

## “วิศวกรรมลาดกระบัง”

วิศวกรรมลาดกระบังเป็นวารสารทางวิชาการซึ่งจัดทำโดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. เป็นเอกสารเผยแพร่งานวิจัยและพัฒนาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์
2. เป็นสื่อแลกเปลี่ยนความรู้ใหม่ ๆ ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ระหว่างนักวิจัยและผู้สนใจ
3. เป็นเอกสารรวบรวมรายงานและบทความทางวิชาการที่น่าสนใจและมีคุณค่าทางวิศวกรรมศาสตร์

### วาระที่ออก

ปีละ 4 ฉบับ (ทุก 3 เดือนต่อฉบับ)

### นโยบาย

บทความที่จะเสนอตีพิมพ์ จะต้องเป็นบทความที่มีคุณค่าทางวิศวกรรม เช่น เป็นรายงานการวิจัยที่ผู้เขียนได้ทำการทดลอง สร้าง หรือมีส่วนกับงานโดยตรง เป็นบทความที่เสนอถึงความคิดหรือหลักการใหม่ที่เป็นไปได้และมีทฤษฎีประกอบหรือสนับสนุนอย่างเพียงพอ หรือเป็นบทความทางวิชาการที่น่าสนใจ มีประโยชน์ต่อนักศึกษาและนักวิจัย โดยผู้เขียนเป็นผู้รวบรวมและเรียบเรียงเอง

### รูปแบบของบทความ

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

บทความที่น่าเสนอเพื่อตีพิมพ์ ควรประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ตามลำดับ ดังนี้

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

กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี)

เอกสารอ้างอิง การอ้างในบทความให้ใช้หมายเลขประจำเอกสารหรือบทความที่อ้างอิง โดยตัวเลขจะอยู่ในวงเล็บใหญ่ โดยรูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิงจะเป็นดังนี้

- [1] P. Choeysuwan and S. 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 6 หน้า 2 คอลัมน์ โดยติดต่อส่งได้ที่ E-mail : [kmil.eng.jnl@gmail.com](mailto:kmil.eng.jnl@gmail.com) ส่วนวิศวกรรมลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง บทความจะได้รับการกลั่นกรองโดยผู้อ่านที่ทรงคุณวุฒิในสาขานั้น ๆ และเมื่อบทความได้รับการแก้ไข (หากมี) อย่างเหมาะสม ผู้เขียนจะต้องส่งต้นฉบับ 1 ชุด และซีดีข้อมูลบทความอีก 1 ชุด

### เจ้าของ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ (662) 329-8000 # 3464, 3465

โทรสาร (662) 329-8317

### ที่ปรึกษา

คณบดี

รศ.ดร.คมสัน มาลีสี

### หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ศ.ดร.อิสระชัย จมพหุ

### กองบรรณาธิการ

นายโกล วดเขียน

ออกแบบปกและรูปเล่ม

นางอาทิตย์ดา ขาววิกรม

ติดต่อประสานงานและสมาชิกสัมพันธ์

จัดทำต้นฉบับ Artwork

พิสูจน์อักษร

### จัดจำหน่ายโดย

คณะวิศวกรรมศาสตร์

นางอาทิตย์ดา ขาววิกรม

โทร. 02-329-8317



# วิศวกรรมลาดกระบัง

Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## ผู้ทรงคุณวุฒิในกองบรรณาธิการ “วิศวกรรมลาดกระบัง”

ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ

คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติสุขภกร

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.เควิต บรรเจิดพงษ์ชัย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกผาลิน

บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติ

สิรินธร ไทย-เยอรมัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า-

พระนครเหนือ

ศาสตราจารย์ ดร.อภิศักดิ์ วรพิเชษฐ

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ชูชีพสกุล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.สราวุฒิ สุจิตรจรัส

สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

ศาสตราจารย์ ดร.โมนัย ไกรฤกษ์

สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

ศาสตราจารย์ ดร.วัลลภ สุระกำพลธร

สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีขั้นสูง (THAIST)

สำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์

เทคโนโลยีนวัตกรรมแห่งชาติ (สวทน.)

รองศาสตราจารย์ ดร. กอบชัย เดชหาญ

สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

# การชดเชยค่าเซตพอยท์ในการชั่งแบบเติมโดยใช้คาลมานฟิลเตอร์

## Set-Point Recompense in Filling Weigher using Kalman Filter

ศักรินทร์ ลินไชย จีรสุตา โกษิยาภรณ์ ปราโมทย์ วาดเขียน

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

ในระบบควบคุมมีตัวแปรตัวหนึ่งที่ต้องให้ความสำคัญคือค่าเซตพอยท์เพราะว่าค่าเซตพอยท์เป็นตัวกำหนดขอบเขตการทำงานของระบบควบคุมว่าจะให้หยุดการทำงานหรือว่าเริ่มการทำงาน โดยปกติแล้วการตั้งค่าเซตพอยท์จะแบ่งออกเป็นแบบตรงไปตรงมา และ แบบที่มีการชดเชย ซึ่งในแบบหลังนั้นถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อลดความผิดพลาดในระบบการชั่งแบบเติมในแนวดิ่ง เนื่องจากระบบการชั่งดังกล่าวเซ็นเซอร์ถูกติดตั้งได้ภาชนะที่ใช้ชั่งแต่ในขณะที่วัตถุดิบถูกเติมจากด้านบนส่งผลให้การอ่านค่าของเซ็นเซอร์ถูกหน่วงเวลา ทำให้เมื่อเซ็นเซอร์อ่านค่าได้ตามค่าน้ำหนักเป้าหมายนั้นยังคงมีวัตถุดิบค้างอยู่ในอากาศที่ยังไม่ได้อ่านค่า ส่วนเกินของน้ำหนักจึงเกิดขึ้นและพบว่าในทางปฏิบัติค่าน้ำหนักส่วนเกินนี้มักจะไมคงที่ด้วยปัจจัยต่างๆที่เข้ามารบกวน จากปัญหาข้างต้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการนำเทคนิคคาลมานฟิลเตอร์มาใช้ในการชดเชยค่าเซตพอยท์ให้สอดคล้องกับน้ำหนักส่วนเกิน จากการทดลองกับเครื่องจักรที่ใช้งานจริงพบว่าเทคนิคที่นำเสนอสามารถชดเชยค่าเซตพอยท์สอดคล้องกับน้ำหนักส่วนเกินได้ดีและพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยความผิดพลาดของน้ำหนักเป้าหมายที่ 3505 กรัมเกิดขึ้นเพียงแค่ 0.08 เปอร์เซ็นต์

**คำสำคัญ :** การชดเชยค่าเซตพอยท์ น้ำหนักส่วนเกิน คาลมานฟิลเตอร์

### Abstract

In control system, one variable which is significant to a system is a set-point because it defines the system to initialize or to end its operation. Assigning the set-point can be set in two ways as follows, 1) the set-point is set identical to the desired value and 2) the set-point is compensated to satisfy the target value. In this work, the latter case is employed to lessen errors in a filling weighing system. Due to, in such system, a sensor is placed beneath a weighing container whilst a substance is filled from the top. By the time that the sensor senses the desired quantity, there is some quantity which has not been measured still left in the air. Hence, the excess of weight is occurred. In reality, the surplus is not constant owing to some noises interfere. To surmount this problem, Kalman filtering is introduced to compensate the weight set-point to meet the exact excess consistently. To illustrate its performance, the proposed technique is experimented with a practical machine at the target weight of 3505 grams. The results have revealed that the proposed approach is well performed which provides the measured weight error as low as 0.08%.

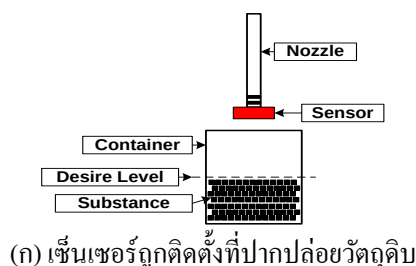
**Keywords :** Excess of weight, Kalman filter, Set-point compensation

## 1. บทนำ

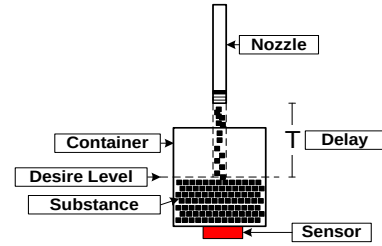
โดยทั่วไปแล้วการวัดปริมาณวัตถุดิบที่ถูกเติมลงไป ในภาชนะ (Container) ในงานอุตสาหกรรมให้ได้ตาม ปริมาณที่กำหนดไว้ (Desirable Quantity) สามารถทำ การวัดได้ 2 แบบ ขึ้นอยู่กับว่าวัตถุดิบที่ถูกเติมลงไปนั้น เป็นของเหลวหรือของแข็งดังแสดงในรูปที่ 1

ในกรณีของของเหลว (Liquid) จะใช้การวัดอัตราการ ไหลในการควบคุมการเปิดปิดปากปล่อยวัตถุดิบ (Nozzle) โดยที่ตัวเซ็นเซอร์อ่านอัตราการไหลถูกติดตั้ง ไว้ที่ปลายของปากปล่อยวัตถุดิบ [1] (ดูรูปที่ 1(ก)) ทำใ้ การอ่านค่าอัตราการไหลของวัตถุดิบอ่านในลักษณะ ทันทีทันใด (Real-time) ดังนั้นการตั้งค่าเซตพอยท์ (Set-point) เพื่อควบคุมการเปิดปิดปากปล่อยวัตถุดิบสามารถ ตั้งให้มีค่าเท่ากับปริมาณที่ต้องการได้เลย โดยไม่ จำเป็นต้องชดเชยค่าเซตพอยท์

แต่ในกรณีของของแข็ง (Solid) จะใช้การวัดน้ำหนัก หรือการชั่งน้ำหนักให้ได้ปริมาณที่ต้องการ โดยการชั่ง น้ำหนักตัวเซ็นเซอร์อ่านค่าน้ำหนักถูกติดตั้งไว้ได้ภาชนะ ที่ใช้ชั่งและตัวควบคุมเปิดปิดปากปล่อยวัตถุดิบถูกติด ตั้งอยู่ด้านบน (ดูรูปที่ 1(ข)) จากการติดตั้งในลักษณะนี้ ทำให้การอ่านค่าน้ำหนักจะเกิดขึ้นหลังจากมีการปล่อย วัตถุดิบลงมาแล้ว กล่าวคือการอ่านค่าน้ำหนักเกิดการ หน่วงเวลาไป  $T$  วินาทีและเมื่อตัวเซ็นเซอร์อ่านค่า น้ำหนักได้ปริมาณที่ต้องการแล้วจะยังคงมีวัตถุดิบลอย ค้างอยู่ในอากาศที่ซึ่งยังไม่ถูกอ่านค่า ผลที่ตามมาคือ ปริมาณที่ได้จริง (Actual Quantity) จะมากกว่า ปริมาณที่ต้องการ (ปริมาณที่ต้องการ + ปริมาณส่วนเกิน (Excess Quantity)) ดังนั้นการกำหนดค่าเซตพอยท์จึง ต้องชดเชยเพื่อให้ปริมาณที่ได้จริงเท่ากับปริมาณที่ ต้องการดังแสดงเป็นไดอะแกรมในรูปที่ 2 เพื่อให้เห็น ภาพที่ชัดเจนยิ่งขึ้น



(ก) เซ็นเซอร์ถูกติดตั้งที่ปากปล่อยวัตถุดิบ

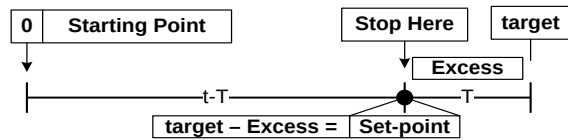


(ข) เซ็นเซอร์ถูกติดตั้งไว้ได้ภาชนะที่ใช้ชั่ง

รูปที่ 1 ระบบการวัดที่ติดตั้งเซ็นเซอร์ตำแหน่งต่างกัน



(ก) ระบบสั่งตัดการทำงานที่เวลา  $t$  ยังไม่ได้ทำการชดเชย



(ข) ระบบถูกชดเชยให้สั่งตัดการทำงานเร็วขึ้นที่เวลา  $t-T$

รูปที่ 2 ไดอะแกรมของระบบที่ถูกชดเชยและไม่ถูกชดเชย

จากรูปที่ 2 ปัญหาที่พิจารณาอยู่นี้อยู่ในมิติของเวลา แต่เมื่อพิจารณาในมิติของน้ำหนักจะพบว่า การชดเชย ด้วยการสั่งปิดปากปล่อยวัตถุดิบให้เร็วขึ้นเป็นระยะเวลา  $T$  วินาที (ดูรูปที่ 2(ข)) นั้นไม่สามารถทำได้เพราะค่าน้ำหนักส่วนเกินที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้งไม่คงที่ ซึ่งปัญหาดังกล่าวนี้อาจเกิดขึ้นในระบบเครื่องชั่งแบบเดิมในแนวตั้ง (Vertical Filling Weighing Machine) ดังนั้นการชดเชย น้ำหนักส่วนเกินจะอยู่ในรูปแบบการสั่งปิดปากปล่อย วัตถุดิบให้เร็วหรือช้าโดยอาศัยการชดเชยค่าเซตพอยท์ ในมิติของน้ำหนัก

ในช่วงสิบกว่าปีที่ผ่านมา มีงานวิจัยหลายงานได้นำเสนอผลงานในการหาค่าเซตพอยท์ที่เหมาะสมซึ่งในงานวิจัย [2] ได้นำเสนอวิธีการใช้ค่าเฉลี่ยแบบเคลื่อนที่ (Moving Average) คือการเก็บบันทึกค่าส่วนเกินน้ำหนัก ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง (เช่น 3 ครั้ง หรือ 5 ครั้ง หรือ แล้วแต่จะกำหนด) เพื่อนำค่าที่เก็บบันทึกนั้นมา คำนวณหาค่าเฉลี่ยแล้วนำมาชดเชยค่าเซตพอยท์ การใช้ วิธีของ [2] นั้น หน่วยความจำส่วนหนึ่งจะถูกสำรองไว้ เพื่อเก็บบันทึกข้อมูล ซึ่งจำนวนหน่วยความจำที่ต้อง สำรองไว้นั้นขึ้นกับความกว้างของการใช้ค่าเฉลี่ยแบบ

เคลื่อนที่ ในการใช้เทคนิคนี้ค่าเซตพอยท์ที่ถูกชดเชยจะ ถูกหน่วงเวลาเนื่องด้วยการคำนวณค่าเฉลี่ยน้ำหนัก ส่วนเกินแบบเคลื่อนที่นั้นต้องเก็บตัวอย่างให้ครบจำนวน ที่ต้องการก่อนแล้วจึงทำการชดเชย นอกจากนี้แล้วการใช้เทคนิคนี้มีแนวโน้มที่ค่าเซตพอยท์ที่ถูกชดเชยจะไม่ สอดคล้องกับค่าน้ำหนักส่วนเกินที่เกิดขึ้นจริง

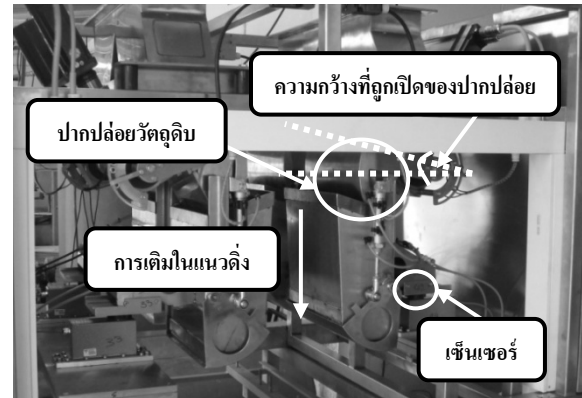
ต่อจากนั้น วิธีการที่อยู่บนพื้นฐานของพีชชีลอจิก (Fuzzy Logic) ได้ถูกนำเสนอในงานวิจัย [3] เพื่อที่จะ หลีกเลี่ยงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลที่ ตามมาคือเงื่อนไขต่างๆถูกสร้างขึ้นมาให้ครอบคลุม สถานการณ์ต่างๆเพื่อรองรับน้ำหนักส่วนเกินที่เกิดขึ้น

ในงานวิจัย [4] นี้ใช้เทคนิคคลามานฟิลเตอร์ในการ ทำนายค่าเซตพอยท์ที่เหมาะสมที่สุด โดยอาศัย แบบจำลองการวัด (Measurement Model) ในการ ประมาณค่าเซตพอยท์ในครั้งต่อไป แม้ว่าการใช้เทคนิค นี้จะเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมให้ดีขึ้นแต่วิธีการนี้ยังมี ข้อด้อยอยู่ตรงที่แบบจำลองกระบวนการ (Process Model) ถูกกำหนดให้เท่ากับหนึ่ง หมายความว่า แบบจำลองกระบวนการยังสามารถสร้างให้สอดคล้อง กับระบบเพื่อเพิ่มสมรรถนะการทำงานให้สูงขึ้นได้อีก

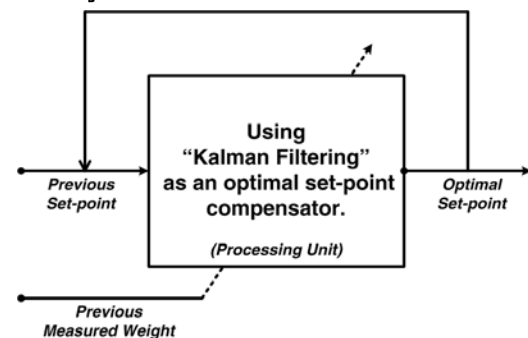
งานวิจัยนี้เป็นการต่อขยายความคิดของงานวิจัย [4] ด้วยการออกแบบแบบจำลองกระบวนการให้มีความ ยืดหยุ่นเพิ่มมากยิ่งขึ้นและทำการทดลองกับเครื่องจักร จริงดังแสดงในรูปที่ 3 เพื่อแสดงประสิทธิภาพของ วิธีการที่นำเสนอ นอกจากนี้ยังทำการเปรียบเทียบ ความสามารถในการชดเชยค่าเซตพอยท์ของเทคนิคที่ นำเสนอกับเทคนิค [2] [3] และ [4] ด้วยการจำลองการ ทำงานเพื่อแสดงให้เห็นสมรรถนะของวิธีการที่นำเสนอ นั้นดีกว่า

## 2. การออกแบบการชดเชยค่าเซตพอยท์

ในหัวข้อนี้เป็นการอธิบายรายละเอียดการออกแบบ การชดเชยของเทคนิคที่นำเสนอถูกนำไปประยุกต์ใช้กับ เครื่องจักรที่อ้างถึงไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตาม ได้ค่าเซตพอยท์ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งการออกแบบการ ชดเชยค่าเซตพอยท์ของวิธีการที่นำเสนอถูกแสดงเป็น บล็อกไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งประกอบไปด้วย



รูปที่ 3 ระบบเครื่องชั่งน้ำหนักแบบเดิม



รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมการชดเชยที่นำเสนอ

ค่าน้ำหนักที่ได้จากการวัดครั้งก่อนหน้าป้อนเข้าสู่เทคนิค ที่นำเสนอ (Proposed Technique) เพื่อทำการประมาณค่า เซตพอยท์ที่เหมาะสมที่สุด โดยส่วนของการประมวลผลถูก สร้างด้วยการออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ สอดคล้องกับเครื่องจักรและสร้างอัลกอริทึมการชดเชย ค่าเซตพอยท์

### 2.1 เทคนิคที่นำเสนอ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของคลามานฟิลเตอร์[5] นั้นมีการตั้งสมมติฐานว่าค่าเซตพอยท์ของระบบที่เวลา  $n$  เกิดจากค่าเซตพอยท์ของระบบที่เวลา  $n-1$  หรือกล่าวอีก นัยหนึ่งคือค่าปัจจุบันนั้นเกิดขึ้นจากค่าในอดีต ซึ่ง ความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ถูกแสดงในสมการที่ (1)

$$x[n] = Ax[n-1] + Bu[n] + w[n] \quad (1)$$

โดยที่  $x[n]$  คือผลรวมเชิงเส้นของค่าเซตพอยท์ก่อน หน้า  $x[n-1]$  ค่าสัญญาณควบคุม  $u[n]$  และค่าสัญญาณ รบกวนที่เกิดขึ้นในระบบ  $w[n]$  และ  $A$  คือค่าสัมประสิทธิ์ การเปลี่ยนผ่านจากค่าเซตพอยท์ก่อนหน้ามาเป็นค่าเซต พอยท์ปัจจุบัน และ  $B$  คือค่าสัมประสิทธิ์สัญญาณควบคุม นอกจากนี้ในการประมาณค่าของคลามานฟิลเตอร์ยัง อาศัยแบบจำลองการวัดเพื่อให้การประมาณค่านั้นเหมาะสม

สมการที่แสดงสมการที่ (2)

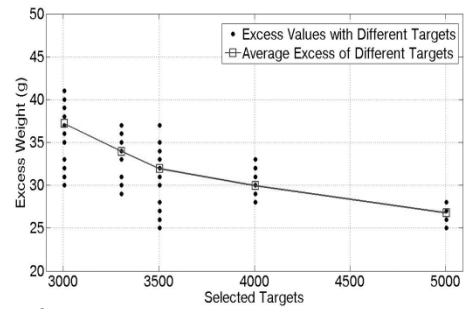
$$z[n] = Hx[n] + v[n] \quad (2)$$

โดยที่  $z[n]$  คือค่าที่ได้จากการวัดจากเซ็นเซอร์  $H$  คือค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนรูปจากค่าเซตพอยท์ปัจจุบันเป็นค่าที่ได้จากการวัด และ  $v[n]$  คือค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการวัด การจะใช้สมการที่ (1) และ สมการที่ (2) ให้ได้ประสิทธิภาพนั้น สัญญาณรบกวน  $w[n]$  และ  $v[n]$  ถูกสมมติเป็นแบบเกาส์เซียน (Gaussian) ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และมีค่าความแปรปรวน  $Q(\sigma_w^2)$  และ  $R(\sigma_v^2)$  ตามลำดับ

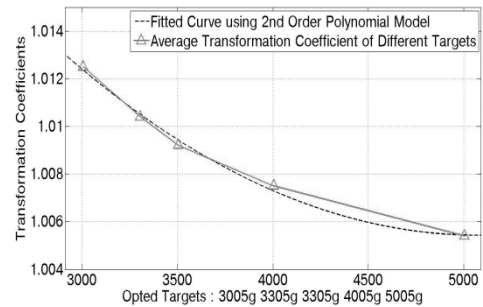
ในการใช้คาลมานฟิลเตอร์ ค่าสัมประสิทธิ์  $A$   $B$  และ  $H$  ต้องสร้างแบบจำลองให้สอดคล้องกับระบบเครื่องซึ่งแบบเดิมในแนวดิ่ง แต่เนื่องจากในระบบนี้ไม่มีค่าสัญญาณควบคุมเข้ามากระตุ้นระบบ ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์  $B$  ไม่ต้องออกแบบจึงกำหนดให้เป็นศูนย์ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์  $A$  นั้นสามารถสร้างได้จากสมมติฐานที่ว่า “ถ้าน้ำหนักที่อ่านได้ในครั้งนั้นมีค่ามากกว่าค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้แล้วนั้น ค่าเซตพอยท์ในครั้งต่อไปจะต้องปรับให้ต่ำลง แต่ในทางกลับกันถ้าน้ำหนักที่อ่านได้ในครั้งนั้นมีค่าต่ำกว่าค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้แล้วนั้น ค่าเซตพอยท์ในครั้งต่อไปจะต้องปรับขึ้น” และเพื่อตอบสนองสมมติฐานดังกล่าว[6] ความสัมพันธ์จึงถูกสร้างขึ้นดังแสดงในสมการที่ (3)

$$A = Tg(z[n-1]^{-1}) \quad (3)$$

โดยที่  $Tg$  คือน้ำหนักเป้าหมายซึ่งคงที่ตลอด และ  $z[n-1]$  คือน้ำหนักที่ได้จากการวัดครั้งก่อนหน้า สุดท้ายคือค่าสัมประสิทธิ์  $H$  สร้างได้จากการวัดโดยอาศัยเครื่องจักรในรูปที่ 3 ซึ่งทำได้โดยการหาน้ำหนักส่วนเกินที่น้ำหนักเป้าหมายต่างๆ ได้แก่ 3005 กรัม 3305 กรัม 3505 กรัม 4005 กรัม และ 5005 กรัม อย่างละ 40 ตัวอย่างรวมทั้งหมด 200 ตัวอย่าง โดยที่น้ำหนักส่วนเกินนั้นหาได้จากการตั้งค่าเซตพอยท์เท่ากับค่าน้ำหนักเป้าหมายแล้วอ่านค่าที่ได้หลังจากกระบวนการซึ่งเสร็จสิ้นแล้ว จากการหาค่าน้ำหนักส่วนเกินดังกล่าวถูกนำมาพล็อตกราฟเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักเป้าหมายกับค่าน้ำหนักส่วนเกินได้ดังรูปที่ 5 จากนั้น



รูปที่ 5 แสดงน้ำหนักเป้าหมายกับน้ำหนักส่วนเกิน



รูปที่ 6 แสดงน้ำหนักเป้าหมายกับสัมประสิทธิ์  $H$

คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์  $H$  ของค่าน้ำหนักเป้าหมายต่างๆ ด้วยการเอาค่าน้ำหนักเป้าหมายลบด้วยค่าเฉลี่ยน้ำหนักส่วนเกินที่ซึ่งถูกคำนวณโดยใช้ข้อมูลจากรูปที่ 5 จะได้ค่าเซตพอยท์แล้วนำค่าน้ำหนักเป้าหมาย ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์  $H$  ดังแสดงในตารางที่ 1 นอกจากนี้ค่าความแปรปรวนน้ำหนักส่วนเกินถูกคำนวณได้ด้วยเช่นกัน

เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์  $H$  มีหลายค่าขึ้นอยู่กับน้ำหนักเป้าหมายที่ถูกนำมาใช้ซึ่ง ดังนั้นการหาค่าสัมประสิทธิ์  $H$  เป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์จะช่วยให้มีความสะดวกมากขึ้น ซึ่งสามารถสร้างได้จากการนำเอาค่าน้ำหนักเป้าหมายต่างๆ กับค่าสัมประสิทธิ์  $H$  ของน้ำหนักเป้าหมายนั้นๆ มาพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์จะได้ดังรูปที่ 6 และจากรูปที่ 6 เส้นกราฟที่เชื่อมรูปสัญลักษณ์สามเหลี่ยมเข้าหากันนั้นถูกนำมาคำนวณหาฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์โดยใช้ความสัมพันธ์แบบพหุนามเชิงเส้นโค้งลำดับที่สองได้ดังสมการที่ 4 และกราฟเส้นประในรูปที่ 6 เป็นผลที่ได้จากสมการที่ 4

$$H = 1.613e^{-9}(Tg)^2 - 1.638e^{-5}(Tg) + 1.047 \quad (4)$$

## 2.2 กระบวนการวนซ้ำของคาลมานฟิลเตอร์

ในการหาค่าเซตพอยท์ให้ค่าที่เหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์  $H$  ที่น้ำหนักเป้าหมายต่างๆ

|                                                    | น้ำหนักเป้าหมาย (กรัม) |        |        |        |        |
|----------------------------------------------------|------------------------|--------|--------|--------|--------|
|                                                    | 3005                   | 3305   | 3505   | 4005   | 5005   |
| ค่าเฉลี่ยน้ำหนักส่วนเกิน (กรัม)                    | 37                     | 34     | 32     | 30     | 27     |
| ค่าเซตพอยท์(กรัม)                                  | 2968                   | 3271   | 3473   | 3975   | 4978   |
| ค่าสัมประสิทธิ์ $H$                                | 1.0125                 | 1.0104 | 1.0092 | 1.0075 | 1.0054 |
| ค่าความแปรปรวนน้ำหนักส่วนเกิน (กรัม <sup>2</sup> ) | 17.6567                |        |        |        |        |

โดยใช้กระบวนการวนซ้ำของคาลมานฟิลเตอร์ประกอบไปด้วยสองขั้นตอนได้แก่ขั้นตอนการทำนายค่า (Prediction Update) และ ขั้นตอนการแก้ไขค่า (Correction Update) ดังแสดงในสมการที่ (6) – (10)

- ขั้นตอนการทำนายค่า

$$\hat{x}[n|n-1] = A\hat{x}[n-1|n-1] + w[n-1] \quad (6)$$

$$P[n|n-1] = AP[n-1|n-1]A^T + Q \quad (7)$$

โดยที่  $\hat{x}[n|n-1]$  คือค่าเซตพอยท์ที่ถูกทำนายที่เวลา  $n$  ที่ได้มาจากค่าเซตพอยท์ที่ถูกแก้ไขที่เวลา  $n-1$  และ  $P[n|n-1]$  คือค่าความผิดพลาดแปรปรวนที่ถูกทำนายที่เวลา  $n$  ที่ได้มาจากค่าความผิดพลาดแปรปรวน  $P[n-1|n-1]$  ที่เวลา  $n-1$

- ขั้นตอนการแก้ไขค่า

$$K[n] = P[n|n-1]H^T(HP[n|n-1]H^T + R)^{-1} \quad (8)$$

$$\hat{x}[n|n] = \hat{x}[n|n-1] + K[n](z[n] - H\hat{x}[n|n-1]) \quad (9)$$

$$P[n|n] = (I - K[n]H)P[n|n-1] \quad (10)$$

โดยที่  $K[n]$  คือค่าอัตราขยายคาลมาน และ  $\hat{x}[n|n]$  คือค่าเซตพอยท์ที่ถูกแก้ไขที่เวลา  $n$  และ  $P[n|n]$  คือค่าความผิดพลาดแปรปรวนที่ถูกแก้ไขที่เวลา  $n$

### 3. การจำลองการทำงาน

เพื่อตรวจสอบการทำงานของเทคนิคที่แนะนำให้เสนอว่าใช้งานได้จริง การจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB จึงได้ถูกจัดทำขึ้นโดยจำลองที่น้ำหนักเป้าหมาย 3505 กรัม ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์  $H$  ถูกคำนวณด้วยสมการที่ (4) ได้เท่ากับ 1.0094 และการจำลองนี้เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการชดเชยค่าเซตพอยท์ของเทคนิคที่นำเสนอกับเทคนิค [2] [3] และ [4] การใช้เทคนิคที่นำเสนอค่าพารามิเตอร์  $Q$   $R$   $\hat{x}[0|0]$  และ  $P[0|0]$

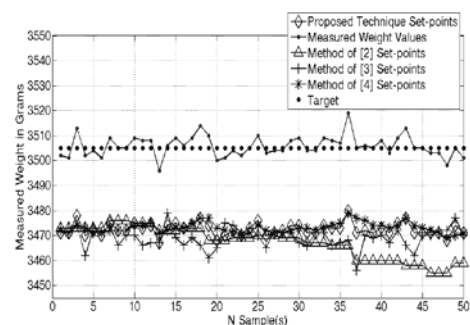
จำเป็นต้องถูกกำหนดค่าเริ่มต้นก่อนการเริ่มการทำงาน ดังนั้น  $Q=1$   $P[0|0]=1$   $\hat{x}[0|0]=3473$  (ดูตารางที่ 1) และ  $R$  ถูกบังคับให้เท่ากับหนึ่ง  $R=1$  เพื่อป้องกันไม่ให้ค่าเซตพอยท์แกว่งไปมาตามค่าน้ำหนักที่วัดได้ ในกรณีที่มีปัจจัยภายนอกกระทบกระบวนการวัดสูง

เพื่อแสดงประสิทธิภาพในการชดเชยค่าเซตพอยท์นั้น ตัวอย่างค่าน้ำหนักที่ได้จากการวัดถูกสุ่มไว้ 50 ตัวอย่างแล้วนำมาใช้เทคนิคที่นำเสนอและเทคนิคที่ถูกใช้ใน [2] [3] และ [4] คำนวณหาค่าเซตพอยท์ ซึ่งการเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานถูกแสดงในรูปที่ 7 พบว่าค่าเซตพอยท์ของวิธีการที่นำเสนอไม่แกว่งไปมาเหมือนวิธีของ [3] และยังพบว่าในวิธีของ [2] การหาค่าเซตพอยท์มีแนวโน้มที่เข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งค่าดังกล่าวนั้นอาจจะไม่ใช่ค่าเซตพอยท์ที่ดีที่สุด สุดท้ายในวิธีของ [4] ถึงแม้จะแกว่งน้อยกว่าแต่วิธีการที่นำเสนอใหม่นั้นปรับค่าเซตพอยท์ตามน้ำหนักส่วนเกินที่เกิดขึ้นจริงได้เหมาะสมกว่า เพราะว่าวิธีของ [4] นั้นอาศัยการปรับค่าเซตพอยท์จากการวัดเพียงอย่างเดียวซึ่งต่างจากวิธีการที่นำเสนอ นอกจากนั้นข้อมูลทางสถิติของผลที่ได้จากจำลองถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 2

เนื่องจากเครื่องจักรในรูปที่ 3 ถูกใช้ซึ่งที่น้ำหนักเป้าหมาย 3505 กรัมเป็นหลักจึงใช้เป้าหมายนี้ทำการจำลอง แต่อย่างไรก็ตามวิธีการที่นำเสนอสามารถใช้งานได้กับน้ำหนักเป้าหมายในช่วง 3005 ถึง 5005 กรัมอย่างมีประสิทธิภาพเนื่องด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ถูกสร้างจากการสุ่มเก็บตัวอย่างในช่วงน้ำหนักเป้าหมายดังกล่าว

### 4. การทดลองกับเครื่องจักร

เครื่องจักรดังแสดงในรูปที่ 3 ถูกนำมาใช้ในการทดลอง จากการจำลองการทำงานพบว่าวิธีการที่นำเสนอ



รูปที่ 7 ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB

ตารางที่ 2 ข้อมูลทางสถิติจากการจำลองการทำงาน

| วิธีการชดเชย                                                                                                                                                                                        | Av.M | Avg.SP | Ex | Var   | STD  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|--------|----|-------|------|
| วิธีที่นำเสนอ                                                                                                                                                                                       | 3506 | 3473   | 32 | 6.37  | 2.52 |
| เทคนิคของ [2]                                                                                                                                                                                       |      | 3467   | 38 | 40.41 | 6.36 |
| เทคนิคของ [3]                                                                                                                                                                                       |      | 3469   | 36 | 17.37 | 4.17 |
| เทคนิคของ [4]                                                                                                                                                                                       |      | 3473   | 32 | 4.12  | 2.03 |
| Av.M-ค่าเฉลี่ยน้ำหนักที่อ่านได้(กรัม), Avg.SP-ค่าเฉลี่ยเซตพอยท์(กรัม), Ex-ค่าน้ำหนักส่วนเกิน(กรัม), Var-ค่าความแปรปรวนของเซตพอยท์(กรัม <sup>2</sup> ) และ STD- ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเซตพอยท์(กรัม) |      |        |    |       |      |

มีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีของ [2] [3] และ [4] ดังนั้นการทดลองจึงใช้วิธีการที่นำเสนอทดลองเพียงวิธีการเดียว การทดลองนี้ใช้น้ำหนักเป้าหมาย 3505 กรัมและเก็บค่าเซตพอยท์ที่ถูกชดเชยและค่าน้ำหนักที่ได้จากวัดมาจำนวน 100 ตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 8 โดยที่ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองเหมือนกับการจำลองการทำงาน โดยที่ผลลัพธ์จากการทดลองถูกสรุปเป็นข้อมูลทางสถิติแสดงอยู่ในตารางที่ 3 รวมทั้งค่าความถูกต้องของค่าน้ำหนักที่ได้จากการวัดถูกคำนวณอยู่ในตารางนี้ด้วยเช่นกัน ค่าความถูกต้องถูกคำนวณโดยใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean absolute percentage error : MAPE) ดังสมการที่ (11)

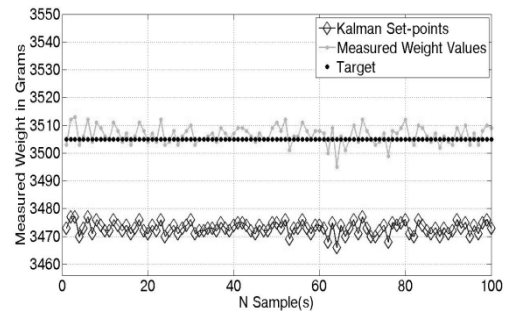
$$\%M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Tg - MW_i}{Tg} \right| \times 100 \quad (11)$$

โดยที่  $MW$  คือค่าน้ำหนักที่ได้จากการวัด  $n$  คือจำนวนตัวอย่างทั้งหมด และ  $\%M$  คือค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ย

ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองชี้ให้เห็นว่าเทคนิคที่นำเสนอใหม่นี้ปรับค่าเซตพอยท์เป็นไปตามค่าน้ำหนักส่วนเกินที่เกิดขึ้นจริงดังนั้นความผิดพลาดจึงเกิดขึ้นต่ำ

## 5. สรุป

ในงานวิจัยนี้นำเสนอเทคนิคใหม่สำหรับการชดเชยค่าเซตพอยท์สำหรับระบบการชั่งแบบเดิมในแนวดิ่ง ซึ่งเทคนิคใหม่นี้ชดเชยค่าเซตพอยท์ให้มีค่าเหมาะสมที่สุดโดยใช้กาลมานฟิลเตอร์ซึ่งถูกออกแบบให้สอดคล้องกับระบบนี้ ในงานวิจัยนี้ได้จำลองการทำงานและทดลองจริงกับเครื่องจักรและพบว่าผลลัพธ์เป็นไปในทิศทางเดียวกัน นอกจากนี้ผลการทดลองกับเครื่องจักรแสดงให้เห็นว่าวิธี



รูปที่ 8 ผลการชดเชยค่าเซตพอยท์ที่ทดลองกับเครื่องจักร

ตารางที่ 3 ข้อมูลทางสถิติจากการทดลองกับเครื่องจักร

| วิธีการชดเชย  | Av.M                            | Avg.SP | Ex                                      | Var  | STD  |
|---------------|---------------------------------|--------|-----------------------------------------|------|------|
| วิธีที่นำเสนอ | 3507                            | 3473   | 34                                      | 4.78 | 2.19 |
|               | ความแปรปรวน น้ำหนักที่ได้จากวัด |        | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน น้ำหนักที่ได้จากวัด |      | %M   |
| วิธีที่นำเสนอ | 10.29                           |        | 3.21                                    |      | 0.08 |

ที่นำเสนอมีประสิทธิภาพดีในการชดเชยค่าเซตพอยท์ เนื่องด้วยความผิดพลาดของน้ำหนักที่ได้จากวัดเกิดขึ้นต่ำ

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Wheatley, "Filling time," IET Journals & Magazines, vol. 5, pp. 54-56, 2010.
- [2] Unipulse Corporation. F701-C Weighing Controller Operation Manual. Tokyo., pp. 82-83, 2012.
- [3] Z. Dejun, W. Haochen, and L. Chunmei, "The application of fuzzy control in high accurate automatic powder dosing system," Electric Inf. and Control Eng. (ICEICE), pp. 1771-1774, 2011.
- [4] S. Sinchai, S. Saechia, T. Limpiti, J. Koseeyaporn and P. Wardkein, "Estimating an Optimal Setpoint to Lessen Errors in Filling Weighing System Based on Kalman Filtering," IEEE Int'l. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp. 2189-2193, 2014.
- [5] S.M. Kay, Fundamentals of Statistical Signal Processing, Vol. I: Estimation Theory. New Jersey: Prentice Hall, pp. 419-478, 1993.
- [6] M.H. Hayes, Statistical Digital Signal Processing and Modeling. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, pp. 335-390, 1996.



