO ที่เกิดขึ้นกับหมีขนาดเล็กจะมีแนวโน้มสูงกว่าที่เกิดขึ้นกับหมีขนาดใหญ่ที่ทุก Fr อาจเนื่องมาจากเวลาในการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นกับหมีขนาดเล็กมีค่าน้อยเกิดไปที่จะทำให้กลไกเปลี่ยนหรือกลไกเผาไหม้ CO เป็น CO_2 เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ โดยปริมาณ CO ที่เกิดขึ้นมีค่าไม่เกิน 560 ppm ที่ทุกกรณี



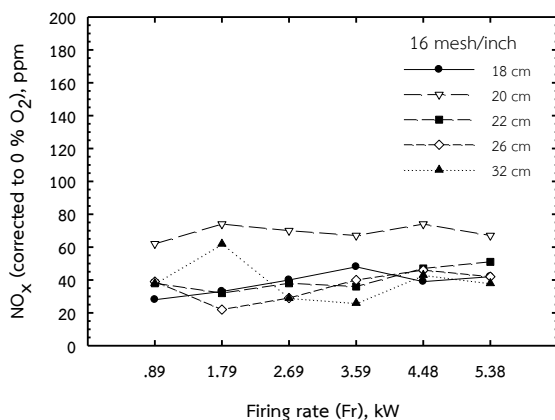
รูปที่ 6 อิทธิพลของขนาดภาชนะต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) ที่ Firing rate ต่างๆ เมื่อใช้ Wire mesh 16 mpi



รูปที่ 7 อิทธิพลของขนาดภาชนะต่อปริมาณ CO ที่ Firingrate ต่างๆ เมื่อใช้ Wire mesh 16 mpi

รูปที่ 8 แสดงอิทธิพลของขนาดภาชนะต่อปริมาณ NO_x ที่ Firing rate ต่างๆ เมื่อใช้ Wire mesh 16

mpi พบว่า NO_x มีค่าต่ำมาก โดยมีค่าไม่เกิน 75 ppm ที่ทุกสภาวะและมีค่าใกล้เคียงกันทุกกรณี



รูปที่ 8 อิทธิพลของขนาดภาชนะต่อปริมาณ NO_x ที่ Firing rate ต่างๆ เมื่อใช้ Wire mesh 16 mpi

4. สรุป

จากการศึกษาอิทธิพลของขนาด wire mesh ต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบ vertical port พบว่า เมื่อ Fr สูงขึ้น η_{th} มีค่าลดลง ในขณะที่ เมื่อขนาดของหม้อใหญ่ขึ้น η_{th} ของเตา มีค่าเพิ่มขึ้น โดย Wire mesh ขนาด 16 mpi เป็นขนาดที่เหมาะสมกว่า ขนาด 14 mpi (ซึ่งเป็นขนาดมาตรฐานที่ติดมากับเตา) และ 18 mpi โดยทำให้เตามี η_{th} สูงที่สุดที่ร้อยละ 77.06 ที่ Fr และหม้อเท่ากับ 0.89 และ 32 cm ตามลำดับ และมีการปลดปล่อยปริมาณ CO และ NO_x ของเตามีค่าสูงสุดไม่เกิน 600 ppm และ 80 ppm ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณนายจิระวุฒิ ประกอบดี นักศึกษาปริญญาโท ห้องปฏิบัติการการประยุกต์ใช้ลำเจ็ทและการเผาไหม้ (CJARL) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ความช่วยเหลือในการเก็บรวบรวมข้อมูลการทดลองและคำแนะนำตลอดการทำงานวิจัย โดยงานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Energy Policy and Planning Office, Energy, Energy Database, Available online, <http://www.eppo.go.th/>, 2014.
- [2] Dong, L.L., Cheung, C.S. and Leung, C.W, "Heat Transfer from an Impinging Premixed Butane/Air Slot Flame Jets," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.45, pp.972-992, 2002.
- [3] Jugjai, S. and Sanijai, S, "Parametric Studies of Thermal Efficiency in a Proposed Porous Radiant Recirculated Burner (PRRB) : A Design Concept for the Future Burner", Proceedings of RERIC International Energy Journal, Vol.18, pp.97-111, 1996.
- [4] Nutthawut Rungsimuntuchat, "Application of Porous Medium for Energy Saving in Gas Cooker," Dissertation Master of Engineering degree in Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkuts University of Technology Thonburi, Bangkok (Thailand), 2011.
- [5] Industrial Standards (Thai Industrial Standard, TIS) TIS. 2312-2549, "Household cooking stoves using liquefied petroleum gas," Vol.126, (episode 40).

Influence of Packing Limit on Gas-Solid Fluidized Bed Flow Pattern by Computational Fluid Dynamics

Kasamawan Taorat Eakarach Bumrunghthaichaichan Santi Wattananusorn

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok

Abstract

The present work aims to study the influence of packing limit on gas-solid fluidized bed flow pattern by using the computational fluid dynamics (CFD). The Multi-fluid Eulerian model was applied to simulate the unsteady state gas-solid fluidized bed. The gas-solid phase was characterized by varying the packing limit values from 0.55 - 0.63. The model was validated by comparing the simulation results with the experimental data to achieve the optimal model. The simulated results showed that the flow pattern obtained by the model with packing limit value of 0.63 was the suitable model because of the accurate steady state value and its time dependent pressure drop tendency.

Keywords : Gas-solid fluidized bed, Drag force, Eulerian model, CFD

1. Introduction

Fluidized bed reactors are widely used in modern processing industries which require high mixing rate or segregation phenomena. They are applied to many chemical, petrochemical and food plant operations such as catalytic cracking, combustion, gasification, etc. Fluidized bed which consists of solid particles and pressurized gas is called gas-solid fluidized bed reactor. Although the combined gas and solid phases in the reactor have thorough contact with excellent heat, mass and momentum transfer, their flow behavior is complex making the flow prediction a challenging task. In addition, the efficiency of the fluidized bed reactor depends on several parameters, i.e., gas velocity, particles density, particle size and packing characteristics of fluidized bed. Therefore, the accurate model is required to predict the behavior of multiphase flow in the fluidized bed reactor. Computational fluid dynamics (CFD) is a suitable tool for modeling hydrodynamics of multiphase flow and reducing the number of steps for reactor scaling up and design [1-2].

There are two routes for CFD multiphase flow simulations. The former is called the Euler-Lagrange model, which solves the dispersed phase by tracking a large number of particles through the flow field and using the assumption that the dispersed second phase occupies a low volume fraction. Meanwhile, the latter is called the Euler-Euler model. It solves the different phase as interpenetrating continua by assuming that the volume of a phase cannot be occupied by other phase. The volume fraction is continuous functions of space and time. Three different Euler-Euler models are available, including, the volume of fluid model (VOF), the mixture model and the Eulerian model [3]. The VOF model is designed for two or more immiscible fluids where the position of the interface between the fluids is of interest. Application for the VOF include stratified flows, free surface flow, filling, the motion of bubbles in a liquid, the motion of liquid after a dam break etc. The mixture model is designed for two or more phase (fluid or particulate) which are treated as interpenetrating continua.

Applications of the mixture model include particle-laden flows with low loading, bubbly flow, sedimentation, cyclone separators etc. The Eulerian model is designed for the complex of the multiphase and solves a set of momentum and continuity equation for each phase. Coupling is achieved through the pressure and interphase exchange coefficients. Application of the Eulerian multiphase model include bubble columns, particle suspension and fluidized beds.[4].

In CFD simulation, the mass and momentum of the gas-solid fluidized beds are calculated by using the Eulerian model and kinetic theory for granular flow [1,3]. The momentum transfer between gas and solid interphase is represented by using drag force. Further, the drag of particle can be affected by other particles. The momentum exchange coefficient of gas-solid systems are calculated by the Syamlal-O'Brien [1], Gidaspow and Wen and Yu drag fraction [1-2,5].

The objective of this study is to predict the simulation model of the gas-solid fluidized bed by using the CFD technique. The simulated results were compared with the experiment. The simulation models were assumed to be two dimensional. The FLUENT15 CFD program is based on the finite volume method and Syamlal-O'Brien drag function was applied to calculate momentum exchange coefficients. The effect of packing limit on flow pattern was studied to obtain the accurate model for predicting fluidized bed reactor.

2. Simulation setup

2.1 Geometry model and Gas-solid properties

The geometry of fluidized bed reactor was similar to the experiment of Taghipour et al. [1]. The cylindrical reactor has a 0.4 m height and 0.28 m diameter. The solid beds were spherical glass beads of 250-300 μm diameter (275 μm of mean particle diameter),

2,500 kg/m^3 density and 0.28 mm static bed height. The inlet gas was air with a density of 1.225 kg/m^3 at a velocity of 0.38 cm/s. The 2D schematic of fluidized bed reactor is shown in Figure 1. The fluidized bed model were simulated by varying five different packing limit values (0.55, 0.57, 0.58, 0.60 and 0.63).

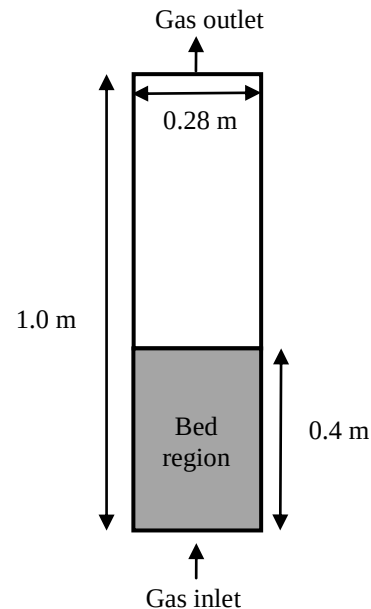


Figure 1. 2D schematic of fluidized bed reactor

2.2 Modeling parameters

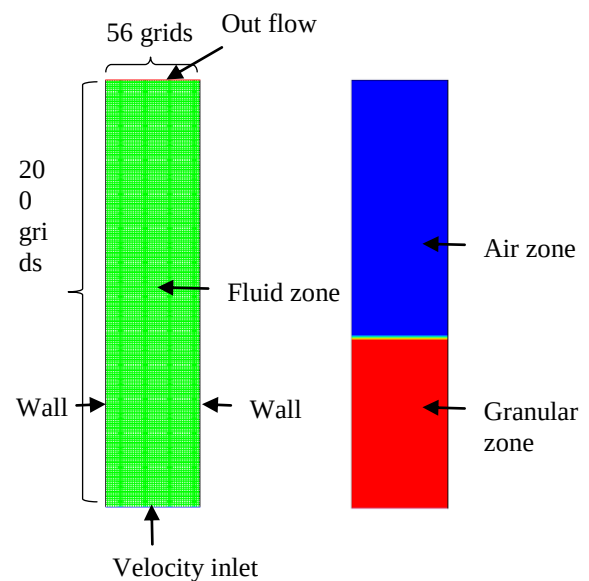


Figure 2. 2D of mesh resolution and boundary conditions

Gambit software was used to generate the grid of 2D fluidized bed. The 56 x 200 rectangular grids were achieved by 0.005 m of grid interval spacing in width and height reactor. A time step of 0.001 s and 20 iterations per time step were used. Regarding to the previous literature, for the glass beads of 300 μm diameter, the restitution coefficient is 0.9 [6]. The boundary conditions of inlet was velocity inlet while outlet was outflow. Moreover, the no-slip boundary condition was applied at the walls. Figure 2 shows 2D mesh resolution and boundary conditions.

2.3 Computational models

CFD simulation was performed by using Fluent 15 software. The multiphase flow Eulerian model was used for considering the mass and momentum conservation of gas and solid phase. The mass conservation equations are given by

Gas phase:

$$\frac{\partial}{\partial t} \cdot (\alpha_g \cdot \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \cdot \rho_g \cdot \vec{v}_g) = 0 \quad (1)$$

Solid phase:

$$\frac{\partial}{\partial t} \cdot (\alpha_s \cdot \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \cdot \rho_s \cdot \vec{v}_s) = 0 \quad (2)$$

The momentum conservation equations are given by

Gas phase:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \cdot (\alpha_g \cdot \rho_g \cdot \vec{v}_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \cdot \rho_g \cdot \vec{v}_g^2) \\ = -\alpha_g \cdot \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_g \\ + \alpha_g \cdot \rho_g \cdot \vec{g} + K_{gs} \cdot (\vec{v}_g - \vec{v}_s) \end{aligned} \quad (3)$$

Solid phase:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \cdot (\alpha_s \cdot \rho_s \cdot \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \cdot \rho_s \cdot \vec{v}_s^2) \\ = -\alpha_s \cdot \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_s \\ + \alpha_s \cdot \rho_s \cdot \vec{g} + K_{gs} \cdot (\vec{v}_g - \vec{v}_s) \end{aligned} \quad (4)$$

The Syamlal-O'Brien drag function is used for considering the gas-solid momentum exchange coefficient, K_{sg} , is given by

$$K_{gs} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\alpha_s \cdot \alpha_g \cdot \rho_g}{\nu_{r,s}^2 \cdot d_s} \cdot C_D \cdot \left(\frac{\text{Re}_s}{\nu_{r,s}} \right) \cdot |\vec{v}_s - \vec{v}_g| \quad (5)$$

Where

$$\begin{aligned} \nu_{r,s} = 0.5 \cdot (A - 0.06 \cdot \text{Re}_s \\ + \sqrt{(0.06 \cdot \text{Re}_s)^2 + 0.12 \cdot \text{Re}_s \cdot (2 \cdot B - A) + A^2}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$A = \alpha_g^{4.14}, B = 0.8 \alpha_g^{1.28} \text{ for } \alpha_g \leq 0.85$$

$$A = \alpha_g^{4.14}, B = \alpha_g^{2.65} \text{ for } \alpha_g \geq 0.85$$

and

$$C_D = \left(0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{\text{Re}_s / \nu_{r,s}}} \right)^2 \quad (7)$$

The constitutive equations and simulation setting of fluent software are shown in Table 1.

Table 1. The constitutive equations and simulation setting [7].

Description	Base case setting/value
<u>Operating conditions</u>	
Mesh resolution	56 × 200 grids
Convergence criteria	10 ⁻³
Maximum iterations	20
Discretization method	First order upwind
Time step	0.001 s
Reactor width × length	0.28 × 1.0 m ²
Bed particle width × length	0.28 × 0.4 m ²
Restitution coefficient	0.9
Outlet boundary condition	Out flow
Wall boundary condition	No slip shear condition
Gravitational acceleration	9.8 m/s ²
Operating pressure	1.01325 × 10 ⁵ Pa
Gas superficial velocity	0.38 m/s
Inlet boundary condition	Gas velocity inlet
<u>Constitutive equation</u>	
Granular viscosity	Syamlal-obrien
Granular bulk viscosity	Lun-et-al
Frictional viscosity	Schaeffer
Angle of internal friction	30
Frictional Pressure	Based-ktgf
Friction packing limit	0.61
Granular conductivity	Syamlal-obrien
Drag law	Syamlal-obrien
Coefficient of restitution	0.9

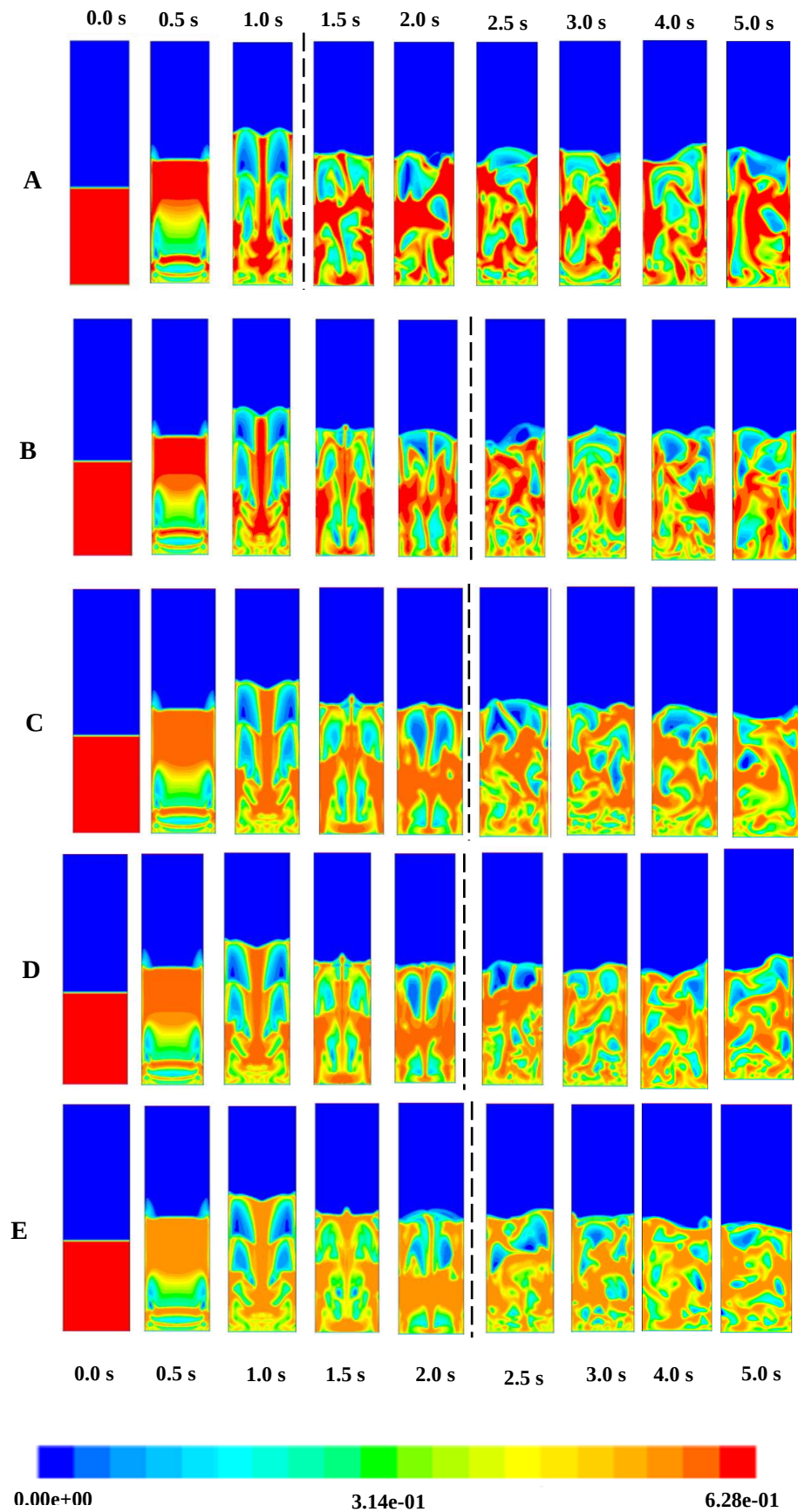


Figure 3. Solid volume fraction contour for packing limit of
 (A) = 0.63, (B) = 0.60, (C) = 0.58, (D) = 0.57, (E) = 0.55

3. Results and discussion

3.1 Solid volume fraction profile

The contour plot of solid volume fraction for different packing limit values are depicted in Figure 3. At the initial, all of fluidized beds models were impulsively fluidized by inlet gas with a velocity of 0.38 m/s. The increasing of bed height is due to the bubble formation inside the column. The models exhibit the different steady state values. This value can be identified by considering the unchanged bed height and flow pattern. The results revealed that the steady state prediction obtained by the model with packing limit of 0.63 (1.5 s) is more accurate than other models as compared with the experiment [1].

3.2 Pressure drop

In order to confirm the accuracy of present simulation, the predicted time dependent pressure drop for different models were compared with the experiment [1] as shown in Figure 4. Figure 4 shows that the predicted pressure drop of these models are different and exhibit the under prediction values. However, the tendency of predicted time dependent pressure drop for five different models were investigated by using Eq. (8) to obtain the optimal packing limit value for this simulation.

$$\sum_{i=1}^{N-1} (X^*_i) = \sum_{i=1}^{N-1} \sqrt{\left[\left(\frac{\Delta \theta_{i,exp}}{\Delta t_{i,exp}} \right) - \left(\frac{\Delta \theta_{i,sim}}{\Delta t_{i,sim}} \right) \right]^2} \quad (8)$$

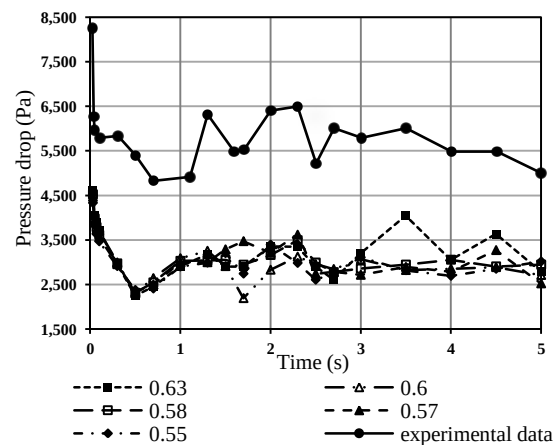
where θ is pressure drop (Pa), t is time (s) and N is number of experimental data.

From Eq. (8), it can be seen that the smaller value of $\sum_{i=1}^{N-1} (X^*_i)$ results more accurate model.

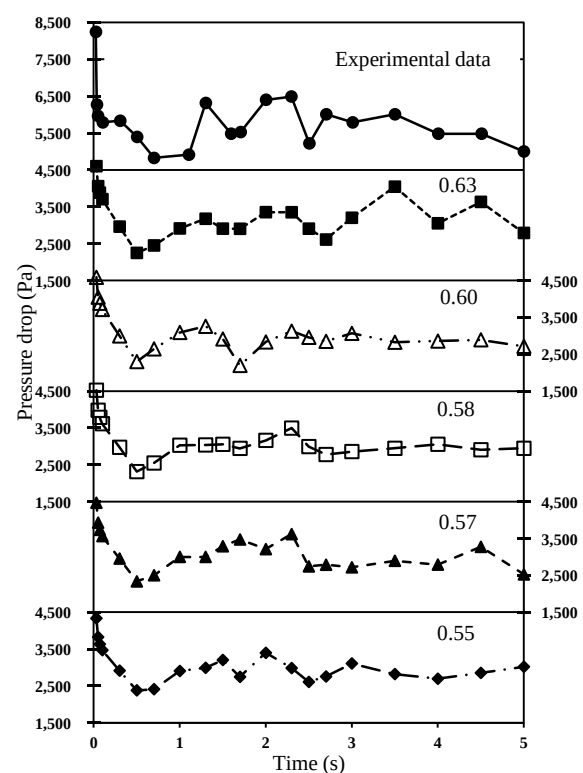
These values of five different models are summarized in Table 2.

From Table 2, the results revealed that the model with packing limit of 0.63 shows the smallest values of $\sum_{i=1}^{N-1} (X^*_i)$. Hence, it can be deduced that the tendency of time dependent pressure drop obtained by the model with

packing limit of 0.63 is more accurate as compared to the other models. In other words, the model with packing limit of 0.63 is the suitable values for predicting the fluid flow inside the fluidized bed reactor.



(a)



(b)

Figure 4. Time dependent of pressure drop
(a) Comparison of pressure drop for different packing limit values

(b) Enlargement of comparison of pressure drop for different packing limit values

Table 2. The variation of flow pattern.

Models	$\sum_{i=1}^{N-1} (X^*_i) [10^6 \text{ (Pa/s)}]$
Packing limit 0.63	0.23979
Packing limit 0.60	0.24070
Packing limit 0.58	0.24141
Packing limit 0.57	0.24067
Packing limit 0.55	0.24188

4. Conclusions

The multifluid Eulerian model can be employed to predict the flow inside gas-solid fluidized bed. The simulated results were in good agreement with the experimental data. The prediction accuracy can be improved by using a suitable packing limit value. The model with packing limit value of 0.63 was the most optimal model for predicting the gas-solid fluidized bed reactor because of its steady state value, predicted pressure drop tendency, and probably the drag force generated by the influence of packing limit.

5. Notation

5.1 Symbols

C_D	drag coefficient	[-]
d_i	diameter	[m]
g	acceleration of gravity	[m/s ²]
K_{gs}	gas/solid momentum exchange coefficient	[-]
N	number of experimental data	[-]
p	pressure	[Pa]
r	radial coordinate	[m]
Re	Reynolds number	[-]
t	time	[s]
θ	pressure drop	[Pa]
v_i	velocity	[m/s]
α_i	volume fraction,	[-]
ρ_i	density	[kg/m ³]
$\bar{\tau}_i$	stress tensor	[Pa]

5.2 Subscripts

g	gas
i	general index
s	solid
exp.	experimental data
sim	simulation model

7. References

- [1] F. Taghipour, N. Eillis, C. Wong, "Experimental and Computational Study of Gas-Solid Fluidized Bed Hydrodynamics," Chemical Engineering Science, Vol.60, pp.6857-6867, July, 2005.
- [2] J. T. Cornelissen, F. Taghipour, R. Escudie, N. Eillis, J.R. Grace, "CFD Modelling of a Liquid-Solid Fluidized Bed," Chemical Engineering Science, Vol.62, pp.6334-6348, July, 2007.
- [3] A. Kumar, CFD Modeling of Gas-Liquid-Solid Fluidized Bed, National Institute of Technology Rourkela, 2008-2009.
- [4] Fluent, Inc., Fluent 6.1UDF Manual, 2003.
- [5] T. Li, A. Gel, S. Pannala, M. Shahnam, M. Syamlal, "CFD Simulation of Circulating Fluidized Bed Risers, Part I: Grid Study," Powder Technology, Vol. 254, pp.170-180, January, 2014.
- [6] C.C Pain, S. Mansoorzadeh, C.R.E. de Oliveira, "A Study of Bubbling and Slugging Fluidized Beds Using the Two Fluid Granular Temperature Model," International Journal of Multiphase Flow, Vol.27, pp.527-551, April, 2000.
- [7] Ansys, Inc., Ansys Fluent 12.0 Theory Guide, 2009

การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยใช้พลังงานไมโครเวฟ

Synthesis Activated Carbon from Coffee Residue by Using Microwave Radiation

ทองนิตร์ จิงสมาน¹ พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ ขั้นตอนแรกการคาร์บอนไนซ์กากกาแฟที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง วิเคราะห์ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัว ตามมาตรฐาน ASTM พบว่าที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส มีปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 48 32 และ 27 ตามลำดับ นำถ่านชาร์ที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส แช่สารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในอัตราส่วนถ่านชาร์ 1 กรัมต่อสารละลาย 20 มิลลิลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 200 500 และ 800 วัตต์ ตามลำดับ เป็นเวลา 60 วินาที จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิค BET พบว่าที่กำลังไฟฟ้า 200 500 และ 800 วัตต์ มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 7.05 16.50 และ 416.10 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเท่ากับ 0.02 0.03 และ 0.24 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ การกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ ให้พื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนสูงสุด เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงทำให้เกิดการสั่นของโมเลกุลถ่านกัมมันต์ และเกิดความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่สามารถเกิดการระเหยของไอน้ำ และเกิดการสลายตัวของสารระเหยที่อุดตันในถ่านชาร์

คำสำคัญ : การสังเคราะห์ ถ่านกัมมันต์ กากกาแฟ ไมโครเวฟ

Abstract

This research examined synthesis of activated carbon derived from coffee residue by being activated with microwave radiation. The first part of process was to carbonize coffee residue at 400, 500, and 600 °C respectively. Each carbonization spent 1 hour. The amount of moisture, volatile, ash and fixed carbon were analyzed by following American Society for Testing and Materials (ASTM). It was found that the amount of fixed carbon at temperature 400, 500, and 600 °C were 48, 32, and 27% respectively. Charcoal at 400 °C was immersed in 40% H_3PO_4 solution, ratio of charcoal 1 g. per solution 20 ml. in 24 hrs. After that it was activated by microwave radiation at 200, 500, and 800 Watt respectively in 60 sec. According to characteristic of

surface area and total pore volume by BET technique, it was found that at 200, 500, and 800 Watt, surface area were 7.05, 16.50, and 416.10 m^2/g and total pore volume were 0.02, 0.03, and 0.24 cm^3/g respectively. Microwave powered at 800 Watt, activated carbon consequently gave the most surface area and total pore volume. The microwave radiation at 800 Watt also transmitted high frequency electromagnetic wave which caused the vibration in molecule of the activated carbon. The vibration simultaneously generated heat which was capable of water evaporation and volatility in charcoal.

