

“วิศวกรรมลาดกระบัง”

วิศวกรรมลาดกระบังเป็นวารสารทางวิชาการซึ่งจัดทำโดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. เป็นเอกสารเผยแพร่งานวิจัยและพัฒนาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์
2. เป็นสื่อแลกเปลี่ยนความรู้ใหม่ ๆ ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ระหว่างนักวิจัยและผู้สนใจ
3. เป็นเอกสารรวบรวมรายงานและบทความทางวิชาการที่น่าสนใจและมีคุณค่าทางวิศวกรรมศาสตร์

วาระที่ออก

ปีละ 4 ฉบับ (ทุก 3 เดือนต่อฉบับ)

นโยบาย

บทความที่จะเสนอตีพิมพ์ จะต้องเป็นบทความที่มีคุณค่าทางวิศวกรรม เช่น เป็นรายงานการวิจัยที่ผู้เขียนได้ทำการทดลอง สร้าง หรือมีส่วนกับงานโดยตรง เป็นบทความที่เสนอถึงความคิดหรือหลักการใหม่ที่เป็นไปได้และมีทฤษฎีประกอบหรือสนับสนุนอย่างเพียงพอ หรือเป็นบทความทางวิชาการที่น่าสนใจ มีประโยชน์ต่อนักศึกษาและนักวิจัย โดยผู้เขียนเป็นผู้รวบรวมและเรียบเรียงเอง

รูปแบบของบทความ

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

บทความที่น่าสนใจเสนอเพื่อตีพิมพ์ ควรประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ตามลำดับ ดังนี้

ชื่อเรื่อง	ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
ชื่อผู้เขียนและผู้ร่วมงาน	ไม่ต้องระบุคุณวุฒิหรือตำแหน่งทางวิชาการใด ๆ
สถานที่ทำงาน	ในกรณีที่ผู้เขียนหรือผู้ร่วมงานเป็นนักศึกษา ให้ใช้คณะและสถาบันที่สังกัดเป็นสถานที่ทำงาน
บทคัดย่อ	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 ส่วนวิศวกรรมลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง บทความจะได้รับการกลั่นกรองโดยผู้อ่านที่ทรงคุณวุฒิในสาขานั้น ๆ และเมื่อบทความได้รับการแก้ไข (หากมี) อย่างเหมาะสม ผู้เขียนจะต้องส่งต้นฉบับ 1 ชุด และซิดีข้อมูลบทความอีก 1 ชุด

เจ้าของ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

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 กิตติสุขกร

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.เควิด บรรเจิดพงษ์ชัย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกผาลิน

บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติ

สิรินธร ไทย-เยอรมัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า-

พระนครเหนือ

ศาสตราจารย์ ดร.อภิศักดิ์ วรพิเชฐ

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ชูชีพสกุล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.สราวุฒิ สุจิตรงจร

สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

ศาสตราจารย์ ดร.โมนัย ไกรฤกษ์

สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

ศาสตราจารย์ ดร.วัลลภ สุระคำพลธร

สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีขั้นสูง (THAIST)

สำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์

เทคโนโลยีนวัตกรรมแห่งชาติ (สวทน.)

รองศาสตราจารย์ ดร. กอบชัย เดชหาญ

สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น เพื่อค่าสภาพเจาะจงทิศทางมากที่สุด โดยระเบียบวิธีขั้นตอน แบบแมลงหวี่

Linear Array Antenna Optimization for Maximum Directivity Using FOA Method

ณัฐเศรษฐ์ หมวดทองอ่อน⁽¹⁾ ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์⁽¹⁾ สุภกิต แก้วดวงตา⁽²⁾

⁽¹⁾ ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

⁽²⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี กรุงเทพมหานคร

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยระเบียบวิธีขั้นตอนแบบแมลงหวี่ ถูกนำเสนอสำหรับการออกแบบสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นในช่องว่างอิสระ เพื่อแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของระเบียบวิธีขั้นตอนแบบแมลงหวี่ วัตถุประสงค์ของการออกแบบสายอากาศ คือการได้มาซึ่งสภาพเจาะจงทิศทางมากที่สุดของสายอากาศแถวลำดับ โดยการปรับพารามิเตอร์แอมพลิจูดและระยะห่างระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับ ผลลัพธ์ของระเบียบวิธีขั้นตอนแบบแมลงหวี่ จะถูกนำมาพิจารณาพร้อมกับผลลัพธ์ของระเบียบวิธีขั้นตอนแบบถ่ายทอดเชิงพันธุกรรม ท้ายที่สุดนี้ วิธีการหาค่าที่เหมาะสมด้วยระเบียบวิธีขั้นตอนแบบแมลงหวี่ เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพและมีความแม่นยำ สำหรับปัญหาทางไฟฟ้าขนาดใหญ่ของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นในช่องว่างอิสระ

คำสำคัญ : สายอากาศแถวลำดับ, ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง, ระเบียบวิธีขั้นตอนแบบแมลงหวี่

Abstract

In this research, the fruit fly optimization algorithm (FOA) is proposed to design linear array antenna in free space. To show the versatility of the present method, the objective of antenna design is to achieve maximum directivity for linear array antenna by controlling amplitude and spacing parameters of the array antenna. The result of the FOA is validated by comparing with results obtained using the genetic algorithm (GA). Finally, the FOA is efficient and accurate for electrically large problems of linear antenna arrays in free space.

Keywords : Array Antenna, Directivity, Fruit Fly Optimization Algorithm

1. บทนำ

ความน่าสนใจของปัญหาทางด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าขนาดใหญ่อย่างหนึ่ง คือ สายอากาศแฉวลำดับ เนื่องจากเป็นสายอากาศที่มีประโยชน์และมีการนำไปใช้งานกันอย่างกว้างขวาง ยกตัวอย่างเช่น เรดาร์ ดาราศาสตร์วิทยุ ดาวเทียม และระบบการสื่อสารแบบเซลลูลาร์ สำหรับการประยุกต์ใช้งานนั้น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉวลำดับ จะถูกกำหนดให้มีความสอดคล้องกับคุณลักษณะบางประการของสายอากาศ ได้แก่ ค่าสภาพจะงทิสทางและระดับลำคลื่นย่อยด้านข้าง [1] คุณลักษณะทั้งสองอย่างนี้จะถูกพิจารณาเพื่อให้เกิดความเหมาะสมมากที่สุดกับการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

วิธีการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบสายอากาศแฉวลำดับ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีการ คือ วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบวงแคบ และ วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบวงกว้าง [2] วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบวงแคบ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบดั้งเดิม ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับการสังเคราะห์ระดับลำคลื่นย่อยด้านข้างของสายอากาศแฉวลำดับ [3]

การหาค่าที่เหมาะสมของสายอากาศแฉวลำดับจัดว่าเป็นปัญหาแบบไม่เชิงเส้นและเป็นปัญหาที่มีค่าของคำตอบท้องถิ่นอยู่มากมาย ดังนั้นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบดั้งเดิมจึงไม่ใช่วิธีการที่มีความเหมาะสมกับปัญหาดังกล่าว เนื่องจาก วิธีการเหล่านี้มีกฎเกณฑ์ในการค้นหาคำตอบที่ตายตัว ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากต่อการคำนวณ อีกทั้งยังใช้เวลาในการคำนวณนาน โดยเฉพาะเมื่อปัญหามีขนาดใหญ่และซับซ้อนมากขึ้น

ปัญหาต่างๆ เหล่านี้ สามารถแก้ไขได้ ด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมบางอย่าง ซึ่งเป็นวิธีการที่มีแนวคิดที่แตกต่างจากเทคนิคการโปรแกรมทางด้านคณิตศาสตร์แบบดั้งเดิม นั่นคือ

วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบวงกว้าง ซึ่งวิธีการเหล่านี้ถูกเรียกว่า วิธีการแบบเมตาฮิวริสติก [4-5] โครงสร้างของวิธีการแบบเมตาฮิวริสติกนั้น มีพื้นฐานมาจากการจำลองทางธรรมชาติและเครื่องมือปัญญาประดิษฐ์ วิธีการแบบเมตาฮิวริสติก จะก่อให้เกิดกระบวนการของการค้นหาคำตอบที่มีความหลากหลาย ภายในบริเวณพื้นที่ของการค้นหาคำตอบ ดังนั้นวิธีการดังกล่าวสามารถที่จะหลีกเลี่ยงกับการค้นหาคำตอบที่ได้มาซึ่งคำตอบแบบท้องถิ่นได้

วิธีการหาคำตอบที่เกี่ยวข้องกับวิธีการแบบเมตาฮิวริสติก และขั้นตอนเชิงวิวัฒนาการรูปแบบใหม่ ซึ่งยังไม่เป็นที่นิยมกับการนำมาใช้งานร่วมกับปัญหาทางด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า นั่นคือ วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบแมลงหิว โดยวิธีการดังกล่าว มีพื้นฐานมาจากพฤติกรรมในการค้นหาอาหารของแมลงหิว ซึ่งถูกพัฒนาโดย Pan [6] เนื่องจากเป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดรูปแบบใหม่และมีความน่าสนใจ ดังนั้นระเบียบวิธีขั้นตอนแบบแมลงหิว จึงได้รับความสนใจกับการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ในช่วงปีที่ผ่านมา ข้อดีหลักๆของระเบียบวิธีขั้นตอนแบบแมลงหิว คือ เป็นวิธีการที่สามารถค้นหาคำตอบได้อย่างรวดเร็วและง่ายต่อการทำความเข้าใจ เนื่องจากโปรแกรมการใช้งานมีความสั้นมากกว่าวิธีการหาคำตอบแบบอื่นๆ

งานวิจัยนี้จะนำเสนอวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบแมลงหิว สำหรับปัญหาทางไฟฟ้าขนาดใหญ่ของสายอากาศแฉวลำดับ เพื่อที่จะศึกษาถึงประสิทธิภาพของระเบียบวิธีขั้นตอนแบบแมลงหิว การหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ขนาดของกระแสนและระยะห่างระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศแฉวลำดับ ที่มีผลทำให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ มีค่าสภาพจะงทิสทางมากที่สุด ซึ่งจะทำให้การพิจารณา และเปรียบเทียบร่วมกับผลลัพธ์จากการคำนวณเชิงเลขของระเบียบวิธีขั้นตอนแบบถ่ายทอด

เชิงพันธุกรรม ซึ่งเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพและได้รับความนิยมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ในปัจจุบัน

2. การออกแบบสายอากาศแฉวลำดับเชิงเส้น

2.1 ตัวประกอบแฉวลำดับเชิงเส้น

กำหนดให้ สายอากาศแฉวลำดับเชิงเส้นขององค์ประกอบแบบไอโซทรอปิก ถูกวางอย่างสมมาตรกับจุดกึ่งกลางของสายอากาศและระยะห่างระหว่างองค์ประกอบมีระยะที่เท่ากัน เมื่อจำนวนขององค์ประกอบเป็นจำนวนคู่ ตัวประกอบแฉวลำดับ [7] สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$AF_{2N}(\theta) = \sum_{n=1}^N I_n \cos[(2n-1)\frac{\pi d}{\lambda} \cos \theta] \quad (1a)$$

เมื่อจำนวนขององค์ประกอบมีค่าเป็นจำนวนคี่ ตัวประกอบแฉวลำดับ [7] สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$AF_{2N+1}(\theta) = \sum_{n=1}^{N+1} I_n \cos[2(n-1)\frac{\pi d}{\lambda} \cos \theta] \quad (1b)$$

เมื่อ I_n คือ สัมประสิทธิ์การกระตุนขนาดของกระแส $2N$ และ $2N + 1$ คือ จำนวนคู่และจำนวนคี่ขององค์ประกอบ d คือ ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ λ คือ ความยาวคลื่น และ θ คือ มุมระหว่างทิศทางสนามไปยังแนวแกน z

2.2 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง

สำหรับปัญหาของการออกแบบสายอากาศ คุณลักษณะของสายอากาศที่มีความสำคัญ ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นตัวกำหนดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ได้แก่ ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มีค่ามากที่สุด ค่าอัตราขยายที่สูง ระดับของค่าคลื่นย้อนด้านข้างที่ต่ำ และการกำหนดคุณลักษณะของสายอากาศให้มีความเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งาน การออกแบบในงานวิจัยนี้ จะทำการพิจารณาโครงสร้างของ

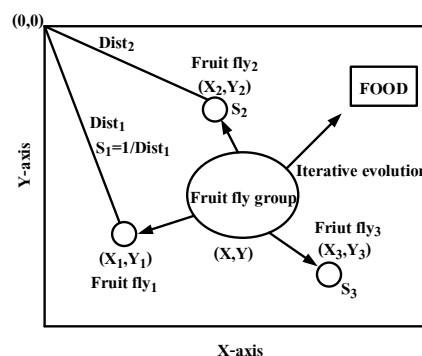
สายอากาศแฉวลำดับร่วมกับค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มีค่ามากที่สุด [7]

ดังนั้นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการออกแบบสายอากาศสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$Directivity(D_0) = \frac{2 |AF(\theta)|_{\max}^2}{\int_0^\pi |AF(\theta)|^2 \sin \theta d\theta} \quad (2)$$

3. วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยระเบียบวิธีขั้นตอนแบบแมลงหิว

ระเบียบวิธีขั้นตอนแบบแมลงหิว ถูกพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 2011 โดย Pan [6] วิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยมีพื้นฐานมาจากพฤติกรรมในการค้นหาแหล่งอาหารของแมลงหิว ซึ่งโดยปกติแล้วแมลงหิวจะเป็นสัตว์ที่มีประสาทสัมผัสในการมองเห็นและรับกลิ่นที่ดีมาก ดังนั้นกระบวนการหลักๆ ในการค้นหาแหล่งอาหารของแมลงหิวจะมีกระบวนการที่สำคัญอยู่ 2 กระบวนการด้วยกัน นั่นคือ กระบวนการแรกแมลงหิวจะใช้ประสาทสัมผัสในการรับกลิ่นของแหล่งอาหาร จากนั้นจะทำการบินไปยังบริเวณที่ใกล้เคียงกับแหล่งอาหาร และ กระบวนการที่สองจะเป็นการใช้ประสาทสัมผัสในการมองเห็น โดยจะบินไปยังแหล่งอาหารเพื่อทำการค้นหาอาหาร



รูปที่ 1. กระบวนการค้นหาอาหารของกลุ่มแมลงหิว [6]

โดยปกติแล้ว ขั้นตอนการใช้งานของระเบียบวิธีขั้นตอนแบบแมลงหิวร่วมกับปัญหาของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจะประกอบด้วย

ขั้นตอนแรก คือ การกำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้น ซึ่งประกอบด้วย

จำนวนรอบของการทำซ้ำมากที่สุด ($\max_{gen}$)

ขนาดของกลุ่มประชากร ($size_{pop}$)

ตำแหน่งของแมลงหิว $Random(x_{axis}, y_{axis})$

ขั้นตอนที่ 2 คือ การสุ่มทิศทางและระยะทางของแมลงหิวในการดมกลิ่น สำหรับค้นหาแหล่งอาหาร

$$X_i = x_{axis} + Random\ Value$$

$$Y_i = y_{axis} + Random\ Value$$

$$Dist_i = \sqrt{X^2 + Y^2} ; S_i = 1 / Dist_i$$

ขั้นตอนที่ 3 คือ การแทนค่าความหนาแน่นของกลิ่น ลงไปในฟังก์ชันความหนาแน่นของกลิ่น

$$Smell_i = objective\ function(S_i)$$

ขั้นตอนที่ 4 คือ การตรวจสอบตำแหน่งของแมลงหิวร่วมกับความหนาแน่นของกลิ่นที่มีค่ามากที่สุด

$$[Smellbest\ bestindex] = \max(smell)$$

ขั้นตอนที่ 5 คือ การเก็บค่า โดยจะทำการบันทึกค่าความหนาแน่นของกลิ่นและตำแหน่งที่ดีที่สุดไว้

$$Smellbest = bestsmell$$

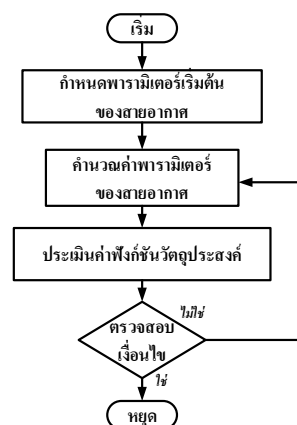
$$x_{axis} = x(bestindex); y_{axis} = y(bestindex)$$

ขั้นตอนที่ 6 คือ การทำซ้ำ โดยจะเข้าสู่กระบวนการทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2 ถึง 5 ในกรณีที่ความหนาแน่นของกลิ่นเป็นค่าที่

ค้อยกว่าค่าในรอบก่อนหน้านี้ กระบวนการทำงานต่างๆ จะหยุดลง

4. กระบวนการออกแบบสายอากาศด้วยระเบียบวิธีขั้นตอนแบบแมลงหิว

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงกระบวนการออกแบบสายอากาศแถวลำดับในช่องว่างอิสระ ด้วยระเบียบวิธีขั้นตอนแบบแมลงหิว แผนภาพการทำงานของวิธีการออกแบบสายอากาศด้วยระเบียบวิธีขั้นตอนแบบแมลงหิว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2

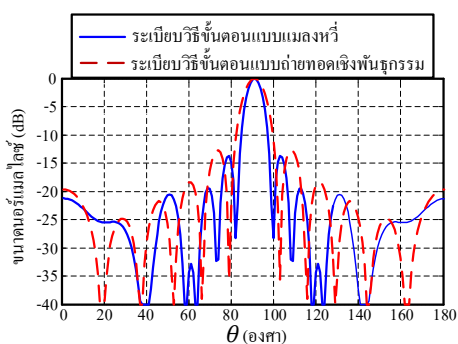


รูปที่ 2 โฟลชาร์ตของกระบวนการออกแบบสายอากาศ ด้วยระเบียบวิธีขั้นตอนแบบแมลงหิว

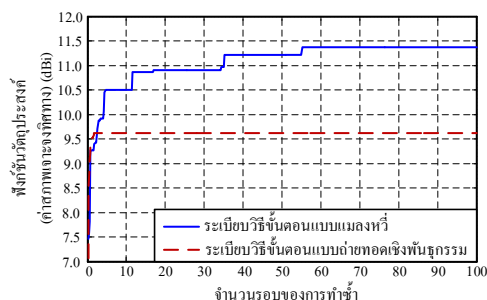
กระบวนการออกแบบเริ่มจาก การกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น ซึ่งจะถูกดำเนินการในขั้นตอนที่ 1 และ 2 ของระเบียบวิธีขั้นตอนแบบแมลงหิว จากนั้นทำการคำนวณพารามิเตอร์ของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น ด้วยขั้นตอนที่ 3 และ 4 ของระเบียบวิธีขั้นตอนแบบแมลงหิว การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการออกแบบสายอากาศ (ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มีค่ามากที่สุด) จะถูกดำเนินการในขั้นตอนที่ 5 และในขั้นตอนสุดท้ายของการออกแบบสายอากาศนั้นคือ กระบวนการทำซ้ำ ซึ่งจะดำเนินการในขั้นตอนที่ 6 ของระเบียบวิธีขั้นตอนแบบแมลงหิว

5. ผลลัพธ์ของการคำนวณเชิงเลข

เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอ สายอากาศแฉวลำดับเชิงเส้นจำนวน 10 องค์ประกอบกับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์ขนาดของกระแสและระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ ที่มีผลทำให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มีค่ามากที่สุดจะถูกพิจารณา แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉวลำดับเชิงเส้นจากระเบียบวิธีขั้นตอนแบบแมลงหวี่ จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับระเบียบวิธีขั้นตอนแบบถ่ายทอดเชิงพันธุกรรม ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉวลำดับเชิงเส้นจำนวน 10 องค์ประกอบ ด้วยระเบียบวิธีขั้นตอนแบบแมลงหวี่และระเบียบวิธีขั้นตอนแบบถ่ายทอดเชิงพันธุกรรม



รูปที่ 4 การลู่เข้าของคำตอบของสายอากาศแฉวลำดับเชิงเส้นด้วยระเบียบวิธีขั้นตอนแบบแมลงหวี่และระเบียบวิธีขั้นตอนแบบถ่ายทอดเชิงพันธุกรรม

รูปที่ 3 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉวลำดับเชิงเส้น ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นว่า ความกว้างลำคลื่นจากการคำนวณด้วยวิธีการทั้งสอง มีความแตกต่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความกว้างลำคลื่นของระเบียบวิธีขั้นตอนแบบแมลงหวี่ จะมีค่าน้อยกว่าจากระเบียบวิธีขั้นตอนแบบถ่ายทอดเชิงพันธุกรรม คุณลักษณะของสายอากาศที่มีความสำคัญและเป็นวัตถุประสงค์หลัก สำหรับการออกแบบ คือ ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง ซึ่งคุณลักษณะของสายอากาศดังกล่าวจะมีความสัมพันธ์กับความกว้างลำคลื่น กล่าวคือ ความกว้างลำคลื่นที่แคบจะมีผลทำให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางมีค่ามาก ซึ่งจากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่า ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของระเบียบวิธีขั้นตอนแบบแมลงหวี่ มีค่ามากกว่าระเบียบวิธีขั้นตอนแบบถ่ายทอดเชิงพันธุกรรม

การลู่เข้าของคำตอบของสายอากาศแฉวลำดับเชิงเส้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4 ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นว่า การลู่เข้าของคำตอบด้วยระเบียบวิธีขั้นตอนแบบแมลงหวี่ มีค่าที่แม่นยำกว่าระเบียบวิธีขั้นตอนแบบถ่ายทอดเชิงพันธุกรรม กล่าวคือ การลู่เข้าของคำตอบด้วยระเบียบวิธีขั้นตอนแบบแมลงหวี่ จะเกิดการลู่เข้าตั้งแต่รอบการทำงานที่ 10 ถึง 35 จากนั้นการลู่เข้าจะมีค่าที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งเกิดการลู่เข้าของคำตอบที่เหมาะสม สำหรับระเบียบวิธีขั้นตอนแบบถ่ายทอดเชิงพันธุกรรม การลู่เข้าของคำตอบจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่รอบแรกของการทำงาน ซึ่งตรงจุดนี้แสดงให้เห็นถึงข้อดีและข้อบกพร่องของระเบียบวิธีขั้นตอนแบบถ่ายทอดเชิงพันธุกรรม ได้อย่างชัดเจน กล่าวคือ วิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการที่สามารถค้นหาคำตอบได้อย่างรวดเร็ว แต่คำตอบที่ได้อาจจะไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด เนื่องจากขาดความหลากหลายของจำนวนประชากร ซึ่งเป็นข้อเสียที่พบได้บ่อยของระเบียบวิธีขั้นตอนแบบถ่ายทอดเชิงพันธุกรรม ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบสายอากาศสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์และคุณลักษณะของสายอากาศที่เหมาะสมของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นจำนวน 10 องค์ประกอบ โดยใช้ระเบียบวิธีขั้นตอนแบบแมลงหิว และระเบียบวิธีขั้นตอนแบบถ่ายทอดเชิงพันธุกรรม

พารามิเตอร์	ระเบียบวิธีขั้นตอนแบบแมลงหิว	ระเบียบวิธีขั้นตอนแบบถ่ายทอดเชิงพันธุกรรม
I_1, d_1	0.5779, 0.1754 λ	1.0432, 0.4826 λ
I_2, d_2	0.4960, 2.1571 λ	1.5092, 0.3889 λ
I_3, d_3	1, 0.6923 λ	1.9031, 0.4891 λ
I_4, d_4	0.9017, 0.2581 λ	1.3179, 0.4960 λ
I_5, d_5	0.8407, 0.5622 λ	1.3455, 0.4920 λ
HPBW (deg)	7.56	10.60
D_0 (dBi)	11.3746	9.5367

6. บทสรุป

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยระเบียบวิธีขั้นตอนแบบแมลงหิว สามารถนำมาใช้งาน ได้อย่างมีประสิทธิภาพกับการออกแบบสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นในช่องว่างอิสระ การศึกษาในงานวิจัยนี้ จะทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของขนาดของกระแสและระยะห่างระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น ที่มีผลทำให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางมีค่ามากที่สุด เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถของระเบียบวิธีขั้นตอนแบบแมลงหิว ผลลัพธ์จากการคำนวณเชิงเลขที่มีความเหมาะสมของคุณลักษณะของสายอากาศจะถูกนำมาพิจารณาพร้อมกับระเบียบวิธีขั้นตอนแบบถ่ายทอดเชิงพันธุกรรม ในฐานะที่เป็นขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการ ระเบียบวิธีขั้นตอนแบบแมลงหิว มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เช่นเดียวกับวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบอื่นๆ เนื่องจากมีความแม่นยำ และรวดเร็ว ในการค้นหาคำตอบ อีกทั้งยังมีความง่ายต่อการนำไปใช้งาน เนื่องจากมีกระบวนการทำงาน

ทางด้านคณิตศาสตร์ที่ไม่ซับซ้อน ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับผู้เริ่มต้นศึกษา

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก สัญญาเลขที่ PHD/0331/2551

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. A. Panduro, D. H. Covarubias, C. A. Brizuela, and F. R. Marante, "A multi-objective approach in the linear antenna array design," AEÜ. Int. J. Electron. Common, vol. 59, pp. 205-212, 2005.
- [2] S. S. Rao, Engineering optimization, John Wiley and Son, New York, NY, USA, 3rd edition, 1996.
- [3] T. J. Peters, "A conjugate gradient-based algorithm to minimize the sidelobe level of planar array with element failures," IEEE Transactions on Antenna and Propagation, vol. 45, pp. 1497-1504, 1991.
- [4] D. Marciano, and F. Duran, "Synthesis of antenna arrays using genetic algorithm," IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 42, pp. 12-20, 2000.
- [5] O. P. Acharya, A. Patnaik, S. N. Sinha, "Null steering in failed antenna arrays," Applied Computational Intelligence and Soft Computing, vol. 2011, pp. 1-9, 2011.
- [6] W.-T. Pan, "A new fruit fly optimization algorithm: taking the financial distress model as an example," Knowledge-Based System, vol. 26, pp. 69-74, 2012.
- [7] C. A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design, John Wiley and Son, New York, NY, USA, 2nd edition, 1997.

วงจรจำลองอุปกรณ์ Memristor โดยใช้วงจร OTA

A Memristor Emulator Circuit Using OTAs

ณัฐกร บุญตัน มนตรี คำเงิน

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรจำลอง memristor โดยใช้วงจรออปเปอเรชันแนลทรานส์คอนดักแตนซ์แอมพลิไฟเออร์เป็นวงจรพื้นฐาน วงจรจำลองจะเลียนแบบคุณสมบัติของ memristor ที่สร้างจาก titanium dioxide โดยวงจรจำลองที่นำเสนอสามารถสร้างได้ด้วยอุปกรณ์ไอซีที่มีขายอยู่ทั่วไป ดังนั้นฮาร์ดแวร์ของวงจรจำลองที่นำเสนอจึงสามารถสร้างได้ด้วยอุปกรณ์ที่วางขายอยู่ตามท้องตลาด วงจรที่นำเสนอสามารถจำลองด้วยคอมพิวเตอร์และทดลองจริง ซึ่งสามารถใช้เป็นอุปกรณ์ช่วยสอนและเป็นอุปกรณ์ที่สามารถประยุกต์ใช้งานจริง ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE และผลการทดลองสามารถยืนยันขั้นตอนพฤติกรรมของวงจรจำลอง memristor ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี

คำสำคัญ : วงจรจำลอง memresistor วงจรออปเปอเรชันแนลทรานส์คอนดักแตนซ์แอมพลิไฟเออร์ อุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้น วงจรสายพานกระแสชนิดอินพุตแตกต่างที่สามารถปรับอัตราขยายกระแสได้

Abstract

This paper proposes a memristor emulator circuit based on operational transconductance amplifiers. This emulator circuit is imitated the behavior of a titanium dioxide memristor model using commercial available integrated circuit. Thus, the hardware of proposed emulator circuit can be built using common devices that seek in the market. Also, it can be used in both simulations and experiments which can be used as a teaching aid and for real circuit applications. PSPICE simulation and experimental results are given as agree well with theory.

Keywords : memristor emulator, operational transconductance amplifier (OTA), nonlinear device, electronically tunable differential difference current conveyor (EDDCC)

1. บทนำ

ในปี 2008 ทีมนักวิจัยของห้องทดลอง Hewlett-Packard (HP) ได้ประสบความสำเร็จในการสร้างอุปกรณ์ memristor ที่สร้างจากไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) [1] โครงสร้างทางฟิสิกส์ของ memristor ที่สร้างจากไทเทเนียมไดออกไซด์จะสร้างจากแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์

ขนาดบางที่ประกอบด้วยด้านหนึ่งได้เป็นส่วนอีกด้านไม่มีการได้ซึ่งเป็นอุปกรณ์โซลิตสเทปในระดับนาโนเมตร memristor เป็นอุปกรณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นโดยมีความสัมพันธ์ของประจุและฟลักซ์ในตัวมันที่ไม่เป็นเชิงเส้น คุณสมบัติพิเศษของอุปกรณ์ชนิดนี้คือค่าความต้านทานในตัวมันจะเปลี่ยนแปลงโดยขึ้นอยู่กับการทำงาน

ที่ผ่านมาของตัวมัน การจดจำค่าความต้านทานได้ของอุปกรณ์ชนิดนี้จึงมีชื่อเรียกว่า memristor ซึ่งถูกนิยามโดย Leon Chua [2] ที่ได้นำเสนอในปี 1971 แต่ในขณะนั้นยังเป็นทีที่คลุมเครือของเหล่านักวิจัยตลอดมา จนกระทั่งกลุ่มนักวิจัยจากห้องทดลอง HP ได้ประสบความสำเร็จในการสร้างอุปกรณ์นี้ขึ้นมาจึงได้มีการนำอุปกรณ์ memristor มาประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย ตัวอย่างเช่น [3]-[5] แต่ทุกวันนี้เป็นที่น่าเสียดายที่ memristor ยังไม่มีการวางจำหน่ายในท้องตลาดอย่างเป็นทางการ แต่การศึกษาพฤติกรรมของ memristor เป็นเรื่องที่สำคัญยิ่งเนื่องจากมีการคาดการณ์กันว่า memristor จะเข้ามามีบทบาทกับเทคโนโลยีในอนาคตเป็นอย่างมาก เพื่อศึกษาถึงการทำงานของ memristor จึงมีการนำเสนอแบบจำลอง memristor ที่เลียนแบบพฤติกรรมของ memristor แบบ TiO_2 โดยเป็นแบบจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม SPICE หรือ PSPICE ใน [6]-[8] ถึงแม้ว่าแบบจำลองเหล่านั้นจะสามารถจำลองพฤติกรรมของ memristor ได้ดี แต่แบบจำลองเหล่านั้นยังมีข้อจำกัดคือไม่มีการนำเอาค่าพารามิเตอร์แฝงในตัว memristor มาคิดคำนวณด้วย ดังนั้นจึงเป็นแบบจำลอง memristor ในแบบอุดมคติเท่านั้น เพื่อศึกษาแบบจำลอง memristor แบบเสมือนจริงจึงมีการนำเสนอแบบจำลอง memristor ที่สร้างด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไว้ใน [9]-[11] แต่อย่างไรก็ตามโครงสร้างของวงจรที่นำเสนอบางวงจรจำลองมีความยุ่งยากซับซ้อน อีกทั้งยังมีข้อจำกัดเมื่อต้องเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ในแบบขนานหรืออนุกรม เมื่อในเร็ว ๆ นี้ได้มีการนำเสนอวงจรจำลอง memristor ที่ออกแบบโดยเทคโนโลยีซิมูเลชัน [12]-[13] เนื่องจากเป็นวงจรที่สร้างจากซิมูเลชัน ดังนั้นเมื่อต้องการศึกษาวงจรผ่านการทดลองหรือต้องการผลการทดลองจริง วงจร memristor ที่สร้างจากซิมูเลชันจะต้องนำไปสร้างเป็นวงจรรวมซึ่งอาจจะทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง ด้วยเหตุนี้บทความใน [12]-[13] จึงนำเสนอเพียงผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เท่านั้นโดยปราศจากการทดลองบนอุปกรณ์จริง

ดังนั้นบทความนี้จึงนำเสนอวงจรจำลอง memristor ที่สร้างได้จากไอซีที่วางจำหน่ายในท้องตลาด อุปกรณ์ที่ถูก

นำมาใช้คือวงจร OTA โดยจะถูกนำมาออกแบบสร้างเป็นวงจรสายพานกระแสชนิดอินพุตแตกต่างที่สามารถปรับอัตราขยายกระแสได้โดยจะเรียกว่าวงจร EDDCC และวงจร EDDCC นี้จะถูกนำมาสร้างเป็นวงจรจำลอง memristor ดังนั้นวงจรที่นำเสนอจึงสามารถสร้างได้จากอุปกรณ์จริง นอกจากนี้ยังสามารถจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ได้อีกด้วย ซึ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับการเรียนการสอนและประยุกต์ใช้งานจริง

2. วงจรจำลอง memristor

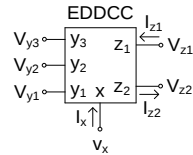
สัญลักษณ์วงจร EDDCC แสดงได้ดังรูปที่ 1 คุณสมบัติอินพุตและเอาต์พุตของวงจร EDDCC ในทางอุดมคติสามารถแสดงได้คือ

$$\begin{pmatrix} V_x \\ I_{y1} \\ I_{y2} \\ I_{y3} \\ I_{z1} \\ I_{z2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_1 \\ 0 & 0 & 0 & -k_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{y1} \\ V_{y2} \\ V_{y3} \\ I_x \end{pmatrix} \quad (1)$$

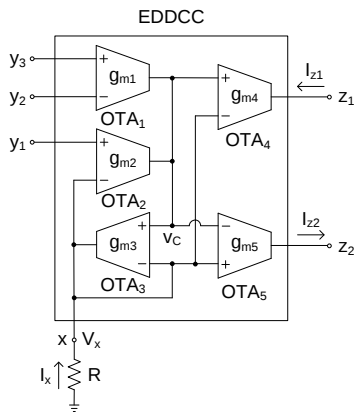
วงจร EDDCC ที่สร้างจากวงจร OTA แสดงได้รูปที่ 2 โดยมีหลักการพื้นฐานการออกแบบมาจากบทความใน [14] ความสัมพันธ์ระหว่าง V_x และ V_{y1} V_{y2} V_{y3} สามารถเขียนได้เป็น

$$V_x = \frac{(g_{m2}g_{m3}r_{in}R)V_{y1} - (g_{m1}g_{m3}r_{in}R)V_{y2} + (g_{m1}g_{m3}r_{in}R)V_{y3}}{1 + g_{m3}R + g_{m2}g_{m3}r_{in}R} \quad (2)$$

เมื่อ g_{mi} คือค่าความนำของ OTA ตัวที่ i R คือตัวต้านทานที่กำหนด และ r_{in} คือความต้านทานขนาดเล็กทางอินพุตของ OTA_3 ($r_{in} = 130 \text{ k}\Omega$ [14]) จากสมการที่ (2) สมมติว่า $g_{m2}g_{m3}r_{in}R \gg g_{m3}R \gg 1$ ความสัมพันธ์แรงดันของ EDDCC มีค่าเป็น $V_x \approx V_{y1} - V_{y2} + V_{y3}$ จากรูปที่ 2 I_x มีค่าเท่ากับกระแสเอาต์พุตของ OTA_3 ซึ่งกำหนดได้คือ $I_x = g_{m3}(V_C - V_x)$ หรือสลับข้างได้เป็น $V_C - V_x = I_x/g_{m3}$ ในขณะที่กระแส I_{z1} และ I_{z2} สามารถกำหนดได้คือ $I_{z1} = g_{m4}(V_C - V_x)$ และ $I_{z2} = g_{m5}(V_x - V_C)$ เมื่อแทน $V_C - V_x = I_x/g_{m4}$ และ $V_C - V_x = -I_{z2}/g_{m5}$ ลงใน $V_C - V_x = I_x/g_{m3}$ กระแส I_{z1} และ I_{z2} สามารถแสดงได้คือ



รูปที่ 1 สัญลักษณ์วงจร EDDCC



รูปที่ 2 วงจร EDDCC สร้างจากวงจร OTA

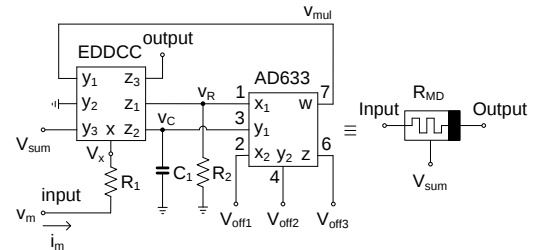
$$I_{z1} = \left(\frac{g_{m4}}{g_{m3}} \right) I_x = k_1 I_x \quad (3)$$

$$I_{z2} = \frac{g_{m5}}{g_{m3}} I_x = -k_2 I_x \quad (4)$$

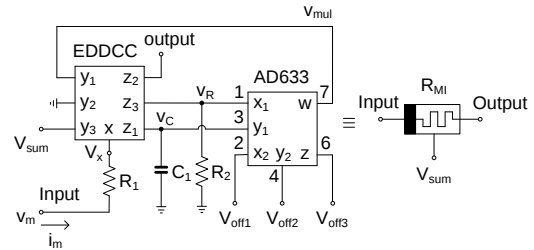
เมื่อ k_1 และ k_2 คืออัตราขยายกระแสของวงจร EDDCC ซึ่งควบคุมได้โดย g_{m4} และ g_{m5} จะเห็นได้ว่าค่า k_1 และ k_2 สามารถควบคุมได้อิสระจากกัน วงจร EDDCC แบบหลายเอาต์พุตสามารถทำได้โดยต่อวงจร OTA ขนานเข้าไปทางเอาต์พุตตามชนิดเอาต์พุตที่ต้องการ จาก memristor ที่สร้างโดยนักวิจัยจากห้องทดลอง HP [1] ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเขียนได้คือ

$$v(t) = \left[R_{ON} \frac{W(t)}{D} + R_{OFF} \left(1 - \frac{W(t)}{D} \right) \right] i(t) \quad (5)$$

เมื่อ D คือความหนาทั้งหมดของ TiO_2 ที่นำมาประกบกันทั้งสองส่วน และ W คือความหนาของบริเวณที่แผ่น TiO_2 ที่ถูกได้ป โดย R_{ON} และ R_{OFF} คือความต้านทานที่บริเวณส่วนที่ได้ปและไม่ได้ปตามลำดับ จากสมการที่ (5) จะเห็นได้ว่า memristor ประกอบด้วยความต้านทานที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งในบทความนี้จะเลียนแบบพฤติกรรม memristor ที่สร้างจาก TiO_2 ของทีมนักวิจัยจากห้องทดลอง HP นี้



รูปที่ 3 วงจรจำลอง memristor แบบ decremental



รูปที่ 4 วงจรจำลอง memristor แบบ incremental

วงจรวงจรจำลอง memristor ที่นำเสนอตามรูปที่ 3 และ 4 ซึ่งประกอบด้วยวงจร EDDCC หนึ่งวงจร ตัวต้านทานทางสองตัว ตัวเก็บประจุหนึ่งตัว และวงจรคูณสัญญาณหนึ่งวงจร วงจรที่นำเสนอใช้หลักการออกแบบวงจรมาจาก [9] และ [12] วงจรจำลอง memristor แบบ decremental ในรูปที่ 3 หมายความว่าความต้านทานของ memristor มีค่าเท่ากับความต้านทานที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาถูกหักล้างด้วยความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ส่วนวงจรจำลอง memristor แบบ incremental ในรูปที่ 4 หมายความว่าความต้านทานของ memristor มีค่าเท่ากับ ความต้านทานที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาถูกเพิ่มค่าด้วยความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา รูปที่ 3 ขั้ว Z_3 จะมีคุณสมบัติเหมือนขั้ว Z_2 และรูปที่ 4 ขั้ว Z_3 จะมีคุณสมบัติเหมือนขั้ว Z_1 เมื่อใช้การวิเคราะห์วงจรแบบโนดจะสามารถแสดงสมการของวงจรนี้ได้ดัง

$$v_m = i_m R_1 + v_x \quad (6)$$

แรงดัน v_c และ v_R สามารถแสดงได้ดัง

$$v_c = \frac{k_1}{R_1 C_1} \int_0^t v_m () \quad (7)$$

$$V_R = -k_1 R_2 i_m \quad (8)$$

จากคุณสมบัติของวงจรคูณสัญญาณเบอร์ AD633J แรงดัน v_{mul} สามารถแสดงได้คือ

$$v_{mul} = -d_i \frac{k_1 k_2 R_2}{10 R_1 C_1} \int_0^t v_m(\cdot) dt \quad (9)$$

จากคุณสมบัติของ EDDCC คือ $V_x = V_{y1} - V_{y2} + V_{y3}$ สมการที่ (6) สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$v_m = i_m R_1 + d_i \left(i_m \frac{k_1 k_2 R_2}{10 R_1 C_1} \int_0^t v_m(\cdot) dt \right) + v_{sum} \quad (10)$$

จากสมการที่ (10) เมื่อกำหนดให้ v_{sum} มีค่าเป็นศูนย์และ พลิกซ์ $\phi_m(t)$ เป็นความสัมพันธ์ของแรงดันที่แสดงได้ คือ $\phi_m(t) = \int_0^t v_m(\cdot) dt$ สมการที่ (10) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{v_m}{i_m} = R_1 - \left(\frac{k_1 k_2 R_2}{10 R_2 C_1} \phi_m(t) \right) = M(\phi_m(t)) \quad (11)$$

เมื่อ $M(\phi_m(t))$ คือค่าความต้านทานของ memristor จะเห็นได้ว่า k_1 และ k_2 สามารถใช้ชดเชยอัตราการลดทอน 1/10 ที่เกิดจากวงจรคูณสัญญาณได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ชดเชยผลกระทบอันเกิดจากความถี่ซึ่งส่งผลต่อพฤติกรรม pinched hysteresis loop ของ memristor ได้อีกด้วย จากรูปที่ 3 และ 4 แรงดันไบอัส V_{off1} , V_{off2} และ V_{off3} คือแรงดัน DC ที่ใช้ในการปรับปรุงพฤติกรรม pinched hysteresis loop ของ memristor ในกรณีคุณสมบัติผิดเพี้ยนไป ถ้ากำหนดให้ $V_m(t) = V_p \sin(\omega t)$ เป็นอินพุตของวงจรในรูปที่ 3 เมื่อ $\omega = 2\pi f$ และ V_p คือขนาดของสัญญาณอินพุต ดังนั้น $\phi_m(t) = -(V_p/\omega) \cos(\omega t) = (V_p/\omega) \cos(\omega t - \pi)$ เมื่อแทนค่า $\phi_m(t)$ ลงในสมการที่ (11) จะได้

$$M(\phi_m(t)) = R_1 - \left(\frac{k_1 k_2 R_2}{10 R_2 C_1} \cos(\cdot) \right) \quad (12)$$

จากสมการที่ (12) สามารถพิสูจน์ได้ว่าค่าความต้านทานของวงจร memristor นี้ประกอบด้วยส่วนที่เป็นค่าความต้านทานที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและส่วนที่เป็นค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ในกรณีที่สัญญาณอินพุตมีความถี่เพิ่มสูงขึ้น จะทำให้ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงตามเวลามีค่าลดลง ซึ่งหมายความว่าพฤติกรรม pinched hysteresis loop จะเล็กลงเมื่อที่ค่าความถี่สูงขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการชดเชยด้วยอัตราการขยาย k_1 และ k_2 ตามค่าความถี่ที่เพิ่มมากขึ้นเพื่อให้มาซึ่งพฤติกรรม pinched hysteresis loop ตามต้องการ

3. การจำลองและการทดลอง

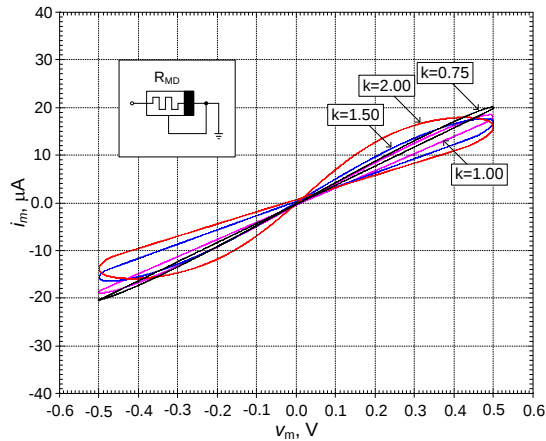
เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมทางด้านความถี่ของวงจรจำลองที่นำเสนอ จึงได้มีการทดลองเพื่อเลียนแบบพฤติกรรมของวงจรจำลองนี้ผ่านโปรแกรม PSPICE และทดลองโดยใช้อุปกรณ์จริงที่หาได้ในท้องตลาดซึ่งประกอบไปด้วยไอซี LM13600 ซึ่งเป็นวงจร OTA โดยจะนำมาใช้งานสร้างเป็นวงจร EDDCC ตามรูปที่ 2 โดยกระแสไบอัสของ OTA₁ ถึง OTA₃ จะถูกไบอัสด้วยกระแส $I_{abc} = 57.88 \mu A$ (ใช้ตัวต้านทานที่ 150 kΩ) ในขณะที่กระแสไบอัสของ OTA ตัวอื่นๆ จะเปลี่ยนแปลงตามค่าอัตราการขยาย วงจรใช้แหล่งจ่ายแรงดัน $\pm 10 V$ พารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองวงจร EDDCC แสดงได้ดังตารางที่ 1 วงจรในรูปที่ 3 จะถูกจำลองโดยกำหนดค่า $R_1 = 15 k\Omega$, $R_2 = 15 k\Omega$ และ $C_1 = 1 nF$ แรงดัน $V_{off1} = 26 mV$, $V_{off2} = 0 V$ และ $V_{off3} = -50 mV$ รูปที่ 5 แสดงผลการจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง $v_m(t)$ และ $i_m(t)$ ที่ k ค่าต่างๆ ($k=k_1=k_2$) เมื่อป้อนความถี่ 1 kHz ขนาด $0.5 V_{(peak)}$ รูปที่ 6 แสดงผลการจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง $v_m(t)$ และ $i_m(t)$ ของวงจรที่ความถี่ค่าต่างๆ เมื่อกำหนดให้ $k_1=k_2=1$ และขนาดสัญญาณ $0.5 V_{(peak)}$

ตารางที่ 1 ค่าจากการจำลองวงจร EDDCC ในรูปที่ 2

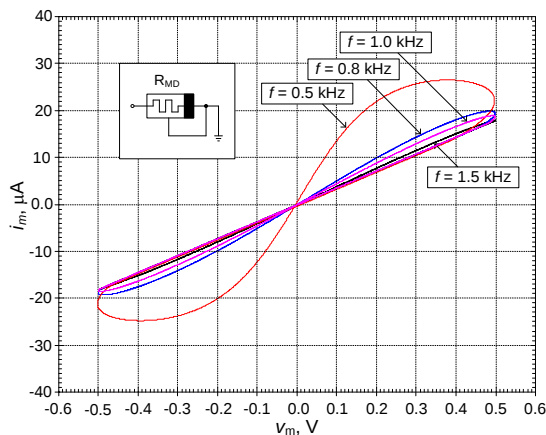
พารามิเตอร์	ค่า
แหล่งจ่ายแรงดัน	$\pm 10 V$
OTA	LM13600N
กระแสไบอัส (I_{abc})	$57.88 \mu A$
V_x/V_{y1} (ไม่ต่อโหลด)	-0.6 V to 0.9 V
V_x/V_{y2} (ไม่ต่อโหลด)	-0.1 V to 0.1 V
V_x/V_{y3} (ไม่ต่อโหลด)	-0.1 V to 0.1 V
DC current range	-60 μA to 60 μA
-3 dB bandwidth (V_x/V_{y1})	7.3 MHz
-3 dB bandwidth (I_x/I_x)	11 MHz
$R_{y1} : C_{y1}$	185 kΩ; 8.4 pF
$R_x : L_x$	17 Ω; 24 μH
$R_{y2} : C_{y2}$	22 kΩ; 6.12 pF

วงจรในรูปที่ 3 จะถูกนำมาต่อเป็นวงจรด้วยอุปกรณ์จริง โดยใช้ค่าอุปกรณ์ต่างๆ แหล่งจ่ายแรงดันและกระแส

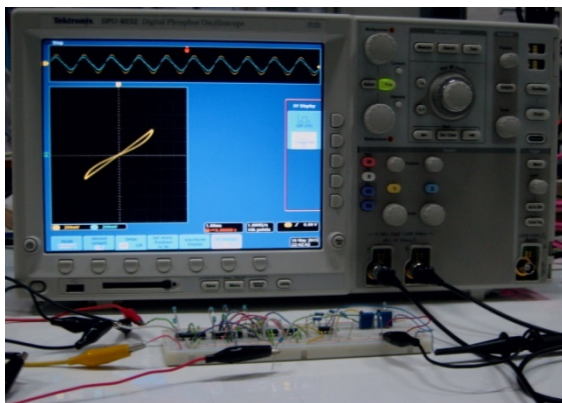
ค่าเท่ากับค่าที่ใช้ในการจำลองการทำงาน การเตรียมการทดลองแสดงดังรูปที่ 7 จากรูปที่ 3 กระแส i_m จะไหลผ่าน R_1 ดังนั้นพฤติกรรม pinched hysteresis loop ของวงจรจำลอง memristor ที่นำเสนอสามารถวัดได้จากแรงดัน v_m และแรงดันตกคร่อม R_1 ($v_m - v_x$)



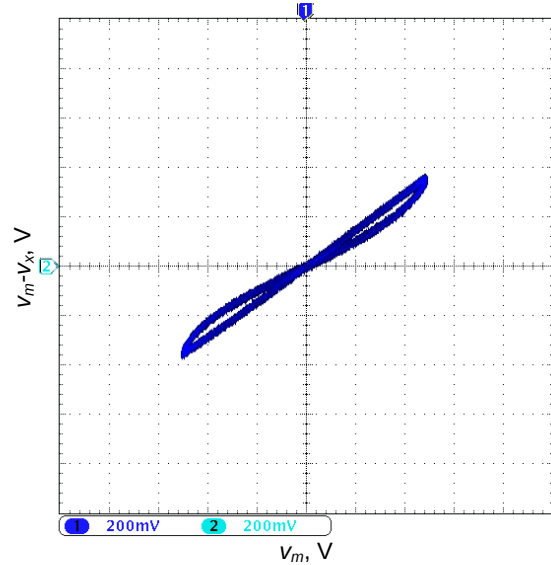
รูปที่ 5 ผลการจำลองคุณสมบัติ v-i ที่ k ค่าต่างๆ ($k=k_1=k_2$) เมื่อป้อนความถี่ 1 kHz ขนาด $0.5 V_{(peak)}$



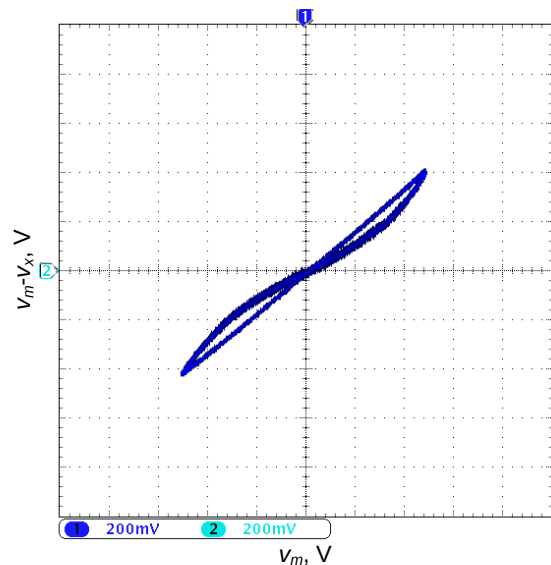
รูปที่ 6 ผลการจำลองคุณสมบัติ v-i ที่ความถี่ค่าต่างๆ ขนาด $0.5 V_{(peak)}$ เมื่อค่า $k_1 = k_2 = 1$



รูปที่ 7 การจัดเตรียมการทดลอง



รูปที่ 8 ผลการทดลองคุณสมบัติ v-i ที่ความถี่ 1 kHz ขนาด $0.5 V_{(peak)}$ และ $k_1 = k_2 = 1$



รูปที่ 9 ผลการทดลองคุณสมบัติ v-i ที่ความถี่ 3 kHz ขนาด $0.5 V_{(peak)}$ $k_1 = 2$ และ $k_2 = 10$

รูปที่ 8 แสดงผลการทดลอง pinched hysteresis loop เมื่อป้อนสัญญาณความถี่ 1 kHz ขนาด $0.5 V_{(peak)}$ และ $k_1 = k_2 = 1$ รูปที่ 9 แสดงผลการทดลอง 9pinched hysteresis loop เมื่อป้อนสัญญาณความถี่ 3 kHz ขนาด $0.5 V_{(peak)}$ $k_1 = 2$ และ $k_2 = 10$ จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการปรับค่า k_1 และ k_2 เพื่อปรับคุณสมบัติ pinched hysteresis loop วงจรสามารถทำงานที่ความถี่สูงขึ้นได้โดยไม่ต้องมีการเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุแต่อย่างใดซึ่งเป็นจุดเด่นของวงจรนี้ ซึ่งการทดลองนี้เพื่อยืนยันสมการที่ (12)

5. สรุป

ในบทความได้เสนอวงจรจำลอง memristor โดยใช้ วงจร OTA เป็นวงจรพื้นฐาน วงจร OTA จะถูกนำมาสร้าง วงจร EDDCC และวงจร EDDCC นี้จะถูกนำมาสร้างเป็น วงจรจำลอง memristor ร่วมกับวงจรคุณสมบัติสัญญาณและ อุปกรณ์พาสซีฟ วงจรที่นำเสนอสามารถสร้างได้จากไอซี ที่หาได้ตามท้องตลาด นอกจากนี้ยังสามารถจำลองการทำงานด้วยตัวโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้อีกด้วยซึ่งจะเป็น ประโยชน์ต่อการเรียนการสอนและศึกษาการประยุกต์ใช้ งาน วงจรจำลอง memristor สามารถสร้างได้ทั้งแบบ decremental และ incremental เพียงสลับการเชื่อมต่อขั้ว อุปกรณ์เพียงเล็กน้อย พฤติกรรม pinched hysteresis loop ของวงจรจำลอง memristor ที่นำเสนอสามารถแสดงได้ทั้ง การจำลองการทำงานและผลการทดลอง ซึ่งผลการจำลอง การทำงานและผลการทดลองได้ผลไปในทิศทางเดียวกัน

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. B. Strukov, G. S. Snider, D. R. Stewart, R. S. Williams, "The missing memristor found," *Nature*, vol. 453, pp. 80-83, 2008.
- [2] L. O. Chua, "Memristor-the missing circuit element," *IEEE Transactions on Circuit Theory*, vol. CT-18, pp. 507-511, 1971.
- [3] Y. V. Pershin, M. D. Ventra, "Practical approach to programmable analog circuit with memristors," *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers*, vol. 57, pp. 1857-1864, 2010.
- [4] J. Borghetti, G. Y. Snider, P. J. Kuekes, J. J. Yang, D. R. Stewart, R. S. Williams "“Memristive” switches enable ‘stateful’ logic operations via material implecation," *Nature*, vol. 464, pp. 873-876, 2010.
- [5] S. Shin, K. Kim, S.-M. Kang, "Memristor applications for programmable analog ICs," *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol. 10, pp. 266-274, 2011.
- [6] D. Biolek, Z. Biolek, V. Biolkova, "PSPICE modeling of memristor with nonlinear dopant drift," *Radioengineering*, vol. 18, pp. 210-214, 2009.
- [7] D. Biolek, Z. Biolek, V. Biolkova, "PSPICE modeling of memristor," *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 66, pp. 129-137, 2011.
- [8] D. Bates, H. Fiedler, "A memristor SPICE implementation and a new approach for magnetic flux controlled memristor," *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol. 10, pp. 250-255, 2011.
- [9] H. Kim, M. P. Sah, Y. Changju, S. Cho, L. O. Chua, "Memristor emulator for memristor circuit applications," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 59, pp. 2422-2431, 2012.
- [10] X. Y. Wang, A. L. Fitch, H. H. C. Lu, W. G. Qi, "Desing of a memcapacitor emulator based on a memristor," *Physics Letters A*, vol. 376, pp. 394-399, 2012.
- [11] C. Sanchez-Lopez, J. Mendoza-Lopez, M. A. Carrasco, C. Muniz-Montero, "A floating analog memristor emulator circuit," *IEEE Transactions on Circuits and Systems-II: Express Briefs*, vol. 61, pp. 309-313, 2014.
- [12] A. Yesil, Y. Babacan, F. Kacar, "A new DDCC based memristor emulator circuit and its appliactions," *Microelectronics Journal*, vol. 45, pp. 282-287, 2014.
- [13] S. C. Yener, H. H. Kuntman, "Fully CMOS memristor based chaotic circuit," *Radioengineering*, vol. 23, pp.1140-1149, 2014.
- [14] V. Riewruja, W. Petchmaneelumka, "Floating current-controlled resistance converters using OTAs," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 62, pp. 725-731, 2008.