# ผลกระทบจากการให้ความร้อนกับฟิล์มบาง ITO ที่ใช้ใน

## ตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO

### The Effects of Heat Treatment of ITO Thin Films

### Using in ITO/n-Si/ITO Photodetectors

สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการปรับปรุงคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO โดยฟิล์มบาง ITO ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส ซึ่งสร้างจากการสputter ด้วยความถี่วิทยุ (RF) และหลังจากสร้างฟิล์มบาง ITO เสร็จแล้ว จึงนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นเวลา 15 นาที ด้วยเตาแบบพาความร้อนในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนจากการทดลอง พบว่าหลังจากให้ความร้อนกับฟิล์มบาง ITO แล้ว ตัวตรวจวัดแสงมีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีขึ้น กล่าวคือ ความหนาแน่นกระแสมืดและความจุไฟฟ้าในโครงสร้างมีค่าลดลง 33% และ 32% ตามลำดับ ในขณะที่กระแสแสงและการตอบสนองความถี่มีค่าสูงขึ้น 40% และ 1.3 เท่า ตามลำดับ

**คำสำคัญ :** โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ; ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์; อุปกรณ์ทางแสงแบบเชิงราบ; ขั้วโลหะโปร่งใส; การให้ความร้อน

#### Abstract

This paper reported the improvement of the electrical and optical properties of ITO/n-Si/ITO photodetectors. The indium tin oxide (ITO) thin films as transparent electrodes were deposited by radio frequency (RF) sputtering. The experimental results showed that the properties of ITO/n-Si/ITO photodetectors became better properties after ITO thin films were given by 300 °C heat treatment for 15 minute, in N<sub>2</sub> atmosphere convection furnace. The dark current density and capacitance decreased by 33% and 32%, respectively. While, the photocurrent and cutoff frequency of alternating current (ac) optical response increased by 40% and 1.3 times, respectively.

**Keywords :** Metal-semiconductor-metal; ITO thin film; Planar optical device; Transparent electrode; Heat treatment

#### 1. บทนำ

ฟิล์มบาง ITO (indium tin oxide: ITO) ได้ถูกนำไปประยุกต์งานในหลาย ๆ ด้าน เช่น การเคลือบเลนส์แว่นตาเพื่อลดแสง นำไปใช้ในอาคารประหยัดพลังงาน และการใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามการใช้

งานของฟิล์มบาง ITO ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ได้ถูกนำไปใช้กันอย่างแพร่หลาย และสามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับสินค้าต่าง ๆ ได้อย่างมากมาย การนำฟิล์มบาง ITO ไปใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์โดยทั่วไปมักจะอยู่ใน

ลักษณะของข้อไฟฟ้าโปร่งใสในอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ตัวอย่างเช่น ใช้กับจอภาพผลึกเหลว (LCD), กระดาษอิเล็กทรอนิกส์, โซลาร์เซลล์, โอแอลอีดี (OLED), และตัวตรวจวัดแสง เป็นต้น เทคนิคการสร้างฟิล์มบาง ITO ด้วยวิธีการต่าง ๆ (เช่น การสเป็คเตอร์ [1] การใช้โซล-เจล [2] วิธีหมักพิมพ์ [3] และวิธีการพ่น [4] เป็นต้น) เพื่อสร้างให้ฟิล์มบาง ITO มีคุณภาพดี และมีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านอื่น ๆ มีความสำคัญอย่างยิ่ง อย่างไรก็ตาม ยังมีแนวทางอื่นที่ช่วยปรับปรุงคุณภาพหลังจากการสร้างฟิล์มบาง ITO (ด้วยเทคนิคที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น) นั่นคือ วิธีการให้ความร้อนกับฟิล์มบาง ITO ด้วยวิธีการนี้มีจุดเด่นตรงที่เป็นวิธีการที่ทำได้ง่าย ใช้เวลาน้อย และเสียค่าใช้จ่ายไม่มาก แต่ได้ฟิล์มบาง ITO ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพ ทางแสง และทางไฟฟ้าดีขึ้น

บทความนี้นำเสนอสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีลวดลายแบบอินเตอร์ดิจิตัล ด้วยการให้ความร้อนที่เหมาะสม (อุณหภูมิ 300 °C) กับฟิล์มบาง ITO ที่ใช้สร้างเป็นข้อไฟฟ้าโปร่งใส

## 2. ผลกระทบของฟิล์มบาง ITO กับอุณหภูมิ

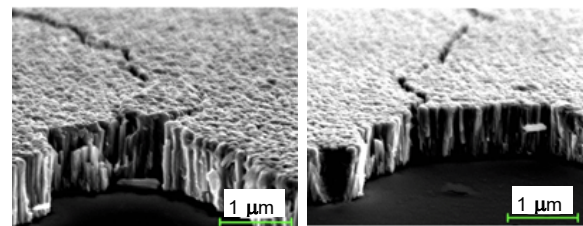
ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาผลกระทบกับฟิล์มบาง ITO ความหนา 500 nm สร้างขึ้นจากเครื่องอาร์เอฟสเป็คเตอร์บนฐานรองกระจก (ความหนาของฟิล์มบาง ITO นี้มีความเหมาะสมที่จะใช้สร้างตัวตรวจวัดแสง [5]) เพื่อหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะ สภาพคล่องของพาหะ ด้วยเทคนิคการวัดจากปรากฏการณ์ของฮอลล์ และการส่องผ่านแสงของฟิล์มบาง ITO ด้วยเครื่อง UV-VIS Transmittance ที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงอุณหภูมิ 200 °C ถึง 500 °C เวลา 15 นาที เปรียบเทียบกับก่อนให้ความร้อน [6] ดังแสดงในตารางที่ 1

จากตารางที่ 1 เมื่อให้ความร้อนมากขึ้นจะส่งผลให้คุณสมบัติด้านต่าง ๆ ดีขึ้น โดยเฉพาะสภาพต้านทานไฟฟ้า มีค่าลดลง และการส่องผ่านแสงสูงขึ้น เนื่องจากขนาดเกรนของฟิล์มบาง ITO มีขนาดใหญ่ขึ้น (จาก 48 nm กลายเป็น 55 nm) ซึ่งตัวแปรทั้งสองเป็นตัวแปรที่สำคัญในการสร้างข้อไฟฟ้าโปร่งใส อย่างไรก็ตาม การตรวจสอบฟิล์มบาง ITO ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าที่อุณหภูมิ 400 °C (รูปที่ 1 (ก)) และ

อุณหภูมิ 500 °C (รูปที่ 1 (ข)) จะพบรอยแตกร้าว และการหลุดล่อนของฟิล์มบาง ITO เนื่องจากสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่แตกต่างกัน จากตารางที่ 1 พบอีกว่าที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นช่วงอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูงอาจส่งผลให้เกิดความบกพร่องขึ้นกับฟิล์มบาง ITO จึงทำให้สภาพคล่องของพาหะมีค่าลดลงเหลือ 11.2 cm<sup>2</sup>/V-s ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ดังนั้นในบทความนี้จึงเลือกให้ความร้อนกับฟิล์มบาง ITO ด้วยอุณหภูมิ 300 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่มีความเหมาะสมในการนำไปสร้างเป็นข้อไฟฟ้าโปร่งใสของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO

ตารางที่ 1 สมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของฟิล์มบาง ITO ที่มีความหนา 500 nm ก่อนและหลังให้ความร้อน

| Temp. (°C) | Carriers (cm <sup>-3</sup> ) | Mobility (cm <sup>2</sup> /V-s) | Resistivity (Ω-cm)   | Transmittance (%) |
|------------|------------------------------|---------------------------------|----------------------|-------------------|
| no heat    | 4.2×10 <sup>20</sup>         | 10.9                            | 1.1×10 <sup>-3</sup> | 85                |
| 200        | 4.9×10 <sup>20</sup>         | 11.1                            | 9.3×10 <sup>-4</sup> | 86                |
| 300        | 6.8×10 <sup>20</sup>         | 11.8                            | 8.0×10 <sup>-4</sup> | 88                |
| 400        | 7.2×10 <sup>20</sup>         | 12.3                            | 7.6×10 <sup>-4</sup> | 89                |
| 500        | 7.4×10 <sup>20</sup>         | 11.2                            | 7.2×10 <sup>-4</sup> | 90                |



(ก)

(ข)

รูปที่ 1 รอยแตกร้าวของฟิล์มบาง ITO เกิดขึ้นหลังจากให้ความร้อนที่อุณหภูมิ (ก) 400 °C และ (ข) 500 °C

## 3. การสร้างตัวตรวจวัดแสง

การสร้างตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO เริ่มต้นจากแผ่นซิลิคอน ชนิด n, สภาพต้านทานไฟฟ้า 5-10 Ω-cm ระบายผลึก (100) สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) หนา 400 nm แล้วเปิดชั้น SiO<sub>2</sub> เพื่อสร้างเป็นส่วนรับแสง

และรอยสัมผัสระหว่างชั้น ITO กับซิลิคอน (ITO/n-Si) โดยฟิล์มบาง ITO สร้างขึ้นจากเครื่องอาร์เอฟสปีเตอร์ (ความหนา 500 nm) สร้างจากแหล่งจ่ายอินเดียมทินออกไซด์บริสุทธิ์ 99.99% หลังจากสร้างฟิล์มบาง ITO เสร็จแล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300 °C ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน เวลา 15 นาที (ด้วยเตาแบบพาความร้อน) แล้วจึงสร้างลวดลายอลูมิเนียมด้วยการระเหยสารในสุญญากาศ เพื่อสร้างเป็นส่วนเชื่อมต่อกับตัวถังที่ใช้เก็บบรรจุ (ตัวอย่างชิ้นงานของตัวตรวจวัดแสงที่สร้างเสร็จแล้ว ดูได้จากเอกสารอ้างอิง [7]) จากนั้นนำตัวตรวจวัดแสงที่สร้างเสร็จแล้ว ไปวัดสมบัติทางไฟฟ้า และทางแสงต่อไป โดยทุกการทดลองในบทความนี้ทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง

#### 4. การทดลอง และผลการทดลอง

##### 4.1 สมบัติพื้นฐานของข้อต่อกึ่งไดโอดกับอุณหภูมิ

สมบัติพื้นฐานในที่นี้หมายถึงการหาตัวแปรที่สำคัญของข้อต่อกึ่งไดโอด ได้แก่ ศักย์ภายใน ( $qV_{bi}$ ) และความสูงกำแพงศักย์ ( $q\phi_{bn}$ ) จากการทดลองพบว่า ก่อนและหลังให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300 °C จะได้ค่า  $qV_{bi}$  และ  $q\phi_{bn}$  ใกล้เคียงกัน โดยมีค่า 0.34 eV และ 0.76 eV ตามลำดับ (สำหรับเทคนิคการหาค่าดูได้จากเอกสารอ้างอิง [8])

##### 4.2 ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันกับอุณหภูมิ

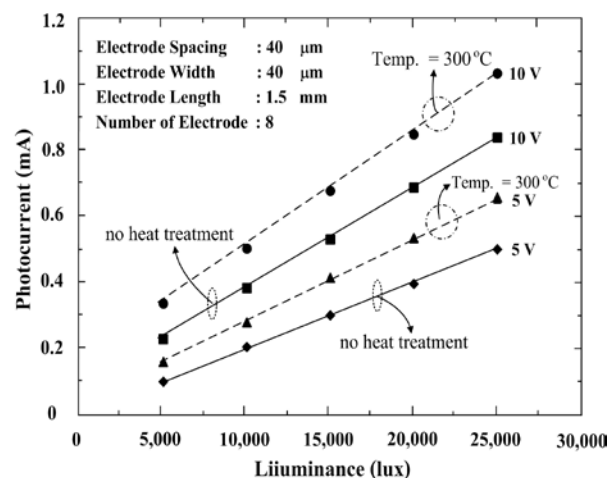
###### 4.2.1 กระแสมืดของตัวตรวจวัดแสง

ความหนาแน่นกระแสมืด (ไม่ให้แสงตกกระทบกับตัวตรวจวัดแสง และวัดที่แรงดันไบอัส 5 V) ของตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้น พบว่าก่อนให้ความร้อนความหนาแน่นกระแสมืดมีค่า 1.5 pA/ $\mu\text{m}^2$  หลังจากให้ความร้อนกับฟิล์มบาง ITO แล้ว มีค่าลดลงเหลือ 1.0 pA/ $\mu\text{m}^2$  การลดลงของความหนาแน่นกระแสมืดเกิดขึ้นเนื่องจากความร้อนทำให้รอยสัมผัสระหว่าง ITO กับซิลิคอนมีความสมบูรณ์มากขึ้น ส่งผลให้สถานะที่ผิวลดลง จึงทำให้ความหนาแน่นกระแสมืดลดลงตามไปด้วย [8]

###### 4.2.2 กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง

กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (S), ความกว้างของขั้วไฟฟ้า (W), ความยาวของ

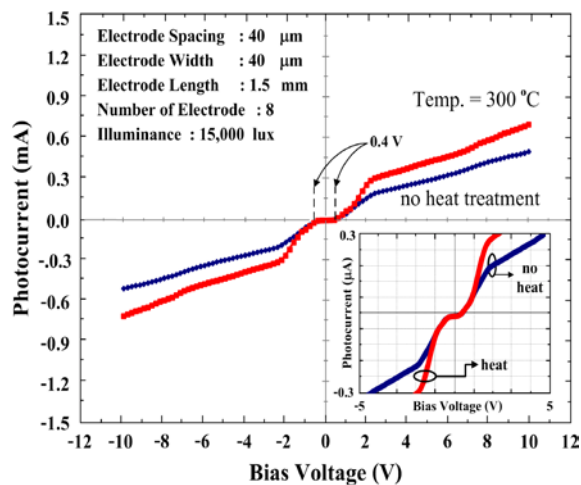
ขั้วไฟฟ้า (L) และจำนวนขั้วไฟฟ้า (N) เป็น 40  $\mu\text{m}$ , 40  $\mu\text{m}$ , 1.5 mm และ 8 ขั้ว ตามลำดับ [7] แสดงดังในรูปที่ 2 พบว่าหลังจากผ่านการให้ความร้อนแล้วได้กระแสแสงมากขึ้น กล่าวคือที่แรงดันไบอัส 5 V ตัวตรวจวัดแสงจะมีกระแสแสงที่ความเข้มแสง 5000, 10,000, 15,000, 20,000 และ 25,000 lux ประมาณ 0.14, 0.26, 0.42, 0.54 และ 0.66 mA ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วนกระแสแสงต่อกระแสมืด (ที่ความเข้มแสง 25,000 lux และที่แรงดัน 5 V) ประมาณ 2,750 เท่า ในขณะที่ตัวตรวจวัดแสงที่ไม่ให้ความร้อนมีอัตราส่วนกระแสแสงต่อกระแสมืดที่ความเข้มแสงและแรงดันค่าเดียวกันประมาณ 1,400 เท่า จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนระหว่างกระแสแสงต่อกระแสมืดมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 2 เท่าด้วยกัน และยังพบอีกว่าถึงแม้จะให้ความร้อนแก่ตัวตรวจวัดแสง กระแสแสงที่ได้จะเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้น เมื่อให้ความเข้มแสงมากขึ้นเช่นเดียวกับตัวตรวจวัดแสงที่ไม่ได้ให้ความร้อนกับฟิล์มบาง ITO



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับความเข้มแสงค่าต่าง ๆ แสดงให้เห็นความเป็นเชิงเส้นที่ดีของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO ก่อนและหลังให้ความร้อน

เมื่อนำลักษณะสมบัติกระแสแสงและแรงดันของตัวตรวจวัดแสง ก่อนและหลังให้ความร้อนมาเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าที่แรงดันไบอัสมีค่าต่ำ (ในช่วง 0 ถึง 0.4 V) กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง หลังจากให้ความร้อนยังคงมีค่าต่ำมากเหมือนกับตัวตรวจวัดแสงที่ไม่ได้ให้ความร้อน ซึ่งเป็นไปได้ว่าชั้นของออกไซด์บาง ๆ เกิดขึ้นที่บริเวณรอยสัมผัสระหว่าง ITO และซิลิคอนยังคง

มีผลกระทบต่อลักษณะสมบัติของกระแสแสงอยู่ ส่งผลให้เกิดแรงดันค่าน้อย ๆ ตกคร่อมที่บริเวณชั้นออกไซด์เหล่านั้น ถึงแม้จะให้ความร้อนแต่ก็ไม่ได้ทำให้ความหนาของออกไซด์เปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด ดังนั้นถ้าจะใช้ตัวตรวจวัดแสงนี้ควรให้แรงดันไบอัสมากกว่า 0.8 V สำหรับเหตุผลหลักที่ทำให้กระแสแสงเพิ่มมากขึ้น เมื่อให้ความร้อนกับฟิล์มบาง ITO ของตัวตรวจวัดแสง เกิดจากมีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงมากขึ้น โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 85% เป็น 88% ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1

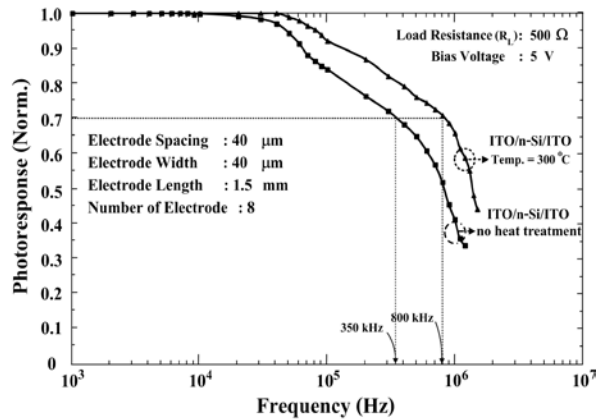


รูปที่ 3 ลักษณะสมบัติกระแสแสงและแรงดันของ ITO/n-Si/ITO เปรียบเทียบก่อนและหลังให้ความร้อน

#### 4.3 การตอบสนองทางความถี่กับอุณหภูมิ

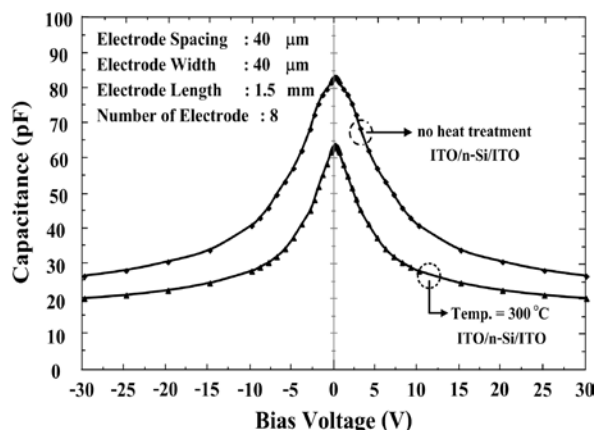
รูปที่ 4 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางแสงแบบสัญญาณกระแสสลับกับความถี่ของตัวตรวจวัดแสง (รายละเอียดของการทดลองดูได้จากเอกสารอ้างอิง [9]) ผลการทดลองก่อนและหลังให้ความร้อน พบว่าความถี่คutoff มีค่าเท่ากับ 350 kHz และ 800 kHz ตามลำดับ ความถี่คutoff ของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้มีการเปลี่ยนแปลงกับความร้อน โดยหลังจากให้ความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 1.3 เท่า การตอบสนองทางความถี่นี้มีความสอดคล้องกับผลการวัดความจุไฟฟ้าและแรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยก่อนและหลังให้ความร้อนกับตัวตรวจวัดแสงนี้ ความจุไฟฟ้าที่วัดได้ (ที่แรงดันไบอัส 5 V) มีค่า 50 pF และ 34 pF ตามลำดับ ความจุไฟฟ้าที่ได้มีความสมมาตรกันทั้งแรงดันไบอัสบวกและแรงดันไบอัสลบ หลังจากให้ความร้อนแล้วความจุไฟฟ้ามีค่าลดลงประมาณ 32% เพราะว่า

ความจุไฟฟ้าในโครงสร้างที่ลดลงนี้ จึงทำให้เวลาคงตัว (time constant) มีค่าลดลง ดังนั้นความถี่คutoff ของตัวตรวจวัดแสงหลังจากฟิล์มบาง ITO ได้รับความร้อนแล้ว จึงมีค่ามากขึ้นกว่าตัวตรวจวัดแสงที่มีฟิล์มบาง ITO ไม่ได้ให้ความร้อน



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางแสงและความถี่ในช่วง 1 kHz - 10 MHz เพื่อหาความถี่คutoff ของ ITO/n-Si/ITO ก่อนและหลังให้ความร้อน

สาเหตุที่ความจุไฟฟ้าที่ได้มีค่าลดลง เนื่องมาจากความร้อนที่ทำให้รอยสัมผัสระหว่าง ITO และซิลิคอน ชนิด n มีความสมบูรณ์มากขึ้นกว่าเดิม ส่งผลให้สถานะที่ผิวมีค่าลดลง และ/หรืออาจมาจากชั้นออกไซด์บาง ๆ ( $\text{SiO}_x$ ) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการรวมตัวระหว่างซิลิคอนและออกซิเจน ส่วนเกินจากกระบวนการสร้างฟิล์มบาง ITO ด้วยวิธีอาร์เอฟสเปคเตอร์มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น [10]



รูปที่ 5 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้าและแรงดันเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO ก่อนและหลังให้ความร้อน

การเปรียบเทียบตัวแปรที่สำคัญของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO (ก่อนและหลังให้ความร้อน) ที่กล่าวไว้ข้างต้น และ Al/n-Si/Al [7] แสดงไว้ในตารางที่ 2 จากตาราง พบว่าตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO หลังจากให้ความร้อนแล้วตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้จะมีสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงดีกว่า (ตัวตรวจวัดแสงที่ไม่ได้ให้ความร้อนแก่ฟิล์มบาง ITO) โดยมีความหนาแน่นกระแสมีค่าน้อยลง 33%, กระแสแสงมากขึ้น 40% และความจุไฟฟ้าลดลง 32% จึงทำให้ความถี่คutoff สูงขึ้นถึง 1.3 เท่า

เมื่อเปรียบเทียบตัวตรวจวัดแสง ชนิด Al/n-Si/Al กับตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO (ฟิล์มบาง ITO ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 300 °C) มีขนาดทางเรขาคณิตเท่ากัน พบว่าความหนาแน่นกระแสมีค่าน้อยลง 23%, กระแสแสงสูงขึ้น 7.4 เท่า, ความถี่คutoff น้อยกว่า 20% และความจุไฟฟ้ามากกว่าประมาณ 31%

## 5. สรุป

การให้ความร้อนกับฟิล์มบาง ITO เพื่อใช้เป็นขั้วโลหะโปร่งใสกับตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ทำให้ได้ตัวตรวจวัดแสงที่มีสมบัติทางไฟฟ้าดีขึ้นเกือบทุกด้าน เมื่อเทียบกับตัวตรวจวัดแสงที่ไม่

ให้ความร้อน โดยมีกระแสมีค่าน้อยลง กระแสแสงสูงขึ้น ความถี่คutoff มากขึ้น ในขณะที่ความจุไฟฟ้าที่ได้มีค่าลดลง

จากการปรับปรุงประสิทธิภาพตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้ด้วยการใช้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม เพื่อช่วยให้ได้คุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยรวมในด้านต่าง ๆ ดีขึ้นกว่าเดิม เป็นอีกแนวทางหนึ่งนำไปสู่การสร้างตัวตรวจวัดแสงที่มีประสิทธิภาพสูง ด้วยการนำไปวัดความเข้มแสงที่มีค่าต่ำ ๆ ได้เป็นอย่างดี และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในเชิงพาณิชย์ได้ในโอกาสต่อไป

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณกุลวรงค์ นุตะมาน และคุณอิสรระ ศรีธนชัยที่ช่วยสร้างชิ้นงาน วัดข้อมูล และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในบทความนี้ และขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจสอบฟิล์มบาง ITO ด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ผลงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ตารางที่ 2 ลักษณะสมบัติของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO ก่อน และหลัง (อุณหภูมิ 300 °C) ให้ความร้อนกับฟิล์มบาง ITO (ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส) โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40  $\mu\text{m}$ , ความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40  $\mu\text{m}$ , ความยาวของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 1.5 mm และจำนวนขั้วไฟฟ้า 8 ขั้ว เมื่อได้รับแรงดันไบอัส 5 V และยังได้เปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสง ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขนาดเดียวกัน

| MSM Photodetectors               | Dark current density ( $\text{pA}/\mu\text{m}^2$ ) | Photocurrent [15,000 lux] (mA) | Frequency cut off (MHz) | Capacitance (pF) |
|----------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------|------------------|
| ITO/n-Si/ITO (heat treatment)    | 1.0                                                | 0.42                           | 0.80                    | 34               |
| ITO/n-Si/ITO (no heat treatment) | 1.5                                                | 0.30                           | 0.35                    | 55               |
| Al/n-Si/Al [7]                   | 1.3                                                | 0.05                           | 1.00                    | 26               |

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] F. Kurdesau, G. Khripunov, A. F. da Cunha, M. Kaelin, A. N. Tiwari, "Comparative study of ITO layers deposited by DC and RF magnetron sputtering at room temperature", *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 352, pp. 1466-1470, 2006
- [2] LI Zhi-hua, KE Yu-peng and REN Dong-yan, "Effects of Heat Treatment on Morphological, Optical and Electrical Properties of ITO Films by Sol-Gel Technique", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 18, pp. 366-371, 2008
- [3] Sung-Jei Hong, Jong-Woong Kim, Jae-Won Lim, Good-Sun Choi and Minoru Isshiki, "Characteristics of Printed Thin Films Using Indium Tin Oxide (ITO) Ink", *Materials Transactions*, Vol. 51, pp. 1905-1908, 2010
- [4] Seok-In Na, Byung-Kwan Yu, Seok-Soon Kim, Doo-jin Vak, Tae-Soo Kim, Jun-Seok Yeo and Dong-Yu Kim, "Fully spray-coated ITO-free organic solar cells for low-cost power generation", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 94, pp. 1333-1337, 2010
- [5] Surasak Niemcharoen, Design and Fabrication of Planar ITO/n-Si/ITO Photodetectors, Completed Research Report, Faculty of Engineering, KMITL, pp. 44-52, 2011
- [6] Kunagone Kiddee, Thanawat Thongnak, Itsara Sri-thanachai, Surada Ueamanapong, Narin Atiwong-sangthong, Surasak Niemcharoen and Somkiat Supadech, "The Effect of Temperature to Indium Tin Oxide Thin Films for Apply to Transparent Electrode of Photodetector", 33<sup>rd</sup> Electrical Engineering Conference, pp. 1465-1468, 2010
- [7] Surasak Niemcharoen, "High Photocurrent of Metal-Semiconductor-Metal Photodetector Using Transparent Electrodes", *Ladkrabang Engineering Journal*, Vol. 27, No. 1, pp. 25-30, 2010
- [8] Surasak Niemcharoen, Metal and Semiconductor Contacts, Chapter 1 and Chapter 6, Mean Service Supply, Bangkok, 2015
- [9] Surasak Niemcharoen, "Optical Response of MSM Structure Photodetector Using Indium Tin Oxide as Transparent Electrodes", *Ladkrabang Engineering Journal*, Vol. 28, No. 1, pp. 25-30, 2011
- [10] G. Hodes, L. Thompson, J. DuBow, and K. Rajeshwar, "Heterojunction Silicon/Indium Tin Oxide Photoelectrodes: Development of Stable Systems in Aqueous Electrolytes and Their Applicability to Solar Energy Conversion and Storage", *Journal of American Chemical Society*, Vol. 105, No. 3, pp. 324-330, 1983

# อิทธิพลของแมนเดรลเหลวต่อการลดพื้นที่หน้าตัด ความเค้นดึง และความหนาในกระบวนการดึงขึ้นรูปท่อทองแดง

## Influence of Fluid Mandrel on Area Reduction, Drawing Stresses and Thickness in Copper Tube Drawing

ทัฬหีสมน ดุสิตโสภิตวงศ์ สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาอิทธิพลของแมนเดรลเหลวที่ส่งผลกระทบต่อ การลดของพื้นที่หน้าตัด ความหนา และความเค้นดึงของท่อในกระบวนการดึงขึ้นรูปท่อทองแดง ได้ทำการทดลองโดยใช้ท่อทองแดงตามมาตรฐาน JIS C12200 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาของท่อ 15.88 มิลลิเมตร และ 1.12 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยของเหลวที่บรรจุไว้ภายในท่อทองแดงเพื่อทำหน้าที่เป็นแมนเดรล คือ น้ำสะอาด และ น้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 จนเต็ม จากนั้นทำการดึงขึ้นรูปผ่านแม่พิมพ์ที่มีขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์เท่ากับ 15 องศา เพื่อลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลงร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยศึกษาที่อัตราเร็วในการดึงขึ้นรูปเท่ากับ 5 และ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่าชนิดของแมนเดรลเหลวส่งผลกระทบต่อขนาดของพื้นที่หน้าตัด ความหนาของท่อและความเค้นดึง และยังขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของแมนเดรลเหลวและอัตราเร็วที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปด้วย

**คำสำคัญ :** การดึงขึ้นรูปท่อ, ท่อทองแดง, แมนเดรลเหลว, การลดพื้นที่หน้าตัด, ความเค้นดึง

### Abstract

The objective of this research is to study the effect of the fluid mandrel on the reduction of area, drawing stress and thickness in copper tube drawing process. The standard copper tube JIS C12200 with 15.88 mm diameter and 1.12 mm wall thickness is chosen for this experimental investigation. Two types of fluid mandrel, water and lubrication oil (SAE20W40) were contained in the copper tube. The copper tube is drawn through the die ( $\alpha = 15^\circ$ ) by using the area reduction of 20, 35 and 50% with the drawing speeds at 5 and 30 mm/min. The results shown the influence of the fluid mandrel on the reduction of area, the tube thickness and the drawing stress and also depend on the density of fluid and the drawing speed.

**Keywords :** Tube drawing, Copper tube, Fluid mandrel, Reduction of area, Drawing stress

## 1. บทนำ [1,2,4]

การดึงขึ้นรูป เป็นกระบวนการขึ้นรูปที่นิยมในงานอุตสาหกรรมการผลิตท่อในปัจจุบัน โดยการนำท่อมาดึงลดขนาดทั้งด้านในและด้านนอก โดยดึงผ่านแม่พิมพ์ เพื่อให้ได้ขนาดตามต้องการ ซึ่งในงานวิจัยนี้ เป็นการดึงขึ้นรูปแบบเย็นที่อาศัยแรงในการดึงขึ้นรูปสูง และวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาด รูปร่างแบบถาวรที่อุณหภูมิห้อง แต่ชิ้นงานที่ได้จะมีความแข็งแรงสูง สามารถควบคุมขนาดสุดท้ายได้แน่นอน และผิวของวัสดุที่ได้มีความสวยงาม

การพัฒนากระบวนการผลิตเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมการผลิต ซึ่งส่งผลให้ต้นทุนในการดำเนินงานลดลง ใช้ระยะเวลาในการดำเนินงานน้อยลง ให้ผลผลิตสูงขึ้น ผลิตรักษามีคุณภาพสูงขึ้น การปรับปรุงตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการผลิตเป็นอีกวิธีหนึ่งของการพัฒนากระบวนการผลิต การปรับปรุงตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการผลิตที่สำคัญ เช่น ขนาดแม่พิมพ์ ชนิดของสารหล่อลื่น ชนิดของแมนเดรล ให้มีความเหมาะสม เพื่อให้ได้ชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพตรงตามความต้องการในการใช้งาน

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด ว่าส่งผลกระทบต่อความหนาของท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งภายในและภายนอก รวมไปถึงความเค้นดึงที่เกิดขึ้นขณะทำการดึงขึ้นรูป อีกทั้งยังมีของเหลวที่ใช้เป็นแมนเดรลมาพิจารณาด้วย โดยศึกษาว่าตัวแปรเหล่านี้ จะส่งผลกระทบต่อวัสดุที่ใช้ทำท่ออย่างไรบ้าง

## 2. การดึงขึ้นรูป (Tube Drawing Process) [2,3]

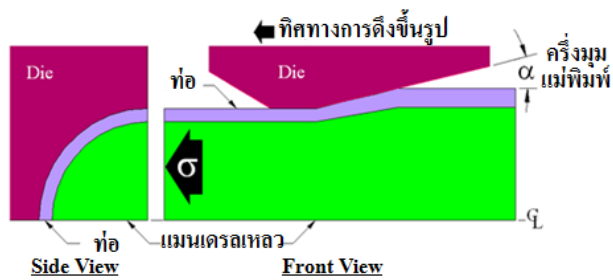
การดึงขึ้นรูป เป็นหนึ่งในกระบวนการขึ้นรูปวัสดุที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมที่เก่าแก่วิธีหนึ่ง โดยเป็นการทำให้ขนาดพื้นที่หน้าตัดของท่อ ลวด หรือเหล็กท่อนกลม ลดขนาดลงตามที่ต้องการ ซึ่งตัวกำหนดขนาดของวัสดุในขณะที่ดึงขึ้น

รูป คือ แม่พิมพ์ (Die) ที่ทำจากซีเมนต์คาร์ไบด์หรือเพชรอุตสาหกรรม เพราะจะทำให้แม่พิมพ์มีอายุการใช้งานที่นาน และทนต่อการสึกหรอสูง โดยปกติแล้วการดึงขึ้นรูปนิยมทำที่อุณหภูมิห้องและทำการดึงซ้ำๆ ในบางกรณีได้มีการให้ความร้อนหรืออบอ่อนแก่ชิ้นงานที่ต้องดึงซ้ำ เพื่อลดความเครียดแข็งที่เกิดขึ้นในชิ้นงานก่อนการดึงครั้งต่อไป

การดึงขึ้นรูปแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดหลัก คือ 1. การดึงขึ้นรูปแบบไม่มีแมนเดรลหรือแกน เรียกว่า การขึ้นรูปแบบซิงกิ้ง (Tube Sinking) โดยหลังจากดึงผ่านแม่พิมพ์ จะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกลดลง ในขณะที่ความหนาและความยาวของท่อจะเพิ่มขึ้น จะขึ้นอยู่กับความเค้นดึง ลักษณะของแม่พิมพ์ และแรงเสียดทานระหว่างแม่พิมพ์กับชิ้นงาน วิธีนี้จะทำให้ผิวภายในและภายนอกชิ้นงานมีความขรุขระ ลักษณะชิ้นงานที่ได้มีขนาดไม่คงที่ตลอดทั้งชิ้นงาน 2. การดึงขึ้นรูปแบบมีแกน (Plug Drawing or Mandrel Drawing) การขึ้นรูปแบบนี้เป็นการขึ้นรูปที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดกลางไปจนถึงขนาดใหญ่ นิยมใช้ในการผลิตท่อผนังบาง ซึ่งแกนจะอยู่ภายในท่อและจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยอาศัยแรงเสียดทานไปในทิศทางเดียวกันกับทิศทางที่ใช้ดึง โดยวิธีนี้ ผิวชิ้นงานทั้งภายในและภายนอกมีความเรียบกว่าแบบซิงกิ้ง

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การขึ้นรูปท่อแบบมีแกนเหลว (Fluid Mandrel) คือ การดึงวัสดุผ่านแม่พิมพ์โดยอาศัยแรงดึงในการดึงวัสดุที่บริเวณปลายของท่อที่สอดผ่านแม่พิมพ์ออกมา โดยใช้ของเหลวเป็นแกนกลางในการดึงขึ้นรูป แม่พิมพ์จะทำหน้าที่ควบคุมขนาดและผิวภายนอกท่อ ส่วนขนาดและผิวภายในท่อจะถูกกำหนดด้วยแกนเหลว แสดงดังรูปที่ 1





รูปที่ 1 การดิ่งขึ้นรูปทอโดยใช้แมนเดรลเหลว

### 3. วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ขั้นตอนทดสอบที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของการลดลงของพื้นที่หน้าตัด ต่อความหนาของทอ และความเค้นดิ่ง ในกระบวนการดิ่งขึ้นรูปทอโดยใช้แมนเดรลเหลวในงานวิจัยนี้ คือ ทอทองแดงขนาด 15.88 มม. หนา 1.12 มม. โดยดิ่งผ่านแม่พิมพ์ 3 ขนาด ด้วยเครื่องทดสอบแรงดิ่งดังต่อไปนี้

**3.1 ทอทองแดง** ตามมาตรฐาน JIS C12200 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 15.88 มม. ความหนา 1.12 มม. ความยาวทอก่อนดิ่ง 10 ซม. ซึ่งมีคุณสมบัติเชิงกลดังตารางที่ 1 ตารางที่ 1 คุณสมบัติเชิงกลของทอทองแดงที่ใช้ในการดิ่งขึ้นรูป

|                                   |         |
|-----------------------------------|---------|
| Young's modulus, E (MPa)          | 117,000 |
| Yield stress, $\sigma_y$ (MPa)    | 120     |
| Poisson's ratio, V                | 0.31    |
| Die half-angle, $\alpha$ (Degree) | 15      |

### 3.2 เครื่องทดสอบแรงดิ่ง Universal Testing Machine

**Testometric Model** รุ่น M500-100 kN (UTM) ขนาดแรง 100 กิโลนิวตัน ดังแสดงในรูปที่ 2

**3.3 แม่พิมพ์ (Die)** ในการทดลอง เลือกใช้แม่พิมพ์ที่มีขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ ( $\alpha$ ) เท่ากับ 15 องศา โดยมีอัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 20, 35 และ 50% ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2 เครื่องทดสอบแรงดิ่ง



รูปที่ 3 ชุดแม่พิมพ์ขนาดครึ่งมุม 15 องศา ที่ขนาดการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ ก) 20% ข) 35% ค) 50%

**3.4 แมนเดรลเหลว** แมนเดรลที่ใช้ในการทดลองมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป โดยค่าความหนาแน่นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังตารางที่ 2 ในปริมาณการใช้ 18 มิลลิลิตร ต่อการทดลองในแต่ละครั้ง

ตารางที่ 2 ค่าความหนาแน่นของแมนเดรลเหลวที่อุณหภูมิห้องที่ใช้ในการทดลอง

| แมนเดรลเหลว                 | ความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ ) |
|-----------------------------|---------------------------------|
| น้ำสะอาด                    | 1000*                           |
| น้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 | 896*                            |

\*www.engineeringtoolbox.com

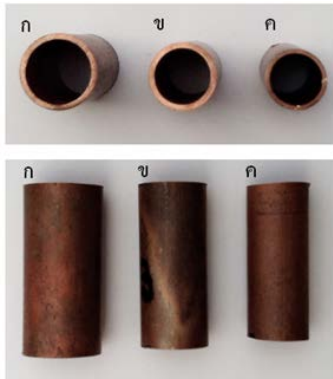
### 4. ขั้นตอนการทดลอง

ในการทดลองจะทำการดิ่งลดขนาดทอทองแดงผ่านแม่พิมพ์ที่มีขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ 15 องศาให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดลดลง 20, 35 และ 50% ภายในท่อบรรจุน้ำสะอาดและน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 เพื่อใช้เป็นแมนเดรลเหลว โดยศึกษาที่อัตราเร็วในการดิ่งขึ้นรูป 5 และ 30