Keywords : Synthesis, Activated carbon, Coffee residue, Microwave

1. บทนำ

จากสถิติความต้องการใช้ปริมาณเมล็ดกาแฟในตลาดโลกในช่วง 5 ปีที่ผ่านมาตั้งแต่ปี 2553 ถึง ปี 2557 เพิ่มขึ้นร้อยละ 1.67 ต่อปี ส่วนของประเทศไทยในช่วง 5 ปีที่ผ่านมาปริมาณความต้องการใช้เมล็ดกาแฟจาก 58,000 ตัน ในปี 2553 เป็น 75,000 ตัน ในปี 2557 หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.65 ต่อปี และมีแนวโน้มความต้องการใช้เพิ่มขึ้นเป็น 80,000 ตัน ในปี 2558 [1] จากปริมาณความต้องการเมล็ดกาแฟที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณของกากกาแฟเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน โดยทั่วไปนิยมนำกากกาแฟไปใช้ประโยชน์เช่น ในธุรกิจเสริมความงามนำกากกาแฟทำเป็นวัสดุขัดผิว ทางด้านการเกษตรนำกากกาแฟไปใช้ทำปุ๋ย เป็นต้น

ถ่านกัมมันต์คือวัสดุดูดซับจากวัตถุดิบที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนใหญ่ผลิตจากวัสดุธรรมชาติ วัสดุเหลือทิ้ง หาง่าย และไม่สลายตัวตอนเก็บ วัตถุดิบที่นิยมใช้ผลิตถ่านมีด้วยกันหลายชนิดตัวอย่างเช่นวัตถุดิบชีวมวลที่มาจากเกษตรกรรม เช่น เปลือกผลไม้ต่างๆ ฟางข้าว และกะลามะพร้าว เป็นต้น ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์ใช้ในการดูดซับของเสียในน้ำหรือในอากาศ [2] ตัวอย่างจากงานวิจัยที่ใช้วัสดุชีวมวลในการสังเคราะห์เป็นถ่านกัมมันต์โดยการใช้เปลือกขนุนผ่านวิธีการบอไนเซชัน และกระตุ้นจนกลายเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อดูดซับเมทิลินบลู และอีกหนึ่งงานวิจัยนำเปลือกผลปาล์มเป็นวัตถุดิบในการทำถ่านกัมมันต์เพื่อดูดซับแอมโมเนีย [3, 4] วิธีการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์โดยการเผา

แบบคาร์บอนในเซชันเพื่อให้ได้ถ่านชาร์ และนำไปกระตุ้นเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุน การกระตุ้นมีทั้งทางกายภาพและกระตุ้นทางเคมี โดยทั่วไปการกระตุ้นทางเคมีจะนำถ่านชาร์ไปแช่สารเคมีเช่น H_3PO_4 , KOH หรือ NaOH เป็นต้น และใช้ความร้อนเพื่อช่วยกระตุ้นถ่านกัมมันต์ในเตาปฏิกรณ์อีกครั้ง [2] วิธีการกระตุ้นดังกล่าวใช้ความร้อนสูง ระยะเวลา และสิ้นเปลืองพลังงาน ปัจจุบันมีอีกทางเลือกหนึ่งมาช่วยในกระบวนการกระตุ้นคือ พลังงานไมโครเวฟ หลักการทำงานของไมโครเวฟคือ การส่งคลื่นไมโครเวฟทำให้มีการสั่นของโมเลกุล และเกิดความร้อนขึ้นภายในโมเลกุลเมื่อถ่านกัมมันต์ได้รับความร้อนถึงอุณหภูมิที่ทำให้ไอน้ำ สารระเหย ภายในเกิดการระเหยออกหรือสลายตัว ทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนเพิ่มมากขึ้น [5] การนำพลังงานไมโครเวฟมาใช้ไม่ได้ส่งผลต่อคุณภาพที่ต่างจากการกระตุ้นด้วยการให้ความร้อนจากเครื่องปฏิกรณ์ แต่การใช้พลังงานไมโครเวฟนั้นมีประสิทธิภาพการให้ความร้อนที่รวดเร็ว ประหยัดเวลาและพลังงานในการสังเคราะห์ และเทคนิคนี้ไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อธาตุคาร์บอนอีกด้วย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากกาแฟโดยใช้วิธีการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ ในส่วนแรกศึกษาเกี่ยวกับสภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไซ์สำหรับการเตรียมถ่านชาร์เพื่อนำไปใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ ในส่วนที่สองเป็นการกระตุ้นทางเคมีด้วยการแช่สารละลายกรดฟอสฟอริก และกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 200 500 และ 800 วัตต์ ที่

เวลา 60 วินาที เปรียบเทียบพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนของ ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมไว้ด้วยเทคนิค BET

2. วิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมกากกาแฟ

นำกากกาแฟล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อทำความสะอาด และปรับ ให้มีค่า pH~7 จากนั้นอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง นำกากกาแฟที่อบวิเคราะห์หาคุณสมบัติเบื้องต้น ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า และ ปริมาณคาร์บอนคงตัว ตามมาตรฐาน ASTM

2.2 การเตรียมถ่านชาร์

ชั่งกากกาแฟที่ผ่านการล้าง และอบ 100 กรัม ใส่เครื่อง ปฏิกรณ์ เฝากากกาแฟแบบคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยกำหนดอัตราการให้ความร้อน 10 °C ต่อวินาที และมีแก๊สไนโตรเจนไหลผ่านตลอดเวลาในการเผา หลังจากนั้นเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 500 และ 600 °C ตามลำดับ วิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนคงตัวของถ่านชาร์ตามมาตรฐาน ASTM เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนในเซชัน

2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆตามมาตรฐาน ASTM [6]

2.3.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ASTM D3173-95

อบด้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิดที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง วางไว้ให้อุณหภูมิลดลงในโถดูดความชื้น และชั่ง น้ำหนัก ชั่งสารตัวอย่างหนักประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยพร้อม ฝาปิดที่เตรียมไว้ นำไปอบที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง วางไว้ให้อุณหภูมิลดลงในโถดูดความชื้น และชั่ง น้ำหนัก คำนวณร้อยละของปริมาณความชื้นจากสมการที่ 1

$$\text{ร้อยละของปริมาณความชื้น} = [(C - D)/(C - B)] * 100 \quad (1)$$

เมื่อ B หมายถึงน้ำหนักถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิด (กรัม) C หมายถึงน้ำหนักถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิดรวมกับน้ำหนัก สารก่อนอบ (กรัม) และ D หมายถึงน้ำหนักถ้วยกระเบื้อง พร้อมฝาปิดรวมกับน้ำหนักสารหลังอบ (กรัม)

2.3.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารระเหย ASTM D5832-98

นำถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิดเผาที่อุณหภูมิ 950 °C เป็น เวลา 30 นาที วางไว้ให้อุณหภูมิลดลงในโถดูดความชื้น และ ชั่งน้ำหนัก จากนั้นชั่งสารตัวอย่างหนักประมาณ 1 กรัม ใส่ใน ถ้วยพร้อมฝาปิดที่เตรียมไว้ นำไปเผาที่ 950 °C เป็นเวลา 7 นาที วางไว้ให้อุณหภูมิลดลงในโถดูดความชื้น และชั่ง น้ำหนัก คำนวณหาร้อยละของสารระเหยจากสมการที่ 3

$$\text{ร้อยละของน้ำหนักที่เสียไป} = [(C - D)/(C - B)] * 100 \quad (2)$$

เมื่อ B หมายถึงน้ำหนักถ้วยกระเบื้องและฝาปิด (กรัม) C หมายถึงน้ำหนักถ้วยกระเบื้องและฝาปิดรวมกับสารตัวอย่าง ก่อนเผา (กรัม) และ D หมายถึงน้ำหนักของถ้วยกระเบื้องและฝา ปิดรวมกับสารตัวอย่างหลังเผา (กรัม)

$$\text{ร้อยละของปริมาณสารระเหย} = (2) - (1) \quad (3)$$

2.3.3 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า ASTM D2866-11

นำถ้วยกระเบื้องเผาที่อุณหภูมิ 650 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง วางไว้ให้อุณหภูมิลดลงในโถดูดความชื้น และชั่งน้ำหนัก จากนั้นชั่งสารตัวอย่างหนัก 1 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้องที่ เตรียมไว้ นำไปเผาที่อุณหภูมิ 650 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง วาง ไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น และชั่งน้ำหนัก คำนวณหาร้อยละ ของปริมาณเถ้าจากสมการที่ 4

$$\text{ร้อยละของปริมาณเถ้า} = [(D - B)/(C - B)] * 100 \quad (4)$$

เมื่อ B หมายถึงน้ำหนักถ้วยกระเบื้อง (กรัม) C หมายถึง น้ำหนักถ้วยกระเบื้องรวมกับสารตัวอย่างก่อนเผา (กรัม) และ D หมายถึงน้ำหนักถ้วยกระเบื้องรวมกับสารตัวอย่างหลังเผา (กรัม)

2.3.4 การคำนวณปริมาณคาร์บอนคงตัว ASTM D3172

ปริมาณคาร์บอนคงตัวคือส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้ หลังจากที่กำลังจัดความชื้น สารระเหย และเถ้า คำนวณได้จาก สมการที่ 5

$$\text{ร้อยละของคาร์บอนคงตัว} = 100 - (M + V + A) \quad (5)$$

เมื่อ M หมายถึงร้อยละความชื้น (1) V หมายถึงร้อยละสารระเหย (3) และ A หมายถึงร้อยละเถ้า (4)

2.4 การกระตุ้นถ่านชาร์โดยไมโครเวฟ

นำถ่านชาร์ที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวมากที่สุดแช่ด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในอัตราส่วนกากกาแฟ 1 กรัมต่อสารละลาย 20 มิลลิลิตร จากนั้นกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 200 500 และ 800 วัตต์ ตามลำดับเป็นเวลา 60 วินาที เมื่อผ่านการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟนำมาล้างให้มีค่า pH~7 และอบแห้ง

2.5 วิเคราะห์หาพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิค BET

พื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์วิเคราะห์โดยการดูดซับด้วยแก๊สไนโตรเจนภายใต้ความดันมาตรฐานที่อุณหภูมิ 77 องศาเคลวิน และประเมินค่าด้วยเทคนิค BET

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 คุณสมบัติของกากกาแฟ

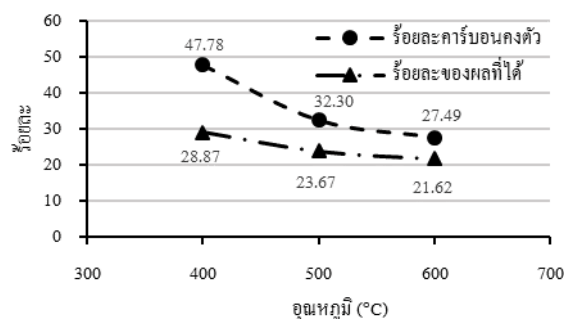
การวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัวของกากกาแฟ แสดงดังในตารางที่ 1 พบว่าปริมาณความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 1.63 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณสารระเหยเฉลี่ยเท่ากับ 97.02 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณเถ้าเฉลี่ยเท่ากับ 0.34 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณคาร์บอนคงตัวเฉลี่ยเท่ากับ 1.01 เปอร์เซ็นต์ กากกาแฟมีปริมาณสารระเหยมากจึงเหมาะสมในการเผาแบบคาร์บอนในเซชัน เนื่องจากกระบวนการเผาแบบคาร์บอนในเซชันจะเปลี่ยนปริมาณสารระเหยให้กลายเป็นคาร์บอนคงตัว [7] ผลิตภัณฑ์ที่ได้เรียกถ่านชาร์

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของกากกาแฟ

การทดลองครั้งที่	ปริมาณความชื้น (%wt)	ปริมาณสารระเหย (%wt)	ปริมาณเถ้า (%wt)	ปริมาณคาร์บอนคงตัว (%wt)
1	1.27	97.62	0.29	0.82
2	2.01	96.37	0.40	1.22
3	1.60	97.07	0.35	0.98
เฉลี่ย	1.63	97.02	0.34	1.01

3.2 คุณสมบัติของถ่านชาร์

ศึกษาสภาวะของอุณหภูมิที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ของกากกาแฟที่อุณหภูมิต่างกัน 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยทั่วไปการคาร์บอนไนซ์จะทำในช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส ถ้าใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส สารระเหยในวัสดุชีวมวลอาจยังไม่สลายตัวเป็นคาร์บอนคงตัว หากอุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาทำให้ธาตุคาร์บอนเปลี่ยนไปเป็นก๊าซส่งผลให้ปริมาณถ่านชาร์ลดลง [7] รูปที่ 1 แสดงผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ต่อร้อยละคาร์บอนคงตัว และร้อยละผลได้ พบว่าการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีปริมาณร้อยละของคาร์บอนคงตัวเท่ากับร้อยละ 47.78 32.30 และ 27.49 ตามลำดับ และมีร้อยละผลได้เท่ากับร้อยละ 28.87 23.67 และ 21.62 ตามลำดับ ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมแก่การคาร์บอนไนซ์คือ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เพราะว่ามีปริมาณคาร์บอนคงตัว และร้อยละผลได้มากที่สุด หากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นปริมาณคาร์บอนคงตัว และร้อยละผลได้มีแนวโน้มลดลง

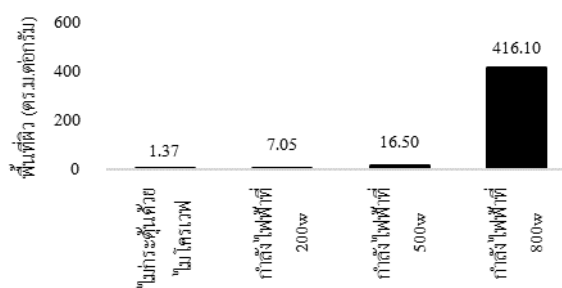


รูปที่ 1 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ต่อร้อยละคาร์บอนคงตัว และร้อยละผลที่ได้

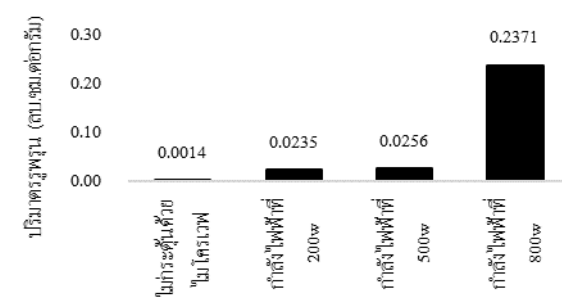
3.3 ศึกษาการกระตุ้นถ่านชาร์

นำถ่านชาร์ที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 400 °C เข้าในสารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อช่วยเกิดการสร้างโพรงของถ่านที่ผลิตจากวัสดุชีวมวล [2] และกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กัลังไฟฟ้าต่างกันคือ 200 500 และ 800 วัตต์ ตามลำดับ เป็นเวลา 60 วินาที วิเคราะห์หาพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์โดยไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ผลการเปรียบเทียบพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กัลังไฟฟ้า 200 500 และ 800 วัตต์ แสดงดังรูปที่ 2 และรูปที่ 3 ตามลำดับ พบว่าถ่านชาร์ที่ไม่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟมีพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 1.37 ตร.ม.ต่อกรัม และ 0.0014 ลบ.ซม.ต่อกรัม ตามลำดับ และถ่านชาร์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กัลังไฟฟ้า 200 500 และ 800 วัตต์ มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 7.05 16.50 และ 416.10 ตร.ม.ต่อกรัม และมีปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.02 0.03 และ 0.24 ลบ.ซม.ต่อกรัม ตามลำดับ ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟจะให้พื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนสูงกว่าถ่านชาร์ที่ไม่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กัลังไฟฟ้าสูงขึ้นจาก 200 500 และ 800 วัตต์ ส่งผลให้พื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนสูงขึ้นตามกัลังไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟที่

กัลังไฟฟ้า 800 วัตต์ ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงกว่า 200 และ 500 วัตต์ ทำให้มีประสิทธิภาพในการผลิตความร้อนขึ้นภายในอนุภาคของถ่านชาร์มากกว่า และยังสามารถทำให้เกิดการระเหยของสารระเหยที่อุดตันในถ่านชาร์ที่ดีกว่า ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนสูงขึ้นเมื่อนำถ่านกัมมันต์จากงานวิจัยเทียบกับถ่านกัมมันต์พาณิชย์ทั่วไป พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์พาณิชย์มีประมาณ 1,000 ตารางเมตรต่อกรัม [2] จากงานวิจัยนี้มีพื้นที่ผิวน้อยกว่าถ่านกัมมันต์พาณิชย์ อาจเนื่องมาจากสภาวะในการผลิตถ่านกัมมันต์ยังไม่เหมาะสมสำหรับกากกาแฟ



รูปที่ 2 ผลการเปรียบเทียบพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กัลังไฟฟ้า 200 500 และ 800 วัตต์



รูปที่ 3 ผลการเปรียบเทียบปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กัลังไฟฟ้า 200 500 และ 800 วัตต์

4. สรุปผล

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยการกระตุ้นด้วยพลังงาน

ไมโครเวฟ ในส่วนแรกการผลิตถ่านชาร์จากการคาร์บอนใน-
เซชันที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1
ชั่วโมง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์คือ
อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งมีปริมาณร้อยละคาร์บอนคง-
ตัว และร้อยละผลได้ของถ่านชาร์มากที่สุดเท่ากับ 47.78 และ
28.87 ตามลำดับ ในการคาร์บอนไนซ์ในเซชันหากอุณหภูมิเพิ่มขึ้น
ปริมาณคาร์บอนคงตัว และผลที่ได้มีแนวโน้มลดลง ส่วนที่
สองการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์นำถ่านชาร์ที่ผ่านการคาร์บอน
ไนซ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส แช่สารละลายกรดฟอสฟอ-
ริก 24 ชั่วโมง และกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ 200 500
และ 800 วัตต์ เป็นเวลา 60 วินาที พบว่าสภาวะที่เหมาะสมใน
การกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟคือ ที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์
โดยจะให้พื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนสูงสุดคือ 416.10 ตร.ม.
ต่อกรัม และ 0.24 ลบ.ซม.ต่อกรัม ตามลำดับ เนื่องจากคลื่น
ไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ จะส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่
มีความถี่สูงโดยจะผลิตความร้อนขึ้นภายในอนุภาคของถ่าน
ชาร์ และยังสามารถทำให้เกิดการระเหยของสารระเหยที่ออก
ตันอยู่ในถ่านชาร์ ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิว และ
ปริมาตรรูพรุนสูงขึ้น ดังนั้นการนำพลังงานไมโครเวฟมาใช้
เพื่อช่วยกระตุ้นถ่านกัมมันต์จึงมีแนวโน้มที่จะช่วยเพิ่มพื้นที่
ผิว และปริมาตรรูพรุน

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยจากเงินรายได้
คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเครื่องมือวิเคราะห์จากศูนย์
เครื่องมือเพื่อการวิจัยทางวิศวกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระ-
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

6. เอกสารอ้างอิง

[1] N. Yomchot, "The situation and trend of major
agricultural products in 2015," Office of agricultural
economics, pp.77 – 88, 2014.

- [2] D. Chatsiriwech, Adsorption process, Chulalongkorn
university press, Bangkok, 2009.
- [3] K.Y. Foo and B.H. Hameed, "Potential of jackfruit peel
as precursor for activated carbon prepared by microwave
induced NaOH activation," Elsevier bioresource
technology, Vol.112, pp.143-150, Feb., 2012.
- [4] J. Guo, W.S. Xu, Y.L. Chen and A.C. Lua, "Adsorption
of NH₃ onto activated carbon prepare from palm shells
impregnated with H₂SO₄," Elsevier journal of colloid
and interface science, Vol.281, pp.285-290, Oct., 2005.
- [5] K.Y. Foo and B.H. Hameed, "Recent developments in
the preparation and regeneration of activated carbons by
microwaves," Elsevier advances in colloid and interface
science, Vol.149, pp.19–27, Jan., 2009.
- [6] American Society for Testing and Materials, "ASTM
D3173-95 D5832-98 D2866-11 D3172," [Online],
Available: <http://www.astm.org>. 2014.
- [7] S. Yokoyama, "A guide for biomass production and
utilization," The Japan institute of energy, pp.94-100,
2008.

PI Controller Optimization for Indirect Current Control for Single-Phase Shunt Active Filter

Kanapot Yodmanee Wanchak Lenwari

Department of Control System and Instrumentation Engineering
King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand

Abstract

The conventional current control of shunt active filters deals with the design of controller in order to track harmonic reference currents with the lowest possible error. An indirect current control appears to be an alternative approach for active filter control. This method focuses on the control of reference source current rather than harmonic current. As a result, a simple Proportional–integral (PI) controller can be used in the control design which is one of the main benefits. However, to obtain suitable controller parameter they require considerable design effort. In this paper, a new design of PI controller for indirect current control for a single-phase shunt active filter has been proposed. Optimized controller parameters are obtained through the use of Genetic Algorithms (GA). Reference source current is derived based on a single-phase synchronous d-q reference frame. Simulation results are presented to validate the proposed design method.

Keywords: Single phase shunt active filter, Indirect current control, PI(Proportional-Integral), GA(Genetic Algorithms)

1. Introduction

Nowadays, computers, communication devices and automation devices are examples of loads which widely use. By using these devices, harmonic current is generated while reactive power is consumed i.e. a rectifier for AC-DC power conversion. These nonlinear loads cause voltage distortion and even harmonic problems. For the single-phase system to remove harmonics generated from nonlinear loads, a single-phase active power filter is one of very effective devices [1-2].

Active power filtering applications widely use synchronous frame based strategies [3]. The control design in this synchronous d-q frame of reference has the advantage that fundamental quantities appear as dc values. These strategies require transformations. Another popular method is to use instantaneous active and reactive power theory or (simply p-q theory) which originally applies to a three-phase active

filtering [4]. However the original park transformation and p-q theory cannot be used directly for the single-phase system. The three-phase p-q theory can be applied to use with single-phase system by the addition of an imaginary variable which is an original signal of voltage or current shifted by 90 degree that is utilized to single-phase synchronous d-q reference [5].

The current control systems of shunt active filters can be divided into two main groups, direct current control and indirect current control. In the direct current control the reference signal is harmonic current. The controllers must be designed to inject harmonic currents and match reference currents with minimum error [6-7]. The difficulty in the design is the tracking problem in particular for controlling higher order harmonics which is not straightforward to design the current controller and achieve zero steady-state error. While the indirect current methods focus on the

control of reference source current. Some researchers have proposed indirect current control methods [8-10] and found that they can give satisfactory or better performance and some works number of sensors can be reduced.

However, when designed the current controller based on indirect method it becomes more difficult because the filter inductor cannot be directly used as a plant transfer function. In this paper, to overcome this problem, optimization algorithm by GA has been developed for the tuning of proportional integral (PI) controller based on the indirect current control strategy for a single-phase shunt active filter. To obtain high performance control response optimized values of controller parameters are required. The design procedure and the principle of the proposed control method are proposed and discussed. Simulation results are presented to confirm the effectiveness, accuracy, and validity of the proposed strategy.

2. Single-Phase Shunt Active Filter

2.1 Conventional Current Control

The scheme of a single-phase shunt active filter with the connection to the main supply and nonlinear load is shown in Fig. 1. Without the filter connected to the network, the supply current (i_s) is contaminated by the harmonic currents.

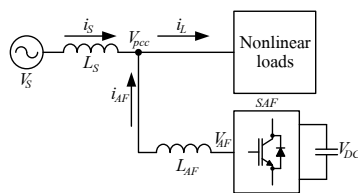


Fig.1 The conventional scheme of a single-phase shunt active filter

The SAF acts as an ideal controlled current source and injects antiphase harmonic currents, having the same amplitude but the phase is inversed, to cancel those drawn by nonlinear loads. The filter output voltage (V_{AF}) is controlled with respect to the measured voltage at the point of common coupling (V_{pcc}), to force the active filter

current (i_{AF}) to match its demanded (reference) values (i_{AF}^*). Basically, the SAF performance can be assessed by two aspects, the reference current generation method used to obtain the harmonic demanded current and the control system strategy used to control the real current to precisely track the demanded harmonic current obtained from the reference current generation method.

2.2 Nonlinear load current

In steady-state condition, the nonlinear load current in a single-phase system is a periodic signal which contains only odd harmonics as a series of sinusoidal waveforms which have been summed together. By using a Fourier series expansion, a nonlinear load current is given as:

$$i_L = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \sin(2n+1)\omega t + b_n \cos(2n+1)\omega t \quad (1)$$

where ω is the angular frequency of the supply voltage. It should be noted that a nonlinear load current contains only odd harmonic components.

3. Proposed Control Scheme

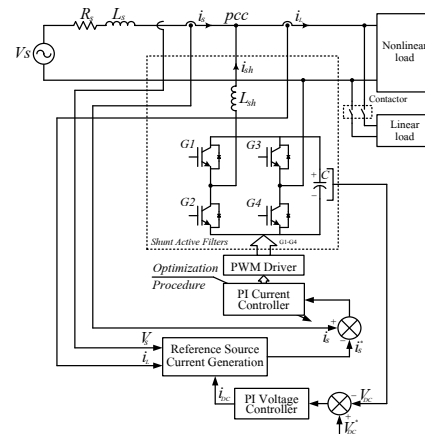


Fig.2 The proposed control scheme

The propose control scheme is shown in Fig. 2. Reference source current generation block is used to calculate the reference source current (i_s^*) from the measured load current (i_L) with the use of synchronous rotating frame. Since the transformation to this frame of reference requires transformation angle (θ), supply voltage is measured and a phased-locked loop (PLL)

topology is used to provide this angle. There are two control loops, a dc-link voltage control and source current control. In the dc voltage control, (V_{DC}) is kept constant at its reference a traditional PI controller. The output of PI voltage controller (i_{DC}) is the d-axis current. This dc current controls the power flow in and out of the capacitor. In this work, the source current will be controlled therefore i_{DC} is sent to reference generation block in order to correctly generate reference source current. The source current control employs a simple PI controller which controller gains will be obtained by the optimization procedure based on GA to obtain its best performance.

3.1 Reference Source Current Generation using Single-Phase d-q Transformation

The block diagram used to generate reference source current is shown in Fig. 3. It is based on a synchronous d-q frame of reference. Unlike a three-phase system, in order to apply the d-q transformation to a single-phase system a modification is required. The $i_{L\beta}$ is obtained from the measurement of i_L before shifted or delayed the signal by $\pi/2$. The original signal with a delayed signal can be considered as equivalent representation of single-phase system in α - β frame of reference as in (2). Then the load currents in α - β frame of reference ($i_{L\alpha}$, $i_{L\beta}$) are transformed to d-q frame of reference using $\sin \omega t$ and $\cos \omega t$ using (3) and (4).

$$\begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_L(\omega t) \\ i_L(\omega t - \pi/2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ \cos \omega t & \sin \omega t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \cdot (\sin \omega t) - i_{L\beta} \cdot (\cos \omega t) \\ i_{L\alpha} \cdot (\cos \omega t) + i_{L\beta} \cdot (\sin \omega t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

As a result, the load currents in d-q frame of reference (i_{Ld} and i_{Lq}) are obtained. The d-axis current (i_{Ld}) and q-axis current (i_{Lq}) will represent the active and reactive power components of the load current respectively.

The d and q-axis currents can be decomposed into the dc and ac components as given in (5). They are fundamental and harmonic currents respectively.

$$\begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{i}_{Ld} + \tilde{i}_{Ld} \\ \bar{i}_{Lq} + \tilde{i}_{Lq} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Since the essence of indirect current control method is to derive the reference source current, $\bar{i}_{Lq}$, $\tilde{i}_{Ld}$ and $\tilde{i}_{Lq}$ are set to zero.

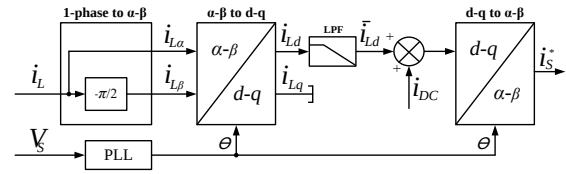


Fig.3 Reference source current generation using a single-phase synchronous d-q reference frame.

This corresponds to the fact that only fundamental active power is demanded by the loads. As mentioned, to extract fundamental component in load current ($\bar{i}_{Ld}$) low pass filter is used as depicted in Fig.3. The filtered (dc) signal will be summed with i_{DC} which is the output current of voltage controller used to regulate the dc-link voltage. The summed current ($\bar{i}_{Ld} + i_{DC}$) is then transformed back from synchronous reference frame to a stationary reference frame using the inverse Park transformation in (6). Finally, the reference source current (i_s^*) is generated as given in (7).

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha}^* \\ i_{s\beta}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \omega t & \cos \omega t \\ -\cos \omega t & \sin \omega t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{i}_{Ld} + i_{DC} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$i_s^*(\omega t) = (\bar{i}_{Ld} + i_{DC}) \sin \omega t \quad (7)$$

3.2 Genetic Algorithms for Controller Design

A GA is a stochastic global for controller design search method that is inspired by the theories of evolution and natural selection [11]. GA operates on a population of potential solutions, termed individuals, applying the principle of evolution, simulated by means of mathematical

operations that mimic the process of selection, crossover and mutation.

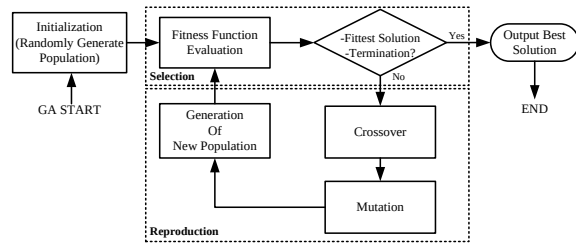


Fig.4 The GA-based design routine.

Fig. 4 shows a basic GA routine. A GA-based routine starts with a population of individuals generated randomly. During each iteration, successive populations of strings were generated through three operators: reproduction, crossover and mutation. Reproduction is a process in which individuals in the current population are evaluated using a measure of their objective function values, called fitness function. The GA will seek the solution that maximizes or minimizes the fitness function. A fitness function measures the fitness of an individual to survive in a population of individuals. Individuals with a lower value of fitness function have a higher probability of contributing one or more offspring in the next generation. The selection of fitness function used to evaluate fitness of each individual is the crucial step and can be defined in many different ways based on different target specifications. Since the main aim of active filter control is to minimize both magnitude and phase error, [12] have presented optimization designs of controllers for SAF. They used the integral of absolute error (IAE) between the demanded and measured filter currents as fitness function. Unlike direct current control, the indirect current control is employed in this work. The fitness function is therefore defined as the measure of the integral of absolute error between the demanded and measured source currents as given in (8):

$$IAE = \int_{t_0}^T |i_s(t) - i_s^*(t)| dt \quad (8)$$

where t_0 is the starting time and T is the total simulation time in each simulation. The

evaluation of the fitness function does not start until t_0 to prevent the effect of all simulation initializations which can affect the optimization result.

The setting parameters for GA routine are listed in Table 1. The optimization is performed through 50 generations with each generation having 20 individuals. At the end of the optimization process, the GA returns optimum gain parameter. This gain, when used within the simulation, provides the least IAE possible within the predefined search area of the gain parameters.

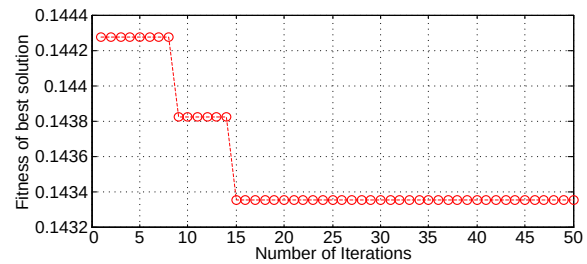


Fig.5 Fitness of best solution against iterations.

In each simulation, the total simulation time is 0.6 seconds. It should be noted that the calculation of the fitness function does not start until $t=0.15s$. This prevents simulation initialization transients affecting the result. After the optimization is completed, the GA returns the optimized gains which are 4.8535 and 0.1569. The final PI controller has the equation in (9). The plot of the fitness of the best solution over the number of iterations is shown in Fig. 5.

$$C(s) = 4.8535 + 0.1569/s \quad (9)$$

4. Simulation Results

The proposed control strategy has been modeled using MATLAB/SIMULINK and SimPowerSystems. The simulations work with the component parameters and operation conditions given in Table 1. The performance of the proposed control strategy has been investigated as follows.

Fig. 6 and 7 show the current waveforms used to generate the source reference current (i_s^*). After the reference current is achieved, the optimized PI controller has been evaluated in the presence of a nonlinear load

which in this work is an inductively smoothed uncontrolled rectifier. Load parameters are given in Table 1.

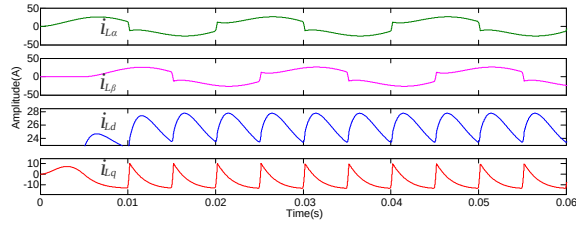


Fig.6 $i_{L\alpha}$, $i_{L\beta}$, i_{Ld} and i_{Lq}

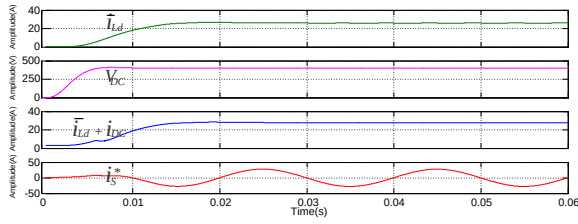
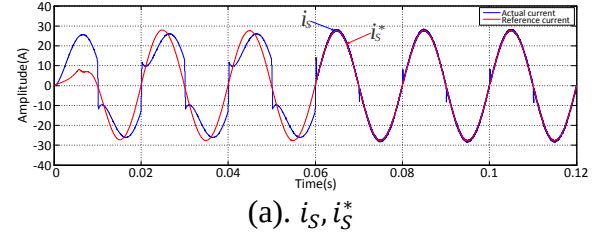


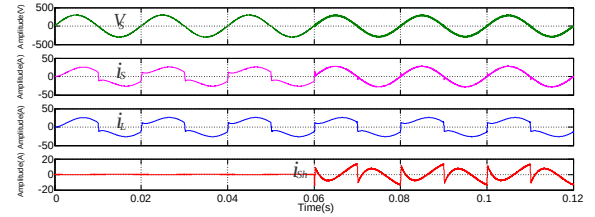
Fig.7 $\bar{i}_{Ld}$, V_{DC} , $\bar{i}_{Ld} + i_{DC}$ and i_s^*

Fig. 8 illustrates the control performance. The compensation is set to start at $t=0.06$ s. It can be seen that before starting the compensation, the source current and the nonlinear load current waveforms are the same. After starting the compensation, the actual current rapidly tracks the reference current and the source current waveform is obviously improved. It becomes sinusoidal as shown. A total harmonic distortion (THD) of the source current is reduced from 27.06% to 2.86% after the compensation. To evaluate the transient performance, a linear load (R-L load) is connected to a system via a contactor. The connection is take place at $t=0.12$ s. Fig. 9 shows signal waveforms. The performance the current control is excellent which can be seen that i_s accurately follows i_s^* rapidly. It can be noticed from Fig.9 (a) that it takes around half a cycle of the source voltage to calculate the new reference source current. Fig.10 shows the comparison of i_s and i_s^* between using optimized GA controller and trial and error controller. It is clearly seen that the compensating performance has been improved with the proposed controller-total harmonic distortion (THD) of source current is reduced from 27.06% to 2.86% while in

case of using trial and error controller is reduced to 10.18%. Future works will be the optimized design of LPF used for generating source reference current and the hardware implementation of the proposed system.

