

# การประยุกต์ใช้เทคนิค การปรับเปลี่ยนเครื่องจักรอย่างรวดเร็ว และ ECRS เพื่อลดเวลาการปรับตั้งเครื่องจักร: กรณีศึกษา กระบวนการผลิตหัวเชื้อเครื่องดื่มผง

## Application of Single Minute Exchange of Die and ECRS Techniques to Reduce Machine Set up Time: A Case Study of Powdered Drink Mix Process

มงคล กิตติญาณจอร์\* มณีมณฑา วงหาจัก และ มัทนา สุธสมบุรณ์

Mongkol Kittiyankajon\*, Maneemon Wongharjuk and Mattana Susomboon

สาขาการจัดการอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี 41000

Department of Industrial Management, Faculty of Technology,  
Udon Thani Rajabhat University, Udonthani, 41000, Thailand

\*E-mail: mongkolk3@hotmail.com

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการนำเทคนิค การปรับเปลี่ยนเครื่องจักรอย่างรวดเร็ว (Single Minute Exchange of Die: SMED) และ การกำจัด การรวมกัน การจัดเรียงใหม่และ การทำให้ง่ายขึ้น (Eliminate, Combine, Rearrange and Simplify: ECRS) มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาแนวทางการลดเวลาการปรับตั้งเครื่องจักรเพื่อลดเวลาจากความสูญเปล่าในกระบวนการบรรจุผลิตภัณฑ์หัวเชื้อเครื่องดื่มผง จากการศึกษาพบว่ากระบวนการบรรจุผลิตภัณฑ์ผสมแล้วลงของ มีเวลาการทำงานที่สูญเปล่าจากขั้นตอนการเปลี่ยนม้วนกระดาษอะลูมิเนียมฟอยล์สูงที่สุด และมีสาเหตุหลักมาจากการขาดขั้นตอนการทำงานมาตรฐาน ดังนั้นหลังจากการนำแนวทางการปรับปรุงด้วยการเปลี่ยนงานในมาเป็นงานนอกตามเทคนิค SMED และการจัดเรียงงานใหม่ กำจัดงานที่ไม่จำเป็นออก และทำให้งานที่มีทำได้ง่ายขึ้น โดยการใช้อุปกรณ์ช่วยตามหลักการ ECRS สามารถทำให้เวลาสูญเปล่าในขั้นตอนการเปลี่ยนม้วนกระดาษอะลูมิเนียมฟอยล์ลดลง 565 วินาทีต่อครั้ง หรือคิดเป็น 67% จากเวลาเดิมก่อนการปรับปรุง โดยสามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้ 16,143 ซองต่อวัน

**คำสำคัญ:** เทคนิคการปรับเครื่องจักรอย่างรวดเร็ว การปรับตั้งเครื่องจักร การลดความสูญเปล่า เทคนิค ECRS

### ABSTRACT

The objective of this study is to apply single minute exchange of die (SMED) and Eliminate, Combine, Rearrange and Simplify (ECRS) techniques to analyse and provide improvement methods in order to reduce powdered drink Mix process waste time. From the study result, the highest packing process waste time is the time for aluminum foil changed operation. The major root cause came from lacking of working standards. Therefore, after adoption of SMED technique and ECRS technique such as rearrange, eliminate, and simplify, waste time of aluminum foil changed operation was reduced 565 sec/time that was 67% reduction from original time. Moreover, Total capacity of packing process was increased 16,143 unit/day

**Keyword:** Single minute exchange of die, Machine set up, Waste reduction. ECRS technique.

## 1. บทนำ

ภายใต้สภาวะการแข่งขันที่รุนแรงในปัจจุบันของอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์เครื่องดัดขึ้นรูป ผู้ประกอบการจึงจำเป็นต้องดำเนินการปรับปรุงประสิทธิภาพของการผลิตเพื่อลดต้นทุนความสูญเสียในกระบวนการผลิตและเพิ่มความสามารถในการแข่งขัน โรงงานกรณีศึกษาดำเนินการผลิตหัวเชื้อเครื่องดัดขึ้นรูปซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความต้องการจากลูกค้าในระดับสูง แต่โรงงานมีกำลังการผลิตไม่เพียงพอต่อความต้องการของลูกค้าที่มีแนวโน้มการสั่งซื้อเพิ่มมากขึ้น จากการศึกษาสภาพปัจจุบันของโรงงานในกระบวนการผลิตหัวเชื้อเครื่องดัดขึ้นรูปมีขั้นตอนสำคัญขั้นตอนสุดท้ายคือกระบวนการบรรจุ ในขั้นตอนนี้ผลิตภัณฑ์หัวเชื้อเครื่องดัดขึ้นรูปจะถูกบรรจุลงในซองซึ่งทำจากกระดาษอะลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminum foil) เมื่อกระดาษอะลูมิเนียมฟอยล์ ถูกใช้จนหมดม้วนพนักงานจำเป็นต้องถอดแกนม้วนเก่าออกและทดแทนด้วยกระดาษอะลูมิเนียมฟอยล์ ม้วนใหม่ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวเป็นสาเหตุให้เครื่องจักรต้องหยุดการทำงานและก่อให้เกิดความสูญเสียเปล่าถึง 14.08 นาทีต่อครั้ง หรือคิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องสูญเสีย 24,330 ซองต่อวัน

งานวิจัยนี้จึงนำเทคนิค การปรับเปลี่ยนเครื่องจักรอย่างรวดเร็ว (Single Minute Exchange of Die: SMED) [1] และการกำจัด การรวมกัน การจัดเรียงใหม่ และการทำให้ง่ายขึ้น (Eliminate, Combine, Rearrange and Simplify: ECRS) [2] มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาแนวทางการลดเวลาการปรับตั้งเครื่องจักรเพื่อลดความสูญเสียเปล่าในกระบวนการบรรจุผลิตภัณฑ์หัวเชื้อเครื่องดัดขึ้นรูป

## 2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อศึกษากระบวนการปรับตั้งเครื่องจักรที่ใช้ขั้นตอนบรรจุผลิตภัณฑ์หัวเชื้อเครื่องดัดขึ้นรูป

2.2 เพื่อลดเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักรที่ใช้ขั้นตอนบรรจุผลิตภัณฑ์หัวเชื้อเครื่องดัดขึ้นรูป

## 3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องหลายเทคนิคซึ่งทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมดได้ถูกนำมาอธิบายดังนี้

### 3.1 การปรับเปลี่ยนเครื่องจักรอย่างรวดเร็ว

การปรับเปลี่ยนเครื่องจักรอย่างรวดเร็ว (Single Minute Exchange of Die, SMED) เป็นวิธีการที่ช่วยลดเวลาจนสามารถดำเนินการปรับตั้งเครื่องจักรได้ภายในเวลาในหน่วยนาทีโดยอาศัยการแยกกิจกรรมหรืองานออกเป็นงานในซึ่งจำเป็นต้องทำเมื่อเครื่องจักรหยุด และงานนอกซึ่งสามารถเตรียมไว้ก่อนโดยไม่ต้องทำระหว่างเครื่องจักรหยุดการทำงาน จากนั้น เปลี่ยนงานในให้เป็นงานนอก และในลำดับสุดท้ายทำการเปลี่ยนทุกกิจกรรมให้ง่ายต่อการปรับตั้ง โดยเทคนิคดังกล่าวได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การปรับตั้งลูกอัดสำหรับการผลิตไม้ฝาสังเคราะห์ [3], การปรับตั้งเครื่องพิมพ์หมึกสีในโรงงานกล่องกระดาษ [4] และ การเปลี่ยนลูกกลิ้งและปรับตั้งเครื่องรีดพลาสติก [5]

### 3.2 การลดความสูญเสียเปล่า ด้วยหลักการ ECRS

ความสูญเสียเปล่า (Waste) หมายถึง สิ่งที่ไม่ทำให้เกิดมูลค่าเพิ่มแก่สินค้าซึ่งความสูญเสียเปล่า ประกอบด้วย การผลิตมากเกินไป (Overproduction), การรอคอย (Waiting), การเคลื่อนย้ายที่ไม่จำเป็น (Transporting), การทำงานที่ไม่เกิดประโยชน์ (Processing), การเก็บสินค้าที่มากเกินไป (Inventory), การเคลื่อนที่ที่ไม่จำเป็น (Motions) และ ของเสีย (Defect) ความสูญเสียเปล่าทั้ง 7 ประการนี้เป็นสิ่งที่ไม่มีความจำเป็นและไม่ได้ก่อให้เกิดประโยชน์ ดังนั้น จึงควรทำการลดความสูญเสียเปล่าเหล่านี้ลงโดยใช้หลักการ ECRS [6] ซึ่ง ประกอบไปด้วย

1) การกำจัด (Eliminate) หมายถึง การพิจารณาการทำงานและพยายามกำจัดความสูญเสียเปล่าที่พบออกไป

2) การรวมกัน (Combine) คือ การพิจารณาว่าสามารถรวมขั้นตอนการทำงานให้ลดลงได้หรือไม่

3) การจัดเรียงใหม่ (Rearrange) คือ การจัดเรียงขั้นตอนการผลิตใหม่ หรือสลับลำดับในการทำงาน เพื่อลดการเคลื่อนที่ หรือ การรอคอย

4) การทำให้ง่าย (Simplify) หมายถึง การปรับปรุงการทำงานให้ง่ายและสะดวกขึ้น โดยอาจจะออกแบบ jig หรือ fixture เข้าช่วย

### 3.3 การวิเคราะห์กระบวนการด้วยแผนภูมิการไหล

แผนภูมิการไหล (Flow Process Chart) เป็นเครื่องมือที่ใช้บันทึกการปฏิบัติงานตามขั้นตอนมาตรฐานของกระบวนการ โดยการนำมาเขียนร่วมกับการใช้สัญลักษณ์แทนขั้นตอนต่างๆ เริ่มจากการแบ่งกระบวนการทั้งหมดออกเป็น ขั้นตอนย่อย โดยแต่ละขั้นตอนย่อยต้องเป็นการกระทำอย่างหนึ่งอย่างใด ในบรรดาการปฏิบัติงาน การเคลื่อนย้าย การรอคอย การตรวจสอบ และการเก็บพัก โดยมีสัญลักษณ์ที่ใช้เป็นสากลดังตารางที่ 1 จากนั้นข้อมูลที่ได้จึงสามารถนำมาวิเคราะห์หาขั้นตอนการทำงานที่ถือว่าเป็นความสูญเปล่าและต้องการการปรับปรุงโดยใช้เทคนิค ECRS ในลำดับต่อไป

ตารางที่ 1 สัญลักษณ์ที่มีในแผนภูมิการไหล

สัญลักษณ์	ความหมาย
○	การปฏิบัติงาน
D	การรอคอย
□	การตรวจสอบ
▽	การเก็บพัก
⇒	การเคลื่อนย้าย

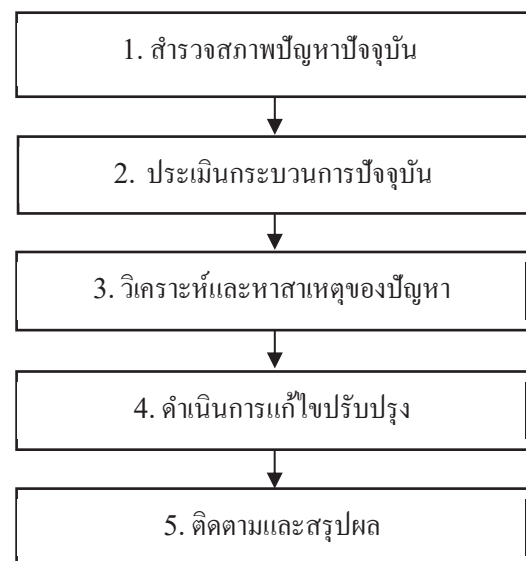
### 3.4 เครื่องมือคุณภาพทั้ง 7

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการแก้ปัญหาด้านคุณภาพ ซึ่งช่วยศึกษาสภาพทั่วไปของปัญหา, คัดเลือกปัญหา, ค้นหาและวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาที่แท้จริงเพื่อทำการ

แก้ไขอย่างถูกต้องและป้องกันไม่ให้เกิดซ้ำซึ่งได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายเช่นในกระบวนการผลิตถึงบรรจุอากาศ [7] และ กระบวนการผลิตชิ้นส่วนฉีดพลาสติก [8] โดยมีส่วนประกอบดังนี้ แผ่นตรวจสอบ (Check sheet), ผังพาเรโต (Pareto Diagram), กราฟ (Graphs), แผนภูมิก้างปลา (Fish bone diagram) ฮิสโตแกรม (Histogram), ผังการกระจาย (Scatter diagram) และแผนภูมิควบคุม (Control Chart) โดยงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เครื่องมือคุณภาพทั้ง 7 ในบางรายการดังแสดงใน ตารางที่ 2 ขั้นตอนและเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

### 4. วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้แยกวิธีการดำเนินการวิจัยออกเป็นขั้นตอนต่างๆดังแสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการวิจัย

โดยในขั้นตอนต่างๆที่แสดงในรูปที่ 1 ระหว่างการทำวิจัยได้มีการนำเครื่องมือต่างๆมาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมตามชนิดของงานดังแสดงในตารางที่ 2 เช่นในขั้นตอนการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา งานวิจัยนี้นำเครื่องมือ แผนภูมิก้างปลา (Fish bone diagram) มาใช้

ในการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาเพื่อนำไปสู่แนวทางการแก้ไขและปรับปรุง

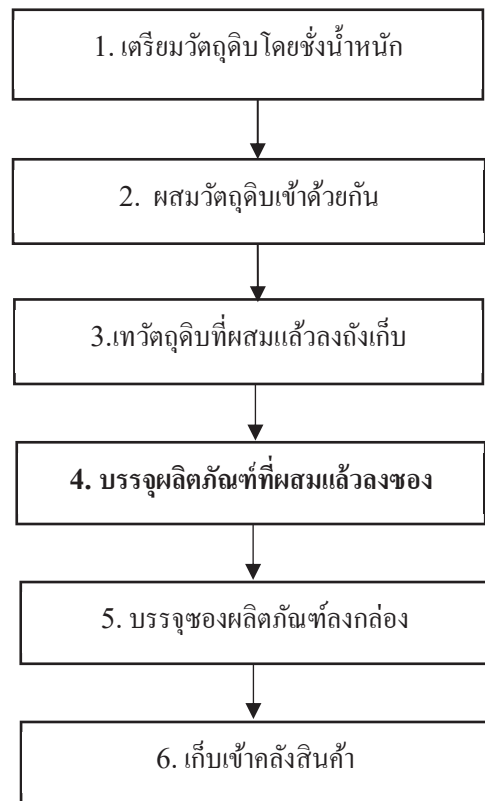
ตารางที่ 2 ขั้นตอนและเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

ขั้นที่	ขั้นตอน	เครื่องมือที่ใช้
1	สำรวจสภาพปัญหาปัจจุบัน	แผนภูมิพาเรโต
2	ประเมินกระบวนการปัจจุบัน	แผนภูมิการไหล
3	วิเคราะห์สาเหตุ	แผนภูมิกิ่งปลา
4	ปรับปรุงแก้ไข	SMED และ ECRS
5	ติดตามและสรุปผล	มาตรฐานขั้นตอนการทำงาน

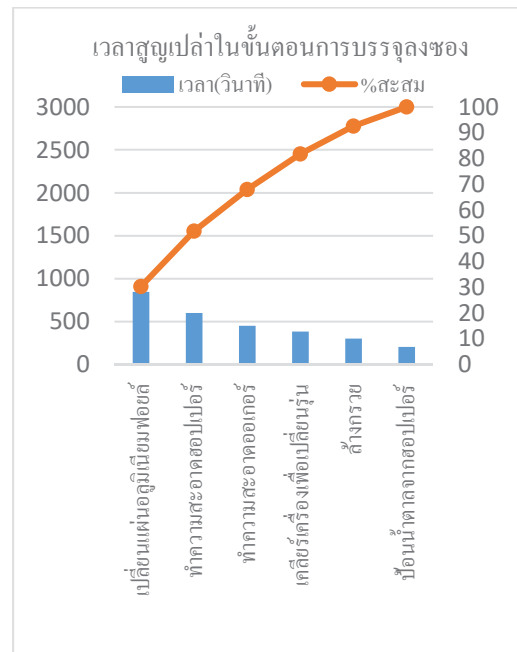
## 5. ผลการวิจัย

### 5.1 ผลการสำรวจสภาพปัจจุบัน

จากการสำรวจสภาพปัจจุบันของกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มชนิดผงพบว่าในขั้นตอนการบรรจุผลิตภัณฑ์ที่ผสมแล้วลงของ ในขั้นตอนที่ 4 ตามแผนภูมิแสดงขั้นตอนการผลิตรูปที่ 2 เป็นขั้นตอนผลิตที่สำคัญเนื่องจากเป็นคอขวดในสายการผลิตและมีเวลาสูญเสียไปจากการหยุดทำงานของเครื่องจักรทั้งหมด 2,785 วินาทีต่อกะ โดยมีสาเหตุหลักมาจากการเปลี่ยนม้วนกระดาษอะลูมิเนียมฟอยล์ถึง 845 วินาที ซึ่งคิดเป็น 30% ของเวลาสูญเสียทั้งหมดดังแสดงในผังพาเรโต ในรูปที่ 3



รูปที่ 2 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการผลิต



รูปที่ 3 ผังพาเรโตแสดงเวลาสูญเสียเปล่าในขั้นตอนการบรรจุผลิตภัณฑ์ที่ผสมแล้วลงของ



## 5.2 ผลการประเมินกระบวนการปัจจุบัน

หลังจากการสำรวจสภาพปัจจุบัน ซึ่งพบว่า ในขั้นตอนการบรรจุผลิตภัณฑ์ที่ผสมแล้วลงในซองมีเวลาสูญเสียจากการเปลี่ยนม้วนกระดาษอะลูมิเนียมฟอยล์ สูงที่สุด แผนภูมิการไหลจึงถูกนำมาใช้วิเคราะห์การทำงาน

ในขั้นตอนนี้โดยผลการวิเคราะห์การไหลของขั้นตอนเปลี่ยนม้วนกระดาษอะลูมิเนียมฟอยล์ได้นำมาแสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการประเมินกระบวนการปัจจุบันด้วยแผนภูมิการไหล

ลำดับ	กิจกรรม	ระยะทาง (เมตร)	เครื่องหมาย					เวลา (วินาที)
			●	→	◐	■	▼	
1.	เดินไปเอาเทปติดฟอยล์	20		●				60
2.	เดินไปเอารถเข็นฟอยล์	20		●				60
3.	เข็นรถเข็นฟอยล์ไปเอาม้วนฟอยล์ที่สต็อก	40		●				120
4.	เข็นรถบรรทุกฟอยล์มาไว้หลังเครื่อง	50		●				150
5.	เดินไปเอาลิฟท์ยกฟอยล์	20		●				60
6.	หยุดเครื่อง		●					5
7.	ไปเอากุญแจตู้สวิตช์นิรภัย	10		●				15
	ถือกุญแจตู้สวิตช์นิรภัย			●				15
8.	กดลิฟท์ฟอยล์ให้ตรงกับแขนรถฟอยล์			●				45
9.	เข็นรถเข็นมาให้ตรงกับบล็อกแกนฟอยล์และปรับระดับให้สูง	2		●				30
10.	เอาฟอยล์ม้วนเก่าออกและนำม้วนใหม่ไปใส่และทำการต่อฟอยล์			●				90
11.	ปลดล็อกตู้สวิตช์นิรภัย			●				15
12.	สตาร์ทเครื่องเคลียร์ฟอยล์ร่องจนได้น้ำตาลของแรก			●				30
	ตรวจสอบว่าฟอยล์ไม่ขาว			●				30
13.	เข็นรถเข็นฟอยล์ลิฟท์ฟอยล์ไปห้องเก็บ	40		●				60
	เก็บรถเข็น			●				60
<b>รวม ระยะทาง (เมตร) และ เวลา (วินาที) ทั้งหมด</b>		<b>202</b>						<b>845</b>

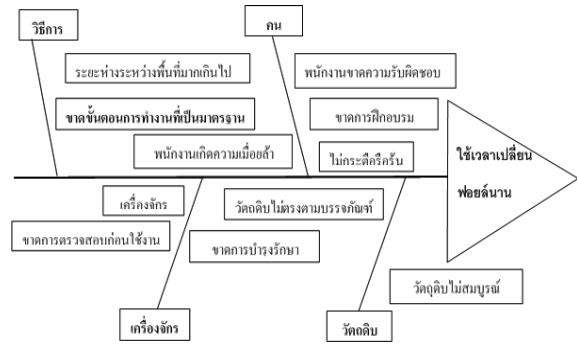
จากข้อมูลการวิเคราะห์การไหลของการทำงานในขั้นตอนการเปลี่ยนม้วนกระดาษอะลูมิเนียมพอยล์เวลาในการทำงานประเภทต่างๆได้ถูกนำมาจัดกลุ่มตามชนิดและสัญลักษณ์สากลได้ดังตารางที่ 6 โดยที่ จากข้อมูลในตารางที่ 6 พบว่ามีขั้นตอนการทำงานที่ถือว่าเป็นการสูญเปล่า เช่น การเคลื่อนย้าย การตรวจสอบ การเก็บพัก และการรอคอยอยู่ถึง 675 วินาที โดยคิดเป็น 80% ของเวลาทั้งหมด โดยเฉพาะการเคลื่อนย้ายที่เกิดขึ้นถึง 66% โดยมีการเดินทางที่ไม่จำเป็น เช่น การเดินไปนำอุปกรณ์จากห้องเก็บอุปกรณ์ เดินไปนำคูลูญแจจากที่เก็บ และเดินไปนำลิฟท์ยกพอยล์มาเพื่อใช้งาน เป็นต้น

ตารางที่ 6 สรุปผลการวิเคราะห์การไหลของการทำงาน

สัญลักษณ์	ความหมาย	เวลา (วินาที)	เปอร์เซ็นต์
●	การปฏิบัติงาน	170	20.12%
◐	การรอคอย	30	3.55%
■	การตรวจสอบ	30	3.55%
▼	การเก็บพัก	60	7.1%
➔	การเคลื่อนย้าย	555	65.68%
เวลาทั้งหมด		845	100%

### 5.3 ผลการวิเคราะห์สาเหตุ

เนื่องจากผลการวิเคราะห์สภาพปัจจุบันระบุได้ว่า ปัญหาที่ส่งผลต่อการทำงานที่เกิดเวลาสูญเปล่าเกิดขึ้นที่ขั้นตอนการเปลี่ยนม้วนกระดาษอะลูมิเนียมพอยล์ส่วนใหญ่แล้วมาจากการทำงานที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่ม เช่นการ รอคอยและการเคลื่อนย้าย ดังนั้นเครื่องมือแผนภูมิ ก้างปลาจึงถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาเวลาในการทำงานที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่มอยู่ในระดับที่สูง ดังแสดงผลในการวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิ ก้างปลาในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนภูมิ ก้างปลา

จากผลการวิเคราะห์หาสาเหตุการใช้เวลาในการเปลี่ยนม้วนกระดาษอะลูมิเนียมพอยล์นานด้วยแผนภูมิ ก้างปลาพบว่าสาเหตุหลักมาจากการขาดขั้นตอนการทำงานมาตรฐานให้กับพนักงานได้ปฏิบัติตามเพื่อให้การทำงานมีประสิทธิภาพสูงที่สุดโดยไม่ก่อให้เกิดขั้นตอนการทำงานที่ไม่จำเป็นและสูญเปล่าเช่นการเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ต่างๆ ระหว่างการทำงาน

### 5.4 ผลการหาแนวทางปรับปรุงการทำงาน

จากผลการประเมินกระบวนการปัจจุบันด้วยแผนภูมิการไหลตามตารางที่ 5 พบว่ามีขั้นตอนหลายขั้นตอนที่สามารถเตรียมไว้ทำก่อนที่จะมีการหยุดเครื่องจักรเพื่อให้งานระหว่างที่เครื่องจักรหยุดใช้เวลาน้อยลงได้เช่น การเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือ ดังนั้นเทคนิคการปรับปรุงงานด้วยวิธี SMED จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการแยกงานออกเป็นงานในและงานนอกดังแสดงได้ในตารางที่ 7 จากนั้นแนวทางการปรับปรุงเพื่อลดเวลาการทำงานด้วยเทคนิค ECRS จึงถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงงานที่เหลือที่เป็นงานในที่จำเป็นต้องทำเมื่อเครื่องจักรหยุดเท่านั้น โดยผลการทำการปรับปรุงด้วยเทคนิค ECRS ได้ถูกนำมาแสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 7 การแยกงานในและงานนอกด้วยเทคนิค SMED

ลำดับ	กิจกรรม	งานใน	งานนอก
1.	เดินไปเอาเทปติดฟอยล์		X
2.	เดินไปเอารถเข็นฟอยล์		X
3.	เข็นรถเข็นฟอยล์ไปเอาม้วนฟอยล์ที่สต็อก	X	
4.	เข็นรถบรรทุกฟอยล์มาไว้หลังเครื่อง	X	
5.	เดินไปเอาลิฟท์ยกฟอยล์		X
6.	หยุดเครื่อง	X	
7.	ไปเอาถุงแฉะตัวนิรภัยทำการล็อกตู้สวิตช์นิรภัย	X	
8.	กดลิฟท์ฟอยล์ให้ตรงกับแขนรถฟอยล์	X	
9.	เข็นรถเข็นมาให้ตรงกับบล็อกแกนฟอยล์ปรับระดับให้สูง	X	
10.	เอาฟอยล์ม้วนเก่าออกเอาม้วนใหม่ไปสวมทำการต่อฟรอย	X	
11.	ปลดล็อกตู้สวิตช์นิรภัย	X	
12.	สตาร์ทเครื่องไล่ฟอยล์ร้อนจนได้น้ำตาลของแรกตรวจสอบดูว่าฟอยล์ไม่ขาว		X
13.	เข็นรถเข็นฟอยล์ลิฟท์ฟอยล์ไปห้องเก็บแล้วเก็บรถเข็น		X








จากตารางที่ 7 การแยกงานในและงานนอกด้วยเทคนิค SMED พบว่าขั้นตอนที่สามารถเตรียมไว้ล่วงหน้าโดยไม่จำเป็นต้องทำตอนเครื่องจักรหยุดแล้วคือขั้นตอนที่ 1, 2, 5, 12 และ 13 ซึ่งส่วนใหญ่เป็นขั้นตอนการเดินทางไปเอาอุปกรณ์ เครื่องมือ และรถเข็นจากสถานที่เก็บ อีกทั้งยังต้องนำอุปกรณ์ เครื่องมือและรถเข็นดังกล่าวไปเก็บยังที่เก็บซึ่งอยู่ห่างจากที่ปฏิบัติงาน โดยขั้นตอนที่จำเป็นต้องทำ

เมื่อเครื่องจักรหยุดทำงานเท่านั้นมีดังนี้คือ ขั้นตอนที่ 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, และ 11 โดยส่วนใหญ่ขั้นตอนการทำงานเหล่านี้จะเป็นขั้นตอนการปฏิบัติงานที่ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่ม เช่น การกดสวิตช์หยุดเครื่อง และการกดลิฟท์ฟอยล์ให้ตรงกับแขนรถฟอยล์ซึ่งจากเหตุผลนี้ขั้นตอนงานในที่เหลืออยู่จึงถูกนำไปพิจารณาหาแนวทางปรับปรุงด้วยเทคนิค ECRS ตามตารางที่ 8 ในลำดับต่อไป

ตารางที่ 8 การลดเวลาสูญเสียด้วยเทคนิค ECRS

ลำดับ	วิธีปัจจุบัน		วิธีการปรับปรุง	
	วิธีการ	รูปภาพ	วิธีการ	รูปภาพ
E-1.	เดินไปเอาเทปติดฟอยล์		เตรียมอุปกรณ์ไว้ล่วงหน้า	
E-2.	เดินไปเอารถเข็นฟอยล์		ทำจุดเก็บรถใหม่หลังเครื่องที่มีระยะห่างน้อยลง	

ตารางที่ 8 (ต่อ) การลดเวลาสูญเปล่าด้วยเทคนิค ECRS

ลำดับ	วิธีปัจจุบัน		วิธีการปรับปรุง	
	วิธีการ	รูปภาพ	วิธีการ	รูปภาพ
R-3.	เข็นรถเข็นฟอยล์ไป เอาม้วนฟอยล์ที่ สต็อก		นำรถเข็นไปเอาม้วน ฟอยล์จากจุดเก็บรถเข็น ใหม่ที่ใกล้ขึ้น	
R-4.	เข็นรถเข็นฟอยล์ กลับมาไว้หลังเครื่อง		เข็นมาไว้ตรงจุดเก็บ รถเข็นฟอยล์ที่ทำมาใหม่ พร้อมกับแกนฟอยล์ สำรอง	
R-5.	ไปเอากุญแจตู้สวิตซ์ นิรภัย		ทำจุดเก็บกุญแจใหม่ที่ ใกล้ที่ใช้งานมากขึ้น	
S-6.	กดลิฟท์ฟอยล์ให้ตรง กับแกนรถฟอยล์โดย ไม่มีระดับที่แน่นอน		ทำเซนเซอร์ลดระดับ ความสูง	
S-7.	เข็นรถเข็นมาให้ตรง กับบล็อคแกนฟอยล์ ปรับระดับให้สูง		ทำเซนเซอร์ให้อยู่ใน ระดับพอดี	
S-8.	เอาฟอยล์ม้วนเก่า ออก เอาม้วนใหม่ไป สวมทำการต่อฟอยล์		มีแกนฟอยล์สำรอง (การต่อฟอยล์ก่อนหมด ม้วน)	
R-10.	เข็นรถเข็นฟอยล์และ ลิฟท์ฟอยล์ไปห้อง เก็บ		เก็บที่จุดเก็บรถเข็นใหม่ หลังเครื่อง	

จากข้อมูลการลดเวลาสูญเปล่าด้วยเทคนิค ECRS ในตารางที่ 8 พบว่ามีขั้นตอนทั้งหมด 10 ขั้นตอนที่สามารถทำการปรับปรุงเพื่อลดเวลาด้วยเทคนิค ECRS ดังนี้ ลดเวลาด้วยการกำจัด (Eliminate) ตามขั้นตอนลำดับที่ E-1, E-2 และ E-10 โดยการกำจัดขั้นตอนดังกล่าวและนำไปทำเป็นงานนอกก่อนที่เครื่องจักรจะหยุด

ทำงานด้วยการเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือดังกล่าวไว้ล่วงหน้า ลดเวลาด้วยการจัดเรียงใหม่ (Re-arrange) ตามขั้นตอนลำดับที่ R-3, R-4 และ R-5 โดยการจัดผังการทำงานให้สถานที่จัดเก็บอุปกรณ์เปลี่ยนที่มาอยู่ใกล้กับจุดปฏิบัติงานมากขึ้นและสุดท้าย ลดเวลาด้วยการทำให้ง่ายขึ้น (Simplify) ตามขั้นตอนลำดับที่ S-6, S-7 และ S-8

โดยการสร้างอุปกรณ์ช่วยให้ทำงานง่ายขึ้นเช่นสร้าง เซนเตอร์ไลค์ช่วยปรับระดับ และการเตรียมฟอยล์สำรองไว้เพื่อใช้ต่อก่อนการหดรัดเป็นต้น หลังจากการทำ การปรับปรุงตามแนวทาง SMED และ ECRS ตามที่ระบุไว้

ในตารางที่ 7 และ 8 ขั้นตอนการทำงานหลังการปรับปรุง จึงถูกนำมาประเมินอีกครั้งด้วยแผนภูมิการไหลเพื่อ ตรวจสอบประสิทธิผลของแนวทางการปรับปรุงดังกล่าว โดยแสดงไว้ในตารางที่ 9 และ 10

ตารางที่ 9 ผลการประเมินกระบวนการหลังการปรับปรุงด้วยแผนภูมิการไหล

ลำดับ	กิจกรรม	ระยะทาง (เมตร)	เครื่องหมาย					เวลา (วินาที)
			●	➔	◐	■	▼	
1.	เข็นรถไปเอาฟอยล์ (ทำจุดเก็บรถเข็นไว้หลังเครื่อง)	20						60
2.	เข็นรถบรรทุกฟอยล์พร้อมแกนสำรองกลับมา	20						60
3.	หยุดเครื่อง							5
4.	ไปเอากุญแจที่จุดเก็บที่ทำขึ้นใหม่	6						15
	ล็อคตู้นิรภัย							5
5.	ถอดลิฟท์ฟอยล์ให้ตรงกับเซนเตอร์ไลน์ที่ทำไว้							20
6.	เข็นรถเตรียมให้ตรงกับแกนฟอยล์ที่ทำเซนเตอร์ไลน์ไว้	2						15
7.	ยกแกนม้วนเก่าออกเอาม้วนใหม่ใส่ (มีฟอยล์สำรอง) เปลี่ยนฟอยล์ก่อนหดรัดม้วน							25
8.	ปลดล็อคตู้นิรภัย							15
9.	สตาร์ทเครื่องไล่ฟอยล์ร่องจนได้น้ำตาลของแรก							30
	ตรวจสอบว่าฟอยล์ไม่ขาว							30
<b>รวม ระยะทาง (เมตร) และ เวลา (วินาที) ทั้งหมด</b>		<b>48</b>						<b>280</b>

ตารางที่ 10 สรุปผลการวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิการไหลของการทำงานเปรียบเทียบก่อนและหลังปรับปรุง

สัญลักษณ์	ความหมาย	เวลา (วินาที)		เวลาที่ลดลง	
		ก่อน	หลัง	เวลา (วินาที)	เปอร์เซ็นต์
●	การปฏิบัติงาน	170	70	100	59%
◐	การรอคอย	30	30	0	0%
■	การตรวจสอบ	30	30	0	0%
▼	การเก็บพัก	60	0	60	100%
➔	การเคลื่อนย้าย	555	150	405	73%
<b>เวลาทั้งหมด</b>		<b>845</b>	<b>280</b>	<b>565</b>	<b>67%</b>

จากผลการปรับปรุงวิธีการทำงานในขั้นตอนการเปลี่ยนม้วนกระดาษอะลูมิเนียมฟอยล์ตามแนวทาง SMED และ ECRS ตามที่ระบุไว้ในตารางที่ 7 และ 8 พบว่าเวลาโดยรวมลดลง 565 วินาที จาก 845 วินาที เป็น 280 วินาที โดยคิดเป็น 67% ของเวลาการทำงานก่อนการปรับปรุง โดยเกิดจากการลดลงของเวลาสูญเสีย เช่น การรอคอย การตรวจสอบ การเก็บพัก และการเคลื่อนย้าย ซึ่งเวลาที่ลดลงมากที่สุดอยู่ในหมวดการเคลื่อนย้าย โดยลดลงจาก 555 วินาทีเหลือ 150 วินาที คิดเป็นเวลาที่ลดลง 73% จากเวลาก่อนการปรับปรุง ทั้งนี้เนื่องจากการปรับปรุงด้วยแนวทางการเปลี่ยนงานในเป็นงานนอก โดยการเตรียมอุปกรณ์ไว้ก่อนทำการหยุดเครื่องจักรเพื่อลดเวลาการเดินและเคลื่อนย้าย ตามเทคนิค SMED นอกจากนี้การปรับปรุงด้วยเทคนิค ECRS เช่นการจัดเตรียมแกนฟอยล์สำรอง เพื่อการต่อฟอยล์ก่อนการใช้งานหมดม้วน และการทำเซนเซอร์ไลน์ให้การปรับระดับความสูงของลิฟท์ยกฟอยล์ง่ายและรวดเร็วขึ้นก็เป็นส่วนที่ทำให้เวลาโดยรวมที่เหลือจากการทำการปรับปรุงโดยการเปลี่ยนงานในเป็นงานนอกตาม เทคนิค SMED ลดลง นอกจากนี้เวลาสูญเสียที่ลดลงจากการปรับปรุงดังกล่าวแล้วกำลังการผลิตยังสามารถเพิ่มขึ้นได้จากการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักรถึง 16,143 ซองต่อวันดังแสดงในตารางที่ 11 โดยขั้นตอนการทำงานหลังการปรับปรุงทั้งหมดถูกนำไปจัดทำเป็นคู่มือการทำงานที่เป็นมาตรฐานให้พนักงานใช้เป็นมาตรฐานในการทำงานต่อไป อย่างไรก็ตามกำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้น 16,143 ซองต่อวันยังเป็นผลที่เกิดจากการคำนวณเท่านั้นซึ่งต้องนำไปทดลองปฏิบัติเพื่อทราบผลที่เกิดขึ้นจริงกับกระบวนการผลิต

ตารางที่ 11 กำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้นจากการปรับปรุงการทำงาน

รายการ	หน่วย	ค่า	สัญลักษณ์
เวลาดมาตรฐานในการผลิต	วินาที/ซอง	0.21	A
เวลาสูญเสียที่ลดลง	วินาที/ครั้ง	565	B
จำนวนครั้งในการเปลี่ยนฟอยล์ต่อวัน	ครั้ง/วัน	6	C
กำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้นจากการปรับปรุงการทำงาน	ซอง/วัน	16,143	(BxC)/A

## 6. สรุปผลการวิจัย

การนำเทคนิค การปรับเปลี่ยนเครื่องจักรอย่างรวดเร็ว (SMED) และ ECRS มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาแนวทางการลดเวลาการปรับตั้งเครื่องจักรเพื่อลดความสูญเสียในกระบวนการบรรจุผลิตภัณฑ์หัวเชื้อเครื่องดื่มชนิดผง พบว่ากระบวนการบรรจุผลิตภัณฑ์ผสมแล้วลงซอง มีเวลาการทำงานที่สูญเสียจากขั้นตอนการเปลี่ยนม้วนกระดาษอะลูมิเนียมฟอยล์สูงที่สุดและมีสาเหตุหลักมาจากการขาดขั้นตอนการทำงานมาตรฐานให้กับพนักงานได้ปฏิบัติตามเพื่อให้การทำงานมีประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นหลังจากที่งานวิจัยนี้นำเสนอแนวทางการปรับปรุงด้วยการเปลี่ยนงานในเป็นงานนอกตามเทคนิค SMED และการจัดเรียงงานใหม่ กำจัดงานที่ไม่จำเป็นออก และทำให้งานที่มีทำได้ง่ายขึ้นโดยการใช้อุปกรณ์ตามหลักการ ECRS สามารถทำให้เวลาสูญเสียในขั้นตอนการเปลี่ยนม้วนกระดาษอะลูมิเนียมฟอยล์ลดลง 565 วินาทีต่อครั้ง หรือคิดเป็น 67% จากเวลาเดิมก่อนการปรับปรุงโดยสามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้ 16,143 ซองต่อวัน



## 7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ โรงงานกรณีศึกษาซึ่งเป็นผู้ผลิต  
ผลิตภัณฑ์หัวเชื้อเครื่องคั้นชนิดผง ในการให้ความร่วมมือ

และสนับสนุนข้อมูลระหว่างการทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไป  
ด้วยดี

### เอกสารอ้างอิง

- [1] พรเทพ เหลือทรัพย์สุข และ ยูพา กลอนกลาง. การปรับเปลี่ยนเครื่องจักรอย่างรวดเร็ว. สำนักพิมพ์ อี.ไอ.สแควร์, 2550.
- [2] วันชัย ริจิรวนิช. หลักการเพิ่มผลผลิตในอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [3] โกสินทร์ เจริญวรกิจ และจิตรา รุ่งกิจการพานิช. การลดเวลาในการปรับตั้งลูกอัดสำหรับการผลิตไม้ฝาสังเคราะห์. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, 2554; 22(2): 48-55.
- [4] ธนะรัตน์ รัตนกุล, กลางเดือน โปชนา และ กันต์ธมน สุขกระจ่าง. การลดเวลาปรับตั้งเครื่องพิมพ์หมึกสีในโรงงานผลิตกล่องกระดาษ. การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, 17-19 ตุลาคม, ชะอำ, เพชรบุรี, 2555.
- [5] ชานิดา พิทยานนท์ และปริญญา พัฒนวัตน์ (2560). การลดเวลาการเปลี่ยนลูกกลิ้งและปรับตั้งเครื่องรีดพลาสติกแผ่นด้วยเทคนิค SMED, การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร, 19 พฤษภาคม, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, กรุงเทพฯ, 2560.
- [6] ฤทธิชัย สังฆทิพย์, วัชรุตม์ ชีววิริยะนนท์, เฉลิมศักดิ์ ถาวรวัตร์, วิฑูรย์ อบรม และประยูร สุรินทร์. การลดเวลาการผลิตกระบวนการเชื่อมชิ้นส่วนยานยนต์ด้วยเทคนิค ECRS. การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี, 16-18 ตุลาคม 2556 ณ โรงแรมเอวัน เดอะ รอยัล กรุ๊ป พัทยา จังหวัดชลบุรี, 2556.
- [7] มงคล กิตติญาณขจร. การประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับขั้นเชิงวิเคราะห์ในการคัดเลือกโครงการปรับปรุงคุณภาพเพื่อลดของเสีย: กรณีศึกษากระบวนการผลิตถังบรรจุอากาศ. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี*, 2561; 16(2): 71-85.
- [8] ปฐมพงษ์ หอมศรี และจักรพรรณ คงธนะ. การลดของเสียในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนฉีดพลาสติกสำหรับชิ้นส่วนยานยนต์โดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง. *วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต*, 2556; 3(2): 73-95.



# การวิเคราะห์ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อหาผลกระทบ เนื่องจากการอัดความดันภายในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดเบต้า ทำงานบนแหล่งความร้อนอุณหภูมิคงที่

## CFD Analysis on Charged Pressure Effect of Beta-Stirling Engine with Constant Temperature Heat Source

ณัฐกิจ ทองดี และ ชโลธร ธรรมแท้\*

Nattakit Tongdee and Chalothorn Thumthae\*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา

School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology  
 111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

\*E-mail: chalothorn@sut.ac.th

### บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการศึกษาพารามิเตอร์ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดเบต้า โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาได้แก่ ความดัน (Charged pressure) ที่อัดเข้าไปภายในเครื่องยนต์สเตอร์ลิง โดยการคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหลและการวิเคราะห์กำลังของเครื่องยนต์ผ่านการใช้โปรแกรม ANSYS Fluent 16.2 ในการวิเคราะห์โดเมนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ถูกสร้างในลักษณะของ 2D-Axisymmetric และแบบจำลองความปั่นป่วน  $k - \epsilon$  กำหนดให้แหล่งอุณหภูมิความร้อนคงที่ 773 K แหล่งอุณหภูมิต่ำ 300 K และมีกำหนดการอัดความดันตั้งแต่ 1, 2, 3 และ 4 bar โดยผลจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่ากำลัง อัตราการถ่ายเทความร้อน ความเร็วของอากาศภายในเครื่องยนต์เปลี่ยนแปลงไปตามการอัดความดัน การอัดความดันภายในจะทำให้อากาศมีการเปลี่ยนแปลงความดันในวัฏจักรที่มากขึ้นจึงส่งผลให้กำลังสูงสุดที่ได้มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามการอัดความดัน ในขณะที่เดียวกันอากาศที่เป็นสารทำงานจะมีความเร็วการไหลและอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ผิวสูงขึ้นเมื่อความดันภายในเครื่องยนต์ถูกอัดให้มีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่ในทางกลับกันการกระจายของอุณหภูมิภายในมีค่าที่ต่ำลงซึ่งตรงกันข้ามกับค่าของการอัดความดัน

**คำสำคัญ:** เครื่องยนต์สเตอร์ลิง พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ อัดความดันเครื่องยนต์ การไหลแบบอัดตัว

### ABSTRACT

This project presented an investigation of effect of charged pressure for power generation from Beta-Stirling engine. The engine was calculated power output and analyzed by computational fluid dynamics software (ANSYS Fluent 16.2). The control volume was considered as 2D axisymmetric for numerical method and the  $k - \epsilon$  turbulence model was used. The engine was calculated at constant hot end temperature, 773 K and constant cold end temperature, 300 K. The charged pressure in each case was 1, 2, 3 and 4 bar. The results showed that power output, heat transfer rate and flow velocity were varied depending on the charged pressure. Increasing charged

pressure of a working fluid resulted in increasing of power output due to increasing of pressure distribution. Meanwhile, heat transfer rate increased due to higher fluid velocity. On the other hand, temperature variation in hot volume decreased when charged pressure was increased.

**Keyword:** Stirling engine, Computational fluid dynamics, Charged pressure, Compressible flow

## 1. บทนำ

ปัจจุบันการมองหาพลังงานทางเลือกที่เข้ามาแทนแหล่งพลังงานหลักอย่างน้ำมันกำลังเป็นที่สนใจและศึกษากันอย่างกว้างขวางเพื่อหาแหล่งพลังงานทางเลือกที่สามารถตอบสนองความต้องการที่เพิ่มสูงขึ้น แหล่งพลังงานสะอาดที่สามารถให้พลังงานได้อย่างต่อเนื่องและไม่ก่อให้เกิดมลพิษเกิดขึ้นจึงเป็นแหล่งพลังงานที่มีความน่าสนใจอย่างมาก ตัวอย่างเช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานความร้อนใต้พิภพ เป็นต้น นั่นทำให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีที่จะเปลี่ยนพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานที่สามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ เช่น การเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้า เทคโนโลยีที่มีความน่าสนใจและมีการศึกษาเป็นจำนวนมากชนิดหนึ่งนั่นคือ เครื่องยนต์สเตอร์ลิง โดยเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจะเปลี่ยนพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานกล แล้วจึงสามารถเปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงจะสามารถทำงานโดยประกอบขึ้นจากชิ้นส่วนหลัก คือ ลูกสูบกำลัง (Power Piston), ลูกสูบดิสเพลสเซอร์ (Displacer), อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนฝั่งร้อนและเย็น (Hot & Cold heat exchanger) และ รีเจนเนอเรเตอร์ (Regenerator) ซึ่งการทำงานเกิดจากสารทำงานที่บรรจุภายในเครื่องยนต์ ถูกเหนี่ยวนำให้เคลื่อนที่โดยลูกสูบดิสเพลสเซอร์เพื่อรับความร้อนจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ในฝั่งร้อนทำให้สารทำงานมีอุณหภูมิสูงขึ้นแล้วจึงเกิดการขยายตัวเพื่อดันให้ลูกสูบกำลังเคลื่อนที่ หลังจากนั้นสารทำงานจะเคลื่อนไปยังอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในฝั่งเย็นเพื่อนำความร้อนไปทิ้งและเพื่อให้สามารถพร้อมกลับมารับความร้อนใหม่ เกิดเป็นวัฏจักรอีกครั้งหนึ่ง โดยรีเจนเนอเรเตอร์ที่บรรจุภายในเครื่องยนต์จะทำหน้าที่ช่วยกักเก็บและปล่อยความร้อนให้สารทำงาน ซึ่งจะสามารถลดปริมาณความร้อนที่ต้องการจากแหล่งความร้อน ช่วยทำให้การเพิ่ม

ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ให้มีความสูงขึ้น นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ ดังนี้

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์ที่เรียกว่าเครื่องยนต์เผาไหม้ภายนอก (External combustion engine) หมายความว่าเครื่องยนต์นั้นไม่เกิดการเผาไหม้ภายในเครื่องยนต์แต่จะนำความร้อนมาจากแหล่งความร้อนภายนอก นั่นทำให้เครื่องยนต์สามารถรับความร้อนจากแหล่งความร้อนได้อย่างหลากหลายและการพัฒนาให้เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพหรือกำลังที่สูงขึ้นได้ จำเป็นต้องมีการศึกษาและปรับปรุงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ให้มีความเหมาะสม ในการประเมินผลกระทบของพารามิเตอร์ การทำการทดสอบเครื่องยนต์เป็นวิธีที่มีการศึกษาอยู่ไม่น้อย โดยทำการเปลี่ยนวัสดุหรือขนาดของพารามิเตอร์ต่าง ๆ แล้วหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์นั้นออกมา การศึกษาของ B. Kongtragool และ S. Wongwises [1, 2] ทำการสำรวจ การพัฒนาและการใช้งานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงบนแหล่งความร้อนจากแสงอาทิตย์และเสนอว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา สองลูกสูบกำลังนั้นมีความสามารถที่จะทำงานได้บนแหล่งความร้อนจากแสงอาทิตย์แล้วทำการสร้างและทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา โดยอาศัยแหล่งพลังงานความร้อนจาก solar simulator ที่ความเข้มของแสงต่างกันเพื่อหาการตอบสนองการทำงานของเครื่องยนต์ต่อความเข้มแสงที่ได้ พบว่ายิ่งความเข้มของแสงมีค่าสูงก็จะสามารถยั้งได้กำลังของเครื่องยนต์สูงขึ้นตามไปด้วย นอกจากการศึกษารูปแบบแหล่งความร้อน ค่าของพารามิเตอร์ภายในเครื่องยนต์ก็มีความสำคัญและมีการศึกษาเช่นกัน

Wen-Lih Chen et al. [3] ได้ทำการทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเพื่อหาตัวแปรของรีเจนเนอเรเตอร์ที่มีผลต่อกำลังที่ได้ โดยจากการทดสอบพบว่าการใช้ขนาดเส้นใยของรีเจนเนอเรเตอร์ที่เล็กลงจะทำให้ความดัน

ที่สูญเสียภายในเครื่องยนต์สูงขึ้นและส่งผลถึงการลดประสิทธิภาพของตัวรีเจนเนอเรเตอร์เองด้วยและการศึกษาของ M. Tanaka et al. [4] ทำการศึกษาทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรของรีเจนเนอเรเตอร์และเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเพื่อทำนายผลของความดันสูญเสียเมื่อสารทำงานไหลผ่านรีเจนเนอเรเตอร์ เพื่อที่จะสามารถทำการพัฒนาเครื่องยนต์ได้สะดวกมากขึ้น นอกจากการทดสอบแล้ว การใช้สมการมาเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์ก็มีการศึกษาอย่างแพร่หลายเช่นกัน

B. Kongtragool และ S. Wongwiset [5] ทำการหาสมการที่สามารถทำนายกำลังของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา แล้วนำมาเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ของแต่ละสมการ พบว่าการใช้สมการ Mean pressure power formula ในการประเมินมีความเหมาะสมเพียงพอที่จะหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องยนต์ในเบื้องต้น ซึ่งสมการดังกล่าวถูกพัฒนาต่อมาจาก Beale number โดยอาศัยการเก็บข้อมูลของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดต่าง ๆ

K. Kraitong และ K. Mahkamov [6] ทำการศึกษาหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ทำงานกับพลังงานแสงอาทิตย์ โดยวิเคราะห์จากสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์และทำการคำนวณร่วมกับ Genetic Algorithm ทำให้สามารถเพิ่มกำลังของเครื่องยนต์ให้สูงขึ้นได้โดยยังคงทำงานที่แหล่งความร้อนเดิม

B. Kongtragool และ S. Wongwiset [7] ได้มีการศึกษาผลกระทบของปริมาตรตาย (Dead volume) ภายในส่วนเย็น (Cold space), ส่วนร้อน (Hot space) และรีเจนเนอเรเตอร์ ที่มีผลต่อกำลังเครื่องยนต์สเตอร์ลิงด้วยสมการเทอร์โมไดนามิกส์เช่นกัน ซึ่งผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่ายิ่งมีขนาดของ ปริมาตรตาย ที่มากขึ้นจะส่งผลทำให้กำลังเครื่องยนต์ต่ำลงไป ซึ่งจะเห็นได้ว่าการศึกษาที่ได้กล่าวมานี้มีความซับซ้อนมากขึ้นตามลำดับ แต่ก็ยังคงไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นพร้อมกับสามารถเห็นภาพที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน ดังนั้นการวิเคราะห์ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational

fluid dynamics, CFD) จึงเข้ามามีบทบาทอย่างมาก เนื่องจากสามารถศึกษาและแสดงผลเฉพาะจุดที่สนใจได้ และเห็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ชัดเจนกว่าการวิเคราะห์ก่อนหน้านี้

Wen-Lih Chen et al. [8] ได้ทำการศึกษาค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านผิวเครื่องยนต์สเตอร์ลิง การศึกษาบริเวณถ่ายเทความร้อนสามารถบอกได้ว่าบนบริเวณผิวที่ถ่ายเทความร้อนนั้นมีการถ่ายเทความร้อนไม่เท่ากันตลอดทั้งผิวเนื่องจากผลของอุณหภูมิและความเร็วการไหลที่ต่างกันในแต่ละบริเวณ

S. Alfarawi [9] ทำการศึกษาโดยใช้เทคนิคเดียวกันนี้เพื่อหาผลกระทบของมุมเฟส (Phase angle) กับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา และพบว่าค่ามุมเฟสที่เหมาะสมคือ 105 องศา ซึ่งจะให้กำลังสูงสุด

ดังนั้นในบทความนี้จึงมีแนวคิดที่จะทำการศึกษาค่าผลกระทบเนื่องจากการอัดความดันเข้าไปภายในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยเลือกพิจารณาชนิดเบต้าที่อุณหภูมิคงที่ เนื่องจากมีการระบุข้อมูลที่ครบถ้วนรวมถึงสามารถลดความซับซ้อนในการคำนวณได้ เครื่องยนต์จะถูกศึกษาโดยดูปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในได้ผ่านการศึกษาโดยโปรแกรม ANSYS Fluent เพื่อให้สามารถทำความเข้าใจปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในเมื่อมีความดันสูงขึ้น และสามารถรู้แนวโน้มในการสร้างงานและกำลังของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีความสัมพันธ์กับความดันที่อัดเข้าไปภายใน

## 2. การจำลองระบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

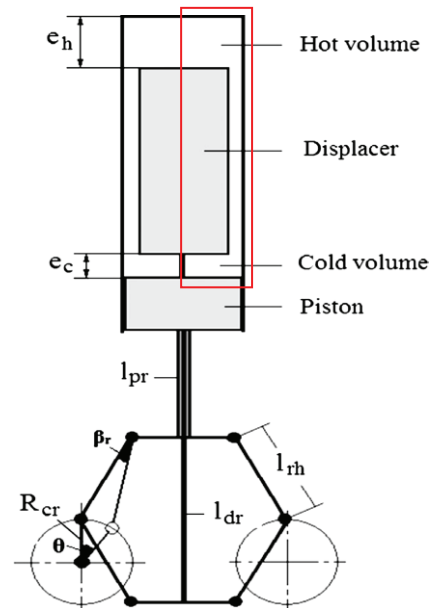
ในการศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องยนต์สเตอร์ลิง มีการทดสอบในเครื่องยนต์หลากหลายรูปแบบและหลากหลายขนาด อย่างไรก็ตามการทดสอบเหล่านั้นส่วนมากไม่ได้ระบุข้อมูลที่ครบถ้วนชัดเจนสำหรับการนำมาสร้างเป็นโคเดนของโปรแกรม เช่น ขนาดของเครื่องยนต์ ค่าพารามิเตอร์ที่ขอบเขตต่าง ๆ เป็นต้น ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกใช้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดเบต้าจากบทความของ Aksoy และ Cinars [10] โดยใช้ระบบ

กลไกแบบ Rhombic drive ซึ่งมีข้อมูลขนาดเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแสดงภายในบทความเพียงพอต่อการสร้างโดเมนดังแสดงในตารางที่ 1

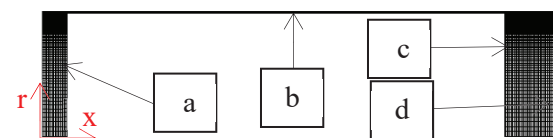
ซึ่งการเลือกเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดเบต้ามาเพื่อวิเคราะห์เนื่องจากมีลักษณะของปริมาตรภายในเครื่องยนต์ที่สมมาตรรอบแกนตามยาวของเครื่องยนต์ ทำให้ในการสร้างโดเมนเพื่อวิเคราะห์สามารถวิเคราะห์บนระนาบสมมาตร 2 มิติ (2D Axisymmetric) ได้โดยเครื่องยนต์ต้นแบบแสดงตามรูปที่ 1 ในการวิเคราะห์เครื่องยนต์ใช้อากาศเป็นสารทำงาน ภายในจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนขยาย (Expansion zone) หรือ ส่วนร้อน, ส่วนอัด (Compression zone) หรือ ส่วนเย็น และช่องว่างระหว่างคิสเพลสเซอร์และกระบอกสูบ (Narrow zone) โดยอากาศภายในทั้งสามส่วนจะถูกสร้างเป็นโดเมนของสารทำงานโดยไม่พิจารณาการหายไปของปริมาตรอากาศที่เกิดจากแกนข้อต่อลูกสูบคิสเพลสเซอร์ เนื่องจากมีปริมาตรคิดเป็นเพียง 3.1 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรอากาศทั้งหมดและเพื่อให้สามารถลดความซับซ้อนในการคำนวณของโดเมนลงได้ โดเมนถูกสร้างตามรูปที่ 2

ตารางที่ 1 ขนาดของเครื่องยนต์ต้นแบบ [10]

ตัวแปรของเครื่องยนต์	ขนาด (มิลลิเมตร)
เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกลูกสูบคิสเพลสเซอร์	86
เส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบคิสเพลสเซอร์	84.5
ความยาวลูกสูบคิสเพลสเซอร์	155
เส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบกำลัง	86
ความยาวของลูกสูบกำลัง	90
Rhombus length ( $l_{rh}$ )	66
รัศมีของ Crankshaft ( $R_{cr}$ )	$l_{rh}/2.6666$
แหล่งความร้อน ( $T_H$ ) (K)	773
แหล่งความเย็น ( $T_C$ ) (K)	300
สารทำงาน	อากาศ



รูปที่ 1 แสดงลักษณะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดเบต้าและกลไกแบบ Rhombic drive [10]



รูปที่ 2 แสดงโดเมนของสารทำงานภายในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดเบต้า [11] a- ส่วนร้อน b- ช่องว่างระหว่างคิสเพลสเซอร์และกระบอกสูบ c- ส่วนเย็น d – Moving wall

### 3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

#### 3.1 แบบจำลองความสัมพันธ์ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

โดเมนที่ถูกสร้างขึ้นจะถูกตั้งค่าให้สามารถ Moving mesh ได้ โดยการตั้งค่าบริเวณลูกสูบ (ผิว d) และลูกสูบคิสเพลสเซอร์ (ผิว a, b, c) ให้มีการเคลื่อนที่โดยอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์สร้างโปรแกรมการเคลื่อนที่ของทั้งสองส่วนให้เคลื่อนที่สัมพันธ์กันเป็นไปตามกลไกแบบ Rhombic drive ดังสมการที่แสดงต่อไปนี้

$$e_c = (R_{cr} \cos \theta - l_{rh} \cos \beta_r + l_r) - \left( l_{pr} + R_{cr} \cos \theta + l_{rh} \cos \beta_r + \frac{H_p}{9} \right) \quad (1)$$

$$e_h = U_c - (R_{cr} \cos \theta - l_{rh} \cos \beta_r + l_{dr} + H_d) \quad (2)$$

$$\beta_r = \sin^{-1}(0.5 - \frac{R_{cr} \sin \theta}{l_{rh}}) \quad (3)$$

แล้วสามารถนำมาแปลงเพื่อหาตำแหน่งการเคลื่อนที่ของลูกสูบและลูกสูบดิสเพลสเซอร์ที่เป็นไปตามรูปที่ 3 หาปริมาตรของส่วนเย็นและส่วนร้อน ได้ดังนี้

$$V_c = e_c A_c \quad (4)$$

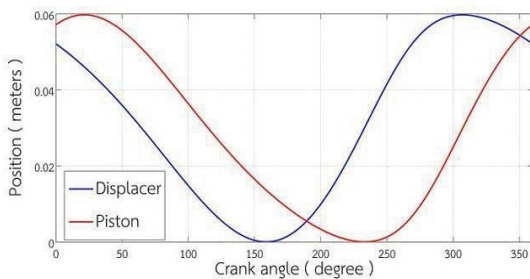
$$V_h = e_h A_h \quad (5)$$

โดย  $V_c, V_h$  คือปริมาตรอากาศส่วนเย็นและส่วนร้อน  $A_c, A_h$  คือพื้นที่หน้าตัดของส่วนเย็นและส่วนร้อน ในหนึ่งรอบวัฏจักรจะทำการคำนวณ 600 ครั้งต่อหนึ่งรอบวัฏจักร แล้ววนรอบใหม่เพื่อทำการคำนวณซ้ำจนกว่าค่าอุณหภูมิและความดันเริ่มต้นของวัฏจักรจะไม่เปลี่ยนแปลงไปจากวัฏจักรก่อนหน้า หลังจากนั้นจึงจะสามารถคำนวณหาค่า Power output ได้ดังนี้

$$W_{indicated} = \int_0^T (P_c \frac{dV_c}{dt} + P_h \frac{dV_h}{dt}) dt \quad (6)$$

$$P_{indicated} = f W_{indicated} \quad (7)$$

โดย  $P_c, P_h$  คือความดันภายในส่วนเย็นและส่วนร้อน  $W_{indicated}$  คืองานสุทธิที่เครื่องยนต์สร้างได้ใน 1 รอบวัฏจักร  $f$  คือ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ในหน่วยรอบต่อวินาทีและ  $P_{indicated}$  คือกำลังที่เครื่องยนต์สร้างใน 1 รอบวัฏจักร



รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ของตำแหน่งการเคลื่อนที่ระหว่างลูกสูบและลูกสูบดิสเพลสเซอร์

### 3.2 สมการควบคุม

ในการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจะสามารถทำการแก้ปัญหาโดยใช้วิธีการทาง Numerical โดยอาศัยการแก้สมการควบคุมคือ สมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม สมการพลังงานและสมการสภาวะ โดยพิจารณาอากาศสามารถอัดตัวได้ โดยสามารถเขียนได้ดังนี้

สมการความต่อเนื่อง [12]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = 0 \quad (8)$$

สมการโมเมนตัม[12]

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho v_x v_x)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho v_r v_x)}{\partial r} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[ r \mu \left( 2 \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \mu \left( 2 \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{\partial v_r}{\partial x} \right) \right] + F_x \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho v_r)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho v_x v_r)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho v_r v_r)}{\partial r} = - \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \mu \left( 2 \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[ r \mu \left( \frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \right] - 2 \mu \frac{v_r}{r^2} + \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \vec{v}) + \rho \frac{v_r^2}{r} + F_r \quad (10)$$

โดยที่

$$\nabla \cdot \vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_x}{r} \quad (11)$$

สมการพลังงาน[13]

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot [k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{j}_j + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{v})] \quad (12)$$

โดยที่

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (13)$$

โดย  $\rho$  คือ ความหนาแน่น,

$x, r$  คือ axial coordinate และ radial coordinate

$v_x, v_r$  คือ axial velocity และ radial velocity

$\mu$  คือ molecular viscosity

$F$  คือ source terms

$k_{eff}$  คือ effective conductivity

$\vec{j}_j$  คือ diffusion flux

$\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}$  คือ viscous dissipation



$h$  คือ sensible enthalpy

ในการวิเคราะห์แบบจำลองความปั่นป่วนมีการเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วน  $k - \epsilon$  เนื่องจากการไหลของสารทำงานภายในเครื่องยนต์มีค่า เรย์โนลด์ส (Reynolds number) เกินกว่าค่าวิกฤตในช่วงของวัฏจักร

#### 4. เปรียบเทียบผลลัพธ์กับผลการทดลอง

##### 4.1 การหาความเป็นอิสระของกริดและเวลา (grid and time-step independence)

การวิเคราะห์โดยอาศัยสมการควบคุมเพื่อให้สามารถอธิบายปรากฏการณ์ภายในเครื่องยนต์ผ่านการใช้โปรแกรม ANSYS fluent 16.2 ในการแก้ปัญหา โดยก่อนที่จะเริ่มต้นการวิเคราะห์ ได้ทำการหาผลลัพธ์จาก CFD มาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากการทดลองเพื่อหาความถูกต้องของโปรแกรมที่ใช้ การเปรียบเทียบเริ่มต้นจากการทดสอบเพื่อหา grid และ time-step ที่เหมาะสมซึ่งจะไม่ส่งผลถึงผลลัพธ์ของการคำนวณที่จะได้มา โดยมีการทดสอบกับโดเมนที่มีปริมาตรกริดแตกต่างกัน 3 ค่า โดยแต่ละโดเมนมีจำนวนกริดอยู่ที่ 1,995 กริด, 7,870 กริด และ 31,140 กริด และทำการทดสอบกับจำนวนรอบการคำนวณในหนึ่งวัฏจักรอีก 3 ค่าคือ 300, 600 และ 900 รอบต่อวัฏจักร โดยจากการทดสอบพบว่าจำนวนรอบที่ 300 รอบต่อวัฏจักรนั้น ไม่สามารถใช้คำนวณที่จำนวนกริด 31,140 กริดได้ เนื่องจากในระหว่างการคำนวณจะเกิดปริมาตรเซลล์ในโดเมนติดลบ (Negative cell volume) ดังนั้นจึงทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการที่คำนวณ 600 และ 900 รอบต่อวัฏจักร ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เปรียบเทียบแล้วพบว่ามีความต่างกันไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ จึงเลือกพิจารณาโดเมนให้มีการคำนวณ 600 รอบต่อวัฏจักร และผลลัพธ์ที่ได้จากการเปลี่ยนจำนวนกริดคือ 32.1, 35.2 และ 35.9 วัตต์ตามลำดับ พบว่าผลลัพธ์ของโดเมนที่มีจำนวนกริด 7,870 กริด และ 31,140 กริด มีความต่างกันประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นโดเมนที่เหมาะสมจะ

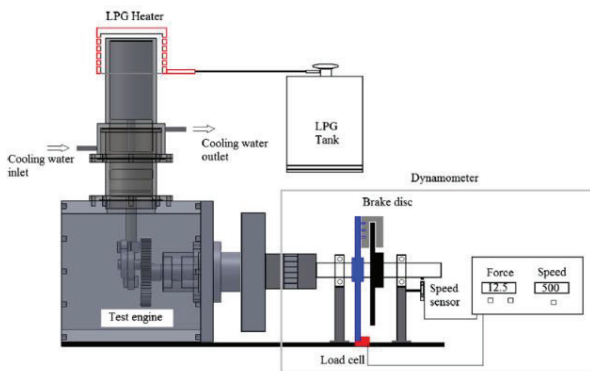
ถูกสร้างให้มีกริดอยู่ที่ 7,870 กริด และจำนวนรอบการคำนวณที่ 600 รอบต่อวัฏจักร

##### 4.2 การเปรียบเทียบผลการทดสอบ

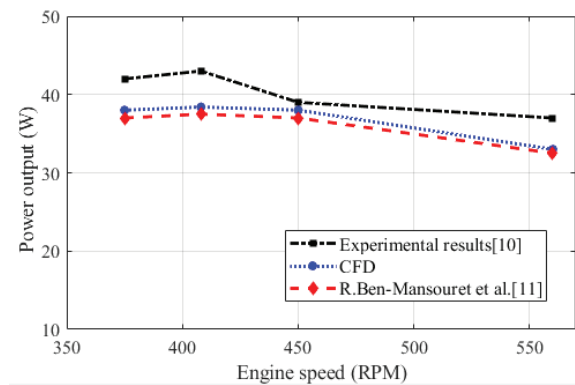
เนื่องจากในบทความ Aksoy และ Cinars นั้นระบุข้อมูลของเครื่องยนต์ไว้เพียงพอที่จะสามารถนำมาใช้ในการทดสอบด้วย CFD ได้ ดังแสดงในตารางที่ 1 แต่ในส่วนของพื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อน ไม่ได้ถูกระบุมาในบทความ จึงจำเป็นต้องอาศัยการประมาณจากรูปของการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4 เมื่อพิจารณาสารทำงานภายในเครื่องยนต์จากการทดสอบก่อนหน้านี้ พบว่าในช่วงของวัฏจักรสารทำงานมีค่าเรย์โนลด์สที่สูงกว่า 4,000 ดังนั้นจึงเลือกพิจารณาวัฏจักรโดยคิดรวมปรากฏการณ์ของการเกิดการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) โดยการพิจารณา Turbulent model standard  $k - \epsilon$  เข้าร่วมด้วย เนื่องจากลักษณะของการไหลไม่ได้ซับซ้อนและเป็นโมเดลที่สามารถใช้ได้หลากหลายและมักถูกเลือกเมื่อต้องการศึกษาการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของปัญหาที่สนใจรวมถึงในบทความของ R. Ben-Mansour et al.[11] ซึ่งทำการศึกษาเครื่องยนต์ชนิดเดียวกันนี้ ได้เลือกใช้โมเดลนี้ในการแก้ปัญหาด้วยเช่นกัน แต่ในส่วนเงื่อนไขขอบบริเวณผิวด้านข้างไม่มีกระบวนกรกระจายอุณหภูมิว่าเป็นลักษณะใด ทำให้ในการวิเคราะห์นี้ที่ผิวด้านข้างจะมีการประมาณความยาวของผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่ผิวร้อน, 773 K และผิวเย็น, 300 K ขาวผิวละ 12 เซนติเมตร ผิวลูกสูบคิสเพลสเซอร์ไม่มีการถ่ายเทความร้อน ซึ่งจะส่งผลให้ผลลัพธ์มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเมื่อเทียบกับผลลัพธ์ที่เคยมีการวิเคราะห์ไว้ซึ่งแสดงตามรูปที่ 5 ค่าตัวแปรที่กำหนดในการทดสอบด้วย CFD แสดงในตารางที่ 2

โดยผลของการทดสอบจะนำค่าจาก CFD เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบพร้อมกับเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิคเดียวกันนี้ในการศึกษาของ R. Ben-Mansour ซึ่งได้แสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งมีการทดสอบที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่

380, 408, 450 และ 560 RPM ซึ่งจะเห็นว่าผลลัพธ์จาก CFD นั้นมีแนวโน้มที่สอดคล้องและใกล้เคียงกับผลการทดลอง โดยจะเห็นว่าในขณะที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น ค่ากำลังจะมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้นไปจนถึงจุด ๆ หนึ่ง จะเริ่มมีค่าที่ลดลง ซึ่งเป็นแนวโน้มที่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง และผลลัพธ์ที่ได้จาก CFD มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงที่สุดอยู่ที่ 11.6% ที่ความเร็วรอบ 408 RPM เมื่อเทียบกับค่าจากการทดลอง



รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างชุดทดลอง [10]



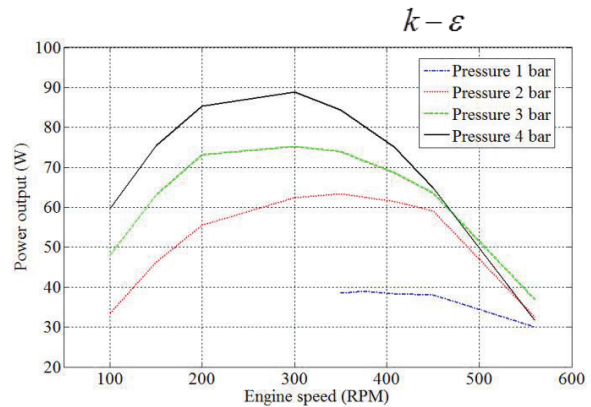
รูปที่ 5 ภาพเปรียบเทียบค่ากำลังที่ได้จากผลการทดลองที่ความดัน 1 bar และผลจากการวิเคราะห์ด้วย CFD

ตารางที่ 2 แสดงการตั้งค่าตัวพารามิเตอร์ของ 2D-CFD

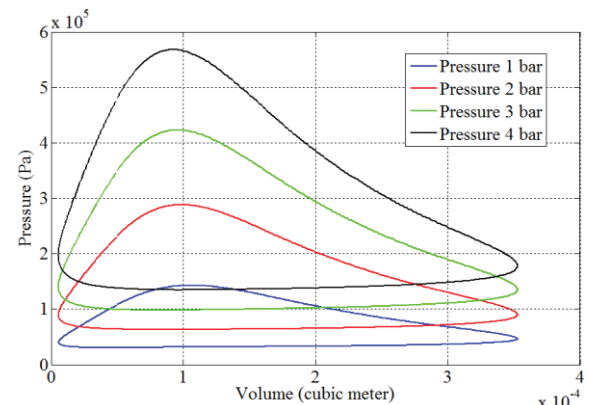
โดเมน	2D-Axisymmetric
สารทำงาน	อากาศ
ความดันภายใน	1, 2, 3 และ 4 bar
อุณหภูมิฝั่งร้อน(K)	773
อุณหภูมิฝั่งเย็น(K)	300

ตารางที่ 2 (ต่อ) แสดงการตั้งค่าตัวพารามิเตอร์ของ 2D-CFD

โดเมน	2D-Axisymmetric
Mesh	7,870
Time-step	600
Viscous model	Standard



รูปที่ 6 ภาพเปรียบเทียบค่ากำลังที่ได้เมื่อทำการอัดความดันภายในเครื่องยนต์



รูปที่ 7 ภาพเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความดันภายในเครื่องยนต์ความเร็วรอบ 408 RPM

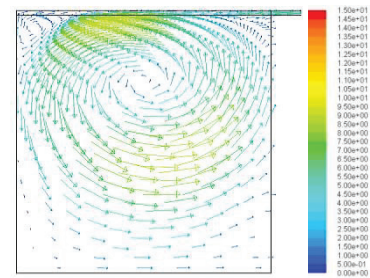
## 5. ผลการวิเคราะห์และการอภิปราย

ผลจากการจำลองเชิงตัวเลขในการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อหาค่ากำลังที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกันในแต่ละกรณี que เพิ่มความดันให้สูงขึ้นภายในเครื่องยนต์ โดยการวิเคราะห์จะไม่มี การเปลี่ยนแปลงขนาดของเครื่องยนต์ แหล่งอุณหภูมิความร้อนและแหล่งอุณหภูมิความเย็น แต่จะปรับเพียงความดันภายใน

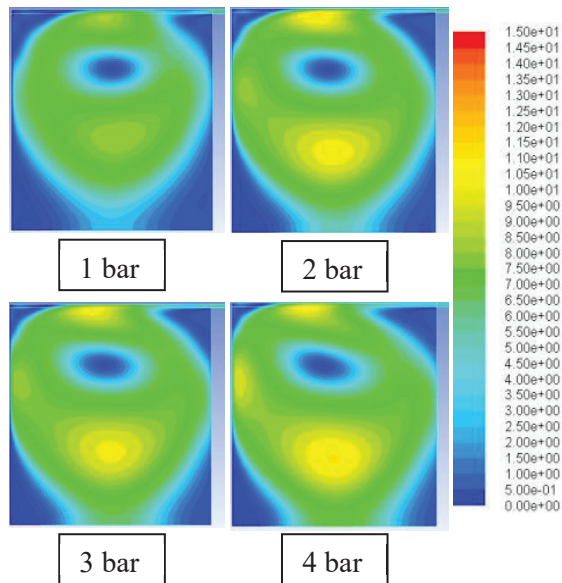
(Operating pressure) ให้กับเครื่องยนต์เท่านั้นและหาค่ากำลังที่แปรผันตามความเร็วรอบ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังรูปที่ 6 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการเพิ่มความดันเข้าไปภายในเครื่องยนต์จะสามารถทำให้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีกำลังที่สูงขึ้น

พิจารณาการทำงานที่ 1 bar กำลังสูงที่สุดอยู่ที่ประมาณ 43 วัตต์ที่ความเร็วรอบ 408 RPM แต่เมื่อเพิ่มความดันจะส่งผลให้กำลังที่ได้สูงขึ้น โดยค่าสูงที่สุดโดยประมาณของการอัดความดันที่ 2, 3 และ 4 bar คือ 63.4 วัตต์ที่ 350 RPM, 75.2 วัตต์ และ 88.8 วัตต์ที่ประมาณ 300 RPM ใกล้เคียงกันตามลำดับ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงกำลังเทียบกับความเร็วรอบที่เปลี่ยนไป แต่จะสามารถสังเกตเห็นได้ว่ากราฟของเส้นที่มีการอัดความดันที่สูงขึ้นจะเริ่มมีความชันของเส้นกราฟที่สูงขึ้นมาด้วย จะเห็นว่าเมื่อเทียบผลของ 2 และ 4 bar การเปลี่ยนแปลงผลลัพธ์ของกำลังที่ 4 bar จะมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่า ในการคำนวณกำลังที่ได้ในวัฏจักรเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจะสามารถวิเคราะห์ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตรของอากาศในหนึ่งรอบวัฏจักร ดังที่แสดงในรูปที่ 7 โดยเปรียบเทียบระหว่างเครื่องยนต์ที่มีการอัดความดันที่แตกต่างกัน โดยพิจารณาที่ความเร็วรอบเดียวกันที่ 408 RPM เพื่อให้การวิเคราะห์การไหลภายในนั้นไม่เปลี่ยนแปลงตามความเร็วของลูกสูบ การวิเคราะห์สามารถประเมินงานและกำลังได้จากพื้นที่ภายในวงรอบของความดันและปริมาตร ซึ่งพื้นที่ในวงรอบที่มากขึ้นหมายถึงความสามารถในการสร้างงานออกมากได้มากขึ้น จากการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าการที่เพิ่มความดันเข้าไปในระบบ จะทำให้การเปลี่ยนแปลงความดันภายในวัฏจักรมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้พื้นที่ภายในวงรอบมากขึ้น กำลังของเครื่องยนต์จะสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เปรียบเทียบกับบทความที่มีการทดลองพบว่ามีแนวโน้มที่สอดคล้องกับผลการทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงของ Halit Karabulut et al. [14] โดยจะสามารถเห็นได้ว่าเมื่อมีการเพิ่มความดัน ค่ากำลังที่ได้จะมีค่าสูงมากขึ้น และเมื่อเพิ่มความดันจนถึง

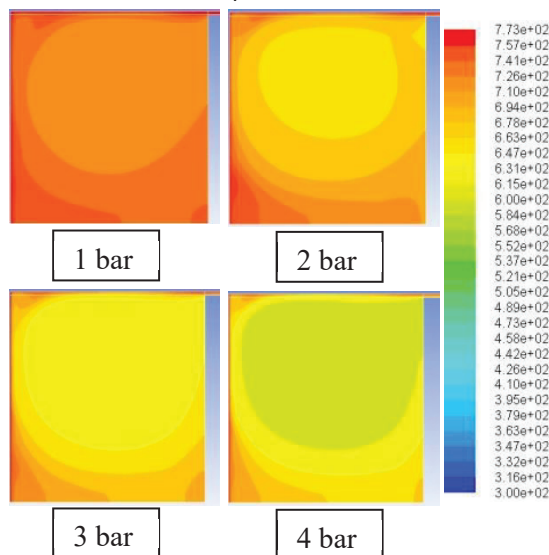
ค่า ๆ หนึ่งแล้ว ผลลัพธ์จะมีกำลังที่ลดลง สอดคล้องกับผลลัพธ์ที่ได้ ซึ่งจะเห็นว่าช่องว่างของกำลังที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนความดันให้สูงขึ้น ช่องว่างนั้นเริ่มลดลงเช่นเดียวกับการทดสอบ พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของความถี่รอบของเครื่องยนต์สามารถส่งผลกระทบต่อสารทำงานภายในได้เช่นกัน โดยที่ความเร็วรอบที่สูงกว่าจุดที่ให้กำลังสูงที่สุด อากาศภายในจะมีเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่น้อยลงทำให้ความสามารถในการสร้างงานในหนึ่งรอบวัฏจักรนั้นน้อยลง กำลังของเครื่องยนต์ก็จะสามารถสร้างได้น้อยลงตามไปด้วย ในทางกลับกันที่ความเร็วรอบต่ำกว่าจุดที่ให้กำลังสูงที่สุด อากาศสามารถสร้างงานในหนึ่งรอบวัฏจักรได้มากขึ้นเนื่องจากมีเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่นานขึ้นแต่เวลาของหนึ่งรอบวัฏจักรที่ใช้ก็นานขึ้นเช่นกัน และเมื่อการเพิ่มความดันในระบบที่ความเร็วรอบเท่ากันเป็นผลให้ความเร็วการไหลของอากาศภายในไหลเร็วยิ่งขึ้น ในทำนองเดียวกันการแลกเปลี่ยนความร้อนก็ทำได้น้อยลง ดังนั้นเมื่อเพิ่มความดันในระบบ ความเร็วรอบที่ให้กำลังสูงที่สุดจึงปรับตัวให้ความเร็วรอบลดลงเล็กน้อยเพื่อให้เหมาะสมที่จะสามารถรับความร้อนได้ดีเทียบกับเวลาที่ใช้ในวัฏจักร



รูปที่ 8 ภาพแสดงตัวอย่างทิศทางการไหลของสารทำงานภายในส่วนร้อนที่มุมเครื่องยนต์ 90 องศา 1 bar



รูปที่ 9 ภาพเปรียบเทียบความเร็ว (m/s) ของอากาศภายใน ส่วนร้อนที่มุมเครื่องยนต์ 90 องศา



รูปที่ 10 ภาพเปรียบเทียบอุณหภูมิ (K) ของอากาศภายใน ส่วนร้อนที่มุมเครื่องยนต์ 90 องศา

พิจารณารูปที่ 8, 9 และ 10 ที่ความเร็วรอบ 408 RPM โดยแสดงภาพในรูปแบบของ Vector และ Contour ในรูปที่ 8 และ 9 อากาศไหลเข้ามาเพื่อรับความร้อนทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น ความดันสูงขึ้นแล้วจึงขยายตัวดันลูกสูบกำลังให้ได้งานออกมา จากรูปพบว่า การอัดความดันที่สูงขึ้นส่งผลให้ความเร็วการไหลของอากาศที่ไหลกลับเข้ามามีค่าสูงมากขึ้นตามความดันที่อัดเข้าไปในเครื่องยนต์ ทำให้ในบริเวณที่อากาศสัมผัสกับพื้นที่

แลกเปลี่ยนความร้อนมีความเร็วสูงขึ้น ส่งผลถึงความสามารถในการดึงความร้อนจากผิวร้อนให้มีความสูงขึ้นตามความเร็วของอากาศที่ไหลผ่าน โดย ณ ขณะที่พิจารณาพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่การอัดความดัน 1, 2, 3 และ 4 bar มีอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนผิวร้อน ณ เวลาเดียวกันนั้นคือ 25.4, 42.3, 62.1 และ 88.8 วัตต์ ตามลำดับ ดังนั้นการอัดความดันที่สูงทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศบริเวณผิวร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อวิเคราะห์จากรูปที่ 10 เป็นการแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศภายในส่วนของส่วนร้อน จะเห็นว่าการอัดความดันในตอนเริ่มต้นของวัฏจักรโดยพิจารณาว่ามีอุณหภูมิและปริมาตรเท่ากัน ในทุกกรณีการเพิ่มความดันจะหมายถึงการเพิ่มมวลของอากาศภายในเครื่องยนต์ ซึ่งแม้ว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนนั้นจะมีค่าสูงขึ้นแต่ปริมาณความร้อนไม่ได้มีปริมาณเพียงพอที่จะทำให้อุณหภูมิของอากาศสูงขึ้นกว่ากรณีที่มีการอัดความดันที่ต่ำกว่า ทำให้อุณหภูมิที่กระจายตัวมีค่าลดลงเมื่อทำการเพิ่มความดันภายในเครื่องยนต์ แต่ในทางกลับกันผลของการอัดความดันทำให้ความสามารถในการขยายตัวของอากาศภายในมีมากขึ้น เมื่อย้อนกลับไปรูปที่ 7 ก็จะสามารถบอกได้ว่าอากาศที่มีการอัดความดันสูงขึ้นแม้จะมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าแต่กลับมีความสามารถในการขยายตัวได้มากกว่า ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของความดันภายในมีค่ามากกว่าการเปลี่ยนแปลงความดันของกรณีที่มีการอัดความดันที่ต่ำกว่า

## 6. สรุป

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงถือเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่น่าสนใจที่สามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนจากแหล่งความร้อนใดก็ได้ไปเป็นพลังงานที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ การพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจึงมีส่วนสำคัญเพื่อให้เครื่องยนต์สามารถทำงานตอบสนองต่อความต้องการได้ดียิ่งขึ้น การวิเคราะห์ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจึงเป็นวิธีการวิเคราะห์วิธีหนึ่งที่ได้รับการนิยมนิยม โดยมีข้อดีคือการที่สามารถวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่



เกิดขึ้นภายในเครื่องยนต์ได้อย่างชัดเจน ในการศึกษาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดเบต้าได้ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดังกล่าวเพื่อหาว่าความสัมพันธ์ของการอัดความดันภายในเครื่องยนต์ที่สูงขึ้นจะสามารถส่งผลอย่างไร จากการทดสอบพบว่า การเพิ่มความดันเข้าไปภายในเครื่องยนต์ส่งผลให้การไหลของอากาศภายในมีความเร็วสูงขึ้นตามความดันที่เพิ่มขึ้นและส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่

ผิวบริเวณแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าสูงขึ้นด้วย แต่ในขณะเดียวกันมีผลทำให้การกระจายอุณหภูมิภายในส่วนร้อนมีค่าต่ำลงซึ่งตรงข้ามกับการอัดความดันที่เพิ่มขึ้น การอัดความดันภายในเครื่องยนต์ทำให้อากาศมีความสามารถที่จะขยายตัวส่งผลทำให้การเปลี่ยนแปลงความดันในวัฏจักรมีค่ามากขึ้นและส่งผลให้เครื่องยนต์สามารถให้กำลังได้สูงขึ้น

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Kongtragool, B., Wongwises, S. Performance of a Twin Power Piston Low Temperature Differential Stirling Engine Powered by a Solar Simulator. *Solar Energy*, 2007; 81(7): 884–895.
- [2] Kongtragool, B., Wongwises, S. A Review of Solar-Powered Stirling Engines and Low Temperature Differential Stirling Engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2003; 7(2): 131–154.
- [3] Chen, W.L., Wong, K.L., Chen, H.E. An Experimental Study on the Performance of the Moving Regenerator for a  $\Gamma$ -Type Twin Power Piston Stirling Engine. *Energy Conversion and Management*, 2014; 77 118–128.
- [4] Tanaka, M., Yamashita, I., Chisaka, F. Flow and Heat Transfer Characteristics of the Stirling Engine Regenerator in an Oscillating Flow. *JSME International Journal. ser. 2, Fluids Engineering, Heat Transfer, Power, Combustion, Thermophysical Properties*, 1990; 33(2): 283–289.
- [5] Kongtragool, B., Wongwises, S. Investigation on Power Output of the Gamma-Configuration Low Temperature Differential Stirling Engines. *Renewable Energy*, 2005; 30(3): 465–476.
- [6] Kraitong, K., Mahkamov, K. Optimisation of Low Temperature Difference Solar Stirling Engines Using Genetic Algorithm. World Renewable Energy Congress, 8–13 May, Linköping, Sweden, 2011.
- [7] Kongtragool, B., Wongwises, S. Thermodynamic Analysis of a Stirling Engine Including Dead Volumes of Hot Space, Cold Space and Regenerator. *Renewable Energy*, 2006; 31(3): 345–359.
- [8] Chen, W.L., Wong, K.L., Chang, Y.F. A Computational Fluid Dynamics Study on the Heat Transfer Characteristics of the Working Cycle of a Low-Temperature-Differential  $\Gamma$ -Type Stirling Engine. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014; 75 145–155.
- [9] Alfarawi, S., Al-Dadah, R., Mahmoud, S. Influence of Phase Angle and Dead Volume on Gamma-Type Stirling Engine Power Using CFD Simulation. *Energy Conversion and Management*, 2016; 124: 13-140.
- [10] Aksoy, F., Cinar, C. Thermodynamic Analysis of a Beta-Type Stirling Engine with Rhombic Drive Mechanism. *Energy conversion and Management*, 2013; 75 319–324.
- [11] Ben-Mansour, R., Abuelyamen, A., Mokheimer, E.M.A. CFD Analysis of Radiation Impact on Stirling Engine Performance. *Energy Conversion and Management*, 2017; 152 354–365.
- [12] ANSYS FLUENT 12.0.(2009). Continuity and Momentum Equations. April, 1st 2019. [Online], Available: <http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node11.htm>
- [13] ANSYS FLUENT 12.0.(2009). Heat Transfer Theory. April, 1st 2019. [Online], Available: <http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node107.htm>
- [14] Karabulut, H., Yucesu, H.S., Cinar, C. and Aksoy, F. An Experimental Study on the Development of a B-Type Stirling Engine for Low and Moderate Temperature Heat Sources. *Applied Energy*, 2009; 86(1): 68-73.