ม.ม./นาที่ แล้วบันทึกค่าแรงดึงโดยใช้หน่วยเป็น กิโลนิวตัน

## 5. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

หลังจากทำการดึงขึ้นรูปท่อทองแดง รูปร่างของท่อทองแดงที่ได้หลังดึง พบว่า ขนาดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานลดลงตามขนาดของแม่พิมพ์ที่กำหนด ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ท่อทองแดงหลังดึงที่อัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัด ก) 20% ข) 35% และ ค) 50%

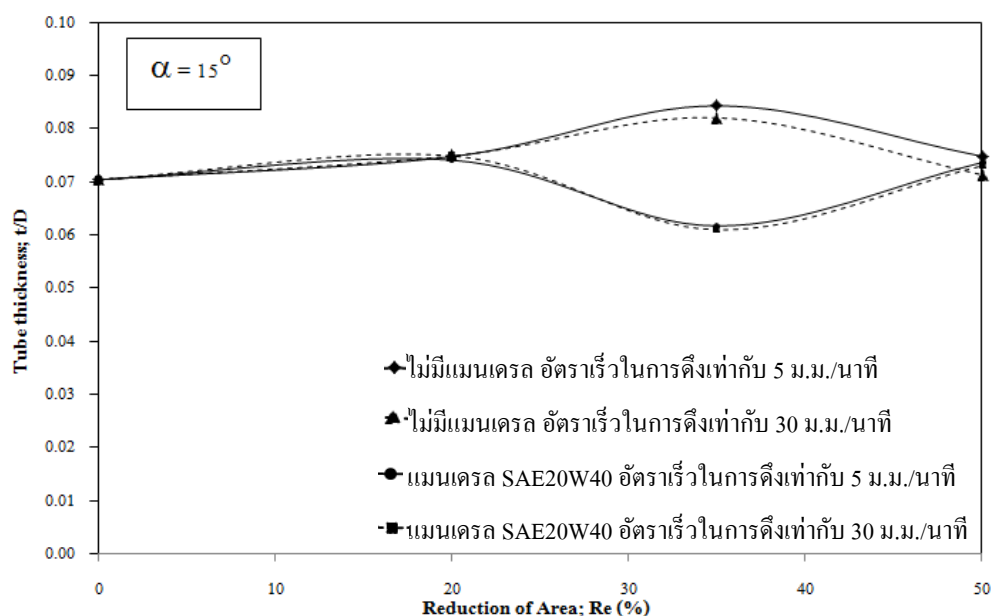
### 5.1 อัตราส่วนความหนาของท่อต่อการลดพื้นที่หน้าตัด (Tube thickness vs Reduction of area)

ในกระบวนการดึงขึ้นรูปท่อนั้น ถ้าอัตราส่วนความหนาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (Tube thickness;  $t/D$ ) มีค่าเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้ท่อที่ผ่านการดึงขึ้นรูปลดพื้นที่หน้าตัดลงหลายๆครั้ง มีโอกาสตีบตันได้ [5] ซึ่งในการทดลองแต่ละครั้งค่าอัตราส่วนความหนาต่อ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเริ่มต้นหรือท่อที่ใช้เป็นชิ้นทดสอบนั้น มีค่าเท่ากับ 0.07 จากการศึกษาดูโดยการทดลองพบว่าอัตราส่วนความหนาและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหลังดึงขึ้นรูปผ่านแม่พิมพ์ที่มีครึ่งมุมแม่พิมพ์เท่ากับ 15 องศา ที่อัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 20, 35 และ 50 % เป็นดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าอัตราส่วนความหนาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อของชิ้นงานที่ไม่มีแมนเดรล จะมีค่าสูงขึ้นในช่วงการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดระหว่าง 20% – 35% และมีแนวโน้มที่จะลดลงหลังจากช่วง 35% เป็นต้นไป

ในทางตรงกันข้าม ชิ้นงานที่ภายในมีแมนเดรลเหลว คือ น้ำมันเครื่องเกรด SAE20W40 พบว่าอัตราส่วนความหนาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจะเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยในช่วงการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดระหว่าง 0%-20% หลังจากนั้นจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจนในช่วงการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดระหว่าง 20%-35% และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นหลังจากช่วง 35% เป็นต้นไป

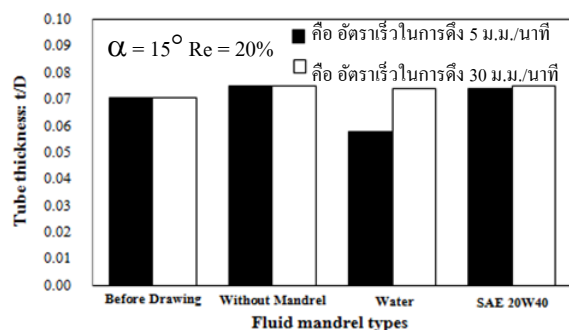
ดังนั้น ช่วงการลดพื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสม ที่ส่งผลต่อความหนาและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออย่างชัดเจนที่สุด คือ ที่ 20-35% ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการพิจารณากำหนดค่าการดึงลดพื้นที่หน้าตัดเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตต่อไป



รูปที่ 5 อัตราส่วนความหนาของท่อต่อการลดพื้นที่หน้าตัด

## 5.2 อัตราส่วนความหนาของท่อต่อชนิดของแมนเดรลเหลว (Tube thickness vs Fluid mandrel types)

หลังจากทำการดึงขึ้นรูปท่อ โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนาและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหลังผ่านการดึงขึ้นรูปที่เป็นผลมาจากชนิดของแมนเดรลเหลว ได้ผลการทดลองดังกราฟในรูปที่ 6 พบว่า อัตราส่วนความหนาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อของชิ้นงานที่ไม่มีแมนเดรล จะให้ค่าที่สูงกว่าชิ้นงานที่มีแมนเดรลเหลว สำหรับอัตราเร็วในการดึงขึ้นรูปที่ 5 ม.ม./นาที่



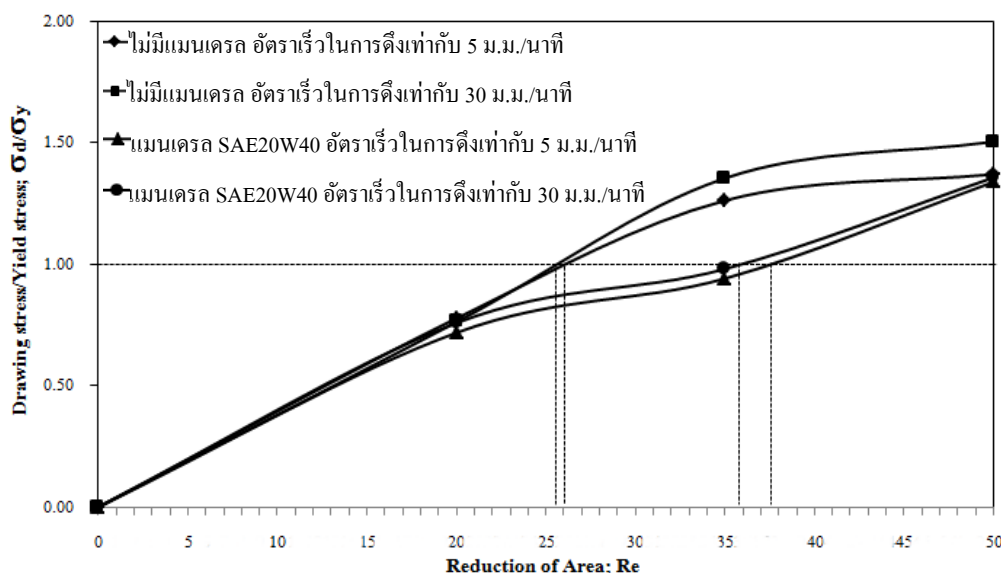
รูปที่ 6 อัตราส่วนความหนาของท่อต่อชนิดของแมนเดรล

ในส่วนของชิ้นงานที่มีแมนเดรลเหลว คือ น้ำสะอาดซึ่งมีค่าความหนาแน่นสูงกว่า มีแนวโน้มช่วยลดอัตราส่วนความหนาของท่อได้ดีกว่าชิ้นงานที่มีน้ำมันเครื่องเกรด SAE20W40 เป็นแมนเดรลเหลว

## 5.3 อัตราส่วนความเค้นดึงต่อการลดพื้นที่หน้าตัด (Drawing stress vs Reduction of area)

ในขณะที่ทำการดึงขึ้นรูปท่อ โดยอาศัยแรงกระทำจากภายนอกมากระทำกับชิ้นงาน จะทำให้ชิ้นงานที่ดึงพื้นแม่พิมพ์ออกมาแล้ว เกิดความเค้นภายในที่เรียกว่า ความเค้นดึง ซึ่งแรงนี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปทางโครงสร้างของชิ้นงาน จึงได้ทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างความเค้นดึงและความเค้นจุดคราก (Yield Stress) ซึ่งค่าอัตราส่วนนี้ต้องมีค่าไม่เกิน 1.0 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่ทำให้เมื่อขึ้นรูปแล้ว ได้ขนาดท่อที่แม่นยำตรงตามขนาดแม่พิมพ์ที่ใช้ และท่อจะไม่เกิดรอยแตกหรือขาดก่อนสิ้นสุดกระบวนการ โดยได้ศึกษาอัตราส่วนความเค้นที่เป็นผลมาจากการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 20, 35 และ 50% ได้ผลการทดลองดังกราฟในรูปที่ 7 สังเกตตามแนวเส้นประ พบว่า อัตราส่วนความเค้นดึงของชิ้นงานที่ไม่มีแมนเดรล ในการดึงขึ้นรูปที่อัตราเร็วทั้ง 5 และ 30 ม.ม./นาที่ จะมีค่าเท่ากับ 1.0 ที่ค่าการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 25.75% และ 26.25% ตามลำดับ

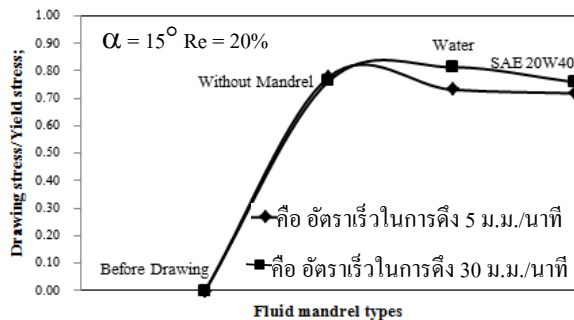
ในทางเดียวกัน สำหรับอัตราส่วนความเค้นของชิ้นงานที่มีแมนเดรลเหลว คือ SAE20W40 ในการดึงขึ้นรูปที่อัตราเร็ว 5 และ 30 ม.ม./นาที่ จะมีค่าเข้าใกล้ 1.0 ที่ค่าการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 36.5% และ 37.8% ตามลำดับ



รูปที่ 7 อัตราส่วนความเค้นดึงต่อการลดพื้นที่หน้าตัด

#### 5.4 อัตราส่วนความเค้นดึงต่อชนิดของแมนเดรลเหลว (Drawing stress vs Fluid mandrel types)

ได้ทำการศึกษาอัตราส่วนความเค้นที่เป็นผลมาจากชนิดของแมนเดรลเหลวในงานวิจัยครั้งนี้ด้วย และได้ผลการทดลองดังกราฟในรูปที่ 8



รูปที่ 8 อัตราส่วนความเค้นดึงต่อชนิดของแมนเดรลเหลว

เมื่อทำการดึงขึ้นรูปผ่านแม่พิมพ์ที่มีครึ่งมุมแม่พิมพ์เท่ากับ 15 องศา ที่อัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 20% พบว่า อัตราส่วนความเค้นดึงของชิ้นงานที่ไม่มีแมนเดรล จะให้ค่าที่สูงกว่าชิ้นงานที่มีแมนเดรลเหลว และสำหรับชิ้นงานที่มีแมนเดรลเหลว คือ น้ำสะอาด จะให้ค่าอัตราส่วนความเค้นดึงของชิ้นงานสูงกว่าชิ้นงานที่มีน้ำมันเครื่องเกรด SAE20W40 เป็นแมนเดรลเหลว และยังพบว่าอัตราเร็วในการดึงขึ้นรูปท่อ ส่งผลต่ออัตราส่วนความเค้นดึงด้วย นั่นคือ ยิ่งอัตราเร็วในการดึงขึ้นรูปสูง แรงกระทำระหว่างภายในและภายนอกจะมีค่ามาก วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปเร็วขึ้น ส่งผลให้ความเค้นดึงสูงขึ้น ซึ่งส่งผลในทิศทางตรงกันข้ามกับชิ้นงานที่มีอัตราเร็วในการดึงขึ้นรูปต่ำ

#### 6. สรุปผลการทดลอง

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างการดึงขึ้นรูปท่อแบบไม่ใช้แมนเดรลกับแบบใช้แมนเดรลเหลว จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า การดึงขึ้นรูปท่อโดยใช้แมนเดรลเหลวนั้น ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญให้สามารถเพิ่มค่าการดึงลดพื้นที่หน้าตัดในกระบวนการดึงขึ้นรูปท่อให้สูงขึ้นได้พบว่า

1. แมนเดรลเหลวส่งผลต่ออัตราส่วนความเค้นดึงต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อได้ดีกว่าชิ้นงานที่ไม่มีแมนเดรล ทั้งในการดึงขึ้นรูปที่ 5 และ 30 ม.ม./นาท
2. ช่วงการลดพื้นที่หน้าตัดที่ 20-50% เป็นช่วงที่แมนเดรลเหลวส่งผลต่ออัตราส่วนความเค้นดึงอย่างชัดเจน ได้ขนาดท่อที่แม่นยำตรงตามขนาดแม่พิมพ์ที่ใช้ สำหรับกรณีไม่มีแมนเดรล การดึงขึ้นรูปที่อัตราเร็วทั้ง 5 และ 30 ม.ม./นาท การลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดที่ใช้ไม่ควรเกิน 25.75% และ 26.25% ตามลำดับ และสำหรับกรณีที่ใช้แมนเดรลเหลวเป็น SAE20W40 ดึงขึ้นรูปที่อัตราเร็ว 5 และ 30 ม.ม./นาท ค่าการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดที่ใช้ในกระบวนการผลิตไม่ควรเกิน 36.5% และ 37.8% ตามลำดับ
3. ความหนาแน่นของแมนเดรลเหลว ส่งผลต่อความเค้นดึง ยิ่งค่าความหนาแน่นมาก อัตราส่วนความเค้นดึงที่เกิดขึ้นจะมีค่ามาก

#### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] William F.Hosford and Robert M. Caddell, "Metal Forming Mechanics and Metallurgy," PTR Inc, 1993.
- [2] S.Kalpajian and R.Schmid, "Manufacturing Process for Engineering Materials," Pearson Inc, 2003.
- [3] T.Altan, S.OH and H.Gegel, "Metal Forming Fundamentals and Applications," American Society for Metals, Metal Park, OH 44073, 1983.
- [4] K.Yoshida, Y.Onitsuka and S.Yamashita, "Fabrication of High Quality Fine Medical Tubes by Fluid Mandrel Drawing," Journal of Solid Mechanicals and Materials Engineering, Vol.3, pp.1348-1355, 2009.
- [5] T.Tangsri, S.Norasethasopon and K.Yoshida, "Fabrication of small size inner spiral ribbed copper tube by fluid mandrel drawing," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.70, pp 1923-1930, 2014.

# การวิเคราะห์ปัญหาการจัดเส้นทางรถภายใต้ความไม่แน่นอน ของอุปสงค์โดยใช้แบบจำลองสถานการณ์

## Analysis of Vehicle Routing Problem Under Demand Uncertainty Via Simulation

เดชพล พลังไพบูลย์ พิระพัฒน์ ภูผาน อุดม จันทร์จรัสสุข

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ปัญหาการจัดเส้นทางรถภายใต้ความไม่แน่นอนของอุปสงค์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของอุปสงค์ที่มีต่อต้นทุนการขนส่งและระดับการให้บริการ คณะผู้วิจัยได้ทำการสร้างแบบจำลองของปัญหาการจัดเส้นทางรถขึ้นเพื่อจำลองความไม่แน่นอนของปริมาณอุปสงค์โดยใช้เทคนิคการสุ่มตัวอย่างจากรูปแบบการแจกแจงที่กำหนดขึ้นซึ่งประกอบด้วยการแจกแจงแบบปกติ การแจกแจงแบบเอกรูป และการแจกแจงแบบสามเหลี่ยม และได้ทำการทดลองกับตัวอย่างปัญหา 25 ปัญหาโดยกำหนดให้มีการปรับเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ของความผันแปรและช่วงกว้างของอุปสงค์ ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของอุปสงค์แม้เพียงเล็กน้อยจะส่งผลให้ต้นทุนของการขนส่งเพิ่มขึ้นและระดับการให้บริการลดลงอย่างเห็นได้ชัด ผลการวิจัยในครั้งนี้เป็นประโยชน์ในการใช้ประกอบการตัดสินใจเพื่อลดต้นทุนในการขนส่งและปรับปรุงคุณภาพในการให้บริการ

**คำสำคัญ :** ปัญหาการจัดเส้นทางรถ, การจำลองสถานการณ์, ความไม่แน่นอน, ต้นทุนการขนส่ง, ระดับการให้บริการ

### Abstract

This paper presents analysis of the vehicle routing problem with demand uncertainty. The objective is to study the effect of demand uncertainty on transportation cost and service level. We developed a simulation model of the vehicle routing problem to simulate the demand uncertainty. Sampling technique was used in the simulation for different types of demand distributions including normal distribution, uniform distribution, and triangular distribution. Computational experiment was conducted with 25 instances from literature by varying the coefficient of variation and interval of demand. The results showed that slightly changes in demand could cause the transportation cost to increase significantly and the service level to decrease. The results of this research are beneficial for supporting the decision making on reducing transportation cost and improving service level.

**Keywords :** Vehicle Routing Problem (VRP), Simulation, Uncertainty, Transportation Cost, Service Level

## 1. บทนำ

การจัดเส้นทางรถเป็นปัญหาที่มีความสำคัญต่อธุรกิจในปัจจุบันทั้งในส่วนของการจัดหาวัตถุดิบ การผลิต และการจัดจำหน่าย ในธุรกิจต่างๆ ต้นทุนการขนส่งนับเป็นต้นทุนที่สำคัญและส่งผลกระทบต่อต้นทุนรวมของสินค้า [1] การลดต้นทุนค่าขนส่งโดยการวางแผนเส้นทางรถที่เหมาะสมจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่ถูกใช้ในการลดต้นทุนรวมของสินค้าในอุตสาหกรรม

ต้นทุนการขนส่งยังได้รับผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุปสงค์ซึ่งตามธรรมชาติแล้วอุปสงค์จะมีค่าไม่แน่นอนมากกว่าจะเป็นค่าที่ถูกกำหนด [2] การเปลี่ยนแปลงของอุปสงค์ทำให้ผู้ประกอบการจำเป็นต้องมีทรัพยากรสำรองเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าได้อย่างเพียงพอ ส่งผลให้ต้นทุนในการขนส่งเพิ่มสูงขึ้น หรือหากใช้ทรัพยากรที่มีอยู่เดิมในการจัดส่งจะทำให้การจัดส่งล่าช้าและทำให้ระดับการให้บริการลดลง ซึ่งอาจส่งผลให้ลูกค้ามองหาผู้จัดส่งรายใหม่ที่ให้บริการได้ดีกว่าทำให้เกิดการสูญเสียรายได้อย่างมากสาละแก่ผู้ประกอบการ [3-4]

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์ต้นทุนและระดับการให้บริการของปัญหาการจัดเส้นทางรถภายใต้การเปลี่ยนแปลงของอุปสงค์โดยใช้การจำลองสถานการณ์ เนื้อหาในบทความนี้จะกล่าวถึงปัญหาการจัดเส้นทางรถ ขั้นตอนการวิจัย รวมทั้งการนำแบบจำลองที่สร้างขึ้นมาทดลองกับปัญหาการจัดเส้นทางรถ และปิดท้ายด้วยการสรุปผลการทดลอง

## 2. ปัญหาการจัดเส้นทางรถ

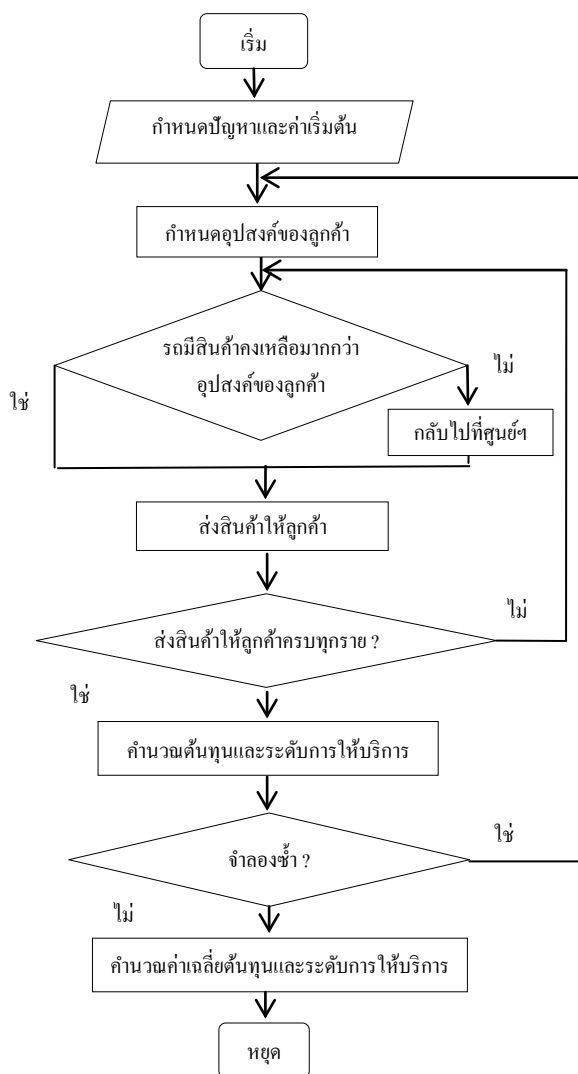
ปัญหาการจัดเส้นทางรถ (Vehicle Routing Problem, VRP) เป็นปัญหาที่รู้จักกันเป็นอย่างดีในการวิจัยการดำเนินงาน ลักษณะของปัญหาประกอบด้วยจำนวนพาหนะที่ใช้ในการขนส่งที่มีความจุค่าหนึ่ง จุรถรับสินค้า และปริมาณอุปสงค์ของลูกค้า [5] โดยมีเป้าหมายเพื่อหาชุดของเส้นทางที่ทำให้ต้นทุนการขนส่งต่ำที่สุดและ

สามารถให้บริการครบตามปริมาณอุปสงค์ทั้งหมด พาหนะที่ใช้ขนส่งจะเริ่มและจบลงที่จุดรับสินค้าโดยที่การขนส่งจะต้องถูกกำหนดให้มีการให้บริการแก่ลูกค้าแต่ละจุดโดยใช้พาหนะเพียงคันเดียว [6] ลักษณะของปัญหาที่ทำการวิจัยในครั้งนี้เป็นปัญหาการจัดเส้นทางรถที่มีความจุรถจำกัดภายใต้ความไม่แน่นอนหรือ Capacitated Vehicle Routing Problem with Stochastic Demand (CVRPSD) ซึ่งเป็นปัญหาที่ถูกจัดอยู่ในปัญหาประเภท (NP-Hard) [8-9] และยากต่อการหาคำตอบที่ดีที่สุด ปัญหา CVRPSD ประกอบด้วย เซตของอุปสงค์ของลูกค้า และมีพาหนะจำนวนหนึ่งที่มีลักษณะและความจุที่เหมือนกัน (Homogeneous Vehicle) ในการขนส่งสินค้า เป้าหมายของการแก้ปัญหานี้เหมือนกับปัญหา VRP แต่มีข้อจำกัดเพิ่มเข้ามาคือ ลูกค้าแต่ละรายมีอุปสงค์ที่มีรูปแบบไม่แน่นอน [6] สำหรับปัญหาที่ใช้ในงานวิจัยนี้อ้างอิงมาจากงานวิจัยของ [10]

## 3. วิธีการวิจัย

การวิเคราะห์ปัญหาในงานวิจัยนี้อาศัยหลักการของการจำลองสถานการณ์ ข้อมูลของปัญหาประกอบด้วย พิกัดตำแหน่งของลูกค้าแต่ละรายและศูนย์กระจายสินค้า จำนวนลูกค้า ปริมาณอุปสงค์ของลูกค้าแต่ละราย และจำนวนรถขนส่งสินค้าที่มีความจุของรถแต่ละคันเท่ากัน รวมถึงคำตอบของปัญหาซึ่งประกอบด้วย เส้นทางรถขนส่งสินค้าของรถขนส่งสินค้าแต่ละคันที่สามารถตอบสนองอุปสงค์ของลูกค้าด้วยระยะทางการขนส่งที่สั้นที่สุด ในการจำลองสถานการณ์ปัญหาดังกล่าวจะใช้วิธีเปลี่ยนแปลงปริมาณอุปสงค์ของลูกค้าที่คงที่ของปัญหาให้เป็นปริมาณอุปสงค์ที่ไม่แน่นอนในลูกค้าแต่ละรายโดยใช้รูปแบบการแจกแจง 3 แบบซึ่งประกอบด้วย การแจกแจงแบบปกติ การแจกแจงแบบเอกรูป และการแจกแจงแบบสามเหลี่ยม เพื่อนำไปคำนวณต้นทุนในการขนส่งและระดับการให้บริการ คณะผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลองของ

ปัญหาโดยใช้ภาษา C# ซึ่งวิธีการจำลองสถานการณ์มีขั้นตอนดังแสดงไว้ในแผนภูมิรูปที่ 1



รูปที่ 1 : แผนภูมิการทำงาน

จาก รูปที่ 1 การทำงานเริ่มจากการกำหนดจำนวนรอบของการจำลองสถานการณ์ และตามด้วยการสุ่มตัวอย่างจากปริมาณอุปสงค์ของลูกค้าแต่ละรายตามรูปแบบการแจกแจงที่เลือกไว้ เทคนิคการสุ่มตัวอย่างในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีคอนโวลูชัน (Convolution Method) สำหรับรูปแบบการแจกแจงแบบปกติ และวิธีผกผัน (Inverse Method) สำหรับการแจกแจงแบบเอกรูปและการแจกแจงแบบสามเหลี่ยม จากนั้นทำการตรวจสอบปริมาณสินค้าที่เหลืออยู่ในรถขนส่งสินค้า ถ้ามีปริมาณน้อยกว่าปริมาณอุปสงค์ของลูกค้า

รายถัดไป ให้รถขนส่งสินค้าทำการวนรถกลับไปสู่ศูนย์กระจายสินค้า (Depot) เพื่อรับสินค้าใหม่จนเต็มจำนวนที่สามารถบรรทุกได้และขนส่งสินค้าไปให้กับลูกค้ารายที่ยังไม่ได้รับสินค้าถัดไปตามลำดับจนครบจำนวนลูกค้า จากนั้นทำการคำนวณต้นทุนรวมที่เกิดขึ้น โดยกำหนดให้ต้นทุนในการขนส่งอยู่ที่อัตรา 1 บาทต่อ 1 หน่วยระยะทาง และผลที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบในรูปแบบร้อยละของอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงของต้นทุนที่เปลี่ยนไป กับต้นทุนรวมการขนส่งเมื่ออุปสงค์คงที่ โดยที่ระยะทางของการขนส่งคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$s_{ij} = [(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2]^{1/2} \quad (1)$$

เมื่อ  $s_{ij}$  คือ ระยะขจัดระหว่าง  $i$  กับ  $j$  โดยที่  $x$  และ  $y$  เป็นพิกัดในแนวนอนและแนวตั้งของลูกค้า

การวัดระดับการให้บริการจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ ดังนี้

- Service level 1 (%) คำนวณจากร้อยละของจำนวนลูกค้าที่สามารถส่งสินค้าภายในรอบแรกของการขนส่ง
- Service level 2 (%) คำนวณจากร้อยละของจำนวนลูกค้าที่ใช้ระยะทางน้อยกว่าหรือเท่ากับระยะทางรวมในการขนส่งเมื่อปริมาณอุปสงค์คงที่

เมื่อทำการจำลองสถานการณ์ครบตามจำนวนรอบที่กำหนดไว้ จากนั้นจึงทำการคำนวณค่าเฉลี่ยของต้นทุนรวมการขนส่งและระดับการให้บริการ

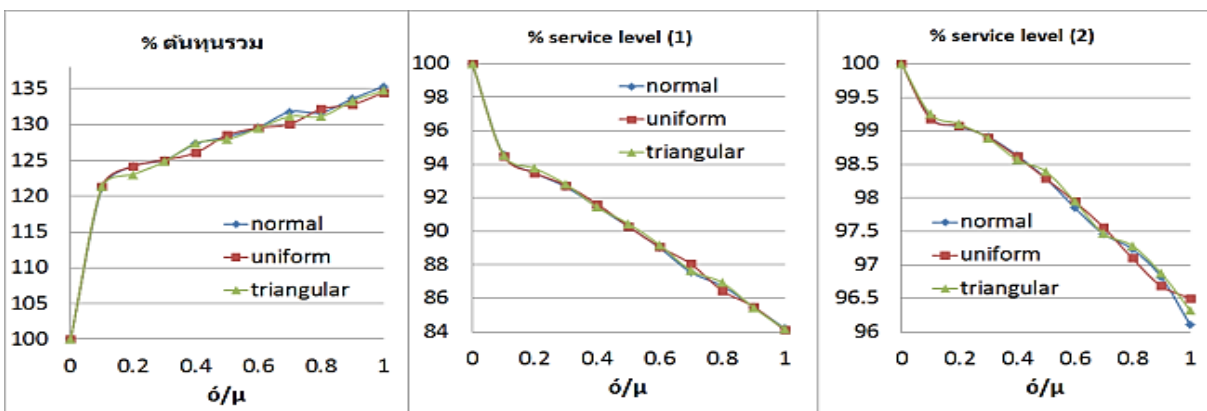
#### 4. การทดลองและผลการทดลอง

ในการทดลองผู้วิจัยได้ทำการทดลองกับปัญหา 25 ปัญหาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [10] ซึ่งแต่ละปัญหามีความแตกต่างของจำนวนลูกค้า ความจุของรถแต่ละคัน และจำนวนรถขนส่งสินค้า เพื่อประเมินต้นทุนรวมการขนส่งและระดับการให้บริการ ซึ่งในแต่ละปัญหาจะทำการจำลองซ้ำ 1500 ครั้งและใช้วิธีการสุ่มปริมาณอุปสงค์ของลูกค้าแต่ละรายทั้ง 3 รูปแบบการแจกแจง โดยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอุปสงค์แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

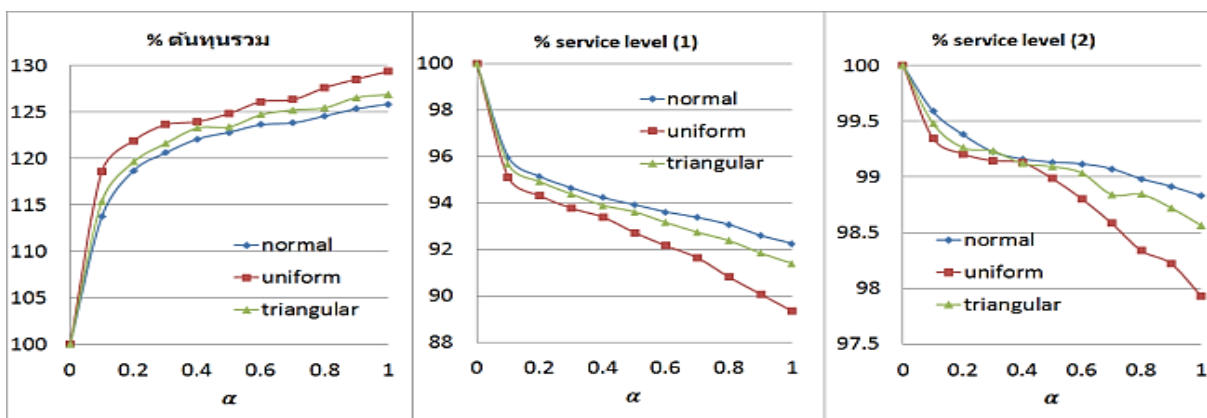
- กรณี 1. การเปลี่ยนแปลง coefficient of variation (CV) คือการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานกับค่าเฉลี่ยของปริมาณอุปสงค์ ( $\sigma/\mu$ ) จาก 0 - 1 โดยให้ช่วงการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 10 % หรือ 0.1
- กรณี 2. การเปลี่ยนแปลงช่วงกว้างของอุปสงค์ คือการกำหนดให้อุปสงค์มีค่าอยู่ในช่วง ( $\mu \pm d$ ) โดยที่  $\mu$  คือค่าเฉลี่ยของปริมาณอุปสงค์และให้  $d = \alpha\mu$  ซึ่ง  $\alpha$  เป็นพารามิเตอร์ที่มีช่วงการเปลี่ยนแปลงระหว่าง 0-1 สำหรับการแจกแจงแบบปกติกำหนดให้  $\sigma$  มีค่าเท่ากับ  $\alpha\mu/3$  หรือ ( $d = 3\sigma$ ) ในขณะที่การแจกแจงแบบเอกรูปและแบบสามเหลี่ยมจะใช้ค่า  $d$  เท่ากับ  $\alpha\mu$

เพื่อให้เห็นภาพของการเปลี่ยนแปลงต้นทุนรวม การขนส่งและระดับการให้บริการจากการเปลี่ยนแปลงอุปสงค์ใน 2 กรณีดังกล่าว ผู้วิจัยขอยกตัวอย่างผลการทดลองของปัญหา B-n66-k9 ที่มีรถขนส่งจำนวน 9 คัน ความจุ 100 หน่วย และมีจำนวนลูกค้า 65 ราย ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 2 และ 3

ผลการทดลองในรูปที่ 2 (กรณีที่ 1) แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของอุปสงค์ตามรูปแบบการแจกแจงทั้ง 3 แบบมีผลต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงต้นทุนรวมในแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่ในรูปที่ 3 (กรณีที่ 2) ร้อยละต้นทุนรวมของการแจกแจงแบบเอกรูปมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นมากกว่าการแจกแจงแบบสามเหลี่ยมและแบบปกติตามลำดับ



รูปที่ 2 : ต้นทุนรวมการขนส่ง (%) และระดับการให้บริการเมื่อเปลี่ยนแปลง coefficient of variation (CV)



รูปที่ 3 : ต้นทุนรวมการขนส่ง (%) และระดับการให้บริการเมื่อเปลี่ยนแปลงช่วงกว้างของอุปสงค์



สำหรับระดับการให้บริการ จากผลการทดลองในรูปที่ 2 (กรณีที่ 1) ทั้ง 3 รูปแบบการแจกแจงจะให้ผลการเปลี่ยนแปลงระดับการให้บริการทั้ง 2 กรณีที่ใกล้เคียงกัน โดยมีแนวโน้มที่ลดลงในขณะที่รูปที่ 3 (กรณีที่ 2) การแจกแจงแบบเอกรูปจะมีการเปลี่ยนแปลงระดับการให้บริการทั้ง 2 กรณีในแนวโน้มที่ลดลงมากกว่าการแจกแจงแบบสามเหลี่ยมและแบบปกติตามลำดับ เช่นจากรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าระดับการให้บริการในกรณีที่ 1 มีค่ามากกว่า 90 % เมื่อปริมาณอุปสงค์มีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 50 % เป็นต้น

ตารางที่ 1 เป็นตารางแสดงผลลัพธ์ของปัญหาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [10] ในกรณีที่อุปสงค์มีการเปลี่ยนแปลงตามการแจกแจงแบบปกติและการทดลองที่ค่า  $(\sigma/\mu) = 10\%$  โดยที่ (a, b, c) ในตารางหมายถึง

ตารางที่ 1 ตารางสรุปผลลัพธ์ 25 ปัญหา

| ชื่อปัญหา  | (a, b, c)    | Increased total cost (%) | Service level 1 (%) | Service level 2 (%) |
|------------|--------------|--------------------------|---------------------|---------------------|
| P-n19-k2   | (2,18,160)   | 5.242                    | 97.444              | 99.356              |
| P-n55-k8   | (8,54,160)   | 5.966                    | 97.328              | 98.904              |
| P-n55-k7   | (7,54,170)   | 7.098                    | 97.247              | 98.972              |
| P-n60-k15  | (15,59,80)   | 12.976                   | 93.219              | 97.491              |
| P-n76-k5   | (5,75,280)   | 1.948                    | 98.068              | 99.125              |
| P-n101-k4  | (4,100,400)  | 0.804                    | 99.744              | 99.980              |
| A-n33-k5   | (5,32,100)   | 8.062                    | 96.550              | 97.763              |
| A-n53-k7   | (7,52,100)   | 20.167                   | 94.216              | 98.468              |
| A-n64-k9   | (9,63,100)   | 19.535                   | 93.938              | 98.349              |
| A-n80-k10  | (10,79,100)  | 16.982                   | 96.243              | 97.819              |
| B-n45-k5   | (5,44,100)   | 9.520                    | 96.031              | 98.509              |
| B-n41-k6   | (6,40,100)   | 16.108                   | 95.618              | 96.698              |
| B-n51-k7   | (7,50,100)   | 20.474                   | 95.654              | 98.680              |
| B-n66-k9   | (9,65,100)   | 21.073                   | 94.570              | 99.196              |
| B-n78-k10  | (10,77,100)  | 23.478                   | 93.625              | 97.148              |
| F-n45-k4   | (4,44,2010)  | 6.030                    | 95.161              | 100.000             |
| F-n72-k4   | (4,71,30000) | 12.199                   | 96.095              | 97.873              |
| F-n135-k7  | (7,134,2210) | 11.973                   | 97.598              | 98.503              |
| E-n22-k4   | (4,21,6000)  | 3.626                    | 97.255              | 99.515              |
| E-n23-k3   | (3,22,4500)  | 3.888                    | 98.180              | 100.000             |
| E-n76-k10  | (10,75,140)  | 9.590                    | 95.751              | 98.207              |
| E-n76-k14  | (14,75,100)  | 15.717                   | 93.229              | 98.003              |
| E-n33-k4   | (4,32,8000)  | 15.387                   | 95.997              | 97.119              |
| M-n121-k7  | (7,120,200)  | 6.499                    | 97.371              | 98.874              |
| M-n101-k10 | (10,100,200) | 18.182                   | 97.925              | 99.489              |

a = จำนวนรถขนส่งสินค้า b = จำนวนลูกค้า และ c = ความจุของรถ และแสดงค่าร้อยละการเพิ่มขึ้นของต้นทุนรวมการขนส่งและค่าร้อยละการลดลงของระดับการให้บริการแบบที่ 1 และ 2 ของทั้ง 25 ปัญหา