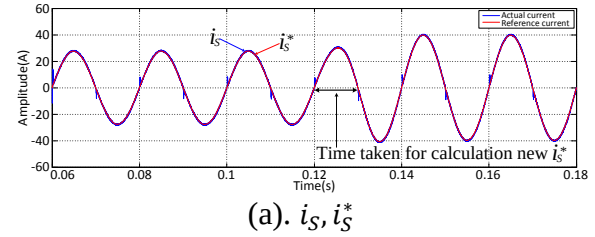


(a). i_s , i_s^*

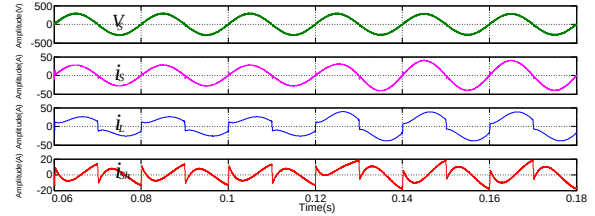


(b). V_s , i_s , i_L and i_{sH}

Fig.8 Performance of SAF: Before and after starting compensation at $t=0.06$ s.

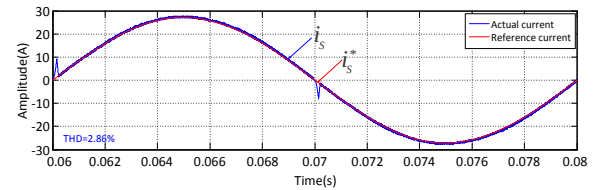


(a). i_s , i_s^*

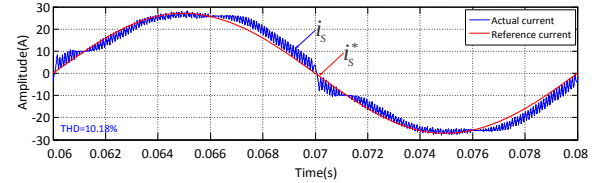


(b). V_s , i_s , i_L and i_{sH}

Fig.9 Performance of SAF: Linear loads is added at $t = 0.12$ s.



(a). Using optimized GA controller



(b). Using trial and error controller

Fig. 10 Comparison of compensating performance between GA based controller and Trial and error controller

5. Conclusion

This paper presents the control design of a single-phase shunt active filter based on an indirect current control and the single-phase synchronous d-q reference frame to generate reference source current. By using an indirect current control technique source current control can be achieved by using PI controller which is preferable for most of commercial control system. Optimization of controller gains is obtained with GA. A detailed design procedure has been presented and applied to the current control system. The performance of the proposed control strategy has been investigated by simulations. The results exhibit excellent control of source current during both steady state and transient conditions. A total harmonic distortion (THD) of source current is reduced from 27.06% to 2.86% in case of nonlinear load while it is reduced from 17.83% to 2.06% in case of a combined nonlinear load and linear load. Thus, with the use of optimization procedure such as GA, it can therefore be considered as an effective tool for a control design for shunt active filter with an indirect current control.

Table 1 Shunt active filter system and parameters for simulation test

AC supply voltage and frequency	Vrms = 220 V, 50 Hz
Nonlinear load(Bridge Rectifier) - inductor and resister	20 mH, 10 Ω
Linear load	25 mH, 20 Ω
AC side impedance	0.1 mH, 0.5 Ω
Active Filter impedance	3.3 mH, 0.3 Ω
DC voltage reference	400 V
DC-link capacitor	2200 μ F
Inverter Rating	5 kVA
Switching frequency	20 kHz
Sampling time	2 μ s
Switching device	IGBT
GA: K_p gain range	[0-10]
GA: K_i gain range	[0-10]
GA generation gap	0.9
GA crossover rate	0.7
GA mutation rate	0.05

6. References

- [1] H-L. Jou, J-C. Wu and H-Y. Chu, "New single-phase active power filter," IEE Proc. Electr. Pow. Appl., Vol.141.3, pp.129–134, 1994.
- [2] C. Y. Hsu and H. Y. Wu, "A new single-phase active power filter with reduced energy-storage capacity," IEE Proc. Electron. Pow. Appl., Vol.143, No.1, pp.25–30, Jan., 1996.
- [3] S. Bhattacharya and D.Divan, "Synchronous frame based controller implementation for a hybrid series active filter system," in Conf. Record 30th IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meeting, Vol.3, pp.2531–2540, 1995.
- [4] H. Akagi, Y. Kanazawad, and A. Nabae, "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.20, No.3, pp.625-630, May/June., 1984.
- [5] Liu I, Yang J. and Z. Wang, "A new approach for single-phase harmoniccurrent detecting and its application in a hybrid active power filter," in Proc. Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc., Vol 2, pp.849-854, Dec., 1999.
- [6] J. Barros and E. Perez, "An adaptive method for determining the reference compensating current in single-phase shunt active power filters," IEEE Trans. Power Del., Vol.18, No.4, pp.1578–1580, Oct., 2003.
- [7] T. Komrska, J. Zák, and Z. Peroutka, "Control strategy of active power filter with adaptive FIR filter-based and DFT-based reference estimation," Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion, pp.1524-1529, Jun., 2010.
- [8] Y. Khadkikar, M. Singh, A. Chandra, and B. Singh, "Implementation of single-phase synchronous dq reference frame controller for shunt active filter under distorted voltage condition," in Proc. IEEE PEDES Conf., pp.1-6, Dec., 2010.
- [9] Adel Mohamed, Sherif Zaid, and Osama Mahgoub. "Improved active power filter performance based on an indirect current control technique," Journal of power electronics(JPE), pp.931-937, Jun., 2011.
- [10] Q. N. Trinh and H. H. Lee, "An advanced current control strategy for three-phase shunt active power filters," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol.60, No.12, pp.5400–5410, Dec., 2013.
- [11] Z. Michalewicz, Genetic algorithms + Data structures = Evolution programs, Springer-Verlag, 1996.
- [12] W. Lenwari, M. Sumner, and P. Zanchetta, "The use of genetic algorithms for the design of resonant compensators for active filters," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol.56, No.8, pp.2852-2861, Aug., 2009.

การประเมินสมรรถนะ และความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งระบบ ผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบมีระบบติดตามดวงอาทิตย์ และแบบมุมรับแสงคงที่ในประเทศไทย

Evaluation of PV System Performance and Investment of the Solar Tracking and Fixed Tilt Systems Installation in Thailand

ศศิวิมล ทรงไทร พิระวุฒิ ชินวรรังสี อัสวิน หงษ์สิงห์ทอง ญัฐกานต์ อุดมเดชาณัติ ทรงเกียรติ กิตติสนธิรักษ์
ทวีวัฒน์ กระจำวงศ์ จริญญา ศรีธาราธิคุณ กอบศักดิ์ ศรีประภา

ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (STL) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สวทช.

บทคัดย่อ

การประเมินสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งระบบแบบติดตามดวงอาทิตย์ และแบบมุมรับแสงคงที่ ทั้ง 2 ระบบใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโรจังก์ชันบนฐานรองผลึกเดี่ยวซิลิคอน และเก็บข้อมูลภายใต้สภาวะการใช้งานจริงในประเทศไทยเป็นระยะเวลา 1 ปี เพื่อทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของทั้ง 2 ระบบ พบว่า ระบบที่มีการติดตั้งแบบติดตามดวงอาทิตย์สามารถรับค่าพลังงานแสงอาทิตย์ได้มากกว่าแบบมุมรับแสงคงที่ 12.68% และมีค่าผลผลิตทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 15.39% ทำให้ค่าสมรรถนะของระบบแบบติดตามดวงอาทิตย์มีค่ามากกว่าแบบมุมรับแสงคงที่ 1.87% นอกจากนี้ได้ทำการประเมินความคุ้มค่าในการลงทุน โดยพิจารณาจากระยะเวลาคืนทุนพบว่าระบบที่ติดตั้งแบบมุมรับแสงคงที่จะมีระยะเวลาคืนทุนที่เร็วกว่าแบบมีระบบติดตามดวงอาทิตย์ เนื่องจากระบบที่ติดตั้งแบบมุมรับแสงคงที่มีการลงทุนที่น้อยกว่าแบบมีระบบติดตามดวงอาทิตย์

คำสำคัญ : เซลล์แสงอาทิตย์, ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์, แบบติดตามดวงอาทิตย์, แบบมุมรับแสงคงที่

Abstract

The evaluation of photovoltaic (PV) system energy performance with the solar tracking system and the fixed-tilt system were presented. In order to compare the performance of both systems, these systems were grid-connected using the crystalline silicon hetero-junction solar panel technology. The data was recorded for one year under outdoor conditions in Thailand. It was found that the solar irradiance value of the tracking system show higher than the fixed-tilt system of 12.68% and the final yield value was increased of 15.39% as well as the performance ratio was increased of 1.87%. Furthermore, the evaluation of an investment value was analyzed in term of the payback period. The analysis result shows that the fixed-tilt system has shorter payback period than the tracking system due to a low of installation cost.

Keywords : Photovoltaic, PV module, Solar Tracking System, Fixed tilt system

1. บทนำ

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งในประเทศไทยส่วนมากเป็นการติดตั้งแบบมุมรับแสงคงที่ (Fixed Tilt System : FTS) หน้าหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปทางทิศใต้ทำมุมเดียวกับละติจูดของพื้นที่ติดตั้ง ซึ่งทำให้ใน 1 วัน สามารถรับค่าพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ได้ประมาณ 4 - 5 ชั่วโมง เนื่องจากการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์มีการเคลื่อนที่จากทิศตะวันออกไปทิศตะวันตก และมีลักษณะการเคลื่อนที่เปลี่ยนไปตามฤดูกาล ส่งผลถึงการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และเพื่อให้สามารถรับค่าพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ได้มากขึ้น ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบมีระบบติดตามดวงอาทิตย์ (Solar Tracking System : STS) จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้งาน เนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดติดตามดวงอาทิตย์ มีการติดตั้ง Sensor ที่ทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเคลื่อนที่ตามลักษณะการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ได้ โดย G. Belluardo และคณะ[1] ได้ทำการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบ FTS แบบ STS ชนิด 1 แกนหมุน และแบบ STS ชนิด 2 แกนหมุนที่ประเทศอิตาลี เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบแต่ละแบบ พบว่าในช่วงฤดูหนาวแบบ STS ชนิด 2 แกนหมุนเป็นระบบที่ใช้งานได้ดีที่สุด รองมาเป็นแบบ STS ชนิด 1 แกนหมุน และแบบ FTS ตามลำดับ ในขณะที่ M.Mehrtash และคณะ[2] ได้ทำการจำลองระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบ FTS ตามแนวราบ และทำมุมเอียง แบบ STS ชนิด 1 แกนหมุนและ 2 แกนหมุนด้วยโปรแกรม PV SOL Pro โดยใช้ข้อมูลสิ่งแวดล้อมของเมือง Montreal ประเทศแคนาดา ผลที่ได้จากการจำลองพบว่าในวันที่ท้องฟ้าปลอดโปร่ง ระบบแบบ STS ชนิด 2 แกนหมุนให้ค่ารังสีอาทิตย์มากที่สุด แต่ในวันที่มีเมฆมาก ระบบทุกแบบให้ค่ารังสีอาทิตย์ใกล้เคียงกัน

จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าเป็นการทดสอบการทำงานของระบบภายใต้สภาวะแวดล้อมของเมืองหนาว ซึ่งผลที่ได้อาจมีความแตกต่างกับการใช้งานในประเทศไทย ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงได้ทำการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 แบบ คือ แบบ FTS และแบบ

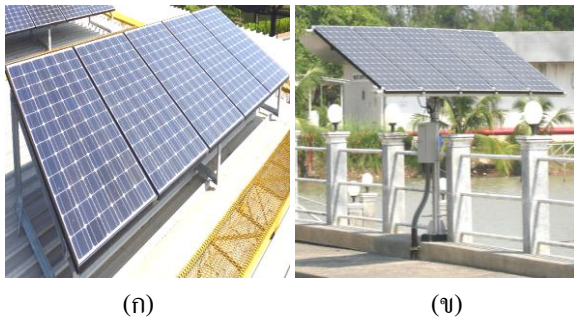
STS เพื่อทดสอบการผลิตไฟฟ้าของระบบ ภายใต้สภาวะการใช้งานจริงในประเทศไทย และนำข้อมูลที่ได้มาประเมินสมรรถนะของระบบเพื่อหาความเหมาะสม และความคุ้มค่าในการเลือกใช้เทคโนโลยีในการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

2. การทดสอบ

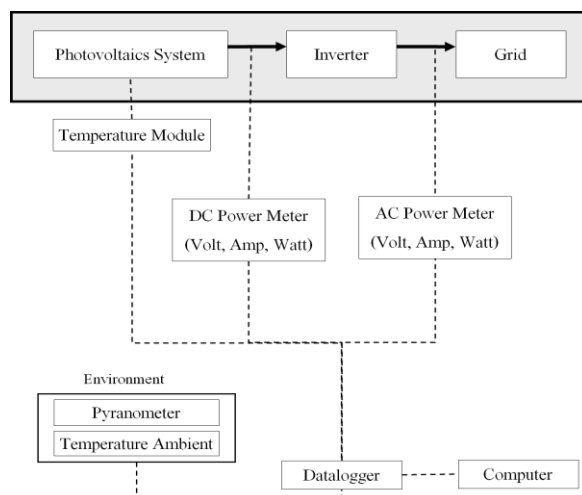
ในการทดสอบทางคณะวิจัยได้ทำการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบ FTS และแบบ STS โดยระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบ FTS จะหันหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปทางทิศใต้ ทำมุม 14 องศา กับแนวราบ เนื่องจากเป็นทิศทางและมุมที่สอดคล้องกับทิศทางที่ตั้งของสถานที่ทดสอบทำให้สามารถรับพลังงานแสงอาทิตย์ได้ตลอดทั้งปี ทั้งยังได้รับค่าพลังงานรังสีอาทิตย์มากที่สุด และระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบ STS เป็นแบบใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแสงร่วมกับวงจรควบคุม โดยมี 1 แกนหมุนเพื่อติดตามดวงอาทิตย์ (Single Axis Tracking Systems) ยี่ห้อ Delixi ซึ่งสามารถติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์จากทิศตะวันออกไปทิศตะวันตก โดยใช้พลังงานไฟฟ้าจากภายนอกประมาณ 90 W ในการควบคุม และขับเคลื่อนระบบ ทั้งนี้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 ระบบ ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโรจังก์ชันร่อนผลึกเดี่ยวซิลิคอน (Hetero-junction with Intrinsic Thin Film : HIT) และติดตั้งที่สถาบันวิจัยและเทคโนโลยี บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) อำเภอวังน้อย จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ดังรูปที่ 1

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 ระบบ มีขนาดกำลังการติดตั้งประมาณ 1.2 kWp เชื่อมต่อเข้ากับตัวแปลงกระแสไฟฟ้า (Grid-Connected Inverter) ยี่ห้อ SMA รุ่น Sunny boy 1200 และทำการเก็บข้อมูลทางไฟฟ้าของระบบ โดยบันทึกข้อมูลลง Data Logger ทุก 1 นาที และทำการเก็บข้อมูลสภาพแวดล้อมโดยติดตั้ง Pyranometer จำนวน 2 ตัว ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 ที่ระนาบเดียวกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งในแบบ FTS และแบบ STS เพื่อวัดค่าพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ ติดตั้ง Sensor ยี่ห้อ Sensirion รุ่น SHT15 สำหรับวัดค่าอุณหภูมิ และ

ความชื้นบรรยากาศ ติดตั้ง Sensor ยี่ห้อ Dallas รุ่น DS1820 สำหรับวัดค่าอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยข้อมูลสถานะแวดล้อมเหล่านี้ ทำการวัดและเก็บบันทึกข้อมูลลง Data Logger เช่นเดียวกันดังรูปที่ 2 จากนั้นนำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบตามมาตรฐาน International Electrotechnical Commission : IEC 61724[3]



รูปที่ 1 (ก) ระบบแบบ FTS และ (ข) ระบบแบบ STS



รูปที่ 2 ไดอะแกรมระบบการวัด และเก็บบันทึกข้อมูล

3. การประเมินสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

3.1 วิธีการประเมินสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 61724 มีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของระบบดังนี้

$$Y_a = \frac{E_{pv(DC)}}{P_{o(installed)}} \quad (1)$$

$$Y_f = \frac{E_{grid(AC)}}{P_{o(installed)}} \quad (2)$$

$$Y_r = \frac{H_i}{G_{STC}} \quad (3)$$

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \times 100 \quad (4)$$

โดยที่

Y_a คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อขนาดของระบบที่ติดตั้ง : Array Yield (kWh/kWp)

Y_f คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบต่อขนาดของระบบที่ติดตั้ง : Final Yield (kWh/kWp)

Y_r คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทางทฤษฎี : Reference Yield (kWh/kWp)

PR คือ ค่าสมรรถนะของระบบ : Performance Ratio (%)

$E_{pv(DC)}$ คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ : Energy from array (kWh)

$E_{grid(AC)}$ คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบผลิตไฟฟ้า : Energy Generation (kWh)

$P_{o(installed)}$ คือ ขนาดของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้ง (kWp)

H_i คือ ค่าพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ : Global Irradiation in the plane of the array (kWh/m²)

G_{STC} คือ ค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่มาตรฐาน STC : Irradiation at STC (1 kW/m²)

3.2 วิธีการวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุน[4] ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$PB = \frac{I}{R} \quad (5)$$

โดยที่

PB คือ ระยะเวลาคืนทุน : Payback Period (ปี)

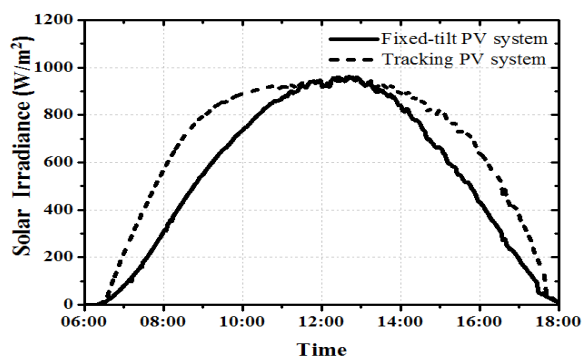
I คือ เงินลงทุน : Investment (บาท)

R คือ ผลตอบแทน : Net Benefit per Period (บาท / ปี)

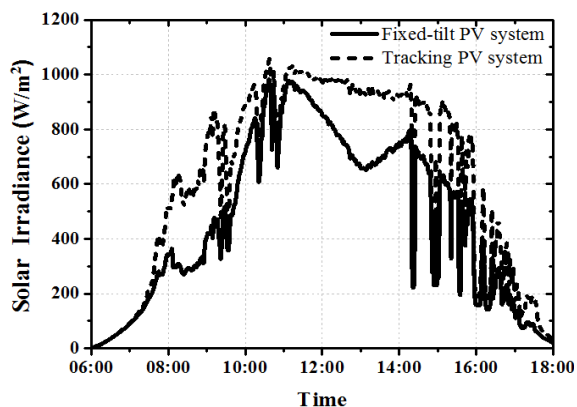
4. ผลการประเมินสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งแบบ Solar Tracking System และแบบ Fixed Tilt System

ค่าเฉลี่ยพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ของทั้ง 2 ระบบ ในวันที่ท้องฟ้าโปร่ง แสดงดังรูปที่ 3 จะเห็นว่าค่าพลังงานรังสีดวงอาทิตย์มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วงเช้า

(6:00 น. ถึง 11:00 น.) และช่วงบ่าย (14:00 น. ถึง 18:00 น.) โดยระบบแบบ STS มีค่าเฉลี่ยพลังงานรังสีดวงอาทิตย์เท่ากับ $8 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{day}$ มากกว่าระบบแบบ FTS ที่มีค่าเฉลี่ยพลังงานรังสีดวงอาทิตย์เท่ากับ $6.56 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{day}$ ซึ่งต่างกันประมาณ 22% ส่วนในรูปที่ 4 แสดงค่าเฉลี่ยพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ของทั้ง 2 ระบบ ในวันที่ท้องฟ้ามีเมฆมากจะเห็นว่าได้เกือบตลอดทั้งวันระบบแบบ STS มีค่าเฉลี่ยพลังงานรังสีดวงอาทิตย์มากกว่าแบบ FTS โดยระบบแบบ STS มีค่าเฉลี่ยพลังงานรังสีดวงอาทิตย์เท่ากับ $7.34 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{day}$ ซึ่งมากกว่าระบบแบบ FTS ที่มีค่าเฉลี่ยพลังงานรังสีดวงอาทิตย์เท่ากับ $5.61 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{day}$ ซึ่งต่างกันประมาณ 31% ทั้งนี้ค่าพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ที่แตกต่างกัน เกิดจากระบบแบบ STS สามารถเคลื่อนที่ติดตามดวงอาทิตย์ได้ตลอดทั้งวัน ทำให้สามารถรับพลังงานได้มากกว่าระบบแบบ FTS

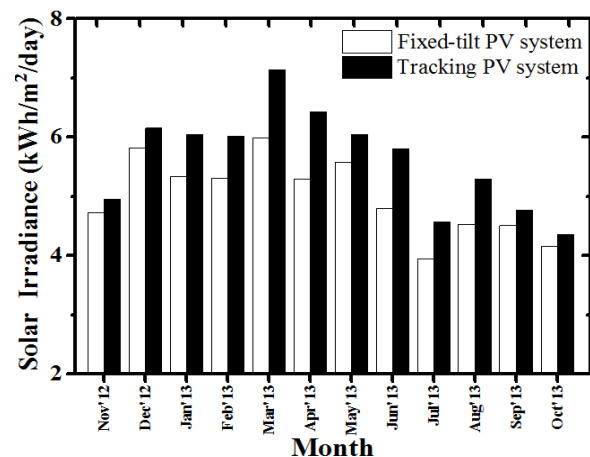


รูปที่ 3 ค่าพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 ระบบ ในวันที่ท้องฟ้าโปร่ง (เดือนมีนาคม 2556)



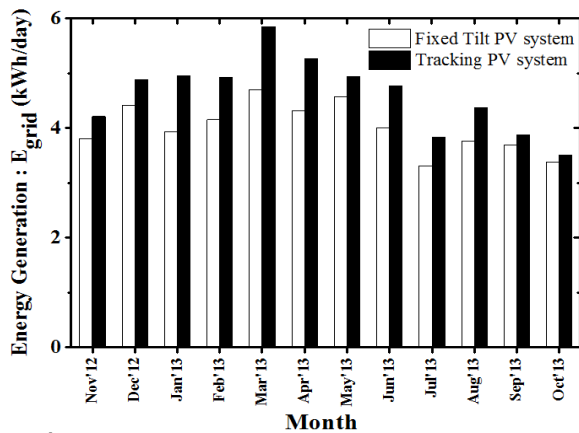
รูปที่ 4 ค่าพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 ระบบ ในวันที่ท้องฟ้ามีเมฆมาก (เดือนเมษายน 2556)

จากรูปที่ 5 แสดงค่าพลังงานรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยรายเดือนของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 ระบบ ในช่วงเดือนพฤศจิกายน 2555 ถึงเดือนตุลาคม 2556 พบว่า ค่าเฉลี่ยพลังงานแสงอาทิตย์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบ STS มีค่ามากกว่าระบบแบบ FTS ในทุกเดือน และมีความมากกว่าประมาณ 12.68% โดยระบบแบบ STS มีค่าเฉลี่ยพลังงานแสงอาทิตย์เท่ากับ $5.63 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{day}$ และระบบแบบ FTS มีค่าเฉลี่ยพลังงานแสงอาทิตย์เท่ากับ $5 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{day}$ ทั้งนี้เนื่องมาจากระบบแบบ STS มีระบบติดตามดวงอาทิตย์ทำให้สามารถติดตามดวงอาทิตย์จากทิศตะวันออกไปทิศตะวันตก ส่งผลให้มีช่วงระยะเวลาในการรับค่าพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ได้ยาวนานกว่าระบบแบบ FTS



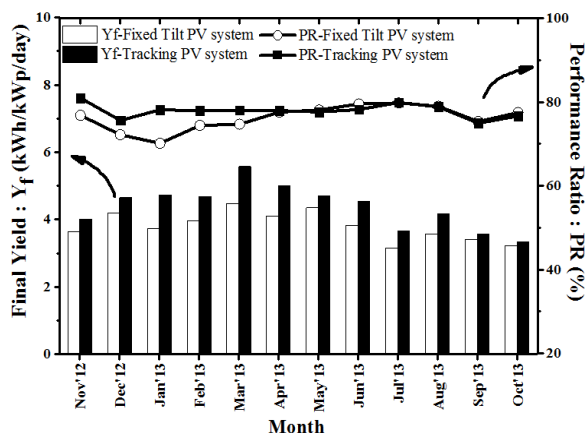
รูปที่ 5 ค่าพลังงานรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยรายเดือนของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 ระบบ

เมื่อพิจารณาค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยรายเดือน (Energy Generation : E_{grid}) ที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 ชนิด ช่วงระหว่างเดือนพฤศจิกายน 2555 ถึงเดือนตุลาคม 2556 พบว่า ระบบแบบ STS สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าระบบแบบ FTS โดยระบบแบบ FTS มีค่า E_{grid} เฉลี่ยเท่ากับ 4 kWh/day ในขณะที่ระบบแบบ STS มีค่า E_{grid} เฉลี่ยเท่ากับ 4.62 kWh/day ซึ่งมากกว่าประมาณ 15.37% ดังรูปที่ 6 ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากค่าพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ที่ระบบได้รับ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น



รูปที่ 6 ค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยรายเดือนที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 ระบบ

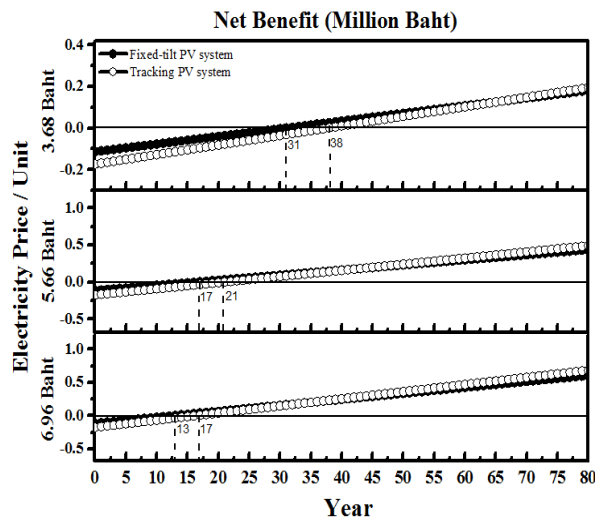
จากรูปที่ 7 แสดงค่าเฉลี่ย Y_f และค่า PR พบว่า ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบ STS มีค่า Y_f เฉลี่ยมากกว่าระบบแบบ FTS ประมาณ 15.39% และให้ค่า PR เพิ่มขึ้นจากระบบแบบ FTS ประมาณ 1.87% โดยที่ระบบแบบ STS มีค่า PR เฉลี่ยเท่ากับ 78.02% และระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบ FTS มีค่า PR เฉลี่ยเท่ากับ 76.15% ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า PR ของทั้ง 2 ระบบมีค่าใกล้เคียงกันยกเว้นในฤดูหนาวที่ค่า PR ของระบบแบบ FTS มีค่าน้อยกว่าระบบแบบ STS เนื่องมาจากแนวการโคจรระหว่างดวงอาทิตย์และแนวแกนโลกมีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาในรอบปี และขึ้นอยู่กับตำแหน่งของพื้นที่ติดตั้ง[5] ในขณะที่ระบบแบบ STS มีระบบติดตามดวงอาทิตย์ ทำให้สามารถรับพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ได้มากกว่าระบบแบบ FTS ส่งผลให้ค่า Y_f และค่า PR มากกว่าระบบ FTS



รูปที่ 7 ค่า Y_f และค่า PR จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 ระบบ

5. ความคุ้มค่าในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Solar Tracking System และแบบ Fixed Tilt System

การติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นอกจากการเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสม ยังควรคำนึงถึงมูลค่าในการลงทุน และผลตอบแทนที่ได้รับในอนาคต เมื่อทำการคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนจากสมการที่ 5 โดยคิดจากค่าไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปตามลักษณะการซื้อขายไฟฟ้า[6] พบว่าที่ค่าไฟฟ้าเท่ากับ 3.68 Baht/kWh ซึ่งเป็นค่าไฟฟ้าฐาน ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบ STS มีระยะเวลาคืนทุนในปีที่ 38 และแบบ FTS มีระยะเวลาคืนทุนในปีที่ 31 ในกรณีที่ค่าไฟฟ้าเท่ากับ 5.66 Baht/kWh ซึ่งเป็นอัตราการรับซื้อไฟฟ้าแบบ Feed in Tariff (FIT) ระบบแบบ STS มีระยะเวลาคืนทุนในปีที่ 21 และแบบ FTS มีระยะเวลาคืนทุนในปีที่ 17 และในกรณีที่ค่าไฟฟ้าเท่ากับ 6.96 Baht/kWh ซึ่งเป็นอัตราการรับซื้อไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งบนหลังคา (Solar Rooftop) ระบบแบบ STS มีระยะเวลาคืนทุนในปีที่ 17 และแบบ FTS มีระยะเวลาคืนทุนในปีที่ 13 จากทั้ง 3 กรณี พบว่าระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบ FTS มีระยะเวลาคืนทุนน้อยกว่าแบบ STS เนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบ FTS มีมูลค่าการลงทุนประมาณ 113 Baht/Wp ซึ่งน้อยกว่าแบบ STS ที่มีมูลค่าการลงทุนประมาณ 173 Baht/Wp ซึ่งต่างกันประมาณ 52.92% โดยมูลค่าการลงทุนเป็นราคาที่ใช้ในการติดตั้งในปี 2555 เฉพาะพื้นที่ประเทศไทยโดยไม่รวมมูลค่าของที่ดินที่ใช้ในการติดตั้งระบบ หากเป็นการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในทวีปยุโรป หรือประเทศสหรัฐอเมริกามูลค่าการลงทุนจะลดลง[7] ซึ่งทำให้ระยะเวลาคืนทุนสั้นลงกว่าการลงทุนติดตั้งระบบในประเทศไทย ทั้งนี้ในการคำนวณหาความคุ้มค่าในการลงทุนได้คำนึงถึงค่าบำรุงรักษา และค่าพลังงานไฟฟ้าจากภายนอกที่นำมาใช้กับชุดควบคุมของระบบแบบ STS โดยมีมูลค่าประมาณ 2,278 บาท/ปี และในกรณีที่มีการติดตั้งใช้งานระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นระยะเวลานาน พบว่าระบบแบบ STS จะให้ค่าผลตอบแทนรายปีมากกว่าแบบ FTS ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ระยะเวลาการคืนทุนของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบทั้ง 2 ระบบ

6. สรุป

จากการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบ STS และแบบ FTS ทำการทดสอบการทำงานภายใต้สภาวะการใช้งานจริง พร้อมทั้งเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลา 1 ปี พบว่าระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบ STS สามารถรับค่าพลังงานแสงอาทิตย์ได้มากกว่าแบบ FTS ประมาณ 12.68% ส่งผลให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบ STS ให้ค่า Yield มากกว่าแบบ FTS ประมาณ 15.39% และมีค่า PR เพิ่มขึ้นจากแบบ FTS ประมาณ 1.87% ในขณะที่การวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุน โดยพิจารณาจากระยะเวลาการคืนทุนพบว่า การติดตั้งระบบแบบ FTS มีความคุ้มค่าในการติดตั้งมากกว่าแบบ STS เนื่องจากระยะเวลาการคืนทุนที่สั้นกว่าถึงแม้จะสามารถผลิตไฟฟ้าได้น้อยกว่า และหากพิจารณาผลตอบแทนในระยะยาวพบว่าระบบแบบ STS จะให้ผลตอบแทนที่มากกว่าแบบ FTS ทั้งนี้ในอนาคตหากระบบแบบ STS ได้รับการพัฒนาเทคโนโลยี และมีราคาถูกลงก็จะเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจกว่าเนื่องจากสามารถผลิตไฟฟ้าได้มากกว่า

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ดำเนินการวิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยและเทคโนโลยี บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ในการทำงานวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Giorgio Belluardo, David Moser and Miglena Nikolaeva-Dimitrova, "1-Year Performance of Crystalline Technologies on Different Tracking Systems", 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 3359 – 3362, September, 2012
- [2] Mostafa mehrtash, Guillermo quesada, Yvan dutil and Daniel rousse, "Performance Evaluation of Sun Tracking Photovoltaic Systems in Canada", 20th Annual International Conference on Mechanical Engineering, May, 2012
- [3] International Electrotechnical Commission, "Photovoltaic System Performance Monitoring Guidelines for Measurement, Data Exchange and Analysis IEC61724", IEC Standard, 1998.
- [4] Paradorn Preedasak, "Principles of Microeconomics", Reading, Thammasat University Press, 2005.
- [5] Serm Janjai, "Solar Radiation", Reading, Phetkasem Printing Group Co., Ltd, 2014.
- [6] Energy Regulatory Commission, "Electricity Tariffs ", Available Online at <http://www.erc.or.th/> (Accessed May, 2015).
- [7] Feldman, David, Galen L. Barbose, Robert Margolis, Ted James, Samantha Weaver, Naïm R. Darghouth, Ran Fu, Carolyn Davidson, Sam Booth, and Ryan H. Wiser, "Photovoltaic System Pricing Trends: Historical, Recent, and Near-Term Projections - 2014 Edition", Available Online at <http://www.nrel.gov/docs/fy14osti/62558.pdf> (Accessed May, 2015).