# การปรับปรุงรูปแบบการจัดเก็บสินค้าในคลังสินค้าสำเร็จรูป ชนิดแห้ง กรณีศึกษา บริษัทผลิตวุ้นเส้น

## Improvement of Storage Facilities in Dry Goods Warehouse: Case Study Vermicelli Production Company

วรุตม์ บุญภักดี<sup>1,\*</sup> วิชญ์พล ศุภจินดากรณ์ วิภาลักษณ์ ไซ้ และ สุมัทชา แก้วสระแสน

Warut Boonphakdee, Wichaphon Suppajindakorn, Viphalak Tsai and Sumatcha Kaewsasaen

เลขที่ 1 หมู่ 6 ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

<sup>1</sup>Moo 6 Kamphaeng Saen Sub-district Kamphaeng Saen District, Nakhon Pathom Province, 73140

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen,

Kasetsart University, Thailand

\*E-mail: warutboon@yahoo.com

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการวางแผนผังการจัดเก็บสินค้าของบริษัทผลิตวุ้นเส้น เพื่อนำมาปรับปรุงตำแหน่งการจัดเก็บสินค้าสำเร็จรูปชนิดแห้ง และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พื้นที่ในการจัดเก็บสินค้า โดยพื้นที่ที่ทำการศึกษานั้นเป็นคลังสินค้าสำเร็จรูปชนิดแห้งคลังที่ 1 มีพื้นที่ 1,350 ตารางเมตร โดยมีการจัดเก็บสินค้าบนพื้นมากกว่าบนชั้นวางสินค้าอุตสาหกรรม ทำให้การใช้รรถประโยชน์ของพื้นที่แนวสูงได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ และไม่มีการระบุตำแหน่งการจัดเก็บสินค้าที่ชัดเจน ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบแผนผังการจัดเก็บสินค้าทั้งหมด 4 รูปแบบ โดยการนำชั้นวางสินค้าอุตสาหกรรมมาใช้ในการจัดเก็บ และนำรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดคือ แผนผังปรับปรุงการจัดเก็บสินค้ารูปแบบที่ 1 มาทำการจัดโซนพื้นที่ในการจัดเก็บสินค้า โดยใช้แนวคิดทฤษฎีการวิเคราะห์จัดกลุ่มด้วยระบบ ABC Analysis มาประยุกต์ใช้ในการจัดกลุ่มสินค้าตามความเคลื่อนไหวของสินค้า และใช้ Excel Solver ซึ่งเป็นโปรแกรมแอด-อินของไมโครซอฟท์ เอ็กเซลร่วมกับหลักการของตัวแบบโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming) ตามทฤษฎีสินค้าเคลื่อนไหววางไว้ใกล้ประตู มาช่วยในการกำหนดโซนพื้นที่การจัดเก็บที่เหมาะสมสำหรับแต่ละกลุ่มสินค้า จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อปรับปรุงการจัดเก็บโดยการวางแผนผังการจัดเก็บสินค้าสำเร็จรูปใหม่ สามารถเพิ่มความสามารถในการจัดเก็บสินค้าได้ 328 แพลเล็ต คิดเป็นร้อยละ 59.85 และสามารถลดระยะทางเฉลี่ยรวมในการจัดเก็บสินค้าได้ 12,810.86 เมตร คิดเป็นร้อยละ 63.85

คำสำคัญ: กลุ่มสินค้าที่มีความเคลื่อนไหวเร็ว ทฤษฎี ABC Analysis โปรแกรมเชิงเส้น

### ABSTRACT

This research aims to study the storage layout of vermicelli production company in order to improve the storage location of dried products as well as enhancing the efficiency of the storage system. The study area is a dry-type warehouse located at 1,350 square meters. Previously,



every product is stored on the floor rather than on the industrial shelves, the use of the vertical storages and its location have been ineffective and uncertainly indicated. Therefore, four storage models were designed to enhance the system by bringing in the industrial shelves and using model one storage system. Accordingly, the concept of grouping analysis theory by ABC analysis is applied to group goods from its movement. In addition, Solver, the Microsoft Excel add-in program combined with the principle of linear programming along with the theory of the rapid movement goods. The goods have been also installed near by the door so as to assist allocate the position of the goods. From the result, it indicated that the storage system can effectively improve with installing model 1 and the industrial shelves. By the increase in storage capacity of 328 pallets, or 59.85% and the overall average storage distance decreases 12,810.86 meters or 63.85%.

**Keywords:** Rapid movement goods, ABC Analysis, Linear Programing, Excel Solver

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันการจัดการโลจิสติกส์เข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างยิ่ง โดยหลายๆกิจกรรมของระบบโลจิสติกส์จะเกี่ยวข้องกับระบบคลังสินค้า เนื่องจากคลังสินค้าทำหน้าที่เป็นที่พักสินค้าชั่วคราว จัดเก็บวัตถุดิบ สินค้าระหว่างการผลิต สินค้ารอการผลิต ตลอดจนจัดเก็บสินค้าสำเร็จรูป รวมทั้งวัสดุต่างๆที่ใช้ในกระบวนการผลิต และยังเป็นศูนย์กระจายสินค้าคลังสินค้า จนกว่าจะมีการเคลื่อนย้ายไปสู่ผู้ที่มีความต้องการไม่ว่าจะเพื่อการผลิตหรือเพื่อส่งมอบ ดังนั้นการจัดการคลังสินค้าจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อทุกๆองค์กร หากสามารถลดต้นทุนในการบริหารจัดการคลังสินค้าได้นั้นก็หมายความว่ากิจการย่อมได้เปรียบทางการแข่งขันมากขึ้นหรือสามารถทำกำไรได้มากขึ้น

บริษัทผลิตวุ้นเส้นแห่งนี้ มีการประกอบกิจการการผลิตสินค้า แบ่งเป็น 2 กลุ่มหลัก คือ สินค้าประเภทแป้งมันสำปะหลังและสินค้าประเภทอาหาร เพื่อจัดจำหน่ายภายในประเทศและส่งออกไปยังต่างประเทศ โดยคลังสินค้าสำเร็จรูปชนิดแห้งคลังที่ 1 จะจัดเก็บสินค้าสำเร็จรูปชนิดแห้งที่ส่งออกไปยัง ห้างสรรพสินค้าและบริษัทที่สำคัญภายในประเทศ มีการจัดเก็บสินค้าบนชั้นวางอุตสาหกรรมและบนพื้น โดยใช้แพลตฟอร์มเป็นหน่วยรวมสินค้าสำเร็จรูป ส่งผลทำให้ไม่สามารถวางแพลตฟอร์มซ้อนทับกัน หลายๆชั้นได้ เนื่องจากจะเกิดความเสียหายต่อสภาพของสินค้าและบรรจุภัณฑ์ รวมถึงการจัดเรียงสินค้า ยังไม่มีการระบุตำแหน่งการจัดเก็บสินค้าตามชนิดและขนาดที่ชัดเจน ทำให้ยากต่อการหยิบจ่าย ซึ่งในการหยิบ

สินค้า 1 ครั้ง ต้องใช้ระยะทางมากกว่าที่ควรจะเป็น โดยสินค้าที่นำเข้ามาก่อนจะถูก จัดเก็บในส่วนของตำแหน่งพื้นที่ที่ยังว่างด้านใน และสินค้าที่ผลิตภายหลังจะถูกจัดเก็บด้านนอกของตำแหน่งพื้นที่นั้น ซึ่งทำให้พนักงานต้องเสียเวลาในการเปลี่ยนตำแหน่งการจัดเก็บสินค้าใหม่ไปยังพื้นที่อื่น ส่งผลให้เกิดการทำงานที่ซ้ำซ้อนของพนักงาน อีกทั้งคลังสินค้ามีการใช้พื้นที่ในแนวราบมากกว่าการใช้พื้นที่ในแนวสูง ก่อให้เกิดความสูญเปล่าและการใช้ประโยชน์จากพื้นที่ที่มีอยู่ภายในคลังสินค้าได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ซึ่งในอนาคตหากมีความต้องการของลูกค้าที่เพิ่มขึ้นและความหลากหลายในด้านชนิดและขนาดของสินค้า จะส่งผลทำให้พื้นที่การจัดเก็บสินค้าไม่เพียงพอ ไม่สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ ทำให้เสียโอกาสทางการขาย

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้เล็งเห็นถึง ความสำคัญในการศึกษาและหาแนวทางแก้ไขปัญหาดังนี้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจัดเก็บสินค้า ภายในคลังสินค้าสำเร็จรูปชนิดแห้งคลังที่ 1 เพื่อให้เกิดความคุ้มค่า และการใช้พื้นที่อย่างเต็มประสิทธิภาพสูงสุด

## 2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชาติรี และพลชัย (2554) ศึกษาการวางแผนผังการจัดเก็บสินค้าคลังคลัง อาคารเก็บบ่มสุราถังไม้โอ๊คของบริษัทผลิตสุราแห่งหนึ่ง เพื่อปรับปรุงให้สามารถจัดเก็บสินค้าได้เต็มพื้นที่ โดยนำระบบการวางแผนผังการจัดเก็บสินค้ามาใช้แบ่งพื้นที่และกำหนดเส้นทางเดินสำหรับพนักงานและรถยกที่ชัดเจน ผลการวิจัยพบว่า แผนผัง

รูปแบบที่ 4 สามารถจัดเก็บถังไม้ไอศได้เพิ่มพื้นที่และทำให้พนักงานสามารถทราบตำแหน่งและจำนวนในการจัดเก็บสินค้าได้อย่างถูกต้อง ส่งผลทำให้พนักงานสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและเกิดการจัดเก็บได้เพิ่มพื้นที่มากขึ้น [1]

เมธินี (2555) ศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพตำแหน่งการจัดวางสินค้าในคลังสินค้าของบริษัท ศรีไทย ซุปเปอร์แวร์ จำกัด (มหาชน) สาขาสุขสวัสดิ์ โดยใช้หลักการตัวแบบ โปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming Method) ตามทฤษฎีสินค้าเคลื่อนไหวเร็ววางไว้ใกล้ประตู (Fast Mover Closest to the Door) ร่วมกับ Solver ซึ่งเป็นโปรแกรมของ Microsoft Excel เพื่อช่วยในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของการจัดวางสินค้า โดยมีการวัดประสิทธิภาพด้วยการใช้ตัวแบบจำลองของกระบวนการทำงานภายในคลังสินค้าด้วยโปรแกรมการจำลองสถานการณ์ (Arena Version 10.0) ผลการวิจัยพบว่า ระยะเวลารวมเฉลี่ยในการดำเนินการกิจกรรม ลดลง 9.81 เปอร์เซ็นต์ และการใช้ทรัพยากรในการดำเนินการกิจกรรม โดยวัดจากการใช้ทรัพยากร 2 ชนิดด้วยกันคือ การใช้งานของรถโฟล์คลิฟท์ที่สามารถลดลง 9.30 เปอร์เซ็นต์ และการใช้งานของโซนพื้นที่การจัดวางสินค้าต่อเวลาที่สามารถลดลง 13.33 เปอร์เซ็นต์ [2]

สุนันทา (2555) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการคลังสินค้า กรณีศึกษา บริษัท ภูมิไทย คอมพิวเตอร์ จำกัด ซึ่งพบว่าสาเหตุที่ทำให้การดำเนินงานของบริษัทขาดประสิทธิภาพคือ มีสินค้าคงคลังปริมาณสูง คลังสินค้ามีวิธีการจัดเก็บและจัดวางไม่เหมาะสม และกระบวนการเบิกจ่ายอะไหล่ให้ช่างใช้เวลาและมีความผิดพลาดสูง โดยขั้นตอนในการวิจัยจะเริ่มจากการปรับปรุงวิธีการดำเนินงาน การรับสินค้า การเบิกจ่าย การปรับปรุง จำนวนรายการอะไหล่ จัดความสำคัญอะไหล่ด้วยวิธี ABC การตั้งรหัสสินค้า และการตั้งรหัสการจัดเก็บในคลังสินค้า การออกแบบแผนผังการจัดเก็บ ระบุตำแหน่งการจัดเก็บ จากนั้นทำการตรวจนับสินค้าทั้งหมด ผลจากการปรับปรุงนั้นทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการคลังสินค้าคือ

สินค้ามีความเป็นระเบียบเรียบร้อยมากขึ้น เวลาเฉลี่ยในการเบิกจ่ายอะไหล่ให้ช่างลดลงจาก 24 นาทีเป็น 11 นาทีต่อครั้ง รวมเฉลี่ยต่อวันคิดเป็น 33 นาที และอัตราส่วนความผิดพลาดในการ ตรวจนับสินค้าลดลงจาก 46.14 เปอร์เซ็นต์ เป็น 21.25 เปอร์เซ็นต์ [3]

อมรรัตน์ (2556) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพคลังสินค้าด้วยการจัดแผนผังคลังสินค้าใหม่กรณีศึกษาบริษัท ABC เพื่อหาวิธีการจัดการกับพื้นที่การจัดเก็บและหยิบจ่ายที่เหมาะสมเพื่อลดปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นภายในคลังสินค้า และช่วยให้พนักงานปฏิบัติงานได้สะดวกมากขึ้น โดยได้ใช้ทฤษฎี ABC Classification และทฤษฎีการจัด Layout จากผลการศึกษารูปได้ว่า ถ้าหากบริษัทกรณีศึกษาใช้วิธีการจัด Layout ตามการแบ่งโซน (Zoning) จะช่วยให้ใช้เวลาและระยะทางในการจัดงานน้อยลง และลดปัญหาการจัดเก็บสินค้าการจัดกระจายทำให้สินค้าหาได้ง่าย อีกทั้งยังสะดวกในการควบคุม First In First Out (FIFO) อีกด้วย [4]

ธิญาดา (2559) เสนอการเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการคลังสินค้า โดยใช้แนวตามแนวคิดสินค้านำมาประยุกต์ใช้การออกแบบแผนผัง คลังสินค้าใหม่ด้วยวิธีการจัดเก็บเป็นโซนตาม ABC จะทำการแบ่งตามประเภทสินค้าที่ทำการจัดเก็บ ก่อนเพื่อให้ง่ายต่อการจัดวางแผนผัง โดยจะทำการแบ่งประเภทสินค้า ABC ที่ละกลุ่มสินค้า โดยผู้ศึกษา จะกำหนดสินค้าประเภท A มีปริมาณ 20% ของสินค้าทั้งหมด กลุ่มสินค้า B มีปริมาณ 30% และสินค้าในกลุ่ม C มีปริมาณ 50% เพื่อให้การจัดวางตำแหน่งสินค้ามีความเหมาะสมกับขนาดของ คลังสินค้า และง่ายต่อการเบิกจ่ายสินค้า [5]

นิทิส และชัยพล (2559) ปรับปรุงระบบการจัดการคลังสินค้าคลังของบรรจุภัณฑ์ผลิตภัณฑ์แปรรูปทางการเกษตร และเพิ่มประสิทธิภาพในการปฏิบัติงานในคลังสินค้าได้สูงขึ้น โดยสถานประกอบการตัวอย่างเป็นโรงงานแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ซึ่งประสบปัญหาการใช้ระยะเวลาในการเบิกจ่ายคลังของบรรจุภัณฑ์นานกว่าเวลามาตรฐานของทางสถานประกอบการกำหนด

สำรวจชนิดของกล่องบรรจุภัณฑ์และปริมาณที่จัดเก็บ ศึกษาการทำงานขั้นตอนการเบิกจ่ายกล่องบรรจุภัณฑ์และระยะเวลาที่ใช้ในแต่ละงานย่อยโดยการวิเคราะห์ด้วยแผนภาพการไหลของกิจกรรม และการแบ่งประเภทกล่องบรรจุภัณฑ์โดยใช้หลักการวิเคราะห์ ABC [6]

### 3. ทฤษฎี

#### 3.1 การวางแผนคลังสินค้า (Warehouse Layout)

การวางแผนของคลังสินค้าหรือวัสดุโดยทั่วไปมักจะต้องการให้สินค้ามีลักษณะการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ระยะทางการเคลื่อนที่ทั้งของพนักงานและสินค้าต้องสั้นกะทัดรัด เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์นี้ช่องทางเดิน ควรจะแคบที่สุดเท่าที่ทำได้และไม่ควรเป็นทางตัน (Smith, 1989) [7]

#### 3.2 การวิเคราะห์จัดกลุ่มด้วยระบบ ABC Analysis

เป็นแนวคิดที่ให้ความสำคัญกับการจัดกลุ่มสินค้า เป็น 3 กลุ่ม เพื่อง่ายในการบริหารจัดการตามกลุ่มสินค้า การจัดลำดับมีหลายแบบตามแนว โยบายที่ต้องการใช้บริหารขององค์กร เช่น การจัดลำดับสินค้าตามมูลค่าสินค้าคงคลังที่ถือครองรวมต่อปีของแต่ละรายการ มูลค่าขายสินค้าแต่ละรายการ หรือส่วนแบ่งกำไรของสินค้านั้น ซึ่งสินค้าที่จัดอยู่ในกลุ่ม A จะประกอบด้วย สินค้าเพียงไม่กี่ประเภทหรือมีจำนวน SKU (Stock Keeping Unit) น้อยแต่เป็นสินค้าที่มียอดขายหรือส่วนแบ่งกำไรมากที่สุด ส่วนสินค้าที่มียอดขายหรือส่วนแบ่งกำไรรองลงไปจะได้รับความสำคัญ น้อยลงเป็น B และ C ตามลำดับ [2]

#### 3.3 อัตราการหมุนเวียนสินค้าคงเหลือ (Inventory Turnover)

การคำนวณอัตราการหมุนเวียนสินค้าคงเหลือ เป็นจุดประสงค์ที่สำคัญคือ ติดตามการเคลื่อนไหวของรายการสินค้า ซึ่งถ้าคำนวณอัตราการหมุนเวียนสินค้าคงเหลือได้ค่าต่ำ แสดงถึงรายการสินค้านั้นหยุดนิ่งไม่หมุนเวียน แสดงว่ามีสินค้าคงค้างซึ่งอาจทำให้สินค้าเสื่อมสภาพและเสียหาย หรือทำให้เกิดต้นทุนจม (Sunk cost) ได้ แต่ถ้าหากคำนวณอัตราการหมุนเวียนสินค้าคงเหลือได้ค่ามาก มีความหมายว่าบริษัทมีความสามารถ

ในการขายหรือระบายสินค้าออกจากบริษัทได้ดี ทำให้มีต้นทุนสินค้าลดลงได้ [8]

#### 3.4 โปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming)

การใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่ช่วยในการวางแผน และการจัดสรรพื้นที่ภายในคลังสินค้าให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยสามารถทำให้พื้นที่ภายในคลังสินค้ามีการใช้ประโยชน์อย่างเต็มพื้นที่และเกิด ประโยชน์ในการดำเนินงานสูงสุด การใช้ Linear Programming และ Fastest turning closest to the door Method [9] สมการ Linear Programming คือ สมการที่ใช้หาตำแหน่งการจัดวางสินค้าอย่างเหมาะสมสำหรับสินค้าแต่ละประเภท โดยคำนึงถึงระยะทางที่ใช้ในการวัด การนำสินค้าเข้าและการนำสินค้าออก รวมถึงข้อมูลความถี่ในการจัดเก็บสินค้ามาใช้ในการพิจารณาด้วยหลักการของ Linear Programming โดยใช้ร่วมกับหลักการที่ว่า วิธีสินค้าที่มีความเคลื่อนไหวบ่อยวางใกล้ประตูหรือ Fastest turning closest to the door มาใช้ในการปรับเปลี่ยนตำแหน่งการจัดเก็บสินค้าให้มี ประสิทธิภาพมากขึ้น

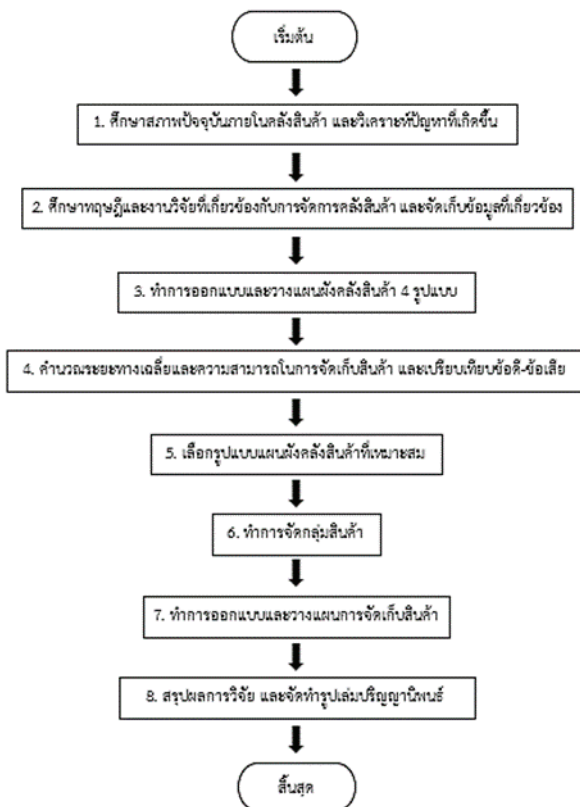
#### 3.5 การใช้ Excel Solver

Excel Solver เป็น โปรแกรมแอดอิน (Add-in) ของไมโครซอฟท์เอ็กเซล (Microsoft Excel) การจัดพื้นที่การวางแผนคลังสินค้าต้องอาศัยการใช้เครื่องมือที่มีความรวดเร็วและมีความถูกต้องแม่นยำและเกิดความสะดวกในการปฏิบัติงานซึ่งการใช้ Solver เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการแบ่งโซนสินค้า แบบ ABC ได้อย่างรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น การหาผลลัพธ์โดยการใช้ Spread Sheet ทำให้สามารถทำงานได้สะดวกยิ่งขึ้น ทั้งในด้านการใช้งานและการนำเสนอผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหา [10]

### 4. ขั้นตอนและวิธีการวิจัย

การออกแบบและวางแผนผังการจัดเก็บสินค้าใหม่ ทั้ง 4 รูปแบบ โดยใช้โปรแกรม Solidworks ประกอบกับการใช้ข้อมูลพื้นที่ทางเดินสำหรับรถโฟล์คลิฟท์ ขนาดของแพลตฟอร์ม ปริมาณการเข้า-ออกของสินค้า และพื้นที่ทั้งหมด

ของคลังสินค้า ทำการคำนวณหาระยะทางเฉลี่ยในการจัดเก็บสินค้า รวมถึงความสามารถในการจัดเก็บสินค้าของแต่ละรูปแบบ เพื่อเลือกรูปแบบแผนผังที่เหมาะสมที่สุด จากนั้นทำการจัดกลุ่มสินค้าด้วยอัตรากรมวนเวียนสินค้าคงเหลือ และใช้หลักการของตัวแบบโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programing) และการใช้ Solver เพื่อระบุโซลูชันการจัดเก็บสินค้าของแต่ละกลุ่ม โดยขั้นตอนการวิจัยและวิธีการวิจัยในการปรับปรุงรูปแบบการจัดเก็บสินค้า เพื่อให้ได้รูปแบบการจัดเก็บสินค้าที่เหมาะสม และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์จากพื้นที่ในแนวสูง คณะผู้วิจัยได้แบ่งขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 1



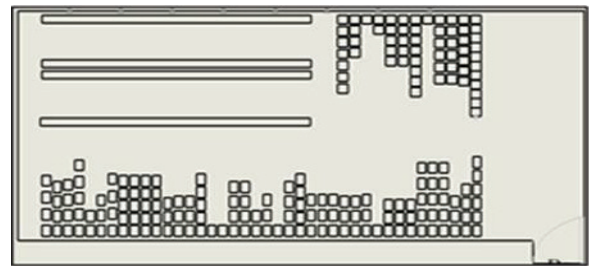
รูปที่ 1 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

## 5. ผลการดำเนินงาน

### 5.1 ศึกษาสภาพปัจจุบัน

จากการศึกษาสภาพปัจจุบันของคลังสินค้า พบว่าลักษณะของคลังสินค้าเป็นอาคารแบบ 1 ชั้น มีการจัดเก็บสินค้าโดยใช้แพalletพลาสติก ขนาดมาตรฐานด้านกว้าง 1

เมตร ความยาว 1.2 เมตร และมีความสูง 0.15 เมตร เป็นหน่วยรองรับสินค้า โดยคลังสินค้านี้มีขนาดพื้นที่ ด้านกว้าง 25 เมตร ความยาว 54 เมตร และมีความสูง 11 เมตร ซึ่งมีพื้นที่รวมทั้งหมดเท่ากับ 1,350 ตารางเมตร และมีความสามารถในการจัดเก็บสินค้าได้ 548 แพallet และมียะยะทางเฉลี่ยรวมในการจัดเก็บสินค้าอยู่ที่ 20,065.13 เมตร แสดงแผนผังคลังสินค้าในปัจจุบัน ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนผังการจัดเก็บสินค้าในปัจจุบัน

### 5.2 ปรับปรุง/แก้ไขข้อมูลจากการศึกษา

#### 5.2.1 การเลือกใช้ชั้นวางสินค้าอุตสาหกรรม

ผู้วิจัยเลือกใช้ชั้นวางสินค้าอุตสาหกรรม 2 ประเภท มาใช้ในการออกแบบแผนผังคลังสินค้าใหม่ คือ ชั้นวางสินค้าอุตสาหกรรมแบบความลึกหนึ่งแพallet (Selective Rack) และแบบขับรถเข้าเก็บสินค้า (Drive in Rack)

#### 5.2.2 การออกแบบแผนผังคลังสินค้าใหม่

จากการออกแบบ ได้รูปแบบการจัดแผนผังใหม่ทั้งหมด 4 รูปแบบ ซึ่งแต่ละรูปแบบมีความสามารถในการจัดเก็บสินค้าที่แตกต่างกันออกไป เป็นการบริหารจัดการพื้นที่คลังสินค้า เพื่อให้สามารถจัดเก็บสินค้าเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเพิ่มประสิทธิภาพใช้พื้นที่ในแนวสูงมากขึ้น โดยรูปแบบแผนผังปรับปรุงการจัดเก็บสินค้ามีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

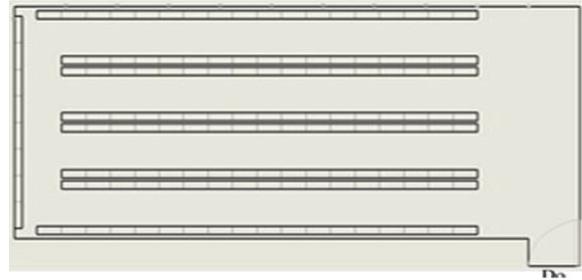
ตารางที่ 1 เปรียบเทียบความสามารถในการจัดเก็บสินค้า

การปรับปรุง	จำนวนการจัดเก็บ (แพเลตต์)	ระยะทางในการจัดเก็บ (เมตร)
รูปแบบที่ 1	876	7,254.27
รูปแบบที่ 2	744	6,369.46
รูปแบบที่ 3	1,050	13,736.21
รูปแบบที่ 4	1,254	17,510.30

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบอัตราส่วนระยะทางการจัดเก็บสินค้าต่อแพเลตต์

การปรับปรุง	ระยะทางการจัดเก็บต่อแพเลตต์ (เมตร/แพเลตต์)
รูปแบบที่ 1	8.28
รูปแบบที่ 2	8.56
รูปแบบที่ 3	13.08
รูปแบบที่ 4	13.96

หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบเชิงปริมาณคืออัตราส่วนระยะทางการจัดเก็บสินค้าต่อแพเลตต์ และเชิงคุณภาพคือ ข้อดี-ข้อเสียของแต่ละรูปแบบการจัดเก็บ ทำให้ตัดสินใจเลือกใช้การจัดแผนผังรูปแบบที่ 1 แสดงดังรูปที่ 2 เนื่องจากมีความเหมาะสมกับการจัดเก็บในปัจจุบัน ทั้งในเรื่องของการจัดเก็บสินค้าและการเข้าถึงสินค้าแบบ FIFO ที่สามารถเคลื่อนย้ายสินค้าเข้าออกได้สะดวก และสามารถแบ่งพื้นที่ (Zone) การจัดเก็บสินค้าแต่ละประเภทได้อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นรูปแบบที่ใช้ชั้นวางอุตสาหกรรมแบบความลึกหนึ่งแพเลตต์ (Selective Rack) ทั้งหมด โดยมีอัตราส่วนระยะทางการเคลื่อนย้ายสินค้าต่อแพเลตต์ต่ำที่สุดคือ 8.28 เมตรต่อแพเลตต์ และสามารถจัดเก็บสินค้าได้จำนวน 876 แพเลตต์



รูปที่ 2 แผนผังปรับปรุงรูปแบบที่ 1

### 5.2.3 การจัดพื้นที่จัดเก็บสินค้าของแต่ละกลุ่มสินค้า

#### 5.2.3.1 การจัดกลุ่มสินค้า

ผู้วิจัยได้ทำการคำนวณอัตราการหมุนเวียนสินค้าคงเหลือ (Inventory Return) ของสินค้าทั้ง 27 รายการ โดยใช้ช้อคออกของสินค้าเป็นน้ำหนัก (kg) และยอดสินค้าคงเหลือเฉลี่ยมาคำนวณ ซึ่งจะใช้ข้อมูลสินค้าคงคลัง 6 เดือนย้อนหลัง ได้แก่ เดือนกุมภาพันธ์-กรกฎาคม 2561 จากสูตรดังสมการ (1) และ (2)

$$\text{อัตราการหมุนเวียนสินค้าคงเหลือ} = \frac{\text{จำนวนหน่วยขายทั้งหมด}}{\text{ยอดสินค้าคงเหลือเฉลี่ย}} \quad (1)$$

$$\text{ยอดสินค้าคงเหลือเฉลี่ย} = \frac{\text{ยอดสินค้าคงเหลือต้นงวด} + \text{ยอดสินค้าคงเหลือปลายงวด}}{2} \quad (2)$$

หลังจากนั้นนำผลอัตราการหมุนเวียนสินค้าคงเหลือที่คำนวณได้มาทำการจัดกลุ่มสินค้า โดยใช้แนวคิดทฤษฎีการวิเคราะห์จัดกลุ่มด้วยระบบ ABC Analysis มาประยุกต์ใช้ โดยจะจัดกลุ่มตามความเคลื่อนไหวของสินค้าออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ได้ผลดังนี้

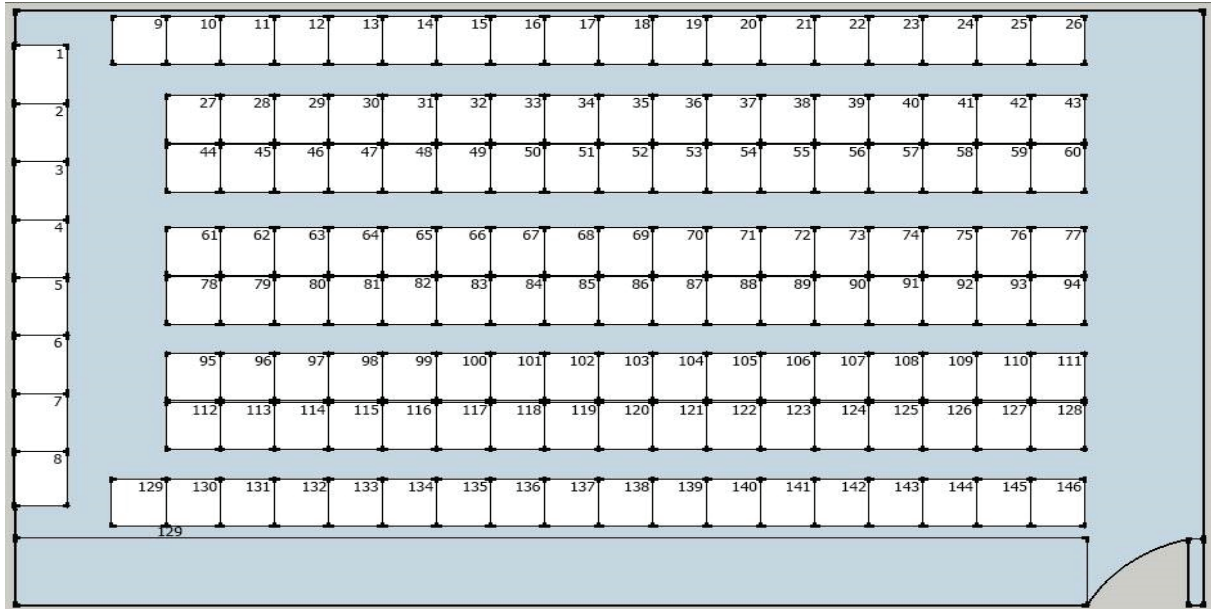
ตารางที่ 3 การจำแนกกลุ่มสินค้าตามความเคลื่อนไหวของสินค้า

กลุ่มสินค้า	การเคลื่อนไหว	อัตราการหมุนเวียนสินค้าคงเหลือ	จำนวนรายการ
A	เร็ว	มากกว่า 2	5
B	ปานกลาง	1 ถึง 2	6
C	ช้า	น้อยกว่า 1	16



จากผลการจัดกลุ่มสินค้าที่ได้นั้น นำไปคำนวณหาจำนวนโชนที่ต้องการของแต่ละกลุ่มสินค้า โดยทำการแปลงยอดออกจากร้านหนัก (kg) เป็นจำนวนแพเลตต์ และ

นำมาเทียบเพื่อวิเคราะห์หาโชนการจัดเก็บของแต่ละกลุ่มสินค้าในแผนผังการปรับปรุงรูปแบบที่ 1 ดังตารางที่ 4



รูปที่ 3 การกำหนดโชนการจัดเก็บสินค้า

ตารางที่ 4 จำนวนโชนที่ต้องการของแต่ละกลุ่มสินค้า

กลุ่มสินค้า	จำนวนโชนที่ต้องการ (%)	โชนการจัดเก็บของแผนผังการปรับปรุง
A	19	28
B	17	25
C	64	93
รวม	100	146

### 5.2.3.2 การระบุตำแหน่งการจัดเก็บสินค้า

นำรูปแบบแผนผังคลังสินค้านี้รูปแบบที่ 1 มาทำการกำหนดโชนการจัดเก็บสินค้า โดยกำหนดให้ 1 Rack = 1 โชนการจัดเก็บ ซึ่งมีทั้งหมด 146 โชน แสดงดังรูปที่ 3

$$\text{Min} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$\text{st} \quad \sum_{j=1}^N x_{ij} = q_i, \forall i = 1, \dots, M \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^M x_{ij} \leq N \quad ; j = 1, 2, 3, \dots, N \quad (3)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (4)$$

เมื่อ  $i = 1, 2, 3 \dots M, j = 1, 2, 3 \dots N$

โดยที่  $M$  คือ ประเภทการจัดเก็บ A = 1, B = 2, C = 3

$N$  คือ จำนวนโชนการจัดเก็บสินค้า

กำหนดให้  $d_{ij}$  = ระยะทางการเคลื่อนที่ของสินค้า  $i$  จากประตูไปยังโชนจัดเก็บ  $j$

$x_{ij} = 1$  ขอมรับประเภทการจัดเก็บ  $i$  ไปเก็บยังโชน  $j$  หรือ 0 ไม่ขอมรับผลิตภัณฑ์  $i$  ไปเก็บยังโชน  $j$

$q_i$  = ความต้องการโชนที่ต้องการเก็บสินค้าในแต่ละประเภทการจัดเก็บ

สมการวัตถุประสงค์ (สมการ 1) เป็นผลรวมของระยะทางที่น้อยที่สุดของตำแหน่งที่มีการจัดเก็บสินค้า ผลรวมของจำนวนโชนที่อยู่ในแต่ละประเภทการจัดเก็บตามทฤษฎี ABC (สมการ 2) จำนวนโชนที่กำหนดให้จัดเก็บสินค้าต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนโชนทั้งหมดที่มีอยู่ ( $N$ ) (สมการ 3) กำหนดให้ ตัวแปร  $x_{ij}$  เป็นจำนวน Binary (0, 1) เท่านั้น (สมการ 4)



การระบุตำแหน่งการจัดเก็บสินค้าแต่ละกลุ่มสินค้า โดยใช้ Excel solver ร่วมกับหลักการของโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming)

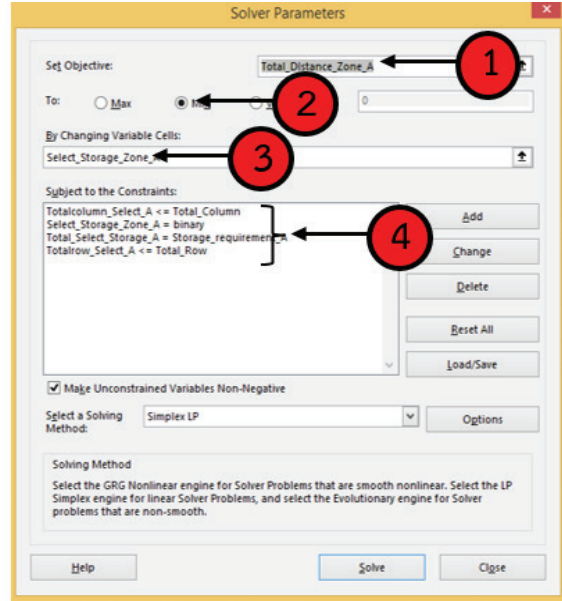
ตารางที่ 5 แสดงข้อมูลความต้องการโซนในการจัดเก็บของสินค้าแต่ละประเภท

Product	A	B	C
Storage Requirement ( $q_i$ )	28	25	93

ตารางที่ 6 แสดงระยะทางจากประตูไปยังโซนการจัดเก็บสินค้าต่าง ๆ (เมตร)

Door	Zone	$x_{ij}$
	1	86.21
2	83.36	
3	80.50	
4	77.65	
5	74.79	
.	.	.
.	.	.
.	.	.
146	15.67	

ในการวิเคราะห์จะใช้สมการทางคณิตศาสตร์ แต่การสร้างสมการในโปรแกรม Excel solver นั้น จะทำการเขียนสูตรบนเซลล์ต่างๆ ที่กำหนดไว้เพื่อให้สอดคล้องกับสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้คำนวณตัวแปรสมการที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณ จากนั้นทำการกำหนดเงื่อนไขในการคำนวณบนหน้าต่างของโปรแกรม Excel solver ดังรูปที่ 4 ซึ่งเป็นการคำนวณหาระยะทางเฉลี่ยรวมในการจัดเก็บสินค้าที่สั้นที่สุด และระยะทางเฉลี่ยในการจัดเก็บของแต่ละกลุ่มสินค้า A, B และ C ที่สั้นที่สุด



รูปที่ 4 หน้าต่างของ Excel Solver สำหรับข้อมูลสินค้ากลุ่ม A

จากรูปที่ 4 หมายเลข 1 คือ เซลล์ที่เป็นคำตอบ คือผลจากการรัน (Run) ใน Solver ซึ่งแสดงระยะทางที่สั้นที่สุดในการจัดเก็บสินค้าจากประตูทางเข้า-ออกของแต่ละโซนการจัดเก็บ M

หมายเลข 2 คือ กำหนดให้ข้อมูลที่ได้เป็นระยะทางที่สั้นที่สุดในการเคลื่อนที่ไปจัดเก็บสินค้า

หมายเลข 3 คือ เซลล์ที่ทำการหาคำตอบ คือการเลือกหรือไม่เลือกโซนพื้นที่การจัดเก็บนั้น (Changing Cells) ซึ่งจะเป็เซลล์ที่กำหนดโซนในการเลือกที่จะจัดเก็บสินค้าในคลังสินค้า

หมายเลข 4 คือ ข้อจำกัดในการเลือกโซนการจัดเก็บสินค้า

ผลลัพธ์ระยะทางที่สั้นที่สุดที่สามารถคำนวณได้จากโปรแกรม Solver มีค่าเท่ากับ 7254.27 เมตร และยังทำให้ทราบผลลัพธ์การจัดตำแหน่งสินค้าที่ทำให้ได้ระยะทางสั้นที่สุดในการจัดเก็บสินค้าแต่ละชนิด และยังเห็นถึงโซนการจัดเก็บที่ชัดเจน ซึ่งจะแสดงผลดังรูปที่ 5



ผู้วิจัยได้นำค่าตัวแปรดังกล่าวมากำหนดเป็นชื่อกลุ่มสินค้าลงในแผนผังคลังสินค้าปรับปรุงรูปแบบที่ 1 ดังรูปที่ 6 สามารถแสดงข้อมูลการจัดเก็บสินค้าแยกตามพื้นที่และระยะทางเฉลี่ยในการจัดเก็บสินค้าของแต่ละกลุ่มสินค้าทั้ง 3 กลุ่ม A, B และ C ได้ดังนี้

พื้นที่จัดเก็บสินค้าที่อยู่ในกลุ่ม A ได้แก่ โซนที่ 59-60, 76-77, 90-94, 107-111, 122-128, 140-146 มีระยะทางเฉลี่ยในการจัดเก็บเท่ากับ 734.18 เมตร

พื้นที่จัดเก็บสินค้าที่อยู่ในกลุ่ม B ได้แก่ โซนที่ 24-26, 41-43, 55-58, 73-75, 87-89, 104-106, 119-121, 137-139 มีระยะทางเฉลี่ยในการจัดเก็บเท่ากับ 949.09 เมตร

พื้นที่จัดเก็บสินค้าที่อยู่ในกลุ่ม C ได้แก่ โซนที่ 1-8, 9-23, 27-40, 44-54, 61-72, 78-86, 95-103, 112-118, 129-136 มีระยะทางเฉลี่ยในการจัดเก็บเท่ากับ 5,571 เมตร

ผู้วิจัยได้นำค่าตัวแปรดังกล่าวมากำหนดเป็นชื่อกลุ่มสินค้าลงในแผนผังคลังสินค้าปรับปรุงรูปแบบที่ 1

จากผลการปรับปรุงรูปแบบการจัดเก็บสินค้าภายในคลังสินค้าสำเร็จรูปชนิดแห้ง เมื่อเปรียบเทียบกับการจัดเก็บสินค้าในปัจจุบัน สามารถเพิ่มความสามารถในการจัดเก็บสินค้าได้เป็น 876 แพลเลต ซึ่งเพิ่มขึ้น 328 แพลเลต คิดเป็นร้อยละ 59.85 และสามารถลดระยะทาง

เฉลี่ยรวมในการจัดเก็บสินค้าได้เป็น 7,254.27 เมตร ซึ่งลดลง 12,810.86 เมตร คิดเป็นร้อยละ 63.85

## 6. สรุปผลการวิจัย

การวางแผนผังการจัดเก็บสินค้าของบริษัทผลิตวุ้นเส้นแห่งนี้ โดยแบ่งประเภทสินค้าโดยใช้ทฤษฎี ABC แล้วนำโปรแกรมเชิงเส้น Excel Solver กำหนดตำแหน่งการจัดเก็บสินค้าในชั้นวางสินค้าเพื่อให้ได้ผลรวมระยะทางการจัดเก็บน้อยที่สุดตามทฤษฎีสินค้าเคลื่อนไหวเร็ววางไว้ใกล้ประตู เมื่อปรับปรุงการจัดเก็บโดยการวางแผนผังการจัดเก็บสินค้าสำเร็จรูปใหม่ สามารถเพิ่มความสามารถในการจัดเก็บสินค้าได้ 328 แพลเลต คิดเป็นร้อยละ 59.85 และสามารถลดระยะทางเฉลี่ยรวมในการจัดเก็บสินค้าได้ 12,810.86 เมตร คิดเป็นร้อยละ 63.85

## 7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ชาตรี พลชัย. การวางแผนผังเพื่อการจัดเก็บน้ำสุรากรณีศึกษา บริษัทสุราแห่งหนึ่ง. วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2554.
- [2] เมธินี ศรีกาญจน์ และชุมพล มณฑาทิพย์กุล. การปรับปรุงประสิทธิภาพตำแหน่งการจัดวาง สินค้าในคลังสินค้ากรณีศึกษา บริษัทศรีไทยซูเปอร์แวร์จำกัด (มหาชน) สาขาสุขสวัสดิ์. บัณฑิตวิทยาลัยการจัดการและนวัตกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2555.
- [3] สุนันทา ศิริเจริญวัฒน์. การเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการคลังสินค้า กรณีศึกษา บริษัท ภูมิไทย คอมซีส จำกัด. วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย, 2555.
- [4] อมรรัตน์ ปาลกะวงษ์ ณ อยุธยา. การเพิ่มประสิทธิภาพคลังสินค้าด้วยการจัดแผนผังคลังสินค้าใหม่ กรณีศึกษาบริษัท ABC. วิทยานิพนธ์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 2559.
- [5] ธัญดา ใจไหมคร้าม. การเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการคลังสินค้า กรณีศึกษาคลังสินค้า 2 รายบุรีบูรณะ กรุงเทพมหานคร องค์การคลังสินค้า. วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยกรุงเทพ, 2559.

- [6] นิธิศ ปุณชนกรภัทร์ และชัชพล มงคลิก. การปรับปรุงระบบการจัดการคลังสินค้าสำหรับคลังกล่องบรรจุภัณฑ์ผลิตภัณฑ์แปรรูปทางการเกษตร. วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง, 2559; 22-33.
- [7] Smith, J.D. The warehouse management handbook. McGraw- Hill, New York, 1988.
- [8] วิทยา คาระคำ. แนวทางการออกแบบผังการจัดเก็บสินค้าสำหรับคลังสินค้า บริษัท ABC จำกัด. วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยบูรพา, 2559.
- [9] พงษ์ชัย อธิคมรัตน์กุล. การจัดการคลังสินค้า (Warehouse Management). เอกสารประกอบการเรียน, สาขาการจัดการโลจิสติกส์, บัณฑิตวิทยาลัยการจัดการและนวัตกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2554.
- [10] สุวิไลภา แสงประกาย. การนำ Optimization มาประยุกต์ใช้ในการหาค่าใช้จ่ายในการขนส่งไปรษณีย์ภัณฑ์. วิทยาสตรมหาบัณฑิต, คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2542.

# การประเมินความเสียหายของอาคาร ในพื้นที่เทศบาลนครเชียงใหม่ก่อนและหลังการเสริมกำลัง จากเหตุแผ่นดินไหวคาดการณ์

## Damage Assessment of Buildings in Chiang Mai Municipal Area Before and After Strengthening Under an Anticipated Earthquake

เอกชัย เกษทรัพย์<sup>1\*</sup> ชยานนท์ หารษภิญโญ<sup>1</sup> ปานนท์ ลาซโรจน์<sup>2</sup> และ กรพล สายเชื้อ<sup>1</sup>

Akkachai Ketsap<sup>1</sup>, Chayanon Hansapinyo<sup>1</sup>, Panon Latcharote<sup>2</sup> and Koraphon Saicheur<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

239 ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

<sup>2</sup> คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

99 หมู่ 18 ถนนพหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง ปทุมธานี 12121

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University,  
 239 akaew Road, Suthep, Mueng, Chiang Mai, Thailand, 50200

<sup>2</sup> Faculty of Science and Technology, Thammasat University,  
 99 Moo 18 Paholyothin Road, Klong Nueng, Klong Luang, Pathumthani, Thailand, 12121

\* E-mail: akachai1624@gmail.com, chayanon@cmu.ac.th and panon@tu.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการประเมินความเสียหายของอาคารในพื้นที่เทศบาลนครเชียงใหม่ก่อนและหลังการเสริมกำลังจากเหตุแผ่นดินไหวคาดการณ์ โดยเริ่มจากเก็บข้อมูลลักษณะอาคารต่างๆ ทั้งหมด 80,290 อาคาร หลังจากนั้นจะจำลองสถานการณ์ของแผ่นดินไหวในตำแหน่งของรอยเลื่อนที่อยู่ใกล้กับเทศบาลนครเชียงใหม่มากที่สุด จากข้อมูลความยาวของรอยเลื่อน 9.69 กิโลเมตร สามารถประมาณขนาดของแผ่นดินไหวที่อาจจะเกิดขึ้นได้เท่ากับ 6.3 แมกนิจูดที่พิกัดศูนย์กลาง ละติจูด 18.901 และ ลองจิจูด 98.916 และได้ใช้สมการค่าลดทอนความเร่งของพื้นดินเพื่อคำนวณค่าความเร่งที่ฐานอาคารในแต่ละตำแหน่งของอาคาร ต่อจากนี้ได้นำค่าความเร่งพิจารณาพร้อมกับเส้นโค้งกำลัง (Capacity curve) เพื่อหาพิกัดการตอบสนอง และประเมินระดับความเสียหายจากฟังก์ชันระดับความเปราะบางของอาคาร (Fragility Function) ต่อไป จากสถานการณ์แผ่นดินไหวที่จำลองดังกล่าว ส่งผลทำให้อาคารจำนวน 80,290 อาคาร พื้นที่อาคารทั้งหมด 22.33 ล้านตารางเมตร เกิดการพังทลายโดยสมบูรณ์คิดรวมเป็นพื้นที่ 7.29 ล้านตารางเมตร และหากมีการเสริมกำลังอาคารทุกหลัง พบว่าพื้นที่รวมของอาคารเกิดการพังทลายโดยสมบูรณ์ลดลงเหลือ 2.70 ล้านตารางเมตร

**คำสำคัญ:** แผ่นดินไหว เชียงใหม่ เสริมกำลัง ประเมินความเสียหาย การวิเคราะห์เชิงพื้นที่



## ABSTRACT

This research was aimed to perform damage assessment of buildings in Chiang Mai municipal area before and after strengthening under an anticipated earthquake. Building information in the study area was first collected. Then, the nearest fault was considered for making an earthquake scenario. The assumed earthquake was estimated at 6.3 Magnitude according to the fault length at the epicentre of Latitude and Longitude point of (18.901,98.916). Then, an attenuation model was adopted to estimate the peak ground acceleration at every building. Next, the performance of buildings was estimated considering the acceleration with the building capacity curve. Then, the fragility function was adopted for the determination of the damage level. From the earthquake simulation, 80,290 buildings in the area which are 22.33 million square meters of the functional area, the complete damage was 7.29 million square meters. In the case of seismic strengthening for all buildings, the complete damage area was reduced to 2.70 square meters.

**Keyword:** Earthquake, Chiang Mai, Strengthening, Loss estimation, Spatial analysis

### 1. บทนำ

เมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขึ้น จะทำให้เมืองเกิดความเสียหายจากแผ่นดินไหวทั้งทางตรง ได้แก่ อาคารต่างๆ ได้รับความเสียหายจากการสั่นสะเทือนและพังทลายหรือในทางอ้อม ได้แก่ การเกิดเหตุการณ์ไฟไหม้ น้ำท่วม ดินถล่ม ซึ่งมูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นนั้นย่อมมีมูลค่ามากมาย ทั้งต่อชีวิตและทรัพย์สิน โดยเฉพาะหากไม่ได้มีมาตรการรับมือกับแผ่นดินไหวที่ดีพอ ในการจัดการต่อภัยพิบัติแผ่นดินไหวของโลกในช่วงปัจจุบันนั้นพบว่า การจัดการทางด้านเตรียมความพร้อม (Preparedness) จะมีประสิทธิภาพมากกว่า การจัดการทางด้านฟื้นฟูหลังเกิดภัยพิบัติ (Recovery Strategy) [1]

จังหวัดเชียงใหม่ นับว่าเป็นเมืองที่สำคัญเมืองหนึ่งของประเทศไทย ที่มีโบราณสถานรวมถึงวัฒนธรรมพื้นเมืองที่สืบทอดต่อกันมาอย่างยาวนาน ในแต่ละปีจะมีผู้คนทั้งชาวไทยและชาวต่างชาติเดินทางเข้ามาเยี่ยมชมจังหวัดเชียงใหม่อย่างมาก แต่ด้วยตำแหน่งที่ตั้งของจังหวัดเชียงใหม่เป็นบริเวณที่มีรอยเลื่อนที่ยังมีพลังอยู่สามารถที่จะเกิดแผ่นดินไหวได้ตลอดเวลา ข้อมูลทางสถิติที่เก็บรวบรวมข้อมูลการเกิดแผ่นดินไหวตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันแสดงให้เห็นว่าในบริเวณภาคเหนือของประเทศไทยมีการเกิดแผ่นดินไหวอยู่บ่อยครั้ง ถึงแม้ว่าขนาดของแผ่นดินไหวจะมีขนาดไม่รุนแรงมากนักก็ตาม [2] ซึ่งแผ่นดินไหวเหล่านี้ล้วนถือเป็นสัญญาณที่คอยเตือนว่า พื้นที่ในเขตภาคเหนือของประเทศไทยนั้นมีโอกาสที่จะเกิด

แผ่นดินไหวได้ตลอดเวลา ตัวอย่างของแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นเมื่อไม่นานมานี้เช่น วันที่ 22 มกราคม 2562 เวลา 23.00 น. อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ ขนาด 3.2 แมกนิจูด [2] และแผ่นดินไหวที่เคยทำให้คนเชียงใหม่ตื่นตระหนกมาแล้วเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2557 ที่อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย ขนาด 6.3 แมกนิจูด

การประเมินความเสียหายจากแผ่นดินไหว เป็นการประมาณการล่วงหน้าถึงความเสียหายที่อาจจะเกิดในอนาคต โดยการที่จะประเมินความเสียหายหรือตำแหน่งของการเกิดแผ่นดินไหวได้อย่างแม่นยำนั้นเป็นเรื่องยาก การที่จะทำการประเมินความเสียหายของแผ่นดินไหวนั้นมีปัจจัยคือ ความเสี่ยงในการเกิดแผ่นดินไหว ความเปราะบางของอาคาร และจำนวนอาคารที่มีความเสี่ยงต่อภัยแผ่นดินไหว [3] ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มักจะไม่แน่นอนอยู่ในธรรมชาติ ทำให้ยากต่อการระบุค่าที่แน่นอน ทำให้การประเมินความเสียหายนั้นจะใช้วิธีหาความน่าจะเป็นของการเกิดขึ้นของเหตุการณ์และมีความแตกต่างกันออกไปในแต่ละพื้นที่ รวมทั้งการตอบสนองต่อภัยจะต้องสอดคล้องกับทรัพยากรของเมืองนั้น ดังนั้นเพื่อให้เกิดความเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ปฏิบัติในงานวิจัยนี้ได้จำลองถึงสถานการณ์แผ่นดินไหวที่คาดว่าจะเกิดขึ้นได้มากที่สุดและประเมินความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในเขตเทศบาลนครเชียงใหม่



## 2. พื้นที่เทศบาลนครเชียงใหม่ (พื้นที่ที่ทำการศึกษ)

จากแผนที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวของกรมทรัพยากรธรณี [4] ได้แบ่งระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวออกเป็น 4 ระดับ โดยจังหวัดเชียงใหม่ตั้งอยู่ในบริเวณที่มีความเสี่ยงอยู่ในระดับที่ 3 มีรอยเลื่อนมีพลังที่ปรากฏในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่และอยู่ใกล้กับบริเวณตัวเมืองเชียงใหม่มากที่สุด คือ รอยเลื่อนแม่ทา ส่วนรอยเลื่อนที่อยู่ในระยะไกลถัดออกไป ได้แก่ รอยเลื่อนแม่ฮ่องสอนในทิศตะวันตก รอยเลื่อนแม่จันในทิศเหนือ รอยเลื่อนพะเยาในทิศตะวันออก และรอยเลื่อนเถินในทิศใต้ สำหรับรอยเลื่อนแม่ทานั้นจะวางตัวโค้งในแนวเหนือ-ใต้ อยู่ทาง

ฝั่งทิศตะวันออกเทียบกับตัวเมืองเชียงใหม่ พาดผ่านมาตั้งแต่อำเภอเชียงดาว เลียบตามแนวอำเภอสันทรายตอนบน ผ่านอำเภอคอสระเก็ด กิ่งอำเภอแม่อนตามแนวขอบอำเภอสันกำแพงและผ่านเข้าสู่จังหวัดลำพูน ทางด้านตอนบนของอำเภอคอสระเก็ดมีแนวทแยงของรอยเลื่อนในทิศตะวันออกเฉียงเหนือไปตามทิศทางสู่อำเภอเวียงป่าเป้า จ.เชียงใหม่ นอกจากนี้ยังมีแขนงย่อยของรอยเลื่อนแม่ทา ในเขตบริเวณติดต่อรหว่างอำเภอแม่วาง อำเภอหางดง และอำเภอสันป่าตอง อีกด้วย โดยนับเป็นระยะทางยาวทั้งสิ้นประมาณ 55 กิโลเมตร

ตารางที่ 1 อาคารในพื้นที่ศึกษา (จำนวนหลัง)

ประเภทอาคาร	ประเภทโครงสร้าง								
	C1	C2	C3	S1	S2	S3	W1	W2	รวม
อาคารสาธารณะ	2	2	57	2		15	1		79
อาคารพาณิชย์	127	151	18,072	5	5	288	393	3	19,044
อาคารรถเก็น	4	12	136	2		3	2		159
อาคารรัฐบาล	8	10	881			20	20		939
โบราณสถาน	1	6	951				34	1	993
โรงแรม	70	158	412	2		5	4		651
อุตสาหกรรม		2	121	1		68	2		194
สำนักงาน	15	47	397	1		19	7		486
ทั่วไป	9	2	12,117	4		111	328		12,571
ที่พักอาศัย	143	400	40,206	2		95	2,972	6	43,824
โรงเรียน	60	19	1,198	8		30	35		1350
รวม	439	809	74,548	27	5	654	3,798	10	80,290

โดยที่ C1 คือ ระบบโครงเฟรมคอนกรีตเสริมเหล็กด้านทานโมเมนต์

C2 คือ ระบบโครงเฟรมคอนกรีตเสริมเหล็กผนังรับแรงเฉือน

C3 คือ ระบบโครงเฟรมคอนกรีตเสริมเหล็กและมีกำแพงอิฐไม่เสริมเหล็กในช่วงเสา

S1 คือ ระบบโครงเหล็กด้านโมเมนต์เหล็ก

S2 คือ ระบบโครงเหล็กแกน

S3 คือ ระบบโครงด้านโมเมนต์เหล็กขนาดเล็ก

W1 คือ ระบบโครงไม้ขนาดเล็ก พื้นที่ไม่เกิน 464.5 ตารางเมตร

W2 คือ ระบบโครงสร้างไม้ พื้นที่เกิน 464.5 ตารางเมตร

พื้นที่ศึกษานี้ กำหนดเป็นบริเวณพื้นที่เทศบาลนครเชียงใหม่ รวมเป็นพื้นที่ขนาด 40.22 ตารางกิโลเมตร จากการสำรวจอาคารในพื้นที่ศึกษาพบว่ามีจำนวนอาคารทั้งหมด 80,290 หลัง ดังตารางที่ 1 ผลสำรวจที่ได้ โดยส่วนใหญ่ อาคารในพื้นที่มีระบบโครงสร้างในกลุ่มระบบโครงเฟรมคอนกรีตเสริมเหล็กและมีกำแพงอิฐไม่เสริมเหล็กในช่วงเสา (C3) จำนวน 74,548 หลัง รองลงมาเป็นระบบโครงสร้างอาคารขนาดเล็กโครงสร้างไม้ (W1) พื้นที่ไม่เกิน 464.5 ตารางเมตร จำนวน 3,798 หลัง ประเภทการใช้อาคารเป็นกลุ่มที่พักอาศัย (Residential) มีปริมาณอาคารมากที่สุด 43,824 หลัง (54.58%) รองลงมาเป็นอาคารในกลุ่มอาคารพาณิชย์ (Commercial) จำนวน 19,044 หลัง (23.72%) อาคารในกลุ่มทั่วไป (Other) จำนวน 12,571 หลัง (15.66%)

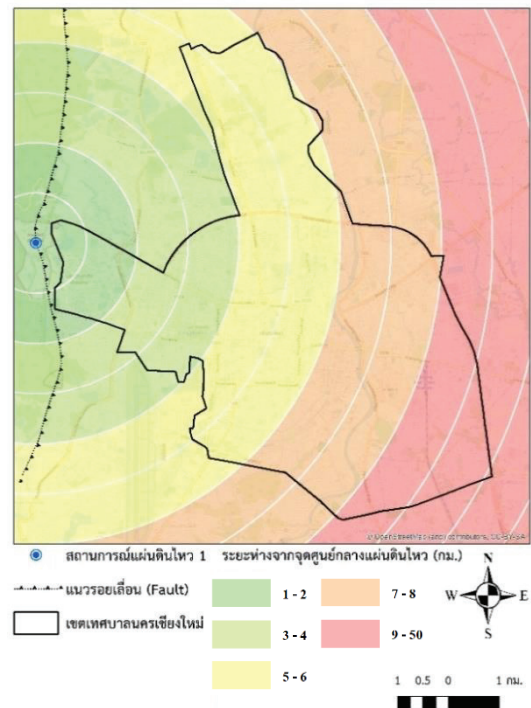
### 3. การจำลองสถานการณ์การเกิดแผ่นดินไหว

ระดับความเสียหายของอาคาร ในเหตุการณ์แผ่นดินไหวหนึ่งๆ ขึ้นกับขนาดความเร่งของแผ่นดินไหวที่กระทำต่ออาคาร โดยเป็นผลจากตำแหน่งศูนย์กลางและขนาดของแผ่นดินไหว ในการพิจารณาเหตุการณ์แผ่นดินไหวสมมติเพื่อจำลองสถานการณ์นี้ ได้พิจารณาดำเนินการที่ตั้งของเทศบาลนครเชียงใหม่ร่วมกับแผนที่รอยเลื่อนที่ยังมีพลังของกรมทรัพยากรธรณี โดยพบว่ามีส่วนย่อยของรอยเลื่อนแม่ทาที่ตำแหน่งพิกัดละติจูด 18.901 และ ลองจิจูด 98.916 ดังรูปที่ 1 ที่อยู่ใกล้เมืองเทศบาลนครเชียงใหม่

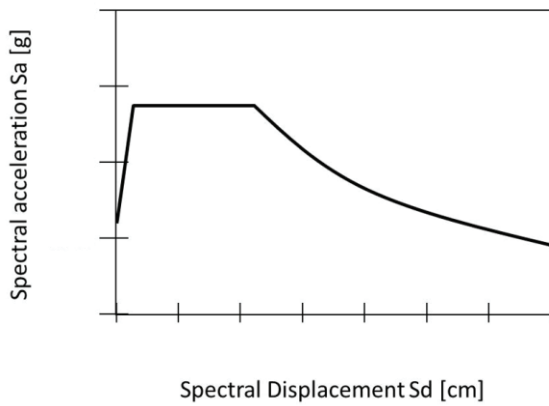
การประมาณขนาดของแผ่นดินไหวจะอ้างอิงจากงานวิจัยของ Donald and Wells [5] ซึ่งพิจารณาความยาวของรอยเลื่อนในการประเมินหาขนาดความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่อาจจะเกิดได้ ซึ่งในตำแหน่งของส่วนย่อยของรอยเลื่อนแม่ทา มีความยาว 9.69 กิโลเมตร จึงประมาณความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่อาจจะเกิดขึ้นได้สูงสุดเท่ากับ 6.3 แมกนิจูด

ความรุนแรงของแผ่นดินไหวจะลดทอนลงตามระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของแผ่นดินไหว อร์รทดล

อำมาตย์มณี [6] ได้ทำการศึกษาสมการลดทอนพลังงานแผ่นดินไหวต่าง ๆ ที่เหมาะสมกับชั้นดินของจังหวัดเชียงใหม่พบว่า สมการลดทอนพลังงานของ Chiou and Young [7], Abrahamson and Silva [8] และ Sadigh et al. [9] นั้นมีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้เพื่อคำนวณความรุนแรงของแผ่นดินไหว ดังนั้นในการจำลองสถานการณ์นี้ได้เลือก สมการลดทอนของ Chiou and Young [7] มาใช้ในการคำนวณขนาดความเร่งจากเหตุแผ่นดินไหวจำลองนี้ และจากค่าความเร่งในแต่ละตำแหน่งของอาคาร สามารถสร้างเส้นกราฟความสัมพันธ์ของ Spectral acceleration (Sa) และ Spectral Displacement (Sd) ได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 แสดงตำแหน่งการจำลองการเกิดสถานการณ์แผ่นดินไหว



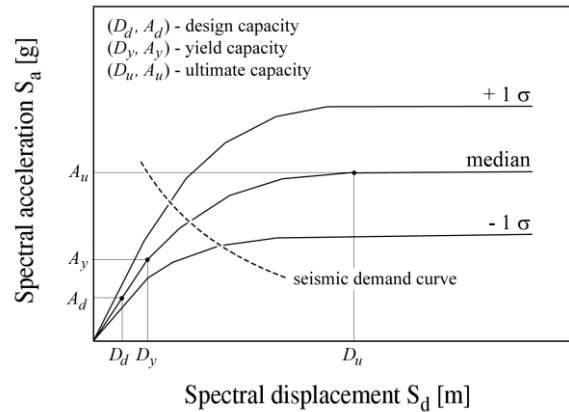
รูปที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ Spectral acceleration (Sa) และ Spectral Displacement (Sd)

#### 4. การวิเคราะห์ความเสียหายอาคาร

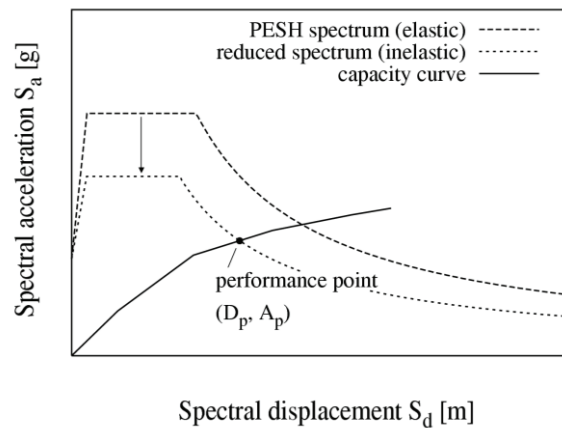
นอกจากขนาดความเร่งพื้นดินแล้ว ความแข็งแรงของโครงสร้างอาคารก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อระดับความเสียหายของอาคาร จากข้อมูลการสำรวจอาคารซึ่งได้มีการจำแนกลักษณะของโครงสร้างแต่ละชนิดออกเป็นกลุ่มๆ ตามมาตรฐานการสำรวจอาคาร FEMA 154-155 [10,11] ซึ่งในอาคารที่มีลักษณะของโครงสร้างที่ต่างกัน จะมีพฤติกรรมรับแรงและการเสียรูปที่แตกต่างกัน แสดงเป็นเส้นโค้งกำลัง (Capacity curve) ของอาคาร การศึกษานี้ได้ใช้เส้นโค้งกำลังตามมาตรฐานของ HAZUS [12] ซึ่งมีการสมมติให้อาคารอยู่ระดับก่อนที่จะมีการเสริมกำลังอาคาร ดังแสดงในรูปที่ 3 และตารางที่ 2 เส้นโค้งกำลังจะมีจุดกำหนดอยู่ 3 จุดคือ กำลังออกแบบ (Design capacity) กำลังคราก (Yield Capacity) และกำลังประลัย (Ultimate capacity) จากจุดกำเนิดเส้นโค้งถึงจุดกำลังครากจะพิจารณาให้โครงสร้างมีพฤติกรรมเป็นอิลาสติกเชิงเส้น (Linear elastic) และนับจากจุดครากไปจนกระทั่งจุดประลัย เส้นโค้งจะเปลี่ยนจากอิลาสติกไปสู่การเสียรูปแบบพลาสติกสมบูรณ์ (fully plastic)

อาคารในพื้นที่วิเคราะห์ที่มีระดับความเร่งของแผ่นดินไหว ได้ทำการวิเคราะห์ความเสียหายโดยวิธีการที่เรียกว่า Capacity-Spectrum Method (CSM) ซึ่งเป็น

การนำค่าความเร่งของพื้นดินเนื่องจากแผ่นดินไหว จากรูปที่ 2 และ เส้นกราฟกำลังของอาคาร (Capacity curve) จากรูปที่ 3 เข้าด้วยกันเพื่อทำการหาจุดตัดระหว่างกราฟทั้ง 2 ชนิด ที่เรียกว่า Performance point ดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 เส้นโค้งกำลังของอาคาร (Capacity curve)



รูปที่ 4 แสดงวิธีการวิเคราะห์แบบ Capacity-Spectrum Method (CSM)

จากจุด performance point ของอาคารในแต่ละตำแหน่งที่ได้ จะได้ค่าความน่าจะเป็นของระดับความเสียหายจากการพิจารณาโค้งการแตกหัก (Fragility curve) ดังรูปที่ 5 ซึ่งจำแนกความน่าจะเป็นของระดับเสียหายออกเป็น 5 ระดับ คือ 1. ไม่เกิดความเสียหาย (None) 2. เสียหายเล็กน้อย (Slight) 3. เสียหายปานกลาง (Moderate) 4. เสียหายมาก (Extensive) และ 5.พังทลายโดยสมบูรณ์ (Complete)

ตารางที่ 2 เส้นโค้งสมรรถภาพ (Capacity curve) ก่อนมีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว (Pre – Code Seismic Design Level)

Building Type	Yield Capacity Point		Ultimate Capacity Point	
	Dy (in.)	Ay (g)	Du (in.)	Au (g)
W1	0.24	0.20	4.32	0.60
W2	0.16	0.10	2.35	0.25
S1	0.15	0.06	2.75	0.19
S2	0.16	0.10	1.88	0.20
S3	0.16	0.10	1.88	0.20
C1	0.10	0.06	1.76	0.19
C2	0.12	0.10	1.80	0.25
C3	0.12	0.10	1.35	0.22

จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีดังกล่าวพบว่าในสถานการณ์จำลองแผ่นดินไหวขนาด 6.3 ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 3 ได้ประมาณการเกิดความเสียหายในระดับสมบูรณ์ (Complete) ของอาคารในทุกๆ อาคารรวมกัน เท่ากับ 7,289,446 ตารางเมตร หรือ คิดเป็นร้อยละ 32.65 ของพื้นที่ใช้สอยรวมของอาคารทุกชั้นในบริเวณพื้นที่ทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 22,331,315 ตารางเมตร โดยสามารถแสดงความหนาแน่นของพื้นที่เสียหายได้ดังรูปที่ 6

### 5. การวิเคราะห์ความเสียหายของเทศบาลนครเชียงใหม่หลังมีการเสริมกำลังให้อาคาร

การเสริมกำลังอาคารเดิมให้สามารถรองรับแรงแผ่นดินไหวมีหลายแนวทางด้วยกัน การเลือกใช้พิจารณาเงื่อนไขที่เกี่ยวข้องและความเหมาะสม เช่น ปัจจัยทางด้านเทคนิค ราคา การใช้ประโยชน์ได้อย่างลงตัว ผลกระทบต่อด้านสถาปัตยกรรม ผลกระทบต่อการใช้ประโยชน์ และการเสียโอกาส เป็นต้น สิ่งเหล่านี้มีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กัน ซึ่งผู้ตัดสินใจในการเลือกวิธีเสริมกำลังอาคารบางครั้งไม่อาจบอกได้ว่าวิธีการใดดีที่สุดที่ครอบคลุมทุกเงื่อนไขที่เกี่ยวข้อง

ในงานศึกษานี้ ไม่ได้มุ่งเน้นเพื่อการหาวิธีการเสริมกำลังโครงสร้างที่เหมาะสม แต่สมมติให้โครงสร้างที่ได้เสริมกำลังนั้นจะมีความสามารถในการรับแรงที่ดีขึ้นหรือตามวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ วิธี Capacity – Spectrum Method (CSM) ซึ่งกำหนดให้ภายหลัง

ทำการเสริมกำลังอาคาร จะทำให้อาคารนั้นสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวในระดับข้อกำหนดปานกลาง (Moderate – Code Seismic Design Level) [12] ดังข้อกำหนดในตารางที่ 3 เส้นโค้งสมรรถภาพใหม่ (Capacity curve) ดังรูปที่ 7 และทำการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของระดับความเสียหายต่างๆ ดังเช่นก่อนหน้านี้

หลังจากมีการกำหนดให้อาคารทั้งหมดในเขตเทศบาลนครเชียงใหม่ และทำการวิเคราะห์ความเสียหายอีกครั้งจากสถานการณ์การเกิดแผ่นดินไหวเดิมคือ ขนาด 6.3 ตำแหน่งศูนย์กลาง พิกัดละติจูด 18.901 และลองจิจูด 98.916 พบว่า เดิมก่อนการปรับปรุงมีความเสียหายในระดับสมบูรณ์ (Complete) เท่ากับ 7,289,446 ตารางเมตร หรือ คิดเป็นร้อยละ 32.65 ของพื้นที่อาคารทั้งหมด ภายหลังทำการเสริมกำลังอาคารมีความเสียหายในระดับสมบูรณ์ (Complete) เท่ากับ 2,703,357 ตารางเมตร หรือ คิดเป็นร้อยละ 12.09 ของพื้นที่อาคารทั้งหมด ดังรูปที่ 8 และได้แสดงจำนวนของพื้นที่เสียหายที่เกิดขึ้นกับอาคารแต่ละประเภทโครงสร้าง ทั้งก่อนและหลังการเสริมกำลัง ดังตารางที่ 4

### 6. สรุป

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาประเมินความเสียหายของอาคารในพื้นที่เทศบาลนครเชียงใหม่ภายใต้สถานการณ์แผ่นดินไหวสมมติ การศึกษาเริ่มจากการเก็บข้อมูลลักษณะอาคารในพื้นที่ ทั้งหมด 80,290 อาคาร คิดเป็นพื้นที่ใช้สอยทั้งหมด 22.33 ล้านตารางเมตร

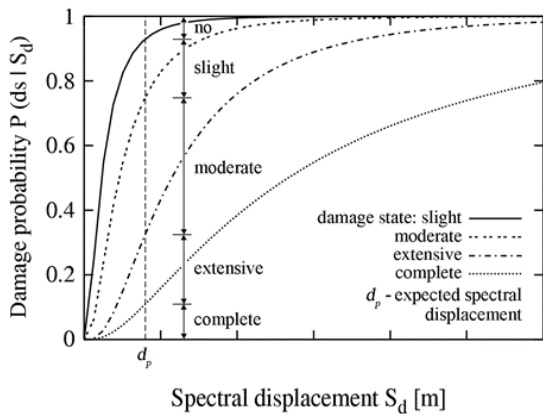
หลังจากนั้นได้ทำการจำลองสถานการณ์ของแผ่นดินไหวในตำแหน่งของรอยเลื่อนที่อยู่ใกล้กับพื้นที่ศึกษามากที่สุด จากนั้นประเมินความยาวของรอยเลื่อน เพื่อใช้ในการประมาณขนาดของแผ่นดินไหวที่อาจจะเกิดขึ้นได้ และประมาณความเสียหายด้วยวิธี Capacity – Spectrum Method (CSM) ผลการศึกษาพบว่า

1. ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหว สมมติให้เกิดขึ้นรอยเลื่อนที่ใกล้เทศบาลนครเชียงใหม่ที่สุด คือ พิกัดละติจูด 18.901 และ ลองจิจูด 98.916 ซึ่งความยาวของรอยเลื่อน 9.69 กิโลเมตร สามารถประมาณขนาดของแผ่นดินไหวที่อาจจะเกิดขึ้นได้เท่ากับ 6.3 แมกนิจูด

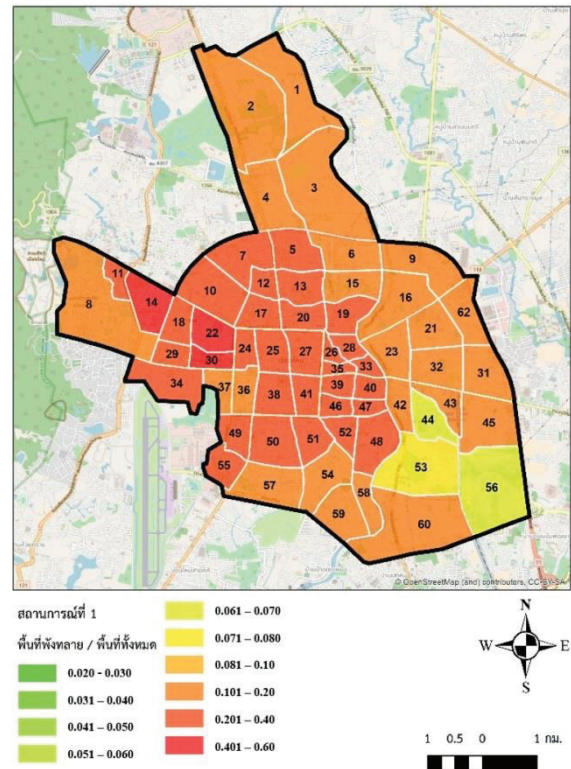
2. จากแผ่นดินไหวที่สมมติ อาคารในเขตเทศบาลนครเชียงใหม่เกิดการพังทลายโดยสมบูรณ์ 7.29 ล้านตารางเมตร คิดเป็นร้อยละ 32.65

3. หากทำการเสริมกำลังอาคารทุกหลัง พบว่าภายใต้สถานการณ์แผ่นดินไหวสมมติเดียวกัน อาคารในเขตเทศบาลนครเชียงใหม่เกิดการพังทลายโดยสมบูรณ์ 2.70 ล้านตารางเมตร คิดเป็นร้อยละ 12.09

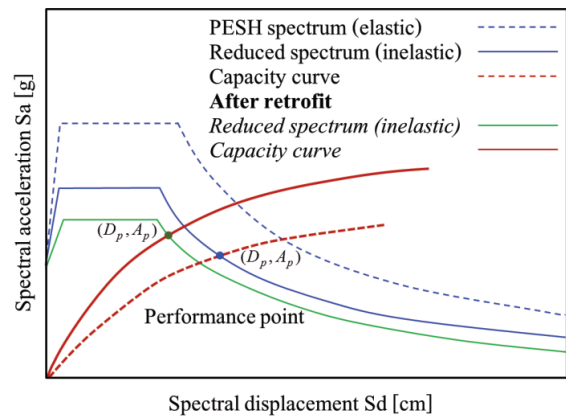
4. ในการประเมินความเสียหายด้วยวิธี CSM ก่อนข้างมีความแปรปรวน เนื่องจากเส้นโค้งกำลังที่ใช้เป็นเพียงตัวแทนของอาคารโครงสร้างชนิดนั้นๆ ซึ่งในความเป็นจริง อาคารที่มีโครงสร้างชนิดเดียวกัน มีปัจจัยหลายอย่าง ที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของอาคาร เช่น การควบคุมคุณภาพการก่อสร้าง คุณภาพของวัสดุที่ใช้ การเสื่อมสภาพของอาคารที่ใช้งานมาเป็นเวลานาน เป็นต้น



รูปที่ 5 เส้นโค้งการแตก (Fragility curve)

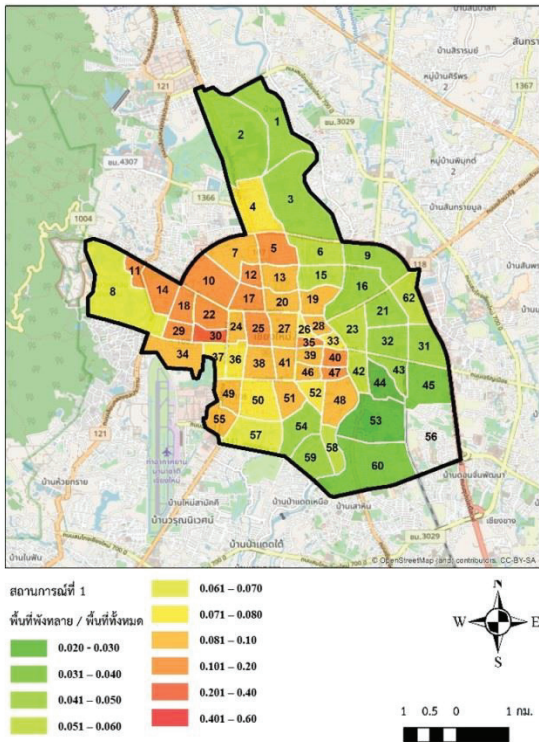


รูปที่ 6 ความหนาแน่นของอาคารที่ได้รับความเสียหายในเขตเทศบาลนครเชียงใหม่



รูปที่ 7 เส้นโค้งกำลังอาคารที่เสริมกำลังเทียบกับระดับการสั่นของพื้นดิน





รูปที่ 8 ความหนาแน่นของอาคารที่ได้รับความเสียหายในเขตเทศบาลนครเชียงใหม่ หลังจากมีการเสริมกำลังอาคาร

## 7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ในการสนับสนุนการดำเนินงานภายใต้โครงการ การประมาณการสูญเสียจากแผ่นดินไหวและมาตรการบรรเทาการสูญเสีย โดยการเสริมกำลังอาคารในเขตเทศบาลเชียงใหม่งบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 ตามมติคณะรัฐมนตรี

ตารางที่ 3 เส้นโค้งสมรรถภาพ (Capacity curve) ในระดับข้อกำหนดปานกลาง (Moderate – Code Seismic Design Level)

Building Type	Yield Capacity Point		Ultimate Capacity Point	
	Dy (in.)	Ay (g)	Du (in.)	Au (g)
W1	0.36	0.300	6.48	0.900
W2	0.31	0.200	4.70	0.500
S1	0.31	0.125	5.50	0.375
S2	0.31	0.200	3.76	0.400
S3	0.31	0.200	3.76	0.400
C1	0.20	0.125	3.52	0.375
C2	0.24	0.200	2.70	0.450
C3	0.12	0.100	1.35	0.225

ตารางที่ 4 พื้นที่เสียหายของอาคารจำแนกตามประเภทโครงสร้าง ก่อนและหลังการเสริมกำลัง (หน่วย: ตารางเมตร)

Building Type	พื้นที่เสียหายก่อนเสริมกำลัง	พื้นที่เสียหายหลังเสริมกำลัง
W1	6,006	1,681
W2	363	37
S1	773	292
S2	1,520	413
S3	388,797	141,952
C1	496,680	186,696



ตารางที่ 4 (ต่อ) พื้นที่เสียหายของอาคารจำแนกตามประเภทโครงสร้าง ก่อนและหลังการเสริมกำลัง (หน่วย: ตารางเมตร)

Building Type	พื้นที่เสียหายก่อนเสริมกำลัง	พื้นที่เสียหายหลังเสริมกำลัง
C2	795,982	318,844
C3	5,599,324	2,053,443
รวม	7,289,446	2,703,357

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] The United Nation Office for Disaster Risk Reduction. The Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030, 2015.
- [2] กองเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา. เหตุการณ์แผ่นดินไหวในประเทศและใกล้เคียง, 2562. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.earthquake.tmd.go.th/inside.html?ps=200>.
- [3] Erdik, M. Earthquake Risk Assessment. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2017; 15(12): 5055-5092.
- [4] กรมทรัพยากรธรณี. แผนที่แสดงพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว, 2562. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.dmr.go.th/images/scheme/9.jpg>
- [5] Donald, L. and Wells, K. New Empirical Relationships Among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1994; 84(4): 974-1002.
- [6] อรรถพล อามาศย์มณี. แบบจำลองการลดทอนพลังงานแผ่นดินไหวสำหรับชั้นดินเชียงใหม่. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2554.
- [7] Chiou, B. and Youngs, R. R. An NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. *Earthquake Spectra*, 2008; 24(1): 173-215.
- [8] Abrahamson, N. and Silva, W. Summary of the Abrahamson & Silva NGA Ground-Motion Relations. *Earthquake Spectra*, 2008; 24(1): 67-97.
- [9] Sadigh, K., Chang, C., Egan, J. A., Makdisi, F. and Youngs, R. R. Attenuation Relationships for Shallow Crustal Earthquakes Based on California Strong Motion Data. *Seismological Research Letters*, 1997; 68(1): 180-189.
- [10] Federal Emergency Management Agency-FEMA. Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: A handbook FEMA 154, 2003.
- [11] Federal Emergency Management Agency-FEMA. Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: Supporting documentation FEMA 155, 2003.
- [12] Federal Emergency Management Agency-FEMA. Multi-hazard loss Estimation Methodology–Earthquake Module, HAZUS-MH MR4 Technical Manual, Washington DC, USA, 2003.

# การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเครื่องมือแพทย์ ภายใต้พื้นที่การผลิตที่ลดลง

## Increasing Efficiency of Medical Device Production Under Reduced Space

อติทยา มารศรี\* และ จิรพัฒน์ เงามประเสริฐวงศ์

Atitaya Marasri and Jeerapat Ngaoprasertwong

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,  
Chulalongkorn University, Phayathai Road, Patumwan, Bangkok, 10330, Thailand

\*E-mail: tamayaru\_gr@hotmail.com, jeerapat\_n@chula.ac.th

Telephone Number: 089-1554966, 02-2186838

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเครื่องมือแพทย์ ภายใต้เงื่อนไขพื้นที่การผลิตที่ลดลง เกือบเท่าตัว โดยกำลังการผลิตจะต้องไม่ลดน้อยลงไปจากเดิมและยังคงสามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ ปัจจุบันผลิตภัณฑ์ AAA ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ส่วนหนึ่งของชุดบริจาคเกล็ดเลือด ใช้พื้นที่การผลิตทั้งหมด 219 ตารางเมตร มีสถานีการทำงานทั้งหมด 15 สถานี ใช้พนักงานผลิตเฉลี่ย 30 คน ระยะเวลาการผลิตเท่ากับ 652 วินาที/ชิ้น หรือ 5.52 ชั่วโมง/คน/ชม. ทำการผลิตระบบผลัดโดยทำการผลิตล่วงหน้า 1 วัน แบบเป็นงวด (Batch Production) ของกระบวนการ ประกอบย่อย 11 สถานี จากนั้นเก็บเป็นชิ้นงานระหว่างกระบวนการไว้ทั้งหมด ทำให้ใช้พื้นที่ในการผลิตและจัดเก็บ ก่อนข้างมาก ก่อนที่จะส่งให้กับกระบวนการประกอบหลักเป็นผู้ประกอบชิ้นส่วนย่อยทั้งหมดเข้าด้วยกัน และส่งให้กลุ่มงานถัดไป โดยแนวทางการทำวิจัย ผู้วิจัยดำเนินการโดยปรับเปลี่ยนรูปแบบการผลิต ลดสถานีการทำงาน และปริมาณชิ้นงาน ระหว่างกระบวนการให้ได้สูงสุดเป็นหลัก ซึ่งวิธีการวิจัยเริ่มจากการศึกษาพื้นที่ที่ใช้ในแต่ละส่วนงาน เวลา และวิธีการทำงานของกระบวนการผลิตในปัจจุบัน จากนั้นวิเคราะห์งานที่ไม่เกิดมูลค่าและปรับปรุงกระบวนการผลิตด้วยเทคนิค ECRS (Eliminate, Combine, Rearrange, Simplify) หลังจากนั้นทำการศึกษาเวลามาตรฐานของแต่ละงานใหม่ และลำดับก่อนหลังของการประกอบ เพื่อนำมาออกแบบการผลิตแบบเซลล์ลู่ โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการจัดสมดุลการผลิต การรวมงานของกระบวนการประกอบย่อยบางสถานีเข้ากับงานของกระบวนการประกอบหลัก และทำการผลิตในรูปแบบเซลล์ลู่ 3 คนต่อ 1 เซลล์การทำงานประกอบ และกำหนดเวลามาตรฐานของการทำงานแบบเซลล์ลู่ โดยรูปแบบการผลิตจะถูกเปลี่ยนเป็นการทำงานในรูปแบบดึง โดยออกแบบให้เข้าใกล้การผลิตแบบไหลที่ละชิ้น

ผลจากการปรับปรุงพบว่า พื้นที่ในการผลิตลดลงจาก 219 ตารางเมตร เหลือ 111 ตารางเมตร หรือลดลง 49 เปอร์เซ็นต์ สถานีการทำงานลดลงจาก 15 สถานีเหลือ 10 สถานี ใช้พนักงานทำงานลดลงจาก 30 คน เหลือ 27 คน และระยะเวลาในการผลิตลดลงจาก 652 วินาที/ชิ้น เป็น 574 วินาที/ชิ้น หรือประสิทธิภาพการผลิตเพิ่มขึ้นจาก

5.52 ชิ้น/คน/ชม. เป็น 6.27 ชิ้น/คน/ชม. หรือเพิ่มขึ้น 12 เปอร์เซ็นต์ สำหรับพื้นที่ที่ลดได้ 108 ตารางเมตร จะใช้ในการรองรับสายการผลิตของผลิตภัณฑ์ใหม่

**คำสำคัญ:** การผลิตแบบเซลล์ลู่การ การจัดสมดุลการผลิต เทคนิค ECRS การผลิตแบบดึง การผลิตแบบไหลทีละชิ้น

## ABSTRACT

This research aims to increase the efficiency of medical device production under the condition that the production area is reduced, the production capacity must not be reduced from the current and can still meet the needs of customers. Currently, AAA products is a part of product use for donate platelets which use area for production total 219 square meters, 15 work stations, and 30 persons. The cycle time is 652 seconds / piece or 5.52 pieces / person/ hour. Production by Push system as Batch production of 11 sub assembly processes, then stored as a work in process before sending to the main assembly process to assembly all the sub units together and send to the next process. The research methodology starts from studying the current situation of production process about using areas, time and working methods then analyze the non-value work and improve the production process with the ECRS (Eliminate Combine Rearrange Simplify) technique. After that, time study and then set new standard time of each process and using precedence diagram to design a new production process to cell production by applying line balancing technique with combine and rearrange working process of some Sub assembly and Main assembly by using 3 persons/cell to produce AAA complete unit and set new standard time for cell assembly. Which these production process will be work as Pull system and we design to approach One-piece flow production.

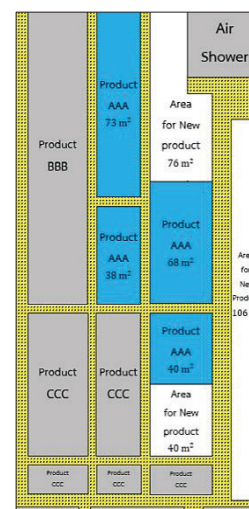
The result of the research showed Production area decreased from 219 square meters to 111 square meters or decreased 49 percent. Work stations decreased from 15 stations to 10 stations. Workers were reduced from 30 to 27 person and the Cycle time decreased from 652 seconds/ unit to 574 seconds / unit or production efficiency increase from 5.52 units / person / hour to 6.27 units/ person / hour or 12 percent increasing. For areas that can reduce 108 square meters will use to support the production line of new products.

**Keyword:** Cellular production, Line balancing, ECRS Technique, Pull Production and One-piece flow

## 1. บทนำ

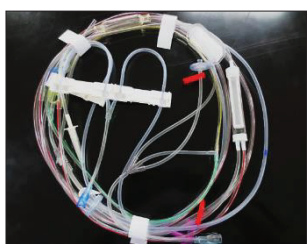
บริษัทกรณศึกษา ผลิตและจำหน่ายสินค้าในกลุ่มวัสดุสิ้นเปลืองทางการแพทย์ ส่วนใหญ่จะเป็นแบบใช้ครั้งเดียวทิ้ง (Single-use device) ใช้เทคโนโลยีการผลิตไม่สูงมาก ทำการประกอบด้วยคนเป็นส่วนใหญ่ โดยส่งออกประเทศญี่ปุ่นเป็นหลัก และในปัจจุบัประมาณหน้า บริษัทแม่ที่ประเทศญี่ปุ่นมีนโยบายที่จะลดต้นทุนการผลิต โดยการย้ายผลิตภัณฑ์บางชนิดมาผลิตที่โรงงานในประเทศไทย เนื่องจากค่าแรงงานในไทยถูกกว่าที่ญี่ปุ่น แต่ปัจจุบัน ยังมีพื้นที่ไม่เพียงพอต่อการรองรับผลิตภัณฑ์ที่จะถูกย้ายมา ซึ่งต้องการใช้พื้นที่ทั้งหมดประมาณ 300 ตารางเมตร แต่ในปัจจุบันมีพื้นที่เพื่อรองรับผลิตภัณฑ์ใหม่เพียง 222 ตารางเมตรเท่านั้น ดังภาพที่ 1 (พื้นที่สีขาว) ผู้วิจัยจึงต้องจัดหาพื้นที่เพิ่มอีกอย่างน้อย 78 ตารางเมตร เพื่อรองรับผลิตภัณฑ์ที่จะถูกย้ายมาผลิต

ดังนั้นพื้นที่ของผลิตภัณฑ์ AAA ซึ่งติดกับพื้นที่รองรับผลิตภัณฑ์ใหม่ จึงถูกพิจารณาให้ปรับลดลง ดังรูปที่ 1 (พื้นที่สีฟ้า)



รูปที่ 1 พื้นที่การผลิตปัจจุบันก่อนการปรับปรุง

ผลิตภัณฑ์ AAA ดังรูปที่ 2 เป็นผลิตภัณฑ์ส่วนหนึ่งของชุดสายส่งสำหรับบริจาคเลือด มีรูปแบบการผลิตเป็นแบบผลัก (Push System) โดยทำการผลิตแบบเป็นงวด ของกลุ่มงานประกอบย่อย (Sub Assembly) จำนวนมาก และเก็บเป็นชิ้นงานระหว่างกระบวนการ (Work in process: WIP) ก่อนที่จะส่งไปยังกลุ่มงานประกอบหลัก (Main assembly) เพื่อประกอบชิ้นงานย่อยทั้งหมดเข้าด้วยกันให้เป็นผลิตภัณฑ์และส่งให้กระบวนการถัดไป



รูปที่ 2 ผลิตภัณฑ์ AAA

จากการศึกษาเบื้องต้นที่หน้างาน ผู้วิจัยพบว่า พื้นที่ส่วนใหญ่ ถูกใช้ไปกับสถานีงานประกอบย่อย และพื้นที่ที่ใช้สำหรับจัดเก็บชิ้นงานระหว่างกระบวนการ อีกทั้งยังไม่มีการศึกษาเวลามาตรฐาน (Standard Time) ที่ดี ทำให้ไม่มีการแบ่งงานที่ชัดเจนให้กับพนักงาน โดยปัจจุบันจะเป็นการแบ่งงานตามอัตราการผลิตของแต่ละกระบวนการที่ถูกกำหนดมาตั้งแต่แรกเริ่มที่มีการผลิตผลิตภัณฑ์ และจัดสรรงานให้คนลงไปทำ ซึ่งจากสภาพการทำงานจริงพบว่า มีสภาวะการว่างงานในบางกระบวนการ บางคนรับภาระงานที่หนักเกินไป และบางกระบวนการทำงานเสร็จก่อนเวลาเลิกงาน ซึ่งเกิดการใช้ทรัพยากรอย่างไม่มีประสิทธิภาพ ทั้งในส่วนขอพื้นที่การใช้งาน ชิ้นงานระหว่างกระบวนการ แรงงาน และเวลา

ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงต้องทำการศึกษาและปรับปรุงสายการผลิตของผลิตภัณฑ์ AAA โดยเป้าหมายหลักคือลดพื้นที่การผลิต เพื่อนำไปใช้รองรับสายการผลิตของผลิตภัณฑ์ใหม่ที่จะถูกย้ายมา โดยมีเงื่อนไขว่าประสิทธิภาพการผลิตของผลิตภัณฑ์ AAA จะต้องไม่

ลดลง แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มประสิทธิภาพในส่วนขอแรงงาน และเวลาในการผลิตก็เป็นส่วนสำคัญ ที่ช่วยให้บริษัท มีศักยภาพในการแข่งขันเพิ่มขึ้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการพิจารณาปรับปรุงเพื่อให้การผลิตมีประสิทธิภาพสูงสุดในทุก ๆ ด้าน

ดังนั้นการศึกษางานวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้นำเสนอวิธีการ โดยการปรับเปลี่ยนรูปแบบการผลิตจากเดิม ที่ทำการผลิตแบบผลัก ในลักษณะเป็นงวดของกลุ่มงานประกอบย่อย มาเป็นการผลิตแบบดึง (Pull System) โดยรวมงานของกลุ่มงานประกอบย่อยเข้ากับกลุ่มงานประกอบหลัก ในรูปแบบการผลิตแบบเซลล์ลู่ดาร์ (Cellular Production) ให้เข้าใกล้การไหลแบบทีละชิ้น (One-piece flow) และประยุกต์ใช้เครื่องมือที่เกี่ยวข้องมาใช้ในการปรับปรุงกระบวนการ

### 1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเครื่องมือแพทย์ ภายใต้พื้นที่การผลิตที่ลดลง

### 1.2 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะมุ่งเน้น การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตผลิตภัณฑ์ AAA ในการลดพื้นที่ ของสถานีงานประกอบย่อยที่ 7 สถานี ที่เป็นการประกอบแบบปกติ (A, B, C, E, G, H, และ J) และสถานีงานประกอบหลัก 1 สถานี รวมเป็น 8 สถานีจากทั้งหมด 15 สถานี เป็นหลัก โดยประยุกต์ใช้เครื่องมือที่เกี่ยวข้องมาทำการปรับปรุงกระบวนการ

## 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การเพิ่มผลผลิตในอุตสาหกรรมในแบบที่มีการลดต้นทุนการผลิต หรือลดสัดส่วนทรัพยากรที่ใช้ เป็นแนวทางการเพิ่มผลผลิตที่ได้ผลสูงสุด [1] สำหรับองค์ประกอบใด ๆ ของกระบวนการผลิตที่เพิ่มค่าใช้จ่าย โดยปราศจากการเพิ่มคุณค่าให้กับผลิตภัณฑ์ ได้แก่ กิจกรรมที่ไม่เพิ่มคุณค่า (Non-Value Added Activities: NVA) คือกิจกรรมใด ๆ ก็ตามที่ใช้ทรัพยากร

เช่น เวลา พนักงาน เครื่องจักร พื้นที่ เป็นต้น แต่ไม่ได้มีส่วนในการสร้างความพึงพอใจให้แก่ลูกค้า มีการประมาณกันว่า 95% ของเวลาที่ผลิตภัณฑ์อยู่ในโรงงานเป็นเวลาที่ใช้ไปกับกิจกรรมที่ไม่เพิ่มคุณค่า [2]

เครื่องมือที่ผู้วิจัยเลือกใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการผลิต ได้แก่ แผนภูมิกระบวนการไหลของกระบวนการ (Flow process chart) ซึ่งจะแสดงลำดับของกิจกรรมตลอดจนความสัมพันธ์ของกิจกรรมต่างๆ ดังรูปที่ 3 การพิจารณาว่ากิจกรรมใดในขั้นตอนวิธีการทำงานเป็นกิจกรรมที่ไม่จำเป็นเช่น งานประเภท เวลาไร้ประสิทธิภาพหรือเวลาส่วนเกินซึ่งใช้สัญลักษณ์กลุ่ม  $\square \nabla \Rightarrow \square$  ให้พยายาม ตัดงานกลุ่มเหล่านี้ออกไปก่อน และถ้ามีงานกลุ่ม  $\circ$  ที่ตรงแล้วเป็นงานที่ไม่จำเป็นก็ตัดออกได้ [3]

สำหรับการศึกษาเวลาผู้วิจัย ใช้วิธีการจับเวลาโดยตรงแบบต่อเนื่อง โดยแต่ละงานใช้  $n=10$  ตามหลักการระบบการผลิตแบบโตโยต้า

สัญลักษณ์	ชื่อเรียก	คำจำกัดความโดยย่อ
$\circ$	Operation	1. การเตรียมวัสดุเพื่อขึ้นงานชิ้นต่อไป 2. การประกอบชิ้นส่วนหรือการ ถอดส่วนประกอบออก
$\nabla$	Inspection	1. การตรวจสอบคุณลักษณะของ วัสดุ 2. การตรวจสอบคุณภาพหรือ ปริมาณ
$\Rightarrow$	Transportation	1. การเคลื่อนที่ของวัสดุจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง 2. พนักงานกำลังเดิน
$\square$	Delay	1. การเก็บวัสดุชั่วคราวระหว่าง การปฏิบัติงาน 2. การคอยเพื่อให้งานชิ้นต่อไป เริ่มต้น
$\square$	Storage	1. การเก็บในที่ถาวร ซึ่งต้องอาศัยคำสั่งในการเคลื่อนย้าย

รูปที่ 3 สัญลักษณ์การเขียนแผนภูมิการไหลของกระบวนการผลิต

สำหรับเทคนิคการปรับปรุงงานที่ผู้วิจัยเลือกใช้คือ ECRS ได้แก่ การกำจัด (Eliminate) การรวมกัน (Combine) การจัดใหม่ (Rearrange) การทำให้ง่าย (Simplify) ในส่วนของรูปแบบการผลิต Productivity Development Team กล่าวไว้ว่า การทำการผลิตแบบเซลล์ลูลาร์ คือวิธีการหนึ่งของการผลิตแบบดิน (Lean Manufacturing) วิธีหนึ่งที่ช่วยให้บริษัทสามารถผลิต

ได้โดยมีความสูญเปล่าเกิดขึ้นน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยอุปกรณ์ และสถานงาน จะถูกจัดเรียงไว้ตามลำดับซึ่งจะช่วยให้วัสดุและส่วนประกอบต่าง ๆ สามารถไหลผ่านตลอดทั้งกระบวนการไปได้อย่างราบรื่น โดยมีการขนส่งหรือความล่าช้าเกิดขึ้นน้อยที่สุด [4] และผู้วิจัยประยุกต์ใช้การจัดสมดุลการผลิต (Line Balancing) และการจัดลำดับก่อน หลัง ของการทำงาน (Precedence Diagram) มาช่วยในการออกแบบการผลิตแบบเซลล์ลูลาร์

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มีการศึกษาวิจัยเพื่อปรับปรุงกำลังการผลิต โดยปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตแบบเป็นวงล้อให้เป็นแบบการไหลที่ละชั้น เพื่อมุ่งเน้น การลดต้นทุน ที่เกินความจำเป็น และการกำจัดความสูญเปล่าที่เกิดขึ้นด้วยหลักการ ECRS โดยวิธีการทำงานที่ปรับปรุงแล้วถูกนำไปใช้เป็นการทำงานแบบมาตรฐาน โดยใช้การจัดสมดุลของสายการผลิตแล้วปรับปรุงแผนผังสถานที่การทำงานให้สอดคล้องกับระบบการผลิตแบบใหม่ ผลจากการปรับปรุงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตได้ทั้งในส่วนของ เวลา แรงงานและพื้นที่ [5] และมีผู้ที่ศึกษาวิเคราะห์การผลิตที่พบปัญหาความล่าช้าในการส่งมอบสินค้า เพื่อพัฒนาปรับปรุงผังกระบวนการผลิต โดยปรับปรุงผังกระบวนการผลิตจากผังกระบวนการผลิตแบบกระบวนการ (Functional layout) เป็นกระบวนการผลิตแบบกลุ่ม (Cellular layout) โดยประยุกต์จากหลักการผลิตแบบเซลล์ลูลาร์ ส่งผลให้สามารถลดขั้นตอนและเวลา ลดปัญหาความล่าช้าในการผลิต [6] นอกจากนี้ยังมีผู้ศึกษาที่ประยุกต์ใช้วิธีการจัดสมดุลสายการประกอบแบบต่าง ๆ โดยต้องการจัดเรียงองค์ประกอบของงานทั้งหมดให้เป็นไปตามข้อจำกัดด้านลำดับก่อนหลัง (Precedence Constraints) โดยแบ่งเป็นแบบปกติ 6 วิธี และแบบย้อนหลัง 6 วิธี จากนั้นนำผลลัพธ์ที่คำนวณได้จากวิธีทั้งหมดมาเปรียบเทียบเพื่อหาวิธีที่เหมาะสมกับสายการผลิต โดยหลังจากการปรับปรุงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพความสมดุลในการผลิตได้ [7]



### 3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 ศึกษาสภาพปัจจุบัน

ศึกษาสภาพปัจจุบันของผลิตภัณฑ์ AAA ได้แก่ ส่วนประกอบ สถานีการทำงาน การไหลของกระบวนการ พื้นที่ จำนวนคน และเวลา

#### 3.2 ศึกษา วิเคราะห์กิจกรรมที่ไม่เพิ่มมูลค่าและปรับปรุงกระบวนการทำงาน

ศึกษาเวลาและขั้นตอนการทำงาน โดยใช้แผนภูมิกระบวนการผลิต เพื่อวิเคราะห์และหากิจกรรมที่ไม่เพิ่มมูลค่า จากนั้นปรับปรุงกระบวนการโดยใช้เทคนิค ECRS โดยเน้นการกำจัดกิจกรรมที่ไม่เพิ่มคุณค่าเป็นหลัก เพราะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานได้สูงที่สุด

#### 3.3 กำหนดเวลาทำงานมาตรฐานของแต่ละกระบวนการประกอบ

จับเวลา และกำหนดเวลาเพื่อ เพื่อกำหนดเป็นเวลาดำเนินการของแต่ละกระบวนการใหม่ พร้อมทั้งเขียนลำดับก่อน-หลังของการประกอบผลิตภัณฑ์ AAA

#### 3.4 ออกแบบการทำงานแบบเซลล์ลู่และกำหนดเป็นเวลาดำเนินการมาตรฐานของการผลิตแบบเซลล์ลู่

นำเวลาดำเนินการที่ได้ และลำดับก่อนหลังของการประกอบผลิตภัณฑ์ มาเป็นแนวทางการจัดรูปแบบการผลิตแบบเซลล์ลู่และเข้าใกล้การผลิตแบบไหลที่ละชั้น โดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการจัดสมดุลการผลิต จากนั้นกำหนดเป็นเวลาดำเนินการมาตรฐานของการผลิตแบบเซลล์ลู่

#### 3.5 เปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุง

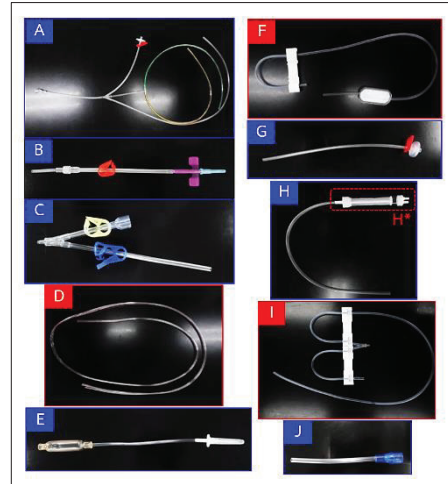
นำข้อมูลก่อนและหลังปรับปรุงมาเปรียบเทียบกัน ในส่วนของการใช้พื้นที่ จำนวนสถานีงาน เวลาที่ใช้ในการผลิต และจำนวนคน

### 4. ผลการดำเนินงานวิจัย

#### 4.1 การเก็บผลและข้อมูลก่อนการปรับปรุง

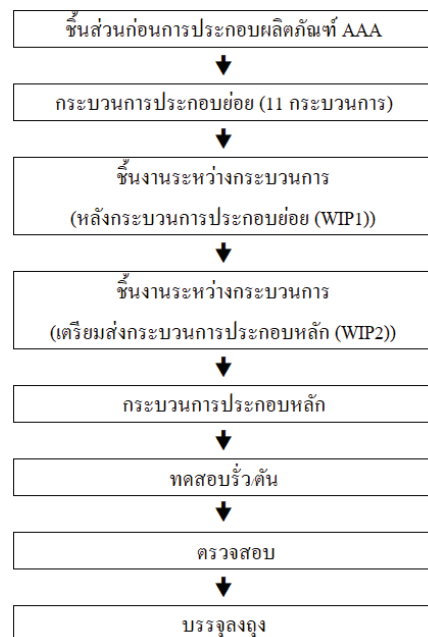
##### 4.1.1 ส่วนประกอบและสถานีงาน

ผลิตภัณฑ์ AAA ประกอบด้วย 10 ชิ้นส่วนย่อย (A-J) ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ส่วนประกอบย่อยของผลิตภัณฑ์ AAA

มีสถานีประกอบทั้งหมด 15 สถานี ประกอบด้วย สถานีงานประกอบย่อย 11 สถานี (A-J และ H\*), สถานีงานประกอบหลัก, สถานีการทดสอบร้ว/ตัน, สถานีตรวจสอบและสถานีบรรจุลงถูง โดยการไหลของกระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์ AAA แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ขั้นตอนการไหลของผลิตภัณฑ์ AAA

โดยรูปแบบการผลิตก่อนการปรับปรุง เป็นรูปแบบการผลิตเป็นแบบผลึก โดยทำการผลิตแบบเป็นงวดของสถานีงานประกอบย่อยทั้ง 11 สถานี ซึ่งสถานีงาน



ประกอบย่อย ผู้วิจัยแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบคือ สถานีงานที่ประกอบในรูปแบบปกติ สามารถนำผลิตภัณฑ์ไปใช้ต่อได้ทันที 7 สถานี ได้แก่ A, B, C, E, G, H และ J และสถานีงานที่มีการประกอบในลักษณะซับซ้อน ต้องใช้สารเคมีประเภทพิเศษในการประกอบ ต้องรอผลการทดสอบจากแผนกคุณภาพ จึงจะสามารถนำงานไปใช้ได้ 4 สถานี ได้แก่ D, F, H\* และ I

ซึ่งสถานีงานประกอบย่อยทั้ง 11 สถานี ต้องผลิตล่วงหน้า 1 วัน โดยผลิตกระบวนการละ 1,300 ชิ้น/วัน ทำให้มีปริมาณชิ้นงานระหว่างกระบวนการจำนวนมากก่อนที่จะส่งชิ้นงานทั้งหมดไปยังสถานีงานประกอบหลัก เพื่อนำชิ้นงานจากทุกสถานีงานประกอบย่อยทั้งหมดมาประกอบเข้าด้วยกัน ก่อนที่จะส่งให้กระบวนการถัดไป

#### 4.1.2 เวลา จำนวนคน และขั้นตอนการทำงาน

การผลิตของผลิตภัณฑ์ AAA 1 ชิ้น ใช้เวลาทั้งหมด 652 วินาที ซึ่งเป็นเวลาที่ถูกระบุให้ใช้ในการผลิตมาตั้งแต่แรกเริ่มที่มีการผลิต ผลิตภัณฑ์ ดังตารางที่ 1

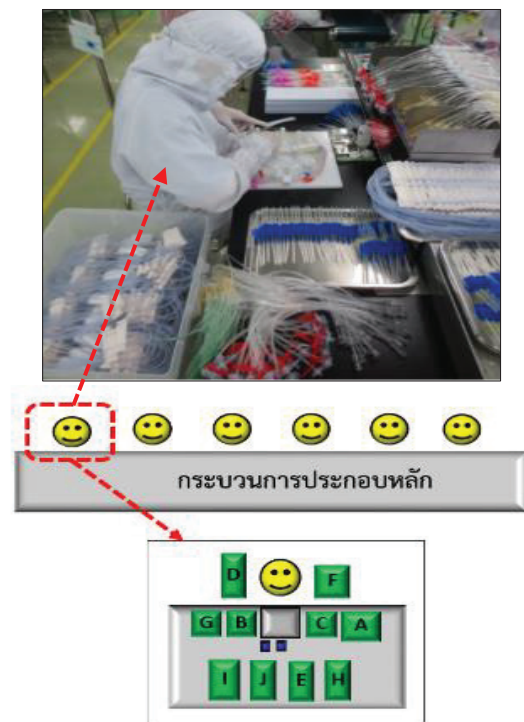
ตารางที่ 1 เวลาที่ใช้ผลิตก่อนการปรับปรุง

กระบวนการประกอบ	เวลาที่ใช้ก่อนการปรับปรุง (วินาที/ชิ้น)
A	79
B	27
C	37
D	22
E	23
F	68
G	15
H*	71
H	7
I	77
J	7
กระบวนการประกอบหลัก	117
ทดสอบร่ว/ต้น	54
ตรวจสอบ 100%	24
บรรจุลงถุง	24
เวลาที่ใช้ทั้งหมด (วินาที/ชิ้น)	652

จากปริมาณความต้องการต่อวันคือ 1,300 ชิ้น ในเวลาทำงาน 8 ชม./วัน ก่อนการปรับปรุงจะใช้พนักงานทั้งหมด 30 คน โดยในส่วนของกระบวนการประกอบย่อย 11 สถานี ใช้คนประกอบทั้งสิ้น 20 คน ส่วนของ

กระบวนการประกอบหลัก ทำหน้าที่ประกอบชิ้นส่วนย่อย A-J (10 ชิ้น) ที่ได้มาจากกระบวนการประกอบย่อยมาประกอบเข้าด้วยกันด้วยพนักงาน 1 คน พร้อมจัดให้เป็นวงและติดเทปกาวกระดาษ โดยใช้ทั้งหมด 6 คน ที่ทำงานในรูปแบบเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 6 และกระบวนการหลังกระบวนการประกอบหลัก ได้แก่ ทดสอบร่ว/ต้น ตรวจสอบ ตรวจสอบ และบรรจุลงถุงทำงานร่วมกันอีก 4 คน

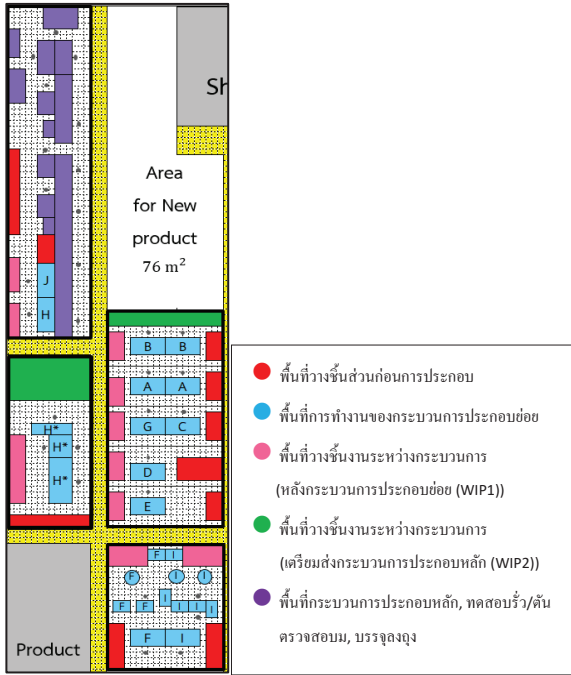
\* หมายเหตุ กระบวนการประกอบหลัก ใช้พนักงานประกอบหลัก 5 คน อีก 1 คนจะไปช่วยทำในส่วนของงานหลังกระบวนการประกอบหลักด้วย



รูปที่ 6 กระบวนการประกอบหลักก่อนการปรับปรุง

#### 4.1.3 การใช้พื้นที่

ก่อนการปรับปรุงพื้นที่การผลิตผลิตภัณฑ์ AAA จะแยกพื้นที่การทำงาน ของทุกกระบวนการประกอบย่อย ออกจากกัน และแยกกันกับกระบวนการประกอบหลัก มีพื้นที่การวางชิ้นส่วนและชิ้นงานระหว่างกระบวนการ ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 พื้นที่การผลิตผลิตภัณฑ์ AAA ก่อนปรับปรุง

จากการวัดปริมาณพื้นที่ ที่ใช้ในการผลิต พบว่า ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ทำงานของกระบวนการประกอบย่อย ถึง 50% และ พื้นที่ในการวางชิ้นส่วนก่อนการประกอบ และระหว่างกระบวนการ 24% ดังรูปที่ 8

กระบวนการ	พื้นที่การผลิต (ตารางเมตร)										รวม การใช้พื้นที่	%	
	A	B	C	D	E	F	G	H*	H	I			J
พื้นที่วางชิ้นส่วน ก่อนการประกอบ	1.4	1.4	0.7	2.9	1.4	2.2	0.7	2.5	2.7	2.2	1.4	19.2	9
พื้นที่ทำงานของกระบวนการ ประกอบย่อย	9.9	9.9	5.0	8.4	9.9	15.1	5.0	22.0	4.0	15.1	5.5	109.6	50
พื้นที่วางชิ้นส่วนระหว่างกระบวนการ (หลังกระบวนการประกอบย่อย)	1.4	1.4	0.7	1.4	1.4	2.5	0.7	3.2	1.1	2.5	1.1	17.2	8
พื้นที่วางชิ้นส่วนระหว่างกระบวนการ (เตรียมส่ง กระบวนการประกอบ)	15.5										15.5	7	
พื้นที่กระบวนการประกอบหลัก, ทดสอบรับ/คืน, ตรวจสอบ, บรรจุลง	57.4										57.4	26	
พื้นที่ทั้งหมด											218.9	100	

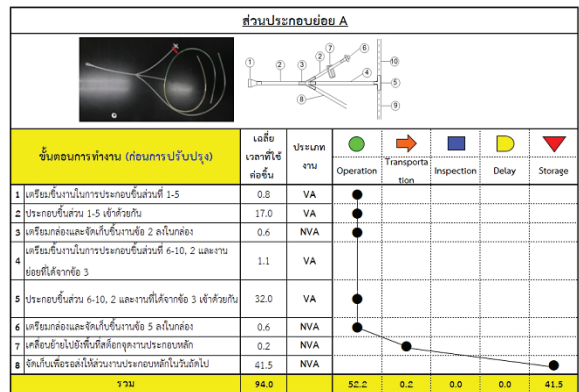
รูปที่ 8 ปริมาณการใช้พื้นที่การผลิตผลิตภัณฑ์ AAA ก่อนปรับปรุง

#### 4.2 ผลการศึกษา วิเคราะห์กิจกรรมที่ไม่เพิ่มมูลค่า และการปรับปรุงกระบวนการด้วย ECRS

จากการศึกษาและวิเคราะห์กระบวนการประกอบย่อย A, B, C, E, G, H, และ J รวม 7 กระบวนการ พบว่า มีขั้นตอนการทำงานที่ไม่เกิดมูลค่าและมีวิธีการปรับปรุงดังนี้

1. ทุกกระบวนการประกอบย่อย สูญเสียเวลาในการจัดเตรียมกล่องและจัดเก็บชิ้นงานลงกล่อง และการเคลื่อนย้ายชิ้นงานเพื่อจัดส่งให้กระบวนการประกอบหลัก เนื่องจากต้องประกอบและเก็บไว้เป็นชิ้นงานระหว่างกระบวนการ เมื่อเปลี่ยนรูปแบบการประกอบให้เป็นแบบเซลล์ลาร์สามารถกำจัดขั้นตอนเหล่านี้ออกไปได้

2. กระบวนการประกอบย่อย A มี 10 ขั้นตอนย่อย มีการแยกขั้นตอนการประกอบออกเป็น 2 จังหวะ คือการแบ่งงานประกอบชิ้นส่วน 1-5 และ 6-10 พบว่ามีขั้นตอนที่เป็นงานที่เกิดมูลค่า 4 ขั้นตอนและงานที่ไม่เกิดมูลค่า 4 ขั้นตอน ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 เวลาและขั้นตอนการทำงานของส่วนประกอบย่อย A ก่อนการปรับปรุง

ปรับปรุงกระบวนการ โดยการจัดขั้นตอนการประกอบใหม่ ให้เสร็จสิ้นเพียงขั้นตอนเดียว คือประกอบชิ้นส่วนที่ 1-10 ต่อเนื่องกันและกำจัดขั้นตอนที่ไม่เกิดมูลค่าออกไป พบว่าเหลือเพียงขั้นตอนงานที่เกิดมูลค่า 2 ขั้นตอน ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 เวลาและขั้นตอนการทำงานของส่วนประกอบย่อย A หลังการปรับปรุง

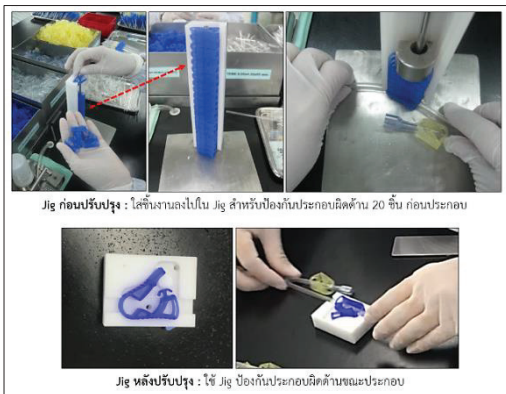
3. กระบวนการประกอบย่อย C มี 6 ขั้นตอนย่อย มีการแยกขั้นตอนการใช้จิ๊ก เพื่อป้องกันการประกอบ

ผิดพลาด มาใช้ก่อนการประกอบชิ้นงาน และมีขั้นตอนการจัดเรียงชิ้นงานก่อนส่งให้จุดถัดไป พบว่ามีขั้นตอนที่เป็นงานที่เกิดมูลค่า 2 ขั้นตอนและงานที่ไม่เกิดมูลค่า 5 ขั้นตอนดังรูปที่ 11

ส่วนประกอบย่อย C							
ขั้นตอนการทำงาน (ก่อนการปรับปรุง)	เฉลี่ยเวลาที่ใช้ต่อชิ้น (วินาที)	ประเภทงาน	●	➡	■	▼	
			Operation	Transportation	Inspection	Delay	Storage
1 เตรียมชิ้นงานในการประกอบชิ้นส่วนที่ 1-6	1.0	VA	●				
2 ใส่ชิ้นงานที่ 6 ลงใน jig สำหรับประกอบ	1.5	NVA	●				
3 ประกอบชิ้นส่วนทั้งหมดเข้าด้วยกัน	20.0	VA	●				
4 จัดเรียงและนำชิ้นงานออกจาก	2.0	NVA	●				
5 เตรียมกล่องและจัดเก็บชิ้นงานในกล่อง	3.2	NVA	●				
6 เคลื่อนย้ายไปยังพื้นที่จัดจตุรัสประกอบหลัก	0.2	NVA	●	●			
7 จัดเก็บเพื่อส่งให้ส่วนประกอบหลักในวันถัดไป	41.5	NVA	●			●	
<b>รวม</b>	<b>69.5</b>		<b>27.7</b>	<b>0.2</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>41.5</b>

รูปที่ 11 เวลาและขั้นตอนการทำงานของส่วนประกอบย่อย C ก่อนการปรับปรุง

ปรับปรุงกระบวนการ โดยออกแบบจิ๊กใหม่เพื่อให้สามารถใช้งานได้ขณะประกอบชิ้นงาน ดังรูปที่ 12 และกำจัดขั้นตอนที่ไม่เกิดมูลค่าออกไป พบว่าเหลือเพียงขั้นตอนงานที่เกิดมูลค่า 2 ขั้นตอน ดังรูปที่ 13



Jig ก่อนปรับปรุง : ใช้ชิ้นงานลงใน Jig สำหรับป้องกันประกอบผิดพลาด 20 ชิ้น ก่อนประกอบ

Jig หลังปรับปรุง : ใช้ Jig ป้องกันประกอบผิดพลาดด้านแนวประกอบ

รูปที่ 12 จิ๊กที่ใช้ก่อน/หลังปรับปรุงของส่วนประกอบย่อย C

ขั้นตอนการทำงาน (หลังการปรับปรุง)	เฉลี่ยเวลาที่ใช้ต่อชิ้น (วินาที)	ประเภทงาน	●	➡	■	▼
			Operation	Transportation	Inspection	Delay
1 เตรียมชิ้นงานในการประกอบชิ้นส่วนที่ 1-6	1.0	VA	●			
2 ประกอบชิ้นส่วนทั้งหมดเข้าด้วยกัน (ใช้ Jig ใหม่)	20.0	VA	●			
<b>รวม</b>	<b>21.0</b>		<b>21.0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

รูปที่ 13 เวลาและขั้นตอนการทำงานของส่วนประกอบย่อย C หลังการปรับปรุง

4. กระบวนการประกอบย่อย E มี 3 ชั้นส่วนย่อย มีการทำกิจกรรมที่นอกเหนือความรับผิดชอบของฝ่ายผลิต นั่นคือขั้นตอนการกำจัดฝุ่นผงออกจากตัวชิ้นงาน ซึ่งเป็นความรับผิดชอบของผู้ขายชิ้นส่วน และพบว่ามีขั้นตอนที่เป็นงานที่เกิดมูลค่า 2 ขั้นตอนและงานที่ไม่เกิดมูลค่า 4 ขั้นตอน ดังรูปที่ 14

ส่วนประกอบย่อย E							
ขั้นตอนการทำงาน (ก่อนการปรับปรุง)	เฉลี่ยเวลาที่ใช้ต่อชิ้น (วินาที)	ประเภทงาน	●	➡	■	▼	
			Operation	Transportation	Inspection	Delay	Storage
1 กำจัดฝุ่นผงออกจากชิ้นส่วนที่ 1 ด้วยวิธีการดูดออก	3.0	NVA	●				
2 เตรียมชิ้นงานในการประกอบชิ้นส่วนที่ 1-3	0.5	VA	●				
3 ประกอบชิ้นส่วนทั้งหมดเข้าด้วยกัน	15.0	VA	●				
4 เตรียมกล่องและจัดเก็บชิ้นงานในกล่อง	3.2	NVA	●				
5 เคลื่อนย้ายไปยังพื้นที่จัดจตุรัสประกอบหลัก	0.2	NVA	●	●			
6 จัดเก็บเพื่อส่งให้ส่วนประกอบหลักในวันถัดไป	41.5	NVA	●			●	
<b>รวม</b>	<b>63.5</b>		<b>21.7</b>	<b>0.2</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>41.5</b>

รูปที่ 14 เวลาและขั้นตอนการทำงานของส่วนประกอบย่อย E ก่อนการปรับปรุง

ปรับปรุงกระบวนการ โดยยกเลิกขั้นตอนการกำจัดฝุ่นผงออกจากตัวชิ้นงาน และกำจัดขั้นตอนที่ไม่เกิดมูลค่าออกไป พบว่าเหลือเพียงขั้นตอนงานที่เกิดมูลค่า 2 ขั้นตอน ดังรูปที่ 15

ขั้นตอนการทำงาน (หลังการปรับปรุง)	เฉลี่ยเวลาที่ใช้ต่อชิ้น (วินาที)	ประเภทงาน	●	➡	■	▼
			Operation	Transportation	Inspection	Delay
1 เตรียมชิ้นงานในการประกอบชิ้นส่วนที่ 1-3	0.5	VA	●			
2 ประกอบชิ้นส่วนทั้งหมดเข้าด้วยกัน	15.0	VA	●			
<b>รวม</b>	<b>15.5</b>		<b>15.5</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

รูปที่ 15 เวลาและขั้นตอนการทำงานของส่วนประกอบย่อย E หลังการปรับปรุง

สำหรับส่วนงานประกอบหลัก ไม่พบขั้นตอนงานที่ไม่เกิดมูลค่า จึงยังไม่มีกรปรับปรุงใดๆ เป็นเพียงศึกษาเวลาและขั้นตอนการทำงาน เพื่อใช้อ้างอิงในการกำหนดเป็นเวลามาตรฐานของการทำงานเท่านั้น

### 4.3 ผลของเวลาทำงานมาตรฐานของแต่ละกระบวนการและลำดับก่อน-หลังของการประกอบผลิตภัณฑ์ AAA

#### 4.3.1 ผลของเวลาทำงานมาตรฐาน

เมื่อทำการปรับปรุงแล้ว ให้นำเวลาหลังการปรับปรุง นั่นคือเวลามาตรฐานที่ได้มาจาก เวลาของกิจกรรมที่เกิดมูลค่าของแต่ละกระบวนการประกอบรวมกับเวลาเพื่อ

ที่ 4% ของกระบวนการประกอบทั้งหมด 8 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการประกอบย่อย A, B, C, E, G, H, J และ กระบวนการประกอบหลัก มาเปรียบเทียบกับเวลา ก่อนการปรับปรุง (เวลาที่ถูกกำหนดให้ใช้) ดังตารางที่ 2

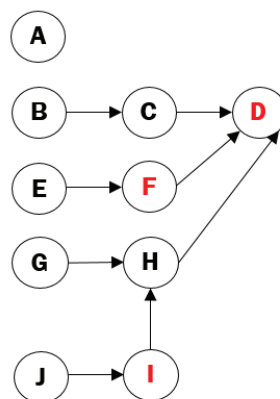
ตารางที่ 2 เวลาที่ใช้ก่อนและหลังการปรับปรุง

กระบวนการประกอบ	เวลาก่อนการปรับปรุง	เวลา(วินาที)		
		เวลาที่ใช้หลังการปรับปรุง (วินาที)		
		เวลากิจกรรมที่คิดมูลค่า	เวลาต่อ 4%	เวลามาตรฐานหลังปรับปรุง
A	79	52.8	2.1	55
B	27	16.6	0.7	17
C	37	21.0	0.8	22
D	22	22.0	0	22
E	23	15.5	0.6	16
F	68	68.0	0.0	68
G	9	7.5	0.3	8
H*	71	71.0	0	71
H	13	9.5	0.4	10
I	77	77.0	0	77
J	7	5.3	0.2	6
กระบวนการประกอบหลัก	117	97	3.9	101
ทดสอบรื้อต้น	54	54	0	54
ตรวจสอบ 100%	24	24	0	24
บรรจุลงถุง	24	24	0	24
เวลาที่ทั้งหมด (วินาที/ชิ้น)	652	565	9.0	574

จะเห็นได้ว่ารอบเวลาการผลิตรวม (Cycle time) ก่อนการปรับปรุงอยู่ที่ 652 วินาที/ชิ้น และหลังการปรับปรุงหรือเวลามาตรฐาน อยู่ที่ 574 วินาที

**4.3.2 ผลของการศึกษาความสัมพันธ์การจัดลำดับก่อน-หลัง ของการประกอบผลิตภัณฑ์ก่อนการปรับปรุง**

จากการศึกษาขั้นตอนการประกอบของส่วนงานประกอบหลัก ซึ่งเป็นส่วนงานที่ประกอบขึ้นส่วนย่อยทั้งหมด 10 ชิ้น (A-J) เข้าด้วยกัน โดยประยุกต์ใช้การเขียนความสัมพันธ์ลำดับก่อน-หลัง ของการทำงาน สามารถเขียนได้ดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ลำดับก่อน-หลัง

ของการประกอบผลิตภัณฑ์ AAA ก่อนการปรับปรุง

**4.4 ผลของการออกแบบการทำงาน และเวลามาตรฐาน ในการผลิตแบบเซลล์ลาร์**

**4.4.1 ผลของการออกแบบการทำงานแบบเซลล์ลาร์**

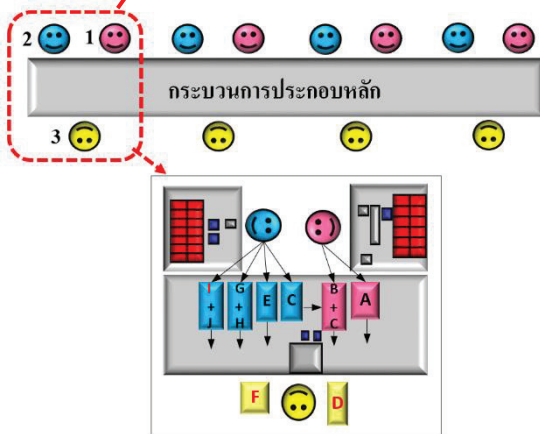
เมื่อได้เวลามาตรฐานและความสัมพันธ์ลำดับก่อนหลังของการประกอบงานเข้าด้วยกันแล้ว ผู้วิจัยจึงใช้ข้อมูลทั้งสองส่วนนี้พร้อมกับประยุกต์ใช้ การจัดสมดุลการผลิตมาเป็นแนวทางในการการออกแบบการทำงานแบบเซลล์ลาร์ ที่เข้าใกล้การผลิตแบบไหลทีละชิ้น โดยย้ายกระบวนการประกอบย่อย เข้าไปรวมกับงานของกระบวนการประกอบหลัก

แต่จากการศึกษาพบว่าในส่วนงานกระบวนการประกอบย่อยที่มีความซับซ้อน และต้องใช้สารเคมีประเภทพิเศษในการต่อเชื่อม ได้แก่กระบวนการ D, F, H\* และ I ไม่สามารถนำมารวมได้ จึงมีการผลิตในรูปแบบเดิมคือทำแบบเป็นงวด แล้วส่งมาที่กระบวนการประกอบหลัก เช่นเดิม ดังนั้นจึงทำการจัดสมดุลการประกอบของกระบวนการประกอบย่อยที่เหลือ 7 กระบวนการ ได้แก่ A, B, C, E, G, H และ J เข้ากับกระบวนการประกอบหลัก

ผู้วิจัยสามารถจัดงานในรูปแบบของการประกอบแบบเซลล์ลาร์ในแบบ 2 คน และ 3 คน ต่อ 1 เซลล์การประกอบ แต่เมื่อลองจัดแบบ 2 คนแล้ว พบปัญหาคือมีชิ้นส่วนจำนวนมากวางอยู่หน้าพนักงาน และใช้พื้นที่

ในการวางชิ้นส่วนเกินระยะการหยิบชิ้นงานมาประกอบได้สะดวก

ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกแบบที่ใช้ 3 คน ต่อ 1 เซลล์การประกอบ โดยลักษณะการทำงานที่ออกแบบ จะให้นั่งในลักษณะรูปสามเหลี่ยม เป็นการแบ่งงานในรูปแบบที่ 3 คนทำงานพร้อมๆกัน โดย คนที่ 1 และ 2 ทำหน้าที่ประกอบชิ้นส่วนพร้อมๆกัน ตามชิ้นส่วนย่อยและงานประกอบที่ได้รับมอบหมาย จากนั้นทำการส่งชิ้นส่วนให้กับคนที่ 3 เป็นคนประกอบชิ้นงานทั้งหมดเข้าด้วยกัน พร้อมจัดให้เป็นวงและติดเทปกาวกระดาษ เพื่อให้ออกเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป โดยจัดให้มีทั้งหมด 4 เซลล์การประกอบ ที่ทำงานในรูปแบบเดียวกัน รวมทั้งสิ้น 12 คน โดยนั่งทำงานลักษณะตามรูปที่ 17



รูปที่ 17 การประกอบแบบ เซลล์คู่ 3 คนต่อ 1 เซลล์

โดยแบ่งงานให้แต่ละคนได้ดังนี้

**คนที่ 1** มีชิ้นส่วนสำหรับประกอบทั้งสิ้น 14 ชิ้น

1. ประกอบกระบวนการย่อย A (10 ชิ้นส่วน)
2. ประกอบชิ้นส่วน B (3 ชิ้นส่วน) และนำ B มาต่อกับ C (ชิ้นส่วน C นับเป็น 1 ชิ้น เพราะได้มาจากคนที่ 2) รวมทั้งหมด 4 ชิ้นจะได้เป็น BC
3. ส่งชิ้นงาน A และ BC รวม 2 ชิ้น ให้กับคนที่ 3

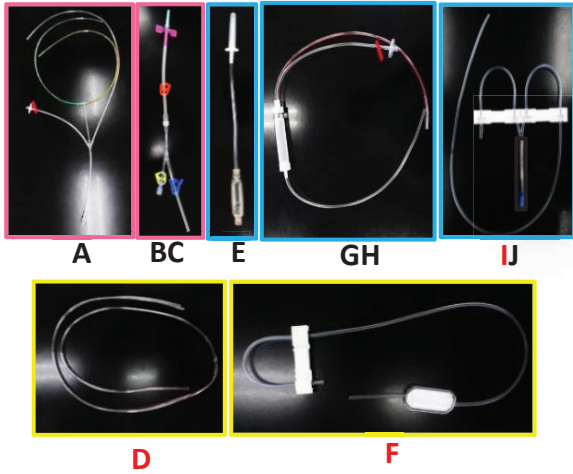
**คนที่ 2** มีชิ้นส่วนสำหรับประกอบทั้งสิ้น 18 ชิ้น

1. ประกอบชิ้นส่วน C (6 ชิ้นส่วน) จากนั้นวางชิ้นงานเพื่อให้คนที่ 1 ใช้สำหรับประกอบเข้ากับ B
2. ประกอบชิ้นส่วน E (3 ชิ้นส่วน)
3. ประกอบชิ้นส่วน G (3 ชิ้นส่วน), ประกอบชิ้นส่วน H (3 ชิ้นส่วน โดยส่วนประกอบของ H จะมี H\* ได้มาจากกระบวนการประกอบย่อยที่ซับซ้อน) จากนั้น นำ G ต่อเข้ากับ H จะได้เป็น GH (รวมกัน 6 ชิ้นส่วน)
4. ประกอบชิ้นส่วน J (2 ชิ้นส่วน) และประกอบเข้ากับ I (I ได้มาจากกลุ่มงานประกอบย่อยที่ซับซ้อนจะถูกนับเป็น 1 ชิ้น) จะได้เป็น IJ (รวมกัน 3 ชิ้น)
5. ส่งชิ้นงาน E, GH และ IJ รวม 3 ชิ้นให้คนที่ 3

**คนที่ 3** มีชิ้นส่วนสำหรับประกอบทั้งสิ้น 7 ชิ้น

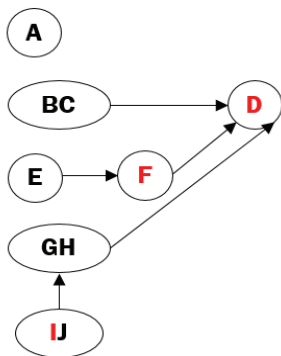
ทำการประกอบชิ้นส่วนที่ได้จากคนที่ 1 (A, BC) และ คนที่ 2 (E, GH, IJ) รวมทั้งหมด 5 ชิ้น ประกอบเข้ากับชิ้นส่วน D และ F (D และ F ได้มาจากกระบวนการประกอบย่อยที่ซับซ้อน) รวมทั้งหมด 7 ชิ้น ดังรูปที่ 18 พร้อมจัดให้เป็นวงและติดเทปกาวกระดาษ





รูปที่ 18 ชิ้นส่วน 7 ชิ้น สำหรับคนที่ 3 ในการประกอบแบบเซลล์คู่

สามารถเขียนความสัมพันธ์ ลำดับก่อน-หลังของการประกอบแบบเซลล์ของคนี่ 3 ซึ่งประกอบชิ้นส่วนย่อยทั้งหมด 7 ชิ้น (A, BC, D, E, F, GH และ IJ) ดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ลำดับก่อน-หลังของการประกอบผลิตภัณฑ์ AAA หลังการปรับปรุง

#### 4.4.2 ผลของเวลามาตรฐานในการผลิตแบบเซลล์คู่

จากการแบ่งงานในรูปแบบ 3 คน ต่อ 1 เซลล์การประกอบ โดยศึกษาจากเวลามาตรฐาน และ ความสัมพันธ์ ลำดับก่อน-หลังของการประกอบงานเข้าด้วยกัน และ ประยุกต์การจัดสมดุลการผลิต สามารถแสดงเวลาที่ใช้ในการประกอบดังรูปที่ 20 โดยกำหนดเป็นเวลามาตรฐาน

ในการประกอบเซลล์คู่แบบ 3 คนต่อ 1 เซลล์การประกอบอยู่ที่ 78 วินาที



รูปที่ 20 เวลาที่ใช้ในการประกอบของแต่ละคนในระบบ 3 คน ต่อ 1 เซลล์การประกอบ

จากเวลาที่ใช้ คิดเป็นประสิทธิภาพการผลิตในส่วน ของเซลล์การประกอบ 98% ซึ่งได้จากสูตร

$$\begin{aligned}
 \text{ประสิทธิภาพ} &= \frac{\text{ผลรวมของเวลางานย่อยทั้งหมด}}{\text{รอบเวลาสูงสุด X สถานีงาน (คน)}} \times 100 \\
 &= \frac{(77 + 75 + 78)}{78 \times 3} \times 100 \\
 &= 98\%
 \end{aligned}$$

สำหรับกระบวนการประกอบย่อยที่ซับซ้อนและใช้สารเคมีประเภทพิเศษในการประกอบ (D, E, H\* และ I) จะมีการย้ายพื้นที่การประกอบและจัดพื้นที่ใหม่ให้เหมาะสมกับการใช้งาน แต่ยังไม่มีการเปลี่ยนวิธีการทำงาน และกระบวนการหลังการประกอบหลัก ซึ่งได้แก่ ทดสอบ รั่ว/ตัน ตรวจสอบและบรรจุลงถุงซึ่งใช้พื้นที่อยู่กับพื้นที่การประกอบหลัก ยังไม่มีการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงใดๆ ยังคงใช้กำลังคนตามภาระงานที่ได้รับด้วยอัตราการผลิตเท่าเดิม

#### 4.5 เปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุง

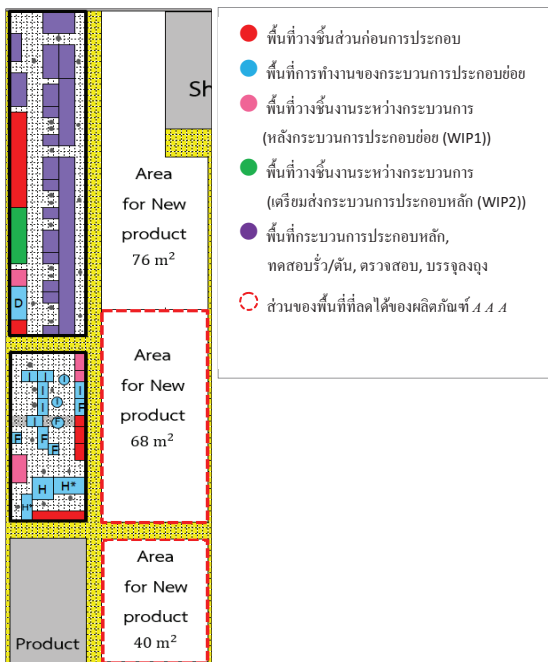
จากการปรับปรุงรูปแบบวิธีการทำงาน จากเดิมที่ผลิตแบบเป็นงวดของกระบวนการประกอบย่อย เก็บเป็นชิ้นงานระหว่างกระบวนการเป็นจำนวนมาก และส่งไปให้กระบวนการประกอบหลักประกอบรวมกันเป็นผลิตภัณฑ์ เปลี่ยนเป็นย้ายกระบวนการประกอบย่อย ทั้งหมด 7 กระบวนการ ได้แก่ A, B, C, E, G, H, และ J เข้าไปทำงานรวมกันกับงานประกอบหลักในรูปแบบเซลล์คู่



ที่เข้าใกล้การไหลแบบที่ละเอียดขึ้น และปรับพื้นที่การทำงานเล็กน้อย สามารถเพิ่มประสิทธิภาพ การผลิตในทุกๆด้าน ทั้งพื้นที่ เวลา และแรงงาน ดังนี้

### 4.5.1 การใช้พื้นที่

สามารถลดพื้นที่จาก 219 ตารางเมตร เหลือ 111 ตารางเมตร เท่ากับลดพื้นที่ได้ทั้งหมด 108 ตารางเมตร หรือ 49.3% โดยพื้นที่ที่ลดไปได้ส่วนใหญ่ ได้มาจากพื้นที่ของการกระบวนการประกอบย่อย ลดจาก 109.6 เหลือ 34.9 ตารางเมตร เท่ากับ ลดลง 74.7 ตารางเมตรหรือ 34.1% และรองลงมาพื้นที่การวางชิ้นงาน ระหว่างกระบวนการ ลดจาก 32.7 เหลือ 5.8 ตารางเมตร เท่ากับ ลดลง 26.9 ตารางเมตรหรือ 12.3% และพื้นที่อื่น ๆ ที่ได้จากการปรับพื้นที่ใหม่ อีก 6.4 ตารางเมตร หรือ 2.9% แสดงพื้นที่การผลิตหลังการปรับปรุง ดังรูปที่ 21 และปริมาณการใช้พื้นที่ ดังรูปที่ 22 จะเห็นได้ว่าไม่มีการใช้พื้นที่ในการประกอบ และจัดเก็บชิ้นงาน ระหว่างกระบวนการของ 7 กระบวนการประกอบย่อย (A, B, C, E, G, H และ J) เนื่องจากย้ายงานขึ้นไปประกอบในแบบเซลล์คู่ที่กระบวนการประกอบหลัก



รูปที่ 21 พื้นที่การผลิต ผลผลิตขั้นต้น AAA หลังปรับปรุง

กระบวนการ	พื้นที่การผลิต (ตารางเมตร)										รวมการใช้พื้นที่	% การใช้พื้นที่	
	A	B	C	D	E	F	G	H*	H	I			J
พื้นที่วางชิ้นส่วนก่อนการประกอบ				4.6				0.8	0.7	1.8	0.7	8.6	8
พื้นที่ทำงานของกระบวนการประกอบย่อย	-	-	-	-	-	-	-	2.7	7.4	11.8	13.0	34.9	31
พื้นที่วางชิ้นงานระหว่างกระบวนการ (หลังกระบวนการประกอบย่อย)	-	-	-	-	-	-	-	0.8	0.5	1.4	0.5	3.1	3
พื้นที่วางชิ้นงานระหว่างกระบวนการ (เตรียมส่งกระบวนการประกอบหลัก)	-	-	-	-	-	-	-				2.7	2.7	2
พื้นที่กระบวนการประกอบหลัก, ทดสอบร้ว/คัน, ตรวจสอบ, บรรจุลง								61.5				61.5	56
พื้นที่ทั้งหมด											110.8	100	

รูปที่ 22 ปริมาณการใช้พื้นที่การผลิต ผลผลิตขั้นต้น AAA หลังปรับปรุง

เมื่อนำมาคำนวณตัวเลขที่บ่งบอกถึงความคุ้มค่าในการใช้พื้นที่จากสูตร

$$\text{ความคุ้มค่าในการใช้พื้นที่} = \frac{\text{ยอดขายของผลิตภัณฑ์รุ่นนั้น}}{\text{พื้นที่ที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์รุ่นนั้น}}$$

ปัจจุบัน ยอดขายเฉลี่ยต่อเดือนอยู่ที่ 1,300 ชิ้น/วัน x 24 วัน x 285 บาท/ชิ้น = 7,737,600 บาท/เดือน

ดังนั้นก่อนปรับปรุงราคาพื้นที่เท่ากับ

$$7,737,600 / 219 = 35,332 \text{ บาท/ตารางเมตร}$$

หลังปรับปรุงราคาพื้นที่เท่ากับ

$$7,737,600 / 111 = 69,708 \text{ บาท/ตารางเมตร}$$

### 4.5.2 สถานีงาน

เมื่อทำการรวมสถานีงานย่อยของกระบวนการของกระบวนการประกอบย่อย 7 กระบวนการ เข้ากับงานของกระบวนการประกอบหลักรูปแบบเซลล์คู่ ทำให้จำนวนสถานีงานทั้งหมดลดลงจาก 15 สถานีเหลือ 10 สถานี ประกอบด้วย

1. สถานีของกระบวนการประกอบย่อย 4 สถานี ได้แก่ D, F, H\*, I เป็นสถานีงานที่มีการประกอบในลักษณะซับซ้อน ต้องใช้สารเคมีประเภทพิเศษในการประกอบ และบางกระบวนการต้องรอผลการทดสอบจากแผนกคุณภาพ จึงจะสามารถนำงานไปใช้ได้ 4 สถานี ได้แก่ D, F, H\* และ I

2. สถานีประกอบหลัก (แบบเซลล์คู่ 3 คน) นับเป็น 3 สถานี

3. สถานีทดสอบร้ว/คัน, สถานีตรวจสอบและบรรจุลงถูง รวม 3 สถานี

### 4.5.3 รอบเวลาการผลิต

ก่อนการปรับปรุง รอบเวลาการประกอบที่กลุ่มงาน ประกอบหลักใช้เพื่อให้ได้ชิ้นงานออกมา 1 ชิ้น อยู่ที่ 117 วินาทีหรือ 30.8 ชิ้น/คน/ชั่วโมง หลังปรับปรุงกระบวนการ สามารถลดรอบเวลาการประกอบที่ใช้ประกอบชิ้นงาน หลัก 1 ชิ้น อยู่ที่ 78 วินาที หรือ 46.2 ชิ้น/คน/ชั่วโมง หรือเพิ่มขึ้น 16 ชิ้น/คน/ชม. คิดเป็นประสิทธิภาพการผลิต ของงานประกอบหลักที่เพิ่มขึ้น 33%

สำหรับรอบเวลาการผลิตรวมชิ้นงาน 1 ชิ้นก่อนการ ปรับปรุงอยู่ที่ 652 วินาที/ชิ้น (15 สถานี) หลังปรับปรุง รอบเวลาการผลิตรวมลดลงเหลือ 574 วินาที/ชิ้น (10 สถานี) ดังตารางที่ 3 หรือประสิทธิภาพการผลิต เพิ่มขึ้นจาก 5.52 ชิ้น/คน/ชม. เป็น 6.27 ชิ้น/คน/ชม. หรือ เพิ่มขึ้น 12 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 3 เวลาที่ใช้หลังการปรับปรุงเมื่อผลิตแบบ เซลลูลาร์

กระบวนการประกอบ		เวลาที่ใช้ (วินาที)
กระบวนการ ประกอบย่อย	D	22
	F	68
	H*	71
	I	77
กระบวนการ ประกอบหลัก (เซลล์ลาร์ 3 คน)	คนที่ 1	78
	คนที่ 2	78
	คนที่ 3	78
ทดสอบรื้อ/ต้น		54
ตรวจสอบ 100%		24
บรรจุลงถาด		24
เวลาที่ใช้ทั้งหมด (วินาที/ชิ้น)		574

### 4.5.4 จำนวนคน

จากขอดการผลิตที่ต้องการต่อวัน 1,300 ชิ้น เวลา ทำงาน 8 ชั่วโมง ก่อนการปรับปรุง ใช้คนอยู่ที่ 30 คน ประกอบด้วย กระบวนการประกอบย่อย 20 คน, กระบวนการหลัก 6 คน, กระบวนการ ทดสอบรื้อ/ต้น ตรวจสอบ และบรรจุลงถาด อีก 4 คน

หลังปรับปรุงลดเหลือ 27 คน ประกอบด้วย กระบวนการประกอบย่อย 11 คน, กระบวนการหลัก 12 คน, กระบวนการ ทดสอบรื้อ/ต้น ตรวจสอบ และบรรจุลง ถาด อีก 4 คน

ดังนั้นสามารถลดคนงานได้ 3 คน ทำให้ต้นทุนด้าน แรงงานของสายการผลิตลดลงจากสูตร

ต้นทุนค่าแรง = จำนวนพนักงาน x ค่าแรงพนักงานเฉลี่ย

ดังนั้นต้นทุนค่าแรง ก่อนการปรับปรุงเท่ากับ

30 คน x 22,500 บาท/เดือน = 675,000 บาท/เดือน

หลังการปรับปรุงต้นทุนค่าแรงเท่ากับ

27 คน x 22,500 บาท/เดือน = 607,500 บาท/เดือน

สามารถลดต้นทุนของพนักงานฝ่ายผลิตซึ่งเป็น ค่าแรงทางตรงได้ 67,500 บาท/เดือน หรือ 810,000 บาท/ปี

\* หมายเหตุ งานทดสอบรื้อ/ต้น, ตรวจสอบ, บรรจุ ลงถาด ทั้งก่อนและหลังการปรับปรุง จะมีการใช้คนร่วมกับ กระบวนการประกอบหลัก 1 คน

## 5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการดำเนินงานวิจัย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการ ผลิตของผลิตภัณฑ์ AAA ภายใต้เงื่อนไขพื้นที่ที่ลดลง ผู้วิจัยทำการปรับปรุงกระบวนการประกอบ โดยเริ่มจาก วิเคราะห์สภาพปัจจุบัน โดยใช้แผนภูมิการไหลของ กระบวนการ เพื่อวิเคราะห์หากิจกรรมที่ไม่เพิ่มมูลค่า และ ปรับปรุงกระบวนการ โดยใช้เทคนิค ECRS เพื่อ กำหนดเวลามาตรฐานของแต่ละกระบวนการ พร้อมทั้ง เขียนลำดับก่อนหลังของการทำงาน เพื่อช่วยในการ ออกแบบรูปแบบการผลิตแบบใหม่ ให้เป็นการผลิตแบบ เซลลูลาร์ โดยการประยุกต์ใช้การจัดสมดุลการผลิต และ กำหนดเป็นเวลามาตรฐานของการผลิตแบบเซลล์ลาร์

รูปแบบการผลิตของผลิตภัณฑ์ AAA ถูกเปลี่ยน รูปแบบจากแบบผลึกมาเป็นในรูปแบบสิ่ง โดยเปลี่ยนจาก การผลิตแบบวงด ของกระบวนการประกอบย่อย จากนั้น ส่งให้กับกระบวนการประกอบหลัก เปลี่ยนไปเป็น

ในรูปแบบการผลิตที่เข้าใกล้การผลิตแบบไหลทีละชิ้น โดยการย้ายงานของกระบวนการประกอบย่อยเข้าไปทำงานร่วมกับงานประกอบหลักในรูปแบบการผลิตแบบเซลล์ลู่าร์ โดยทำการจัดการะงานของแต่ละกระบวนการใหม่เพื่อให้เกิดความสมดุลของการประกอบ

ซึ่งผลจากการดำเนินงานปรับปรุงกระบวนการสามารถบรรลุได้ตามเป้าหมายหลักของโรงงาน คือ ต้องการพื้นที่เพื่อใช้เป็นสายการผลิตของผลิตภัณฑ์ใหม่อย่างน้อยอีก 78 ตารางเมตร แต่จากการปรับปรุง สามารถลดพื้นที่ได้ถึง 108 ตารางเมตร ซึ่งมากกว่าที่ต้องการถึง 30 ตารางเมตร อีกทั้งยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพสายการผลิตของผลิตภัณฑ์ AAA ได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สรุปผลจากการดำเนินงานวิจัย

หัวข้อ	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	ผล	ผล(%)
พื้นที่การประกอบของผลิตภัณฑ์ AAA (ตร.ม.)	209	111	ลดลง 108	ลดลง 49%
จำนวนสถานีงาน	15	10	ลดลง 5	ลดลง 67%
รอบเวลาผลิตงานประกอบหลัก (วินาที/ชิ้น)	117	78	ลดลง 39	ลดลง 33%
ประสิทธิภาพการผลิตงานประกอบหลัก (ชิ้น/คน/ชม.)	30.8	46.2	15.4	เพิ่มขึ้น 33%
รอบเวลาผลิตรวม (วินาที/ชิ้น)	652	574	ลดลง 78	ลดลง 12%
ประสิทธิภาพการผลิตรวม (ชิ้น/คน/ชม.)	5.52	6.27	เพิ่มขึ้น 0.75	เพิ่มขึ้น 12%
จำนวนคนที่ใช้ในสายการผลิต (คน)	30	27	ลดลง 3	ลดลง 10%

นอกจากนี้ยังสามารถลดการเคลื่อนไหวจากการเตรียมกล่อง จัดเก็บชิ้นงานลงกล่องและการเคลื่อนย้ายชิ้นงานระหว่างกลุ่มงานประกอบย่อยและงานประกอบหลัก ซึ่งทำให้ลดการบาดเจ็บจากการยกและย้ายชิ้นงาน และเมื่อเปลี่ยนรูปแบบการประกอบทำให้พนักงานมีทักษะเพิ่มมากขึ้น สามารถทำงานได้หลากหลาย ซึ่งส่งผลดีกับตัวพนักงาน และโรงงานเองจะมีความสามารถในการผลิตที่สูงขึ้น สำหรับพนักงานที่เหลือ 3 คน จะส่งให้ไปเรียนรู้กระบวนการทำงานและทำงานในกลุ่มของผลิตภัณฑ์ใหม่

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

การปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตยังสามารถดำเนินการศึกษาในกระบวนการทำงานย่อยที่เป็นงานซับซ้อนและใช้สารเคมีประเภทพิเศษ และกระบวนการที่ทำหลังจากกระบวนการประกอบหลัก ได้แก่ ทดสอบรื้อ/ต้นตรวจสอบ และบรรจุลงถาด ด้วยการศึกษาวิธีการทำงานและทำการปรับปรุงประสิทธิภาพ เพื่อให้ทั้งสายการผลิตมีความสมดุลและเข้าใกล้การผลิตแบบทีละชิ้นได้ทั้งกระบวนการ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] วันชัย ริจิวนิช. การศึกษาการทำงาน หลักการและกรณีศึกษา. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, 2555.
- [2] ประดิษฐ์ วงศ์ฉัตรรุ่ง, สมเจตน์ เพิ่มพูนชัยญะ, พรเทพ เหลือทรัพย์สุข, นพดล อิมเอม. 1-2-3 ก้าวสู่ Lean in action. สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพมหานคร, 2552.
- [3] กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. หลักการควบคุมคุณภาพ. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี ไทย-ญี่ปุ่น, กรุงเทพฯ, 2550.
- [4] Productivity Development Team. Cellular Manufacturing. One-Piece Flow for Workteams. Bangkok: E.I.Square Publishing, 2006.