จากตารางที่ 1 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงต้นทุนรวมการขนส่งในปัญหาส่วนใหญ่จะมีค่ามากขึ้นเมื่อจำนวนรถขนส่งสินค้าและจำนวนลูกค้าเพิ่มขึ้นเพราะว่าเมื่อมีจำนวนลูกค้ามากขึ้นทำให้ต้องมีรถขนส่งสินค้ามากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น เมื่อปริมาณอุปสงค์เปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลให้ระยะทางรวมในการขนส่งของรถแต่ละคันเพิ่มขึ้น นำมาซึ่งต้นทุนรวมการขนส่งที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย เช่นในปัญหา B-n78-k10 เมื่อเปลี่ยนแปลง  $(\sigma/\mu) = 10\%$  ส่งผลให้ร้อยละต้นทุนรวมเพิ่มขึ้นจากเดิม 23.478 % ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ค่อนข้างมาก ในขณะที่ระดับการให้บริการแบบที่ 1 และ 2 ยังมีค่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ (มากกว่า 93 %) ในภาพรวมการเปลี่ยนแปลง  $(\sigma/\mu) = 10\%$  ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของต้นทุนรวมอย่างเห็นได้ชัด แต่จะมีผลต่อการลดลงของระดับการให้บริการไม่มากนักซึ่งมีสาเหตุสำคัญเนื่องจากค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นจากการที่รถขนส่งสินค้าต้องวนรถกลับไปรับสินค้าจากศูนย์กระจายสินค้าใหม่และทำการขนส่งสินค้าให้กับลูกค้าคนถัดไปตามลำดับ

ความจุของรถขนส่งสินค้าก็มีผลต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงต้นทุนรวมการขนส่งและระดับการให้บริการแบบ 1 และ 2 เช่นในปัญหา P-n19-k2 ที่มีจำนวนรถขนส่งเท่ากับ 2 คัน จำนวนลูกค้า 18 ราย และความจุ 160 หน่วย มีร้อยละการเปลี่ยนแปลงต้นทุนรวมการขนส่งเพิ่มขึ้น และระดับการให้บริการ 1 และ 2 มีค่าลดลงมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับปัญหา P-n101-k4 ที่มีจำนวนรถขนส่ง 4 คัน จำนวนลูกค้า 100 ราย และความจุเพิ่มขึ้นเป็น 400 หน่วย เนื่องจากเมื่อความจุสินค้าเพิ่มขึ้นส่งผลให้รถขนส่งสินค้ามีพื้นที่เพื่อสำหรับสินค้ามากขึ้นตามไปด้วย

## 5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ผลกระทบของอุปสงค์ต่อต้นทุนรวมการขนส่งและระดับการให้บริการจากความไม่แน่นอนของปริมาณอุปสงค์และจากการทดลองสรุปได้ว่า ถ้าปริมาณอุปสงค์ของลูกค้ามีความไม่แน่นอนแล้วจะส่งผลต่อต้นทุนรวมการขนส่งเพิ่มขึ้นและระดับการให้บริการลดลง และผลของการแจกแจงของอุปสงค์ทั้ง 3 ประเภทเมื่อทำเปลี่ยนแปลง Coefficient of Variation นั้นจะส่งผลให้ต้นทุนรวมการขนส่งเพิ่มขึ้นและระดับการให้บริการลดลงในค่าที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงช่วงกว้างของอุปสงค์ การแจกแจงแบบเอกรูปจะส่งผลให้ต้นทุนรวมการขนส่งเพิ่มขึ้นและระดับการให้บริการลดลงมากกว่าการแจกแจงแบบสามเหลี่ยมและแบบปกติตามลำดับ

แบบจำลองในงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์เส้นทางการขนส่งและใช้เป็นตัวประกอบการตัดสินใจว่าควรเปลี่ยนแปลงเส้นทางการขนส่งใหม่หรือไม่ โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงต้นทุนรวมการขนส่งที่เพิ่มมากขึ้นหรือระดับการให้บริการที่ลดลงเกินกว่าค่าที่ยอมรับได้ และสามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของการบริการเพื่อให้ลูกค้ามีความพึงพอใจ อย่างไรก็ตามผู้ประกอบการควรคำนึงถึงปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องควบคู่ไปด้วย

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Pisanwanich, "A Study of the Logistics Cost Structure in Thailand and an Impact Analysis of Oil". University of the Thai Chamber of Commerce Journal, Vol. 30, No. 1, pp.38-53, March, 2010.
- [2] Dimitris J. Bertsimas, "A vehicle Routing Problem With Stochastic Demand," Operation Research Society Of America, Vol. 40, No. 3, pp. 574-585, May-June 1992.
- [3] Li Jiang, Hongyan Wang, and Bin Ding, "Disruption Management Recovery Model of

- Distribution Delay with Service Priority," Asian Social Science; Vol. 9, No. 2; pp 170-179, 2013
- [4] Vahid Mahdavi Asl, Seyyed Amir Sadeghi, Soheil Fathi, "A mathematical Model and Solving Method for Multi-Depot and Multi-level Vehicle Routing Problem with Fuzzy Time Windows," Advances in Intelligent Transportation Systems Vol. 1, No. 1, pp.19-24, March 2012
  - [5] M. Fisher. Vehicle routing. Handbooks of Operations Research and Management Science, Chapter 1, 8:1-31, 1995.
  - [6] Abdul Kadar Muhammad Masam, Muhammad Shahjalal, Md. Faisal Faruque, and Md. Iqbal Hasan Sarker, "Solving the Vehicle Routing Problem using Genetic Algorithm," (IIACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 2, No. 7, pp. 126-131, 2011.
  - [7] Angel A. Juan, Scott E. Grasman, Javier Faulin, Daniel Riera, Carlos A. Mendes, and Bernardo Ruiz, "Applying Simulation and Reliability to Vehicle Routing Problems with Stochastic Demands," Experimental Evaluation of Algorithm for Solving Problems with Combinatorial Explosion Reggio Emilia, Italy, 12 December 2009.
  - [8] R. Liu and Z. Jiang, "The close-open mixed vehicle routing problem," European Journal of Operational Research, vol. 220, pp. 349-360, 2012.
  - [9] X. Li, S. C. H. Leung, and P. Tian, "A multistart adaptive memory-based tabu search algorithm for the heterogeneous fixed fleet open vehicle routing problem," Expert Systems with Applications, vol. 39, pp. 365-374, 2012.
  - [10] P. Augerat, J.M. Belenguer, E. Benavent, A. Corberán, D. Naddef, G. Rinaldi, Computational Results with a Branch and Cut Code for the Capacitated Vehicle Routing Problem, Research Report 949-M, Université Joseph Fourier, Grenoble.

# การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมประสานด้วยความ ต้านทานที่มีต่อความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างแผ่น เหล็กกล้าไร้สนิม 316L

## A Study on Influence of Resistance Brazing Parameters on Joint Strength Between 316L Stainless Steel Plates

ภูเมศวร์ แสงระยับ กำธร สุขพิมาย กรรณชัย กัลยาศิริ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมประสานด้วยความต้านทานที่มีต่อความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L โดยใช้โลหะเติมชนิด Si1 CD1050-5M ในลักษณะการต่อแบบต่อเกย โดยทำการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล  $2^4$  ทดลองซ้ำ 2 ครั้ง และมีตัวแปรที่ศึกษาคือ กระแสไฟฟ้า เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ความดันจากอิเล็กโทรด และเวลาในการกดแช่ชิ้นงานหลังการเชื่อม ผลจากการทดลองพบว่าตัวแปรหลัก กระแสไฟฟ้า เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ความดันจากอิเล็กโทรด และตัวแปรร่วมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความดันจากอิเล็กโทรด มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อที่ระดับ  $\alpha = 0.05$  และรอยต่อที่ใช้กระแสไฟฟ้า 4,000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กโทรด 0.3 MPa สามารถรับแรงดึงเฉือนได้สูงสุด

คำสำคัญ : การเชื่อมประสานด้วยความต้านทาน/ ความแข็งแรงดึงเฉือน / การออกแบบการทดลอง

### Abstract

This research aims to study on influence of resistance brazing parameters on brazed joint between 316L stainless steel plates. Si1 CD1050-5M filler metal was used in joining form lap joint. The experimental design of  $2^4$  full factorial design with 2 replicates was employed, and the factors of interest included welding current, welding time, electrode pressure and holding time. Results showed that the main effects were welding current, welding time, electrode pressure and 2-way interactions between welding current and electrode pressure significantly affect to the shear strength of brazed joint at  $\alpha = 0.05$ . In addition, the brazed joint with welding current of 4,000 A, welding time of 2 s and electrode pressure of 0.3 MPa provided the maximum shear strength.

**Keywords:** Resistance brazing/ Shear strength /Design of experiments

## 1. บทนำ

ปัจจุบันกระบวนการแผ่นประสานเป็นกระบวนการหนึ่งที่ยอมรับใช้ในการเชื่อมต่อวัสดุ เนื่องจากสามารถใช้เชื่อมต่อวัสดุได้หลากหลายชนิด หรือมีลักษณะรอยต่อที่มีรูปร่างซับซ้อน และความสามารถที่เด่นชัดของกระบวนการแผ่นประสาน คือ สามารถเชื่อมต่อวัสดุที่มีหน้าตัดขนาดใหญ่ให้ติดกันได้เต็มทั้งหน้าตัดของรอยต่อ [1] แต่ในการแผ่นประสานวัสดุที่มีความสามารถในการกัดกร่อนได้ดี เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม หรือไทเทเนียม นั้นจะทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากวัสดุจำพวกนี้เมื่อมีอุณหภูมิสูงจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดออกไซด์บนผิวของชิ้นงาน ทำให้รอยต่อของชิ้นงานเกิดการแพร่ได้น้อย มีผลให้ค่าความแข็งแรงลดลง [2] เพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์ในการแผ่นประสาน วิธีการที่ยอมรับประยุกต์ใช้ในการประสานวัสดุที่มีความสามารถในการกัดกร่อนได้ดี คือ การแผ่นประสานในเตาสุญญากาศ หรือการควบคุมบรรยากาศภายในเตาโดยใช้ก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซอาร์กอน (Ar) และใช้ฟลักซ์ช่วยกำจัดหรือป้องกันการเกิดออกไซด์หรือสารเคมีอื่นๆ ที่ไม่ต้องการที่สามารถเกิดขึ้นได้ในระหว่างการแผ่นประสาน [3-4] วิธีการที่กล่าวนี้เป็นวิธีการที่ซับซ้อนและใช้ระยะเวลาในการดำเนินงาน จึงได้มีการนำเทคนิคการแผ่นประสานด้วยความต้านทาน (Resistance brazing) มาศึกษาและประยุกต์ใช้ เพื่อลดระยะเวลาและความซับซ้อนในการดำเนินงาน

ในงานวิจัยของ โยธิน จันทร์ทอง และคณะ ได้ศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบ SGCD1 ที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ซึ่งได้ทำการศึกษา 5 ปัจจัย คือ แรงกดจากอิเล็กโทรด เวลากดชิ้นงานสองชิ้นให้ติดกัน กระแสไฟฟ้า เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า และเวลากดแช่ชิ้นงานหลังการเชื่อม ผลจากการทดลองพบว่า ทุกปัจจัยมีผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงดึงเฉือนที่ระดับ  $\alpha = 0.05$  [5] Aslanlar และคณะ ได้ศึกษาอิทธิพลของเวลาในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมระหว่างแผ่นเหล็กชุบโครเมต หนา 1.2 mm โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ กระแสไฟฟ้า และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ซึ่งใน

การทดลองจะกำหนดแรงกดจากอิเล็กโทรดคงที่ 6 kN ผลจากการทดลองพบว่า ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุดของรอยเชื่อมเกิดขึ้นเมื่อ ใช้กระแสไฟฟ้าที่ 10 kA สำหรับเวลาในการเชื่อมที่ 12 cycle [6] และงานวิจัยของ Marashi ศึกษาความเสียหายของโครงสร้างจุลภาคโลหะ ด้วยการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างเหล็กแผ่นชุบสังกะสี หนา 1.1 mm กับเหล็กกล้าไร้สนิมมีความหนา 1.2 mm โดยมีตัวแปรที่ศึกษา คือ กระแสไฟฟ้า เวลากดชิ้นงานสองชิ้นให้ติดกัน เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า แรงกดจากอิเล็กโทรด และเวลากดแช่ชิ้นงานหลังการเชื่อม ผลจากการทดลองพบว่า ที่กระแสไฟฟ้า 13,000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 11 cycle และแรงกดจากอิเล็กโทรด 4 bar ทำให้ได้รอยเชื่อมที่สามารถรับแรงดึงเฉือนได้สูงสุด [7] ซึ่งจากการศึกษา และรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยของ โยธิน จันทร์ทอง, Aslanlar และ Marashi สามารถกำหนดตัวแปรหลักที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงของรอยต่อ คือ กระแสไฟฟ้า เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ความดันจากอิเล็กโทรด และเวลาในการกดแช่ชิ้นงานหลังการเชื่อม

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการแผ่นประสานด้วยความต้านทานที่มีต่อค่าความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L โดยใช้โลหะเติมชนิด Sil CD1050-5M ในลักษณะการต่อแบบต่อเกย (Lap joint) โดยมีตัวแปรที่ศึกษา คือ กระแสไฟฟ้า เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า แรงกดจากอิเล็กโทรด และเวลาในการกดแช่ชิ้นงานหลังการเชื่อม

## 2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 2.1 การออกแบบการทดลอง

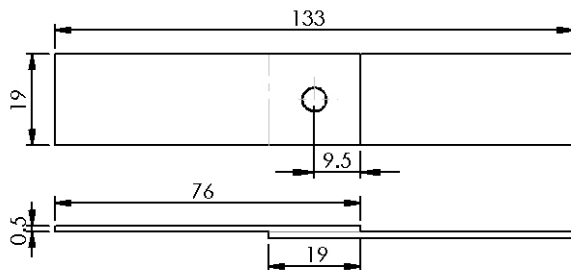
ในงานวิจัยนี้ทำการออกแบบการทดลองแบบ  $2^4$  Full factorial design ทำซ้ำ 2 ครั้ง รวมทั้งหมด 32 การทดลอง โดยมีตัวแปรที่ศึกษา คือ A : กระแสไฟฟ้า, B : เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า, C : แรงกดจากอิเล็กโทรด, D : เวลากดแช่ชิ้นงานหลังการเชื่อม ซึ่งแต่ละตัวแปร มี 2 ระดับดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับในการทดลอง

| ลำดับ | ปัจจัย  | ระดับ    |         |
|-------|---------|----------|---------|
|       |         | ต่ำ (-1) | สูง (1) |
| 1     | A (A)   | 2,000    | 4,000   |
| 2     | B (Sec) | 0.5      | 2.0     |
| 3     | C (MPa) | 0.3      | 0.5     |
| 4     | D (Sec) | 0        | 5       |

## 2.2 การเตรียมโลหะพื้นและโลหะเติม

ในส่วนนี้จะใช้วัสดุชนิดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หนา 0.5 mm มาต่อเข้าด้วยกัน โดยใช้โลหะเติมแบบแผ่น ชนิด Sil. CD1050-5M ตัดให้ได้ขนาด 19 X 19 X 0.15 mm ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของโลหะเติม แสดงดังตารางที่ 2 โดยออกแบบการต่อแบบต่อเกลย ตามมาตรฐานของการกำหนดขนาดชิ้นงานทดสอบสำหรับงานเชื่อมด้วยความต้านทาน (Resistance welding) AWS C3 [8] ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 รูปร่างและขนาดของชิ้นงานทดสอบ [8]

## 2.3 การเล่นประสาน

หลังจากเตรียมโลหะพื้นและโลหะเติมให้ได้ตามขนาดที่ต้องการแล้ว นำโลหะพื้นและโลหะเติมมาขัดด้วย

กระดาษทรายเบอร์ 320 และ 400 แล้วล้างทำความสะอาดด้วยอะซิโตน (Acetone) และเอทานอล (Ethanol) หลังจากนั้นนำโลหะพื้นมาจับยึดบนฟิกเจอร์ โดยการต่อแบบต่อเกลย ซึ่งจะสอดแผ่นโลหะเติมไว้ระหว่างรอยต่อของโลหะพื้น จากนั้นนำไปเล่นประสานด้วยความต้านทานด้วยเครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุด ยี่ห้อ Fan รุ่น ISO 25510522 โดยใช้อิเล็กโทรดทองแดง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm

## 2.4 ทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน

ในขั้นตอนการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน จะนำชิ้นงานมาทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน โดยใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AG - X ใช้ความเร็วในการทดสอบ 10 mm/min จากนั้นนำผลจากการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนมาวิเคราะห์ เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยต่อ โดยใช้โปรแกรม Minitab V.16 ในการวิเคราะห์ข้อมูล

## 3. ผลการทดลอง

### 3.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ผลจากการทดลองนำมาวิเคราะห์ ANOVA และการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model adequacy checking) โดยใช้โปรแกรม Minitab V. 16 แสดงผลจากการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3 และรูปที่ 2

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของโลหะเติมชนิด Sil. CD1050-5M [9]

| Item           | Chemical component (%) |      |      |     |     | Solidus<br>(°C) | Liquidus<br>(°C) | Brazing temperature (°C) |
|----------------|------------------------|------|------|-----|-----|-----------------|------------------|--------------------------|
|                | Ag                     | Cu   | Zn   | Ni  | Mn  |                 |                  |                          |
| Sil. CD1050-5M | 49                     | 27.5 | 20.5 | 0.5 | 2.5 | 630             | 670              | 670 - 770                |

ตารางที่ 3 Analysis of variance for RB (coded units)

| Source                            | DF | Seq SS  | Adj MS  | F      | P       |
|-----------------------------------|----|---------|---------|--------|---------|
| Main Effects                      | 4  | 13129.3 | 3282.32 | 79.40  | < 0.001 |
| A                                 | 1  | 6974.1  | 6974.10 | 168.70 | < 0.001 |
| B                                 | 1  | 2707.9  | 2707.93 | 65.50  | < 0.001 |
| C                                 | 1  | 3443.0  | 3443.05 | 83.28  | < 0.001 |
| D                                 | 1  | 4.2     | 4.21    | 0.10   | 0.732   |
| A*B                               | 1  | 106.8   | 106.84  | 2.58   | 0.132   |
| A*C                               | 1  | 836.9   | 836.92  | 20.24  | < 0.001 |
| A*D                               | 1  | 5.0     | 4.98    | 0.12   | 0.733   |
| B*C                               | 1  | 71.9    | 71.85   | 1.74   | 0.206   |
| B*D                               | 1  | 4.5     | 4.51    | 0.11   | 0.746   |
| C*D                               | 1  | 151.0   | 150.99  | 3.65   | 0.074   |
| Residual Error                    | 16 | 661.5   | 41.34   |        |         |
| Pure Error                        | 16 | 661.5   | 41.34   |        |         |
| Total                             | 31 | 15096.9 |         |        |         |
| R-Sq = 95.63% R-Sq (adj) = 91.54% |    |         |         |        |         |

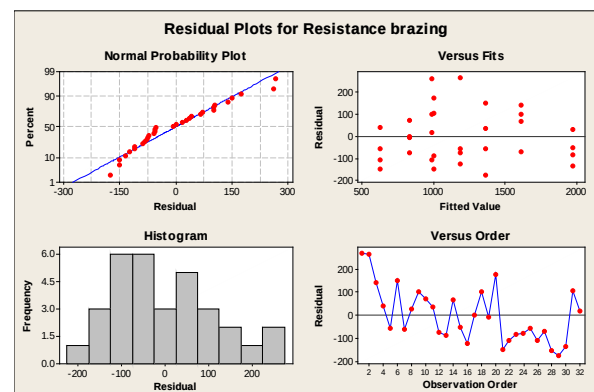
จากการวิเคราะห์ ANOVA จะเห็นว่าไม่มีตัวแปรที่ไม่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยต่อ จึงต้องวิเคราะห์ ANOVA อีกครั้ง โดยตัดตัวแปรที่ไม่มีผลกระทบออก ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 Reduced model

| Source                            | DF | Seq SS  | Adj MS  | F      | P       |
|-----------------------------------|----|---------|---------|--------|---------|
| Main Effects                      | 3  | 13125.1 | 4375.03 | 104.08 | < 0.001 |
| A                                 | 1  | 6974.1  | 6974.10 | 165.91 | < 0.001 |
| B                                 | 1  | 2707.9  | 2707.93 | 64.42  | < 0.001 |
| C                                 | 1  | 3443.0  | 3443.05 | 81.91  | < 0.001 |
| A*C                               | 1  | 836.9   | 836.92  | 19.91  | < 0.001 |
| Residual Error                    | 27 | 1135.0  | 42.04   |        |         |
| Lack of Fit                       | 3  | 180.8   | 60.25   | 1.52   | 0.236   |
| Pure Error                        | 24 | 954.2   | 39.76   |        |         |
| Total                             | 31 | 15096.9 |         |        |         |
| R-Sq = 92.48% R-Sq (adj) = 91.37% |    |         |         |        |         |

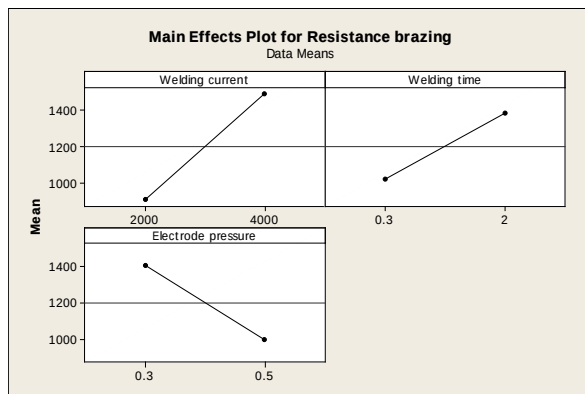
ผลจากการวิเคราะห์ ANOVA จะเห็นได้ว่าตัวแปรหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยต่อในการแผ่นประสานด้วยความดันทาน คือ กระแสไฟฟ้า เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า และแรงกดจากอิเล็กโทรด รวมทั้งอันตรกิริยาของกระแสไฟฟ้าและแรงกดจากอิเล็กโทรด มีผลต่อค่าความแข็งแรงของรอยประสานที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ส่วนเวลาในการกดชิ้นงานหลังการเชื่อมไม่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงของรอยต่อ (P-value > 0.05) และผลจากการวิเคราะห์ ANOVA จากตารางที่ 4 สามารถนำมาเขียนเป็นสมการเส้นตรงสำหรับการทำนายค่าความแข็งแรงของรอยต่อได้ดังสมการที่ 1

$$Y = 61.0578 + 14.7628 A + 9.19906 C - 10.3728 C - 5.11406 A*C \quad (1)$$

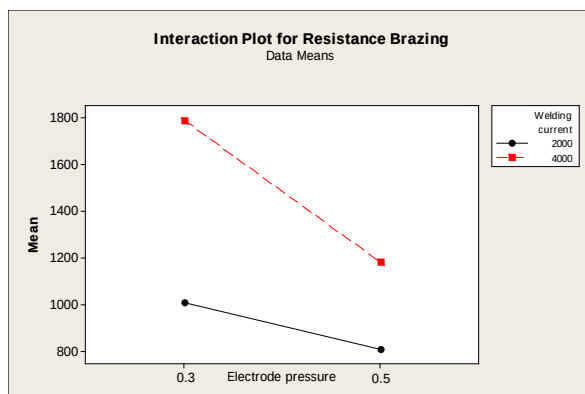


รูปที่ 2 กราฟแสดงส่วนตกค้างจากการทดลอง

จากกราฟ Normal probability plot และ Histogram ในรูปที่ 2 เห็นได้ว่าค่าส่วนตกค้างเกาะกลุ่มกันในลักษณะเส้นตรง มีลักษณะการกระจายตัวแบบปกติ จากกราฟ Versus fits ส่วนตกค้างมีความแปรปรวนคงที่ และความแปรปรวนเป็นส่วนตกค้างจากกราฟ Versus order ลักษณะการกระจายตัวของส่วนตกค้าง ไม่มีรูปแบบหรือแนวโน้มใดๆ จึงสรุปได้ว่าไม่พบสิ่งผิดปกติในระหว่างการทดลอง



รูปที่ 3 กราฟตัวแปรหลัก (Main effects) ของการทดลอง



รูปที่ 4 Interaction plots แสดงผลกระทบร่วม

จากการพิจารณากราฟ Main effects และ Interaction plots จะเห็นว่าตัวแปรและระดับที่มีผลกระทบให้ค่าความแข็งแรงเฉือนสูงสุดจากการทดลองในครั้งนี้ คือ กระแสไฟฟ้าที่ 4,000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กโทรดที่ 0.3 MPa

จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่า กระแสไฟฟ้า และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าจะมีผลต่อความร้อนที่เกิดขึ้น การเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้า หรือเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ทำให้ความร้อนในการเชื่อมสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับสมการตามทฤษฎี คือ

$$H = I^2 R t \quad (2)$$

เมื่อ H คือ ความร้อน I คือ กระแสไฟฟ้า R คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ t คือ ระยะเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ซึ่งจากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้า และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าจะทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Aslanlar [6] และ Marashi [7] และผลจากการทดลองที่ใช้ความดัน 0.3 MPa ให้ค่าความแข็งแรงมากกว่าที่ความดัน 0.5 MPa เนื่องจากความดัน 0.5 MPa ทำให้ผิวของชิ้นงานเกิดการเสียดสีมากกว่า หรือมีผิวสัมผัสมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่หน้าสัมผัสต่ำกว่าที่ใช้ความดัน 0.3 MPa ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าจึงน้อยกว่าที่ความดัน 0.3 MPa ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ โยธิน จันทร์ทอง [5] เมื่อใช้ความดันจากอิเล็กโทรด 0.15 MPa รอยต่อจะมีค่าความแข็งแรงมากกว่าใช้ความดันจากอิเล็กโทรด 0.25 MPa สำหรับเวลาทดแซ่ชิ้นงานในงานการทดลองครั้งนี้ ไม่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม เนื่องจากใช้วัสดุที่มีความหนา 0.5 mm ซึ่งมีความหนาน้อยมาก และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าเพียง 2 s มีผลให้รอยเชื่อมเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว เวลาทดแซ่ชิ้นงานหลังการเชื่อมจึงไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม

#### 4. สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการแผ่นประสานด้วยความต้านทานที่มีต่อความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ กระแสไฟฟ้า เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ความดันจากอิเล็กโทรด และเวลาทดแซ่ชิ้นงานหลังการเชื่อม จากการทดสอบค่าความแข็งแรงเฉือน และวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิคทางสถิติพบว่า ตัวแปรหลัก กระแสไฟฟ้า เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ความดันจากอิเล็กโทรด และอันตรกิริยาร่วมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความดันจากอิเล็กโทรดมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงของรอยประสานที่ระดับ  $\alpha = 0.05$  และรอยต่อที่ได้จากการแผ่นประสานด้วยความต้านทาน โดย

ใช้กระแสไฟฟ้า 4000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กโทรด 0.3 MPa ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเหนือนสูงสุด

## 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Kanlayasiri, "Manufacturing Processes," VJ. printing, Bangkok, 2008.
- [2] L. Yajiang, Z. Zengda, F. Tao and W. Xinghong, "Oxidation resistance and phase constituents in the brazing interface of WC-TiC-Co hard alloys," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 122, pp. 51–55, 2002.
- [3] A. Elrefaey and W. Tillmann, "Effect of brazing parameters on microstructure and mechanical properties of titanium joints," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, pp. 4842–4849, 2009.
- [4] A. Elrefaey and W. Tillmann, "Correlation between microstructure, mechanical properties, and brazing temperature of steel to titanium joint," Journal of Alloys and Compounds, Vol.487, pp. 639–645, 2009.
- [5] Y. Janthong, K. Kanlayasiri and S. Klongboonjit, "Study on influence of welding parameters of resistance spot welding on tensile shear load for hot-dipped zinc-coated steel sheets SGCD1," Kasetsart University Annual Conference Vol.343, No.50, pp.26-33, 2555.
- [6] S. Aslanlar a, A. Ogur b, U. Ozsarac and E. Ilhan, "Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding," Materials and Design, Vol. 29, pp.1427–1431, 2008.
- [7] P. Marashi, "Microstructure and failure behavior of dissimilar resistance spot welds between low carbon galvanized and austenitic stainless steel," Materials Science and Engineering :A, Vol.480, pp.175–180, 2008.
- [8] AWS C3, "Establishment of a Standard Test for Brazed Joints," A committee Report, American Welding Society (AWS), pp. 1-63, 1963.
- [9] Neis, "Brazing filler metals," Amatanakorn Indutrial Estate 700/436 Moo7 Bangna-Trad Highway Km57, Donhuaroh, Muang District, Chonburi 20000 Thailand.



# การอธิบายกลไกการทำความสะอาดของการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง โดยพารามิเตอร์การละลาย

## An Explanation of Mechanism of Snow Dry Ice Cleaning by Solubility Parameter

พัชร พิริยะวิริยะ สุรัตน์ อารีรัตน์

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

บทความนี้อธิบายหนึ่งในกลไกการทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งโดยพิจารณาจากค่าพารามิเตอร์การละลาย เป็นกลไกการทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนอินทรีย์ไม่มีขั้ว โดยการเข้าไปละลายสารปนเปื้อนอินทรีย์ไม่มีขั้วของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่เกิดขึ้นในระหว่างการกระทบกันระหว่างอนุภาคน้ำแข็งแห้งกับพื้นผิว ซึ่งอุณหภูมิและโมเมนตัมการชนของกระแสน้ำแข็งแห้งส่งผลต่อค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ จากการศึกษาพบว่าค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวในการทำความสะอาดมีค่าอยู่ในช่วง 16.3-17.1 MPa<sup>0.5</sup> ที่สภาวะความดันป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 48 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 5°C และที่สภาวะความดันป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 55 bar ที่อุณหภูมิป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 5 10 และ 15°C เมื่อระยะห่างจากปลายหัวฉีด 2 cm ซึ่งค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวนั้นมีค่าใกล้เคียงกับสารละลายอินทรีย์ไม่มีขั้วที่ใช้ทำความสะอาดสิ่งสกปรกไม่มีขั้ว เช่น พาราฟินแว็ก ไขมัน สารหล่อลื่น เป็นต้น ดังนั้น การพ่นละอองน้ำแข็งแห้งจึงสามารถทำความสะอาดสารอินทรีย์ไม่มีขั้วได้

**คำสำคัญ :** การทำความสะอาดแบบแห้ง การทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง พารามิเตอร์การละลาย

### Abstract

This paper explained about one of mechanism of snow dry ice cleaning by solubility parameter. The mechanism for the removal of non-polar organic residues utilizes liquid CO<sub>2</sub> solvent properties while the dry ice are attach the surface. Solubility parameter value of liquid CO<sub>2</sub> were estimated from temperature and momentum of snow dry ice stream. From our study, solubility parameters value of liquid carbon dioxide for cleaning process are between 16.3-17.1 MPa<sup>0.5</sup> when using pressure for supplying carbon dioxide 48 bar temperature for supplying carbon dioxide 5 °C and pressure for supplying carbon dioxide 55 bar temperature for supplying carbon dioxide 5 10 and 15°C at distance from tip of nozzle 2 cm. Solubility parameters value of liquid carbon dioxide are close to solubility parameters value of non-polar organic solvent, which using for dissolve non-polar organic compound e.g., paraffin wax, oil, lube oil. So, Snow dry ice cleaning can be cleaned non-polar organic residues.

**Keywords :** Dry cleaning, Snow dry ice cleaning, Solubility parameter

## 1. บทนำ

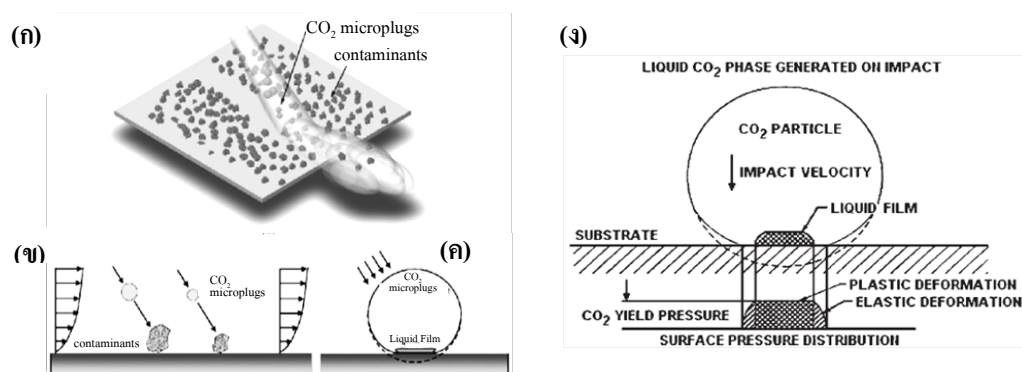
ในภาคอุตสาหกรรมความสะอาดของผลิตภัณฑ์เป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง ผลิตภัณฑ์ต้องสะอาดหรือมีการปนเปื้อนในระดับที่ยอมรับได้ โดยการทำความสะอาดด้วยการพ่นน้ำแรงดันสูงเป็นวิธีการหนึ่งในกระบวนการทำความสะอาดในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งใช้ในการทำความสะอาดพื้นผิว เช่น อุปกรณ์เคมีคอนกรีตเตอร์ แม่พิมพ์ยานยนต์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น การทำความสะอาดโดยการพ่นน้ำแรงดันสูงสามารถทำความสะอาดชิ้นงานได้เร็ว อ่อนโยนต่อผลิตภัณฑ์ ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม ไม่ก่อให้เกิดสารตกค้างที่เป็นอันตราย และคาร์บอนไดออกไซด์สามารถระบายสู่บรรยากาศได้ [1-4]

การทำความสะอาดโดยการพ่นน้ำแรงดันสูงนั้นประกอบด้วย 3 กลไก คือ 1. การถ่ายเทโมเมนตัมในลักษณะของการชนกระแทกของอนุภาคน้ำแรงดันสูงกับสิ่งสกปรกบนพื้นผิวชิ้นงาน 2. แรงลากของกระแสคาร์บอนไดออกไซด์ และ 3. การเข้าไปละลายสิ่งปนเปื้อนอินทรีย์ไม่มีหัวของคาร์บอนไดออกไซด์เหลว

กลไกหลักในการทำความสะอาดสิ่งสกปรกบนพื้นผิวคือการถ่ายเทโมเมนตัมเนื่องจากการชนของอนุภาคน้ำแรงดันสูงไปยังสิ่งสกปรกวัฏภาคของแข็งบนชิ้นงานดังรูปที่ 1(ก) และขั้นตอนถัดมาคือการเข้าไปละลายสิ่งปนเปื้อนอินทรีย์ไม่มีหัวโดยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว โดยทั่วไปมีสิ่งสกปรกปนเปื้อนอินทรีย์ไม่มีหัวตกค้างหรือถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวชิ้นงานดังนั้นขั้นตอนนี้จึงมีความสำคัญ ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจะเกิดขึ้นช่วงหนึ่งใน

ระหว่างการเกิดการกระแทกของอนุภาคน้ำแรงดันสูงบนพื้นผิว เนื่องจากในระหว่างการชนก่อให้เกิดความเครียดที่สูงตรงรอยต่อระหว่างอนุภาคน้ำแรงดันสูงกับพื้นผิว ความเครียดที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่ามากกว่าค่าความเค้นจุดครากของอนุภาคน้ำแรงดันสูงและสูงกว่าค่าความดันที่จุดรวม 3 วัฏภาค ส่งผลให้อนุภาคคาร์บอนไดออกไซด์เปลี่ยนไปอยู่ในวัฏภาคของเหลวและทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายสารอินทรีย์ไม่มีหัว จากนั้นเมื่ออนุภาคคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มที่จะสะท้อนออกจากพื้นผิว ความดัน ณ จุดสัมผัสระหว่างอนุภาคคาร์บอนไดออกไซด์กับพื้นผิวก็จะลดลงและวัฏภาคของเหลวที่อยู่ในอนุภาคของน้ำแรงดันสูงก็จะเปลี่ยนวัฏภาคลงมาอยู่ในวัฏภาคของแข็งอีกครั้งหนึ่ง พร้อมทั้งเป็นการขจัดเอาสารอินทรีย์ไม่มีหัวออกไปจากพื้นผิวด้วย [5] ดังแสดงในรูปที่ 1 (ง)

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการอธิบายกลไกการทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแรงดันสูง ในส่วนกลไกการละลายสิ่งปนเปื้อนอินทรีย์ไม่มีหัวของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวโดยพารามิเตอร์การละลายและเนื่องจากการคำนวณค่าพารามิเตอร์การละลายของสิ่งปนเปื้อนและค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวขณะทำความสะอาดเป็นสิ่งจำเป็น แต่ข้อมูลค่าพารามิเตอร์การละลายยังไม่แพร่หลายและมีข้อจำกัด งานวิจัยนี้จึงศึกษาข้อมูลดังกล่าว เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกสภาวะการทำความสะอาด อีกทั้งเป็นแนวทางในการพัฒนาประสิทธิภาพในการทำความสะอาด



รูปที่ 1 (ก) ภาพจำลองการทำความสะอาดด้วยการพ่นละอองคาร์บอนไดออกไซด์ [3]

(ข) กลไกการขจัดอนุภาคที่เกาะอยู่บนผิวชิ้นงาน [3]

(ค และ ง) กลไกการขจัดสารอินทรีย์ที่ไม่มีหัวบนพื้นผิว [5]

## 2. พารามิเตอร์การละลาย

พารามิเตอร์การละลาย (Solubility parameter,  $\delta$ ) แสดงถึงความแข็งแรงของแรงระหว่างโมเลกุล มีความสัมพันธ์กับพลังงานในการดึงดูดระหว่างโมเลกุล สามารถนำไปอธิบายการละลายเข้าด้วยกันของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย ซึ่งตัวถูกละลายสามารถละลายในสารละลายได้ ต่อเมื่อมีค่าพารามิเตอร์การละลายเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน ค่าพารามิเตอร์แสดงดังสมการ (1) ซึ่งค่าพารามิเตอร์การละลายเป็นลักษณะเฉพาะของสารแต่ละชนิดซึ่งขึ้นอยู่กับแรงพันธะที่ยึดเหนี่ยวและลักษณะโครงสร้างทางเคมี

$$\delta(\text{MPa}^{0.5}) = \left( \frac{\text{ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ} (J/mol)}{\text{ปริมาตรต่อโมล} (m^3/mol)} \right)^{0.5} \quad (1)$$

การประมาณค่าพารามิเตอร์การละลายของสาร มีหลายวิธีแสดงดังต่อไปนี้

### 2.1 การประมาณค่าพารามิเตอร์การละลายแบบเฮนเซน (Hansen solubility parameter) [6]

เป็นแบบจำลองสามพารามิเตอร์กล่าวคือ พิจารณาแรงความแข็งแรงระหว่างโมเลกุลในส่วนที่ไม่มีขั้ว ส่วนที่มีขั้ว และพันธะไฮโดรเจน ซึ่งค่าพารามิเตอร์การละลายดังแสดงในสมการ (2)

$$\delta_T^2 = \delta_d^2 + \delta_p^2 + \delta_h^2 \quad (2)$$

เมื่อ  $\delta_d$ ,  $\delta_p$  และ  $\delta_h$  คือพารามิเตอร์การละลายของอันตรกิริยาของส่วนไม่มีขั้ว ส่วนที่มีขั้ว และพันธะไฮโดรเจน ตามลำดับ