การประมาณค่าตัวแปรของแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า InfoWorks PDM ในลุ่มน้ำแม่วังทอง

An Estimation of InfoWorks PDM Rainfall-Runoffmodel Parameters in Mae Wang Thong River Basin

วิษณุวัฒน์ เต็มสมบัติ สุทธิพงษ์ จุลฉาย

ห้องปฏิบัติการวิจัยการจำลองระบบทรัพยากรน้ำด้วยคอมพิวเตอร์และระบบสารสนเทศ (WRCMIS Lab)

ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้เป็นการประยุกต์ใช้แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า InfoWorks PDM เพื่อคำนวณปริมาณน้ำท่าของลุ่มน้ำแม่วังทองโดยใช้ข้อมูลจากสถานีโทรมาตรลุ่มน้ำแม่วังทองซึ่งตรวจวัดข้อมูลน้ำฝนและระดับน้ำแบบต่อเนื่องราย 15 นาทีตามเวลาจริง ผลการเปรียบเทียบและการตรวจพิสูจน์ของแบบจำลองที่สถานี TNwt.6 และ TNwt.15 ในระหว่างเดือนมิถุนายน-ตุลาคม พ.ศ. 2556 ได้ค่าทางสถิติของแบบจำลอง PDM มีค่า r เท่ากับ 0.87 และ 0.85 ตามลำดับ ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก ส่วนค่าความแม่นยำและความคลาดเคลื่อน RMSE และ NSE อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ต่อมาทำการวิเคราะห์ความไวของค่าตัวแปรจากแบบจำลอง PDM ที่สถานีโทรมาตร TNwt.6 โดยพิจารณาจากปริมาตรน้ำและปริมาณการไหลสูงสุดของกราฟน้ำท่าที่เปลี่ยนแปลงไปจากการเปลี่ยนค่าตัวแปรแต่ละตัวผลที่ได้พบว่า ค่าตัวแปร 4 ตัวที่มีความไวมากกว่าตัวแปรอื่น คือ ค่า $rainfc$ ค่า $k1$ ค่า bg และ ค่า kg

คำสำคัญ : แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า, แบบจำลอง InfoWorks PDM, การวิเคราะห์ความไวของค่าตัวแปร, ลุ่มน้ำแม่วังทอง

Abstract

This study is an application of InfoWorks PDM rainfall – runoff model to calculate runoff of Mae Wang Thong Basin using data from telemetry stations which measured 15-minutes rainfall and water level real-time data. The model calibration and verification at TNwt.15 and TNwt.6 station during June - October 2013 found that the statistical indexes of PDM model has r equal to 0.87 and 0.85, respectively which are illustrated very good correlation. While, the precision and accuracy of model result, RMSE and NSE remain acceptable. The sensitivity analysis of PDM model parameters at TNwt.6 telemetry station was then carried out by considering the change of both volume and peak flow hydrograph affected from the change of each model parameter. It found that four model parameters are sensitive than others namely $rainfc$, $k1$, bg and kg .

Keywords : Rainfall-Runoff Model, InfoWorks PDM Model, Sensitivity Study, Mae Wang Thong River Basin

1. บทนำ

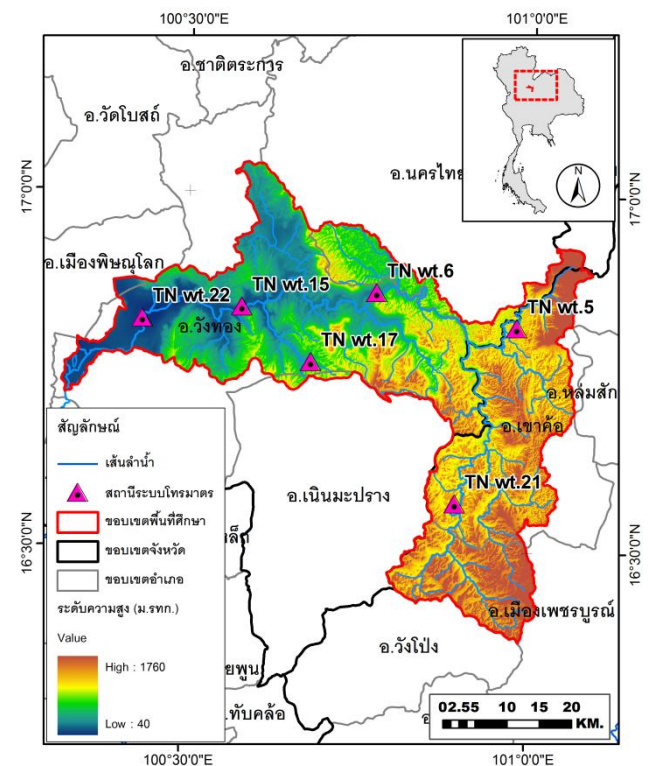
พื้นที่ลุ่มน้ำแม่วังทองมักจะประสบปัญหาอุทกภัยในช่วงเดือนกันยายนถึงเดือนตุลาคมซึ่งได้รับอิทธิพลจากลมมรสุม พายุและร่องความกดอากาศต่ำ โดยพื้นที่ต้นน้ำของแม่น้ำวังทองอยู่บนเทือกเขาสูงบริเวณเขตของจังหวัดพิษณุโลกและจังหวัดเพชรบูรณ์เนื่องจากสภาพลำน้ำมีความลาดชันสูงและไม่มีแหล่งเก็บกักน้ำและชะลอการไหลของน้ำในช่วงฤดูฝนจะเกิดน้ำป่าไหลหลากจากบนเขาลงมาทำให้แม่น้ำวังทองเอ่อล้นตลิ่งจนเกิดน้ำท่วมฉับพลันด้านท้ายน้ำทำให้พื้นที่การเกษตรและบ้านเรือนเสียหายเป็นประจำทุกปี

ในปี พ.ศ. 2553 กรมชลประทานได้เริ่มติดตั้งระบบโทรมาตรในลุ่มน้ำแม่วังทอง และติดตั้งแล้วเสร็จในปี พ.ศ. 2554 จำนวน 6 สถานี โดยเป็นสถานีตรวจวัดข้อมูลระดับน้ำและปริมาณน้ำฝน 4 สถานี และสถานีตรวจวัดข้อมูลปริมาณน้ำฝน 2 สถานี ซึ่งเป็นการตรวจวัดข้อมูลน้ำฝนและระดับน้ำแบบต่อเนื่องราย 15 นาทีตามเวลาจริง (Real Time) [1] โดยนำมาประเมินหาปริมาณน้ำท่าของลุ่มน้ำแม่วังทองจากข้อมูลฝนเพื่อเป็นประโยชน์ต่อการพยากรณ์น้ำท่วมและเตือนภัยในลุ่มน้ำสำหรับการศึกษาค้นคว้าได้นำแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า InfoWorks PDM เพื่อทำการเปรียบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองโดยใช้ข้อมูลตรวจวัดจริงจากสถานีโทรมาตรในลุ่มน้ำแม่วังทองและการวิเคราะห์ความไวของตัวแปรของแบบจำลองเพื่อเป็นแนวทางในการปรับค่าตัวแปรต่อไป

2. พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาลุ่มน้ำแม่วังทอง เป็นลุ่มน้ำสาขาในลุ่มน้ำน่านตอนล่าง ความยาวประมาณ 136 กิโลเมตร มีพื้นที่รวมทั้งลุ่มน้ำประมาณ 1,970 ตารางกิโลเมตร อยู่ระหว่างเส้นรุ้งที่ 16-22 เหนือ ถึง เส้นรุ้งที่ 17-2 เหนือ และอยู่ระหว่างเส้นแวงที่ 100-19 ตะวันออก ถึง เส้นแวงที่ 101-4 ตะวันออก ครอบคลุมพื้นที่บางส่วนของ 2 จังหวัด ได้แก่ ทางทิศตะวันตกติดกับ อำเภอมวกเหล็กของจังหวัดพิษณุโลก และทางทิศตะวันออกติดกับ อำเภอเขาค้อของจังหวัดเพชรบูรณ์ พื้นที่ต้นน้ำของแม่น้ำวังทองอยู่บนเทือกเขาสูงบริเวณตำบลเจ็กน้อย และตำบลชัยเปา

รอยต่ออำเภอเมืองและอำเภอมวกเหล็ก จังหวัดเพชรบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 1



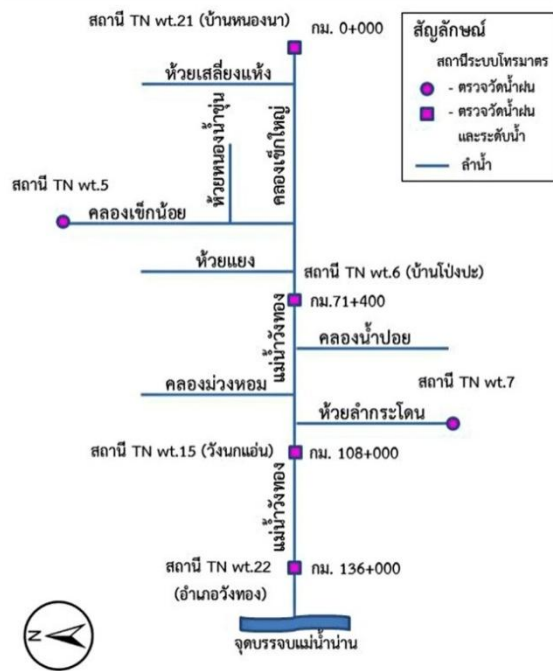
รูปที่ 1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา

3. หลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษา

แบบจำลอง InfoWorks-PDM ย่อมาจาก Probability Distributed Model เป็นแบบจำลองแบบ Deterministic Conceptual Model ที่ทำการคำนวณปริมาณน้ำท่าจากน้ำฝน ซึ่งในการคำนวณจะนำเข้าข้อมูลน้ำฝนที่ได้จากสถานีตรวจวัดแสดงในรูปที่ 2 แล้วคำนวณหาปริมาณน้ำฝนเชิงพื้นที่ในแต่ละลุ่มน้ำย่อย

หลักการทำงานของแบบจำลอง PDM ซึ่งปรับปรุงขึ้นมาจาก ISIS PDM ที่พัฒนาขึ้นโดย Center for Ecology and Hydrology ประเทศอังกฤษ เพื่อใช้ในการคำนวณปริมาณน้ำท่าจากข้อมูลน้ำฝนและการระเหย โดยมีความสามารถคำนวณน้ำของดินเป็นปัจจัยหลักในการควบคุมปริมาณน้ำท่าที่จะไหลออกจากลุ่มน้ำ [2]-[3] แต่เนื่องจากดินที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในลุ่มน้ำเดียวกัน จะมีความสามารถในการอุ้มน้ำแตกต่างกันจึงใช้หลักการ Probability Distribution เป็นพื้นฐานของแบบจำลอง โดย

เมื่อมีฝนตกลงมาจะมีน้ำบางส่วนสูญเสียไปจากการระเหย ส่วนที่เหลืออยู่บนผิวดินจะถูกจำลองให้เป็นการเก็บกักน้ำบนผิวดิน และส่วนที่ซึมลงใต้ดินจะถูกจำลองเป็นแหล่งเก็บกักน้ำใต้ดิน ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง คือ ปริมาณน้ำท่าของกลุ่มน้ำ ที่เป็นผลรวมของการไหลออกจากแหล่งเก็บกักน้ำผิวดินและแหล่งเก็บกักน้ำใต้ดินที่เวลาเดียวกัน ดังแสดงผังการทำงานของแบบจำลอง PDM ในรูปที่ 3



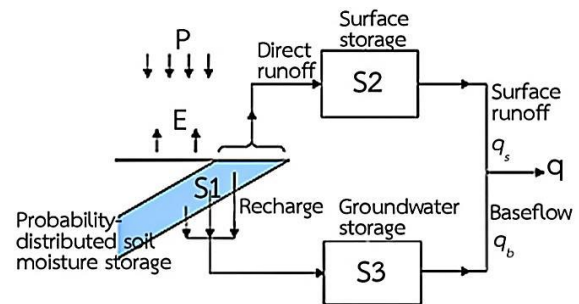
รูปที่ 2 ระบบลุ่มน้ำและสถานีโทรมาตร

เมื่อกำหนดให้ความสามารถในการเก็บกักน้ำของแห่งดิน (Soil Column) ที่ตำแหน่งใดๆ ในพื้นที่ลุ่มน้ำเป็นเสมือนถังเก็บน้ำที่มีความจุ C' ต่อมาถ้ดั่งกล่าวได้รับน้ำจากฝน (P) และในขณะเดียวกันก็มีการสูญเสียเนื่องจากการระเหย (E) ต่อมาถ้ได้รับน้ำจนกระทั่งน้ำเต็มถึงจะล้นออกนอกถังเป็นปริมาณน้ำท่า (q) แต่ในกรณีที่มีการสูญเสียมากกว่าปริมาณฝนจะไม่ล้นออกนอกถังซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$q = \begin{cases} P - E - (C' - S_0), & P > C' + E \\ 0, & P \leq C' + E \end{cases} \quad (1)$$

โดยที่ q คือ ปริมาณน้ำท่าไหลออกจากกลุ่มน้ำ และ S_0 คือ ระดับน้ำในถังตอนเริ่มต้น เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งใดๆ ในพื้นที่ลุ่มน้ำซึ่งมีความสามารถในการเก็บกักน้ำเท่ากับ c ซึ่งถือว่าเป็นตัวแปรสุ่ม (Random Variable) ที่สัมพันธ์กับ Probability Density Function, $f(c)$ ดังนั้น

สัดส่วนของกลุ่มน้ำที่มีพิสัยของระดับน้ำอยู่ในช่วง $(c, c+dc)$ จะเป็น $f(c)dc$



รูปที่ 3 ผังการทำงานของแบบจำลอง InfoWorks PDM

การพิจารณาสมมูลน้ำเริ่มต้นจากการนำถึงน้ำในลุ่มน้ำที่มีความสูงเท่ากันแต่มีระดับน้ำแตกต่างกันไปตามตำแหน่งต่างๆ มาเรียงกันตามลำดับของระดับน้ำจากมากไปน้อย ในกรณีที่ลุ่มน้ำแห่งตอนเริ่มต้นถึงน้ำก็จะมีการเก็บกักเป็นศูนย์ และเมื่อมีฝนตกภายในช่วงเวลาที่พิจารณาในอัตราสุทธิ P ถึงจะรับน้ำไว้เป็นความลึกเท่ากับ P แต่ถ้าถึงนั้นมีความสูงที่เหลืออยู่น้อยกว่า P จะเกิดการไหลล้นออกนอกถัง ดังนั้น ถ้าพิจารณาในช่วงเวลาใดๆ ถึงที่มีความจุเหลืออยู่น้อยจะเต็มก่อน แล้วระบายน้ำออกมาเป็นน้ำท่า และเมื่อสิ้นสุดช่วงเวลาพิจารณา ถึงที่มีความจุเท่ากับ P จะเต็มพอดีและเริ่มที่จะระบายน้ำออก โดยทั่วไป จะมีถึงหลายใบที่มีความจุเท่ากัน ดังนั้น ปริมาณน้ำท่าที่จะได้จากลุ่มน้ำจะมาจากการปรับค่าความลึกของน้ำในถังตามความถี่ ซึ่งจะระบุโดย $f(c)$ และเมื่อสิ้นสุดช่วงเวลาที่พิจารณา ถึงที่มีความจุน้อยกว่า P เริ่มจะระบายน้ำออกมาเป็นน้ำท่า ถ้าให้ C' เป็นความจุวิกฤตของถังที่มีความจุน้อยกว่า P ซึ่งจะได้รับน้ำเต็มถึงที่เวลา t จึงสามารถเขียนสัดส่วนของกลุ่มน้ำที่มีถึงซึ่งมีความจุเท่ากับหรือน้อยกว่าความจุวิกฤตได้ดังนี้

$$\text{prob}(c \leq C^*) = F(C^*) = \int_0^{C^*} f(c)dc \quad (2)$$

โดยที่ $F(C^*)$ คือ Distribution Function ของความจุของถังและเกี่ยวข้องกับ Density Function, $f(c)$ ภายใต้อสมการความสัมพันธ์ $f(c) = dF(C^*)/dc$ ซึ่งเป็นสัดส่วนของกลุ่มน้ำที่จะให้น้ำท่าเช่นเดียวกัน[4]-[5] และจากคำแนะนำของผู้พัฒนาแบบจำลองนี้ได้สรุปค่าตัวแปรและความสัมพันธ์กับกระบวนการต่างๆ ทางอุทกวิทยาได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวแปรที่สำคัญของแบบจำลอง PDM [5]

กระบวนการ	ตัวแปร	หน่วย	ความหมาย
1. ปริมาณฝนและการระเหย	1) rainfc 2) idly 3) be	- ชั่วโมง -	ตัวคูณปริมาณฝน เวลาที่เลื่อนออก เลขยกกำลังของฟังก์ชันการระเหย
2. การกระจายตัวของ การเก็บกักความชื้นในดิน	4) cmax 5) b	มม. -	ความจุกักเก็บน้ำในดินสูงสุด เลขยกกำลังของการกระจายตัวPareto
3. การไหลของน้ำใต้ดิน	6) kg 7) bg	ชั่วโมง -	ค่าคงที่ของเวลาการไหลของน้ำใต้ดิน เลขยกกำลังของเวลาการไหลของน้ำใต้ดิน
4. การเคลื่อนตัวของน้ำท่า	8) k1	ชั่วโมง	ค่าคงที่ของเวลาการไหลบนผิวดิน
5. ปริมาณการไหลพื้นฐาน	9) kb	ชั่วโมง	ค่าคงที่ของเวลาการไหลพื้นฐาน

4. วิธีการศึกษา

วิธีการศึกษาแบ่งเป็น 4 ขั้นตอนคือ การรวบรวมข้อมูล การตรวจสอบและนำเข้าข้อมูล การเปรียบเทียบและการตรวจพิสูจน์แบบจำลองและการวิเคราะห์ความไวของตัวแปรของแบบจำลอง

4.1 การรวบรวมข้อมูล

การรวบรวมข้อมูลซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลดังนี้

1) ข้อมูลตรวจวัดระดับน้ำ ปริมาณการไหล และปริมาณน้ำฝนราย 15 นาที จากสถานีระบบโทรมาตร ปี พ.ศ. 2554-2556 รวบรวมได้จากกรมชลประทาน

2) ข้อมูลการระเหยจากดาวเทียมการระเหยของกรมอุตุนิยมวิทยา ที่อยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่วังทองและบริเวณใกล้เคียงจำนวน 3 สถานี คือ สถานีตรวจอากาศพิษณุโลก , อำเภอหล่มสัก และเพชรบูรณ์ ในช่วงปี พ.ศ. 2523-2552

4.2 การตรวจสอบและนำเข้าข้อมูล

การตรวจสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากการรวบรวมเพื่อนำเข้าไปสร้างแบบจำลองของข้อมูลฝนราย 15 นาทีในปี 2554-2556 ด้วยวิธีการวิเคราะห์ Double Mass Curve ของสถานีโทรมาตรในลุ่มน้ำแม่วังทองแล้วปรับแก้ค่าปริมาณฝนแต่ละสถานีให้มีค่าใกล้เคียงกับ

ปริมาณฝนสะสมของสถานีข้างเคียงโดยการตัดข้อมูลที่มีค่าซ้ำกันกับข้อมูลที่มีค่าติดลบทิ้งไป หลังจากนั้นจะใช้ข้อมูลน้ำฝนในปี พ.ศ. 2556 นำเข้าเพื่อเปรียบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองการนำเข้าข้อมูลจะใช้ข้อมูลอนุกรมเวลาของปริมาณฝนเฉลี่ยของพื้นที่ลุ่มน้ำด้วยวิธี Thiessen Polygon ส่วนข้อมูลอัตราการระเหยและปริมาณการไหลจะใช้บริเวณจุดออกของพื้นที่ลุ่มน้ำแต่ละลุ่มน้ำ

4.3 การเปรียบเทียบและการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง

การเปรียบเทียบและการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง PDM เลือกใช้สถานีโทรมาตร TNwt.6 และสถานี TNwt.15 โดยกำหนดเกณฑ์ในการประเมินผลการเปรียบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองซึ่งจะใช้ค่าดัชนีทางสถิติ 3 ตัว จะพิจารณาเลือกช่วงปีของข้อมูลน้ำฝน น้ำท่า และการระเหยมาใช้ในการเปรียบเทียบแบบจำลองในช่วงเดือนกันยายน ถึงตุลาคม และการตรวจพิสูจน์แบบจำลองในช่วงเดือนมิถุนายน ถึง สิงหาคม ปี พ.ศ. 2556 และวัดผลการศึกษาโดยใช้ข้อมูลทางสถิติดังนี้

1) ค่าความคลาดเคลื่อน (Root Mean Square Error, RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (3)$$

2) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ หรือ Correlation Coefficient (r)

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

3) ค่าความแม่นยำ (Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

เมื่อ y_i คือค่าที่ได้จากแบบจำลอง, x_i คือ ค่าที่ได้จากการตรวจวัด, $\bar{y}$ คือ ค่าเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลอง, $\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัด, n คือ จำนวนชุดข้อมูล

ค่า r ควรมีค่ามากกว่า 0.6 ซึ่งถ้า r มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าชุดข้อมูลทั้งสองมีสหสัมพันธ์เชิงเส้นอย่างสมบูรณ์ ส่วนค่า RMSE และ NSE ยิ่งมีค่าน้อยยิ่งดี แสดงว่าชุดข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนจากข้อมูลตรวจวัดน้อย

4.4 การวิเคราะห์ความไวของตัวแปรจากแบบจำลอง

การวิเคราะห์ความไวของแบบจำลองเพื่อดูว่าปริมาณการไหลเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรแต่ละตัวเพิ่มขึ้นหรือลดลงในขณะที่ตัวแปรอื่นๆ คงที่เพื่อหาค่าตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณการไหลในลุ่มน้ำแม่วังทองมากที่สุดโดยนำค่าตัวแปรที่ผ่านการปรับเทียบที่สถานี TNwt.6 มาใช้ในช่วงเดือนสิงหาคมถึงกันยายน ปี พ.ศ.2556 เนื่องจากเป็นช่วงที่มีการปริมาณการไหลในลำน้ำไม่มากนักและไม่เกินระดับตลิ่งลำน้ำค่าตัวแปรเริ่มต้นมีทั้งหมด 9 ตัวแปร ได้แก่ ค่า rainfc, cmax, k1, kg, bg, tdly, b, be และ kb

5. ผลการศึกษา

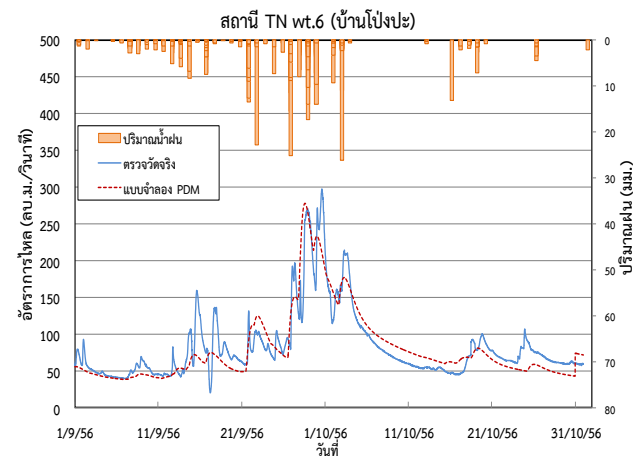
ผลการศึกษาครั้งนี้แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ผลการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองและผลการวิเคราะห์ความไวของตัวแปรของแบบจำลอง

5.1 ผลการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง

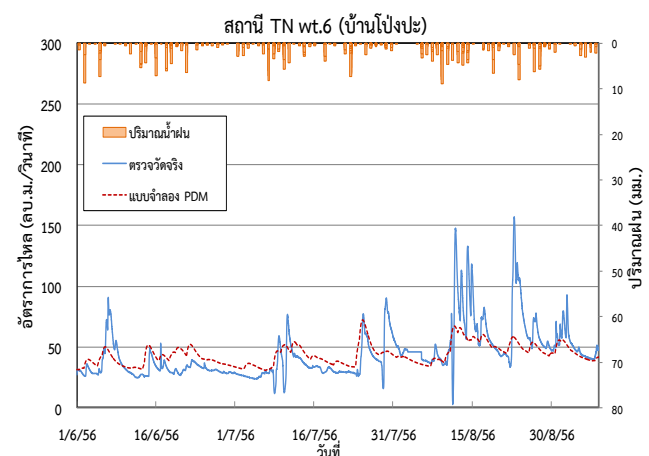
สถานี TNwt.6 มีผลการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองแสดงดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5 ตามลำดับ จากรูปแสดงการพล็อตกราฟระหว่างค่าปริมาณการไหลที่ตรวจวัดได้จริง (เส้นทึบ) กับค่าปริมาณการไหลที่คำนวณได้จาก PDM (เส้นประ) ส่วนตารางที่ 2 แสดงค่าทางสถิติของแบบจำลอง PDM ที่สถานี TN wt.6 และ TNwt.15 ซึ่งมีค่า r เท่ากับ 0.87 และ 0.85 ตามลำดับ อยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก ส่วนค่า RMSE และ NSE อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และแสดงค่าตัวแปรที่ได้จากการปรับเทียบแบบจำลอง PDM ทั้งสองสถานีในตารางที่ 3 หลังจากนั้น จึงคัดเลือกแบบจำลอง PDM ของสถานี TNwt.6 โดยพิจารณาจากค่า r ดีกว่ามาใช้ในการวิเคราะห์ความไวของตัวแปรของแบบจำลองต่อไป

ตารางที่ 2 ค่าดัชนีทางสถิติที่ได้จากผลการปรับเทียบ

สถานี	ค่า r	ค่า RMSE	ค่า NSE
TNwt.6	0.87	19.74	0.75
TNwt.15	0.85	43.81	0.72



รูปที่ 4 ผลการปรับเทียบแบบจำลองที่สถานี TNwt.6



รูปที่ 5 ผลการตรวจพิสูจน์แบบจำลองที่สถานี TNwt.6

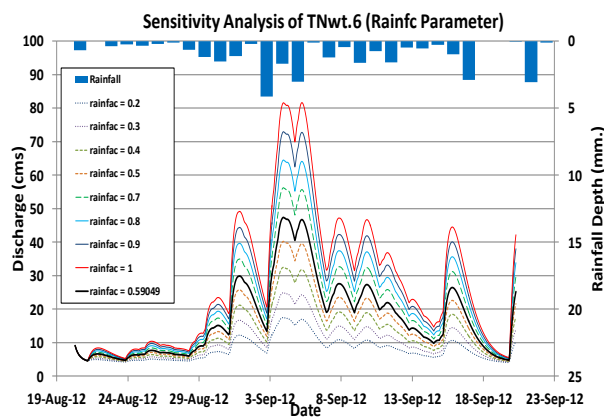
ตารางที่ 3 ค่าตัวแปรที่ผ่านการปรับเทียบแบบจำลอง

ตัวแปร	สถานี TN wt.6	สถานี TN wt.15
rainfc	0.5905	0.927
cmax	451	460
b	3.141	1.202
be	7.036	8.801
k1	18.83	19.29
kb	499.36	242.77
kg	26114	41846
bg	1.1329	1.941
tdly	3.25	0.511

5.2 ผลการวิเคราะห์ความไวของค่าตัวแปร

เมื่อพิจารณาจากปริมาตรน้ำ (Volume) และการไหลสูงสุดของกราฟน้ำท่า (Flood Peak) พบว่า ค่าตัวแปรที่มีความไวต่อปริมาณน้ำท่วมในลุ่มน้ำแม่วังทองมากที่สุดและรองลงมาตามลำดับได้แก่ ค่า rainfc ค่า k1 ค่า bg

และ ค่า kg โดยแสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งแสดงเฉพาะค่า rainfc และตารางที่ 4 โดยทั้งสองตัวแปรที่มีความอ่อนไหวมากนั้น เนื่องจาก rainfc จะเป็นตัวคูณปรับแก้ปริมาณฝน, k1 จะเกี่ยวข้องกับระยะเวลาการเคลื่อนตัวของน้ำท่าผิวดิน, และ kg กับ bg จะเกี่ยวข้องการไหลของน้ำใต้ดิน



รูปที่ 6 ผลการวิเคราะห์ความไวของตัวแปร rainfc จากแบบจำลอง PDM

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความไวของตัวแปรในแบบจำลอง PDM ที่สถานี TNwt.6

change	Rainfc		Change	k1	
parameter	Peak	Volume	Parameter	Peak	Volume
	(%)	(%)		(%)	(%)
0.2	-63.11	-53.61	5	6.50	4.79
0.3	-47.47	-40.41	10	25.02	1.66
0.4	-31.47	-26.84	15	10.68	0.45
0.5	-15.12	-12.90	20	-4.62	-0.21
0.7	18.70	15.96	25	-16.20	-0.75
0.8	36.17	30.83	30	-24.80	-1.28
0.9	54.01	45.92	40	-36.96	-2.70
1.0	72.25	61.18	50	-45.44	-4.32

change	kg		change	bg	
parameter	Peak	Volume	parameter	Peak	Volume
	(%)	(%)		(%)	(%)
5000	-53.68	-22.45	0.50	9.54	-7.55
10000	-19.61	3.19	1.00	2.73	-5.18
15000	-1.17	9.59	1.50	-54.15	-22.23
20000	-0.73	3.76	2.00	-60.76	-19.23
30000	0.48	-1.49	2.50	-36.10	-8.23
35000	1.05	-2.82	3.00	-0.67	-4.86
40000	1.57	-3.75	3.50	15.34	-3.57
50000	2.48	-4.93	4.00	10.63	-2.39

6. สรุปผลการศึกษา

ผลการเปรียบเทียบและผลการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง PDM ที่สถานี TNwt.6 และ TNwt.15 พบว่า ค่าทางสถิติอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และการวิเคราะห์ความไวของค่าตัวแปรในกลุ่มน้ำแม่วังทอง พบว่า ค่าตัวแปรที่มีความไวได้แก่ ค่า rainfc ค่า k1 ค่า bg และ ค่า kg ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการปรับค่าตัวแปรเพื่อประเมินหาปริมาณน้ำท่าของกลุ่มน้ำแม่วังทองและกลุ่มน้ำอื่นได้ต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

จากการศึกษาครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการตีพิมพ์จาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสนม.เกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม ผู้วิจัยขอขอบคุณหน่วยงาน กรมชลประทานและกรมอุตุฯ ที่อนุเคราะห์ข้อมูล

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Royal Irrigation Department, "Study and Installation of Telemetry System in Mae Wang Thong River Basin for Flood Forecasting and Warning System," 2010.
- [2] K. Khantiyawichai, "An Application of InfoWorks RSmodel for Flood Estimation in Chi River Basin," Master Thesis Department of Water Resources Engineering, Khon Kaen University, 2004.
- [3] R. Homvichien, "An Application of InfoWorks PDM model for Streamflow Estimation in Chi River Basin," Master Thesis Department of Water Resources Engineering, Khon Kaen University, 2006.
- [4] S. Chaluay, "The Study on Real Time Flood Forecasting in the Mae Wang Thong Basin," Master Thesis Department of Irrigation Engineering, Kasetsart University, 2014.
- [5] HR Wallingford Ltd, "InfoWorks RS and FloodWorks ISIS Flow User Manual," UK, 1998.