- [5] สุจินดา ศรีชัยประชา. การปรับปรุงกำลังการผลิตของสายการผลิตชิ้นส่วนเบาะที่นั่งรถยนต์ด้วยแนวคิดระบบการผลิตแบบโตโยต้า. วิทยานิพนธ์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
- [6] น้ำพลอย พรพิบูลย์. การประยุกต์ใช้หลักการการผลิตแบบเซลล์ลู่ดาร์ในบริษัทผลิตเฟอร์นิเจอร์. วิทยานิพนธ์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, ศูนย์ระดับภูมิภาคทางวิศวกรรมระบบการผลิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556.
- [7] ธัญญา ฉมารัตน์. การประยุกต์ใช้วิธีการจัดสมดุลสายการผลิตสำหรับการผลิตช่องแอร์รถยนต์. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, 2561.

# การทดสอบเชื้อเพลิงนาโนอิมัลชัน ดีเซล-ไบโอดีเซล-น้ำ ในเครื่องยนต์ดีเซลแบบฉีดตรง

## Testing of Nano-Emulsified Fuel in Direct- Injection Diesel Engine

เขมรรฐ รอดเนียม กฤษ สมนึก\* และ กำพล ประทีปชัยกุล

**Kammarat Rodniam, Krit Somnuk\* and Gumpon Prateepchaikul**

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ถนนกาญจนาภิเษก ตำบลคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University,  
Karnjanavanit Road, Kho Hong, Hat Yai, Songkhla, 90110, Thailand

\*E-mail: krit.s@psu.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการใช้เชื้อเพลิงอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันคือ ดีเซล-ไบโอดีเซล-น้ำ ในเครื่องยนต์สูบลูกเดียว ระบบหัวฉีดโดยตรง (direct injection, DI) เพื่อหาค่าการปลดปล่อยค่าก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์คือ ออกซิเจน ( $O_2$ ), คาร์บอนมอนอกไซด์ ( $CO$ ), คาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ), ไฮโดรคาร์บอน ( $HC$ ), ไนโตรเจนออกไซด์ ( $NO_x$ ) อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรกจำเพาะ โดยใช้เงื่อนไขของเชื้อเพลิงอิมัลชัน ดีเซล-ไบโอดีเซล-น้ำ ที่อัตราส่วนผสมของดีเซลเท่ากับ 42 vol.% ไบโอดีเซลเท่ากับ 50 vol.% น้ำเท่ากับ 2 vol.% และ สารลดแรงตึงผิว Span80/Tween80 เท่ากับ 6 vol.% (สูตร D42B50W2S3T3) เชื้อเพลิงอิมัลชันถูกผลิตด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิคที่ถี่ความถี่เท่ากับ 18 kHz กำลังคลื่นเสียงเท่ากับ 1,000 W เวลาการผสมเท่ากับ 60 sec และนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของดีเซลและไบโอดีเซล ที่ภาระโหลดเท่ากับ 0% 25% 50% และ 75% และความเร็วรอบของเครื่องยนต์เท่ากับ 2,300 rpm พบว่าเชื้อเพลิงอิมัลชันให้ค่าการปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ( $NO_x$ ) เท่ากับ 708.7 ppm ลดลงเท่ากับ 19.0% และ 3.7% ตามลำดับ และให้ค่าการปลดปล่อยก๊าซไฮโดรคาร์บอน ( $HC$ ) เท่ากับ 105.3 ppm ลดลงเท่ากับ 4.7% และ 7.4% ตามลำดับ เปรียบเทียบกับดีเซลและไบโอดีเซล ที่ภาระโหลดเท่ากับ 75% แต่ส่งผลให้มีค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $CO$ ) เท่ากับ 545.8 ppm เพิ่มขึ้นเท่ากับ 26.1% และ 16.6% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับดีเซลและไบโอดีเซล ด้านสมรรถนะของเครื่องยนต์พบว่า ที่ภาระโหลดเท่ากับ 75% ค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเชื้อเพลิงอิมัลชันมีค่าเท่ากับ 1.56 kg/hr ต่ำกว่าไบโอดีเซลและสูงกว่าดีเซลเท่ากับ 4.07% และ 1.34% ตามลำดับ และเชื้อเพลิงอิมัลชันมีค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรกจำเพาะ (brake specific fuel consumption, BSFC) เท่ากับ 0.26 kg/kW.hr ต่ำกว่าไบโอดีเซลและสูงกว่าดีเซลเท่ากับ 4.07% และ 1.32% ตามลำดับ ดังนั้นผลกระทบของเชื้อเพลิงอิมัลชัน ดีเซล-ไบโอดีเซล-น้ำ ชนิดน้ำในน้ำมัน สามารถช่วยลดค่าการปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ( $NO_x$ ) และค่าการปลดปล่อยก๊าซไฮโดรคาร์บอน ( $HC$ ) ที่ภาระโหลด 75% ในเครื่องยนต์ดีเซล



เชื้อเพลิงอิมัลชัน ดีเซล-ไบโอดีเซล-น้ำ จึงเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกใหม่สำหรับใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่ต้องมีการปรับเปลี่ยนเครื่องยนต์

**คำหลัก:** เชื้อเพลิงอิมัลชัน ค่าการปลดปล่อยค่าก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ ไบโอดีเซล

## ABSTRACT

The objective of this study was to investigate the effects of diesel-biodiesel-water emulsion fuel on the exhaust emission contents ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $HC$  and  $NO_x$ ), specific fuel consumption (SFC), and brake-specific fuel consumption (BSFC) of a single-cylinder diesel engine. The Span80 and Tween80 of 6 vol.% were used as the emulsifier to homogeneously blend the emulsion fuel, which consisted of 42 vol.% diesel, 50 vol.% biodiesel, 2 vol.% water (D42B50W2S3T3). The diesel-biodiesel-water emulsion fuel was produced using 18 kHz and 1,000W ultrasonic probe type within 60 sec sonication time. For the engine testing, diesel, biodiesel, and emulsion fuel were used as fuels to compare the exhaust emission contents, SFC, and BSFC with engine load of 0% 25% 50%, and 75% at 2300 rpm. The results showed that D42B50W2S3T3 blend emitted 708.7 ppm  $NO_x$  which was increased by 19.0% and 3.71%, when compared with diesel and biodiesel, respectively. While 105.3 ppm  $HC$  emission was emitted for combustion of emulsion fuel which was decreased by 4.7% for diesel and 7.4% for biodiesel with 75% engine load and 2,300 rpm. However, 545.8 ppm  $CO$  emission was increased by 26.1% and 16.6% with diesel and biodiesel, respectively. Regarding the specific fuel consumptions (SFC) of emulsion fuel are lower than biodiesel at all engine load. At 75% engine load and 2300 rpm, 1.56 kg/hr of SFC obtained from the emulsion fuel which was decreased by 4.07% and increased by 1.34% as compared to biodiesel and diesel, respectively. For brake specific fuel consumption (BSFC), 0.26 kg/kW.hr produced by emulsion fuel which was decreased by 4.07% and increased by 1.32% as compared to biodiesel and diesel, respectively. In conclusion, the emulsion blend can reduced the  $NO_x$  and  $HC$  emissions in a DI diesel engine with 75% engine load at 2300 rpm. Therefore, D42B50W2S3T3 blend are alternatives usable in a diesel engine without modifications.

**Keywords:** emulsion fuel; emission; specific fuel consumption; biodiesel

## 1. บทนำ

เครื่องยนต์ดีเซลเป็นเครื่องยนต์ประเภทสันดาปภายในซึ่งเป็นที่นิยมและมีความจำเป็นอย่างมากต่อการใช้ชีวิตประจำวันของมนุษย์ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับน้ำมันทางเลือกอื่น ๆ ได้ ถึงแม้ว่าในปัจจุบันเริ่มมีการผลิตยานพาหนะในรูปแบบของระบบขับเคลื่อนเครื่องยนต์ด้วยระบบไฟฟ้า (electric vehicle) หรือรูปแบบลูกผสมระหว่างพลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิงกับพลังงานไฟฟ้าจากมอเตอร์ (hybrid) ซึ่งให้ข้อดีคือประหยัดเชื้อเพลิงและให้ค่าการปลดปล่อยก๊าซไอเสียสู่ชั้นบรรยากาศที่ต่ำลง ส่งผลให้เป็นมิตรต่อธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมมากขึ้น แต่ราคาของยานพาหนะของเครื่องยนต์ดังกล่าวยังมีราคาที่สูงเนื่องมาจากความซับซ้อนทางวิศวกรรมที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะการนำระบบมอเตอร์ไฟฟ้ามาใช้ในระบบขับเคลื่อน อีกทั้งยังมีค่าบำรุงรักษาที่สูงขึ้นอีกด้วยเช่นกัน และสถานีสำหรับชาร์จไฟฟ้าที่มีปริมาณจำกัดและใช้เวลา

ชาร์จที่นานของระบบขับเคลื่อนเครื่องยนต์แบบ electric vehicle [1] ด้วยปัจจัยดังกล่าวจึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ส่งผลให้ความนิยมในการใช้ยานพาหนะในรูปแบบของระบบขับเคลื่อนเครื่องยนต์แบบ electric vehicle และ hybrid ยังคงมีน้อยมากเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซล แต่อย่างไรก็ตามน้ำมันดีเซลที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซลในปัจจุบันมีค่าการปลดปล่อยก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้สู่ชั้นบรรยากาศ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $CO$ ) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ( $NO_x$ ) ก๊าซไฮโดรคาร์บอน ( $HC$ ) ก๊าซซัลเฟอร์ออกไซด์ ( $SO_2$ ) ฝุ่นละออง คาร์บอนดำและอื่น ๆ สูง ซึ่งมักจะถูกเปลี่ยนไปเป็นสารอันตรายที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพต่อระบบนิเวศสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ [2, 3]

นักวิจัยส่วนใหญ่ได้ทำการวิจัยด้านการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืช เช่น น้ำมันปาล์ม (palm oil) สบู่ค่า

(jatropha oil) และน้ำมันมะพร้าว (coconut oil) เป็นต้น หรือไขมันสัตว์ที่มีกรดไขมัน ซึ่งในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล เป็นการนำน้ำมันไปทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์และใช้กรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างกลีเซอไรด์เป็นผลิตภัณฑ์เอสเตอร์หรือไบโอดีเซล และผลพลอยได้ก็คือน้ำตาล [4] และเนื่องด้วยสถานการณ์ในปัจจุบัน น้ำมันปาล์มดิบภายในประเทศมีปริมาณที่สั้นตลาดส่งผลให้ราคาซื้อขายที่ต่ำลง ทำให้กระทรวงพลังงานออกมาแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นและได้ออกนโยบายสำหรับการเพิ่มอัตราส่วนของน้ำมันดีเซลหมุนเร็วที่มีส่วนผสมของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นเป็นน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว บี 20 เพื่อช่วยเหลือชาวเกษตรกรผู้ปลูกปาล์มน้ำมันและส่งจำหน่ายให้กับกลุ่มรถบรรทุกขนส่งสินค้า รถโดยสาร เรือโดยสาร และรถกระบะ เป็นต้น [5] โดยไบโอดีเซลมีส่วนช่วยลดค่าการปลดปล่อยก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้สู่ชั้นบรรยากาศที่สำคัญคือ CO<sub>2</sub> CO<sub>2</sub> SO<sub>2</sub> ฝุ่นละออง และควันทา แต่ยังคงให้ค่าการปลดปล่อยก๊าซ NO<sub>x</sub> ที่สูงกว่าดีเซล [6] ดังนั้นนักวิจัยจึงได้ทำการวิจัยเพื่อหาวิธีในการลดค่าการปลดปล่อยก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้จากเครื่องยนต์ดีเซลให้มีค่าต่ำลง เช่นที่มวิจัยของ Mohammad และคณะ (2019) [7] ได้ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชันน้ำในดีเซล โดยเพิ่มอัตราส่วนของน้ำที่ผสมกับน้ำมันดีเซลที่เงื่อนไขของน้ำเท่ากับ 2% 5% 8% และ 10% โดยปริมาตร พบว่าเชื้อเพลิงอิมัลชันน้ำในดีเซลสามารถช่วยลดค่าการปลดปล่อยก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้คือ CO<sub>2</sub> NO<sub>x</sub> HC และฝุ่นละอองอย่างมีนัยสำคัญ แต่ให้ค่าการปลดปล่อยก๊าซ CO มากขึ้นเมื่ออัตราส่วนของน้ำที่ผสมกับน้ำมันดีเซลเพิ่มขึ้น และส่งผลให้กำลังของเครื่องยนต์และแรงบิดลดลง เนื่องจากน้ำทำให้เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพเชิงความร้อน (thermal efficiency) ที่ต่ำลง [8] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yang และคณะ (2013) [9] ที่ได้รายงานผลไว้เช่นเดียวกัน

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ทำการผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชันดีเซล-น้ำ-ไบโอดีเซล แบบชนิดน้ำในน้ำมัน โดยใช้สารลดแรงตึงผิว 2 ชนิด คือ Span80 และ Tween80 เป็นตัวทำอิมัลชัน (emulsifier) เพื่อผสมน้ำและน้ำมันให้เข้ากันทำให้เกิดอิมัลชันที่มีความเสถียรภาพมากขึ้น และใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกชนิดโพรบแบบกะ ที่ความถี่เท่ากับ 18 kHz ในการผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชัน ดีเซล-ไบโอดีเซล-น้ำ จากนั้นนำไปทดสอบในเครื่องยนต์การเกษตรระบบหัวฉีดโดยตรง (direct injection, DI) เพื่อวิเคราะห์ค่าการปลดปล่อยก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ คือ O<sub>2</sub> CO<sub>2</sub> CO HC NO<sub>x</sub> ค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ และค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรกก่าเพาะของเชื้อเพลิงอิมัลชัน ดีเซล-ไบโอดีเซล-น้ำ ที่ภาระโหลดเท่ากับ 0% 25% 50% และ 75% เปรียบเทียบกับดีเซลและไบโอดีเซล

## 2. วัตถุประสงค์ สารเคมี และอุปกรณ์

### 2.1 วัตถุดิบ

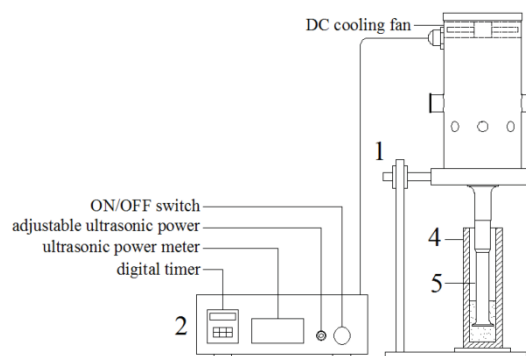
วัตถุดิบที่ใช้ผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชันมีทั้งหมด 5 ชนิด คือ น้ำมันดีเซลบี 7 (diesel B7, D) ซึ่งมีส่วนผสมของไบโอดีเซล 7 vol.% และดีเซลปิโตรเลียม 93 vol.% ไบโอดีเซลบี100 (biodiesel B100, B) ผลิตจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชัน น้ำกรอง (water, W) โดยใช้สารลดแรงตึงผิวชนิด Span80 และชนิด Tween80 เพื่อทำให้น้ำมันดีเซลบี7 (D) ไบโอดีเซลบี100 (B) และน้ำ (W) เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน สำหรับสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการบนน้ำมันไบโอดีเซลด้วยเทคนิค thin layer chromatography with flame ionization detector (TLC/FID) คือ เฮกเซน ไดเอทิลอีเทอร์ กรดฟอร์มิก และเบนซิน ซึ่งคุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงได้แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงสัดส่วนของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบเครื่องยนต์

ชนิดของเชื้อเพลิง	Diesel (vol.%)	Biodiesel (vol.%)	Water (vol.%)	Span 80 (vol.%)	Tween80 (vol.%)	Density (g/mL) ที่ 30 °C	LHV (kJ/kg)
Diesel	100	-	-	-	-	0.830	43683
Biodiesel	-	100	-	-	-	0.865	37463
D42B50W2S3T3	42	50	2	3	3	0.870	38169

## 2.2 อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์สำหรับใช้ในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชัน ดีเซล-ไบโอดีเซล-น้ำ คือ เครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิกชนิดโพรบแบบกะ (ultrasonic probe, model: AKHGZ-50420K) มีความถี่เท่ากับ 18 kHz กำลังของคลื่นเสียงเท่ากับ 1,000 W และใช้ท่อทรงกระบอกร่วมกับเครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิก ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (SUS316L) มีขนาดเท่ากับ 34 mm สูงเท่ากับ 150 mm และความหนาเท่ากับ 8 mm เครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิกได้ติดตั้งเพื่อทดสอบกระบวนการผลิตอิมัลชันดังแสดงในรูปที่ 1 [10] และในกระบวนการเตรียมสารผสม 2 ชนิด คือ น้ำมันดีเซล-ไบโอดีเซล-Tween80 และน้ำ-Span80 ได้ใช้เครื่องกวนสารละลายโดยใช้สนามแม่เหล็ก (magnetic stirrer, model: IKA RCT B S104) กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 650 W ความถี่ 50/60 Hz อุปกรณ์สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ขนาดหยดอนุภาค (droplet size) ของเชื้อเพลิงอิมัลชัน ขนาดหยดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง (1,000-10,000 nm) ได้ใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 1,000 เท่า (microscope, model: OLYMPUS CX23) เพื่อวัดขนาดหยดอนุภาคในเบื้องต้น และนำไปสู่แนวโน้มน้ำการสูญเสียเสถียรภาพของเฟสภายใน และการวัดขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง (0.6-10,000 nm) ได้ใช้เครื่องวัดอนุภาคระดับนาโนเมตร (Zetasizer model: Zen3600)



รูปที่ 1 เครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิกชนิดโพรบแบบกะ [10] (หมายเลข 1 คือ support stand with ring clamp, หมายเลข 2 คือ ultrasonic generator, หมายเลข 3 คือ ultrasonic homogenizer, หมายเลข 4 คือ ultrasonic horn และหมายเลข 5 คือ glass reactor)

อุปกรณ์วิเคราะห์ก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้และประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ โดยเครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดสอบคือ เครื่องยนต์สูบเดี่ยว แบบสี่จังหวะ ระบายความร้อนด้วยน้ำ (Kubota, model: RT 100 DI) ใช้ระบบหัวฉีดโดยตรง (direct injection, DI) ซึ่งเป็นการจ่ายเชื้อเพลิงเข้าไปยังห้องเผาไหม้โดยตรงคือ หัวฉีดจะทำการฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปที่บริเวณหัวของลูกสูบภายในห้องเผาไหม้ ซึ่งตรงหัวของลูกสูบในระบบ DI จะมีลักษณะเป็นหลุมเพื่อใช้เป็นห้องเผาไหม้ โดยระบบนี้จะให้กำลังอัดที่สูงกว่าแบบระบบการฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อม (indirect injection, IDI) ข้อดีคือ มีการประหยัดเชื้อเพลิงมากขึ้น เนื่องจากมีการจุดระเบิดที่บริเวณหัวลูกสูบโดยตรงทำให้เกิดการสูญเสียประสิทธิภาพเชิงความร้อน (thermal efficiency) น้อยกว่าระบบ IDI ข้อเสียคือ แรงอัดที่สูงทำ

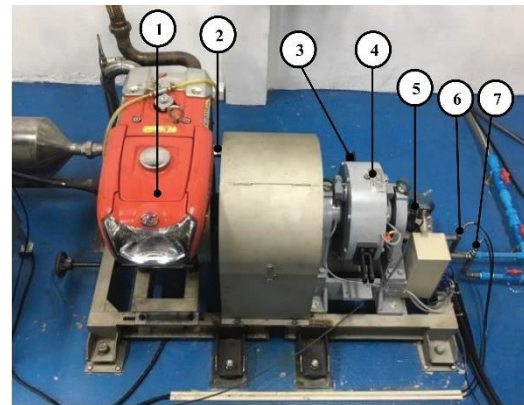
ให้เกิดการสันตะเทียนในเครื่องยนต์สูงด้วยเช่นกัน ส่งผลให้เครื่องมีเสียงดังและระบบสึกหรอเร็วขึ้น และให้ค่าการปลดปล่อยก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้สูง เนื่องจากการฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงที่บริเวณหัวลูกสูบ ส่งผลให้เชื้อเพลิงไม่สามารถทำปฏิกิริยากับอากาศได้เต็มที่จึงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์มากขึ้น เครื่องยนต์ RT 100 DI มีอัตราส่วนแรงอัด 18:1 และมีกำลังสูงสุด ความเร็วสูงสุดของเครื่องยนต์เท่ากับ 7,400 W และ 2,400 rpm ตามลำดับ โดยได้แสดงรายละเอียดของเครื่องยนต์ในตารางที่ 2 และชุดทดสอบเครื่องยนต์ในรูปที่ 2

ตารางที่ 2 รายละเอียดของเครื่องยนต์

รหัสรุ่น	อาร์ที 100 ดีไอ
แบบ	1 สูบ 4 จังหวะ
จำนวนลูกสูบ	1
ขนาดกระบอกสูบxช่วงชัก	88x90 (mm·mm)
ปริมาตรช่วงชัก	547 (cm <sup>3</sup> )
กำลังเครื่องยนต์สูงสุด	10 /2400 (hp/rpm) (7.35kW/2400)
กำลังเครื่องยนต์ต่อเนื่อง	9/2400 (hp/rpm) (6.62kW/2400)
อัตราส่วนการอัด	18:1
แรงบิดสูงสุด	3.4/1600 (kgf·m)
ชนิดของระบบการเผาไหม้	แบบฉีดตรง (direct injection)
ระบบระบายความร้อน	หม้อน้ำแบบรังผึ้ง

ในการทดลองได้มีการแปรค่าภาระโหลดของเครื่องยนต์ ไดนาโมมิเตอร์แบบกระแสเหนี่ยวนำ (eddy current dynamometer, model: DW16) ถูกนำมาใช้เป็นอุปกรณ์สร้างภาระโหลดให้กับเครื่องยนต์ โดยค่าภาระโหลดจากไดนาโมมิเตอร์ได้มาจากน้ำหนัก ที่วัดค่าได้จากโหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ (strain gauge load cell, model: RM-S2) โดยเครื่องบันทึกข้อมูล (data logger, model: Wisco AI 210) จะรับสัญญาณแรงดันไฟฟ้า เพื่อไปคำนวณหาค่าทอร์กที่เครื่องยนต์ได้รับ และในการ

วัดความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ภาระโหลดต่าง ๆ ได้ใช้เซนเซอร์สำหรับวัดความเร็วรอบอยู่ในช่วง 0-6,000 rpm (encoder speed, model: E6B2-CWZ6C) สำหรับการหาปริมาณก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ ได้แก่ O<sub>2</sub> CO<sub>2</sub> CO HC และ NO<sub>x</sub> ได้ใช้เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (gas analyzer, model: Testo 350-XL) และได้ใช้เซนเซอร์วัดอุณหภูมิก๊าซไอเสีย (temperature sensor, model: K-Type SS316) เพื่อวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในท่อไอเสีย



รูปที่ 2 ชุดทดสอบเครื่องยนต์

(หมายเลข 1 คือ diesel engine, หมายเลข 2 คือ exhaust temperature sensor, หมายเลข 3 คือ strain gauge load cell, หมายเลข 4 คือ dynamometer, หมายเลข 5 คือ encoder, หมายเลข 6 คือ water output temperature sensor และหมายเลข 7 คือ water input temperature sensor)

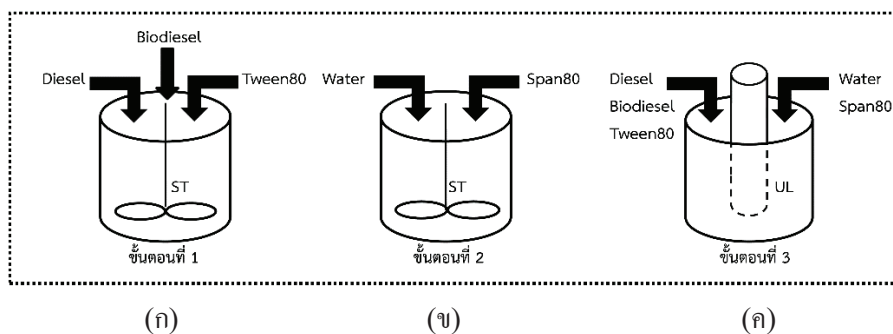
### 3. วิธีการทดลอง

#### 3.1 วิธีการผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชัน ดีเซล-ไบโอดีเซล-น้ำ ด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก

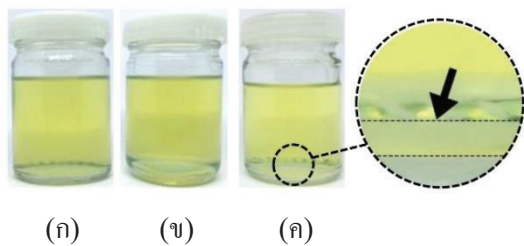
วิธีการผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชัน ดีเซล-ไบโอดีเซล-น้ำ มีทั้งหมด 3 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 3 คือ ขั้นตอนที่ (1) เตรียมสารผสมชนิด A ที่อัตราส่วนเชิงปริมาตรคือ D4 2 B50T3 (42% diesel: 50% biodiesel: 3% Tween80) ด้วยเครื่องกวนสารละลายที่ความเร็วรอบเท่ากับ 500 rpm และระยะเวลาผสมเท่ากับ 60 sec ขั้นตอนที่ (2) เตรียมสารผสมชนิด B อัตราส่วน

เชิงปริมาตรคือ W2S3 (2% water: 3% Span80) ด้วยเครื่องกวนสารละลายที่ความเร็วรอบเท่ากับ 500 rpm และระยะเวลาผสมเท่ากับ 60 sec และขั้นตอนที่ 3 คือกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชันได้นำสารชนิด A และชนิด B มีอัตราส่วนเชิงปริมาตรเท่ากับ 100% คือ D4 2 B50W2S3T3 (42% diesel: 50% biodiesel: 2% water: 3% Span80: 3% Tween80) นำสารผสมปริมาตรรวมเท่ากับ 40 mL เทลงไปในเครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิกชนิดโพรบแบบกะ และเปิดเครื่องกำเนิดคลื่นเสียงอัลตราโซนิก (ultrasonic generator) โดยให้คลื่น

ความถี่เท่ากับ 18 kHz กำลังคลื่นเสียงเท่ากับ 1,000 W จะปล่อยคลื่นเสียงไปที่สารผสมเป็นระยะเวลา 60 sec หลังจากนั้นทำการทดลองซ้ำเพื่อสะสมเชื้อเพลิงอิมัลชันให้ได้ปริมาณ 3,000 mL ซึ่งได้แสดงเชื้อเพลิงอิมัลชันในรูปที่ 4 โดยสัญลักษณ์ลูกศรชี้บริเวณภายในพื้นที่เส้นประคือ ลักษณะการเกิดการแยกชั้นหรือเกิดการสูญเสียความเสถียรภาพของเชื้อเพลิงอิมัลชัน จากนั้นนำไปทดสอบหาค่าก๊าซจากการเผาไหม้และสมรรถนะของเครื่องยนต์ในหัวข้อที่ 4



**รูปที่ 3** ขั้นตอนวิธีการผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชัน (ก) ขั้นตอนที่ 1 การผสม ดีเซล-ไบโอดีเซล-Tween80 ด้วยวิธีการกวนผสม (ข) ขั้นตอนที่ 2 การผสม น้ำ-Span80 ด้วยวิธีการกวนผสม (ค) ขั้นตอนที่ 3 การผสมเชื้อเพลิงอิมัลชัน ดีเซล-ไบโอดีเซล-น้ำ-Span80-Tween80 ด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกชนิดโพรบ



**รูปที่ 4** แสดงรูปภาพเชื้อเพลิงอิมัลชัน (ก) เชื้อเพลิงอิมัลชันที่ระยะเวลาความเสถียรภาพเท่ากับ 1 hr (ข) เชื้อเพลิงอิมัลชันที่ระยะเวลาความเสถียรภาพเท่ากับ 24 hr (ค) เชื้อเพลิงอิมัลชันที่ระยะเวลาความเสถียรภาพเท่ากับ 5 เดือน

### 3.2 วิธีการทดสอบเชื้อเพลิงอิมัลชันในเครื่องยนต์การเกษตร Kobota RT 100DI

วิธีการทดสอบเชื้อเพลิงอิมัลชัน ในเครื่องยนต์การเกษตร มีทั้งหมด 7 ขั้นตอน ซึ่งได้แสดงแผนผังชุดการ

ทดสอบในรูปที่ 5 โดยขั้นตอนที่ (1) ติดเครื่องและเดินเครื่องยนต์ด้วยน้ำมันดีเซลแล้วปล่อยให้เครื่องยนต์ทำงานที่ความเร็วรอบต่ำเป็นระยะเวลา 30 min เพื่ออุ่นเครื่องยนต์มีอุณหภูมิอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบ ขั้นตอน (2) เปลี่ยนเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบเป็นเชื้อเพลิงอิมัลชัน ดีเซล-ไบโอดีเซล-น้ำ และปรับความเร็วรอบของเครื่องยนต์เท่ากับ 2,300 rpm แปรค่าภาระโหลดตามที่กำหนดเริ่มต้นจากภาระโหลด เท่ากับ 0% โดยปรับกระแสไฟฟ้าที่ตู้อุปกรณ์ควบคุมไฟฟ้า (controller, model: SC-1D, 90V 5A) เพื่อปรับกระแสไฟฟ้าและสร้างสนามแม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้ามให้กับไดนาโมมิเตอร์ ทำให้เครื่องยนต์รับภาระโหลดจากการปรับกระแสไฟฟ้า แล้วจึงทำการปรับความเร็วรอบเฉลี่ยให้ได้เท่ากับ 2,300 rpm



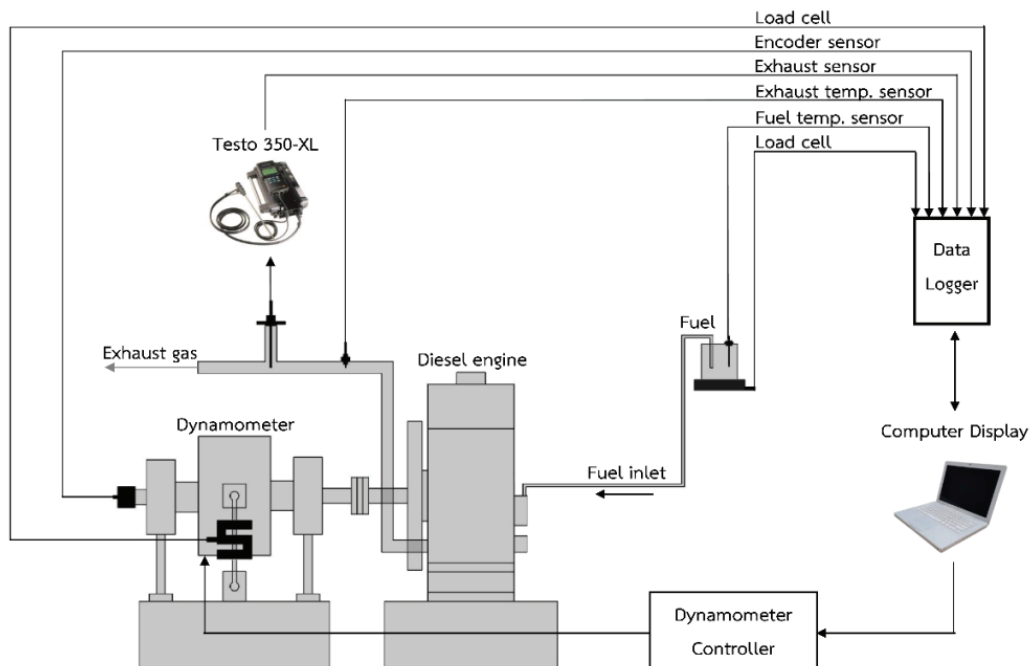
ขั้นตอนที่ (3) ทำการวัดค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (specific fuel consumption) ซึ่งวัดค่าอัตราการไหลเชิงมวลโดยใช้อุปกรณ์เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล (digital balance weight, model: AND EK-3000i) เพื่อวิเคราะห์น้ำหนักของน้ำมันที่ถูกใช้ไปทุกๆ 1 sec ขั้นตอนที่ (4) ทำการวัดค่าก๊าซ  $O_2$   $CO_2$   $CO$   $HC$  และ  $NO_x$  ที่ได้จากการเผาไหม้โดยใช้เครื่องวัดก๊าซ Testo 350-XL ที่บริเวณท่อไอเสียของเครื่องยนต์ ขั้นตอนที่ (5) บันทึกผลการทดสอบและทำซ้ำข้อที่ 2-5 โดยเพิ่มภาระโหลดเท่ากับ 25% 50% และ 75% หรือแรงบิดเท่ากับ 8.2 N-m 16.4 N-m และ 24.6 N-m ตามลำดับ ที่กำลังของเครื่องยนต์เท่ากับ 2.5 hp 5.0 hp และ 7.5 hp ตามลำดับ ขั้นตอนที่ (6) ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1-5 เมื่อทำการเปลี่ยนเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบ คือ น้ำมันดีเซลบี 7 และน้ำมันไบโอดีเซลบี 100 ขั้นตอนที่ (7) รวบรวมข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบไปวิเคราะห์หาค่าการปลดปล่อยค่าก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์คือ  $O_2$   $CO_2$   $CO$

$HC$  และ  $NO_x$  และประสิทธิภาพของเครื่องยนต์คือ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรคจำเพาะ

#### 4. ผลการทดลอง

##### 4.1 ขนาดอนุภาคของน้ำในเชื้อเพลิงนาโนอิมัลชัน ดีเซล-ไบโอดีเซล-น้ำ

พบว่าผลการเพิ่มอัตราส่วนผสมของน้ำที่ 2 vol.% ความหนาแน่น ที่อุณหภูมิห้อง  $30^{\circ}C$  มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ  $0.870 \text{ g/mL}$  เมื่อเทียบกับดีเซลและไบโอดีเซล แสดงไว้ในตารางที่ 1 โดยวิธีการผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชันด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิคชนิดโพรบ ส่งผลให้ขนาดของอนุภาค (droplet size) เฟสภายในมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $122.4 \text{ nm}$  ค่าดัชนีการกระจายตัวของอนุภาค (polydispersion index, PDI) เท่ากับ 0.200 และมีระยะเวลาความเสถียรภาพของเชื้อเพลิงอิมัลชันประมาณ 5 เดือน



รูปที่ 5 แสดงแผนผังชุดทดสอบเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลและอุปกรณ์สำหรับเก็บข้อมูล

## 4.2 การปลดปล่อยค่าก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์

### 4.2.1 ก๊าซออกซิเจน (O<sub>2</sub>)

อากาศเป็นส่วนผสมหนึ่งในการจุดระเบิดภายในห้องเผาไหม้ทำให้เกิดกำลังแก่เครื่องยนต์ โดยองค์ประกอบของอากาศได้แก่ ไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) ปริมาณเท่ากับ 78.08% ออกซิเจน (O<sub>2</sub>) ปริมาณเท่ากับ 20.95% และก๊าซอื่น ๆ ที่ปริมาณเท่ากับ 0.97% [11] ซึ่งก๊าซ O<sub>2</sub> มีคุณสมบัติช่วยให้ติดไฟได้เมื่อทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงและความร้อน จึงเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยให้เกิดการเผาไหม้ (combustion) ขึ้นภายในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ จากการทดลองเชื้อเพลิง 3 ชนิดคือ ดีเซล ไบโอดีเซล และเชื้อเพลิงอิมัลชันที่ภาระโหลดของเครื่องยนต์เท่ากับ 0% 25% 50% และ 75% โดยปริมาณการปลดปล่อยของก๊าซ O<sub>2</sub> ได้แสดงในรูปที่ 6(ก) พบว่า ค่าการปลดปล่อยก๊าซ O<sub>2</sub> ของเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิด มีค่าลดลงเมื่อมีการป้อนภาระโหลดเพิ่มขึ้น ซึ่งน้ำมันดีเซลมีค่าการปลดปล่อยก๊าซ O<sub>2</sub> สูงกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ ที่ทุก ๆ ภาระโหลด โดยไบโอดีเซลและเชื้อเพลิงอิมัลชันมีปริมาณการปลดปล่อยก๊าซ O<sub>2</sub> ใกล้เคียงกันที่ภาระโหลด 0-75% เมื่อพิจารณาที่ภาระโหลดมากที่สุดเท่ากับ 75% พบว่า ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซ O<sub>2</sub> ของไบโอดีเซลและเชื้อเพลิงอิมัลชันมีปริมาณต่ำกว่าดีเซลเท่ากับ 9.8% และ 8.7% ตามลำดับ เนื่องจากในช่วงของการเผาไหม้เฟสภายในคือน้ำที่กระจายตัวอยู่ในเฟสน้ำมันของเชื้อเพลิงอิมัลชันได้แตกตัวและระเหยกลายเป็นไอก่อนจังหวะจุดระเบิด ซึ่งเกิดจากจุดเดือดของน้ำมีค่าต่ำกว่าดีเซล [12] ปรากฏการดังกล่าวทำให้พื้นที่สัมผัสระหว่างเชื้อเพลิงและก๊าซ O<sub>2</sub> เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงสมบูรณ์ขึ้น [13] และอีกสาเหตุหนึ่งเกิดจากปริมาณน้ำในเชื้อเพลิงอิมัลชันทำให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ลดลง โดยปริมาณน้ำได้ดูดซับความร้อนสำหรับการกลายเป็นไอทำให้ก๊าซออกซิเจนลดลง [14] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Khalife et al. (2017) [15] ที่ได้ศึกษาการเพิ่มอัตราส่วนของน้ำที่เจือปนในเชื้อเพลิงเท่ากับ 2, 4 และ 6 wt.%

ในเชื้อเพลิงไบโอดีเซลผสมดีเซล โดยไบโอดีเซลผลิตจากน้ำมันทอดที่ใช้แล้ว (WCO) และผสมในดีเซลเท่ากับ 5 wt.% พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนของน้ำในเชื้อเพลิงไบโอดีเซลผสมดีเซลนำไปสู่การเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้นส่งผลให้ค่าการปลดปล่อยก๊าซ O<sub>2</sub> ลดลง ที่โหลดสูงสุด ความเร็วรอบของเครื่องยนต์เท่ากับ 2,500 rpm

### 4.2.2 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>)

การปลดปล่อยค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) จากเครื่องยนต์เป็นการบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของการเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้ [16] จากการทดลองเชื้อเพลิง 3 ชนิดคือ ดีเซล ไบโอดีเซล และเชื้อเพลิงอิมัลชันที่ภาระโหลดของเครื่องยนต์เท่ากับ 0% 25% 50% และ 75% ปริมาณการปลดปล่อยของก๊าซ CO<sub>2</sub> ได้แสดงในรูปที่ 6(ข) พบว่า ค่าการปลดปล่อยก๊าซ CO<sub>2</sub> ของเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิด มีปริมาณมากขึ้นเมื่อมีการป้อนภาระโหลดเพิ่มขึ้น ซึ่งเชื้อเพลิงอิมัลชันมีค่าการปลดปล่อยก๊าซ CO<sub>2</sub> สูงกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ ที่ภาระโหลด 0-25% และต่ำกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ ที่ภาระโหลด 50-75% เมื่อพิจารณาที่ภาระโหลดมากที่สุดเท่ากับ 75% พบว่า ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซ CO<sub>2</sub> ของไบโอดีเซลและเชื้อเพลิงอิมัลชันมีปริมาณต่ำกว่าดีเซลเท่ากับ 2.3% และ 3.5% ตามลำดับ จากการเทียบความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซ CO<sub>2</sub> กับ O<sub>2</sub> แสดงให้เห็นว่าปริมาณการปลดปล่อยของก๊าซทั้ง 2 ชนิดมีความสัมพันธ์สอดคล้องกัน สังเกตได้จากก๊าซ CO<sub>2</sub> มีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ก๊าซ O<sub>2</sub> มีค่าลดลงตามการป้อนภาระโหลดที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีจำนวนอะตอมออกซิเจนในส่วนผสมของเชื้อเพลิงที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำเพิ่มขึ้น [17] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Alahmer (2013) [18] ได้ศึกษาถึงเรื่องการเพิ่มอัตราส่วนของน้ำที่เจือปนในเชื้อเพลิงดีเซล ทดลองในเครื่องยนต์ที่โหลดสูงสุด ความเร็วรอบเท่ากับ 1,000 ถึง 3,000 rpm พบว่าปริมาณการปลดปล่อยก๊าซ CO<sub>2</sub> ให้ค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วของเครื่องยนต์และให้ค่าลดลงตามปริมาณส่วนผสมของน้ำ

#### 4.2.3 ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีคุณสมบัติเป็น ก๊าซพิษ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น เกิดขึ้นในเครื่องยนต์ที่มีการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์หรือมีก๊าซ  $O_2$  ไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดเป็นก๊าซ  $CO_2$  [19] จากการทดลองเชื้อเพลิง 3 ชนิดคือ ดีเซล ไบโอดีเซล และเชื้อเพลิงอิมัลชันที่ภาระโหลดของเครื่องยนต์เท่ากับ 0% 25% 50% และ 75% ปริมาณการปลดปล่อยของก๊าซ CO ได้แสดงในรูปที่ 6(ค) พบว่า ค่าการปลดปล่อยก๊าซ CO ของเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิด ให้ค่าต่ำสุดเมื่อมีการป้อนภาระโหลดเท่ากับ 50% ซึ่งเชื้อเพลิงอิมัลชันมีค่าการปลดปล่อยก๊าซ CO สูงกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆที่ทุกๆภาระโหลด โดยไบโอดีเซลและดีเซลมีปริมาณการปลดปล่อยก๊าซ CO ใกล้เคียงกันที่ภาระโหลด 0-75% เมื่อพิจารณาที่ภาระโหลดมากที่สุดเท่ากับ 75% พบว่า ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซ CO ของไบโอดีเซลและเชื้อเพลิงอิมัลชันสูงกว่าดีเซลเท่ากับ 8.1% และ 26.1% ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณของน้ำในเชื้อเพลิงอิมัลชันส่งผลให้ปริมาณ OH มีความเข้มข้นที่สูงส่งผลให้เกิดการออกซิเดชันของคาร์บอนไปเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์สูงขึ้น [20] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mazlan และคณะ (2018) [21] ได้ศึกษาเรื่องผลกระทบเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของน้ำเท่ากับ 5, 6.5, 10.8 และ 30 vol.% ในเชื้อเพลิงอิมัลชันโดยไม่ใช้สารแรงดึงผิวต่อสมรรถนะและการปล่อยไอเสียของรถบรรทุกขนาดเล็ก ที่ความเร็วเท่ากับ 32, 40, 48, 56 และ 64 km/hr ตามลำดับ พบว่าดีเซลที่มีส่วนผสมของน้ำในปริมาณเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าการปลดปล่อยก๊าซ CO สูงขึ้น โดยน้ำที่ปริมาณเท่ากับ 30 vol.% ให้ค่าการปลดปล่อยก๊าซ CO สูงสุดเท่ากับ 159% ที่ความเร็วเครื่องยนต์เท่ากับ 64 km/hr เมื่อเทียบกับดีเซล

#### 4.2.4 ก๊าซไฮโดรคาร์บอน (HC)

ก๊าซไฮโดรคาร์บอน (HC) เป็นดัชนีบ่งชี้กลิ่นและประสิทธิภาพของการเผาไหม้ โดยที่ปริมาณไฮโดรคาร์บอนเกิดจากเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ [15] ซึ่งประกอบไปด้วยเชื้อเพลิงที่ไม่ถูกเผาไหม้หรือถูกเผาไหม้

เพียงบางส่วน ส่วนมากจะอยู่ในสถานะก๊าซของไอเสียจากการทดลองเชื้อเพลิง 3 ชนิดคือ ดีเซล ไบโอดีเซล และเชื้อเพลิงอิมัลชันที่ภาระโหลดของเครื่องยนต์เท่ากับ 0% 25% 50% และ 75% ปริมาณการปลดปล่อยของก๊าซ HC ได้แสดงในรูปที่ 6(ง) พบว่า ค่าการปลดปล่อยก๊าซ HC ของเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิด มีค่าต่ำสุดเมื่อมีการป้อนภาระโหลดเท่ากับ 25% ซึ่งเชื้อเพลิงอิมัลชันมีค่าการปลดปล่อยก๊าซ HC ต่ำกว่าไบโอดีเซลที่ภาระโหลดเท่ากับ 0% 25% และ 75% และมีค่าการปลดปล่อยก๊าซ HC สูงสุดที่ภาระโหลดเท่ากับ 50% เมื่อพิจารณาที่ภาระโหลดมากที่สุดเท่ากับ 75% พบว่า ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซ HC ของไบโอดีเซลมีค่าการปลดปล่อยสูงที่สุด โดยสูงกว่าดีเซล 2.8% และเชื้อเพลิงอิมัลชันมีค่าการปลดปล่อยที่ต่ำกว่าดีเซล 4.7% เนื่องจากความล่าช้าในการจุดระเบิดที่สั้นลงและปริมาณออกซิเจนของไบโอดีเซลส่งผลให้ค่าการปลดปล่อยก๊าซ (HC) ลดลง หรือช่วงเวลาการเผาไหม้ที่มีอัตราส่วนผสมของอากาศกับเชื้อเพลิงในปริมาณที่ไม่เหมาะสม จึงส่งผลให้ปริมาณของไฮโดรคาร์บอนในไอเสียมีปริมาณเพิ่มขึ้น [22] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Samec และคณะ (2002) [23] ที่ได้ศึกษาถึงเรื่อง การเพิ่มอัตราส่วนของน้ำที่เงื่อนไขเท่ากับ 0 5 และ 10 vol.% ในดีเซล ที่ภาระโหลดเท่ากับ 5 bar 8 bar และ 10 bar และความเร็วรอบของเครื่องยนต์เท่ากับ 1,700 rpm พบว่าเชื้อเพลิงดีเซลที่ผสมน้ำ 5 และ 10 vol.% สามารถช่วยลดค่าการปลดปล่อยก๊าซ (HC) ลงได้เมื่อเทียบกับดีเซล

#### 4.2.5 ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ( $NO_x$ )

ไนโตรเจนออกไซด์ เป็นมลพิษหลักของเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งถูกกำหนดให้เป็นมลพิษควบคุม โดยส่วนใหญ่จะประกอบด้วยไนตริกออกไซด์ (nitric oxide, NO) ประมาณ 70-80% และไนโตรเจนไดออกไซด์ (nitrogen dioxide  $NO_2$ ) ประมาณ 20% เป็นสารพิษที่เป็นอันตรายต่อทางเดินระบบหายใจ อีกทั้งยังทำปฏิกิริยากับอากาศทำให้เกิดเป็นโอโซน ซึ่งเป็นสาเหตุหลักทำให้เกิดหมอกควัน [24] จากการทดลองเชื้อเพลิง 3 ชนิดคือ ดีเซล ไบโอดีเซล

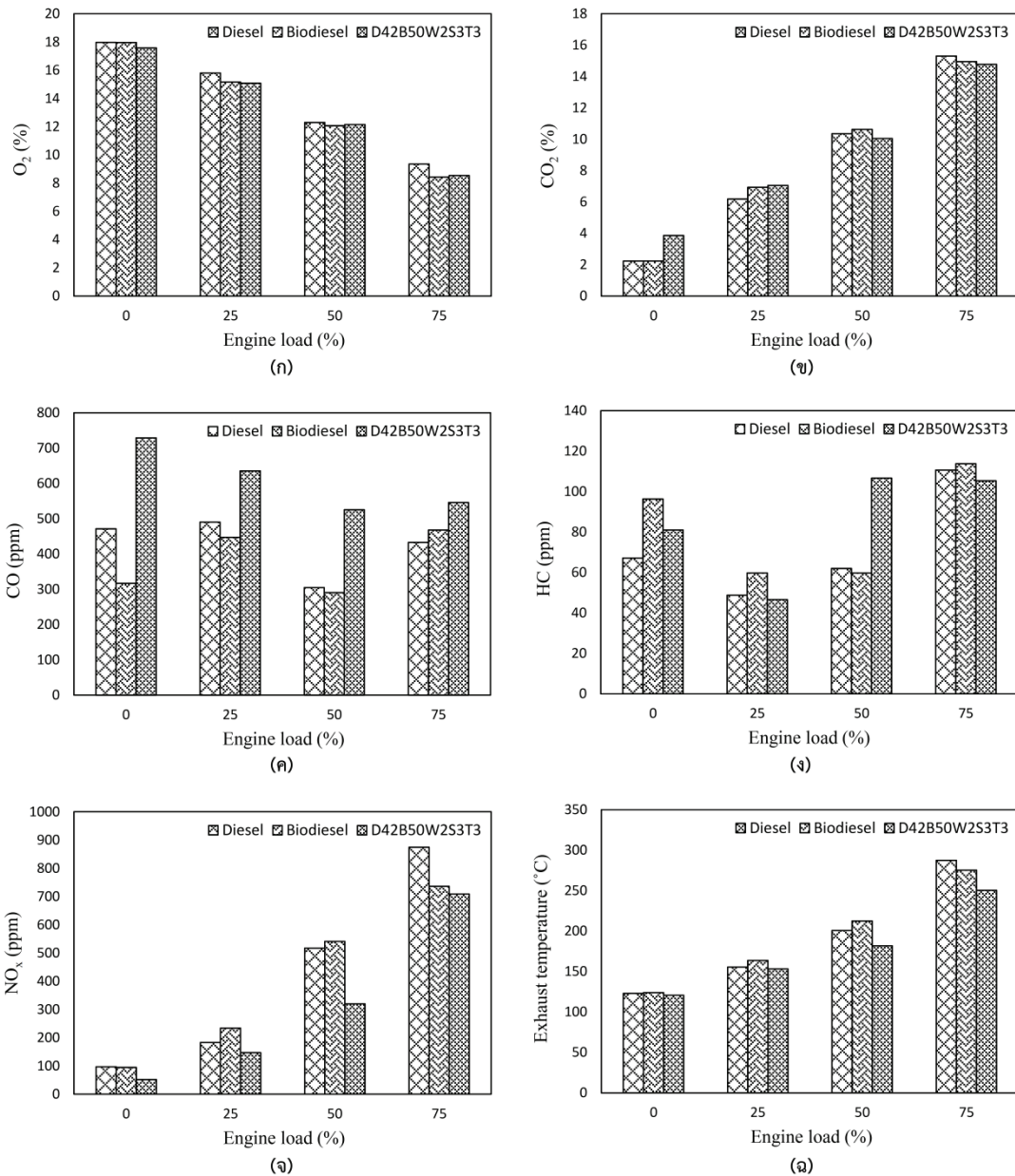
ดีเซล และเชื้อเพลิงอิมัลชันที่ภาระโหลดของเครื่องยนต์เท่ากับ 0% 25% 50% และ 75% ปริมาณการปลดปล่อยของก๊าซ  $\text{NO}_x$  ได้แสดงในรูปที่ 6(จ) พบว่าการปลดปล่อยก๊าซ  $\text{NO}_x$  ของเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิด มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการป้อนภาระโหลดเพิ่มขึ้น ซึ่งเชื้อเพลิงอิมัลชันมีการปลดปล่อยก๊าซ  $\text{NO}_x$  ต่ำกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ที่ทุกภาระโหลด โดยดีเซลมีปริมาณการปลดปล่อยก๊าซ  $\text{NO}_x$  ต่ำกว่าไบโอดีเซลที่ภาระโหลด 0-50% และให้ค่าสูงกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ที่ภาระโหลดเท่ากับ 75% เมื่อพิจารณาที่ภาระโหลดมากที่สุดเท่ากับ 75% พบว่า ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซ  $\text{NO}_x$  ของไบโอดีเซลและเชื้อเพลิงอิมัลชันมีปริมาณต่ำกว่าดีเซลเท่ากับ 15.9% และ 19.0% ตามลำดับ เนื่องจากน้ำมันไบโอดีเซลมีปริมาณออกซิเจนสูงกว่าน้ำมันดีเซลอาจทำให้ปริมาณการปล่อยก๊าซ  $\text{NO}_x$  สูงกว่าน้ำมันดีเซล [25] หรือ อัตราส่วนของน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงอิมัลชันมีส่วนช่วยระบายความร้อนทำให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ต่ำลงส่งผลให้ค่าการปล่อยก๊าซ  $\text{NO}_x$  ลดลง [26] จากการเทียบความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซ  $\text{NO}_x$  กับค่าอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่ได้จากห้องเผาไหม้ ได้แสดงในรูปที่ 6(ข) พบว่าอุณหภูมิห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์มีค่าสูง จะส่งผลทำให้ค่าปริมาณการปลดปล่อย  $\text{NO}_x$  สูงขึ้นด้วยเช่นกัน โดยเชื้อเพลิงอิมัลชันที่มีส่วนผสมของน้ำสามารถช่วยให้อุณหภูมิของห้องเผาไหม้มีค่าลดลง จึงส่งผลให้มีค่าปริมาณการปลดปล่อย  $\text{NO}_x$  ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Davis และคณะ (2012) [27] ได้ศึกษาค่าการปลดปล่อยของก๊าซ  $\text{NO}_x$  ในเครื่องยนต์ดีเซล ของเชื้อเพลิง 6 ชนิด คือ D2, B20, B100, Em-D2, Em-B20 และ Em-B100 ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์เท่ากับ 2,400, 2,900, 3,300 และ

3,600rpm พบว่าเชื้อเพลิง Em-B20 (สัดส่วนคือ ไบโอดีเซลจากไขมันสัตว์และน้ำมันพืช (83:17 vol.%) เท่ากับ 20 vol.% น้ำมันดีเซล เท่ากับ 66.5 vol.% สารลดแรงดึงผิว hypermer A-70 เท่ากับ 3.5 vol.% และน้ำ เท่ากับ 10 vol.%) ให้ค่าการปลดปล่อยก๊าซ  $\text{NO}_x$  ลดลงสูงสุดเท่ากับ 19.9% เมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล (D2, ultralow sulfur) ที่ โหลดสูงสุด ความเร็วรอบของเครื่องยนต์เท่ากับ 2,900 rpm

### 4.3 สมรรถนะของเครื่องยนต์

#### 4.3.1 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (specific fuel consumption, SFC) คือ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงโดยมวลต่อหนึ่งหน่วยที่ผลิตได้จากเครื่องยนต์ภายในเวลาหนึ่งหน่วย จากการทดลองเชื้อเพลิง 3 ชนิดคือ ดีเซล ไบโอดีเซล และเชื้อเพลิงอิมัลชันที่ความเร็วรอบต่างๆ โดยใช้ภาระโหลดของเครื่องยนต์เท่ากับ 0% 25% 50% และ 75% ค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะได้แสดงในรูปที่ 7(ก) พบว่า ค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิด มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการป้อนภาระโหลดเพิ่มขึ้น โดยเชื้อเพลิงอิมัลชันจะให้ค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะต่ำสุดที่ภาระโหลดเท่ากับ 0-25% และให้ค่าสูงกว่าดีเซลเล็กน้อยที่ภาระโหลดเท่ากับ 50-75% ซึ่งไบโอดีเซลให้ค่าสูงกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ที่ทุกภาระ โหลด เมื่อพิจารณาที่ภาระโหลดมากที่สุดเท่ากับ 75% พบว่าเชื้อเพลิงอิมัลชันให้ค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเท่ากับ 1.56 kg/hr สูงกว่าดีเซลเท่ากับ 1.34% และต่ำกว่าไบโอดีเซลเท่ากับ 4.07%



**รูปที่ 6** ผลการปลดปล่อยก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้เชื้อเพลิง ดีเซล ไบโอดีเซล และ D42B50W2S3T3 ที่ภาระโหลดของเครื่องยนต์เท่ากับ 0% 25% 50% 75% (ก) ก๊าซ O<sub>2</sub> (ข) ก๊าซ CO<sub>2</sub> (ค) ก๊าซ CO (ง) ก๊าซ HC (จ) ก๊าซ NO<sub>x</sub> และ (ฉ) อุณหภูมิแก๊สไอเสีย

**4.3.2 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรกจำเพาะ**

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรกจำเพาะ (brake specific fuel consumption, BSFC) คือ ปริมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้ไปต่อหนึ่งหน่วยเวลาต่อกำลังงานเบรกของเครื่องยนต์ [28] จากการทดลองเชื้อเพลิง 3 ชนิดคือ ดีเซล ไบโอดีเซล และเชื้อเพลิงอิมัลชัน ที่ความเร็วรอบต่างๆ โดย

ใช้ภาระโหลดของเครื่องยนต์เท่ากับ 25% 50% และ 75% ค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรกจำเพาะได้แสดงในรูปที่ 7(ข) พบว่า ค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรกจำเพาะของเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิด มีค่าลดลงเมื่อมีการป้อนภาระโหลดเพิ่มขึ้น โดยเชื้อเพลิงอิมัลชันจะให้ค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรกจำเพาะต่ำสุดที่



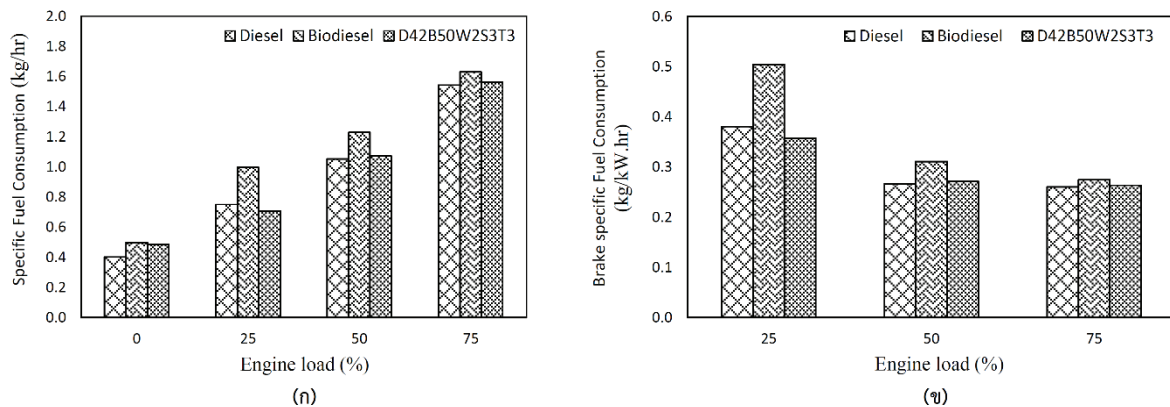
ภาระโหลดเท่ากับ 25% และให้ค่าสูงกว่าดีเซลเล็กน้อยที่ภาระโหลดเท่ากับ 50% ถึง 75% ซึ่งไบโอดีเซลให้ค่าสูงกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆที่ทุกภาระโหลด เมื่อพิจารณาที่ภาระโหลดมากที่สุดเท่ากับ 75% พบว่าเชื้อเพลิงอิมัลชันให้ค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรกจำเพาะเท่ากับ 0.26 kg/kW.hr สูงกว่าดีเซลเท่ากับ 1.32% และต่ำกว่าไบโอดีเซลเท่ากับ 4.07% เนื่องจากค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (lower heating value, LHV) ส่งผลต่อค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรกจำเพาะ ซึ่งเป็นปริมาณความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ด้วยอากาศ (combustion) ของเชื้อเพลิง [13] โดยเชื้อเพลิงอิมัลชันให้ค่าต่ำกว่าดีเซลและสูงกว่าไบโอดีเซล มีค่าเท่ากับ 38169 kJ/kg ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Dhar และ Agarwal (2014) [29] ได้ศึกษาค่าสมรรถนะและค่าการปลดปล่อยก๊าซไอเสียของเชื้อเพลิงดีเซลผสมกับไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชเท่ากับ 5, 10, 20 50 และ 100 vol.% ที่ความดันยังผลเฉลี่ยเบรก (brake mean effective pressure, BMEP) เท่ากับ 1.4 ถึง 6.8 bar และความเร็วรอบของเครื่องยนต์เท่ากับ 1,200 1,500 1,800 2,100 2,400 และ 2,600 rpm พบว่าค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงที่ให้ค่าลดลง ส่งผลต่อค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรกจำเพาะที่สูงขึ้น โดยไบโอดีเซลที่ 100 vol.% ให้ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงน้อยสุด ส่งผลให้ได้ค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรกจำเพาะมากที่สุด

## 5. สรุป

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชัน ดีเซล-ไบโอดีเซล-น้ำ และนำไปทดสอบในเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวชนิดระบบหัวฉีดโดยตรง (direct injection, DI) เพื่อวิเคราะห์หาค่าการปลดปล่อยค่าก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์คือ O<sub>2</sub> CO<sub>2</sub> CO HC NO<sub>x</sub> และสมรรถนะของเครื่องยนต์คือ ค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ และค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรกจำเพาะ ที่ภาระโหลดเท่ากับ 0% 25% 50% และ 75% เปรียบเทียบกับดีเซล ซึ่งได้ศึกษา

ถึงกระบวนการการผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชัน และตรวจสอบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงก่อนนำไปทดสอบในเครื่องยนต์ดีเซล ผลการทดลองพบว่าสูตรอิมัลชัน D42B50W2S3T3 ซึ่งมีส่วนผสมของน้ำเท่ากับ 2% ในเชื้อเพลิงอิมัลชันที่มีส่วนผสมของดีเซลและไบโอดีเซลเท่ากับ 42 และ 50 vol.% โดยน้ำมีส่วนช่วยในการลดค่าการปลดปล่อยก๊าซจากการเผาไหม้ O<sub>2</sub> CO<sub>2</sub> HC และ NO<sub>x</sub> เท่ากับ 8.7% 3.5% 4.7% และ 19.0% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับดีเซลที่ภาระโหลดสูงสุดเท่ากับ 75% ความเร็วรอบเครื่องยนต์เท่ากับ 2,300 rpm ถึงแม้ว่าการเพิ่มปริมาณน้ำจะทำให้การปลดปล่อยก๊าซ CO สูงขึ้นเท่ากับ 26.1% และ 16.6% แต่มีนัยสำคัญมากเมื่อเติมน้ำเข้าไปในเชื้อเพลิงอิมัลชันพบว่า การปลดปล่อยก๊าซ NO<sub>x</sub> ลดลงเท่ากับ 19.0% และ 3.7% เมื่อเทียบกับดีเซลและไบโอดีเซลที่ภาระโหลดสูงสุด เนื่องจากเกิดจากการแตกตัวและระเหยกลายเป็นไอของน้ำซึ่งเฟสภายในของเชื้อเพลิงอิมัลชันภายในห้องเผาไหม้เชื้อเพลิง ปรากฏการณ์นี้จะช่วยในการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเชื้อเพลิงและก๊าซ O<sub>2</sub> มากขึ้น ทำให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ต่ำลงส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงสมบูรณ์ขึ้น

ในด้านสมรรถนะของเครื่องยนต์ พบว่าเชื้อเพลิงอิมัลชันให้ค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะสูงกว่าดีเซลเท่ากับ 1.34% และต่ำกว่าไบโอดีเซลเท่ากับ 4.07% ที่ภาระโหลดสูงสุดเท่ากับ 75% และให้ค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรกจำเพาะสูงกว่าดีเซลเท่ากับ 1.32% และต่ำกว่าไบโอดีเซลเท่ากับ 4.07% ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิงอิมัลชันที่มีส่วนผสมของน้ำสามารถช่วยลดค่าก๊าซ O<sub>2</sub> CO<sub>2</sub> HC และ NO<sub>x</sub> ในเครื่องยนต์และลดสัดส่วนการใช้น้ำมันดีเซลลงได้เท่ากับ 58 vol.% ทำให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น แต่การใช้เชื้อเพลิงอิมัลชัน ดีเซล-ไบโอดีเซล-น้ำ จะส่งผลกระทบต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรกจำเพาะที่สูงขึ้น



รูปที่ 7 ผลการทดลองปล่อยก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้เชื้อเพลิง ดีเซล ไบโอดีเซล และ D42B50W2S3T3 ที่ภาระโหลดของเครื่องยนต์เท่ากับ 0% 25% 50% 75% (ก) ค่า SFC (ข) BSFC

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ภายใต้โครงการการพัฒนาพลังงานทดแทนและการประยุกต์ใช้ในชุมชนสีเขียว (สัญญาเลขที่ ENG590898a และ ENG6105073a) และทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สัญญาเลขที่

ENG601985S ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัย และขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนสถานที่ในการทำวิจัย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] รายงานการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรม ฉบับสมบูรณ์ รหัสโครงการ P-12-01114. การศึกษาการพัฒนาของเทคโนโลยี ยานยนต์ไฟฟ้าและผลกระทบต่อที่เกิดขึ้นสำหรับประเทศไทย. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี(มจธ.) และ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC), 2558.
- [2] Al-Sabagh, A. M., Mostafa, M., Emara, M. R., El-Din, N. and Aly, W. R. Formation of Water-In-Diesel Oil Nano-Emulsions Using High Energy Method and Studying Some of Their Surface Active Properties. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2011; 20(2):17-23.
- [3] El-Din, N., El-Hamouly, S. H., Mohamed, H. M., Mishrif, M. R. and Ragab, A. M. Water-in-Diesel Fuel Nanoemulsions: Preparation, Stability and Physical Properties. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2013; 22(4): 517-530.
- [4] Somnuk, K., Smithmaitrie, P. and Prateepchaikul, G. Two-Stage Continuous Process of Methyl Ester from High Free Fatty Acid Mixed Crude Palm Oil Using Static Mixer Coupled with High-Intensity of Ultrasound. *Energy Conversion and Management*, 2013; 75: 302-310.
- [5] ศูนย์ข่าวพลังงาน. ราคาปาล์มยังคงตก พลังงาน ถก พาณิชย์ ติดตามผลมาตรการช่วยเหลือยกระดับราคา. 2562. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.energynewscenter.com>
- [6] Sanjid, A., Masjuki, H., Kalam, M., Rahman, S., Abedin, M. and Palash, S. Production of Palm and Jatropha Based Biodiesel and Investigation of Palm-Jatropha Combined Blend Properties, Performance, Exhaust Emission and Noise in an Unmodified Diesel Engine. *Journal of Cleaner Production*, 2014; 65(15): 295-303.
- [7] Seifi, M. R., Desideri, U., Antonelli, M., Frigo, S., Beygi, S. R. H., Ghobadiand, B. and Ghorbani, Z. Statistical Evaluation of the Effect of Water Percentage in Water-Diesel

- Emulsion on the Engine Performance and Exhaust Emission Parameters. *Energy*, 2019; 180: 797-806.
- [8] Ithnin, A. M., Noge, H., Kadir, H. A. and Jazair, W. An Overview of Utilizing Water-Indiesel Emulsion Fuel in Diesel Engine and Its Potential Research Study. *Journal of the Energy Institute*, 2014; 84(4): 273-288.
- [9] Yang, W. M., An, H., Chou, S. K., Chua, K. J., Mohan, V., Sivasankaralingma, V., Raman, V., Maghbouli, A. and Li, J. Impact of Emulsion Fuel with Nano-Organic Additives on the Performance of Diesel Engine. *Applied Energy*, 2013; 112: 1206-1212.
- [10] Somnuk, K. and Prateepchaikul, G. Feasibility of Using High-Intensity Ultrasound Assisted Biodiesel Production from Mixed Crude Palm Oil in Two-Step Process. *Advanced Materials Research*, 2014; 875-87: 1687-1692.
- [11] ทฤษฎีปัญหา. ส่วนประกอบของอากาศ. 2562, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://www.trueplookpanya.com/knowledge/content/70935/-sciche-sci->
- [12] Qi, D., Chen, H., Geng, L., Bian, Y. Z. and Ren, X. C. Performance and Combustion Characteristics of Biodiesel–Diesel–Methanol Blend Fuelled Engine. *Applied Energy*, 2010; 87(5): 1679-1686.
- [13] Vellaiyana, S. and Amirthagadeswaran, K. S. (2016). The Role of Water-in-Diesel Emulsion and Its Additives on Diesel Engine Performance and Emission Levels: A Retrospective Review. *Alexandria Engineering Journal*, 2016; 55(3): 2463-2472.
- [14] Jiaqiang, E., Zhanga, Z., Chena, J., Phama, M. H., Zhaoa, X., Penga, Q., Zhanga, B. and Yind, Z. Performance and Emission Evaluation of a Marine Diesel Engine Fueled by Water Biodiesel-Diesel Emulsion Blends with a Fuel Additive of a Cerium Oxide Nanoparticle. *Energy Conversion and Management*, 2018; 169(1): 194-205.
- [15] Khalife, E., Kazerooni, H., Mirsalim, M., Shojaei, T. M., Mohammadi, P., Salleh, A. M., Najafi, B. and Tabatabaei, M. Experimental Investigation of Low-Level Water in Waste-Oil Produced Biodiesel-Diesel Fuel Blend. *Energy*, 2017; 121(15): 331-340.
- [16] Ithnin, A. M., Ahmad, M. A., Bakar, M. A. A., Rajo, S. and Yahya, W.J. Combustion Performance and Emission Analysis of Diesel Engine Fueled with Water-in-Diesel Emulsion Fuel Made from Low-Grade Diesel Fuel. *Energy*, 2015; 90(15): 375-382.
- [17] Alahmer, A., Yamin, J., Sakhrieh, A. and Hamdan, M. A. Engine Performance Using Emulsified Diesel Fuel. *Energy Conversion and Management Energy*, 2010; 51(8): 1708-1713.
- [18] Alahmer, A. Influence of Using Emulsified Diesel Fuel on the Performance and Pollutants Emitted from Diesel Engine. *Energy Conversion and Management Energy*, 2013; 73: 361-369.
- [19] Lee, W. J., Liu, Y. C., Mwangi, F. K., Chen, W. H., Lin, S. L., Fukushima, Y., Liao, C. N. and Wang, L. C. Assessment of Energy Performance and Air Pollutant Emissions in a Diesel Engine Generator Fueled with Water-Containing Ethanol–Biodiesel–Diesel Blend of Fuels. *Energy*, 2011; 36(9): 5591-5599.
- [20] Koc, A. B. and Abdullah, M. Performance and Nox Emissions of a Diesel Engine Fueled with Biodiesel-Diesel-Water Nanoemulsions. *Fuel Processing Technology*, 2013; 109: 70-77.
- [21] Mazlan, N. A., Yahya, W. J., Ithnin, A. M., Hasannuddin, A. K., Ramlan, N. A., Sugeng, D. A., Adib, A. M., Koga, T., Mamat, R. and Azwadi, N. Effects of Different Water Percentages in Non-Surfactant Emulsion Fuel on Performance and Exhaust Emissions of a Light-Duty Truck. *Journal of Cleaner Production*, 2018; 179: 559-566.
- [22] Ghajel, J. and Honnery, D. Heat Release Model for the Combustion of Diesel Oil Emulsions in DI Diesel Engines. *Applied Thermal Engineering*, 2005; 25(14-15): 2072-2085.
- [23] Samec, N., Kegl, B. and Robert, W. D. Numerical and Experimental Study of Water/Oil Emulsified Fuel Combustion in a Diesel Engine. *Fuel*, 2002; 81(16): 2035-2044.
- [24] National Geographic. วิทยาศาสตร์น่ารู้ : 10 ตัวการที่ก่อมลพิษทางอากาศสูงสุด. 2561. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://ngthai.com/science/8134/10-principal-make-air-pollution/>.

- [25] Guzman, R. C., Tang, H., Wadumesthrige, S., Zhou, T., Garcia-Perez, M. D., Ng, K. Y. S. and Salley, S. O. 2009 Quality Survey of Retail Biodiesel Blends in Michigan. *Fuel*, 2010; 29(12): 3662-3667.
- [26] Ghojel, J., Honnery, D. and Khaleefi, K. A. Performance, Emissions and Heat Release Characteristics of Direct Injection Diesel Engine Operating on Diesel Oil Emulsion. *Applied Thermal Engineering*, 2006; 16(17-18): 2132-2141.
- [27] Davis, J. A., Johnson, D. M., Author, E., Edgar, D. W., Wardlow, G. W. and Sadaka, S. NO<sub>x</sub> Emissions and Performance of a Single-Cylinder Diesel Engine with Emulsified and Non-Emulsified Fuels. *Applied Engineering in Agriculture*, 2012; 28(2):179-186.
- [28] Sidhu, M. S., Roy, M. M. and Wang, W. Glycerine Emulsions of Diesel-Biodiesel Blends and Their Performance and Emissions in a Diesel Engine. *Applied Energy*, 2018; 230(15): 148-159.
- [29] Dhar, A. and Agarwal, A. K. Performance, Emissions and Combustion Characteristics of Karanja Biodiesel in a Transportation Engine. *Fuel*, 2014; 119: 70-80.

# การลดข้อบกพร่องที่มาจากการแจ้งข้อร้องเรียน ในงานดัดแปลงรถบรรทุก ตามความต้องการของลูกค้า

## Defects Reduction from The Complaints as Customer Modification Requirements

สมยศ ผ่องใส\* และ จิรพัฒน์ เภาประเสริฐวงศ์

Somyos Phongsai and Jeerapat Ngaoprasertwong

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,  
Chulalongkorn University, Phayathai Road, Patumwan, Bangkok, Thailand, 10330

\*E-mail: punkpink\_me\_za@windowslive.com

\*Telephone Number: +66924864039

### บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดข้อบกพร่องจากข้อร้องเรียนของลูกค้าในงานดัดแปลงรถบรรทุกของบริษัทกรณีศึกษา โดยศึกษาส่วนงานดัดแปลงรถบรรทุกตามความต้องการของลูกค้า ข้อร้องเรียนจากข้อบกพร่องประเภทแชสซีเสียหายเป็นสิ่งที่ถูกแจ้งมากที่สุด ซึ่งส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของผู้ใช้งาน และภาพลักษณ์ที่ไม่ดีต่อบริษัท ผู้วิจัยจึงนำเอาเทคนิคซิกซ์ ซิกม่า (Six Sigma) มาประยุกต์ใช้ ดำเนินงานวิจัยตามหลักการ DMAIC เพื่อปรับปรุงและพัฒนากระบวนการดัดแปลงในส่วนงานเชื่อมโลหะให้มีคุณภาพ โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล  $2^{k-1}$  ( $2^{k-1}$  Factorial Design) เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อเกิดการเกิดข้อบกพร่องอย่างมีนัยสำคัญ และการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบนเคน (Box-Behnken Design) เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม โดยปัจจัยที่ใช้ทำการทดลองมี 5 ปัจจัยคือ กระแสไฟ แรงเคลื่อนไฟ มุมลวดเชื่อม ความเร็วในการเดินลวดเชื่อม และการปฏิบัติตามข้อกำหนดก่อนเชื่อม ผู้วิจัยทำการเก็บข้อมูล และวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติ ผลจากการทดลองพบว่า ปัจจัยกระแสไฟ แรงเคลื่อนไฟ และความเร็วในการเดินลวดเชื่อม ส่งผลกระทบต่อเกิดการเกิดข้อบกพร่องอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีระดับปัจจัยที่เหมาะสมของกระแสไฟ 230 แอมแปร์ แรงเคลื่อนไฟ 26 โวลต์ และความเร็วในการเดินลวดเชื่อม 40 ซม./นาที จากผลของการปรับปรุงครั้งนี้ทำให้สัดส่วนของเสียที่เกิดข้อบกพร่องในกระบวนการดัดแปลงรถบรรทุก ส่วนงานเชื่อมโลหะจาก 0.23% ลดลงเหลือ 0.08% ทำให้ช่วยลดค่าใช้จ่ายงานซ่อมแซมของบริษัทกรณีศึกษาลงได้

**คำสำคัญ:** ซิกซ์ ซิกม่า การออกแบบการทดลอง การดัดแปลงรถบรรทุก ข้อบกพร่อง ข้อร้องเรียน

### ABSTRACT

This research aims to decrease faults from the complaints by the customer from the case study company's truck modification, focusing on customer's order truck modification. The study has shown that damaged chassis have the greatest number of complaints, which negatively affects both safety of users and the company's image. Therefore, the researcher has applied the Six Sigma technique with



DMAIC methods to improve the quality of welding modification process. The 2k-1 Factorial Design has been used to find the significantly fault causing factor and the Box-Behnken Design has been used to find the appropriate level of factors – from the five factors used in the study which are electric current, electromotive force, electrode angle, travel speed and rules of welding observing. The researcher has collected and analyzed statistical significance showing that electric current, electromotive force and travel speed have significantly caused the faults: the appropriate electric current is 230A, the appropriate electromotive force is 26V and the appropriate travel speed is 40 cm/min. This improvement has diminished proportion of faults in welding modification process from 0.23% to 0.08% which resulted in decreased repairing expenses of the case study company.