### 2.2 การประมาณค่าพารามิเตอร์การละลายโดยวิธีพิจารณากลุ่มองค์ประกอบของ Hoftyzer และ Van Krevelen [7]

เป็นการทำนายค่าพารามิเตอร์การละลายขององค์ประกอบจากโครงสร้างทางเคมี แสดงในสมการที่ (3)

$$\delta_d = \sum F_{di} / V \quad (3-1)$$

$$\delta_p = \sqrt{\sum F_{pi}^2} / V \quad (3-2)$$

$$\delta_h = \sqrt{\sum E_{hi}} / V \quad (3-3)$$

$$V = \sum N_i V_i$$

เมื่อ  $V$  คือ ปริมาตรเชิงโมล  $F_d$ ,  $F_p$  และ  $E_h$  คือ พลังงานยึดเหนี่ยวเป็นผลมาจากอันตรกิริยาของส่วนที่ไม่มีขั้ว ส่วนที่มีขั้ว และพันธะไฮโดรเจน

ตารางที่ 1 ตัวอย่างค่า  $F_d$ ,  $F_p$  และ  $E_h$  ขององค์ประกอบโครงสร้างเคมี [8]

| หมู่<br>โครงสร้าง  | $F_{di}$<br>(MJ/m <sup>3</sup> ).mol <sup>-1</sup> | $F_{pi}$<br>(MJ/m <sup>3</sup> ).mol <sup>-1</sup> | $E_{hi}$<br>J.mol <sup>-1</sup> |
|--------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------|
| -CH <sub>3</sub>   | 420                                                | 0                                                  | 0                               |
| -CH <sub>2</sub> - | 270                                                | 0                                                  | 0                               |
| >C-                | 80                                                 | 0                                                  | 0                               |
| =C<                | 70                                                 | 0                                                  | 0                               |
| -Cl                | 450                                                | 550                                                | 400                             |
| -OH                | 210                                                | 500                                                | 20000                           |

### 2.3 การประมาณค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ [6]

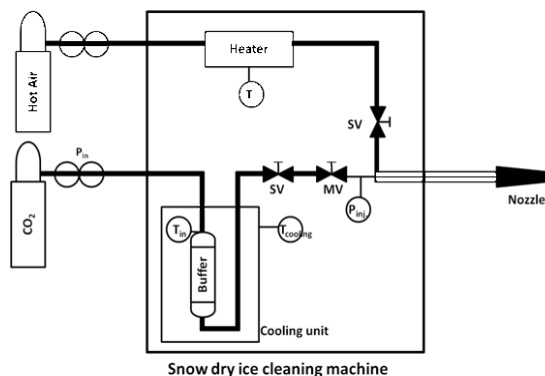
ค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์สามารถประมาณค่าได้จากสมการ (4) พบว่าค่าพารามิเตอร์การละลายเป็นฟังก์ชันกับปริมาตรเชิงโมลและอุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์

$$\delta^2 = \left[ \frac{\delta_{dref}}{\left( \frac{V_{ref}}{V} \right)^{-1.25}} \right]^2 + \left[ \frac{\delta_{pref}}{\left( \frac{V_{ref}}{V} \right)^{-0.5}} \right]^2 + \left[ \frac{\delta_{href}}{\exp \left( -1.32 \times 10^{-3} (T_{ref} - T) - \ln \left( \frac{V_{ref}}{V} \right)^{0.5} \right)} \right]^2 \quad (4)$$

เมื่อ  $\delta_{dref}$ ,  $\delta_{pref}$  และ  $\delta_{href}$  คือค่าพารามิเตอร์การละลายของอันตรกิริยาของส่วนไม่มีขั้วอ้างอิง (15.6 MPa<sup>0.5</sup>) ส่วนมีขั้วอ้างอิง (5.2 MPa<sup>0.5</sup>) และส่วนพันธะไฮโดรเจนอ้างอิง (5.8 MPa<sup>0.5</sup>) ตามลำดับ  $V_{ref}$  คือปริมาตรเชิงโมลอ้างอิง (39.13 cm<sup>3</sup>/mole)  $T_{ref}$  คืออุณหภูมิอ้างอิง (298.15 K)

### 3. การทดลอง

ในการศึกษาใช้เครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้งรุ่น KMITL Model 01 ซึ่งแผนภูมิของเครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้งแสดงดังรูปที่ 2 โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.95 จากบริษัท United Industrial Gas งานวิจัยนี้ศึกษาหาโปรไฟล์อุณหภูมิของกระแสดละอองน้ำแข็งแห้ง และศึกษาโมเมนต์การชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาประมาณค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2 แผนภูมิเครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

3.1 ศึกษาโปรไฟล์อุณหภูมิของกระแสดละอองน้ำแข็งแห้ง ใช้เทอโมคัปเปิลชนิด K เพื่อวัดอุณหภูมิของกระแสดละอองน้ำแข็งแห้งที่ระยะห่างจากปลายหัวฉีด 0 2 4 และ 6 cm ที่ความดันและอุณหภูมิป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์คือ 35-48 bar และ 5-15 °C ตามลำดับ

3.2 ศึกษาโมเมนต์การชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งโดยพิจารณาจากแผ่น Fuji Prescale Film สามารถบอกถึงโมเมนต์การชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งได้จากสีที่ปรากฏบนแผ่นฟิล์มหลังจากอนุภาคน้ำแข็งแห้งพุ่งชน สีเข้มมากหมายถึงโมเมนต์การชนที่สูง และถ้าแผ่นฟิล์มไม่ปรากฏสีหมายถึงไม่เกิดอนุภาคน้ำแข็งแห้งในกระแสน้ำแข็งแห้ง ซึ่ง Fuji Prescale Film ที่ใช้ในการทดลองเป็นฟิล์มระดับ Super low สามารถวัดค่าโมเมนต์การชนในช่วง 5-24 bar ทำการทดลองโดยนำ Fuji Prescale Film ใส่บนแท่นยึดและทำการพ่นน้ำแข็งแห้งลงท่ามุม 90 องศา กับแผ่น Fuji Prescale Film ระยะห่างระหว่างปลายหัวฉีดกับแผ่น Fuji Prescale Film 2 cm ความชื้นสัมพัทธ์ขณะทำการทดลองร้อยละ 50 ถึง 70

### 4. ผลการทดลองและการอภิปราย

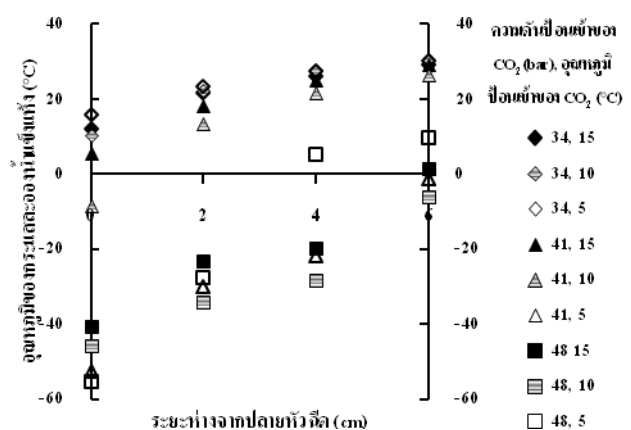
งานวิจัยนี้เป็นการอธิบายกลไกการทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง ในส่วนกลไกการละลายสารปนเปื้อนอินทรีย์ไม่มีข้อบกพร่องขึ้นงาน โดยพิจารณาค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในขณะทำความสะอาดเปรียบเทียบกับทำความสะอาดโดยใช้สารละลายอินทรีย์ไม่มีข้อ

#### 4.1 ค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์

การประมาณค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะการทำความสะอาดสามารถประมาณค่าได้จากสมการ (4) ซึ่งต้องทราบอุณหภูมิและปริมาตรเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ โดยปริมาตรเชิงโมลสามารถหาได้จากสมการสภาวะเมื่อทราบโมเมนต์การชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง

ก) โปรไฟล์อุณหภูมิของกระแสดละอองน้ำแข็งแห้ง

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของกระแสดละอองน้ำแข็งแห้งกับระยะห่างจากปลายหัวฉีดกับความดันและอุณหภูมิป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งอุณหภูมิของกระแสดละอองน้ำแข็งแห้งที่สามารถผลิตอนุภาคน้ำแข็งแห้งได้ ควรมีอุณหภูมิต่ำหรือใกล้เคียงกับอุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์ที่จุดรวมสาม (Triple point, -56.6 °C)



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของกระแสดละอองน้ำแข็งแห้ง (°C) กับระยะห่างจากปลายหัวฉีด (cm)

### ข) โมเมนต์การชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้ง

ศึกษาสภาวะการทำความสะอาดเมื่อความดันป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 41 48 และ 55 bar อุณหภูมิป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 5 10 และ 15 °C พบว่าที่ความดันป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 48 bar ที่อุณหภูมิป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 5 °C และความดันป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 55 bar ที่อุณหภูมิป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 5 10 และ 15 °C ปรากฏสีชมพูเข้มบนแผ่นฟิล์มซึ่งมีความเข้มสูงสุด แสดงถึงค่าโมเมนต์การชนของอนุภาคน้ำแข็งแห้งประมาณ 24 bar

เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะความดันป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 48 bar ที่อุณหภูมิป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 5 °C และความดันป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 55 bar ที่อุณหภูมิป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 5 10 และ 15 °C พบว่ามีค่าพารามิเตอร์การละลายในช่วง 16.7-17.1 MPa<sup>0.5</sup> แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับงานวิจัยของ Williams L.L. et al. (2004) [9] ที่ค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในช่วง 16-18 MPa<sup>0.5</sup> ในสภาวะเดียวกัน

ตารางที่ 2  $\delta$  ของคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อความดันที่คาร์บอนไดออกไซด์กระทบชิ้นงานประมาณ 24 bar

| ความดัน<br>ป้อนเข้า<br>ของ CO <sub>2</sub><br>(bar) | อุณหภูมิ<br>ป้อนเข้า<br>ของ CO <sub>2</sub><br>(°C) | ปริมาตร<br>เชิงโมล<br>(cm <sup>3</sup> /mol) | $\delta$<br>(MPa <sup>0.5</sup> ) |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------|
| 55                                                  | 5                                                   | 40.8                                         | 16.8                              |
| 55                                                  | 10                                                  | 41.1                                         | 16.7                              |
| 55                                                  | 15                                                  | 40.2                                         | 17.1                              |
| 48                                                  | 5                                                   | 42.0                                         | 16.3                              |

### 4.2 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์การละลายคาร์บอนไดออกไซด์กับค่าพารามิเตอร์การละลายของสารละลายอินทรีย์

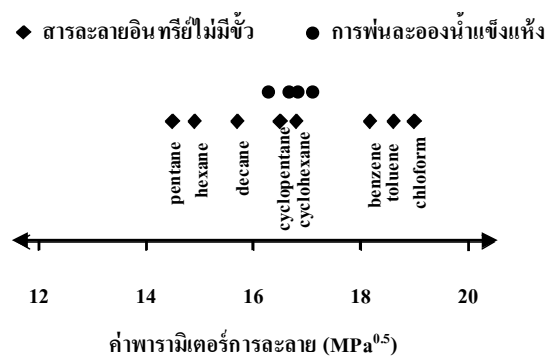
สารละลายอินทรีย์ไม่มีขั้วสามารถละลายสารอินทรีย์ไม่มีขั้วได้ตามหลัก like dissolves like คือ ตัวถูกละลายที่มีขั้วจะละลายในตัวทำละลายที่มีขั้ว แต่จะไม่ละลายในตัว

ทำละลายที่ไม่มีขั้ว และตัวถูกละลายที่ไม่มีขั้วจะละลายในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว แต่จะไม่ละลายในตัวทำละลายที่มีขั้ว ซึ่งค่าพารามิเตอร์การละลายของสารละลายอินทรีย์ไม่มีขั้วพิจารณาจากพารามิเตอร์การละลายแบบเฮนเซนในหัวข้อที่ 2.1 แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์การละลายของสารละลายอินทรีย์ไม่มีขั้วที่ 25°C [6]

| สารละลายอินทรีย์ไม่มีขั้ว | ค่าพารามิเตอร์การละลาย<br>(MPa <sup>0.5</sup> ) |
|---------------------------|-------------------------------------------------|
| pentane                   | 14.5                                            |
| hexane                    | 14.9                                            |
| decane                    | 15.7                                            |
| cyclopentane              | 16.5                                            |
| cyclohexane               | 16.8                                            |
| benzene                   | 18.6                                            |
| toluene                   | 18.2                                            |
| chloroform                | 19.0                                            |

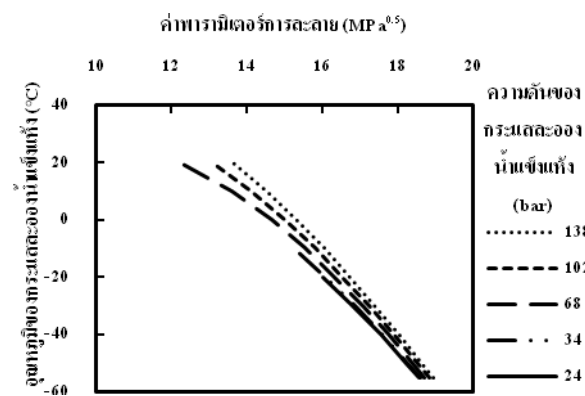
พิจารณาเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์จากตารางที่ 2 และค่าพารามิเตอร์การละลายของสารอินทรีย์ไม่มีขั้วจากตารางที่ 3 พบว่าค่าพารามิเตอร์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าอยู่ในช่วงของค่าพารามิเตอร์การละลายของสารละลายอินทรีย์ไม่มีขั้วแสดงดังรูปที่ 4 ดังนั้นการทำความสะอาดโดยการพ่นน้ำแข็งแห้งจึงสามารถทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนอินทรีย์ไม่มีขั้วได้



รูปที่ 4  $\delta$  ของสารละลายอินทรีย์ไม่มีขั้วและ  $\delta$  ของคาร์บอนไดออกไซด์หลังจากการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

### 4.3 อิทธิพลของความดันและอุณหภูมิของกระแสละอองน้ำแข็งห่อค่าพารามิเตอร์การละลาย

อุณหภูมิและความดันของกระแสละอองน้ำแข็งห่อส่งผลต่อค่าพารามิเตอร์การละลาย เมื่อความดันของกระแสละอองน้ำแข็งห่อลดลง ค่าพารามิเตอร์การละลายจะลดลงที่อุณหภูมิคงที่ เนื่องจากความดันของการคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลงส่งผลให้ความหนาแน่นของการคาร์บอนไดออกไซด์หรือตัวทำละลายลดลง ในทำนองเดียวกันการที่อุณหภูมิของกระแสละอองน้ำแข็งห่อเพิ่มขึ้นที่ความดันคงที่ ค่าพารามิเตอร์การละลายจึงมีค่าลดลง ดังแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความดันของน้ำแข็งห่อที่กระทบชิ้นงานกับค่าพารามิเตอร์การละลาย

### 5. สรุปผลการทดลอง

ค่าพารามิเตอร์การละลายสามารถอธิบายกลไกการทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแข็งห่อ ในส่วนของการเข้าไปละลายสิ่งปนเปื้อนอินทรีย์ไม่มีขั้วของการคาร์บอนไดออกไซด์เหลว เนื่องจากค่าพารามิเตอร์การละลายของการคาร์บอนไดออกไซด์เหลวมีค่าพารามิเตอร์การละลายเท่ากับหรือใกล้เคียงกับค่าพารามิเตอร์การละลายของสารละลายอินทรีย์ไม่มีขั้วที่สามารถใช้ในการละลายสารอินทรีย์ไม่มีขั้ว ซึ่งการทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนอินทรีย์บนพื้นผิวหาคำพารามิเตอร์การละลายของสิ่งสกปรกสามารถปรับค่าพารามิเตอร์การละลายของการคาร์บอนไดออกไซด์ให้เท่ากับหรือใกล้เคียงกับค่าพารามิเตอร์การละลายของสิ่งสกปรกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการทำความสะอาด

### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Liu et al., "Agglomeration process of dry ice particles produced by expanding liquid carbon dioxide", *Advanced Powder Technology* 21, pp 652-657, 2012.
- [2] R. Sherman, "Developments in surface contamination and cleaning: fundamentals and applied aspects", William Andrew Inc., NJ, USA, 2008, pp.987-1011.
- [3] S. Banerjee, A. Campbell, "Principles and mechanisms of sub-micrometer particle removal by CO<sub>2</sub> cryogenic technique", *Journal of Adhesion Science and Technology* 19 (9), pp. 739-751, 2005.
- [4] R. Sherman, P. Adams, "Carbon Dioxide Snow Cleaning - The Next Generation of Clean", in *Proceeding of Clean Tech*, p.271, New Jersey: Witter Publishing, Flemington, 1995.
- [5] R. Sherman. "Carbon Dioxide Snow Cleaning", *Developments in surface contamination and cleaning: fundamentals and applied aspects*, pp.987-1011, New Jersey: William Andrew Inc. 2008.
- [6] C. M. Hasen, "Hansen Solubility Parameters: A User's Handbook", CRC Press, London, 2<sup>nd</sup> ed., 2007.
- [7] D. W. Van Krevelen et al., "Properties of Polymers: Their Correlation with Chemical Structure; their Numerical Estimation and Prediction from Additive Group Contributions", Elsevier, Amsterdam, 4th ed. 2009.
- [8] M. Khayet and V. Fernández, "Estimation of the solubility parameters of model plant surfaces and agrochemicals: a valuable tool for understanding plant surface interactions", *Theoretical Biology and Medical Modeling*, 2012.
- [9] L. L. Williams et al., *Calculation of Hansen solubility parameter values for a range of pressure and temperature conditions, including the supercritical fluid region*, Industrial & Engineering Chemistry Research, 2004.

# การเลือกที่ตั้งคลังน้ำมันในประเทศไทย โดยใช้วิธีลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์

## Oil Tank Farm Site Selection in Thailand by Using The Analytic Hierarchy Process

ธนวัฒน์ เมธีชัยรัตน์

สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาการเลือกที่ตั้งคลังน้ำมันในประเทศไทย โดยใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ เพื่อช่วยการตัดสินใจเลือกทำเลที่ตั้งที่เหมาะสมในจังหวัด สระบุรี ลำปาง และขอนแก่น ซึ่งในเบื้องต้นจะต้องศึกษาข้อมูลทางด้านกายภาพ ปริมาณความต้องการการใช้น้ำมันบริเวณพื้นที่โดยรอบ และข้อมูลการลงทุนสำหรับที่ตั้งของแต่ละพื้นที่ ทั้งนี้ในแต่ละพื้นที่จะมีกฎระเบียบข้อบังคับ ลักษณะภูมิศาสตร์ที่แตกต่างกัน ซึ่งการวิเคราะห์การเลือกที่ตั้งคลังน้ำมันนี้เราจะทำการออกแบบเกณฑ์การประเมินให้ผู้เชี่ยวชาญทำการประเมินเพื่อหาตำแหน่งที่ตั้งคลังน้ำมันที่เหมาะสม โดยใช้ปัจจัยด้านคุณภาพ เช่น ความเหมาะสมด้านสิ่งแวดล้อม, ความพร้อมด้านสาธารณูปโภค เป็นต้นและปัจจัยด้านปริมาณ เช่น มูลค่าการลงทุนและการดำเนินงานมาทำการวิเคราะห์โดยใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ เพื่อให้สถานที่ทำเลที่ตั้งที่เหมาะสมทั้งในด้านสิ่งแวดล้อม เศรษฐศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ จากนั้นนำผลประเมินมาคำนวณหาค่าน้ำหนักความสำคัญโดยตัดสินจากค่าที่มากที่สุด โดยผลลัพธ์ที่ได้คือจังหวัดสระบุรีเลือกบริเวณตำบลห้วยปลวก อำเภอสายน้ำ ด้วยน้ำหนักความสำคัญ 0.510 จังหวัดลำปางเลือกบริเวณตำบลแม่กัว อำเภอสบปราบ ด้วยน้ำหนักความสำคัญ 0.428 และจังหวัดขอนแก่นเลือกบริเวณตำบลหินตั้ง อำเภอบ้านไผ่ ด้วยน้ำหนักความสำคัญ 0.396 ซึ่งเป็นค่าน้ำหนักที่มากที่สุดหลังจากผ่านกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์

**คำสำคัญ :** การเลือกทำเลที่ตั้ง / เกณฑ์การเลือก / กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ / คลังน้ำมัน

### Abstract

This paper is a study of oil tank farm site selection in Thailand by using the Analytical Hierarchy Process. The objective of a case study is to find the proper site in the environment, economics and engineering at Saraburi, Lampang and Khonkaen. Processes of the study are started from studying the physical data, demand for oil surrounding area and investment for the location of each area. In the each area, there are different in term of rules, regulations and geography. Afterwards, design criteria is done for evaluation and experts to evaluate of each area for finding the appropriate of oil tank farm site. Analyze the quality factors and the quantity factors by using the Analytical Hierarchy Process for decision making the proper site selection. Result from the study, Oil tank in Saraburi will be located in Sao-Hai district, with the emphasis was 0.51. Oil tank in Lampang will be located in Sob-Prab district, with the emphasis was 0.428. Oil tank in Khonkaen will be located in Ban-Pai district, with the emphasis was 0.395.

**Keywords :** Site Selection / Criteria / The Analytic Hierarchy Process / Oil Tank Farm

## 1. บทนำ

กรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน ได้ริเริ่มโครงการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อจัดสร้างท่อขนส่งน้ำมัน 3 เส้นทางคือ เส้นทางระยองถึงสระบุรี เส้นทางสระบุรีถึงลำปาง และเส้นทางสระบุรีถึงขอนแก่น โดยจำเป็นต้องมีคลังน้ำมันเพื่อกักเก็บน้ำมันที่จังหวัดสระบุรี ลำปาง และขอนแก่น เพื่อจำหน่ายให้กับผู้บริโภคลำดับต่อไป ดังนั้นการเลือกตำแหน่งที่ตั้งคลังน้ำมันจึงมีความสำคัญมาก เพราะต้องคำนึงถึงผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม ด้านเศรษฐศาสตร์ ด้านวิศวกรรมและการลงทุน โดยใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (The Analytic Hierarchy Process ) ในการวิเคราะห์ทั้งปัจจัยเชิงปริมาณและปัจจัยเชิงคุณภาพ เพื่อเลือกที่ตั้งคลังน้ำมันที่เหมาะสม

## 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ความสำคัญในการเลือกทำเลที่ตั้ง

การเลือกทำเลที่ตั้งมีความสำคัญต่อองค์กรธุรกิจสูง เนื่องจากหากเลือกทำเลที่ไม่เหมาะสมจะทำให้ธุรกิจประสบปัญหาดังเช่น เสียค่าขนส่งสูง เนื่องจากสถานที่อยู่ห่างไกลจากแหล่งวัตถุดิบ และลูกค้า อีกทั้งอาจจะได้รับผลกระทบด้านแรงงานที่มีคุณภาพไม่เพียงพอ เป็นต้น ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการดำเนินธุรกิจเป็นอย่างมาก โดยทั่วไปแล้วทำเลแต่ละแห่ง จะไม่มีลักษณะเด่นกว่าอีกแห่งในทุกด้านอย่างชัดเจน เพียงแต่มีลักษณะดีกว่าเท่าที่ธุรกิจนั้นๆ จะต้องการ และนำมาพิจารณาตัดสินใจเลือก แต่ลักษณะธุรกิจมีความหลากหลายแตกต่างกันไปย่อมทำให้ปัจจัยที่นำมาพิจารณาแตกต่างกันตามไปด้วย

### 2.2 ปัจจัยที่มีผลในการตัดสินใจเลือกทำเลที่ตั้ง

การเลือกทำเลที่ตั้งนั้นจำเป็นต้องใช้ปัจจัยเพื่อประกอบการตัดสินใจโดยทั่วไปปัจจัยที่มักมีผลต่อการเลือกทำเลที่ตั้งเพื่อประกอบธุรกิจโดยไม่จำแนกประเภทธุรกิจและไม่เรียงลำดับ[1] มีดังนี้

1. แหล่งวัตถุดิบ โดยส่วนมากจะเน้นเรื่องระยะทางขนส่งจากแหล่งวัตถุดิบ

2. แหล่งแรงงาน แรงงานหมายถึง สิ่งที่มาจากความสามารถของมนุษย์ ทั้งที่เกิดจากแรงกายและเกิดจากการใช้ความคิดการเลือกทำเลที่ตั้งหาแรงงานได้ง่ายและเป็นจำนวนมากทำให้ได้เปรียบ

3. ค่าใช้จ่ายในการขนส่ง เป็นตัวแปรตามระยะทางทั้งจากแหล่งวัตถุดิบมายังโรงงานผลิต และจากโรงงานผลิตไปยังลูกค้า

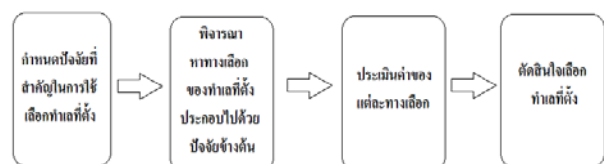
4. สิ่งอำนวยความสะดวก การเลือกทำเลที่ตั้งควรคำนึงถึงสาธารณูปโภคพื้นฐาน เช่น ระบบการบริการด้านไฟฟ้า น้ำประปา โทรศัพท์ และอินเทอร์เน็ต รวมไปถึงสถานพยาบาล และสถานดับเพลิงเป็นต้นเพื่อความปลอดภัย

5. แหล่งลูกค้า ในธุรกิจส่วนใหญ่มักจะคำนึงระยะทางระหว่างสถานประกอบการกับลูกค้าเป็นสำคัญอยู่แล้ว แม้จะจำเป็นต้องใช้เงินลงทุนค่าที่ดินที่สูงขึ้นก็ตาม

6. กฎหมาย ระเบียบและข้อบังคับ มีความสำคัญในการเลือกทำเลที่ตั้ง และในแต่ละแห่งหรือแต่ละประเทศอาจจะมีกฎหมาย และข้อบังคับที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นการเลือกที่ตั้งสถานประกอบการจึงจำเป็นต้องศึกษากฎหมาย ระเบียบและข้อบังคับต่างๆของสถานที่นั้นๆ เพื่อไม่ให้ขัดต่อกฎหมาย ระเบียบและข้อบังคับ รวมไปถึงประเพณีและวัฒนธรรมในสถานที่นั้นๆด้วย

### 2.3 ขั้นตอนในการตัดสินใจเลือกทำเลที่ตั้ง

การตัดสินใจเลือกทำเลที่ตั้ง ต้องตัดสินใจบนพื้นฐานของข้อมูลที่สามารถวัดได้และมีความน่าเชื่อถือเพราะหากตัดสินใจผิดพลาดนั้นหมายถึงเงินลงทุนก้อนใหญ่ที่ต้องเสียไปโดยได้ผลลัพธ์กลับมาไม่เป็นไปตามที่ตั้งใจไว้ ดังนั้นการตัดสินใจเลือกทำเลที่ตั้งประกอบไปด้วย ขั้นตอนหลัก[2]ดังรูปที่ 1



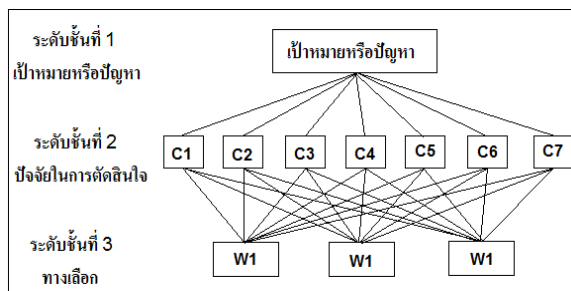
รูปที่ 1 ขั้นตอนหลักในการตัดสินใจเลือกทำเลที่ตั้ง



## 2.4 กระบวนการตัดสินใจลำดับเชิงวิเคราะห์ (The Analytic Hierarchy Process ; AHP)

เป็นกระบวนการที่ใช้ในการ วัดค่าระดับของการตัดสินใจจากทางเลือกได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังช่วยให้ผู้ตัดสินใจเข้าใจปัญหาที่มีมากยิ่งขึ้น กระบวนการตัดสินใจลำดับเชิงวิเคราะห์นี้ถูกคิดค้นโดย Thomas L. Saaty[3] ในช่วงทศวรรษ 1970 มีพื้นฐานมาจากความรู้ด้านคณิตศาสตร์และจิตวิทยา กระบวนการดังกล่าวได้ถูกประยุกต์ใช้ในธุรกิจต่างๆมากมาย เช่น การสั่งซื้อวัตถุดิบ การกำหนดยุทธศาสตร์ทางการตลาด การเลือกสถานที่ตั้งประกอบธุรกิจ การประเมินทางเลือก และอีกมากมาย หลักการในการตัดสินใจโดยใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ มีดังนี้

1. การกำหนดโครงสร้างแผนภูมิลำดับชั้น ( The structuring of the problem as a hierarchy ) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภูมิลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์

2. กำหนดคะแนนความสำคัญ (Pairwise comparison matrix) หลังจากสร้างแผนภูมิลำดับชั้นแล้ว จะทำการสร้างเมทริกซ์เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างปัจจัยเป็นคู่ๆ ภายใต้หลักการที่ว่าปัจจัยนั้นๆเมื่อเทียบกับกับปัจจัยอื่นมีผลกระทบต่อตัดสินใจอยู่ในระดับที่สูงกว่ามากหรือน้อยเพียงใด โดยจัดให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบความสำคัญของปัจจัยภายใต้

เป้าหมายหรือวัตถุประสงค์ของปัญหา

| ปัจจัย   | ปัจจัย 1 | ปัจจัย 2... | ปัจจัย n | น้ำหนักของปัจจัย |
|----------|----------|-------------|----------|------------------|
| ปัจจัย 1 | 1        | $a_{12}$    | $a_{1n}$ | $w_1$            |
| ปัจจัย 2 | $a_{21}$ | 1           | $a_{2n}$ | $w_2$            |
| .        | .        | .           | .        | .                |
| .        | .        | .           | .        | .                |
| ปัจจัย n | $a_{n1}$ | $a_{n2}$    | 1        | $w_n$            |

โดย : 1)  $a_{12}$  เป็นค่าลำดับความสำคัญของปัจจัย 1 เมื่อเปรียบเทียบกับปัจจัย 2 ภายใต้วัตถุประสงค์ของปัญหา

$$2) a_{21} = 1/a_{12}$$

การบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น จะแทนค่าความสำคัญด้วยตัวเลขระหว่าง 1 ถึง 9 แสดงถึงความแตกต่างระหว่างปัจจัยที่ถูกเปรียบเทียบ 2 ปัจจัยในแง่ของระดับความพึงพอใจของผู้ทำการตัดสินใจ ระดับของความพึงพอใจจะแสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตารางมาตรฐานแสดงมาตราส่วนที่ใช้ในการเปรียบเทียบความสำคัญเป็นคู่

| ระดับความสำคัญ | ความหมาย                                        | คำอธิบาย                                                 |
|----------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 1              | สำคัญเท่ากัน                                    | ปัจจัยทั้งสองมีความสำคัญเท่ากัน                          |
| 3              | สำคัญกว่าปานกลาง                                | ปัจจัยตัวที่พิจารณามีความมากกว่าอีกตัวหนึ่งปานกลาง       |
| 5              | สำคัญกว่ามาก                                    | ปัจจัยตัวที่พิจารณามีความมากกว่าอีกตัวหนึ่งมาก           |
| 7              | สำคัญกว่ามากที่สุด                              | ปัจจัยตัวที่พิจารณามีความมากกว่าอีกตัวหนึ่งมากที่สุด     |
| 9              | สำคัญกว่าสูงสุด                                 | ปัจจัยตัวที่พิจารณามีความมากกว่าอีกตัวหนึ่งสูงสุด        |
| 2,4,6,8        | ค่าความสำคัญระหว่างกลางของสองสิ่งที่เปรียบเทียบ | ค่าความสำคัญระหว่างสองปัจจัยอยู่ระหว่างกลางของค่าทั้งสอง |

การวัดความสอดคล้องกัน ถูกนำมาใช้เพื่อเป็นการยืนยันกระบวนการตัดสินใจอย่างมีเหตุผลว่าความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบต่างๆ จากการเปรียบเทียบเป็นรายคู่มีความสอดคล้องกันมากน้อยเพียงใด จึงสร้างกลไกที่จะตรวจสอบการเปรียบเทียบ

สำหรับดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index, C.I.) และอัตราส่วนความสอดคล้อง จากทฤษฎีของไอเกนเวกเตอร์ สามารถคำนวณได้ดังนี้

- ดัชนีความสอดคล้อง  $C.I. = (\lambda_{\max} - 1) / (n-1)$
- อัตราส่วนความสอดคล้อง  $C.R. = C.I. / R.I.$

โดย  $n$  คือจำนวนปัจจัยที่นำมาเปรียบเทียบเป็นคู่ และ  $\lambda_{\max}$  คือค่าลักษณะเฉพาะที่มากที่สุด(Maximums Eigenvalue) จากนั้นค่าความสำคัญที่ได้จากการเปรียบเทียบปัจจัยต่างๆ ในระดับเดียวกัน สามารถนำไป

เป็นข้อมูลที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจได้ ก็ต่อเมื่อค่าอัตราส่วนความสอดคล้องมีความเบี่ยงเบนน้อยกว่า 0.1

โดยดัชนีเชิงสุ่ม (Random Index, R.I.) เป็นค่าดัชนีความสอดคล้อง ซึ่งได้จากการสุ่มตัวอย่างเมทริกซ์ส่วนกลับของปัจจัยในการพิจารณา ( $n \times n$ ) และใช้เกณฑ์มาตรฐานของค่าความสำคัญอยู่ระหว่าง 1-9 โดยค่าเฉลี่ยของดัชนีเชิงสุ่มดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าดัชนีเชิงสุ่มเฉลี่ย (R.I.) ในเมทริกซ์  $n \times n$

| จำนวน n  | 1 | 2 | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
|----------|---|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ค่า R.I. | 0 | 0 | 0.58 | 0.90 | 1.12 | 1.24 | 1.32 | 1.41 | 1.45 | 1.49 |

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

J.L. García , A. Alvarado , J. Blanco , E. Jiménez , A.A. Maldonado และ G. Cortés[4] ได้ศึกษา งานวิจัยเกี่ยวกับการเลือกที่ตั้งคลังสินค้าการเกษตร โดยสามารถเลือกเกณฑ์สำหรับการพิจารณาเลือกที่ตั้งคลังสินค้าได้ทั้งหมด 10 เกณฑ์, นาริรัตน์ โพธิกุล[5] ได้ใช้วิธีการกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น(AHP)ในการวิเคราะห์เพื่อเลือกที่ตั้งคลังสินค้าใหม่, Jukka Korpela และ Markku Tuominen[6] ใช้วิธี AHP ในการวิเคราะห์ปัจจัยเชิงคุณภาพและปัจจัยเชิงปริมาณโดยมองว่าการเลือกทำเลที่ตั้งเป็นกลยุทธ์ที่สำคัญจึงต้องคำนึงถึงทั้งด้านรูปธรรมและนามธรรมเพื่อให้ได้ทำเลที่เหมาะสม, ณัฐฉา นาคี[7] ใช้วิธี AHP เลือกที่ตั้งโรงงานผลิตพรมและทำการวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุนเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการตัดสินใจว่าจะเช่าที่ดินหรือซื้อขาดต่อไป

## 3. ขั้นตอนการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ศึกษาข้อมูลและทฤษฎีโดยรวมที่ต้องใช้ในการศึกษาของโครงการ
2. กำหนดเกณฑ์เพื่อใช้หาทางเลือกที่ตั้งคลังน้ำมันในแต่ละจังหวัดรวมทั้งกำหนดทางเลือกที่เป็นไปได้ในแต่ละจังหวัด

3. ออกแบบการประเมินโดยใช้เกณฑ์การตัดสินใจที่กำหนด เพื่อเลือกทำเลที่ตั้งที่เหมาะสม

4. วิเคราะห์ความต้องการใช้น้ำมันของพื้นที่โดยรอบคลังเพื่อทราบปริมาณการกักเก็บน้ำมันในแต่ละคลัง

5. วิเคราะห์และเลือกทำเลที่ตั้งที่เหมาะสมทั้งด้านสิ่งแวดล้อม เศรษฐศาสตร์ และวิศวกรรมศาสตร์ โดยใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (The Analytic Hierarchy Process)

6. สรุปผลการเลือกที่ตั้งคลังน้ำมันในแต่ละจังหวัด

## 4. ผลการศึกษา

### 4.1 กำหนดเกณฑ์เพื่อใช้หาทางเลือกที่ตั้งคลังน้ำมัน

ในประเทศไทยการที่จะตั้งคลังน้ำมันจำเป็นต้องอยู่ในกรอบของพระราชบัญญัติการผังเมืองซึ่งระบุไว้ว่าคลังน้ำมันจะต้องอยู่ในพื้นที่ที่ถูกกำหนดให้เป็นพื้นที่อุตสาหกรรมหรือพื้นที่สีม่วง แต่ในกรณีที่จังหวัดนั้นๆไม่มีการจัดสรรพื้นที่อุตสาหกรรม หรือมีการจัดสรรแล้วแต่อยู่ใกล้เขตชุมชนมากเกินไปตามกฎหมายกระทรวงคลังน้ำมันก็ให้พิจารณาเป็นพื้นที่อื่นนอกเหนือพื้นที่อนุรักษ์ เนื่องจากโครงการนี้เป็นงานในส่วนของรัฐทำเพื่อประโยชน์ส่วนรวมของประชาชนในประเทศ ดังนั้นเกณฑ์หลักในการหาทางเลือกในแต่ละจังหวัดมีดังนี้

1. เป็นพื้นที่สามารถจัดตั้งอุตสาหกรรมประเภทคลังน้ำมัน
2. ไม่เป็นพื้นที่ชุมชนหนาแน่น ซึ่งอาจจะเป็นอันตรายต่อประชาชนในกรณีฉุกเฉิน
3. เป็นพื้นที่ที่มีสาธารณูปโภคพื้นฐานเช่น ถนน ระบบประปา ไฟฟ้า โทรศัพท์ เป็นต้น

โดยผลที่ได้คือทางเลือกในแต่ละจังหวัดตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ทางเลือกในแต่ละจังหวัด

| จังหวัด    | สระบุรี               |                        | ลำปาง           |                    |                     | ขอนแก่น            |                   |                    |
|------------|-----------------------|------------------------|-----------------|--------------------|---------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| ทางเลือก   | S1                    | S2                     | L1              | L2                 | L3                  | K1                 | K2                | K3                 |
| รายละเอียด | ค.หัวปลวก<br>อ.สท.ให้ | ค.ตาอ.เสือ<br>อ.สท.กอย | ค.กา<br>อ.สท.คา | ค.แม่ทะ<br>อ.แม่ทะ | ค.แม่ทะ<br>อ.สบปราบ | ค.เมือง<br>อ.เมือง | ค.ระดั<br>อ.เมือง | ค.กัน<br>อ.บ้านไผ่ |