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำหลากต่อพื้นที่รับน้ำฝนเพื่อการออกแบบ โครงการพัฒนาแหล่งน้ำขนาดเล็กของประเทศไทย

Flood Yield Analysis for Design Small Water Resources Development Projects in Thailand

ไชยาพงษ์ เทพประสิทธิ์¹ ชัยวัฒน์ เต็งประกอบกิจ² เนตรชนก ภูระหงษ์²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ E-mail address: fengcpth@ku.ac.th

² ห้องปฏิบัติการวิจัยการจำลองระบบทรัพยากรน้ำด้วยคอมพิวเตอร์และระบบสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปริมาณน้ำหลากสูงสุดที่รอบปีการเกิดซ้ำต่าง ๆ ต่อพื้นที่รับน้ำฝนหนึ่งตารางกิโลเมตรของประเทศไทย เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบอาคารชลประทาน ตลอดจนฝาย อ่างเก็บน้ำและเขื่อนของโครงการพัฒนาแหล่งน้ำขนาดเล็กของประเทศไทย โดยทำการแบ่งพื้นที่ศึกษาออกเป็น 4 พื้นที่ ได้แก่ พื้นที่ภาคเหนือ ภาคใต้ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลางรวมตะวันตกและตะวันออกไว้ด้วยกัน นอกจากนั้นในแต่ละพื้นที่ได้ทำการแบ่งพื้นที่ย่อยสำหรับการวิเคราะห์ออกเป็น 3 กลุ่มจังหวัดตามสภาพภูมิประเทศและความลาดชันของพื้นที่ โดยการศึกษาได้ทำการคัดเลือกสถานีวัดน้ำท่าที่มีพื้นที่รับน้ำฝนตั้งแต่ 5 ตารางกิโลเมตรขึ้นไป และทำการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณน้ำหลากสูงสุดของสถานีวัดน้ำท่าจำนวน 135 สถานี แยกออกเป็นพื้นที่ภาคเหนือ 22 สถานี ภาคใต้ 31 สถานี ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 53 สถานี และภาคกลางรวมตะวันตกและตะวันออก 29 สถานี จากผลการศึกษาปริมาณน้ำหลากสูงสุดต่อพื้นที่รับน้ำฝนหนึ่งตารางกิโลเมตรที่รอบปีการเกิดซ้ำ 2 5 10 25 50 และ 100 ปี ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบผลการศึกษาที่รอบปีการเกิดซ้ำ 25 ปี กับผลการศึกษาเดิมในปี 2524 พบว่า ผลการศึกษานี้ให้ค่าปริมาณน้ำหลากสูงสุดที่มีการผันแปรต่อพื้นที่รับน้ำฝนหนึ่งตารางกิโลเมตรที่มากกว่าผลการศึกษาเดิมในพื้นที่ภาคใต้ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคกลางรวมตะวันตกและตะวันออก ยกเว้นพื้นที่ภาคเหนือที่ผลจากการศึกษานี้ให้ค่าที่ต่ำกว่าผลการศึกษาเดิม

คำสำคัญ: ปริมาณน้ำหลากต่อพื้นที่ ปริมาณน้ำหลากสูงสุด การวิเคราะห์แจกแจงความถี่ปริมาณน้ำหลาก

Abstract

This research has studied about flood peak per every square meter of a catchment area at a variety of return periods to be applied for designing irrigation structures, weirs, reservoirs and dams of small water resources development projects in Thailand. The studied areas being analyzed are divided into 4 parts: northern, southern, northeastern, and central (including western and eastern) regions. Moreover, each region is further divided into 3 subareas according to their topographical characteristics and slopes. In the analysis, 135 gauging stations, each with a catchment area greater than 5 square kilometers, were selected

to analyze flood frequencies and flood yields. These stations were divided into 22 northern stations, 31 southern stations, 53 northeastern stations and 29 central stations (including western and eastern). The study of the flood yields at return periods 2, 5, 10, 25, 50 and 100 years comparing the flood yield at return period of 25 years results with the previous studies in 1981. The result showed that variations of flood peak yields at catchment areas in the southern, northeastern and central (including western and eastern) regions in this study were higher than the variations of flood peak yields found in previously study with an exception of the northern region which gave lower variation.

Keywords: Flood yield, Peak flood, Flood frequency analysis

1. บทนำ

โครงการพัฒนาแหล่งน้ำเป็นโครงการที่สำคัญต่อการพัฒนาของประเทศไทยและได้รับการบรรจุไว้ในแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติอยู่เสมอ ทั้งนี้เนื่องจากทรัพยากรน้ำเป็นปัจจัยพื้นฐานในการพัฒนาในด้านต่าง ๆ ซึ่งในช่วงระยะเวลาที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาแหล่งน้ำทั้งขนาดใหญ่ ขนาดกลาง และขนาดเล็กผสมผสานกันไปตามความเหมาะสมของแต่ละพื้นที่ หรือตามความจำเป็นเร่งด่วน แต่เนื่องจากโครงการพัฒนาแหล่งน้ำขนาดใหญ่และขนาดกลางจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาและงบประมาณจำนวนมาก อีกทั้งในปัจจุบันสภาพพื้นที่ที่เหมาะสมในการพัฒนามีลดน้อยลง และมีปัญหาเรื่องผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่จะตามมา

ดังนั้นเพื่อบรรเทาความเดือดร้อนของราษฎรให้ทันกับความต้องการอย่างทั่วถึงและรวดเร็ว จึงนิยมใช้โครงการพัฒนาแหล่งน้ำขนาดเล็กในการแก้ปัญหาดังกล่าว ซึ่งการพิจารณาวางแผนและออกแบบโครงการพัฒนาแหล่งน้ำจำเป็นต้องมีการศึกษาปริมาณน้ำหลากสูงสุดที่ไหลผ่านจุดที่ตั้งของอาคารนั้นอย่างถูกต้องและเหมาะสม เนื่องจาก การออกแบบหากใช้ค่าปริมาณน้ำหลากสูงสุดที่มีปริมาณมากเกินไป จะทำให้อาคารชลศาสตร์มีขนาดใหญ่และงบประมาณค่าก่อสร้างสูง ในขณะที่เดียวกันหากปริมาณน้ำหลากสูงสุดดังกล่าวมีค่าน้อยเกินไปก็อาจเกิดอันตรายต่อโครงสร้างอาคารเมื่อเกิดน้ำหลากได้

ในปัจจุบันการคำนวณปริมาณน้ำหลากสูงสุดสำหรับโครงการพัฒนาแหล่งน้ำขนาดเล็ก วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ได้กำหนดไว้ในมาตรฐานอ่างเก็บน้ำและเขื่อนขนาดเล็ก [1] ให้ทำการประเมินจากปริมาณน้ำหลากสูงสุดของพื้นที่รับน้ำฝนขนาดหนึ่งตารางกิโลเมตร (Flood Yield) จากผลการศึกษาในปี 2524 [2] ซึ่งในปัจจุบันข้อมูลทางด้านอุทกวิทยาได้มีการเก็บบันทึกทางสถิติที่ยาวนาน และมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น รวมทั้งสภาพการใช้ที่ดินเปลี่ยนแปลงไป เช่น พื้นที่ป่าไม้ การขยายตัวของพื้นที่เกษตรกรรม และชุมชนที่อยู่อาศัย ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อ การเกิดปริมาณน้ำหลากสูงสุดที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาทบทวนปริมาณน้ำหลากต่อพื้นที่รับน้ำฝน เพื่อให้การออกแบบโครงการพัฒนาแหล่งน้ำขนาดเล็กของประเทศไทยมีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ

2. พื้นที่ศึกษา

การศึกษานี้ได้ทำการแบ่งพื้นที่ศึกษาออกเป็น 4 พื้นที่ ได้แก่ พื้นที่ภาคเหนือ ภาคใต้ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคกลางรวมตะวันตกและตะวันออกไว้ด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 1 และในแต่ละพื้นที่ได้ทำการจัดกลุ่มจังหวัดออกเป็น 3 กลุ่มตามสภาพภูมิประเทศและความลาดชันของพื้นที่ตามการศึกษาในปี 2524 [2] ดังนี้

1) ภาคเหนือ สภาพภูมิประเทศที่เป็นเนินเขา และเนินสูง ความลาดชันมาก ได้แก่

กลุ่มที่ 1 จังหวัดเชียงราย และแม่ฮ่องสอน

กลุ่มที่ 2 จังหวัดแพร่ น่าน พะเยา อุตรดิตถ์ เลย และเพชรบูรณ์

กลุ่มที่ 3 จังหวัดเชียงใหม่ ลำพูน ลำปาง สุโขทัย พิชญ์โลก ดาก พิจิตร และกำแพงเพชร

2) ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ สภาพภูมิประเทศที่เป็นเนินสูงต่ำความลาดเทมากถึงปานกลาง ได้แก่

กลุ่มที่ 1 จังหวัดอุบลราชธานี นครพนม สกลนคร หนองคาย ศรีสะเกษ และอุดรธานี

กลุ่มที่ 2 จังหวัดมหาสารคาม ร้อยเอ็ด และยโสธร

กลุ่มที่ 3 จังหวัดขอนแก่น นครราชสีมา กาฬสินธุ์ บุรีรัมย์ สุรินทร์ และชัยภูมิ



รูปที่ 1 การแบ่งพื้นที่ศึกษา

3) ภาคกลาง ภาคตะวันตก และภาคตะวันออก สภาพภูมิประเทศที่เป็นเนินสูงต่ำสลับกัน ความลาดเทมากถึงปานกลาง และสภาพภูมิประเทศที่เป็นเนินและที่ค่อนข้างราบ ความลาดเทปานกลางถึงน้อย ได้แก่

กลุ่มที่ 1 จังหวัดจันทบุรี ตราด และระยอง

กลุ่มที่ 2 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ราชบุรี เพชรบุรี และกาญจนบุรี

กลุ่มที่ 3 จังหวัดในลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง แม่กลอง และบางปะกง

4) ภาคใต้ สภาพภูมิประเทศที่เป็นทิวเขา และเนินสูงต่ำ ความลาดเทมาก ได้แก่

กลุ่มที่ 1 จังหวัดนครศรีธรรมราช

กลุ่มที่ 2 จังหวัดชายฝั่งทะเลด้านทิศตะวันออก ยกเว้นจังหวัดนครศรีธรรมราช

กลุ่มที่ 3 จังหวัดชายฝั่งทะเลด้านทิศตะวันตก

3. วิธีการศึกษา

3.1 ทำการรวบรวมข้อมูลปริมาณน้ำหลากสูงสุดรายปี ตั้งแต่ปี 2508 – 2556 จำนวน 135 สถานี และคัดเลือก สถานีที่มีพื้นที่รับน้ำฝนอยู่ระหว่าง 5 ถึง 40 ตร.กม. (ขนาดพื้นที่รับน้ำฝนน้อยที่สุดของสถานีที่รวบรวมได้เท่ากับ 5 ตร.กม. และขนาดพื้นที่รับน้ำฝนสูงสุดตามการศึกษาในปี 2524 [2] เท่ากับ 40 ตร.กม.) โดยแบ่งเป็นภาคเหนือ 22 สถานี ภาคใต้ 31 สถานี ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 53 สถานี ภาคกลางรวมตะวันตกและตะวันออก 29 สถานี

3.2 ทำการวิเคราะห์ถดถอย (Regression Analysis) หาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำหลากสูงสุดรายปีเฉลี่ย และพื้นที่รับน้ำฝนของแต่ละพื้นที่ศึกษา [3] เพื่อพิจารณาความสัมพันธ์และการกระจายตัวของสถานีวัดน้ำท่าและทำการคัดเลือกสถานีแยกตามกลุ่มจังหวัด โดยมีลักษณะของสมการดังนี้

$$Q_M = aA^b \quad (1)$$

เมื่อ Q_M คือ ปริมาณน้ำหลากสูงสุดรายปี (ลบ.ม/วินาที) A คือ พื้นที่รับน้ำฝน (ตร.กม.) a และ b คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient)

3.3 ทำการวิเคราะห์แจกแจงความถี่ (Frequency Analysis) ข้อมูลปริมาณน้ำหลากสูงสุดรายปีทุกสถานี ด้วยวิธีกัมเบล (Gumbel or Extreme Value Type 1 Distribution) [4] ที่รอบปีการเกิดซ้ำ (Return Period) 2 5 10 25 50 และ 100 ปี

3.4 ทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำหลากสูงสุดที่รอบปีการเกิดซ้ำต่าง ๆ ต่อพื้นที่รับน้ำฝนขนาดหนึ่งตารางกิโลเมตร (Flood Yield) ของสถานีวัดน้ำท่าที่ใช้ในการศึกษา โดยมีลักษณะของสมการ [5] ดังนี้

$$Q_S = \frac{Q_T}{A} \quad (2)$$

เมื่อ Q_s คือ ปริมาณน้ำหลากสูงสุดต่อพื้นที่รับน้ำฝน มีหน่วยเป็น ลบ.ม/วินาที/ตร.กม. Q_T คือ ปริมาณน้ำหลากสูงสุดที่รอบปีการเกิดซ้ำต่าง ๆ มีหน่วยเป็น ลบ.ม/วินาที และ A คือ พื้นที่รับน้ำฝน หน่วยเป็น ตร.กม.

3.5 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำหลากสูงสุดที่รอบปีการเกิดซ้ำต่างๆ และพื้นที่รับน้ำฝนขนาดหนึ่งตารางกิโลเมตรของแต่ละพื้นที่ศึกษาและกลุ่มจังหวัด

3.6 ทำการเปรียบเทียบผลการศึกษาปริมาณน้ำหลากสูงสุดของพื้นที่รับน้ำฝนหนึ่งตารางกิโลเมตรที่รอบปีการเกิดซ้ำ 25 ปี กับผลการศึกษาคเดิม [2] ในปี พ.ศ. 2524

4. ผลการศึกษา

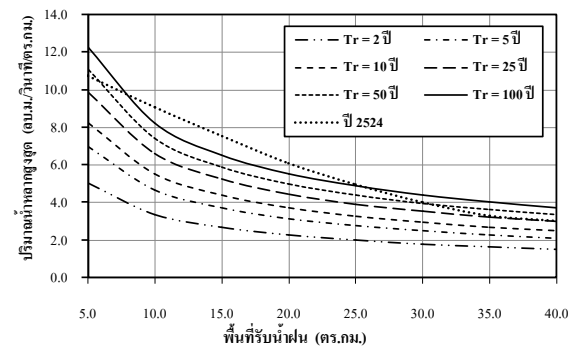
4.1 ผลการวิเคราะห์หาคัดลอกความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำหลากสูงสุดรายปีเฉลี่ยและพื้นที่รับน้ำฝนของแต่ละพื้นที่ศึกษา แสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์หาคัดลอก (Regression Analysis)

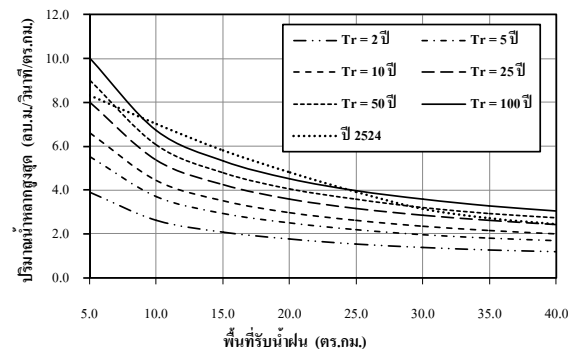
พื้นที่ศึกษา	ผลการวิเคราะห์หาคัดลอก	
ภาคเหนือ	กลุ่ม 1	$Q_M = 24.442A^{0.4272}$ ($R^2 = 0.921$)
	กลุ่ม 2	$Q_M = 19.882A^{0.4272}$ ($R^2 = 0.933$)
	กลุ่ม 3	$Q_M = 11.545A^{0.4272}$ ($R^2 = 0.661$)
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	กลุ่ม 1	$Q_M = 13.263A^{0.5472}$ ($R^2 = 0.918$)
	กลุ่ม 2	$Q_M = 9.434A^{0.5472}$ ($R^2 = 0.978$)
	กลุ่ม 3	$Q_M = 6.974A^{0.5472}$ ($R^2 = 0.967$)
ภาคกลาง/ ภาคตะวันตก/ ภาคตะวันออก	กลุ่ม 1	$Q_M = 16.676A^{0.5226}$ ($R^2 = 0.919$)
	กลุ่ม 2	$Q_M = 12.199A^{0.5226}$ ($R^2 = 0.996$)
	กลุ่ม 3	$Q_M = 8.929A^{0.5226}$ ($R^2 = 0.956$)
ภาคใต้	กลุ่ม 1	$Q_M = 38.553A^{0.5391}$ ($R^2 = 0.836$)
	กลุ่ม 2	$Q_M = 26.560A^{0.5391}$ ($R^2 = 0.955$)
	กลุ่ม 3	$Q_M = 16.009A^{0.5391}$ ($R^2 = 0.954$)

4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำหลากสูงสุดและพื้นที่รับน้ำฝนขนาดหนึ่งตารางกิโลเมตรที่รอบปีการเกิดซ้ำต่าง ๆ ของแต่ละพื้นที่ศึกษาและกลุ่มจังหวัดแสดงได้ดังรูปที่ 2 ถึง รูปที่ 13

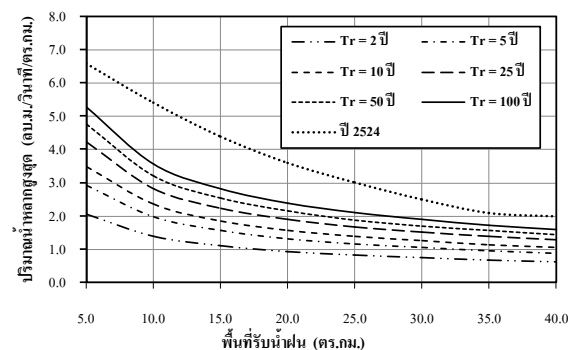
4.3 เนื่องจากผลการศึกษาคเดิมในปี พ.ศ. 2524 ได้ทำการศึกษายปริมาณน้ำหลากสูงสุดของพื้นที่รับน้ำฝนหนึ่งตารางกิโลเมตรเฉพาะที่รอบปีการเกิดซ้ำ 25 ปี ดังนั้นจึงทำการเปรียบเทียบกับผลการศึกษานี้ที่รอบปีการเกิดซ้ำ 25 ปี ดังแสดงผลการเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 2 ถึง รูปที่ 13



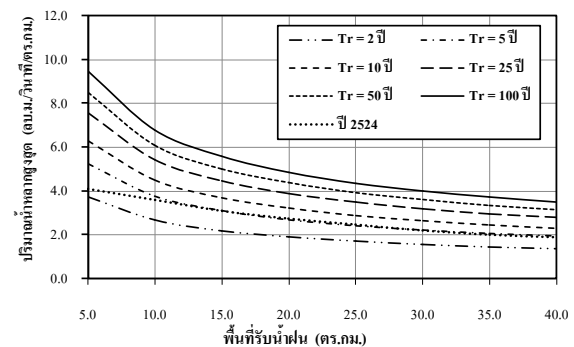
รูปที่ 2 ปริมาณน้ำหลากต่อพื้นที่รับน้ำฝนของพื้นที่ภาคเหนือ กลุ่มจังหวัดที่ 1



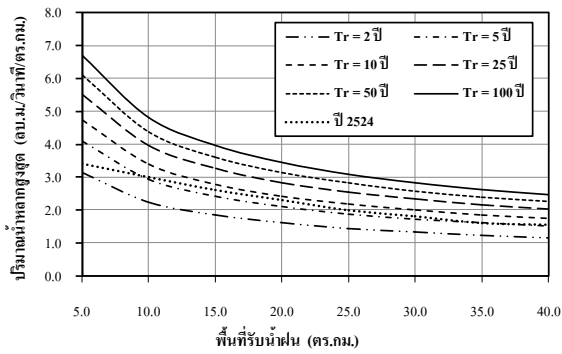
รูปที่ 3 ปริมาณน้ำหลากของพื้นที่รับน้ำฝนของพื้นที่ภาคเหนือ กลุ่มจังหวัดที่ 2



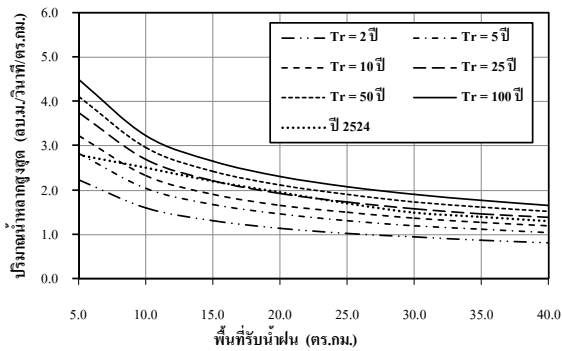
รูปที่ 4 ปริมาณน้ำหลากของพื้นที่รับน้ำฝนของพื้นที่ภาคเหนือ กลุ่มจังหวัดที่ 3



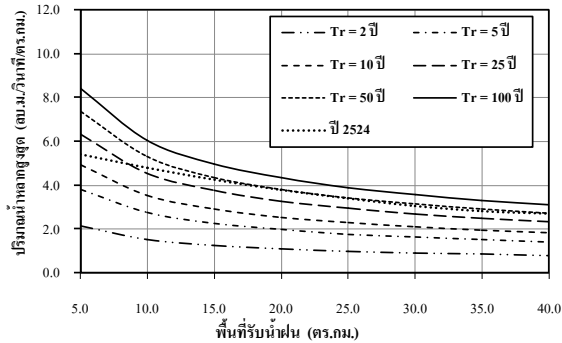
รูปที่ 5 ปริมาณน้ำหลากของพื้นที่รับน้ำฝนของพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ กลุ่มจังหวัดที่ 1



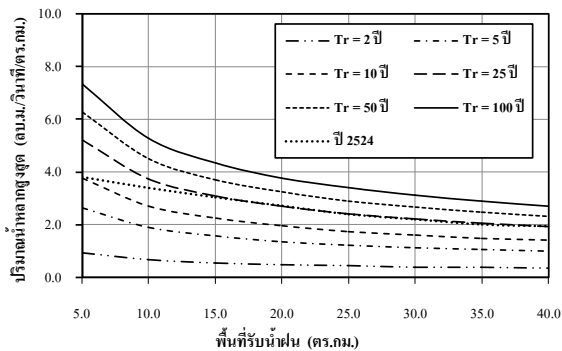
รูปที่ 6 ปริมาณน้ำหลากของพื้นที่รับน้ำฝนของพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ กลุ่มจังหวัดที่ 2



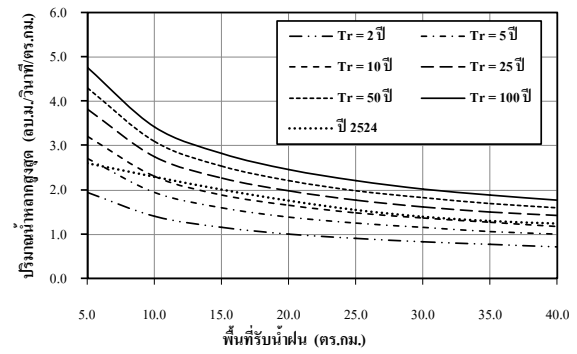
รูปที่ 7 ปริมาณน้ำหลากของพื้นที่รับน้ำฝนของพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ กลุ่มจังหวัดที่ 3



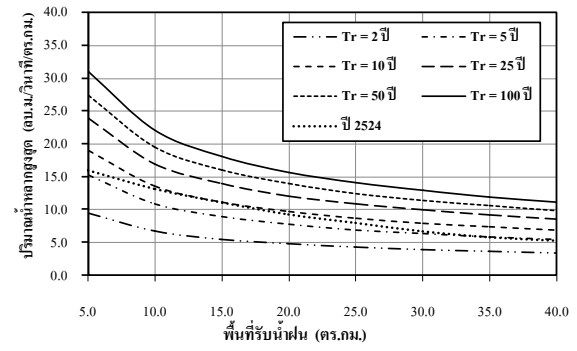
รูปที่ 8 ปริมาณน้ำหลากของพื้นที่รับน้ำฝนของพื้นที่ภาคกลาง ภาคตะวันตก และภาคตะวันออก กลุ่มจังหวัดที่ 1



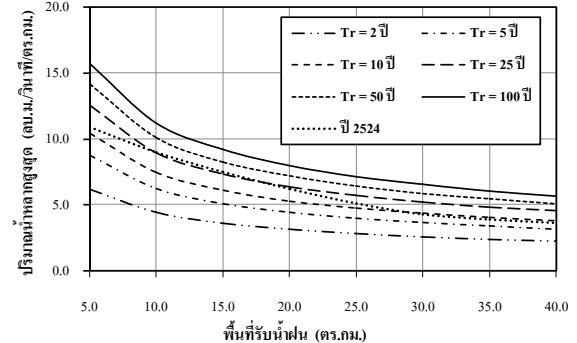
รูปที่ 9 ปริมาณน้ำหลากของพื้นที่รับน้ำฝนของพื้นที่ภาคกลาง ภาคตะวันตก และภาคตะวันออก กลุ่มจังหวัดที่ 2



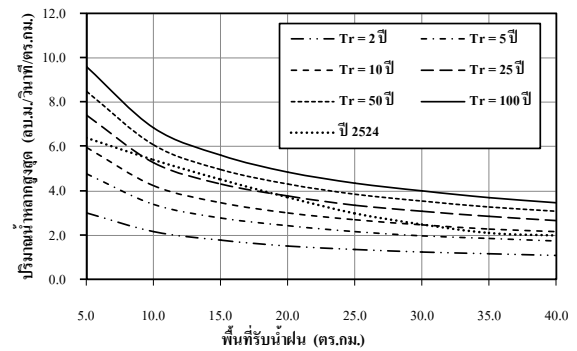
รูปที่ 10 ปริมาณน้ำหลากของพื้นที่รับน้ำฝนของพื้นที่ภาคกลาง ภาคตะวันตก และภาคตะวันออก กลุ่มจังหวัดที่ 3



รูปที่ 11 ปริมาณน้ำหลากของพื้นที่รับน้ำฝนของพื้นที่ภาคใต้ กลุ่มจังหวัดที่ 1



รูปที่ 12 ปริมาณน้ำหลากของพื้นที่รับน้ำฝนของพื้นที่ภาคใต้ กลุ่มจังหวัดที่ 2



รูปที่ 13 ปริมาณน้ำหลากของพื้นที่รับน้ำฝนของพื้นที่ภาคใต้ กลุ่มจังหวัดที่ 3

5. สรุปผลการศึกษา

จากผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการศึกษานี้เปรียบเทียบกับผลการศึกษาดำเนินแต่ละภูมิภาคของประเทศไทย พบว่าปริมาณน้ำหลากสูงสุดจากการศึกษานี้มีค่าการผันแปรต่อพื้นที่รับน้ำฝนที่มากกว่าผลการศึกษาดำเนิน โดยเฉพาะในช่วงที่ขนาดพื้นที่รับน้ำฝนน้อยกว่า 15 ตารางกิโลเมตร ซึ่งจะมีค่าที่แตกต่างกันมากที่สุด

สาเหตุที่ทำให้ผลการศึกษานี้มีค่าแตกต่างจากผลการศึกษาดำเนิน เนื่องจาก

1) ช่วงของข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน โดยการศึกษาเดิมมีช่วงระยะเวลาของข้อมูลปริมาณน้ำหลากที่ใช้ศึกษาตั้งแต่ปี 2508 – 2524 ในขณะที่การศึกษานี้รวบรวมข้อมูลตรวจวัดตั้งแต่ปี 2508 - 2556 จึงมีช่วงเวลาข้อมูลที่ยาวนานกว่าการศึกษาดำเนินถึง 32 ปี

2) จำนวนสถานีวัดน้ำท่าที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน เนื่องจากการศึกษาในปี 2524 ไม่ได้แสดงรายชื่อและระบุจำนวนสถานีที่คัดเลือกมาใช้ในการศึกษาไว้ แต่เนื่องจากระยะเวลาที่ผ่านมา 32 ปี จนถึงปัจจุบัน ได้มีการติดตั้งสถานีวัดน้ำท่าเพิ่มขึ้นในทุกกลุ่มน้ำ โดยหน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง จึงทำให้จำนวนสถานีวัดน้ำท่าที่นำมาใช้ในการศึกษานี้ จำนวน 135 สถานี ควรมีจำนวนที่มากกว่าที่ใช้ในการศึกษาในปี พ.ศ. 2524

3) การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่าต่าง ๆ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสภาพการเกิดปริมาณน้ำหลากที่เปลี่ยนแปลงไป

สำหรับพื้นที่ภาคเหนือ พบว่า ผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณน้ำหลากสูงสุดต่อพื้นที่รับน้ำฝนที่ได้จากการศึกษานี้มีค่าที่น้อยกว่าผลการศึกษาดำเนินปี 2524 ซึ่งมีแนวโน้มแตกต่างจากภูมิภาคอื่น โดยอาจมีสาเหตุได้จาก ข้อมูลปริมาณน้ำหลากของสถานีที่เลือกใช้ในการศึกษา ได้รับผลกระทบจากโครงการพัฒนาแหล่งน้ำขนาดเล็กที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำตอนบนเหนือสถานี หรืออาจเกิดขึ้นได้จากผลการศึกษานปี 2524 ได้มีการปรับค่ากราฟสำหรับการประเมินปริมาณน้ำหลากสูงสุดให้สูงขึ้นเพื่อความปลอดภัยสำหรับการนำไปใช้งาน

นอกจากนี้ ผลการศึกษาของพื้นที่ภาคเหนือกลุ่มที่ 3 ได้แสดงค่าที่น้อยกว่าผลการศึกษาดำเนินปี 2524 มากที่สุด ซึ่งอาจเป็นผลมาจากสถานีที่เลือกใช้ในการวิเคราะห์ยังไม่เป็นตัวแทนที่ดีของพื้นที่ศึกษาเมื่อเทียบกับพื้นที่กลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 ซึ่งจะเห็นได้จากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ในตารางที่ 1 มีค่าต่ำกว่าพื้นที่อื่นอย่างชัดเจน

จากผลการศึกษาปริมาณน้ำหลากต่อพื้นที่รับน้ำฝนที่ได้แสดงในรูปที่ 2 ถึงรูปที่ 13 สามารถนำไปใช้ในการคำนวณปริมาณน้ำหลากสูงสุดที่รอบปีการเกิดซ้ำที่ต้องการ เพื่อการออกแบบโครงการพัฒนาแหล่งน้ำขนาดเล็กของประเทศไทยได้ โดยการวัดขนาดพื้นที่รับน้ำฝนของโครงการ จากนั้นทำการเลือกกราฟตามภูมิภาคและกลุ่มจังหวัดที่โครงการตั้งอยู่ ทำการอ่านค่าปริมาณน้ำหลากต่อพื้นที่รับน้ำฝนที่รอบปีการเกิดซ้ำที่ต้องการและนำมาคูณกับขนาดพื้นที่รับน้ำฝนโครงการ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] The Engineering Institute of Thailand Under H.M. The King's Patronage, and Department of Local Administration. "Standard of Reservoir and Small Dam. Standard of Management/ Public Service of Local Administrative Organization" Bangkok. 115 pp, 2548.
- [2] P. Maiklad., "Manual on Small Earth Dam and Weir" Irrigation Engineering Alumni Association Under H.M. The King's Patronage. Nonthaburi. 153 pp, 2524.
- [3] Y. H. Lim and L.M. Lye, "Regional Flood Estimation for Ungauged Basins in Sarawak, Malaysia," Hydrological Sciences Journal, vol. 48 (1), pp. 79-94, 2003.
- [4] F. Ilorme, V. W. Griffis, and D. W. Watkins Jr., "Regional Rainfall Frequency and Ungauged Basin Analysis for Flood Risk Assessment in Haiti," Journal of Hydrologic Engineering, ASCE, vol. 19, pp. 123-132, 2014.
- [5] D. W. Brown, S. M.A. Moin and M. L. Nicolson, "A Comparison of Flooding in Michigan and Ontario: 'SOFT' Data to Support 'SOFT' Water Management Approaches," Canadian Water Resources Journal, vol. 22 (2), pp. 125-139, 1997.