**Keywords:** Six Sigma, Design, Truck modification, Faults, Complaints

## 1. บทนำ

อุตสาหกรรมผู้ผลิตรถยนต์เพื่อการพาณิชย์มีการแข่งขันทางการตลาดค่อนข้างสูง เป็นผลให้บริษัทจำเป็นต้องพัฒนาผลิตภัณฑ์ออกมาอย่างหลากหลายให้สามารถตอบโจทย์การใช้งานของลูกค้าได้สูงสุด การพัฒนาผลิตภัณฑ์อย่างหนึ่งที่สำคัญคือ งานดัดแปลงรถบรรทุก บริษัทจะทำการดัดแปลงตามความต้องการของลูกค้า ซึ่งในปี 2561 ที่ผ่านบริษัทได้รับแจ้งข้อร้องเรียน (Complaints) เข้ามาจำนวนมาก เนื่องจากรถบรรทุกที่ดัดแปลงออกไปให้ลูกค้านั้น พบข้อบกพร่องของชิ้นส่วนอุปกรณ์ไม่ได้คุณภาพตามมาตรฐาน ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายในการแก้ไขงานที่สูญเปล่า นอกจากนี้ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นแล้ว บริษัทจะสูญเสียภาพลักษณ์ รวมถึงยอดขายที่ลดลงอีกด้วย ปัญหาดังกล่าวจึงถือว่ามีความสำคัญต่อบริษัท

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดข้อบกพร่องประเภทแชสซีเสียหายในงานดัดแปลงรถบรรทุก เพื่อเพิ่มคุณภาพให้กับงานดัดแปลงรถบรรทุก และลดค่าใช้จ่ายในการแก้ไขงานให้กับบริษัทกรณีศึกษา

## 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎี

งานวิจัยฉบับนี้เป็นกรณีศึกษาสภาพปัญหา การเกิดข้อบกพร่อง รวมถึงปัจจัยนำเข้า (Input) เพื่อลดข้อบกพร่องประเภทแชสซีเสียหาย และเพิ่มคุณภาพให้กับงานดัดแปลงรถบรรทุกในส่วนงานเชื่อมโลหะ อย่างหลักแชสซีของรถบรรทุก (Chassis Frame) ผู้วิจัยจึงนำเอา

หลักการของงานเชื่อมโลหะมาวิเคราะห์ และพิจารณาเพื่อหาสาเหตุในการดำเนินการแก้ไข และเทคนิคซิกซ์ ซิกม่า มาเป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการเพื่อเพิ่มคุณภาพงานดัดแปลงรถบรรทุก

### การเชื่อมโลหะ (Welding)

การเชื่อมโลหะเป็นกระบวนการเชื่อมต่อโลหะ 2 ชิ้นขึ้นไป ด้วยการหลอมละลายเนื้อโลหะให้ติดเป็นเนื้อเดียวกัน หรือโดยการเติมลวดเชื่อมเป็นตัวประสานอย่างแข็งแรงและมีประสิทธิภาพ โดยอาศัยความร้อนจากการอาร์ค (Arc) ที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะกับลวดเชื่อม (สมชาย เถาสมบัติ) การเชื่อมโลหะจะถูกแบ่งเป็นประเภทใหญ่ 2 ประเภท ดังนี้

1. การเชื่อมด้วยไฟฟ้า (Arc Welding) หรือการเชื่อมโลหะด้วยการเชื่อมอาร์ค ความร้อนที่ใช้เกิดจากประกายอาร์คระหว่างชิ้นงานและลวดเชื่อม หลอมละลายลวดเชื่อมกับเนื้อโลหะให้ประสานแนวเชื่อมกัน วิธีเชื่อมโลหะโดยการทำให้โลหะหลอมละลายพร้อมกับลวดเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า

2. การเชื่อมด้วยแก๊ส (Gas Welding) คือกระบวนการที่ทำให้โลหะประสานกัน โดยการให้ความร้อนสูงถึง 3,200 องศาเซลเซียส กับโลหะจนถึงอุณหภูมิที่โลหะชนิดนั้นสามารถหลอมละลายได้ เมื่อโลหะหลอมละลายจะรวมตัวเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน (เชิดเชลง ชิดชวนกิจ)

### ซิกซ์ ซิกม่า (Six Sigma)

งานวิจัยนี้นำเอาเทคนิคซิกซ์ ซิกม่า มาเป็นแนวคิดในการปรับปรุงกระบวนการดัดแปลง โดยดำเนินการตามขั้นตอน DMAIC 5 ขั้นตอน ดังนี้ (พิศาล เพลินภูเขียว)

1. การกำหนดปัญหา (Define Phase) ศึกษาข้อมูลการคัดแปลงรถบรรทุกของบริษัทที่ศึกษา โดยพิจารณาจากข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นจากงานคัดแปลงรถบรรทุกตามที่ถูกค้าแจ้งข้อร้องเรียนมาจำนวนมากที่สุดในช่วงปี 2561 มาดำเนินการแก้ไขก่อน และกำหนดขอบเขตของงานวิจัยให้ชัดเจน

2. การวัดเก็บข้อมูล (Measure Phase) ตรวจสอบสภาพข้อบกพร่องและระดมสมอง (Brainstroming) เพื่อหาสาเหตุ และปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องในกระบวนการคัดแปลงด้วยแผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) และวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัด โดยวิเคราะห์ความแม่นยำ (Repeatability) และความเที่ยงตรง (Reproducibility) ของระบบไฟฟ้าที่ใช้ในอุปกรณ์เครื่องเชื่อม และการตรวจสอบความสามารถระบบการวัดของพนักงาน โดยการวัดค่าและแยกแยะข้อมูลออกเป็น ผ่าน (P) และไม่ผ่าน (NG) ตามข้อกำหนด หรือที่เรียกว่า Gage R&R

3. การวิเคราะห์สาเหตุปัญหา (Analysis Phase) นำเอาปัจจัยนำเข้ามาทำการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment หรือ DOE) การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ  $2^k$  โดยกำหนดปัจจัยที่ใช้ทำการทดลอง 5 ปัจจัย แบ่งเป็นระดับ 2 ระดับ คือ ระดับต่ำ (-1) และระดับสูง (+1) โดยทำการทดลองซ้ำจำนวน 2 ครั้ง โดยทำการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติ เพื่อทดสอบหาปัจจัยที่มีนัยสำคัญ และการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบนันเคน เพื่อหาค่าเหมาะสมของปัจจัย

4. การปรับปรุงกระบวนการ (Improve Phase) นำเอาค่าเหมาะสมของปัจจัยที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานทางสถิติมาดำเนินการกำหนดในขั้นตอนการปฏิบัติงานของพนักงานในกระบวนการคัดแปลงรถบรรทุก และทดสอบสมมติฐานทางสถิติ เพื่อยืนยันค่าปัจจัยนำเข้า โดยเปรียบเทียบก่อนและหลังปรับปรุง

5. การติดตาม และควบคุม (Control Phase) กำหนดค่าระดับปัจจัยที่ได้จากการทดลองมากำหนดเป็น

วิธีการปฏิบัติงาน (Work Instruction) ให้กับพนักงานในกระบวนการคัดแปลง จัดทำเป็นคู่มือและจัดอบรมพนักงาน เพื่อให้เกิดทักษะฝีมือการทำงานก่อนปฏิบัติงานจริง

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เคย์ ชิงชล (2543) ได้ศึกษางานบริการในฝ่ายขายของบริษัทจัดจำหน่ายรถบรรทุก โดยการประยุกต์ใช้เทคนิค QFD เพื่อจะปรับปรุงคุณภาพของงานบริการของฝ่ายขาย เริ่มจากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการซื้อรถบรรทุกของลูกค้า การสำรวจความต้องการของลูกค้า ด้วยการออกไปสอบถาม หรือสัมภาษณ์กับลูกค้า ทั้งภายในและภายนอกเพื่อให้ทราบและเข้าใจความต้องการของลูกค้า โดยใช้เทคนิควิธีการแปรหน้าที่เชิงคุณภาพ (Quality Function Deployment หรือ QFD) แบบ Four Phase Model ซึ่งจะประกอบไปด้วย 4 เฟส ในเฟสที่ 1 การวางแผนด้านผลิตภัณฑ์ (Product Planning หรือ House of Quality) จะเก็บรวบรวมข้อมูลความต้องการจากลูกค้าและแปลออกมาให้อยู่ในรูปคุณสมบัติทางเทคนิค เฟสที่ 2 การออกแบบผลิตภัณฑ์ (Product Design หรือ Product Deployment) เป็นขั้นตอนการออกแบบผลิตภัณฑ์ โดยจะทำการแปลคุณสมบัติทางเทคนิคออกมาเป็นคุณสมบัติทางคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เฟสที่ 3 การวางแผนกระบวนการ (Process Planning) จะเริ่มวิเคราะห์และวางแผนกระบวนการดำเนินงาน โดยจะพิจารณาและคัดเลือกกระบวนการที่จะใช้ในการดำเนินงานที่สามารถตอบสนองคุณสมบัติทางด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ และเฟสที่ 4 การวางแผนควบคุมกระบวนการ (Process Control Planning) ซึ่งหลักจากที่ดำเนินงานวิจัยได้ผลลัพธ์ คือ งานบริการลูกค้าให้ได้ข้อมูลครบถ้วน ถูกต้อง และรวดเร็ว อีกทั้งงานด้านการติดตามและการดูแลลูกค้าที่มีคุณภาพ การลดเวลาการรอรับบริการ ข้อมูลที่มีความละเอียดเป็นการสร้างภาพลักษณ์ของบริษัทและสร้างความพึงพอใจของลูกค้าต่อผลิตภัณฑ์

ธีระพงษ์ สำราญ (2559) จากปัญหาของเสียของเหล็กหล่อเหนียวประเภทขนาดผิวดรูปและทรายตกในโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ เมื่อรวมทั้งสองประเภทแล้วมีจำนวนของเสียถึง 78.3% ซึ่งถือว่าเป็นปัญหาหลักของโรงงาน จึงได้ศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต และประยุกต์ใช้แนวคิด ซิกซ์ ซิกม่า (Six Sigma) เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยเริ่มจากการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาด้วยเครื่องมือแผน ผัง ก้างปลา (Fish Bone Diagram) พบว่าข้อบกพร่องประเภทขนาดผิวดรูป มีสาเหตุจากช่องปล่อยทรายเครื่องปั้นไม่สม่ำเสมอและใช้แรงกดแบบทรานซ์น้อยเกินไป ส่วนข้อบกพร่องประเภททรายตก มีสาเหตุมาจาก Pin Bush สึกหรือและการปิดแบบเอียง ซึ่งจากปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อทำให้เกิดข้อบกพร่องประเภทขนาดผิวดรูปและข้อบกพร่องประเภททรายตก จึงได้ดำเนินการออกแบบการทดลองแบบ ไซไนน์ (Shainin) เพื่อเปรียบเทียบหาตำแหน่งที่ดีที่สุด (Best of Best: BOB) ซึ่งหลังจากดำเนินการทดลองโดยใช้ระยะเวลา 3 เดือนพบว่า ข้อบกพร่องประเภทขนาดผิวดรูปลดลงจาก 9.11% เหลือ 1.58% และข้อบกพร่องประเภททรายตกลดลงจาก 4.95% เหลือ 0.60%

พิศาล เพลินภูเขียว (2559) ได้ศึกษาปัญหาของโรงงานผลิตโคมสำหรับเบาะรถยนต์ เช่น ชิ้นงานเป็นหลุม ชิ้นงานฉีกขาด ชิ้นงานฉีดไม่เต็ม เป็นต้น ซึ่งปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นมีจำนวนมาก และจำนวนการซ่อมโคมในการผลิตสูงเกินกว่าที่บริษัทจะยอมรับได้ จึงประยุกต์ใช้เทคนิค ซิกซ์ ซิกม่า (Six Sigma) เข้ามาวิเคราะห์หาสาเหตุของการเกิดปัญหา พบว่าเกิดจากอุณหภูมิของแม่พิมพ์ก่อนที่จะฉีดน้ำยาโคม พนักงานฉีดน้ำยาแม่พิมพ์ปริมาณไม่เท่ากัน และระบบระบายอากาศของแม่พิมพ์ที่ไม่เพียงพอ ซึ่งหลังจากนั้นได้ทำการออกแบบการทดลองเพื่อทดสอบปัจจัยให้ได้ค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดและนำไปใช้ปรับปรุงในระบบ ทำให้สามารถลดปริมาณของเสียทั้งสามประเภทลงได้ โดยคิดเป็น 58.12% ซึ่งทำให้สามารถลดต้นทุนเฉลี่ยต่อเดือนเท่ากับ 12,862 บาท

ต่อเดือน จากการทดลองที่สามารถลดปริมาณของเสียในระบบได้แล้วนั้น จำเป็นต้องควบคุมตัวแปรและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ โดยจัดทำเป็นเอกสารการกำหนดขั้นตอนการปฏิบัติงาน (Visual Management) ในแต่ละกระบวนการ

### 3. วิธีการวิจัยและผลการวิจัย

#### 3.1 การกำหนดปัญหา

การศึกษาข้อมูลข้อร้องเรียน (Complaints) จากลูกค้าของข้อบกพร่องงานดัดแปลงรถบรรทุก (Modification) บริษัทกรมศึกษาในช่วงมกราคมถึงธันวาคมปี 2561 พบว่างานดัดแปลงที่บริษัทดำเนินการดัดแปลงตามความต้องการของลูกค้ามีข้อบกพร่องเกิดขึ้นหลายประเภท ดังแสดงในตารางที่ 1

ซึ่งจากการศึกษาข้อมูลข้อร้องเรียนลูกค้าในงานดัดแปลงรถบรรทุก ช่วงมกราคมถึงธันวาคมปี 2561 พบว่าบันทึกการร้องเรียนข้อบกพร่องประเภทแซสซีเสียหาย จำนวนข้อร้องเรียนมากที่สุด โดยคิดเป็น 35.95% ของข้อร้องเรียนทั้งหมด และทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในงานซ่อมแซมที่สูง เป็นเงิน 10,110,000 บาทต่อปี

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการศึกษาและกำหนดเป้าหมายของงานวิจัยฉบับนี้ คือ การลดข้อบกพร่องประเภทแซสซีเสียหายลง เพื่อลดข้อบกพร่องในงานดัดแปลงรถบรรทุก ของบริษัทกรมศึกษา

#### 3.2 การวัดเก็บข้อมูล

##### 1. การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา

ปัญหาข้อบกพร่องประเภทแซสซีเสียหายที่ลูกค้าแจ้งข้อร้องเรียนเข้ามานั้น ตามเอกสารบันทึกรายงานข้อบกพร่องของฝ่ายรับประกันคุณภาพที่ผ่านการวิเคราะห์ปัญหาข้อบกพร่องประเภทแซสซีเสียหาย พบว่ามีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อทำให้เกิดข้อบกพร่อง 5 ปัจจัย ดังนี้

1. การออกแบบงานตัดต่อแซสซี
2. การคำนวณทางวิศวกรรม การกระจายน้ำหนักของน้ำหนักบรรทุก และการรับน้ำหนักบรรทุกของรอยเชื่อม

3. การเชื่อมโลหะ เครื่องมือ และวิธีการเชื่อม
  4. การใช้งานของลูกค้ำ น้ำหนักบรรทุก และสภาพพื้นที่การใช้งาน
  5. การประกอบตัวถังของตู้ การเจาะรู การตัดปีก
- แชสซี
- เมื่อเก็บ ข้อมูล บันทึกการทำงาน (Work Attendance) หลังจากทำการตรวจสอบสภาพความเสียหายของแชสซี พบว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นจากสาเหตุ

ของการเชื่อมแชสซีมีเปอร์เซ็นต์สูงสุด ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งเมื่อพิจารณาตัวอย่างคุณภาพงานเชื่อมจะเห็นได้ว่ารอยเชื่อมที่แสดงในรูปที่ 1 บริเวณหน้าตัดของจุดหยุดเชื่อม แนวเชื่อมไม่เต็มรอย เป็นต้น

ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงทำการศึกษาขั้นตอนการเชื่อมโลหะ และปรับปรุงขั้นตอนการเชื่อมโลหะให้มีคุณภาพและความแข็งแรงของรอยเชื่อม เพื่อการใช้งานของลูกค้ำที่ปลอดภัย

ตารางที่ 1 ข้อบกพร่องจากงานตัดแปรงรถบรรทุกในช่วงมกราคมถึงธันวาคมปี 2561

ประเภทข้อบกพร่อง	ม.ค.61	ก.พ.61	มี.ค.61	เม.ย.61	พ.ค.61	มิ.ย.61	ก.ค.61	ส.ค.61	ก.ย.61	ต.ค.61	พ.ย.61	ธ.ค.61	รวม (ครั้ง)	สัดส่วน	ค่าใช้จ่าย (บาท/ครั้ง)	รวมค่าใช้จ่าย (บาท)
แชสซีแตก	34	50	87	47	51	72	44	52	78	48	53	58	674	0.230	15,000	10,110,000
รีดดีเสียหาย	20	14	25	25	29	16	5	17	34	11	14	19	229	0.078	1,386	317,394
สามลมรั่ว	4	19	25	18	20	32	21	17	20	4	7	21	208	0.071	800	166,400
สายไฟขาด	5	21	13	19	27	18	10	31	44	14	9	18	229	0.078	2,590	593,110
วาล์วรั่ว	29	11	25	13	24	27	19	10	17	8	10	4	197	0.067	4,500	886,500
โบสถ์กลายตัว	10	12	24	3	15	10	29	17	15	8	2	6	151	0.052	86	12,986
ซิลิโคนฝ้ากรั่ว	7	2	1	0	8	10	7	15	2	0	4	0	56	0.019	1,285	71,960
พื้นสีบาง	10	12	8	16	7	2	15	10	11	9	10	21	131	0.045	2,000	262,000
รวม	119	141	208	141	181	187	150	169	221	102	109	147	1,875	รวม (บาท)		12,420,350
กำลังผลิต	141	192	237	216	269	283	189	239	350	170	207	438	2,930			

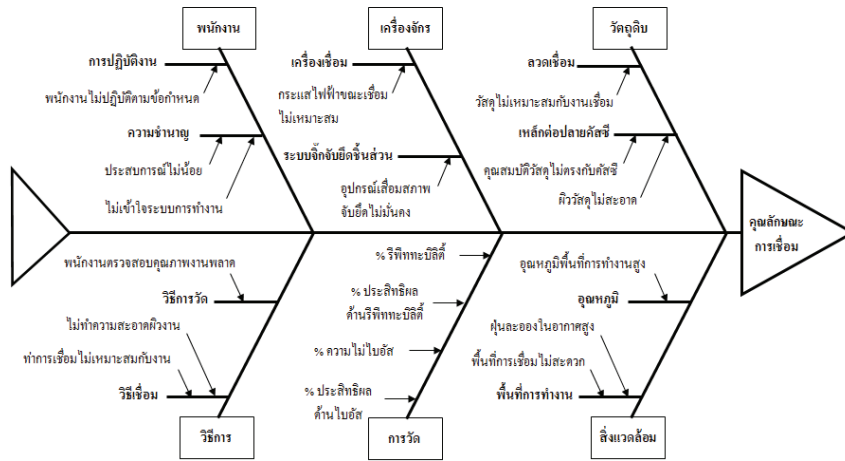
ตารางที่ 2 สาเหตุปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดแชสซีเสียหาย

ลำดับ	ปัจจัย	จำนวน	เปอร์เซ็นต์
1	การออกแบบงานตัดต่อแชสซี	0	0.00
2	การคำนวณทางวิศวกรรม	0	0.00
3	การเชื่อมโลหะ	408	60.53
4	การประกอบตัวถังของตู้	112	16.62
5	การใช้งานของลูกค้ำ	154	22.85
รวมทั้งหมด		674	100.00



รูปที่ 1 ลักษณะความเสียหายของแชสซีในจุดรอยเชื่อม

ในขั้นตอนนี้จึงทำการหาปัจจัยนำเข้าของคุณลักษณะของการเชื่อมโลหะที่มีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อม โดยเริ่มจากการจัดตั้งทีมผู้เชี่ยวชาญที่มีความรู้และประสบการณ์ในสายงานวิศวกรรมและการตัดแปรงมาระดมสมอง (Brain Storming) วิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลทำให้เกิดอาการข้อบกพร่องด้วยเครื่องมือแผนภาพเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) (อาทิคัยหงสพันท์) โดยการใช้หลักการ 5M 1E คือ คน (Man) เครื่องจักร (Machine) วัสดุดิบ (Material) วิธีการ (Method) การวัด (Measurement) และสิ่งแวดล้อม (Environment) (อนุชา กิจสุทธิพงศ์) ดังรูปที่ 2 จากนั้นทำการกำหนดคะแนนระดับความสำคัญของปัจจัยที่ส่งผลต่อข้อบกพร่อง โดยการให้คะแนน 9, 6, 3 และ 1 จากความสำคัญมากไปหาน้อยตามลำดับ ด้วยเมทริกซ์เหตุและผล (Cause and Effect Matrix) ดังแสดงในตารางที่ 3



รูปที่ 2 แผนภาพเหตุและผลของคุณลักษณะรอยเชื่อม

จากคะแนนระดับความสำคัญของปัจจัยที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดข้อบกพร่องประเภทแซสซีเสียหาย โดยปัจจัยที่ถูกนำมาพิจารณาเพื่อปรับปรุงแก้ไขก่อนนั้น 6 ปัจจัย คือ

1. วิธีการเชื่อม
2. วิธีการวัด
3. การปฏิบัติตามข้อกำหนดก่อนงานเชื่อม
4. อุปกรณ์เครื่องเชื่อม
5. ลวดเชื่อม
6. วัสดุเหล็กต่อปลายแซสซี

ตารางที่ 3 ปัจจัยนำเข้าและคะแนนระดับความสำคัญ

ลำดับ	ปัจจัย	คะแนน
1	วิธีการเชื่อม	9
2	การปฏิบัติตามข้อกำหนด	9
3	อุปกรณ์เครื่องเชื่อม	6
4	วิธีการวัด	6
5	ลวดเชื่อม	6
6	วัสดุเหล็กต่อปลายแซสซี	6
7	ความชำนาญของพนักงาน	3
8	ระบบจิกจับชิ้นส่วน	3
9	พื้นที่การทำงาน	1

ผู้วิจัยจึงนำเอาปัจจัยนำเข้าส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่อง ประเภทแซสซีเสียหายมาทำการศึกษา และวิเคราะห์ในกระบวนการต่อไป

### 2. การวิเคราะห์ระบบการวัด

โดยเริ่มต้นจากศึกษาปัจจัยของอุปกรณ์เครื่องเชื่อมที่มีผลกระทบต่อเกิดการเกิดข้อบกพร่อง โดยทำการวิเคราะห์ความสามารถของเครื่องมือด้านความเที่ยงตรง (Accuracy) ด้วยการประเมินผลด้านค่าไบอัส (Bias) เพื่อตรวจสอบความมีเสถียรภาพของเครื่องมือ

การประเมินผลด้านค่าไบอัส มีขั้นตอนดังนี้ (ประภัสสรพรณ สวัสดิ์วงษ์)

1. กำหนดค่ากระแสไฟฟ้า (Current) 250 แอมแปร์ และแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Voltage) 25 โวลต์ ที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมเป็นค่ามาตรฐาน เพื่อใช้ในการตรวจสอบเครื่องเชื่อม
2. วัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ลวดเชื่อมโดยผู้เชี่ยวชาญที่มีความชำนาญการใช้เครื่องมือวัด ค่าละ 10 ครั้ง
3. กำหนดค่าเฉลี่ยเพื่อใช้กำหนดเป็นค่าอ้างอิง (Reference Value)
4. ให้พนักงานทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ลวดด้วยเครื่องมือ ค่าละ 10 ครั้ง
5. กำหนดค่าเฉลี่ย ค่าไบอัส และค่า % ไบอัส ดังตารางที่ 4
6. วิเคราะห์การประเมินผล และกำหนดเกณฑ์ยอมรับ ดังตารางที่ 5



ตารางที่ 4 ผลประเมินความไบอัสของเครื่องมือ

เครื่องมือ	เครื่องเชื่อม 1		เครื่องเชื่อม 2	
ตัวแปร	A	V	A	V
ค่าอ้างอิง	250.70	25.23	250.59	25.20
พจน. ตรวจสอบ	B	B	B	B
ค่าเฉลี่ย ข้อมูล 10 ครั้ง	250.28	25.29	250.33	25.20
ไบอัส	-0.42	0.06	-0.26	0.00
%ไบอัส	1.68	2.40	1.04	0.16

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ผล และการตัดสินใจ

ระดับค่าไบอัส	การตัดสินใจ
ค่า %ไบอัส < 5%	ยอมรับได้
$5\% \leq \text{ค่า \%ไบอัส} \leq 10\%$	ยอมรับได้ โดยขึ้นกับปัจจัยที่เกี่ยวข้อง
ค่า %ไบอัส > 10%	ไม่ยอมรับ ต้องทำการแก้ไข

จากการตรวจสอบค่าไบอัสของเครื่องมือ พบว่าเมื่อวัดค่าความแตกต่างของค่ากระแสไฟฟ้าเท่ากับ 100 แอมแปร์ ค่าวัดเนื่องจากค่าไบอัสของเครื่องมือจะมีค่าเท่ากับ  $\pm 1.68$  แอมแปร์ ซึ่งค่า % ไบอัสที่ได้มีค่า 1.68% < 5% จึงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

การวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัด โดยวิเคราะห์ความแม่นยำ และความเที่ยงตรงของระบบการวัดของพนักงาน การตรวจสอบข้อบกพร่อง ประเภทคุณภาพรอยเชื่อมด้วยวิธีตรวจพินิจ ซึ่งข้อมูลจากการตรวจสอบรอยเชื่อมจะถูกแยกแยะตามข้อกำหนดการตรวจสอบเป็นผ่าน (G) และไม่ผ่าน (NG) โดยใช้ข้อกำหนดตามเกณฑ์มาตรฐานการตรวจสอบรอยเชื่อมโครงสร้างรูปพรรณด้วยวิธีตรวจพินิจ ตามมาตรฐาน AWS D1.1/D1.1M:2006 (American Welding Society) (กรมโยธาธิการ และผังเมือง) โดยกำหนดในขั้นตอนการตรวจสอบของงานเชื่อมเหล็กแชสซีที่มีความหนา 8 มม.

การตรวจสอบความสามารถของระบบการวัดของพนักงาน มีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดพนักงานผู้ทำการตรวจสอบชิ้นงาน ซึ่งมีความสามารถ และมีประสบการณ์ในการคัดแยกคุณภาพของชิ้นงาน จำนวน 3 คน เพื่อทำการทดสอบ และประเมินผล

2. กำหนดจำนวนชิ้นงานตรวจสอบในกระบวนการตัดแปลงตามหลักการของ Fasser and Brettner โดยคัดเลือกชิ้นงานในกระบวนการตัดแปลง จำนวน 12 ชิ้นงาน ดังตารางที่ 6 ซึ่งประกอบไปด้วยชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมไม่สมบูรณ์ มีความเสี่ยงต่อการเกิดปัญหาแชสซีเสียหาย จำนวน 5 ชิ้น และชิ้นงานที่มีสภาพรอยเชื่อมสมบูรณ์อีก 7 ชิ้น โดยไม่มีลักษณะก้ำกึ่ง เนื่องจากรอยเชื่อมที่นำมาพิจารณาสามารถคัดแยกออกได้อย่างชัดเจน คือ สมบูรณ์และไม่สมบูรณ์เท่านั้น

3. การทดลอง กำหนดให้พนักงานแต่ละคนตรวจสอบชิ้นงาน โดยลำดับการตรวจสอบแบบสุ่ม (Random) ประเมินชิ้นงาน คือ ผ่าน (G) หรือไม่ผ่าน (NG) การทดลองพนักงานแต่ละคนจะตรวจสอบชิ้นงานซ้ำ 3 ครั้ง โดยสุ่มลำดับของชิ้นงาน เพื่อไม่ให้พนักงานเกิดการจดจำชิ้นงานตัวอย่าง

4. บันทึกค่าการทดลองเพื่อใช้ในการประเมินความแม่นยำและความเที่ยงตรงของระบบการวัดแยกแยะคุณภาพของชิ้นงาน โดยผลของการทดลองถูกบันทึกลงเอกสาร

5. วิเคราะห์ระบบการวัดของพนักงาน จากการประเมินระบบการวัด โดยคำนวณค่า % ความสามารถในการวัดซ้ำของพนักงานตรวจสอบ (Repeatability) ความไม่ไบอัสของพนักงานตรวจสอบ (Accuracy) % ด้านประสิทธิภาพผลความสามารถในการวัดซ้ำ และ % ด้านประสิทธิภาพความไม่ไบอัส ดังแสดงในตารางที่ 7

6. สรุปผลจากการประเมินระบบการวัด พบว่าพนักงานแต่ละคนมีความสามารถในการวัดซ้ำ และ

ความไม่ไบอัสที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่ 100% ตามบริษัทกำหนด โดยให้เป็นไปตามนโยบายที่ให้ความสำคัญด้านคุณภาพ ความแข็งแรงของสินค้าและความปลอดภัยของลูกค้า จึงไม่ต้องการให้มีข้อบกพร่องถูกส่งไปถึงลูกค้า ดังนั้นบริษัทจึงต้องทำการอบรมพนักงานตรวจสอบ โดยแนะนำวิธีการตรวจสอบตามมาตรฐาน เพื่อให้พนักงานเข้าใจและสามารถตัดสินใจได้ถูกต้อง ดังนั้นหลังจากอบรมให้กับพนักงานและตรวจสอบชิ้นงานใหม่ พบว่าพนักงานสามารถแยกชิ้นงานได้อย่างถูกต้องและมีความสามารถในการวัดซ้ำ และความไม่ไบอัสอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้

ตารางที่ 6 จำนวนชิ้นงานที่ใช้แนะนำในการประเมินผลระบบการวัด

จำนวน พนง. ตรวจสอบ	จำนวนชิ้นงาน	จำนวนการตรวจสอบซ้ำ
1	24	5
2	18	4
มากกว่า/เท่ากับ 3	12	3

ตารางที่ 7 ผลการประเมินระบบการวัด

ก่อนอบรม	% รัฟฟิทีบิลิตีของพนักงานตรวจสอบ	% ความไม่ไบอัสของพนักงานตรวจสอบ	% ด้านประสิทธิภาพด้านรัฟฟิทีบิลิตี	% ด้านประสิทธิภาพด้านไบอัส
พนง. ตรวจสอบ 1	75.00%	75.00%	50.00%	50.00%
พนง. ตรวจสอบ 2	83.33%	83.33%		
พนง. ตรวจสอบ 3	91.67%	91.67%		
<b>หลังอบรม</b>				
พนง. ตรวจสอบ 1	100%	100%	100%	100%
พนง. ตรวจสอบ 2	100%	100%		
พนง. ตรวจสอบ 3	100%	100%		

### 3.3 การวิเคราะห์สาเหตุปัญหา

#### 1. การกำหนดระดับปัจจัยการทดลอง

เมื่อพิจารณาปัจจัยทั้ง 6 ปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา พบว่า

1. วิธีการเชื่อม (สมชาย เถาสมบัติ) ยังมีองค์ประกอบที่เกี่ยวข้อง กับงานเชื่อมโลหะอื่น ๆ อีก โดยสามารถแจกแจงได้ ดังนี้

ก. ลวดเชื่อมที่ใช้เชื่อมงาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 มม. มาตรฐาน AWS A5.28 ER80S-G

ข. ทำเชื่อมที่เหมาะสมกับงาน ทำเชื่อมจะถูกกำหนดเป็นท่าแนวตั้งตามลักษณะของการเชื่อมต่อชนของโลหะ

ค. ค่าปรับแต่งกระแสไฟ

ง. ค่าแรงเคลื่อนไฟ

จ. มุมลวดเชื่อม

ฉ. ความเร็วในการเดินลวดเชื่อม

2. วิธีการวัด จากการวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัดของพนักงานตรวจสอบเพื่อคัดแยกชิ้นงานที่มีคุณภาพและข้อบกพร่องได้อย่างถูกต้อง จึงกำหนดให้อ้างอิงตามข้อกำหนดของเกณฑ์มาตรฐานการตรวจสอบรอยเชื่อม โครงเหล็กรูปพรรณด้วยวิธีตรวจพินิจ ตามมาตรฐาน AWS D1.1/D1.1M:2006

3. การปฏิบัติตามข้อกำหนดก่อนงานเชื่อม

4. อุปกรณ์เครื่องเชื่อม Rilon MIG 500 IGBT

5. ลวดเชื่อม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 มม.

มาตรฐาน AWS A5.28 ER80S-G

6. วัสดุเหล็กต่อปลายแซสซี เหล็กกรีดร้อน เกรด SAPH540 ความหนา 8 มม.

## 2. การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล

ซึ่งหลังจากที่พิจารณาปัจจัยนำเข้าแล้วนั้น การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ  $2^{k-1}$  ( $2^{k-1}$  Factorial Design) 5 ปัจจัย ได้แก่ ค่ากระแสไฟ ค่าแรงเคลื่อนไฟ มุมลวดเชื่อม ความเร็วในการเดินลวดเชื่อม และการปฏิบัติตามข้อกำหนดก่อนงานเชื่อม โดยกำหนดระดับปัจจัยนำเข้าเป็นระดับต่ำ (-1) และ

ระดับสูง (+1) ดังตารางที่ 8 เมื่อกำหนดให้ทำการทดลองแบบ  $2^{5-1}$  Factorial Design ทำการทดลองซ้ำ (Replicate) 2 ครั้ง ดังนั้นจึงมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 32 การทดลอง โดยลำดับการทดลองจะเป็นลักษณะการสุ่มด้วยโปรแกรม Minitab 16 ดังที่แสดงในตารางที่ 9

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ ตามรูปที่ 3 เมื่อพิจารณาปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อข้อบกพร่องประเภทแซสซีเสียหาย ดังรูปที่ 4 พบว่ากระแสไฟและความเร็วในการเดินลวดเชื่อม กราฟมีลักษณะชันขึ้น ซึ่งหมายความว่า เมื่อค่ากระแสไฟ 230 แอมแปร์ และความเร็วในการเดินลวดเชื่อม 40 ซม./นาที ตามลำดับส่งผลกระทบต่อข้อบกพร่องของงานเชื่อมน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญ ปัจจัยแรงเคลื่อนไฟ กราฟมีลักษณะชันลง ซึ่งหมายความว่า เมื่อค่าแรงเคลื่อนไฟ 26 โวลต์ ส่งผลกระทบต่อข้อบกพร่องของงานเชื่อมน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญ และปัจจัยมุมลวดเชื่อม และการปฏิบัติตามข้อกำหนดก่อนงานเชื่อม กราฟมีลักษณะเกือบเป็นเส้นตรง หมายถึงการปรับค่าของทั้งสองปัจจัยจะเป็นค่าระดับสูงหรือต่ำจะไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของข้อบกพร่องประเภทแซสซีเสียหายมากนัก ดังนั้นมุมลวดเชื่อมและการปฏิบัติตามข้อกำหนดก่อนงานเชื่อม เมื่อพิจารณาปัจจัยร่วมดังรูปที่ 5 พบว่าปัจจัยร่วมระหว่างกระแสไฟและแรงเคลื่อนไฟ มีผลกระทบต่อข้อบกพร่องอย่างมีนัยสำคัญชัดเจน คือเมื่อปรับค่ากระแสไฟต่ำและแรงเคลื่อนไฟต่ำ จะส่งผลให้ข้อบกพร่องของงานเชื่อมอยู่ในระดับลดลง

ตารางที่ 8 ระดับปัจจัยที่ทำการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล

ลำดับ	ปัจจัย	สัญลักษณ์	ระดับปัจจัย	
			ระดับต่ำ (-1)	ระดับสูง (+1)
1	กระแสไฟ (แอมแปร์)	A	230	260
2	แรงเคลื่อนไฟ (โวลต์)	B	24	26
3	มุมลวดเชื่อม (องศา)	C	15	30
4	ความเร็วในการเดินลวดเชื่อม (ซม./นาที)	D	40	50
5	การปฏิบัติตามข้อกำหนดก่อนงานเชื่อม	E	ไม่กำหนด	กำหนดการปฏิบัติ

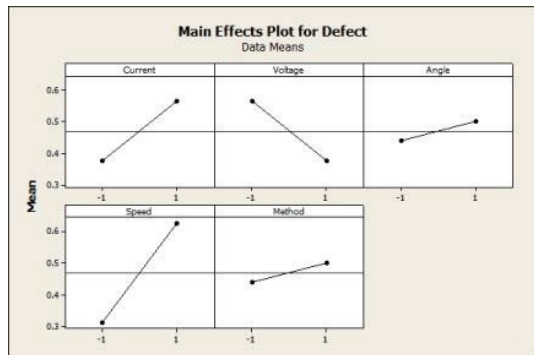
**Factorial Fit: Defect versus Current, Voltage, Angle, Speed, Method**

Estimated Effects and Coefficients for Defect (coded units)

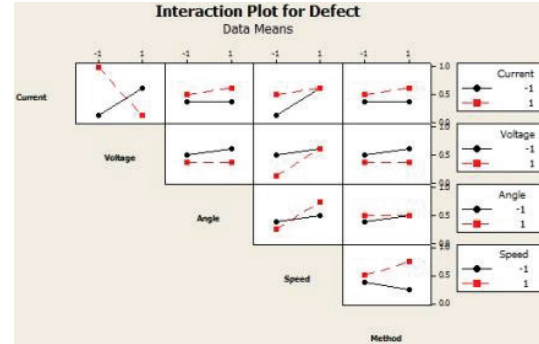
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		0.4687	0.05413	8.66	0.000
Current	0.1875	0.0937	0.05413	1.73	0.102
Voltage	-0.1875	-0.0937	0.05413	-1.73	0.102
Angle	0.0625	0.0312	0.05413	0.58	0.572
Speed	0.3125	0.1563	0.05413	2.89	0.011
Method	0.0625	0.0312	0.05413	0.58	0.572
Current*Voltage	-0.6875	-0.3437	0.05413	-6.35	0.000
Current*Angle	0.0625	0.0313	0.05413	0.58	0.572
Current*Speed	-0.1875	-0.0938	0.05413	-1.73	0.102
Current*Method	0.0625	0.0313	0.05413	0.58	0.572
Voltage*Angle	-0.0625	-0.0312	0.05413	-0.58	0.572
Voltage*Speed	0.1875	0.0937	0.05413	1.73	0.102
Voltage*Method	-0.0625	-0.0312	0.05413	-0.58	0.572
Angle*Speed	0.1875	0.0938	0.05413	1.73	0.102
Angle*Method	-0.0625	-0.0312	0.05413	-0.58	0.572
Speed*Method	0.1875	0.0938	0.05413	1.73	0.102

S = 0.306186 PRESS = 6  
R-Sq = 81.18% R-Sq(pred) = 24.71% R-Sq(adj) = 63.53%

**รูปที่ 3** ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองของข้อบกพร่อง



**รูปที่ 4** การวิเคราะห์ปัจจัยหลักของการเกิดข้อบกพร่องประเภทแซตซีเลียหาย



**รูปที่ 5** การวิเคราะห์ปัจจัยร่วมของการเกิดข้อบกพร่องประเภทแซตซีเลียหาย

**3. การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน**

ผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลนั้น แสดงให้เห็นถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การเกิดข้อบกพร่อง ประกอบด้วยปัจจัย กระแสไฟ แรงเคลื่อนไฟ และความเร็วในการเดินลวดเชื่อม ดังนั้นในขั้นตอนนี้จะเป็นการวิเคราะห์ เพื่อหาค่าความเหมาะสมของปัจจัย

**ตารางที่ 9** ผลการทดลองแบบแฟคทอเรียล 5 ปัจจัย

ลำดับการทดลอง	ลำดับการทดลองมาตรฐาน	ลำดับการทดลอง	ลุ่ม	A (Amp)	V (Volt)	C (Degree)	D (cm./min)	E	ข้อบกพร่องบนชิ้นงาน
1	16	-1	-1	-1	1	-1	ไม่มี		
2	21	-1	1	1	-1	1	ไม่มี		
3	29	-1	-1	1	1	1	มี		
4	15	-1	1	-1	1	1	มี		
5	8	-1	1	-1	1	1	มี		
6	11	1	1	1	-1	-1	ไม่มี		
7	18	-1	1	1	-1	1	ไม่มี		
8	32	-1	-1	-1	-1	1	ไม่มี		
9	31	-1	-1	1	-1	-1	ไม่มี		
10	22	-1	1	1	1	-1	มี		

ตารางที่ 9 (ต่อ) ผลการทดลองแบบแฟคทอเรียล 5 ปัจจัย

ลำดับการทดลอง มาตรฐาน	ลำดับการทดลอง สุ่ม	A (Amp)	V (Volt)	C (Degree)	D (cm./min)	E	ข้อบกพร่อง บนชิ้นงาน
11	10	-1	-1	1	-1	-1	ไม่มี
12	30	-1	-1	-1	-1	1	ไม่มี
13	23	-1	-1	1	1	1	ไม่มี
14	25	1	1	1	1	1	ไม่มี
15	4	1	-1	-1	-1	-1	มี
16	9	1	-1	1	1	-1	มี
17	17	-1	1	-1	-1	-1	ไม่มี
18	2	1	1	-1	1	-1	ไม่มี
19	27	-1	-1	-1	1	-1	ไม่มี
20	5	1	-1	1	-1	1	มี
21	14	-1	1	1	1	-1	มี
22	19	1	1	1	-1	-1	ไม่มี
23	28	1	-1	-1	1	1	มี
24	3	1	1	-1	-1	1	ไม่มี
25	26	-1	1	-1	-1	-1	มี
26	13	1	1	-1	-1	1	ไม่มี
27	20	1	-1	1	1	-1	มี
28	24	1	1	1	1	1	มี
29	1	1	-1	-1	1	1	มี
30	7	1	1	-1	1	-1	ไม่มี
31	6	1	-1	1	-1	1	มี
32	12	1	-1	-1	-1	-1	มี

ตารางที่ 10 ระดับปัจจัยที่ทำการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน

ลำดับ	ปัจจัย	สัญลักษณ์	ระดับปัจจัย		
			ระดับต่ำ (-1)	ระดับ กลาง (0)	ระดับสูง (+1)
1	กระแสไฟ (แอมแปร์)	A	230	240	260
2	แรงเคลื่อนไฟ (โวลต์)	B	24	25	26
3	ความเร็วในการเดินลวดเชื่อม (ชม./นาที)	D	40	45	50



โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบนห์เคน ด้วยปัจจัย 3 ปัจจัย และแบ่งปัจจัยออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ ระดับต่ำ (-1) กลาง (0) และสูง (+1) ดังตารางที่ 10 ปัจจัยมุมลวดเชื่อมกำหนดค่า 15 องศา และกำหนดให้ปฏิบัติตามข้อกำหนดก่อนงานเชื่อม โดยควบคุมค่าให้คงที่ การออกแบบการทดลองจะมีทั้งหมด 15 การทดลอง และใช้ชิ้นงานจำนวน 5 ชิ้นงานต่อ การทดลอง ดังนั้นจะมีการทดลองทั้งหมด 75 ครั้ง โดยลำดับการทดลองจะเป็นลักษณะการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completed Randomization) โดยโปรแกรม Minitab

#### 4. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

หลังจากทำการทดลอง ผลการทดลองที่ได้จะถูกทำการวิเคราะห์การถดถอยของพื้นที่ผิวสะท้อน (Response Surface Regression) ดังแสดงในรูปที่ 6 เมื่อทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของคุณภาพข้อมูลที่เก็บบันทึกมา พบว่าค่า  $R^2$  เท่ากับ 98.55% มีค่ามากกว่า 80% นั้น หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination) สามารถใช้อธิบายความผันแปรของค่าตอบสนองได้อย่างเหมาะสม ดังนั้นสมการถดถอย (Regression Equation) จะมีความน่าเชื่อถือเพียงพอที่จะใช้ทำนายจำนวนของเสียได้

#### Response Surface Regression: Defect versus A, B, D

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for Defect

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1123.81	140.123	8.020	0.000
A	-1.32	0.455	-2.907	0.034
B	-84.67	8.742	-9.686	0.000
D	5.12	1.115	4.589	0.006
A*A	0.00	0.001	3.038	0.029
B*B	1.50	0.165	9.115	0.000
D*D	-0.02	0.007	-3.038	0.029
A*B	0.03	0.011	3.162	0.025
A*D	-0.01	0.002	-6.325	0.001
B*D	0.00	0.032	0.000	1.000

S = 0.316228 PRESS = 8  
R-Sq = 98.55% R-Sq(pred) = 76.74% R-Sq(adj) = 95.93%

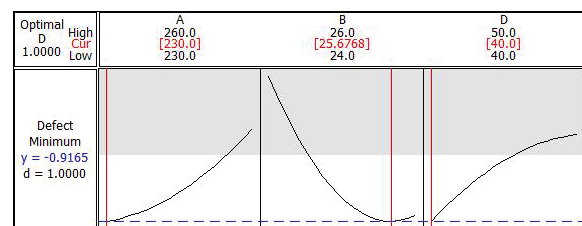
รูปที่ 6 การวิเคราะห์การถดถอยของผิวสะท้อนของการทดลองแบบบ็อกซ์-เบนห์เคน

#### 5. การวิเคราะห์หาค่าความเหมาะสมของปัจจัย

จากสมการถดถอยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีนัยสำคัญ และจำนวนของเสียที่เกิดขึ้นจากข้อบกพร่องประเภทเศษชีเสี่ยหาย ดังแสดงในสมการที่ 1

$$\begin{aligned} \text{Defect} = & 1123.81 - 1.32(\text{Current}) \\ & - 84.67(\text{Voltage}) \\ & + 1.50(\text{Voltage} * \text{Voltage}) \\ & - 0.02(\text{Speed} * \text{Speed}) \\ & + 0.03(\text{Current} * \text{Voltage}) \\ & - 0.01(\text{Current} * \text{Speed}) \quad (1) \end{aligned}$$

เมื่อทำการวิเคราะห์สมการถดถอย เพื่อหาค่าความเหมาะสมของแต่ละปัจจัย โดยใช้หลักการ Response Optimization ของโปรแกรม Minitab ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยจากการคำนวณในการทดลองนี้ คือ กระแสไฟเท่ากับ 230 แอมแปร์ แรงเคลื่อนไฟเท่ากับ 25.6768 หรือ 26 โวลต์ และความเร็วในการเดินลวดเชื่อมเท่ากับ 40 ซม./นาที โดยทำให้ค่าทำนายจำนวนของเสียเกิดขึ้น เท่ากับ -0.9165 ซึ่งภาพรวมของผลตอบสนอง (Composite Desirability: D) มีค่าเท่ากับ 1 หมายถึง ผลตอบสนองได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 7 Response Optimization ค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย

#### 3.4 การปรับปรุงกระบวนการ

จากค่าปัจจัยที่คำนวณได้จากหลักการ Response Optimization ทางผู้วิจัยนำเอาค่าแต่ละปัจจัยและวิธีการมาทำการทดลองในกระบวนการตัดแปรงรถบรรทุกของบริษัทกรณีศึกษาในสำนักงานเชื่อมโลหะ โดยกำหนดการ

ปรับค่าและวิธีการปฏิบัติ และทำการเปรียบเทียบข้อมูลก่อนการปรับปรุง ดังในตารางที่ 11

หลังจากที่ทำการทดลองโดยใช้ค่าปัจจัยนำเข้าที่กำหนดและเก็บข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบจำนวนของเสียที่ส่งผลกระทบต่อข้อบกพร่องประเภทแซสซีเสียหายก่อนและหลังการปรับปรุง โดยข้อมูลที่น่ามาเปรียบเทียบจะแสดงในตารางที่ 12

จากการทดลองโดยการปรับปรุงและควบคุมปัจจัยทั้ง 5 ปัจจัย ที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของงานเชื่อมที่ส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่องประเภทแซสซีเสียหาย

ด้วยชิ้นงานตัวอย่าง 25 ชิ้นงาน และเกิดชิ้นงานที่มีข้อบกพร่องที่คุณภาพไม่ผ่านการตรวจสอบรอยเชื่อมโครงเหล็กรูปพรรณด้วยวิธีตรวจพินิจ ทั้งหมด 2 ชิ้นงาน โดยคิดเป็นสัดส่วนข้อบกพร่อง 0.08% ดังนั้นสรุปได้ว่าการปรับปรุงปัจจัยทั้ง 5 ปัจจัยสามารถลดปริมาณการเกิดข้อบกพร่องประเภทแซสซีเสียหายลงได้ โดยจากข้อมูลการเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุงจะเห็นว่าสัดส่วนข้อบกพร่องก่อนปรับปรุงคิดเป็น 0.72% และหลังปรับปรุง 0.08% ลดลง 0.64%

ตารางที่ 11 ค่าปัจจัยการปรับปรุงกระบวนการในการทดลอง

ปัจจัย	ค่าปัจจุบัน	ค่าปรับปรุง
กระแสไฟ (แอมแปร์)	200	230
แรงเคลื่อนไฟ (โวลต์)	30	26
มุมลวดเชื่อม (องศา)	30	15
ความเร็วในการเดินลวดเชื่อม (ชม.นาที)	60	40
การปฏิบัติตามข้อกำหนดก่อนงานเชื่อม	ไม่มีข้อกำหนดข้อกำหนด	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ตรวจสอบสภาพความสามารถการทำงาน of พนักงาน</li> <li>2. ตรวจสอบวัสดุเหล็กแซสซีเกรด SPH540 ความหนา 8 มม.</li> <li>3. ตรวจสอบคุณภาพ และสภาพของอุปกรณ์ในการเชื่อมให้พร้อมใช้งาน</li> <li>4. ตรวจสอบสภาพแวดล้อมการทำงาน</li> <li>5. ตรวจสอบความสะอาดผิววัสดุก่อนงานเชื่อม</li> <li>6. ตรวจสอบแนวการวางของชิ้นส่วน</li> <li>7. ตรวจสอบขอบรอยต่องานเชื่อม</li> <li>8. ตรวจสอบค่าปรับตั้งก่อนงานเชื่อม</li> </ol>

ตารางที่ 12 ข้อมูลการทดลองเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุง

กระบวนการ	จำนวนการผลิต	จำนวนชิ้นงานที่มีข้อบกพร่อง	สัดส่วนข้อบกพร่อง
ก่อนการปรับปรุง	25	18	0.72
หลังการปรับปรุง	25	2	0.08

### 3.5 การติดตาม และควบคุม

หลังจากที่ทำการทดลองเพื่อยืนยันค่าปัจจัยทั้ง 5 ปัจจัยที่ใช้ปรับปรุงกระบวนการคัดแปรงรถบรรทุกของ บริษัทกรมศึกษาในส่วนงานเชื่อม โลหะ ซึ่งผลการทดลอง ปัจจัยดังกล่าวสามารถลดปริมาณชิ้นงานที่เกิดข้อบกพร่องลงได้ ดังนั้นผู้วิจัยต้องการควบคุมปัจจัยให้อยู่ภายใต้ การควบคุมหลังจากทำการปรับปรุงกระบวนการ โดยจัด ประชุมทีมงานและผู้เชี่ยวชาญ เพื่อเขียนวิธีการปฏิบัติงาน รายละเอียดเพื่อควบคุมกระบวนการแสดงในตารางที่ 13

### 4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเอาหลักการซิกซ์ ซิกม่า มาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ และกระบวนการ ใน ส่วน งาน เชื่อม ของ งาน คัด แปรง รถ บรรทุก โดยดำเนินการตามขั้นตอน 5 ขั้นตอน ประกอบด้วย ขั้นตอนการกำหนดปัญหา รวบรวมข้อมูลข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นจากการแจ้งข้อร้องเรียนของลูกค้า โดยจะเห็นว่า ข้อบกพร่องประเภทแซสซีเลียหายเกิดข้อบกพร่องโดยคิด เป็น 15.83% ของข้อบกพร่องทั้งหมด ซึ่งเมื่อพิจารณาใน ส่วนค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมข้อบกพร่องคิดเป็น 86.32% ของค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมของเสียทั้งหมด ผู้วิจัยจึงกำหนดเป็นเป้าหมายในการลดสัดส่วน

ข้อบกพร่องประเภทแซสซีเลียหาย ขึ้นตอนวัดเก็บข้อมูล ระดมสมองของทีมงานเพื่อหาปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องมากที่สุด โดยใช้แผนภาพเหตุและผล และทำการวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัดของ พนักงานเพื่อการตัดสินใจแยกแยะข้อบกพร่องได้ถูกต้อง ขึ้นตอนการวิเคราะห์สาเหตุปัญหา โดยทำการออกแบบ การทดลองเชิงแฟคทอเรียล 5 ปัจจัย เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อข้อบกพร่องอย่างมีนัยสำคัญ และการทดลอง แบบบล็อกซ์-เบห์นเคน เพื่อคำนวณหาค่าปัจจัยที่เหมาะสม ขึ้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ ดำเนินการควบคุม กระบวนการโดยการกำหนดค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลองมาใช้ปรับปรุงกระบวนการ คือ กระแสไฟ 230 แอมแปร์ แรงเคลื่อนไฟ 26 โวลต์ มุมลวดเชื่อม 15 องศา ความเร็วในการเดินลวดเชื่อม 40 ซม./นาที และการปฏิบัติ ตามข้อกำหนดก่อนงานเชื่อม และขั้นตอนติดตามและ ควบคุม จากสัดส่วนข้อบกพร่องประเภทแซสซีเลียหาย หลังการปรับปรุงสามารถลดลงจาก 0.23% ลงมา เหลือ 0.08% จึงจัดทำเอกสารกำหนดวิธีการปฏิบัติงาน และแผนควบคุมคุณภาพ เพื่อใช้ควบคุมการทำงานและ ตรวจสอบคุณภาพงานเชื่อมของพนักงาน

ตารางที่ 13 แผนการปฏิบัติงานเพื่อการปรับปรุงกระบวนการ

กระบวนการ	ส่วนประกอบของกระบวนการ	ความถี่	ผู้รับผิดชอบ
การฝึกอบรม	การฝึกอบรมสำหรับพนักงานใหม่	ทุกครั้งที่มีการจ้างงานใหม่	หัวหน้าฝ่ายบุคคล
	การอบรมระบบการทำงานสำหรับพนักงาน	2 ครั้ง/ปี	หัวหน้าฝ่ายบุคคล
	การอบรมวิธีการเชื่อมโลหะ	2 ครั้ง/ปี	หัวหน้าฝ่ายผลิต
	การอบรมขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพงานเชื่อมโลหะ	2 ครั้ง/ปี	หัวหน้าฝ่ายควบคุม คุณภาพ
	การประเมินทักษะการทำงาน	2 ครั้ง/ปี	หัวหน้าฝ่ายบุคคล
การตรวจสอบ ชิ้นงาน	การตรวจสอบคุณภาพชิ้นงานก่อนงานเชื่อม	ทุกครั้งของการทำงาน	พนักงาน
	การตรวจสอบคุณภาพชิ้นงานระหว่างงานเชื่อม	ทุกครั้งของการทำงาน	พนักงาน
	การตรวจสอบคุณภาพชิ้นงานหลังงานเชื่อม	ทุกครั้งของการทำงาน	พนักงาน
การควบคุม คุณภาพ	ขั้นตอนการปฏิบัติงานก่อนงานเชื่อม	ทุกครั้งของการทำงาน	พนักงาน
	การตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงาน	ทุกครั้งของการทำงาน	พนักงาน

### เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมโยธาธิการ และผังเมือง. มาตรฐานการตรวจสอบรอยเชื่อม โครงเหล็กรูปพรรณด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย. พิมพ์ครั้งที่ 1, 2551.
- [2] เชิดเชลง ชิตชวนกิจ และคณะ. วิศวกรรมการเชื่อม. สมาคมส่งเสริมความรู้ด้านเทคนิคระหว่างประเทศ, 2524
- [3] เคย์ ยี่งชล. การประยุกต์ใช้เทคนิคคิวเอฟดี เพื่อปรับปรุงคุณภาพของงานบริการในฝ่ายขายของบริษัทจัดจำหน่ายรถบรรทุก. วิทยานิพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [4] ชีระพงษ์ สำราญ. การลดของเสียของเหล็กหล่อเหนียวประเภทขนาดผิกรูปร่างและทรายตกในโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์. วิทยานิพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [5] ประภัสสรธรรม สวัสดิ์วงษ์. การวิเคราะห์ระบบการวัดในโรงงานผลิตกล่องและซุ้มเลนส์. วิทยานิพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556.
- [6] พิศาล เพลินภูเขียว. การลดปริมาณของเสีย และงานซ่อมแซมในกระบวนการผลิตโคมสำหรับเบาะรถยนต์โดยแนวคิดซิกซ์ ซิกม่า. วิทยานิพนธ์, สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา, 2559.
- [7] สมชัย เกาสมบัติ. เทคโนโลยี การเชื่อมและการประสาน. สำนักพิมพ์ ยูไนเต็ทบุ๊กส์, 2529.
- [8] อนุชา กิจสุทธิพงษ์. การลดข้อบกพร่องในกระบวนการเชื่อมโครงเบาะรถยนต์. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, 2555; 23(1).
- [9] อาทิตย์ หงสพันธ์. การลดข้อบกพร่องในกระบวนการพ่นสีตัวถังรถยนต์โดยแนวทางซิกซ์ ซิกม่า. วิทยานิพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [10] Fasser, Y. and Brettner, D. *Process Improvement in Electronics Industry*. John Wiley & Sons Inc., New York, 1992.

# การสำรวจปัจจัยที่มีผลต่อความสำเร็จในการบริหารโครงการ ด้านแหล่งน้ำเชิงพื้นที่

## The Influencing Factors of Successful Area-based Water Resource Management Project

พีร์นิธิ อักษร

Preenithi Aksorn

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

Department of Civil Engineer, Faculty of Engineering, Khon Kaen University  
Mitrphab Highway, Khon Kaen, 40002

E-mail: preenithi@kku.ac.th, Telephone :043-202846

### บทคัดย่อ

บทความนี้ต้องการศึกษาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความสำเร็จในการบริหารโครงการแหล่งน้ำเชิงพื้นที่ โดยเริ่มศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลทั้งจากการทบทวนวรรณกรรมร่วมกับการสำรวจจากโครงการจริง เพื่อให้ได้ข้อมูลทั้งทางด้านทฤษฎีและด้านปฏิบัติอย่างครบถ้วน จากนั้นทำการวัดความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหา โดยวิธีการสัมภาษณ์จากผู้เชี่ยวชาญ 5 ท่าน ที่มีความรู้และประสบการณ์ด้านที่เกี่ยวข้องกับการบริหารโครงการแหล่งน้ำเชิงพื้นที่ โดยการตัดตัวแปรที่ไม่เกี่ยวข้องออกไป ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างแท้จริง จากนั้นนำมาพัฒนาเป็นแบบสอบถาม และทำการปรับปรุงให้เหมาะสม และใช้เก็บข้อมูลกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการบริหารโครงการแหล่งน้ำในพื้นที่ทั่วประเทศ ต่อจากนั้นข้อมูลจะถูกวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS เพื่อหาค่าองค์ประกอบปัจจัย ค่าความผันแปร และการวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระที่มีผลต่อความสำเร็จในการบริหารโครงการแหล่งน้ำเชิงพื้นที่ ผลการวิเคราะห์พบว่าสามารถแบ่งปัจจัยที่มีผลต่อความสำเร็จในการบริหารโครงการด้านแหล่งน้ำเชิงพื้นที่ ออกเป็น 4 กลุ่ม โดยสามารถอธิบายความผันแปรทั้งหมด 57.218% ได้แก่ 1) ด้านแผนปฏิบัติการและความร่วมมือของพื้นที่ 2) ด้านการบริหารและเครื่องมือในการจัดการ 3) ด้านงบประมาณและการจัดหาจากภาครัฐ และ 4) ด้านเครือข่ายและการวิจัยเพื่อพัฒนา โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดคือ ด้านแผนปฏิบัติการและความร่วมมือของพื้นที่ รองลงมาคือ ด้านเครือข่ายและการวิจัยเพื่อพัฒนา ด้านงบประมาณและการจัดหาจากภาครัฐ และด้านการบริหารและเครื่องมือในการจัดการ ตามลำดับ ซึ่งประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้คือ ผู้ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการโครงการด้านแหล่งน้ำเชิงพื้นที่ เช่น ผู้จัดการโครงการ นักบริหารโครงการ นักวางแผน นักวิจัยทั่วไป และนักปฏิบัติงาน สามารถนำปัจจัยเหล่านี้ไปเป็นแนวทางในขั้นตอนของการกำหนดนโยบาย การวางแผน และการปฏิบัติงานจริง โดยเน้นให้ความสำคัญกับปัจจัยที่มีอิทธิพลเหล่านี้มาพิจารณา ก่อน เพื่อให้การบริหารโครงการสำเร็จตามวัตถุประสงค์

**คำสำคัญ:** ปัจจัยความสำเร็จ โครงการด้านแหล่งน้ำ การพัฒนาแหล่งน้ำ แหล่งน้ำเชิงพื้นที่ การบริหารจัดการโครงการ ระบบโครงสร้างพื้นฐาน



## ABSTRACT

The objective of this study is to explore the influencing factors of area-based water resource management to achieve successful project. For the first step, the success factors for project management are reviewed. Then, the pre-survey of pilot projects by interviewing the project managers and project developers have been set up to identify the real significant factors. For this step, the combination between theoretical and practical dimensions is implemented. Next, the discussion with expert persons who have the experience in project management, project development is investigated to validate content. After that, the questionnaire development is applied to investigate the real samples. Afterward, the data analysis is analyzed to produce the expected outcome. The analysis could be identified the influencing factors of successful area-based water resource project. Also, the relationship between these factors could be presented. The result showed that there are four components influencing success of area-based water resource project with a total about 57.2 per cent of the variance in responses were extracted. These components that are: 1) implementation plan and area participation, 2) connection network and research development 3) budget and public provision, and 4) administration and tool management, respectively. The largest influencing component is “administration and tool management” is “academic research on community-based and partnership creation”. The study outcome could be applied to design primary area-based water resource management factors in choosing the proper that project managers, developers, planners and researchers would be used in a real-life context.

**Keywords:** Success factor, water resource project, water resource development, project management, infrastructure management

### 1. บทนำ

แนวคิดของการพัฒนาเชิงพื้นที่ มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อให้ประชาชนในพื้นที่มีชีวิตและความเป็นอยู่ที่ดี หรือเพื่อความเป็นอยู่ที่ดีสุขอย่างยั่งยืนนั่นเอง ดังนั้นรูปแบบและขบวนการพัฒนาเชิงพื้นที่จึงจำเป็นต้องพิจารณาในหลายมิติ ทั้งด้านสังคม เศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม และวัฒนธรรม เป็นต้น [1, 2] จากการศึกษาพบว่า การพัฒนาเชิงพื้นที่ในระยะแรก จำเป็นที่จะต้องมีการสร้างพื้นฐานในการดำรงชีวิตก่อน เพื่อให้ประชาชนสามารถพึ่งพาตัวเองได้ จากนั้นจึงมาพิจารณาสิ่งอำนวยความสะดวกหรือระบบสาธารณูปโภคอื่นๆ ที่จำเป็นในลำดับต่อมา เพื่อให้การพัฒนาเป็นไปอย่างต่อเนื่อง

จากการศึกษาหลักการพัฒนาอย่างยั่งยืน พบว่าแนวคิดของการพัฒนาชุมชนหรือการพัฒนาเชิงพื้นที่ที่ต้องทำทีละขั้นตอน มีการมององค์รวมของทั้งระบบตั้งแต่ขั้นตอนวางแผน การปฏิบัติตลอดจนการติดตามผลอย่างรอบคอบ โดยใช้หลักของการพัฒนาตามเศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม และภูมิสังคม เป็นหลักในการวางยุทธศาสตร์ ซึ่งมีการพัฒนาระบบโครงสร้างพื้นฐานเป็นหัวใจหลักของการขับเคลื่อนการพัฒนา [3] การจัดหาระบบโครงสร้างพื้นฐานให้ชุมชน

หรือพื้นที่ เป็นหน้าที่ของภาครัฐที่ต้องดำเนินการให้สอดคล้องกับแผนพัฒนาในแต่ละพื้นที่ รวมถึงการมีส่วนร่วมของชุมชน ก็เป็นสิ่งที่จะต้องให้ความสำคัญควบคู่กันไป เนื่องจากการพัฒนาจะต้องเกี่ยวข้องกับวิถีชีวิต อาชีพ สังคม และวัฒนธรรม อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ จากการศึกษาพบว่ามิติของการพัฒนาเชิงพื้นที่ หรือพัฒนาเมืองมีหลายมิติด้วยกัน ได้แก่ ด้านเศรษฐกิจ สังคม วัฒนธรรม ทรัพยากรธรรมชาติ สิ่งแวดล้อม เทคโนโลยี ประชาชน ภูมิสังคม การประกอบธุรกิจ ธรรมชาติภูมิปัญญา คุณธรรม การสร้างเครือข่าย และการเปลี่ยนแปลงของโลก ซึ่งล้วนเป็นมิติที่จำเป็นต่อการพัฒนาเมืองทั้งสิ้น [1, 2, 4-14]

เมื่อกล่าวถึงระบบโครงสร้างพื้นฐานหลักที่จำเป็นต่อการพัฒนาเชิงพื้นที่ ระบบโครงสร้างที่สำคัญมีด้วยกันหลายด้านประกอบไปด้วย ระบบไฟฟ้า การวิจัยด้านการเกษตร และการต่อยอด ระบบชลประทาน ถนน ระบบขนส่ง ทรัพยากรส่วนกลาง ตลาดส่งออกและนำเข้า การพัฒนาสันปันน้ำ โภคังและคลังสินค้า การพัฒนาผลิตภัณฑ์นม เกษตรแปรรูป อุตสาหกรรมพื้นบ้านและงานฝีมือ การป้องกันน้ำท่วมและระบายน้ำ โรงเรียน โรงพยาบาล การศึกษา พลังงาน การสื่อสาร และแหล่งน้ำ [3, 15]

### วัตถุประสงค์ของบทความ

1. เพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความสำเร็จการบริหารจัดการโครงการด้านแหล่งน้ำเชิงพื้นที่
2. เพื่อหาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความสำเร็จ ต่อการบริหารจัดการด้านแหล่งน้ำเชิงพื้นที่

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาพบว่าหลักการที่เกี่ยวข้องในการพัฒนาระบบ โครงสร้างพื้นฐานของชุมชนหรือเชิงพื้นที่มีหลักการที่สำคัญอยู่ 2 หลักการคือ (1) หลักการเศรษฐกิจพอเพียง (sufficiency economy) ซึ่งเป็นหลักการตามแนวพระราชดำริของพระบาทสมเด็จพระปรมินทรมหาภูมิพลอดุลยเดช รัชกาลที่ 9 โดยจะเน้นการพึ่งพาตัวเองของชุมชนก่อนที่จะระเบิดจากภายในสู่ภายนอก โดยใช้หลักของภูมิสังคมและการมีส่วนร่วมของชาวชุมชนในการพัฒนาเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งหลักการนี้เหมาะสมกับพื้นที่ หรือ ประเทศที่กำลังพัฒนา หรือ ประเทศที่มีงบประมาณจำกัด ระบบ โครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นจึงมุ่งเน้นที่จะส่งเสริมด้านการประกอบอาชีพหลักของคนในพื้นที่ เพื่อให้ชุมชนพึ่งพาตัวเองได้ก่อน ระบบโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญตามหลักการนี้ ได้แก่ การพัฒนาแหล่งน้ำและการบริหารจัดการที่ดิน การพัฒนาระบบขนส่งสินค้าเกษตรจากผู้ผลิตสู่ผู้บริโภค ศูนย์บริการสุขภาพชุมชน และสถานศึกษา สำหรับประเทศไทยการพัฒนาชุมชนอย่างเป็นรูปธรรม เพื่อให้บรรลุถึงการพัฒนาอย่างยั่งยืนนั้น ได้ดำเนินการผ่านโครงการพระราชดำริที่ได้ดำเนินการไปแล้วมากกว่า 4,000 โครงการ [1, 3] (2) หลักการพัฒนาชุมชนหรือพัฒนาเมืองหรือพื้นที่ขององค์การสหประชาชาติ [2] หลักการนี้ได้รับความนิยมไปทั่วโลก และมีการนำมาใช้อย่างกว้างขวาง เหมาะกับประเทศที่มีงบประมาณ หรือฐานะทางเศรษฐกิจที่ดี เนื่องจากต้องใช้งบลงทุนพัฒนาเกือบทุกระบบควบคู่กันไป ทำให้ใช้งบประมาณการลงทุนที่สูงมาก ดังแสดงรายละเอียดระบบโครงสร้างพื้นฐานในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงแนวคิดของการพัฒนาระบบโครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็น ต่อการพัฒนาพื้นที่ [1, 2, 16]

มิติการพัฒนา	แนวคิดเศรษฐกิจพอเพียง [1, 16]	แนวคิดการพัฒนาอย่างยั่งยืน [2]
ระบบโครงสร้างพื้นฐาน	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การจัดการที่ดินทำกิน</li> <li>- การบริหารจัดการน้ำ</li> <li>- แหล่งเรียนรู้</li> <li>- การจัดการของเสีย</li> <li>- สถานพยาบาล</li> <li>- สถานศึกษา</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- โครงสร้างพื้นฐานด้านสุขภาพ</li> <li>- โครงสร้างพื้นฐานด้านสิ่งแวดล้อม เช่น น้ำอุปโภค, สุขภาพิบาล, ระบบระบาย และการกำจัดของเสีย</li> <li>- การพัฒนาระบบการค้า การส่งออกและนำเข้า</li> <li>- ระบบพลังงาน และระบบขนส่งมวลชน</li> <li>- โครงสร้างพื้นฐานด้านการบริการ เช่น ถนน, ระบบสื่อสาร</li> <li>- สถานศึกษา</li> <li>- การวิจัยด้านวิทยาศาสตร์</li> </ul>

Mancini and Marek [17] ได้ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการพัฒนาโครงการให้สำเร็จในระยะกลาง และยั่งยืนในระยะยาว จากการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่ทำให้โครงการสำเร็จในระยะกลางมี 4 ปัจจัย ได้แก่ 1) ปัจจัยการตอบสนองต่อความต้องการของผู้มีส่วนร่วม 2) ความเชื่อมั่นในโครงการ 3) การวางแผนเพื่อความยั่งยืนอย่างมีประสิทธิภาพ และ 4) ผลลัพธ์ของโครงการ ส่วนปัจจัยที่ทำให้โครงการมีความยั่งยืนในระยะยาว ประกอบไปด้วยปัจจัยทั้งหมด 7 ปัจจัย ได้แก่ 1) ความสามารถของผู้นำ 2) การร่วมมืออย่างมีประสิทธิภาพของชุมชน 3) ความเข้าใจชุมชน 4) การสาธิตผลลัพธ์ของโครงการ 5) กลยุทธ์

การระดมทุน 6) บูรณาการบุคลากร และ 7) ความรับผิดชอบโครงการ

การพัฒนา ระบบ โครงสร้างพื้นฐานเชิงพื้นที่ จำเป็นต้องอาศัยองค์ความรู้ทุกด้าน รวมถึงการบูรณาการองค์ความรู้เหล่านั้นเข้าด้วยกัน ได้แก่ ด้านสังคม เศรษฐกิจ ภูมิสังคม ด้านการเงินและงบประมาณ ด้านข้อมูลและการจัดการข้อมูล ด้านนโยบายและแผน ด้านธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ด้านระบบสาธารณูปโภคและระบบโครงสร้างพื้นฐาน เพื่อนำความรู้มาใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อการพัฒนาโครงการสูงสุด [1, 16, 18, 19] จากการศึกษาพบว่า นโยบายการพัฒนาโดยส่วนมากมาจากส่วนกลางหรือจากระดับบนเป็นหลัก (top-down approach) ระดับนโยบายมีหน้าที่ในการวางยุทธศาสตร์การพัฒนาหรือวางแผนสำหรับการพัฒนาในภาพรวม เพื่อให้ระดับล่างหรือระดับจุลภาคหรือพื้นที่ (bottom-up approach) นำนโยบายการพัฒนาจากส่วนกลางมาประยุกต์เป็นนโยบายที่เหมาะสมกับพื้นที่ ซึ่งขบวนการเหล่านี้จำเป็นต้องอาศัยระบบสาธารณูปโภคหรือระบบโครงสร้างพื้นฐานเป็นเครื่องมือสำคัญในการดำเนินการ [20-23] ปัญหาที่มักจะพบเป็นส่วนใหญ่ก็คือระบบสาธารณูปโภคหรือระบบโครงสร้างพื้นฐาน โดยเฉพาะโครงการด้านแหล่งน้ำ ยังมีไม่เพียงพอที่จะให้บริการประชาชนในพื้นที่ [1, 16] โดยเฉพาะในส่วนภูมิภาค พบว่าระบบโครงสร้างพื้นฐานด้านแหล่งน้ำเป็นปัญหาคอขวดหลักในการพัฒนา ถึงแม้ในระดับนโยบายจากส่วนกลางจะสนับสนุนให้มีการดำเนินการกลุ่มโครงการที่เกี่ยวข้องกับระบบโครงสร้างพื้นฐานและสิ่งอำนวยความสะดวกก็ตาม นโยบายหรือการปฏิบัติในระดับท้องถิ่นที่ต้องอาศัยการพัฒนาเชิงพื้นที่ บางครั้งไม่สอดคล้องกับส่วนกลาง ทำให้ไม่สามารถดำเนินโครงการในส่วนภูมิภาคได้ทั้งหมด อีกทั้งระบบโครงสร้างพื้นฐานบางอย่างไม่สามารถตอบสนองให้การดำเนินโครงการในพื้นที่สามารถดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้การพัฒนา ระบบ โครงสร้างพื้นฐาน ตลอดจนการบริหารโครงการ จำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลสำคัญต่อการพัฒนาโครงการในระยะยาว เพื่อจะได้้นำ

ปัจจัยเหล่านั้นมาใช้เป็นเครื่องมือสำคัญในการดำเนินการให้โครงการประสบความสำเร็จ และมีความยั่งยืน

### 3. วิธีการดำเนินการวิจัย

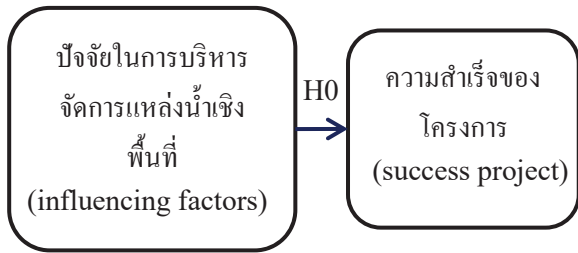
ขั้นตอนการวิจัย เริ่มจากการศึกษาถึงปัจจัยในการบริหารจัดการแหล่งน้ำเชิงพื้นที่ (success factor) จากการทบทวนวรรณกรรม ทบทวนเอกสารโครงการ และการสัมภาษณ์แบบมีโครงสร้าง (structured interview) กับผู้เกี่ยวข้องกับโครงการ ซึ่งขั้นตอนนี้ได้ปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 63 ปัจจัย ขั้นตอนถัดมาทำการวัดความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหา (content validity) โดยใช้การสัมภาษณ์กลุ่มผู้เชี่ยวชาญเป็นผู้ตัดสิน (expert selection) ซึ่งบทความนี้ทำการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 คน เพื่อหาว่าอย่างน้อย 3 ใน 5 เห็นด้วยว่าปัจจัยเหล่านี้เป็นปัจจัยที่มีความเที่ยงตรงตามเนื้อหาที่ทำการวิจัย พบว่ามี 51 ปัจจัยที่มีความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหา ดังแสดงในตารางที่ 2

ในการเลือกผู้เชี่ยวชาญเพื่อทำการสัมภาษณ์นั้น ได้คัดเลือกจากกลุ่มผู้เชี่ยวชาญที่มีประสบการณ์และความรู้ตรงกับขอบเขตงานวิจัย และกำหนดเงื่อนไขผู้เชี่ยวชาญไว้ดังนี้ [16]

- 1) เป็นผู้ที่มีประสบการณ์ตั้งแต่ 15 ปี ขึ้นไป
- 2) ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้อง ในด้านการบริหารโครงการ การพัฒนาโครงการ การวางแผนโครงการ การดำเนินโครงการ หรืออื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง
- 3) เป็นผู้ที่มีความเต็มใจที่จะมีส่วนร่วมในการให้ข้อมูล จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาพัฒนาเป็นแบบสอบถามเพื่อเก็บข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ต่อไป

#### กรอบความคิดในการวิจัย

กรอบความคิดในการวิจัย แสดงถึงความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ในการบริหารจัดการแหล่งน้ำเชิงพื้นที่ (influencing factor) กับความสำเร็จของโครงการด้านแหล่งน้ำเชิงพื้นที่ (success project) โดยสมมติฐานได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 กรอบความคิดในการวิจัย

### สมมติฐานการวิจัย

H0 = ปัจจัยในการบริหารจัดการแหล่งน้ำเชิงพื้นที่ ไม่มีผลต่อความสำเร็จของโครงการด้านแหล่งน้ำเชิงพื้นที่

H1 = ปัจจัยในการบริหารจัดการแหล่งน้ำเชิงพื้นที่ มีผลต่อความสำเร็จของโครงการด้านแหล่งน้ำเชิงพื้นที่

ตัวแปรอิสระ = ปัจจัยในการบริหารจัดการแหล่งน้ำเชิงพื้นที่

ตัวแปรตาม = ความสำเร็จของโครงการด้านแหล่งน้ำเชิงพื้นที่

การพิสูจน์สมมติฐานการวิจัย

ยอมรับ H0 เมื่อ  $\beta = 0$

ปฏิเสธ H0 เมื่อ มี  $\beta > 0$

## 4. กลุ่มตัวอย่างในการเก็บข้อมูล

การเลือกกลุ่มตัวอย่างเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้สำรวจข้อมูลเบื้องต้นในหลาย ๆ ด้านที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาอย่างยั่งยืน ทั้งด้านหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง บทบาทหน้าที่ เช่น หน่วยงานภาครัฐ หน่วยงานท้องถิ่น องค์กรไม่แสวงหากำไร หน่วยงานที่กำกับดูแล โครงการพระราชดำริ หน่วยงานท้องถิ่น และชุมชน ด้านระบบโครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นทั้งด้านแหล่งน้ำ ระบบขนส่ง แหล่งเรียนรู้ งบประมาณ การบริหารจัดการ นโยบายและแผน

จากการศึกษาพบว่ากลุ่มตัวอย่างที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการโครงการแหล่งน้ำเชิงพื้นที่ที่อย่างยั่งยืน มี 3 หน่วยงาน ได้แก่ 1) กรมชลประทาน ซึ่งมีหน้าที่

โดยตรงในการดูแล ดำเนินการ และบริหารจัดการโครงการด้านแหล่งน้ำในแต่ละพื้นที่ที่รับผิดชอบ โดยมีสำนักงานกรมชลประทานกระจายอยู่ทั่วประเทศ 17 แห่ง 2) ศูนย์พัฒนาโครงการหลวง เป็นหน่วยงานที่ดำเนินตามโครงการตามแนวพระราชดำริที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเชิงพื้นที่ โครงการที่ดำเนินการส่วนมากจะเกี่ยวข้องกับด้านแหล่งน้ำ มีศูนย์ดำเนินการ 38 แห่งทั่วประเทศ 3) มูลนิธิฟ้าหลวง โครงการที่ดำเนินส่วนใหญ่มีวัตถุประสงค์มุ่งพัฒนาชุมชน สังคม สิ่งแวดล้อม และวัฒนธรรม ตามหลักการทรงงานของสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวอานันทมหิดล เพื่อสร้างความสุข ความยั่งยืน และความมั่นคง ตลอดจนส่งเสริมผลผลิตชาวเขาไทย [10, 24-26]

นอกจากนี้ ยังมีหน่วยงานอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการน้ำ เช่น กรมทรัพยากรน้ำ ซึ่งเป็นหน่วยงานภาครัฐที่มีภารกิจหลักด้านการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ ทำหน้าที่เสนอแนะนโยบาย จัดทำแผนแม่บท การศึกษาวิจัย พัฒนาอนุรักษ์ และฟื้นฟูแหล่งน้ำ ตลอดจนการส่งเสริมและสนับสนุนการมีส่วนร่วมของประชาชน ให้สอดคล้องกับนโยบายของรัฐบาล [8] หรือ กรมพัฒนาที่ดิน ซึ่งเป็นหน่วยงานในกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ มีหน้าที่ศึกษาสำรวจ วิเคราะห์และวิจัยดินและที่ดินเพื่อกำหนดนโยบาย และวางแผนการใช้ที่ดิน และเพื่อการพัฒนาที่ดิน ให้บริการด้านการวิเคราะห์ ตรวจสอบและให้คำแนะนำเกี่ยวกับดิน น้ำ ปุ๋ย และอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาที่ดิน และถ่ายทอดผลการศึกษา ค้นคว้า วิจัย และให้บริการด้านการพัฒนาที่ดินแก่ส่วนราชการที่เกี่ยวข้องและเกษตรกร [9] ซึ่งไม่ได้นำมาพิจารณาเพื่อเก็บตัวอย่างด้วย เนื่องจากพิจารณาแล้วเกี่ยวข้องกับขอบเขตงานวิจัยแค่บางส่วน

การเก็บข้อมูลเก็บจากเจ้าหน้าที่หรือผู้บริหารที่เกี่ยวข้องกับโครงการ โดยทำหน้าที่ดูแลหรือเกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการด้านแหล่งน้ำในพื้นที่ ได้แก่ ผู้จัดการโครงการ นักบริหารโครงการ นักปฏิบัติการ นักวิจัย และเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องในพื้นที่ ทั้งนี้ไม่รวมประชาชนผู้ได้รับประโยชน์ เนื่องจากต้องการข้อมูลที่เน้นเกี่ยวกับการบริหารจัดการแหล่งน้ำ โดยเก็บข้อมูลในรูปแบบสอบถาม

ตารางที่ 2 ปัจจัยในการบริหารจัดการแหล่งน้ำเชิงพื้นที่จากการทบทวนวรรณกรรมและสำรวจโครงการเบื้องต้น