### 4.2 ปัจจัยที่ใช้ในการเลือกทำเลที่ตั้งในแต่ละจังหวัด

จากผลการศึกษาปัจจัยที่ใช้ในการเลือกทำเลที่ตั้งคลังน้ำมันของบริษัทที่ปรึกษาผู้เชี่ยวชาญทำให้ได้ปัจจัยต่างๆ โดยแบ่งเป็นปัจจัยเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพดังนี้

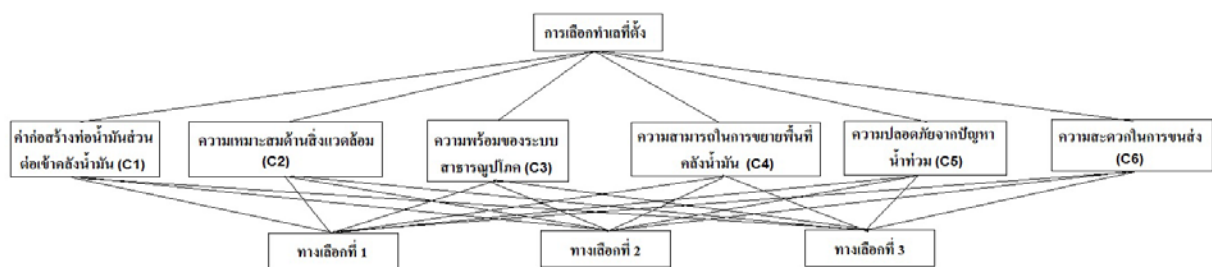
**ปัจจัยเชิงปริมาณ**

1. ค่าก่อสร้างท่อน้ำมันส่วนต่อเข้าคลังน้ำมัน

**ปัจจัยเชิงคุณภาพ**

1. ความเหมาะสมด้านสิ่งแวดล้อม
2. ความพร้อมของระบบสาธารณูปโภค
3. ความสามารถในการขยายพื้นที่คลังน้ำมัน
4. ความปลอดภัยจากปัญหาน้ำท่วม
5. ความสะดวกในการขนส่ง

โดยใช้กระบวนการตัดสินใจลำดับเชิงวิเคราะห์ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนภูมิลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์สำหรับการเลือกทำเลที่ตั้งในแต่ละจังหวัด

ตารางที่ 5 ค่าน้ำหนักของปัจจัย

| ปัจจัยในการประเมิน | C1   | C2   | C3    | C4   | C5   | C6   | ค่าน้ำหนัก |
|--------------------|------|------|-------|------|------|------|------------|
| C1                 | 1.00 | 0.19 | 0.11  | 0.28 | 0.13 | 1.00 | 0.160      |
| C2                 | 5.16 | 1.00 | 0.32  | 0.17 | 0.35 | 1.67 | 0.176      |
| C3                 | 8.91 | 3.11 | 1.00  | 0.12 | 0.07 | 0.82 | 0.272      |
| C4                 | 3.57 | 6.03 | 8.12  | 1.00 | 0.16 | 0.96 | 0.107      |
| C5                 | 7.69 | 2.88 | 13.81 | 6.33 | 1.00 | 1.44 | 0.117      |
| C6                 | 1.00 | 0.60 | 1.22  | 1.04 | 0.69 | 1.00 | 0.168      |
| CR = 0.06          |      |      |       |      |      |      |            |

**4.3 ประเมินเพื่อตัดสินใจเลือกทำเลที่ตั้งในแต่ละจังหวัด**

ปัจจัยทั้ง 6 จะใช้การประเมินโดยให้ผู้เชี่ยวชาญ 6 คน โดยมีความเชี่ยวชาญด้านสิ่งแวดล้อม ด้านการขนส่ง และด้านวิศวกรรม เพื่อหาค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัย ตามกระบวนการตัดสินใจลำดับเชิงวิเคราะห์ดังตารางที่ 5 จากนั้นจะนำเฉพาะปัจจัยเชิงคุณภาพให้ผู้เชี่ยวชาญประเมินเทียบกับทางเลือกในแต่ละจังหวัดดังตัวอย่างตารางที่ 6 และผลลัพธ์การวิเคราะห์ในตารางที่ 7

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบทางเลือกจังหวัดลำปางสำหรับ

ปัจจัยความเหมาะสมด้านสิ่งแวดล้อม

| ปัจจัย                     |    | จังหวัดลำปาง |       |       | ค่าน้ำหนัก |
|----------------------------|----|--------------|-------|-------|------------|
| ความเหมาะสมด้านสิ่งแวดล้อม |    | L1           | L2    | L3    |            |
| จังหวัดลำปาง               | L1 | 1.000        | 1.561 | 0.736 | 0.342      |
|                            | L2 | 0.641        | 1.000 | 0.672 | 0.247      |
|                            | L3 | 1.358        | 1.488 | 1.000 | 0.412      |
| CR = 0.01                  |    |              |       |       |            |

ตารางที่ 7 ผลลัพธ์การคำนวณค่าน้ำหนักทางเลือกทั้ง 3 จังหวัด

| ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจ | ค่าน้ำหนักของปัจจัย | ค่าน้ำหนักของทางเลือก |       |       |       |       |         |       |       |       | ผลลัพธ์การตัดสินใจเลือก |       |       |       |       |         |       |       |  |
|-----------------------------|---------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|--|
|                             |                     | สระบุรี               |       | ลำปาง |       |       | ขอนแก่น |       |       |       | สระบุรี                 |       | ลำปาง |       |       | ขอนแก่น |       |       |  |
|                             |                     | S1                    | S2    | L1    | L2    | L3    | K1      | K2    | K3    | S1    | S2                      | L1    | L2    | L3    | K1    | K2      | K3    |       |  |
| C1                          | 0.160               | 0.306                 | 0.694 | 0.006 | 0.003 | 0.991 | 0.193   | 0.164 | 0.643 | 0.049 | 0.111                   | 0.001 | 0.001 | 0.159 | 0.031 | 0.026   | 0.103 |       |  |
| C2                          | 0.176               | 0.833                 | 0.167 | 0.342 | 0.247 | 0.412 | 0.145   | 0.251 | 0.604 | 0.147 | 0.029                   | 0.060 | 0.043 | 0.073 | 0.035 | 0.044   | 0.106 |       |  |
| C3                          | 0.272               | 0.438                 | 0.563 | 0.575 | 0.099 | 0.327 | 0.538   | 0.335 | 0.127 | 0.119 | 0.153                   | 0.156 | 0.027 | 0.089 | 0.146 | 0.091   | 0.035 |       |  |
| C4                          | 0.107               | 0.850                 | 0.150 | 0.099 | 0.432 | 0.469 | 0.110   | 0.284 | 0.606 | 0.091 | 0.016                   | 0.011 | 0.046 | 0.050 | 0.012 | 0.030   | 0.065 |       |  |
| C5                          | 0.117               | 0.363                 | 0.637 | 0.231 | 0.644 | 0.124 | 0.270   | 0.130 | 0.600 | 0.042 | 0.074                   | 0.027 | 0.075 | 0.015 | 0.032 | 0.015   | 0.070 |       |  |
| C6                          | 0.168               | 0.371                 | 0.629 | 0.631 | 0.111 | 0.258 | 0.617   | 0.278 | 0.105 | 0.062 | 0.106                   | 0.106 | 0.019 | 0.043 | 0.104 | 0.047   | 0.018 |       |  |
|                             |                     | รวม                   |       |       |       |       |         |       |       |       | 0.510                   | 0.490 | 0.361 | 0.211 | 0.428 | 0.350   | 0.254 | 0.396 |  |

**4.4 กำหนดจำนวนถังและปริมาตรของถังเก็บน้ำมัน**

วิเคราะห์โดยการนำความต้องการใช้น้ำมันในแต่ละพื้นที่ แต่ที่สำคัญคือนอกเหนือจากจะใช้ข้อมูลความต้องการใช้น้ำมันแล้วยังต้องคำนึงถึงพระราชบัญญัติการค้า

น้ำมันเชื้อเพลิง พ.ศ.2543 ที่ระบุให้มีการสำรองน้ำมันร้อยละ 5-10 หรือเทียบเท่า 36 วัน โดยในกรณีคลังน้ำมันถือว่าเป็นผู้จำหน่ายกำหนดให้ใช้อัตราร้อยละ 5 ของยอดจำหน่ายในแต่ละปี โดยสรุปแล้วการตั้งคลังน้ำมันต้องรวม

ส่วนปริมาณสำรองด้วย ยกตัวอย่างคลังน้ำมันที่จังหวัดลำปางมีพื้นที่ครอบคลุมภาคเหนือตอนบน ซึ่งมีความต้องการใช้น้ำมันที่พยากรณ์ได้ดังตารางที่ 8 เราจะใช้ปริมาณที่มากที่สุดคือ 2,897 ล้านลิตร แล้วนำมาบวกปริมาณสำรองคือ  $2,897 \times 0.05 = 145$  ล้านลิตร ดังนั้นการคำนวณหาปริมาณกักเก็บน้ำมันในน้ำมันลำปางจึงใช้ค่า 3,042 ล้านลิตรต่อปี

**ตารางที่ 8** ผลพยากรณ์ความต้องการใช้น้ำมันในพื้นที่

ภาคเหนือตอนบนจนถึงปี พ.ศ. 2585

| ภาคเหนือตอนบน (หน่วย : ล้านลิตร) |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ปี พ.ศ.                          | 2556  | 2557  | 2560  | 2565  | 2570  | 2575  | 2580  | 2585  |
| เชียงใหม่                        | 442   | 433   | 477   | 542   | 620   | 709   | 808   | 903   |
| ลำพูน                            | 78    | 76    | 82    | 90    | 100   | 111   | 123   | 134   |
| ลำปาง                            | 279   | 273   | 299   | 336   | 381   | 431   | 487   | 541   |
| อุดรดิต                          | 89    | 88    | 98    | 113   | 132   | 153   | 177   | 200   |
| แพร่                             | 95    | 92    | 99    | 107   | 116   | 126   | 138   | 149   |
| น่าน                             | 82    | 80    | 87    | 97    | 110   | 123   | 139   | 154   |
| พะเยา                            | 79    | 78    | 86    | 99    | 114   | 131   | 151   | 169   |
| เชียงราย                         | 246   | 242   | 272   | 319   | 376   | 444   | 519   | 591   |
| แม่ฮ่องสอน                       | 33    | 32    | 35    | 38    | 42    | 46    | 51    | 55    |
| รวม                              | 1,425 | 1,393 | 1,534 | 1,741 | 1,990 | 2,275 | 2,592 | 2,897 |

## 5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผล

จากการวิเคราะห์การตัดสินใจเลือกทำเลที่ตั้งของคลังน้ำมันใน 3 จังหวัดได้แก่ สระบุรี ลำปาง และขอนแก่น โดยมีปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจได้แก่ ค่าก่อสร้างต่อน้ำมันส่วนต่อเข้าคลังน้ำมัน เป็นปัจจัยเชิงปริมาณ ความเหมาะสมด้านสิ่งแวดล้อม ความพร้อมของระบบสาธารณูปโภค ความสามารถในการขยายพื้นที่คลังน้ำมันความปลอดภัยจากปัญหาน้ำท่วม และความสะดวกในการขนส่ง เป็นปัจจัยเชิงคุณภาพซึ่งในแต่ละจังหวัดมีทางเลือกที่สามารถจะเป็นที่ตั้งคลังน้ำมันได้จังหวัดละ 2-3 ทางเลือก โดยผ่านกรองในเบื้องต้นโดยใช้ปัจจัยด้านกฎหมายหรือกฎระเบียบ รวมทั้งพ.ร.บ.การผังเมือง

ผลการวิเคราะห์การตัดสินใจโดยใช้วิธีลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์หรือ AHP โดยผู้เชี่ยวชาญทั้งหมด 6 คนซึ่งประกอบด้วยผู้เชี่ยวชาญด้านสิ่งแวดล้อม ด้านการขนส่ง และด้านวิศวกรรมได้ข้อสรุปว่าพื้นที่ที่มีความเหมาะสมมากที่สุดในจังหวัดสระบุรี คือ ต.หัวปลวก อ.เสนาไห้(S1) ด้วยค่าความสำคัญ 0.510 จังหวัดลำปางคือ ต.แม่กัวะ อ.สบ

ปราบ(L3) ด้วยค่าความสำคัญ0.428 และจังหวัดขอนแก่น คือ ต.หินตั้ง อ.บ้านไผ่(K3) ด้วยค่าความสำคัญ 0.396

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากทำเลที่ตั้งทางเลือกแต่ละจังหวัดค่อนข้างมีความแตกต่างกันไม่มากนัก ทั้งนี้หากต้องการผลลัพธ์ที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้นจะต้องทำการศึกษาข้อมูลเชิงลึกของในแต่ละพื้นที่ เพื่อให้การตัดสินใจมีความชัดเจนและแม่นยำมากยิ่งขึ้น

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] O. Wanichdee, S. Tantikulchai, and S. Hongthong. (2002) "Location selection" [Online] information on: <http://www.novabizz.com/Business/ทำเลที่ตั้ง.htm>
- [2] G. Advisors "The Site Selection Process" [Online] information on: <http://greyhill.com/site-selection-process>
- [3] T. L. Saaty, "How to make a decision : The Analytic Hierarchy Process," European Journal of Operational Research, vol. 48, pp. 9-26, September 1990.
- [4] J. L. García, A. Alvarado, J. Blanco, E. Jiménez, A. A. Maldonado, and G. Cortés, "Multi-attribute evaluation and selection of sites for agricultural product warehouses based on an Analytic Hierarchy Process," Sciencedirect Computers and Electronics in Agriculture, vol. 100, pp. 60-69, January 2014.
- [5] N. Pothikun, "Applying analytic hierarchy process (AHP) to warehouse location selection," Master of Science, Graduate School, Chulalongkorn University, 2005.
- [6] J. Korpela and M. Tuominen, "A decision aid in warehouse site selection," International Journal of Production Economics, vol. 45, pp. 169-180, August 1996.
- [7] N. Nadee, "Site Selection for Factory by Using AHP and Break-Even Analysis," Master of Business Administration, University of Thai Chamber of Commerce, 2012.

# แรงถอนวิบัติแนวตั้งของฐานรากปล่องแบบระนาบในดินเหนียว

## Ultimate Vertical Pullout Load of Planar Caisson in Clay

สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์ บุญชัย อุกฤษฏชน

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์หาแรงถอนวิบัติแนวตั้งของฐานรากปล่องแบบระนาบในดินเหนียว วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ของการวิเคราะห์ลิมิตแบบระนาบความเครียด 2 มิติถูกนำมาใช้วิเคราะห์การวิบัติของปัญหานี้ ฐานรากปล่องแบบระนาบมีความกว้าง (B) และความลึก (L) สำหรับการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์ของการวิเคราะห์ลิมิต ดินเหนียวถูกจำลองเป็นอีลิเมนต์แบบปริมาตรที่มีคุณสมบัติของวัสดุแบบมอร์-คูลอมบ์ในสภาพไม่ระบายน้ำ ฐานรากปล่องแบบระนาบถูกจำลองเป็นอีลิเมนต์แบบแผ่นที่มีคุณสมบัติของวัสดุแบบอีลาสติก ชั้นส่วนเชื่อมต่อระหว่างดินและโครงสร้างถูกใช้ตลอดความยาวระหว่างผิวสัมผัสของดินและฐานราก แฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างดินและเสาเข็ม ( $\alpha$ ) มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยเพิ่มขึ้นทีละ 0.25 ผลที่ได้นำเสนอในรูปของตัวแปรไร้มิติระหว่างแรงถอนวิบัติแนวตั้ง ( $P/p((B/2)+L)^2$ ) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว (B/L) และแฟกเตอร์การยึดเกาะ ( $\alpha$ ) โดย  $p$  คืออัตราการเพิ่มของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่เพิ่มแบบคงที่ตามความลึก

**คำสำคัญ:** ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ระนาบความเครียด ไฟไนต์อีลิเมนต์ของการวิเคราะห์ลิมิต ฐานรากปล่อง

### Abstract

This paper presents ultimate vertical pullout load of planar caisson in clay. The two dimensional plane strain finite element limit analysis is employed to determine the stability of this problem. The planar caissons have the width (B) and the depth (L). For finite element limit analysis, the clay is modelled as the volume element with the Mohr-Coulomb material in an undrained condition. The planar caisson is modelled as the plate element with the elastic material. Soil-structure interface are used around the contacted length between caisson and clay. Adhesion factor between clay and caisson ( $\alpha$ ) is also studied in the range of 0 – 1 with increment of 0.25. The results of analyses are presented in terms of ratio of ultimate vertical pullout load ( $P/p((B/2)+L)^2$ ) as a function of dimensionless parameters which are the ratio of width and depth (B/L) and the adhesion factor ( $\alpha$ ), where  $p$  is the rate of linear increase in undrained shear strength with depth.

**Keywords:** Numerical Analysis, Plane Strain, Finite Element Limit Analysis, Planar Caisson

## 1. บทนำ

ฐานรากปล่องแบบระนาบ (Planar Caisson) เป็นฐานรากแบบเหล็กที่ถูกปล่อยให้จมลงในดินด้วยน้ำหนักตัวมันเอง ฐานรากนี้นิยมถูกใช้เป็นฐานรากของโครงสร้างขนาดใหญ่ หรือโครงสร้างพวกถังเก็บน้ำขนาดใหญ่ ซึ่งใช้วิธีขุดแบบธรรมดาไม่ได้ ฐานรากลักษณะนี้รับแรงจะสามารถรับแรงได้มากกว่าฐานรากแบบเสาเข็มรับแรง โดยมากโครงสร้างชนิดนี้มักจะถูกก่อสร้างใกล้ชายฝั่งทะเล เพราะเนื่องจากปัญหาเรื่องแรงดันน้ำจึงทำให้การสร้างฐานรากชนิดอื่นๆเป็นไปได้ด้วยความยากลำบาก รายละเอียดต่างๆสามารถอ่านเพิ่มเติมได้จากหนังสือปฐพีกลศาสตร์และวิศวกรรมฐานราก โดย Bowles (2001) [1]

นอกจากฐานรากนี้จะรับแรงจากโครงสร้างได้มากแล้ว แรงถอนออกจากดินของฐานรากชนิดนี้ก็เป็นเรื่องสำคัญที่มีนักวิจัยในอดีตมากมายศึกษากัน เช่นงานวิจัยของ Cauble (1996) [2] ได้ศึกษาผลการทดลองของแบบจำลองฐานรากปล่องในห้องปฏิบัติการซึ่งเป็งานวิจัยแรกๆที่ได้มีการศึกษาเรื่องพฤติกรรมของฐานรากปล่อง สำหรับงานวิจัยของฐานรากปล่องด้วยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Analysis) ยุคต้นๆก็ได้มีนักวิจัยหลายท่านเสนอไว้บ้าง เช่น Clukey และ Morrison (1993) [3] และ Geer (1996) [4] โดยทั้งสามได้ใช้วิธีที่แตกต่างกันในการวิเคราะห์พฤติกรรมของฐานรากปล่องแบบระนาบ เช่น วิธีสมดุลลิมิต (Limit Equilibrium) และวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element)

ต่อมา Ukritchon (1998) [5] ได้ใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ของการวิเคราะห์ลิมิต (Finite Element Limit Analysis) สองมิติบนระนาบความเครียด (2D Plane Stain) ในการหาผลเฉลยของแรงถอนในแนวดิ่งของฐานรากปล่องแบบระนาบในดินเหนียวใกล้ชายฝั่ง ที่มีกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ผิวดิน ( $s_u$ ) เท่ากับศูนย์ และมีอัตราการเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นของกำลังรับแรงเฉือนตามความลึก ( $p$ ) นอกเหนือจากนี้ ตัวแปรอื่นๆที่ Ukritchon (1998) [5] ใช้ในการวิเคราะห์คือตัวแปรความกว้าง ( $B$ ) และความลึก ( $L$ ) ของฐานราก รวมไปถึงตัวแปรแฟกเตอร์การยึดเกาะ ( $\alpha$ ) แต่ในงานวิจัยของ Ukritchon

(1998) [5] ได้ใช้ค่าแฟกเตอร์การยึดเกาะเท่ากับ 1 ซึ่งเป็นกรณีหยาบสมบูรณ์ (Rough Surface) แฟกเตอร์การยึดเกาะมีนิยามคือ  $\alpha = s_u/s_u$  โดย  $s_u$  คือกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ผิวสัมผัสระหว่างดินและฐานรากปล่อง ผลเฉลยของ Ukritchon (1998) [6] มีทั้งขอบเขตบน (Upper Bound) และขอบเขตล่าง (Lower Bound)

ต่อมาก็ได้มีนักวิจัยใช้วิธีการวิเคราะห์ลิมิต (Limit Analysis) หาผลเฉลยของฐานรากปล่องเอาไว้บ้าง เช่นงานวิจัยของ Aubeny และ Murff (2001, 2003, 2005) [6], [7], [8] ได้ใช้วิธีการวิเคราะห์ลิมิตของวิธีขอบเขตบนในการวิเคราะห์หาแรงวิกฤติที่เกิดจากกระทำร่วมกันบนฐานรากปล่องทรงกระบอก (Axisymmetric Caisson) โดยฐานรากรับแรงแนวดิ่งและแรงแนวราบ แต่พารามิเตอร์ที่ใช้ไม่ได้ได้ครบทุกกรณีของตัวแปรไว้มีความกว้างต่อความลึก ( $B/L$ ) ของฐานรากปล่อง

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์หาแรงถอนวิกฤติแนวดิ่งของฐานรากปล่องแบบระนาบด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ของการวิเคราะห์ลิมิต (Finite Element Limit Analysis) ทั้งขอบเขตบนและขอบเขตล่างบนระนาบความเครียด (2D Plane Stain) โดยตัวแปรไว้มิติที่ศึกษาคือตัวแปรความกว้างต่อความลึก ( $B/L$ ) ตั้งแต่ 0 ถึง  $\infty$  และแฟกเตอร์การยึดเกาะตั้งแต่ 0 ถึง 1 แฟกเตอร์การยึดเกาะมีค่าเท่ากับ 0 หมายถึงกรณีที่พื้นผิวสัมผัสเป็นแบบลื่นสมบูรณ์ (Smooth Surface) ในทางตรงกันข้าม แฟกเตอร์การยึดเกาะเท่ากับ 1 หมายถึงกรณีที่พื้นผิวสัมผัสเป็นแบบหยาบสมบูรณ์ (Rough Surface)

## 2. วิธีการวิเคราะห์และกำหนดแบบจำลองฐานรากปล่อง

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ของการวิเคราะห์ลิมิต (Finite Element Limit Analysis) OptumG2 โดย Krabbenhoft (2014) [9] ในการจำลองและวิเคราะห์หาผลเฉลยของปัญหาทั้งผลเฉลยแบบขอบเขตบน (Upper Bound) และขอบเขตล่าง (Lower Bound) ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการของทฤษฎีลิมิตพลาสติก (Plastic limit theorem) ซึ่งให้ผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำและสามารถประยุกต์ใช้กับการหาคำตอบแบบวิเคราะห์ขอบด้วยทฤษฎีขอบ

(Bound theorem) กล่าวคือ ถ้าเราสามารถจำกัดขอบเขตของคำตอบให้อยู่ในช่วงๆ หนึ่งที่แน่นอนได้ และปรับปรุงแก้ไขระบบการคำนวณไปเรื่อยๆ จนกระทั่งช่วงของคำตอบนี้เข้าใกล้กันมากที่สุด เราจะได้ผลเฉลยที่ใกล้เคียงผลเฉลยจริง (Exact solution) มากที่สุด ทฤษฎีขอบเขตแบ่งออกเป็นอีก 2 ทฤษฎีบท คือ ทฤษฎีบทขอบเขตล่าง (Lower bound theorem) และทฤษฎีบทขอบเขตบน (Upper bound theorem) โดยผลจากทฤษฎีทั้งสองนี้เองที่จะกลายมาเป็นขอบเขตของคำตอบในที่สุด

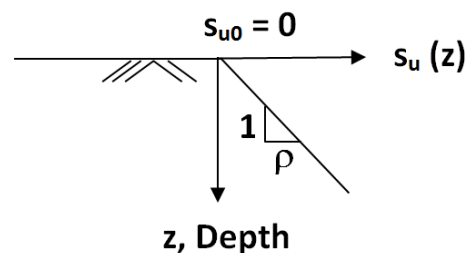
งานวิจัยนี้จำลองให้ดินเหนียวเป็นอีลิเมนต์แบบปริมาตรที่เป็นการวิบัติแบบมอร์-คูลอมบ์ ดินเหนียวมีกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ผิวดิน ( $s_{u0}$ ) = 0 ซึ่งเป็นกรณีของดินเหนียวบริเวณชายฝั่งที่มักจะมีการก่อสร้างฐานรากแบบปล่อง ดินเหนียวมีอัตราการเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นของกำลังรับแรงเฉือนตามความลึก ( $\rho$ ) ทำให้ดินเหนียวมีกำลังรับแรงเฉือนที่ความลึกใดๆ ( $s_u$ ) =  $\rho z$  ดังที่แสดงในรูปที่ 1 นอกเหนือจากนี้ ดินเหนียวยังมีอัตราส่วนโมดูลัสของยังต่อกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว ( $E/\rho L$ ) = 500 มุมเสียดทานภายใน ( $\phi$ ) =  $0^\circ$  มุมขยายตัวเชิงปริมาตร ( $\psi$ ) =  $0^\circ$  อัตราส่วนของปัวซอง ( $\nu$ ) = 0.495 ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของดินเหนียวแบบไม่ระบายน้ำหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตร หน่วยน้ำหนัก ( $\gamma$ ) ของดินเหนียวใช้  $20 \text{ kN/m}^3$  สำหรับทุกปัญหาของฐานรากปล่องที่วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ ทั้งนี้เพราะตัวแปรหน่วยน้ำหนักไม่มีผลต่อผลเฉลยของแรงถอนวิบัติแนวตั้ง

ฐานรากปล่องแบบระนาบถูกจำลองเป็นอีลิเมนต์แบบแผ่น ฐานรากปล่องมีความกว้าง ( $B$ ) และความลึก ( $L$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2 และเป็นแบบแข็งเกร็ง (Rigid) นอกเหนือจากนี้ ฐานรากแบบปล่องถูกกำหนดให้มีแรงถอนแนวตั้งที่กึ่งกลางของโครงสร้าง โดยมี  $P$  เป็นแรงถอนในแนวตั้ง

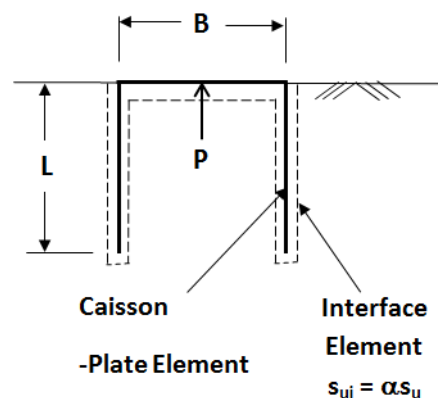
ชั้นส่วนเชื่อมต่อระหว่างดินและโครงสร้างถูกใช้ตลอดความยาวระหว่างผิวสัมผัสระหว่างฐานรากปล่องและดินเหนียว ค่าแฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างดินและฐานรากปล่อง ( $\alpha$ ) มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยเพิ่มขึ้นทีละ

0.25 แฟกเตอร์การยึดเกาะมีค่าเท่ากับศูนย์หมายถึงกรณีที่พื้นผิวสัมผัสเป็นแบบลื่นสมบูรณ์ (Smooth Surface) ในทางตรงกันข้าม แฟกเตอร์การยึดเกาะเท่ากับหนึ่งหมายถึงกรณีที่พื้นผิวสัมผัสเป็นแบบหยาบสมบูรณ์ (Rough Surface) แฟกเตอร์การยึดเกาะมีนิยามคือ  $\alpha = s_{ui}/s_u$  โดย  $s_{ui}$  คือกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ผิวสัมผัสระหว่างดินและฐานรากปล่อง นอกเหนือจากนี้ ชั้นส่วนเชื่อมต่อยังถูกกำหนดให้ผิวสัมผัสเป็นแบบสามารถมีแรงดึงสมบูรณ์ (Full Tension) อีกด้วย

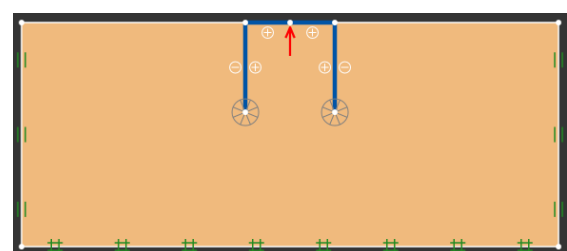
เงื่อนไขการเคลื่อนตัวและหน่วยแรงที่ขอบเขตของงานวิจัยนี้คือขอบล่างของแบบจำลองไม่มีการเคลื่อนที่ทั้งแนวราบและแนวตั้ง ขอบซ้ายและขอบขวาไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวราบโดยรายละเอียดแสดงอยู่ในรูปที่ 3



รูปที่ 1 กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวบริเวณชายฝั่ง



รูปที่ 2 ปัญหาแรงถอนวิบัติของฐานรากแบบปล่อง

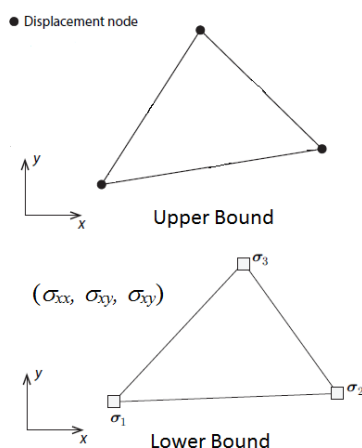


รูปที่ 3 แบบจำลองฐานรากแบบปล่องด้วยโปรแกรม

OptumG2



แบบจำลองเป็นแบบระนาบความเครียด (Plane Strain) ชิ้นส่วนดินของโครงข่ายไฟไนต์อีลิเมนต์ของขอบเขตล่างเป็นชิ้นส่วน (Element) รูปสามเหลี่ยมแบบมี 3 จุดต่อของความเค้นประสิทธิภาพ (Nodal Effective Stresses) ส่วนขอบเขตบนมีชิ้นส่วนรูปสามเหลี่ยมแบบมี 3 จุดต่อความเค้น (Stress Node) ที่มุมของชิ้นส่วน และมี 3 จุดต่อการเคลื่อนตัว (Displacement Node) รอบๆ ชิ้นส่วน ดังที่แสดงในภาพที่ 4 นอกเหนือจากนี้ โปรแกรม OptumG2 ยังมีฟังก์ชันพิเศษคือการที่แบบจำลองสามารถเพิ่มจำนวนชิ้นส่วนหรือพัฒนาโครงข่าย (Adaptive Mesh) ด้วยตัวเองได้ซึ่งสามารถทำให้ผลเฉลยของปัญหามีความเข้าใกล้ผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) มากยิ่งขึ้น โคนงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้แบบจำลองพัฒนาโครงข่ายทั้งหมด 5 รอบต่อการวิเคราะห์หาผลเฉลยของ 1 ปัญหา โดยฟังก์ชันนี้จะเพิ่มจำนวนชิ้นส่วนในพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเค้นและความเครียดสูง หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าพื้นที่ประสิทธิภาพ (Effective Area) เช่น ตรงตำแหน่งที่เกิดเส้นการวิบัติ (Slip-Line Field) เป็นต้น ผลเฉลยทุกค่าในงานวิจัยนี้ถูกตั้งค่าให้มีชิ้นส่วนเริ่มต้นที่ 5000 ชิ้น และแบบจำลองจะพัฒนาโครงข่ายไปเรื่อยๆ ทั้งหมด 5 รอบ ซึ่งจะมีการเพิ่มจำนวนของชิ้นส่วนไปได้ถึง 10000 ชิ้นส่วนหลังจากการพัฒนาโครงข่ายครั้งสุดท้าย



รูปที่ 4 ชิ้นส่วนสำหรับการวิเคราะห์ขอบเขตบนและ

ขอบเขตล่างใน โปรแกรม OptumG2

ตัวแปรป้อนเข้าสำหรับการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์ของการวิเคราะห์หาลิมิตมีดังนี้

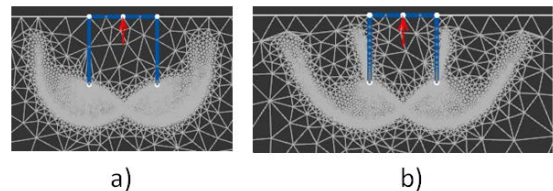
1. อัตราส่วนความลึกต่อความกว้างของฐานรากแบบปล่อง ( $L/B$ ) = 0, 2.5, 5, 0.75, 1 และ ( $B/L$ ) = 0, 2.5, 5, 0.75, 1

2. แฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างดินและเสาเข็ม ( $\alpha$ ) = 0, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1

ผลเฉลยแบบตัวแปรไร้มิติที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ของการวิเคราะห์หาลิมิตคือ  $P/P((B/2)+L)^2$

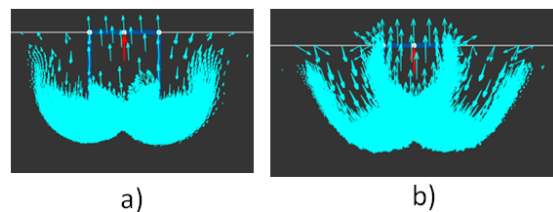
### 3. ผลการวิเคราะห์

รูปที่ 5 แสดงผลการพัฒนาโครงข่าย (Adaptive Mesh) ครั้งสุดท้ายของฐานรากปล่องแบบระนาบที่มี  $L/B = 1$  เปรียบเทียบระหว่างสองกรณีคือ  $\alpha = 0$  และ 1 หลังจากการพัฒนาโครงข่ายครั้งที่ 5 จำนวนชิ้นส่วน (Element) ของแบบจำลองจะถูกเพิ่มจำนวนในพื้นที่ประสิทธิภาพ (Effective Area) หรือตรงส่วนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของความเค้นเฉือนสูง จากรูปจะเห็นว่าที่  $\alpha = 0$  มีพื้นที่วิบัติจะขยายออกจากส่วนกึ่งกลางด้านล่างของฐานรากปล่องไปเรื่อยๆ จนเกือบแตะผิวดินซึ่งมีลักษณะคล้ายใบพัดและสัมผัสกับขาทั้งสองข้างของฐานราก แต่ที่  $\alpha = 1$  จะมีลักษณะแตกต่างเล็กน้อย โดยพื้นที่วิบัติจะมีลักษณะกว้างกว่าดังที่แสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การพัฒนาโครงข่ายของกรณี  $L/B = 1$ : a)  $\alpha = 0$ ,

b)  $\alpha = 1$



รูปที่ 6 เวกเตอร์การเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้นของกรณี  $L/B = 1$ :

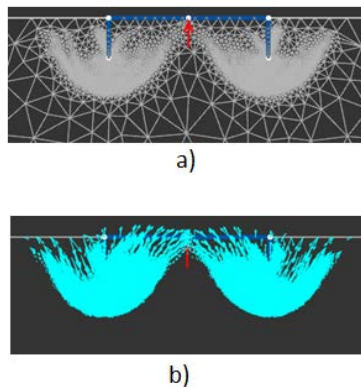
a)  $\alpha = 0$ , b)  $\alpha = 1$

รูปที่ 6 แสดงเวกเตอร์การเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้น (Total Incremental Vector) ของกรณี  $L/B = 1$  เปรียบเทียบระหว่างสองกรณีคือ  $\alpha = 0$  และ 1 เช่นเดียวกัน จากรูป

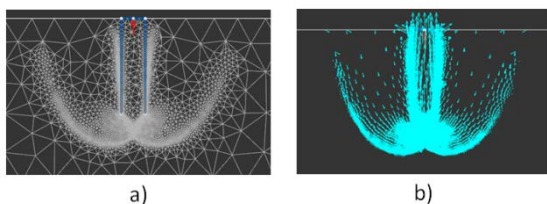


พบว่าเวกเตอร์การเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้นมีลักษณะเดียวกันกับการพัฒนาโครงข่ายในรูปที่ 5

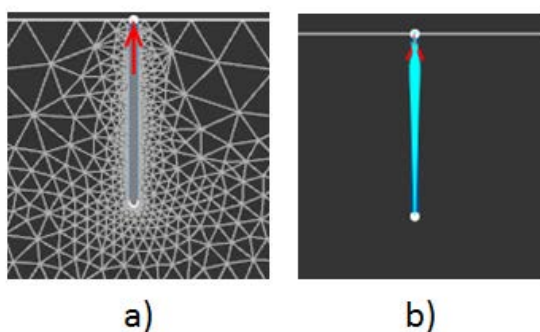
รูปที่ 7, 8, 9 แสดงการพัฒนาโครงข่ายและเวกเตอร์การเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้นของกรณี  $L/B = 0.25$ ,  $B/L = 0.25$  และ  $B/L = 0$  ตามลำดับ โดยทั้งสามรูปคือกรณี  $\alpha = 1$  จากรูปพบว่าเวกเตอร์การเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้นและการพัฒนาโครงข่ายมีลักษณะจะมีความแตกต่างกันไปตามความกว้างและความลึกซึ่งแปรผันกับค่า  $B$  และ  $L$  ของแบบจำลอง สำหรับกรณี  $B/L = 0$  พบว่าเวกเตอร์การเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้นได้เกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับฐานรากเท่านั้น ไม่มีการแผ่ขยายไปบริเวณข้างๆ เหมือนกับฐานรากปล่องขนาดอื่นๆ



รูปที่ 7 กรณี  $L/B = 0.25$ : a) การพัฒนาโครงข่าย, b) เวกเตอร์การเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้น

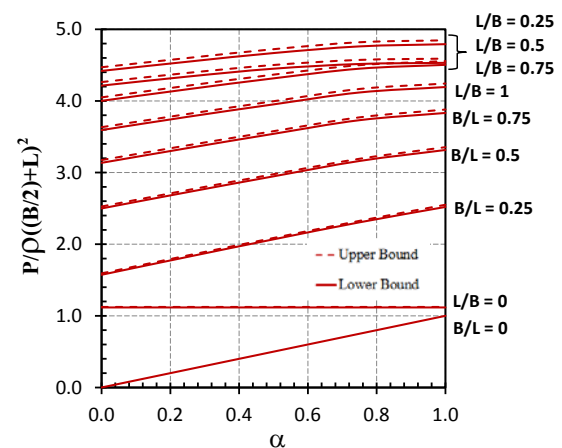


รูปที่ 8 กรณี  $B/L = 0.25$ : a) การพัฒนาโครงข่าย, b) เวกเตอร์การเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 9 กรณี  $B/L = 0$ : a) การพัฒนาโครงข่าย, b) เวกเตอร์การเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้น