การประเมินค่าเสถียรภาพชั่วคราว โดยใช้ระบบอนุมานนิวโรฟัซซี โครงข่ายปรับตัวได้

Transient Stability Assessment Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)

สิริวุฒิ กลอวุฒิเสถียร สมชาติ จีรวិภากร

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการการประเมินค่าเสถียรภาพชั่วคราว โดยใช้ระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ ซึ่งเป็นระบบอัจฉริยะแบบผสมที่นำข้อดีระหว่างโครงข่ายประสาทเทียมกับตรรกศาสตร์คลุมเครือเข้าด้วยกัน มาทำนายค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤติ ระบบไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบเป็นระบบมาตรฐานสองระบบ คือระบบ New England 39 บัส และระบบ Western System Coordinating Council 9 บัส ผลที่ได้จากระบบดังกล่าวถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤติ ที่ได้มาจากการคำนวณแบบทีละขั้นตอนจากโปรแกรม Power world Version 17 ซึ่งผลที่ได้นั้นสามารถสร้างระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้สำหรับระบบไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบและทำนายค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤติ ได้ใกล้เคียงกับวิธีการคำนวณแบบทีละขั้นตอน

คำสำคัญ : เสถียรภาพชั่วคราว,ระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้,ช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤติ,วิธีทีละขั้นตอน

Abstract

This paper presents transient stability assessment using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). It is a hybrid intelligent system. ANFIS is completed with core competency of neural network and fuzzy logic in order to predict the critical clearing time by using two test systems named New England 39 bus test system and Western System Coordinating Council 9 bus. From the results, it shows the structure of ANFIS for these electrical power systems. Prediction results compared with the critical clearing times obtained from simulations using step-by-step method of Power world program version17 are accurate.

Keywords : transient stability, adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS), critical clearing time, step-by-step method

1. บทนำ

ในปัจจุบัน เพื่อรองรับกับปริมาณความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีความสลับซับซ้อนที่เพิ่มขึ้น และเพื่อให้มีการจ่ายไฟอย่างต่อเนื่อง ระบบไฟฟ้ากำลังจำเป็นต้องมีเสถียรภาพที่ดี

เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในระบบอย่างทันทีทันใด เช่น การเปิดวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การปลดสายส่ง หรือเกิดการลัดวงจร ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า รวมทั้งความเร็วและแรงบิดของเครื่องจักรภายในระบบ ซึ่งผลกระทบที่เกิดขึ้นในช่วงแรกของการเปลี่ยนแปลง ถูกเรียกว่า เสถียรภาพชั่วครู่ (Transient Stability) โดยปัญหาของการเปลี่ยนแปลงภายในระบบที่เกิดขึ้นมากที่สุด คือ เกิดการลัดวงจร ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าอย่างรุนแรง เพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบ จึงต้องกำจัดกระแสลัดวงจรภายในช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤติ (Critical Clearing Time, CCT) มิเช่นนั้นแล้วจะเกิดการสูญเสียเสถียรภาพของระบบ จึงจำเป็นต้องนำช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤติ มาพิจารณาในการปลดวงจรของอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้าเพื่อป้องกันการล่มระบบไฟฟ้า [1]

การศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในปัจจุบันนั้น จำเป็นต้องอาศัยคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ เพราะระบบไฟฟ้ากำลังเป็นระบบขนาดใหญ่ที่มีการเชื่อมโยงกันมาก ตั้งแต่ ส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจนถึงผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งการประเมินเสถียรภาพนั้น ส่วนใหญ่ใช้วิธีการคำนวณทีละขั้นตอน โดยอาศัยสมการสวิง ซึ่งมีความยุ่งยากและสิ้นเปลืองเวลา จึงได้มีการวิจัยเพื่อหาวิธีในการประเมินเสถียรภาพที่มีความยุ่งยากน้อยกว่าและรวดเร็วกว่า ตัวอย่างเช่น A. W. Noor Izzi ได้เสนอวิธีการที่เรียกว่า least squares support vectormachine (LS-SVM) [2], H. H. Al Marhoon ใช้ A Practical Method ในการประเมินค่าเวลาวิกฤติ [3], A. Karami ได้ใช้โครงข่ายประสาทเทียมมาประเมินเสถียรภาพชั่วครู่ [4]

ในบทความนี้ได้นำระบบอนุมานฟัซซี่โครงข่ายปรับตัวได้ (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) มาประเมินหาช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤติ โดยเปรียบเทียบผลที่ได้กับวิธีทีละขั้นตอน (step by step) ซึ่งได้มาจากการ

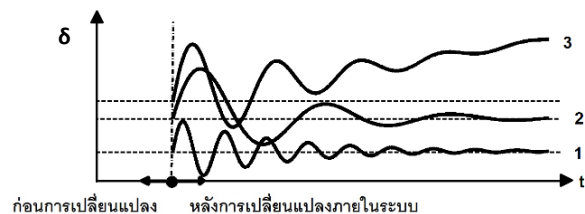
จำลอง Transient Stability (TS) ในโปรแกรม Power world Version17 [5]

2. เสถียรภาพชั่วครู่ของระบบไฟฟ้า

การพิจารณาเสถียรภาพชั่วครู่ของระบบไฟฟ้ากำลัง สามารถพิจารณาได้จากมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงภายในระบบไฟฟ้า มุมโรเตอร์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ตามสมการที่ 1

$$\frac{H}{2\pi} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (1)$$

เมื่อ δ คือมุมโรเตอร์, H คือค่าคงที่ความเฉื่อย (Inertia Constant) ของเครื่องจักร P_m คือกำลังกลของเครื่องจักรและ P_e คือกำลังทางไฟฟ้า โดยเรียกสมการที่ (1) ว่าสมการสวิง และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับเวลา ถูกเรียกว่า กราฟสวิง



รูปที่ 1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมโรเตอร์ต่อเวลา

จากรูปที่ 1 เป็นกราฟสวิงของระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เครื่อง เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นภายในระบบ มุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมายเลข 1 และ 2 มีการแกว่งเล็กน้อยก่อนกลับเข้าสู่ค่าคงที่ใดๆ ในขณะที่ มุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมายเลข 3 เพิ่มขึ้นตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปและไม่กลับเข้าสู่ค่าคงที่ใดๆ แสดงว่า เครื่องจักร 3 สูญเสียเชิงโครนิสซิม จึงกล่าวได้ว่า ระบบไม่มีเสถียรภาพหลังจากการลัดวงจรขึ้นภายในระบบ โดยเรียกการหาเสถียรภาพด้วยวิธีนี้ว่า การคำนวณทีละขั้นตอน (step by step)

การคำนวณทีละขั้นตอน จะทำการแบ่งช่วงเวลาคำนวณออกเป็นช่วงๆ เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ จึงต้องอาศัยสมมติฐานดังต่อไปนี้ 1. กำลังไฟฟ้าแรง มีค่าคงที่จากกึ่งกลางของช่วงเวลานึงไปยังกึ่งกลางของอีกช่วงเวลานึง 2. ความเร็วเชิงมุมมีค่าคงที่ตลอดในแต่ละช่วงเวลา

จากสมการสวิงและสมมติฐานดังกล่าว สามารถหาการเปลี่ยนแปลงของมุมโรเตอร์ได้จากสมการที่ (2)

$$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + \frac{P_a(n-1)}{M} (\Delta t)^2 \quad (2)$$

ช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤติเป็นเวลาสุดท้ายในการกำจัดกระแสลัดวงจรก่อนที่จะทำให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพสามารถหาได้จากกราฟสวิง ซึ่งความถูกต้องและแม่นยำของวิธีการนี้จะขึ้นอยู่กับกระบวนการแบ่งช่วงเวลาคำนวณ เพราะถ้าแบ่งช่วงเวลากว้างเกินไป ส่งผลให้กราฟที่ได้มีความคลาดเคลื่อนไปจากกราฟจริงที่ได้จากสมการสวิง โดยทั่วไปแล้วการแบ่งช่วงเวลาคำนวณมักแบ่งที่เวลา 0.1 หรือ 0.01 วินาที [6]

3. ระบบอนุมานนิเวศฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้

ระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference system, ANFIS) เป็นการประยุกต์ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) ซึ่งมีข้อดีในเรื่องของการเรียนรู้แต่ไม่สามารถอธิบายถึงการได้มาของการตัดสินใจได้ ร่วมกับตรรกศาสตร์คลุมเครือหรือฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic) ซึ่งมีคุณสมบัติในการให้เหตุผลเชื่อมโยงมนุษย์ แต่ไม่สามารถเรียนรู้ได้โดยอัตโนมัติ จึงเหมาะสมที่นำระบบทั้งสอง ทำเป็นระบบประสานแบบอัจฉริยะ (hybrid intelligent system, HIS) ที่สามารถเรียนรู้ได้ด้วยตัวเองและอธิบายถึงที่มาของเอาต์พุตได้ โดยระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้แบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนของอนุมานฟัซซี (Fuzzy Inference) ของฟัซซีลอจิก และวิธีการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ (Back Propagation) ของโครงข่ายประสาทเทียม [7]

จากรูปที่ 2 เป็นระบบที่มีโครงสร้าง 2 อินพุต 1 เอาต์พุต แต่ละอินพุตแบ่งเป็นสองฟัซซีเซต มิติที่ 1 แบ่งฟัซซีเซตเป็น A_1 และ A_2 มิติที่ 2 แบ่งเป็น B_1 และ B_2 เอาต์พุตมีพารามิเตอร์เป็น p, q และ r โดยมีกฎจำนวน L กฎ ดังนี้

Rule1: IF x_1 is A_1 and x_2 is B_1 THEN $y_1 = p_1x_1 + q_1x_2 + r_1$

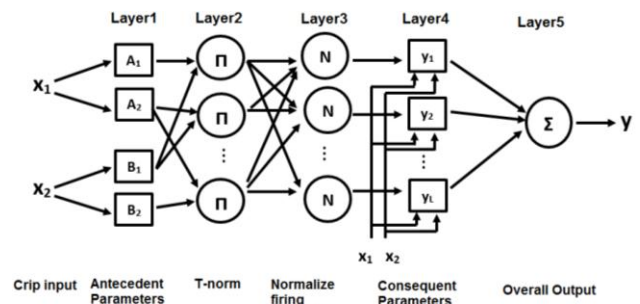
Rule2: IF x_1 is A_2 and x_2 is B_1 THEN $y_2 = p_2x_1 + q_2x_2 + r_2$

⋮

RuleL: IF x_1 is A_2 and x_2 is B_2 THEN $y_L = p_Lx_1 + q_Lx_2 + r_L$

โดยโครงสร้างประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1: Antecedent Parameters เป็นการหาค่าฟัซซีจากอินพุตในรูปแบบคิ (Crip input, x) ให้เป็นค่าความเป็นสมาชิก



รูปที่ 2 โครงสร้างระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้

ผ่านฟังก์ชันความเป็นสมาชิก μ_{A_i} หรือ μ_{B_i} โดยที่

$$O_j^1 = \mu_{A_i}(x) \quad (3)$$

เมื่อ A_i คือพจน์ทางภาษาและ O_j^1 เป็นค่าความเป็นสมาชิกของพจน์ภาษา A_i ที่เกิดจากค่า x โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิก อาจฟังก์ชันแบบสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมคางหมู รูปประฆังคว่ำหรือแบบอื่นก็ได้

ขั้นที่ 2: T-norm หรือขั้นกฎของฟัซซี (fuzzy rule base) เป็นขั้นทำการเชื่อมโยงค่าฟัซซีจากแต่ละมิติโดยคูณสัญญาณเข้าที่เป็นฟัซซี เข้าด้วยกัน และส่งค่าฟัซซีผลคูณเป็นสัญญาณออก

$$w_j = \mu_{j1}(x_1) \times \mu_{j2}(x_2) \quad (4)$$

เมื่อ w_j เป็นค่า firing strength จากกฎแต่ละข้อ และ $\mu_{j1}(x_1)$ เป็นค่าฟัซซีจากมิติที่ i ของกฎข้อที่ j

ขั้นที่ 3: Normalize firing strength หรือขั้นค่าถ่วงน้ำหนัก เป็นขั้นหาค่าฟัซซีผลรวมทุกกฎให้เป็นหนึ่ง

$$\bar{w}_j = \frac{w_j}{w_1 + w_2 + \dots + w_L}, j = 1, 2, \dots, L \quad (5)$$

ขั้นที่ 4: Consequent Parameters เป็นขั้นของ output membership ซึ่งค่าเอาต์พุตหาได้จาก

$$O_j^4 = \bar{w}_j y_j = \bar{w}_j (p_j x_1 + q_j x_2 + r_{j0}) \quad (6)$$

ขั้นที่ 5: Overall Output เป็นขั้นตอนการทำดีฟัซซีฟิเคชัน (Defuzzification) เพื่อหาเอาต์พุตของโครงข่าย โดยทำการรวมสัญญาณเข้า เอาต์พุตหาได้จาก

$$O_j^5 = \bar{w}^T y = \sum_{j=1}^L \bar{w}_j y_j \quad (7)$$

เมื่อ $\bar{w}^T = [\bar{w}_1 \ \bar{w}_2 \ \dots \ \bar{w}_L]$ เป็นค่าฟัซซีที่ผ่านวิธีอนุมอลไลซ์จากกฎข้อ 1 ถึง L และ $y^T = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_L]$ เป็นส่วนเอาต์พุตของกฎข้อ 1 ถึง L [8]-[9]

ซึ่งการประยุกต์ใช้งานระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวในด้านงานวิศวกรรม ได้แก่ การนำไปใช้

ร่วมกับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ การพยากรณ์โหลด การคำนวณกระแสลัดวงจร เป็นต้น

4. ระบบที่ใช้ในการจำลอง

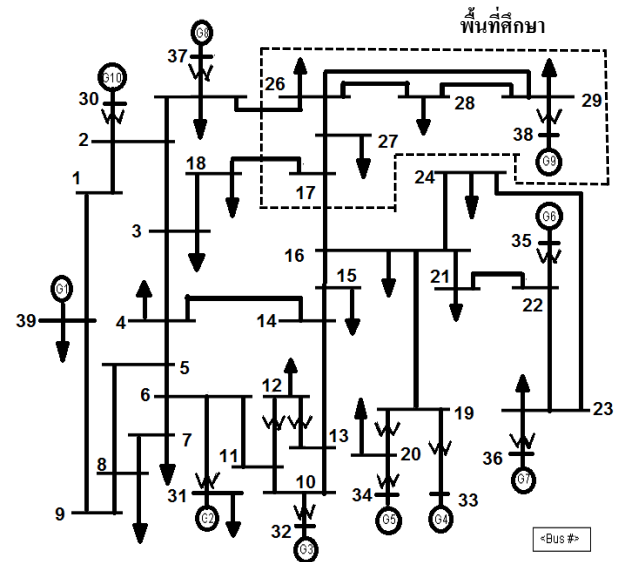
ระบบที่ใช้ในการจำลองในบทความนี้ ได้เลือกใช้ระบบมาตรฐาน 2 ระบบด้วยกัน ได้แก่

1. ระบบ New England ซึ่งเป็นระบบไฟฟ้าขนาดกลาง โดยประกอบไปด้วย บัสทั้งสิ้น 39 บัส มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด 10 เครื่อง มีแผนภูมิเส้นเคียวดังรูปที่ 3 โดยมีพารามิเตอร์ของ สายส่ง หม้อแปลง รวมทั้งค่าเริ่มต้นของระบบเป็นไปตาม เอกสารอ้างอิง [10] โดยใช้โมเดลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบพื้นฐาน (Classical Model) ไม่มีการพิจารณาผลของตัวควบคุมใดๆ เนื่องจากระบบ New England เป็นระบบที่มีการเชื่อมโยงกันมาก และเมื่อคำนวณช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤติของบัสต่างๆ พบว่าบริเวณบัส 26, 28 และ 29 มีช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤติต่ำที่สุดในบทความนี้จึงได้กำหนดขอบเขตการจำลองตามกรอบในรูปที่ 3 โดยมีการเปลี่ยนขนาดกำลังไฟฟ้าในบัสที่ 26, 27, 28 และ 29 ในช่วง 80 % ถึง 120 % ของกำลังไฟฟ้าเริ่มต้น และให้ค่าตัวประกอบกำลังมีค่าคงที่

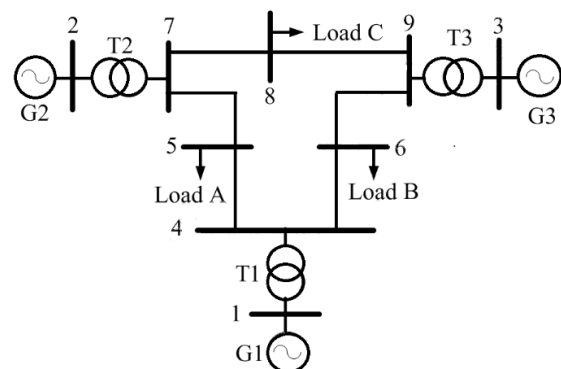
2. ระบบ Western System Coordinating Council (WSCC) ซึ่งเป็นระบบไฟฟ้าที่มีขนาดเล็ก ประกอบด้วยบัส 9 บัส เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เครื่อง มีแผนภูมิเส้นเคียวดังรูปที่ 4 โดยมีพารามิเตอร์ของสายส่ง หม้อแปลง รวมทั้งค่าเริ่มต้นของระบบเป็นไปตาม เอกสารอ้างอิง [11] โดยใช้โมเดลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบมีรายละเอียด (Detailed Model) ใช้ตัวควบคุมตามมาตรฐาน IEEE Type 1 ในการจำลองมีการเปลี่ยนขนาดกำลังไฟฟ้าของโหลดในบัสที่ 5, 6 และ 8 ในช่วง 80 % ถึง 120 % ของกำลังไฟฟ้าเริ่มต้น และให้ค่าตัวประกอบกำลังมีค่าคงที่

5. ผลการจำลอง

การจำลองในทั้งสองระบบ ใช้โครงสร้างของระบบอนุमानนิวโรฟฟิซซึโครงข่ายปรับตัวได้แบบ Sugeno อันดับที่ 1 (first order - Sugeno) มีอินพุตคือ กำลังไฟฟ้าจริงในแต่ละบัส ในขอบเขตการจำลองและตำแหน่งการเกิดการลัดวงจร และมีเอาต์พุตคือ ช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤติ โดยจำนวนข้อมูลที่ใช้ต้องเพียงพอต่อการฝึกสอน



รูปที่ 3 แผนภูมิเส้นเคียวของระบบทดสอบ New England



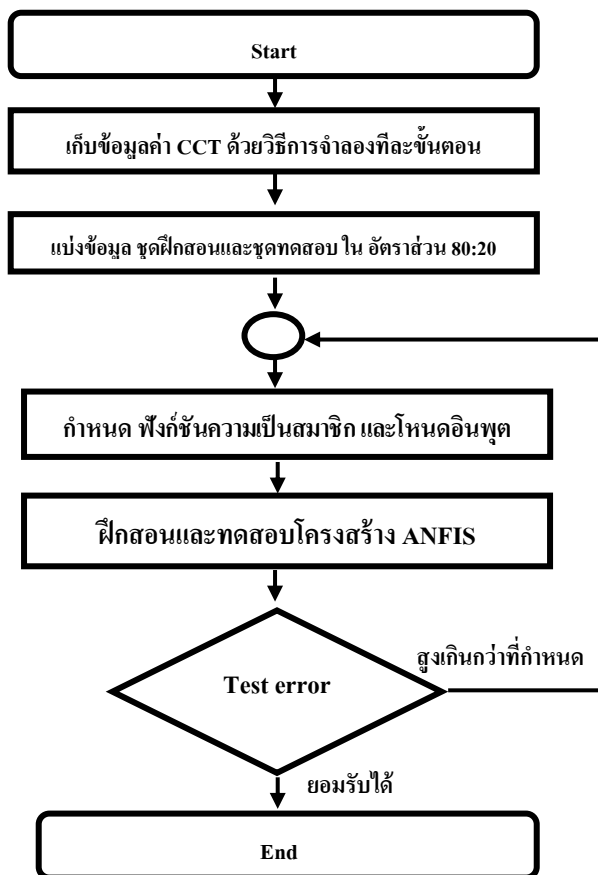
รูปที่ 4 แผนภูมิเส้นเคียวของระบบทดสอบ WSCC 9 bus

ระบบอนุमानนิวโรฟฟิซซึโครงข่ายปรับตัวได้ และครอบคลุมพื้นที่การจำลอง ใช้กระบวนการเรียนรู้แบบผสม มีรอบการฝึกสอน 300 รอบ (epochs) โดยข้อมูลได้มาจากการจำลองในโปรแกรม Power world ในแต่ละระบบจะทำการแบ่งข้อมูลเป็น ชุดฝึกสอนและชุดทดสอบ ในอัตราส่วน 80:20 โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ใช้ในการจำลองเป็นการเลือกมาจากระบวนการลองผิดลองถูก (Trial and error) และมีกระบวนการจำลองตามรูปที่ 5

การพิจารณาถึงความสามารถในการหาค่าตอบสามารถพิจารณาได้จากค่าความผิดพลาด โดยในที่นี้จะใช้ค่าความผิดพลาดแบบ RMSE (Root Mean Square Error) ดังสมการที่ 8

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - F_i)^2}{n}} \times 100\% \quad (8)$$

เมื่อ O_i คือ ค่าที่ได้จากการจำลองด้วย Transient Stability (TS) ในโปรแกรม Power world Version17, F_i คือค่าที่



รูปที่ 5 แผนภาพบล็อกกระบวนการจำลอง

ได้จากการทำนายโดยใช้ระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ และ n คือจำนวนข้อมูลฝึกสอนหรือทดสอบ

ในระบบ New England มีข้อมูล 400 ชุด มี 5 อินพุต คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 26, 27, 28 และ 29 และตำแหน่งการลัดวงจร โดยมีตำแหน่งการลัดวงจรทั้งสิ้น 21 ตำแหน่งประกอบด้วย การลัดวงจรที่บัส 17, 26, 27, 28, 29 และ 38 และการลัดวงจรที่ความยาว 25, 50 และ 75 เปอร์เซนต์ของสายระหว่างบัส 17-27, 26-27, 26-28, 26-29 และ 28-29 เลือกใช้ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบ pimf (Π -shaped membership function) [12] ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 1

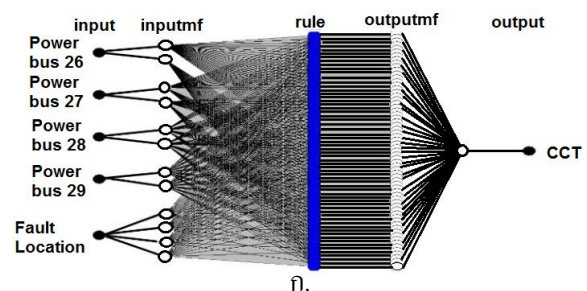
ในระบบ WSCC มีข้อมูล 300 ชุดมี 4 อินพุต คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 5, 6 และ 8 และตำแหน่งการลัดวงจร โดยมีตำแหน่งการลัดวงจรทั้งสิ้น 27 ตำแหน่งประกอบด้วย การลัดวงจรที่บัสทั้ง 9 บัส และการลัดวงจรที่ความยาว 25, 50 และ 75 เปอร์เซนต์ของสายส่งระหว่างบัส 1-5, 1-6, 5-7, 6-9, 7-8 และ 8-9 เลือกใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบ trimf

ตารางที่ 1 ค่าความผิดพลาด RMSE ในโครงสร้างต่างๆ ของระบบ New England

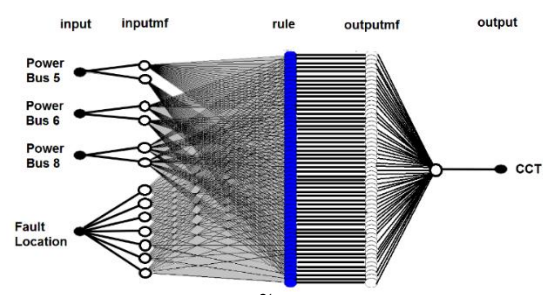
จำนวนโหนด อินพุต	Training error (%RMSE)	Test error (%RMSE)
2 2 2 2 2	1.39	1.65
2 2 2 2 3	1.23	1.60
2 2 2 2 4	0.90	1.28
3 3 3 3 4	0.38	79.0

ตารางที่ 2 ค่าความผิดพลาด RMSE ในโครงสร้างต่างๆ ของระบบ WSCC

จำนวนโหนด อินพุต	Training error (%RMSE)	Test error (%RMSE)
2 2 2 2	3.94	4.00
3 3 3 3	3.33	5.31
2 2 2 7	1.95	1.83
2 2 5 7	1.51	18.00



ก.



ข.

รูปที่ 5 โครงสร้างระบบอนุมานนิเวศวิทยาโครงข่ายปรับตัวได้ดีที่สุดในการทดสอบของระบบ

ก. New England ข. WSCC

(Triangular-shaped membership function) [12] ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 2

จากตารางที่ 1 ในระบบ New England โครงสร้างของระบบอนุมานนิเวศวิทยาโครงข่ายปรับตัว

ได้ ที่มีจำนวนโหนดในชั้นที่ 1 เป็น แบบ 2 2 2 2 4 เป็น โครงสร้างที่ให้ค่าความผิดพลาดของข้อมูลในชุดฝึกสอนต่ำ โดยมีค่าความผิดพลาดของชุดทดสอบต่ำที่สุดและสามารถยอมรับได้ จึงกล่าวได้ว่าโครงสร้างดังกล่าวเหมาะสมสำหรับการหาค่าช่วงเวลาตัด กระแสวิกฤติในระบบ New England โดยจะมีโครงสร้างดังรูปที่ 5ก

จากตารางที่ 2 ในระบบ Western System Coordinating Council (WSCC) โครงสร้างของระบบอนุমানนิวโรฟิซซึโครงข่ายปรับตัวได้ ที่มีจำนวนโหนดในชั้นที่ 1 เป็นแบบ 2 2 2 7 เป็นโครงสร้างที่ให้ค่าความผิดพลาดของข้อมูลในชุดทดสอบต่ำที่สุดและสามารถยอมรับได้ จึงกล่าวได้ว่า โครงสร้างดังกล่าวเหมาะสมสำหรับการหาค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤติในระบบ WSCC โดยจะมีโครงสร้างดังรูปที่ 5ข

บทความนี้ ได้กำหนดขอบเขตการจำลองในระบบ New England เพียง 6 บัส โดยสายส่งเชื่อมต่อ 5 เส้น ในขณะที่ระบบ WSCC ได้กำหนดขอบเขตทำการจำลองทั้งระบบ คือ 9 บัส และสายส่ง 6 เส้น จึงทำให้ขอบเขตของการศึกษาในระบบ New England มีขนาดเล็กกว่าระบบ WSCC ซึ่งทำให้การออกแบบตัวแปรอินพุตของตำแหน่งการลัดวงจรมีความซับซ้อนยุ่งยาก รวมทั้งโมเดลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบมีรายละเอียด ส่งผลให้ระบบอนุমানนิวโรฟิซซึโครงข่ายปรับตัวได้ทำนายค่า CCT ได้คลาดเคลื่อนมากกว่าในระบบ New England

6. บทสรุป

การประเมินค่าเสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้า โดยใช้ระบบอนุমানฟิซซึโครงข่ายปรับตัวได้ในบทความนี้ เป็นการนำระบบดังกล่าวมาทำนายค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤติของระบบไฟฟ้า โดยความถูกต้องของผลการทำนายขึ้นอยู่กับ การออกแบบ โครงสร้างของระบบอนุমানฟิซซึโครงข่ายปรับตัวได้ซึ่งผลการทำนายที่ได้ในบทความนี้ สามารถทำนายช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤติ ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากวิธีทีละขั้นตอน โดยใช้เวลาในการประเมินค่าเสถียรภาพชั่วคราวเร็วกว่าวิธีทีละขั้นตอน แต่ประสบปัญหาผลที่ได้นั้นมีค่าต่ำกว่าค่าจริงและสูงกว่าค่าจริงปนกันไป ซึ่งทำให้เกิดปัญหาในการนำค่าที่ได้ไปใช้

ต่อไปได้ ดังนั้นการทำนายที่ได้นี้เหมาะสำหรับการใช้วิเคราะห์ในเบื้องต้นก่อนทำการประเมินเสถียรภาพอย่างละเอียดต่อไป

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Saadat, Power System Analysis, The McGraw-Hill, New York, 2010.
- [2] A. W. N. Izzri "A New Method of Transient Stability Assessment in Power Systems Using LS-SVM" 5th Student Conference on Research and Development, pp.1-6, Dec., 2007,
- [3] H. H. A. Marhoon "A Practical Method for Power Systems Transient Stability and Security Analysis" Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), pp.1-6., May, 2012
- [4] A. Karami and S.Z. Esmaili "Transient stability assessment of power systems described with detailed models using neural networks" International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol.45, pp. 279-292, Feb., 2013
- [5] online <http://www.powerworld.com>
- [6] C. Hokeyrit, Electrical Power System Analysis, Charan Sanit Wong Pu publishing, Bangkok, 2007.
- [7] P. Meesad, Fuzzy logic and Neural network, King Mongkut's University of Technology North Bangkok Publishers, Bangkok, 2010.
- [8] J. W. Hines, Fuzzy and Neural Approaches in Engineering MATLAB Supplement, John Wiley and Sons, New York, 1997.
- [9] J. R. Jang "ANFIS : Adaptive-Neural-Based Fuzzy Inference System," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 23, pp.665-685, May/June, 1993.
- [10] M.A. Pai, Energy Function Analysis for Power System Stability, Kluwer Academic Publishers, London, 1989.
- [11] S. K. Nallagatla, M. K. Kirar and G. Agnihotri "Transient Stability Analysis of the IEEE 9-Bus Electric Power System," International Journal of Scientific Engineering and Technology, Vol.1, pp.161-166, July, 2012.
- [12] online <http://www.mathworks.com/help/fuzzy/anfis.html>

การพัฒนาตัวตรวจรู้ความดันบนพื้นฐานของไดอะแฟรมด้วย สารไวแสงชนิด SU-8

Development of A Gauge Pressure Sensors Based on SU-8 Photoresist Diaphragm

กมลรัตน์ บุญประกอบ พิทยา ดิกล้ำ นิमित ชมนาวัง

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความดันแบบเกจด้วยกระบวนการทางระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ซึ่งมุ่งเน้นการพัฒนาตัวตรวจรู้ความดันบนพื้นฐานของไดอะแฟรมที่เป็นสารไวแสงชนิด SU-8 เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็น พอลิเมอร์ มีค่ายังมอดุลัสต่ำกว่าและราคาถูกกว่าซิลิกอน เหมาะสำหรับใช้เป็นตัวรับปริมาณอินพุตของตัวตรวจรู้ความดัน โดยลักษณะของตัวตรวจรู้ความดันมีไดอะแฟรมเป็นแผ่นวงกลมมีขนาดรัศมี 500 μm และมีความหนา 38 μm ซึ่งมีตัวต้านทานไฟฟ้าสเตรจเกจอยู่ด้านบนไดอะแฟรม ในส่วนของสเตรจเกจนั้น ทำจากโลหะนิโครม (นิกเกิลผสมโครเมียม) มีลักษณะเป็นฟิล์มบาง สร้างด้วยกระบวนการระเหยไอโลหะในสุญญากาศ ลิโธกราฟี และกระบวนการลิฟออฟ มีค่าความต้านทานไฟฟ้า 4.404 k Ω ตัวตรวจรู้ความดันนี้สามารถวัดความดันในช่วง 30-180 kPa ที่อุณหภูมิ 25-60°C มีความไว 26 mV/kPa ค่าความแม่นยำ $\pm 10\%$ และเวลาในการตอบสนองเท่ากับ 2.3 วินาที

คำสำคัญ : ไดอะแฟรม ตัวตรวจรู้ความดัน ระบบกลไฟฟ้าจุลภาค กระบวนการลิโธกราฟี

Abstract

This paper presents a design and fabrication of a gauge pressure sensor by using MEMS processes. The sensor was developed base on SU-8 photoresist diaphragm. Since SU-8 photoresist is polymer material which is lower Young's modulus and manufacturing cost of fabrication than silicon, it must to be used as a material for polymeric detecting diaphragm in this work. The diaphragm is a circular shape which is under a strain gauge resistor. The strain gauge resistor made from NiCr (nickel-chromium) thin film via thermal evaporation, UV lithography, and lift-off process is resistance of 4.404 k Ω on a SU-8 diaphragm which is with a radius of 500 μm and a thickness of 38 μm . This low cost sensor can measure gas pressure between 30-180 kPa at 25-60°C. Furthermore, this sensor has sensitivity of 26 mV/kPa, accuracy $\pm 10\%$, and rise time in 2.3 second.

Keywords : diaphragm, pressure sensor, photolithography, MEMS

1. บทนำ

โดยทั่วไปตัวตรวจรู้ความดันในระบบกลไฟฟ้า จุลภาคนิยมสร้างด้วยซิลิกอน [1] แต่ยังมีวัสดุอื่นที่สามารถใช้ได้เช่น เซรามิก [2] หรือ พอลิเมอร์ เป็นต้น ในปัจจุบันมีการศึกษาวิจัยในกระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความดันโดยใช้พอลิเมอร์มากขึ้น ซึ่งไคอะแฟรมของตัวตรวจรู้ที่สร้างด้วยพอลิเมอร์นั้นมีการ โกงตัว (deflection) ที่มากกว่าซิลิกอน เพราะค่ายังมอดูลัสที่น้อยกว่าและราคาต้นทุนในการสร้างนั้นต่ำกว่าซิลิกอน ตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาตัวตรวจรู้ความดันที่ทำจากพอลิเมอร์ เช่น การใช้สาร polydimethylsiloxane (PDMS) และ polyethylene terephthalate (PET) เป็นไคอะแฟรม และมีสเตรจเกจแบบฟิล์มบางในไคอะแฟรม [3] ตัวตรวจรู้ความดันที่มีไคอะแฟรมสร้างด้วย PDMS โดยมีคาร์บอนไฟเบอร์เป็นสเตรจเกจ [4] ตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างด้วย PMMA และมีคาร์บอนนาโนทิว (carbon nanotube) เป็นตัวต้านทานเพียโซ (Piezoresistive) [5] และตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างด้วย SU-8 เป็นไคอะแฟรมที่มีตัวต้านทานแบบเพียโซ [6]

SU-8 เป็นสารไวแสงชนิดลบมีลักษณะเป็นของเหลวเมื่อทำปฏิกิริยากับแสงแล้วจะมีลักษณะแข็งตัวขึ้น มีความยืดหยุ่นคล้ายวัสดุพอลิเมอร์ มีความทนต่อกรดเบสและความร้อนได้ดีกว่าวัสดุพอลิเมอร์อื่น เช่น PDMS และ PET และยังเป็นวัสดุที่มีการใช้อย่างแพร่หลายในระบบกลไฟฟ้าจุลภาค เพราะมีราคาถูกกว่าทั้งซิลิกอน มีความสะดวกในการใช้งานและสามารถขึ้นรูปได้ตามต้องการด้วยแสงอัลตราไวโอเลต (วัสดุ PMMA ต้องใช้แสงที่มีความยาวคลื่นสั้นของรังสีเอ็กซ์)

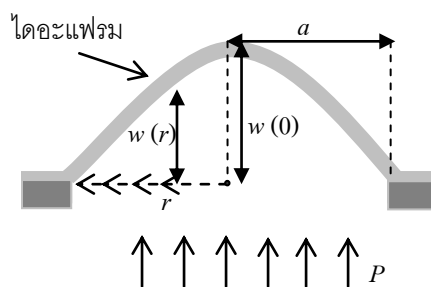
งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการสร้างตัวตรวจรู้ความดันก๊าซ ต้นทุนต่ำที่ใช้วัดความดันก๊าซทั่วไป เช่น วัดความดันจากถังก๊าซ โดยใช้สารไวแสง SU-8 เป็นไคอะแฟรมรูปวงกลม เนื่องจากไคอะแฟรมรูปวงกลมมีประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อเทียบกับไคอะแฟรมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและสี่เหลี่ยมจัตุรัส [7] มีขนาดไม่เกิน 1,000 μm สามารถวัด

ความดันก๊าซในช่วงไม่เกิน 30 psi (206 kPa) เทียบกับบรรยากาศ ที่อุณหภูมิห้อง

2. การออกแบบและการสร้างตัวตรวจรู้ความดัน

2.1 การออกแบบ

ขนาดของไคอะแฟรมเป็นตัวกำหนดระดับย่านความดันที่วัดและความเครียดสูงสุดที่ไคอะแฟรมสามารถรับได้ และยังกำหนดความไวของตัวตรวจรู้อีกด้วย เมื่อให้ความดันที่ระนาบของแผ่นไคอะแฟรม ไคอะแฟรมเกิดการโก่งตัวขึ้นดังรูปที่ 1 อธิบายได้ตามสมการที่ (1) [8] เมื่อ w คือ ระยะโก่งตัวของไคอะแฟรม (m) P คือ ความดันก๊าซ (Pa) a คือความยาวรัศมีของไคอะแฟรม (m) r คือ ระยะจากจุดศูนย์กลางของไคอะแฟรม (m) และ D คือความแข็งเชิงดัด (Flexural rigidity) กำหนดได้โดยสมการที่ (2)



รูปที่ 1 ลักษณะการโก่งตัวของไคอะแฟรม

$$w(r) = \frac{P}{64D} [a^2 - r^2]^2 \quad (1)$$

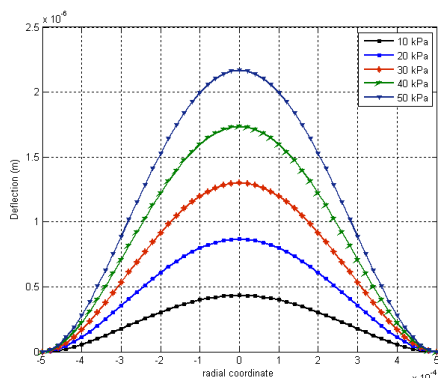
$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2)$$

เมื่อ E คือ ยังมอดูลัส (Young's modulus) (Pa) h คือ ความหนาของไคอะแฟรม (m) และ ν คือ อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio) เมื่อนำค่า D จากสมการที่ (2) มาแทนในสมการที่ (1) จะได้สมการที่ (3)

$$w(r) = \frac{3(1-\nu^2)P}{16Eh^3} (a^2 - r^2) \quad (3)$$

ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการสร้างตัวตรวจรู้ความดันด้วยสารไวแสง SU-8 มีค่ายังมอดูลัสเท่ากับ 4.02 GPa และอัตราส่วนของปัวซองเท่ากับ 0.22 [9] จากสมการที่ (3) สามารถทำแบบจำลองไคอะแฟรมเพื่อศึกษาผลของ

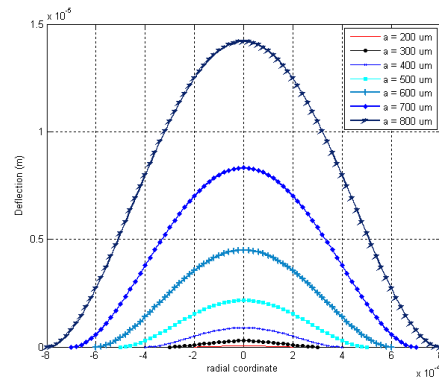
ความดันในช่วง 10-50 kPa ต่อการโก่งตัวของไดอะแฟรม โดยกำหนดให้ไดอะแฟรมหนา 40 μm รัศมี 500 μm ได้กราฟลักษณะการโก่งตัวของไดอะแฟรมดังรูปที่ 2 คือเมื่อความดันก๊าซเพิ่มขึ้น ไดอะแฟรมจะโก่งตัวเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เพื่อหาขนาดรัศมีไดอะแฟรมที่เหมาะสม ทำการจำลองให้ไดอะแฟรมหนา 40 μm รัศมีตั้งแต่ 200-800 μm ที่ความดัน 50 kPa จะได้ผลดังรูปที่ 3 ไดอะแฟรมที่มีขนาดใหญ่กว่าจะโก่งตัวได้มากกว่าขนาดเล็ก และเพื่อหาความหนาของไดอะแฟรมที่เหมาะสม ทำการจำลองไดอะแฟรมที่มีความหนาต่างๆ โดยมีขนาดรัศมี 500 μm ที่ความดัน 50 kPa ได้ผลกราฟดังรูปที่ 4 คือไดอะแฟรมที่มีความหนาน้อยกว่าจะสามารถโก่งตัวได้มากกว่า จากผลการจำลองทั้ง 3 สรุปได้ว่าขนาดไดอะแฟรมควรจะมี ความหนาน้อย และมีขนาดรัศมีที่ใหญ่ จึงจะตอบสนองความดันได้ดี



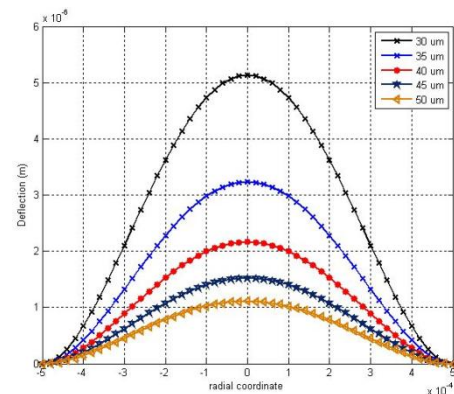
รูปที่ 2 การจำลองการโก่งตัวของไดอะแฟรมรูปวงกลม

ขนาดรัศมี 500 μm ที่ความดันระดับต่าง ๆ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เลือกขนาดไดอะแฟรมของตัวตรวจรู้ความดันเป็นรูปวงกลมมีขนาดรัศมี 500 μm ซึ่งเป็นขนาดที่ทำให้ตัวตรวจรู้ความดันมีขนาดไม่ใหญ่จนเกินไปและสร้างได้ง่าย มีความหนา 40 μm ซึ่งมีความหนาที่สามารถสร้างได้ในห้องปฏิบัติการ ถ้าหากความหนาน้อยกว่านี้อาจทำให้ไดอะแฟรมรับระดับแรงดันก๊าซได้ไม่มาก อาจทำให้ไดอะแฟรมเกิดความเสียหายได้



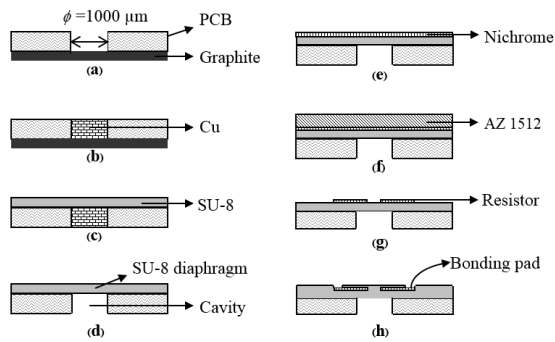
รูปที่ 3 การจำลองการโก่งตัวของไดอะแฟรมรูปวงกลมที่มีขนาดรัศมีต่างกัน



รูปที่ 4 การจำลองการโก่งตัวของไดอะแฟรมรูปวงกลมขนาดรัศมี 500 μm ที่ความหนาต่าง ๆ

2.2 กระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความดัน

การสร้างตัวตรวจรู้ความดันในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างในห้องปฏิบัติการของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) โดยใช้กระบวนการลิโธกราฟี มีขั้นตอนดังรูปที่ 5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างไดอะแฟรม ได้แก่ สารไวแสง SU-8 เครื่องหมุนเคลือบสารไวแสง (Spinner) เครื่องให้ความร้อน (Hot plate) เพื่อทำการอบสารไวแสง เครื่องฉายแสงอัลตราไวโอเลต สารละลายทองแดง และชุดชุบโลหะ ส่วนในการสร้างตัวต้านทานไฟฟ้า ใช้โลหะนิโครมและเครื่องระเหยไอโชนะในสุญญากาศ สารไวแสงชนิดบวก AZ เพื่อสร้างเป็นชั้นป้องกันในการสกัดโลหะ และสารละลายเพื่อทำการสกัดโลหะนิโครมให้เกิดตัวต้านทานไฟฟ้า

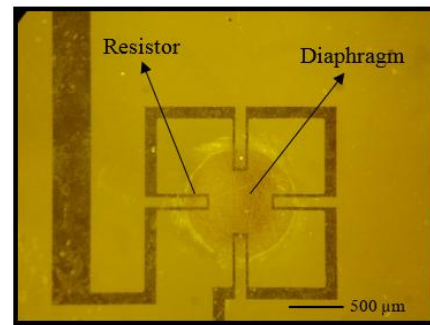


รูปที่ 5 ขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรู้ความดันในห้องปฏิบัติการ

การของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

- 1) นำแผ่นพิมพ์วงจร (PCB) สกัดทองแดงให้หมด แล้วเจาะรูขนาดรัศมี 500 μm นำแกรไฟต์ประกบติดด้านหลังของแผ่นพิมพ์วงจรดังรูปที่ 5 (a)
- 2) นำไปชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเพื่อเติมโลหะทองแดงลงในรู จากนั้นนำแผ่นแกรไฟต์ออกจัดบริเวณทองแดงให้เรียบเสมอ ดังรูปที่ 5 (b)
- 3) หมุนเคลือบ (Spin) สารไวแสง SU-8 เบอร์ 2050 [10] ฉายแสงอัลตราไวโอเลตเพื่อให้สารไวแสงแข็งตัวเป็นพอลิเมอร์ สารไวแสงชั้นนี้จะเป็นไโคอะแฟรมของตัวตรวจรู้ ดังรูปที่ 5 (c)
- 4) ทำการสกัดทองแดงด้วยสารละลายเคมี จะได้ไโคอะแฟรม SU-8 ดังรูปที่ 5 (d)
- 5) นำไปเคลือบโลหะนิโครมด้วยการระเหยไอโลหะในสุญญากาศเพื่อเป็นตัวต้านทานไฟฟ้า รูปที่ 5 (e)
- 6) หมุนเคลือบสารไวแสง AZ 1512 แล้วฉายแสงอัลตราไวโอเลตเพื่อให้เกิดลวดลายตัวต้านทานไฟฟ้า จากนั้นล้างสารไวแสง (Develop) ด้วยสารละลายเคมีจะเกิดลายตัวต้านทานขึ้น รูปที่ 5 (f)
- 7) สกัดโลหะนิโครมเป็นลายตัวต้านทานไฟฟ้าด้วยสารละลายเคมี $\text{HCl}:\text{HNO}_3:\text{DI Water}$ (1:1:3) แล้วล้างสารไวแสง AZ ออกให้หมด ได้ตัวต้านทานไฟฟ้ามีค่า 4.404 $\text{k}\Omega$ ดังรูปที่ 5 (g)
- 8) หมุนเคลือบสารไวแสง SU-8 เบอร์ 2002 แล้วฉายแสงอัลตราไวโอเลตให้แข็งตัวทั้งแผ่น แต่เปิดฉายเฉพาะบริเวณที่ใช้ในการเชื่อมต่อสายไฟเพื่อใช้ในการวัดผล สารไวแสงชั้นนี้ใช้เป็นชั้นป้องกันตัวต้านทานไฟฟ้า ดังรูปที่ 5 (h)

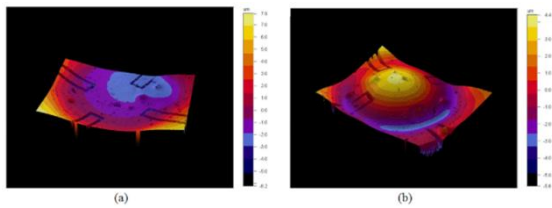
เมื่อทำการสร้างตัวตรวจรู้ความดันเสร็จสิ้นแล้วจะได้ลักษณะชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 6 โครงสร้างตัวตรวจรู้เป็นไโคอะแฟรมรูปวงกลมที่สร้างด้วยสารไวแสง SU-8 ขนาดรัศมี 500 μm หนา 38 μm มีตัวต้านทานไฟฟ้าพาดผ่านเข้าไปบริเวณไโคอะแฟรมทั้งหมดสี่ตัว มีค่าความต้านทานไฟฟ้า 4.404 $\text{k}\Omega$



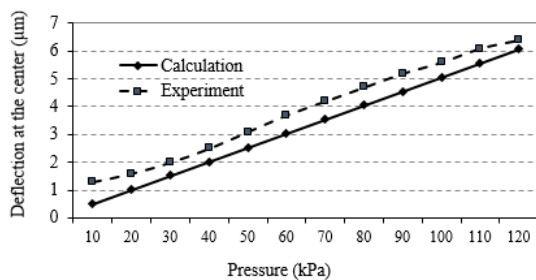
รูปที่ 6 ตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้

3. การทดสอบและผลการทดสอบ

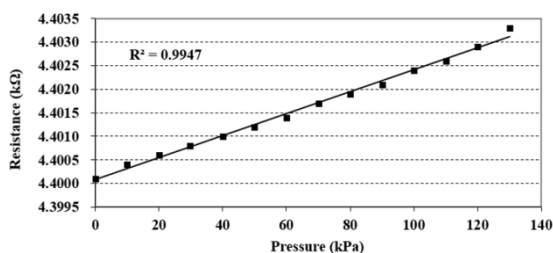
ทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน โดยปล่อยก๊าซไนโตรเจนทางด้านล่างของตัวตรวจรู้ ไโคอะแฟรมของตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นจะเกิดการโก่งตัวดังรูปที่ 7 ซึ่งวัดด้วยเครื่องวัดความหนา และเปรียบเทียบการโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของไโคอะแฟรมจากการคำนวณและตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นที่มีความหนา 38 μm ได้กราฟดังรูปที่ 8 เห็นได้เมื่อความดันเพิ่มมากขึ้นระยะโก่งตัวของไโคอะแฟรมเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ค่าที่วัดได้นั้นมีค่าเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) เท่ากับ 0.58 μm และเมื่อไโคอะแฟรมโก่งตัวสูงขึ้นจะทำให้เกิดความเครียดขึ้นที่ตัวต้านทานไฟฟ้าสเตรนเกจที่อยู่บนไโคอะแฟรม จึงเป็นผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปตามความเครียดที่เกิดขึ้น ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามความดันที่ได้รับ แสดงดังรูปที่ 9 เห็นได้ว่าค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความดันก๊าซเพิ่มขึ้น ซึ่งมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ 0.0269 Ω/kPa



รูปที่ 7 ภาพการวัดโก่งตัวของไดอะแฟรมรูปวงกลมจาก
เครื่องวัดความหนา (a) 0 kPa (b) 120 kPa



รูปที่ 8 กราฟค่าการโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของตัวตรวจวัดที่
สร้างขึ้นและค่าจากการคำนวณ

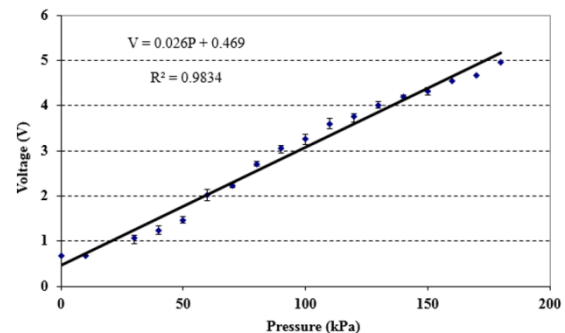


รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน
ไฟฟ้าและความดันก๊าซ

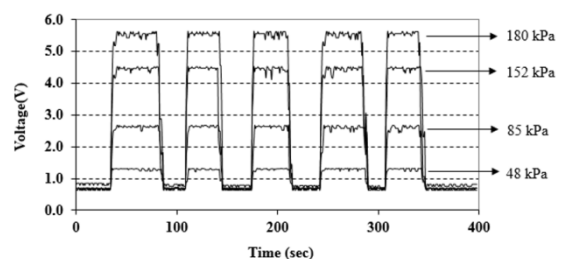
ทำการสอบเทียบ (Calibration) ตัวตรวจวัดความดันที่สร้างขึ้นกับตัวตรวจวัดเชิงพาณิชย์ MPX 5700 ซึ่งสามารถวัดความดันได้ในช่วง 0-700 kPa ค่าความไว 6.4 mV/kPa ช่วงเวลาในการตอบสนอง 1 ms ค่าความแม่นยำ $\pm 2.5\%$ ค่า Full scale output 4.7 V และค่า Full scale span 4.5 V ที่อุณหภูมิ 0-85°C โดยเริ่มจากการปล่อยก๊าซไนโตรเจนให้ก๊าซไหลไปยังตัวตรวจวัดความดันที่สร้างขึ้นและ MPX 5700 พร้อมกัน ตัวตรวจวัดที่สร้างขึ้นได้ทำการต่อกับวงจรวัดสัญญาณและวงจรขยายสัญญาณ และต่อกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่ออ่านค่าความดันก๊าซพร้อมกันทำการสอบเทียบที่อุณหภูมิห้อง ได้กราฟรูปที่ 10 ตัวตรวจวัดที่สร้างขึ้นนั้นเริ่มตอบสนองที่ความดันก๊าซ 30 kPa ค่าความแม่นยำ $\pm 10\%$ ค่า Full scale output 4.95 V Full scale span 4.28 V ความไว 26 mV/kPa ค่าคลาดเคลื่อน

± 7.3 kPa เมื่อเทียบกับ MPX5700 ซึ่งค่าความไวขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ใช้ทำเป็นตัวต้านทานไฟฟ้า ซึ่งตรงกันกับนิยามใช้โลหะนิโครม เนื่องจากมีความไวของสเตรกสูงและสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานต่ำ

เพื่อทดสอบความน่าเชื่อถือได้ (Reliability) เช่น ผลตอบสนอง (Response) การกลับคืนสภาพเดิม (Recovery) หรือ ความล้า (Fatigue) ของตัวตรวจวัดความดัน ทำการทดสอบโดยป้อนความดันก๊าซที่ระดับความดันต่างๆในรูปแบบขั้นบันได ทำซ้ำ 4 ครั้ง แล้วจับสัญญาณแรงดันเอาต์พุตโดยใช้ฮอสซิลโคปบันทึกลักษณะสัญญาณแรงดันไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 11 เวลาในการตอบสนองเท่ากับ (Rise time) 2.3 วินาที ค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ ± 0.5 วินาที ชนิดโลหะของตัวต้านทานไฟฟ้าและความหนาของไดอะแฟรมมีผลต่อการตอบสนอง หากไดอะแฟรมมีความหนาน้อยจะทำให้ตอบสนองทางเวลาน้อยด้วย



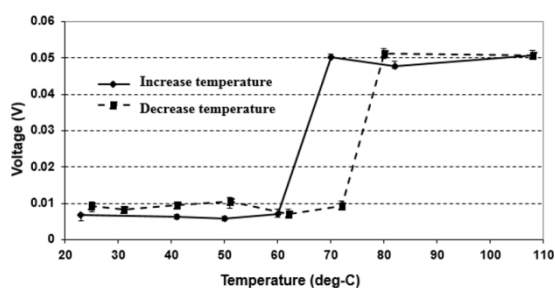
รูปที่ 10 กราฟแรงดันเอาต์พุตและความดันก๊าซ



รูปที่ 11 กราฟผลการตอบสนองทางเวลา

อุณหภูมิมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของโลหะผสม เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้โลหะผสมมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิโดยการนำตัวตรวจวัดที่สร้างขึ้นมาทดสอบโดยใส่ไว้ในเตาอบที่ควบคุมอุณหภูมิได้ ทำการวัด

แรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยไม่ป้อนก๊าซ เริ่มวัดที่อุณหภูมิห้องแล้วเพิ่มอุณหภูมิขึ้นทีละ 10°C จนถึง 100°C จากนั้นลดอุณหภูมิลง ทำซ้ำเช่นเดียวกันที่แต่ละอุณหภูมิ แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ที่แต่ละอุณหภูมิแสดงผลดังรูปที่ 12 แรงดันไฟฟ้าคงที่ในช่วง $25-60^{\circ}\text{C}$ และเริ่มเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 60°C เนื่องจากค่าความต้านทานไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง ทำให้ตัวตรวจรู้สามารถวัดความดันก๊าซได้ในช่วงอุณหภูมิ $25-60^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 12 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิ

4. สรุป

ในบทความนี้ได้ทำเสนอตัวตรวจรู้ความดันโดยใช้สารไวแสง SU-8 เป็นไดอะแฟรม โดยตัวตรวจรู้ความดันมีขนาดครึ่งมี $500\ \mu\text{m}$ ตัวต้านทานไฟฟ้าสร้างด้วยโลหะนิโครม สามารถวัดความดันก๊าซได้ในช่วง $30-180\ \text{kPa}$ ที่อุณหภูมิ $25-60^{\circ}\text{C}$ มีเวลาในการตอบสนองเท่ากับ 2.3 วินาที ค่าความแม่นยำ $\pm 10\%$ และค่า Full scale output 4.95 V, full scale span 4.28 V ซึ่งค่าความไวนี้เหมาะสมกับการวัดความดันในช่วงไม่สูงมากนักและเวลาในการตอบสนองนั้นมีค่ามากกว่าของตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ Motorola MPX 5700 แต่ยังสามารถนำไปใช้งานได้จริง

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) สำหรับอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Lin, A Simulation Program for the Sensitivity and Linearity of Piezoresistive Pressure Sensors,

Journal of MEMS Systems, Vol.8, No.4, pp. 514-522, December 1999.

- [2] L. Janovsky and R. Bauer, Absolute Pressure Sensors in CERMET Thick Film Technology, 26th International Spring Seminar on Electronics Technology, pp. 448-451, 2003.
- [3] J. Kim, J. Lee, and B. Choi, Fabrication and Characterization of Strain Gauge Integrated Polymeric Diaphragm Pressure Sensors, International journal of precision engineering and manufacturing, Vol. 14, No. 11, pp. 2003-2008, Nov 2013.
- [4] D. Lee and Y. Choi, A novel pressure sensor with a PDMS diaphragm, Microelectronic Engineering 85 pp. 1054-1058, 2008.
- [5] C.K.M. Fung, M.Q.H. Zhang, R.H.M. Chan and W.J. Li, A PMMA-based micro pressure sensor chip using carbon nanotubes as sensing elements, IEEE, 2005.
- [6] H.S. Ko, C.W. Liu, and C.W. Gau, Novel Fabrication of a Pressure Sensor with Polymer Material and Evaluation of its Performance, J. Micromech. Microeng, pp. 1640-1648, 2007.
- [7] R. Khakpour, Solmaz R. M. Mansouri and A.R. Bahadorimehr, Analytical Comparison for Square, Rectangular and Circular Diaphragms in MEMS Applications, International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications, pp 297-299. 2010
- [8] S. Timoshenko, and S.W. Krieger, Theory of Plates and Shells, McGraw-Hill, 1959.
- [9] T. Hsu, MEMS and Microsystems: Design, Manufacture, and Nanoscale Engineering, 2nd edition, John Wiley, 2008.
- [10] Microchem Corporation. www.microchem.com

การวิเคราะห์ค่านูลวิปเอฟเฟค สำหรับระบบคลังสินค้าแบบกระจายในโซ่อุปทาน

Analysis of Bullwhip Effect for Decentralized-Warehouse System in Supply Chain

สุพรรณษา ฟองเอม กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาค่านูลวิปเอฟเฟคของระบบคลังสินค้าแบบกระจายในโซ่อุปทาน และศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่านูลวิปเอฟเฟค โครงสร้างโซ่อุปทานประกอบด้วยหนึ่งผู้ผลิต สองคลังสินค้า และสองกลุ่มลูกค้า โดยที่ความต้องการที่เข้ามาในคลังสินค้าโดยรวมให้เป็นไปตามตัวแบบออเทอริเกรสชันอันดับที่หนึ่ง [The First Order Autoregressive, AR(1)] แต่ละคลังสินค้าในโซ่อุปทานจะทำการคำนวณหาปริมาณการสั่งซื้อ ส่งให้กับผู้ผลิต โดยใช้เทคนิคการพยากรณ์แบบถ่วงเฉลี่ยเคลื่อนที่และใช้นโยบายการจัดการสินค้าคงคลังเป็นแบบสั่งซื้อที่เหมาะสม (Order-up-to Inventory Level) ผู้วิจัยได้จำลองโมเดลของระบบขึ้นมา พบว่า ส่วนแบ่งทางการตลาดไม่มีผลกระทบต่อค่านูลวิปเอฟเฟค นอกจากนี้ จากการกำหนดเงื่อนไขและวิธีการวิจัยดังกล่าว จะเกิดพฤติกรรมนูลวิปเอฟเฟคขึ้นในระบบตลอด เนื่องจากค่านูลวิปเอฟเฟคมากกว่าหนึ่งเสมอ ยกเว้นกรณีที่พารามิเตอร์ของตัวแบบออเทอริเกรสชัน (ϕ) เท่ากับ 1 หรือ -1

คำสำคัญ : โซ่อุปทาน นูลวิปเอฟเฟค ระบบคลังสินค้าแบบกระจาย ส่วนแบ่งทางการตลาด

Abstract

This paper aimed to study the bullwhip effects of the decentralized-warehouse system in the supply chain, and its concerned factors were examined. The supply chain structure consisted of one manufacturer, two warehouses and two customer groups. The total incoming demand process was assumed to be the first order autoregressive [AR(1)] model. Each of the warehouses would calculate the order quantities received by the manufacturer with the moving average forecasting technique and the order-up-to inventory policy. The researchers simulated the model and found that the parameter of market share did not affect the bullwhip effect. In addition, the bullwhip effects in the system always existed, because the values of bullwhip effects were always greater than one, except when the parameter (ϕ) of AR(1) was equal to one or negative one.

Keywords : Supply Chain, Bullwhip Effect, Decentralized-Warehouse System, Market Share

1. บทนำ

บูลวิปเอฟเฟกต์ (Bullwhip Effect) หรือ ปรากฏการณ์แส้ม้า หมายถึง ปรากฏการณ์ที่มีความผันผวนในการบริหารงานโซ่อุปทาน Lee et al. [1] กล่าวว่าบูลวิปเอฟเฟกต์จะก่อให้เกิดสินค้าขาดหรือสินค้าเกินจากความต้องการของตลาด โดยสาเหตุหลักของปัญหานี้เกิดจากการขาดประสิทธิภาพของกระบวนการ ขาดความสอดคล้องของสารสนเทศ และขาดการประสานงานของคู่ค้าในโซ่อุปทาน ทำให้สมาชิกในโซ่อุปทานไม่ทราบข้อมูลความต้องการที่แท้จริงของลูกค้า จึงทำให้มีการสั่งซื้อสินค้าหรือวัตถุดิบเกินความจำเป็น ซึ่งเมื่อข้อมูลนี้ถูกส่งต่อกันไป ก็จะทำให้มีการเผื่อสินค้าเอาไว้ในแต่ละชั้นมากขึ้นเรื่อยๆ

ในงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาอิทธิพลของวิธีการพยากรณ์ความต้องการสินค้าแบบต่างๆต่อบูลวิปเอฟเฟกต์ ตัวอย่างเช่น วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลในงานวิจัยของ Chen et al. [2] วิธีถ่วงเฉลี่ยเคลื่อนที่ในงานวิจัยของ Chen et al. [3] และพยากรณ์ด้วยวิธีค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่ต่ำที่สุด (The Minimum Mean Square Error, MMSE) ในงานวิจัยของ Luong [4] และพบการใช้ MMSE ในงานวิจัยของ Sirikasemsuk [5,6] เป็นต้น

ปกติในช่วงเริ่มต้นของการศึกษาบูลวิปเอฟเฟกต์ในโซ่อุปทาน โครงสร้างมักจะเป็นแบบอย่างง่าย โดยที่ระบบนี้ประกอบด้วยหนึ่งผู้ผลิตและหนึ่งผู้ค้าปลีก เช่น ในงานวิจัยของ Chen et al. [2,3] และ Luong [4] นอกจากนี้ยังพบว่าในงานวิจัยต่างๆ ที่ศึกษาปรากฏการณ์บูลวิปเอฟเฟกต์ในโซ่อุปทานโครงสร้างอื่นๆ ด้วย อาทิ โซ่อุปทานที่มีโครงสร้างแบบสั่งซื้อจากสองแหล่ง (Dual Sourcing Model) ซึ่งประกอบด้วยหนึ่งผู้จัดส่งวัตถุดิบ สองแหล่งกระจายสินค้า และหนึ่งผู้ค้าปลีก ในงานวิจัยของ Sirikasemsuk [6] เป็นต้น

แต่การศึกษามูลวิปเอฟเฟกต์ในส่วนของลูกค้าแบบกระจาย ซึ่งประกอบด้วยคลังสินค้า 2 แห่ง แต่ละแห่งตอบสนองความต้องการของกลุ่มลูกค้าแยกออกจากกันตามรูปที่ 1 ยังมีการให้ความสำคัญที่น้อยอยู่ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์บูลวิปเอฟเฟกต์ที่เกิดขึ้นในระบบคลังสินค้าแบบกระจาย นอกจากนี้ยังได้

ศึกษาอิทธิพลของส่วนแบ่งทางการตลาด (α) ช่วงเวลาในการพยากรณ์ความต้องการแบบถ่วงเฉลี่ยเคลื่อนที่ (p_{d_i}) และพารามิเตอร์ของตัวแบบออเทอริเกรสชัน ($\emptyset$) ซึ่งเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อค่าบูลวิปเอฟเฟกต์ด้วย

2. สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

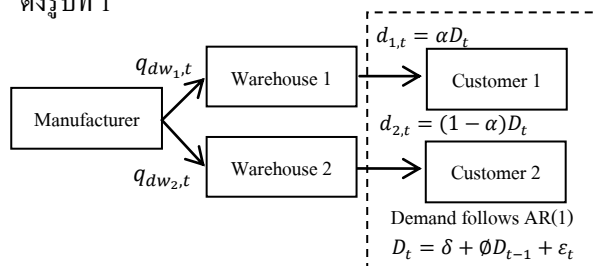
สัญลักษณ์และความหมายต่างๆ ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่

BW_{dw}	บูลวิปเอฟเฟกต์ของระบบคลังสินค้าแบบกระจาย
i	ดัชนีของคลังสินค้าและกลุ่มของลูกค้า โดยที่ $i=1$ หรือ 2
D_t	ความต้องการของลูกค้าทั้งหมดในช่วงเวลา t
$d_{i,t}$	ความต้องการของลูกค้ากลุ่มที่ i ในช่วงเวลา t
$q_{dw,t}$	ปริมาณการสั่งซื้อของคลังสินค้าโดยรวมทั้งสองแห่งที่เริ่มต้นของช่วงเวลา t
$q_{dw_i,t}$	ปริมาณการสั่งซื้อของคลังสินค้าแห่งที่ i ที่เริ่มต้นของช่วงเวลา t
$AR(1)$	ออเทอริเกรสชันอันดับที่หนึ่ง
δ	พารามิเตอร์คงที่ของตัวแบบออเทอริเกรสชัน
$\emptyset$	พารามิเตอร์ของตัวแบบออเทอริเกรสชัน
ε_t	ค่าความคลาดเคลื่อนที่ช่วงเวลา t ของตัวแบบออเทอริเกรสชัน โดยที่มีการแจกแจงแบบปกติด้วยพารามิเตอร์ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และค่าความแปรปรวนเท่ากับ σ_ε^2 ซึ่งแต่ละค่าจะมีความเป็นอิสระต่อกัน
σ_ε^2	ความแปรปรวนของค่าความคลาดเคลื่อน
α	ส่วนแบ่งทางการตลาด มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1
L	ระยะเวลานำส่งสินค้าระหว่างผู้ผลิตถึงแต่ละคลังสินค้า
p_{d_i}	ช่วงเวลาในการพยากรณ์ความต้องการแบบถ่วงเฉลี่ยเคลื่อนที่ของลูกค้ากลุ่มที่ i
z	ระดับการให้บริการ
$s_{i,t}$	ระดับสินค้าคงคลังแห่งที่ i สูงสุดที่ต้องการ ณ ช่วงเวลา t
$\hat{d}_t$	ค่าพยากรณ์ความต้องการของลูกค้าในช่วงเวลา t
$\hat{d}_{i,t}^L$	ค่าพยากรณ์ความต้องการของลูกค้าระหว่างระยะเวลานำของคลังสินค้าแห่งที่ i

$\sigma_{i,t}^L$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าพยากรณ์ความต้องการลูกค้ากับความต้องการของลูกค้าที่เกิดขึ้นจริงในช่วงระยะเวลา n ของคลังสินค้าแห่งที่ i

3. รูปแบบของระบบคลังสินค้าแบบกระจาย

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาปรากฏการณ์บูลิวิเอฟเฟกต์ที่เกิดขึ้นในระบบคลังสินค้าแบบกระจาย ซึ่งจะประกอบไปด้วย ผู้ผลิต 1 แห่ง คลังสินค้า 2 แห่ง และกลุ่มลูกค้า 2 กลุ่ม ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างของระบบคลังสินค้าแบบกระจาย

กำหนดให้รูปแบบของความต้องการที่เข้ามาให้เป็นแบบออเทอเรกเรชันอันดับที่หนึ่ง [AR(1)] ปกติคลังสินค้าจะไม่รู้รูปแบบความต้องการของสินค้าเป็นแบบใด ดังนั้นจึงมีการพยากรณ์ความต้องการของลูกค้าโดยใช้วิธีการพยากรณ์แบบถ่วงเฉลี่ยเคลื่อนที่เนื่องจากเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย และกำหนดให้ใช้นโยบายการจัดการสินค้าคงคลังเป็นแบบสั่งซื้อที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการหาค่าบูลิวิเอฟเฟกต์ของระบบ

โดยที่ลูกค้ากลุ่มที่ 1 จะทำการซื้อกับคลังสินค้าที่ 1 และลูกค้ากลุ่มที่ 2 จะทำการซื้อกับคลังสินค้าที่ 2 ซึ่งแสดงว่าในระบบคลังสินค้าแบบกระจายจะมีสถานที่เก็บสินค้าอยู่ 2 แห่ง คือ คลังสินค้าที่ 1 และ 2 โดยความต้องการของลูกค้ากลุ่มที่ 1 มีค่า $d_{1,t}$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ αD_t และความต้องการของลูกค้ากลุ่มที่ 2 มีค่า $d_{2,t}$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $(1 - \alpha)D_t$

ในลำดับถัดมาคลังสินค้าของแต่ละแห่งก็จะทำการคำนวณหาปริมาณการสั่งซื้อเพื่อส่งไปที่ผู้ผลิตแห่งเดียวกัน โดยแต่ละคลังสินค้า จะคำนวณหาปริมาณการสั่งซื้ออย่างอิสระต่อกัน หลังจากที่มีความต้องการของลูกค้าเข้ามาที่ช่วงเริ่มต้นเวลา t แต่ละคลังสินค้าที่ 1 และที่ 2 จะทำการพยากรณ์ความต้องการของลูกค้าของตัวเอง และมีการคำนวณระดับสินค้าคงคลังสูงสุดที่ต้องการ ($s_{i,t}$) เพื่อไปคู่

การคำนวณหาปริมาณการสั่งซื้อ $q_{dw1,t}$ และ $q_{dw2,t}$ ตามลำดับ

ผู้ผลิตจะรับความต้องการของคลังสินค้าที่ 1 และที่ 2 คือ $q_{dw1,t}$ และ $q_{dw2,t}$ ที่เริ่มต้นช่วงเวลา t พร้อมกัน และกำหนดให้ผู้ผลิตจะทำการส่งมอบสินค้าไปยังคลังสินค้าทั้ง 2 แห่งที่เวลาเท่ากันด้วยเวลานำส่ง 1 หน่วยเวลา ($L=1$) นั่นคือคลังสินค้าทั้ง 2 แห่ง จะได้รับสินค้าจากผู้ผลิตที่เริ่มต้นของช่วงเวลา $t+1$

ค่าบูลิวิเอฟเฟกต์ของระบบคลังสินค้าแบบกระจาย (BW_{dw}) หากจากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (1)

$$BW_{dw} = \frac{\text{VARIANCE}(q_{dw1,t} + q_{dw2,t})}{\text{VARIANCE}(d_{1,t} + d_{2,t})} = \frac{\text{VARIANCE}(q_{dw,t})}{\text{VARIANCE}(D_t)} \quad (1)$$

นั่นคือ บูลิวิเอฟเฟกต์เท่ากับค่าความแปรปรวนของปริมาณการสั่งซื้อโดยรวมหารด้วยความแปรปรวนของความต้องการของลูกค้าจริง

หมายเหตุ ในงานวิจัยนี้จะไม่พิจารณากรณีที่คลังสินค้าใช้เทคนิคการพยากรณ์ความต้องการของลูกค้าเป็นแบบ AR(1) หรือในกรณีที่ระยะเวลานำส่งสินค้าระหว่างผู้ผลิตถึงคลังสินค้าเท่ากับ 0 เนื่องจากทั้งสองเงื่อนไขนี้ไม่ทำให้เกิดปรากฏการณ์บูลิวิเอฟเฟกต์ขึ้น ทำให้ความสำคัญของปัญหาจะไม่เกิดขึ้น

4. รูปแบบความต้องการเริ่มต้นและนโยบายการจัดการสินค้าคงคลัง

ความต้องการของลูกค้าโดยรวมเป็นแบบออเทอเรกเรชันอันดับที่หนึ่ง [AR(1)] ซึ่งหาได้จาก

$$D_t = \delta + \phi D_{t-1} + \varepsilon_t \quad (2)$$

ความต้องการของลูกค้าที่เข้ามาที่คลังสินค้าแห่งที่ 1 และ 2 จะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$d_{1,t} = \alpha D_t \quad (3)$$

$$d_{2,t} = (1 - \alpha) D_t \quad (4)$$

โดยที่ ϕ มีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 เพื่อให้ AR(1) เป็นรูปแบบคงที่ (Stable Process) และ α คือ ส่วนแบ่งทางการตลาดสำหรับลูกค้ากลุ่มที่ 1 ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 จะถูกนำมาใช้คำนวณหาปริมาณการสั่งซื้อของคลังสินค้าแต่ละแห่ง

การพยากรณ์ความต้องการของลูกค้าในช่วงเวลาถัดไป

จะใช้ข้อมูลความต้องการของลูกค้าแต่ละแห่งก่อนหน้านี้ในการคำนวณ ซึ่งคลังสินค้าแต่ละแห่งจะมีช่วงเวลาในการพยากรณ์ของแหล่งที่ 1 และ 2 คือ p_{d1} และ p_{d2} เป็นตัวกำหนดว่าจะใช้ข้อมูลย้อนกลับไปถึงหมดกี่ตัว โดยคลังสินค้าทั้ง 2 แห่งสามารถหาค่าพยากรณ์ความต้องการของลูกค้าได้จาก

$$\hat{d}_{i,t} = \frac{\sum_{j=1}^{p_{d_i}} d_{i,t-j}}{p_{d_i}} \quad (5)$$

คลังสินค้าของแต่ละแห่งจะทำหน้าที่ในการคำนวณหาค่าปริมาณการสั่งซื้อเพื่อส่งให้กับผู้ผลิต จากสูตรนี้

$$q_{dw,i,t} = s_{i,t} - (s_{i,t-1} - d_{i,t-1}) \quad (6)$$

ซึ่งสามารถหาระดับสินค้าคงคลังสูงสุดของคลังสินค้าที่ 1 และคลังสินค้าที่ 2 ได้จาก

$$s_{i,t} = \hat{d}_{i,t} + z\sigma_{i,t}^L \quad (7)$$

โดยที่ค่าความต้องการของลูกค้าระหว่างระยะเวลานำจากการพยากรณ์ของคลังสินค้าที่ 1 และคลังสินค้าที่ 2 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\hat{d}_{i,t}^L = L\hat{d}_{i,t} \quad (8)$$

เนื่องจากกำหนดให้ $L=1$ จึงทำให้ $\hat{d}_{i,t}^L = \hat{d}_{i,t}$

และในงานวิจัยนี้ กำหนดให้ค่า $z=0$ เพื่อลดความซับซ้อนของระบบลง ดังนั้นจะได้ $s_{i,t} = \hat{d}_{i,t}$

5. การจำลองระบบคลังสินค้าแบบกระจาย

จากรูปที่ 2 เป็นตัวอย่างการจำลองระบบคลังสินค้าแบบกระจาย โดยในแถวที่ 1 ถึงแถวที่ 6 จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน (อ้างอิงกับคอลัมน์) คือ ส่วนที่ 1 เป็นพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนด (Input) ให้แก่ระบบ คือ คอลัมน์ A ถึง E และ ส่วนที่ 2 เป็นส่วนที่แสดงผลของระบบ (Output) คือ คอลัมน์ I และ J โดยค่าบูลวิปเอฟเฟคจะแสดงอยู่ในเซลล์ที่ J4 ถึง J6 ซึ่งคำนวณมาจากสมการที่ (1)

	A	B	C	D	E	I	J	K	O	P
1	INPUT					OUTPUT				
2	phi (ϕ)	0.80	Lead Time (L)	1	variance of order quantity ($q_{dw,1}$)	9.73				
3	delta (δ)	1050	z (service level=50%)	0	variance of demand (D_1)	7.25				
4	Dt ($t=0$)	960	period of moving average forecasting (1)	5	Bullwhip Effect (BW_{dw})	1.34				
5	variance error	2.60	period of moving average forecasting (2)	5						
6	market share (α)	0.20								
8	time (t)	error (normal dist.)	real demand by AR(1) (D_t)	demand customer 1 ($d_{1,t}$)	moving average forecasting (1)	order quantity 1 ($q_{dw,1,t}$)	demand customer 2 ($d_{2,t}$)	moving average forecasting (2)	order quantity 2 ($q_{dw,2,t}$)	$q_{dw,t}$
19	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
20	11	-1.11	4881.18	976.24	898.94	995.86	3904.95	3595.77	3983.44	4979.30
21	12	-0.23	4954.71	990.94	929.14	1006.44	3963.77	3716.57	4025.75	5032.19
22	13	0.59	5014.36	1002.87	953.24	1015.04	4011.49	3812.96	4060.16	5075.19
367	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
368	359	-0.86	5249.16	1049.83	1050.28	1049.89	4199.33	4201.11	4199.56	5249.45
369	360	-3.38	5245.95	1049.19	1050.17	1049.73	4196.76	4200.69	4198.92	5248.65

รูปที่ 2 ตัวอย่างการจำลองระบบคลังสินค้าแบบกระจายที่ช่วงเวลา t และ $p = 5$

ผู้วิจัยได้จำลองความต้องการของลูกค้าจากสมการที่(2) ตามคอลัมน์ C (แถวที่ 6 ลงไป) สามารถคำนวณหาค่าความแปรปรวนของความต้องการของลูกค้าตามเซลล์ที่ J3 ในรูปที่ 2 หลังจากนั้น จำลองให้คลังสินค้าแต่ละแห่งคำนวณค่าปริมาณการสั่งซื้อ โดยใช้สูตรสมการที่ (5) ถึง (8) จะได้ $q_{dw,t}$ ตามคอลัมน์ที่ P ผลลัพธ์ที่จำลองได้ในแต่ละส่วนของช่วงเวลาจะแสดงในแถวถัดลงมา และสามารถคำนวณหาค่าความแปรปรวนของปริมาณคำสั่งซื้อได้ตามเซลล์ที่ J2 ในรูปที่ 2 โดยได้ทำการจำลองทั้งหมด 360 ช่วงเวลาในหนึ่งครั้งการจำลอง

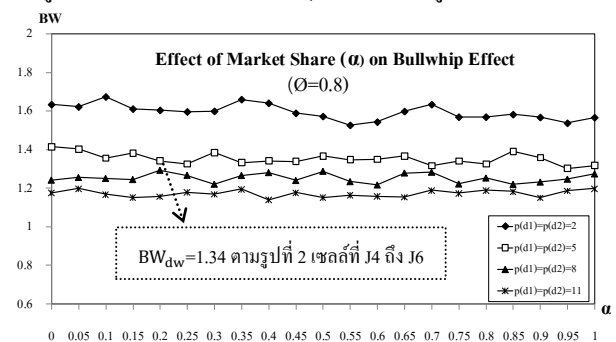
6. ผลกระทบของปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนบทความของ Chen et al. [3] ทำให้ทราบว่าปัจจัย δ , σ_z^2 ไม่มีผลต่อค่าบูลวิปเอฟเฟค อีกทั้งปัจจัยที่กำหนดให้มีค่าคงที่ในงานวิจัยนี้ คือ $L=1$ และ $z=0$ เพื่อลดความซับซ้อนของระบบการจำลอง ดังนั้นจะเหลือปัจจัยที่ทำการพิจารณาต่อไปคือ ϕ , p_{d1} , p_{d2} และ α

ในงานวิจัยนี้ได้ให้ความสนใจที่กรณี $p_{d1} = p_{d2}$ ซึ่งเท่ากับ p ถัดมาผลกระทบของปัจจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถแบ่งได้เป็น 3 หัวข้อดังนี้

1) ผลกระทบของปัจจัย α ต่อ BW_{dw}

การศึกษามูลค่าของปัจจัย α ต่อ BW_{dw} ดังแสดงในรูปที่ 3 จากวิธีการจำลองพฤติกรรมของบูลวิปเอฟเฟค



รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัย α ต่อ BW_{dw}

ซึ่งอธิบายได้ว่า เมื่อค่า α เปลี่ยนแปลงไปตามแกน x ค่าบูลวิเปฟเฟคมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไม่มากนักหรือค่อนข้างใกล้เคียงกัน

ผลการทดสอบทางสถิติด้วยวิธีแผนแบบสุ่มบล็อกสมบูรณ์ (Completely Randomized Design in Block, CRDB) พบว่า ค่า $P\text{-value} = 0.233$ ซึ่งเป็นการยืนยันว่า α ไม่มีผลกระทบต่อค่า BW_{dw}

2) ผลกระทบของปัจจัย ϕ ต่อ BW_{dw}

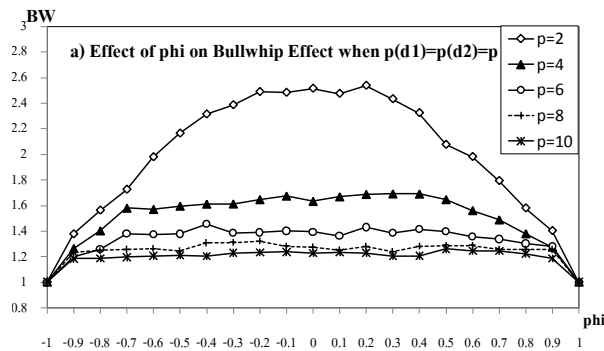
จากการจำลองระบบห่วงโซ่อุปทานดังกล่าว ปรากฏการณ์บูลวิเปฟเฟคจะเกิดขึ้นเสมอ เมื่อ $|\phi| < 1$ ไม่ว่าค่า p และ α จะเป็นค่าใดก็ตาม เพราะจะทำให้ค่าบูลวิเปฟเฟคมากกว่า 1 เสมอ

ในกรณีที่ค่า p เป็นจำนวนคู่ จากผลลัพธ์ที่ได้ในรูปที่ 4(a) ค่า BW_{dw} จะมีลักษณะเป็นรูปพาราโบลาว่าค่า ϕ นี้ BW_{dw} จะเพิ่มขึ้นค่อนข้างจะเร็ว เมื่อ ϕ เพิ่มขึ้นจาก -1 ไปจนถึง ϕ ค่าหนึ่งที่ค่าหนึ่ง หลังจากนั้นค่า BW_{dw} จะค่อยๆ ลดลง เมื่อ ϕ เข้าสู่ 1 จะได้ค่า BW_{dw} เข้าสู่ 1

ในกรณีที่ค่า p เป็นจำนวนคี่ จากรูปที่ 4(b) ค่า BW_{dw} จะค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ เมื่อ ϕ เพิ่มขึ้นจาก -1 ไปจนถึง 1

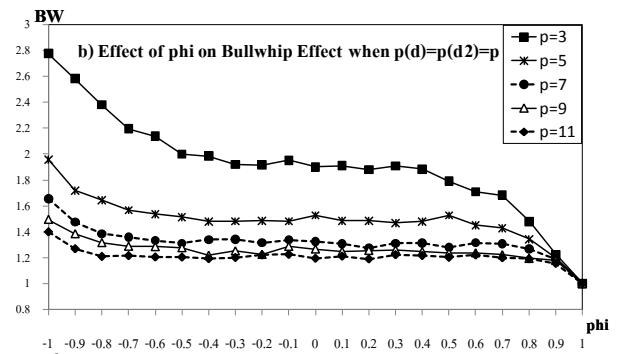
ดังนั้น ที่ p มีค่าน้อย เมื่อค่า ϕ เปลี่ยนไป ค่า BW_{dw} จะอ่อนไหวและเปลี่ยนแปลงง่ายกว่าที่ p มีค่ามากๆ ผู้วิจัยให้ข้อสังเกตว่า ที่ p มีค่าน้อย ค่า ϕ จะส่งผลต่อค่า BW_{dw} เป็นอย่างมาก

นอกจากนี้ เมื่อค่า p มากๆ ทั้งที่เป็นจำนวนคี่และจำนวนคู่ ตั้งแต่ $p=6$ หรือ 7 ขึ้นไป จะได้ค่า BW_{dw} ค่อนข้างคงที่ หรือเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เมื่อ ϕ เปลี่ยนแปลงไปตามช่วง -1 ถึง 1 และที่ p มากๆ ค่า BW_{dw} จะมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า ϕ



รูปที่ 4(a) กราฟความสัมพันธ์ของปัจจัย ϕ ต่อ BW_{dw} เมื่อ

$$p_{d1} = p_{d2} = p \text{ เป็นจำนวนคู่}$$



รูปที่ 4(b) กราฟความสัมพันธ์ของปัจจัย ϕ ต่อ BW_{dw} เมื่อ

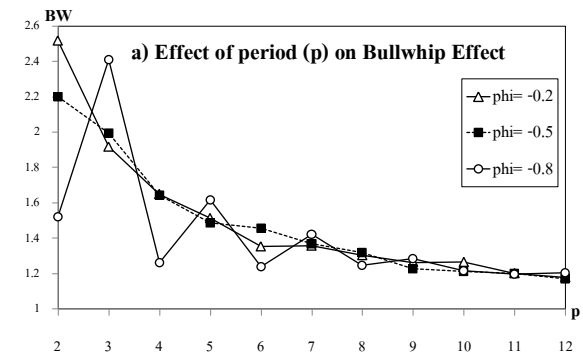
$$p_{d1} = p_{d2} = p \text{ เป็นจำนวนคี่}$$

3) ผลกระทบของปัจจัย p ต่อ BW_{dw}

จากรูปที่ 5(a) และ 5(b) จะพบว่า เมื่อ p เพิ่มขึ้นจากน้อยไปมาก จะทำให้ค่า BW_{dw} มีลักษณะลดลงเป็นลักษณะเอ็กซ์โพเนนเชียล และสุดท้ายที่ p มากๆ จะทำให้ค่าบูลวิเปฟเฟคลดลงและเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง

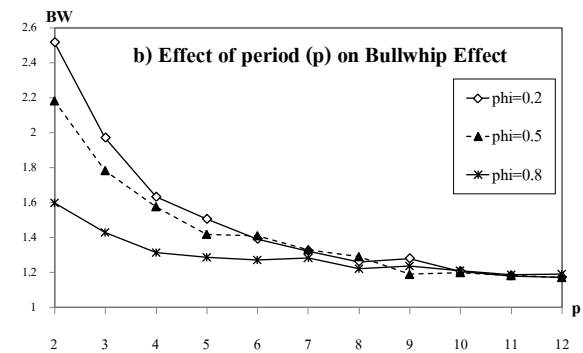
จากรูปที่ 5(a) แสดงค่า BW_{dw} เมื่อพิจารณาค่า ϕ เป็นลบ ถ้าค่า p น้อยๆ ค่า BW_{dw} จะมีการเปลี่ยนแปลงหรือกวัดแกว่งมาก

จากรูปที่ 5(b) แสดงค่า BW_{dw} เมื่อพิจารณาค่า ϕ เป็นบวก ค่า BW_{dw} จะมีการเปลี่ยนแปลงหรือกวัดแกว่งไม่มาก



รูปที่ 5(a) กราฟความสัมพันธ์ของปัจจัย p ต่อ BW_{dw}

เมื่อ ϕ เป็นค่าลบ



รูปที่ 5(b) กราฟความสัมพันธ์ของปัจจัย p ต่อ BW_{dw}

เมื่อ ϕ เป็นค่าบวก

ข้อสังเกตเพิ่มเติมจะเห็นว่า นูลวิปเอฟเฟคของระบบ คลังสินค้าแบบกระจายมีค่าเท่ากับระบบโซ่อุปทานอย่างง่าย (ประกอบด้วยหนึ่งผู้จัดส่งวัตถุดิบและหนึ่งผู้ค้าปลีก) ผลการเปรียบเทียบอ้างอิงจากสูตรทางคณิตศาสตร์งานวิจัยของ Chen et al. [3] ดังแสดงในตารางที่ 1 และจากการทดสอบทางสถิติด้วยวิธี Paired t-test พบว่า ได้ค่า P-value = 0.625 ซึ่งเป็นการยืนยันว่าค่านูลวิปเอฟเฟคของระบบโซ่อุปทานทั้งสองแบบไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 1 ตัวอย่างการเปรียบเทียบค่านูลวิปเอฟเฟคระหว่างระบบคลังสินค้าแบบกระจายกับระบบโซ่อุปทานอย่างง่าย โดยใช้ p เท่ากันทั้งสองระบบ

	ระบบคลังสินค้าแบบกระจาย (จากการจำลองระบบ)	ระบบโซ่อุปทานอย่างง่าย (Chen et al. [3])
$\emptyset = 1, p = 2$	1.000	1.000
$\emptyset = 0.9, p = 4$	1.256	1.269
$\emptyset = 0.5, p = 6$	1.359	1.360
$\emptyset = 0.3, p = 8$	1.300	1.299
$\emptyset = -1, p = 2$	1.000	1.000
$\emptyset = -0.9, p = 4$	1.253	1.247
$\emptyset = -0.5, p = 6$	1.401	1.396
$\emptyset = -0.3, p = 8$	1.276	1.283

7. สรุปผลการวิจัย

จากนำเสนอในหัวข้อที่ผ่านมา สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่านูลวิปเอฟเฟค ได้แก่ พารามิเตอร์ของตัวแบบออเทอริเกรสชัน ($\emptyset$) และช่วงเวลาในการพยากรณ์ความต้องการแบบตัวเคลื่อนที่ p_{d_i} (หรือ p)

ค่า α ไม่มีผลต่อค่านูลวิปเอฟเฟค เมื่อกำหนดให้ $p_{d1} = p_{d2}$ ซึ่งสามารถดูพฤติกรรมของค่านูลวิปเอฟเฟคได้จากรูปที่ 2 นอกจากนี้ยังพบว่าที่ค่า p น้อยค่านูลวิปเอฟเฟคจะมีแนวโน้มที่สูงกว่าที่ค่า p มาก

จากการเปรียบเทียบค่านูลวิปเอฟเฟคระหว่างระบบคลังสินค้าแบบกระจายและระบบแบบง่าย (หนึ่งผู้จัดส่งวัตถุดิบ หนึ่งผู้ค้าปลีก และหนึ่งกลุ่มลูกค้า) ด้วยเงื่อนไขระบบคลังสินค้าดังกล่าว ส่งผลให้ค่านูลวิปเอฟเฟคมีค่าไม่แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้เน้นให้เห็นว่า ระบบคลังสินค้าแบบกระจาย ซึ่งมีคลังสินค้าอยู่ 2 แห่ง นั้นหมายถึงมีการ

จัดเก็บสินค้าอยู่ 2 แห่ง และมีการพยากรณ์ความต้องการ 2 ครั้งต่อช่วงเวลา ให้ผลค่านูลวิปเอฟเฟคไม่แตกต่างกับค่านูลวิปเอฟเฟคระบบแบบง่าย ซึ่งมีคลังสินค้าอยู่ 1 แห่ง และมีการพยากรณ์ความต้องการ 1 ครั้งต่อช่วงเวลา

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Lee, P. Padmanabhan and S. Whang, "Information Distortion in a Supply Chain: The Bullwhip Effect," Management Science, Vol.43, No.4, pp.546-558, April, 1997.
- [2] F. Chen, J.K. Ryan, and D. Simchi-Levi, "The Impact of Exponential Smoothing Forecasts on the Bullwhip Effect," Naval Research Logistics, Vol.47, No.4, pp.269-286, June, 2000.
- [3] F. Chen, Z. Drezner, J.K. Ryan, and D. Simchi-Levi, "Quantify The Bullwhip Effect in a Simple Supply Chain: The Impact of Forecasting, Lead Times, and Information," Management Science, Vol.46, No.3, pp.436-443, March, 2000.
- [4] H.T. Luong, "Measure of Bullwhip in Supply Chains with Autoregressive Demand Process," European Journal of Operation Research, Vol.180, No.3, pp. 1086-1097, August, 2007.
- [5] K. Sirikasemsuk, "Impact of Correlation Coefficient between Two Market Demands on Bullwhip Effect with AR(1) Models in Supply Chain," Proceedings of The 7th International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering, (ICII 2014), Vol.2, pp.313-318, October 25-26, 2014.
- [6] K. Sirikasemsuk and H.T. Luong, "Measure of Bullwhip Effect a Dual Sourcing Model," International Journal Operational Research, Vol.20, No.4, pp. 396-426, 2014.

การวิเคราะห์ผลประโยชน์ต่อต้นทุน ในการสร้างท่อขนส่งน้ำมันของประเทศไทย

Benefits-Costs Analysis for Oil Pipelines in Thailand

ณัฐชัย ก่อเผ่าพานิช

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการสร้างท่อขนส่งน้ำมันในบริเวณภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ได้แก่ เส้นทางจากจังหวัดสระบุรี ผ่านจังหวัดกำแพงเพชร ถึงจังหวัดลำปาง และเส้นทางจากจังหวัดสระบุรี ผ่านจังหวัดนครราชสีมา ถึงจังหวัดขอนแก่น ขั้นตอนการวิจัยเริ่มจากการคาดการณ์ความต้องการน้ำมันในอนาคตและปริมาณน้ำมันผ่านท่อ จากนั้นวิเคราะห์ต้นทุนการก่อสร้างและบริหารจัดการท่อน้ำมันและผลประโยชน์ที่จะได้รับจากโครงการซึ่งประกอบด้วย รายได้จากค่าบริการระบบท่อ ผลประโยชน์จากการลดอุบัติเหตุจากการขนส่งทางถนน ผลประโยชน์จากการลดการปล่อยมลพิษ ผลประโยชน์จากการลดการสูญเสียน้ำมันระหว่างการขนส่ง และ ผลประโยชน์จากการลดต้นทุนการขนส่ง การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์พบว่า อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) ของโครงการทั้ง 2 เส้นทางคิดเป็น 10.53% และ 12.86% ตามลำดับ และ เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ผลประโยชน์ต่อต้นทุน (Benefits-costs analysis) โดยใช้อัตราการคิดลดที่ 10% พบว่า อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุนของทั้ง 2 เส้นทาง เท่ากับ 1.05 และ 1.28 ตามลำดับ

คำสำคัญ : การวิเคราะห์ผลประโยชน์ต่อต้นทุน อัตราผลตอบแทนภายใน ท่อขนส่งน้ำมัน

Abstract

This research presents the economic worthiness analysis for the oil-pipeline-construction project in the north and the northeast of Thailand. The northern route traverses through Saraburi, Kamphangphet, and Lampang, while, the northeastern moves onward from Saraburi to Nakhonratchasima and Khonkaen. Research methodologies start with forecasting oil demand and volume throughput. Then, project investment and operating costs and relevant benefits are evaluated. These benefits are revenue from pipeline services, and, reduction of relating accidents, pollution, oil usage in transportation, and transportation cost. The project IRR for each route are 10.53% and 12.86% respectively. In addition, the benefits-cost ratio, using a discount rate of 10%, of the northern route is 1.05 and 1.28 for the northeastern.