กำลังรับแรงเอียงของเสาเข็มรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสฝังลึกมาก ในดินเหนียว

Inclined Load Capacity of Deeply Embedded Square Piles in Cohesive Soils

สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์ บุญชัย อุกฤษฏ์ชน
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์กำลังรับแรงเอียงของเสาเข็มรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสฝังลึกมากในดินเหนียว วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบระนาบความเครียด 2 มิติถูกนำมาใช้วิเคราะห์การวิบัติของปัญหานี้ เสาเข็มสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีความกว้างและความยาว (B) สำหรับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ดินเหนียวถูกจำลองเป็นเอลิเมนต์แบบปริมาตรที่มีคุณสมบัติของวัสดุแบบมอร์-คูลอมบ์ในสภาพไม่ระบายน้ำ เสาเข็มเป็นเอลิเมนต์แบบปริมาตรที่มีคุณสมบัติของวัสดุแบบอีลาสติกชิ้นส่วนเชื่อมต่อระหว่างดินและโครงสร้างถูกใช้ตลอดความยาวระหว่างผิวสัมผัสของเส้นรอบรูปของเสาเข็ม แฟกเตอร์การยึดเกาะ (α) ระหว่างดินและเสาเข็มมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยเพิ่มขึ้นทีละ 0.25 แฟกเตอร์การยึดเกาะมีค่าเท่ากับศูนย์หมายถึงกรณีที่พื้นผิวสัมผัสเป็นแบบลื่นสมบูรณ์ ในทางตรงกันข้าม แฟกเตอร์การยึดเกาะเท่ากับหนึ่งหมายถึงกรณีที่พื้นผิวสัมผัสเป็นแบบหยาบสมบูรณ์ ผลที่ได้นำเสนอในรูปของตัวแปรไร้มิติระหว่างอัตราส่วนแรงวิบัติแบบเอียงที่กระทำต่อเสาเข็มที่มุมเอียงองศาต่างๆหารด้วยกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำและความกว้างของเสาเข็ม

คำสำคัญ : ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ระบายความเครียด ไฟไนต์เอลิเมนต์ เสาเข็มสี่เหลี่ยมจัตุรัส

Abstract

This paper presents the inclined failure load of the deeply embedded square pile in cohesive soils. The two dimensional plane strain finite element is employed to determine stability of this problem. The deeply embedded square pile has the width and length (B). For finite element analyses, the clay is modelled as the volume element with the Mohr-Coulomb material in an undrained condition. The pile is modelled as the volume element with the elastic material. Soil-structure interfaces are used around the circumferential surfaces of pile. Adhesion factor (α) between clay and pile is also studied in the range of 0 – 1 with increment of 0.25. Adhesion factor of zero means fully smooth surface and that of unity 1 means fully rough surface. The results of analyses are presented in terms of the inclined failure load divided by the undrained shear strength and the width of pile at various degrees of load inclination.

Keywords : Numerical analysis, Plane strain, Finite element, Square Pile

1. บทนำ

แรงดันวิบัติของฐานรากหรือเสาเข็มรับแรงดันด้านข้างถูกเสนอครั้งแรกโดย Broms (1964) [1] ส่วนหนึ่งที่สำคัญในงานวิจัยนี้คือการกล่าวถึงความดันวิบัติ (Limit Pressure) หรือแรงหารด้วยความยาวของเสาเข็ม โดยรูปร่างของเสาเข็มที่ Broms (1964) [1] ได้ศึกษาคือ รูปร่างแบบเสาเข็มรูปวงกลม รูปร่างแบบเสาเข็มรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบเอียง และรูปร่างแบบเสาเข็มแบบแผ่น Broms (1964) [1] ได้พิจารณาผิวสัมผัสหรือค่าแฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างดินและเสาเข็ม (α) เท่ากับ 1 หรือผิวสัมผัสเป็นแบบหยาบสมบูรณ์ (Rough Surface) และที่เท่ากับ 0 หรือผิวสัมผัสเป็นลื่นสมบูรณ์ (Smooth Surface) เท่านั้น ไม่ได้พิจารณาค่าผิวสัมผัสอื่นๆระหว่าง 1 และ 0 แฟกเตอร์การยึดเกาะมีนิยามคือ $\alpha = s_{ui}/s_u$ โดย s_{ui} คือกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ผิวสัมผัสระหว่างดินและเสาเข็ม และ s_u คือกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวรอบเสาเข็ม

งานวิจัยในอดีตส่วนใหญ่ได้วิเคราะห์แรงดันด้านข้างวิบัติของเสาเข็มหน้าตัดรูปวงกลมเท่านั้น เช่นงานวิจัยของ Randolph และ Houlsby (1984) [2] ที่ได้นำเสนอแบบจำลองของเสาเข็มรูปวงกลมรับแรงดันด้านข้างในดินเหนียว โดยใช้วิธีการวิเคราะห์หาลิมิต (Limit Analysis) ทั้งวิธีขอบเขตบน (Upper Bound) และขอบเขตล่าง (Lower Bound) ในการหาผลเฉลยของเสาเข็มรูปวงกลมรับแรงดันด้านข้างซึ่งสัมพันธ์กับแฟกเตอร์การยึดเกาะ (α) Randolph และ Houlsby (1984) [2] ได้พิจารณาค่า α ตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยเพิ่มขึ้นทีละ 0.1 แต่ความแตกต่างระหว่างผลเฉลยของขอบเขตบนและของเขตล่างยังไม่เข้าใกล้กันเท่าไรนัก ต่อมา Martin และ Randolph (2006) [3] ได้พัฒนาแบบจำลองของเสาเข็มรูปวงกลมรับแรงดันด้านข้างในดินเหนียวด้วยวิธีขอบเขตบนขึ้นมาใหม่ เพื่อหาค่าแรงวิบัติของขอบเขตบนให้มีค่าใกล้เคียงกับขอบเขตล่างมากขึ้นกว่าวิธีของ Randolph และ Houlsby

(1984) [2] นอกจากนี้ Ukritchon (1998) [4] ได้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของการวิเคราะห์หาลิมิต (Finite Element Limit Analysis) ทั้งวิธีขอบเขตบนและวิธีขอบเขตล่างในการหาแรงวิบัติของปัญหาเดียวกัน

งานวิจัยของ Ho (1993) [5] Ho และ Lim (1996) [6] และ Ho และ Tan (1998) [7] เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวกับการทดสอบเสาเข็มรูปสี่เหลี่ยมสำหรับการก่อสร้างในที่ต่างๆ ผลเฉลยที่ได้เป็นกราฟการเคลื่อนตัวของเสาเข็มซึ่งแปรผันกับแรงที่กระทำทั้งแนวดิ่งและแนวราบ นอกเหนือจากนี้ยังได้หากราฟการประมาณค่าแฟกเตอร์ผิวสัมผัสระหว่างดินและเสาเข็มซึ่งแปรผันกับค่า N หรือผลที่ได้จากวิธี SPT

Plumbridge et al. (2000) [8] นำเสนอผลการทดสอบเสาเข็มรูปวงกลมและเสาเข็มรูปสี่เหลี่ยมรับแรงกระทำด้านข้างสำหรับการก่อสร้างรางรถไฟในฮ่องกง ผลที่ได้คือสมการการทำนายการเคลื่อนตัวของเสาเข็มในชั้นดินที่มีค่า N หรือผลที่ได้จากวิธี SPT ต่างๆ นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนาการทดสอบต่างๆของเสาเข็มขึ้นอีกมากมาย เช่นงานวิจัยของ Zhang (2003) [9] หรืองานของ Raymond และ Fan (2002) [10]

สำหรับงานวิจัยที่ใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข เช่นวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการช่วยวิเคราะห์หาพฤติกรรมของเสาเข็มรูปสี่เหลี่ยมก็ได้มีการศึกษาเอาไว้ เช่นงานวิจัยของ Hsueh et al. (2004) [11], Abbas (2008) [12], Submanee Wong (1999, 2009) [13], [14] ซึ่งทั้งสามงานวิจัยได้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติในการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็ม อย่างไรก็ตาม งานวิจัยของทั้งสามก็ไม่ได้หาค่าแรงดันด้านข้างวิบัติของเสาเข็มรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่รับแรงเอียงในดินเหนียวเอาไว้

สำหรับหนังสือที่เกี่ยวกับแรงดันด้านข้างวิบัติของเสาเข็ม เช่นหนังสือของ Reese และ Van Impe (2007) [15] หรือหนังสือของ Poulos และ Davis (1980) [16] ก็

ไม่ได้มีการกล่าวถึงผลเฉลยของเสาเข็มรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสรับแรงเฉียงเอาไว้

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์หาแรงவிதிด้านข้างของเสาเข็มรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสฝังลึกมากในดินเหนียว โดยเสาเข็มรับแรงกระทำแบบเฉียงตั้งแต่ 0 ถึง 45 องศา ซึ่งวัดจากกึ่งกลางของเสาเข็ม วิถีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบระนาบความเครียด 2 มิติถูกนำมาใช้วิเคราะห์การவிติของปัญหานี้ โดยเสาเข็มรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีความกว้างและความยาวเท่ากันคือ B

2. วิธีการวิเคราะห์และกำหนดแบบจำลอง

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ Plaxis 2D โดย Brinkgreve et al. (2002) [17] ในการจำลองและวิเคราะห์หาผลเฉลยของปัญหา

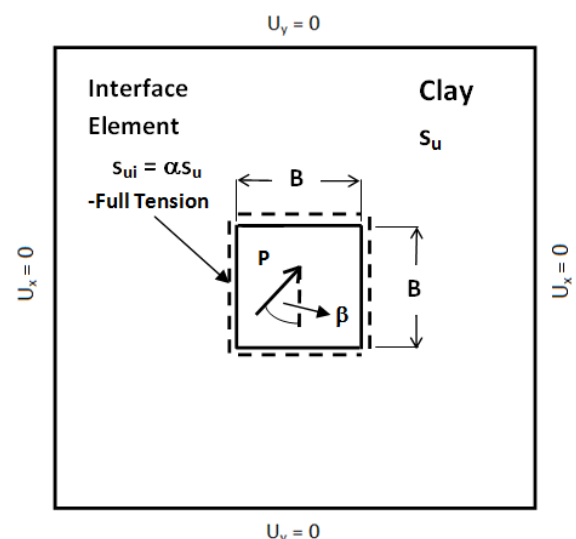
การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองให้ดินเหนียวเป็นเอลิเมนต์แบบปริมาตรที่เป็นการவிติแบบมอร์-คูลอมบี้ อัตราส่วนโมดูลัสของยังต่อกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว $(E/s_u) = 500$ กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (s_u) มุมเสียดทานภายใน $(\phi) = 0^\circ$ มุมขยายตัวเชิงปริมาตร $(\psi) = 0^\circ$ อัตราส่วนของปัวซอง $(\nu) = 0.495$ ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของดินเหนียวแบบไม่ระบายน้ำหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตร และดินเหนียวเป็นดินแบบไม่มีหน่วยน้ำหนักหรือ (Weightless Soil), $\gamma = 0$ รายละเอียดต่างๆแสดงในรูปที่ 1

เสาเข็มรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีขนาดตามแนวราบและแนวดิ่งเท่ากันคือ B มีค่าอัตราส่วนของปัวซอง $(\nu) = 0.21$ โมดูลัสของยัง $(E) = 2.545 \times 10^7$ kPa เสาเข็มเป็นแบบอิลาสติก (Elastic) และไม่เกิดการவிติก่อนดินเหนียว แรงเฉียงที่กระทำกับเสาเข็มทำมุม β กับเส้นสมมาตรของเสาเข็มดังที่แสดงในรูปที่ 1 โดยมุม β ที่ศึกษาในงานวิจัยนี้คือที่ 0, 9, 18, 27, 36 และ 45

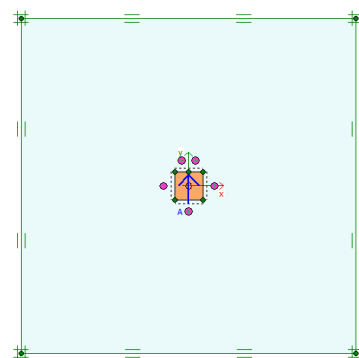
ชั้นส่วนเชื่อมต่อระหว่างดินและโครงสร้างถูกใช้ตลอดความยาวระหว่างผิวสัมผัสของเสาเข็มและดินเหนียว ค่าแฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างดินและเสาเข็ม (α) มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยเพิ่มขึ้นทีละ 0.25 แฟกเตอร์การยึดเกาะมีค่าเท่ากับศูนย์หมายถึงกรณีที่พื้นผิวสัมผัส

เป็นแบบลื่นสมบูรณ์ (Smooth Surface) ในทางตรงกันข้าม แฟกเตอร์การยึดเกาะเท่ากับหนึ่งหมายถึงกรณีที่พื้นผิวสัมผัสเป็นแบบหยาบสมบูรณ์ (Rough Surface) แฟกเตอร์การยึดเกาะมีนิยามคือ $\alpha = s_{ui}/s_u$ โดย s_{ui} คือกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ผิวสัมผัสระหว่างดินและเสาเข็ม และ s_u คือกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวรอบเสาเข็ม นอกจากนั้น ชั้นส่วนเชื่อมต่อระหว่างดินและโครงสร้างถูกกำหนดให้เป็นแบบรับแรงดึงได้โดยสมบูรณ์ (Full Tension) ในทุกกรณีของเสาเข็ม

เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองเสาเข็มถูกกำหนดให้ขอบบนและขอบล่างไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวดิ่งขอบซ้ายและขอบขวาไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวราบดังที่แสดงในรูปที่ 1 และ 2

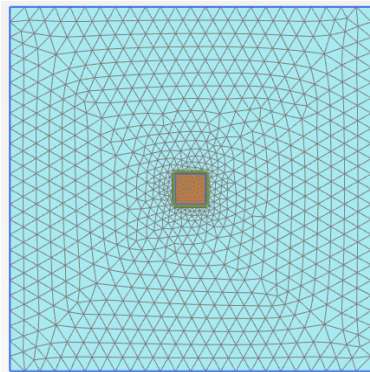


รูปที่ 1 ปัญหาเสาเข็มรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสฝังลึกมากในดินเหนียว



รูปที่ 2 แบบจำลองปัญหาเสาเข็มรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสฝังลึกมากในดินเหนียวด้วยโปรแกรม Plaxis

แบบจำลองเป็นแบบระนาบความเครียด (Plane Strain) ชิ้นส่วนดินและเสาเข็มเป็นชิ้นส่วนรูปสามเหลี่ยมแบบมี 15 จุดต่อ (Node) และความเค้นภายในชิ้นส่วน 12 จุด (Stress Points) ชิ้นส่วนเชื่อมต่อกันมี 10 จุดต่อ และความเค้นภายในชิ้นส่วน 5 จุด การแบ่งโครงข่ายออกเป็นชิ้นส่วนย่อยใช้แบบละเอียดสูงสุด (Very Fine) ดังที่แสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตัวอย่างโครงข่ายไฟไนต์เอลิเมนต์

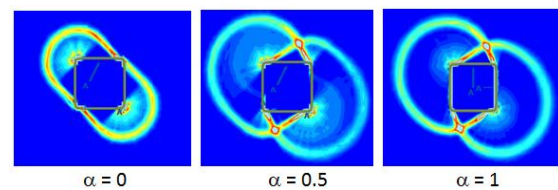
ตัวแปรป้อนเข้าของการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์คือขนาดตามแนวราบและแนวตั้ง (B) ของเสาเข็มรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสดังที่แสดงในรูปที่ 1 โดย P คือแรงกระทำวิธีแบบเชิงในทิศทางใดๆบนเสาเข็ม โดยมีตัวแปรไร้มิติของมุมเอียงคือ β ตั้งแต่ 0 – 45 องศา

นอกเหนือจากนี้ยังมีตัวแปรกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (s_u) และแฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างดินและเสาเข็ม (α) = 0, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1 ผลตัวแปรไร้มิติเป็นฟังก์ชันของตัวแปรไร้มิติป้อนเข้าคือ $P/s_u B = f(\alpha, \beta)$

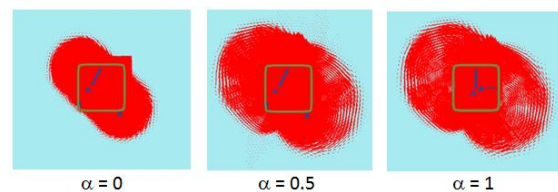
3. ผลการวิเคราะห์

รูปที่ 4 – 5 แสดงตัวอย่างรูปแบบการวิบัติ (Failure Mechanism) ของปัญหาเสาเข็มฝังลึกมากในดินเหนียว ผลรูปแบบการวิบัติประกอบด้วย เส้นรูปร่างความเครียดเฉือนที่เพิ่มขึ้น (Incremental Shear Strain Contour) และเวกเตอร์การเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้น (Total Increment Vector) เปรียบเทียบระหว่างสามกรณีคือ $\alpha = 0$, 0.5 และ 1 ตามลำดับ โดยทั้งสามกรณีมี $\beta = 27^\circ$ ซึ่งสภาพที่ค่า $\alpha = 0$ คือกรณีที่เป็นผิวสัมผัสเป็นแบบลื่น (Smooth Surface) และ $\alpha = 1$ คือกรณีที่เป็นผิวสัมผัสเป็นแบบหยาบ (Rough Surface)

จากรูปที่ 4 - 5 พบว่ากลไกการวิบัติของ ความเครียดเฉือนที่เพิ่มขึ้น (Incremental Shear Strain Contour) ของทั้ง 3 กรณีมีลักษณะคล้ายกัน โดยมีเส้นรอยเฉือนมีลักษณะเป็นเหมือนครึ่งวงกลมสองวงซ้อนอยู่บนผิวสัมผัสที่มุมทั้งสองฝั่งของรูปสี่เหลี่ยมและเส้นรอยเฉือนจะขยายตัวขึ้นเรื่อยๆตามค่า α ที่เพิ่มขึ้นดังที่แสดงในรูปที่ 5 ซึ่งกลไกการวิบัติแบบ เวกเตอร์การเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้น (Total Increment Vector) ก็เป็นเช่นเดียวกันดังที่แสดงในรูปที่ 5

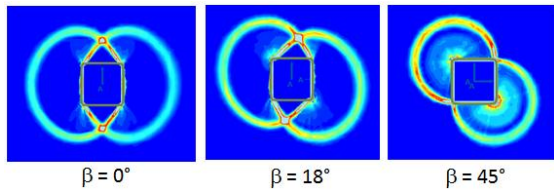


รูปที่ 4 ประกอบด้วย เส้นรูปร่างความเครียดเฉือนที่เพิ่มขึ้น ($\beta = 27^\circ$)

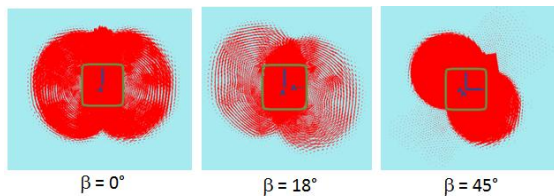


รูปที่ 5 เวกเตอร์การเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้น ($\beta = 27^\circ$)

รูปที่ 6 - 7 แสดงผลกลไกการวิบัติประกอบด้วย เส้นรูปร่างความเครียดเฉือนที่เพิ่มขึ้น (Incremental Shear Strain Contour) และ เวกเตอร์การเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้น (Total Increment Vector) เช่นเดียวกัน โดยเปรียบเทียบระหว่างสามกรณีคือ $\beta = 0^\circ$, 18° และ 45° ตามลำดับ โดยทั้งสามกรณีมี $\alpha = 1$ จากรูปที่ 6 พบว่า เส้นรูปร่างความเครียดเฉือนจะมีลักษณะล้อมรอบอยู่ที่ผิวด้านข้างของเสาเข็มโดยมีทิศทางขนาดไปกับมุมของแรงที่กระทำ โดยเส้นแรงเฉือนนี้จะบิดเบี้ยวไปเรื่อยๆตามความเอียงของแรงที่กระทำตั้งแต่ 0 องศา ไปจนถึงมุมที่เอียงที่สุดคือมุม 45 องศา โดยจะตรงส่วนที่ซ้อนกันของวงกลมจะอยู่บนระนาบเดียวกันกับทิศทางของแรงที่กระทำ สำหรับกรณีเวกเตอร์การเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้น (Total Increment Vector) ก็เป็นเช่นเดียวกันดังที่แสดงในรูปที่ 7

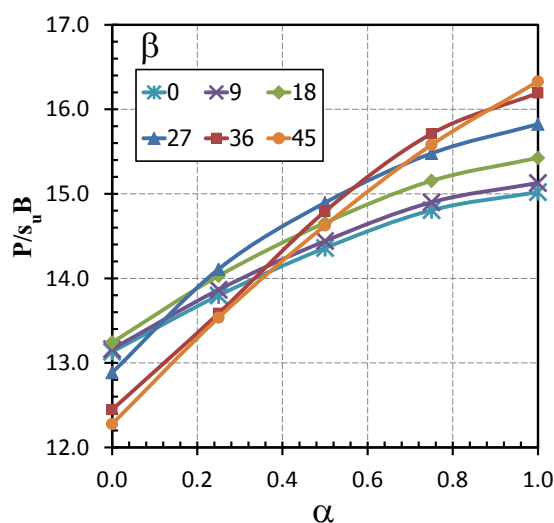


รูปที่ 6 ประกอบด้วย เส้นรูปร่างความเครียดเฉือนที่เพิ่มขึ้น ($\alpha = 1$)



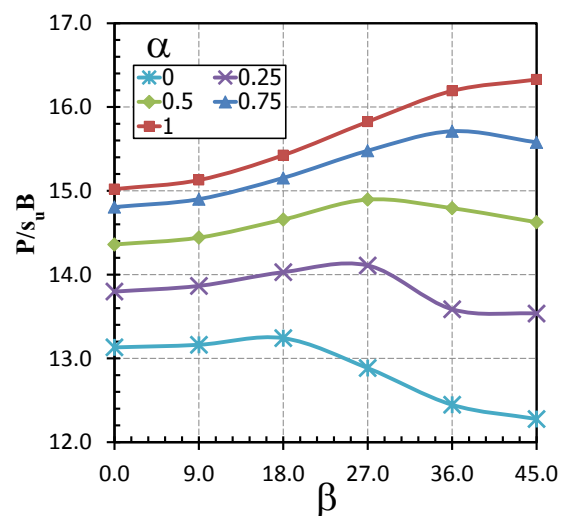
รูปที่ 7 เวกเตอร์การเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้น ($\alpha = 1$)

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ของแรงกระทำแบบเอียง วิบัติ, $P/s_u B$ เปรียบเทียบกับตัวแปร α ตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยเส้นกราฟแต่ละเส้นในรูปที่ 8 แสดงมุมของแรงที่กระทำ ตั้งแต่ 0 ถึง 45 องศา โดยเพิ่มขึ้นทีละ 9 องศา จากรูปพบว่าเส้นแต่ละเส้นไม่มีแนวโน้มไปในลักษณะเดียวกัน โดยเส้นที่มีความชันมากที่สุดคือกรณีที่ $\beta = 36^\circ$ และ 45° ส่วนเส้นที่มีความชันน้อยที่สุดคือกรณีที่ $\beta = 0^\circ$ และ 9° ค่า $P/s_u B$ ที่มากที่สุดคือกรณีที่ $\beta = 45^\circ$ และ $\alpha = 1$ (Rough Surface) โดยมี $P/s_u B = 16.328$ ส่วนกรณีที่ ค่า $P/s_u B$ ที่น้อยที่สุดคือกรณีที่ $\beta = 45^\circ$ เช่นกัน แต่ค่า $\alpha = 0$ (Smooth Surface) โดยมี $P/s_u B = 12.276$



รูปที่ 8 ผลเฉลยความดันด้านข้างวิบัติที่ $\alpha = 0 - 1$

รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ของแรงกระทำแบบเอียง วิบัติ, $P/s_u B$ เปรียบเทียบกับมุมเอียงของแรงที่กระทำ β ตั้งแต่ที่ 0° ซึ่งเป็นกรณีที่แรกกระทำนานไปกับระนาบ ด้านข้างของเสาเข็ม ไปจนถึงที่แรงกระทำมีมุมเท่ากับ 45° คือกรณีของมุมที่เอียงที่สุดที่สามารถเกิดขึ้นไปบน เสาเข็มรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส กราฟแต่ละเส้นที่ในรูปแสดง ค่าแฟกเตอร์การยึดเกาะ α ตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยเพิ่มขึ้นทีละ 0.25 จากรูปพบว่าที่ $\beta = 0^\circ$ ถึง 18° เส้นกราฟที่เส้นจะยังมีความชันน้อยและไม่แปรปรวนมาก แต่เมื่อค่า β เพิ่มขึ้นเส้นกราฟก็จะแปรปรวนมากขึ้นโดยเส้นที่มี $\alpha = 0, 0.25, 0.5$ จะมีค่าแรงกระทำแบบเอียงวิบัติลดลง แต่ที่ $\alpha = 1$ จะมีค่าแรงกระทำแบบเอียงวิบัติเพิ่มขึ้น ส่วนที่ $\alpha = 0.75$ ค่าแรงกระทำแบบเอียงวิบัติจะเพิ่มขึ้นก่อนเล็กน้อยและลดลงเมื่อ $\beta = 36^\circ$



รูปที่ 9 ผลเฉลยความดันด้านข้างวิบัติที่ $\beta = 0^\circ - 45^\circ$

4. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์หาแรงวิบัติแบบเอียงของเสาเข็มรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบระนาบความเครียด 2 มิติ สำหรับการวิเคราะห์ เสาเข็มรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะมีขนาดตามแนวราบและแนวตั้งที่เท่ากันคือ B และมี P เป็นแรงกระทำแบบเอียงในทิศทางต่างๆบนเสาเข็มตั้งแต่ $\beta = 0^\circ$ ถึง 45°

จากผลการศึกษาพบว่าแรงกระทำแบบเอียงวิบัติในรูปของตัวแปรไร้มิติ ($P/s_u B$) จะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่อไปนี้

1. แรงกระทำแบบเอียงในทิศทางต่างๆ (β)

2. ค่าแฟกเตอร์การขีดเกาะ (α)

จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อ β มีค่าเพิ่มขึ้น ค่า $P/s_u B$ ก็จะแปรปรวนมากขึ้น โดยขณะที่ $\beta = 0^\circ$ ถึง 18° เส้นกราฟทุกเส้นจะยังมีความชันน้อยและไม่มีความแปรปรวนมาก แต่เมื่อค่า β เพิ่มขึ้นเส้นกราฟก็จะมีความแปรปรวนมากขึ้นและทำให้ค่าแรงดันวิบัติแบบเอียงเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างมาก

นอกเหนือจากนี้เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของแรงกระทำแบบเอียงวิบัติ, $P/s_u B$ เปรียบเทียบกับตัวแปร α พบว่าเส้นกราฟที่มีความชันมากที่สุดคือเส้นกราฟของกรณีที่มี $\beta = 36^\circ$ และ 45° ส่วนเส้นกราฟที่มีความชันน้อยที่สุดคือเส้นกราฟของกรณีที่มี $\beta = 0^\circ$ และ 9°

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] B. B. Broms. "Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils", Journal of the Soil Mechanics and Foundation, Division 90 (2), pp. 27-63, 1964.
- [2] M. F. Randolph and G. T. Houlsby. "The Limiting Pressure on Circular Pile Loaded Laterally in Cohesive Soil", Géotechnique 34, N0. 4, pp. 613-623, 1984.
- [3] C. M. Martin and M. F. Randolph. "Upper-Bound Analysis of Lateral Pile Capacity in Cohesive Soil", Géotechnique 56, N0. 2, pp. 141-145, 2006.
- [4] B. Ukritchon "Application of Numerical Limit Analyses for Undrained Stability Problems in Clay". ScD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, USA, 1998.
- [5] C. E. Ho. "Deep Barrette Foundation in Singapore Weathered Granite". Proc. II the Southeast Asian Geotechnical Conference, Singapore, pp. 529-534. 1993.
- [6] C. E. Ho and C. H. Lim. "Barrette Foundation Constructed under Polymer Slurry Support in Old Alluvium". Proceedings of 12th Southeast Asian Geotechnical Conference, Kuala Lumpur, pp. 379-384, 1996.
- [7] C. E. Ho and C. G. Tan. "Barrettes Designed as Friction Foundations: a Case History". Proceedings of Fourth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, Missouri, March 9-12, 1998.
- [8] G. D. Plumbridge, J. W. C. Sze, T. T. F. Tram. "Full Scale Lateral Load Tests on Bored Piles and a Barrette" Proceedings of 19th Annual Seminar of Geotechnical Division, pp. 211-220, Hong Kong: Hong Kong Institution of Engineers, 2000.
- [9] L. M. Zhamg. "Behavior of Laterally Loaded Large-Section Barrettes". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 135: 639-648. 2003.
- [10] J.C . Raymond and K. Fan. "Lateral Load Test Results on Drill Shafts in Marl at Jacksonville, Florida". Proceedings of the International Deep Foundations Congress, Florida, pp. 825-835, 2002.
- [11] C. K. Hsueh, S. S. Lin, S. G. Chen. "Lateral Performance of Drilled Shaft Considering Nonlinear Soil and Structure Material Behavior". Journal of Marine Science and Technology 12: 62-71, 2004.
- [12] J. M., Abbas, Z. H., Chik, M. R., Taha. "Single Pile Simulation and Analysis Subjected to Lateral Load" The Electronic Journal of Geotechnical Engineering 3E: 1-15, 2008.
- [13] C. Submanee Wong. "Behavior of Instrumented Barrette and Bored Pile in Bangkok Subsoils" Master's Thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 1999.
- [14] C. Submanee Wong. "Behavior of Vertical and Lateral Load on T-Shape Barrette and Bored Piles" PhD Thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2009.
- [15] L. C. Reese Van and W. F. Impe. "Single Piles and Pile Groups under Lateral Loading", Taylor & Francis Group plc, London, UK, 2007
- [16] H.G . Poulos, and E. H. Davis. "Pile Foundation Analysis and Design", John Wiley & Sons, USA, 1980.
- [17] R. B. J. Brinkgreve. "PLAXIS 2D Version 8 Manual". A.A. Balkema Publishers, 2002.