ปัจจัย	ตัวแปร	อ้างอิง
1. มีโครงการด้านพัฒนาชุมชนเกิดขึ้น	FA01/No	[27]
2. โครงการมีการตอบสนองต่อปัญหาและความต้องการในพื้นที่	FA02	[28]
3. มีการประสานระหว่างนโยบายจากส่วนกลางและความต้องการของชุมชนเข้าด้วยกัน	FA03	[29]
4. มีการวิเคราะห์ จุดแข็ง จุดอ่อน โอกาส และอุปสรรค	FA04	[30]
5. มีขบวนการดำเนินโครงการ ที่ไม่ทำให้สิ่งแวดล้อมเป็นพิษ	FA05/No	[31]
6. มีหน่วยงานอื่น ที่มีความชำนาญให้การสนับสนุน	FA06	[32]
7. มีการวิจัยและพัฒนาที่สามารถนำไปใช้ในเชิงปฏิบัติได้จริง	FA07	[33]
8. มีการพัฒนาเครือข่าย และความร่วมมือกับชุมชนภายนอก	FA08	[34]
9. การพัฒนาโครงการได้คำนึงถึงจุดแข็งและจุดอ่อนของชุมชน	FA09	[35]
10. ชุมชนให้ความร่วมมือและช่วยเหลือในการปฏิบัติงานร่วมกันเป็นอย่างดี	FA10	[36]
11. มีหน่วยงานจากภาครัฐบาลให้การสนับสนุน	FA11	[37]
12. การบูรณาการ ด้านเศรษฐกิจ สังคม สิ่งแวดล้อมและวัฒนธรรม เข้าด้วยกัน	FA12/No	[38]
13. การดำเนินโครงการคำนึงถึงการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม	FA13/No	[39]
14. มีนโยบายที่จะลงทุนด้านสิ่งอำนวยความสะดวกและโครงสร้างพื้นฐาน	FA14	[20]
15. หน่วยงานรัฐในส่วนกลางมีบทบาทและส่วนเกี่ยวข้องกับการดำเนินโครงการ	FA15	[40]
16. การจัดหาหรือก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นให้	FA16	[41]
17. เกิดความร่วมมือในการดำเนินโครงการระหว่างตัวแทนภาครัฐ	FA17	[42]
18. มีแหล่งเงินทุนสนับสนุนในการริเริ่มโครงการ	FA18	[43]
19. ได้รับการจัดสรรและสนับสนุนงบประมาณ	FA19	[44]
20. ส่งเสริมให้มีการจัดตั้งสถาบันการเงินของชุมชน	FA20	[45]
21. การจัดแบ่งส่วนงบประมาณมายังโครงการขณะดำเนินการ	FA20/Key1	[46]
22. การดำเนินโครงการเป็นที่ยอมรับของชุมชนและผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง	FA22	[47]
23. การจัดสรรงบประมาณให้ดำเนินการ หรือซ่อมแซม อย่างต่อเนื่อง	FA23	[48]
24. ข้อมูลที่ได้เพียงพอในการออกแบบและดำเนินโครงการ	FA24	[49]
25. นำความรู้ในท้องถิ่นมาใช้ในโครงการ	FA25/Key2	[50]
26. มีศูนย์ข้อมูลและความรู้ในชุมชนให้บริการ	FA26/Key3	[51]
27. มีศูนย์ข้อมูลและองค์ความรู้สำหรับการเพิ่มผลิตผลการเกษตรให้บริการ	FA27/Key4	[52]
28. ผู้นำชุมชนมีความสามารถในการประสานงาน	FA28/Key5	[17]
29. หน่วยงานที่ดำเนินโครงการมีความน่าเชื่อถือ	FA29	[53]
30. มีการนำระบบการบริหารและการจัดการมาใช้เป็นเครื่องมือในการบริหารโครงการ	FA30	[54]
31. การรักษาความสัมพันธ์ที่ดีระหว่างผู้มีส่วนร่วมกับโครงการทุกฝ่าย	FA31	[55]
32. การจัดตั้งกลุ่ม หรือรวมตัวเป็นกลุ่มขึ้นในชุมชน	FA32	[56]
33. การฝึกงาน ฝึกอบรมทักษะและพัฒนาความชำนาญด้านต่างๆ	FA33	[57]
34. ความเข้าใจภูมิสังคม หรือเข้าใจพื้นที่	FA34	[16]



ตารางที่ 2 (ต่อ) ปัจจัยในการบริหารจัดการแหล่งน้ำเชิงพื้นที่จากการทบทวนวรรณกรรมและสำรวจโครงการเบื้องต้น

ปัจจัย	ตัวแปร	อ้างอิง
35. มีผลผลิตทางการเกษตรตลอดปี	FA35	[16]
36. มีรายได้จากการขายผลผลิตเพิ่มขึ้น	FA36	[16]
37. การอนุรักษ์ป่าไม้ ต้นน้ำลำธาร	FA37/No	[16]
38. การทำเกษตรอินทรีย์	FA38	[16]
39. การจัดตั้งกองทุนด้านแหล่งน้ำ	FA39	[16]
40. การจัดตั้งวิสาหกิจชุมชน หรือสหกรณ์ เพื่อสนับสนุนกิจกรรมด้านแหล่งน้ำในชุมชน	FA40	[16]
41. การสร้างเครือข่ายกับหน่วยงานรัฐ สถาบันการศึกษาหรือเอกชน	FA41	[16]
42. มีแผนพัฒนาและแผนปฏิบัติการของชุมชน	FA42	[58]
43. ชุมชนมีบทบาทและส่วนร่วมในขบวนการตัดสินใจ	FA43	[59]
44. มีการสนับสนุนด้านการเงินจากหน่วยงานหรือสถาบันอื่น	FA44	[45, 60]
45. มีการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานต่างๆ ให้เพียงพอต่อการดำเนินโครงการ	FA45	[23]
46. มีการจัดตั้งกลุ่มของชาวชุมชน หรือมีการดำเนินงานของกลุ่มชุมชน	FA46	[61]
47. มีการพัฒนาทักษะอาชีพ การร่วมมือร่วมใจ และช่วยเหลือซึ่งกันและกันของชุมชน	FA47	[43, 62]
48. เกิดการทำงานร่วมกันระหว่างชุมชนและตัวแทนจากรัฐในหลายส่วนที่เกี่ยวข้อง	FA48	[36]
49. มีข้อมูลในพื้นที่ที่ใช้ประโยชน์ได้จริง หรือมีคู่มือการทำงานในพื้นที่	FA49	[63]
50. มีนักวิจัยที่ทำการศึกษาวิจัยในด้านต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับชุมชนหรือท้องถิ่น	FA50	[64]
51. มีการพัฒนาฝีมือ เสริมสร้างความสามัคคี และการยกระดับจิตใจ ในชุมชน	FA51	[18]
52. มีการนำภูมิปัญญาท้องถิ่นมาประยุกต์ใช้	FA52	การสัมภาษณ์
53. หน่วยงานท้องถิ่นเป็นผู้ริเริ่ม	No	[3]
54. มีหน่วยงานเอกชนเป็นผู้สนับสนุนหลัก	No	[3]
55. มีการกำหนดนโยบายในการใช้พื้นที่อย่างชัดเจน	No	[65]
56. มีการถ่ายทอดเทคโนโลยีที่ทันสมัย	No	[66]
57. มีการส่งเสริมเพื่อการท่องเที่ยว	No	[67]
58. มีการบังคับใช้กฎหมายที่เกี่ยวข้อง	No	[68]
59. มีการส่งเสริมให้ที่ดินเป็นของตนเอง	No	การสัมภาษณ์
60. ได้รับการสนับสนุนทุนจากนานาชาติ	No	การสัมภาษณ์
61. ได้รับการสนับสนุนโดยผู้เชี่ยวชาญจากต่างประเทศ	No	การสัมภาษณ์
62. มีการเผยแพร่ข้อมูลไปสู่นานาชาติ	No	การสัมภาษณ์
63. มีการสร้างเครือข่ายหรือดูงานในต่างประเทศ	No	การสัมภาษณ์

หมายเหตุ: No = ปัจจัยที่ไม่มีความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหา

FA = ปัจจัยที่นำมาพิจารณา

Key = ตัวชี้วัดความสำเร็จ (ได้จากการสัมภาษณ์กลุ่มผู้เชี่ยวชาญและวิเคราะห์)

### 5. การวิเคราะห์และผลการวิจัย

การวิเคราะห์ข้อมูลทำจากแบบสอบถามที่ส่งออกไปทั้งหมด 4,000 ชุด ให้ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องกับการดำเนินโครงการ เช่น ผู้จัดการโครงการ ผู้เชี่ยวชาญในการดำเนินโครงการ นักวิจัย ช่างเทคนิค และชาวบ้านผู้เข้าร่วมโครงการ แต่มีแบบสอบถามที่ตอบกลับอย่างสมบูรณ์และสามารถใช้ได้เพียง 830 ชุด ในการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS version 23 ซึ่งคิดเป็น 20.75% โดยผลการวิเคราะห์สามารถแสดงรายละเอียดได้ตามลำดับดังนี้

ในตารางที่ 3 แสดงข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างที่ทำการสำรวจ จากผู้ตอบแบบสอบถามจำนวน 830 คน พบว่าผู้ตอบแบบสอบถามส่วนมากเป็นผู้ปฏิบัติงานในโครงการถึง 57.7% ส่วนใหญ่จบการศึกษาระดับปริญญาตรี 56.60% ส่วนมากเป็นเพศชาย 72.5% ประสบการณ์ทำงานเฉลี่ย 14.8 ปี และอายุผู้ตอบแบบสอบถามเฉลี่ย 40.4 ปี

จากการวิเคราะห์เมทริกซ์ความสัมพันธ์ (correlation matrix) ที่ค่า p-value = 0.05 เพื่อตรวจสอบค่าความสัมพันธ์ที่ไม่เกิน 0.70 และไม่น้อยกว่า 0.30 พบว่ามีตัวแปร 3 ตัวคือ FA20, FA35 และ FA36 ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ น้อยกว่า 0.30 ทำให้ต้องตัดตัวแปรเหล่านี้ออกก่อนที่จะใช้วิธีการวิเคราะห์ปัจจัย (factor analysis) นอกจากนั้นการวิเคราะห์เพื่อหาค่าเหมาะสมของข้อมูล ซึ่งวัดโดยวิธี KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) and Bartlett's test of sphericity พบว่าค่าที่ได้คือ 0.968 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.70 ซึ่งถือว่าข้อมูลที่ได้มีความเหมาะสมในการทดสอบ Factor analysis และจากการวิเคราะห์ พบค่า Eigenvalues ที่มากกว่า 1.00 มีอยู่ 4 ค่า ทำให้แบ่งกลุ่มปัจจัยความสำเร็จได้ 4 กลุ่ม ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4 และ 5

จากผลการวิเคราะห์พบว่าตัวชี้วัดความสำเร็จของโครงการ (key indicator) ได้แยกพิจารณาต่างหาก โดยพิจารณาเป็นตัวแปรตามหรือผลที่เกิดขึ้น และไม่นำมา

พิจารณารวมกับปัจจัยอิสระหรือปัจจัยสาเหตุ ซึ่งได้แสดงผลการวิเคราะห์ไว้ตามตารางที่ 2 เพื่อให้การพิจารณาปัจจัยความสำเร็จ (success factor) เป็นการพิจารณาเฉพาะปัจจัยสาเหตุแยกจากผลที่เกิดขึ้น เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ตารางที่ 3 แสดงข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างที่ทำการสำรวจ (n = 830)

ตัวแปร	ความถี่ /เฉลี่ย	ร้อยละ
<b>ตำแหน่ง</b>		
ผู้จัดการโครงการ	41	4.9
ผู้เชี่ยวชาญ	77	9.3
นักวิจัย	82	9.9
ผู้ปฏิบัติงานในโครงการ	479	57.7
ชาวบ้านผู้ร่วมโครงการ	151	18.2
<b>การศึกษา</b>		
ปริญญาโท และสูงกว่า	126	15.2
ปริญญาตรี	470	56.6
ต่ำกว่าปริญญาตรี	234	28.2
<b>เพศ</b>		
ชาย	602	72.5
หญิง	228	27.5
<b>ประสบการณ์การทำงาน</b>		
ประสบการณ์เฉลี่ย (ปี)	14.8	std=11.263
<b>อายุ</b>		
อายุเฉลี่ย (ปี)	40.4	std=10.995

ตารางที่ 4 KMO measure and Bartlett's Test

Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy		0.968
Bartlett's Test of Sphericity	Approx. Chi-Square	19341.143
	Df	741
	Sig.	0.000

ตารางที่ 5 แสดงค่า Eigenvalue และ Total Variance

Component	Initial Eigenvalues			Extraction Sums of Squared Loadings			Rotation Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
1	15.994	41.010	41.010	15.994	41.010	41.010	8.241	21.132	21.132
2	3.331	8.542	49.551	3.331	8.542	49.551	6.361	16.309	37.441
3	1.605	4.116	53.667	1.605	4.116	53.667	4.975	12.757	50.198
4	1.385	3.551	57.218	1.385	3.551	57.218	2.738	7.020	57.218
5	.892	2.288	59.506						
6	.871	2.234	61.740						
7	.821	2.105	63.845						
8	.783	2.008	65.854						
9	.724	1.856	67.709						
10	.698	1.790	69.500						
11	.664	1.702	71.201						
12	.636	1.630	72.831						
13	.591	1.515	74.346						
14	.584	1.497	75.843						
15	.545	1.397	77.240						
16	.526	1.350	78.590						
17	.510	1.307	79.897						
18	.485	1.243	81.140						
19	.477	1.222	82.362						
20	.467	1.198	83.560						
21	.450	1.153	84.713						
22	.441	1.130	85.843						
23	.423	1.085	86.927						
24	.417	1.070	87.997						
25	.404	1.036	89.033						
26	.385	.987	90.020						
27	.371	.952	90.973						
28	.354	.907	91.880						
29	.345	.885	92.764						
30	.336	.862	93.626						
31	.317	.814	94.440						
32	.312	.801	95.241						
33	.308	.789	96.030						
34	.294	.754	96.784						
35	.277	.711	97.495						
36	.271	.695	98.190						
37	.255	.653	98.844						
38	.238	.610	99.454						
39	.213	.546	100.000						

Extraction Method: Principal Component Analysis.

จากผลการวิเคราะห์สามารถแบ่งปัจจัยออกเป็น 4 กลุ่ม โดยอธิบายความผันแปรทั้งหมดได้ 57.218% โดยมีรายละเอียดด้านต่าง ๆ ดังนี้

**กลุ่มที่ 1 ด้านแผนปฏิบัติการและความร่วมมือของพื้นที่ (Implementation plan and area participation)** มี 15 ตัวแปร ปัจจัยกลุ่มนี้ส่วนมากจะเน้นไปที่ แผนพัฒนาและแผนการปฏิบัติการในชุมชน การ จัดตั้งกลุ่มเพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการแหล่งน้ำ การนำภูมิปัญญาท้องถิ่นมาใช้ และการให้ความ ร่วมมือของพื้นที่ที่มีปัจจัย “มีนักวิจัยที่ทำการวิจัยใน ด้านต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับชุมชนหรือท้องถิ่น” เป็น ตัวแปรที่มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบสูงสุด (Factor loading) คือ 0.764

**กลุ่มที่ 2 ด้านการบริหารและเครื่องมือในการจัดการ (Administration and tool management)** มี 10 ตัวแปร ปัจจัยกลุ่มนี้จะเน้นไปที่การนำระบบการ บริหารและการจัดการมาใช้เป็นเครื่องมือในการ บริหาร โครงการ การประสานระหว่างนโยบายจาก ส่วนกลางและความต้องการของชุมชนเข้าด้วยกัน และ โครงการมีการตอบสนองต่อปัญหาและความ ต้องการในพื้นที่ โดยมีปัจจัย “การรักษา ความสัมพันธ์ที่ดีระหว่างผู้มีส่วนร่วมกับโครงการ ทุกฝ่าย” เป็นตัวแปรที่มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบ สูงสุดคือ 0.710

**กลุ่มที่ 3 ด้านงบประมาณและการจัดหาจากภาครัฐ (Budget and public provision)** มี ตัว แปร 9 ตัวแปร ปัจจัยกลุ่มนี้เน้นไปที่การจัดสรรและ สนับสนุนงบประมาณ การจัดหาจากภาครัฐ แหล่ง เงินทุนสนับสนุนในการริเริ่ม โครงการ และ หน่วยงานจากภาครัฐบาลให้การสนับสนุน มีปัจจัย “หน่วยงานรัฐในส่วนกลางมีบทบาทและส่วน เกี่ยวข้องกับการดำเนินโครงการ” เป็นตัวแปรที่มี ค่าน้ำหนักองค์ประกอบสูงสุดคือ 0.713

**กลุ่มที่ 4 ด้านเครือข่ายและการวิจัยเพื่อพัฒนา (Connection network and research development)** มี 5 ตัวแปร ปัจจัยกลุ่มนี้เน้นไปที่ การวิเคราะห์ จุดแข็ง จุดอ่อน โอกาส และอุปสรรค การพัฒนาเครือข่าย และความร่วมมือกับชุมชน ภายนอก และการวิจัยและพัฒนาที่สามารถนำไปใช้ ในเชิงปฏิบัติได้จริง โดยมีปัจจัย “มีหน่วยงานอื่นที่มี ความชำนาญให้การสนับสนุน” เป็นตัวแปรที่มีค่า น้ำหนักองค์ประกอบสูงสุดคือ 0.676

จากผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ระหว่างกลุ่มปัจจัยทั้ง 4 กลุ่ม การหาค่าความสัมพันธ์ก็เพื่อตรวจสอบความ เป็นอิสระของตัวแปร เพื่อป้องกัน สภาวะร่วม (Multicollinearity) ตารางที่ 7 แสดงค่าความสัมพันธ์ ระหว่างตัวแปรทั้งหมด พบว่าแสดงค่าความสัมพันธ์ ระหว่างตัวแปรต่ำกว่า 0.80 แสดงว่าไม่มีปัญหาเรื่อง สภาวะร่วม [69]

ตารางที่ 6 แสดงค่า Factor loading และ Variance

No.	Items	Factor loading	Percent of variance explained	Cumulative percent of variance
<b>กลุ่มที่ 1 ด้านแผนปฏิบัติการและความร่วมมือของพื้นที่ (IPA) (15 ตัวแปร)</b>				
FA50	มีนักวิจัยที่ทำการวิจัยในด้านต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับชุมชนหรือท้องถิ่น	0.764		
FA39	การจัดตั้งกองทุนด้านแหล่งน้ำ	0.744		
FA40	การจัดตั้งวิสาหกิจชุมชน หรือสหกรณ์ เพื่อสนับสนุนกิจกรรมด้าน แหล่งน้ำในชุมชน	0.732		

ตารางที่ 6 (ต่อ) แสดงค่า Factor loading และ Variance

No.	Items	Factor loading	Percent of variance explained	Cumulative percent of variance
<b>กลุ่มที่ 1 ด้านแผนปฏิบัติการและความร่วมมือของพื้นที่ (IPA) (15 ตัวแปร)</b>				
FA51	มีการพัฒนาฝีมือ เสริมสร้างความสามัคคี และการยกระดับจิตใจ ในชุมชน	0.732		
FA47	มีการพัฒนาทักษะอาชีพ การร่วมมือร่วมใจ และช่วยเหลือซึ่งกันและ กันของชุมชน	0.699		
FA42	มีแผนพัฒนาและแผนปฏิบัติการของชุมชน	0.695		
FA41	การสร้างเครือข่ายกับหน่วยงานรัฐ สถาบันการศึกษาหรือเอกชน	0.686		
FA44	มีการสนับสนุนด้านการเงินจากหน่วยงานหรือสถาบันอื่น	0.670		
FA52	มีการนำภูมิปัญญาท้องถิ่นมาประยุกต์ใช้	0.654		
FA38	การทำเกษตรอินทรีย์	0.652		
FA46	มีการจัดตั้งกลุ่มของชาวชุมชน หรือมีการดำเนินงานของกลุ่มชุมชน	0.628		
FA45	มีการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานต่างๆ ให้อย่างพอเพียงต่อการ ดำเนิน โครงการ	0.599		
FA48	เกิดการทำงานร่วมกันระหว่างชุมชนและตัวแทนจากรัฐในหลายส่วน ที่เกี่ยวข้อง	0.569		
FA49	มีข้อมูลในพื้นที่ที่ใช้ประโยชน์ได้จริง หรือมีคู่มือการทำงานในพื้นที่	0.563		
FA33	การฝึกงาน ฝึกอบรมทักษะและพัฒนาความชำนาญด้านต่าง ๆ	0.546	21.132	21.132
<b>กลุ่มที่ 2 ด้านการบริหารและเครื่องมือในการจัดการ (ATM) (10 ตัวแปร)</b>				
FA31	การรักษาความสัมพันธ์ที่ดีระหว่างผู้มีส่วนร่วม กับ โครงการทุกฝ่าย	0.710		
FA29	หน่วยงานที่ดำเนิน โครงการมีความน่าเชื่อถือ	0.684		
FA02	โครงการมีการตอบสนองต่อปัญหาและความต้องการในพื้นที่	0.675		
FA22	การดำเนินโครงการเป็นที่ยอมรับของชุมชนและผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง	0.659		
FA30	มีการนำระบบการบริหารและการจัดการมาใช้เป็นเครื่องมือในการ บริหารโครงการ	0.644		
FA32	การจัดตั้งกลุ่ม หรือรวมตัวเป็นกลุ่มขึ้นในชุมชน	0.636		
FA43	ชุมชนมีบทบาทและส่วนร่วมในขบวนการตัดสินใจ	0.594		
FA10	ชุมชนให้ความร่วมมือและช่วยเหลือในการปฏิบัติงานร่วมกันเป็น อย่างดี	0.579		
FA34	ความเข้าใจภูมิสังคม หรือเข้าใจพื้นที่	0.565		
FA03	มีการประสานระหว่างนโยบายจากส่วนกลางและความต้องการของ ชุมชนเข้าด้วยกัน	0.560	16.309	37.441



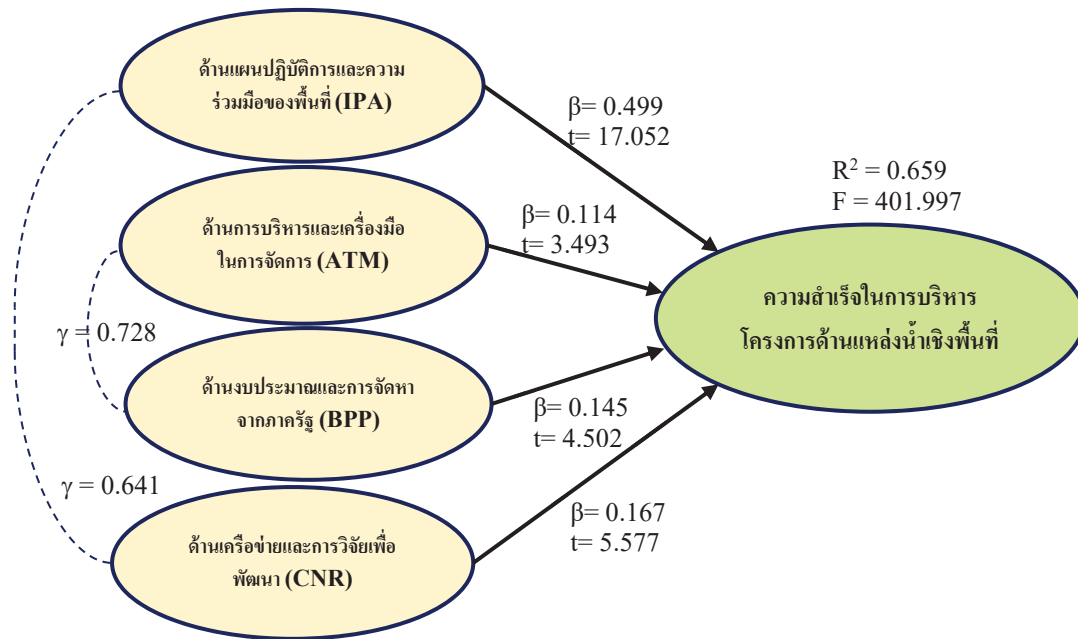
ตารางที่ 6 (ต่อ) แสดงค่า Factor loading และ Variance

No.	Items	Factor loading	Percent of variance explained	Cumulative percent of variance
<b>กลุ่มที่ 3 ด้านงบประมาณและการจัดหาจากภาครัฐ (BPP) (9 ตัวแปร)</b>				
FA15	หน่วยงานรัฐในส่วนกลางมีบทบาทและส่วนเกี่ยวข้องกับ การดำเนินงาน ดำเนินโครงการ	0.713		
FA16	การจัดการหรือก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นให้	0.671		
FA17	เกิดความร่วมมือในการดำเนินโครงการระหว่างตัวแทนภาครัฐ	0.654		
FA19	ได้รับการจัดสรรและสนับสนุนงบประมาณ	0.636		
FA14	มีนโยบายที่จะลงทุนด้านสิ่งอำนวยความสะดวกและโครงสร้าง พื้นฐาน	0.621		
FA18	มีแหล่งเงินทุนสนับสนุนในการริเริ่มโครงการ	0.580		
FA11	มีหน่วยงานจากภาครัฐบาลให้การสนับสนุน	0.555		
FA23	การจัดสรรงบประมาณให้ดำเนินการ หรือซ่อมแซม อย่างต่อเนื่อง	0.543		
FA24	ข้อมูลที่ได้เพียงพอในการออกแบบและดำเนินโครงการ	0.519	12.757	50.198
<b>กลุ่มที่ 4 ด้านเครือข่ายและการวิจัยเพื่อพัฒนา (CNR) (5 ตัวแปร)</b>				
FA06	มีหน่วยงานอื่น ที่มีความชำนาญให้การสนับสนุน	0.676		
FA07	มีการวิจัยและพัฒนาที่สามารถนำไปใช้ในเชิงปฏิบัติได้จริง	0.635		
FA09	การพัฒนาโครงการได้คำนึงถึงจุดแข็งและจุดอ่อนของชุมชน	0.583		
FA04	มีการวิเคราะห์ จุดแข็ง จุดอ่อน โอกาส และอุปสรรค	0.514		
FA08	มีการพัฒนาเครือข่าย และความร่วมมือกับชุมชนภายนอก	0.507	7.020	57.218

ตารางที่ 7 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มปัจจัย

Modes	Mode	IPA	ATM	BPP	CNR
ด้านแผนปฏิบัติการและความร่วมมือของพื้นที่ (IPA)	IPA	1.00			
ด้านการบริหารและเครื่องมือในการจัดการ (ATM)	ATM	.571	1.00		
ด้านงบประมาณและการจัดหาจากภาครัฐ (BPP)	BPP	.606	.728	1.00	
ด้านเครือข่ายและการวิจัยเพื่อพัฒนา (CNR)	CNR	.641	.610	.607	1.00

Note: All correlations are significant at the 0.01 level (2-tailed)



รูปที่ 2 การวิเคราะห์การถดถอยระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม

จากผลการวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple regression) ดังรูปที่ 2 พบว่ามีค่า  $\beta > 0$  จึงปฏิเสธสมมติฐาน  $H_0$  แสดงว่าปัจจัยในการบริหารจัดการแหล่งน้ำเชิงพื้นที่ มีผลต่อความสำเร็จของโครงการด้านแหล่งน้ำเชิงพื้นที่ โดยพบว่าที่ความเชื่อมั่น 65.9% ปัจจัยด้านแผนปฏิบัติการและความร่วมมือของพื้นที่ (Administration and tool management) เป็นปัจจัยที่มีค่า  $\beta$  สูงสุดคือ 0.499,  $t=17.052$  ที่  $p < 0.05$  รองลงมาคือด้านเครือข่ายและการวิจัยเพื่อพัฒนา (Connection network and research development) มีค่า  $\beta=0.167$ ,  $t=5.577$  ที่  $p < 0.05$  ด้านงบประมาณและการจัดหาจากภาครัฐ (Budget and public provision) มีค่า  $\beta=0.145$ ,  $t=4.502$  ที่  $p < 0.05$  และด้านการบริหารและเครื่องมือในการจัดการ (Administration and tool management) มีค่า  $\beta$  ต่ำสุดคือ 0.114,  $t=3.493$  ที่  $p < 0.05$

## 6. สรุปวิจารณ์ และเสนอแนะ

จากผลการวิจัยที่ได้สามารถสรุปเป็นข้อ ๆ ตามวัตถุประสงค์ดังนี้

1. ปัจจัยที่มีผลต่อความสำเร็จในการบริหารจัดการโครงการด้านแหล่งน้ำเชิงพื้นที่ มีทั้งหมด 4 กลุ่มปัจจัย ได้แก่ 1) ด้านแผนปฏิบัติการและความร่วมมือของพื้นที่ 2) ด้านการบริหารและเครื่องมือในการจัดการ 3) ด้านงบประมาณและการจัดหาจากภาครัฐ และ 4) ด้านเครือข่ายและการวิจัยเพื่อพัฒนา

2. ปัจจัยด้านแผนปฏิบัติการและความร่วมมือของพื้นที่ (Administration and tool management) เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อความสำเร็จในการบริหารจัดการโครงการด้านแหล่งน้ำเชิงพื้นที่ รองลงมาได้แก่ ปัจจัยด้านเครือข่ายและการวิจัยเพื่อพัฒนา (Connection network and research development) ปัจจัยด้านงบประมาณและการจัดหาจากภาครัฐ (Budget and public provision) และปัจจัยด้านการบริหารและเครื่องมือในการจัดการ (Administration and tool management) ตามลำดับ

3. ตัวแปรที่มีน้ำหนักองค์ประกอบ (factor loading) สูงสุด สำหรับปัจจัยด้านแผนปฏิบัติการและความร่วมมือของพื้นที่ คือ มีนักวิจัยที่ทำการวิจัยในด้านต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับชุมชนหรือท้องถิ่น

4. รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและความสำเร็จในการบริหารจัดการ โครงการด้านแหล่งน้ำเชิงพื้นที่ แสดงความสัมพันธ์ในทิศทางเชิงบวก

สำหรับการนำผลงานวิจัยนี้ไปใช้ประโยชน์ก็คือ โดยการหาแนวทางเพื่อแนะนำให้ผู้เกี่ยวข้องโครงการด้านแหล่งน้ำเชิงพื้นที่ ทั้งในขั้นตอนการกำหนดนโยบายและขั้นตอนการวางแผน เช่น ผู้บริหาร ผู้จัดการโครงการ นักบริหารโครงการ นักวางแผน หรือนักวิจัยทั่วไป นำปัจจัยที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปดำเนินการและประยุกต์ใช้จริง ในขั้นตอนการวางแผนและการปฏิบัติให้เกิดผล

อย่างจริงจัง เพื่อให้การบริหารระบบโครงสร้างพื้นฐานด้านแหล่งน้ำเชิงพื้นที่ให้เป็นไปอย่างยั่งยืน

ข้อเสนอแนะสำหรับนำผลงานวิจัยนี้ไปใช้ประโยชน์ก็คือในการศึกษาครั้งต่อไป อาจจะเพิ่มวิธีวิจัยเชิงคุณภาพ โดยการวิเคราะห์กรณีศึกษาเพื่อให้ทราบถึงผลของปัจจัยย่อยแต่ละตัวอย่างละเอียด โดยอาจมีการศึกษาด้วยวิธีการสัมภาษณ์แบบเจาะลึก (in-depth interview) กับประชาชนผู้ใช้เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความละเอียดและสามารถอธิบายปรากฏการณ์ได้ดียิ่งขึ้น

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] The Royal Development Projects Board (RDPB). Projects initiated by His Majesty King Bhumibol Adulyadej: Background of the Royal Development Projects. 2005. [Online], Available: <http://kanchanapisek.or.th>.
- [2] United Nations. Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodology 3rd Edition. United Nations, New York, 2007.
- [3] สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. โครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. 2559. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: [www.rdpb.go.th](http://www.rdpb.go.th).
- [4] Holliday, C. O., Stephan, S. and Philip W. Walking the Talk: The Business Case for Sustainable Development. Greenleaf Publishing, Sheffield, 2002.
- [5] Lehtonen, M. The Environmental-Social Interface of Sustainable Development: Capabilities, Social Capital, Institutions. *Ecological Economics*, 2004; 49(2): 199-214.
- [6] Meadowcroft, J., Katharine, N. F. and Joachim S. Developing a Framework for Sustainability Governance in the European Union. *International Journal of Sustainable Development*, 2005; 8(1/2): 3-11.
- [7] Spangenberg, J. H. Environmental Space and the Prism of Sustainability: Frameworks for Indicators Measuring Sustainable Development. *Ecological Indicators*, 2002; 2: 295-309.
- [8] กรมทรัพยากรน้ำ. (2560). [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.dwr.go.th>
- [9] กรมพัฒนาที่ดิน. ประวัติกรมพัฒนาที่ดิน. 2560. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.ldd.go.th>
- [10] เกษม วัฒนชัย. ยูเอ็นนำแนวปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียงเผยแพร่ 114 ประเทศทั่วโลก. 2550. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.manager.co.th/Home/ViewNews.aspx>
- [11] จิรายุ อิศรางกูร ณ อยุธยา. ตามรอยพระยุคลบาทด้วย “ปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง”. 2550. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.Komchadluek.net>
- [12] สุเมธ ตันติเวชกุล. ใต้เบื้องพระยุคลบาท. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มติชน, 2549.
- [13] สุรยุทธ์ จุลานนท์. นายกฯ เดินสายเจนนักลงทุนซัปปี้ 50 เร่งปฏิรูปเศรษฐกิจพอเพียงอำเภอรับต่างชาติ. 2550. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.naewna.com/new.asp>
- [14] อ่ำพล เสนาณรงค์. องคมนตรีของคนไทยช่วยกันเผยแพร่เศรษฐกิจพอเพียง. 2550. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.manager.co.th/QOL/ViewNews.aspx>
- [15] Leungbootnak, N. Improvement of the Rural Infrastructure Development Process in Thai Sub-District Local Government. Asian Institute of Technology, Bangkok, 2005

- [16] มุลนิธิปิดทองหลังพระ สืบสานแนวพระราชดำริ. โครงการบริหารจัดการน้ำอย่างยั่งยืนอ่างเก็บน้ำห้วยคล้าย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ จ.อุดรธานี. 2555. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: [www.pidthong.org](http://www.pidthong.org).
- [17] Mancini, J. A. and Marek, L. I. Sustaining Community-Based Program for Families: Conceptualization and Measurement. *Family Relations*, 2004; 53(4): 339-347.
- [18] Evans, E. A framework for development?, The Growing Role of UK Local Government in International Development. *Habitat International*, 2009; 33: 141-148.
- [19] Seo, J. K. Balanced National Development Strategies: The Construction of Innovation Cities in Korea. *Land Use Policy*, 2009; 26: 649-661.
- [20] Fedderke, J. W. Infrastructure Investment in Long-Run Economy Growth: South Africa 1875-2001. *World Development*, 2006; 34(6): 1037-1059.
- [21] Gandhi, N. M. D., Selladurai, V. and Santhi, P. Unsustainable Development to Sustainable Development: A Conceptual Model. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 2006; 17 (6): 654 - 672.
- [22] Greca, P. L., Rosa, D. L., Martinico F. and Privitera, R. Agricultural and Green Infrastructures: The Role of Non-Urbanized Areas for Eco-Sustainable Planning in a Metropolitan Region. *Environmental Pollution*, 2010; 159(8-9): 1-14.
- [23] Santos, G., Behrendt, H. and Teytelboym, A. Part II: Policy Instruments for Sustainable Road Transport. *Research in Transportation Economics*, 2010; 28: 46-91.
- [24] กรมชลประทาน. สถิติข้อมูลบุคลากรกรมชลประทาน ปีงบประมาณ พ.ศ. 2560. 2560. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.rid.go.th>
- [25] ความเป็นมามูลนิธิโครงการหลวง. 2560. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.thairoyalprojectthailand.com>
- [26] ความเป็นมามูลนิธิแม่ฟ้าหลวง ในพระบรมราชูปถัมภ์. 2553. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: [www.maefahluang.org](http://www.maefahluang.org)
- [27] Aksorn, P. and Charoenngam, C. Factors Influencing Life Cycle Management for Community Infrastructure Development. *International Journal of Project Organisation and Management*, 2016; 8(1): 63-86.
- [28] Aksorn, P. and Charoenngam, C. Sustainability Factors Affecting Local Infrastructure Project: The Case of Water Resource, Water Supply, and Local Market Projects in Thai Communities. *Facilities*, 2015; 33(1/2): 119-143.
- [29] Lin, G. T. R., Shen, Y.C. and Chou, J. National Innovation Policy and Performance: Comparing The Small Island Countries of Taiwan And Ireland. *Technology in Society*, 2010; 32(2): 161-172.
- [30] Terrados, J., Almonacid, G. and Hontoria, L. Regional Energy Planning Through SWOT Analysis and Strategic Planning Tools. *Impact on Renewable Development, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007; 11: 1275-1287.
- [31] Klevas, V., Streimikiene, D. and Kleviene, A. Sustainable Assessment of the Energy Project Implementation in Regional Scale. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009; 13: 155-166.
- [32] Peterson, P.J., bin Mokhtar, M., Chang, C. and Krueger, J. Indicators as a Tool for the Evaluation of Effective National Implementation of the Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals (GHS). *Journal of Environmental Management*, 2010; 91: 1202-1208.
- [33] Joseph, C., Gunton, T. I. and Day, J. C. Implementation of Resource Management Plans: Identifying Keys to Success. *Journal of Environment Management*, 2008; 88: 594-606.
- [34] Campo, P. C., Mendoza, G. A. and Guizol, P. Exploring Management Strategies for Community-Base Forests Using Multi-Agent Systems: A Case Study in Palawan, Philippines. *Journal of Environment Management*, 2009; 90: 3607-3615.
- [35] Nasuchon, N. and Chareles, A. Community Involvement in Fisheries Management: Experiences in the Gulf of Thailand Countries. *Marine Policy*, 2010; 34: 163-169.

- [36] Fleeger, W. E., and Becker, M. L. Creating and Sustaining Community Capacity for Ecosystem-Based Management: Is Local Government the Key?. *Journal of Environmental Management*, 2008; 88: 1396-1405.
- [37] McFadden, K. W. and Barnes, C. The Implementation of An Ecosystem Approach to Management within a Federal Government Agency. *Marine Policy*, 2009; 33: 156-163.
- [38] Mitchell, D., Clarke, M. and Baxter, J. Evaluation Land Administration Project in Developing Countries. *Land Use Policy*, 2008; 25: 464-473.
- [39] Azerrad, J. M. and Nilon, C. H. An Evaluation Agency Conservation Guidelines to Better Address Planning Efforts by Local Government. *Landscape and Urban Planning*, 2006; 77: 255-262.
- [40] Shan, C. and Yai, T. (2011). Public involvement requirements for infrastructure planning in China, *Habitat International*, vol. 35, pp. 158-166.
- [41] Mauricio, A. Q., Lins, E. S. and Alvarenga, M. B. A National Residue Control Plan from the Analytical Perspective-The Brazilian Case. *Analytica Chimica Acta*, 2009; 637(1/2): 333-336.
- [42] Chakrabarti, S., Majumder, A. and Chakrabarti, S. Public-Community Participation in Household Waste Management in India: An Operational Approach. *Habitat International*, 2009; 33: 125-130.
- [43] Kamara, L., Milstien, J. B., Patyna, M., Lydon, P., Levin, A. and Brenzel, L. Strategies for Financial Sustainability of Immunization Programs: A Review of the Strategies from 50 National Immunization Program Financial Sustainability Plans. *Vaccine*, 2008; 26: 6171-6726.
- [44] Wen, W., Wang, W.K. and Wang, C.H. A Knowledge-Based Intelligent Decision Support System for National Defense Budget Planning. *Expert Systems with Applications*, 2005; 28: 55-66.
- [45] George, G. and Prabhu, G. N. Developmental Financial Institutions as Technology Policy Instruments: Implications for Innovation and Entrepreneurship in Emerging Economies. *Research Policy*, 2003; 32: 89-108.
- [46] Eedlenbruch, K., Thoyer, S., Grelot, F., Kast, R. and Enjolras, G. Risk-sharing Policies in the Context of the French Flood Prevention Action Programs. *Journal of Environmental Management*, 2009; 91(12): 363-369.
- [47] Ashby, K. J. and Burgoyne, C.B. The Financial Practices and Perceptions Behind Separate Systems of Household Financial Management. *The Journal of Socio-Economics*, 2009; 38: 519-529.
- [48] Frow, N., Marginson, D. and Ogden, S. "Continuous" Budgeting: Reconciling Budget Flexibility with Budgetary Control. *Accounting, Organizations and Society*, 2010; 35, pp. 444-461.
- [49] Omekwu, C.O. National Agricultural Information Management System in Nigeria: A Conceptual Framework. *Library Review*, 2003; 52(9): 444-451.
- [50] Raymond, C. M., Fazey, I., Reed, M. S., Stringer, L. C., Robinson, G. M. and Evely, A. C. Integrating Local and Scientific Knowledge for Environmental Management. *Journal of Environmental Management*, 2010; 91: 1766-1777.
- [51] Ferguson, J., Huysman, M. and Soekijad, M. Knowledge Management in Practice: Pitfalls and Potentials for Development. *World Development*, 2010; 38(12): 1797-1810.
- [52] Peskircioglu, N. MpM's Productivity Improvement Project Approach in Provinces. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 2008; 57(6): 440-448.
- [53] Jabareen, Y. and Carmon, N. Community of Trust: A Socio-Cultural Approach for Community Planning. *Habitat International*, 2010; 34(4): 446-453.
- [54] Kumar, R. and Markeset, T. Implementation and Execution of Industrial Service Strategy. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 2006; 12(2): 105-117.
- [55] Perez, A. Fisheries Management at the Tri-National Border Between Belize, Guatemala and Honduras. *Marine Policy*, 2009; 33: 195-200.
- [56] Lilley, D. and Hinduja, S. Officer Evaluation in the Community Policing Context. *Policing: An International Journal of Police Strategy & Management*, 2006; 29(1): 19-37.



- [57] Collins, M. E. Evaluating Child Welfare Training in Public Agencies: Status and Prospects. *Evaluation and Program Planning*, 2008; 31: 241-246.
- [58] Busscher, T., Tillema, T. and Arts, J. In Search of Sustainable Road Infrastructure Planning Reference Build on Historical Policy Shifts?. *Transport Policy*, 2015; 42: 42-51.
- [59] Varol, C., Ercoskun, O. Y. and Gurer, N. Local Participatory Mechanisms and Collective Actions for Sustainable Urban Development in Turkey. *Habitat International*, 2011; 35(1), pp. 9-16.
- [60] Vries, B. J. M. and Peterson, A. C. Conceptualizing Sustainable Development: An Assessment Methodology Connecting Values, Knowledge, Worldviews and Scenarios. *Ecological Economics*, 2009; 68: 1006-1019.
- [61] Sharp, J. S., Agnitsch, K., Ryan, V. and Flora, J. Social Infrastructure and Community Economic Development Strategies: The Case of Self-Development and Industrial Recruitment in Rural Iowa. *Journal of Rural Studies*, 2002; 18(4): 405-417.
- [62] Rehan, R., Unger, A. J. A., Knight, M. A. and Haas, C. T. Financially Sustainable Management Strategies for Urban Wastewater Collection Infrastructure - Implementation of a System Dynamics Model. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014; 39: 102-115.
- [63] Brent, A. C. and Labuschagne, C. An Appraisal of Social Aspects in Project and Technology Life Cycle Management in the Process Industry. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 2007; 18(4): 413-426.
- [64] Bodorkos, B. and Pataki, G. Linking Academic and Local Knowledge: Community-Based Research and Service Learning for Sustainable Rural Development in Hungary. *Journal of Cleaner Production*, 2009; 17: 1123-1131.
- [65] Reidsma, P., König, H., ShuyiFeng, S., Bezlepkina, I., Nesheime, I., Bonin, M., Sghaier, M., Purushothaman, S., Sieber, S., Ittersum, M. K. V. and Brouwer, F. Methods and Tools for Integrated Assessment of Land Use Policies on Sustainable Development in Developing Countries. *Land Use Policy*, 2011; 28: 604-617.
- [66] Martinsions, M. G., Leung, A. K. Y. and Loh, C. Technology Transfer for Sustainable Development: Environmentalism and Entrepreneurship in Hong Kong. *International Journal of Social Economics*, 1996; 23 (9): 69-96.
- [67] Connell, J., Page, S. and Bentley, T. Toward Sustainable Tourism Planning in New Zealand: Monitoring Local Government Planning under the Resource Management Act. *Tourism Management*, 2009; 30: 867-877.
- [68] Geng, Y. and Doberstein, B. Greening Government Procurement in Developing Countries: Building Capacity in China. *Journal of Environmental Management*, 2008; 88: 932-938.
- [69] Allison, P. D. Multiple Regression. Pine Forge Press, Thousan Oaks, California, 1999.



# การลดเวลานำและชิ้นงานระหว่างกระบวนการผลิต ในการผลิตชิ้นส่วนตู้รถเข็นโดยใช้เทคนิคการผลิตแบบลีน

## Production Lead Time and Work in Process Reduction in Trolley Production Using Lean Manufacturing Techniques

ศศิชา ทองอำไพ\* และ วิมลลิน เหล่าศิริถาวร

Sasicha Thongampai and Wimalin Laosirithawon

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

239 ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

Department of Industrial Engineering, Chiang Mai University

239 Huay Kaew Road, Muang District, Chiang Mai, Thailand, 50200

E-mail : \*Moohammy\_236@hotmail.com and Wimalin@hotmail.com

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดเวลานำ และจำนวนชิ้นงานระหว่างกระบวนการผลิตในแผนกการประกอบด้านบนของตู้รถเข็นอาหารบนเครื่องบิน โดยประยุกต์ใช้แนวคิดแบบลีน และใช้เทคนิคที่เกี่ยวข้องเพื่อลดความสูญเปล่าในกระบวนการ โดยเลือกศึกษาชิ้นงาน Top assembly และชิ้นงาน Extrusion วิธีการวิจัยเริ่มจากการศึกษาสภาพปัจจุบันของกระบวนการ โดยการศึกษาการไหลของชิ้นงาน เพื่อให้ทราบทิศทางและระยะทางการไหลของชิ้นงานแต่ละชนิด หลังจากนั้นทำการศึกษาเวลาในกระบวนการผลิตในแต่ละสถานีการทำงาน และศึกษาจำนวนชิ้นงานระหว่างกระบวนการ และนำข้อมูลทั้งหมดมาสรุปบนแผนภาพสายธารแห่งคุณค่าสถานะปัจจุบัน (Value Stream Mapping: Current state) ช่วยให้เห็นถึงปัญหาและจุดที่ทำให้เกิดความสูญเปล่า เมื่อทราบถึงความสูญเปล่าที่ได้จากการเก็บข้อมูลดังกล่าวจึงนำไปสู่การปรับสมดุลสายการผลิตโดยใช้เทคนิคการจัดสมดุลสายการผลิต (Line balancing) จากนั้นเข้าสู่การแบ่งกลุ่มชิ้นงานและเครื่องจักรโดยใช้เทคโนโลยีการจัดกลุ่ม (Group Technology) นำไปผลที่ได้สู่การจัดสายการผลิตแบบเซลล์ลูลาร์ โดยมุ่งกำจัดความสูญเปล่าทางการขนส่งและลดจำนวนชิ้นงานระหว่างกระบวนการลง เมื่อสามารถลดความสูญเปล่าที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตจึงนำไปสู่การสร้างแผนภาพสายธารแห่งคุณค่าสถานะอนาคต (Value Stream Mapping : Future state) จากผลการวิจัยพบว่าสามารถลดความสูญเปล่าที่เกิดจากการขนส่ง ส่งผลให้สามารถลดเวลานำในการผลิตชิ้นงาน Top assembly จาก 1.6 วัน เหลือ 0.8 วัน และชิ้นงาน Extrusion จาก 2.7 วัน เหลือ 0.7 วัน รวมไปถึงสามารถลดจำนวนชิ้นงานระหว่างกระบวนการลง เหลือจากเดิม 160 ตู้/วัน เหลือ 10 ตู้/วัน

**คำสำคัญ:** เวลานำ เทคนิคการผลิตแบบลีน เทคโนโลยีแบบกลุ่ม สมดุลสายการผลิต ผังการผลิตแบบเซลล์ลูลาร์

### ABSTRACT

The purpose of this research is to apply ‘Lean Manufacturing’ concept and related techniques to eliminate waste in the manufacturing process of airplane trolley in order to reduce the product’s lead

times and work in process. The parts studied in this research were Top assembly part and Extrusion part. The research methodology started with analyzing the direction and transportation distance of each part through work stations. Then data regarding work station lead-times and work in process quantity were collected and used to construct current stage value stream mapping. This method helps to visualize the problem and waste activities. In order to reduce production waste, Line balancing technique and ‘Group technology’ were applied. The new cellular production line was designed with the aim of reducing transportation waste and work in process. Then the future state value stream mapping was created. The results showed that lead times of Top assembly part was reduced from 1.6 days to be 0.8 days and Extrusion part from 2.7 days to 0.7 days while the average work in process were reduced from 160 trolleys per day to 10 trolleys per day.

**Keywords:** Lead time, Lean Manufacturing Techniques, Group Technology, Line balancing, Cellular layout

## 1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตทุกประเภท มีการแข่งขันระหว่างองค์กรอยู่ในระดับที่สูงมาก นอกจากเทคโนโลยีที่ทันสมัย ยังมีการเปิดตลาดทางการค้าที่กว้างมากขึ้น หากต้องการรักษภาพ เพื่อให้เกิดความสามารถในการแข่งขันที่เหนือกว่าคู่แข่งในธุรกิจจะต้องมุ่งเน้นการผลิตหรือให้บริการที่คุณภาพที่เหนือกว่า ด้วยต้นทุนที่ต่ำกว่าและการส่งมอบที่ทันเวลา

บริษัท Zodiac Aircatering Equipment Thailand เป็นบริษัทที่ดำเนินธุรกิจหลักเกี่ยวกับอุตสาหกรรมอากาศยานทำการผลิตเกี่ยวกับการผลิตชิ้นส่วนและอุปกรณ์ที่ใช้งานบนเครื่องบิน เช่น ถังขยะ (Waste Bin) ตู้คอนเทนเนอร์ (Containers) และ ตู้รถเข็น (Trolley) โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาในส่วน ของตู้รถเข็น ทั้งนี้ส่วนประกอบของตู้รถเข็นประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนด้านล่างของรถเข็น (Base), ส่วนด้านบนของรถเข็น (Top), ส่วนประตูของรถเข็น (Door) และส่วน Extrusion โดยสามารถแบ่งการสายการผลิตออกเป็น 4 แผนก คือ แผนกการประกอบด้านล่างของรถเข็น (Base Assembly), แผนกการประกอบด้านบนของรถเข็น (Top/Sub Assembly), แผนกการประกอบประตูของรถเข็น (Door Assembly) และแผนกการประกอบชิ้นสุดท้าย (Final Assembly)

จากการศึกษากระบวนการผลิตในระบบจริงพบ จำนวนชิ้นงานระหว่างกระบวนการค่อนข้างมาก จึงทำการเก็บข้อมูลจำนวนชิ้นงานระหว่างกระบวนการของทั้ง

4 แผนก พบว่า แผนก Top/Sub Assembly มีจำนวนชิ้นงานระหว่างกระบวนการมากที่สุด ส่งผลให้มีเวลาในการผลิตมากเมื่อเทียบกับเวลามาตรฐาน อีกทั้งกระบวนการผลิตมีกระบวนการไหลของชิ้นงานที่ไม่ไปในทิศทางเดียวกันและมีระยะทางการไหลที่ยาว ทำให้ส่งผลต่อเวลานำในการผลิต และชิ้นงานระหว่างกระบวนการมากอีกด้วย

ระบบการผลิตแบบลีน (Lean Manufacturing) เป็นแนวทางที่สามารถขจัดความสูญเปล่าได้อย่างต่อเนื่อง อีกทั้งยังนิยมมาใช้เป็นกลยุทธ์ในการดำเนินธุรกิจ โดยทำความเข้าใจกระบวนการผลิตและการออกแบบตามที่ถูกค้าต้องการ เพื่อช่วยในการปรับปรุงการเพิ่มผลผลิตให้ดีขึ้น จากการศึกษางานวิจัยในอดีตพบว่า มีการนำเทคนิคการผลิตแบบลีนไปประยุกต์ใช้ในหลายอุตสาหกรรม เช่น ในอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กรูปพรรณ [1] ในอุตสาหกรรมการผลิตบีม น้ำ ารยนต์ [2] ในอุตสาหกรรมการผลิตตู้ปรับอากาศ [3] และในอุตสาหกรรม การประกอบแผ่นวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ [4]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้แนวคิดแบบลีน และใช้เทคนิคต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อลดความสูญเปล่าในกระบวนการอันนำไปสู่การลดเวลานำและจำนวนงานระหว่างกระบวนการผลิต

## 2. ทบทวนวรรณกรรม

### 2.1 ระบบการผลิตแบบลีน (Lean manufacturing)

ระบบการผลิตแบบลีนเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการติดตามความสูญเปล่าเพื่อกำจัดให้หมดไปจากระบบอย่างไม่มีที่สิ้นสุด โดยความสูญเปล่านั้นคือ ทุก ๆ สิ่งที่ไม่เกิดคุณค่าแก่ผลิตภัณฑ์ ดังนั้น เพื่อการปรับปรุงกระบวนการผลิต การกำจัดความสูญเปล่าและเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานจึงนำหลักการพื้นฐานของระบบการผลิตแบบลีนที่ James P. Womack and Daniel T. Jones [5] ได้นำเสนอหลักการคิดแบบลีนมาประยุกต์ใช้กับกรณีศึกษา โดยประกอบไปด้วย 5 ประการ ดังต่อไปนี้

#### 2.1.1 การนิยามคุณค่า (Value Definition)

การจัดการกับความสูญเปล่านั้นต้องใช้ความพยายามในการกำจัดความสูญเปล่าออกจากกระบวนการ ดังนั้น ในแนวคิดนี้ถือว่ากระบวนการสร้างคุณค่าจึงมีความสำคัญ ดังนั้นประเภทความสูญเสีย (Muda) คือกระบวนการผลิตที่ลูกค้าไม่ต้องการ บริษัทที่ทำการผลิตแบบลีนจะดำเนินการ เพื่อกำหนดคุณค่าของผลิตภัณฑ์และความสามารถของผลิตภัณฑ์ในการเสนอราคาให้กับลูกค้า บริษัทที่ทำการผลิตแบบลีนจะทำความเข้าใจและถามลูกค้าว่าต้องการอะไร แล้วบริษัทจึงทำการผลิตแบบลีนโดยปรับปรุงผลิตภัณฑ์ การบริหารองค์กรและพนักงาน เพื่อให้บรรลุตามแผนการผลิตนั้น

#### 2.1.2 การแสดงสายธารแห่งคุณค่าหรือผังแห่งคุณค่า (Value Stream Mapping)

แผนภาพสายธารแห่งคุณค่าเป็นเครื่องมือและเทคนิคหนึ่งที่สนับสนุนการพัฒนากลยุทธ์การผลิตแบบลีนที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับทุกธุรกิจ โดยมุ่งลดความสูญเปล่าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการด้วยการแสดงลำดับขั้นตอนของกิจกรรมต่าง ๆ รวมถึงศึกษาลำดับขั้นตอนของกระบวนการไหลของงาน ตั้งแต่ต้นน้ำ เริ่มจากการรับวัตถุดิบ จนถึงการแปรรูปผลิตภัณฑ์ โดยแสดงขั้นตอนในการกระบวนการต่าง ๆ ตลอดจนการส่งมอบสินค้าคุณภาพให้กับลูกค้า โดยแสดงความสูญเปล่าต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการด้วยการแสดงการไหลของ

ทรัพยากรและสารสนเทศของกระบวนการ เช่น ระยะเวลาที่ใช้ในการผลิต ปริมาณงานระหว่างกระบวนการ เป็นต้น

#### 2.1.3 การทำให้เกิดการไหลอย่างต่อเนื่อง (Flow)

การทำให้คุณค่าเกิดการไหลอย่างต่อเนื่อง คือ การทำให้สายการผลิตสามารถปฏิบัติงานได้อย่างสม่ำเสมอตลอดเวลาโดยไม่มีการหยุดการผลิตด้วยเหตุใดก็ตาม ทำให้งานไหลไปได้อย่างต่อเนื่องเหมือนกระแสน้ำ ซึ่งแม้ระดับน้ำจะลดลงแต่ก็ยังไหลอยู่เสมอ ซึ่งการไหลของงานถือเป็นสิ่งสำคัญของระบบการผลิตแบบลีน และเป็นจุดเริ่มต้นที่ต้องทำให้เกิดขึ้นก่อน

#### 2.1.4 การทำให้ลูกค้าเป็นผู้ดึงคุณค่าจากกระบวนการ (Pull)

การให้ลูกค้าเป็นผู้ดึงคุณค่าจากกระบวนการ คือ การทำการผลิตเมื่อลูกค้ามีความต้องการสินค้านั้น และผลิตให้เพียงพอที่ลูกค้าต้องการ โดยหมายถึงทั้งลูกค้าภายในและภายนอกเป็นการผลิตที่เข้าใกล้กับลักษณะของการผลิตตามสั่ง ไม่ใช่การผลิตเพื่อเก็บและรอการขาย ซึ่งการผลิตเพื่อเก็บและรอการขายถือเป็นความสูญเปล่าชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นเนื่องจากการรอคอย

#### 2.1.5 การมุ่งสู่ความสมบูรณ์แบบ (Pursues the Perfection)

หลังจากที่เข้าใจความต้องการของลูกค้า รู้และเข้าใจในคุณค่าของสินค้าที่ผลิต จัดทำผังของคุณค่าและให้ลูกค้าเป็นผู้สั่งงาน และกำหนดกิจกรรมในการผลิตแล้ว ต่อมาคือ การพยายามมุ่งมั่นสู่ความสมบูรณ์แบบ และกำจัดความสูญเปล่าอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีปัจจัยสนับสนุนคือ ความมีส่วนร่วมของบุคลากรทุกคนที่มุ่งเน้นการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องเพื่อนำองค์กรสู่ความเป็นเลิศ

## 2.2 ทฤษฎีการจัดกลุ่ม (Group Technology)

เทคโนโลยีการจัดกลุ่ม เป็นการประยุกต์ใช้แนวคิดเพื่อการจัดกลุ่มของระบบการผลิต ซึ่งคิดค้นทฤษฎีขึ้นโดยศาสตราจารย์ เอส.พี. ไมโตรฟานอฟ (S. P. Mitrofanov) แห่งมหาวิทยาลัยเลนินกราด ประเทศสหภาพโซเวียต เมื่อปี ค.ศ. 1950 โดยพิจารณาผลิตภัณฑ์ที่มีคุณลักษณะคล้ายคลึงกันรวมเป็นกลุ่มผลิตภัณฑ์ (Part of Family) และการจัดกลุ่มเครื่องจักร (Machine Group) เพื่อทำการ

ผลิตตามกลุ่มผลิตภัณฑ์นั้น การนำแนวคิดของเทคโนโลยีกลุ่มมาประยุกต์ใช้ในการผลิตให้เป็นระบบการผลิตแบบเซลล์ จะใช้การวางผังโรงงานแบบเทคโนโลยีกลุ่ม ผลิตจากการใช้ระบบการผลิตแบบเซลล์ โดยทั่วไปช่วยลดเวลาในการขนถ่ายวัสดุ ลดเวลาปรับตั้งเครื่องจักร ลดเวลาในการผลิต ลดจำนวนของเสีย วางแผนและควบคุมการผลิตได้ง่าย

### 3. วิธีการดำเนินการ

ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

#### 3.1 ศึกษาสภาพปัจจุบัน

ศึกษาสภาพปัจจุบันของกระบวนการผลิตชิ้นงานในแผนกด้านบนของรถเข็น โดยทำการเก็บข้อมูลของชิ้นงานแต่ละประเภท ทั้งระยะทางการไหล และกระบวนการในการผลิตเพื่อให้เห็นถึงทิศทางการไหลของชิ้นงานทั้งหมดในแผนก

#### 3.2 ทำแผนภาพสายธารแห่งคุณค่าสถานะปัจจุบัน

หลังจากทราบถึงสภาพปัจจุบันของกระบวนการผลิต จึงทำการเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับชิ้นงานที่เราสนใจคือ ชิ้นงาน Top assembly และชิ้นงาน Extrusion โดยทำการเก็บข้อมูลรอบเวลาการทำงานของกระบวนการผลิตชิ้นงานแต่ละชนิดรวมกับการเก็บข้อมูลจำนวนชิ้นงานระหว่างกระบวนการผลิต เพื่อใช้วิเคราะห์ว่ามี WIP ที่กระบวนการใดมากที่สุด และมีคอขวดที่กระบวนการใด จากนั้นนำข้อมูลทั้งหมดมาสรุปลงบนแผนภาพสายธารแห่งคุณค่าสถานะปัจจุบัน เพื่อให้เข้าใจถึงวิธีการไหลของข้อมูลสารสนเทศ และการไหลของวัสดุทั้งหมด พร้อมทั้งมองเห็นแหล่งที่เกิดปัญหา และแหล่งที่ทำให้เกิดความสูญเปล่า อีกทั้งยังช่วยให้มองเห็นคอขวด และจำนวนงานระหว่างผลิตได้

#### 3.3 จัดสมดุลสายการผลิตก่อนปรับปรุง

นำข้อมูลรอบเวลาการทำงานของพนักงานงานแต่ละคนในการผลิตชิ้นงานในแต่ละกระบวนการมาพล็อตกราฟสมดุลสายการผลิตสถานะก่อนปรับปรุง โดยเทียบกับเส้น Takt time ที่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) เพื่อให้

ทราบว่าปัจจุบันมีการทำการผลิตสินค้ามากเกินไปเกินความต้องการ หรือน้อยกว่าความต้องการของลูกค้า รวมไปถึงทำให้เห็นถึงความสูญเปล่าเนื่องจากการขนส่งที่มุ่งเน้นในการกำจัดความสูญเปล่าดังกล่าว

- การคำนวณหา Takt Time

$$\text{Takt Time} = \frac{\text{เวลาทำงานปกติในหนึ่งวัน (วินาที)}}{\text{จำนวนชิ้นงานที่ต้องการต่อวัน (ชิ้น)}} \quad (1)$$

#### 3.4 จัดสมดุลสายการผลิตหลังปรับปรุง

จากกราฟสมดุลสายการผลิตสถานะก่อนปรับปรุง ทำให้เราทราบถึงว่าสามารถผลิตได้ทันตามความต้องการของลูกค้าหรือไม่ และพนักงานหรือกระบวนการใดเป็นคอขวดในกระบวนการผลิต หลังจากนั้นเราจึงทำการสร้างกราฟสมดุลสายการผลิตเทียบกับเส้น Takt time โดยทำการจัดสมดุลงานของพนักงาน แต่ละคนให้มีความสมดุลกัน และไม่เกินเส้น Takt time โดยสามารถทราบถึงจำนวนพนักงานที่ต้องการในการผลิตชิ้นงานแต่ละชนิดได้จากสมการที่ (2)

- การคำนวณหาจำนวนพนักงาน

$$\text{Manpower} = \frac{\text{Process Time}}{\text{Takt time}} \quad (2)$$

#### 3.5 จัดกลุ่มของเครื่องจักร และชิ้นงาน

จัดกลุ่มของเครื่องจักรและชิ้นงาน โดยทำการจัดกลุ่มเครื่องจักรของชิ้นงานแต่ละชนิด เพื่อหากกลุ่มชิ้นงานที่มีความสัมพันธ์กัน และนำไปสู่การจัดกลุ่มการผลิตแบบเซลล์ลูลาร์ ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดเครื่องจักร และชิ้นงานให้อยู่ในรูปแบบตัวเลข และตัวอักษร

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดให้แถว (Row) เป็นรายการเครื่องจักร และหลัก (Column) เป็นรายการชิ้นงาน โดยเครื่องจักรตัวไหนมีชิ้นงานเข้าให้ใส่หมายเลข 1 หากไม่มีให้เว้นว่างไว้หรือใส่ศูนย์

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดค่า Binary Value ของชิ้นงาน และคำนวณผลรวมของ Decimal Equivalent ในแต่ละเครื่องจักร และจัดลำดับค่าของ Rank

ขั้นตอนที่ 4 จัดลำดับค่าของ Rank ที่ได้ในขั้นตอนที่ 3 ของชิ้นงานทั้งหมด และคำนวณผลรวมของ Decimal Equivalent ในแต่ละเครื่องจักร และจัดลำดับค่าของ Rank

ขั้นตอนที่ 5 จัดกลุ่มของผลิตภัณฑ์ และเครื่องจักรที่มีความสัมพันธ์กันให้อยู่ในกลุ่มเดียวกัน

ขั้นตอนที่ 6 ใส่กลุ่มของชิ้นงาน และเครื่องจักรที่มีความสัมพันธ์กันให้อยู่ในกลุ่มเดียวกัน

### 3.6 จัดผังการผลิตใหม่โดยการจัดผังแบบเซลล์ลาร์

หลังจากทราบกลุ่มของเครื่องจักร และชิ้นงานที่แล้ว หลังจากนั้นนำกลุ่มของเครื่องจักร และชิ้นงานที่ได้ไปทำการจัดผังการผลิตใหม่โดยประยุกต์ใช้การจัดผังการผลิตแบบเซลล์ลาร์ในการปรับปรุงผังการผลิต เพื่อลดความสูญเสียเปล่าในการขนส่งชิ้นงานระหว่างกระบวนการผลิต

### 3.7 ทำแผนภาพสายธารแห่งคุณค่าสถานะอนาคต

หลังจากทราบความสูญเสียเปล่าที่เกิดขึ้นและได้ทำการกำจัดความสูญเสียเปล่า และรวมงานเข้าด้วยกันด้วยเทคนิคที่กล่าวมาข้างต้น จึงทำการสร้างแผนภาพสายธารแห่งคุณค่าสถานะอนาคต โดยควบคุมชิ้นงานระหว่างกระบวนการให้ลดลงเหลือ Small batch size

## 4. ผลการทดลอง

### 4.1 การไหลของกระบวนการผลิต











เพื่อให้เห็นถึงการไหลของชิ้นงานทั้งหมดในแผนกการประกอบด้านบนของตู้รถเข็น จึงทำการเก็บข้อมูลของชิ้นงานแต่ละตัวโดยชิ้นงานทั้งหมดแสดงชื่อ ระยะทางการไหล และกระบวนการในการผลิต ดังตารางที่ 1

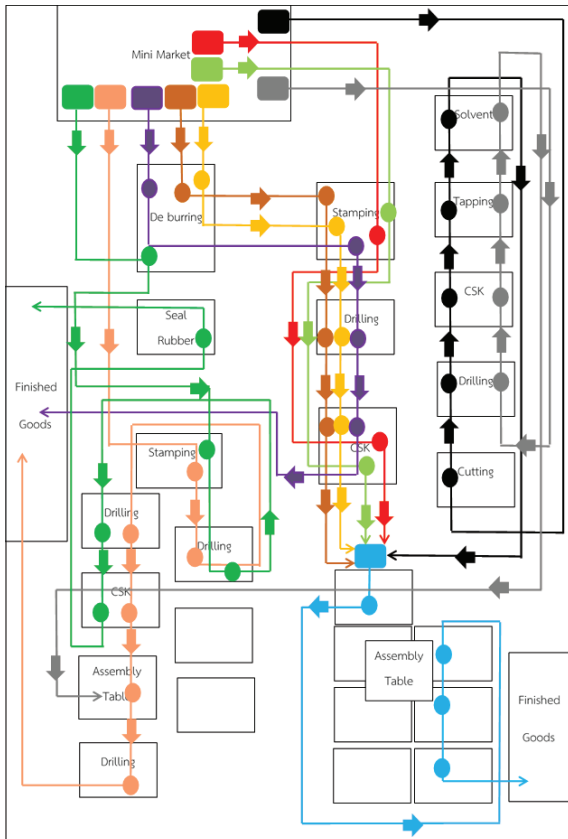
นอกจากนี้ยังมีการเก็บข้อมูลทิศทางการไหลของชิ้นงานแต่ละชิ้น เพื่อดูทิศทางการไหลดังรูปที่ 2

รูปที่ 2 แสดงกระบวนการไหลของชิ้นงานทุกชิ้นในแผนกด้านบนของตู้รถเข็น โดยสัญลักษณ์ต่าง ๆ มีความหมายดังนี้ สัญลักษณ์สี่เหลี่ยม (□) หมายถึง จุดเริ่มต้น, สัญลักษณ์ลูกศร (⇌) หมายถึง การเคลื่อนย้ายวัตถุดิบจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง และสัญลักษณ์วงกลม (○) หมายถึง การปฏิบัติงานบนชิ้นงานเกิดขึ้นเมื่อมีการ

เปลี่ยนแปลงลักษณะหรือคุณสมบัติของชิ้นงาน ซึ่งจากรูปที่ 2 แสดงถึงลักษณะการไหลที่ไม่ไปในทิศทางเดียวกัน และมีระยะทางการไหลที่ยาวส่งผลให้เกิดเวลานานในการผลิตนาน รวมไปถึงพบชิ้นงานระหว่างกระบวนการมากอีกด้วย

ตารางที่ 1 ชื่อชิ้นงาน ระยะทางการไหล และกระบวนการผลิตชิ้นงานในแผนกการประกอบชิ้นส่วนด้านบนของรถเข็น

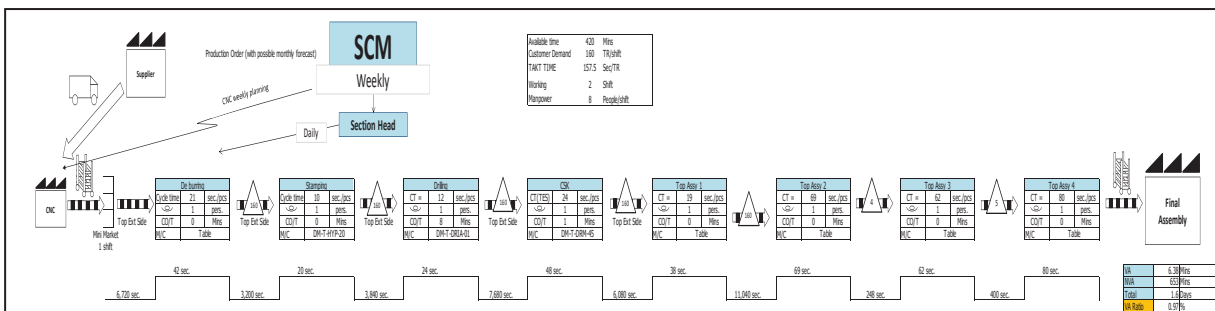
รูปที่	ชื่อชิ้นงาน	ระยะทาง (เมตร)	กระบวนการ
	Top Ext Side (FS)	10.61	ตะไบลบคม, บีมชิ้นงาน, เจาะชิ้นงาน, คว้านชิ้นงาน, นำชิ้นงานเข้าโต๊ะประกอบ
	Top Ext Side (HS)	10.61	ตะไบลบคม, บีมชิ้นงาน, เจาะชิ้นงาน, คว้านชิ้นงาน, นำชิ้นงานเข้าโต๊ะประกอบ
	Top Ext Front	7.95	บีมชิ้นงาน, คว้านชิ้นงาน, นำชิ้นงานเข้าโต๊ะประกอบ
	Top Ext Back	10.61	บีมชิ้นงาน, คว้านชิ้นงาน, นำชิ้นงานเข้าโต๊ะประกอบ
	Top Assembly	16.73	การประกอบชิ้นงาน
	Back Ext	15.16	ตะไบลบคม, บีมชิ้นงาน, เจาะชิ้นงาน, คว้านชิ้นงาน
	Front Ext Hinge	32.07	ตะไบลบคม, บีมชิ้นงาน, เจาะชิ้นงานตำแหน่งที่ 1, เจาะชิ้นงานตำแหน่งที่ 2, คว้านชิ้นงาน, นำชิ้นงานใส่ยาง
	Front Ext Lock	21.4	บีมชิ้นงาน, เจาะชิ้นงานตำแหน่งที่ 1, เจาะชิ้นงานตำแหน่งที่ 2, ประกอบชิ้นงาน, เจาะชิ้นงานตำแหน่งที่ 3
	Corner Piece	15.37	ตัดชิ้นงาน, เจาะชิ้นงาน, คว้านชิ้นงาน, ทำเกลียวในชิ้นงาน, แฉ่น้ำยา
	Filler	22.37	เจาะชิ้นงาน, คว้านชิ้นงาน, ทำเกลียวในชิ้นงาน, แฉ่น้ำยา



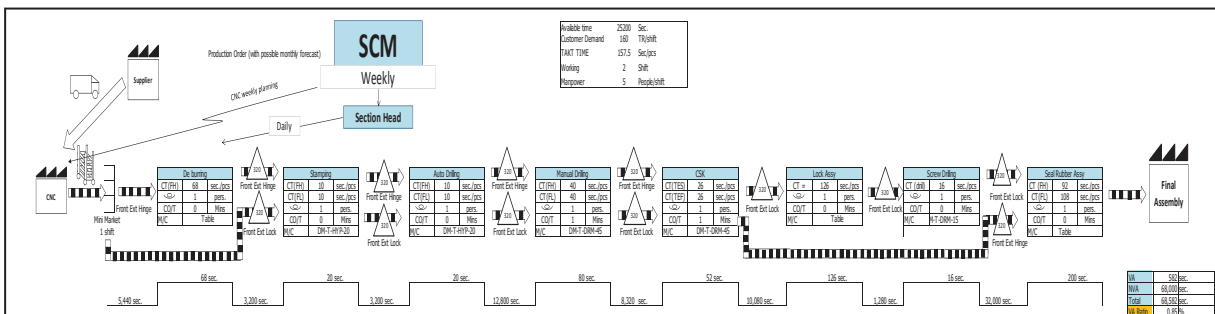
รูปที่ 2 กระบวนการไหลของชิ้นส่วนในแผนการประกอบชิ้นส่วนด้านบนของรถเงิน

### 4.2 แผนภาพสายธารแห่งคุณค่าสถานะปัจจุบัน

นำข้อมูลที่ได้จากการศึกษามาสรุปลงบนแผนภาพสายธารแห่งคุณค่าสถานะปัจจุบัน ลงในรูปที่ 3 และ 4 โดยแสดงแผนภาพสายธารแห่งคุณค่าสถานะปัจจุบันของชิ้นงาน Top assembly และ Extrusion ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าเวลานำรวมของชิ้นงาน Top assembly สูงถึง 1.6 วัน และเวลานำรวมของชิ้นงาน Extrusion สูงถึง 2.7 วัน ซึ่งเป็นผลมาจากมีจำนวนชิ้นงานระหว่างกระบวนการผลิตที่มากเกินไปจนเกิดความจำเป็น



รูปที่ 3 แผนภาพสายธารแห่งคุณค่าสถานะปัจจุบันของชิ้นงาน Top assembly



รูปที่ 4 แผนภาพสายธารแห่งคุณค่าสถานะปัจจุบันของชิ้นงาน Extrusion



จากแผนภาพสายธารแห่งคุณค่าสถานะปัจจุบันของ  
ชิ้นงานทั้ง Top assembly และ Extrusion สามารถ  
สรุปข้อมูลทั้งหมดได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สรุปข้อมูลแผนภาพสายธารแห่งคุณค่า  
สถานะปัจจุบัน

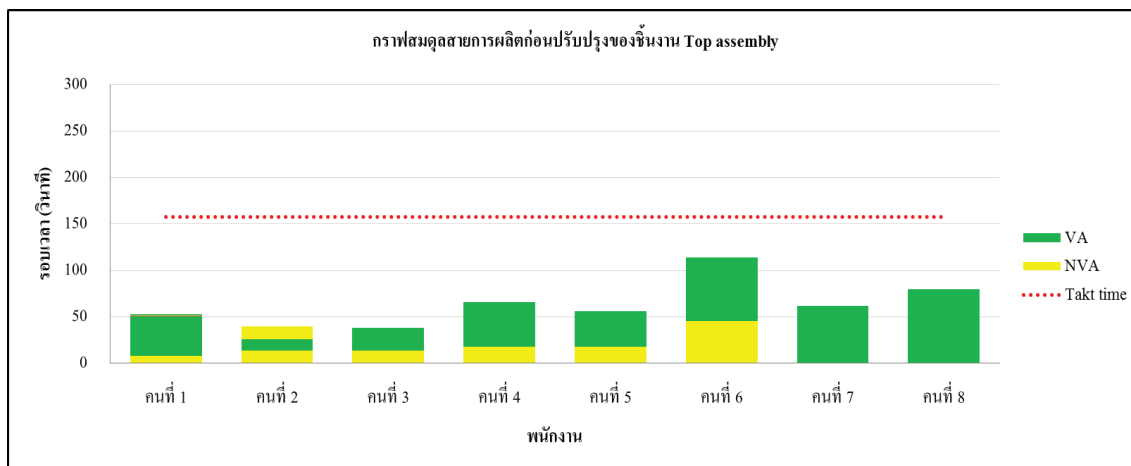
	Top assembly	Extrusion
Takt time (sec.)	158	158
VA (Mins)	6.38	9.7
NVA (Mins)	653	1,133
Lead Time (Days)	1.6	2.7
Work in Process (ea.)	800	1,120

จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นถึงเวลาที่ไม่ง้อให้เกิด  
คุณค่าในกระบวนการผลิต (NVA) ซึ่งมีในปริมาณที่  
ค่อนข้างมาก โดยเวลานี้เกิดจากการที่มีจำนวนชิ้นงาน  
ระหว่างกระบวนการคงค้างอยู่จำนวนมาก ส่งผลให้มี  
เวลานำในการผลิตที่ยาวนาน

### 4.3 สมดุลสายการผลิตก่อนปรับปรุง

นำข้อมูลรอบเวลาการผลิตของแต่ละกระบวนการที่  
คำนวณได้จากการศึกษาข้อมูล มาพล็อตลงบนกราฟสมดุล  
สายการผลิตก่อนปรับปรุงเทียบกับเส้น Takt time  
ที่คำนวณมาจากสมการที่ (1)

$$\begin{aligned} \text{Takt time} &= \frac{25,200 \text{ วินาที}}{160 \text{ ผู้}} \\ &= 158 \text{ วินาที/ผู้} \end{aligned}$$



รูปที่ 5 กราฟสมดุลสายการผลิตก่อนปรับปรุงของชิ้นงาน Top assembly

รูปที่ 5 แสดงกราฟสมดุลสายการผลิตก่อนปรับปรุง  
ของชิ้นงาน Top assembly จากกราฟแสดงให้เห็นว่าใน  
กระบวนการผลิตชิ้นงานดังกล่าวใช้พนักงานในการผลิต  
ทั้งหมด 8 คน โดยเมื่อนำเวลาในการผลิตเทียบกับ Takt  
time แล้วพบว่าพนักงานยังมีเวลาเหลืออยู่มากเมื่อเทียบ  
กับเส้น Takt time จึงนำไปสู่การพล็อตกราฟ  
สมดุลสายการผลิตหลังปรับปรุง โดยสามารถคำนวณ  
จำนวนคนที่เราต้องการได้จากสมการที่ (2)

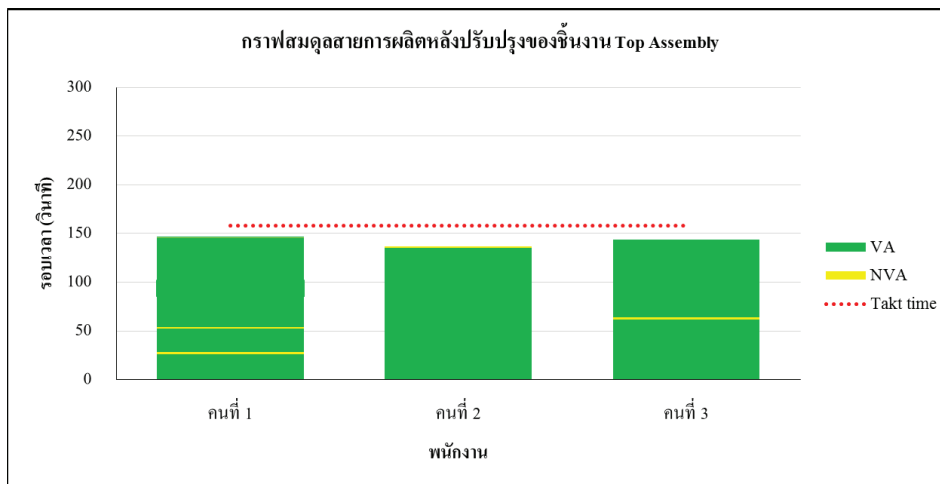
$$\begin{aligned} \text{จำนวนพนักงานที่ต้องการ} &= \frac{488 \text{ วินาที}}{158 \text{ วินาที}} \\ &= 3 \text{ คน} \end{aligned}$$

หลังจากทราบจำนวนพนักงานที่ต้องการในการผลิต  
ที่ได้จากการคำนวณ จึงทำการขจัดความสูญเปล่าที่เกิดจาก  
การขนส่ง รวมไปถึงการรวมงานเข้าด้วยกัน และจัดสมดุล  
สายการผลิตใหม่ให้สอดคล้องกับจำนวนพนักงานที่ได้จาก  
การคำนวณ จากกราฟแสดงให้เห็นถึงความสมดุลกัน