Keywords : Benefit cost analysis, internal rate of return, Oil Pipeline

1. บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีรูปแบบการขนส่งน้ำมันหลากหลายรูปแบบ ได้แก่ ทางรถยนต์ ทางรถไฟ ทางเรือ และทางท่อ [1] ทั้งนี้ถ้าจะมีการผสมผสานรูปแบบการขนส่งเพื่อให้สามารถกระจายน้ำมันไปยังผู้บริโภคตามภูมิภาคต่างๆ ได้อย่างทั่วถึง โดยมีกรุงเทพมหานครเป็นศูนย์กลางการกระจายน้ำมันที่สำคัญ ซึ่งจะรับน้ำมันจากโรงกลั่นแล้วขนส่งต่อไปยังภูมิภาคต่างๆ ของประเทศ

การขนส่งที่มีความสำคัญต่อโครงสร้างการขนส่งน้ำมันของประเทศไทย คือ การขนส่งน้ำมันทางท่อ แต่ในปัจจุบันมีผู้ให้บริการขนส่งน้ำมันทางท่อเพียง 2 ราย ได้แก่ บริษัทขนส่งน้ำมันทางท่อจำกัด (FPT) และ บริษัทท่อส่งปิโตรเลียมไทยจำกัด (Thappline) ซึ่งมีเส้นทางท่อกว้างขนส่งน้ำมันรวมกันเพียงแค่ 460 กิโลเมตร และ สิ้นสุดที่คลังน้ำมันจังหวัดสระบุรีเท่านั้น [2]

ภาครัฐจึงได้มีแนวคิดที่จะทำการวางท่อขนส่งน้ำมันในบริเวณภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการขนส่งน้ำมันและลดปัญหาต่างๆ ข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะทำการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการนี้ เพื่อทำการประเมินความคุ้มค่าของโครงการก่อนที่จะมีการลงทุนก่อสร้างจริงเนื่องจากโครงการนี้ต้องใช้จำนวนเงินลงทุนเป็นจำนวนมหาศาล หากลงทุนไปโดยไม่ทราบว่าการโครงการดังกล่าวมีความคุ้มค่าหรือไม่ อาจจะทำให้เกิดความเสียหายในภายหลัง โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบผลประโยชน์ต่อต้นทุน (Benefits-costs analysis) ซึ่งผล

จากการวิเคราะห์ดังกล่าวจะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้ในการตัดสินใจลงทุนของภาครัฐ และ นำไปประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุนโครงการอื่นๆ ที่มีลักษณะคล้ายกัน

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการวางท่อส่งน้ำมัน บริเวณพื้นที่ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

3. ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการวางท่อฯ จะใช้วิธีการวิเคราะห์ผลประโยชน์ต่อต้นทุน (Benefits-costs analysis: BCA) และ อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal rate of return: IRR)
- 2) กำหนดอายุโครงการเท่ากับ 30 ปี (พ.ศ. 2561-2590)

4. ขั้นตอนการศึกษา

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการวางท่อขนส่งน้ำมันของประเทศไทย มีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

- 1) ศึกษาเส้นทางท่อกว้างขนส่งน้ำมัน
- 2) คำนวณปริมาณการใช้ปริมาณในรายจังหวัด
- 3) ประเมินปริมาณน้ำมันผ่านท่อ
- 4) ประเมินต้นทุนและผลประโยชน์
- 5) วิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์
- 6) สรุปผลการศึกษา

ตารางที่ 1 : ตารางแสดงปริมาณคาดการณ์การใช้ปริมาณในรายจังหวัด ณ ปีต่างๆ (หน่วย ล้านลิตร)

Demand Forecast	2561	2565	2570	2575	2580	2585	2590
ภาคเหนือ							
ขอนแก่น	651	749	892	1060	1252	1444	1621
อุดรธานี	495	579	703	851	1023	1193	1356
เลย	107	128	162	204	253	302	351
หนองคาย	85	93	104	115	129	144	155
มหาสารคาม	168	199	244	299	363	427	488
ร้อยเอ็ด	191	219	261	310	366	421	473

Demand Forecast	2561	2565	2570	2575	2580	2585	2590
ภาคเหนือ							
กาแฟลิ้นจี่	140	163	198	238	286	332	377
สกลนคร	161	190	234	287	348	409	468
นครพนม	85	98	117	140	166	192	216
มุกดาหาร	71	84	104	127	154	181	207
บึงกาฬ	34	38	42	47	53	58	63
หนองบัวลำภู	55	62	73	85	99	113	126
นครราชสีมา	1044	1146	1285	1438	1617	1798	1948
บุรีรัมย์	420	487	586	703	837	971	1097
สุรินทร์	203	233	277	328	387	446	500
ศรีสะเกษ	242	283	343	416	499	583	662
อุบลราชธานี	342	391	461	542	636	729	814
ยโสธร	84	95	110	128	147	167	185
ชัยภูมิ	177	205	246	294	349	405	456
อำนาจเจริญ	35	39	45	52	59	67	74
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ							
เชียงใหม่	480	539	623	718	828	938	1034
ลำพูน	88	97	108	121	135	150	162
ลำปาง	327	365	417	476	544	612	671
แพร่	94	102	112	123	135	149	159
น่าน	94	104	119	135	153	172	188
พะเยา	77	88	102	119	138	157	174
เชียงราย	264	304	362	430	509	587	659
แม่ฮ่องสอน	37	41	45	50	56	62	66
อุดรดิษฐ์	95	108	127	149	175	200	223
กำแพงเพชร	153	173	202	236	274	312	346
ตาก	183	202	229	258	293	327	356
สุโขทัย	158	180	209	244	283	323	358
พิษณุโลก	383	429	494	567	651	736	809
พิจิตร	184	209	244	285	331	377	419
เพชรบูรณ์	173	199	236	280	331	381	427

5. ผลการศึกษา

5.1 เส้นทางวางท่อขนส่งน้ำมัน

เส้นทางวางท่อขนส่งน้ำมันสำหรับโครงการฯ ได้กำหนดไว้จำนวน 2 เส้นทาง ได้แก่

- 1) เส้นทางสระบุรี-กำแพงเพชร-ลำปาง (SB-KP-LP) ซึ่งจะวิ่งตามแนวเส้นทางหลวงหมายเลข 1 โดยจะเริ่มต้นที่อำเภอเสนาห์ จังหวัดสระบุรี และสิ้นสุดที่อำเภอสบปราบ จังหวัดลำปาง ระยะทางรวม 514.5 กิโลเมตร
- 2) เส้นทางสระบุรี-นครราชสีมา-ขอนแก่น (SB-NR-KK) ซึ่งจะวิ่งตามแนวเส้นทางหลวงหมายเลข 2 สลับกับทางรถไฟ โดยจะเริ่มต้นที่อำเภอเสนาห์ จังหวัดสระบุรี และสิ้นสุดที่อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น ระยะทางรวม 337.1 กิโลเมตร

5.2 ปริมาณคาดการณ์การใช้น้ำมันรายจังหวัด

การคาดการณ์ปริมาณการใช้น้ำมันรายจังหวัด (หน่วย ล้านลิตร) แบ่งการคำนวณออกเป็น 2 มุมมอง ได้แก่ การคาดการณ์ปริมาณการใช้น้ำมันในอนาคตรายจังหวัด และ การคาดการณ์ปริมาณการใช้น้ำมันจากภาพรวมปริมาณการใช้น้ำมันขั้นสุดท้ายของประเทศไทย [3] โดยการคาดการณ์ปริมาณการใช้น้ำมันในอนาคตรายจังหวัดจะได้

ปริมาณการใช้น้ำมันรวมที่มากกว่าการคาดการณ์ปริมาณการใช้น้ำมันจากภาพรวมปริมาณการใช้น้ำมันขั้นสุดท้ายของประเทศไทย ซึ่งจะทำการปรับลดให้สอดคล้องกันในภายหลัง

การคาดการณ์ปริมาณการใช้น้ำมันในอนาคตรายจังหวัด เริ่มต้นจากการหาปริมาณการใช้น้ำมันเบนซินและน้ำมันดีเซลรายจังหวัด จากข้อมูลปริมาณการจำหน่ายน้ำมันในปีพ.ศ. 2557 [4] จากนั้นทำการคาดการณ์ปริมาณการใช้น้ำมันตั้งแต่ปีพ.ศ. 2561-2590 ด้วยสมการทางเศรษฐศาสตร์ [5] แล้วทำการปรับปริมาณคาดการณ์การใช้น้ำมันรายจังหวัดให้เป็นไปตามภาพรวมปริมาณการใช้น้ำมันขั้นสุดท้ายของประเทศ ด้วยการนำสัดส่วนการใช้น้ำมันของแต่ละจังหวัดในแต่ละปี คูณด้วยปริมาณการใช้น้ำมันในภาพรวมของประเทศ โดยผลการคาดการณ์ปริมาณการใช้น้ำมันในอนาคตแสดงในตารางที่ 1

5.3 ปริมาณน้ำมันผ่านท่อ

ปริมาณน้ำมันผ่านท่อ (หน่วย ล้านลิตร-กิโลเมตร) ประเมินจาก ปริมาณการใช้น้ำมันคาดการณ์ต่อปีของแต่ละเส้นทาง (หน่วย ล้านลิตร) คูณด้วยความยาวของท่อในแต่ละเส้นทาง (หน่วย กิโลเมตร) ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 : ตารางแสดงปริมาณน้ำมันผ่านท่อในแต่ละเส้นทาง ณ ปีต่างๆ (หน่วย ล้านลิตร-กิโลเมตร)

	2561	2565	2570	2575	2580	2585	2590
SB-KP-LP	1,119,137	1,256,858	1,451,874	1,673,438	1,929,354	2,185,431	2,411,654
SB-NR-KK	1,099,469	1,265,438	1,508,020	1,794,030	2,124,932	2,454,358	2,762,197

5.4 ต้นทุนและผลประโยชน์ที่ได้จากการวางท่อขนส่งน้ำมัน

1) ต้นทุน

ต้นทุนการก่อสร้างระบบท่อน้ำมันที่ประเมินจากผู้เชี่ยวชาญ ประกอบด้วย ต้นทุนการก่อสร้างระบบท่อและระบบคลัง-สถานี ซึ่งจะแบ่งเป็น ค่าดำเนินการและบำรุงรักษา (Operation Expenditure: OPEX) และมูลค่าเงินลงทุน (Capital Expenditure: CAPEX) โดย OPEX ของระบบท่อและระบบคลัง-สถานี จะคิดเป็น 1% และ 4% ของ CAPEX ต่อปี ตามลำดับ ซึ่งแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 : ตารางแสดงต้นทุนการก่อสร้างที่ประเมินจากผู้เชี่ยวชาญ ณ มิถุนายน 2558 (หน่วย ล้านบาท)

เส้นทาง	องค์ประกอบ	ต้นทุนการก่อสร้าง	
		CAPEX	OPEX
SB-KP-LP	ระบบท่อ	17,184	170
	ระบบคลัง	4,512	180
SB-NR-KK	ระบบท่อ	12,000	120
	ระบบคลัง	5,920	240

2) ผลประโยชน์

ผลประโยชน์ที่จะได้รับจากโครงการจะรับรู้ได้เมื่อเริ่มทำการขนส่งน้ำมันผ่านระบบท่อได้ตั้งแต่ปี 2561 ซึ่งจะประกอบด้วย รายได้จากค่าบริการระบบท่อ ซึ่งคิดจาก ค่าบริการระบบท่อ (917 บาท/ล้านลิตร-กิโลเมตร ณ ปี 2561 และเพิ่มขึ้น 1% ต่อปี) คูณด้วยปริมาณน้ำมันผ่านท่อ

ผลประโยชน์จากการลดอุบัติเหตุจากการขนส่งทางถนน ซึ่งจากข้อมูลการเกิดอุบัติเหตุจากการขนส่งน้ำมันเชื้อเพลิงที่ประเทศสหรัฐอเมริกา [6] พบว่า การขนส่งทางท่อมียาจำนวนการเกิดอุบัติเหตุน้อยกว่าการขนส่งทางรถบรรทุก 11.8437 ครั้ง/พันล้านลิตร-กิโลเมตร และพบว่าสถิติการเกิดอุบัติเหตุของประเทศไทยมากกว่าสหรัฐอเมริกาถึง 3.086 เท่า [7] รวมถึงข้อมูลความสูญเสียของการเกิดอุบัติเหตุบนท้องถนนเท่ากับ 6.5 ล้านบาทต่อครั้ง [8] จะได้ว่า การขนส่งน้ำมันด้วยระบบท่อจะเกิดผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์ 175.1385 บาท/ล้านลิตร-กิโลเมตร

ผลประโยชน์จากการลดการปลดปล่อยมลพิษ โดยจะพิจารณาจากการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (CO_2) ซึ่งพบว่า การขนส่งด้วยรถบรรทุก 18 ล้อ มีปริมาณการปลดปล่อย CO_2 เท่ากับ 0.8147 kg. CO_2 /กม. [9] (รวมไปกลับ คิดเป็น 1.6294 kg. CO_2 /กม.) โดยราคาซื้อขายคาร์บอนเครดิตล่วงหน้าในตลาดยุโรปในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2557 (European Union Allowance; EUA) เท่ากับ 7.46 ยูโร/ CO_2e (ณ อัตราแลกเปลี่ยน 38.41 บาท/ยูโร) จะได้ว่า การขนส่งน้ำมันด้วยระบบท่อจะเกิดผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์ 12.97 บาท/ล้านลิตร-กิโลเมตร

ผลประโยชน์จากการลดต้นทุนการขนส่ง จากข้อมูลการศึกษาต้นทุนประกอบการขนส่งสินค้าด้วยรถบรรทุก พบว่า การขนส่งน้ำมันเชื้อเพลิงมีต้นทุนในการขนส่งเท่ากับ 917.48 บาท/ล้านลิตร-กิโลเมตร [10] ดังนั้น เมื่อมีการลงทุนในระบบท่อน้ำมันจึงเป็นการลดต้นทุนในการขนส่งด้วยรถบรรทุก หรือในอีกแง่หนึ่งคือ ได้รับประโยชน์จากการลดต้นทุนการขนส่ง จะได้ว่า การขนส่งน้ำมันด้วยระบบท่อจะเกิดผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์ 917.48 บาท/ล้านลิตร-กิโลเมตร

ทั้งนี้จะนำผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์ทั้งหมดที่ได้แปลงให้เป็นมูลค่าทางการเงิน แล้วจึงนำไปทำการการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ต่อไป

6. การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

เมื่อนำผลประโยชน์และต้นทุนของโครงการมาวิเคราะห์กระแสเงินสด (Cash Flow Analysis) ตั้งแต่เริ่มต้นก่อสร้าง จนถึงตลอดอายุของโครงการ พบว่า อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) ของโครงการรวมทั้ง 2 เส้นทาง คิดเป็น 10.53% และ 12.86% ตามลำดับ และ เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบ BCA โดยใช้อัตราการคิดลดที่ 10% พบว่า อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุนของทั้ง 2 เส้นทาง เท่ากับ 1.05 และ 1.28 ตามลำดับ

7. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาข้างต้นทำให้สามารถสรุปได้ว่าการจัดสร้างท่อขนส่งน้ำมันในเส้นทางสระบุรี-กำแพงเพชร-ลำปาง มีอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุนมากกว่าหนึ่ง (1.05) และ เส้นทางสระบุรี-นครราชสีมา-ขอนแก่น มีอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุนมากกว่าหนึ่งเช่นกัน (1.18) จึงสรุปได้ว่าการจัดสร้างท่อขนส่งน้ำมันบนเส้นทางดังกล่าวมีความคุ้มค่าแก่การลงทุนและยังมีผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์อีกมากมายที่ไม่ได้นำมาคำนวณในงานวิจัยชิ้นนี้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากกับประชาชนในอีกหลายสิบปีข้างหน้า

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Department Of Energy Business, The improving of Thailand's fuel oil transportation performance, 2009.
- [2] Department Of Energy Business, The development of Thailand's transportation and fuel oil reservation infrastructure master plan, 2004.
- [3] Energy Research Institute, Development of Thailand's 20 Years Energy Master Plan, 2013.
- [4] Department of Energy Business. (2015). Sales volume of fuel oil, by province in 2014. Available: http://www.doeb.go.th/info/value_fuel_province.php
- [5] Chulalongkorn University, Environmental impact assessment evaluation report of oil pipelines in Thailand, 2015.
- [6] D. Furchtgott-Rot, "Pipelines are safest for transportation of oil and gas," Manhattan Institute for policy research, vol. 23, pp. 1-10, June 2013.
- [7] World Life Expectancy. (2015). Road Traffic Accidents. Available: <http://www.worldlifeexpectancy.com/>
- [8] Department Of Highways, Value of losses from traffic accidents in Thailand, 2007.
- [9] Department Of Environmental Quality Promotion, Manufacturing guideline of carbon labile's product, 2011.
- [10] Department Of Land Transport, The study of truck's transportation costs, 2010.

การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตขาเทียม โดยใช้ระบบต้นทุนฐานกิจกรรม

Production Cost Analysis of Prostheses by Activity-Based Cost System

ชาญศักดิ์ ตั้งสันติกุลานนท์

สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์ขาเทียม ซึ่งลักษณะของผลิตภัณฑ์ขาเทียมจะประกอบไปด้วยชิ้นส่วนจำนวนทั้งหมด 12 ชนิด และชิ้นส่วนแต่ละชนิดจะมีกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน ทำให้การคำนวณต้นทุนการผลิตของชิ้นส่วนแต่ละชนิดด้วยการคำนวณต้นทุนด้วยระบบเดิมไม่มีความชัดเจน ส่งผลให้ผู้ประกอบการไม่สามารถหาวิธีการลดต้นทุนการผลิตได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำระบบต้นทุนฐานกิจกรรมมาทำการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตเพื่อให้ทราบถึงสาเหตุและปัจจัยที่ทำให้เกิดต้นทุนการผลิตของชิ้นส่วนแต่ละชนิด เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการตัดสินใจในการปรับปรุงกระบวนการผลิตให้มีต้นทุนการผลิตที่ลดลง จากผลการศึกษาพบว่าต้นทุนการผลิตของชิ้นส่วนขาเทียมชนิดที่ 1 และ 2 มีต้นทุนการผลิตมากกว่าชิ้นส่วนชนิดอื่นอย่างชัดเจน และเมื่อทำการย้อนกลับไปหาสาเหตุของการเกิดต้นทุนพบว่า มีสาเหตุมาจากกิจกรรมการกลึงชิ้นงานเป็นเวลานาน ดังนั้นถ้าหากมีการปรับปรุงกระบวนการผลิตของชิ้นส่วนชนิดที่ 1 และ 2 ให้มีการใช้หัวโมการกลึงชิ้นงานน้อยลงจะสามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตได้

คำสำคัญ : ระบบต้นทุนฐานกิจกรรม

Abstract

This research present the production cost analysis of part of prostheses. In this study, the prostheses can be divided into 12 different parts. Each part has different production process so the calculating production cost by traditional system is unclear. This result make the entrepreneur can't find cost reduction solutions. Thus the researcher decides to use Activity-Based Cost System (ABC) analyzing production cost to determine the factors that contribute to the cost of production of each part. To use the information to make decisions to improve manufacturing process for reducing production cost. The study found that the first and the second part of prostheses has the production cost more than other parts. When the researcher return to find the cause of cost, found that it is because of the long-time turning activity. So if the production process of the first and the second part of prostheses is improved, the production cost will be reduced.

Keywords : Activity-Based Cost System

1. บทนำ

ปัจจุบันมีผู้พิการทางขาจำนวนมากในประเทศไทย ที่ยังไม่สามารถได้รับการรักษาอย่างทั่วถึง เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการรักษาผู้พิการทางขาจะมีราคาสูง โดยสาเหตุหลักมาจากอุปกรณ์การแพทย์หรือขาเทียมที่มีประสิทธิภาพนั้นจะมีราคาแพง ในปัจจุบันประเทศไทยได้มีการใช้งานผลิตภัณฑ์ขาเทียม จำนวน 2 ประเภท ได้แก่ ขาเทียมชนิดจุดหมุนเดียว และขาเทียมชนิดหลายจุดหมุน โดยขาเทียมชนิดจุดหมุนเดียว มีข้อดีคือ ราคาถูกและผลิตได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือ เมื่อผู้พิการมีการใช้งานเป็นเวลานานอาจทำให้เกิดความเจ็บปวดและมีการเคลื่อนไหวที่ไม่เป็นธรรมชาติ ส่วนขาเทียมชนิดหลายจุดหมุน มีข้อดีคือ เมื่อผู้พิการใช้งานเป็นเวลานานจะไม่เกิดความเจ็บปวดและมีลักษณะการเคลื่อนไหวที่เป็นธรรมชาติ แต่มีข้อเสียคือ มีราคาสูง ดังนั้นผู้ประกอบการจึงมีความต้องการที่จะลดต้นทุนการผลิตเพื่อให้ผู้พิการสามารถเข้าถึงผลิตภัณฑ์ได้ โดยในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เครื่องมือ ต้นทุนฐานกิจกรรมเข้ามาวิเคราะห์ต้นทุนที่เกิดขึ้นในการผลิตแต่ละชิ้นส่วน เพื่อให้ผู้ประกอบการใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงวิธีการผลิตส่วนใด หรือทำการจ้างช่วงการผลิตส่วนใด

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ระบบต้นทุนฐานกิจกรรมถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อที่จะนำมาคำนวณต้นทุนของผลิตภัณฑ์ให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการคิดต้นทุนด้วยระบบเดิม[1] โดยระบบต้นทุนฐานกิจกรรม จะเป็นเครื่องมือในการปันส่วนต้นทุนค่าใช้จ่ายสู่ห่วยการผลิตให้เข้าสู่ผลิตภัณฑ์ ซึ่งขั้นตอนของการคิดต้นทุนด้วยระบบต้นทุนฐานกิจกรรมประกอบไปด้วย [2],[3]

1.การวิเคราะห์และระบุกิจกรรม
เป็นขั้นตอนการพิจารณาและระบุถึงกิจกรรมการผลิต

2.การคำนวณหาต้นทุนกิจกรรม
เป็นขั้นตอนการปันส่วนต้นทุนจากทรัพยากรที่ใช้ในการผลิต เพื่อผลักดันต้นทุนเข้าสู่กิจกรรมการผลิตแต่ละกิจกรรม โดยผ่านเกณฑ์การปันส่วนต้นทุนที่มีความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมการผลิตและทรัพยากรที่ใช้

ในการผลิต (Resource Driver) เพื่อที่จะสามารถคำนวณต้นทุนที่เกิดขึ้นของแต่ละกิจกรรมได้

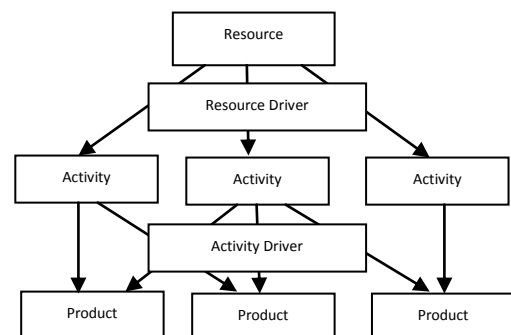
3.การปันส่วนต้นทุนกิจกรรมเข้าสู่ผลิตภัณฑ์
เป็นขั้นตอนการนำต้นทุนกิจกรรมมาทำการปันส่วนต้นทุนเข้าสู่ผลิตภัณฑ์ โดยผ่านเกณฑ์การปันส่วนต้นทุนที่มีความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมการผลิตและผลิตภัณฑ์ (Activity Driver) โดยความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมและผลิตภัณฑ์จะสามารถแบ่งได้ออกเป็น 4 ระดับ [4],[5] ได้แก่

1. Unit-level Activity หมายถึง กิจกรรมที่เกิดขึ้นในแต่ละหน่วยผลิต โดยมีจำนวนครั้งที่ทำแปรผันตรงกับปริมาณการผลิต เช่น จำนวนชิ้นส่วนที่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพ จำนวนชั่วโมงเครื่องที่ใช้ในการผลิต เป็นต้น

2. Batch-level Activity หมายถึง กิจกรรมที่เกิดขึ้นในการผลิตแต่ละ Batch โดยมีจำนวนครั้งที่ทำแปรผันตรงกับจำนวน Batch เช่น จำนวนครั้งการขนย้าย จำนวนครั้งการสั่งซื้อ เป็นต้น

3. Product-level Activity หมายถึง กิจกรรมโดยรวมที่ทำเพื่อให้สามารถการผลิตผลิตภัณฑ์ดำเนินต่อไปได้ เช่น การควบคุมงาน การซ่อมบำรุง เป็นต้น

4. Facility-Sustaining Activity หมายถึง กิจกรรมที่สนับสนุนการดำเนินการทั่วไปให้เป็นไปตามปกติ เช่น การให้แสงสว่าง การรักษาความปลอดภัย สามารถแสดงขั้นตอนการปันส่วนต้นทุนของระบบต้นทุนฐานกิจกรรมได้ดังรูปที่ 1 [6]



รูปที่ 1 การปันส่วนต้นทุนของระบบต้นทุนฐานกิจกรรม

3. ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.1 ศึกษากระบวนการผลิตของชิ้นส่วนขาเทียมแต่ละชนิด

ทำการศึกษากิจกรรมการผลิตของชิ้นส่วนขาเทียมทั้ง 12 ชนิด จากฝ่ายการผลิตของโรงงานผลิตขาเทียม โดยสามารถจำแนกกิจกรรมออกได้เป็น 2 กลุ่มกิจกรรม ได้แก่ กลุ่มกิจกรรมฝ่ายการผลิตหลัก และกลุ่มกิจกรรมฝ่ายสนับสนุนการผลิต โดยในแต่ละกลุ่มกิจกรรมประกอบไปด้วยกิจกรรมย่อยทั้ง 16 กิจกรรม ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดกิจกรรมการผลิตชิ้นส่วนขาเทียม

สัญลักษณ์	รายการกิจกรรม
	กิจกรรมฝ่ายผลิตหลัก
A1	การตัดด้วยเครื่องจักร Sawing Machine
A2	การตัดด้วยเครื่องจักร Water Jet
A3	การกลึงด้วยเครื่องจักร VARIAXIS
A4	การกลึงด้วยเครื่องจักร LB3000
A5	การกลึงด้วยเครื่องจักร LB35III
A6	การกลึงด้วยเครื่องจักร Multi-tasking CNC
A7	การเจียรผิวปรับสภาพผิว
A8	การพ่นทรายปรับสภาพผิว
A9	การพิมพ์ด้วยเลเซอร์
A10	การตกแต่งชิ้นงานสำเร็จ
A11	การประกอบผลิตภัณฑ์
A12	การบรรจุผลิตภัณฑ์
	กิจกรรมฝ่ายสนับสนุนการผลิต
A13	การตรวจสอบควบคุมคุณภาพ
A14	การบำรุงเครื่องจักร
A15	การวางแผนการผลิต
A16	การตรวจสอบและติดตามการดำเนินงาน

3.2 ศึกษาต้นทุนและค่าใช้จ่ายการผลิต

ทำการศึกษาต้นทุนและค่าใช้จ่ายการผลิตที่เกิดขึ้นในการผลิตขาเทียมจากผู้ประกอบโรงงานขาเทียม โดยจะสามารถแบ่งประเภทของต้นทุนตามลักษณะของทรัพยากรที่ใช้อย่างออกเป็น 4 ประเภท ซึ่งประกอบไปด้วย 1.ทรัพยากรบุคลากร 2.ทรัพยากรเครื่องจักร 3.ทรัพยากรพื้นที่ และ 4.ทรัพยากรสนับสนุน [7] รวมทั้งสิ้น 22 รายการ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2

3.3 ศึกษาเกณฑ์การปันส่วนต้นทุนเข้าสู่กิจกรรม

เนื่องจากกิจกรรมบางกิจกรรมจะมีการใช้งานต้นทุนบางประเภทร่วมกัน ดังนั้นในการคำนวณต้นทุนที่เกิดขึ้นในแต่ละกิจกรรมจึงจำเป็นต้องมีเกณฑ์การปันส่วนต้นทุน เพื่อที่จะใช้เป็นเครื่องมือในการปันส่วนต้นทุนเข้าสู่แต่ละกิจกรรมได้อย่างเหมาะสม โดยในการกำหนดเกณฑ์การปันส่วนต้นทุนจะทำการศึกษาจากลักษณะของทรัพยากรที่ใช้ในต้นทุนแต่ละชนิดสามารถจำแนกออกได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่

1.ทรัพยากรบุคลากร เนื่องจากกิจกรรมในกระบวนการผลิต จะมีการใช้งานทรัพยากรบุคลากรที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงใช้เกณฑ์ชั่วโมงการทำงานของผู้จัดการและชั่วโมงการทำงานของวิศวกรเป็นเกณฑ์ในการปันส่วนต้นทุนทางด้านบุคลากรเพื่อเข้าสู่กิจกรรม

2.ทรัพยากรเครื่องจักร ในการปันส่วนต้นทุนด้านเครื่องจักรจะใช้ชั่วโมงการทำงานของเครื่องจักรในแต่ละกระบวนการผลิตเป็นเกณฑ์ในการปันส่วนต้นทุนเข้าสู่กิจกรรมการผลิต แต่ในส่วนของบริษัทคอมพิวเตอร์ซึ่งมีลักษณะการใช้งานในหลายกิจกรรมจะใช้เกณฑ์ชั่วโมงการทำงานของเครื่องจักรเป็นเกณฑ์ในการปันส่วนต้นทุน

3.ทรัพยากรพื้นที่ ในการปันส่วนต้นทุนด้านพื้นที่จะใช้ปริมาณการใช้พื้นที่เป็นเกณฑ์การปันส่วน

4.ทรัพยากรสนับสนุนการผลิต เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการผลิตเกิดจากการใช้ทรัพยากรหลายชนิด ดังนั้นจากการพิจารณาร่วมกับผู้ประกอบการถึงเกณฑ์ในการปันส่วนต้นทุน ซึ่งประกอบด้วย ชั่วโมงการทำงานของบุคลากร และ ชั่วโมงการทำงานของเครื่องจักรในแต่ละกระบวนการผลิตสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนกับเกณฑ์การปันส่วนต้นทุนเข้าสู่กิจกรรม [1], [8] ได้ดังตารางที่ 2

3.4 คำนวณต้นทุนที่เกิดขึ้นในแต่ละกิจกรรม

สามารถคำนวณต้นทุนที่เกิดขึ้นในแต่ละกิจกรรม โดยใช้เกณฑ์การปันส่วนต้นทุนจากตารางที่ 3 เป็นเกณฑ์ในการ

ปันส่วนต้นทุนเข้าสู่กิจกรรม ซึ่งจะสามารถคำนวณต้นทุนที่เกิดขึ้นในแต่ละกิจกรรมได้จากต้นทุนกิจกรรม = ต้นทุน X ปริมาณการใช้ตัวผลัดกันต้นทุนของแต่ละกิจกรรม โดยสามารถแสดงผลการปันส่วนต้นทุนที่เกิดขึ้นในแต่ละกิจกรรมได้ดังตารางที่ 3

กิจกรรมเข้าสู่ชั้นส่วนแต่ละชนิด[9] โดยสามารถแบ่งระดับของกิจกรรมได้ 3 ระดับได้แก่ 1.Unit-level Activity 2.Batch-level Activity 3.Product-level Activity โดยปริมาณชั่วโมงการทำงานของเครื่องจักร จะนำมาจากการเก็บรวบรวมข้อมูลจาก ชั่วโมงการทำงานการทำงาน

ตารางที่ 2 รายการทรัพยากรและเกณฑ์การปันส่วนต้นทุนเข้าสู่กิจกรรม

รายการทรัพยากร	ค่าใช้จ่ายการผลิต	เกณฑ์การปันส่วนต้นทุนเข้าสู่กิจกรรม	ปริมาณตัวผลัดกันต้นทุน	
ทรัพยากรบุคลากร	บาท/เดือน		(หน่วย)	
เงินเดือนผู้จัดการ	30,000.00	ชั่วโมงการทำงานของผู้จัดการ	160	ชั่วโมง
เงินเดือนวิศวกร	84,000.00	ชั่วโมงการทำงานของวิศวกร	640	ชั่วโมง
ทรัพยากรเครื่องจักร	บาท/เดือน			
เครื่องจักรกระบวนการตัด				
ค่าเสื่อมราคาเครื่องจักรตัด Sawing Machine	1,250.00	ชั่วโมงการทำงานของเครื่องจักรตัด Sawing Machine	28	ชั่วโมง
ค่าเสื่อมราคาเครื่องจักรตัด Water Jet	37,500.00	ชั่วโมงการทำงานของเครื่องจักรตัด Water Jet	76	ชั่วโมง
เครื่องจักรกระบวนการกลึง				
ค่าเสื่อมราคาเครื่องจักรกลึงชิ้นงาน VARIAXIS	116,666.67	ชั่วโมงการทำงานของเครื่องจักรกลึง VARIAXIS	165	ชั่วโมง
ค่าเสื่อมราคาเครื่องจักรกลึงชิ้นงาน LB3000	66,666.67	ชั่วโมงการทำงานของเครื่องจักรกลึง LB3000	175	ชั่วโมง
ค่าเสื่อมราคาเครื่องจักรกลึงชิ้นงาน LB35III	69,166.67	ชั่วโมงการทำงานของเครื่องจักรกลึง LB35III	187	ชั่วโมง
ค่าเสื่อมราคาเครื่องจักรกลึงชิ้นงาน Multi-Tasking CNC	83,333.33	ชั่วโมงการทำงานของเครื่องจักรกลึง Multi-Tasking CNC	17	ชั่วโมง
เครื่องจักรกระบวนการเจียร				
ค่าเสื่อมราคาเครื่องจักรเจียรราบปรับสภาพผิว	15,000.00	ชั่วโมงการทำงานของเครื่องจักรเจียรราบ	25	ชั่วโมง
ค่าเสื่อมราคาเครื่องจักรพ่นทรายปรับสภาพผิว	15,000.00	ชั่วโมงการทำงานของเครื่องจักรพ่นทราย	12	ชั่วโมง
ค่าเสื่อมราคาเครื่องจักรพิมพ์เลเซอร์	15,000.00	ชั่วโมงการทำงานของเครื่องพิมพ์เลเซอร์	17	ชั่วโมง
ค่าเสื่อมราคาชุดเครื่องมือทดสอบคุณภาพ	41,666.67	ชั่วโมงการทำงานของชุดเครื่องมือทดสอบคุณภาพ	40	ชั่วโมง
ค่าเสื่อมราคาเครื่องมือสนับสนุนการผลิต	12,500.00	ชั่วโมงการทำงานของเครื่องจักรสนับสนุนการผลิต	40	ชั่วโมง
ค่าชุดคอมพิวเตอร์และโปรแกรม	16,666.67	ชั่วโมงการทำงานของเครื่องจักรหลัก	701	ชั่วโมง
ทรัพยากรสนับสนุน	บาท/เดือน			
วัตถุดิบทางอ้อม				
น็อต, อะไหล่	3,200.00	ชั่วโมงการทำงานประกอบผลิตภัณฑ์	20	ชั่วโมง
ชุดบรรจุภัณฑ์	2,000.00	ชั่วโมงการทำงานบรรจุภัณฑ์	20	ชั่วโมง
วัสดุสิ้นเปลือง กัด,กลึง	80,000.00	ชั่วโมงการทำงานของเครื่องจักรกลึง	543	ชั่วโมง
วัสดุสิ้นเปลือง ตัด	20,000.00	ชั่วโมงการทำงานของเครื่องจักรตัด	104	ชั่วโมง
วัสดุสิ้นเปลืองอื่นๆ	20,000.00	ชั่วโมงการทำงานของเครื่องจักรปรับสภาพผิว	45	ชั่วโมง
ค่าสาธารณูปโภค	20,000.00	ชั่วโมงการทำงานของเครื่องจักร	781	ชั่วโมง
ค่าใช้จ่ายอื่นๆ	10,000.00	ชั่วโมงการทำงานของบุคลากรฝ่ายสนับสนุนการผลิต	80	ชั่วโมง
ทรัพยากรพื้นที่	บาท/เดือน			
ค่าเสื่อมราคาโรงงาน	20,000.00	ปริมาณพื้นที่ใช้สอย	90	ตร.ม.
รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด (บาท/เดือน)	779,616.67			

3.5 ทำการปันส่วนต้นทุนกิจกรรมเข้าสู่ชั้นส่วนต่างๆของผลิตภัณฑ์

นำข้อมูลต้นทุนกิจกรรมที่เกิดขึ้นมาทำการปันส่วนเข้าสู่ชั้นส่วนของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด โดยทำการศึกษาหาความสัมพันธ์และปริมาณการใช้งานกิจกรรมของชิ้นส่วนแต่ละชนิด จากนั้นทำการศึกษาเกณฑ์การปันส่วนต้นทุน

เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนแต่ละชนิดสามารถแสดงผลการปันส่วนต้นทุนได้ดังตารางที่ 4

4 ผลการศึกษา

จากการนำระบบต้นทุนฐานกิจกรรมมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณเพื่อหาต้นทุนต่อหน่วยของชิ้นส่วนขาเทียมทั้ง 12 ชนิด ซึ่งมีกระบวนการผลิตที่

แตกต่างกัน จะสามารถคำนวณหาต้นทุนต่อหน่วยของชิ้นส่วนแต่ละชนิดได้ดังตามตารางที่

5 สรุปผลการศึกษา

ระบบต้นทุนฐานกิจกรรมเป็นเครื่องมือการคำนวณต้นทุนชนิดหนึ่ง ที่ทำให้ผู้ประกอบการสามารถทราบถึงต้นทุนของกิจกรรมต่างๆ และใช้ข้อมูลต้นทุนกิจกรรมเหล่านั้นในการปรับปรุงหรือพัฒนากระบวนการผลิต เพื่อที่จะสามารถลดต้นทุนการผลิตลงได้ ซึ่งจะนำไปสู่การเพิ่มความสามารถในการแข่งขันได้

ตารางที่ 3 ผลการปันส่วนต้นทุนเข้าสู่กิจกรรม

กิจกรรม	ต้นทุนในการผลิต (บาท/เดือน)									จำนวนผลิต (หน่วย/ เดือน)	ต้นทุน กิจกรรมต่อ หน่วย (บาท/ หน่วย)
	บุคลากร		เครื่องจักรและอุปกรณ์		ค่าใช้จ่ายวัสดุการผลิต			พื้นที่ใช้สอย	รวมต้นทุน กิจกรรม		
	ผู้จัดการ	วิศวกร	เครื่องจักรและ อุปกรณ์	ชุดโปรแกรม	วัตถุดิบ ทางอ้อม	ค่า สาธารณูปโภค	สนับสนุน อื่นๆ				
ฝ่ายการผลิตหลัก											
A1	1,000.00	9,333.33	1,250.00	666.03	5,384.62	613.76	-	400.00	18,647.74	40	466.19
A2	1,000.00	3,568.63	37,500.00	1,807.80	14,615.38	1,841.29	-	2,000.00	62,333.11	40	1,558.33
A3	1,000.00	9,514.51	116,666.67	3,932.76	23,955.80	3,960.24	-	3,000.00	162,029.98	40	4,050.75
A4	1,000.00	3,294.12	66,666.67	4,154.77	23,337.02	3,857.94	-	2,000.00	104,310.52	40	2,607.76
A5	1,000.00	3,112.94	69,166.67	4,440.22	28,287.29	4,676.30	-	3,000.00	113,683.41	40	2,842.09
A6	1,000.00	181.18	83,333.33	396.45	4,419.89	730.67	-	2,000.00	92,061.51	40	2,301.54
A7	1,000.00	1,921.57	15,000.00	586.74	5,000.00	642.99	-	1,000.00	25,151.30	40	628.78
A8	1,000.00	1,740.39	15,000.00	285.44	5,000.00	438.40	-	1,000.00	24,464.24	40	611.61
A9	1,000.00	2,333.33	15,000.00	396.45	-	438.40	-	400.00	19,568.18	40	489.20
A10	1,000.00	18,666.67	10,000.00	-	-	200.00	-	400.00	30,266.67	40	756.67
A11	1,000.00	2,333.33	1,500.00	-	3,200.00	200.00	-	400.00	8,633.33	40	215.83
A12	1,000.00	2,333.33	1,000.00	-	2,000.00	200.00	-	400.00	6,933.33	40	173.33
ฝ่ายสนับสนุนการผลิต											
A13	3,000.00	7,000.00	41,666.67	-	-	600.00	1,590.91	1,200.00	55,057.58	40	1,376.44
A14	9,000.00	-	-	-	-	600.00	3,409.09	1,200.00	14,209.09	40	355.23
A15	4,000.00	7,000.00	-	-	-	600.00	5,000.00	1,200.00	17,800.00	40	445.00
A16	2,000.00	11,666.67	-	-	10,000.00	400.00	-	400.00	24,466.67	40	611.67
รวม	30,000.00	84,000.00	473,750.00	16,666.67	125,200.00	20,000.00	10,000.00	20,000.00	779,616.66		19,490.42

จากผลการศึกษาการนำระบบต้นทุนฐานกิจกรรมมาคำนวณต้นทุนการผลิตต่อหน่วยของชิ้นส่วนชนิดต่างๆของขาเทียม ทำให้ทราบถึงที่มาของต้นทุนของชิ้นส่วนขาเทียมชนิดต่างๆ ว่ามาจากกิจกรรมส่วนใดและมีปริมาณต้นทุนเท่าไร ดังแสดงได้ในตารางที่ 4 ซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญในการกำหนดวิธีการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อให้สามารถลดต้นทุนการผลิตลงได้ ยกตัวอย่างเช่น จากการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตของชิ้นส่วนขาเทียมชนิดต่างๆพบว่าชิ้นส่วนชนิดที่1และ2 มีต้นทุนการผลิตที่

สูงมากกว่าต้นทุนชนิดอื่นอย่างชัดเจน เมื่อลองย้อนกลับไปดูที่มาของต้นทุนที่เกิดขึ้นจากตารางที่ 4 พบว่าต้นทุนส่วนใหญ่ของชิ้นส่วนทั้ง 2 ชนิดนี้ มาจากกิจกรรมการกลึงชิ้นงาน โดยมีต้นทุนการผลิตคิดเป็น 4,233.84 บาทต่อหน่วย และ 2, 946.90 บาทต่อหน่วย ตามลำดับ โดยมีสาเหตุมาจากเนื่องจากการใช้เวลาในการกลึงชิ้นงานเป็นเวลานาน ดังนั้นถ้าหากต้องการลดต้นทุนการผลิตของชิ้นส่วนทั้ง 2 ชนิดนี้ จะสามารถทำได้โดยการปรับปรุงหรือพัฒนากระบวนการผลิตใหม่ เช่น การหล่อแบบขึ้นรูป

ชิ้นส่วนชนิดที่1และ2 ให้มีลักษณะใกล้เคียงกับความต้องการก่อนนำมาผ่านกระบวนการกลึง เป็นต้น

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Boontam, "Production Cost Analysis of Rod in Industry Using Activity-based Costing System," KMUTT Research and Development Journal, Vol.36, No.2, pp.203-213, June, 2556.

- [2] Brimson, James A., Activity Accounting--An Activity-Based Costing Approach, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, 1991.
- [3] Tumey, Peter B.B., COMMON CENTS-The ABC Performance Breakthrough, How to succeed with Activity-Based Costing, Cost Technology, Hillsboro, Oregon, 1992.
- [4] Cooper, Robin, "Cost Classification in Unit-Based and Activity-Based Manufacturing Cost Systems," Journal of Cost Management, Vol.4, No.3, pp.4-14., 1990
- [5] Cooper, Robin; Kaplan, Robert S., "Measure costs right: make the right decisions," Harvard Business Review, Vol.66, pp.96-103., 1988
- [6] Wen-Hsien T., "Activity-based Costing Model for Joint Products," Computers and Industrial Engineering, Vol.31, No.3, pp.725-729, 1996.
- [7] N. Salah, "Resource Breakdown Structure Development of Mechanical Equipment Project," Chulalongkorn Engineering Journal, Vol.5, No.2, pp.15-26, August, 2557.
- [8] D. Pankan, "Manufacturing Cost Analysis in Die-casting Process Using Activity-based Costing System," Master's Thesis, Department of Industrial Engineering, Chaing Mai University, 2553
- [9] Fong C.C. and Kumar N. (2002) "Cost Drivers and Company Activities," Retrieved July 15, 2015, [Online] information on: http://www.hk iaat.org/images/uploads/articles/AAT_Paper_3 _Cost_drivers_and_company_activities.pdf

ตารางที่ 4 ผลการปันส่วนต้นทุนกิจกรรมเข้าสู่ชิ้นส่วนแต่ละชนิด

กิจกรรม	ต้นทุนกิจกรรม (บาท/หน่วย)	ชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ											
		ชนิดที่1	ชนิดที่2	ชนิดที่3	ชนิดที่4	ชนิดที่5	ชนิดที่6	ชนิดที่7	ชนิดที่8	ชนิดที่9	ชนิดที่10	ชนิดที่11	ชนิดที่12
ฝ่ายการผลิตหลัก													
A1	466.19	187.98	150.39	-	-	-	52.63	-	-	-	-	-	75.19
A2	1,558.33	527.14	579.65	48.30	48.30	163.81	-	27.30	-	-	163.81	-	-
A3	4,050.75	2,139.93	857.92	563.01	-	-	-	-	-	-	-	489.89	-
A4	2,607.76	2,093.91	-	-	261.11	-	252.74	-	-	-	-	-	-
A5	2,842.09	-	2,088.98	-	-	-	-	-	-	-	-	-	753.10
A6	2,301.54	-	-	-	-	-	-	-	1,825.05	476.49	-	-	-
A7	628.78	268.05	268.05	-	24.00	58.01	-	10.67	-	-	-	-	-
A8	611.61	277.20	277.20	-	-	39.60	-	17.60	-	-	-	-	-
A9	489.20	163.07	163.07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	163.07
A10	756.67	63.06	63.06	63.06	63.06	63.06	63.06	63.06	63.06	63.06	63.06	63.06	63.06
A11	215.83	17.99	17.99	17.99	17.99	17.99	17.99	17.99	17.99	17.99	17.99	17.99	17.99
A12	173.33	70.78	57.15	6.27	5.14	2.73	4.97	0.52	3.27	0.85	1.98	4.95	14.73
ฝ่ายสนับสนุนการผลิต													
A13	1,376.44	114.70	114.70	114.70	114.70	114.70	114.70	114.70	114.70	114.70	114.70	114.70	114.70
A14	355.23	29.60	29.60	29.60	29.60	29.60	29.60	29.60	29.60	29.60	29.60	29.60	29.60
A15	445.00	37.08	37.08	37.08	37.08	37.08	37.08	37.08	37.08	37.08	37.08	37.08	37.08
A16	611.67	50.97	50.97	50.97	50.97	50.97	50.97	50.97	50.97	50.97	50.97	50.97	50.97
ต้นทุนต่อหน่วย (บาท/หน่วย)		6,041.46	4,755.81	930.98	651.96	577.56	623.75	369.49	2,141.72	790.75	479.19	808.24	1,319.49

การจัดกลุ่มปัจจัยเสี่ยงซัพพลายเชนธุรกิจพยาบาล

โดยวิธี Q-Sort

Hospital Supply Chain Risks Categorization: Q - SORT Technique

ภูมิพร ธรรมสถิตย์เดช¹ ตรีทศ เหล่าศิริหงษ์ทอง^{2*}

¹วิทยาลัยการจัดการ มหาวิทยาลัยมหิดล

²ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

E-mail: ltritos@engr.tu.ac.th^{*}

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และจัดกลุ่มปัจจัยเสี่ยงที่ซัพพลายเชนของอุตสาหกรรมสุขภาพ ใน การศึกษานี้เริ่มจากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความเสี่ยงในการซัพพลายเชนในอุตสาหกรรมสุขภาพจาก งานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติทั้งสิ้น 36 บทความ และสังเคราะห์แยกโครงสร้างกลุ่มปัจจัยเสี่ยง โดยแยกเป็นมิติความเสี่ยง 5 กลุ่ม และปัจจัยความเสี่ยง 13 ปัจจัยโดยใช้เทคนิค Pareto Ratio จากนั้นเก็บข้อมูลเชิง ทรรศนคติจากผู้มีประสบการณ์ด้านการจัดการซัพพลายเชนในอุตสาหกรรมสุขภาพโดยใช้เทคนิค Q-Sort เพื่อจัด หมวดหมู่ปัจจัยเสี่ยง ผลการศึกษาชี้ให้เห็นถึงมุมมองการระบุและวิเคราะห์ปัจจัยเสี่ยงที่สนับสนุนการวิเคราะห์ความ เสี่ยงและการหาแนวทางในการกำหนดมาตรการในการจัดการความเสี่ยงแยกมิติได้อย่างชัดเจน

คำสำคัญ : ซัพพลายเชน ธุรกิจสุขภาพ ความเสี่ยง

Abstract

This paper aims to categorize risk factors in healthcare business supply chain. The study commenced with searching articles related to supply chain risk and healthcare. It discovered 36 literatures published in international refereed journals then employed Pareto technique to determine 13 risk issues and 5 risk dimensions. In order to categorize all risk factors based on Thai practitioners in hospital supply management perception, the Q-Sort method was employed to reveal such determination. The results indicate useful group of risk dimensions and risk factors which can be very beneficial for practitioners to support their risk identification activities.