ข้อเสนอแนะเพื่อการแก้ไขปัญหาจราจรสำหรับงานเกษตร

แห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

Recommendation for Improvement of Traffic Circulation

During “Kaset Fair”

เหมือนมาส วิเชียรสินธุ์ พงศ์ธร หงษา สิทธิวัฒน์ ศรีมงคล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัญหาการจราจรในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ในช่วงการจัดงานเกษตรแห่งชาติ ซึ่งมีประชาชนจากภายนอก นิสิตนักศึกษา ผู้ประกอบการร้านค้าสัญจรเดินทางเข้าและออกมหาวิทยาลัยเป็นจำนวนมากทำให้การจราจรติดขัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณประตูทางเข้าออกของมหาวิทยาลัย โดยสร้างแบบจำลองสภาพการจราจรด้วยโปรแกรม CORSIM และเปรียบเทียบแบบจำลองด้วยแถวคอยและความล่าช้า เพื่อสร้างแบบจำลองทางเลือกที่มีมาตรการจัดการการจราจร ประโยชน์ที่ได้รับคือได้เสนอแนะการห้ามการจอดรถในถนนสายหลักในมหาวิทยาลัยซึ่งสามารถเพิ่มความเร็วได้ร้อยละ 10 และลดความล่าช้าได้ร้อยละ 6

คำสำคัญ : การจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค การจัดการจราจร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ งานเกษตรแห่งชาติ

Abstract

The objective of this paper is to analyze a traffic management measure for Kasetsart University during “Kaset fair”. Due to a large number of officials, students and people driving within university, traffic congestion is a problem especially at the vicinity of the university gates. This study used CORSIM simulation software. The model was constructed and calibrated using traffic volume and delay. We analyzed the alternatives for improvement. It was found that no parking along all the main streets in the university can improve average speed of 10% and decrease delay of 6%. The results provided the guidance to the university on the traffic condition and the traffic measures affected.

Keywords: Traffic simulation, Traffic management, Kasetsart University, Kaset fair

1. บทนำ

งานเกษตรแห่งชาติเป็นงานที่จัดขึ้นเป็นประจำทุกปี เพื่อส่งเสริมวัฒนธรรมของเกษตรกรไทย มีการจัด

นิทรรศการเพื่อการเรียนรู้ จัดอบรมวิชาชีพพระยะสัน การประกวดพืชพันธุ์ไม้ต่างๆรวมถึงการแสดง ประกวดสัตว์เลี้ยงต่างๆ และมีการตั้งร้านค้าในบริเวณโดยรอบ

มหาวิทยาลัยซึ่งมีพื้นที่มากกว่า 800 ไร่ ปกติมีบุคลากรและนิสิตนักเรียนราวสองหมื่นคน เมื่อมีการจัดงานทำให้มีคนภายนอกเดินทางเข้าออกเพิ่มจำนวนมาก มหาวิทยาลัยได้ปรับเปลี่ยนเส้นทางการเดินรถรวมถึงปิดถนนบางสายเพื่อใช้เป็นบริเวณตั้งร้านค้า ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้เกิดปัญหาการจราจรติดขัดภายในพื้นที่มหาวิทยาลัยเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะบริเวณประตูทางเข้าออกในช่วงเวลาเร่งด่วนเย็น สำหรับในช่วงเร่งด่วนเช้านั้นไม่เป็นปัญหาเพราะยังไม่เปิดงาน ทั้งนี้เราได้ตระหนักถึงปัญหาการจราจรภายในมหาวิทยาลัยในช่วงการจัดงานนี้จึงเห็นว่ามหาวิทยาลัยควรมีแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถซึ่งขณะนี้ยังไม่มี การศึกษานี้จึงได้ทำการสร้างแบบจำลองการจราจรโดยใช้โปรแกรมทางด้านวิศวกรรมจราจรเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์สภาพการจราจร เพื่อให้เกิดความสะดวกในการตรวจสอบผลกระทบการจราจรจากสถานการณ์รูปแบบใหม่ๆ และสามารถคาดการณ์ปัญหาจราจรที่อาจเกิดขึ้นและทดสอบซ้ำได้ตามที่ต้องการต่อไปในอนาคต ทำให้มองเห็นสภาพจราจรและปัญหาการจราจรโดยรวมในมหาวิทยาลัยอย่างเป็นระบบ

2. จุดประสงค์และขอบเขตของงาน

เพื่อจำลองสภาพการจราจรในแง่ปริมาณการไหลและความล่าช้าในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ในช่วงการจัดงานเกษตรแห่งชาติ เพื่อเสนอแนะเส้นทางถนนภายในมหาวิทยาลัยที่ห้ามจอดเพื่อแก้ไขปัญหาการจราจรติดขัดในช่วงการจัดงานเกษตรแห่งชาติ

ขอบเขตของงาน ศึกษาพื้นที่ในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์บนถนนสายหลักของมหาวิทยาลัย โดยในช่วงการจัดงานเกษตรแห่งชาติ ได้ทำการศึกษาในบริเวณทางแยกที่ประตูทางเข้าออกหลัก 2 ประตูคือประตูงามวงศ์วาน 1 และประตูวิภาวดีรังสิต โดยชั่วโมงที่ศึกษาคือชั่วโมงเร่งด่วนเย็นที่มีปริมาณการจราจรสูงสุดมีความล่าช้ามากและมีแถวคอยสูง

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค (Micro-Simulation) เป็นการจำลองโดยใช้คอมพิวเตอร์ซึ่งแสดง

ลักษณะการเคลื่อนตัวของยานแต่ละคันในระบบโครงข่ายโดยมีพื้นฐานการจำลองมาจากทฤษฎีการเคลื่อนตัวตามกัน (Car Following) การเปลี่ยนช่องทาง (Lane Changing) และระยะระหว่างรถที่ยอมรับได้ (Gap Acceptance) ทั้งนี้การจำลองการจราจรในระดับจุลภาคมีข้อดีคือความสามารถในการเลียนแบบพฤติกรรมที่แท้จริงของผู้ขับขี่และสมรรถนะของระบบได้สูงสามารถนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการพัฒนาระบบให้มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพง่ายและสะดวกในการประเมินผลกระทบจากโครงการใหม่ๆ

โปรแกรมจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาค (Microscopic) ใช้วิเคราะห์โครงข่ายในระดับพื้นที่ย่อยเพื่อแสดงให้เห็นสภาพใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงบนท้องถนน ณ จุดตัดและทางแยก เหมาะสำหรับการคาดการณ์ผลการปรับปรุงโครงข่ายถนน ณ จุดตัดหรือทางแยก โดยวิเคราะห์จากตัวชี้วัดจากโปรแกรม เช่น ความยาวแถวคอย ความล่าช้า เป็นต้น

สืบเนื่องจากการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีสื่อสารและคอมพิวเตอร์ที่มีอย่างค่อนึงทำให้การพัฒนาโปรแกรมจำลองสภาพจราจรมีความก้าวหน้าและมีให้เลือกใช้จำนวนมากในปัจจุบันแต่โปรแกรมที่มีความยืดหยุ่นสูงในการนำไปประยุกต์ใช้และผ่านการตรวจสอบความถูกต้องพร้อมกับได้รับการยอมรับนั้นมีอยู่ไม่มากนักในส่วนนี้จึงกล่าวถึงโปรแกรมจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาคที่ได้รับการยอมรับและนิยมใช้ในระดับสากลได้แก่ โปรแกรม AIMSUN 2, CORSIM, DRACULA, PARAMICS และ VISSIM

สำหรับโปรแกรม CORSIM (Corridor Microscopic Simulation) [2] ที่ใช้ในที่นี่พัฒนาขึ้นโดย Federal Highway Administration ในปี ค.ศ. 1996 เป็นโปรแกรมจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาค ประกอบไปด้วยโปรแกรมย่อย FRESIM ใช้ในการจำลองสภาพจราจรบนทางหลวง (Freeway) และ NETSIM ใช้จำลองสภาพจราจรในเมือง เป็นโปรแกรมระดับแนวหน้าที่ได้มีการนำมาใช้ทดสอบการออกแบบลักษณะทางกายภาพ (Geometric Configuration) สามารถใช้จำลองการ

ควบคุมสัญญาณไฟจราจรคงที่และสัญญาณไฟปรับเปลี่ยนตามปริมาณจราจร

สำหรับทางแยกที่ไม่มีสัญญาณไฟจราจรนั้น Highway Capacity Manual 2010 [1] ให้คำนิยามไว้ว่าเป็นทางแยกที่ควบคุมโดยป้ายหยุดแบบสองขาของทางแยก (Two-way Stop Control Intersection) ว่าเป็นทางแยกที่ไม่มีการควบคุมการจราจรบนทางแยกด้วยสัญญาณไฟจราจร แต่ควบคุมการจราจรด้วยป้ายหยุดแบบสองขาของทางแยก และให้ความสำคัญของทางแยกก่อน โดยให้ยานพาหนะที่มาจากทางแยกเอกสามารถผ่านทางแยกได้ก่อน โดยให้ยานพาหนะที่มาจากทางโทหยุด ด้วยการติดตั้งป้ายหยุดบนทางโท เพื่อเป็นการบังคับให้ยานพาหนะทางโทหยุดให้ยานพาหนะบนทางเอกผ่านทางแยกไปก่อนได้จำลองสภาพการจราจรในแง่ปริมาณการไหลและความล่าช้าในมหาวิทยาลัยในช่วงการจัดงาน

สุพรชัย อุทัยนฤมล และ พลศรี ประเสริฐพรหม [3] วิเคราะห์การจัดการจราจรในพื้นที่กิจกรรมขนาดใหญ่ ลักษณะคล้ายมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วัดพระธรรมกาย โดยเปรียบเทียบอัตราการไหลและประสิทธิภาพการจัดการเดินรถในรูปแบบทิศทางเดียวและสองทิศทางโดยใช้โปรแกรม VISSIM ในการวิเคราะห์สภาพจราจรทั้งโครงข่าย ซึ่งมีความเร็ว ระยะเวลาในการเดินทางและความล่าช้าเป็นตัววัดผล

ชัยวัฒน์ ไหล่บุบผ และ ประเมศวร์ เหลือเทพ [4] วิเคราะห์การจัดการทางแยกบนถนนกาญจนาภิเษกตั้งแต่สถานีขนส่งขนาดใหญ่ถึงแยกคลองหมี โดยสำรวจข้อมูลปริมาณการจราจร ความเร็ว ความล่าช้า รอบสัญญาณไฟจราจร และตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของทางแยก จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม VISSIM เพื่อเปรียบเทียบสถานการณ์จำลองที่มีมาตรการจัดการการจราจร ผลที่ได้จากการศึกษานำมาเป็นแนวทางการแก้ปัญหาการจราจรในบริเวณดังกล่าว

4. การดำเนินงาน

การกำหนดขอบเขตพื้นที่และเลือกทางแยกที่เป็นตำแหน่งบันทึกข้อมูล ได้เลือกถนนสายหลักได้แก่ ถนนสุวรรณวาลกสิกิจ ถนนจันทรสติชัย ถนนไพฑูรย์จิงคสุวรรณ และถนนสุธรรมอริกุล ดังแสดงในรูปที่ 1 โดย

เส้นสีขาวแสดงเส้นทางที่เปิดการจราจรและเส้นประสีขาวแสดงเส้นทางที่ปิดการจราจร



รูปที่ 1 โครงข่ายถนนที่ศึกษาภายในมหาวิทยาลัย

ได้มีการสำรวจข้อมูลในช่วงที่มีการจัดงานเกษตรแห่งชาติ และเลือกทางแยกที่เป็นทางแยกหลัก ซึ่งเป็นทางเข้า-ออกมหาวิทยาลัย ได้แก่ ทางแยกประตูลิเก (หมายเลข 1) และทางแยกประตูลิเก 1 (หมายเลข 2) ดังแสดงในรูปที่ 2

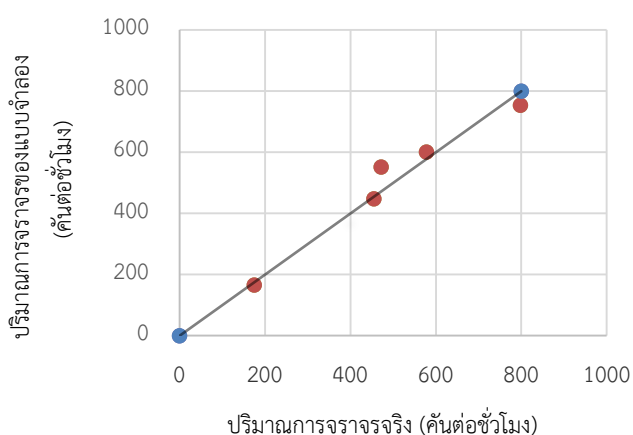


รูปที่ 2 ทางแยกที่ทำการศึกษากายภายในมหาวิทยาลัยช่วงการจัดงานเกษตรแห่งชาติ

การเก็บข้อมูลปริมาณการจราจรทำในช่วงวันที่ 30 มกราคม – 7 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2558 ในวันธรรมดา แยก ประตูกมวงศ้วน 1 และแยกประตูวิภาวดีรังสิต ในเวลา เร่งด่วนเย็น 16.30 – 17.30 น. เนื่องจากเป็นช่วงที่มีปริมาณ รถมากมีความล่าช้าสูง ข้อมูลจากการสำรวจที่นำมา ประทับเทียบ ได้แก่ ปริมาณรถ และความล่าช้า ของทางแยก ประตูกมวงศ้วน 1 และประตูวิภาวดี ในส่วนของแถวคอย ไม่ได้เก็บข้อมูลเพราะสภาพจราจรจริงมีรถติดขัดยาวจนไม่ สามารถระบุบริเวณท้ายแถวได้แน่นอน ในการประมวลผล แบบจำลองในโปรแกรม ได้ปรับจำนวน 16 รอบ จึงได้ผล การปรับทั้งปริมาณรถและความล่าช้าของแต่ละทิศทางได้ ไกล่เคียง ผลของการปรับเทียบแสดงค่าดังตารางที่ 1 รูปที่ 3 และตารางที่ 2 รูปที่ 4 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบปริมาณรถในแต่ละทิศทาง

ชื่อแยก	ทิศทาง	ปริมาณรถ (จำลอง)	ปริมาณรถ (จริง)	ความแตกต่าง	% ความแตกต่าง
กมวงศ้วน 1	SB	552	472	80	16.94
	NB	166	175	9	5.14
วิภาวดี	SB	754	798	44	5.51
	EB	601	578	23	3.98
	NB	448	455	7	1.54



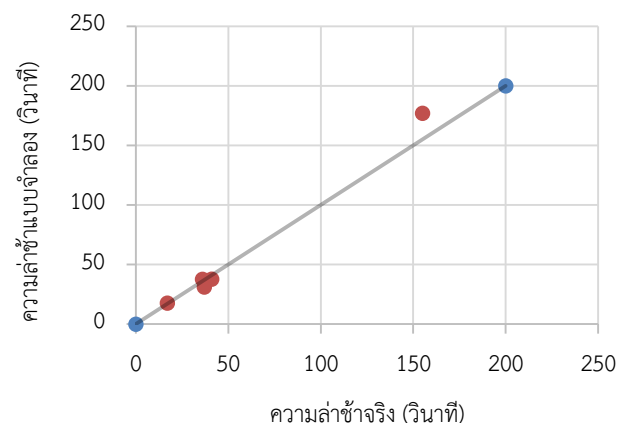
รูปที่ 3 การเปรียบเทียบปริมาณจราจรจริงกับแบบจำลอง

จากตารางที่ 1 และรูปที่ 3 พบว่าเปอร์เซ็นต์ผลต่างของ ปริมาณการจราจรอยู่ในช่วงร้อยละ 1.54 - 16.94 โดย

ปริมาณรถที่แสดงดังกล่าวในช่วงการจัดงานเกษตรแห่งชาติ สภาพจริงมีปริมาณรถใกล้เคียงกับแบบจำลองสังเกตได้จาก รูปที่ 3 ซึ่งจุดที่พล็อตบนกราฟอยู่ในแนวเอียงทำมุม 45 องศา

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบความล่าช้า

ชื่อแยก	ทิศทาง	ความล่าช้า			
		แบบจำลอง (วินาที)	สภาพจริง (วินาที)	ความแตกต่าง	
				วินาที	%
กมวงศ้วน 1	NB	31.2	37	5.8	15.67
	SB	117	155	38	14.20
วิภาวดี	NB	37.7	36	1.7	4.72
	SB	37.8	41	3.2	7.80
	EB	17.7	17	0.7	4.11



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบความล่าช้าจริงกับแบบจำลอง

จากตารางที่ 2 พบว่าร้อยละผลต่างของความล่าช้าอยู่ ในช่วง 4.11 - 15.67 โดยความล่าช้าที่แสดงดังกล่าวในช่วง การจัดงานเกษตรแห่งชาติสภาพจริงมีปริมาณรถใกล้เคียง กับแบบจำลอง สังเกตได้จากรูปที่ 4 ซึ่งจุดที่พล็อตบนกราฟ อยู่ในแนวเอียงทำมุม 45 องศา

เมื่อทำการวิเคราะห์ระดับการให้บริการของทางแยก โดยใช้มาตรฐาน HCM 2010 ได้ผลดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบ LEVEL OF SERVICE

ทางแยก	ทิศทาง	LEVEL OF SERVICE		
		สภาพจริง	แบบจำลอง	ความต่าง
งามวงศ์วาน 1	SB	F	F	ระดับเดียวกัน
	NB	D	E	ต่างกัน 1 ระดับ
วิภาวดี	SB	E	E	ระดับเดียวกัน
	EB	C	C	ระดับเดียวกัน
	NB	E	E	ระดับเดียวกัน

จากตาราง พบว่า ส่วนใหญ่ทางแยก มีระดับบริการอยู่ที่ E และ F แสดงว่าสภาพการจราจรในมหาวิทยาลัยติดขัดอย่างมาก โดยแบบจำลองสามารถสะท้อนสภาพการเดินรถได้ดี เนื่องจากสภาพจริงกับแบบจำลองส่วนใหญ่มีระดับการให้บริการเดียวกัน ยกเว้นที่ทางแยกกงวมวงศ์วาน 1 มุ่งหน้า NB ซึ่งมีความแตกต่างกัน 1 ระดับอันเนื่องมาจากผลต่างของความล่าช้าที่บริเวณนี้ซึ่งประตูเป็นทางเข้าหลักของงาน ซึ่งในสภาพจริงมีความแปรปรวนของการเคลื่อนที่มากในช่วงชั่วโมงที่ทำการศึกษา

อนึ่ง ปัญหาชัดเจนที่พบในช่วงการดำเนินงานเกษตรแห่งชาติ คือ มีการจอดรถในช่องจราจรซ้ายซึ่งปกติห้ามจอดดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การจอดรถในบริเวณที่ห้ามจอด

จากปัญหาดังกล่าวผู้ศึกษาได้ทำการวิเคราะห์เพื่อประเมินทางเลือกที่เหมาะสมในการแก้ไขปัญหาด้านการจราจรพื้นที่ ในช่วงการดำเนินงานเกษตรแห่งชาติ ออกเป็น 4 ทางเลือก ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ทางเลือกรูปแบบต่างๆของแบบจำลอง

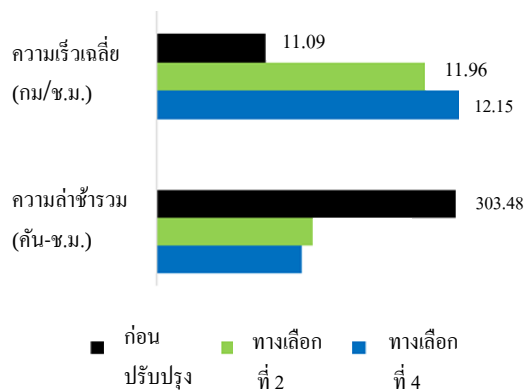
5. ผลจากทางเลือกต่างๆ

ในการหาทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดใช้ดัชนีชี้วัดได้แก่ความเร็วเฉลี่ยของรถทั้งระบบ และความล่าช้ารวม และค่าความแตกต่างของดัชนีของแบบจำลองทางเลือก ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4 จากตาราง พบว่าแบบจำลองทางเลือกการจราจร ก่อนและหลังการปรับปรุง สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการการจราจรได้อย่างชัดเจน พบว่ามี 2 ทางเลือกที่ดีซึ่งทำให้ความเร็วเฉลี่ยเพิ่มขึ้น และลดความล่าช้าทั้งระบบลง ได้แก่ ทางเลือกที่ 4 (การห้ามจอดรถบนถนนสายหลักรอบมหาวิทยาลัย) และทางเลือกที่ 2 (การห้ามจอดรถบนถนนจันทรสติย์และถนนสุวรรณอมริกุล) เป็นทางเลือกที่ดีลำดับถัดมา

ตารางที่ 4 ตัวชี้วัดความแตกต่างของแบบจำลองทางเลือกการจัดการจราจรระดับจุลภาค

แบบจำลองทางเลือก		ดัชนีตัวชี้วัด			
		ความเร็วเฉลี่ยของ ทั้งระบบ (KPH)	% ความแตกต่าง	ความล่าช้ารวม (veh-hr)	% ความแตกต่าง
ก่อนปรับปรุง		11.09	0.00	303.48	0.00
หลังปรับปรุง	ทางเลือกที่ 1	11.30	1.89	305.57	0.69
	ทางเลือกที่ 2	11.96	7.84	287.41	-5.30
	ทางเลือกที่ 3	11.28	1.74	300.02	-1.14
	ทางเลือกที่ 4	12.15	9.58	286.14	-5.71

เราพบว่าทางเลือกที่ 4 การรวมทุกกรณี เป็นทางเลือกที่มีความเหมาะสม และมีประสิทธิภาพสูงสุดในการแก้ไขปัญหาจราจรบริเวณทางแยกโดยแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนการรวมทุกกรณีสามารถบรรเทาปัญหาการจราจรในแง่ของความเร็วเฉลี่ย และความล่าช้าเฉลี่ยของรถมีประสิทธิภาพดีขึ้นกว่าสภาพจราจรก่อนปรับปรุง และมีประสิทธิภาพมากกว่าทางเลือกที่ 1-3 ทั้งนี้ทางเลือกที่ 2 (การห้ามจอดรถบนถนนจันทรสติย์และถนนสุวรรณสารีกุล) เป็นทางเลือกที่ช่วยบรรเทาการติดขัดของการจราจรได้ดีเช่นกัน



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบผลของทางเลือกที่เหมาะสม

6. สรุป

จากการสร้างแบบจำลองสร้างเพื่อจำลองการจราจรในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ในช่วงงานเกษตรแห่งชาติ ทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเห็นได้จากผลจากการวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างสภาพจริงกับแบบจำลอง

ส่วนใหญ่ใกล้เคียงกันมาก มีค่าความแตกต่างสูงสุดไม่เกินร้อยละ 17 จากการวิเคราะห์แนวทางเลือกเพื่อปรับปรุงการจราจร สรุปได้ว่าการห้ามจอดรถบนถนนสายหลักรอบมหาวิทยาลัยทั้ง 4 เส้นสามารถช่วยบรรเทาปัญหาการติดขัดของจราจรได้เป็นอย่างดีโดยสามารถเพิ่มความเร็วเฉลี่ยทั้งระบบได้ประมาณร้อยละ 10 และลดความล่าช้าได้ประมาณร้อยละ 6 แต่อย่างไรก็ดีหากต้องการห้ามจอดเพียงทางเลือกเดียวแล้วการห้ามจอดเฉพาะบนถนนจันทรสติย์และถนนสุวรรณสารีกุลเป็นทางเลือกที่ช่วยบรรเทาการติดขัดของการจราจรได้ดีเช่นกัน แบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้ยังสามารถนำมาใช้ทดสอบสถานการณ์อื่นๆ ได้อีก เช่น ตรวจสอบผลของการปิดถนนเนื่องจากกิจกรรมต่างๆ หรือทดสอบผลของการเพิ่มลดทางเข้าออกสู่ถนนของพื้นที่กิจกรรมต่างๆ ได้

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Transportation Research Board. 2010, Highway Capacity Manual, National Research Council, Washington D.C.
- [2] McTrans Center, TSIS-CORSIM, <http://mctrans.ce.ufl.edu/featured/TSIS/>, accessed 2015.
- [3] S.Uthainarumol and P. Prasertphan, "Analysis of Traffic Management in a large Area Using Micro-Simulation", the 17th National Convention on Civil Engineering, 2554.
- [4] C. Yaibog and P. Luatthep, "Analysis of Traffic Management from Hat Yai Bus Terminal Intersection to Kor-Hong Intersection", the 19th National Convention on Civil Engineering, Pattaya, 2557.

การออกแบบเส้นทางขนส่งหลายรูปแบบเพื่อการส่งออกผลไม้

Designing The Multimodal Transport Route for Fruit Export

ศักรธร บุญทวีวัฒน์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบชุดเส้นทางขนส่งใหม่เพื่อลดต้นทุนการขนส่งสินค้าประเภทคอนเทนเนอร์ ซึ่งต้นทุนการขนส่งนั้นมีสัดส่วนมากที่สุดในระบบโลจิสติกส์มากถึง 50% ของทั้งระบบฯ ชุดเส้นทางขนส่งใหม่นี้จะถูกพิจารณาโดยรูปแบบของการขนส่งหลายรูปแบบระหว่างการขนส่งทางรถบรรทุกอย่างเดียว และการขนส่งทางเรือผสมผสานกับรถบรรทุกโดยประยุกต์ใช้แบบจำลองการแก้ไขปัญหาคอขวด เพื่อหาชุดเส้นทางขนส่งใหม่ที่ประกอบด้วยปริมาณสินค้าที่เหมาะสมในแต่ละเส้นทาง ผลที่ได้จากแบบจำลองฯ พบว่าชุดเส้นทางขนส่งใหม่สามารถลดต้นทุนและเวลาที่ใช้ในการขนส่งได้ 17.52% และ 61% ตามลำดับ ผลการวิจัยที่ได้จากแบบจำลองฯ สามารถเป็นประโยชน์ต่อผู้ประกอบการการขนส่งและโลจิสติกส์ ในการลดต้นทุนการขนส่งภายในเวลาที่จำกัดเพื่อการส่งออกผลไม้ และสินค้าอื่นๆ ที่บรรจุลงในตู้คอนเทนเนอร์แช่เย็นได้อย่างมหาศาล ตลอดจนจะเป็นประโยชน์ต่อผู้บริหารระดับสูงของท่าเรือสุราษฎร์ธานีอีกด้วย

คำสำคัญ : การขนส่งหลายรูปแบบ การลดต้นทุนการขนส่ง แบบจำลองการแก้ไขปัญหาคอขวด โปรแกรมเชิงเส้น การส่งออกผลไม้ และ ท่าเรือสุราษฎร์ธานี

Abstract

This paper presents a design of new routes set for minimizing container transportation cost which is the highest proportion in logistics cost system as much as 50% . The new routes set is considered as the multimodal transportation between trailer only and barge - trailer modes by utilizing the linear optimization model to determine the optimal routes set with cargo amount in each route. The results derived from the model found the new routes set can minimize cost and time for 17.52% and 61% respectively. The results derived from the model can be immensely beneficial to the transportation and logistics operators aspiring to reduce costs usage under time constraint for fruit export and other cargoes in reefer container through the chief executive of Surat Thani port as well.