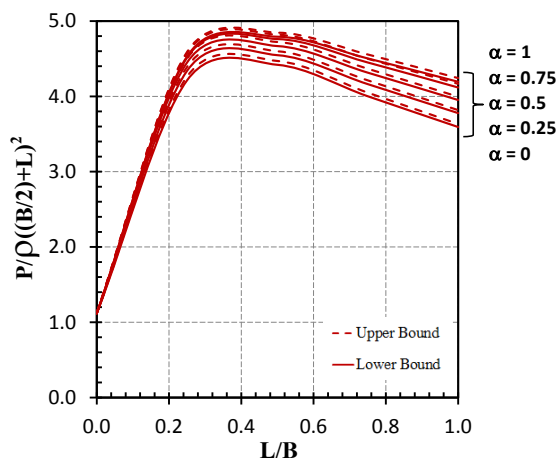
รูปที่ 10 แสดงผลเฉลยจากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ของการวิเคราะห์หาลิมิต ด้วยโปรแกรม Optum G2 ผลเฉลยที่ได้คือความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติของอัตราส่วนแรงถอนวิบัติแนวตั้ง,  $P/p((B/2)+L)^2$  กับแฟกเตอร์การบิดเกาะ,  $\alpha$  ตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยกราฟในรูปจะแบ่งเป็นสองแบบคือแบบผลเฉลยของขอบเขตบนจะเป็นเส้นประ ส่วนผลเฉลยของขอบเขตล่างจะเป็นเส้นทึบ จากรูปจะเห็นได้ว่าขอบเขตบนและขอบเขตล่างมีความใกล้เคียงกันมากจนเกือบจะเป็นเส้นเดียวกันซึ่งแสดงว่าผลเฉลยที่ได้มีค่าใกล้เคียงผลเฉลยแม่นยำตรงมาก เส้นต่างๆในรูปที่ 10 มีอัตราส่วนความกว้างต่อความลึก,  $L/B$  แตกต่างกัน โดยเส้นบนสุดมีค่า  $L/B = 0.25$  และเส้นล่างสุดมีค่า  $B/L = 0$  ซึ่งเส้นล่างสุดเป็นกรณีที่ไม่มีค่าความกว้างหรือกรณีที่ฐานรากมีลักษณะเป็นแผ่น สำหรับกรณีที่  $L/B = 0$  เป็นกรณีที่ฐานรากปล่องไม่มีความลึกโดยจะมีลักษณะเป็นแผ่นวางอยู่บนดินเหนียวและค่าแฟกเตอร์การบิดเกาะไม่มีผลต่อกรณีนี้ ทำให้กรณีนี้มีค่า  $P/p((B/2)+L)^2$  เพียงค่าเดียวคือ 1.12 (เฉลี่ยจากขอบเขตบนและขอบเขตล่าง) นอกเหนือจากนี้ เมื่อพิจารณาจากเส้นทุกเส้นในรูปที่ 10 พบว่าค่า  $P/p((B/2)+L)^2$  จะเพิ่มขึ้นตามค่า  $\alpha$  ที่เพิ่มขึ้น



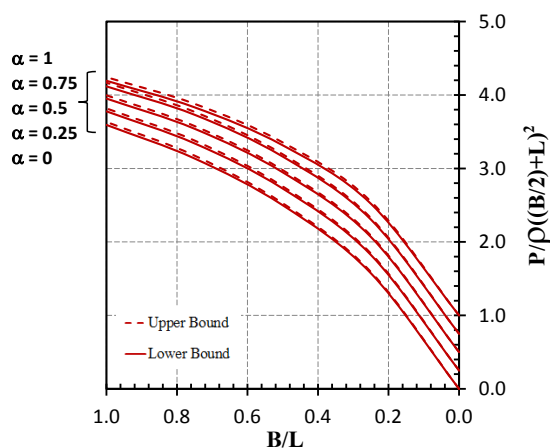
รูปที่ 10 ผลเฉลยอัตราส่วนแรงถอนวิบัติแนวตั้งที่  $\alpha = 0 - 1$

รูปที่ 11 ถึง 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $P/p((B/2)+L)^2$  กับ  $L/B$  ตั้งแต่ 0 ถึง 1 และ  $B/L = 1$  ถึง 0 ตามลำดับ โดยเส้นบนสุดของรูปทั้งสองคือกรณีที่  $\alpha = 1$  และเส้นล่างสุดคือกรณีที่  $\alpha = 0$  จากรูปทั้งสองพบว่าผลเฉลยที่ได้มีความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นกับอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว สำหรับกรณีที่ค่า

$P/\rho((B/2)+L)^2$  มากที่สุดคือตรงที่ค่า  $L/B = 0.25$  และค่าที่น้อยที่สุดคือกรณี  $B/L = 0$  และ  $\alpha = 0$  โดยผลเฉลยที่ได้ก็จะมีค่าเท่ากับ 0 เช่นเดียวกัน



รูปที่ 11 ผลเฉลยอัตราส่วนแรงถอนวิบัติแนวตั้งที่  $L/B = 0 - 1$



รูปที่ 12 ผลเฉลยอัตราส่วนแรงถอนวิบัติแนวตั้งที่  $B/L = 1 - 0$

#### 4. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์หาแรงถอนวิบัติแนวตั้งของฐานรากปล่องแบบระนาบ (Planar Caisson) ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ของการวิเคราะห์ลิมิต (Finite Element Limit Analysis) ทั้งขอบเขตบนและขอบเขตล่างบนระนาบความเครียด (2D Plane Strain) จากผลการศึกษาพบว่าตัวแปรไร้มิติของแรงถอนวิบัติแนวตั้ง ( $P/\rho((B/2)+L)^2$ ) ขึ้นอยู่กับตัวแปรต่อไปนี้

1. ตัวแปรไร้มิติความกว้างต่อความลึก ( $B/L$ )
2. แฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างฐานรากและดินเหนียว ( $\alpha$ )

จากผลเฉลยที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่า เมื่อ  $\alpha$  มีค่าเพิ่มขึ้น ค่า  $P/\rho((B/2)+L)^2$  ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในทำนองเดียวกัน เมื่อ  $B/L$  เพิ่มขึ้น ค่า  $P/\rho((B/2)+L)^2$  ก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงที่  $B/L = 4$  หรือ  $L/B = 0.25$  จะเป็นตำแหน่งที่ค่า  $P/\rho((B/2)+L)^2$  มีค่ามากที่สุด หลังจากนั้นเมื่อค่า  $B/L$  เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่า  $\infty$  พบว่าค่า ( $P/\rho((B/2)+L)^2$ ) จะลดลงเรื่อยๆ อย่างรวดเร็วและที่ตำแหน่ง  $B/L = \infty$  ค่า  $\alpha$  จะไม่มีผลต่อ  $P/\rho((B/2)+L)^2$  ซึ่งมีค่าคงที่เท่ากับ 1.12

#### 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. E. Bowles, "Foundation Analysis and Design, 5th ed.", McGraw-Hill, USA, 2001.
- [2] D.F. Cauble. "Experimental Measurements for a Model Suction Caisson" PhD Thesis, MIT, 1996.
- [3] E.C. Clukey, M.J. Morrison. "a Centrifuge and Analytical study to Evaluate Suction Caissons for TLP Applications in Gulf of Mexico", Design and Performance of Deep Foundation, ASCE, 141-156, 1993.
- [4] M. Geer. "Analysis of Pile and Suction Caisson Behavior in Axial Loading". PhD Thesis, MIT, USA, 1996.
- [5] B. Ukritchon "Application of Numerical Limit Analyses for Undrained Stability Problems in Clay". ScD Thesis, MIT, USA, 1998.
- [6] C.P. Aubeny, J.D. Murff, S.K. Moon, "Lateral Undrained Resistance of Suction Caisson Anchors" International Journal of Offshore and Polar Engineering Vol. 11, No. 3, 2001
- [7] C.P. Aubeny, S.W. Han, J.D. Murff "Inclined Load Capacity of Suction Caissons". Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech, 27:1235-1254, 2003.
- [8] C.P. Aubeny, J.D. Murff, "Simplified Limit Solutions for the Capacity of Suction Anchors under Undrained Conditions" Ocean Engineering 32. 864-877. 2005.
- [9] K. Krabbenhoft, A. Lyamin, J. Krabbenhoft. "Optum Computational Engineering Version 1.14: Manual", OptumG2 Company, 2014.

# การออกแบบหน้าตัดที่เหมาะสมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก สี่เหลี่ยมผืนผ้ารับแรงดัดสองทางด้วยวิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์

## Optimum Design of Reinforced Concrete Biaxial Bending Rectangular Column using Artificial Bee Colony Algorithm

อศัญญ์ ทาภา เรืองรุชดี ชีระโรจน์

สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์สำหรับการออกแบบที่เหมาะสมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ารับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดสองทาง ซึ่งวิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ถูกพัฒนาโดยใช้โปรแกรม Microsoft visual basic 6 และตรวจสอบผลการออกแบบหน้าตัดเสาโดยใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 วิธีกำลังและทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ให้มีจำนวนรอบการทำงานที่เหมาะสมสำหรับออกแบบหน้าตัดเสาที่ประหยัด ตัวอย่างทดสอบเลือกใช้ 2 ตัวอย่างที่มีน้ำหนักกระทำได้และระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่ต่างกัน จากผลการศึกษาพบว่า ขั้นตอนวิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์สามารถประยุกต์ใช้กับการออกแบบที่เหมาะสมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดสองทางได้และมีเร็วกว่าอัลกอริทึมจำลองการหลออบเหนียว

**คำสำคัญ :** การออกแบบที่เหมาะสม เสารับแรงดัดสองทาง วิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์

### Abstract

This research presents the application of artificial bee colony algorithm for optimum cross-section design of reinforced concrete biaxial rectangular column. An artificial bee colony algorithm was developed by Microsoft visual basic 6 to design the reinforced concrete column and verified cross-section design by EIT 1008-38 strength design method standard. The parameters of artificial bee colony algorithm were adjusted to obtain the optimal iteration for saving cost of column design. Two examples were selected that various define different applied load and concrete covering. The result showed that the artificial bee colony algorithm can be apply for optimum design of biaxial reinforced concrete rectangular column and faster than that of the simulated annealing algorithm.

**Keywords :** Optimum design, Biaxial bending column, Artificial bee colony algorithm

## 1. บทนำ

วิธียนานิมฝูงประดิษฐ์ (Artificial bee colony algorithm : ABC) เป็นระบบปัญญาประดิษฐ์ใหม่ชนิดหนึ่ง ซึ่งถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Karaboga [1] ในปี ค.ศ. 2005 ทดลองใช้วิธียนานิมฝูงประดิษฐ์ในการแก้ปัญหาค่าตอบที่เหมาะสมของ LNCS (Lecture notes in computer science) ซึ่งพบว่า วิธียนานิมฝูงประดิษฐ์สามารถแก้ไขปัญหาล NCS ได้เป็นอย่างดี จากนั้น Karaboga ทดสอบวิธียนานิมฝูงประดิษฐ์อีกครั้งเพื่อแก้ปัญหาเชิงตัวเลขที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์หลายตัวแปร (Multi objective functions problem) [2] และเปรียบเทียบผลกับอัลกอริทึมแบบกลุ่มที่ประกอบด้วย อัลกอริทึมวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (Differential evolution : DE) [3] อัลกอริทึมฝูงอนุภาค อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมและอัลกอริทึมเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary algorithm : EA) [4] จากผลการทดสอบพบว่า วิธียนานิมฝูงประดิษฐ์สามารถแก้ไขปัญหาล NCS ได้ดีกว่าทุกอัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบเมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวิธียนานิมฝูงประดิษฐ์ที่เหมาะสม

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการประยุกต์ใช้วิธียนานิมฝูงประดิษฐ์สำหรับออกแบบเสาต้นคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เหมาะสมโดยใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 วิธีกำลัง [5] เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของวิธียนานิมฝูงประดิษฐ์โดยเปรียบเทียบกับวิธีการออกแบบด้วยอัลกอริทึมจำลองการหล่อบเหนียว (Simulated annealing algorithm : SA)

## 2. วิธียนานิมฝูงประดิษฐ์

วิธียนานิมฝูงประดิษฐ์หรือ ABC คือขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหาค่าที่เหมาะสมสำหรับค่าสูงสุดหรือค่าต่ำสุดตามเงื่อนไขที่กำหนดด้วยวิธีการสุ่มค่าตอบที่เป็นไปได้เพื่อให้ได้คำตอบที่ต้องการ วิธีนี้ได้เลียนแบบพฤติกรรมกรรมการออกหาอาหารของฝูงผึ้ง ที่แบ่งการทำงานออกเป็น 3 กลุ่ม คือ ผึ้งผู้ทำงาน (Employed bees) ผึ้งผู้สำรวจ (Onlooker bees) และผึ้งสอดแนม (Scout bees) โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. เริ่มต้นด้วยการสร้างฟังก์ชันงานตามจำนวนที่กำหนดโดยใช้สมการที่ (1) หลังจากนั้นเปลี่ยนฟังก์ชันงานทุกตัวให้กลายเป็นฟังก์ชันสำรวจ

$$x_{ij} = x_{\min j} + \text{rand}[0,1](x_{\max j} - x_{\min j}) \quad (1)$$

เมื่อ  $j = 1, 2, \dots, D$  และ  $i = 1, 2, \dots, N_s$   $x_{\max}$  และ  $x_{\min}$  คือขอบเขตบนและขอบเขตล่างของตัวแปรออกแบบ  $j$  หลังจากการสร้างฟังก์ชันเริ่มต้นแล้ว ฟังก์ชันทุกตัวจะถูกประเมินด้วยฟังก์ชันความเหมาะสม

2. สร้างแหล่งอาหารโดยใช้สมการที่ (2) ตามจำนวนที่กำหนดและส่งฟังก์ชันสำรวจมาเก็บอาหาร

$$v_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \quad (2)$$

เมื่อ  $k = 1, 2, \dots, N_s$  และ  $j = 1, 2, \dots, D$  คือค่าสุ่มในชุดข้อมูล  $x_{kj}$  คือตัวแปรที่สุ่มมาจากฟังก์ชันตัวที่  $i$  และค่า  $\phi_{ij}$  คือค่าสุ่มที่มีค่าระหว่าง  $[-1, 1]$

3. ฟังก์ชันสำรวจจะเลือกแหล่งอาหารที่พบโดยพิจารณาจากค่าความน่าจะเป็น  $P_i$  คำนวณจากสมการที่ (3) เปรียบเทียบกับค่าสุ่ม  $P_i$  ที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ถ้าค่าที่สุ่มมีค่าน้อยกว่า ฟังก์ชันสำรวจจะนำอาหารกลับสู่รังและเปลี่ยนตัวเองเป็นฟังก์ชันและทำต่อขั้นตอนที่ 4 แต่ถ้า  $P_i$  น้อยกว่าค่าสุ่ม ให้กำหนดฟังก์ชันสำรวจเป็นฟังก์ชันสอดแนมและทำต่อขั้นตอนที่ 2

$$P_i = \frac{\text{Cost}_i(x_i)}{\sum_{i=1}^{N_s} \text{Cost}_i(x_i)} \quad (3)$$

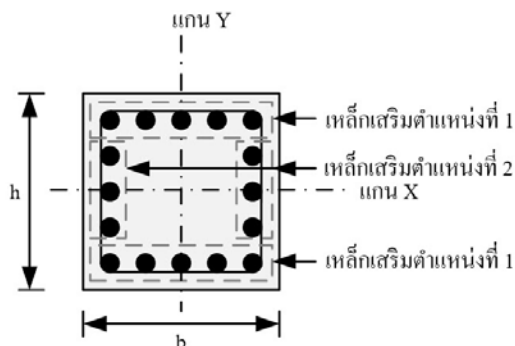
4. ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดหรือจำนวนรอบการทำงาน ถ้าครบจำนวนรอบหรือเงื่อนไขการหยุดการทำงาน ให้หยุดการทำงานทันที แต่ถ้าไม่เข้าเงื่อนไขใดเลยให้ทำต่อขั้นตอนที่ 2

## 3. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 ขอบเขตการทำงานของโปรแกรม

การวิจัยครั้งนี้ใช้คอมพิวเตอร์ภายใต้ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ 7 หน่วยประมวลผลกลาง Intel Core i3 M330 2.13GHz หน่วยความจำแรม DDR3 1.92GB และเลือกใช้โปรแกรม Microsoft visual basic 6.0 พัฒนาขั้นตอนวิธียนานิมฝูงประดิษฐ์สำหรับออกแบบหน้าตัดเสาคอนกรีตเสริม

เหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เหมาะสมโดยตารางที่ 1 แสดงขอบเขตการทำงานของโปรแกรมซึ่งประกอบด้วย กำลังอัดคอนกรีต 210, 240, 280, 300 และ 320 กก./ซม.<sup>2</sup> หน้าตัดเสามีขนาด 20 x 20 ซม. ปรับเพิ่มค่าที่ละ 5 ซม. จนถึงเสาขนาด 150 x 150 ซม. เหล็กปลอกกำหนดให้ระดับชั้น SR24 (ขนาด 6 และ 9 มม.) และ SD30 (ขนาด 10 และ 12 มม.) สำหรับเหล็กชั้นมีระดับชั้น SD30 และ SD40 ขนาด 12, 16, 20, 22, 25, 28, 32, 36 และ 40 มม. การเสริมเหล็กชั้นจะเสริมโดยรอบหน้าตัดเสา 2 ตำแหน่งที่ต่างกันดังรูปที่ 1 ตำแหน่งแรกคือตำแหน่งบนและล่าง และตำแหน่งที่สองคือด้านซ้ายและด้านขวาของหน้าตัด โดยมีเหล็กกรอรอบเหล็กชั้น 1 เส้น



รูปที่ 1 ตำแหน่งเหล็กเสริมในหน้าตัดเสา

ตารางที่ 1 ขอบเขตการใช้งานของโปรแกรม

| ตัวแปรออกแบบ           | ต่ำสุด | สูงสุด | หน่วย                |
|------------------------|--------|--------|----------------------|
| กำลังอัดคอนกรีต        | 210    | 320    | กก./ซม. <sup>2</sup> |
| กำลังของเหล็กเสริม     | 3,000  | 4,000  | กก./ซม. <sup>2</sup> |
| ด้านแคบของเสา (b)      | 20     | 150    | ซม.                  |
| ด้านลึกของเสา (h)      | 20     | 150    | ซม.                  |
| ขนาดของเหล็กชั้น       | 12     | 40     | มม.                  |
| เหล็กปลอก SR24         | 6      | 9      | มม.                  |
| เหล็กปลอก SD30, SD40   | 10     | 12     | มม.                  |
| จำนวนเหล็กตำแหน่งที่ 1 | 2      | 40     | เส้น/ด้าน            |
| จำนวนเหล็กตำแหน่งที่ 2 | 0      | 40     | เส้น/ด้าน            |

สำหรับการออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสมจำเป็นต้องกำหนดราคาวัสดุและค่าแรงเพื่อคำนวณหาราคาของโครงสร้าง ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ราคาของวัสดุผสมเสริมราคาแบบหล่อและเหล็กเสริมจากบัญชีค่าแรง/ค่าเงินการสำหรับถอดแบบคำนวณราคากลางงานก่อสร้างฉบับปรับปรุงปี พ.ศ. 2557 [6] (ตารางที่ 2) อย่างไรก็ตาม ราคาที่นำมาใช้สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามราคาในท้องถิ่นๆ

ตารางที่ 2 ราคาของวัสดุที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้

| คอนกรีตผสมเสริม (ทรงกระบอก) |           |           |                     |
|-----------------------------|-----------|-----------|---------------------|
| กำลังอัด (F <sub>c</sub> )  | ราคาวัสดุ | ค่าแรงงาน | หน่วย               |
| 210                         | 2,510     | 485       | บาท/ม. <sup>3</sup> |
| 240                         | 2,550     | 485       | บาท/ม. <sup>3</sup> |
| 280                         | 2,630     | 485       | บาท/ม. <sup>3</sup> |
| 300                         | 2,670     | 485       | บาท/ม. <sup>3</sup> |
| 320                         | 2,710     | 485       | บาท/ม. <sup>3</sup> |
| ราคาเหล็กเสริมและค่าแรง     |           |           |                     |
| เหล็กปลอก SR24              | 20        | 3         | บาท/กก.             |
| เหล็กชั้น SD30              | 23        | 2         | บาท/กก.             |
| เหล็กชั้น SD40              | 24        | 2         | บาท/กก.             |
| ราคาแบบหล่อและค่าแรง        |           |           |                     |
| แบบหล่อ                     | 400       | 115       | บาท/ม. <sup>2</sup> |

### 3.2 สมการเป้าหมาย

เป้าหมายของงานวิจัยครั้งนี้คือ การออกแบบหน้าเสา คอนกรีตเสริมเหล็กให้มีราคาประหยัดที่สุด ดังนั้น สมการเป้าหมายคือสมการที่ทำให้ผลการออกแบบและขนาดหน้าตัดมีความประหยัดที่สุดที่คำนวณจากสมการที่ 4 โดยตัวแปรที่มีผลต่อราคาของหน้าตัดเสาประกอบด้วย ปริมาณคอนกรีต ปริมาณแบบหล่อ ปริมาณเหล็กเสริมและค่าแรงงาน

$$F = \text{Min } \sum (V_c C_c + A_f C_f + W_s C_s) \quad (4)$$

เมื่อ F คือ ราคาวัสดุรวมของเสา คอนกรีตเสริมเหล็ก  $V_c$  คือ ปริมาตรของคอนกรีต  $C_c$  คือ ราคาวัสดุและค่าแรงสำหรับงานคอนกรีต  $A_f$  คือ ปริมาณแบบหล่อคอนกรีต  $C_f$  คือ ราคาแบบหล่อและค่าแรงสำหรับงานหล่อแบบ  $W_s$  คือ น้ำหนักรวมของเหล็กเสริม  $C_s$  คือ ราคาของเหล็กเสริมและค่าแรงงาน

### 3.3 ขั้นตอนการทำงานโปรแกรมวิธีอณานิคมผึ้งประดิษฐ์

โปรแกรมที่พัฒนาสำหรับออกแบบหน้าตัดเสา คอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีอณานิคมผึ้งประดิษฐ์มีขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 2 โดยในการใช้งานโปรแกรมวิธีอณานิคมผึ้งประดิษฐ์ต้องกำหนดแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดที่กระทำทั้งสองแกนก่อน ต่อมากำหนดพารามิเตอร์ให้กับวิธีอณานิคมผึ้งประดิษฐ์ซึ่งประกอบด้วย จำนวนผึ้งงาน จำนวนแหล่งอาหาร และ

จำนวนรอบสูงสุด หลังจากนั้น โปรแกรมจะเริ่มทำงานตามกระบวนการดังนี้

1) สร้างผังงานตามจำนวนที่กำหนดด้วยการสุ่มตัวแปรออกแบบทั้งหมด ( $f_c, f_y, b, h$ , ขนาดของเหล็กเสริมและปริมาณเหล็กเสริมทั้ง 2 ตำแหน่ง) โดยใช้สมการที่ 1 จากนั้นคำนวณกำลังรับน้ำหนักและราคากับผังงานทุกตัว

2) ตรวจสอบเงื่อนไขการออกแบบกับผังงานทุกตัว ถ้าผ่านเงื่อนไขให้ต่อขั้นตอนที่ 3 แต่ถ้าไม่ผ่านให้กลับไปทำขั้นตอนที่ 1

3) คำนวณราคาให้กับตัวผัง กำหนดผังให้กลายเป็นผังงานแล้วเก็บผังไว้ในโรงเพื่อรอให้ครบชุดก่อนออกหาอาหาร

4) ตรวจสอบจำนวนของผังงานภายในโรง ถ้าจำนวนผังมีครบตามที่กำหนดให้ทำต่อขั้นตอนที่ 5 แต่ถ้ายังไม่ครบให้กลับไปทำขั้นตอนที่ 1

5) คำนวณค่าโอกาสการถูกเลือกจากผังสำรวจโดยใช้สมการที่ 3 ให้กับผังงานทุกตัว

6) สร้างแหล่งอาหารใหม่โดยใช้สมการที่ 2

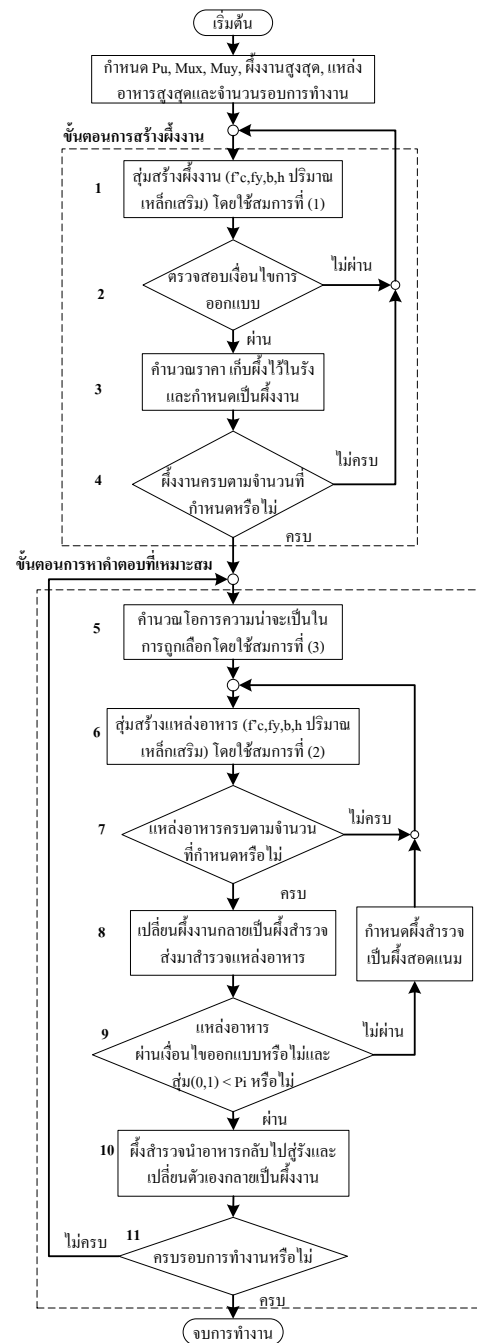
7) ตรวจสอบแหล่งอาหารมีจำนวนครบตามที่กำหนดหรือไม่ ถ้าครบแล้วให้ทำต่อขั้นตอนที่ 8 แต่ถ้ายังไม่ครบให้กลับไปทำต่อขั้นตอนที่ 6

8) เปลี่ยนผังงานให้กลายเป็นผังสอดแนมเพื่อสำรวจแหล่งอาหารใหม่

9) ผังสำรวจตรวจสอบแหล่งอาหารด้วยการสุ่มค่าระหว่าง (0,1) เปรียบเทียบกับค่า  $P_i$  ของผังงาน ตรวจสอบเงื่อนไขออกแบบและตรวจสอบราคา ถ้าค่าสุ่มน้อยกว่าค่า  $P_i$  และผ่านเงื่อนไขออกแบบและมีราคาประหยัดกว่าผังงานที่ถูกเปรียบเทียบให้ทำต่อขั้นที่ 10 แต่ถ้าไม่ผ่านเงื่อนไขเลยให้เปลี่ยนผังสำรวจกลายเป็นผังสอดแนมแล้วทำต่อขั้นตอนที่ 6

10) ผังสำรวจนำอาหารกลับมาที่โรงแทนที่ผังงานที่ถูกเลือกและเปลี่ยนตัวเองกลายเป็นผังงาน

11) ตรวจสอบจำนวนรอบการทำงาน ถ้าครบจำนวนรอบแล้วให้หยุดการทำงานทันที แต่ถ้ายังไม่ครบให้กลับไปทำต่อขั้นตอนที่ 6



รูปที่ 2 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมวิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์

### 3.4 ตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบที่เลือกใช้มาจากการงานวิจัย [7] แสดงในตารางที่ 3 จำนวน 2 ตัวอย่าง โดยจะเลือกตัวอย่างที่ 1 ทดสอบปรับค่าพารามิเตอร์ให้กับอัลกอริทึมซึ่งได้แก่การกำหนดจำนวนรอบ 100 200 และ 300 รอบ การกำหนดจำนวนผังงาน 30 50 และ 70 ตัว และการกำหนดแหล่งอาหาร 30 50 และ 70 แหล่ง หลังจากนั้น เลือกใช้พารามิเตอร์ที่ดีที่สุดทดสอบ

ออกแบบทุกตัวอย่างจำนวน 10 ครั้ง และกำหนดใช้สถิติ t-test ทดสอบวัดความต่างของราคาเฉลี่ยระหว่างกลุ่มตัวอย่างกับประชากรที่มีราคาต่ำสุดเช่นเดียวกับงานวิจัยของ [7]

ตารางที่ 3 ตัวอย่างทดสอบ [7]

| ตัวอย่าง<br>ทดสอบ | P <sub>n</sub><br>(กก.) | M <sub>n</sub><br>(กก-ม.) | M <sub>ny</sub><br>(กก-ม.) | ระยะหุ้ม<br>(ซม.) |
|-------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------|
| 1                 | 95,000                  | 9,500                     | 6,500                      | 3.5               |
| 2                 | 125,000                 | 10,000                    | 4,000                      | 5                 |

#### 4. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

ผลการทดสอบเลือกพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การกำหนดใช้จำนวนรอบที่มากขึ้นจะทำให้ได้คำตอบที่เหมาะสมแม่นยำขึ้น จึงทำให้ในงานวิจัยนี้เลือกใช้รอบการทำงาน 300 รอบ นอกจากนี้ การเลือกพนักงาน 50 ตัว ยังได้คำตอบที่เหมาะสมในทุกๆ แหล่งอาหาร และการเลือกใช้จำนวนแหล่งอาหารเท่ากับ 50 แหล่ง มีค่าเฉลี่ยที่ดีเท่ากับ 70 แหล่ง แต่ใช้เวลาน้อยกว่าที่ 300 รอบ

ตารางที่ 4 ผลทดสอบการปรับจำนวนพนักงาน แหล่งอาหาร และจำนวนรอบ

| รอบ     | 100 รอบ         |                  |                 |                  |                 |                  | 200 รอบ         |                  |                 |                  |                 |                  | 300 รอบ         |                  |                 |                  |                 |                  |
|---------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| อาหาร   | 30              |                  | 50              |                  | 70              |                  | 30              |                  | 50              |                  | 70              |                  | 30              |                  | 50              |                  | 70              |                  |
| พนักงาน | ราคา<br>(บ./ม.) | เวลา<br>(วินาที) | ราคา<br>(บ./ม.) | เวลา<br>(วินาที) | ราคา<br>(บ./ม.) | เวลา<br>(วินาที) | ราคา<br>(บ./ม.) | เวลา<br>(วินาที) | ราคา<br>(บ./ม.) | เวลา<br>(วินาที) | ราคา<br>(บ./ม.) | เวลา<br>(วินาที) | ราคา<br>(บ./ม.) | เวลา<br>(วินาที) | ราคา<br>(บ./ม.) | เวลา<br>(วินาที) | ราคา<br>(บ./ม.) | เวลา<br>(วินาที) |
| 30      | 2,374           | 0.52             | 2,207           | 0.51             | 2,430           | 0.51             | 2,071           | 0.96             | 2,195           | 0.95             | 2,356           | 0.97             | 2,076           | 1.47             | 2,013           | 1.5              | 2,013           | 1.53             |
| 50      | 2,164           | 0.69             | 2,201           | 0.69             | 2,482           | 0.74             | 2,076           | 1.3              | 2,013           | 1.35             | 2,059           | 1.35             | 2,013           | 1.91             | 2,013           | 1.98             | 2,013           | 2.04             |
| 70      | 2,076           | 0.78             | 2,079           | 0.82             | 2,076           | 0.81             | 2,013           | 1.61             | 2,013           | 1.6              | 2,013           | 1.66             | 2,013           | 2.27             | 2,013           | 2.4              | 2,013           | 2.45             |
| Min     | 2,076           | 0.52             | 2,079           | 0.51             | 2,076           | 0.51             | 2,013           | 0.96             | 2,013           | 0.95             | 2,013           | 0.97             | 2013            | 1.47             | 2013            | 1.5              | 2013            | 1.53             |
| Max     | 2,374           | 0.78             | 2,207           | 0.82             | 2,482           | 0.81             | 2,076           | 1.61             | 2,195           | 1.6              | 2,356           | 1.66             | 2076            | 2.27             | 2013            | 2.4              | 2013            | 2.45             |
| Average | 2,204           | 0.66             | 2,162           | 0.67             | 2,329           | 0.69             | 2,053           | 1.29             | 2,073           | 1.30             | 2,142           | 1.33             | 2034            | 1.88             | 2013            | 1.96             | 2013            | 2.01             |

หมายเหตุ : บ./ม. = บาท/เมตร

ผลการทดสอบกับตัวอย่างออกแบบในตารางที่ 3 เมื่อการกำหนดใช้จำนวนพนักงาน 50 ตัว จำนวนแหล่งอาหาร 50 แหล่งและจำนวนรอบการทำงาน 300 รอบ ได้ผลการทดสอบทางสถิติตัวอย่างละ 10 ครั้ง ตามตารางที่ 5 ซึ่งคำตอบที่เหมาะสมของตัวอย่างที่ 1 คือ ราคา 2,013 บาท/ม. และตัวอย่างที่ 2 คือราคา 1,854 บาท/ม. นอกจากนี้ ผลการทดสอบทางสถิติโดยใช้ t-test ขอมรับสมมติฐาน H0 ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 99 ทุกตัวอย่าง แสดงว่า ผลการทดสอบมีคำตอบที่ใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยมาก

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบทางสถิติตัวอย่างละ 10 ครั้ง

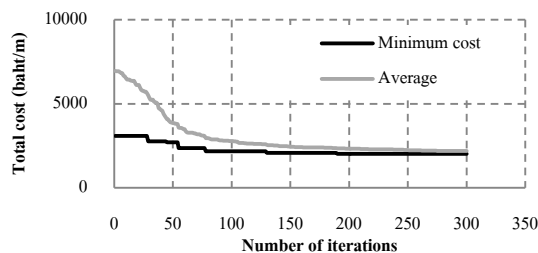
| การทดสอบทางสถิติ       | ตัวอย่างที่ 1 | ตัวอย่างที่ 2 |
|------------------------|---------------|---------------|
| ค่าเฉลี่ย              | 2,025         | 1,860         |
| ค่าต่ำสุด              | 2,013         | 1,854         |
| ค่าสูงสุด              | 2,076         | 1,880         |
| ค่าความแปรปรวน         | 25.536        | 10.8914       |
| ฐานนิยม                | 2,013         | 1,854         |
| ค่าวิกฤติ              | 2.82          | 2.82          |
| T-test                 | 1.50          | 1.80          |
| ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ | ยอมรับ H0     | ยอมรับ H0     |

จากการทดสอบกับตัวอย่างออกแบบในตารางที่ 3 ด้วย การกำหนดใช้จำนวนพนักงาน 50 ตัว จำนวนแหล่งอาหาร 50 แหล่งและจำนวนรอบการทำงาน 300 รอบ มีลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมดังรูปที่ 3 (ก-ข) ซึ่งเห็นได้ว่าเส้นกราฟค่าเฉลี่ยมีลักษณะเป็นเส้นโค้งหงายจนใกล้ถึงจุดที่พบคำตอบที่เหมาะสมจึงเปลี่ยนเป็นเส้นตรง สำหรับเส้นกราฟคำตอบที่ดีที่สุดมีลักษณะการลู่เข้าสู่ค่าต่ำสุดแบบขั้นบันไดเนื่องจากในบางรอบฝูงผึ้งไม่สามารถหาแหล่งอาหารที่ดีกว่าแหล่งอาหารเดิมได้จึงทำให้กราฟเป็นเส้นตรงในช่วงระยะเวลาหนึ่ง แต่เมื่อถึงจุดที่พบแหล่งอาหารที่ดีกว่า กราฟจึงมีลักษณะตกแบบขั้นบันได

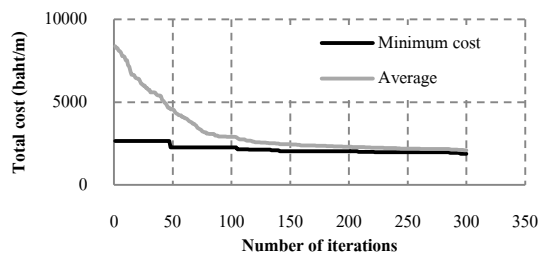
ผลการออกแบบที่ดีที่สุดตารางที่ 6 เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา [7] แสดงให้เห็นว่า วิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์สามารถประยุกต์ใช้สำหรับออกแบบหน้าตัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ารับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดสองทางได้โดยที่คำตอบที่เหมาะสมของวิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์เหมือนกับอัลกอริทึม



จำลองการหล่ออบเหนียวแต่เมื่อเปรียบเทียบกับในเรื่องของเวลาทำงานพบว่า วิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์เร็วกว่าอัลกอริทึมจำลองการหล่ออบเหนียว (SA) ประมาณ 17 วินาที



ก) รูปแบบการลู่เข้าหาคำตอบของตัวอย่างที่ 1



ข) รูปแบบการลู่เข้าหาคำตอบของตัวอย่างที่ 2

รูปที่ 3 รูปแบบการลู่เข้าคำตอบที่เหมาะสมของวิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์

ตารางที่ 6 ผลการออกแบบที่ดีที่สุดของวิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์และอัลกอริทึมจำลองการหล่ออบเหนียว

| ตัวอย่างที่                   | 1        |          | 2        |          |
|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| อัลกอริทึม                    | SA[7]    | ABC      | SA[7]    | ABC      |
| $r_c$ (กก./ชม. <sup>3</sup> ) | 320      | 320      | 320      | 320      |
| $r_f$ (กก./ชม. <sup>3</sup> ) | 4,000    | 4,000    | 4,000    | 4,000    |
| $b \times h$ (ชม.)            | 40 x 50  | 40 x 50  | 35 x 50  | 35 x 50  |
| เหล็กตำแหน่งที่ 1             | 6 – DB16 | 6 – DB16 | 6 – DB16 | 6 – DB16 |
| เหล็กตำแหน่งที่ 2             | 4 – DB16 | 4 – DB16 | 6 – DB12 | 6 – DB12 |
| เหล็กปลอก                     | RB6@0.25 | RB6@0.25 | RB6@0.25 | RB6@0.25 |
| เวลา (วินาที)                 | 19       | 2.02     | 19       | 1.96     |
| ราคา(บาท/ม.)                  | 2,013    | 2,013    | 1,854    | 1,854    |

## 5. สรุปผลการทดลอง

ผลการทดสอบสำหรับการวิจัยครั้งนี้พบว่า วิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์สามารถประยุกต์ใช้สำหรับออกแบบที่เหมาะสมสำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดสองทางได้ ด้วยการกำหนดใช้จำนวนผึ้งงาน 50 ตัวและแหล่งอาหาร 50 แหล่งที่จำนวนรอบการทำงาน 300 รอบ นอกจากนี้ ยังมีความเร็วกว่าอัลกอริทึมจำลองการหล่ออบเหนียวทั้งสองตัวอย่าง

สำหรับข้อเสนอแนะการต่อขอผลงานวิจัย ควรมีการศึกษาการประยุกต์ใช้วิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์สำหรับออกแบบที่เหมาะสมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กหลากหลายรูปแบบมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ทราบถึงข้อดีและข้อด้อยของวิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ห้องวิจัยคอนกรีตและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้การสนับสนุนในการวิจัยครั้งนี้

## 7. เอกสารอ้างอิง

### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Karaboga, "An idea based on honey bee swarm for numerical optimization," Turkey: Technical Report-TR06; 2005.
- [2] D. Karaboga and B. Basturk, "Artificial bee colony optimization algorithm for solving constrained optimization problems LNCS," Advances in soft computing-foundations of fuzzy logic and soft computing, vol.4529, pp. 789–798, 2007.
- [3] D. Karaboga and B. Basturk, "On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm," Applied soft computing, Vol. 8, pp. 687–697, 2007.
- [4] D. Karaboga and B. Akay, "A comparative study of artificial bee colony algorithm," Applied mathematics and computation, vol. 214, pp. 108–132, 2009.
- [5] Engineering institute of thailand, Standard of reinforced concrete building, strength method (E.I.T. 1008-38), 1997.
- [6] Committee of construction price, Labor account/operation for estimate and calculate price (revised edition) year 2014, Bangkok in Thailand, 2014.
- [7] A. Tapown, A. Lamom, J. wongpa and R. Cheerarot, "Optimum design of reinforced concrete biaxial rectangular column using simulated annealing algorithm," KMUTT Research and development journal, Vol. 36, pp. 33–50, 2013.