Keywords : supply chain, risk factors and healthcare

1. บทนำ

ธุรกิจบริการด้านสุขภาพเป็นธุรกิจที่ทำนายในการบริหารจัดการเนื่องจาก ผู้รับบริการมีมุมมองทางด้านความพึงพอใจที่ครอบคลุมหลายด้านทั้งในด้านการได้รับการรักษาที่ถูกต้อง ได้รับการที่รวดเร็ว รวมถึงความสะดวกสบายในการรับบริการ ดังนั้นผู้ดำเนินธุรกิจสุขภาพจำเป็นต้องให้ความสำคัญกับการเตรียมความพร้อมในกระบวนการให้บริการและเพื่อที่จะสามารถตอบสนองต่อความต้องการที่หลากหลายของทั้งผู้รับบริการและผู้ป่วย ซึ่งการจัดการซัพพลายเชนเป็นกลไกสำคัญที่สนับสนุนการให้บริการด้านสุขภาพสามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพ [1]

อย่างไรก็ตาม การจัดการซัพพลายเชนของอุตสาหกรรมบริการด้านสุขภาพนั้นมีลักษณะที่แตกต่างและซับซ้อนกว่าการจัดการซัพพลายเชนของอุตสาหกรรมการผลิตในหลายประเด็น [2] Michael และ Nallan (2009)[3] ได้ให้นิยามของการจัดการซัพพลายสำหรับธุรกิจสุขภาพเน้นที่การดำเนินงานของโรงพยาบาลว่าหมายถึง “การนำกิจกรรม ผู้ผลิต บุคลากรทางการแพทย์ เทคโนโลยี ข้อมูลทางการแพทย์ ข่าวสาร มาประยุกต์ใช้เพื่อเคลื่อนย้ายวัสดุเวชภัณฑ์ ยา หรือการบริการทางด้านสุขภาพจากผู้ผลิต หรือผู้ให้บริการทางด้านสุขภาพ ไปยังผู้ป่วย กิจกรรมในซัพพลายเชนจะเริ่มตั้งแต่การจัดหาวัตถุดิบ การแปรรูปจากวัตถุดิบไปเป็นเวชภัณฑ์หรืออุปกรณ์ทางการแพทย์ (สำหรับบริษัทผู้ผลิตสินค้าประเภทดังกล่าวเพื่อส่งต่อไปให้โรงพยาบาล) จนถึงการส่งมอบเวชภัณฑ์หรืออุปกรณ์ทางการแพทย์ไปยังคลังของโรงพยาบาลเพื่อเตรียมไว้ให้ผู้เข้ารับบริการทางการแพทย์”

จากนิยามข้างต้นสะท้อนให้เห็นว่าการจัดการซัพพลายเชนด้านธุรกิจสุขภาพนั้น ครอบคลุมการเตรียมความพร้อมด้านอุปกรณ์เวชภัณฑ์และอุปกรณ์ทางการแพทย์ รวมไปถึงกิจกรรมการให้บริการด้านสุขภาพ การบริการด้านโภชนาการภายในโรงพยาบาล การควบคุมและกำจัดขยะทั้งขยะปลอดเชื้อและขยะอันตราย นอกจากนี้ยังมีประเด็นด้านการลำเลียงหรือขนย้ายผู้ป่วยระหว่างสถานพยาบาล รวมถึงการแลกเปลี่ยนข้อมูลข่าวสารทั้งภายในและภายนอก

โรงพยาบาล[3] ซึ่ง Mutstaffa และ Potter (2009)[4] ได้ให้ข้อคิดเห็นเกี่ยวกับการสร้างความเข้าใจถึงกลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในซัพพลายเชนของอุตสาหกรรมสุขภาพ โดยพิจารณาโครงสร้างพื้นฐานของซัพพลายเชนสำหรับธุรกิจโรงพยาบาลซึ่งสามารถแบ่งกลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสียตามลักษณะ ต้นน้ำ กลางน้ำ และปลายน้ำ ที่ประกอบไปด้วยกลุ่มการผลิตปฐมภูมิ กลุ่มการผลิตทุติยภูมิ กลุ่มบริษัทการกระจายสินค้า กลุ่มร้านค้าส่ง กลุ่มโรงพยาบาล และ ร้านขายยาหรือร้านค้าปลีก สำหรับกลุ่มผู้ผลิตปฐมภูมิ จะหมายถึง กลุ่มผู้ผลิตวัตถุดิบสำหรับการผลิตเวชภัณฑ์ที่เน้นกระบวนการแปลงวัตถุดิบไปเป็นเวชภัณฑ์ซึ่งผลิตภัณฑ์ของกลุ่มนี้จะมีความหลากหลายและเน้นที่การควบคุมดูแลระบบการผลิตทั้งกระบวนการที่เป็นไปตามระเบียบข้อบังคับด้านอาหารและยา นอกจากนี้ยังมีความท้าทายในการพยากรณ์ความต้องการจากกลุ่มผู้ป่วยและลูกค้าที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลาด้วย [2]

เนื่องจากซัพพลายเชนธุรกิจสุขภาพนั้นเกี่ยวข้องกับจัดการอุปกรณ์และวัสดุที่แตกต่างพร้อมทั้งต้องอาศัยการประสานงานกับกลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสียที่มีมุมมองและวัตถุประสงค์ที่เฉพาะของของแต่ละกลุ่มภายใต้การเปลี่ยนแปลงของกฎระเบียบที่เกี่ยวข้องในด้านต่าง ๆ และต้องเผชิญกับความท้าทายในการจัดการการพยากรณ์ส่งผลให้ซัพพลายเชนของธุรกิจสุขภาพมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงและความเสี่ยงจากปัจจัยด้านต่าง ๆ [5] ดังนั้นการให้ความสำคัญกับการจัดการความเสี่ยงในการจัดการซัพพลายเชนจะเป็นกลไกสำคัญที่สนับสนุนให้การจัดการการไหลเวียนของวัตถุดิบ ยา หรืออุปกรณ์ทางการแพทย์ในซัพพลายเชนอย่างมีประสิทธิภาพมาก [6]

2. การจัดการความเสี่ยงในธุรกิจบริการรักษาสุขภาพ

เนื่องจากลักษณะซัพพลายเชนของธุรกิจสุขภาพมีความซับซ้อนและมีจำนวนผู้มีส่วนได้ส่วนเสียที่มีจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดความท้าทายในการสร้างความเชื่อมโยงในด้านการปฏิบัติงานรวมถึงการแลกเปลี่ยนสารสนเทศ ทั้งระหว่างแผนภายใน โรงพยาบาล รวมถึงระหว่าง

โรงพยาบาลกับหน่วยงานภายนอกที่เกี่ยวข้อง นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงจากสภาพแวดล้อมของอุตสาหกรรมทั้ง จากกฎหมาย กฎระเบียบ ความต้องการในการรักษาโรค บางชนิด การขาดแคลนวัตถุดิบในการผลิต การควบคุม คุณภาพการผลิต และศักยภาพของทรัพยากรมนุษย์ที่ ให้บริการด้านสุขภาพ ความเสี่ยงจากปัจจัยด้านต่าง ๆ อีก ทั้งยังมีประเด็นความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นกับกิจกรรมการ เชื่อมโยงกัน ซึ่งสามารถสร้างผลกระทบต่อผู้รับบริการ ผู้ป่วย ประสิทธิภาพด้านการให้บริการและชื่อเสียงของ โรงพยาบาลในภาพรวม [4] ดังนั้นการเตรียมความพร้อม ของโรงพยาบาลในด้านการบริหารความเสี่ยงที่มีการ กำหนดแผนรองรับความเสี่ยงที่อาจเกิดต่อการจัดการซัพพลายเชนจึงเป็นกลไกที่สำคัญในการสนับสนุนการต่อการ ให้บริการสุขภาพอย่างมีประสิทธิภาพ การบริหารความเสี่ยงในการจัดการซัพพลายเชนของโรงพยาบาลนั้นได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง [6]

เนื่องจากการบริหารความเสี่ยงมีส่วนช่วยในการ ผลักดันให้ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในการจัดการซัพพลายเชน สามารถเตรียมความพร้อมในการป้องกันและบรรเทาความ เสี่ยงที่จะเกิดขึ้นต่อการดำเนินงานของซัพพลายเชน [2] กิจกรรมที่สำคัญในกระบวนการจัดการความเสี่ยง คือ การ ประเมินความเสี่ยงที่ครอบคลุม การกำจัดปัจจัยเสี่ยงในการ ดำเนินงานในซัพพลายเชนของโรงพยาบาล และวิเคราะห์ กลุ่มปัจจัยเสี่ยง จะช่วยให้ผู้บริหารซัพพลายเชนสามารถ จัดลำดับความสำคัญของความเสี่ยงและกำหนดกลุ่ม ผู้รับผิดชอบในการวางแผนในการจัดการกับความเสี่ยงทั้ง ในมุมมองของการป้องกันและบรรเทาได้อย่างมีประสิทธิภาพ [7] การระบุความเสี่ยง (Risk Identification) เป็นขั้นตอนแรกที่สำคัญของกระบวนการจัดการความเสี่ยง [8] เนื่องจากหากไม่สามารถระบุและเข้าใจถึงสาเหตุของ ปัจจัยเสี่ยงได้ องค์กรจะไม่สามารถเตรียมความพร้อมใน การจัดการความเสี่ยงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขั้นตอน ของการระบุความเสี่ยงมีกิจกรรมคือ การจัดกลุ่มปัจจัยเสี่ยง (Risk Categorization) ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการสร้างความ ตระหนักถึงปัจจัยเสี่ยงและกำหนดผู้รับผิดชอบปัจจัยเสี่ยง แต่ละด้านได้อย่างเหมาะสม (Risk Ownership) รวมถึงเป็น

จุดเริ่มในการประเมินและวางแผนจัดการความเสี่ยงได้อย่าง เหมาะสมกับทรัพยากรขององค์กรและประสิทธิภาพของ การจัดการซัพพลายเชน

ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะทำการ สังเคราะห์และจัดกลุ่มปัจจัยเสี่ยงในซัพพลายเชนใน โรงพยาบาล โดยเทคนิคที่ใช้คือ Q-Sort Method เพื่อใช้เป็น ข้อมูลประกอบการตัดสินใจพิจารณาปัจจัยเสี่ยงใน กระบวนการให้บริการของโรงพยาบาล รวมถึงเสนอแนว เพื่อช่วยสนับสนุนให้ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในการจัดการซัพพลายเชนสามารถวิเคราะห์ความเสี่ยงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยพิจารณาความเสี่ยงในลักษณะ กลุ่มปัจจัยที่จะส่งผลต่อผู้เข้ารับบริการ (ผู้ป่วย) ใน โรงพยาบาล รวมถึงภาพลักษณ์ที่ดีของโรงพยาบาลอีกด้วย

3. การศึกษาและผลการศึกษา

การศึกษารวบรวมวิเคราะห์ลำดับความสำคัญของปัจจัย เสี่ยงในซัพพลายเชนของโรงพยาบาล ผู้วิจัยได้ทำการ สืบค้นฐานข้อมูลเชิงวิชาการจากแหล่งข้อมูลต่างๆ ได้แก่ เอกสารวิชาการ โดยใช้สำคัญในสืบค้นซึ่งประกอบไปด้วย ความเสี่ยงในซัพพลายเชน และซัพพลายเชนใน อุตสาหกรรมธุรกิจสุขภาพ จากการสืบค้นทีมผู้วิจัยพบ บทความวิชาการที่เกี่ยวข้องทั้งสิ้น 36 บทความ จากนั้นทีม ผู้วิจัยใช้เทคนิคพาร์โตรีโซ (Pareto Ratio) เพื่อสังเคราะห์ ปัจจัยเสี่ยงและมีมิติปัจจัยเสี่ยงตามที่ได้ถูกกล่าวถึงใน บทความวิชาการ จากนั้นทีมผู้วิจัยใช้เทคนิค Q-Sort ในการ จัดกลุ่มมิติของปัจจัยเสี่ยง โดยอาศัยการสอบถามจากนัก ปฏิบัติที่มีประสบการณ์ในงานด้านซัพพลายเชนของธุรกิจ สุขภาพระหว่าง 8 – 15 ปี ซึ่งผลลัพธ์ของการจัดมิติปัจจัย เสี่ยงนั้นแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 : แสดงมิติของประเด็นความเสี่ยง

มิติของประเด็นความเสี่ยง	
1	มิติด้านเศรษฐกิจ (Economics Factor)
2	มิติด้านเครือข่าย (Networks Factor)
3	มิติด้านปฏิบัติงาน (Operational Factor)
4	มิติด้านแรงผลักดัน (Institutional Factor)
5	มิติด้านความปลอดภัย (Safety Factor)

ซึ่งสามารถแสดงวิธีการคำนวณได้ดังนี้

$$K = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^k n_{ij}^2 - Nn[1 + (n-1) \sum_{j=1}^k P_j^2]}{Nn(n-1)(1 - \sum_{j=1}^k P_j^2)}$$

เมื่อ

K เป็นสถิติ Kappa (สัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น)

N เป็นจำนวนสิ่งของทั้งหมด (จำนวนกิจกรรมย่อย)

n เป็นจำนวนผู้ประเมินทั้งหมด (จำนวนผู้ประเมิน)

k เป็นจำนวนของกลุ่มหรือประเภท (จำนวนมิติ)

n_{ij} เป็นจำนวนผู้ประเมินผู้ทำการจัดของสิ่งที่ i^{th} ลงในกลุ่มที่ j^{th}

P_j เป็นสัดส่วนของการจัดสิ่งของทั้งหมดลงในกลุ่มที่ j^{th}

ตารางที่ 2 ตารางสรุปผล Q-Sort จากผู้ประเมิน 21 ท่าน

ปัจจัยเสี่ยงใน สภาพแวดล้อม	1	2	3	4	5	มิติ
ความเสี่ยงที่เกิด จากการกำหนด ราคา	15		3	3		1
ความเสี่ยงด้าน การเงิน	17	1	2	1		1
ความเสี่ยงจาก ความสัมพันธ์ ของ โรงพยาบาลกับ สมาชิกอื่น		16	2	3		2
ความเสี่ยงจาก การทำงานของ สหพัฒนเซอร์	4	9	5	3		2
ความเสี่ยงด้าน การทำงานของ ตัวบุคคล	2	1	11		7	3
ความเสี่ยงจาก ปริมาณของ บุคลากร	2	2	17			3
ความเสี่ยงจาก ความสัมพันธ์ ของเทคโนโลยี		8	10		3	3
ความเสี่ยงจาก ความผิดพลาด ในบริการ			13		8	3
ความเสี่ยงด้าน ทรัพยากร บุคคล	2	1	14	3	1	3

ความเสี่ยงที่เกิด จากแรงผลัก ของหน่วยงาน	1	3	6	11		4
ความเสี่ยงที่เกิด จากการกำจัด ซากขยะ		1	2		18	5
ความเสี่ยงด้าน การวินิจฉัยโรค			8	2	11	5
ความเสี่ยงจาก ภัยพิบัติทาง ธรรมชาติ	2	1	3	1	14	5
C_j	45	42	96	27	62	
P_j	0.16 5	0.154	0.352	0.102	0.227	

จากสมการจะคำนวณหา

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^k n_{ij}^2 = 15^2 + 3^2 + 3^2 + \dots + 1^2 + 14^2 = 2913$$

และ

$$\sum_{j=1}^k P_j^2 = 0.165^2 + 0.154^2 + 0.352^2 + 0.102^2 + 0.227^2 = 0.236778$$

แทนค่าลงในสมการจะได้

$$K = \frac{2913 - 13(21)[1 + 20(0.236778)]}{13(21)(20)(1 - 0.236778)} \approx 0.32329$$

คำนวณค่า Kappa ของแต่ละกลุ่มมิติจากสมการ

$$K_j = \frac{\sum_{i=1}^N n_{ij}^2 - Nnp_j[1 + (n-1)p_j]}{Nn(n-1)p_j(1 - p_j)}$$

จากสมการจะได้ค่า Kappa รวมและของแต่ละมิติดังแสดง
ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลสรุปค่า Kappa จากการคำนวณครั้งแรก

	K_j	$Var(K_j)$	$\frac{K_j}{SE(K_j)}$
รวม	0.32329	0.0003156	18.198
มิติ 1	0.46967	0.0042054	7.243
มิติ 2	0.32398	0.0039697	5.142
มิติ 3	0.20667	0.0094961	2.121
มิติ 4	0.17066	0.0029464	3.144
มิติ 5	0.43909	0.0056690	5.832

ผลจากการแสดงได้ว่า ค่า $Kappa$ ที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.32 ซึ่งเป็นค่าที่ได้ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ ดังนั้นจึงต้องทำการแก้ไขโดยลดจำนวนผู้เชี่ยวชาญลงจาก 21 ท่านซึ่งมีประสบการณ์ทำงานระหว่าง 8-15 ปี โดยวิเคราะห์ค่า $Kappa$ ที่มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานรายบุคคล ทำให้เหลือผู้เชี่ยวชาญเพียง 7 ท่าน โดยจำกัดผู้เชี่ยวชาญเฉพาะกลุ่มผู้ที่อยู่ในภาคปฏิบัติซึ่งมีประสบการณ์มากกว่า 12 ปีขึ้นไป โดยผลจากแบบสอบถาม Q-Sort ที่อาศัยผู้ประเมิน 7 ท่านแสดงดังตารางที่ 4 ผลลัพธ์จากตารางจะได้ค่า $kappa$ เท่ากับ 0.62 ซึ่งมีความหมายว่ายอมรับได้ [5] ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าผู้เชี่ยวชาญนั้นมีความคิดเห็นสอดคล้องกัน อย่างไรก็ตามสำหรับมิติที่ 3 มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานโดยมีค่าเท่ากับ 0.44 ซึ่งมีความหมายว่าผู้เชี่ยวชาญมีความเห็นสอดคล้องกันในระดับปานกลาง [5]

ตารางที่ 4 ตารางสรุปผล Q-Sort โดยใช้ผู้ประเมิน 7 ท่าน

ปัจจัยเสี่ยงใน ซัพพลายเชน	1	2	3	4	5	มิติ
ด้านการกำหนดราคา	6			1		1
ด้านการเงิน	7					1
ด้านความสัมพันธ์ของโรงพยาบาลกับสมาชิก		7				2
ด้านการทำงานของซัพพลายเออร์	1	5	1			2
ด้านการวินิจฉัยโรค			5		2	3
ด้านปริมาณของบุคลากร		1	6			3
ด้านความล้ำสมัยของเทคโนโลยี		1	5		1	3
ด้านความผิดพลาดในการให้บริการ			5		2	3
ด้านทรัพยากรบุคคล		1	6			3
ด้านแรงผลักดันของหน่วยงาน				7		4
ด้านการทำงานของตัวบุคคล			1		6	5

ความเสี่ยงที่เกิดจากการกำหนดราคา			1		6	5
ความเสี่ยงจากภัยพิบัติทางธรรมชาติ			1		6	5
C_j	14	15	31	8	23	
P_j	0.154	0.165	0.341	0.088	0.253	

ตารางที่ 5 ผลสรุปค่า $Kappa$ จากการคำนวณครั้งที่สอง

	K_j	$Var(K_j)$	$\frac{K_j}{SE(K_j)}$
รวม	0.62457	0.0016286	15.476
มิติ 1	0.82993	0.0226670	5.512
มิติ 2	0.61016	0.0233382	3.994
มิติ 3	0.44220	0.0388833	2.242
มิติ 4	0.86179	0.0197407	6.134
มิติ 5	0.57204	0.0299728	3.304

4. สรุปผล

จากการวิจัยสามารถสรุปความเสี่ยงของโรงพยาบาลได้ 5 กลุ่ม คือ มิติด้านเศรษฐกิจ หรือ Economics Factor มิติด้านเครือข่าย หรือ Networks Factor มิติด้านปฏิบัติงานหรือ Operations Factor มิติด้านแรงผลักดันหรือ Institutional Factor และ มิติด้านความปลอดภัย หรือ Safety Factor ซึ่งในแต่ละมิติจะมีปัจจัยเสี่ยงดังนี้

- มิติด้านเศรษฐกิจ ได้แก่ ความเสี่ยงที่เกิดจากการกำหนดราคา และ ความเสี่ยงด้านการเงิน
- มิติด้านเครือข่าย ได้แก่ ความเสี่ยงจากความสัมพันธ์ของโรงพยาบาลกับสมาชิกอื่น และ ความเสี่ยงจากการทำงานซัพพลายเออร์
- มิติด้านปฏิบัติงาน ได้แก่ ความเสี่ยงด้านการวินิจฉัยโรค ความเสี่ยงจากปริมาณของบุคลากร ความเสี่ยงจากความล้ำสมัยของเทคโนโลยี ความเสี่ยงจากความผิดพลาดในการให้บริการ และ ความเสี่ยงด้านทรัพยากรบุคคล
- มิติด้านแรงผลักดัน ได้แก่ ความเสี่ยงที่เกิดจากแรงผลักดันของหน่วยงาน

- จ. มิติด้านความปลอดภัย ได้แก่ ความเสี่ยงด้านการ
ทำงานของตัวบุคคล ความเสี่ยงที่เกิดจากการ
กำจัดซากขยะ ความเสี่ยงจากภัยพิบัติทาง
ธรรมชาติ

ทั้งนี้สามารถนำผลจากการจัดกลุ่มของปัจจัยเสี่ยงในมิติที่ 1
มิติที่ 2 มิติที่ 4 และมิติที่ 5 ซึ่งเป็นมิติที่ผู้เชี่ยวชาญมี
ความเห็นสอดคล้องกันไปปรับใช้กับธุรกิจโรงพยาบาล
สำหรับเป็นแนวทางในการเตรียมความพร้อมในการลด
หรือกำจัดความเสี่ยงตามกลุ่มที่ได้ทำการศึกษาไว้เพื่อเพิ่ม
ประสิทธิภาพของโรงพยาบาล

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก โครงการส่งเสริม
การวิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัย
แห่งชาติ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และ
กองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ภายใต้งานวิจัย
ทั่วไป” ตามสัญญาเลขที่ ทป ๒/๒๐/๒๕๕๘ และ
ขอขอบคุณผู้ช่วยนักวิจัย ได้แก่ นส.ขวัญวรา หอมทรัพย์
และ นส.รจิตาญจน์ เวทยาภิรมรัตน์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Bhakoo, V., Singh, P. and Sohal, A.
“Collaborative management of inventory in
Australian hospital supply chains: practices and
issues”, Supply Chain Management: An
International Journal, Vol.17, No.2, pp.217-230,
2012
- [2] Cagliano, A., Grimaldi, S. and Rafele, C. (2011),
A systematic methodology for risk management in
healthcare sector, Safety Science, Vol.49, pp.695-
708, 2011
- [3] Michael, B. and Nallan, S. “The organizational
antecedents of a firm’s supply chain agility for risk
mitigation and response”, Journal of Operations
Management: Vol. 27, No. 2, pp.119–140, 2009
- [4] Shah, N. “Pharmaceutical Supply Chains: Key
Issues and Strategies for Optimization, Computers
and Chemical Engineering, Vol.28, pp.929-941.
- [5] Mustaffa, N. and Potter, A. “Healthcare Supply
Chain Management in Malaysia: A Case Study”,
Supply Chain Management: An International
Journal, Vol.14, No.3, pp. 234-243, 2009
- [6] Tang, O. and Musa, N. Identifying risk issues and
research advancements in supply chain risk
management, International Journal of Production
Economics, Vol.133, pp.25-34, 2011
- [7] Ritchie, B. and Brindley, C. “Supply Chain Risk
Management and Performance: A Guiding
Framework for Future Development, International
Journal of Operations and Production Management,
Vol. 27, No.3, pp. 303-322.
- [8] Chapman, R., Simple Tools and Techniques for
Enterprise Risk Management, John Wiley & Sons,
2006
- [9] Landis, L. and Koch, G. "The measurement of
observer agreement for categorical data".
Biometrics, Vol. 33, No.1, pp. 159–174, 1977

CFD Simulation of Disc Radius and Blade Height Effects on Mixing Performance in the Unbaffled Tank Covered by a Lid

Awanee Wongnui Charkorn Akavipat Eakarach Bumrunghthaichaichan Santi Wattananusorn
Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

The stirred tank is a general device in mixing processes. The aim of this work is to investigate the effect of disc radius and blade height on mixing performance by using CFD technique. The preliminary simulated results were validated by comparing with experimental data. The simulated results revealed that the shortest mixing time, which is depended on impeller geometry, average velocities, and ratio of k/ε , and minimum power can be achieved by 1b-disc3/4 (10.72 seconds) and 1b-disc1 (0.4892 watts), respectively. In order to investigate the correct optimal stirred tank, the mixing energy was conducted because the mixing time and power are combined into single parameter. In view of mixing energy, the optimal stirred tank was 1b-disc3/4 because of its lowest energy.

Keywords: CFD, Unbaffled Tank, disc radius, blade height

1. Introduction

Stirred tanks are commonly used in various chemical and process industries, such as liquid–liquid contactors, particle and droplet suspensions, polymer reactors, etc. Generally, the different types of baffle are adopted to achieve the well mixing. However, vessels without baffles are also used in many applications, such as crystallization, precipitation, solid–liquid mass transfer, solid suspension, in the food and dairy, etc.

Nowadays, the computational fluid dynamics (CFD) simulation has been widely applied in many applications. For mixing tank simulations, the results, e.g. velocity profile, power number, etc., are validated by comparing with the data obtained by laser doppler velocimetry (LDV) or particle image velocimetry (PIV)[1] to confirm the model.

Ochieng et al. [2] presented the effect of the impeller clearance on the velocity field and mixing. It has been shown that the Rushton turbine with low impeller clearance generates a flow field that evolves from the typical two loops to a single loop flow pattern similar to an axial impeller. This single loop flow pattern was increased axial flow and decreased mixing time at a constant power number.

Ameur et al. [3] investigated the effect of the curvature blade. The simulated results showed that the eddy is found to decrease with

increasing the curvature blade. In order to reduce the mixing power, it is recommended to use a curved blade but the excessive increase in the blade curvature can reduce the cavern size. Therefore a very deep hollow blade is not required due to the blockage of fluid flow by the curved blade.

Alcamo et al.[4] used Large Eddy Simulation of turbulent flow in an unbaffled stirred tank covered by a lid and validated with the experimental data on the flow field of Vella et al.[5]. The results of the radial profiles of the tangential velocity of the experiment and LES were in excellent agreement.

Akavipat. [6] presented the effect of numbers of blade orifice on mixing performance. The simulated results of full tank and 1/6 tank were identical. The calculation time of 1/6 tank was lower than full tank simulation.

This research investigates the effect of disc radius and blade height on mixing performance by using ANSYS FLUENT® CFD software. The multiple reference frame (MRF) impeller model and Renormalization group k-epsilon (RNGKE) model were used to compute the turbulent field and mixing time.

2. Governing equations

The simulation was distinguished into two parts. First, the three-dimensional steady flow with constant kinematic viscosity was

simulated to obtain the velocity field. The turbulence was simulated by RNGKE. Then, the three-dimensional unsteady flow was computed to achieve the tracer concentration distribution by using species transport equation.

The general form of Reynolds average equations for mass, momentum, k -transport, ε -transport, and species transport equations can be written in the following compact form as shown in Eq. (1).

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{U}\phi)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\Gamma_\phi \frac{\partial\phi}{\partial x_i} \right] + S_\phi \quad (1)$$

where ϕ is a universal dependent variable, $\bar{U}$ is mean velocity vector, Γ_ϕ is the diffusivity, and S_ϕ is the source term. The details of variable for these equations are given in Table 1. Further, the model constants of RNGKE are given in Table 2.

3. Numerical method

The geometry of the investigated six-blade Rushton turbine with unbaffled tank covered by a lid is shown in Fig 1. The flat lid was employed to prevent central vortex formation. The tank diameter (T) was 0.19 m, the rotating shaft diameter was 0.0173 m, and the other details are given in Table 3. The disc diameter and blade height for this study are summarized in Table 4. In this research, the model of 1/6 tanks and their grid generations were done by using GAMBIT® [6].

The fluid is a pure water. The density and dynamic viscosity of water were 1,000 kg/m³

and 0.001 Pa·s, respectively. The properties of water and tracer were identical. The rotating speed of the impeller (N) was 200 rpm [4]. The wall boundary condition was no-slip.

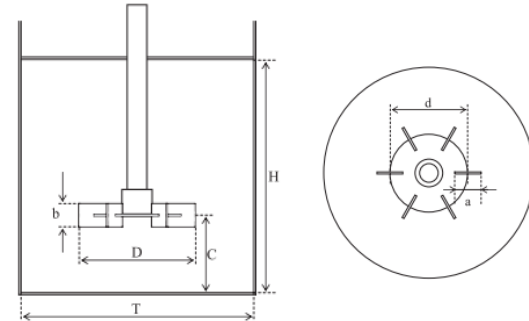


Fig 1. Geometry of the investigated tank

Table 2 Model constants for RNGKE model

$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	C_μ
1.42	1.68	0.0845

Table 3 The standard geometry of the tank

H/T	D/T	C/T	a/D	b/D	d/D
1	1/2	1/3	1/4	1/5	3/4

Table 4 Simulation tests

d/D	Blade height (b)	
	1b	2b
5/8	1b-disc5/8	2b-disc5/8
3/4	1b-disc3/4 ^a	2b-disc3/4
7/8	1b-disc7/8	2b-disc7/8
1	1b-disc1	2b-disc1

^a Standard tank

Table 1 The details of variables for governing equations

Equation	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
Continuity equation	1	0	0
Momentum equation	$\bar{u}$	μ	$-\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu_i \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \right] + S_{M,i}$
k -transport equation	k	$\alpha_k(\mu + \mu_t)$	$G_k + G_b + \rho\varepsilon - Y_M + S_k$
ε -transport equation	ε	$\alpha_\varepsilon(\mu + \mu_t)$	$C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon$
Species transport equation	Y_i	-	$-\frac{\partial \bar{J}_i}{\partial x_i} + R_i + S_i$

Governing equations were solved numerically by using ANSYS FLUENT®. The turbulence model is RNGKE. The impeller rotation was modelled by using the MRF impeller model. The pressure-velocity coupling of this simulation was SIMPLEC algorithm. The spatial discretization of gradient and pressure were Green-Gauss cell based and body force weighted, respectively. The second order upwind scheme was applied to calculate momentum, turbulence kinetic energy and turbulence dissipation rate.

4. Results and discussions

4.1 Model validation

The 1/6 standard tank with 697,449 hexahedral cells was validated by comparing with the experiment [5]. This used grid generation, which obtained by two times wall boundary adaption and two times moving zone adaption, was grid independent solutions.

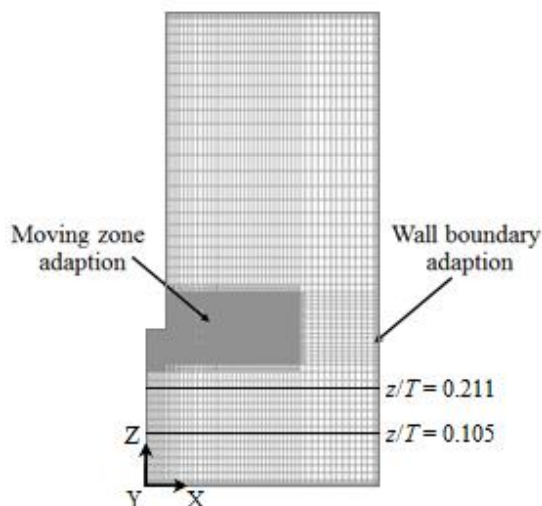


Fig. 2 Grid generation of validated model

The simulated tangential velocity profiles along the radial position for two different height were validated by comparing with the experimental data [5]. The normalized tangential velocity was defined as the ratio of tangential velocity to tip velocity. Further, the normalized radial position was a ratio of radial position to tank radius. The simulated normalized tangential velocity profiles for z/T of 0.105 and 0.211 shown in Fig. 3.

In Fig. 3, at $r/R < 0.5$, the normalized tangential velocity profiles for two different z/T are found to increase with increasing r/R .

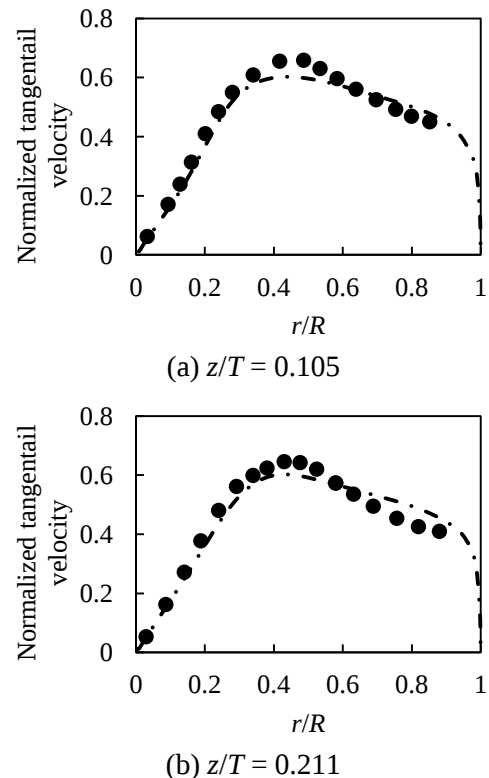


Fig. 3 Radial profiles of tangential velocity at different heights: ● Experiment; - - - CFD

Then, the normalized tangential velocity profiles are decreased with increase in r/R . Further, the predicted results are slightly different as compared to the experiment. Hence, it can be concluded that the simulation results were in good agreement with experiment. In other words, this model can be predicted the mixing tank agitated by Rushton turbine.

Hence, the simulation setup of 7 other stirred tanks as depicted in Table 4 were similar to the validation case setup. In this study, the mixing time and power were employed to investigate the optimal mixing tank.

4.2 Mixing time

In this part, the unsteady state of species transport equation was adopted to obtain the tracer concentration profiles. The tracer was injected at 5 mm above the center of the bottom tank. The tracer concentration profiles were measured at 6 different probe locations as shown in Table 5. The concentration profile was reported in dimensionless form, which can be defined as the ratio of the local tracer concentration to well mixed

concentration. The mixing time can be obtain from the time which concentration at any point in the tank has reached 95% as shown in Eq. (2). The normalized tracer concentration of standard tank (1b-disc3/4) is shown in Fig. 4.

$$t_{95\%} = \text{time for } \left| \frac{c - \bar{c}}{\bar{c}} \right| \leq 0.05 \quad (2)$$

Table 5 Locations of 6 probes

Probe	1	2	3	4	5	6
x	20	20	20	80	80	90
y	0	0	0	30	30	0
z	180	95	10	180	10	95

*** Unit in mm

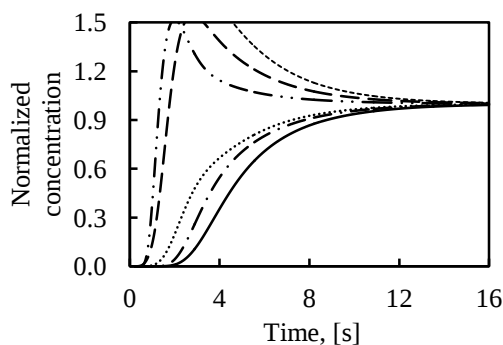


Fig. 4 Normalized concentration of standard tank: — Probe 1; Probe 2; ----- Probe 3; -.- Probe 4; -- Probe 5; --- Probe 6

In Fig. 4, the normalized concentration of standard tank for 6 different probes are different. Probe 6 and probe 3 show the shortest and longest mixing times, respectively. According to these results, the longest mixing

time obtained by probe 3 was employed to indicate the mixing time of the tank. Further, the normalized concentration profiles of probe 3 were also used to examine the mixing time for other tanks. The mixing time for 8 tanks can be summarized as shown in Table 6.

In Table 6, for 1b tanks, the 1b-disc3/4 tank provides the shortest mixing time followed by 1b-disc1 tank, 1b-disc5/8 tank, and 1b-disc7/8 tank, respectively. These simulated results revealed that the mixing time of these tanks show no predictable tendency as the disc radius is increased. For 2b tanks, the shortest mixing time is occurred in 2b-disc5/8 tank followed by 2b-disc3/4 tank, 2b-disc7/8 tank, and 2b-disc1 tank, respectively. These results showed that the mixing time is increased with increasing the disc radius.

In order to elucidate the difference in mixing time, the average radial velocity (v_{radial}) and average axial velocity (v_{axial}) in moving zone were conducted as shown in Table 6. From Table 6, for 1b tanks, the highest average axial and average radial velocities are occurred in the 1b-disc3/4 tank follow by 1b-disc5/8 tank, 1b-disc7/8 tank, and 1b-disc1 tank, respectively. According to these results, as the disc radius is increased, the average velocities of these 1b tanks represent no predictable tendency, which is similar to the mixing time. In contrast, for 2b tanks, these average velocities are found to decrease with increasing the disc radius. According to these results, it can be seen that the mixing time of these 2b tanks are depended on the average radial and axial velocities, that is, the higher average velocities yield the shorter mixing time.

Table 6 The simulated mixing time, average velocities, and turbulent quantities of 8 different tanks

Tank	Mixing time (s)	Average velocities in moving zone		k ($10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^2$)	ε ($10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^3$)	k / ε (s)
		V_{Radial} (10^{-2} m/s)	V_{Axial} (10^{-2} m/s)			
1b-disc5/8	11.29	9.606	-0.754	1.116	9.227	0.121
1b-disc3/4	10.72	9.633	-0.833	1.128	9.225	0.122
1b-disc7/8	11.50	9.521	-0.385	1.098	9.064	0.121
1b-disc1	11.25	9.167	-0.008	1.049	8.948	0.117
2b-disc5/8	10.84	5.889	-3.679	1.489	11.210	0.133
2b-disc3/4	10.90	5.847	-1.362	1.453	10.987	0.132
2b-disc7/8	11.05	5.844	-1.060	1.428	10.845	0.132
2b-disc1	11.57	5.784	-0.932	1.409	10.769	0.131

Moreover, for 1b tanks, only average radial and axial velocities were not sufficient to describe the irregular tendency of the mixing time. Hence, the turbulence quantities were also adopted to indicate this irregular tendency of the mixing time. In this work, the turbulence quantities were defined as a ratio of turbulent kinetic energy (k) to its dissipation rate (ϵ). This ratio represents the mixing ability due to small turbulence scale. Further, this ratio can be interpreted as the efficiency of turbulent kinetic energy usability. If the turbulent kinetic energy in two tanks are identical, the tank with the higher value of turbulent dissipation rate yields the shorter mixing time because the trans-formation of large turbulence scale to small scale is faster than another tank. Hence, the smaller value of k/ϵ provides the shorter mixing time. This ratio of 8 different tanks are shown in Table 6.

From Table 6, for 1b tanks, it can be seen that the 1b-disc1 tank illustrates the lowest value of k/ϵ . Moreover, the value of k/ϵ of 1b-disc5/8 and 1b-disc7/8 tanks are identical. The highest value of k/ϵ is occurred in the 1-disc3/4 tank. The lowest value of k/ϵ in 1b-disc1 can be reduced the mixing time while the average axial and radial velocities show the lowest value because the transformation of turbulence scale is faster than other tanks. However, the mixing time of 1b-disc3/4 is the minimum because of the highest values of average axial and radial velocities. According to these results, it can be implied that the mixing time of 1b tank is not only depended on average velocities but also the ratio of k/ϵ . In contrast, for 2b tanks, the values of k/ϵ for 4 different tanks are slightly different. Thus, it can be concluded that the mixing times of 2b tanks are only depended on average velocities.

However, only mixing time is not sufficient to indicate the optimal stirred tank. Thus, the power and energy should be integrated to consider the optimal mixing tank.

4.3 Power and energy

In order to obtain the required power, the predicted torque was conducted. The predicted power (P) can be calculated by using the relation as shown in Eq. (3). Moreover, the energy, which is used to obtain the mixing in the tank, is determined by using Eq. (4).

$$P = \tau \times 2\pi \times N \quad (3)$$

$$\text{Energy} = \text{Power} \times \text{Mixing time} \quad (4)$$

where P is power (watt), τ is torque (N·m), π is radian, N is impeller speed (rps), and unit of energy is N·m (J). The predicted power and energy of 8 tanks are shown in Table 9.

In Table 9, it can be seen that the 1b-disc1 and 2b-disc1 tanks show the minimum predicted power for the blade height of 1b and 2b, respectively. The maximum power for the blade height of 1b and 2b are 1b-disc5/8 and 2b-disc5/8, respectively. The minimum predicted power obtained by 1b-disc1 tank is due to the smallest wake region behind the blade. Generally, the wake region is resulted in the pressure drag, that is, the smaller wake region yields smaller pressure drag. Hence, the smaller pressure drag leads to smaller power. For power viewpoint, the optimal stirred tank should be 1b-disc1 tank.

Table 9 Power and Energy of simulation tests

	Power (Watts)	Energy (N·m)
1b-disc5/8	0.5023	5.6720
1b-disc3/4	0.5006	5.3668
1b-disc7/8	0.4943	5.6860
1b-disc1	0.4892	5.5040
2b-disc5/8	0.5960	6.4630
2b-disc3/4	0.5869	6.3950
2b-disc7/8	0.5770	6.3772
2b-disc1	0.5735	6.6369

When mixing time in Table 6 and power in Table 9 are viewed together, the shortest mixing time and minimum power are 1b-disc3/4 and 1b-disc1 tanks, respectively. In order to investigate the correct optimal stirred tank, the mixing energy should be conducted. Because the mixing time and power are combine into a single parameter. In other words, the mixing energy represents the mixing time and power at once. The energy for 8 different tanks are also represented in Table 9.

In Table 9, it can be seen that the minimum energy can be obtained by 1b-disc3/4 tank. This minimum energy was due to the minimum mixing time.

According to these results, it can be concluded that the 1b-disc3/4 was the optimal stirred tank in this study. Moreover, the suitable parameter which indicates the optimal mixing tank was the energy.

5. Conclusion

In this work, the effect of disc radius and blade height on mixing performance were investigated by using FLUENT®. The MRF with RNGKE model were used to compute the turbulent field and mixing time in 1/6 tank. The predicted results were validated by comparing with experiment [5]. The preliminary results were in good agreement with experimental data.

In this study, the simulated results revealed that the mixing time is depended on impeller geometry, average axial velocity, average radial velocity, and the ratio of k/ε .

The optimal stirred tank was considered by using energy. The simulated results showed that the 1b-disc3/4 exhibits the smallest energy as compared to the other tanks.

According to these results, it can be concluded that the optimal stirred tank was 1b-disc3/4 because of its lowest energy. Further, the energy was an important parameter to indicate the optimal mixing tank because the mixing time and power were considered together.

6. Nomenclature

6.1 Alphabetical Symbols

G_b	The generation of turbulence due to buoyancy
G_k	The production of turbulence kinetic energy
$\bar{J}_i$	Diffusion flux of species i
k	Turbulent kinetic energy, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
$\bar{p}$	Mean pressure, Pa
R_i	Net rate of production of species i by chemical reaction
S_i	Species source term
S_k	Turbulent kinetic energy source term
S_M	Momentum source term
S_ε	Dissipation rate of turbulent kinetic energy source term
S_ϕ	Source term
Y_i	Mass fraction of species i
Y_M	Dilatation dissipation term
c	Concentration, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$
$\bar{c}$	Fully mixed concentration, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$
$\bar{U}$	Mean velocity vector, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
P	Power, watt
N	Impeller speed, rps

6.2 Greek Symbols

ε	Dissipation rate of turbulent kinetic energy, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$
μ	Fluid Viscosity, $\text{Pa} \cdot \text{s}$
μ_t	Turbulent viscosity, $\text{Pa} \cdot \text{s}$
ρ	Fluid density, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
τ	Stress tensor, $\text{N} \cdot \text{m}$
$\alpha_k, \alpha_\varepsilon$	Inverse effective Prandtl number for k and ε
ϕ	Universal dependent variable
Γ_ϕ	Diffusivity
π	Radian

7. Acknowledgement

The authors would like to thank Associate Professor Dr. Jaruwat Charoensuk, department of mechanical engineering, faculty of engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand for his ANSYS FLUENT® software support.

8. References

- [1] T. Yoshizawa, Handbook of Optical Metrology: Principles and Applications, Taylor& Francis Group, 2009
- [2] A. Ochieng, M. S. Onyango, A. Kumar, K. Kiriamiti, and P. Musonge "Mixing in a tank stirred by a Rushton turbine at a low clearance", Chemical Engineering and Processing, vol. 47, No.5, pp.842–851, 2008
- [3] H. Ameer and M. Bouzit "Numerical investigation of flow induced by a disc turbine in unbaffled stirred tank", Acta Scientiarum Technology, July-Sept, pp. 469–476, 2013
- [4] R. Alcamo, G. Micale, F. Grisafi, A. Brucato, and M. Ciofalo "Large-eddy simulation of turbulent flow in an unbaffled stirred tank driven by a Rushton turbine", Journal of Chemical Engineering Science, vol.60, pp. 2303 – 2316, 2005
- [5] C. Vella, F. Grisafi, G. Micale, L. Rizzuti, and A. Brucato, "Near impeller flow field in an unbaffled stirred tank", Proceedings of the 11th European Conference on Mixing, preprint VDI-GVD Bamberg, 14–17 October, pp. 629–636, 2003
- [6] C. Akavipat, "Computational fluid dynamics study on effects of impeller Geometries on flow pattern in stirred tank," Master of Chemical Engineering Thesis, faculty of engineering King mongkut's institute of technology ladkrabang, 2014.

การปรับสภาพผิวโลหะอะลูมิเนียมผสมรีไซเคิล เพื่อเพิ่มการยึดติดสี

Surface Treatment of Recycle Aluminium Alloy for Improvement of Color Adherence Property

วสุนันท์ ครองทรัพย์ อภิชาติ อาณาเสียว

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของเวลาในการจุ่มชิ้นงานโลหะอะลูมิเนียมผสมรีไซเคิล และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีผลต่อความขรุขระของผิวชิ้นงาน น้ำหนักที่หายไป และทดสอบการยึดติดสีบนพื้นผิวโลหะอะลูมิเนียมผสมที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยแบบหล่อทราย สภาวะที่ใช้ทดลองคือ เวลาในการจุ่มแช่ 1-24 ชั่วโมง และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.75-1.25 โมลาร์ เปรียบเทียบกับชิ้นงานโลหะอะลูมิเนียมผสมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ผลการทดลองพบว่า การปรับสภาพผิวจะทำให้ชิ้นงานมีความขรุขระบนพื้นผิวเพิ่มขึ้น ที่เวลาในการจุ่ม 9 ชั่วโมง หลังจากนั้นความขรุขระมีค่าลดลง น้ำหนักที่หายไปในช่วง 0-9 ชั่วโมง มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากเวลา 9 ชั่วโมง น้ำหนักของชิ้นงานเริ่มคงที่ โดยสภาวะที่เหมาะสม คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.75 โมลาร์ แช่เป็นเวลา 9 ชั่วโมง มีการยึดติดสีดีที่สุด เนื่องจากการสูญเสียเนื้อโลหะน้อย โดยมีพื้นที่การยึดติดสีสูญเสียน้อยที่สุด 0.13% เมื่อทำการเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีความลึกของชั้นผิวออกไซด์ 7 ไมโครเมตร การสูญเสียพื้นที่ยึดติดสีสูงถึง 86.42%

คำสำคัญ : ปรับสภาพผิวโลหะ, โลหะอะลูมิเนียมผสมรีไซเคิล, การยึดติดสี

Abstract

This research studied the effect of the soaking time of recycle aluminium alloy and the NaOH concentration on surface roughness, weight loss of specimen and color adhesion-pull-off test on recycle aluminium alloy surface to sand mold casting. The testing conditions were soaking time in the range of 1-24 hours and NaOH concentration in the range of 0.75-1.25 molars. The results were compared to the specimen that was not immersed in NaOH. It was found that the pretreatment caused the roughness to develop on recycle aluminium alloy surface at ninth hour after that was decreased. Weight loss of specimen rapidly increased when an increase of soaking time increased at 0-9 hours and later turned steady. The most effective adherence occurred at ninth hour with the concentration at 0.75 molar due to the less metal loss. The area loss was 0.13%. In comparison, the one that was not immersed in NaOH showed the thickness of oxide surface at 7 micrometers and the area loss was at 86.42%.