ในการผลิตของพนักงานทั้ง 3 คน และไม่มีพนักงาน  
คนไหนทำการผลิตเกินเส้น Takt time ส่งผลให้สามารถ  
ผลิตได้ทันตามความต้องการของลูกค้า ดังรูปที่ 6

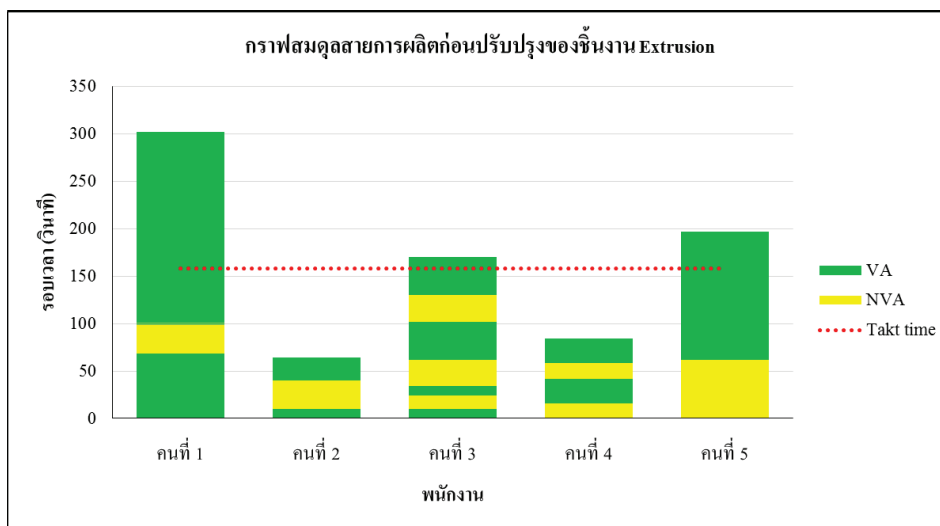
รูปที่ 6 แสดงกราฟสมดุลสายการผลิตหลังปรับปรุง ซึ่งสามารถลดจำนวนพนักงานลงได้จาก 8 คน เหลือเพียง 3 คน โดยการจัดความสูญเปล่าที่เกิดจากการขนส่ง คือ ลดระยะทางในการขนส่งจากสถานีงานหนึ่ง ไปยังอีกหนึ่ง สถานีงานลง โดยวางแผนให้แต่ละสถานีงานชิดติดกัน และทำการรวมงานเข้าไว้ด้วยกัน ยกตัวอย่างเช่น จากเดิม ในกระบวนการตะไบลบคม (De burring), การแสดมบี

ขึ้นงาน (Stamping), การเจาะขึ้นงาน (Drilling) และ คว้านขึ้นงาน (Countersinking) ใช้พนักงานมากถึง 4 คน แต่จากการคำนวณรอบเวลาในการผลิตเทียบกับ Takt time สามารถใช้พนักงานเพียง 1 คนได้ จึงรวมขั้นตอน ทั้งหมดให้พนักงานเพียงคนเดียวทำการผลิต

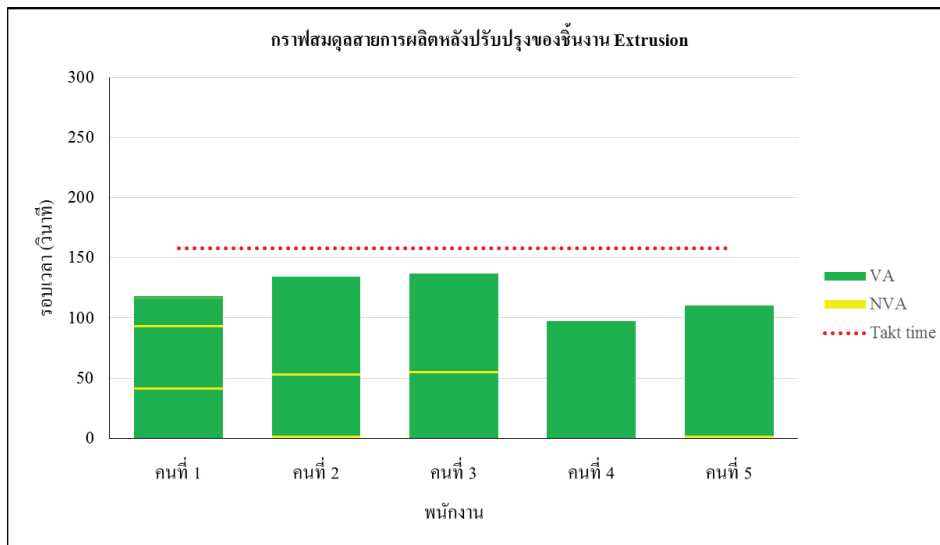


รูปที่ 6 กราฟสมดุลสายการผลิตหลังปรับปรุงของขึ้นงาน Top assembly

เช่นเดียวกับกับขึ้นงาน Extrusion ที่สามารถใช้วิธีการคำนวณจากสมการที่ (1) และสมการที่ (2) จะได้กราฟสมดุลสายการผลิตก่อนปรับปรุง และหลังปรับปรุงของขึ้นงาน Extrusion ดังรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ



รูปที่ 7 กราฟสมดุลสายการผลิตก่อนปรับปรุงของขึ้นงาน Extrusion



รูปที่ 8 กราฟสมดุสยการผลิตหลังปรับปรุงของซึ้นงาน Extrusion

จากรูปที่ 7 แสดงกราฟสมดุสยการผลิตก่อนปรับปรุงของซึ้นงาน Extrusion จะเห็นได้ว่าพนักงานคนที่ 1 และคนที่ 5 มีรอบเวลาในการผลิตเกินเส้น Takt time ทำให้ไม่สามารถผลิตได้ทันตามเวลาที่ลูกค้าต้องการได้ ในกรณีนี้พบว่า กระบวนการใส่ยางเป็นกระบวนการคอขวด พนักงานคนเดียวไม่สามารถผลิตได้ทันตามความต้องการของลูกค้า จึงแยกกระบวนการใส่ยางออกมาให้พนักงานคนที่ 4 และคนที่ 5 ทำการผลิตในกระบวนการนี้ และทำการจัดสมดุสยการผลิตใหม่ในกระบวนการที่เหลือให้กับพนักงานคนที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับดังรูปที่ 8

รูปที่ 8 แสดงกราฟสมดุสยการผลิตหลังปรับปรุงของซึ้นงาน Extrusion จากกราฟแสดงให้เห็นว่ายังคงใช้จำนวนพนักงานที่เท่าเดิมกับก่อนปรับปรุง แต่ลำดับในการผลิต และกระบวนการผลิตของพนักงานทุกคนมีความสมดุสกันมากขึ้น และไม่มีพนักงานคนไหนที่ทำงานเกินเส้น Takt time ทำให้สามารถผลิตได้ทันตามความต้องการของลูกค้าได้

ตารางที่ 3 สรุปข้อมูลจากกราฟสมดุสยการผลิตก่อนและหลังการปรับปรุง

	Top assembly		Extrusion	
	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
VA (sec.)	376	376	542	542
NVA (sec.)	131	8	104	60
Total (sec.)	507	384	686	608
พนักงาน (คน)	8	3	5	5

ตารางที่ 3 แสดงข้อมูลที่ได้จากการพล็อตกราฟสมดุสยการผลิตของซึ้นงาน Top assembly ซึ่งสามารถทำการลดจำนวนพนักงานจาก 8 คน เหลือ 3 คน ในขณะที่ซึ้นงาน Extrusion ไม่สามารถลดจำนวนพนักงานลงได้ แต่กราฟสมดุสยการผลิตหลังการปรับปรุง พนักงานทั้ง 5 คน มีความสมดุสในการทำงานกันมากขึ้นเมื่อเทียบกับกราฟสมดุสยการผลิตก่อนปรับปรุง

#### 4.4 การจัดกลุ่มของเครื่องจักรและซึ้นงาน

การจัดกลุ่มเครื่องจักรของซึ้นงานแต่ละชนิด เริ่มจากการกำหนดเครื่องจักร และซึ้นงานให้อยู่ในรูปแบบตัวเลขและตัวอักษร ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 กำหนดเครื่องจักร และชิ้นงานให้อยู่ในรูปแบบตัวเลข และตัวอักษร

Machine Type	Machine Code	Machine Type	Machine Code	Part	Part Code
Stamping Machine	1	CSK Machine	11	Top Ext Side (FS)	A
Stamping Machine	2	Tapping Machine	12	Top Ext Side (HS)	B
Drilling Machine	3	Assembly Table	13	Top Ext Front	C
Drilling Machine	4	Assembly Table	14	Top Ext Back	D
Drilling Machine	5	Assembly Table	15	Back Ext	E
Drilling Machine	6	Assembly Table	16	Front Ext Hinge	F
Drilling Machine	7	Assembly Table	17	Front Ext Lock	G
Cutting Machine	8	Assembly Table	18	Corner piece	H
CSK Machine	9	Assembly Table	19	Filler	I
CSK Machine	10	Assembly Table	20		

หลังจากดำเนินการตามขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอนในการใช้เทคโนโลยีกลุ่มในการจัดความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์ และเครื่องจักรทำให้สามารถแบ่งกลุ่มออกมาได้ 3 กลุ่ม ดังตารางที่ 5 และ 6

ตารางที่ 5 กลุ่มของชิ้นงานและเครื่องจักร

Machine Code	Part									Decimal Equivalent
	A	B	D	C	E	F	G	H	I	
1	1	1	1	1	1					524288
9	1	1	1	1	1					262144
6	1	1	1	1						131072
17	1	1	1	1						65536
18	1	1	1	1						32768
19	1	1	1	1						16384
13	1	1	1		1	1				8192
3	1	1								4092
2						1	1			2048
4						1	1			1024
5						1	1			512
10						1	1			256
14						1	1			128
6							1			64
15							1			32
7								1	1	16
11								1	1	8
12								1	1	4
20								1	1	2
8								1		1
Decimal Equivalent	$1.04 \cdot 10^6$	$1.04 \cdot 10^6$	$1.03 \cdot 10^6$	$1.04 \cdot 10^6$	$7.98 \cdot 10^6$	$1.21 \cdot 10^4$	$4.06 \cdot 10^3$	31	30	

ตารางที่ 6 สรุปกลุ่มของชิ้นงานและเครื่องจักร

สี	กลุ่มที่	ชิ้นงาน	เครื่องจักร
เขียว	1	A,B,C,D,E	1,9,16,17,18,19,13,3
แดง	2	F,G	2,4,5,10,14,6,15
เหลือง	3	H,I	7,11,12,20,8

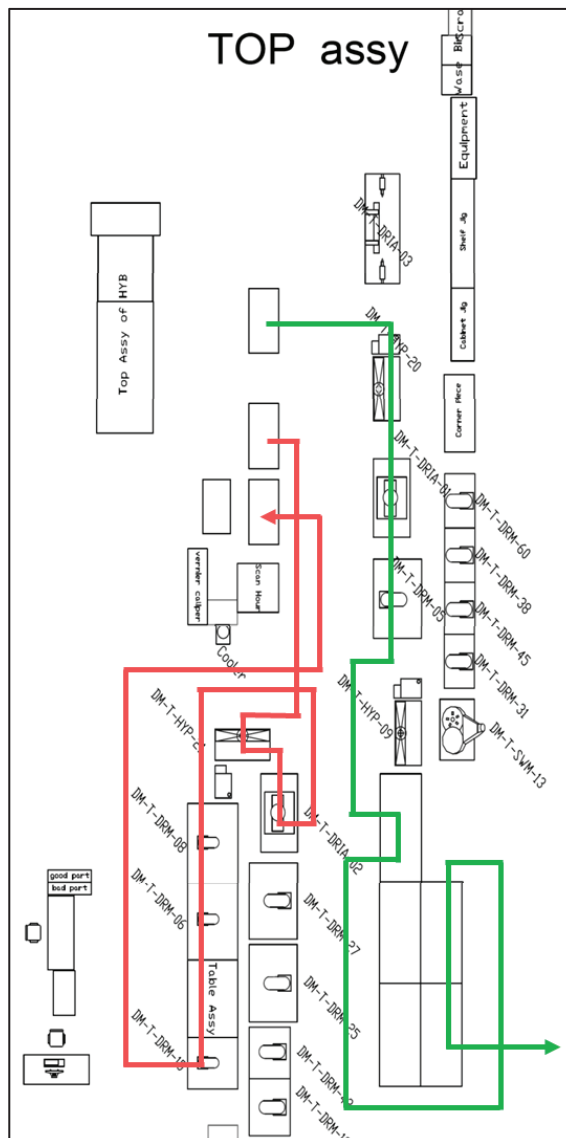
จากการจัดกลุ่มชิ้นงานและเครื่องจักรพบว่า กลุ่มที่ 1 สีเขียว คือ ผลิตภัณฑ์กลุ่ม Top assembly โดยกลุ่มของเครื่องจักรคือ หมายเลข 2, 3, 7, 9, 12, 14, 15 และ 16 กลุ่มที่ 2 สีแดง คือกลุ่มของ Extrusion กลุ่มของเครื่องจักรคือ หมายเลข 1, 4, 5, 6, 8, 10 และ 11 โดย

ทั้ง 2 กลุ่มเป็นกลุ่มที่สนใจในการศึกษา ส่วนในกลุ่มที่ 3 สีเหลือง เป็นชิ้นงานกลุ่มอะไหล่ โดยกลุ่มของเครื่องจักรคือ หมายเลข 7, 11, 12, 20 และ 8

#### 4.5 การจัดผังการผลิตแบบเซลล์ลาร์

หลังจากได้กลุ่มของชิ้นงานและเครื่องจักรจากการจัดกลุ่มด้วยเทคโนโลยีกลุ่มแล้วตามหัวข้อ 4.4 จึงนำข้อมูลที่ได้มาจัดผังการผลิตใหม่โดยนำเทคนิคการจัดผังการผลิตแบบเซลล์ลาร์มาประยุกต์ใช้ เพื่อลดความสูญเปล่าที่เกิดจากการขนส่ง และช่วยให้สะดวกต่อการเคลื่อนไหวยของพนักงานในกรณีที่พนักงานทำงานมากกว่า 1 สถานีงาน

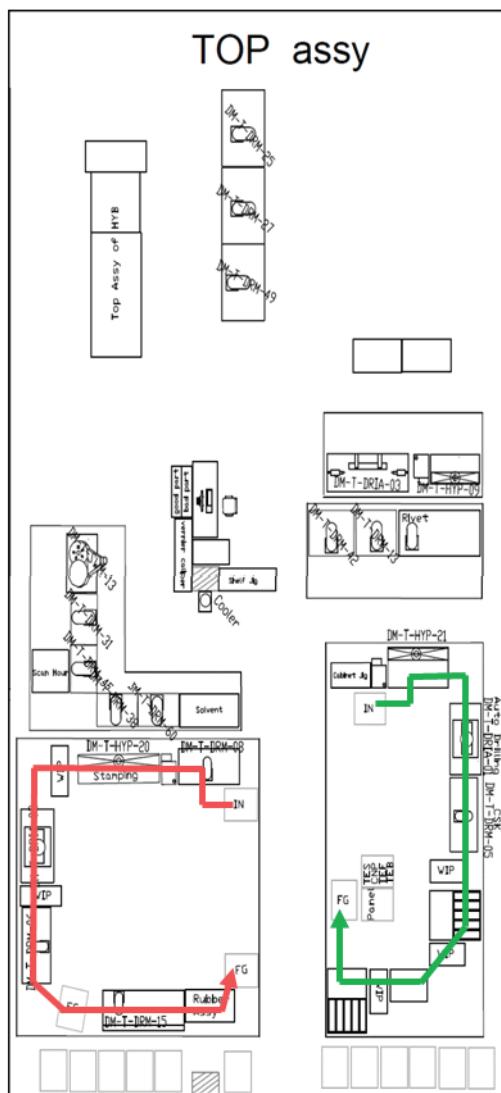
รูปที่ 9 แสดงระยะทางการไหลของชิ้นงานทั้ง 2 ชนิดในแผนก โดยเส้นสีเขียวแสดงระยะทางในการผลิตชิ้นงาน Top assembly โดยมีระยะทางในการผลิตชิ้นงานเท่ากับ 25.09 เมตร และเส้นสีแดง คือ ชิ้นงาน Extrusion มีระยะทางในการผลิตชิ้นงานเท่ากับ 31.08 เมตร



รูปที่ 9 ผังการผลิตก่อนปรับปรุง

จากรูปที่ 9 แสดงให้เห็นถึงความสูญเปล่าที่เกิดจากการขนส่ง และการไหลของชิ้นงานที่ค่อนข้างซับซ้อนในกระบวนการผลิตชิ้นงาน Top assembly และชิ้นงาน Extrusion ที่เกิดขึ้น จึงนำไปสู่การออกแบบผังการผลิตขึ้นมาใหม่ ดังรูปที่ 10 โดยนำแนวคิดผังการผลิตแบบเซลล์ลาร์มาประยุกต์ใช้เพื่อให้เกิดความยืดหยุ่นต่อการผลิตที่มุ่งตอบสนองต่อความต้องการที่หลากหลายของลูกค้า โดยในขั้นตอนนี้ได้ทำการกำจัดความสูญเปล่าที่เกิดจากการขนส่งโดยทำการจัดวางเครื่องจักรที่ทำการผลิตต่อกันไว้ใกล้กัน โดยคำนึงจากผลที่ได้จากการจัดสมดุล

สายการผลิตหลังปรับปรุง และนำเทคนิคการจัดผังกระบวนการผลิตแบบเซลล์ลาร์รูปแบบตัวยูมาประยุกต์ใช้ โดยต้องคำนึงถึงพื้นที่ในการวางชิ้นงานระหว่างกระบวนการร่วมด้วย หากเราสามารถควบคุมจำนวนชิ้นงานระหว่างกระบวนการที่น้อย จะส่งผลให้เวลาในการผลิตลดลง อีกทั้งยังสามารถควบคุมให้ชิ้นงานไหลอย่างต่อเนื่องและคงที่ โดยเส้นสีเขียวแสดงระยะทางในการผลิตชิ้นงาน Top assembly ในขณะที่เส้นสีแดงแสดงระยะทางในการผลิตชิ้นงาน Extrusion โดยมีระยะทางลดลงจากเดิมเหลือ 10.56 เมตร และ 11 เมตร ตามลำดับ

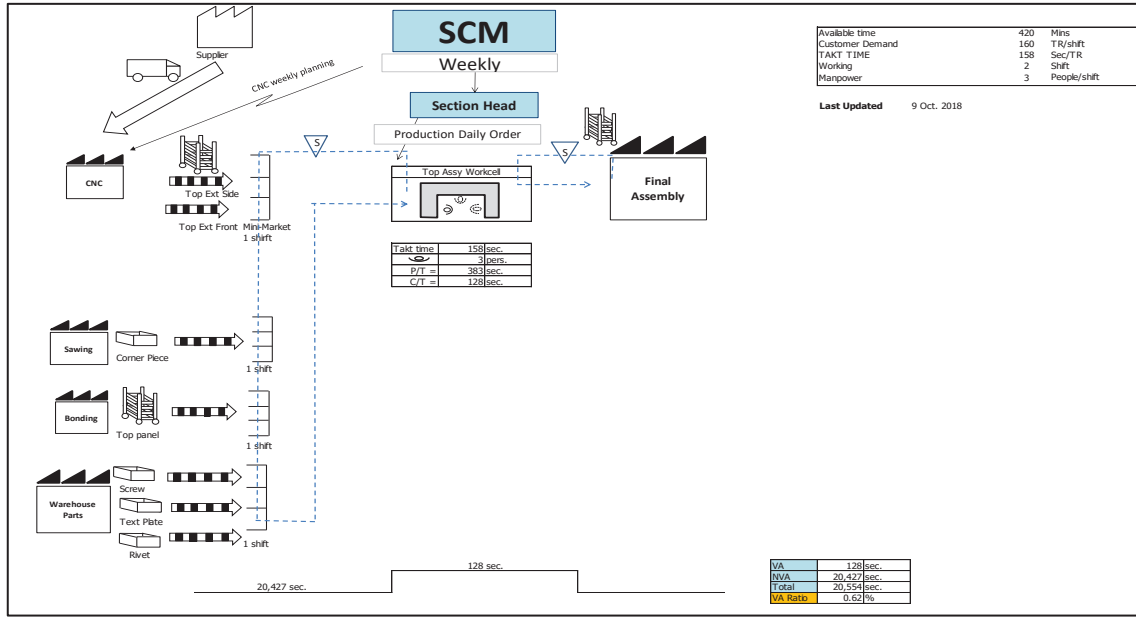


รูปที่ 10 ผังการผลิตหลังปรับปรุง

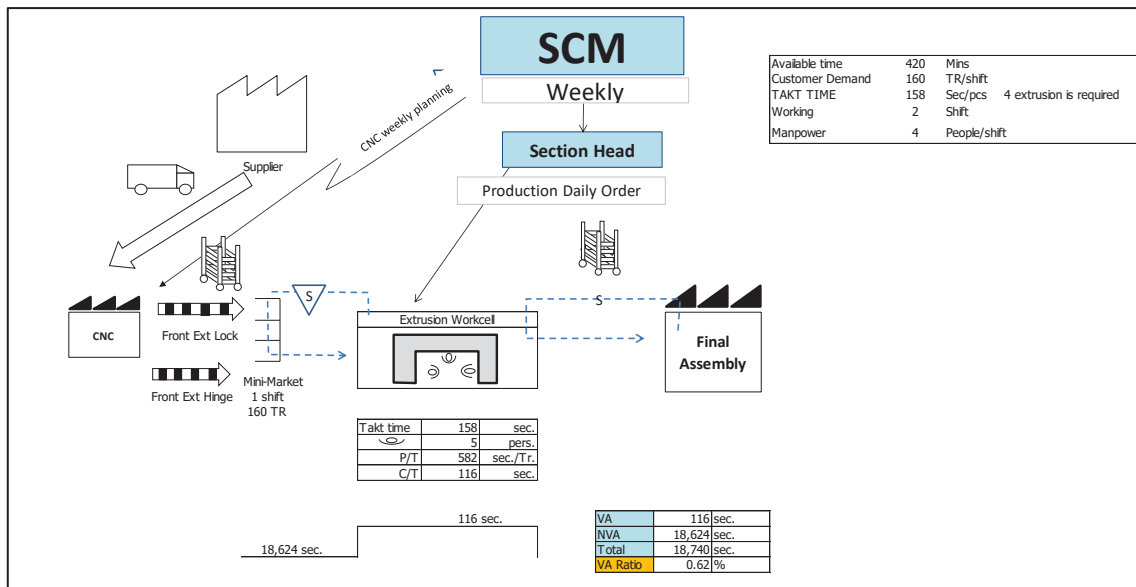
#### 4.6 แผนภาพสายธารแห่งคุณค่าสถานะอนาคต

หลังจากทราบถึงความสูญเปล่าที่เกิดขึ้นจากผลการศึกษาแผนภาพสายธารแห่งคุณค่าสถานะปัจจุบัน การปรับสมดุลสายการผลิต และการจัดวางผังการผลิตรูปแบบใหม่ โดยการจัดกลุ่มของเครื่องจักรด้วยเทคโนโลยีกลุ่ม ซึ่งความสูญเปล่าดังกล่าวส่งผลกระทบต่อเวลาในการผลิตที่นาน เมื่อสามารถกำจัดความสูญเปล่าที่เกิดขึ้นออกไปได้ จึงนำไปสู่การเขียนแผนภาพสายธารแห่งคุณค่าสถานะอนาคตของชิ้นงานทั้ง 2 ชนิด คือ ชิ้นงาน Top assembly และชิ้นงาน Extrusion ซึ่งในการเขียนแผนภาพสายธารแห่งคุณค่าสถานะอนาคตนั้น ทำได้โดยการกำหนดวิธีควบคุมการผลิตต้นทาง เป็นการกำหนดวิธีการควบคุมการไหล ของการผลิต โดยประยุกต์ใช้ระบบดึงในการสั่งผลิต ร่วมกับการกำหนดวิธีการปรับปรุงการไหล โดยใช้การลดขนาดการขนส่งงานระหว่างกระบวนการผลิตลง ซึ่งสอดคล้องกับการวางผังการผลิตแบบเซลล์ลาร์ที่ได้กำหนดพื้นที่สำหรับวางชิ้นงานระหว่างกระบวนการผลิตที่น้อยลงทำให้ส่งผลต่อเวลาที่ลดลงอีกด้วย ซึ่งสามารถสรุปลงบนแผนภาพสายธารแห่งคุณค่าได้ดังรูปที่ 11 และ 12 ตามลำดับ





รูปที่ 11 แผนภาพสายธารแห่งคุณค่าสถานะอนาคตของชิ้นงาน Top assembly



รูปที่ 12 แผนภาพสายธารแห่งคุณค่าสถานะอนาคตของชิ้นงาน Extrusion

รูปที่ 11 และ 12 แสดงแผนภาพสายธารแห่งคุณค่าสถานะอนาคตของชิ้นงาน Top assembly และ ตารางที่ 7 สรุปข้อมูลแผนภาพสายธารแห่งคุณค่าสถานะอนาคต

	Top assembly	Extrusion
Takt time (sec.)	158	158
VA (Mins)	2.1	1.9
NVA (Mins)	340	310
Lead Time (Days)	0.8	0.7
Work in Process (ea.)	50	60

ชิ้นงาน Extrusion ตามลำดับ โดยสามารถสรุปข้อมูลที่ ได้ลงในตารางที่ 7

### 5. สรุปผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้แนวคิดแบบลีน และใช้เทคนิคที่เกี่ยวข้องเพื่อลดความสูญเปล่า ในกระบวนการอันนำไปสู่การลดเวลานำและจำนวนงาน ระหว่างการผลิต จากผลงานวิจัยพบว่า สามารถใช้เทคนิค

การผลิตแบบลีนเพื่อลดเวลานำในการผลิต และลดจำนวนชิ้นงานระหว่างการผลิต โดยสามารถลดความสูญเปล่าที่เกิดจากการรอคอย และลดการผลิตในปริมาณที่มากเกินไป ความจำเป็นส่งผลให้เวลานำของชิ้นงาน Top assembly และชิ้นงาน Extrusion จาก 1.6 วัน และ 2.7 วัน เหลือ 0.8 และ 0.7 วัน ตามลำดับ และสามารถลดจำนวนชิ้นงานระหว่างกระบวนการผลิตเฉลี่ยจากเดิม 160 ชิ้น/วัน เหลือ 10 ชิ้น/วัน รวมไปถึงสามารถใช้เทคนิคอื่นร่วมกับการจัดกลุ่มเครื่องจักรและชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีกลุ่มได้เป็นอย่างดี โดยสามารถลดระยะเวลาในการผลิตรวมได้ ซึ่งถือว่าสามารถลดความสูญเปล่าที่เกิดจากการขนส่งได้ถึง 62%

## 6. อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

จากผลงานวิจัยนี้พบว่า สามารถใช้เทคนิคการผลิตแบบลีนเพื่อลดเวลานำในการผลิต และลดจำนวนงานระหว่างกระบวนการผลิตได้เป็นอย่างดี ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่ได้ใช้เทคนิคการผลิตแบบลีนเพื่อลดเวลานำของการผลิต รวมไปถึงใช้เครื่องมืออื่นในการลดงานระหว่างผลิตได้อีกด้วย ซึ่งจากผลงานวิจัย

พบว่านอกจากเราสามารถลดเวลานำ และงานระหว่างผลิตแล้ว ยังสามารถลดระยะเวลาในการขนส่งระหว่างกระบวนการผลิต อีกทั้งจะช่วยบริษัทลดค่าใช้จ่ายทางด้านค่าแรงของพนักงานที่สามารถลดไปได้ถึง 3 คนอีกด้วย แต่เนื่องจากความเคยชินในการผลิตชิ้นงานเป็น Batch การผลิตแบบน้อยชิ้นยังเป็นเรื่องใหม่สำหรับบริษัท ซึ่งต้องใช้เวลาในการปรับเปลี่ยนวัฒนธรรมองค์กรให้สอดคล้องกับระบบเพื่อทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งทำได้ยากเช่นกันในช่วงแรก

ในการวิจัยนี้สามารถลดเวลานำในการผลิตและชิ้นงานระหว่างกระบวนการผลิตในแผนการประกอบชิ้นส่วนด้านบนของตู้รถเข็นได้ ซึ่งสามารถนำแนวทางดังกล่าวไปประยุกต์เพื่อแก้ปัญหาลักษณะเดียวกันในกระบวนการผลิตชิ้นงานอื่น ๆ ได้

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้ทุนสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการทำวิจัย และขอขอบคุณบริษัท Zodiac Aircatering Equipment Thailand ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเก็บข้อมูลในการทำวิจัยในครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] พลฤทธิพงษ์ โปธิวรารพรม. การประยุกต์ใช้การผลิตแบบลีนในอุตสาหกรรมแบบผสม (แบบต่อเนื่อง-แบบช่วง) : กรณีศึกษาโรงงานผลิตเหล็กรูปพรรณ. วิทยานิพนธ์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2558.
- [2] ปฐมพงษ์ หอมศรี และจักรพรรณ คงชนะ. การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตโดยใช้แนวคิดการผลิตแบบลีน : กรณีศึกษาโรงงานผลิตปั้มน้ำรถยนต์. วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2555; 2: 40-62.
- [3] มุสตาซหะห์ ยูโซะ. การลดเวลานำในการผลิตและงานระหว่างผลิตในการผลิตตู้ขึ้นรถโดยสารโดยใช้เทคนิคการผลิตแบบลีน. วิทยานิพนธ์, วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2555.
- [4] คาราน้อย นริพล. การปรับปรุงปริมาณชิ้นส่วนระหว่างกระบวนการผลิตโดยใช้เทคนิคการจัดสมดุลสายการผลิต : กรณีศึกษาโรงงานประกอบแผ่นวงจรรีเลย์ทรอนิกส์. วิทยานิพนธ์, วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2552.
- [5] Womack, J. P. and Jones, D. T. Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation. 2003; 15-90.

# ผลของอัตราการไหลของน้ำที่มีต่อสมรรถนะของโมดูลพีวี/ที ในการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน

## Effect of Water Mass Flow Rate on PV/T Module for Electrical Power and Hot Water Generation

ธรณิศวรรค์ ดีทายาท\* และ อรรถกร อาสนาคำ

**Thoranis Deethayat\* and Attakorn Asanakham**

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

239 ถ.ห้วยแก้ว ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

\*E-mail: thoranisdee@gmail.com

### บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำที่มีต่อสมรรถนะในการผลิตไฟฟ้าและการผลิตน้ำร้อนของโมดูลโฟโตโวลเทอิก/ความร้อน, พีวี/ที, ชนิดผลึกเดี่ยว ขนาดพื้นที่รับรังสี 828 mm x 1,600 mm ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด 150 W<sub>p</sub> ต่อเข้ากับถังเก็บน้ำร้อนขนาด 50 ลิตร โมดูลเอียงทำมุม 18 องศา จากแนวระดับ หันหน้าทางทิศใต้ ในบทความได้เสนอโมเดลในการทำนายค่าอุณหภูมิน้ำร้อนที่ได้จากโมดูล อุณหภูมิเฉลี่ยของโมดูล และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ซึ่งผลการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองเป็นอย่างดี และโมเดลดังกล่าวได้ถูกนำมาหาสมรรถนะในการผลิตไฟฟ้า และน้ำร้อนที่ได้จากโมดูลที่อัตราการไหลต่าง ๆ จากการศึกษพบว่า การปรับอัตราการไหลที่เหมาะสม ตามค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ จะช่วยให้สมรรถนะในการผลิตไฟฟ้าสูงขึ้น และไม่กระทบกับอุณหภูมิน้ำร้อนในถังเก็บน้ำร้อน ในกรณีที่ความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าต่ำและอุณหภูมิน้ำในถังสูง การลดอัตราการไหลของน้ำจะช่วยให้สมรรถนะในการผลิตไฟฟ้าสูงขึ้น

**คำสำคัญ:** การผลิตไฟฟ้า การผลิตน้ำร้อน โมดูลพีวี/ที สมรรถนะ อัตราการไหล

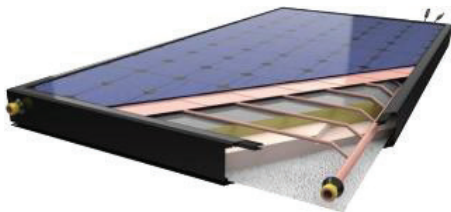
### ABSTRACT

This paper studied effect of water flow rate on power generation and hot water production performance of a 150 W<sub>p</sub> photovoltaic/thermal (PV/T) single crystalline module having an area of 828 mm x 1,600 mm. The unit was connected to a 50 L hot water storage tank. The module was facing south with 18° inclination. A model for predicting hot water temperature generated from the module, average module temperature and generated electrical power was presented and the calculated results agreed well with those of the experimental data. The model was also used to predict the performance on generated power and hot water temperature at various water mass flow rates. It could be found that with adjusting the suitable mass flow rate related to the solar radiation level, the performance on power generation could be improved without any effect on the hot water temperature in the storage tank. At low solar radiation level and high temperature of hot water in the storage tank, lower the mass flow rate resulted in higher the generated electrical power.

**Keywords:** Power Generation, Hot Water Generation, PV/T Module, Performance, Mass Flow Rate

## 1. บทนำ

โมดูลโฟโตโวลตาอิก/ความร้อน (โมดูลพีวี/ที) คือ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีน้ำไหลเวียนด้านหลัง ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งนอกจากช่วยควบคุมอุณหภูมิโมดูลไม่ให้สูงเกินไป สามารถผลิตไฟฟ้าโดยมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ยังสามารถใช้ผลิตน้ำร้อนมาใช้ประโยชน์ได้ ทำให้ประสิทธิภาพรวมสูงขึ้นจากการผลิตไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 1 โมดูลโฟโตโวลตาอิก/ความร้อน [1]

สมรรถนะของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ จะถูกกำหนดที่สภาวะมาตรฐาน โดยมีความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกบนโมดูล  $1,000 \text{ W/m}^2$  และอุณหภูมิโมดูล  $25^\circ\text{C}$  ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโมดูล จะลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น [2] จึงมีการระบายความร้อนจากโมดูลด้วยวิธีการต่างๆ เพื่อควบคุมอุณหภูมิโมดูลไม่ให้สูงเกินไป

ในการระบายความร้อนแบบพาสซีฟ (Passive Cooling) มีรายงานการใช้ท่อความร้อนแบบสั่น (Oscillating Heat Pipe) ติดที่ด้านหลังโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ระบายความร้อนสู่อากาศโดยตรง [2] รวมถึงการใช้สารเปลี่ยนเฟส (Phase Change Material, PCM) ในรูปของแข็ง-ของเหลว แนบติดที่ด้านหลังของโมดูล [3] โดยความร้อนจากโมดูล เมื่อมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมตัวของสาร PCM จะทำให้สาร PCM ละลาย ช่วยควบคุมอุณหภูมิของโมดูล แต่วิธีนี้ จะทำให้โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์มีน้ำหนักเพิ่มขึ้น และสาร PCM มีราคาค่อนข้างสูง สำหรับการระบายความร้อนแบบแอคทีฟ (Active Cooling) จะมีการเป่าอากาศผ่านด้านหลังของโมดูล [4, 5] หรือมีการฝังชุดท่อน้ำแนบติดด้านหลังแผ่นโมดูล และมีน้ำไหลเวียนช่วยในการควบคุมอุณหภูมิของโมดูลไม่ให้สูงเกินไป [6] ซึ่งนอกจากจะช่วยทำให้

ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้ายังคงมีค่าสูง ยังสามารถผลิตอากาศร้อน หรือน้ำร้อน เป็นผลพลอยได้อีกทางหนึ่ง โมดูลที่มีลักษณะเช่นนี้ จะเรียกว่า โมดูลโฟโตโวลตาอิก/ความร้อน, พีวี/ที (Photovoltaic/thermal Module, PV/T) อย่างไรก็ตาม ถ้าไม่มีการนำความร้อนหรือน้ำร้อนที่ผลิตได้ไปใช้ประโยชน์ กำลังไฟฟ้าสุทธิ ที่นำไปใช้ประโยชน์ อาจไม่ได้สูงกว่าโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ปกติ เนื่องจากจะต้องมีกำลังไฟฟ้า ส่วนหนึ่งเพื่อจ่ายให้มอเตอร์พัดลมหรือปั๊มน้ำในการขับเคลื่อนของไหลระบายความร้อน

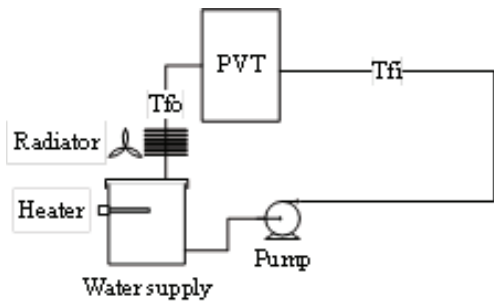
ในการระบายความร้อนแบบแอคทีฟ ไม่ว่าจะเป็นการใช้อากาศหรือน้ำเป็นของไหลในการระบายความร้อน พบว่าในงานวิจัยส่วนใหญ่ จะกำหนดอัตราการไหลในการทำงานเอง โดยยังไม่มีมาตรฐานหรือแนวปฏิบัติ ดังเช่นตัวเก็บรังสีอาทิตย์ในการผลิตน้ำร้อน ซึ่งกำหนดแนวปฏิบัติให้อัตราการไหลของน้ำจะอยู่ที่  $75 \text{ L/h.m}^2$  หรือประมาณ  $0.02 \text{ kg/s.m}^2$  [7]

สำหรับในงานวิจัยนี้ จะศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำที่มีต่อสมรรถนะโมดูลพีวี/ที เมื่อมีการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนมาใช้ประโยชน์ ที่อัตราการไหลต่างๆของน้ำ ทั้งนี้เมื่ออัตราการไหลและอุณหภูมิของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป จะมีผลกระทบต่อพลังงานไฟฟ้าและอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้ การเลือกอัตราการไหลที่เหมาะสม จะช่วยให้การทำงานของอุปกรณ์มีสมรรถนะรวมทั้งสูงขึ้น

## 2. อุปกรณ์ทดสอบ

รูปที่ 2 แสดงลักษณะชุดทดสอบ ประกอบด้วยโมดูลพีวี/ที ชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline PV/T Module) ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้ตามมาตรฐาน  $150 \text{ W}_p$  โดยมีขนาดพื้นที่รับรังสีอาทิตย์  $828 \text{ mm} \times 1600 \text{ mm}$  โมดูลหันหน้าทางทิศใต้และเอียงทำมุม  $18^\circ$  องศาจากแนวระดับ มีน้ำไหลเวียนจากถังเก็บที่หุ้มฉนวนอย่างดีปริมาตร  $50$  ลิตร มายังโมดูลพีวี/ที โดยจะมีชุดระบายความร้อนจากน้ำร้อนก่อนเข้าสู่ถัง และภายในถังมี

ลดให้ความร้อนเสริมขนาด 2 kW ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิน้ำในถังให้ได้ค่าตามที่ต้องการ



รูปที่ 2 ชุดทดสอบสมรรถนะโมดูลพีวี/ที

ในการทดสอบจะทำการวัดอุณหภูมิผิวโมดูลอุณหภูมิน้ำเข้าและออก อุณหภูมิอากาศโดยรอบด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K โดยมีความละเอียด  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$  ความเข้มรังสีอาทิตย์บนระนาบโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะทำการวัดด้วยไพรานอมิเตอร์ ความละเอียด  $\pm 15 \text{ W/m}^2$  และอัตราการไหลของน้ำจะวัดด้วย Flowmeter ความละเอียด  $\pm 4 \%$  การทดสอบจะดำเนินการหาคุณลักษณะทางความร้อน เมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงตัว เช่นเดียวกับการทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ในการผลิตน้ำร้อน

คุณลักษณะทางความร้อนของโมดูลพีวี/ที ในการผลิตน้ำร้อนจะคำนวณจาก

$$\dot{Q}_u = \dot{m}C_p(T_{fo} - T_{fi}) = A_c[F_R(\tau\alpha)_e I_T - F_R U_L (T_{fi} - T_a)] \quad (1)$$

โดย  $\dot{m}C_p$  คือผลคูณอัตราการไหลโดยมวลและความจุของน้ำที่ไปปรับความร้อนจากโมดูล, (W/K)  $T_{fi}$  และ  $T_{fo}$  คืออุณหภูมิน้ำเข้าและออกจากโมดูลตามลำดับ, ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_a$  คืออุณหภูมิอากาศโดยรอบ, ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $A_c$  คือพื้นที่รับรังสีอาทิตย์, ( $\text{m}^2$ )  $F_R(\tau\alpha)_e$  และ  $F_R U_L$  คือคุณลักษณะทางความร้อนที่เกี่ยวกับคุณสมบัติทางแสงและคุณสมบัติทางความร้อนของโมดูล, ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ) ตามลำดับ

จากสมการ (1) จะเห็นได้ว่า ถ้ากำหนดอุณหภูมิน้ำเข้าโมดูลและอัตราการไหล จะสามารถคำนวณอุณหภูมิ  $T_{fo}$  ได้โดย

$$T_{fo} = T_{fi} + \frac{A_c F_R (\tau\alpha)_e I_T - F_R U_L (T_{fi} - T_a)}{\dot{m} C_p} \quad (2)$$

สำหรับค่า  $F_R(\tau\alpha)_e$  และ  $F_R U_L$  จะสามารถทำการทดลอง เช่นเดียวกับกรณีการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ในการผลิตน้ำร้อน [7] และเมื่ออุณหภูมิโมดูลสูงกว่าอุณหภูมิของน้ำที่ไหลในท่อ จะมีความร้อนถ่ายเทจากอุณหภูมิผิวโมดูลไปยังของไหล โดยอาจกำหนดความสัมพันธ์ เมื่อสมมติให้อุณหภูมิโมดูลสม่ำเสมอ ได้ดังนี้ [8]

$$\frac{T_{fo} - T_{fi}}{T_c - T_{fi}} = 1 - e^{-\left(\frac{UA}{\dot{m}C_p}\right)} \quad (3)$$

$UA$  คือผลคูณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากอุณหภูมิโมดูลสู่อุณหภูมิของไหลที่ไหลในท่อ ซึ่งขึ้นกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลในท่อ สภาพการนำความร้อนของวัสดุและรูปร่างการวางท่อ สำหรับโมดูลที่ทำการทดสอบพบว่าค่า  $UA$  จากการทดสอบที่อัตราการไหลต่อหน่วยพื้นที่  $0.03 \text{ kg/s.m}^2$  จะมีค่า  $31.1 \text{ W/K}$  ซึ่งค่าดังกล่าวจะเป็นค่าอ้างอิง ( $UA_{ref}$ ) และเมื่อค่าอัตราการไหลต่อหน่วยพื้นที่เปลี่ยนแปลงไป ค่า  $UA$  จะคำนวณได้จาก  $UA/UA_{ref} = ((\dot{m}/A)/(\dot{m}_{ref}/A))^{0.444}$  โดย  $\dot{m}_{ref}/A = 0.03 \text{ kg/s.m}^2$

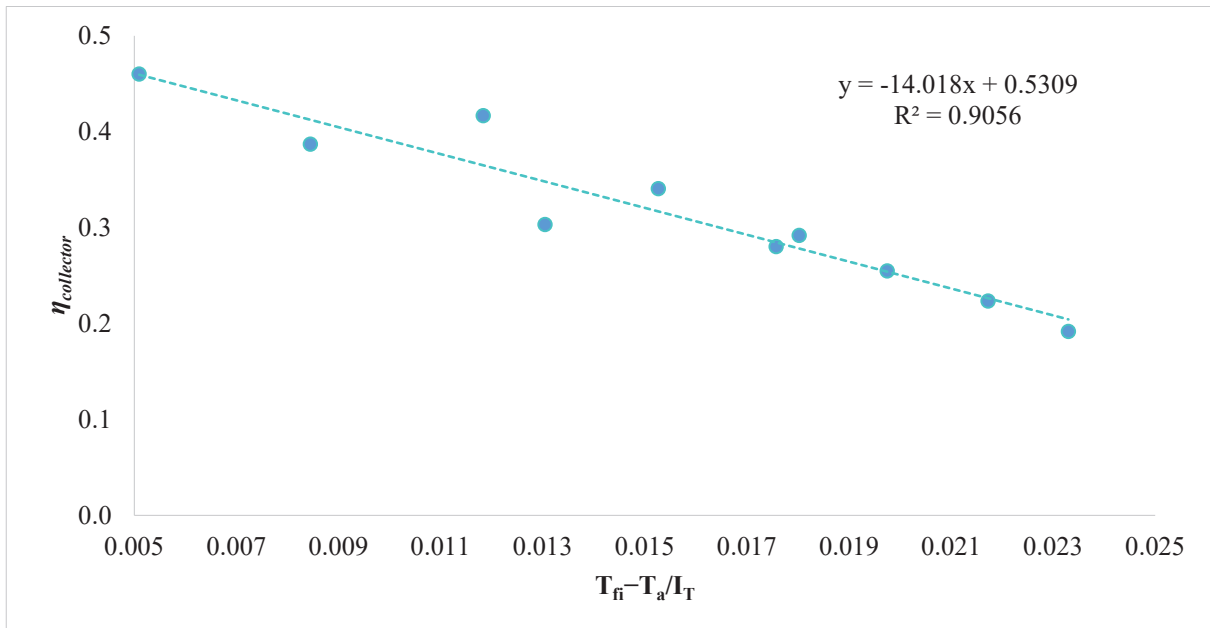
จากสมการ (3) ถ้ากำหนดค่า  $UA$  และ  $T_{fi}$  และจาก  $T_{fo}$  ในสมการ (1) จะสามารถคำนวณค่า  $T_c$  ได้ และจากอุณหภูมิโมดูล ( $T_c$ ) ถ้ากำหนดค่าความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศโดยรอบ จะสามารถประเมินค่ากำลังไฟฟ้า ( $P_e$ ) ที่ผลิตได้จากโมดูลพีวี/ที ทั้งนี้ ฐกฤตธรรม์และคณะ 2560 [8] ได้แสดงความสัมพันธ์พารามิเตอร์เหล่านี้ในรูป

$$P_e = -0.984 + 0.214I_T + (2.07 \times 10^{-5})I_T^2 - 1.83T_c + (4.7 \times 10^{-3})I_T T_c - (4.61 \times 10^{-6})I_T^2 T_c \quad (4)$$

จากสมการข้างต้น สามารถนำมาทำนาย สมรรถนะการ  
ทำงานของโมดูลพีวี/ที เมื่อมีการเปลี่ยนค่าอัตราการไหล  
และอุณหภูมิน้ำที่เข้าอุปกรณ์

### 3. ผลการศึกษา

รูปที่ 3 แสดงคุณลักษณะทางความร้อน  $F_R(\tau\alpha)_e$   
และ  $F_R U_L$  ของโมดูลพีวี/ที ที่อัตราการไหลของน้ำ  
ต่อหน่วยพื้นที่  $0.03 \text{ kg/m}^2\text{s}$  โดยอัตราการไหลต่อหน่วย  
พื้นที่นี้เป็นค่าอ้างอิง เทียบกับค่าที่อัตราการไหลต่อ  
หน่วยพื้นที่ค่าอื่นๆ



รูปที่ 3 สมรรถนะทางความร้อนของโมดูลพีวี/ที อัตราการไหลของน้ำ  $0.03 \text{ kg/m}^2\text{s}$

จากการทดสอบพบว่า  $F_R(\tau\alpha)_e$  และ  $F_R U_L$  จะมีค่า  
 $0.5781$  และ  $15.895 \text{ W/m}^2\text{K}$  ตามลำดับ

ในกรณีที่อัตราการไหลมีค่าแตกต่างจากค่าที่ทดสอบ  
ค่า  $F_R(\tau\alpha)_e$  และ  $F_R U_L$  สามารถปรับแก้ได้โดย

$$r = \frac{F_R U_L|_{used}}{F_R U_L|_{test}} = \frac{F_R(\tau\alpha)_e|_{used}}{F_R(\tau\alpha)_e|_{test}}$$

$$r = \frac{\frac{\dot{m}C_p}{A_c F' U_L} [1 - \exp(-A_c F' U_L / \dot{m} C_p)]|_{use}}{\frac{\dot{m}C_p}{A_c F' U_L} [1 - \exp(-A_c F' U_L / \dot{m} C_p)]|_{test}} \quad (5)$$

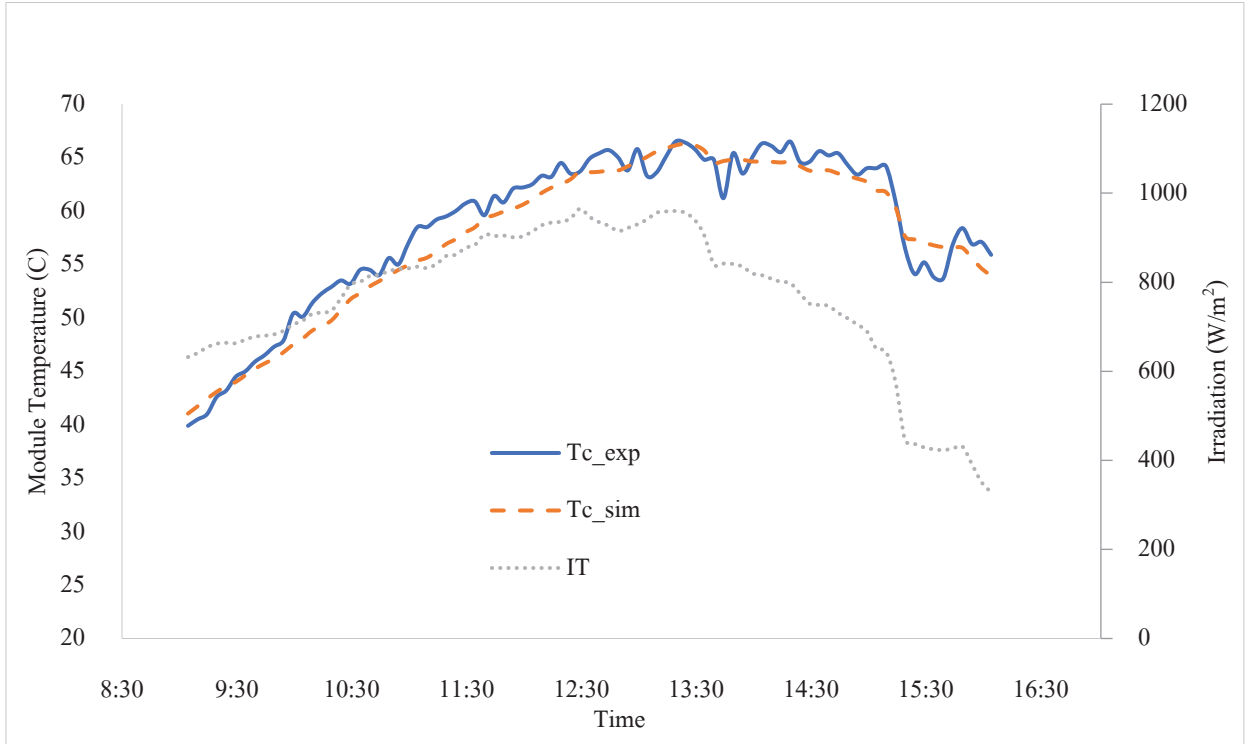
เมื่อ

$$F' U_L = -\frac{\dot{m}C_p}{A_c} \ln \left( 1 - \frac{F_R U_L A_c}{\dot{m} C_p} \right) \quad (6)$$

จากคุณลักษณะทางความร้อน  $F_R(\tau\alpha)_e$  และ  $F_R U_L$  ที่  
อัตราการไหลค่าต่างๆ จะสามารถคำนวณอุณหภูมิของ  
ไหลที่ออก  $T_{fo}$  ตามสมการ (2)

รูปที่ 4 แสดงอุณหภูมิของโมดูล  $T_c$  ที่เวลาต่าง ๆ  
โดยทำการหมุนเวียนน้ำที่อัตราการไหลต่อหน่วยพื้นที่  
 $0.03 \text{ kg/s.m}^2$  ระหว่างโมดูลและถังเก็บน้ำ พบว่าโมเดล  
ที่พัฒนาตามสมการข้างต้นสามารถทำนายอุณหภูมิ  $T_c$  ได้  
เป็นอย่างดี มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกิน 8%

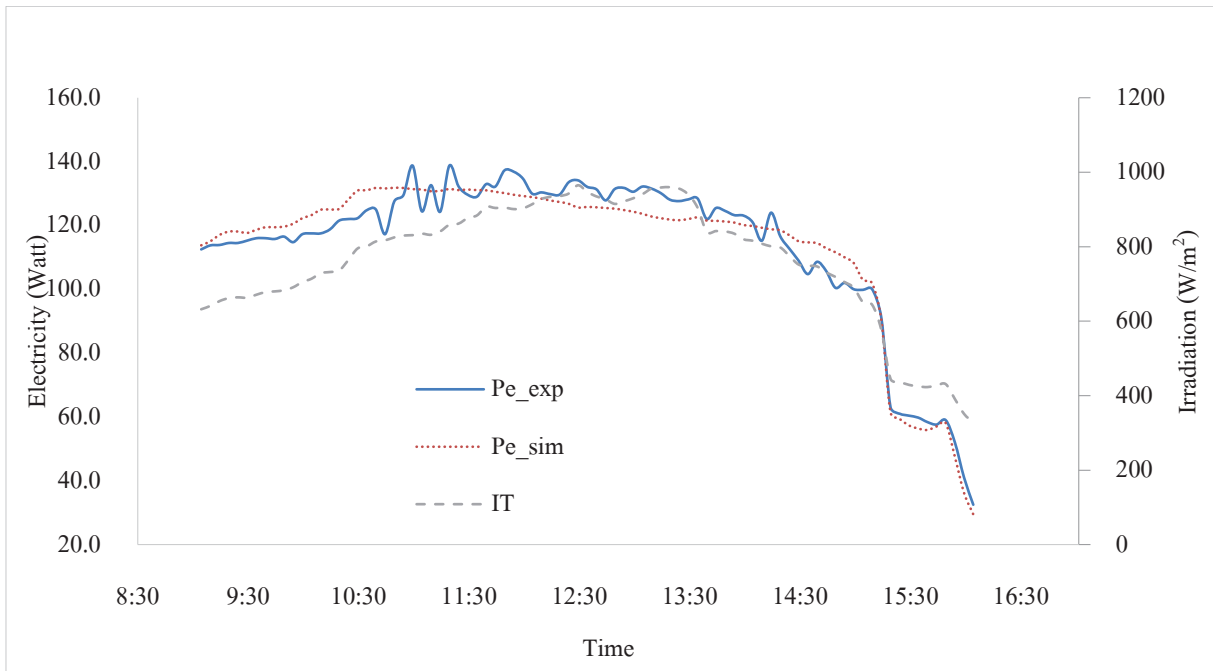




รูปที่ 4 อุณหภูมิของผิวโมดูลในการทดสอบทั้งวัน อัตราการไหลต่อหน่วยพื้นที่  $0.03 \text{ kg/s.m}^2$

จากสมการ (4) เมื่อทราบค่าอุณหภูมิ  $T_c$  และค่าความเข้มข้นของสารละลาย สามารถคำนวณกำลังไฟฟ้า  $P_e$  ที่ผลิตจาก

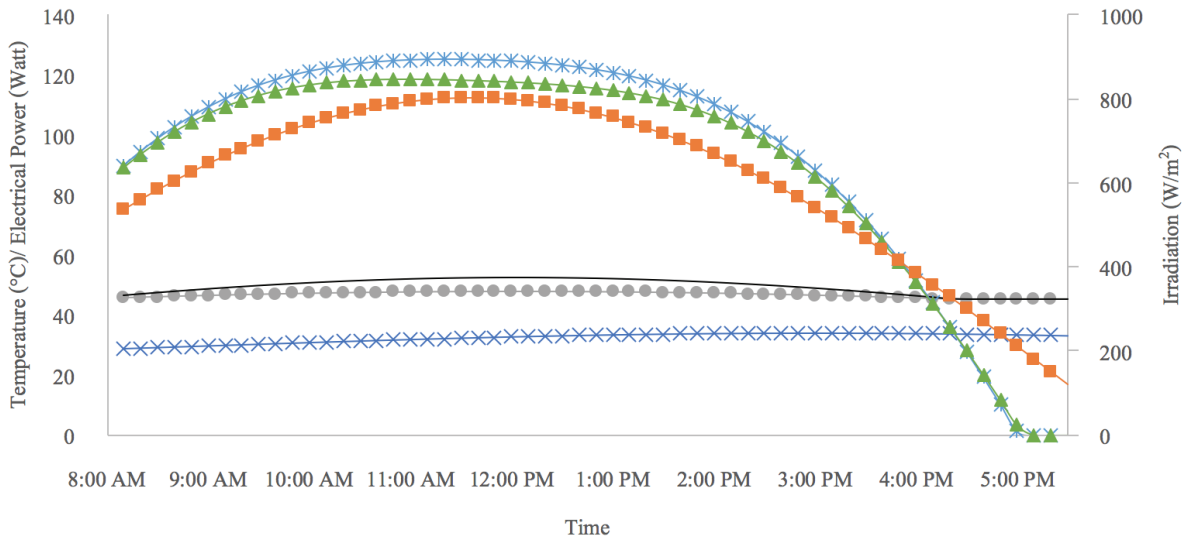
โมดูล ผลแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกิน 13.35%



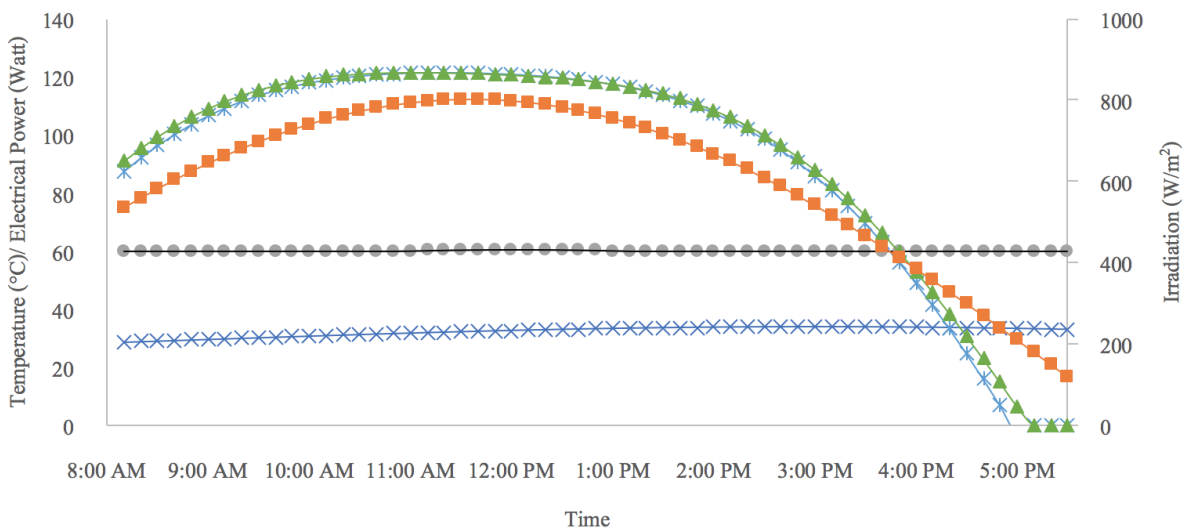
รูปที่ 5 กำลังไฟฟ้า  $P_e$  ที่ผลิตจากโมดูล อัตราการไหลต่อหน่วยพื้นที่  $0.03 \text{ kg/s.m}^2$

จากผลข้างต้น แสดงให้เห็นว่า โมเดลที่นำเสนอ ให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดสอบ จึงได้นำโมเดลนี้มา ทำนายสมรรถนะของโมเดล ในการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน ที่อัตราการไหล และอุณหภูมิน้ำเข้า ที่ค่าต่างๆ

รูปที่ 6 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยอุณหภูมิ น้ำ ในถังควบคุมให้อยู่ที่ประมาณ 45 และ 60°C ในวันที่ ท้องฟ้าแจ่มใส โดยเปรียบเทียบที่อัตราการไหลต่อหน่วย พื้นที่ 0.01 และ 0.03 kg/s.m<sup>2</sup>



ก. อุณหภูมิ น้ำในถังเริ่มต้นและอุณหภูมิควบคุมของลวดไฟฟ้าที่ 45°C



ข. อุณหภูมิ น้ำในถังเริ่มต้น และอุณหภูมิควบคุมของลวดไฟฟ้าที่ 60°C

รูปที่ 6 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยอุณหภูมิ น้ำในถังควบคุมอยู่ที่ประมาณ 45°C และ 60°C ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส

จากรูปที่ 6 ก. ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส อุณหภูมิ น้ำ ในถังเริ่มต้น 45°C ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.03 kg/s.m<sup>2</sup> พบว่าอุณหภูมิ น้ำในถังจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ที่ความเข้ม

รังสีอาทิตย์มีค่าสูง ในช่วงเวลาประมาณเที่ยงวัน ขณะที่ อัตราการไหลของน้ำที่มีค่าต่ำ 0.01 kg/s.m<sup>2</sup> อุณหภูมิ ของน้ำในถังมีค่าสูงกว่า ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.03

kg/s.m<sup>2</sup> และเนื่องจากอุณหภูมิที่ผลิตได้มีค่าสูง ทำให้ อุณหภูมิโมดูลจะสูงขึ้นด้วย ส่งผลให้สมรรถนะในการผลิตไฟฟ้าที่อัตราการไหลต่ำ มีค่าต่ำกว่าที่อัตราการไหลสูง

และจากรูปที่ 6 ข. ซึ่งเป็นวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส เช่นเดียวกัน แต่อุณหภูมิในถังถูกควบคุม และเริ่มต้นที่ 60°C ในช่วงเช้าและช่วงบ่าย ที่ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ต่ำ อุณหภูมิในถังที่อัตราการไหลสูงและต่ำ มีค่าใกล้เคียงกัน แต่สมรรถนะในการผลิตไฟฟ้าที่อัตราการไหลต่ำ จะดีกว่าที่อัตราการไหลสูง เนื่องจากที่อัตราการไหลต่ำ อุณหภูมิร้อนที่ออกจากโมดูลมีค่าลดลงมากกว่าที่อัตราการไหลสูง เนื่องจากผลของการสูญเสียความร้อน ทำให้ อุณหภูมิโมดูลเฉลี่ยของโมดูลที่อัตราการไหลต่ำ ต่ำกว่าที่อัตราการไหลสูง อย่างไรก็ตาม ในช่วงเวลาเที่ยงวัน ที่มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูง กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโมดูลที่มีอัตราการไหลของน้ำมีค่าสูง จะสูงกว่าที่อัตราการไหลของน้ำมีค่าต่ำ เล็กน้อย เนื่องจากอุณหภูมิโมดูลต่ำกว่าโมดูลที่มีอัตราการไหลต่ำ

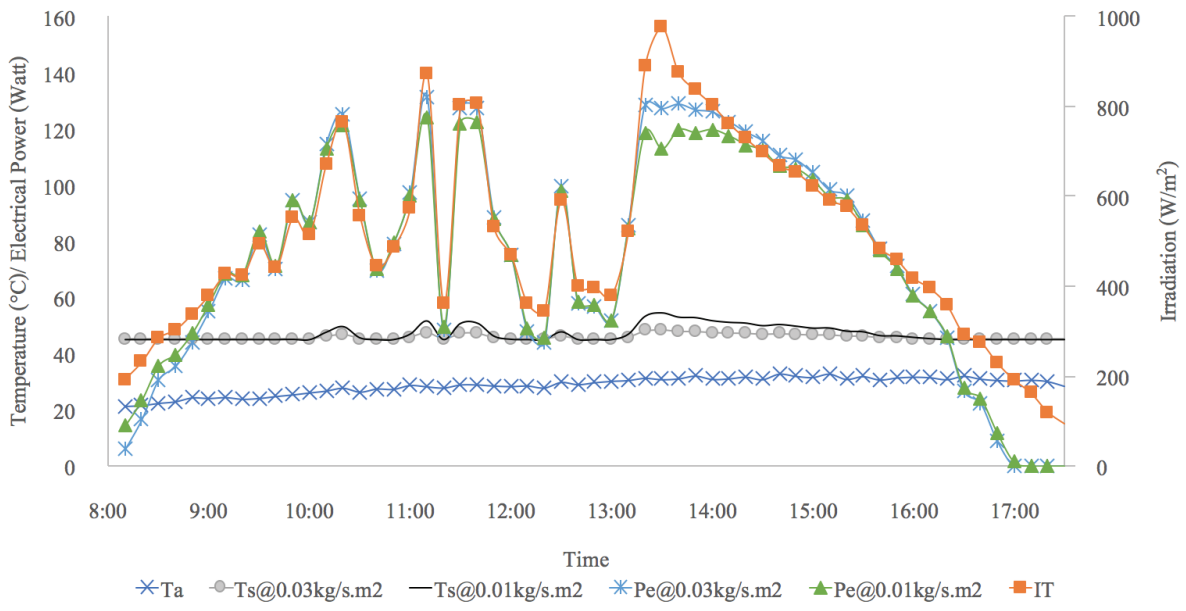
รูปที่ 7 แสดงสมรรถนะในการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน ในวันที่ท้องฟ้ามีเมฆมาก ทำให้ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ มีค่าไม่แน่นอนและแตกต่างกันมากตลอดทั้งวัน ในรูป 7 ก. ซึ่งอุณหภูมิเริ่มต้นและควบคุมของน้ำในถังมีค่า 45°C ในช่วงที่ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเช้าและบ่าย สมรรถนะในการผลิตไฟฟ้าที่อัตราการไหลของน้ำ 0.01 kg/s.m<sup>2</sup> จะมีค่าสูงกว่าที่อัตราการไหล 0.03 kg/s.m<sup>2</sup> แต่เมื่อไรก็ตามที่ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าสูง ผลที่ได้จะมีค่าตรงข้ามกัน และสำหรับอุณหภูมิในถัง เมื่อค่าความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าสูง อุณหภูมิในถังที่อัตราการไหล 0.01 kg/s.m<sup>2</sup>

จะมีค่าสูงกว่าที่อัตราการไหล 0.03 kg/s.m<sup>2</sup> เช่นเดียวกัน ในรูปที่ 7 ข. ซึ่งอุณหภูมิในถังมีค่าเริ่มต้นและควบคุมที่ 60°C พฤติกรรมดังกล่าวเป็นเช่นเดียวกัน แต่ที่ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูง ความสามารถในการจ่ายไฟไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากอุณหภูมิโมดูลมีค่าใกล้เคียงกัน

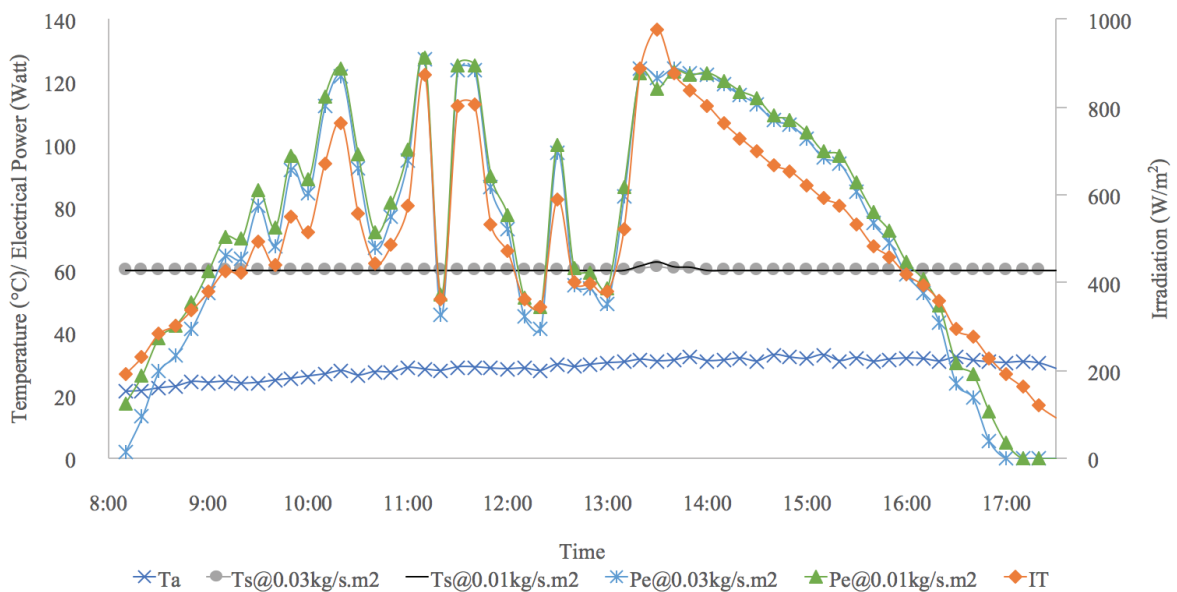
ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่า ในวันที่มีเมฆมาก และต้องการสมรรถนะในการผลิตไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพที่สุด ในช่วงเช้าที่มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ต่ำควรใช้อัตราการไหลของน้ำ 0.01 kg/s.m<sup>2</sup> และในช่วงที่ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ สูงควรใช้อัตราการไหลของน้ำ 0.03 kg/s.m<sup>2</sup>

รูปที่ 8 แสดงอัตราความร้อนเสริม (Q<sub>aux</sub>) ที่ลดไฟฟ้าต้องจ่ายให้แก่ น้ำร้อนในกรณี ที่อุณหภูมิในถังไม่ถึงระดับที่ควบคุมไว้ ซึ่งอุณหภูมิเริ่มต้นและควบคุมของน้ำในถังมีค่า 60°C ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส ในช่วงที่ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเช้าและบ่าย อุณหภูมิของน้ำจะต่ำ ทำให้ต้องมีการใช้อัตราความร้อนเสริมจากลดไฟฟ้า มากกว่าในช่วงที่มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูง สำหรับถึงขนาด 50 ลิตร ในรูป 8 ก. อัตราความร้อนเสริมรวมตลอดทั้งวันของอัตราการไหลของน้ำ 0.01 และ 0.03 kg/s.m<sup>2</sup> มีค่าเท่ากับ 0.73 และ 0.89 kWh ตามลำดับ ซึ่งพบว่าถ้าระบบใช้อัตราการไหลของน้ำ 0.01 kg/s.m<sup>2</sup> จะช่วยลดการใช้อัตราความร้อนเสริมได้ 15.5%

สำหรับถึงขนาด 100 ลิตร ในรูป 8 ข. อัตราความร้อนเสริมรวมตลอดทั้งวันของอัตราการไหลของน้ำ 0.01 และ 0.03 kg/s.m<sup>2</sup> มีค่าเท่ากับ 0.74 และ 0.85 kWh ตามลำดับ ซึ่งพบว่าถ้าระบบใช้อัตราการไหลของน้ำ 0.01 kg/s.m<sup>2</sup> จะช่วยลดการใช้อัตราความร้อนเสริมได้ 13.7%

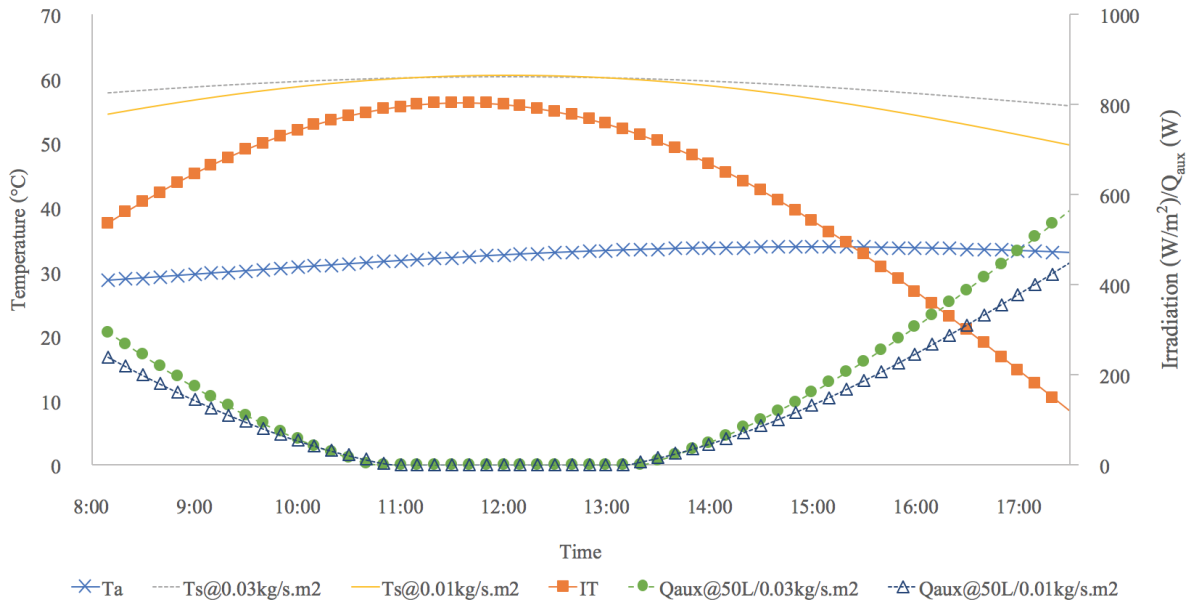


ก. อุณหภูมิน้ำในถังเริ่มต้นและอุณหภูมิควบคุมของลวดไฟฟ้าที่ 45°C

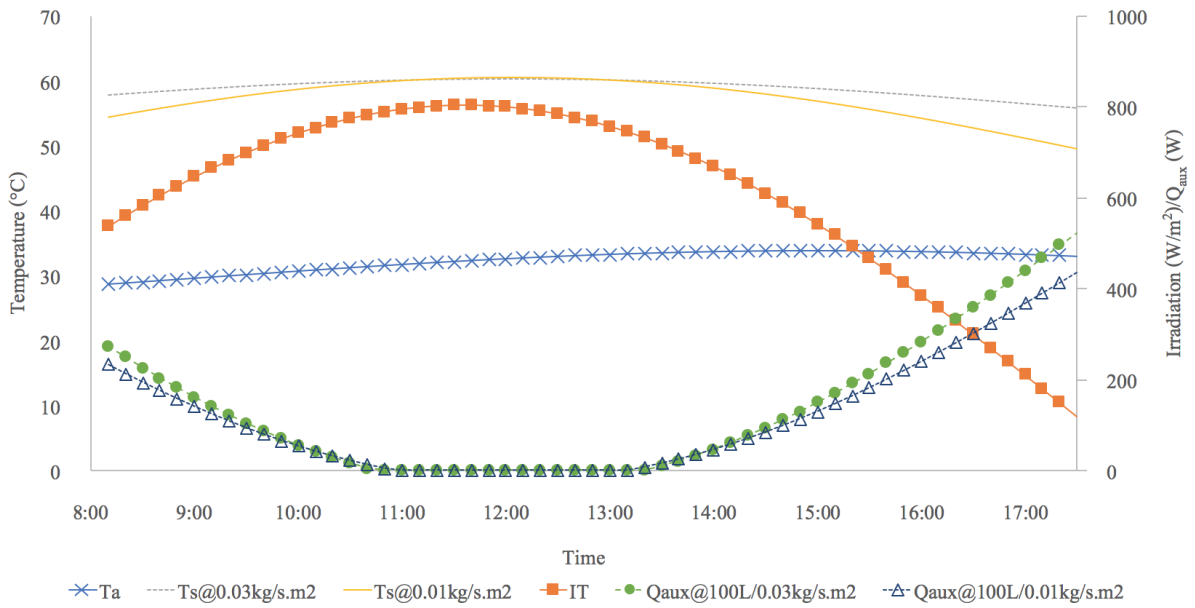


ข. อุณหภูมิน้ำในถังเริ่มต้น และอุณหภูมิควบคุมของลวดไฟฟ้าที่ 60°C

รูปที่ 7 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยอุณหภูมิน้ำในถังควบคุมให้อยู่ที่ประมาณ 45°C และ 60°C ในวันที่มีเมฆมาก

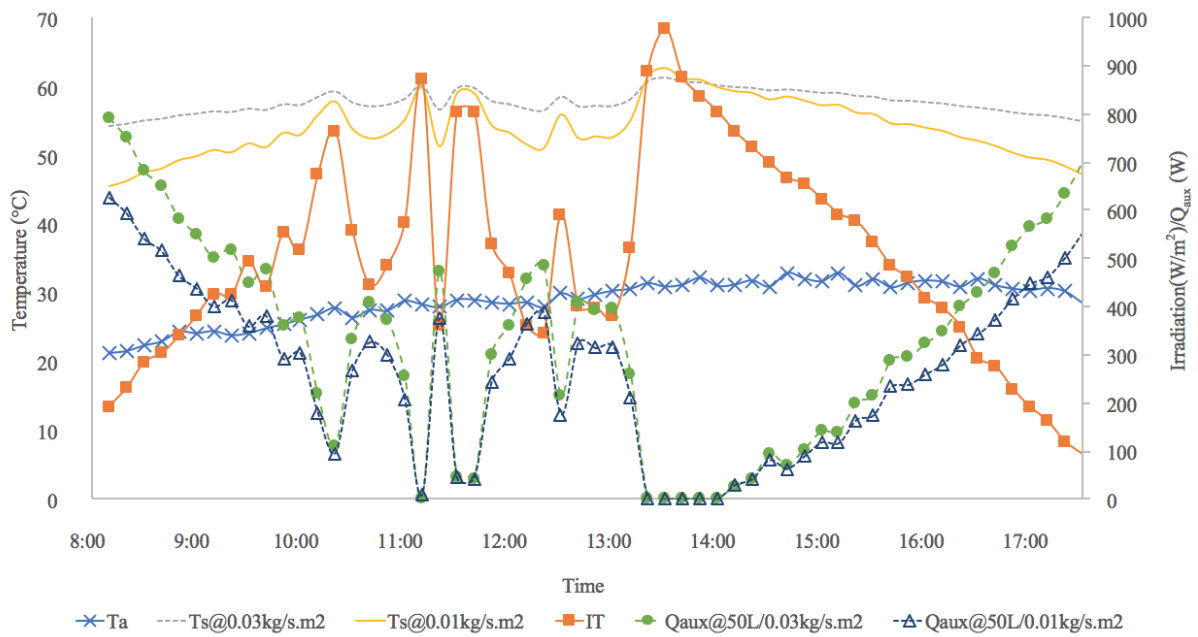


ก. ถังน้ำขนาด 50 ลิตร

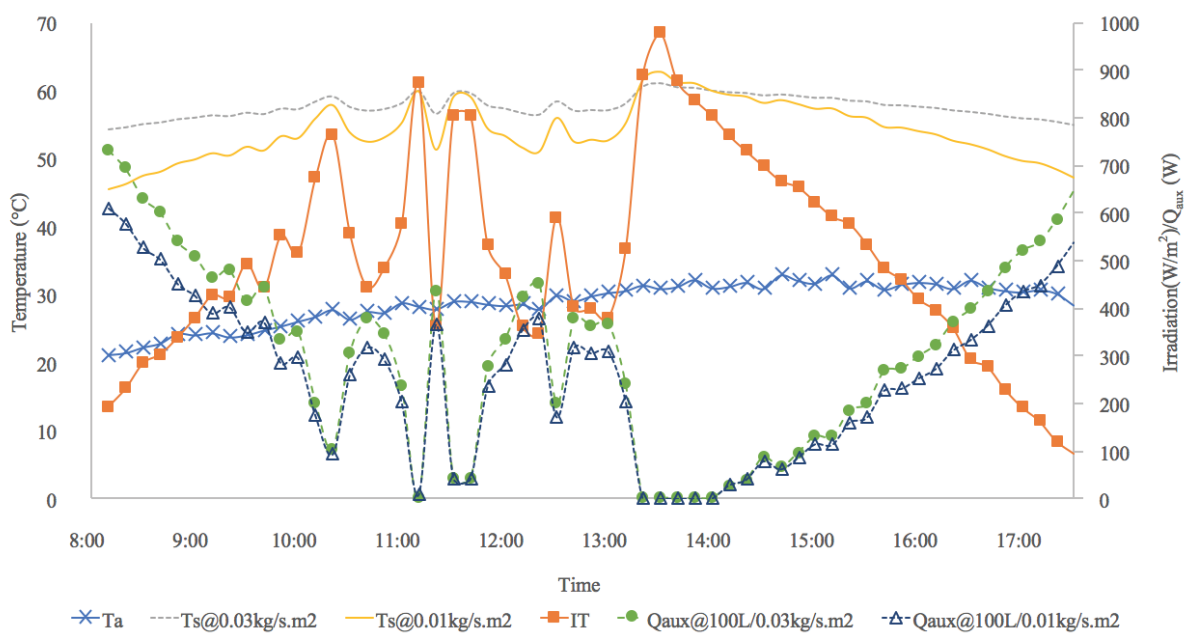


ข. ถังน้ำขนาด 100 ลิตร

รูปที่ 8 อัตราความร้อนเสริม ( $Q_{aux}$ ) ในการอุ่นน้ำในถังควบคุมให้อยู่ที่ประมาณ  $60^{\circ}\text{C}$  ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส



ก. ถังน้ำขนาด 50 ลิตร



ข. ถังน้ำขนาด 100 ลิตร

รูปที่ 9 อัตราความร้อนเสริม ( $Q_{aux}$ ) ในการอุ่นน้ำในถังควบคุมให้อยู่ที่ประมาณ 45°C และ 60°C ในวันที่มีเมฆมาก

รูปที่ 9 แสดงอัตราความร้อนเสริม ( $Q_{aux}$ ) ที่ลวดไฟฟ้าต้องจ่ายให้แก่น้ำร้อน กรณีที่อุณหภูมิไม่ถึงระดับที่ควบคุมไว้ ซึ่งอุณหภูมิเริ่มต้นและควบคุมของน้ำในถังมีค่า 60°C ในวันที่มีเมฆทำให้ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าไม่แน่นอนและแตกต่างกันมากตลอดทั้งวัน ทำให้ต้องมีการใช้อัตราความร้อนเสริมจากลวดไฟฟ้าที่สูง ในช่วงที่มี

ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ต่ำ สำหรับถังขนาด 50 ลิตร ตามรูป 9 ก. อัตราความร้อนเสริมรวมตลอดทั้งวันของการไหลของน้ำ 0.01 และ 0.03 kg/s.m<sup>2</sup> มีค่าเท่ากับ 1.67 และ 2.08 kWh ตามลำดับ ซึ่งพบว่าถ้าระบบใช้อัตราการไหลของน้ำ 0.01 kg/s.m<sup>2</sup> จะช่วยลดการใช้อัตราความร้อนเสริมได้ 19.7% และสำหรับถังขนาด 100



ลิตร ตามรูป 9 ข. อัตราความร้อนเสริมรวมตลอดทั้งวันของอัตราการไหลของน้ำ 0.01 และ 0.03 kg/s.m<sup>2</sup> มีค่า 1.63 และ 1.92 kWh ตามลำดับ ซึ่งพบว่าถ้าระบบใช้อัตราการไหลของน้ำ 0.01 kg/s.m<sup>2</sup> จะช่วยลดการใช้ความร้อนเสริมได้ 15.5%

#### 4. สรุป

ในงานวิจัยนี้ ได้ศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำที่มีต่อสมรรถนะในการผลิตไฟฟ้าและการผลิตน้ำร้อนของโมดูลพีวี/ที ชนิดผลึกเดี่ยว อีกทั้งยังเสนอโมเดลในการทำนายค่าอุณหภูมิน้ำร้อนที่ได้จากโมดูล อุณหภูมิเฉลี่ยของโมดูล และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ซึ่งผลการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบ จึงได้นำโมเดลนี้มาทำนายสมรรถนะของโมดูล ในการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน ที่อัตราการไหล และอุณหภูมิน้ำเข้า ที่ค่าต่างๆ จากการศึกษาพบว่าถ้ามีการปรับอัตราการไหลที่เหมาะสม ตามค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จะช่วยให้สมรรถนะในการผลิตไฟฟ้าสูงขึ้นและไม่กระทบกับอุณหภูมิน้ำร้อนในถังเก็บน้ำร้อนในกรณีที่ความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าต่ำและอุณหภูมิน้ำในถังสูง การลดอัตราการไหลของน้ำจะช่วยให้สมรรถนะในการผลิตไฟฟ้าสูงขึ้น และในกรณีที่ความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่า

สูงการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำ จะช่วยให้สมรรถนะในการผลิตไฟฟ้าสูงขึ้นเช่นกัน และเมื่อพิจารณาอัตราความร้อนเสริมที่ลดไฟฟ้าต้องจ่ายให้แก่ น้ำร้อน เมื่อกำหนดอุณหภูมิน้ำเริ่มต้นในถัง 60°C ขนาดถัง 50 และ 100 ลิตร ที่อัตราการไหลของน้ำต่ำจะช่วยลดการป้อนความร้อนเสริมได้ไม่ต่ำกว่า 13% ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราความร้อนเสริมที่ป้อนให้ระบบ

ขนาดถัง	50L		100 L	
อัตราการไหล (kg/sm <sup>2</sup> )	0.01	0.03	0.01	0.03
อัตราความร้อนเสริมที่ความเข้มรังสีอาทิตย์สูง (kWh)	0.73	0.89	0.74	0.85
อัตราความร้อนเสริมที่ความเข้มรังสีอาทิตย์ต่ำ (kWh)	1.67	2.08	1.63	1.92

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของ โครงการศึกษาภาพในการผลิตไฟฟ้า น้ำร้อน และน้ำเย็นจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดไฮบริดที่ผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน ที่ได้รับการสนับสนุนงบประมาณวิจัยจาก งบประมาณแผ่นดิน ปี พ.ศ. 2561 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Sun, V., and Deethayat, T. Evaluation of Normal Operating Cell Temperature of Unglazed PVT Module for Power Generation. การประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงานความร้อน และมวลในอุปกรณ์ทางความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 17, วันที่ 15-16 กุมภาพันธ์, ลำปางริสอร์ท จังหวัดลำปาง, 2561.
- [2] Skoplaki, E. and Palyvos, J.A. Operating Temperature of Photovoltaic Modules: A Survey of Pertinent Correlations. *Renewable Energy*. 2009; 34: 23–29.
- [3] อรรถกร อาสนคำ, อิสระพงศ์ กันธิยะ และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. การทำนายสมรรถนะโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ภายใต้การทำงานจริง. *วารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2558; 22(3): 88-94.
- [4] ธนัญญ์ ลังกาดี และ อรรถกร อาสนคำ. การประเมินสมรรถนะโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาในกรณีที่มีและไม่มีภาระบายความร้อนด้วยอากาศ. *วารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2559; 23(3): 130-141.
- [5] ฉัฐนี วรรษ, วิภาวดี วงษ์สุวรรณ และทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. การพัฒนาระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ในประเทศไทย. *วารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*. 2552; 16(2): 55-69.