# ศึกษาการสร้างฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมเพื่อใช้เป็น ชั้นดูดกลืนแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอน

## โครงสร้างเซลล์ซ้อน a-Si:H/a-SiGe:H

### Study of an Amorphous Silicon Germanium Films for Use as an Absorber Layer of Bottom Cell in a-Si:H/a-SiGe:H Tandem Solar Cells

<sup>1</sup>อภิชาญ มุอละคร <sup>2</sup>รังสรรค์ เมืองเหลือ <sup>1</sup>สรพงศ์ อินธิแสง <sup>1</sup>ทวีวัฒน์ กระจำลังซัง <sup>1</sup>ปิระวุฒิ ชินวรรังสี  
<sup>1</sup>ทรงเกียรติ กิตติสนธิรักษ์ <sup>1</sup>อัศวิน หงษ์สิงห์ทอง <sup>1</sup>จรัญ ศรีธาราธิคุณ <sup>1</sup>กอบศักดิ์ ศรีประภา

<sup>1</sup>ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (STL), ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)  
112 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถ.พหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120 โทร 02-564 7000 (ต่อ 2720)  
<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

E-mail address: apichan.moollakorn@nectec.or.th

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาการสร้างฟิล์มบางชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม (a-SiGe:H) ให้มีช่องว่างพลังงานแสง (Optical bandgap;  $E_{opt}$ ) ประมาณ 1.5-1.6 eV เพื่อนำไปใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์ชั้นล่าง (Bottom Cell) สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างเซลล์ซ้อนของอะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H) และอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม ด้วยเทคนิค Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD) โดยปรับการปรับอัตราส่วนของก๊าซ ได้แก่ ก๊าซเจอร์เมเนียม ( $GeH_4$ ) ก๊าซไฮโดรเจน ( $SiH_4$ ) และ ก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าจากการปรับก๊าซพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนของก๊าซ  $GeH_4/(SiH_4+GeH_4)$  และ  $SiH_4/(SiH_4+GeH_4)$  จะทำให้ค่าของช่องว่างพลังงานลดลงและมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเสื่อมลง สำหรับการปรับอัตราส่วนของก๊าซ  $H_2/(SiH_4+GeH_4)$  นั้นพบว่าทำให้ค่าช่องว่างพลังงานเพิ่มขึ้นในขณะที่คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เงื่อนไขของฟิล์ม a-SiGe:H ที่มีช่องว่างพลังงานประมาณ 1.53 eV ถูกนำไปประยุกต์ใช้สร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่มีโครงสร้างเซลล์ซ้อนแบบสองชั้น (a-Si:H/a-SiGe:H) พบว่าฟิล์มบาง a-SiGe:H ดังกล่าวมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงสำหรับเซลล์ล่าง ซึ่งจากผลการทดลองสามารถสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างซ้อนที่มีประสิทธิภาพ 10.8% ( $V_{oc}$  1.71 V,  $FF$  0.67,  $J_{sc}$  9.4 mA/cm<sup>2</sup>) บนพื้นที่ขนาด 1 cm<sup>2</sup>

คำสำคัญ: ชั้นดูดกลืนแสง, อะมอร์ฟัสซิลิคอน, อะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม

## Abstract

This paper presents the study of the deposition of hydrogenated amorphous silicon germanium (a-SiGe:H) films with the optical bandgap ( $E_{opt}$ ) target of 1.5-1.6 eV for use as the bottom-layer of a-Si:H/a-SiGe:H tandem solar cells by using plasma enhance chemical vapor deposition technique (PECVD). The source gases consist of Silane ( $\text{SiH}_4$ ), Germane ( $\text{GeH}_4$ ) and Hydrogen ( $\text{H}_2$ ) on films property were studied. It was found that the  $E_{opt}$  of the films was decreased with increasing the  $\text{GeH}_4/(\text{SiH}_4+\text{GeH}_4)$  and  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4+\text{GeH}_4)$  ratio. However, the electrical property of those films was decreased. For the variation of  $\text{H}_2/(\text{SiH}_4+\text{GeH}_4)$  ratio, it was found that the  $E_{opt}$  of the films was increased while the electrical property was slightly decreased. The condition of the 1.53 eV a-SiGe:H film was applied to the bottom cell of a-Si:H/a-SiGe:H tandem solar cells. As a result, high efficiency solar cell of 10.8% ( $V_{oc}$  1.71 V,  $FF$  0.67,  $J_{sc}$  9.4  $\text{mA}/\text{cm}^2$ ) was successfully achieved.

**Keywords :** Absorber layer, Hydrogenated amorphous silicon, Hydrogenated amorphous silicon germanium

## 1. บทนำ

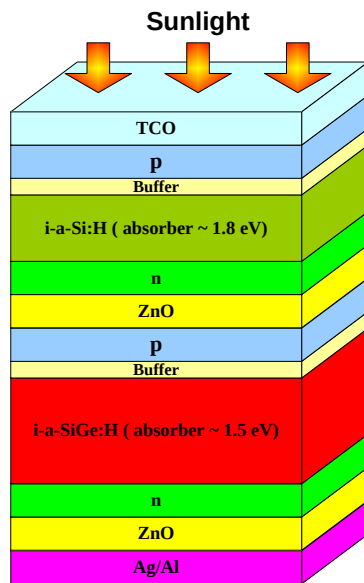
เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ซึ่งพลังงานดังกล่าวถือเป็นพลังงานที่สะอาดและมีอยู่อย่างไม่จำกัด สำหรับประเทศไทยนั้นมีปริมาณของแสงอาทิตย์ที่มากตลอดทั้งปีซึ่งหากมีการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้งานก็จะได้รับประโยชน์เป็นอย่างมาก

ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ ภายใต้สังกัดศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (เนคเทค) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) เป็นหน่วยงานวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ได้มีการทำวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์มาอย่างต่อเนื่อง ได้เล็งเห็นว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอน (Thin film silicon solar cell) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความเหมาะสมในการนำมาใช้งานโดยเฉพาะในแถบประเทศที่อยู่ในเขตร้อนชื้น ซึ่งรวมถึงประเทศไทยด้วย เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดดังกล่าวนี้มีค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิที่ต่ำ (Low temperature coefficient) เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอื่น เช่น ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน (Monocrystalline silicon solar cell) และชนิดผลึกรวมซิลิคอน (Polycrystalline silicon solar cell) ซึ่งเมื่อนำเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอนนี้ไปใช้

งานจริงซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่า  $50^\circ\text{C}$  จะทำให้ได้กำลังงานไฟฟ้า (Energy yield) ที่ผลิตได้สูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิสูงชนิดอื่น

อย่างไรก็ตามเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอนนี้ยังถือว่าเป็นชนิดที่มีประสิทธิภาพไม่สูงมากนัก ซึ่งแนวทางในการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ให้เพิ่มสูงขึ้นนั้น โครงสร้างเซลล์ซ้อน (Tandem solar cell structure) [1] เป็นวิธีการที่ดีวิธีหนึ่ง โดยโครงสร้างดังกล่าวนี้ได้นำเอาหลักการดูดกลืนแสงของวัสดุที่มีช่องว่างพลังงาน (Energy band gap) ที่ต่างกันสองชนิดมาสร้างทับซ้อนกัน ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างนี้มีค่าเพิ่มมากขึ้นอันเป็นผลมาจากแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) ที่สูงขึ้น [2] สำหรับโครงสร้างเซลล์ซ้อนแบบอะมอร์ฟัสซิลิคอนกับอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม (a-Si:H/a-SiGe:H) ดังแสดงในรูปที่ 1 นั้น เป็นโครงสร้างหนึ่งที่น่าสนใจในการพัฒนาเพื่อให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูง

งานวิจัยนี้ได้เน้นการพัฒนาคุณภาพฟิล์มบาง a-SiGe:H ทั้งทางแสงและทางไฟฟ้า จากนั้นนำเอาฟิล์มบางดังกล่าวที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมมาประยุกต์ใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงเซลล์ล่างของเซลล์แสงอาทิตย์ในโครงสร้างเซลล์ซ้อนแบบสองชั้น a-Si:H/a-SiGe:H ต่อไป



รูปที่ 1 ลักษณะ โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอนที่ทับซ้อนกันสองชั้น (a-Si:H/a-SiGe:H)

## 2. วิธีการทดลอง

### 2.1 การสร้างฟิล์ม a-SiGe:H

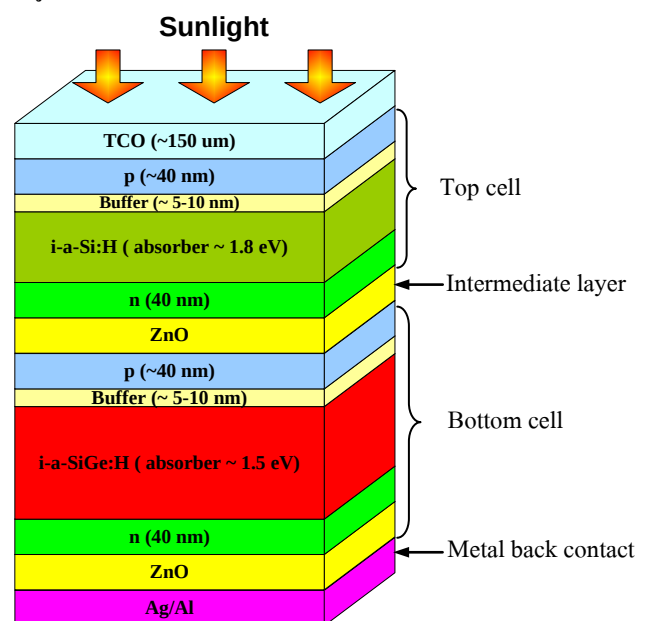
ในการสร้างฟิล์ม a-SiGe:H จะถูกสร้างบนกระจกฐานรองชนิด Soda lime ขนาด  $3.0 \text{ cm} \times 3.0 \text{ cm}$  ด้วยเทคนิค Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD) [3] ที่ความถี่ 27 MHz ภายในห้องเคลือบสุญญากาศโดยใช้ก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{SiH}_4$ ) ก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) และก๊าซเจอร์เมเนียม ( $\text{GeH}_4$ ) เป็นก๊าซวัตถุดิบในการทดลอง คณะวิจัยได้พัฒนาคุณสมบัติฟิล์ม a-SiGe:H ด้วยการปรับอัตราส่วนของก๊าซ ได้แก่  $\text{GeH}_4/(\text{SiH}_4+\text{GeH}_4)$ ,  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4+\text{GeH}_4)$  และ  $\text{H}_2/(\text{SiH}_4+\text{GeH}_4)$  ตามลำดับเพื่อหาคุณสมบัติของฟิล์ม a-SiGe:H ที่เหมาะสม ซึ่งรายละเอียดของเงื่อนไขในการสร้างฟิล์มแสดงในตารางที่ 1 จากนั้นนำมาวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์ม a-SiGe:H ด้วยการวัดค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity;  $\sigma$ ) ทั้งในสภาวะมืด (Dark conductivity;  $\sigma_d$ ) และสภาวะฉายแสง (Photo conductivity;  $\sigma_{ph}$ ) และค่าความกว้างของช่องว่างพลังงานแสง (Optical bandgap;  $E_{opt}$ )

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการสร้างฟิล์มบางชนิด a-SiGe:H

|                                                   |            |
|---------------------------------------------------|------------|
| อุณหภูมิของฐานรอง ( $^{\circ}\text{C}$ )          | 180        |
| คลื่นความถี่ (MHz)                                | 27         |
| ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า ( $\text{mW}/\text{cm}^2$ ) | 50         |
| ก๊าซเจอร์เมเนียม ( $\text{GeH}_4$ ; sccm)         | 0-20       |
| ก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{SiH}_4$ ; sccm)             | 10-20      |
| ก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ; sccm)               | 80-180     |
| ความดันก๊าซ (mTorr)                               | 500        |
| ความหนาฟิล์ม (nm)                                 | $\sim 300$ |

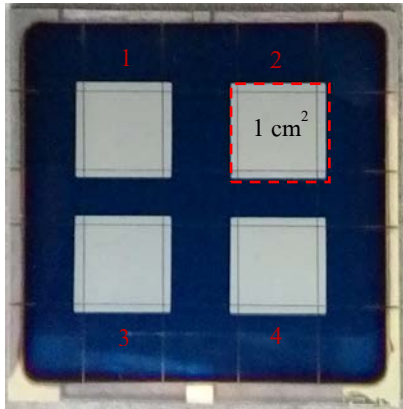
### 2.2 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอนโครงสร้างเซลล์ซ้อน (a-Si:H/a-SiGe:H)

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอนโครงสร้างซ้อนแบบสองชั้น (a-Si:H/a-SiGe:H) ถูกสร้างบนกระจกฐานรองที่มีชั้นนำไฟฟ้าโปร่งแสง (Transparent Conductive Oxide, TCO) โดยเคลือบเซลล์ชั้นบน (Top cell) ใช้ฟิล์มบาง a-Si:H เป็นชั้นดูดกลืนแสง ส่วนเซลล์ชั้นล่าง (Bottom cell) จะใช้ฟิล์มบาง a-SiGe:H ซึ่งชั้นรอยต่อระหว่างเซลล์บนและล่างใช้ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และทำการเคลือบด้วยขั้วโลหะที่ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 โครงสร้างเซลล์ซ้อนแบบสองชั้น a-Si:H/a-SiGe:H

เมื่อทำการเคลือบข้าวโลหะ Ag/Al เสร็จแล้วนำมาตัดแบ่งเซลล์ด้วยเลเซอร์แสงสีเขียว (Green laser 532 nm) ซึ่งแต่ละเซลล์มีพื้นที่ขนาด  $1 \text{ cm}^2$  ดังรูปที่ 3



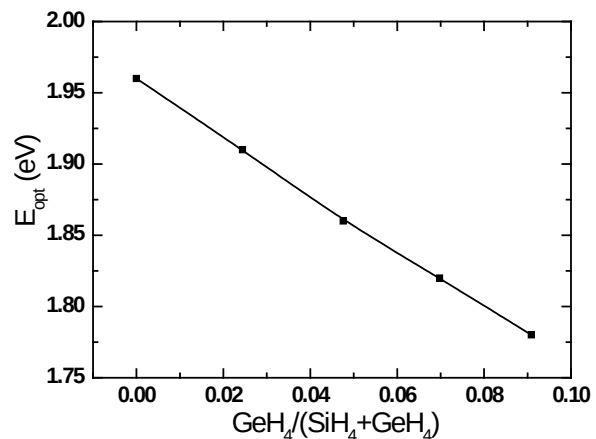
รูปที่ 3 ลักษณะเซลล์แสงอาทิตย์พื้นที่ขนาด  $1 \text{ cm}^2$

### 3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

#### 3.1 การสร้างฟิล์มบาง a-SiGe:H

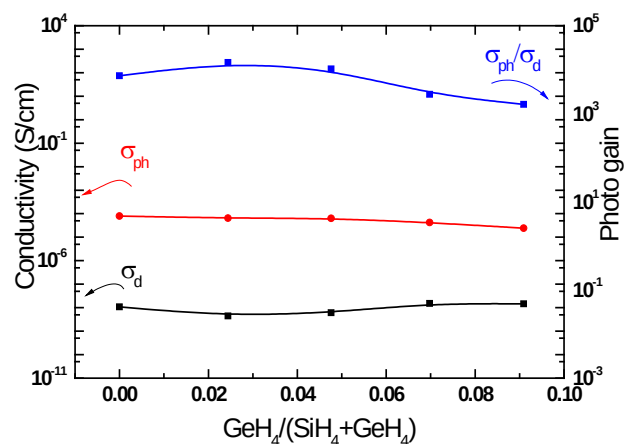
##### 3.1.1 การปรับอัตราส่วนของก๊าซ $\text{GeH}_4/(\text{SiH}_4+\text{GeH}_4)$

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มี a-SiGe:H เป็นชั้นดูดกลืนแสงนั้นมีช่องว่างพลังงานที่แคบกว่าวัสดุ a-Si:H ดังนั้นการปรับช่องว่างพลังงานดังกล่าวให้มีค่าที่เหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้งานจึงมีความจำเป็นที่จะต้องเริ่มต้นจากการหาเงื่อนไขการสร้างฟิล์มบางก่อน โดยช่องว่างพลังงานที่เหมาะสมสำหรับวัสดุนี้ควรจะอยู่ในช่วงประมาณ 1.5-1.6 eV ซึ่งขั้นตอนในการสร้างฟิล์มนี้จะพิจารณาจากคุณสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่ยังไม่มีก๊าซ  $\text{GeH}_4$  เป็นสารเจือ จากนั้นจะทำการเติมสารเจือ  $\text{GeH}_4$  ให้มากขึ้นเรื่อย ๆ เพื่อศึกษาผลของสารเจือต่อคุณสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าว่าเงื่อนไขใดมีค่าที่เหมาะสมในการนำไปสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วนก๊าซ  $\text{GeH}_4/(\text{SiH}_4+\text{GeH}_4)$  เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 0.09 จะส่งผลให้ค่า  $E_{\text{opt}}$  ของฟิล์มลดลงจาก 1.96 ถึง 1.78 eV ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณความเข้มข้นของ Ge ภายในโครงสร้างวัสดุ a-SiGe:H [4]



รูปที่ 4 ค่าช่องว่างพลังงานแสงของฟิล์ม a-SiGe:H ต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของก๊าซ  $\text{GeH}_4/(\text{SiH}_4+\text{GeH}_4)$

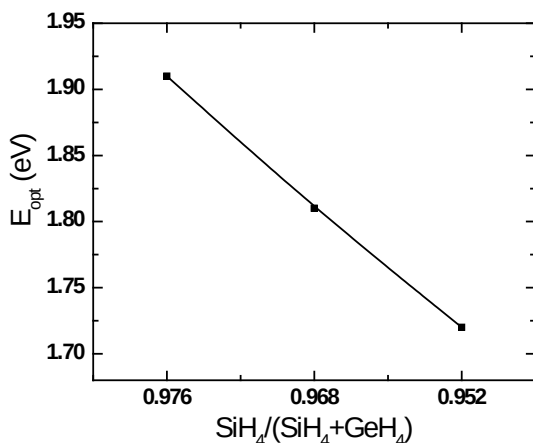
เมื่อพิจารณาค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าพบว่า ค่า  $\sigma_{\text{ph}}$  มีแนวโน้มลดลงจาก  $7.9 \times 10^{-5} \text{ S/cm}$  เป็น  $2.4 \times 10^{-5} \text{ S/cm}$  ในขณะที่ค่า  $\sigma_{\text{d}}$  มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก  $1.09 \times 10^{-8} \text{ S/cm}$  เป็น  $1.46 \times 10^{-8} \text{ S/cm}$  ดังรูปที่ 5 เพื่อให้  $E_{\text{opt}}$  ลดลงด้วยการเพิ่มค่าปริมาณของก๊าซ  $\text{GeH}_4$  นั้น ส่งผลต่อพันธะที่ขาดเพิ่มขึ้นในโครงสร้าง (Dangling Bond) และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนของ  $\sigma_{\text{ph}}/\sigma_{\text{d}}$  (Photo gain) พบว่ามีค่าสูงสุดที่อัตราส่วนก๊าซ  $\text{GeH}_4/(\text{SiH}_4+\text{GeH}_4)$  ที่ต่ำที่สุด ดังนั้นเพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่มีช่องว่างพลังงานและค่าทางไฟฟ้าที่เหมาะสมจึงต้องปรับสัดส่วนของก๊าซ  $\text{SiH}_4$  ในขั้นตอนต่อไป



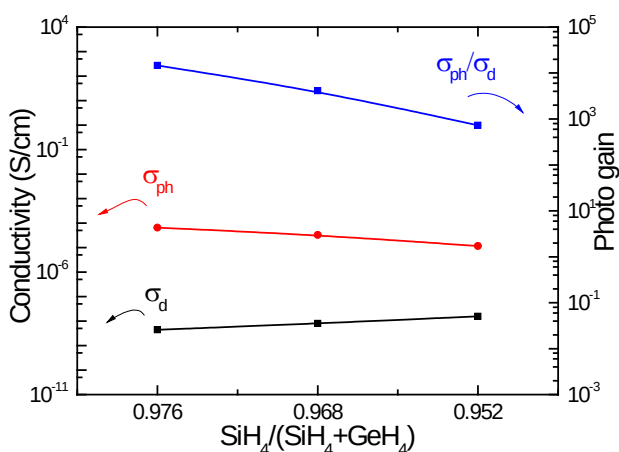
รูปที่ 5 ค่าความนำไฟฟ้าของฟิล์ม a-SiGe:H ต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของก๊าซ  $\text{GeH}_4/(\text{SiH}_4+\text{GeH}_4)$

### 3.1.2 การปรับอัตราส่วนของก๊าซ $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4+\text{GeH}_4)$

หัวข้อนี้ได้ทำการทดลองปรับอัตราส่วนก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4+\text{GeH}_4)$  โดยได้ทำการปรับให้มีค่าตั้งแต่ 0.952 ถึง 0.976 จากผลการทดลองพบว่าค่า  $E_{\text{opt}}$  มีค่าลดลงจาก 1.94 เป็น 1.72 eV และค่า  $\sigma_{\text{ph}}$  แนวโน้มลดลงจาก  $6.51 \times 10^{-5} \text{ S/cm}$  เป็น  $1.15 \times 10^{-5} \text{ S/cm}$  ในขณะที่ค่า  $\sigma_{\text{d}}$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก  $4.45 \times 10^{-9} \text{ S/cm}$  เป็น  $1.57 \times 10^{-8} \text{ S/cm}$  ดังรูปที่ 6 ส่วนค่า Photo gain มีค่ามากที่สุดนั้นได้จากการใช้  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4+\text{GeH}_4)$  ที่ 0.952 ดังรูปที่ 7 ถึงแม้ว่าจะมีการปรับค่าอัตราส่วนก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4+\text{GeH}_4)$  แล้วก็ตาม แต่ค่า  $E_{\text{opt}}$  ก็ยังสูงกว่าค่าที่ตั้งเป้าหมายเอาไว้ ซึ่งคณะวิจัยได้เลือกแนวทางในการปรับก๊าซ  $\text{H}_2$  ในลำดับต่อไป



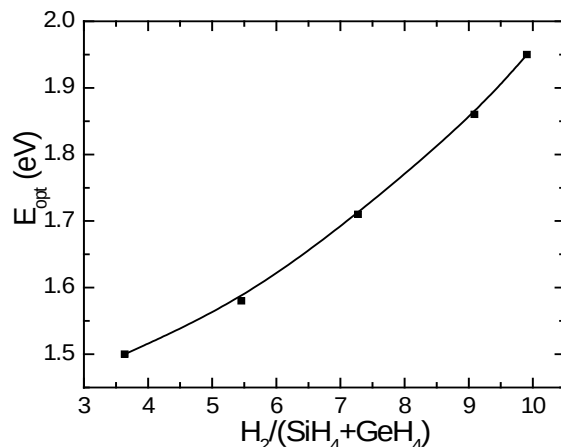
รูปที่ 6 ค่าช่องว่างพลังงานแสงของฟิล์ม a-SiGe:H ต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4+\text{GeH}_4)$



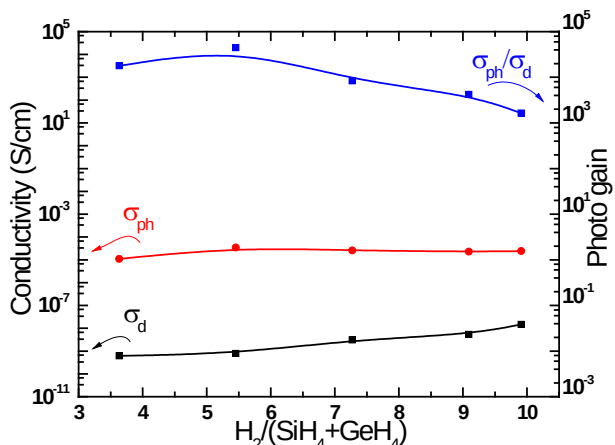
รูปที่ 7 ค่าความนำไฟฟ้าของฟิล์ม a-SiGe:H ต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4+\text{GeH}_4)$

### 3.1.3 การปรับอัตราส่วนของก๊าซ $\text{H}_2/(\text{SiH}_4+\text{GeH}_4)$

การพัฒนาฟิล์ม a-SiGe:H จากหัวข้อข้างต้นมาแล้วนั้น คุณสมบัติฟิล์มมีแนวโน้มดีขึ้นเป็นลำดับ ในการปรับอัตราส่วนของก๊าซ  $\text{H}_2/(\text{SiH}_4+\text{GeH}_4)$  ก็เป็นอีกการทดลองที่ต้องปรับเพื่อให้ได้ค่า  $E_{\text{opt}}$  ตามเป้าหมาย จะเห็นได้ว่าการลดปริมาณการไหลของก๊าซ  $\text{H}_2$  ลง ทำให้ค่า  $E_{\text{opt}}$  มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1.5-1.6 eV ดังรูปที่ 8 ซึ่งใกล้เคียงกับ  $E_{\text{opt}}$  ที่กำหนดไว้ ในขณะที่คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง a-SiGe:H มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และเมื่อพิจารณา Photo gain พบว่าค่าอัตราส่วนของก๊าซ  $\text{H}_2/(\text{SiH}_4+\text{GeH}_4)$  ที่ 5.45 ( $\text{H}_2$  รวมเท่ากับ 120 sccm) มีค่ามากที่สุด ดังรูปที่ 9 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟิล์ม a-SiGe:H มีคุณสมบัติฟิล์มที่ดีเหมาะสมนำไปประยุกต์ใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ได้



รูปที่ 8 ค่าช่องว่างพลังงานแสงของฟิล์ม a-SiGe:H ต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของก๊าซ  $\text{H}_2/(\text{SiH}_4+\text{GeH}_4)$

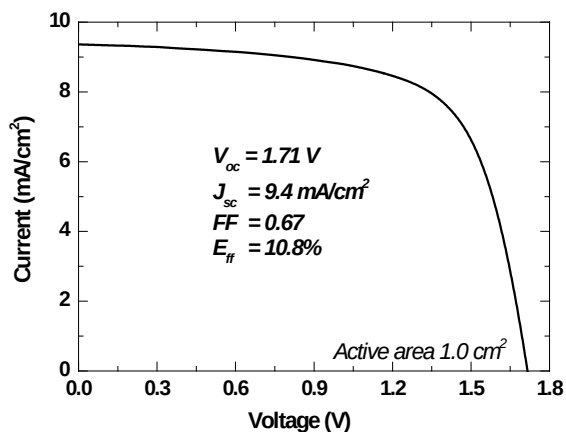


รูปที่ 9 ค่าความนำไฟฟ้าของฟิล์ม a-SiGe:H ต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของก๊าซ  $\text{H}_2/(\text{SiH}_4+\text{GeH}_4)$

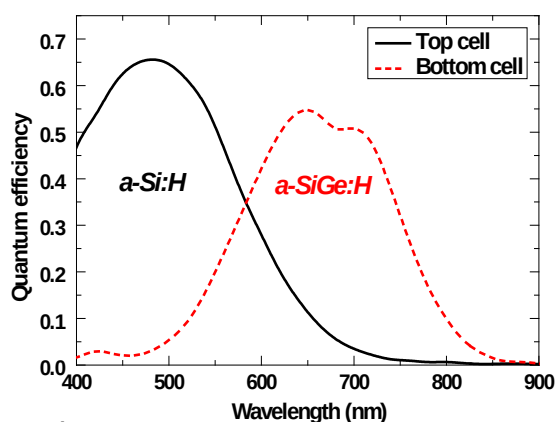
### 3.2 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอน

#### โครงสร้างเซลล์ชั้น a-Si:H/a-SiGe:H

เงื่อนไขของฟิล์ม a-SiGe:H ที่มีช่องว่างพลังงานประมาณ 1.53 eV ถูกนำไปใช้สร้างเซลล์ชั้นล่างของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างเซลล์ชั้นแบบสองชั้น a-Si:H/a-SiGe:H ดังรูปที่ 2 ซึ่งจากผลการทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าสามารถสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพ 10.8% ( $V_{oc}$  1.71 V,  $J_{sc}$  9.4 mA/cm<sup>2</sup>, FF 0.67,) ดังรูปที่ 10 และผลของการตอบสนองต่อสเปกตรัมแสงของเซลล์ชั้นล่าง (Bottom cell) มีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ( $J_{sc}$ ) ใกล้เคียงกับเซลล์ชั้นบน (Top cell) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชั้น a-SiGe:H สามารถใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์ล่างได้ดี [5] ดังรูปที่ 11



รูปที่ 10 คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอนโครงสร้างเซลล์ชั้นแบบสองชั้น a-Si:H/a-SiGe:H



รูปที่ 11 การตอบสนองต่อสเปกตรัมแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอนโครงสร้างเซลล์ชั้นแบบสองชั้น a-Si:H/a-SiGe:H

### 4. สรุป

จากการศึกษาฟิล์ม a-SiGe:H ด้วยการปรับอัตราส่วนของก๊าซวัตถุดิบ ได้แก่ ก๊าซเจอร์เมเนียม (GeH<sub>4</sub>) ก๊าซซิลิคอน (SiH<sub>4</sub>) และ ก๊าซไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) เมื่อนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงและไฟฟ้าฟิล์ม a-SiGe:H มีความเหมาะสมสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงเซลล์ล่างในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอนที่มีโครงสร้างเซลล์ชั้นแบบสองชั้น (a-Si:H/a-SiGe:H) ได้มีประสิทธิภาพ 10.8% ( $V_{oc}$  = 1.71 V,  $J_{sc}$  = 9.4 mA/cm<sup>2</sup>, FF = 0.67) บนพื้นที่ขนาด 1 cm<sup>2</sup> ซึ่งเป้าหมายในอนาคตจะเน้นการพัฒนาความเสถียรภาพของเซลล์ฯ โดยให้มีการเสื่อมสภาพ (Degradation) ที่ต่ำและสามารถนำไปทดสอบเงื่อนไขในสภาวะแวดล้อมจริงต่อไป

### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. H. Mahan, Y. Xu, L.M. Gedvilas, and D. L. Williamson, "Direct Correlation Between Film Structure and Solar Cell Efficiency for HWCVD Amorphous Silicon Germanium Alloys," Thin Solid Films. Vol.517, pp.3532-3535, April, 2009.
- [2] D. Lundzien, F. Finger, and H. Wagner, "Band-gap profiling in amorphous silicon-germanium solar cells," Sol. Energy Mater. Sol. Cells, Vol.74, pp.365-368, March, 2002.
- [3] B. Yan, G. Yue, J. Yang, and S. Guha, "Hydrogenated amorphous silicon and silicon germanium triple-junction solar cells at high rate using RF and VHF glow discharges," Proc. PVSC, 33<sup>rd</sup> IEEE, pp.1-6, May, 2008.
- [4] J. Zimmer, H. Stiebig, and H. Wagner, "a-SiGe:H based solar cells with graded absorption layer," J. Appl. Phys., Vol.84, No.1, pp.611-617, 1998.
- [5] R. J. Soukup, N. J. Ianno, G. Pribil, and Z. Hubicka, "Deposition of high quality amorphous silicon germanium and silicongermanium thin films by a hollow cathode reactive sputtering system," Surf. Coat Tech., Vol.177-178, pp.676-681, 2004.

## รายนามผู้ทรงคุณวุฒิผู้พิจารณาบทความฉบับนี้

ทางกองบรรณาธิการวิศวกรรมลาดกระบัง ขอขอบพระคุณท่านผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ความ  
อนุเคราะห์ในการพิจารณาบทความด้วยความขอบคุณยิ่ง และหวังว่าคงได้รับความอนุเคราะห์จากท่าน  
ด้วยดีในโอกาสต่อไป

ศ.ดร.อิสระชัย งามหรุ

ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์

รศ.ดร.ถาวร เบญจนาสุทธี

ดร.ดอน อิศรากร

รศ.ดร.สุริยณ สมควรพานิชย์

รศ.ดร.จำลอง ปราบแก้ว

ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร

ดร.เชาวลิต หามนตรี

รศ.ดร.ฤดี มาสุจันทร์

ผศ.ดร.ธนาตล คงสมบูรณ์

ผศ.ดร.ชุมพล ยวงใย

ดร.อัฐวิทย์ สุจริตพงศ์

ดร.นิรันดร์ อติวงศ์แสงสอง

ผศ.ดร.ปฐมภรณ์ ศรีผดุงธรรม

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดร.รักติพงษ์ สหมิตรมงคล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

พระจอมเกล้าธนบุรี

ดร.สุริยน เปรมปราโมทย์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดร.อัญชนา วงษ์โต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดร.ศิวพล ศรีสนพันธุ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดร.นิติการ นิมสุข

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและ

คอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

## คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับบทความ

**“บทความทางวิชาการ”** หมายความว่า บทความที่เขียนขึ้นในลักษณะวิเคราะห์ วิจัย หรือเสนอแนวความคิดใหม่ ๆ จากพื้นฐานทางวิชาการที่ได้เรียบเรียงจากผลงานทางวิชาการของตนเอง หรือของผู้อื่น หรือเป็นบทความทางวิชาการที่เขียนขึ้นเพื่อเป็นความรู้ทั่วไปสำหรับประชาชน

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

### รูปแบบในการพิมพ์บทความ

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

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

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

#### ขนาดตัวอักษร

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

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

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

#### การพิมพ์บทความ

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

#### ชื่อบทความ ชื่อผู้เขียน และสถานที่ทำงาน

ให้จัดพิมพ์ในตำแหน่งกลางหน้ากระดาษ

#### บทคัดย่อและเนื้อเรื่อง

ให้จัดพิมพ์แบบเต็มขอบ (Left & Right Justified)

#### คำสำคัญ (Keywords)

ให้ใส่คำสำคัญ 3 – 5 คำ ซึ่งเกี่ยวข้องกับบทความที่นำเสนอ โดยให้จัดพิมพ์ได้บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

#### หัวข้อและหมายเลขหัวข้อ

ให้จัดพิมพ์แบบชิดซ้าย (Right Justified)

#### สมการ หรือ พจน์ทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน

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

#### การส่งบทความ

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



# แบบฟอร์มการส่งบทความ

เลขที่อ้างอิง.....

วันที่ส่ง.....

ชื่อบทความ (ภาษาไทย).....

.....

ชื่อบทความ (ภาษาอังกฤษ).....

.....

ประเภทบทความ



บทความวิชาการ



บทความวิจัย

Keywords (คำสำคัญ).....

.....

ชื่อ - นามสกุล ผู้เขียน (ภาษาไทย) และ (ภาษาอังกฤษ)

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

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

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

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

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

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

จำนวนหน้า.....หน้า

ชื่อและที่อยู่ผู้เขียนที่สามารถติดต่อได้

ชื่อ - นามสกุล.....

ที่อยู่.....

.....

เบอร์โทรศัพท์.....

## เอกสารประกอบการส่งบทความ

บทความต้นฉบับ 1 ชุด และ

สำเนา 3 ชุด (พร้อมลบชื่อผู้แต่งและที่อยู่)

# แบบฟอร์มสั่งซื้อวัสดุสารลาดกระบัง และ สมุดรสมาชิก

ชื่อ.....นามสกุล.....

สถานที่จัดส่งหนังสือ.....

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

## สมุดรสมาชิกวัสดุสารลาดกระบัง

- |                                                        |                                                        |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> ปี 2553      ค่าสมัคร 200 บาท | <input type="checkbox"/> ปี 2556      ค่าสมัคร 200 บาท |
| <input type="checkbox"/> ปี 2554      ค่าสมัคร 200 บาท | <input type="checkbox"/> ปี 2557      ค่าสมัคร 200 บาท |
| <input type="checkbox"/> ปี 2555      ค่าสมัคร 200 บาท | <input type="checkbox"/> ปี 2558      ค่าสมัคร 200 บาท |

หมายเหตุ ปีละ 4 ฉบับ (รวมค่าจัดส่ง)

## ต้องการซื้อวัสดุสารลาดกระบัง

- |                                                                               |                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> เล่มที่ 1 / 2557 ราคา 100 บาท                        | <input type="checkbox"/> เล่มที่ 1 / 2558 ราคา 100 บาท |
| <input type="checkbox"/> เล่มที่ 2 / 2557 ราคา 100 บาท                        | <input type="checkbox"/> เล่มที่ 2 / 2558 ราคา 100 บาท |
| <input type="checkbox"/> เล่มที่ 3 / 2557 ราคา 100 บาท                        | <input type="checkbox"/> เล่มที่ 3 / 2558 ราคา 100 บาท |
| <input type="checkbox"/> เล่มที่ 4 / 2557 ราคา 100 บาท                        | <input type="checkbox"/> เล่มที่ 4 / 2558 ราคา 100 บาท |
| <input type="checkbox"/> อื่น ๆ ปีที่.....ฉบับที่.....ประจำเดือน.....พ.ศ..... |                                                        |

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

## ชำระค่าสั่งซื้อโดย

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

## ถ่ายสำเนาใบสั่งซื้อ และส่งเอกสารการชำระค่าสั่งซื้อมาที่ :

งานบริหารการวิจัย ส่วนสนับสนุนวิชาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทร. 0-2329-8000 ต่อ 3464, 3465

( ท่านสามารถแฟกซ์ใบสั่งซื้อ และ เอกสารการชำระค่าสั่งซื้อมาที่เบอร์แฟกซ์ : 0-2329-8317

การจัดส่งหนังสือจะรวดเร็วขึ้น )

## Ladkrabang Engineering Journal

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

### Contents:

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

### Frequency:

The journal is published quarterly.

### Policy:

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

### Manuscripts:

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

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

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

**Titles:** Should be given in both Thai and English.

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

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

**Abstract:** Should be given in both Thai and English.

**Main theme:** Should contain the following sections.

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

**Acknowledgement:** (if required)

**References:** Should follow the pattern given below.

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

### Submission:

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

At E-mail : [kmitl.eng.jnl@gmail.com](mailto: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.Kamol Wadkhean*

*Cover Design and Photo Books*

*Mrs.Atisuda Chanvikorn*

*Liaise & Member Relationships*

*Create Original Artwork & Proofreading*

### Distributed by

*Faculty of Engineering,*

*Mrs.Atisuda Chanvikorn*

*Tel : (662) 329-8317*