Keywords : Multimodal Transportation, Cost Minimization , Linear Optimization Model, Fruit Export and Surat Thani Port

1. บทนำ

ระบบโลจิสติกส์ที่มีประสิทธิภาพมีความสำคัญต่อการส่งออกสินค้าจากไทยไปยังต่างประเทศ เนื่องจากกิจกรรมในระบบโลจิสติกส์มีความเกี่ยวข้องกับทุกฝ่าย ตั้งแต่ผู้ผลิต ผู้รวบรวม ผู้ส่งออก และผู้บริโภค ซึ่งกิจกรรมการขนส่งจะเข้าไปมีส่วนร่วมเพื่อเชื่อมต่อกับทุกฝ่ายในระบบโลจิสติกส์ ได้แก่ การเคลื่อนย้ายสินค้าจากแหล่งผู้ผลิตไปยังผู้รวบรวมซึ่งมีหน้าที่ในการจัดเก็บสินค้าและทำการส่งต่อไปให้กับผู้ส่งออก(ในบางกรณีผู้รวบรวมทำหน้าที่เป็นผู้ส่งออกด้วย) เพื่อส่งออกไปยังลูกค้าในต่างประเทศ ในสินค้าบางประเภท เช่น ผลไม้เป็นสินค้าที่เน่าเสียง่ายและมีระยะเวลาในการเก็บรักษาจำกัด ระยะเวลาในการขนส่งตลอดจนการบริหารจัดการกิจกรรมโลจิสติกส์ในทุกๆ ฝ่าย เริ่มตั้งแต่เกษตรกรขนส่งผลผลิตมาขายให้กับผู้รวบรวม ผู้รวบรวมจะรับซื้อผลผลิตจากเกษตรกรหลายราย เมื่อผู้รวบรวมรับผลผลิตมาแล้วจะทำการคัดคุณภาพ คัดเกรด ตรวจสอบบรรจุ ขนส่งไปท่าเรือภายในประเทศเพื่อการส่งออก และขั้นตอนสุดท้ายเป็นการขนส่งทางเรือจากท่าส่งออกไปยังท่าเรือในประเทศปลายทาง ซึ่งเวลาที่ใช้ในกระบวนการทั้งหมดนี้เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการกำหนดคุณภาพและมูลค่าของผลไม้ที่ส่งมอบ ณ ประเทศปลายทาง ผู้ส่งออกต้องสร้างความพึงพอใจให้กับลูกค้าด้วยการรักษาคุณภาพของผลไม้ให้อยู่ในสภาพที่ดีที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของระบบโลจิสติกส์ทั้งระบบในการส่งออกสินค้า ต้นทุนการขนส่งมีส่วนที่ใหญ่มากที่สุดในต้นทุนของระบบโลจิสติกส์ทั้งระบบ โดยจากการวิเคราะห์ต้นทุนพบว่า ต้นทุนค่าขนส่งมีค่าประมาณ 35-50% ของระบบต้นทุนโลจิสติกส์ทั้งหมด [1] อัตราส่วนดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับราคาน้ำมัน บางช่วงที่ราคาน้ำมันมีราคาแพงต้นทุนค่าขนส่งอาจขึ้นไปถึงระดับ 70-80% ของระบบต้นทุนโลจิสติกส์ทั้งหมด ต้นทุนที่รองลงมาได้แก่ ค่าบรรจุสินค้าเข้าสู่คอนเทนเนอร์ ค่าเก็บเกี่ยว ค่าคัดเกรด ค่าพิธีทางศุลกากร ค่าติดต่อสื่อสาร และค่าตรวจสอบ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อลดต้นทุนการขนส่ง โดยประยุกต์หลักการการขนส่งต่อเนื่องหลายรูปแบบ (Multimodal Transportation) เพื่อหาทางเลือกใหม่สำหรับเส้นทางการขนส่งผลไม้ภายในประเทศเพื่อการส่งออก โดยกำหนดกรณีศึกษาคือการส่งออกมังคุดจากไทยไปยังจุดหมายปลายทางในต่างประเทศ โดยการวิเคราะห์เส้นทางการขนส่งที่เป็นไปได้ทั้งหมดรวมถึงเส้นทางการขนส่งในปัจจุบัน และนำเสนอชุดเส้นทางการขนส่งใหม่เพื่อเป็นทางเลือกให้ผู้ส่งออกสำหรับการขนส่งที่ถูกกว่าภายในเวลาที่จำกัด

ในงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตได้มีการใช้แบบจำลองเชิงเส้นในการหาเส้นทางการขนส่งแบบใหม่อยู่หลายบทความ Hitchcock [2] และ Tzeng, et.al. [3] ได้ใช้การโปรแกรมเชิงเส้นเพื่อลดต้นทุนการขนส่งให้ต่ำที่สุดภายใต้ขอบเขตของเวลา Leung et. al. [4] วางแผนการขนส่งสินค้าจากฮ่องกงไปจีนเพื่อให้ต้นทุนรวมการขนส่งต่ำสุดโดยใช้การโปรแกรมจำนวนเต็มแบบผสม (Mixed Integer Programming) เพื่อกำหนดเครือข่ายการขนส่งเพื่อลดต้นทุนการขนส่งให้ต่ำที่สุดโดยใช้ซอฟต์แวร์ Lindo ในการแก้ไขปัญห แบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการแก้ปัญหการจัดเส้นทางการขนส่งสามารถใช้เทคนิคสมการทางคณิตศาสตร์ได้หลากหลาย เช่น ในกรณีของการใช้วิธีของ Bender Decomposition [5], Dual accent [6], Cutting plane [7] และ Lagrangian relaxation [8]

ในบทความวิจัยนี้ เส้นทางการขนส่งที่เป็นไปได้ทั้งหมดจะถูกสร้างขึ้น โดยต้นทุนและเวลาที่ใช้ในการขนส่งจะถูกคำนวณในแต่ละเส้นทาง จากนั้นข้อมูลดังกล่าวจะถูกนำไปคำนวณในแบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้น โดยมีปัจจัยเวลาในแต่ละเส้นทางและเวลารวมทุกเส้นทาง ตลอดจนปริมาณสินค้าที่ถูกขนส่งจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดหมายปลายทางเป็นข้อจำกัดหลัก เพื่อวิเคราะห์ถึงทางเลือกใหม่ของการขนส่งภายในประเทศที่เป็นไปได้เพิ่มขึ้น โดยมีเป้าหมายของการวางแผนการขนส่งคือ การลดต้นทุนการขนส่งรวมให้มากที่สุดในการส่งออกสินค้า

งานวิจัยนี้จะแตกต่างจากงานวิจัยอื่นๆที่ผ่านมาในอดีต เนื่องจากแบบจำลองฯที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ เป็นแบบจำลองเฉพาะสำหรับการลดต้นทุนเพื่อการส่งออกผลไม้ภายในเวลาที่จำกัดในแต่ละเส้นทาง และเวลารวมของทุกเส้นทาง รวมถึงข้อจำกัดในด้านความสามารถของยานพาหนะในการบรรทุกสินค้าทั้งรถบรรทุกและเรือซึ่งสามารถให้ผู้ประกอบการขนส่งและโลจิสติกส์สามารถนำไปใช้งานได้จริง

2. ความสำคัญของปัญหา

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการลดต้นทุนการขนส่งซึ่งเป็นต้นทุนที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในระบบโลจิสติกส์โดยกำหนดกรณีศึกษาคือการขนส่งผลไม้ ซึ่งในบทความวิจัยนี้ได้เลือกมังคุด เนื่องจากมังคุดเป็นผลไม้ที่มีมูลค่าการส่งออกอยู่ใน 5 อันดับแรกของผลไม้ไทยไปยัง ณ ประเทศปลายทาง โดยจะทำการศึกษาการส่งออกจากผู้รวบรวมและผู้ส่งออกในไทยที่มีแหล่งผลิตมังคุดที่มากที่สุดใน 5 อันดับแรกในฐานะข้อมูลปี 2554 ได้แก่ จ.จันทบุรี (77,679 ตัน) จ.ตราด (20,896 ตัน) จ.ระยอง (12,547 ตัน) จ.นครศรีธรรมราช (8,922 ตัน) และจ.นราธิวาส (8,380 ตัน) ไปยังจุดหมายปลายทางในต่างประเทศที่รับปริมาณมังคุดจากไทยมากที่สุด 5 อันดับแรก ได้แก่ จีน (52,133.50 ตัน) ฮองกง (25,964.51 ตัน) เวียดนาม (21,647.82 ตัน) เกาหลีใต้ (154.48 ตัน) และญี่ปุ่น (140.53 ตัน) การเลือกจุดหมายปลายทางในต่างประเทศนั้นยังคงใช้หลักการวิธีการขนส่งทางเรือเป็นหลักเพื่อใช้ในการส่งออก อย่างไรก็ตามการขนส่งมังคุดไปยังประเทศลาวและกัมพูชานั้นมีปริมาณมากถึง 4,542.69 ตัน และ 4,809 ตันตามลำดับ แต่ส่วนใหญ่เป็นการขนถ่ายข้ามชายแดน ในขณะที่การขนส่งมังคุดไปสหรัฐอเมริกาที่มีปริมาณที่ 285.72 ตัน แต่เป็นการขนส่งทางอากาศทั้งหมด การวิเคราะห์เส้นทางการขนส่งของมังคุดจากแหล่งผลิตไปยังจุดหมายปลายทางในต่างประเทศในบทความวิจัยนี้จะพิจารณาในกรณีที่ผู้ส่งออกนั้นมีการบรรจุผลไม้ที่โรงบรรจุในสวนผลไม้ของตน หรือไปบรรจุที่ส่งในบริเวณใกล้กับสวนผลไม้

ในปัจจุบัน การขนส่งมังคุดจากแหล่งผลิตในภาคตะวันออกมักจะไม่ค่อยมีปัญหาเนื่องจากอยู่ใกล้กับท่าเรือ

แหลมฉบัง อย่างไรก็ตามการขนส่งจากทางภาคใต้ นั้นมีระยะทางไกลมาก ซึ่งจากการสัมภาษณ์ผู้ประกอบการขนส่ง ต้นทุนการขนส่งจากภาคใต้สูงกว่าแหล่งผลิตในภาคตะวันออกถึง 3 เท่า ดังนั้นเพื่อสนับสนุนผู้ส่งออกจากทางภาคใต้ให้มากขึ้น งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้การขนส่งต่อเนื่องหลายรูปแบบ (Multimodal Transport) โดยพิจารณาเส้นทางการขนส่งผสมผสานระหว่างทางรถบรรทุกและทางน้ำที่มีต้นทุนที่ต่ำ และอยู่ภายใต้ข้อจำกัดของระยะเวลาในการเก็บรักษาผลไม้ที่ต้องการความสดของผลไม้เป็นหลัก

3. กระบวนการวิจัย

ในขั้นตอนแรก การเก็บข้อมูลทุกมิติด้านระยะทางในแต่ละจุดตั้งต้นและจุดหมายปลายทาง และข้อมูลปฐมภูมิจากการสัมภาษณ์ผู้ส่งออกและผู้ประกอบการขนส่งด้านต้นทุน และเวลาที่ใช้ในการขนส่งมังคุดจะถูกดำเนินการในขั้นตอนถัดมา การออกแบบเส้นทางการขนส่งใหม่ที่เป็นไปได้ทั้งหมดจะถูกดำเนินการเพื่อทำการเปรียบเทียบกับเส้นทางการขนส่งในปัจจุบันซึ่งใช้การขนส่งทางรถบรรทุกและใช้บริการท่าเรือแหลมฉบังเป็นท่าเรือส่งออกเป็นหลัก ในขณะที่ท่าเรือส่งออกและท่าเรือที่ใช้ในการเปลี่ยนถ่ายสินค้าในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเพิ่มเติม ได้แก่ ท่าเรือกรุงเทพ ท่าเรือพระประแดง ท่าเรือมาบตาพุด และท่าเรือสุราษฎร์ธานี ซึ่งข้อจำกัดความลึกของท่าเทียบเรือในแต่ละท่าดังกล่าวในการรองรับขนาดเรือที่ใช้ในการเทียบท่าในงานวิจัยนี้จะถูกพิจารณา (ตารางที่ 1) โดยเฉพาะท่าเรือสุราษฎร์ธานีเป็นท่าเรือที่ถูกพิจารณาเพิ่มเติมเพื่อรองรับการให้บริการการขนส่งทางเรือจากสินค้าจากทางภาคใต้ ซึ่งในปัจจุบันท่าเรือสุราษฎร์ธานีดำเนินการโดยบริษัท SCGROUP จำกัด โดยใช้ชื่อท่าเรือ “NP MARINE” มีเรือให้บริการขนาดใหญ่สุด 182 TEU ในปัจจุบันผู้ประกอบการกำลังอยู่ช่วงของการทำแผนพัฒนาระบบการขนส่งภายในท่าเรือเพื่อรองรับตู้คอนเทนเนอร์แช่เย็น ซึ่งถ้าการปรับปรุงระบบดังกล่าวเสร็จเรียบร้อย ผู้ส่งออกและผู้ประกอบการขนส่งทางภาคใต้จะมีทางเลือกที่เพิ่มมากขึ้นในการเชื่อมต่อกับท่าเรือแหลมฉบังเพื่อการส่งออกสินค้า จุดหมายปลายทางใน

ต่างประเทศของม้งคุดที่ถูกใช้เป็นจุดอ้างอิงเพื่อใช้ในการคำนวณระยะทาง ได้แก่ ท่าเรือเซี่ยงไฮ้ (จีน) ท่าเรือฮ่องกง (ฮ่องกง) ท่าเรือดานัง (เวียดนาม) ท่าเรือปูซาน (เกาหลีใต้) และท่าเรือโยโกฮาม่า (ญี่ปุ่น) ดังแสดงในรูปที่ 1

ตารางที่ 1 ท่าเรือเปลี่ยนถ่ายและท่าเรือส่งออกที่ถูกพิจารณาเพิ่มเติมในการออกแบบเส้นทางการขนส่งใหม่

ท่าเรือเปลี่ยนถ่าย	ท่าเรือส่งออก
ท่าเรือกรุงเทพ (1,200 TEU)	ท่าเรือแหลมฉบัง (4,000 TEU)
ท่าเรือพระประแดง (1,200 TEU)	ท่าเรือกรุงเทพ (1,200 TEU)
ท่าเรือสุราษฎร์ธานี (182 TEU)	ท่าเรือพระประแดง (1,200 TEU)
	ท่าเรือมาบตาพุด (4,000 TEU)



รูปที่ 1 ตำแหน่งของท่าเรือทั้งหมดในกรณีศึกษา
เส้นทางการขนส่งที่เป็นไปได้ทั้งหมดจะถูกสร้างขึ้นมาจากจำนวนต้นทุนและเวลาที่ใช้ในการขนส่งในแต่ละเส้นทาง จากนั้นข้อมูลดังกล่าวจะถูกนำเข้าสู่วิธีการจำลองการโปรแกรมเชิงเส้น ดังต่อไปนี้

$$\text{Min } \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R \sum_{k=1}^K X_{ijr}^k C_{ijr}^k \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R \sum_{k=1}^K X_{ijr}^k \leq O_i \quad \forall i \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R \sum_{k=1}^K X_{ijr}^k \geq D_j \quad \forall j \quad (3)$$

$$X_{ijr}^k \begin{cases} \geq 0; T_{ijr}^k \leq T_r \\ = 0; T_{ijr}^k \geq T_r \end{cases} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R \sum_{k=1}^K X_{ijr}^k \begin{cases} \geq 0; \sum_{r=1}^R T_r \leq T_{Max} \\ = 0; \sum_{r=1}^R T_r \geq T_{Max} \end{cases} \quad (5)$$

$$X_{ijr}^k \leq K_{ijr} \quad \forall i, j, r, k \quad (6)$$

$$X_{ijtr}^n \geq 0 \quad \forall i, j, r, n \quad (7)$$

โดยที่

i : จุดเริ่มต้นของเส้นทางการขนส่ง

j : จุดหมายปลายทางของเส้นทางการขนส่ง

I : จุดเริ่มต้นของเส้นทางการขนส่งทั้งหมด

J : จุดหมายปลายทางของเส้นทางการขนส่งทั้งหมด

r : เส้นทางการขนส่ง r

R : ชุดของเส้นทางการขนส่งทั้งหมด

k : ขนาดของกลุ่มยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งภายในประเทศและระหว่างประเทศ

K : กลุ่มยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งภายในประเทศและระหว่างประเทศ

X_{ijr}^n : ปริมาณการขนส่งม้งคุดจากจุดเริ่มต้น i ไปยังจุดหมายปลายทางในต่างประเทศ j โดยเส้นทางการขนส่ง r โดยใช้ขนาดของกลุ่มยานพาหนะ k

C_{ijr}^n : ต้นทุนในการขนส่งม้งคุดจากจุดเริ่มต้น i ไปยังจุดหมายปลายทางในต่างประเทศ j โดยเส้นทางการขนส่ง r โดยใช้ขนาดของกลุ่มยานพาหนะ n

T_r : เวลาที่ใช้ในการขนส่งม้งคุดในเส้นทาง r

T_{Max} : เวลารวมที่ใช้ในการขนส่งม้งคุดทั้งหมด

O_i : ปริมาณของม้งคุดที่ถูกเคลื่อนย้ายจากจุด i

D_j : ปริมาณของม้งคุดที่ถูกเคลื่อนย้ายไปสู่จุด j

สมการวัตถุประสงค์ (1) มีจุดมุ่งหมายเพื่อหาเส้นทางการขนส่งที่มีต้นทุนต่ำที่สุด โดยต้นทุนค่าขนส่งเท่ากับผลรวมของปริมาณการขนส่งหรือจำนวนตู้สินค้าขาว (FEU = Forty-Foot Equivalent Unit) จาก i ไป j โดยใช้เส้นทางการขนส่ง r และกลุ่มยานพาหนะ k โดยจำนวนรอบของยานพาหนะถูกคำนวณต้นทุนไว้แล้วเพื่อให้การขนส่งม้งคุดไปสู่จุดหมายปลายทางในต่างประเทศครบจำนวน ตั้งแต่สมการที่ (2) – (7) นั้นเป็นข้อจำกัด

(Constraint) ของแบบจำลองฯ โดยที่สมการที่ 2 เป็นการกำหนดค่าของปริมาณการขนส่งมั่งคุดในแต่ละเส้นทาง r ที่ออกจากจุดเริ่มต้นเดียวกันแต่มีจุดหมายปลายทางต่างกัน ผลรวมของปริมาณการขนส่งทั้งหมดจะต้องไม่เกินกว่าปริมาณของมั่งคุดที่ถูกปล่อยจากจุดเริ่มต้น i ในทางกลับกันในสมการที่ 3 ปริมาณการขนส่งในแต่ละเส้นทางที่ออกจากจุดเริ่มต้นต่างกัน แต่ขนส่งไปที่จุดหมายปลายทางเดียวกัน ผลรวมของปริมาณการขนส่งมั่งคุดต้องไม่น้อยกว่าความต้องการของสินค้าที่จุดหมายปลายทางในประเทศ j ข้อจำกัดด้านเวลาในการเดินทางจะถูกกำหนดเพื่อให้ไม่เกิน 2 สัปดาห์เพื่อรักษาคุณภาพของมั่งคุดดังแสดงในสมการที่ 4 ในส่วนของสมการที่ 5 เป็นการกำหนดขอบเขตของระยะเวลาในการขนส่งในทุกเส้นทางต้องไม่เกินระยะเวลาสูงสุดที่กำหนดไว้ในขณะที่สมการที่ 6 แสดงปริมาณการขนส่งในแต่ละเส้นทางจะมีค่าไม่เกินความสามารถในการขนส่งสินค้าของกลุ่มยานพาหนะ และสมการที่ 7 แสดงปริมาณการขนส่งของมั่งคุดที่ถูกเลือกมาจะต้องมีค่าไม่ติดลบเสมอ

ต้นทุนที่ใช้ในการขนส่งจะขึ้นอยู่กับขนาดของเรือคอนเทนเนอร์โดยในงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลในการคำนวณจาก Aversa et. al. [9] ตู้คอนเทนเนอร์ยาวขนาด 1 FEU จะถูกใช้ในการบรรจุมั่งคุดในงานวิจัยนี้ โดย 1 FEU สามารถบรรจุน้ำหนักมั่งคุดได้ 25 ตัน สำหรับค่าธรรมเนียมผ่านเข้าท่าเรือโดยรถบรรทุกและค่าธรรมเนียมในการยกขนสินค้าซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละท่าเรือ เช่นท่าเรือแหลมฉบังมีค่าธรรมเนียมในการผ่านเข้าท่าโดยรถบรรทุกที่ร้อยละ 100 บาท ค่ายกขนสินค้าขึ้นเรือเท่ากับ 750 บาท ต่อตู้ต่อครั้ง ในขณะที่ท่าเรือกรุงเทพมีอัตราค่าธรรมเนียมในการผ่านเข้าท่าที่เท่ากับท่าเรือแหลมฉบัง แต่ค่าธรรมเนียมที่ใช้ในการยกขนสินค้าโดยเครนขึ้นเรือจะอยู่ที่ 1,360 บาทต่อตู้ต่อครั้ง ความเร็วเฉลี่ยในการขนส่งโดยรถบรรทุกจะใช้ที่ 70 กม./ชม ความเร็วของเรือเดินทะเลเฉลี่ยจะขึ้นอยู่กับขนาดของเรือที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลจาก Rodrigue [10]

4. ผลการวิจัย

จำนวนเส้นทางการขนส่งที่เป็นไปได้ทั้งหมดในการขนส่งมั่งคุดจากแหล่งผลิตทั้ง 5 แห่งในไทยไปสู่จุดหมายปลายทางในต่างประเทศทั้ง 5 ประเทศในรูปแบบคอนเทนเนอร์ยาวแช่เย็น (1 FEU) จำนวน 3,390 ตู้ จะสามารถสร้างเส้นทางได้ทั้งหมด 500 เส้นทาง โดยเส้นทางปัจจุบันที่ผู้ประกอบการและผู้ส่งออกใช้ในการส่งออกมั่งคุดคือท่าเรือแหลมฉบังซึ่งสามารถสร้างเส้นทางการขนส่งได้ทั้งหมด 25 เส้นทาง ต้นทุนรวม 29.62 ล้านบาทและเวลาในการขนส่งรวม 135 วันจากข้อสมมติฐานที่ผู้ประกอบการมีกลุ่มรถบรรทุกในการขนส่ง 50 คันที่สามารถออกดำเนินการได้พร้อมกัน จากการคำนวณเส้นทางการขนส่งที่มีต้นทุนมากที่สุดได้แก่เส้นทางการขนส่งจากจันทบุรีไปยังท่าเรือเชียงไฮ้โดยผ่านท่าเรือแหลมฉบังด้วยจำนวน 1,067 ตู้ฯ โดยมีต้นทุนการขนส่งอยู่ที่ 6.97 ล้านบาท และเวลาในการขนส่งอยู่ที่ 9.59 วัน ซึ่งจะเห็นว่าจำนวนของตู้สินค้ายิ่งเยอะต้นทุนและเวลาที่ใช้ในการขนส่งจะเยอะตามไปด้วย

ตารางที่ 2 ผลการวิจัยที่ได้จากการปรับปรุงเส้นทาง

โครงการ	จำนวน เส้นทาง	ต้นทุนรวม (ล้านบาท)	เวลารวม (วัน)
ชุดเส้นทางปัจจุบัน	25	29.62	135
ชุดเส้นทางการ ขนส่งที่เหมาะสม	9	24.43	52.65

ตารางที่ 2 แสดงผลการวิจัยที่ได้จากการปรับปรุงเส้นทางในแบบจำลองฯ ซึ่งจะเห็นได้ว่าจำนวนเส้นทางการขนส่งที่เหมาะสมลดลงเหลือ 9 เส้นทาง ต้นทุนรวมขนส่งลดลง 17.52% และเวลาในการขนส่งลดลงมากถึง 61% และเวลาในการขนส่งในแต่ละเส้นทางไม่เกิน 14 วันตามข้อจำกัดในสมการที่ 4 ของแบบจำลองฯ ซึ่งเวลาในการขนส่งที่มากที่สุดอยู่ในเส้นทางการขนส่งจากจันทบุรีไปยังท่าเรือเชียงไฮ้โดยผ่านท่าเรือมาบตาพุดด้วยจำนวน 1,391 ตู้ฯ โดยมีต้นทุนการขนส่งอยู่ที่ 8.37 ล้านบาท และเวลาในการขนส่งอยู่ที่ 9.59 วัน นอกจากนี้ท่าเรือสุราษฎร์ธานีถูกเลือกเป็นท่าเรือที่ใช้ในการเปลี่ยนถ่ายสินค้าในปริมาณการขนส่งที่ไม่มากจากจุดต้นทางในภาคใต้ โดย 3 ใน 9

เส้นทางนั้นใช้ท่าเรือสุราษฎร์ธานีในการเปลี่ยนถ่ายสินค้าเพื่อไปเปลี่ยนถ่ายสินค้าเพื่อขึ้นเรือใหญ่ที่ท่าเรือในภาคตะวันออกโดยเส้นทางแรกคือจากนาวิวาสไปยังท่าเรือช่องกงโดยใช้ท่าเรือมาบตาพุดเป็นท่าเรือส่งออกด้วยจำนวน 222 ตู้ ในขณะที่อีก 2 เส้นทางจุดต้นทางคือ นครศรีธรรมราชไปยังท่าเรือฉางและท่าเรือปูซานโดยผ่านท่าเรือมาบตาพุดทั้งคู่ด้วยจำนวน 229 และ 8 ตู้ตามลำดับ

5. สรุปผลการวิจัย

จากผลที่ได้จากการประมวลผลในแบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้นแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงเส้นทางขนส่งโดยใช้การขนส่งหลายรูปแบบสามารถช่วยในการลดต้นทุนและเวลาที่ใช้ในการขนส่งได้ 17.52% และ 61% ตามลำดับ ท่าเรือสุราษฎร์ธานีสามารถเข้ามามีบทบาทสำคัญในการเป็นทางเลือกสำหรับผู้ประกอบการขนส่งและผู้ส่งออกผลไม้ในภาคใต้ในการเชื่อมต่อระบบการขนส่งระหว่างภาคใต้และภาคตะวันออกเพื่อการส่งออกผลไม้และสินค้าอื่นๆ ที่บรรจุในตู้คอนเทนเนอร์แช่เย็น ซึ่งจะสามารถลดต้นทุนการขนส่งได้อย่างมาก ถ้าผู้บริหารระดับสูงของท่าเรือฯ สามารถพัฒนาท่าเรือในแง่ของสิ่งอำนวยความสะดวกในด้านปลั๊กไฟให้เพียงพอกับตู้ฯ และพื้นที่ภายในท่าในการวางตู้ฯ ในส่วนของแบบจำลองฯ ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการปรับปรุงเส้นทางขนส่งในปัจจุบันเพื่อลดต้นทุนการขนส่งให้แก่ผู้ประกอบการขนส่งและผู้ส่งออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อมูลตัวแปรอื่นๆ ในแบบจำลองฯ เช่น จำนวนของยานพาหนะ ความเร็วและขนาดของยานพาหนะ ฯลฯ สามารถปรับเปลี่ยนลงในแบบจำลองฯ ได้อย่างง่ายในหลากหลายโครงการ ตลอดจนการกำหนดตัวแปรปริมาณสินค้า และจำนวนของยานพาหนะที่ใช้ให้เป็นตัวแปรการตัดสินใจ ก็สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อประยุกต์ใช้ในงานวิจัยในอนาคตได้ต่อไป

6. เอกสารอ้างอิง

[1] P.Pumpuang, "Transport Planning-Cost Saving Human Development Technology Management", Bangkok, Logistics Thailand, 2014. (in Thai)

[2] F.L. Hitchcock, "The distribution of a product from several sources to numerous localities", *Journal of Mathematical Physics*, Vol.20, pp.224-230, 1941.

[3] G.Tzeng, M.Hwang, and S.Ting, "Taipower's coal logistics system : allocation planning and bulk fleet deployment", *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol.25, pp.24-46, 1995.

[4] S.C.H. Leung, Y. Wu and K.K. Lai, "An optimization model for a cross-border logistics problem: A case in Hong Kong", *Computer and Industrial Engineering*, Vol. 43, pp.393-405, 2002.

[5] A.M. Costa, "A survey on benders decomposition applied to fixed-charge network design problems", *Computer and Operations Research*, Vol.32, pp.1429-1450, 2005.

[6] A. Balakrishnan, T.L. Magnanti and R.T. Wong, "A dual-ascent procedure for large-scale uncapacitated network design", *Operations Research*, Vol.37, pp.716-740, 1989.

[7] A. Balakrishnan, T.L., "LP extreme points and cuts for the fixed-charge network design problem", *Mathematical Programming*, Vol.39, pp. 263-284, 1987.

[8] K.Holmberg and D. Yuan, "A Lagrangean approach to network design problems", *International Transactions in Operational Research*, Vol.5, pp.529-539, 1998.

[9] R.Aversa, R.C. Botter, H.E. Haralambides and H.T.V. Yoshisaki "A mixed integer programming model on the location of a hub port in the East Coast of South America", *Maritime Economics & Logistics*, Vol. 7, pp.1-18, 2005.

[10] J.P. Rodrigue, "The Geography of Transport System", 3rd ed., Routledge, New York, 2013.

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิผู้พิจารณาบทความฉบับนี้

ทางกองบรรณาธิการวิศวกรรมลาดกระบัง ขอขอบพระคุณท่านผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ความ
อนุเคราะห์ในการพิจารณาบทความด้วยความขอบคุณยิ่ง และหวังว่าคงได้รับความอนุเคราะห์จากท่าน
ด้วยดีในโอกาสต่อไป

ดร.จิตราภรณ์ วงศาางาม

ศ.ดร.อิสระชัย งามหุ

รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข

รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

รศ.ดร.ชนินทร์ บุญลักษณ์านุสรณ์

รศ.ดร.อุมา สืบบุญเรือง

ผศ.ดร.พัชรภรณ์ ฐิตินวงศ์เสวต

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ผศ.ดร.มาลี สันติคุณาภรณ์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ผศ.ดร.ชาญณรงค์ อัสวเทศานุภาพ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ผศ.ดร.พัชรินทร์ วรธนกุล

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ

ดร. อรรถพร วิเศษสินธุ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผศ.ดร.วีระเกษตร สอนผกา

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รศ.ดร.ตีบุญ เมธากุลชาติ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดร.อนุสรณ์ สืบสา

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดร. อนุรักษ์ ศรีอริยวัฒน์

ภาควิศวกรรมแหล่งน้ำ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผศ.ดร.บุญฤทธิ์ ประสาทแก้ว
ศูนย์วิจัยพลังงาน
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ฉะเชิงเทรา

รศ.ดร.นิตยา หวังวงศ์วิโรจน์
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
ธนบุรี

ดร.ดวงฤดี โฆษิตกิตติวงศ์
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
ธนบุรี

ดร. รักติพงษ์ สหมิตรมงคล
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
ธนบุรี

รศ.วีระชัย แก่นทรัพย์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
ธนบุรี

คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับบทความ

“บทความทางวิชาการ” หมายความว่า บทความที่เขียนขึ้นในลักษณะวิเคราะห์ วิจัย หรือเสนอแนวความคิดใหม่ ๆ จากพื้นฐานทางวิชาการที่ได้เรียบเรียงจากผลงานทางวิชาการของตนเอง หรือของผู้อื่น หรือเป็นบทความทางวิชาการที่เขียนขึ้นเพื่อเป็นความรู้ทั่วไปสำหรับประชาชน

“บทความวิจัย” หมายความว่า บทความที่มีลักษณะเป็นเอกสารที่มีรูปแบบของการวิจัยตามหลักวิชาการ เช่น มีการตั้งสมมติฐาน หรือมีการกำหนดปัญหาที่ชัดเจนสมเหตุสมผล โดยจะต้องระบุถึงวัตถุประสงค์ที่ชัดเจน แน่นนอน 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) เป็นคอลัมน์เดียว 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 8 หน้า 2 คอลัมน์ โดยติดต่อขอส่งได้ที่ E-mail : kmitl.eng.jnl@gmail.com ส่วนวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต บทความจะได้รับกรณการค้นกรองโดยผู้อ่านที่ทรงคุณวุฒิในสาขานั้น 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 2554 ค่าสมัคร 200 บาท | ☐ ปี 2557 ค่าสมัคร 200 บาท |
| ☐ ปี 2555 ค่าสมัคร 200 บาท | ☐ ปี 2558 ค่าสมัคร 200 บาท |
| ☐ ปี 2556 ค่าสมัคร 200 บาท | ☐ ปี 2559 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 ซอยคลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง
กรุงเทพมหานคร 10520 ที่ทำการเคาน์เตอร์บริการเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 00016
- ☐ ผ่านบัญชีออมทรัพย์ธนาคารไทยพาณิชย์ สาขาซอยเทคโนโลยีฯ เจ้าคุณทหาร
เลขที่ 1 ซอยคลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง
กรุงเทพมหานคร 10520
ชื่อบัญชี “แผนกตำราและประชาสัมพันธ์” เลขที่ 088 – 2 15272 – 2

ถ่ายสำเนาใบสั่งซื้อ และส่งเอกสารการชำระค่าสั่งซื้อมาที่ :

งานบริหารการวิจัย ส่วนสนับสนุนวิชาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซอยคลองกรุง 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 which are not exceed 8 pages with two-columns (one copy with author names, three copies without author names) of either Thai or English are to be submitted in camera ready form. The page charge from the 9th page is 500 Baht per page. 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. Choeysuwan 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

Prof. Dr. Issarachai Ngamroo

Editorial Staff

Mr.Komol 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