Keywords : Surface Pretreatment, Recycle Aluminium Alloy, Color Adherence

1. บทนำ

ในอุตสาหกรรมโลหะผสมอะลูมิเนียมมีการหล่อและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียมจากอะลูมิเนียมที่ผ่านการรีไซเคิล และนำกลับมาใช้ใหม่ โดยนำอะลูมิเนียมแท่งที่ได้จากการถลุงแร่ เศษอะลูมิเนียมใหม่ที่ได้มาจากการแปรรูปในโรงงานอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียมที่ใช้แล้ว หรือเศษอะลูมิเนียมเก่า นำมาผ่านกระบวนการทางอุตสาหกรรม เพื่อแยกสิ่งปนเปื้อนออกไป มาทำการหลอมรวมกัน และหล่อในแบบ โดยในขั้นตอนนี้อาจจะเติมสารเคมี หรือธาตุโลหะต่างๆ เพื่อปรับแต่งคุณภาพให้เหมาะสมกับการขึ้นรูป และการใช้งานได้ดีขึ้นต่อไป การหลอมหล่อจะเป็นการช่วยลดการใช้ทรัพยากร ธรรมชาติ และประหยัดค่าพลังงานที่ใช้ในการถลุงแร่ เนื่องจากการผลิตอะลูมิเนียมจากเศษอะลูมิเนียมใช้แล้วจะใช้พลังงานเพียงร้อยละ 5 ของการผลิตอะลูมิเนียมจากสินแร่ จึงทำให้ต้นทุนการผลิตอะลูมิเนียมแท่งจากเศษอะลูมิเนียมถูกกว่าการผลิตจากสินแร่มากถึง 10 เท่า[1]

โลหะอะลูมิเนียมผสม เป็นโลหะที่มีความคงทน สามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดี มีคุณสมบัติสำหรับการหล่อที่ค่อนข้างต่ำ และสามารถผลิตขึ้นรูปได้ง่ายด้วยกระบวนการหล่อ เนื่องจากมีความเหมาะสมกับงานหล่อทั้งในด้านการไหลตัวของน้ำโลหะ และคุณสมบัติไหลป้อนเติมโพรงแบบหล่อ มีผลทำให้การขึ้นรูปเป็นรูปทรงตามที่ต้องการ แม้ในชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน หรือมีความหนาไม่มากก็ตาม ปัจจุบันได้มีการหล่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย เช่น ประติมากรรม ชิ้นงานตกแต่งโครงสร้างเหล็ก เช่น รั้ว ประตู หน้าต่าง เป็นต้น โดยมีการใช้สีพ่นบนชิ้นงานเพื่อให้มีสีสันทันต่างๆ ตามที่ลูกค้าต้องการ ซึ่งสีทองเป็นที่นิยมมากที่สุด อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์โลหะอะลูมิเนียมผสมรีไซเคิล (Re-Al alloy) ที่ได้มีพื้นผิวขรุขระไม่สม่ำเสมอ มีลักษณะหยาบเหมือนเม็ดทราย ลักษณะดังกล่าวเกิดจากแบบพิมพ์ที่ใช้สำหรับขึ้นรูปซึ่งทำมาจากทราย นอกจากนี้อะลูมิเนียมยังสามารถเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนกลายเป็น Al_2O_3 [2]-[3] ซึ่งมีคุณสมบัติขัดขวางการยึดเกาะระหว่างสี และ

ผิวชิ้นงาน Re-Al alloy มีผลทำให้สีเกิดการหลุดลอกได้ง่าย มีผลให้ผลิตภัณฑ์ต่างๆ ไม่คงทน และความสวยงามลดลง

ดังนั้นหลังจากการขึ้นรูปชิ้นงาน Re-Al alloy แล้วควรปรับปรุงพื้นผิว เพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดติดของสีโดยใช้เทคนิคการปรับสภาพพื้นผิวด้วยวิธีการเตรียมผิว โดยทำการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กับเวลา ที่มีผลต่อการยึดติดของสีบนผิว Re-Al alloy ซึ่งสามารถปรับปรุง พื้นผิวให้ยึดติดสีคงทนมากขึ้น และสามารถเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ได้

2. วิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมชิ้นงาน Re-Al alloy

นำ Re-Al alloy หล่อขึ้นรูปด้วยแบบหล่อทรายไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (Optical Emission Spectrometer รุ่น ARL-3460) มีองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 นำชิ้นงานขนาด 3.0 cm x 5.0 cm x 0.5 cm มาล้างทำความสะอาดเนื่องชิ้นงานมีคราบไขมัน ทรายที่มาจากแบบพิมพ์ หรือผงฝุ่น ด้วยเอทานอลในเครื่องสั่นความถี่สูง เป็นเวลา 10 นาที และล้างด้วยน้ำในเครื่องสั่นความถี่สูงเป็นเวลา 5 นาทีตามลำดับ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของปริมาณธาตุใน Re-Al alloy

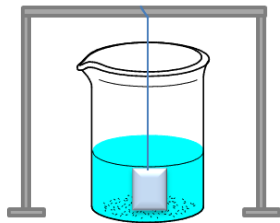
ธาตุ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
อะลูมิเนียม (Al)	88.44
ซิลิกอน (Si)	5.61
เหล็ก (Fe)	1.90
สังกะสี (Zn)	1.55
ทองแดง (Cu)	1.48
แมกนีเซียม (Mg)	0.37
แมงกานีส (Mn)	0.23
นิกเกิล (Ni)	0.13
อื่นๆ	0.29

2.2 การปรับสภาพผิวชิ้นงาน Re-Al alloy

1. เตรียมสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.75, 1.00

และ 1.25 โมลาร์

2. นำชิ้นงาน Re-Al alloy ที่ได้จากการเตรียมหลังจากล้างทำความสะอาดคราบไขมัน มาจุ่มแช่ในสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้นต่างๆ ในสภาวะอุณหภูมิห้อง ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะชิ้นงานเมื่อจุ่มแช่ใน NaOH

3. ทำการเก็บชิ้นงานหลังจากการจุ่มแช่เป็นเวลา 1, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 และ 24 ชั่วโมง ล้างทำความสะอาดด้วยน้ำในเครื่องสั่นความถี่สูง เป็นเวลา 5 นาที จำนวน 3 ครั้ง

4. นำชิ้นงาน Re-Al alloy มาจุ่มแช่ในสารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ความเข้มข้น 6% โดยน้ำหนัก เพื่อทำการกระตุ้นผิวชิ้นงาน เป็นเวลา 3 นาที แล้วล้างทำความสะอาดด้วยน้ำในเครื่องสั่นความถี่สูง เป็นเวลา 5 นาที จำนวน 3 ครั้ง

5. เป่าชิ้นงานให้แห้ง

2.3 การตกแต่งผิว Re-Al alloy ด้วยการพ่นสี

1. นำชิ้นงานที่ได้หลังจากการปรับสภาพผิวแล้วทำการพ่นสีตามที่ต้องการ สีที่ใช้พ่นชิ้นงานเป็นสีอะคริลิก แล็กเกอร์ จากบริษัท ฮาโต้เพ้นต์ (เจ.เค.อาร์) จำกัด โดยควบคุมความดันลม ระยะห่างที่ทำการพ่นสี สภาวะดำเนินงานในอุณหภูมิห้องโดยควบคุมความหนาฟิล์มของสีให้ใกล้เคียง 5 ไมโครเมตร ซึ่งควบคุมโดยกำหนดเวลาในการพ่นสี 3 วินาทีเท่ากัน ทำการพ่นสี 2 ครั้ง

2. ปลดชิ้นงานให้แห้ง

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิว Re-Al alloy

ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว และหลังการทำการปรับสภาพผิว โดยนำ

ชิ้นงาน Re-Al alloy ไปขัดให้เรียบในเครื่องขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1,000 และ 2,000 ตามลำดับ โดยใช้ผ้าเป็นสารหล่อเย็นช่วยในการหล่อลื่น แล้วจึงนำไปขัดละเอียดด้วยผ้าขัดสักหลาด ใช้ผงขัดอลูมินาเป็นสารขัดเงา จากนั้นทำความสะอาดชิ้นงานด้วยเอทานอล และน้ำในเครื่องสั่นความถี่สูง เป่าชิ้นงานให้แห้ง

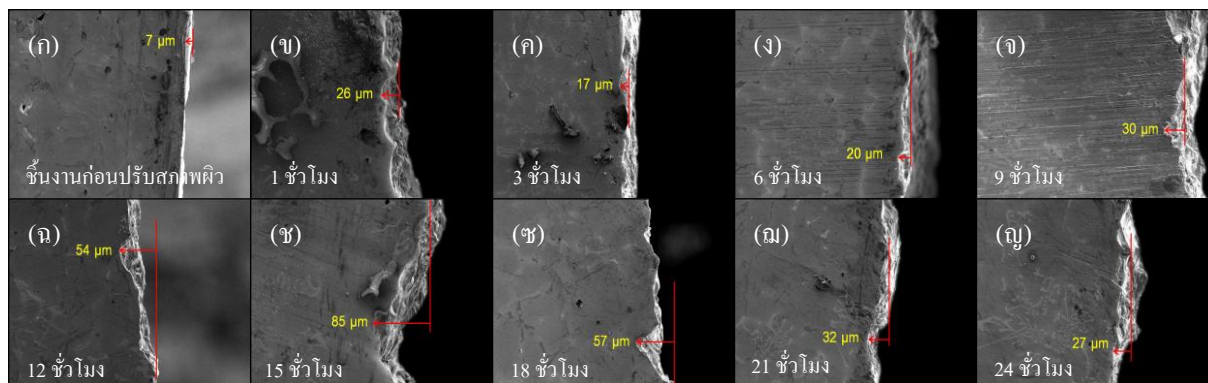
Re-Al alloy เป็นโลหะที่มีความหนาแน่นน้อย น้ำหนักเบา แต่มีความแข็งแรงสูง และทนการกัดกร่อนได้ดี อะลูมิเนียมเป็นธาตุที่ทำปฏิกิริยาเคมีได้รวดเร็วมาก โดยเฉพาะเมื่อสัมผัสกับอากาศ ชั้นผิวหน้าอะลูมิเนียมจะรวมตัวกับออกซิเจน กลายเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ มีคุณสมบัติโปร่งแสง และเหนียว ดังแสดงในรูปที่ 2 ที่เป็นภาพตัดขวางชิ้นงานโลหะ Re-Al alloy ก่อนการปรับสภาพในสารละลาย NaOH ที่พบว่าผิวออกไซด์ที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ ซึ่งความหนาแน่นไม่สูงสามารถสลายตัวได้ง่าย ด้วยความร้อน หรือลมในธรรมชาติ เช่นเดียวกันโลหะ Re-Al alloy ก็สามารถเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ใหม่



รูปที่ 2 ลักษณะของผิวอะลูมิเนียมออกไซด์บนชิ้นงาน

Re-Al alloy ก่อนการปรับสภาพใน NaOH

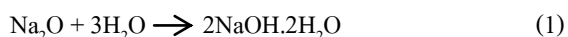
เมื่อทำการปรับสภาพผิวด้วยการจุ่มแช่ในสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยจะทำให้มีความหยาบและความขรุขระเพิ่มขึ้นบนผิวโลหะ Re-Al alloy ดังแสดงในรูปที่ 3-5 พบว่า ก่อนปรับสภาพผิวชิ้นงานชั้นออกไซด์มีความลึก 7 ไมโครเมตร หลังการแช่ในสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.75, 1.00, 1.25 โมลาร์ ชิ้นงานมีความลึกเท่ากับ 85, 226, 104 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังนั้นชิ้นงาน Re-Al alloy มีความลึกเพิ่มขึ้นคือ (85-7), (226-7) และ (104-7) ไมโครเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 3 ภาพตัดขวางของชิ้นงาน Re-Al alloy ใน NaOH ความเข้มข้น 0.75 โมลาร์ ที่เวลาต่างๆ กำลังขยาย 350 เท่า

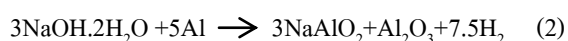
ความขรุขระของผิว Re-Al alloy หลังจากแช่ในสารละลาย NaOH เกิดจากการทำปฏิกิริยาของส่วนที่เป็นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ กับไฮดรอกไซด์ (OH^-) ในสารละลาย มีผลทำให้เนื้ออะลูมิเนียมหลุดออกไปในสารละลายอยู่ในรูปไฮดรอกไซด์ (NaAlO₂) และบางส่วนเกิดเป็นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) เคลือบที่ผิวชิ้นงาน ดังแสดงปฏิกิริยาดังสมการที่ (2) แต่ผิว Al₂O₃ ที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับ OH^- ในสารละลายเปลี่ยนรูปเป็น NaAlO₂ ดังแสดงปฏิกิริยาดังสมการที่ (3)

การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ :



สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับชิ้นงาน

บริเวณที่เป็นโลหะอะลูมิเนียม :



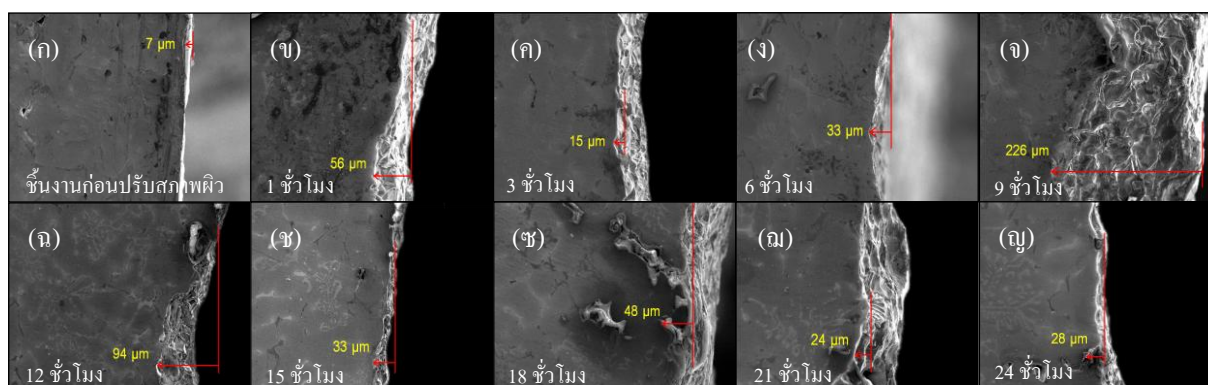
ชั้นผิวออกไซด์ที่เกิดขึ้นทำปฏิกิริยากับสารละลาย

โซเดียมไฮดรอกไซด์:

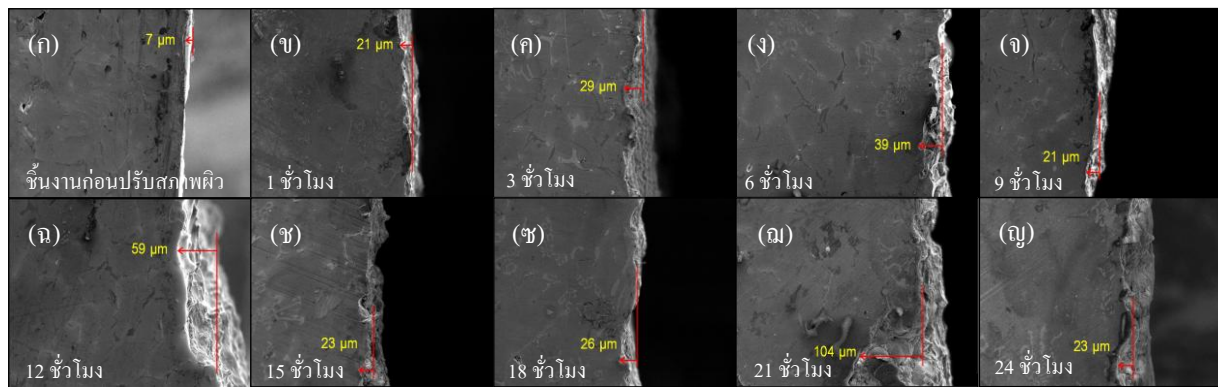


ส่วนธาตุเจือปนอื่นๆ เช่น Si จะทำปฏิกิริยากับ OH^- และรวมตัวกับออกซิเจนกลายเป็นชั้นผิวซิลิกาบางๆ แต่มีความแข็งแรงสูง และมีสมบัติสามารถป้องกันไม่ให้ OH^- ไปทำปฏิกิริยากับธาตุเจือปนอื่นๆ ที่อยู่ผิวด้านในที่ลึกลงไปได้[4]

เมื่อเวลาในการแช่สารละลาย NaOH เพิ่มขึ้น ความขรุขระของผิวเคลือบมีค่ามากขึ้นเนื่องจากส่วนอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ทำปฏิกิริยากับ OH^- และหลุดหายไป ในสารละลายมากขึ้นตามเวลาในการแช่ ในขณะที่ส่วนที่เป็นธาตุเจือปนมีการหลุดหายไปจากผิวชิ้นงานน้อย จนถึงช่วงเวลานึงที่มีค่าความขรุขระมากที่สุด แต่หลังจากนั้นความขรุขระมีค่าลดลง เนื่องจากธาตุเจือปนหลุดหายไป เพราะอะลูมิเนียมที่อยู่ด้านล่างของธาตุเจือปนทำปฏิกิริยากับ OH^- แล้วหลุดออกไปจากผิว มีผลให้ผิวชิ้นงานมีการปรับสภาพใหม่ (เนื้อโลหะส่วนอะลูมิเนียม และธาตุเจือปนด้านบนหลุดหายไป)



รูปที่ 4 ภาพตัดขวางของชิ้นงาน Re-Al alloy ใน NaOH ความเข้มข้น 1.00 โมลาร์ ที่เวลาต่างๆ กำลังขยาย 350 เท่า



รูปที่ 5 ภาพตัดขวางของชิ้นงาน Re-Al alloy ใน NaOH ความเข้มข้น 1.25 โมลาร์ ที่เวลาต่างๆ กำลังขยาย 350 เท่า

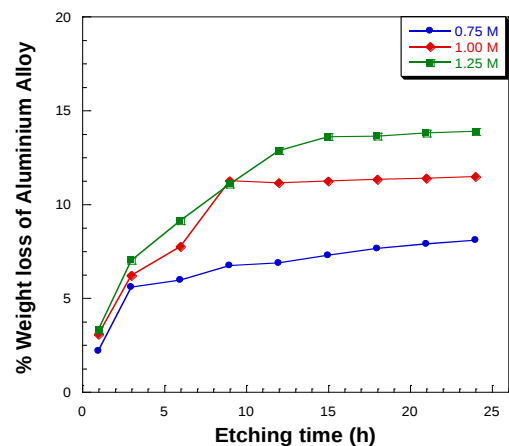
อิทธิพลของความเข้มข้นสารละลาย NaOH ที่มีต่อความขรุขระของผิวชิ้นงานไม่แสดงทิศทางชัดเจนเนื่องจากอัตราการทำปฏิกิริยาของอะลูมิเนียมกับ OH^- และความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ กับสิ่งเจือปนในแต่ละจุดบนผิวชิ้นงานไม่เท่ากัน 3.2 แนวโน้มเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญเสียของ Re-Al

alloy

การสูญเสียน้ำหนักของโลหะ Re-Al alloy คำนวณจากการชั่งน้ำหนักก่อนทดลอง (w_1) ลบด้วยน้ำหนักหลังการปรับสภาพผิว (w_2) ในสารละลาย NaOH ดังแสดงในสมการที่ (4) ในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญเสีย

$$\text{น้ำหนักที่สูญเสีย (\%)} = \frac{w_1 - w_2}{w_1} \times 100 \quad (4)$$

รูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าในช่วงแรกของการแช่น้ำหนักของชิ้นงานหายไปอย่างรวดเร็ว แต่หลังจากนั้นอัตราการหายไปของน้ำหนักลดลงจนเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง น้ำหนักของชิ้นงานมีค่าเกือบคงที่ เนื่องจากในช่วงแรกผิว Al_2O_3 ที่เกิดขึ้นตามสมการที่ (2) ยังไม่มีความเสถียร แต่เมื่อเวลาผ่านไปผิว Al_2O_3 มีความเสถียรมากขึ้น จนไปป้องกันการสลายของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่อยู่ใต้ผิว Al_2O_3 ของชิ้นงานได้ โดยน้ำหนักที่สูญเสียสูงสุดจากการปรับสภาพในสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.75, 1.00 และ 1.25 โมลาร์ เท่ากับ 8.08%, 11.47% และ 13.88% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของ NaOH เพิ่มขึ้น เนื้อโลหะ Re-Al alloy สูญเสียมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากความรุนแรงในการกัดกร่อนของสารละลาย NaOH มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้น



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลา และน้ำหนักที่สูญเสียจากการปรับสภาพใน NaOH

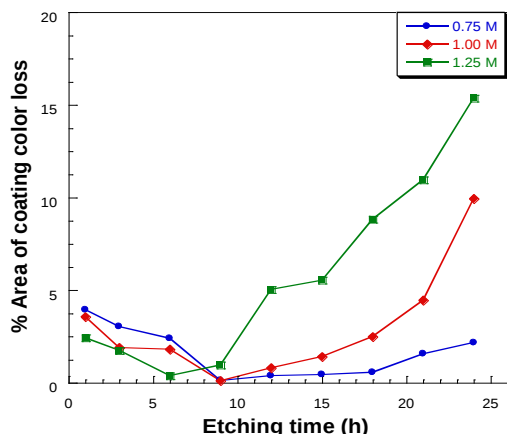
3.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของการยึดติด

การทดสอบการยึดติดใช้วิธีการดึง (ตามมาตรฐาน มอก.285 เล่ม 50-2549)[5] ซึ่งใช้การหาแรงดึงที่ตั้งจากกับพื้นผิวทดสอบที่มากที่สุด โดยผิวเคลือบยังด้านอยู่ได้ก่อนที่จะหลุดออก ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine เปรียบเทียบพื้นที่ที่ทำการทดสอบ กับพื้นที่ที่สูญเสียหรือหลุดลอกออกไป (การวัดพื้นที่ผิวทำการส่งด้วยกล้อง optical microscopes หลังจากนั้นใช้โปรแกรม image j วัดพื้นที่ผิวเคลือบสี) ในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์การสูญเสียพื้นที่ของผิวชิ้นงานผ่านการเคลือบสีดังแสดงตามสมการที่ (5)

$$\text{พื้นที่ที่สูญเสีย (\%)} = \frac{\text{พื้นที่ที่หลุดลอกออกไป}}{\text{พื้นที่ที่ทำการทดสอบ}} \times 100 \quad (5)$$

วิธีการทดลองเริ่มต้นจากการทาภาวอีพ็อกซี (กาวอีพ็อกซีที่ปราศจากตัวทำละลายแบบแยก 2 ส่วน (two-pack epoxy) ซึ่งไม่มีผลต่อสมบัติใช้สำหรับติดตัวยึดกับผิวเคลือบ) ยึดติดกับชิ้นงานปล่อยให้แห้ง 1 วัน แล้ว

จึงนำชิ้นงานไปทดสอบ ผลการทดลองพบว่า ผิวชิ้นงาน Re-Al alloy เคลือบสีที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพในสารละลาย NaOH มีการสูญเสียพื้นที่สูงถึง 86.42% เมื่อเทียบกับพื้นที่ทั้งหมด



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลา และพื้นที่ที่สูญเสียจากการปรับสภาพใน NaOH

ส่วนชิ้นงานที่แช่ในสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.75, 1.00, 1.25 โมลาร์ ที่มีผลการยึดติดสีที่ดีที่สุด โดยมีพื้นที่สูญเสียที่น้อยที่สุด คือ 0.13%, 0.11%, 0.38% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 7 ที่ความเข้มข้น NaOH 0.75 โมลาร์ เมื่อเวลาในการแช่เพิ่มขึ้น การยึดติดสีมีค่าเพิ่มขึ้นจนเมื่อเวลาในการแช่เพิ่มขึ้นถึง 9 ชั่วโมง การยึดติดสีมีค่ามากที่สุด และมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเวลาในการแช่เพิ่มขึ้นจนถึง 18 ชั่วโมง เนื่องจากผิวชิ้นงานมีความขรุขระสูงในช่วงการแช่ 9-18 ชั่วโมง ดังแสดงมาแล้วในรูปที่ 3 ซึ่งชั้นฟิล์มสีมีการยึดเกาะกับผิวที่มีความขรุขระได้ดี แต่หลังจากเวลาในการแช่ 18 ชั่วโมงแล้ว การยึดติดสีลดลง เนื่องจากความขรุขระลดลง ส่วนที่ความเข้มข้น NaOH 1.00 และ 1.25 โมลาร์ การยึดติดสีมีแนวโน้มมากขึ้น เมื่อเวลาในการแช่เพิ่มขึ้นถึง 6-9 ชั่วโมง แต่เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจาก 9-24 ชั่วโมง การยึดติดสีมีค่าน้อยลงมาก แม้จะมีความขรุขระมากก็ตาม เนื่องจากผิว Al_2O_3 อาจจะมี ความหนามากขึ้น ซึ่งสภาพไม่เหมาะสมกับการยึดติดสี

4. สรุปผลการทดลอง

เมื่อเวลาในการแช่ในสารละลาย NaOH เพิ่มขึ้น ความขรุขระมีค่ามากขึ้นจนถึงจุดหนึ่งหลังจากนั้นมีค่า

ลดลง น้ำหนักที่หายไปในช่วงแรกอัตราการหายไปอย่างรวดเร็วหลังจากนั้นการหายไปของน้ำหนักเริ่มลดลง ส่วนการยึดติดสีค่อยๆ ดีขึ้น และหลังจากนั้นเริ่มลดลง เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นความขรุขระไม่แสดงแนวโน้มที่ชัดเจน น้ำหนักที่หายไปเพิ่มขึ้น ส่วนค่าการยึดติดสีใกล้เคียงกับที่เวลาในการแช่ต่ำ แต่มีค่าลดลงเมื่อเวลาในการแช่สูง ความขรุขระบนพื้นผิว Re-Al alloy น้อยเกินไป ชั้นฟิล์มสีจะยึดเกาะไม่สม่ำเสมอ อีกทั้งยังทำให้เกิดการหลุดลอกออกได้ง่าย และชั้นผิวที่เกิดความขรุขระลึกละเอียดพอสมควรอย่างสม่ำเสมอจะทำให้ประสิทธิภาพการยึดเกาะระหว่างสีกับพื้นผิว Re-Al alloy สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว พบว่า มีชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นเองในธรรมชาติ ซึ่งความหนาแน่นไม่สูงพอที่สามารถสูญเสียได้ง่าย ส่งผลทำให้การแพร่ของสีไปยึดเกาะในชั้นผิวออกไซด์ได้ไม่มั่นคง

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of industrial works, "Aluminium Industry Report 2012," office of industrial economics, 2012.
- [2] W.W. Peng and et.al., "Experimental and ab initio study of vibrational modes of stressed alumina films formed by oxidation of aluminium alloy under different atmosphere," Acta Mater, Vol.59, No.7, pp.2723-2730, 2011.
- [3] S. Song and F. Placido, "Investigation on initial oxidation kinetics of Al, Ni and Hf metal film surface," Chinese optics letters, Vol.8, 2010.
- [4] W.D. callister and D.G. Rethwisch, "Materials Science and Engineering : An Introduction," John Wiley and Sons, 6th ed., 2005.
- [5] Thai Industrial Standards Institute, "Standard Test Methods for Paints, Varnishes and Related Materials : Adhesion-pull-off Test, No.285-50, pp.21-26, 2006.

การดูดซับไอออนเงินโดยไคโตซานเรซิน: ผลของอุณหภูมิ

Adsorption Silver Ion By Chitosan Resin: Effect Of Temperature

อุษณีย์ รัชไชยวรรณ ยุพดี กุลรัตน์กิตติวงศ์ โกวิทย์ ปิยะมั่งคลา*

ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับไอออนเงินโดยใช้ไคโตซานเรซินเป็นตัวดูดซับ ทำการทดลองแบบแบตช์ ศึกษาผลของอุณหภูมิ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิของไอออนเงินมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น ไคโตซานเรซินมีความสามารถในการดูดซับไอออนเงินสูงสุดเท่ากับ 17.7 มิลลิกรัมต่อกรัม การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน มีค่าเท่ากับ 29.9 กิโลจูลต่อโมล การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีมีค่าเท่ากับ 94.9 จูลต่อโมล-เคลวิน และการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์เฉลี่ย มีค่าเท่ากับ -306.3 จูลต่อโมล แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับสามารถเกิดขึ้นเองได้ จลนพลศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับ Pseudo-second order กลไกการดูดซับเกิดขึ้น 2 ขั้นตอน โดยการแพร่ที่ผิวเป็นขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ

คำสำคัญ : การดูดซับ ไอออนเงิน ไคโตซานเรซิน

Abstract

The chitosan resin was used as adsorbent for the adsorption of silver ion in batch process. The effect of temperature was thoroughly investigated. It was found that increasing temperature of silver ion increased the adsorption capacity. The highest adsorption capacity of the chitosan resin was 17.7 mg/g. The change of enthalpy was endothermic reaction. The thermodynamics study revealed that changes in enthalpy, entropy and Gibbs free energy were 29.9 kJ/mol, 94.9 J/mol-K and -306.3 J/mol, respectively. The Gibbs free energy was negative value, suggesting spontaneity of adsorption process. The pseudo-second order model was fit for describing the kinetics adsorption behavior. The mechanisms of the adsorption occurred in 2 steps. The rate limiting step for mechanism of adsorption was film diffusion.

Keywords : Adsorption, Silver ion, Chitosan resin

1. บทนำ

เงิน (Silver, Ag) เป็นโลหะมีค่า พบรวมอยู่กับการถลุงแร่จำพวกทองแดง ทอง พลวงหรือสังกะสี มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดเท่ากับ 961.5 และ 2162 องศาเซลเซียส ตามลำดับ มีค่าความร้อนและสภาพนำไฟฟ้าเท่ากับ 429 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน และ 6.30×10^7 ซีเมนต่อเมตร ตามลำดับ มีความมันวาว สีขาว สามารถดัดให้โค้งงอ

ได้ นำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดี จึงมีการนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย ได้แก่เส้นลวดนำไฟฟ้า อุปกรณ์เชื่อมต่ออิเล็กทรอนิกส์ ตัวเรือนเครื่องประดับเครื่องใช้ภายในบ้าน และเหรียญ ในขณะที่เดียวกันสารประกอบเชิงซ้อนเงิน มีการใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิตยาฆ่าเชื้อแบคทีเรียในช่องปาก การเคลือบสีกระจกแก้ว การทำฟ้นเทียม และการผลิตฟิล์มถ่ายภาพ [1]

ประเทศไทยไม่ได้จัดให้เงินอยู่ในกลุ่มของโลหะที่ต้องมีการตรวจสอบก่อนการปล่อยน้ำเสียสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ในขณะที่มลรัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา กำหนดให้เงินเป็นสารอันตราย มีการปนเปื้อนอยู่ในน้ำทิ้งได้ไม่มากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร [2]

การดูดซับเป็นวิธีที่มีความเหมาะสมสำหรับการแยกไอออนโลหะ สีย้อม หรือสารอินทรีย์ออกจากน้ำเสีย เนื่องจากดำเนินการภายใต้อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ ไม่ต้องใช้เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่มีความยุ่งยากซับซ้อน [3] นอกจากนี้การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับยังสามารถทำได้ง่าย โดยราและยีสต์หลากหลายชนิดสามารถนำมาใช้เป็นตัวดูดซับไอออนเงินได้ดี [4]

ไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ ที่มีอยู่มากในเปลือกแข็งของกระดองปู เปลือกกุ้งและแกนหมึก ซึ่งเป็นกากเหลือทิ้งในอุตสาหกรรมหอยเช็น โดยปกติถูกทิ้งเป็นขยะที่ก่อปัญหาน้ำเน่าเหม็น [5] ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีความสนใจใช้ไคโตซานเรซินดูดซับไอออนเงิน ดำเนินการแบบแบดซ์ ศึกษาผลอุณหภูมิของไอออนเงิน นำผลที่ได้มาอธิบายพารามิเตอร์ทางเทอร์โมเคมี จลนพลศาสตร์และกลไกการดูดซับ

2. วิธีการทดลอง

นำเกลือไคโตซาน (บริษัท ซีเฟรช (ประเทศไทย) จำกัด) ปริมาณ 2.0 กรัม ละลายในกรดแอซิติก ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยปริมาตร ปริมาตร 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร กวนด้วยเครื่องกวน ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ใช้เวลา 24 ชั่วโมง ได้สารละลายไคโตซาน

นำผงพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปริมาณ 8.0 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออนปริมาณ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร กวนด้วยเครื่องกวนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ที่ความเร็ว 400 รอบต่อนาที ใช้เวลา 5 ชั่วโมง ได้สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

นำสารละลายไคโตซานผสมกับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ กวนด้วยเครื่องกวนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที ใช้เวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายที่ได้หยดลงในสารละลายโซเดียมไคโร

พอลิฟอสเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ด้วยเครื่องสูบจ่ายสารเคมี แซ่ทิ้งไว้ 12 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นนำเม็ดไคโตซานผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ไปทำปฏิกิริยากับสารละลายเอทิลีนไกลคอลไดไกลซิดิลอีเทอร์ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยปริมาตรต่อปริมาตร แซ่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน นำไปตากให้แห้ง ได้ไคโตซานเรซินลักษณะเป็นเม็ดสีเหลือง มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.015 เซนติเมตร วัดปริมาตรรูพรุน พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนมีค่าเท่ากับ 3.23×10^{-2} ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม 0.64×10^{-3} ตารางเมตรต่อกรัม และ 61.05 นาโนเมตร ตามลำดับ

ชั่งไคโตซานเรซินปริมาณ 0.5 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่เติมสารละลายเงินความเข้มข้นเริ่มต้น 96.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ pH 8.0 นำไปเขย่าที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที ด้วยเครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิ เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารละลายเงินเป็น 303 - 333 เคลวิน เก็บตัวอย่างไอออนเงินตามช่วงเวลาที่กำหนด จากนั้นนำไอออนเงินไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอ็บซอร์ปชันสเปกโตรมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 328 นาโนเมตร คำนวณหาความสามารถในการดูดซับตามสมการที่ 1

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{W} \quad (1)$$

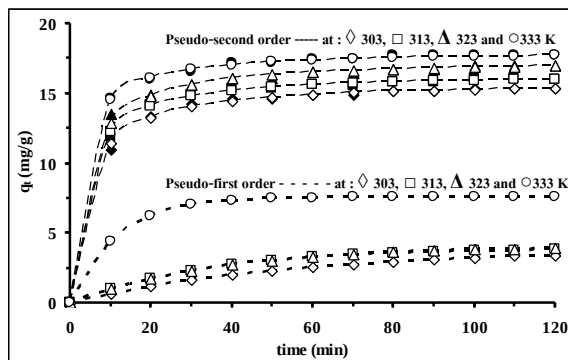
เมื่อ q_t หมายถึงความสามารถในการดูดซับที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม) C_0 หมายถึงความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนเงิน (มิลลิกรัมต่อลิตร) และ C_t หมายถึงความเข้มข้นของไอออนเงินที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร) V หมายถึงปริมาณของไอออนเงิน (ลิตร) และ W หมายถึงน้ำหนักไคโตซานเรซิน (กรัม)

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1. ผลอุณหภูมิของสารละลายเงิน

ผลการดูดซับสารละลายเงินความเข้มข้นเริ่มต้น 96.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ของไคโตซานเรซินปริมาณ 0.5 กรัม ที่ความเป็นกรด-เบส เท่ากับ pH 8.0 เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารละลายเงินที่ 303, 313, 323 และ 333 เคลวิน แสดง

ในรูปที่ 1 พบว่าในช่วง 10 นาทีแรกไคโตซานเรซินมีความสามารถในการดูดซับไอออนเงินเท่ากับ 10.9, 11.9, 13.5 และ 14.7 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ สมดุลการดูดซับเกิดขึ้นที่เวลา 60 นาที มีความสามารถในการดูดซับไอออนเงินเท่ากับ 14.9, 15.6, 16.5 และ 17.7 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ไคโตซานเรซินมีอัตราการดูดซับไอออนเงินได้มากในช่วงแรก เนื่องมาจากพื้นที่บริเวณผิวของไคโตซานเรซินมีหมู่ฟังก์ชัน (Active site) และมีตำแหน่งที่ว่างซึ่งสามารถดูดซับกับไอออนเงินได้ในปริมาณมาก จึงสามารถดูดซับไอออนเงินได้อย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นอัตราการดูดซับไอออนเงินเกิดได้ช้าลง ๆ เนื่องจากพื้นที่บริเวณผิวและตำแหน่งที่ว่างของไคโตซานเรซินถูกปกคลุมด้วยไอออนเงิน จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ ซึ่งไคโตซานเรซินไม่มีพื้นที่บริเวณผิวและไม่มีตำแหน่งที่ว่างสำหรับการดูดซับไอออนเงิน [6]

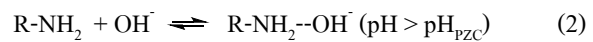


รูปที่ 1 ความสามารถในการดูดซับจากการทดลองที่อุณหภูมิ: ♦ 303, ■ 313, ▲ 323 และ ● 333 เคลวิน

ที่สภาวะสมดุล การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสารละลายเงินจาก 303 - 333 เคลวิน เป็นผลทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจาก 14.9 - 17.7 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงอัตราการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเกิดได้เร็วขึ้น [7] เป็นผลทำให้ตัวถูกดูดซับสามารถจับกับบริเวณที่ว่างของตัวดูดซับได้มากขึ้น นอกจากนั้นตัวถูกดูดซับยังแทรกซึมเข้าไปภายในรูพรุนของตัวดูดซับได้มากขึ้น [8]

ความเป็นกรด-เบส ของไอออนเงินที่ pH 8.0 พบว่าไคโตซานเรซินสามารถดูดซับไอออนเงินได้ เนื่องจากประจุที่ผิวของไคโตซานเรซินมีค่าเป็นลบ (pH_{PZC} ไคโตซานเรซิน

มีค่าเท่ากับ pH 6.7) เกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic attraction) ระหว่างไอออนเงินที่มีประจุบวก (Ag^+) กับไคโตซานเรซินที่ถูกดีโปรโตนเตด ($R-NH_2-OH^-$) ให้มีประจุเป็นลบ [9] ดังนั้นไคโตซานเรซินจึงดูดซับไอออนเงินได้เป็นอย่างดี เขียนได้ดังสมการที่ 2 - 3



3.2. พารามิเตอร์ทางเทอร์โมเคมี

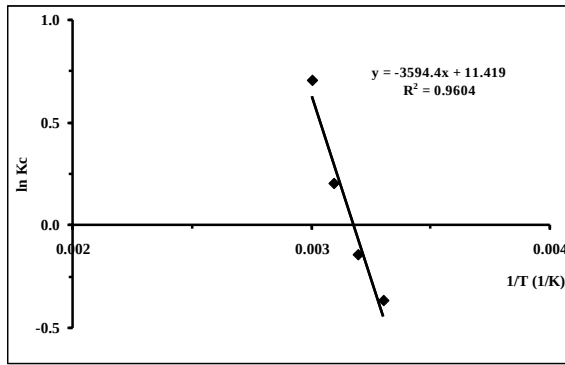
ตัวแปรทางเทอร์โมเคมี ได้แก่การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี (ΔH°) การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS°) และการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG°) สามารถหาได้จากสมการ 4 และ 5 ตามลำดับ

$$\ln \frac{q_t}{C_t} = \ln K_c = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT} \quad (4)$$

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (5)$$

เมื่อ ΔH° หมายถึงการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี (จูลต่อโมล) ΔS° หมายถึงการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (จูลต่อโมล-เคลวิน) ΔG° หมายถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (จูลต่อโมล) R หมายถึงค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 จูลต่อโมล-เคลวิน) และ T หมายถึงอุณหภูมิ (เคลวิน)

นำผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 303-333 เคลวิน ของการดูดซับไอออนเงินมาพลอตกราฟระหว่าง $\ln K_c$ กับ $1/T$ ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนมีค่าเท่ากับ 29.9 กิโลจูลต่อโมล Wu [10] อธิบายว่าค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีน้อยกว่า 40 กิโลจูลต่อโมล เป็นการดูดซับทางกายภาพ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีมีค่าเท่ากับ 94.9 จูลต่อโมล-เคลวิน การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีมีค่าเป็นบวก แสดงว่า Degree of freedom เพิ่มขึ้นที่บริเวณผิวรอยต่อของแข็ง-ของเหลว ในระหว่างการดูดซับไอออนเงินบนไคโตซานเรซิน ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์เฉลี่ย มีค่าเท่ากับ -306.3 จูลต่อโมล ดังนั้นจึงลงความเห็นว่าไคโตซานเรซินดูดซับไอออนเงินเกิดขึ้นโดยกระบวนการทางกายภาพ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่สามารถเกิดขึ้นเองได้

รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_c$ กับ $1/T$

3.3. จลนพลศาสตร์การดูดซับ

จลนพลศาสตร์การดูดซับไอออนเงินของไคโตซานเรซินใช้แบบจำลอง Pseudo-first order และ Pseudo-second order โดยสมการเส้นตรงของ Pseudo-first order เขียนได้ดังสมการที่ 6

$$\text{Log}(q_c - q_t) = \text{Log } q_c - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (6)$$

เมื่อ q_c หมายถึงความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม) k_1 หมายถึงค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (ต่อนาที) และ t หมายถึงเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

สมการเส้นตรง Pseudo-second order เขียนดังสมการที่ 7

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_c^2} + \frac{t}{q_c} \quad (7)$$

เมื่อ k_2 หมายถึงค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สอง (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที)

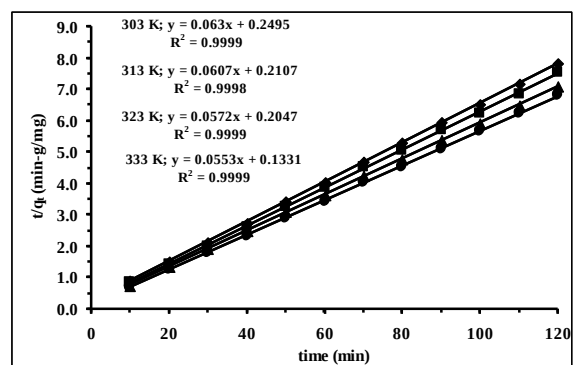
ผลการดูดซับไอออนเงินเขียนตามสมการเส้นตรง Pseudo-first order ที่อุณหภูมิ 303, 313, 323 และ 333 เคลวิน มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.8666, 0.9205, 0.9641 และ 0.9433 ตามลำดับ (ไม่ได้นำเสนอกราฟ) ค่าคงที่ k_1 และค่า $q_{c, \text{cal}}$ แสดงในตารางที่ 1 ในขณะที่สมการเส้นตรง Pseudo-second order แสดงในรูปที่ 3 พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.9999, 0.9998, 0.9999 และ 0.9999 ตามลำดับ ค่าคงที่ k_2 และ ค่า $q_{c, \text{cal}}$ แสดงในตารางที่ 1 ความถูกต้องของจลนพลศาสตร์การดูดซับพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ความสามารถในการดูดซับเปรียบเทียบจากผลการทดลองและผลจากการ

คำนวณ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเขียนได้ดังสมการที่ 8

$$\text{S.D.} = \sqrt{\frac{\sum \left[\frac{(q_{t, \text{exp}} - q_{t, \text{cal}})^2}{q_{t, \text{exp}}} \right]}{n-1}} \quad (8)$$

เมื่อ S.D. หมายถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) $q_{t, \text{exp}}$ หมายถึงความสามารถในการดูดซับที่เป็นผลจากการทดลอง (มิลลิกรัมต่อกรัม) $q_{t, \text{cal}}$ หมายถึงความสามารถในการดูดซับที่เป็นผลจากการคำนวณ (มิลลิกรัมต่อกรัม) และ n หมายถึงจำนวนจุดของข้อมูล

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จากสมการ Pseudo-second order มีความเป็นเส้นตรงมากกว่าสมการ Pseudo-first order ความสามารถในการดูดซับที่คำนวณจากสมการ Pseudo-second order มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าคำนวณจากสมการ Pseudo-first order นอกจากนั้นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสมการ Pseudo-second order มีค่าน้อยกว่าสมการ Pseudo-first order ดังนั้นการดูดซับไอออนเงินของไคโตซานเรซินเป็นไปตามสมการ Pseudo-second order สอดคล้องกับการดูดซับไอออนทอง (III) แพลตินัม (IV) และแพลเลเดียม (II) โดยไคโตซานเชื่อมขวางเรซิน [11]



รูปที่ 3 จลนพลศาสตร์การดูดซับ Pseudo-second order ที่อุณหภูมิ: ♦ 303, ■ 313, ▲ 323 และ ● 333 เคลวิน

การทํานายความสามารถในการดูดซับโดยใช้ค่าคงที่อัตราเร็วของสมการ Pseudo-first order และ Pseudo-second order เขียนได้ดังสมการที่ 9 และ 10 ตามลำดับ

$$q_t = q_c (1 - e^{-k_1 t}) \quad (9)$$

$$q_t = \frac{tk_2q_e^2}{1 + tk_2q_e} \quad (10)$$

ผลการทำนายความสามารถในการดูดซับ ที่อุณหภูมิ 303-333 เคลวิน แสดงในรูปที่ 1 พบว่าความสามารถในการดูดซับที่ทำนายได้จากสมการ Pseudo-second order มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าทำนายจากสมการ Pseudo-first order

3.4. กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับไอออนเงินของไคโตซานเรซิน ศึกษาจากสมการ Intraparticle diffusion ดังแสดงในสมการที่ 11

$$q_t = k_1 t^{1/2} \quad (11)$$

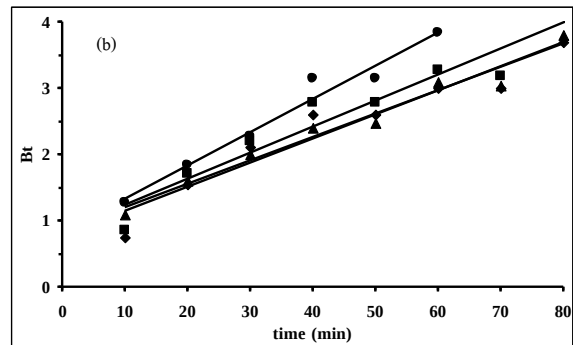
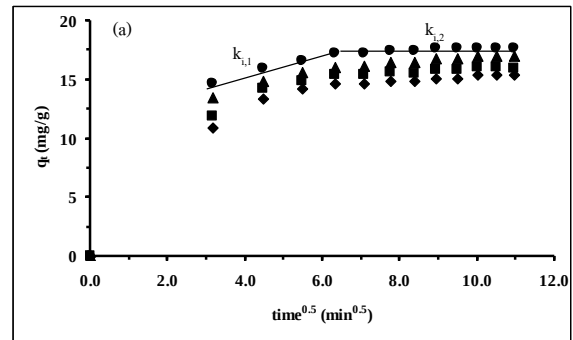
เมื่อ k_1 หมายถึงค่าคงที่อัตราเร็วการแพร่ของไอออนเงินเข้าไปภายในรูพรุนไคโตซานเรซิน (มิลลิกรัมต่อกรัม-นาที่^{0.5})

นำข้อมูลการศึกษาผลอุณหภูมิของสารละลายเงิน มาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง q_t กับ $t^{1/2}$ ได้เส้นกราฟดังแสดงในรูปที่ 4 (a) พบว่ามีค่าความชันสองค่า สามารถหาเป็นค่า k_1 ดังแสดงในตารางที่ 1 Oubagaranadin และคณะ [12] อธิบายค่าความชันของ k_1 ดังนี้ในขั้นตอนแรกเกิดขึ้นรวดเร็วมากภายในเวลา 10 นาที จากนั้นเป็นขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุนของไคโตซานเรซิน ซึ่งเกิดอยู่ในช่วงเวลา 20 - 60 นาที และขั้นตอนสุดท้ายเป็นสมดุลการดูดซับเกิดขึ้นภายหลังจากช่วงเวลา 60 นาทีเป็นต้นไป ดังแสดงในตารางที่ 1

ผลการดูดซับไอออนเงินโดยไคโตซานเรซินนำมาวิเคราะห์อีกครั้ง เพื่อหาขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วการดูดซับ (Rate limiting step) เขียนได้ดังสมการที่ 12

$$Bt = -0.4977 - \ln \left(1 - \frac{q_t}{q_e} \right) \quad (12)$$

นำค่า Bt มาเขียนความสัมพันธ์กับเวลา (t) ลักษณะ



รูปที่ 4 กลไกการดูดซับไอออนเงินของไคโตซานเรซิน: ที่อุณหภูมิ $\diamond$ 303, $\blacksquare$ 313, $\blacktriangle$ 323 และ $\bullet$ 333 เคลวิน: (a) Intraparticle diffusion และ (b) Rate limiting step

ของเส้นตรง สามารถจำแนกขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วการดูดซับ ระหว่างการแพร่ที่ผิว (Film diffusion) และการแพร่ภายในอนุภาค (Particle diffusion) ดังนี้ กรณีที่เป็นเส้นตรงและผ่านจุดกำเนิด อธิบายว่าการแพร่ภายในอนุภาคเป็นขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วการดูดซับ เมื่อการเขียนความสัมพันธ์ดังกล่าวเกิดในลักษณะตรงกันข้าม อธิบายว่าการแพร่ที่ผิวเป็นขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วการดูดซับ [13]

ขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วการดูดซับ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแสดงในรูปที่ 4 (b) พบว่าเส้นที่ได้ไม่มีลักษณะเป็นเส้นตรงและไม่ผ่านจุดกำเนิด อธิบายได้ว่าการดูดซับไอออนเงินโดยไคโตซานเรซิน การแพร่ที่ผิวเป็นขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วการดูดซับ

ตารางที่ 1 ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง-อันดับสอง และค่าคงที่อัตราเร็วการแพร่

Temp (K)	q_e	Pseudo-first order				Pseudo-second order				k_1	
		$q_{e, cal}$	k_1	R^2	S.D.	$q_{e, cal}$	k_2	R^2	S.D.	$k_{1,1}$	$k_{1,2}$
303	14.9	3.8	0.018	0.8666	0.838	15.9	0.016	0.9999	0.014	3.07	0.31
313	15.6	3.9	0.029	0.9205	0.807	16.5	0.018	0.9998	0.011	3.28	0.34
323	16.5	4.1	0.027	0.9641	0.816	17.5	0.016	0.9999	0.041	3.50	0.31
333	17.7	7.6	0.086	0.9433	0.587	18.1	0.023	0.9999	0.006	3.76	0.45

4. สรุป

การใช้ไคโตซานเรซินดูดซับไอออนเงิน พบว่าที่อุณหภูมิ 333 เคลวิน มีความสามารถในการดูดซับดีที่สุดเท่ากับ 17.7 มิลลิกรัมต่อกรัม เนื่องจากเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่ถูกดัดโปรโตเนต การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน มีค่าเท่ากับ 29.9 กิโลจูลต่อโมล การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์เฉลี่ย มีค่าเท่ากับ -306.3 จูลต่อโมล แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับสามารถเกิดขึ้นเองได้ จลนพลศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับ Pseudo-second order กลไกการดูดซับเกิดขึ้น 2 ขั้นตอน การแพร่ที่ผิวเป็นขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนจาก คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] T.W. Purcel and J.J. Peters, "Sources of silver in the environment," *Environment Toxicology and Chemistry*, Vol. 17, pp. 539-546, 1998.
- [2] C. Songkroah, W. Nakbanpote and P. Thiravetyan, "Recovery of silver-thiosulphate complexes with chitin," *Process Biochemistry*, Vol. 39, pp. 1553-1559, 2004.
- [3] W. Sripakdee and K. Piyamongkala, "Equilibrium chromium(VI) adsorption from electroplating wastewater by crosslinked chitosan resin," *The Journal of Applied Science*, Vol. 8, No.2, pp. 6-21, 2009.
- [4] N. Das "Recovery of precious metals through biosorption," *Hydrometallurgy* Vol. 103, pp. 180-189, 2010.
- [5] N. Ruengrong, M. Taewsub and K. Piyamongkala, "Adsorption direct blue 86 dye by chitosan and rice husk," *Ladkrabang Engineering Journal*, Vol. 31, No. 3, pp. 55-60, 2014.
- [6] V. Kittithawornkul, S. Aoonpoontarik and K. Piyamongkala, "Adsorption of cutting oil by synthetic acid soil," *The Journal of KMUTNB*, Vol. 20, No. 2, pp. 266-277, 2010.
- [7] J.W. Moore, W.G. Davies and R.W. Collins, *Chemistry*, McGraw-Hill, 1978.
- [8] R. Suttanan and K. Piyamongkala, "Kinetics and thermodynamics of adsorption methylene blue by groundnut shell," *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 31, No. 4, pp. 751-763, 2008.
- [9] L. Jin and R. Bai, "Mechanisms of lead adsorption on chitosan/PVA hydrogel beads," *Langmuir*, Vol. 18, pp. 9765-9770, 2002.
- [10] C. H. Wu, "Adsorption of reactive dye onto carbon nanotubes: Equilibrium, kinetics and thermodynamics," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 144, pp. 93-100, 2007.
- [11] A. Ramesh, H. Hasegawa, W. Sugimoto, T. Maki and K. Ueda, "Adsorption of gold(III), platinum(IV) and palladium(II) onto glycine modified crosslinked chitosan resin," *Bioresource Technology*, Vol. 99, pp. 3801-3809, 2008.
- [12] J.U.K. Oubagaranadin, N. Sathiyamurthy and Z.V.P. Murthy, "Evaluation of fuller's earth for the adsorption of mercury from aqueous solutions: A comparative study with activated carbon," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 142, pp. 165-174, 2007.
- [13] D. Mohan and K.P. Singh, "Single-and multi-component adsorption of cadmium and zinc using activated carbon derived from bagasse-an agricultural waste," *Water Research*, Vol. 36, pp. 2304-2318, 2002.

การทรุดตัวของชั้นดินเหนียวอ่อนด้วยวิธี Inflection Point กรณีมี และไม่มีระบบระบายน้ำตามแนวดิ่ง

Settlement of Soft Clay by Inflection Point Method for With and Without PVD

กนกกร กันณรงค์ วีรยา นิยมอ้อย

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี

บทคัดย่อ

บทความนี้เปรียบเทียบการวิเคราะห์อัตราการทรุดตัวด้วยวิธี Inflection Point ทั้งในกรณีที่มีและไม่มี PVD โดยเปรียบเทียบกับวิธีการของ Terzaghi ในกรณีที่ไม่มี PVD และเปรียบเทียบกับสมการของ Barron ในกรณีที่มี PVD โดยใช้กรณีศึกษา การถมทางวิ่งของท่าอากาศยานสากลกรุงเทพแห่งที่ 2 ที่มีการปรับปรุงคุณภาพด้วยระบบระบายน้ำตามแนวดิ่ง จากผลการศึกษาพบว่า การหาค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัวด้วยวิธี Inflection Point มีค่าสูงกว่าวิธี Square Root Time ทำให้การคำนวณอัตราการทรุดตัวกรณีที่ไม่มี การปรับปรุงด้วยระบบระบายน้ำตามแนวดิ่งด้วยวิธี Inflection Point เร็วกว่าวิธีของ Terzaghi สำหรับกรณีที่ระบบระบายน้ำตามแนวดิ่ง อัตราการทรุดตัวของวิธี Inflection Point ช้ากว่าวิธีการของ Barron และพบว่าอัตราการทรุดตัวด้วยวิธีการของ Barron ใกล้เคียงกับอัตราการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจริงในสนาม

คำสำคัญ : ค้นดิน การทรุดตัวของชั้นดินเหนียวอ่อน ระบบระบายน้ำตามแนวดิ่งด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ อัตราการทรุดตัว

Abstract

This paper presents the comparison of rate of settlement of soft clay by inflection point method both with and without prefabricated vertical drain (PVD) improvement, comparing with Terzaghi theory in the case of without PVD improvement and comparing with Barron method in the case of with PVD improvement. The case study of runway of the second Bangkok International Airport that have PVD improvement are used. From the results, it is found that the coefficients of consolidation by inflection point method were higher than square root time method. This causes the rate of settlement by inflection point method was faster than Terzaghi method in the case of without PVD improvement. But in the case of with PVD method, the rate of settlement by inflection point method was slower than that of Barron method. When compare with the settlement of the case history, it is found that the rate of settlement by Barron was closed to the field settlement.

Keywords : Embankment, Settlement of Soft Soil, Prefabricated Vertical Drained, rate of settlement

1. บทนำ

ในการก่อสร้างคันทางหรือคันดินถมบนชั้นดินเหนียวอ่อน เนื่องจากชั้นดินเหนียวอ่อนกำลังรับน้ำหนักต่ำ ทำให้ไม่สามารถก่อสร้างคันทางจนถึงความสูงที่ต้องการได้ จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพดิน ซึ่งมีอยู่หลายวิธี แต่สำหรับกรณีที่เป็นคันทางหรือคันดินถม วิธีการปรับปรุงที่นิยมใช้ คือ น้ำหนักกดทับล่วงหน้า (Preloading) โดยการใช้การถมที่ละชั้น (Step Loading) ควบคู่กับการใช้ระบบระบายน้ำตามแนวดิ่ง (PVD) โดยอาศัยหลักการที่เมื่อดินเกิดการทรุดตัว ดินจะแน่นขึ้น และมีกำลังรับน้ำหนักสูงขึ้น โดยระบบระบายน้ำตามแนวดิ่งช่วยเร่งการทรุดตัวให้เกิดระหว่างการก่อสร้างทำให้ไม่มีผลกระทบกับคันดินถมระหว่างการใช้งาน [1, 2] ในการออกแบบการวิเคราะห์ปริมาณการทรุดตัวทั้งหมดมีความสำคัญมากเพราะเป็นค่าตั้งต้นในการวิเคราะห์อัตราการทรุดตัวตามเวลา ในงานวิจัยนี้สนใจวิธี Inflection Point ที่นำเสนอโดย Cour [3] และ Robinson [4] ใช้ความสัมพันธ์อัตราการทรุดตัว (U%) กับ $\log t$ ในการวิเคราะห์การทรุดตัวที่ร้อยละ 70 ซึ่งสามารถใช้ในการวิเคราะห์อัตราการทรุดตัวของดินได้ทั้งในกรณีที่ไม่มีและที่มี PVD เนื่องจากการประมาณอัตราการทรุดตัวตามเวลามีความสำคัญมากในการออกแบบ เพื่อวางแผนการเพิ่มน้ำหนักในแต่ละชั้น รวมถึงทำให้ทราบถึงปริมาณการทรุดตัวที่เหลืออยู่ภายหลังการก่อสร้างทำให้สามารถวางแผนการบำรุงรักษาคันทาง ดังนั้นเพื่อให้สามารถวิเคราะห์อัตราการทรุดตัวได้อย่างเหมาะสม ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาเปรียบเทียบการวิเคราะห์อัตราการทรุดตัวด้วยวิธี Inflection Point ทั้งในกรณีที่มีและไม่มี PVD โดยเปรียบเทียบกับวิธีการของ Terzaghi [5] ในกรณีที่ไม่มี PVD และ เปรียบเทียบกับสมการของ Barron ในกรณีที่มี PVD โดยใช้กรณีศึกษา การถมทางวิ่งของท่าอากาศยานสากลกรุงเทพมหานครแห่งที่ 2 (สนามบินสุวรรณภูมิ)

2. ทฤษฎีวิเคราะห์ปริมาณการทรุดตัวและอัตราการทรุดตัว

2.1 ปริมาณการทรุดตัวของชั้นดิน

ทฤษฎีของ Terzaghi [5] เป็นการหาปริมาณการทรุดตัวแบบ 1 มิติของดินเหนียวอิ่มตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำขึ้นแรก สำหรับดินอัดแน่นปกติ ตามสมการที่ (1)

$$s_c = \frac{C_c}{1+e_0} H \log \left(\frac{\sigma'_{vo} + \Delta\sigma}{\sigma'_{vo}} \right) \quad (1)$$

เมื่อ σ'_{vo} = หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งในปัจจุบัน

H = ความหนาของชั้นดินที่ทรุดตัว

C_c = ดัชนีการยุบอัดตัว

e_0 = อัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้น

$\Delta\sigma$ = หน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากคันดินถม

โดยเมื่อมีการถมคันดินที่ละชั้น ทำให้เกิดการทรุดตัวก่อนที่จะมีการถมชั้นถัดไป การทรุดตัวที่เกิดจากการถมน้ำหนักชั้นที่ 1 สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ (2)

$$s_{c1} = \frac{C_c}{1+e_0} H \log \left(\frac{\sigma'_{vo} + \Delta\sigma_1}{\sigma'_{vo}} \right) \quad (2)$$

เมื่อให้เกิดการทรุดตัวจากการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกชั้นที่ 1 เท่ากับ $U_1\%$ ค่าการทรุดตัวที่เกิดจากการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกชั้นที่ 1 หาได้ด้วยสมการ (3)

$$s_1 = U_1 s_{c1} \quad (3)$$

และเมื่อมีการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก n ชั้น การวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวสามารถหาได้จากสมการ

$$s_{cn} = \frac{C_c}{1+e_0} H \log \left(\frac{\sigma'_{vo} + \Delta\sigma_1 + \dots + \Delta\sigma_n}{\sigma'_{vo}} \right) \quad (4)$$

ค่าการทรุดตัวทั้งหมดจากการเกิดการทรุดตัวที่ละชั้นจนถึงชั้นที่ n หาได้ด้วยสมการที่ (5)

$$s_n = s_{cn} - (s_1 + \dots + s_{n-1}) \quad (5)$$

2.2 อัตราการทรุดตัวกรณีที่ไม่มี PVD

กรณีของอัตราการทรุดตัวที่ไม่มีระบบระบายน้ำตามแนวดิ่งใช้ทฤษฎีของ Terzaghi [5] ด้วยสมการ (6)

$$U = U_{avg} = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v} \quad (6)$$

เมื่อ $M = (2m+1)(\pi/2)$

ค่าตัวประกอบของเวลาตามแนวดิ่ง (T_v) สามารถหาได้จากสมการ (7)

$$T_v = \frac{C_v t}{H_d^2} \quad (7)$$

เมื่อ H_d = ระยะทางการไหลของน้ำ

$H_d = H/2$ เมื่อน้ำไหลได้สองทิศทาง

$H_d = H$ เมื่อน้ำไหลได้ทิศทางเดียว

จากสมการ (6) เห็นว่าเวลาที่ใช้ในการทรุดตัวขึ้นอยู่กับค่า C_v ในงานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบการหาค่า C_v ด้วยวิธี Terzaghi (t_{90}) [5] และวิธี Inflection point (t_{70}) [4]

2.3 อัตราการทรุดตัวกรณีที่มี PVD

1) วิเคราะห์ด้วยวิธีของ Barron [6] วิเคราะห์อัตราการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ (Time Rate of Consolidation) โดยใช้สมการอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจากการระบายน้ำตามแนวรัศมี ดังสมการ (8)

$$U_r = 1 - \exp\left[\frac{-8}{F_n} T_r\right] \quad (8)$$

ค่าตัวประกอบของเวลาตามแนวรัศมี (T_r) สามารถหาได้จากสมการ (9)

$$T_r = \frac{C_v t}{D_c^2} \quad (9)$$

D_c = เส้นผ่านศูนย์กลางอิทธิพล ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (10) หรือ (11) ขึ้นอยู่กับลักษณะการติดตั้ง

$$D_c = 1.13S \text{ (กรณีติดตั้งแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส)} \quad (10)$$

$$D_c = 1.05S \text{ (กรณีติดตั้งแบบสามเหลี่ยม)} \quad (11)$$

เมื่อ S = ระยะห่างระหว่างการจัดตั้ง PVD

C_r = สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำตามแนวรัศมี สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (12)

$$C_r = \left(\frac{k_r}{k_v}\right) C_v \quad (12)$$

สำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ อัตราส่วนของค่า k_r/k_v ที่เสนอโดย Bergado และคณะ [7] มีค่าโดยประมาณเท่ากับ $k_r/k_v = 4-10$

F_n = ค่าตัวประกอบของระยะห่างของแผ่นระบายน้ำ (PVD) หาได้จากสมการ (13)

$$F_n = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2} \quad (13)$$

เมื่อ $n = D_e / d_w$

d_w = ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า สามารถหาได้ตามสมการ (14)

$$d_w = \frac{2(a + b)}{\pi} \quad (14)$$

เมื่อ a = ความกว้างของแผ่น PVD

b = ความหนาของแผ่น PVD

2) วิเคราะห์ด้วยวิธีของ Inflection Point [1] โดยวิธีนี้วิเคราะห์อัตราการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ (Time Rate of Consolidation) ประกอบด้วยอัตราการทรุดตัวตามแนวตั้งและอัตราการทรุดตัวตามแนวรัศมีตามสมการ (15)

$$U = 1 - (1 - U_v)(1 - U_r) \quad (15)$$

อัตราการทรุดตัวตามแนวตั้ง (U_v) สามารถหาได้จากสมการ (16)

$$U_v = \frac{\sqrt{4xT_v}}{\pi} \quad (16)$$

อัตราการทรุดตัวตามแนวรัศมี (U_r) สามารถหาได้จากสมการ (17)

$$U_r = 1 - \exp\left[\frac{-8T_r}{\mu}\right] \quad (17)$$

$$\text{เมื่อ } \mu = F_n + F_s + F_w$$

F_n = ผลกระทบจากระยะห่างระหว่าง PVD โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ (18)

$$F_n = \ln n - \frac{3}{4} \quad (18)$$

เมื่อ n = อัตราส่วนระยะห่างของแผ่นระบายน้ำ = D_e/d_s

d_s = ความยาวเส้นผ่าศูนย์กลางของบริเวณที่ดินถูกรบกวน ดังสมการที่ (19)

$$d_s = 2d_m \quad (19)$$

เมื่อ d_m = ความยาวเส้นผ่าศูนย์กลางของ Mandrel สามารถหาได้จากสมการ (20)

$$d_m = \sqrt{\frac{4}{\pi} w \times l} \quad (20)$$

F_s = ผลกระทบจากการถูกรบกวนของดิน คำนวณได้จากสมการ (21)

$$F_s = \left(\frac{k_r}{k'_r} - 1\right) \ln s \quad (21)$$

เมื่อ k_r = สัมประสิทธิ์การซึมน้ำตามแนวรัศมี

k'_r = สัมประสิทธิ์การซึมน้ำตามแนวรัศมีของ

บริเวณรบกวนดิน

$$s = d_s/d_w$$

F_r = ผลกระทบจากแรงต้านการไหลของแผ่นระบายน้ำ (Well Resistance) คำนวณได้จากสมการ (22)

$$F_r = \pi \frac{2l^2 k_r}{3q_w} \quad (22)$$

q_w = อัตราการไหลของแผ่นระบายน้ำ คำนวณได้จากสมการ (23)

$$q_w = 5l^2 k_r \quad (23)$$

เมื่อ l = ความยาวของแผ่นระบายน้ำ

หลักการวิเคราะห์และข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธีทั้งในกรณีมีและไม่มี PVD สามารถสรุปได้ในตารางที่ 1 ตารางที่ 1 หลักการวิเคราะห์ของแต่ละวิธี

กรณีไม่มี PVD	หลักการวิเคราะห์	ข้อดี/ข้อเสีย
วิธี Terzaghi	ใช้ t_{90}	อ่านค่าได้ไม่ชัดเจน
วิธี Inflection Point	ใช้ t_{70}	อ่านค่าได้ง่ายและชัดเจน
กรณีมี PVD	หลักการวิเคราะห์	ข้อดี/ข้อเสีย
วิธี Barron	มีเฉพาะการระบายน้ำตามแนวดิ่ง	ไม่พิจารณาผลกระทบการติดตั้ง PVD
วิธี Inflection Point	มีการระบายน้ำตามแนวดิ่งและแนวรัศมี	พิจารณาผลกระทบการติดตั้ง PVD เช่น แรงต้านการไหล Smear Zone เป็นต้น

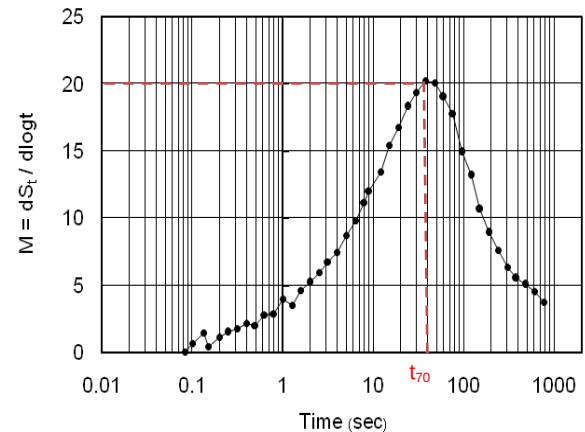
3. ผลการศึกษา

3.1 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำตามแนวดิ่ง (C_v)

1) วิธีรากที่สองของเวลา (Square Root Time) [5] หาค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำตามแนวดิ่งด้วยผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) ในการหาค่า t_{90} ได้จากความสัมพันธ์ของค่าการทรุดตัวที่อ่านได้จากมาตรวัด (Dial Gauge) กับเวลาในรูปแบบของรากที่สองของเวลา (Square Root Time) ค่าตัวประกอบของเวลาตามแนวดิ่ง (T_v) ที่ t_{90} จะมีค่าเท่ากับ 0.848 ทำให้สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำตามแนวดิ่ง (C_v) ได้จากสมการ

$$C_v = 0.848 H_d^2 / t_{90} \quad (24)$$

2) ทฤษฎีของ Inflection Point [4] โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำสามารถหาได้จากค่า t_{70} โดยใช้ความสัมพันธ์ของค่า M และค่าลอการิทึมของเวลา เมื่อค่า $M = dS_t / d \log t$ ดังแสดงในรูปที่ 1

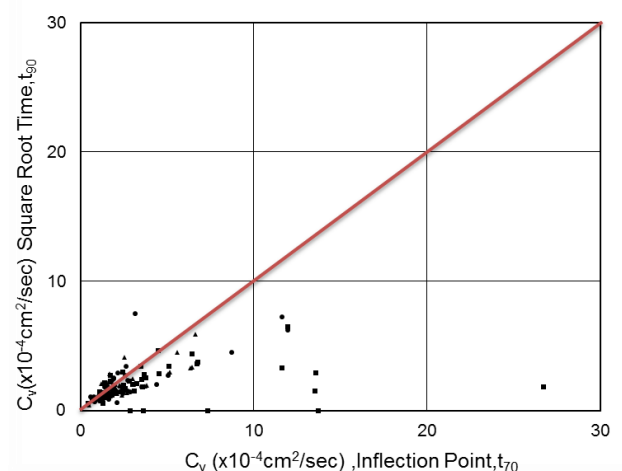


รูปที่ 1 การหาค่า t_{70} ตามวิธี Inflection Point

ค่าตัวประกอบของเวลาตามแนวดิ่ง (T_v) ที่ t_{70} จะมีค่าเท่ากับ 0.405 ทำให้สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำตามแนวดิ่ง (C_v) ได้จากสมการ

$$C_v = 0.405 H_d^2 / t_{70} \quad (25)$$

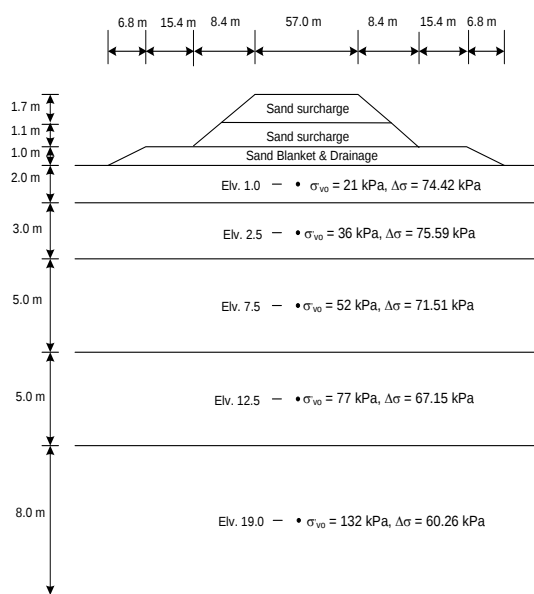
นำค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำที่หาได้จากทั้งสองวิธีมาแสดงความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 2 จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำตามแนวดิ่งของวิธี Inflection Point จะมีค่าสูงกว่าค่าของวิธี Square Root Time



รูปที่ 2 ค่า C_v ของวิธี Square Root Time และวิธี Inflection Point

3.2 อัตราการทรุดตัวกรณีไม่มี PVD

รูปที่ 3 แสดงหน้าตัดของชั้นดินของท่าอากาศยานสากลกรุงเทพแห่งที่ 2 ซึ่งแบ่งเป็น 5 ชั้น โดยชั้นดินถมสำหรับทางวิ่งแบ่งเป็น 3 ชั้น ซึ่งในกรณีที่ไม่มีการใช้สมมุติฐานว่าการถมทั้ง 3 ชั้นทำเสร็จในขั้นตอนเดียว ซึ่งทำให้เกิดการทรุดตัวในดินแต่ละชั้นตามสมการที่ (1) มีค่าเท่ากับ 0.028, 0.589, 0.281, 0.422 และ 0.067 เมตร ตามลำดับ โดยปริมาณการทรุดตัวที่เกิดขึ้นทั้งหมด 1.387 เมตร ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 3 หน้าตัดของชั้นดินถม และคุณสมบัติของชั้นดิน

สำหรับการหาอัตราการทรุดตัวในกรณีไม่มี PVD ตามสมการที่ (6) และ (7) นั้นขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำตามแนวตั้ง ซึ่งแปรผันตามหน่วยแรงกระทำ โดยค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำตามวิธีรากที่สองของเวลาสำหรับดินชั้นที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ

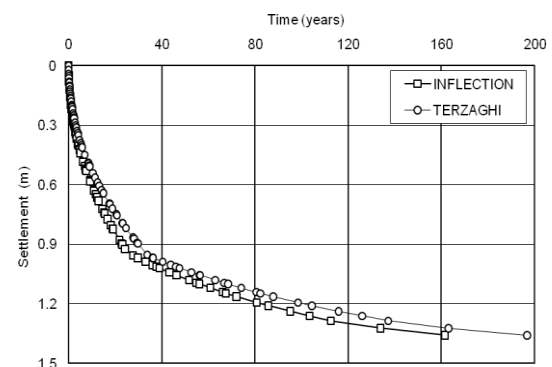
ตารางที่ 2 ปริมาณการทรุดตัวของทางวิ่งจากชั้นดินถม

Elev	γ (kN/m ³)	H (m)	σ'_{vo} (kN/m ²)	$\Delta\sigma$ (kN/m ²)	σ'_{vf} (kN/m ²)	σ'_{vm} (kN/m ²)	e_0	C_c	C_r	S_{oc} (m)
1	16	2	21	74.42	98.42	110	0.9	0.2	0.04	0.028
3.5	14	3	36	73.59	109.59	50	3.1	2.3	0.15	0.589
7.5	14	5	52	71.50	123.50	100	2.7	1.8	0.15	0.281
12.5	16	5	77	67.15	144.15	110	1.9	1.9	0.14	0.422
19	20	8	132	60.26	192.26	140	0.7	0.1	0.02	0.067
Total										1.387

1.8×10^{-4} cm²/sec และสำหรับดินชั้นที่ 3 – 5 มีค่าเท่ากับ 1.7×10^{-4} cm²/sec

ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำที่ได้จากวิธี Inflection Point ในดินชั้นที่ 1 และ 2 เท่ากับ 2.5×10^{-4} cm²/sec และค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำตามแนวตั้งเฉลี่ยของดินในชั้นที่ 3, 4 และ 5 เท่ากับ 2.1×10^{-4} cm²/sec

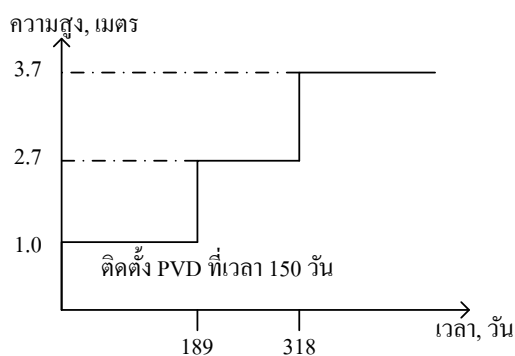
โดยผลวิเคราะห์อัตราการทรุดตัวของชั้นดินทั้งหมดกรณีที่ไม่มีการใช้ PVD ของทั้งสองวิธีแสดงในรูปที่ 4 โดยวิธีของ Terzaghi จะให้ค่าอัตราการทรุดตัวร้อยละ 95 ของชั้นดินที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 มีค่าเท่ากับ 5 ปี 30 ปี 126 ปี 197 ปี 82 ปี ตามลำดับ และวิธีของ Inflection Point จะให้ค่าอัตราการทรุดตัวที่ร้อยละ 95 เท่ากับ 3.5 ปี 22.7 ปี 103 ปี 162 ปี 68 ปี ของชั้นดินที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับ



รูปที่ 4 เปรียบเทียบค่าการทรุดตัวทั้งหมดของชั้นดินตามวิธี Terzaghi และวิธี Inflection Point

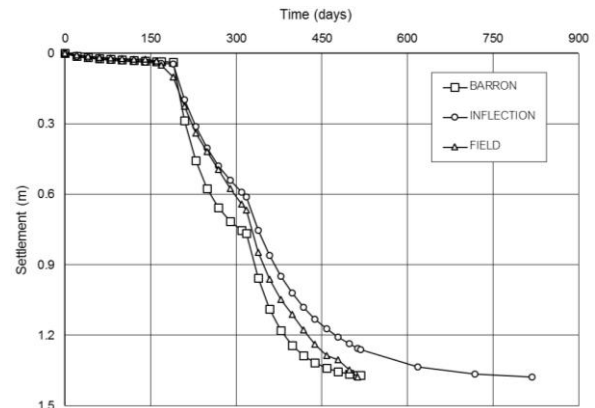
3.3 อัตราการทรุดตัวของดินที่มี PVD

ในกรณีที่มี PVD นั้นการถมคันดินถมดังแสดงในรูปที่ 3 จะใช้ขั้นตอนการถมตามที่เกิดขึ้นจริงในสนาม โดยในแต่ละชั้นมีช่วงเวลาที่ปล่อยให้เกิดการทรุดตัว เนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ รูปที่ 5 แสดงขั้นตอนการถมและระยะเวลาที่ทำให้เกิดการทรุดตัว การทรุดตัวที่เกิดขึ้นจากการถมหน้าหนักรรทุกชั้นที่ 1 โดยเริ่มติดตั้ง PVD เมื่อเวลาผ่านไป 150 วัน มีค่า 0.038 เมตร และในชั้นที่ 2 ได้เริ่มถมเมื่อเวลาผ่านไป 189 วัน และทิ้งไว้ประมาณ 130 วัน จึงเริ่มถมชั้นสุดท้าย และทิ้งไว้โดยวัดการทรุดตัวครั้งสุดท้ายที่ 513 วัน เมื่อมีการติดตั้ง PVD แล้ว การวิเคราะห์การทรุดตัวด้วยวิธีของ Barron มีค่าการทรุดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 0.728 และ 0.603 เมตร ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันค่าผลการทรุดตัวที่เกิดจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีของ Inflection Point ค่าการทรุดชั้นที่เกิดขึ้นจากการถมหน้าหนักรรทุกชั้นที่ 2 เท่ากับ 0.567 เมตร และค่าการทรุดชั้นที่เกิดขึ้นจากการถมหน้าหนักรรทุกชั้นที่ 3 ของดินเท่ากับ 0.643 โดยผลการวิเคราะห์การทรุดตัวทั้งสองวิธีการนั้นให้ผลการทรุดตัวรวมมีค่าเท่ากับ 1.387 เมตร และเท่ากับผลการทรุดตัวที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้การถมเป็นครั้งเดียวในกรณีที่ไม่มี PVD



รูปที่ 5 ขั้นตอนการถมในแต่ละชั้น

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลาในกรณีที่มี PVD จากการวิเคราะห์ทั้งสองวิธีเทียบกับการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจริงในสนาม พบว่าวิธีการของ Barron ให้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่เกิดขึ้นจริงในสนาม ในขณะที่อัตราการทรุดตัวด้วยวิธีของ Inflection Point ซ้ำกว่าค่าที่เกิดขึ้นจริงในสนามเนื่องจากวิธีการของ Inflection Point คำนึงถึงผลกระทบที่เกิดจากการติดตั้งแผ่นระบายน้ำ ผลกระทบของบริเวณที่ดินถูกรบกวน (Smear Zone) และผลกระทบจากแรงต้านการไหลของแผ่นระบายน้ำ



รูปที่ 6 อัตราการทรุดตัวของดินตามวิธีของ Barron วิธีของ Inflection Point เปรียบเทียบกับข้อมูลในสนาม

4. สรุปผลการศึกษา

- 1.) ผลการวิเคราะห์อัตราการทรุดตัวในกรณีชั้นดินที่ไม่มี PVD โดยใช้การวิเคราะห์ 2 วิธีคือ วิธีของ Terzaghi และวิธีของ Inflection Point พบว่าอัตราการทรุดตัวด้วยวิธีของ Inflection Point เร็วกว่าวิธีการของ Terzaghi
- 2.) ผลการวิเคราะห์อัตราการทรุดตัวในกรณีชั้นดินที่มี PVD พบว่าอัตราการทรุดตัวด้วยวิธีการของ Barron ให้ค่าใกล้เคียงกับอัตราการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในสนาม และอัตราการทรุดตัวด้วยวิธี Inflection Point จะเกิดขึ้นช้ากว่าอัตราการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในสนาม

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] A.K. Sinha, G. Havanagi, and S. Mathur, "Inflection point method for predicting settlement of PVD improved soft clay under embankments, Geotextiles and Geomembranes, Vol.25, pp.336- 345, April, 2007.
- [2] C.J. Leo, "Equal consolidation by vertical drains,," J. Geotech. Geoenviron Eng., Vol.131, No.10, pp.1317-1317, October, 2005.
- [3] F.R. Cour, "Inflection Point Method for Computing C_v ," Journal of the Soil Mechanics. Foundation Div, ASCE, Vol.97, No.5, pp. 827-831, August, 1971.
- [4] R.G. Robinson, "Consolidation analysis by inflection point method," J. Geotech. Geoenviron Eng, Vol.47, No.1, pp.199-200, February, 1997.
- [5] K. Terzaghi, "Theoretical soil mechanics," John Wiley and Sons, Inc., New York, 1943
- [6] R.A. Barron, "Consolidation of Fine-grained Soils by Drain Wells," Transactions of ASCE, Vol.113, pp.718-754, January, 1948.
- [7] D.T. Bergado, J.C. Chai, M.C. Alfaro and A.S. Balasubramaniam, "Improvement Techniques of Soft Ground in Subsideind and Lowland Environment," AIT, 1992.

การพัฒนาโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr สำหรับการปรับสภาพเกรน ละเอียดและปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนในโลหะผสมหล่อ อลูมิเนียม-ซิลิคอน-แมกนีเซียม

The Development of Al-4%B-2%Sr Master Alloy for Refining and Eutectic Silicon Modification in Al-Si-Mg Cast Alloys

พิสิษฐ์ เมืองน้อย จินกมล ลุยจันทร์ เฉลิมพล คล้ายนิล

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการผลิต คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

อีเมล: Phisith.mua@rmutr.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr สำหรับการปรับสภาพเกรนละเอียดและการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอน พิจารณาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการปรับสภาพเกรนละเอียดและเฟสยูเทคติกซิลิคอนของโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr ในโลหะผสม Al-Si-Mg โดยการเติมระดับแตกต่างกัน 1-4 wt.% เวลาค้ำน้ำโลหะคงที่ 30 นาที จากการศึกษาด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบเชิงโลหะ AlB_2 , SrB_6 และ Al_4Sr บนพื้นอลูมิเนียม ผลการทดลองโดยการเติมโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr ปริมาณ 4 wt.% ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการปรับสภาพเกรนละเอียดมากกว่าปริมาณการเติม 1, 2 และ 3 wt.% ในขณะที่เฟสยูเทคติกซิลิคอนปรับสภาพกลมมนทั้งหมด จากการวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคแสดงว่าขนาดเกรนเฉลี่ยในโลหะผสมจะลดต่ำลง เมื่อปริมาณโลหะแม่เพิ่มมากขึ้น

คำสำคัญ : โลหะแม่, การปรับสภาพ, การปรับสภาพเกรนละเอียด, งานหล่อ

Abstract

The objective of this research is to development of Al-4%B-2%Sr master alloy for refining and modification of eutectic silicon. Efficiency comparison of Al-4%B-2%Sr master alloy in grain refinement and eutectic modification in Al-Si-Mg cast alloy with different additions (1, 2, 3 and 4.0 wt.%) and constant holding time (30 min) were investigated. The XRD studies show AlB_2 , SrB_6 and Al_4Sr intermetallic compound in α -Al matrix. The results show that the addition 4 wt.% of Al-4%B-2%Sr master alloy leads to refining efficiency than 1, 2 and 3 wt.% addition, while eutectic silicon was fully modified into globular morphology. The analyze of macrostructure show that the average grain size of alloy decreased with increasing the master alloy content.

Keywords : Master alloys, Modification, Grain refinement, Casting

1. บทนำ

การปรับสภาพเกรน α -Al ให้มีขนาดเล็กและละเอียดนั้น ส่งผลดีต่อชิ้นงานหล่อหลายประการ เช่น ปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น มีส่วนผสมทางเคมีสม่ำเสมอ ช่วยลดโอกาสการเกิดรูพรุนและจุดเสียต่างๆ ลดการแตกร้าวร้าวที่เกิดขึ้นระหว่างการแข็งตัวและเพิ่มความสามารถในการป้อนเด็มน้ำโลหะหล่อให้ดียิ่งขึ้น [1] ในปัจจุบันการปรับสภาพเกรนละเอียดนั้นนิยมเติมธาตุผสม เข้าไปในน้ำโลหะหล่อ โดยธาตุดังกล่าวจะฟอร์มตัวเป็นสารประกอบต่างๆ และทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มต้นจากการเกิดนิวเคลียส (Heterogeneous nucleation) เช่น สารประกอบ $TiAl_3$, TiB_2 ในโลหะแมกนีเซียม Al-Ti-B, สารประกอบ AlB_2 ในโลหะแมกนีเซียม Al-B เป็นต้น [1-10]

การปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิกอน เป็นกระบวนการที่มีความสำคัญในกระบวนการหล่อใน โลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิกอน สำหรับผลิตชิ้นส่วนที่มีความซับซ้อนเนื่องจากปริมาณซิลิกอน 5-18 wt.% จะส่งผลดีด้านสมบัติการไหลของน้ำอลูมิเนียมหล่อเหลว [11] เป็นที่ทราบกันดีว่าเฟสยูเทคติกซิลิกอนมีลักษณะเป็นแผ่น รูปทรงไม่แน่นอนเนื่องจากการฟอร์มตัวและเติบโต (Growth) ในระนาบ $\langle 112 \rangle$ และมีการ Twinning ในระนาบ (111) ในปัจจุบันนิยมเติมธาตุสตอนเทียม ปริมาณ 0.02-0.04 wt.% ลงไปในน้ำโลหะหล่อเหลว เมื่อโลหะหล่อเหลวแข็งตัวธาตุสตอนเทียมจะเข้าไปขัดขวางการเติบโตของเฟสซิลิกอนในระนาบ $\langle 112 \rangle$ และเกิดการเติบโตได้หลายทิศทาง ทำให้เฟสยูเทคติกซิลิกอนมีขนาดเล็กและมีความหนาแน่นมากขึ้น จากลักษณะดังกล่าวจะส่งผลดีต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่สูงขึ้น [12-13], สามารถลดเวลาการอบให้เป็นเนื้อเดียวกัน [14] การเติมธาตุสตอนเทียม จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องควบคุมให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสมในกรณีที่เติมมากเกินไปจะเกิด ฟอร์มตัวเป็นสารประกอบเชิงโลหะ Al_4SrSi_2 มีลักษณะเป็นก้อน กระจายตัวในโครงสร้างจุลภาคและส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่อลดต่ำลง [15]

จากงานวิจัยที่ผ่านมา C. Limmaneevichitr [1] ได้ศึกษาการเสื่อมประสิทธิภาพของโลหะแมกนีเซียม Al-3%Ti-0.5%B โดย

การเติมในโลหะผสมอลูมิเนียม A356 พบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมในการปรับสภาพอยู่ในช่วง 20 นาที แต่ไม่เกิน 60 นาที เนื่องจากเกิดการตกตะกอนของสารประกอบ $TiAl_3$ และ TiB_2 บริเวณก้นของเบ้าหล่อ มีการศึกษาการปรับสภาพเกรน α -Al โดยใช้โลหะแมกนีเซียม Al-5%Ti, Al-5%Ti-1%B และ Al-4%B ในโลหะผสม A356 [2] พบว่าโลหะแมกนีเซียม Al-4%B มีประสิทธิภาพสูงสุดในการปรับสภาพเกรน การศึกษาผลกระทบของการปรับสภาพเกรนละเอียดในโลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิกอน [5] โดยการเติมโลหะแมกนีเซียม Al-Ti-B ระดับการเติม 0.01-0.15 wt% พบว่าที่ปริมาณการเติม 0.1-0.15 wt% มีประสิทธิภาพในการปรับสภาพเกรนละเอียดสูงสุด นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อปริมาณธาตุซิลิกอนเพิ่มมากขึ้นประสิทธิภาพในการปรับสภาพเกรนละเอียดจะลดต่ำลง มีงานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบการปรับสภาพเกรนละเอียดและปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิกอนในโลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิกอน โดยการผสมกันระหว่างโลหะแมกนีเซียม Al-Ti-B, Al-B กับ Al-Sr พบว่ามีประสิทธิภาพในการปรับเกรนละเอียดและการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิกอน [3, 6-9] และทำให้สมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่อสูงขึ้น [3,9] นอกจากนี้ยังพบว่าเกิดการฟอร์มตัวของสารประกอบ SrB_6 ในโครงสร้างจุลภาค [6, 8-9] มีการพัฒนาโลหะแมกนีเซียมใหม่และทดลองในโลหะผสม A356 [10] โดยเติม Al-4%Sr+2%B ปริมาณ 0.5 wt.% เทลงโมลเหล็กที่อัตราการเย็นตัว 12°C/s พบว่ามีประสิทธิภาพที่ดีในการปรับเกรนละเอียด ในขณะที่เฟสยูเทคติกซิลิกอนมีการปรับสภาพแบบ Over modify เนื่องจากสัดส่วนของธาตุสตอนเทียมสูงและอัตราการเย็นตัวที่เร็วเกินไป

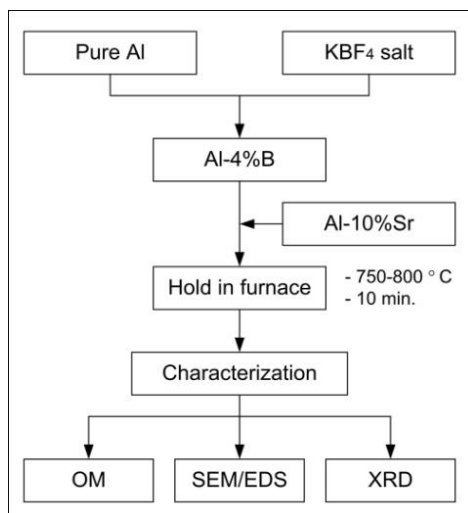
จากที่กล่าวมาทั้งหมดจะพบว่ากระบวนการปรับสภาพเกรนละเอียดและเฟสยูเทคติกซิลิกอนนั้น ส่งผลต่อคุณภาพและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่อ ซึ่งด้วยข้อจำกัดต่างๆ ที่ทำให้ประสิทธิภาพในการปรับสภาพเกรนละเอียดลดต่ำลง เช่น ปริมาณการเติมโลหะแมกนีเซียมที่ไม่เหมาะสม ปริมาณธาตุซิลิกอนที่สูงของโลหะผสมอลูมิเนียม และการเสื่อมสภาพเมื่อเวลาผ่านไปโลหะเพิ่มขึ้น เป็นต้น ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมา นั้นยังไม่พบว่ามีการศึกษาและพัฒนาโลหะแมกนีเซียม Al-4%B-2%Sr เพื่อใช้ในการปรับสภาพเกรนละเอียดและเฟส

ยูเทคติกซิลิคอน ไปพร้อมๆ กัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโลหะแม่ชนิด Al-4%B-2%Sr เพื่อใช้สำหรับการปรับปรุงสภาพเกรนละเอียดและเฟสยูเทคติกซิลิคอนในงานหล่อโลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิคอน-แมกนีเซียม

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 การพัฒนาโลหะแม่ชนิด Al-4%B-2%Sr

รูปที่ 1 แสดงขั้นตอนการพัฒนาโลหะแม่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยการหลอมอลูมิเนียมบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมเกลือ KBF_4 ในปริมาณเท่ากับ Al-4%B เติงรางเหล็กที่เตรียมไว้ จากนั้นนำโลหะไปหลอมอีกครั้ง ที่อุณหภูมิ 750-800 องศาเซลเซียส แล้วเติมโลหะผสมชนิด Al-10%Sr เพื่อให้ได้โลหะแม่ชนิด Al-4%B-2%Sr ค้างน้ำโลหะไว้ 10 นาที



รูปที่ 1 ขั้นตอนการพัฒนาโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr จากนั้นเติงรางเหล็กที่เตรียมไว้ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงและส่องกราดที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ EDS นอกจากนี้ยังศึกษาสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในโครงสร้างโดยใช้เทคนิค XRD

2.2 การทดลองการปรับปรุงสภาพ

โลหะผสมอลูมิเนียม (A356) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีที่ใช้ในการทดลอง (wt.%)

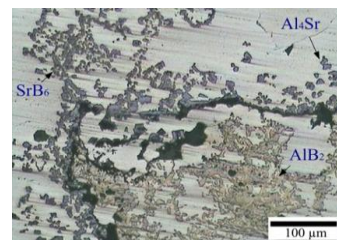
Alloys	Si	Fe	Mg	Cu	Zn
A356	6.95	0.14	0.34	0.04	0.01

กระบวนการหลอมจะใช้เตาไฟฟ้าชนิดลดดันทานอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เมื่ออินกอตหลอมเหลวเติมฟลักซ์ปกคลุมผิวหน้า 0.5 wt.% และเติมโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr ที่ระดับ 1, 2, 3 และ 4 wt.% ตามลำดับ ค้างน้ำโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที พ่นแก๊สอาร์กอน 2 นาที จากนั้นเทลงเบ้าสแตนเลสผนังบาง ที่มีอัตราการเย็นตัวต่ำ 0.2 °C/s เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบการปรับปรุงสภาพเกรนละเอียดและเฟสยูเทคติกซิลิคอนที่เกิดขึ้นจากการเย็นตัวที่เร็ว เทน้ำโลหะที่อุณหภูมิ 720 องศาเซลเซียส นำชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างมหภาค โดยจัดกระจายทรายจนถึงความละเอียด 800 grit กัดผิวหน้าโดยใช้สารละลาย Poultion's reagent ที่มีส่วนผสมทางเคมี HNO_3 , HCl , HF และน้ำกลั่น จากนั้นวัดขนาดเกรนเฉลี่ยโดยวิธี Linear intercept E112 และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 โครงสร้างจุลภาคโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr

เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคพบว่าประกอบด้วยสารประกอบ AlB_2 มีลักษณะเป็นก้อนขนาดใหญ่ สารประกอบ SrB_6 ที่มีการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดเล็ก และสารประกอบ Al_4Sr บนพื้นอลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 2



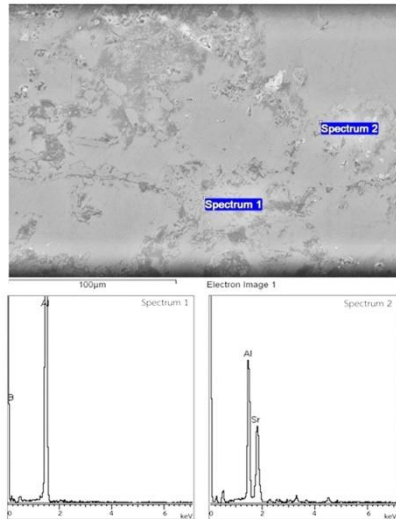
รูปที่ 2 โครงสร้างจุลภาคโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr

3.2 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดและเทคนิค EDS

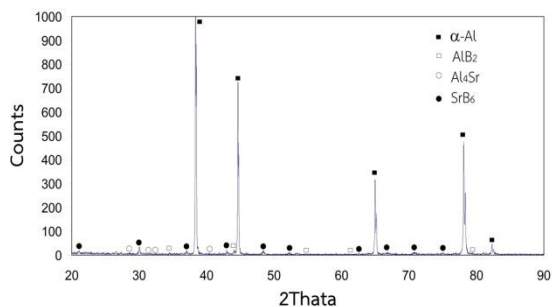
รูปที่ 3 แสดงโครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดและเทคนิค EDS พบว่าที่ Spectrum 1 ประกอบด้วยธาตุโบรอน 53.12 wt% และธาตุอลูมิเนียม 46.88 wt% ขณะที่ Spectrum 2 พบว่าเกิดจากการรวมตัวกันระหว่างธาตุอลูมิเนียม 37.90 wt% และธาตุสตรอนเทียม 62.10 wt%

3.4 การวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค XRD

ผลวิเคราะห์โลหะแม่ Al-4%B-2%Sr โดยใช้เทคนิค XRD แสดงในรูปที่ 4 พบว่าเกิดการฟอร์มตัวของธาตุอลูมิเนียม, สารประกอบ AlB_2 , Al_4Sr และ SrB_6 สอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาคที่แสดงในรูปที่ 2



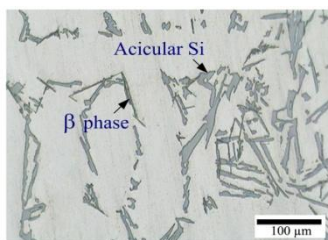
รูปที่ 3 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดและเทคนิค ESD



รูปที่ 4 ผลวิเคราะห์ XRD ของโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr

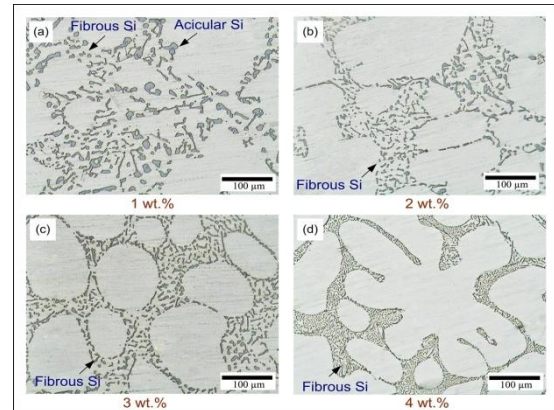
3.5 การปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิกอน

รูปที่ 5 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิกอน พบว่าประกอบด้วยเฟสซิลิกอนมีลักษณะเป็นแท่งขนาดใหญ่ มีรูปทรงไม่แน่นอน



รูปที่ 5 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิกอน

รูปที่ 6 (a) แสดงโครงสร้างจุลภาคผ่านการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิกอน โดยการเติมธาตุสตรอนเทียมในรูปแบบของโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr ปริมาณ 1 wt.% พบว่าเฟสยูเทคติกซิลิกอนมีลักษณะกลมมนและรูปทรงไม่แน่นอน เมื่อปริมาณการเติมโลหะแม่เพิ่มมากขึ้น 2-4 wt.% พบว่าเฟสยูเทคติกซิลิกอนมีลักษณะกลมมนทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 6 (b-d)



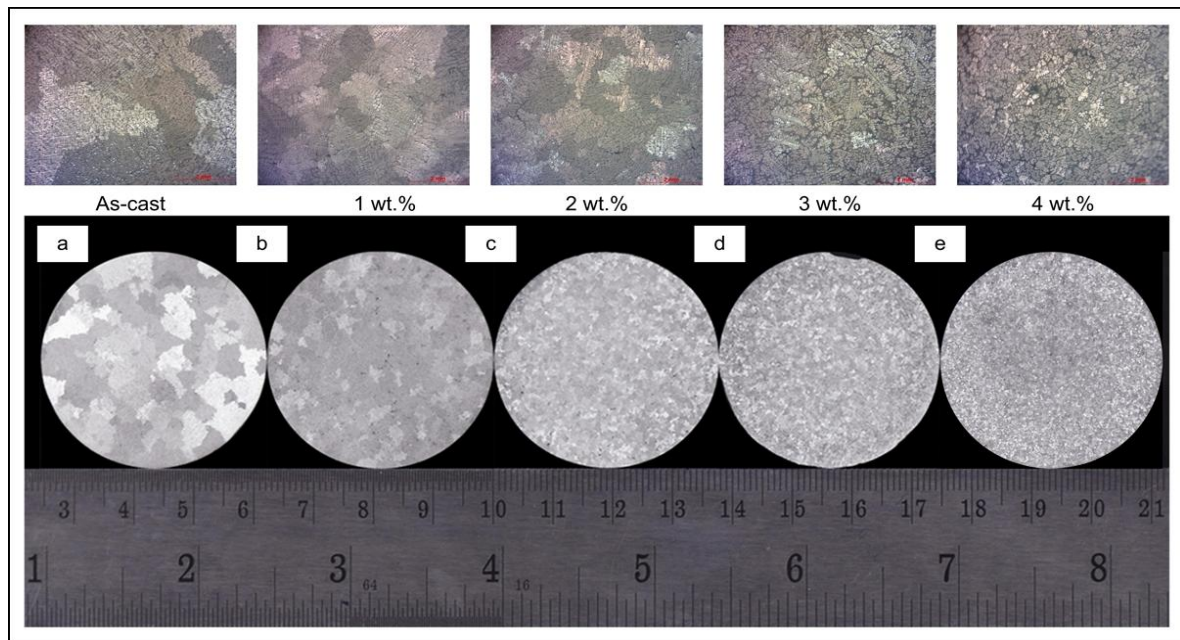
รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอลูมิเนียมหลังปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิกอน

3.5 การปรับสภาพเกรนละเอียด

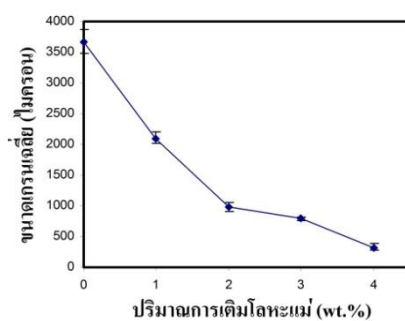
รูปที่ 7 (a) แสดงโครงสร้างมหภาคโลหะผสมที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพเกรน พบว่าเกรนมีลักษณะที่ใหญ่ เมื่อเติมโลหะแม่ชนิด Al-4%B-2%Sr ปริมาณการเติม 1 wt.% ทำให้เกรนมีขนาดเล็กลงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 7 (b) เมื่อปริมาณการเติมโลหะแม่เพิ่มขึ้นที่ 2 wt.% ส่งผลให้เกรนละเอียดมากขึ้น แสดงในรูปที่ 7 (c) และปริมาณการเติม 3-4 wt.% เกรนมีขนาดเล็กลงอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการเติมที่ 1-2 wt.% ดังแสดงในรูปที่ 7 (d-e)

3.6 ขนาดเกรนเฉลี่ย

รูปที่ 8 แสดงขนาดเกรนเฉลี่ยของโลหะผสมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเกรนละเอียด พบว่าเกรนมีขนาดเกรนเท่ากับ 3665 ไมครอน ผลจากการเติมโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr ในปริมาณ 1 wt.% ส่งผลให้ขนาดเกรนมีขนาดเล็กลงเล็กน้อยเท่ากับ 2092 ไมครอน ปริมาณการเติม 2 wt.% เกรนมีเท่ากับ 987 ไมครอน เมื่อปริมาณการเติมโลหะแม่เพิ่มมากขึ้น 3-4 wt.% เกรนมีขนาดเท่ากับ 791 และ 324 ไมครอน ตามลำดับ



รูปที่ 7 โครงสร้างมหภาคของโลหะผสมอลูมิเนียมก่อนและหลังการปรับสภาพเกรน



รูปที่ 8 ขนาดเกรนเฉลี่ยที่ระดับการเติมแตกต่างกัน

4. วิเคราะห์การทดลอง

จากผลการทดลองที่ได้เกิดขึ้นภายใต้งานวิจัยนี้ พบว่า ปริมาณการเติมโลหะแม่ในระดับต่างๆ นั้น ส่งผลต่อประสิทธิภาพการปรับสภาพเกรนละเอียดและเฟสยูเทคติกซิลิกอนแตกต่างกัน ปริมาณการเติมโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr ระดับ 1-2 wt.% จะมีการฟอร์มตัวของสารประกอบ AlB_2 ที่ทำหน้าที่เป็นจุดกำเนิดนิวเคลียสที่น้อยเกินไป ทำให้ประสิทธิภาพในการปรับสภาพเกรนละเอียดลดลง ในขณะที่ระดับการเติม 3-4 wt.% นั้น มีการฟอร์มตัวของสารประกอบ AlB_2 มากเพียงพอ ส่งผลต่อการปรับสภาพเกรนละเอียดที่สมบูรณ์

จากการฟอร์มตัวของสารประกอบ SrB_6 ในโครงสร้างจุลภาค ดังแสดงในรูปที่ 2 ทำให้ประสิทธิภาพในการปรับสภาพเกรนละเอียดและปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิกอนลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Mohamed [16]

เนื่องจากสารประกอบดังกล่าวจะตกตะกอนอยู่ด้านล่างของน้ำโลหะหลอมเหลว เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นพบว่าสารประกอบ SrB_6 มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 3.4 g/cm^3 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าความหนาแน่นของอลูมิเนียม 2.7 g/cm^3 จากสาเหตุดังกล่าวทำให้ค่าความเข้มข้นของธาตุโบรอนและธาตุสตรอนเทียมในน้ำโลหะลดลง แต่เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคของโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr มีการฟอร์มตัวของสารประกอบ AlB_2 ที่มีค่าความหนาแน่น 3.1 g/cm^3 และ Al_4Sr ที่มีค่าความหนาแน่น 2.949 g/cm^3 ใกล้เคียงกับค่าความหนาแน่นของอลูมิเนียม ส่งผลให้โลหะแม้นี้ยังมีประสิทธิภาพที่ดี ในการปรับสภาพเกรนละเอียดและปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิกอน แต่มีความจำเป็นที่ต้องเติมในปริมาณที่สูงขึ้นมากกว่าปกติ

5. สรุปผลการทดลอง

โครงสร้างจุลภาคของโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ประกอบด้วยสารประกอบ AlB_2 , Al_4Sr และ SrB_6 เมื่อทดลองเติมโลหะแม่พบว่าสามารถปรับสภาพเกรน $\alpha\text{-Al}$ และเฟสยูเทคติกซิลิกอน โดยที่ประสิทธิภาพการปรับสภาพเกรนละเอียดจะเพิ่มมากขึ้นตามระดับโลหะแม่ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่การปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิกอนจะมีประสิทธิภาพสูง เมื่อเติมโลหะแม่ที่ปริมาณการเติม 2-4 wt.%

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ ผู้ทำการวิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่สนับสนุนงบประมาณสำหรับงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Limmaneevichitr, "Fading Mechanism of Grain Refinement of Aluminum-Silicon Alloy with Al-Ti-B Grain Refiners," *Materials Science and Engineering A349*, pp.197-206, 2003.
- [2] D. Apelian and J. J. A. Chang, *Trans, AFS 94*, pp.797, 1985.
- [3] Y. C. Lee, A. K. Dahle, D. H. John, J. E. C. Hutt, "The Effect of Grain Refinement and Silicon Content on Grain Formation in Hypoeutectic Al-Si Alloys," *Materials Science and Engineering A259*, pp.43-52, 1999.
- [4] J. G. Li, B. Q. Zhang, L. Wang, W. Y. Yang, H. T. Ma, "Combined Effect and Its Mechanism of Al-3wt.%Ti-4wt.%B and Al-10wt.%Sr Master Alloy on Microstructures of Al-Si-Cu Alloy," *Materials Science and Engineering A328*, pp.169-176, 2002.
- [5] P. Feng, J. Tang, X. Jin, S. Li, D. Zeng, "Influences of Preparation Condition and Melt Treatment Procedures on Melt Treatment Performance of Al-Ti-B and Al-10Sr Master Alloys," *J. Mater. Sci. Technol.*, vol.22, 2006.
- [6] L. Lu and A. K. Dahle, "Effects of Sr and B Interactions in Hypoeutectic Al-Si Foundry Alloys," *Light Metal*, 2006.
- [7] D. G. Mallapura, K. R. Udupaa, S. A. Kori, "Studies on The Influence of Grain Refining and Modification on Microstructure and Mechanical Properties of Forged A356 Alloys," *Materials Science and Engineering A 528*, pp.4747-4752, 2011.
- [8] H. Liao and G. Sun, "Mutual Poisoning Effect Between Sr and B in Al-Si Casting Alloys," *Scripta Material 48*, pp.1035-1039, 2003.
- [9] L. Lu and A. K. Dahle, "Effects of Combined Additions of Sr and AlTiB Grain Refiners in Hypoeutectic Al-Si Foundry Alloys," *Materials Science and Engineering A*, pp.435-436, 2006.
- [10] M. Mahmoudi, R. Taghiabadi, M. Emamy, "Simultaneous Grain Refining and Modification of 356 Aluminium Alloy Using Aluminium Base Master Alloys Containing Strontium, Titanium and Boron," *Light Metal*, 2005.
- [11] J. Campbell, *Castings*, Butterworth-Heinemann, 2003.
- [12] S. Soo, "Modification Effect of Sr on The Microstructures and Mechanical Properties of Al-10.5Si-2.0Cu Recycled Alloy for Die Casting," *Materials Science and Engineering A*, vol. 532, pp. 151-157, 2012.
- [13] Y. Yang, "Effects of Sr and Sb Modifiers on The Sliding Wear Behavior of A356 Alloy Under Varying Pressure and Speed Conditions," *Wear 261*, pp.1348-1358, 2006.
- [14] K. Eidhed, "Effects of Solution Treatment Time and Sr-Modification on Microstructure and Mechanical Property of Al-Si Piston Alloy," *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 24, No.1, 2008.
- [15] E. John and G. Bernard, *The Treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloys*, USA, 1990.
- [16] A. M. A. Mohamed, F. H. Samuel, S. Alkahtani, "Thermal Analysis and Microstructures of Modified Grain-Refined Al-7Si-Mg Cast Alloy," *Light metals*, pp.334-339, 2012.

การผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์อย่างต่อเนื่อง

Continuous Production of Hydrogen Sulfide Gas

วรรณนา ภาณุวัฒน์สุข

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบชุดทดลองที่ใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์อย่างต่อเนื่อง อาศัยปฏิกิริยาเคมีของโซเดียมซัลไฟด์และกรดซัลฟิวริก กระบวนการผลิตเป็นแบบเฟดแบทช์ มีการเติมสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ความเข้มข้น 9 mg/mL ลงในขวดสังเคราะห์ที่บรรจุน้ำกลั่นและกรดซัลฟิวริก โดยใช้หลอดฉีดยา ปริมาตรที่ฉีด 0.5 mL ทุก ๆ 40 sec และใช้ปั๊มดูดจ่ายของเหลวที่อัตรา 0.75 mL/min ผลการทดลองพบว่าสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ความเข้มข้นประมาณ 200 ppm เริ่มตั้งแต่เวลา 88 sec ถึง 12,651 sec (3 h 30 min 51 sec) ด้วยหลอดฉีดยา และเริ่มตั้งแต่เวลา 76 sec ถึง 12,683 sec (3 h 31 min 23 sec) ด้วยปั๊มดูดจ่ายของเหลว การทดลองดังกล่าวสามารถดำเนินการได้บนโต๊ะปฏิบัติการ โดยการบำบัดก๊าซที่ออกมาด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 8%

คำสำคัญ : ไฮโดรเจนซัลไฟด์, การผลิตอย่างต่อเนื่อง, โต๊ะปฏิบัติการ

Abstract

This research was to design the experimental set using for continuously producing hydrogen sulfide gas. It was relied on the reaction between sodium sulfide and sulfuric acid. The production process was a fed-batch type by adding sodium sulfide solution at the concentration of 9 mg/mL into a synthesized bottle containing distilled water and sulfuric acid. The solution was added by injecting with syringe at 0.5 mL for every 40 sec and feeding with peristaltic pump at the rate of 0.75 mL/min. The result was found that hydrogen sulfide gas could be produced at the approximate concentration of 200 ppm starting from 88 sec to 12,651 sec (3 h 30 min 51 sec) with syringe injection and starting from 76 sec to 12,683 sec (3 h 31 min 23 sec) with peristaltic pump feeding. The experiment was operated on the laboratory table by treatment the effluent gas with sodium hydroxide solution at the concentration of 8 %.

Keywords : hydrogen sulfide, continuous production, laboratory table

1. บทนำ

ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) เป็นก๊าซที่ไม่มีสี มีกลิ่นคล้ายไข่เน่า มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าอากาศ ส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายของซากอินทรีย์สารโดยแบคทีเรียในสภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic digestion)

และยังเป็นองค์ประกอบหนึ่งในก๊าซชีวภาพ ที่พบตามแหล่งเก็บกักกากของเสียหรือน้ำเสียและจากกระบวนการทางอุตสาหกรรม เมื่อก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สัมผัสกับน้ำหรือไอน้ำ จะแปรเปลี่ยนสภาพเป็นกรดซัลฟิวริกหรือที่เรียกกันว่า “ฝนกรด” สามารถกัดกร่อนวัสดุประเภทโลหะและคอนกรีต ซึ่งถ้า

มนุษย์ได้สัมผัสก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ จะทำให้เกิดการระคายเคืองตา แสบคอ ปวดศีรษะและคลื่นไส้ สำหรับการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่นิยมใช้มีด้วยกัน 3 กระบวนการ คือ กระบวนการดูดซับ (Adsorption) จะใช้สารดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เป็นของแข็งบรรจุในคอลัมน์ กระบวนการดูดซึม (Absorption) อาศัยหลักการละลายของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในตัวทำละลายชนิดต่างๆ และกระบวนการกำจัดด้วยจุลชีพ (Microbial treatment) ซึ่งเป็นกลุ่มแบคทีเรียจำพวก Sulfide oxidation bacteria เช่น เทคโนโลยี Biofiltration การเลือกกระบวนการกำจัดแบบใดแบบหนึ่ง จำเป็นต้องทำการทดสอบเบื้องต้น เพื่อให้การบำบัดมีประสิทธิภาพและคุ้มค่าต่อการสร้างระบบกำจัดของโรงงานอุตสาหกรรมแต่ละแห่ง โดยทั่วไปมีการใช้แหล่งของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่จะทำการบำบัด 3 แหล่ง แหล่งที่หนึ่งคือ การเก็บจากบ่อก๊าซชีวภาพของโรงงานอุตสาหกรรมโดยตรง ซึ่งถ้าโรงงานอยู่ไกลจะทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการเดินทางไปเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพ แหล่งที่สองคือ การสั่งซื้อก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่บรรจุในถังความดันสูงจากบริษัทตัวแทนจากต่างประเทศ ซึ่งมีราคาก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 25,000 บาท ต่อปริมาณก๊าซ 5.5 m³ ราคาของถังพร้อมวาล์วควบคุม 45,000 บาท และใช้เวลาในการจัดส่ง 7 d ถ้าไม่มีสินค้าคงคลังต้องใช้เวลอย่างน้อย 30 d (ข้อมูลเดือนกุมภาพันธ์ 2556 บริษัท Linde (Thailand) Public จำกัด) แหล่งสุดท้ายคือการสังเคราะห์ขึ้นมาเอง โดยการทำปฏิกิริยาของสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ (Na₂S) กับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่มีความเข้มข้นเท่ากัน จากนั้นจึงบีบก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นเข้าถังความดันสูง (Cylinder) แล้วควบคุมอัตราการไหลให้มีค่าเท่ากับ 15-35 L/h โดยให้ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ผ่านเข้าระบบ Biofilter มีความเข้มข้นเท่ากับหรือมากกว่า 100 ppm [1] หรือการเตรียมก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้มีความเข้มข้น 5-50 ppm เข้าถึงบรรจุก๊าซ โดยการหยดสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 M ลงในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ที่ไม่ระบุความเข้มข้น [2] หรือการเตรียมก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ไม่ระบุความเข้มข้นเข้าถึงบรรจุก๊าซด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ (ความเข้มข้น 1 %) กับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความ

เข้มข้น 0.1 M [3] ซึ่งในระหว่างที่ทำการทดลอง ผู้ทดลองจะต้องใช้อุปกรณ์ป้องกันหรือทำการทดลองในตู้ดูดควัน (Fume hood) งานวิจัยนี้จึงทำการสังเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยใช้ชุดทดลองผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีความเข้มข้นที่คงที่อย่างต่อเนื่องบนโต๊ะปฏิบัติการและไม่เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน

2. วิธีการวิจัย

2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องตรวจวัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Crowcon รุ่น Triple Plus s/n:2560030499) วัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ตั้งแต่ 0-1,000 ppm ได้ผ่านการปรับมาตรฐานจากบริษัท AWJ Innovation Co.,Ltd. (Calibration No. 1311-470, Calibration Date 11 November 2013-2014) เครื่องดูดอากาศ (SKC รุ่น 224-PCXRS) ปรับอัตราการดูดได้ตั้งแต่ 5-5,000 mL/min เครื่องเขย่า (Stuart รุ่น SSL1) ปรับอัตราการเขย่าได้ตั้งแต่ 30-3000 rpm และปั๊มดูดจ่ายของเหลว (Peristaltic pump, Master flex รุ่น L/S Economy) สามารถปรับความเร็วได้ 20-600 rpm พร้อม Pumphead รุ่น 07014-21 และ Tubing L/S 13

2.2 การออกแบบชุดทดลองผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

อาศัยการทำปฏิกิริยาเคมีของสารตั้งต้นโซเดียมซัลไฟด์ (Na₂S) กับกรดซัลฟูริก (H₂SO₄) แทนการใช้กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เนื่องจากสภาวะที่เกิดขึ้นเป็นไอ HCl ณ อุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ ลงในขวดสังเคราะห์ขนาด 1,000 mL (ที่วางบนเครื่องเขย่าที่สามารถปรับอัตราเร็วในการเขย่า) โดยมีท่อทางเข้าของสารตั้งต้นและทางออกของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้น จากนั้นก๊าซจะผ่านเครื่องตรวจวัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และตัวดักจับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อนออกสู่บรรยากาศ ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 8 % (เดิมฟีนอลฟทาไลน์) จากนั้นเดิมสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ (Sodium hypochlorite) หรือคลอรีน (Clorox) หรือไฮเตอร์ (Haiteer) ประมาณ 10 mL ก่อนเทลงท่อน้ำทิ้ง เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้อยู่ในรูปของเกลือซัลเฟตที่อยู่ตัวและปรับสภาวะให้เป็นกลาง [4] มีการเพิ่มตัวดักจับความชื้นด้วยสารละลายในขวดขนาด 1,000 mL ก่อนเข้า

เครื่องตรวจวัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Crowcon) และเครื่องดูดอากาศ SKC ที่อัตราการดูด 2 L/min

2.3 การสังเคราะห์หรือผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

จากการคำนวณตามปริมาณสัมพัทธ์ มีการใช้สารตั้งต้นโซเดียมซัลไฟด์ 4.5 mg กรดซัลฟูริก 1 M ปริมาตร 0.06 mL ลงในขวดสังเคราะห์ที่มีน้ำกลั่นปริมาตรแตกต่างกัน พร้อมกับการเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วในการเขย่าสารละลาย บันทึกเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์หรือผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีความเข้มข้นสูงสุดประมาณ 200 ppm เมื่อทราบปริมาตรของสารละลายและอัตราการเขย่าที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ใน 1 กะ (Batch) แล้วจึงกำหนดให้โซเดียมซัลไฟด์เป็นสารจำกัดปริมาณ (Limiting agent) โดยเตรียมสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ความเข้มข้น 9 mg/mL บรรจุในหลอดฉีดยา (Syringe) ขนาด 10 mL ที่เสียบติดกับจุกยางซึ่งปิดปากขวดสังเคราะห์ การสังเคราะห์เริ่มต้นด้วยการฉีดสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ 0.5 mL ลงในขวดสังเคราะห์ที่มีกรดซัลฟูริก 1 M ปริมาตร 18.9 mL (ดังรูปที่ 1) บันทึกเวลาในการสังเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีความเข้มข้นสูงสุดประมาณ 200 ppm ทำการฉีดสารละลายโซเดียมซัลไฟด์เป็นระยะอย่างต่อเนื่อง โดยให้ผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ความเข้มข้น 200 ppm ที่คงที่ เป็นเวลา 3 h หรือมากกว่า จากนั้นจึงเปลี่ยนมาใช้ในการเติมสารละลายโซเดียมซัลไฟด์แบบต่อเนื่องด้วยสายยางซิลิโคนที่ต่อเข้าปั๊มดูดจ่ายของเหลว แทนการใช้หลอดฉีดยา (ดังรูปที่ 2)



รูปที่ 1 ชุดสังเคราะห์ก๊าซแบบใช้หลอดฉีดยา

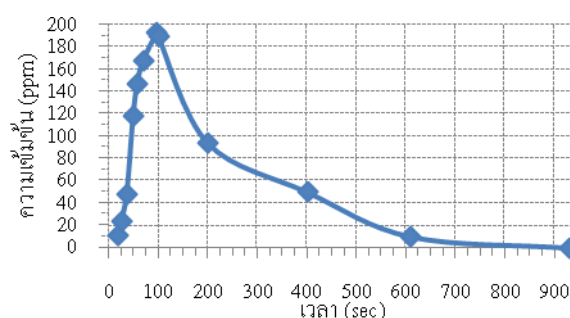


รูปที่ 2 ชุดสังเคราะห์ก๊าซแบบใช้ปั๊มดูดจ่ายของเหลว

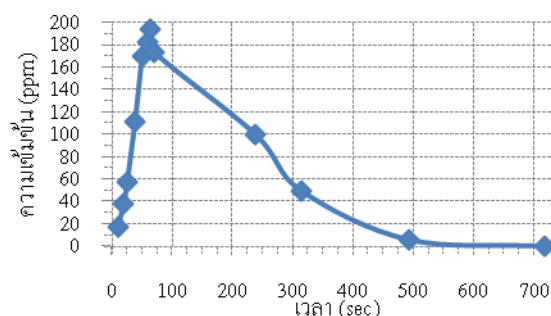
3. ผลการวิจัย

3.1 การผลิตแบบกะ (Batch production)

ผลการวัดความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นด้วยอัตราการเขย่า 100 rpm ณ เวลาต่าง ๆ กัน แสดงในรูปที่ 3 พบว่าปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้น มีค่าสูงสุดเท่ากับ 193 ppm ณ เวลา 98 sec แต่ถ้าวัดอัตราการเขย่า 200 rpm แสดงในรูปที่ 4 พบว่าความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มีค่าสูงสุดเท่ากับ 194 ppm ณ เวลา 64 sec จากผลการทดลองทั้ง 2 พบว่าการเพิ่มอัตราการเขย่าทำให้อัตราการผลิตก๊าซตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงเวลาที่ได้อัตราความเข้มข้นของก๊าซสูงสุด (Slope) มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 0.8 ppm/sec



รูปที่ 3 อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เมื่อใช้สารละลาย 200 mL เขย่าที่ 100 rpm



รูปที่ 4 อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เมื่อใช้สารละลาย 200 mL เขย่าที่ 200 rpm

เนื่องจากขดสังเคราะห์หมีต่อแก้วและสายยางต่อเชื่อมกับอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนั้นการใช้อัตราการเขย่าที่มากกว่า 200 rpm จะทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ข้างต้น อีกทั้งปริมาณของสารละลายที่บรรจุภายในขดสังเคราะห์ ควรจะมีปริมาตรที่ไม่มากนัก ทำให้สามารถรองรับการเติมสารตั้งต้นในปริมาณที่มากพอ ระหว่างที่ทำการเขย่าสำหรับการผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์อย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ทราบปริมาณและอัตราการเขย่าที่เหมาะสม จึงมีการทดลองผลิตก๊าซแบบกะโดยใช้อัตราการเขย่า 100 140 180 และ 200 rpm กับสารละลายที่บรรจุในขดสังเคราะห์ปริมาตร 200 100 และ 50 mL จากนั้นพล็อตกราฟหาค่า slope เพื่อเปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซ ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 1 พบว่าการเขย่าที่ 180 rpm กับสารละลายปริมาตร 50 mL อัตราการผลิตก๊าซ (slope) สูงสุดเท่ากับ 2.5 ppm/sec เช่นเดียวกับที่ใช้ปริมาตร 100 mL และเมื่อใช้อัตราการเขย่าที่ 200 rpm กับสารละลายปริมาตร 50 mL สามารถผลิตก๊าซได้ค่า slope ที่สูงเช่นกัน แต่เมื่อเพิ่มปริมาตรสารละลายเป็น 100 mL อัตราการผลิตก๊าซลดลง ดังนั้นจึงเลือกสภาวะในการผลิตก๊าซที่ปริมาตร 50 mL และอัตราการเขย่า 180 rpm ไปใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์อย่างต่อเนื่องต่อไป

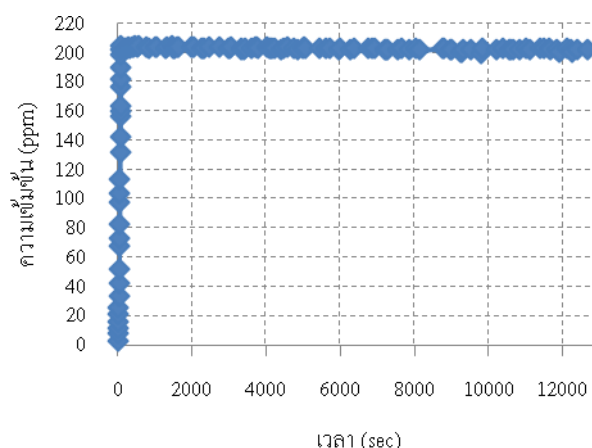
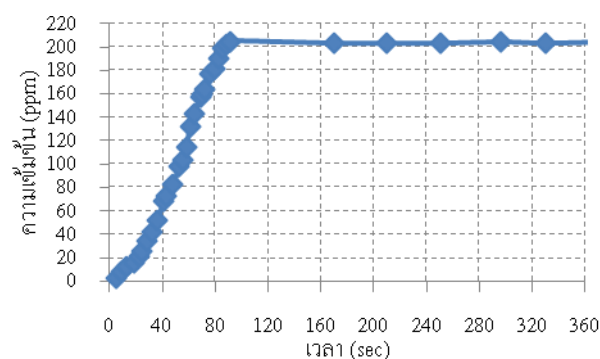
ตารางที่ 1 ค่า slope (ppm/sec) จากการผลิตก๊าซโดยใช้ปริมาตรของสารละลายและอัตราการเขย่าที่แตกต่างกัน

อัตรา การเขย่า ปริมาตร ของสารละลาย	100 rpm	140 rpm	180 rpm	200 rpm
200mL	1.8	2.2	2.4	2.4
100 mL	1.9	2.3	2.5	2.4
50 mL	1.9	2.3	2.5	2.5

3.2 การผลิตแบบเฟดแบทช์ (Fed-Batch production)

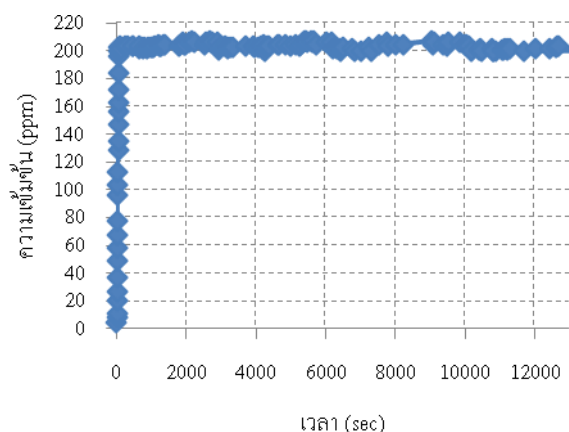
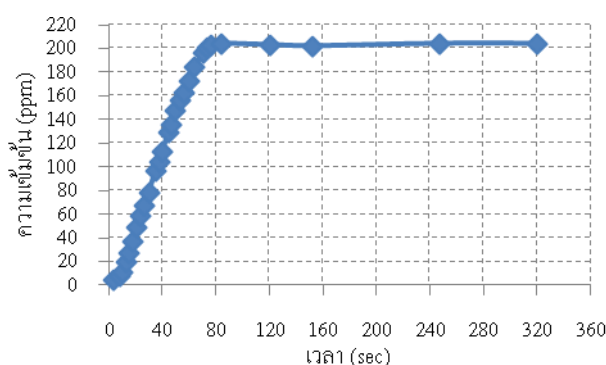
1. เพื่อหาช่วงเวลาในการฉีดสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ จึงได้ทดลองผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยฉีดสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ความเข้มข้น 9 mg/mL ปริมาตร 0.5 mL ลงในสารละลายปริมาตร 50 mL ที่มีปริมาณกรดซัลฟูริกที่มากเกินไปด้วยอัตราการเขย่าที่ 180 rpm พบว่าเวลาที่ใช้ในการ

ผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้ได้ค่าความเข้มข้นสูงสุด (202 ppm) มีค่าเท่ากับ 84 sec จากหลักการ step response ของ first order system ด้วย unit step input ซึ่งจะได้อัตรา output 63.2 % ของค่าสูงสุด จึงได้ทดลองฉีดสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ ณ วินาทีที่ 53 (0.632×84 sec) ปรากฏว่าเกิดการสะสมของก๊าซความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่วัดได้เกินกว่า 250 ppm จึงได้ทดลองลดช่วงเวลาในการฉีดเป็น 40 sec พบว่าก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะถูกสังเคราะห์ออกมามีความเข้มข้นประมาณ 200 ppm ที่คงที่ เริ่มตั้งแต่เวลา 88 sec หรือ 1 min 28 sec (รูปที่ 5 บน) จนกระทั่งถึงเวลา 12,651 sec หรือ 3 h 30 min 51 sec (รูปที่ 5 ล่าง) อัตราการผลิตตั้งแต่เริ่มต้นถึงค่าความเข้มข้นสูงสุด (slope) มีค่าเท่ากับ 2.3 ppm/sec และไม่สามารถตรวจวัดค่าความเข้มข้นหรือได้กลิ่นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์บริเวณที่ทดลอง



รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ppm) ที่ผลิตได้จากการเติมสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ด้วยหลอดฉีด ณ เวลาที่ใช้ในการผลิต (sec) บน : ช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มต้นการผลิตจนถึง 360 sec ล่าง : ช่วงเวลาทั้งหมดที่ใช้

2. การเติมด้วยปั๊มดูดจ่ายของเหลว อาศัยการเติมสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ความเข้มข้น 9 mg/mL จากบิวเรตที่มีท่อซลิโคนต่อเข้าเครื่องปั๊มดูดจ่ายของเหลวด้วยอัตราการเติม 0.75 mL/min (0.5mL/40sec) พบว่าก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะถูกสังเคราะห์ออกมาที่มีความเข้มข้นประมาณ 200 ppm ที่คงที่เริ่มตั้งแต่เวลา 76 sec หรือ 1 min 16 sec (รูปที่ 6 บน) จนกระทั่งถึงเวลา 12,683 sec หรือ 3 h 31 min 23 sec (รูปที่ 6 ล่าง) อัตราการผลิตตั้งแต่เริ่มต้นถึงค่าความเข้มข้นสูงสุด (slope) มีค่าเท่ากับ 2.6 ppm/sec ซึ่งมากกว่าการใช้หลอดนิตยาแสดงถึงการเข้าทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นที่รวดเร็วกว่าเนื่องจากการเติมสารอย่างต่อเนื่อง และในบริเวณที่ทดลองไม่สามารถตรวจวัดค่าความเข้มข้นหรือได้กลิ่นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ppm) ที่ผลิตได้จากการเติมสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ด้วยปั๊มดูดจ่ายของเหลว ณ เวลาที่ใช้ในการผลิต (sec) บน : ช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มต้นการผลิตจนถึง 320 sec ล่าง : ช่วงเวลาทั้งหมดที่ใช้

4. สรุป

การสังเคราะห์หรือผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ อาศัยการทำปฏิกิริยาเคมีของสารตั้งต้นโซเดียมซัลไฟด์และกรดซัลฟูริกโดยใช้ขบวนการ 1,000 mL บรรจุน้ำกลั่น 50 mL และกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 M ปริมาตรอย่างน้อย 18.9 mL วางบนเครื่องเขย่าที่ใช้อัตราการเขย่า 180 rpm การสังเคราะห์จะเกิดขึ้นเมื่อมีการเติมสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ความเข้มข้น 9 mg/mL การทดลองได้ออกแบบให้มีการเติมแบบเฟดแบทช์ด้วยอุปกรณ์ 2 ชนิด ชนิดแรกคือการใช้หลอดนิตยาขนาด 10 mL ด้วยอัตรา 0.5 mL ทุก ๆ 40 sec และการใช้ปั๊มดูดจ่ายของเหลวด้วยอัตรา 0.75 mL/min พบว่าก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นมีความเข้มข้นสูงสุดประมาณ 200 ppm ตั้งแต่เวลา 88 sec จนถึงเวลา 12,651 sec (3 h 30 min 51 sec) เมื่อใช้การเติมสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ด้วยหลอดนิตยา และตั้งแต่เวลา 76 sec จนถึงเวลา 12,683 sec (3 h 31 min 23 sec) เมื่อใช้การเติมสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ด้วยปั๊มดูดจ่ายของเหลว ก๊าซที่เกิดขึ้นมีการกำจัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8%

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยรามคำแหง ปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Rattanapan, P. Boonsawang and D. Kantachote, "Removal of H_2S in down-flow GAC biofiltration using sulfide oxidizing bacteria from concentrated latex wastewater," *Bioresource Technology*, Vol.100, pp. 125-300, 2009.
- [2] G. Moussavi, K. Naddafi, A. Mesdaghinia and M. A. Deshusses, "The removal of H_2S from process air by diffusion into activated sludge," *Environmental Technology*, Vol.28, pp. 987-993, 2007.
- [3] A. Gangagni Rao, P. Ravichandra and A. Jetty, "Operation of biofilter with mixed agricultural residue as filter material: Effect of humidification and inlet

hydrogen sulfide volume fraction on the performance,”
Chemical and Biochemical Engineering, Vol.20, No.2,
pp. 189-196, 2006.

- [4] J. F. Paulino and J. C. Afonso, “New strategies for
treatment and reuse of spent sulfide caustic stream from
petroleum industry,” Quimica Nova, Vol.35, No.7, pp.
1447- 1452, 2012.

Hydrodynamic Computational Analysis for Propeller

Yodchai Tiaple and Pongsan Twinprawate

Department of Maritime Engineering, Faculty of International Maritime Studies, Kasetsart University, Sriracha Campus

Abstract

A propeller can hugely result in high fuel consumption efficiency for a boat. The study objective is to investigate hydrodynamic behaviour for designed propeller via three dimensional modelling. The propeller geometry is formed in three dimension by defining skew, pitch, chord, rake and thickness. These parameters are used to compute geometry at each radius of propeller in order to achieve hydrofoil section. Then, its performance is simulated by using computational fluid dynamics (CFD). The results can show openwater characteristic which is very important for selecting the operating point, propeller dimension and rotation at the high efficiency point.

Keywords : Marine propeller, Openwater characteristics, Hydrodynamics, CFD

1. Introduction

The ship business including cargo ships, fisheries and passenger boat has been struggled over the last few years due to high fuel cost. Since this trend seems to last long, most of companies are focusing on how to improve fuel consumption efficiency and fuel usage reduction [1]. The propulsion system development is one of priorities since it can affect the boat efficiency more than other systems. The ship propeller can increase or decrease fuel consumption, depending on its performance. Therefore, operated propeller in optimum efficiency point yields fuel saving up to 17% [2].

The complexity of propeller geometry is a major obstacle for design. Its shape is normally formed as cylindrical blade line, and various parameters is applied to draw its profile; however, high accuracy and design technology are required for better performance although the primary and standard data is still used for basic design. In the past, the engineer modifies each propeller

from the basic design, but the efficiency has found dropping when it is used for real.

The propeller performance prediction has been studied in different methods such as experiment and numerical simulations by BEM and CFD. The experiment is carried out by using cavitation tunnel. It simulates the hydrodynamic behaviour in turbulence flow, while the Laser Doppler Velocimetry (LDV) or Particle Image Velocimetry (PIV) [3] measures pressure and velocity of fluid. However, this technique is expensive for single test and it is a huge disadvantage. In the mean time, numerical simulation has been continuously developed particular the application of inviscid potential flow. The BEM technique developed from Hess and Smith [4] predicts performance via singularity distribution on surface panel. Such technique can analyse the flow from propeller and shortening computation time; however, the difficulty appears since

the surface panel construction at wake vortex is sophisticated.

The objective of this study is to predict the performance of a new designed propeller. First, the 3D propeller geometry can be created from designed parameters using mathematic equations. Then its performance is simulated using computational fluid dynamics (CFD).

2. Propeller Design

The 3D propeller geometry can be drawn along the helical line axis as shown in figure 1. A helix occurs when the plane rotates clockwise or anti clockwise and the point P is moving away from the observer looking along the axis of rotation. The different cross sections depending on each radius are called the hydrofoil cross section which consists of two edges: Leading edge (L.E.), and Tailing edge (T.E.). The essential parameters as shown in the figure 1 are computed by defining P point at each section coordinate. From the point P, the geometry coordinates can be defined by using equation 1 [5].

$$\begin{aligned} x_p &= -[i_G + r\theta_s \tan(\theta_{nt})] + (0.5c - x_c) \sin(\theta_{nt}) + y_c \cos(\theta_{nt}) \\ y_p &= -r \cdot \sin\left(\frac{[(0.5c - x_c) \cos(\theta_{nt}) - y_c \sin(\theta_{nt})]}{r} - \theta_s\right) \\ z_p &= r \cdot \cos\left(\frac{[(0.5c - x_c) \cos(\theta_{nt}) - y_c \sin(\theta_{nt})]}{r} - \theta_s\right) \end{aligned} \quad (1)$$

where i_G is generator rake, θ_s is skew θ_{nt} is pitch angle and C is the chord length, while y_c is camber line, plus and minus, with half of the thickness t at position of given cross section for upper and lower blade surface respectively.

This study was based on data of Chaopharya passenger boat as shown in figure 2 as a case study for simulating characteristics of suitable propeller. The dimension of the boat consisted of 30.75 m length, 4 m width and 0.5 draft, while its weight was 28.1Tons. Its

265 kW engine produced average speed at 15 knots at 900 rpm, and the top speed was 17 knots at 1100 rpm. The propeller diameter was 0.813 m with three blades.

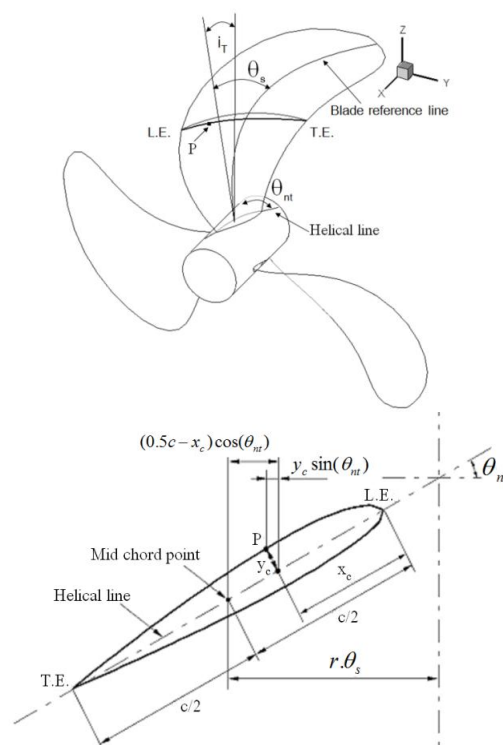


Figure 1 Parameters for defining propeller geometry [6]

The parameters were applied to equation 1 in order to create the 3D propeller geometry: its diameter was set as 0.813 m and hub was 0.15D for three blades. The rake angle was 15° , while the camber line function was selected as NACA a=0.8 then, the skew, pitch, chord and thickness distributions at any radius as shown in figure 3 were applied in equation 1. Eventually, the 3D propeller geometry was created as shown in figure 4.



Figure 2 Chaopharya passenger boat

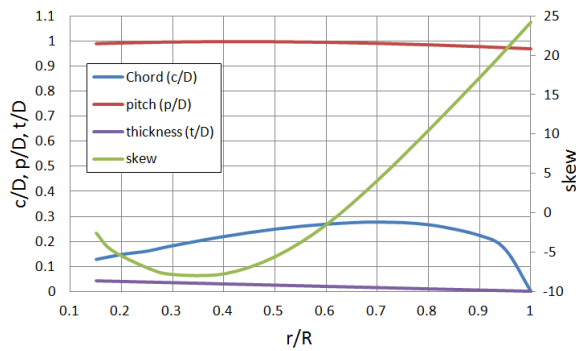


Figure 3 Pitch, Chord, Thickness and Skew distribution of propeller

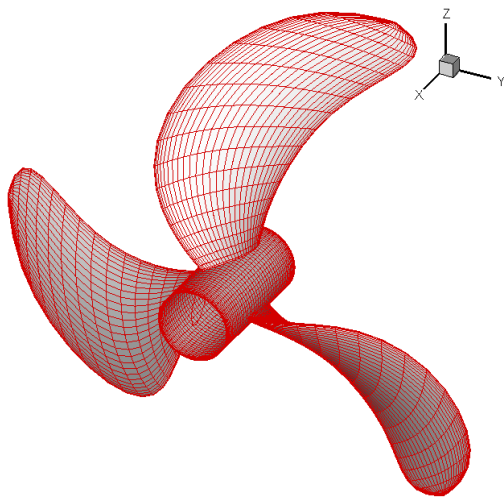


Figure 4 3D propeller geometry

3. Computational Method

The modified Navier-Stokes equations (NESs) called Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) equations were used for flow governing equation as: [7]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u_i)}{\partial x_i} &= 0 \\ \frac{\partial(\rho \cdot u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u_i \cdot u_j)}{\partial x_j} &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \cdot \delta_{ij} \cdot \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \tau_{ij} \end{aligned} \quad (2)$$

$$= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \cdot \delta_{ij} \cdot \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \tau_{ij} \quad (3)$$

The additional unknown terms were named Reynolds Stress and defined as

$$\tau_{ij} = \rho \cdot \overline{u'_i \cdot u'_j}$$

According to Boussinesq hypothesis the derived

Reynolds stress became

$$\tau_{ij} = \mu_t \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \cdot \left(\rho \cdot k + \mu_t \cdot \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \cdot \delta_{ij} \quad (4)$$

From the $k - \varepsilon$ turbulence model, the turbulence viscosity term (μ_t) was

$$\mu_t = \rho \cdot C_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon}$$

The equation was transformed as k and ε function due to turbulent flow model as:

$$\rho \cdot \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \cdot \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P - \rho \cdot \varepsilon \quad (5)$$

and

$$\rho \cdot \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot P - C_{2\varepsilon} \cdot \rho \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

where P was production of turbulent kinetic energy and $\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{1\varepsilon}$ and $C_{2\varepsilon}$ were constant

From the $k - \omega$ Turbulence model, the turbulent viscosity term was

$$\mu_t = \rho \cdot \frac{k}{\omega}$$

The equation was transformed as k and ω function due to turbulent flow model as:

$$\rho \cdot \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \sigma \cdot \mu_t \right) \cdot \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P - \beta \cdot \rho k \omega \quad (7)$$

and

$$\rho \cdot \frac{D\omega}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma \mu_t \right) \cdot \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha P \frac{\omega}{k} - \beta \rho \omega^2 \quad (8)$$

where P was production of turbulent kinetic energy and α, β and σ were constant.

The commercial CFD code, Fluent V.6.3, was used to investigate hydrodynamic behaviour for designed propeller. The model was composed of the cylindrical outer and inner domains. The propeller was placed 2.5D from velocity inlet and 10D from outlet as shown in figure 5.

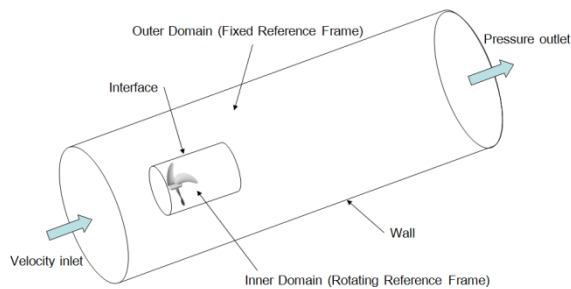


Figure 5 Boundary condition

The mesh of modelled propeller was defined by Gambit program in unstructured mesh mode because it was simple and convenient; moreover, its solution also indicated small errors [8]. This simulation was using rotating reference frame model. The velocity inlet condition was set for upstream inlet surface and the pressure outlet condition was set for downstream outlet surface as shown in figure 5. The interface boundary condition was set on the intersect surface of the outer and inner domains. The outer domain was stationary, while the inner domain was operated at the constant rotational speed. The surface of blade and hub were no-slip condition. The simulation was set to be steady flow and k- ϵ and k- ω turbulence models were selected for calculation and the residual monitor was 10^{-4} . The flow model was applied in single phase without cavitation effect.

4. Result and discussion

The results from the model were compared to result of H. R. Shin and J. Shitalkumar's P5168 propeller [9]. The P5168 was five-blade controllable-pitch with 0.4027m diameter. It was modelled by tetrahedral mesh with 560,000 grids. The model was performed at $J = V_A / (nD) = 0.98, 1.10, 1.27, 1.51$ where V_A was inlet velocity, n was rotation per second (rps) and D was propeller diameter. The k- ϵ and k- ω models were chosen to study pressure distribution at front and back of the

blade as shown in figure 6. The pressure was low at leading edge at suction side, while the high pressure was found at leading edge at pressure side. Figure 7 indicated K_T and K_Q comparing to H. R. Shin and J. Shitalkumar [9]. The results showed consistency at $J=1.0 - 1.3$, while showed lower at $J=1.5$; however, the result from k- ω model and k- ϵ model indicated consistency over $J=1.0 - 1.5$. K_T and K_Q were thrust coefficient and torque coefficient respectively, and they can be written in non-dimensional equation as:

$$K_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4} \quad (9)$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5} \quad (10)$$

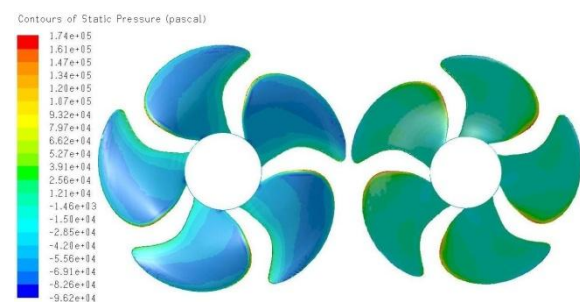
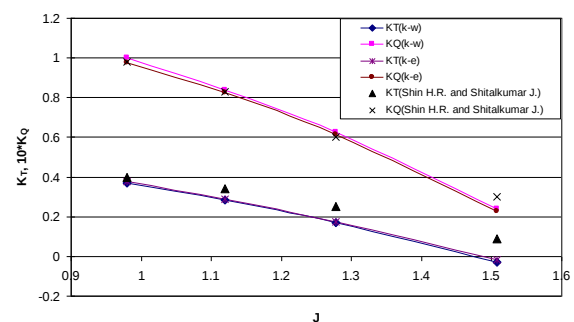


Figure 6 Pressure distributions on P5168

Figure 7 Comparison of predicted K_T and K_Q of P5168

where T was thrust (N), Q was torque (N.m), D was diameter. The propeller efficiency without ship body effect called openwater characteristics was computed from thrust and torque coefficient and advance number as:

$$\eta_0 = \frac{T \cdot V_A}{2\pi \cdot n \cdot Q} = \frac{K_T \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^4}{K_Q \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^5} \cdot \frac{V_A}{2\pi \cdot n} = \frac{K_T}{K_Q} \cdot \frac{J}{2\pi} \quad (11)$$

For investigated propeller of Chaophraya passenger boat, it was also modelled by tetrahedral mesh. Figure 8 showed computational grids. Prior to the analysis of propeller, the optimal number of grids had to be determined. Hence, a preliminary grid dependency was tested with number of grids ranging from 550,728 to 933,829 (see figure 9) and 810,497-nodes were selected as the optimum number of grids. The calculation was carried out from $J = 0.2$ -1.0. The pressure distribution at front and back of the blade was simulated by using k- ϵ model as shown in figure 10. The path line at tip of the blade simulated by k- ϵ model at $J=0.6$ was shown in figure 11.

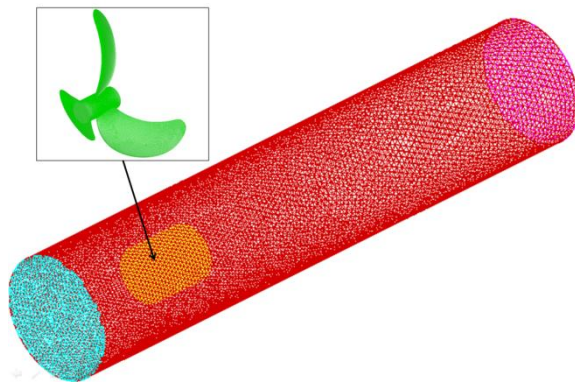


Figure 8 Computational grids

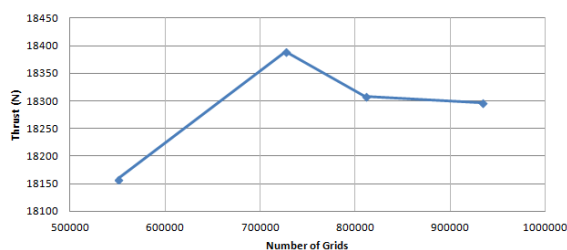


Figure 9 Grid dependency test results

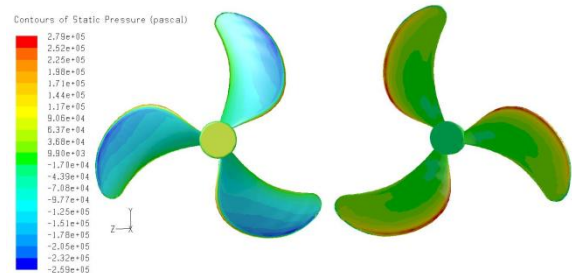


Figure 10 Pressure distribution on propeller

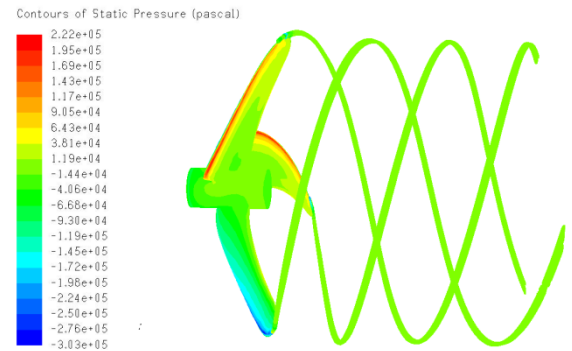
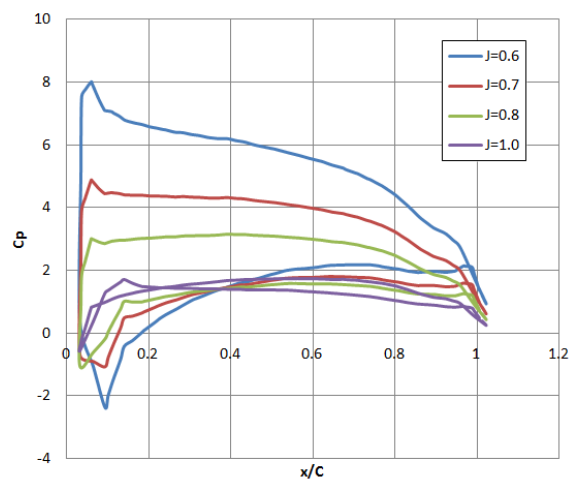


Figure 11 Path line at tip of tailing blade

In order to investigate loads on the blade, C_p on the blade at the same radius ($r=0.7R$) was computed by using k- ϵ model at $J=0.6, 0.7, 0.8$ and 1.0 were shown in figure 12 as equation 12.

$$C_p = \frac{(P - P_\infty)}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (12)$$

where P_∞ was atmospheric pressure and ρ was water density.

Figure 12 Comparison of pressure distribution at $r=0.7R$

Openwater characteristics can be simulated by setting the $D=0.813$ m, $n=1100$ rpm and adjusting velocity for J ranging from 0.1 to 1.0. Figure 13 shows openwater characteristics (K_T , K_Q and η_0) of the propeller. The comparison between k- ϵ and k- ω models showed that the result from k- ω model was lower than k- ϵ model all over the J range.

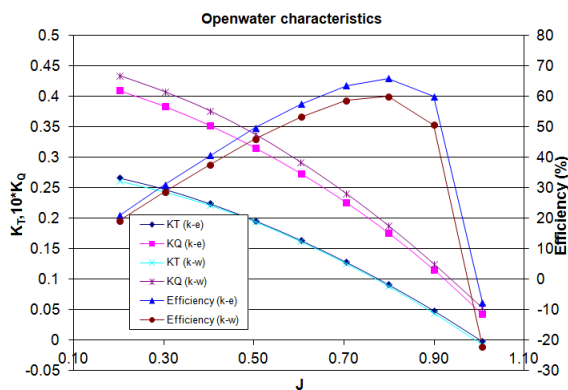


Figure 13 Comparison between K_T , K_Q and η_0

5. Conclusion

The flow analysing through propeller is sophisticated particularly at turbulent mode; this yields complication for propeller design. This study has developed method for propeller design to become more practical. The 3D propeller shape can be drawn by defining skew, pitch, chord, rake and thickness. With these parameters, each component of propeller is easy to adjust; moreover, the 3D geometry can be formed easily. Then, the CFD is used to simulate openwater characteristics of the 3D propeller.

By using the present method, it is more convenient and takes lesser time to design and develop a propeller suitable for each boat than using an usual experimental method. The openwater characteristic of propeller is important to boat speed. The appropriate boat speed and propeller rotational speed affect directly the propulsion performance resulting in improved fuel economy.

6. Acknowledgement

The authors gratefully thank Centre of excellence Kasetsart Univeristy for funding contribution and also Chaophraya speed boat company for allowing propeller installation and testing.

7. References

- [1] B. Sazetak, "New Technologies for Reducing Fuel Consumption in Marine Vehicles", XVI Symposium SORTA2004.
- [2] K. Hochkirch and V. Bertran, "Options for Fuel Saving for Ships".
- [3] G. Calcagno et al, "The INSEAN E779a Propeller Test Case: a Database for CFD Validation".
- [4] J.L. Hess, and A.M.O. Smith, "Calculation of Non-lifting Potential Flow About Arbitrary 3-Dimensional Bodies", Journal of Ship Research, 8(2), pp.22-44, 1964.
- [5] J.S. Carlton, Marine propellers & propulsion, Butterworth-Heinemann Ltd, 1994.
- [6] S. Phoemsapthawee, "Design of Marine Propeller Using Boundary Element Method", Master Thesis, King's Mongkut Institute Technology North Bangkok, 2001
- [7] T. J. Chung, Computational fluid dynamics, Cambridge University Press, 2002.
- [8] J. Kulczyk et al, "Analysis of Screw Propeller 5119 Using the Fluent System", Archives civil and Mechanical Engineering Vol. VII No.4, 2007.
- [9] H.R. Shin and J. Shitalkumar, "Computational Validation for Flow Around a Marine Propeller Using Unstructured Mesh Based Navier-Stokes Solvers", JSME International Journal, Series B, Vol.48, No.3, pp 562-570, 2005.

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิผู้พิจารณาบทความฉบับนี้

ทางกองบรรณาธิการวิศวกรรมลาดกระบัง ขอขอบพระคุณท่านผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ความ
อนุเคราะห์ในการพิจารณาบทความด้วยความขอบคุณยิ่ง และหวังว่าคงได้รับความอนุเคราะห์จากท่าน
ด้วยดีในโอกาสต่อไป

ศ.ดร.อิสระชัย งามหุ

ดร.สถาพร พรหมวงศ์

รศ.ดร.วิศรุต ศรีรัตนะ

ดร.เชาวลิต หามนตรี

รศ.ดร.พิพัฒน์ พรหมมี

ดร.สมปอง วิเศษพานิชกิจ

ผศ.ดร.ชุมพล ยวงใย

ดร.วิฑาดา เจษฎารัตนชัย

ผศ.ดร.อภิรักษ์ นัมคณิสสรณ์

ผศ.เรณูฤดี เบญจางคประเสริฐ

รศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง

ผศ.ดร.ธนาถ คงสมบูรณ์

ดร.นิรันดร์ พิสุทธอานนท์

ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์

ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์

ผศ.ดร.อดิวิทย์ กาญจนหทัย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยรังสิต

ผศ.ดร.แนบบุญ หุนเจริญ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดร.สมโชค สนธิแก้ว

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

ธนบุรี

ผศ.ดร.เจริญชัย โขมพัตรภรณ์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

ธนบุรี

รศ.ดร.เสมอจิตร์ หอมรสสุคนธ์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

รศ.ดร.จิรรัตน์ ชีระวราพฤกษ์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ผศ.ดร.วาที ภัคดี

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

รศ.ดร.ภาณุ ด่านวานิชกุล

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ผศ.ดร.บรรหาญ ลิลา

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา

ผศ.ดร.มาลี สันติคุณาภรณ์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

รศ.ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



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 ขอเปลี่ยนแปลงเพิ่มเติมเนื้อหาของบทความให้มีความยาวจำนวนหน้าเพิ่มมากขึ้นจากเดิม ความยาวไม่เกิน 6 หน้า 2 คอลัมน์ เปลี่ยนเป็น ความยาวไม่เกิน 8 หน้า 2 คอลัมน์ หากจำนวนหน้าของเนื้อหามากกว่า 8 หน้าขึ้นไป ในส่วนของหน้าที่ 9 เป็นต้นไป คิดราคาค่าตีพิมพ์เพิ่มหน้าละ 500 บาท (ห้าร้อยบาทถ้วน) โดยผู้แต่งต้องชำระเงินค่าตีพิมพ์ในจำนวนหน้าที่เกิน 8 หน้า หลังจากที่ยื่นบทความแก้ไขสมบูรณ์แล้ว และได้รับหนังสือการตอบรับการตีพิมพ์จากงานวารสารวิศวกรรมลาดกระบัง

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ จักขอบพระคุณยิ่ง

ขอแสดงความนับถือ

(ศ.ดร.อิสระชัย งามหวง)
หัวหน้ากองบรรณาธิการ

งานบริหารการวิจัย (วารสารวิศวกรรมลาดกระบัง) คณะวิศวกรรมศาสตร์

โทร. / โทรสาร : 02-329-8317

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 6 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