- [6] ชันษา ผาสุกศาสตร์ และสราวุธ พลวงษ์ศิริ. การเพิ่มสมรรถนะเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้ระบบระบายความร้อนด้วยท่อความร้อนแบบสั้น. การประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงานความร้อน และมวลในอุปกรณ์ทางความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 15, วันที่ 30 – 31 มีนาคม, โรงแรม แอลริสอร์ท สมุย จังหวัดสุราษฎร์ธานี, 2559.
- [7] Sun, V., Asanakham, A., Deethayat, T., and Kiatsiriroat, T. Study on Phase Change Material and Its Appropriate Thickness for Controlling Solar Cell Module Temperature. *International Journal of Ambient Energy*, 2018; 64-73.
- [8] รุกฤตธรรม์ ปัญศิริ, ธรณิศวรรค์ ดีทายาท และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. การทดสอบสมรรถนะและการพัฒนาโมเดลในการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนของโมดูลไฮบริดพีวี/ที. การประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงานความร้อน และมวลในอุปกรณ์ทางความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 16, วันที่ 23-24 กุมภาพันธ์, ศูนย์ฝึกอบรมธนาคารไทยพาณิชย์ จังหวัดเชียงใหม่เชียงใหม่, 2560.

# การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการแปรรูปชาเขียวพันธุ์อัสสัม แบบดั้งเดิมระดับวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม

## An Economic Analysis of Conventional var. Assamica Green Tea Processing in Small and Medium Enterprises (SME)

สุนทร สืบคำ<sup>1\*</sup>, เจนจิรา ภูการณ<sup>1</sup>, นิภา นีพวงลา<sup>1</sup>, โชติพงษ์ กาญจนประโชติ<sup>1</sup> และ สุมิตร เชื้อมชัยตระกูล<sup>2</sup>  
 Sunate Surbkar<sup>1\*</sup>, Janjira Phukan<sup>1</sup>, Nipa Nipuangla<sup>1</sup>, Choatpong Kanjanaphachot<sup>1</sup>  
 and Sumit Chueamchaitrakun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>วิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ.เชียงใหม่ 50290

<sup>1</sup>Agricultural Engineering, Faculty of Engineering and Agro-Industry,  
 Maejo University, Chiang Mai, Thailand, 50290

<sup>2</sup>วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่, 50290

<sup>2</sup>Food Science and Technology, Faculty of Engineering and Agro-Industry,  
 Maejo University, Chiang Mai, Thailand, 50290

\*Corresponding author: Tel: +66-5387-5019, Fax: +66-5387-5011, E-mail: sunate@mju.ac.th

### บทคัดย่อ

กระแสการประกอบอาชีพอิสระกำลังเป็นที่น่าสนใจและน่าลงทุน การแปรรูปชาก็เป็นหนึ่งในตัวเลือกที่ดีในการประกอบธุรกิจส่วนตัว งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการแปรรูปชาเขียวพันธุ์อัสสัม (*Camellia sinensis* var. Assamica) ในจังหวัดเชียงราย โดยเก็บข้อมูลในเดือนธันวาคม 2561 การแปรรูปชาเขียวใบอ่อน 1 ชั่ว และชาเขียวใบแก่ 3 ชั่ว และนำเสนอผลการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์วิศวกรรมเพื่อเป็นแนวทางในการตัดสินใจดำเนินธุรกิจ เราพบว่ากระบวนการแปรรูปชาเขียวใบอ่อน หากใช้ใบชาเขียวสด 10.8 kg ( $76.70 \pm 0.59$  %w.b.) จะได้ชาเขียวแห้ง 2.36 kg ( $6.66 \pm 0.26$  %w.b.) คิดเป็นอัตราส่วน 5:1 ส่วนการแปรรูปชาเขียวใบแก่ หากใช้ใบชาแก่สด 12.67 kg ( $70.20 \pm 0.19$  %w.b.) จะได้ชาแก่แห้ง 4.25 kg ( $2.24 \pm 0.13$  %w.b.) คิดเป็นอัตราส่วน 3:1 ชาที่ผลิตจาก SME นี้มีสมบัติทางกายภาพดี โดยชาเขียวใบอ่อนมีสารโพลีฟีนอลมากกว่าชาแก่ ซึ่งแสดงว่าชาเขียวใบอ่อนมีคุณภาพดีกว่าใบแก่ แต่อย่างไรก็ตามความพึงพอใจในการดื่มชา ขึ้นอยู่กับความชอบ ความคุ้นชิน และอื่น ๆ การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ทำให้ทราบว่าการลงทุนแปรรูปชาเขียวใบอ่อนจะต้องมีเงินลงทุนครั้งแรก 935,000 บาท และประมาณ 985,000 ล้านบาท สำหรับชาเขียวใบแก่ ปริมาณการผลิตทั้งปีของชาเขียวใบอ่อนต่อชาเขียวใบแก่มีค่า 1 ต่อ 22 เนื่องจากชาเขียวใบอ่อนนั้นไม่สามารถผลิตได้ทุกวันเหมือนชาใบแก่ จากผลการวิจัยจึงสามารถสรุปได้ว่า ผู้ประกอบการใหม่ที่มีต้นทุนจำกัดควรลงทุนแปรรูปชาเขียวใบแก่เพราะสามารถผลิตได้ตลอดทั้งปี ทำให้มีระยะเวลาคืนทุนสั้นกว่า หากภายหลังมีเงินทุนเพิ่มอาจขยายการแปรรูปชาเขียวใบอ่อนเพิ่มเติม

คำสำคัญ: จุดคุ้มทุน ระยะเวลาคืนทุน การแปรรูปชา

## ABSTRACT

The current issue of self-employed is becoming more interesting and attractive. A tea processing is one of the best options for freelance. Therefore, this research aims to study the processing of green tea; assam variety (*Camellia sinensis* var. Assamica) in Chiang rai, data were collected in Dec 2018 with young green tea production for 1 rep, and mature green tea for 3 rep. Data analysis also emphasized on the engineering economics analysis as a guideline for business decisions. We found that fresh young tea leaves of 10.8 kg ( $76.70 \pm 0.59\%$ w.b.) produced dried young tea of 2.36 kg ( $6.66 \pm 0.26\%$ w.b.) with the recovery ratio of 5:1. On the other hand, fresh mature tea leaves of 12.67 kg ( $70.20 \pm 0.19\%$ w.b.) produced dried mature tea of 4.25 kg ( $2.24 \pm 0.13\%$ w.b.) with the recovery ratio of 3:1. Good physical properties of these dried teas produced by this SME can be preserved. The phenolic compounds within those tea drinks showed that the amount of polyphenols in young tea drink was higher than that of in mature tea drink, indicated that young tea drink should be better in term of healthy than that of mature tea drink. However, the preference of tea drink is individual depending on the linking, preferness and so on. The economic analysis showed that the initial capital for young green tea processing was about 935,000 baht and for mature green tea was about 985,000 baht. Due to the young green tea cannot be produced every day like mature one, the annual production volume of young green tea over the mature one was a ratio of 1 to 22. From the findings, it can be concluded that new entrepreneurs with limited capital should invest on mature green tea as it can be produced throughout the year; resulted in a shorter payback period. If additional funds are available, the processing of young green tea can be extended.

**Keyword:** Break-even point, Payback period, tea processing

### 1. บทนำ

ชาที่ปลูกในประเทศไทยนิยมนำมาแปรรูปเป็นเครื่องดื่มและผลิตภัณฑ์อื่น ๆ หลายชนิด พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของใบชามีความสำคัญเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น การนำใบชามาแปรรูปสามารถแบ่งตามกระบวนการหมักได้ 3 ประเภท ได้แก่ ชาไม่หมักหรือชาเขียว (Non-fermented tea or green tea) ชากึ่งหมักหรือชาอู่หลง (Semifermented or oolong tea) และชาหมักหรือชาดำ (Fermented tea or black tea) ซึ่งการหมักนี้ให้สี กลิ่น รสชาติที่แตกต่างกันด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก ๆ 2 ปัจจัย ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมีของใบชา และกระบวนการผลิตชา โดยองค์ประกอบทางเคมีของใบชาที่แตกต่างกันเป็นผลมาจากสายพันธุ์ชา สภาพพื้นที่ปลูก สภาพภูมิอากาศ ความอุดมสมบูรณ์ของดิน น้ำ และการดูแลรักษา ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันนี้จะส่งผลต่อปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต ทำให้ได้ชาที่มีกลิ่นและรสชาติที่แตกต่างกันไป [1] โดยสารที่มีผลต่อรสชาติของชาคือ สารโพลีฟีนอล (Polyphenols) ซึ่งพบในใบชาสดทั้งหมดประมาณร้อยละ 10-25 โดยน้ำหนักแห้งทำให้เกิดรสฝาด (Astringent taste) สารประกอบ

โพลีฟีนอลส่วนใหญ่เป็น สารกลุ่มฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระและสารต้านการกรดยาพิษ [2] สารประกอบโพลีฟีนอลที่พบมากในชา ได้แก่ แทนนิน พบในใบชาประมาณร้อยละ 20-30 โดยน้ำหนักเป็นสารที่ทำให้เกิดรสฝาดและรสขม (Bitter) ใบชาแก่จะมีปริมาณแทนนินมากกว่าใบชาอ่อน จึงทำให้ชาใบแก่มีรสฝาดมากกว่า สารประกอบแทนนินสำคัญที่พบในชา คือ คาเทชิน (Catechin) [3] คาเทชินจัดอยู่ในกลุ่มเป็นฟลาโวนอล มีประมาณร้อยละ 60-70 ของโพลีฟีนอลทั้งหมด จัดเป็นสารที่ไม่มีสี ให้รสขมและฝาด คาเทชินมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าวิตามินซีและวิตามินอีถึง 25-100 เท่า [4] นอกจากนี้ในชายังพบว่ามีสารคาเฟอีนซึ่งไม่มีกลิ่นมีรสขม มีคุณสมบัติในการช่วยกระตุ้นให้ระบบประสาทและร่างกายสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ พบอยู่ในใบชาประมาณร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก [5] งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการแปรรูปชาเขียวใบอ่อนและใบชาแก่และพลังงานที่ใช้เพื่อเป็นข้อมูลให้ผู้ที่ประกอบธุรกิจ SME ตัดสินใจ รวมถึงศึกษาสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของชาเขียวใบอ่อนและใบแก่แห้งที่ผลิตด้วยกระบวนการดังกล่าวได้มาตรฐานหรือไม่ และ

นำเสนอผลวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์เพื่อหาจุดคุ้มทุนและระยะเวลาคืนทุนในการใช้เครื่องจักรในการแปรรูปชาเขียวพันธุ์อัสสัม

## 2. อุปกรณ์และวิธีการ

### 2.1 ใบชาที่ใช้ในการทดสอบ

ใบชาที่ใช้ในการทดสอบเป็น ใบชาพันธุ์อัสสัม (*Camellia sinensis* var. *Assamica*) ซึ่งปลูกที่ไรชาหยดน้ำค้าง บ้านห้วยน้ำกิน หมู่ 13 ตำบลแม่เจดีย์ใหม่ อำเภอเวียงป่าเป้า จังหวัดเชียงราย

### 2.2 กระบวนการแปรรูป

กระบวนการแปรรูปชาที่ศึกษาเป็นของไรชาหยดน้ำค้าง จังหวัดเชียงราย ซึ่งเป็นทั้งผู้ปลูกและผู้รับซื้อใบชาเพื่อนำมาแปรรูป

### 2.3 การหาพลังงานที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปชา

#### 2.3.1 พลังงานไฟฟ้า

กำลังไฟฟ้า คือการป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าไปในโหลดเพื่อทำให้เกิดพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ เช่น พลังงานแสงสว่าง พลังงานความร้อน พลังงานกล เป็นต้น ดังนั้นสูตรการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าคือ [6]

$$P = EI \quad (1)$$

เมื่อ  $P$  = กำลังไฟฟ้า (W)

$E$  = แรงดันไฟฟ้า (V)

$I$  = กระแสไฟฟ้า (A)

การหาปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า หาได้จากการทราบค่าทางไฟฟ้า (แคลมป์มิเตอร์ยี่ห้อ Yugo รุ่น YG2017) และระยะเวลาการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้า เพื่อคำนวณหาพลังงานไฟฟ้า ในหน่วยกิโลวัตต์-ชั่วโมง ดังสมการ

$$\text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kW-hr)} = \text{กำลังไฟฟ้า} / 1000 \times \text{เวลาที่ใช้อุปกรณ์ไฟฟ้า} \quad (2)$$

#### 2.3.2 พลังงานแก๊สเชื้อเพลิง

การหาค่าพลังงานแก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้ โดยแก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้คือ แก๊สปิโตรเลียมเหลว (Liquid petroleum gas, LPG) มีค่าความร้อน 50,220 kJ/kg [7] ซึ่งต้องชั่งน้ำหนัก

แก๊ส LPG ก่อนและหลังการใช้งาน แล้วนำมาคำนวณตามสมการ (3)

$$\text{พลังงานแก๊สที่ใช้} = \text{น้ำหนักของแก๊สที่ใช้ (kg)} \times \text{ค่าความร้อนของแก๊ส LPG (kJ/kg)} \quad (3)$$

#### 2.3.3 พลังงานชีวมวล

ชีวมวลที่ใช้เป็นไม้ในวงศอก ที่แห้งตายในสวนชาบ้านในการคำนวณพลังงานที่ใช้จะต้องชั่งน้ำหนักก่อนและหลังการใช้งาน แล้วนำมาคำนวณตามสมการ

$$\text{พลังงานชีวมวลที่ใช้} = \text{น้ำหนักของชีวมวลที่ใช้ (kg)} \times \text{ค่าความร้อนของชีวมวล (kJ/kg)} \quad (4)$$

ทั้งนี้ฟืนหรือไม้มีค่าความร้อนเท่ากับ 15,990 kJ/kg [7]

### 2.4 ความชื้นของใบชา

ความชื้นของใบชาหาโดยวิธีมาตรฐานโดยใช้ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) (ยี่ห้อ Binder รุ่น FD 260) และเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล (ยี่ห้อ Sartorius รุ่น CP 3202 S) อุณหภูมิที่ใช้คือ 105°C นาน 24 ชั่วโมง ตามวิธีของ AOAC [8] การคำนวณความชื้นฐานเปียกแสดงดังสมการ (5)

$$m = \frac{W_t - W_d}{W_t} \times 100 \quad (5)$$

เมื่อ  $m$  = ปริมาณความชื้นฐานเปียก (% w.b.)

$W_t$  = มวลเริ่มต้นของชา (g)

$W_d$  = มวลแห้งของชา (g)

### 2.5 ความสามารถในการดูดคืนน้ำของผลิตภัณฑ์แห้ง

การศึกษาความสามารถในการดูดคืนน้ำของผลิตภัณฑ์แห้ง ดำเนินการตามวิธี Maskan [9] โดยนำตัวอย่างของชาเขียวแห้งทั้งสองชนิดมาชั่งน้ำหนักเริ่มต้น จากนั้นนำใบชาที่ชั่งน้ำหนักแล้วมาแช่ในน้ำร้อนอุณหภูมิ 50°C ทุก ๆ ช่วงเวลาละ 10 นาที แล้วชั่งน้ำหนักส่วนเกินในใบชาให้แห้ง แล้วชั่งน้ำหนัก ทำติดต่อกันจนกว่าน้ำหนักใบชาแห้งจะคงที่คำนวณหาอัตราการดูดคืนน้ำของผลิตภัณฑ์แห้งจากสมการ (6)

$$R = \left( \frac{W_t - W_d}{W_d} \right) \times 100 \quad (6)$$

เมื่อ  $R =$  อัตราการดูดคืนน้ำของผลิตภัณฑ์แห้ง (%)  
 $W_d =$  น้ำหนักของผลิตภัณฑ์เริ่มต้น (g)  
 $W_t =$  น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่คืนตัว (g)

## 2.6 การได้คืนของผลิตภัณฑ์

การศึกษาการได้คืนของผลิตภัณฑ์ดำเนินการตามวิธี Duan et al. [10] โดยคำนวณจากน้ำหนักของผลิตภัณฑ์สดก่อนการอบแห้งและน้ำหนักของผลิตภัณฑ์แห้งดังสมการ (7)

$$R_{rec} = \left( \frac{m}{m_0} \right) \times 100 \quad (7)$$

เมื่อ  $R_{rec} =$  อัตราการได้คืนของผลิตภัณฑ์ (%)  
 $m =$  น้ำหนักของผลิตภัณฑ์สดก่อนการอบแห้ง (g)  
 $m_0 =$  น้ำหนักของผลิตภัณฑ์แห้ง (g)

## 2.7 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมี

การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีดำเนินการโดยนำตัวอย่างชาเขียวใบอ่อนและใบแก่ที่ผ่านกระบวนการแปรรูปแล้วจากโรงงานชาไร้ชาหยดน้ำค้างมาวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีที่สถาบันชา มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง ด้วยวิธี ISO 14502-2:2005 โดยพิจารณาสารประกอบโพลีฟีนอลซึ่งได้แก่ Epigallocatechin (EGC), Catechin (C), Epigallocatechin gallate (EGCG), Caffeine (CF), Epicatechin (EC) และ Epicatechin gallate (ECG)

## 2.8 การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

### 2.8.1 จุดคุ้มทุน (Break even point: BEP)

ในการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนในการแปรรูปชาทั้งสองชนิดได้แบ่งโครงสร้างต้นทุนออกเป็น 2 ส่วน คือ ต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปร โดยมีรายละเอียดต้นทุนแต่ละประเภทดังนี้

1) ต้นทุนคงที่ ประกอบด้วย ค่าเสื่อมราคาเครื่องจักรแต่ละเครื่อง และค่าอาคารโรงเรือน

2) ต้นทุนผันแปร ประกอบด้วย ค่าใบชาสด ค่าซ่อมแซมและบำรุงรักษา ค่าแรงงาน และค่าวัสดุและอุปกรณ์ประกอบอื่น ๆ จุดคุ้มทุนคำนวณจาก [11]

$$\text{จุดคุ้มทุน} = \frac{\text{ต้นทุนคงที่}}{\text{(ราคาขายต่อหน่วย - ต้นทุนแปรผันต่อหน่วย)}} \quad (8)$$

### 2.8.2 ระยะเวลาคืนทุน (Payback period: PBP)

การหาอัตราผลตอบแทนการลงทุนโดยพิจารณาทางด้านระยะเวลาการคืนทุน คือ ระยะเวลาที่กิจการจะได้รับผลตอบแทนในรูปของกระแสเงินสดเข้าเท่ากับกระแสเงินสดจ่ายลงทุน [11] สามารถคำนวณได้จากสมการ (9)

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{จำนวนเงินลงทุนครั้งแรก}}{\text{(รายรับจากการขายต่อปี - ต้นทุนแปรผันต่อปี)}} \quad (9)$$

## 3. ผลและการวิจารณ์ผล

งานวิจัยเรื่องนี้เป็นการเก็บข้อมูลการแปรรูปชาและการใช้พลังงานในการแปรรูปชา ณ ไร่ชาหยดน้ำค้าง จังหวัดเชียงราย หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างใบชาสดและชาแห้งมาวิเคราะห์ผลในห้องปฏิบัติการ ผลการศึกษามีดังนี้

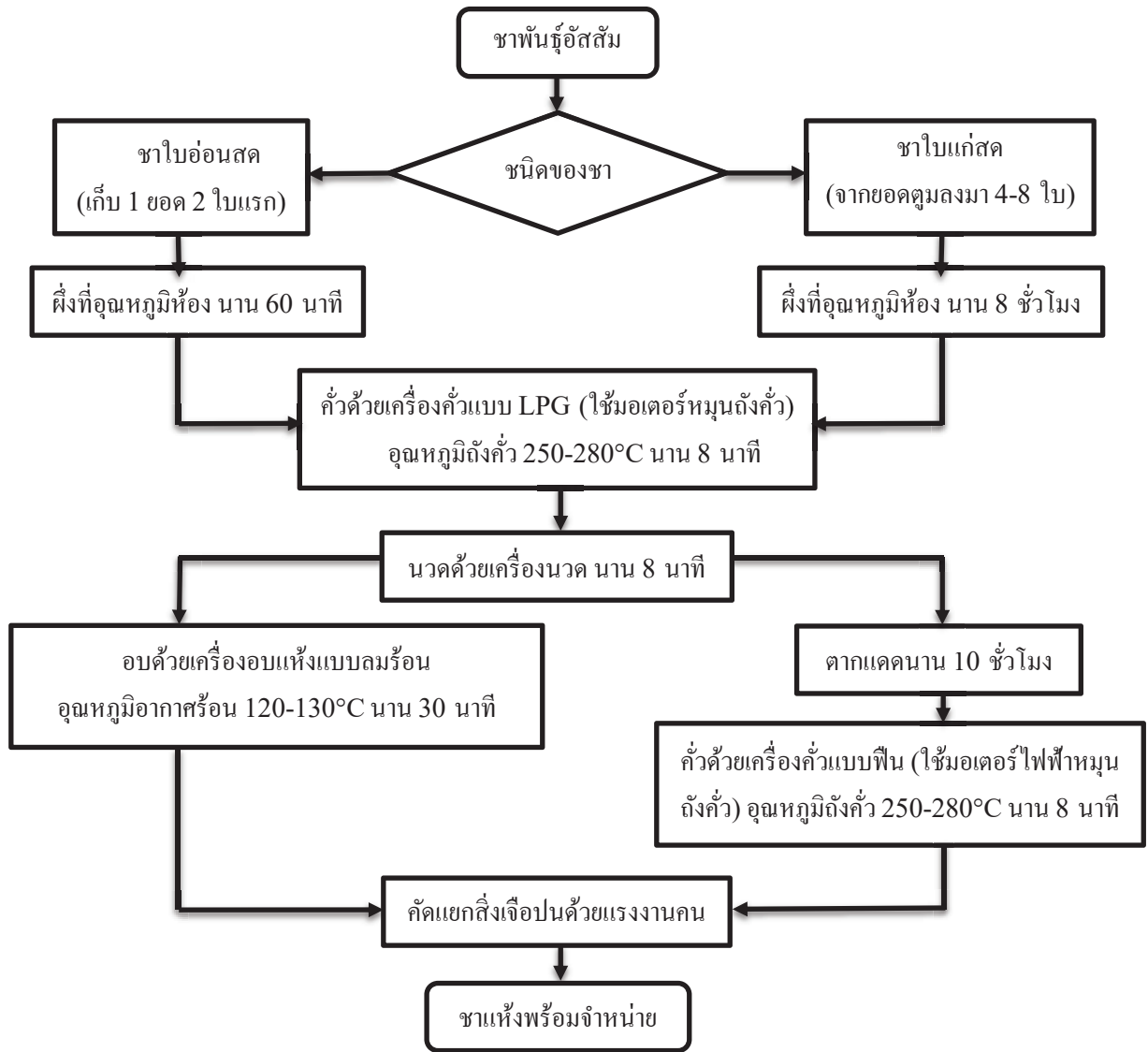
### 3.1 กระบวนการแปรรูปชา

การเก็บชาของไร่ชาหยดน้ำค้างใช้วิธีเก็บด้วยมือ โดยจะเก็บตรงตำแหน่งก้านของยอดชาที่เป็นยอดตูมและมีใบที่ต่ำกว่ายอดตูมลงมา 2 ใบ เพื่อให้ได้ยอดชาอ่อนที่มีคุณภาพดี และช่วงเวลาในการเก็บชาควรเก็บในตอนเช้า ตั้งแต่เวลา 08:00-10:00 น. จะได้ใบชาที่สดและอุดมไปด้วยคุณค่าทางโภชนาการ ต้นชาที่เก็บแล้วจะมีการแต่งกิ่งและต้องรออีก 3 เดือน จึงจะถึงรอบการเก็บยอดชาอีกครั้ง ส่วนใบชาแก่ที่นำมาแปรรูปจะเก็บใบที่ต่ำกว่ายอดตูมลงมา 4-8 ใบ แล้วนำมาผ่านกระบวนการตามลำดับดังรูปที่ 1 ซึ่งชี้ให้เห็นว่ากระบวนการแปรรูปเหมือนกัน แตกต่างกันตรงระยะเวลาการแปรรูป และชาใบแก่จะมีการตากแดดเพื่อลดความชื้นเพิ่มขึ้นมา 1 ขั้นตอน เหตุผลของการแปรรูปแต่ละขั้นตอนมีดังนี้

1) การผึ่งชา เพื่อช่วยให้อุณหภูมิห้องค์ประกอบทางเคมีในใบชาเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ใบชามีกลิ่นหอมมากยิ่งขึ้น

2) การล้ชา เป็นขั้นตอนที่ให้ความร้อนกับใบชาเพื่อทำลายเอนไซม์ต่าง ๆ ในใบชา เช่น เอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสที่ทำให้หยุดปฏิกิริยาการหมักและเอนไซม์คลอโรฟิลเลสที่สามารถออกซิไดส์คลอโรฟิลล์ให้เป็นฟิโอฟิดินที่ทำให้เกิดสีเหลืองน้ำตาลในใบชา





รูปที่ 1 แผนภูมิการแปรรูปชาเขียวระดับ SME ในจังหวัดเชียงราย

- 3) การนวดชา เป็นการขยี้ใบชาเพื่อให้เซลล์แตก เมื่อเซลล์แตกจะทำให้สารประกอบต่าง ๆ ที่อยู่ในเซลล์ไหลออกมาออกเซลล์และเคลือบอยู่บนส่วนต่าง ๆ ของใบชา น้ำ เอนไซม์ และน้ำมันหอมระเหยจะออกมาภายนอก ทำให้สามารถลดความชื้นได้เร็วขึ้นและทำให้สารให้กลิ่นรสของชาละลายได้ง่ายเมื่อชงในน้ำร้อน
- 4) การอบแห้ง เป็นการกำจัดความชื้นในใบชาเพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้สามารถเก็บรักษา

ชาได้นานขึ้น โดยมีกระบวนการเปลี่ยนแปลงของสี กลิ่น และรสชาติที่น้อยที่สุด

### 3.2 สมบัติของชาหลังการแปรรูป

ชาที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการแปรรูปแล้วจะนำมาวิเคราะห์ค่าสมบัติทางกายภาพ ซึ่งค่าคุณสมบัติของชาบ่งบอกถึงคุณภาพของชา

#### 3.2.1 ความชื้นสุดท้ายของชาหลังผ่านกระบวนการแปรรูป

ความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ชาแห้งจะต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก เพื่อให้ตรงตามมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ชุมชน มพช. 120/2558 [12] ทดสอบ

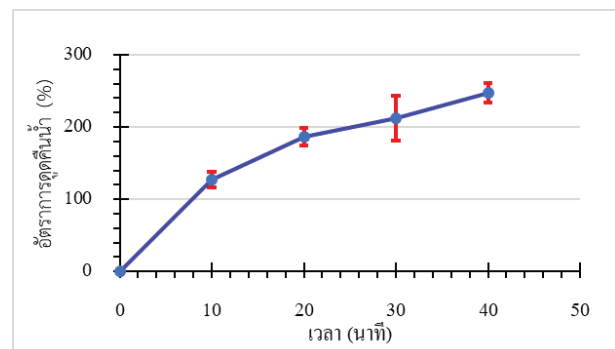
3 ชั่วโมง พบว่าความชื้นสุดท้ายของชาเขียวใบอ่อนมีค่า  $6.66 \pm 0.26\% \text{w.b.}$  ส่วนของชาเขียวใบแก่มีค่า  $2.24 \pm 0.13\% \text{w.b.}$  แสดงว่าชาทั้งสองชนิดมีความชื้นต่ำ (ต่ำกว่า  $8\% \text{w.b.}$ ) ตามมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ชุมชนกำหนด ซึ่งความชื้นต่ำ ทำให้ยากต่อการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์

### 3.2.2 อัตราการได้คั้นของชาแห้งและอัตราการดูดคืนน้ำ

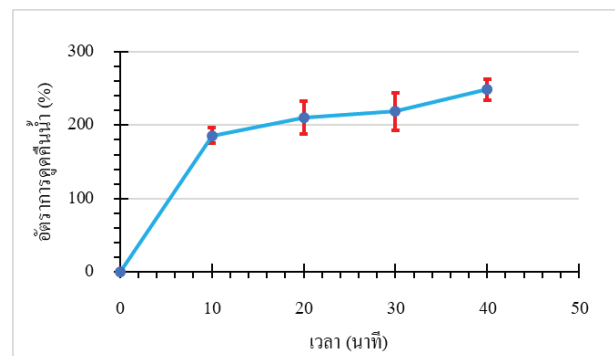
อัตราการได้คั้นของชาเขียวใบอ่อนและใบแก่มีค่าร้อยละ 21.85 และ 33.54 ตามลำดับ คิดเป็นสัดส่วนชาสดต่อชาแห้ง 5:1 และ 3:1 ตามลำดับ ส่วนพฤติกรรม การคั้นตัวของชาเขียวใบอ่อนและใบแก่แสดงในรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าในช่วงเริ่มต้นอัตราการดูดคืนน้ำมีค่าสูงแล้วค่อย ๆ ลดลงจนมีแนวโน้มคงที่ตามเวลา ในการแช่ที่เพิ่มขึ้น โดยแสดงข้อมูลในตารางที่ 1 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าใบชาเขียวและใบชาแก่แห้งมีอัตราการดูดคืนน้ำร้อยละ 248.18 และ 247.68 ตามลำดับ และเมื่อสังเกตด้วยตาจะเห็นว่าใบชาที่ได้จากการดูดคืนน้ำแล้วมีลักษณะใกล้เคียงกับใบชาสดก่อนการอบแห้ง (รูปที่ 4 และ 5) อัตราการดูดคืนน้ำของใบชาแห้งในงานวิจัยนี้ใช้เวลามากกว่าเมื่อเทียบกับอัตราการดูดคืนน้ำของหอมฉับ [13] นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการได้คั้นของชาเขียวใบอ่อนและใบแก่มีอัตราส่วนตรงข้ามกับอัตราการดูดคืนน้ำ เช่นเดียวกับการอบแห้งและลักษณะคุณภาพของเนื้อปลาณิลให้แห้งด้วยความร้อนจากไมโครเวฟอากาศร้อน [14] ดังนั้น กระบวนการแปรรูปชาเขียวและชาแก่ของโรงงานนี้จึงช่วยรักษาคุณภาพด้านสีของใบชาไว้ได้ และมีอัตราการดูดคืนน้ำที่ดี

ตารางที่ 1 อัตราการได้คั้นของชาแห้งและอัตราการดูดคืนน้ำของชาเขียวใบอ่อนและใบแก่

พารามิเตอร์	ชาใบอ่อน	ชาใบแก่
น้ำหนักชาสด (kg)	10.8	12.67
น้ำหนักชาแห้ง (kg)	2.36	4.25
อัตราการได้คั้นของชาแห้ง (%)	21.85	33.54
น้ำหนักชาแห้งที่สุ่ม (g)	3.03	1.51
น้ำหนักชาแห้งหลังแช่น้ำ (g)	10.55	5.25
อัตราการดูดคืนน้ำ (%)	248.18	247.68



รูปที่ 2 อัตราการดูดคืนน้ำของชาเขียวใบอ่อนที่ระยะเวลาการแช่น้ำอุ่น 10-40 นาที



รูปที่ 3 อัตราการดูดคืนน้ำของชาเขียวใบแก่ที่ระยะเวลาการแช่น้ำอุ่น 10-40 นาที



ชาเขียวสด ชาเขียวแห้ง ชาเขียวหลังแช่น้ำ

รูปที่ 4 ลักษณะของชาเขียวใบอ่อนแห้งและหลังแช่น้ำเปรียบเทียบกับชาเขียวสด



ชาเขียวสด ชาเขียวแห้ง ชาเขียวหลังแช่น้ำ  
รูปที่ 5 ลักษณะของชาเขียวใบแก่แห้งและหลังแช่น้ำ  
เปรียบเทียบกับชาเขียวสด

### 3.2.3 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำชา

เมื่อนำตัวอย่างชาเขียวใบอ่อนและใบแก่ที่ผ่านกระบวนการแปรรูปแล้วจากโรงงานชา ไร่ชาหยดน้ำค้าง มาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่สถาบันชา มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง ด้วยวิธี ISO 14502-2:2005 ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอล (Phenolic compounds) ซึ่งได้แก่ Epigallocatechin (EGC), Catechin (C), Epigallocatechin gallate (EGCG), Caffeine (CF), Epicatechin (EC) และ Epicatechin gallate (ECG) ในชาเขียวใบอ่อนมีค่ามากกว่าในชาเขียวใบแก่ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ratanamarno and Surbkar [15] ที่ศึกษาพบว่าชาใบกาแฟใบอ่อนมี catechins หรือสารประกอบโพลีฟีนอลมากกว่าชาใบกาแฟใบแก่ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Yung-Sheng Lin et al. [16] ที่ศึกษาปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอลในชาเขียวในสาธารณรัฐจีน (ไต้หวัน) พบว่า ปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอลในชาเขียวใบอ่อนมีปริมาณสาร ECG สูงที่สุด ตามด้วย EC, EGC, CF, EGCG และ C ตามลำดับ ส่วนในชาเขียวใบแก่มีปริมาณสาร EC สูงที่สุด ตามด้วย EGC, CF, ECG, C และ EGCG ตามลำดับ ซึ่งสารประกอบโพลีฟีนอลเหล่านี้เป็นสารหลักในใบชาที่มีฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาในการต้านโรคมะเร็ง โรคหลอดเลือดหัวใจ และโรคเบาหวาน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าตัวอย่างชาเขียวจากไร่ชาหยดน้ำค้างเป็นชาที่มีคุณภาพดีเพราะมีปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอลสูง แต่ชาแก่เป็นชาที่มีคุณภาพค่อนข้างด้อยเพราะมีสารประกอบโพลีฟีนอลต่ำ ทั้งนี้

ปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอลในใบชาจะมากหรือน้อยยังขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ ฤดูกาล การเพาะปลูก และพันธุ์ชา [17]

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำชาเขียวใบอ่อนและใบแก่

ชนิดของ catechins	ชาใบอ่อน	ชาใบแก่
Epigallocatechin (EGC) (g/100g dry basis)	2.22 ± 0.00	0.35 ± 0.01
Catechin (C) (g/100g dry basis)	1.13 ± 0.00	0.26 ± 0.02
Epigallocatechin gallate (EGCG) (g/100g dry basis)	1.95 ± 0.00	0.17 ± 0.00
Caffeine (CF) (g/100g dry basis)	2.03 ± 0.00	0.34 ± 0.00
Epicatechin (EC) (g/100g dry basis)	2.53 ± 0.01	0.58 ± 0.01
Epicatechin gallate (ECG) (g/100g dry basis)	3.59 ± 0.01	0.30 ± 0.01
Total polyphenol (g/100g dry basis)	17.50 ± 0.02	9.78 ± 0.01

### 3.3 พลังงานที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปชา

พลังงานที่ใช้ในการแปรรูปชาเขียวใบอ่อนและใบแก่ในงานวิจัยได้มาจากการลงพื้นที่เก็บข้อมูลการใช้พลังงานจริง แล้วนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณตามหลักวิชาการ

#### 3.3.1 พลังงานที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปชาเขียวใบอ่อน

พลังงานที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปชาเขียวใบอ่อนได้จากพลังงานไฟฟ้าและพลังงานจากแก๊สเชื้อเพลิงดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งเครื่องคั่วไม่สามารถวัดค่าทางไฟฟ้าได้ จึงหาพลังงานจากค่าแอมเพิลต์ของมอเตอร์ไฟฟ้าและคิดค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ 0.8 โดยขั้นตอนการอบใบชาหลังนวดจะใช้พลังงานมากที่สุด และขั้นตอนการนวดใช้พลังงานน้อยที่สุด

**ตารางที่ 3** ความสิ้นเปลืองพลังงานในการผลิตชาเขียวใบอ่อน จากน้ำหนักสด 10.8 kg จะได้ชาแห้ง 2.36 kg

เครื่องจักร	แหล่งพลังงาน	รายละเอียดพลังงาน	เวลาใช้งาน (min)	กำลัง (W)	พลังงานที่ใช้ (kJ/2.36 kg dried tea)	พลังงานที่ใช้ (kJ /1 kg dried tea)
เครื่องคั่ว	LPG**	0.1 kg	8	10,462.50	5,022.00	2,127.97
	ไฟฟ้า	380 V 5 A*	8	2,632.72	1,263.70	535.47
เครื่องนวด	ไฟฟ้า	380 V 5 A*	8	2,632.72	1,263.70	535.47
เครื่องอบ	LPG**	0.2 kg	30	2,790.00	10,044.00	4,255.93
	ไฟฟ้า	198.00 V 5.0 A	30	990.00	1,782.00	755.08
รวม				19,507.93	19,375.41	8,209.92

\* คิดค่าประสิทธิภาพมอเตอร์ 0.8

\*\*คิดค่าความร้อน 50,220 kJ/kg [7]

### 3.2.2 พลังงานที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปชาเขียวใบแก่

พลังงานที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปชาแก่ได้จากพลังงานไฟฟ้า พลังงานจากแก๊สเชื้อเพลิง และพลังงานจากฟืน ดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งการคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้โดยเครื่องคั่วคิดเหมือนกับการแปรรูป

ชาใบอ่อน โดยการคั่วชาหลังนวดด้วยเครื่องคั่วแบบใช้ฟืนจะใช้พลังงานมากกว่าเครื่องคั่วก่อนนวดด้วยแก๊ส LPG แต่อย่างไรก็ตามราคาแก๊ส LPG มีค่าสูงกว่าฟืนมาก ดังนั้นการตัดสินใจเลือกชนิดของเชื้อเพลิงต้องพิจารณาถึงต้นทุนด้วย

**ตารางที่ 4** พลังงานไฟฟ้า แก๊ส LPG และชีวมวลที่ใช้ในการแปรรูปชาเขียวใบแก่

เครื่องจักร	แหล่งพลังงาน	รายละเอียดพลังงาน	เวลาใช้งาน (min)	กำลัง (W)	พลังงานที่ใช้ (kJ/4.25 kg dried tea)	พลังงานที่ใช้ (kJ /1 kg dried tea)
เครื่องคั่วก่อนนวด	PLG**	0.1 kg	8	10,462.50	5,022.00	2,127.97
	ไฟฟ้า	380 V 5 A*	8	2,632.72	1,263.70	535.47
เครื่องนวด	ไฟฟ้า	380 V 5.68 A	8	3,738.46	1,794.46	760.36
เครื่องคั่วหลังนวด	ฟืน***	3.07 kg	8	102,269.38	49,036.00	20,777.97
	ไฟฟ้า	192.47 4.3 A	8	827.62	397.26	168.33
รวม				119,930.67	57,513.42	24,370.09

\* คิดค่าประสิทธิภาพมอเตอร์ 0.8

\*\* คิดค่าความร้อน 50,220 kJ/kg [7]

\*\*\* คิดค่าความร้อน 15,990 kJ/kg [7]

### 3.4 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ในการแปรรูปชา

การวิเคราะห์หัวข้อนี้ใช้ข้อมูลจริงของไร่ชาหยดน้ำค้างเป็นค่าเริ่มต้นในการคำนวณ นั่นคือ ปริมาณการผลิตชาเขียวใบอ่อนแห้ง 2,112.20 กก./ปี ราคาขายชาเขียวใบอ่อนแห้ง 500 บาท/กก. และปริมาณการผลิตชาเขียวใบแก่ 45,730.00 กก./ปี ราคาขายชาเขียวใบแก่แห้ง 50 บาท/กก. เงื่อนไขการวิเคราะห์มีดังนี้

- ใช้วิธีเส้นตรงในการคิดค่าเสื่อมราคา
- ใช้อัตราดอกเบี้ย 3.875% ต่อ ปี [18]
- มูลค่าซากคิด 10% ของราคาแรกซื้อเครื่องจักร ทั้งนี้หากเครื่องจักรมีราคาไม่เกิน 30,000 บาท จะไม่คิดมูลค่าซาก [19]
- อายุการใช้งานของเครื่องจักรทุกชนิด 10 ปี
- คิดค่าไฟฟ้าหน่วยละ 3.9 บาท
- คิดค่าแก๊ส LPG กิโลกรัมละ 26.04 บาท

- คิดค่าฟืน กิโลกรัมละ 1.24 บาท
- สินค้าที่ผลิตจำหน่ายได้หมดโดยไม่มีสินค้าคงเหลือ

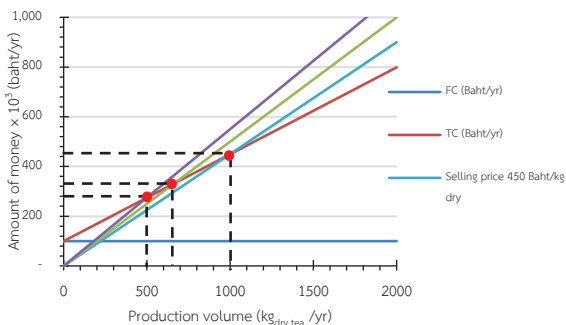
#### 3.4.1 ชาเขียวใบอ่อน

ค่าใบชาอ่อนสด 60 บาท/กิโลกรัมสด ในการผลิต 1 ครั้ง สามารถผลิตได้ 10.8 กิโลกรัมสด และ 1 วัน จะผลิตได้ 5 ครั้ง ดังนั้นในหนึ่งวันจะสามารถผลิตชาเขียวได้ 54 กิโลกรัมสด ( $10.8 \times 5$ ) โดยมีระยะเวลาในการปฏิบัติงาน 179 วัน/ปี ซึ่งไม่นับวันหยุดวันเสาร์-อาทิตย์ และหยุดช่วงระยะเวลา 3 เดือน หลังการตัดแต่งกิ่ง ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณหาต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปรแสดงในตารางที่ 5 โดยมีจำนวนเงินลงทุนครั้งแรก 935,000 บาท ผลการคำนวณหาจุดคุ้มทุนและระยะเวลาคืนทุนมีดังนี้

ตารางที่ 5 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ในการแปรรูปชาเขียวใบอ่อน

ข้อมูล	ราคา	หน่วย
ราคาซื้อเครื่องคั่วใบชา	150,000	บาท
ราคาซื้อเครื่องนวดใบชา	85,000	บาท
ราคาซื้อเครื่องอบใบชา	300,000	บาท
ค่าอาคารโรงเรือน	400,000	บาท
อัตราดอกเบี้ย	3.875	% ต่อปี
ค่าซ่อมแซม & บำรุงรักษา	10,000	บาท/ปี
จำนวนคนงาน	2	คน
ค่าจ้างแรงงาน	300	บาท/วัน
ชั่วโมงทำงาน	8	ชั่วโมง/วัน
ชั่วโมงทำงานของเครื่องคั่วใบชา	0.65	ชั่วโมง/วัน
ชั่วโมงทำงานของเครื่องนวดใบชา	0.65	ชั่วโมง/วัน
ชั่วโมงทำงานของเครื่องอบใบชา	2.65	ชั่วโมง/วัน
ปริมาณการผลิต	54	กก.สด/วัน
ปริมาณการผลิต	12	กก.แห้ง/วัน
ระยะเวลาทำงาน	179	วัน/ปี
ค่าวัสดุและอุปกรณ์ประกอบ	30,000	บาท/ปี

1) จุดคุ้มทุนในการแปรรูปชาเขียวใบอ่อน จากการสอบถามราคาชาเขียวแห้งจากผู้ประกอบการพบว่า ราคาชาเขียวใบอ่อนแห้งคือ 500 บาท/กก. ซึ่งจะมีจุดคุ้มทุนเท่ากับ 650 กิโลกรัมชาแห้งต่อปี (รูปที่ 5) หากคิดราคาขายลดลง 10% จะได้ราคาขาย 450 บาท/กก. ซึ่งจะมีจุดคุ้มทุนเท่ากับ 1,000 กิโลกรัมชาแห้งต่อปี (รูปที่ 6) และหากคิดราคาขายเพิ่มขึ้น 10% จะได้ราคาขาย 550 บาท/กก. ซึ่งจะมีจุดคุ้มทุนเท่ากับ 500 กิโลกรัมชาแห้งต่อปี (รูปที่ 5)



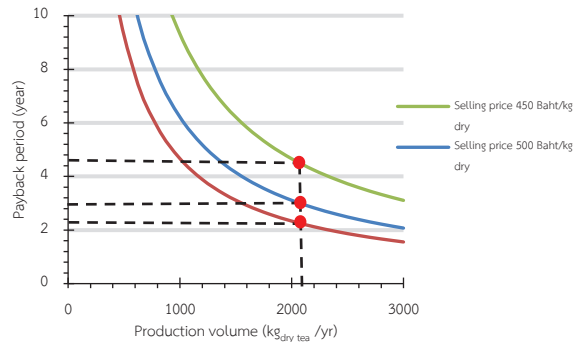
รูปที่ 6 จุดคุ้มทุนของการแปรรูปชาเขียวใบอ่อน  
เมื่อกำหนดราคาขาย 450-550 บาท ต่อ กก.

2) ระยะเวลาคืนทุนในการแปรรูปชาเขียวใบอ่อน หากใช้ปริมาณการผลิตของไร่ชาหยดน้ำค้างที่ 2,100 กิโลกรัมชาแห้งต่อปี จะมีระยะเวลาคืนทุน 3.00 ปี (รูปที่ 6) เมื่อราคาขายชาแห้งมีค่า 500 บาท/กก. หากราคาขายเพิ่มขึ้น 10% (550 บาท/กก.) จะมีระยะเวลาคืนทุน 2.30 ปี (รูปที่ 6) และหากราคาขายลดลง 10% (450 บาท/กก.) จะมีระยะเวลาคืนทุน 4.60 ปี (รูปที่ 7) ซึ่งระยะเวลาคืนทุนจะมีค่ามากกว่าการอบแห้งหญ้าโดยใช้แหล่งความร้อนจากก๊าซหุงต้มและพลังงานแสงอาทิตย์ [20]

ตารางที่ 6 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ในการแปรรูปชาเขียวใบแก่

ข้อมูล	ราคา	หน่วย
ราคาซื้อเครื่องคั่วใบชา	150,000	บาท
ราคาซื้อเครื่องนวดใบชา	85,000	บาท
ราคาซื้อเครื่องคั่วใบชา	150,000	บาท
ค่าอาคารโรงเรือน	600,000	บาท

เนื่องจากกระบวนการแปรรูปชาใบแก่มีเครื่องมือที่ใช้ในการผลิตมากกว่าการอบแห้งหญ้าหวาน หากต้องการระยะเวลาการคืนทุนที่สั้นลง จำเป็นต้องเพิ่มกำลังการผลิตหรือปรับราคาขายต่อกิโลกรัมให้สูงขึ้น



รูปที่ 7 ระยะเวลาคืนทุนของการแปรรูปชาเขียวใบอ่อน  
เมื่อกำหนดราคาขาย 450-550 บาท ต่อ กก.

### 3.4.2 ชาเขียวใบแก่

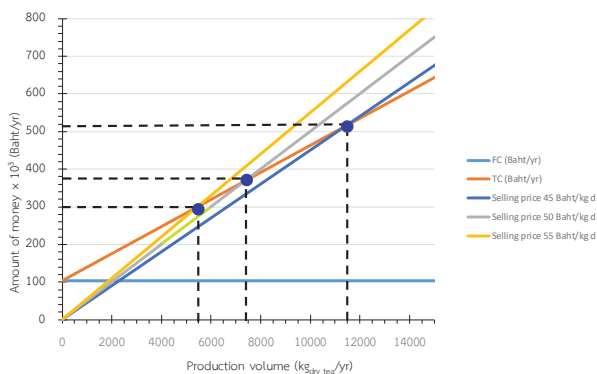
ค่าใบชาแก่สด 8 บาท/กิโลกรัมสด ใน 1 ครั้งสามารถผลิตได้ 12.67 กิโลกรัมสด และใน 1 วันสามารถผลิตได้ 40 ครั้ง ดังนั้นในหนึ่งวันจะสามารถผลิตชาเขียวได้ 506.8 กิโลกรัมสด ( $12.67 \times 40$ ) โดยมีระยะเวลาในการปฏิบัติงาน 269 วัน/ปี ซึ่งไม่นับวันหยุดวันเสาร์-วันอาทิตย์ ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ต้นทุนแสดงในตารางที่ 6 ซึ่งมีรายการที่เพิ่มจากการคำนวณต้นทุนในการแปรรูปชาใบอ่อนคือ ค่าพลาสติกและวัสดุปูรองตากใบชา โดยมีจำนวนเงินลงทุนครั้งแรก 985,000 บาท ผลการคำนวณหาจุดคุ้มทุนและระยะเวลาคืนทุนมี ดังนี้



ตารางที่ 6 (ต่อ) ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ในการแปรรูปชาเขียวใบแก่

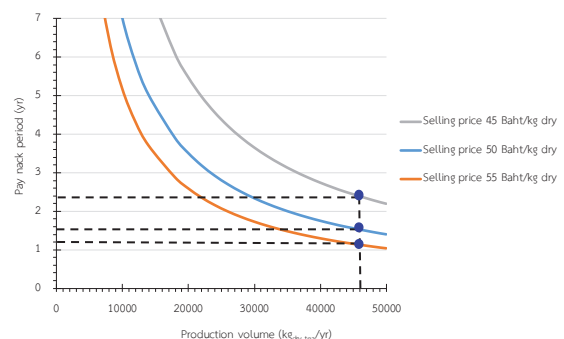
ข้อมูล	ราคา	หน่วย
อัตราดอกเบี้ย	3.875	% ต่อปี
ค่าซ่อมแซมและบำรุงรักษา	10,000	บาท/ปี
จำนวนคนงาน	5	คน
ค่าจ้างแรงงาน	300	บาท/วัน
ชั่วโมงทำงาน	8	ชั่วโมง/วัน
ชั่วโมงทำงานของเครื่องคั่วใบชา	1.74	ชั่วโมง/วัน
ชั่วโมงทำงานของเครื่องนวดใบชา	1.72	ชั่วโมง/วัน
ชั่วโมงทำงานของเครื่องคั่วใบชา	0.53	ชั่วโมง/วัน
ปริมาณการผลิต	507	กก.สด/วัน
ปริมาณการผลิต	170	กก.แห้ง/วัน
ระยะเวลาทำงาน	269	วัน/ปี
ค่าวัสดุและอุปกรณ์ประกอบ	30,000	บาท/ปี
ค่าพลาสติกใสและวัสดุรองตากชา	10,000	บาท/ปี

1) การหาจุดคุ้มทุนในการแปรรูปชาเขียวใบแก่ จากการสอบถามราคาขายชาใบแก่จากผู้ประกอบการพบว่าราคาชาใบแก่แห้งคือ 50 บาท/กก. ซึ่งจะมีจุดคุ้มทุนเท่ากับ 7,500 กก./ปี (รูปที่ 8) แต่หากคิดราคาขายลดลง 10% จะได้ราคาขาย 45 บาท/กก. ซึ่งจะมีจุดคุ้มทุนเท่ากับ 5,500 กก./ปี (รูปที่ 8) และหากคิดราคาขายเพิ่มขึ้น 10% จะได้ราคาขาย 55 บาท/กก. ซึ่งจะมีจุดคุ้มทุนเท่ากับ 11,500 กก./ปี (รูปที่ 8)



รูปที่ 8 จุดคุ้มทุนของการแปรรูปชาเขียวใบแก่ เมื่อกำหนดราคาขาย 45-55 บาท ต่อ กก.

2) การหาระยะเวลาในการคืนทุนในการแปรรูปชาเขียวใบแก่ หากใช้ปริมาณการผลิตของไร่ชาหยดน้ำค้างที่ 45,730 กก. ชาแห้ง/ปี จะมีระยะเวลาในการคืนทุน 1.50 ปี (รูปที่ 9) เมื่อราคาขายชาแห้งมีค่า 50 บาท ต่อ กก. หากราคาขายเพิ่มขึ้น 10% (55 บาท ต่อ กก.) จะมีระยะเวลาคืนทุน 1.10 ปี (รูปที่ 9) และหากราคาขายลดลง 10% (45 บาท ต่อ กก.) จะมีระยะเวลาคืนทุน 2.30 ปี (รูปที่ 9)



รูปที่ 9 ระยะเวลาคืนทุนของการแปรรูปชาเขียวใบแก่ เมื่อกำหนดราคาขาย 45-55 บาท ต่อ กก.

### 3.4.3 ข้อเสนอแนะสำหรับผู้ประกอบการ

การผลิตชาระดับ SME ในจังหวัดเชียงรายด้วยการใช้ทั้งพลังงานไฟฟ้า แก๊ส LPG และฟืน ชาที่ได้มีสมบัติทางกายภาพดี โดยชาเขียวใบอ่อนมีค่าองค์ประกอบทางเคมีดีกว่าชาใบแก่และสอดคล้องกับผลการวิจัยอื่น ๆ การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ ทำให้ทราบว่าจำเป็นต้องมีเงินลงทุนครั้งแรก 935,000 บาทสำหรับการแปรรูปชาเขียวใบอ่อน และ 985,000 บาทสำหรับชาเขียวใบแก่ แต่ปริมาณการผลิตทั้งปีของชาเขียวใบอ่อนต่อชาเขียวใบแก่มีค่า 1 ต่อ 22 ถึงแม้ว่าราคาขายชาเขียวใบอ่อนจะสูงกว่าใบแก่ถึง 10 เท่า แต่การผลิตชาเขียวใบอ่อนนั้นไม่สามารถผลิตได้ทุกวันเหมือนชาใบแก่ เนื่องจากต้องรอให้ยอดอ่อนงอก จากผลการวิจัยจึงสามารถสรุปได้ว่าผู้ประกอบการใหม่ที่มีต้นทุนจำกัดควรลงทุนแปรรูปชาเขียวใบแก่เพราะสามารถผลิตได้ตลอดทั้งปี ทำให้มีระยะเวลาคืนทุนสั้นกว่า หากภายหลังมีเงินทุนเพิ่มอาจขยายการแปรรูปชาเขียวใบอ่อนเพิ่มเติม

## 4. สรุปผล

1. กระบวนการแปรรูปชาเขียวใบอ่อนและใบแก่มีความคล้ายคลึงกัน แตกต่างกันที่ชาเขียวใบแก่จะเพิ่มกระบวนการลดความชื้นด้วยแสงอาทิตย์ขึ้นมา
2. ใบชาเขียวสด 10.8 kg เมื่อแปรรูปแล้วจะได้ชาเขียวแห้ง 2.36 kg คิดเป็นสัดส่วน 5:1 ส่วนชาเขียว

ใบแก่สด 12.67 kg เมื่อแปรรูปแล้วจะได้ชาเขียวใบแก่แห้ง 4.25 kg คิดเป็นสัดส่วน 3:1

4. พฤติกรรมการกินตัวของชาแห้ง ในช่วงเริ่มต้นอัตราการดูดคืนน้ำจะมีค่าสูงแล้วค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งถึงตามระยะเวลาการแช่น้ำที่เพิ่มขึ้น โดยมีอัตราการดูดคืนน้ำของชาเขียวใบอ่อนมีค่าร้อยละ 248.18 และชาเขียวใบแก่ร้อยละ 247.68

5. ในชาเขียว 100 g จะมีปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอลสูงกว่าชาเขียวใบแก่ แสดงว่าชาเขียวใบอ่อนมีคุณภาพดีกว่าชาเขียวใบแก่

6. จะต้องผลิตชาเขียวใบอ่อน 2,112.20 กก./ปี จึงจะมีระยะเวลาในการคืนทุนประมาณ 3.00 ปี และจะต้องผลิตชาเขียวใบแก่ 45,730 กก./ปี จึงจะมีระยะเวลาในการคืนทุนประมาณ 1.50 ปี

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ

- คุณวัชรระ ขาววิราช ไร่ชาหยดน้ำค้าง จังหวัดเชียงราย ที่ให้ความรู้และอนุญาตให้นักศึกษาเข้าไปเก็บข้อมูลจริง ณ โรงงาน
- สถาบันชา มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง ที่ให้ความอนุเคราะห์ตรวจองค์ประกอบทางเคมีของชา
- สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ และอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่สนับสนุนงบประมาณในการทำงานชิ้นนี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] สถาบันชา มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง. ความรู้เกี่ยวกับชา. 2559. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://web2.mfu.ac.th/other/teainstitute/?lang=th>.
- [2] ชีรพงษ์ เทพกรณ์. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ (โพลีฟีนอล) ในระหว่างกระบวนการผลิตชาเขียวและชาอู่หลงของจังหวัดเชียงราย. มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง, 2550.
- [3] วัฒนา วิวิธดิกร. ความสำคัญของแทนนินที่มีต่ออุตสาหกรรมอาหาร. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2539; 26(3) : 157-167.
- [4] Balentine, D.A. Introduction: tea and health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1997; 8: 661-669.

- [5] จารุภรณ์ ศรีประเสริฐ. การวิเคราะห์หาปริมาณคาเฟอีนในกาแฟสำเร็จรูป (ชนิดน้ำ) บรรจุกระป๋อง. สถาบันราชภัฏเพชรบุรี, 2540.
- [6] เตชา ภัทรมูล. งานไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น. บริษัท สกายบุ๊คส์ จำกัด; กรุงเทพฯ, 2547.
- [7] คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ตารางที่เกี่ยวข้องกับหน่วยการเรียนรู้ ที่ 1. 2559. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: [http://mte.kmutt.ac.th/elearning/Energy\\_Conservation\\_in\\_Industrial\\_Plant/7.html](http://mte.kmutt.ac.th/elearning/Energy_Conservation_in_Industrial_Plant/7.html).
- [8] AOAC. Official Analytical Methods. Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists, 2002.
- [9] Maskan, M. Drying, Shrinkage and Rehydration Characteristics of Kiwifruits During Hot Air and Microwave Drying. *Journal of Food Engineering*, 2001; 48: 177-182.
- [10] Duan, Z. H., Shang, J., and Xu, S. Study on Characteristics of Hot-Air Drying of Tilapia and Changes of Its Main Components. *Food and Bioproducts Processing*, 89(4):472-476.
- [11] ฐานันดร ปริดาภิษฎารัตน์. จุดคุ้มทุนและระยะเวลาคืนทุน. 2551. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: [http://www2.feu.ac.th/acad/ac/articles\\_detail.php?id=112](http://www2.feu.ac.th/acad/ac/articles_detail.php?id=112).
- [12] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 120/2558. กระทรวงอุตสาหกรรม, 2558.
- [13] เทวรัตน์ ทิพย์วิมล. การคงคุณภาพผักอบแห้งกิ่งสำเร็จรูปด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบบีบความร้อน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2555.
- [14] Duan, Z. H., Jiang, L. N., Wang, J. L., Yu, X. Y., and Wang, T. Drying and Quality Characteristics of Tilapia Fish Fillets Dried with Hot Air-Microwave Heating. *Food and Bioproducts processing*, 2011: 89(4), 472-476.
- [15] Ratanamarno, S., and Surbkar, S. Caffeine and Catechins in Fresh Coffee Leaf (*Coffea Arabica*) and Coffee Leaf Tea. *Maejo International Journal of Science and Technology*, 2007; 11(3), 211-218.
- [16] Yung-Sheng, L., Yao-Jen, T., Jyh-Shyan, T., and Jen-Kun, L. Factors Affecting the Levels of Tea Polyphenols and Caffeine in Tea Leaves. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003; 51: 1864-1873.
- [17] Graham, H. N. Green Tea Composition, Consumption and Polyphenol Chemistry. *Preventive Medicine*, 1992; 21: 334-350.
- [18] ธนาคารพัฒนาวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมแห่งประเทศไทย. สินเชื่อเพื่อยกระดับ เศรษฐกิจชุมชน. 2562. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://www.smebank.co.th/loans/LocalEconomyUpgrade> (7 มีนาคม 2562).
- [19] กระทรวงการคลัง. การตีราคาทรัพย์สิน. 2543. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://audit.nida.ac.th/main/images/Kanokwan/Article/11article.pdf>.
- [20] ทวีศักดิ์ มหาวรรณ, อัจฉรา จันทร์ผง, และนิลวรรณ ไชยทนต์. การพัฒนาตู้อบหุ้มาหวานโดยใช้แหล่งความร้อนจากก๊าซหุงต้มและพลังงานแสงอาทิตย์. ประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 14 และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 6, วันที่ 1-4 เมษายน 2556, โรงแรมหัวหินแกรนด์ แอนด์ พลาซ่า จังหวัดประจวบคีรีขันธ์, 2556, 387-392.

# การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการทอรรีแฟคชันของ ทะลายปาล์มด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

## A Study of Factors Affecting to Torrefaction Process of Palm Bunch using Response Surface Methodology

โชคชัย เหมือนมาต\* ปนัดดา อินทร์ดำ และ รวมพร นิคม

Chokchai Mueanmas\*, Panadda Indum and Ruamporn Nikhom

หลักสูตรวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง จังหวัดพัทลุง 93210

Energy Engineering Program, Faculty of Engineering,  
 Thaksin University, Phatthalung Campus, Phatthalung, 93210, Thailand

\*E-mail: chokchai@tsu.ac.th, Tel. 074-609600 ext. 3610

### บทคัดย่อ

ทะลายปาล์มเป็นวัสดุเศษเหลือจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันที่มีศักยภาพสูงสำหรับใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทน แต่ปัญหาของการนำไปใช้งานคือมีคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงต่ำ ซึ่งปัจจัยหลักมาจากการมีปริมาณความชื้นและสารอินทรีย์ระเหยง่าย ประกอบกับการมีปริมาณคาร์บอนคงตัวที่ต่ำ จึงส่งผลให้ค่าความร้อนของทะลายปาล์มต่ำ โดยวิธีการที่มีความเหมาะสมสำหรับปรับปรุงคุณภาพของชีวมวลคือกระบวนการทอรรีแฟคชัน ซึ่งเป็นกระบวนการทางเคมีความร้อนที่ใช้อุณหภูมิในช่วง 200–320 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะจำกัดอากาศ งานวิจัยชิ้นนี้จึงประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบประสมกลางเพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการทอรรีแฟคชัน ได้แก่ อุณหภูมิ (200–320 องศาเซลเซียส) และเวลา (5–50 นาที) ต่อตัวแปรตอบสนอง ได้แก่ ปริมาณความชื้น (Moisture content, MC) ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile matter content, VC) ปริมาณเถ้า (ash content, AC) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon content, FC) และค่าความร้อน (Heating value, HV) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของทะลายปาล์ม ซึ่งผลการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าทั้งปัจจัยของอุณหภูมิ และเวลา มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทอรรีแฟคชันของทะลายปาล์ม โดยสามารถลดปริมาณความชื้น และปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้ร้อยละ 90.22 (มาตรฐานเปียก) และร้อยละ 31.26 (มาตรฐานเปียก) ในขณะที่สามารถเพิ่มปริมาณคาร์บอนคงตัว และค่าความร้อนได้ร้อยละ 1,363.2 (มาตรฐานเปียก) และร้อยละ 26.69 (มาตรฐานเปียก) ตามลำดับ ดังนั้นกระบวนการทอรรีแฟคชันจึงเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของทะลายปาล์ม

### ABSTRACT

Palm bunch (PB) is waste biomass from palm oil production and has good potential as a renewable energy resource. However, PB has poor fuel properties. The main problems result from the high moisture and volatile organic content of the material and the low fixed carbon content. These properties contribute to the low calorific values of PB. Nevertheless, techniques exist that improve the fuel quality of biomass and the most suitable is thermochemical treatment by torrefaction, a procedure that is carried out in a temperature range from 200 to 320°C in the absence of oxygen. This research applied

response surface methodology (RSM) based on central composite design (CCD) to study the influence of operational factors affecting the torrefaction process. The investigated parameters included temperature (200–320°C) and time (5–50 min) of torrefaction and the response variables were moisture content (MC), volatile organic content (VC), ash content (AC), fixed carbon content (FC) and heating value (HV). By improving these fuel properties, this research aims to enhance the fuel quality of the biomass. The statistical results showed that both temperature and time significantly influenced the qualities of torrefied PB. MC and VC were reduced by 90.22% (wet basis, w.b.) and 31.26% (w.b.), respectively and FC and HV were increased by 1,363.2% (w.b.) and 26.69% (w.b.), respectively. In conclusion, torrefaction has the potential to be an efficient technique for improving the fuel properties of PB.

## 1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศแห่งเกษตรกรรม ซึ่งมีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตเป็นปริมาณมาก โดยยังมีเศษวัสดุเหลือทิ้งอีกปริมาณไม่น้อยที่ยังไม่ได้นำกลับมาใช้ประโยชน์ ดังนั้นการนำวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้มาใช้ในการผลิตเป็นพลังงานทดแทนจึงมีความเหมาะสมเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งจะช่วยจัดการปัญหาเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรได้อีกด้วย วัสดุเหลือทิ้งปาล์มน้ำมัน เป็นชีวมวลที่มีศักยภาพในการนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดี โดยในการผลิตน้ำมันปาล์ม เมื่อนำทะลายปาล์ม น้ำมันมาผ่านกระบวนการหีบจะได้น้ำมันปาล์ม และมีวัสดุเหลือทิ้งปาล์มน้ำมันเป็นผลพลอยได้จากการผลิต ซึ่งประกอบด้วย กะลาปาล์ม เส้นใยปาล์ม และทะลายปาล์ม เปล่า โดยกะลาปาล์ม และเส้นใยปาล์ม ได้มีการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำอยู่แล้ว แต่สำหรับทะลายปาล์ม ยังคงมีการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงค่อนข้างน้อย ทั้ง ๆ ที่มีสัดส่วนของการเกิดทะลายปาล์มเปล่า 0.2 ตันต่อทะลายปาล์มสด 1 ตัน [1] ซึ่งเป็นศักยภาพในเชิงปริมาณที่มีความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงต่อไป โดยปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ทะลายปาล์มไม่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง คือมีค่าความชื้นที่สูง ส่งผลให้ค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ต่ำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการเตรียมเชื้อเพลิงก่อนนำมาใช้ในการเผาไหม้เพื่อให้มีสมบัติเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง โดยกระบวนการที่มีความเหมาะสมสำหรับปรับปรุงสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของทะลายปาล์มคือกระบวนการทอริฟิเคชัน (torrefaction process) ซึ่งมีความเหมาะสมมากกว่ากระบวนการคาร์บอนิเซชัน ที่ใช้สำหรับการผลิตถ่านในปัจจุบัน เนื่องจากกระบวนการทอริฟิเคชัน

เป็นกระบวนการทางเคมีความร้อนที่ใช้อุณหภูมิในช่วง 200 - 320 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะจำกัดอากาศ และเป็นการให้ความร้อนกับทะลายปาล์มทางอ้อม นั่นคือ เปลวไฟไม่สัมผัสกับทะลายปาล์มโดยตรง ซึ่งแตกต่างกับกระบวนการคาร์บอนิเซชัน (carbonization process) ที่เปลวไฟจะสัมผัสกับชีวมวลโดยตรง และจากลักษณะทางกายภาพของทะลายปาล์มที่มีความเป็นเส้นใยสูง ถ้าสัมผัสโดยตรงกับเปลวไฟจะเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์จนกลายเป็นเถ้าทั้งหมด

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทอริฟิเคชันจะเรียกว่า ทอริฟิไฟด์ทะลายปาล์ม (torrefied palm bunch) ซึ่งจะมีสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงที่ดีขึ้น นั่นคือมีค่าความชื้นต่ำ ส่งผลให้ค่าความร้อนมีค่าสูงขึ้น และใช้พลังงานในการบดย่อยต่ำเนื่องจากความเป็นเส้นใยของทะลายปาล์มที่ลดลง อีกทั้งยังส่งผลให้ความสามารถในการดูดความชื้นลดลง ทำให้สามารถเก็บทอริฟิไฟด์ทะลายปาล์มได้นานขึ้น โดยไม่มีปัญหาของการเน่าสลาย นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังมีคุณภาพทางด้านเชื้อเพลิงที่สม่ำเสมอ และประหยัดค่าใช้จ่ายในการขนส่งเชื้อเพลิงอีกด้วย [2, 3] โดยงานวิจัยที่ได้ศึกษา ก่อนหน้านี้พบว่ากระบวนการทอริฟิเคชันมีประสิทธิภาพในการที่จะปรับปรุงสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของชีวมวลชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการทอริฟิเคชันของทะลายปาล์ม โดยใช้วิธีพ่นผิวตอบสนองแบบประสมกลาง เพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของทะลายปาล์ม โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ อุณหภูมิ และเวลาสำหรับกระบวนการทอริฟิเคชัน ซึ่งผลการศึกษาที่ได้จะทำการวิเคราะห์

ตารางที่ I การศึกษากระบวนการเทอร์ราฟิเคชันของชีวมวลชนิดต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านเชื้อเพลิง

วัสดุดิบ	สภาวะของกระบวนการเทอร์ราฟิเคชัน			ผลการศึกษา	อ้างอิง
	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (min)	อัตราการให้ความร้อน (°C/min)		
herbal medicine wastes	230 - 290	-	-	อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีผลสูงสุดต่อสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ และลักษณะการเผาไหม้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีค่าความชื้น และความสามารถในการดูดความชื้นลดลง ในขณะที่ค่าดัชนีการเผาไหม้สูงขึ้นประมาณ 3-5 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบ	[4]
pigeon peastalk ( <i>Cajanus cajan</i> )	225 - 275	15 - 45	15	กระบวนการเทอร์ราฟิเคชันจะส่งผลให้อัตราส่วนของออกซิเจนต่อคาร์บอน และไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมีค่าลดลง และที่อุณหภูมิ 275 °C เป็นเวลา 45 นาที ทำให้ค่า HV เพิ่มขึ้น 28.6% อีกทั้งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความสามารถในการดูดความชื้น และความหนาแน่นรวมลดลง	[5]
sugarcane bagasse	200 - 300	15 - 60	-	เมื่อศึกษาที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 60 นาที จะส่งผลให้ FC HV และ AC เพิ่มขึ้น 165.94% 45.25% และ 55.10% ตามลำดับ และทำให้ VC ลดลง 59.26%	[6]
<i>Sida hermaphrodita</i>	250 - 350	15	-	เมื่อศึกษาที่อุณหภูมิ 350°C จะส่งผลให้ FC HV และ AC เพิ่มขึ้น 930.10% 54.29% และ 138.22% ตามลำดับ และทำให้ VC ลดลง 34.87%	[7]
olive tree pruning	200 - 300	10 - 60	15	สมบัติทางด้านเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการเทอร์ราฟิเคชัน โดยเมื่อใช้สภาวะที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 60 นาที จะทำให้อัตราส่วนของค่า FC ต่อ VC เพิ่มขึ้นจาก 0.23 เป็น 0.39 และส่งผลให้อัตราส่วนของ H/C และ O/C ลดลง	[8]
stem wood, stump and bark	225 - 300	30 - 60	15	เมื่ออุณหภูมิ และเวลาในการเทอร์ราฟิเคชันเพิ่มขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความเป็นเส้นใยลดลง ส่งผลให้พลังงานที่ใช้ในการบดย่อยลดลงประมาณ 50% อีกทั้งยังเป็นการปรับปรุงสมบัติทางด้านเชื้อเพลิง โดยเมื่ออุณหภูมิ และเวลาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า HV FC และ AC เพิ่มขึ้นในขณะที่ MY และ VC ลดลง	[9]
<i>Acacia nilotica</i>	220 - 280	20 - 60	5 - 15	ปัจจัยของอุณหภูมิจะส่งผลต่อกระบวนการเทอร์ราฟิเคชันมากกว่าปัจจัยของเวลา และอัตราการให้ความร้อน โดย HV มีค่ามากที่สุดเมื่อใช้อุณหภูมิ 252°C เป็นเวลา 60 นาที ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/นาที่ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีค่า MC อัตราส่วนของ H/C และ O/C ลดลงเท่ากับ 73.23% 52.94% และ 46.22% ตามลำดับ ในขณะที่ค่า FC และ HV เพิ่มขึ้น 75.54% และ 18.62%	[10]



ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) เพื่อทดสอบความเหมาะสม และความน่าเชื่อถือของ ข้อมูลที่ได้จากการศึกษา ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการศึกษาใน ครั้งนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการที่จะนำไป ประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของชีวมวล ชนิดอื่น ๆ ต่อไป

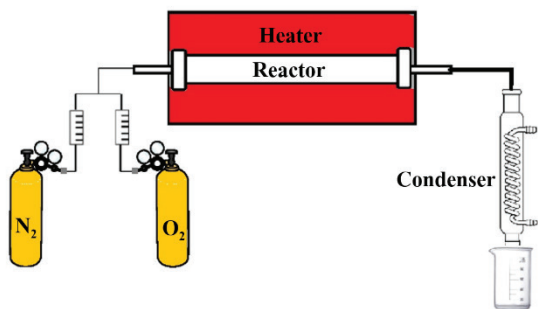
## 2. วัสดุ และอุปกรณ์

### 2.1 วัสดุ

ทะเลสาปาล์ม เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิต ของ บริษัท ปาล์มดีศรีนคร จำกัด ซึ่งเมื่อออกจาก กระบวนการผลิตจะถูกสับให้มีขนาดอยู่ในช่วง 2-10 เซนติเมตร

### 2.2 อุปกรณ์

อุปกรณ์สำหรับกระบวนการเทอร์รี่แฟลคชัน (ดังแสดง ในรูปที่ 1) จะศึกษาโดยใช้ถังปฏิกรณ์ชนิด Horizontal tubular reactor ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร บรรจุอยู่ใน Tubular Furnace เพื่อ ควบคุมอุณหภูมิตามที่กำหนด และทำการกำจัดออกซิเจน ออกจากระบบโดยใช้แก๊สไนโตรเจนไหลผ่านที่อัตราการ ไหล 500 มิลลิลิตรต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำ การควบคุมปัจจัยต่าง ๆ และดำเนินการทดลองตามที่ได้ ออกแบบการทดลองด้วย CCD เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการ ในแต่ละการทดลอง ผลิตภัณฑ์ของแข็งที่เกิดขึ้นจะนำไป วิเคราะห์คุณสมบัติทางเชื้อเพลิง ได้แก่ การวิเคราะห์แบบ กะประมาณ การวิเคราะห์แบบละเอียด การวิเคราะห์ค่า ความร้อน และการวิเคราะห์โครงสร้างบริเวณพื้นผิว



รูปที่ 1 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการเทอร์รี่แฟลคชัน

## 3. วิธีการวิจัย

### 3.1 การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ทางสถิติ

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการ เทอร์รี่แฟลคชันของทะเลสาปาล์มจะศึกษาโดยใช้การ ออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD ของ โปรแกรม Design Expert® เพื่อศึกษาผลของปัจจัย ที่มีนัยสำคัญ [11] ได้แก่ อุณหภูมิ ( $X_1$ ) และเวลา ( $X_2$ ) ซึ่งเป็นปัจจัยอิสระที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่า ตอบสนอง ได้แก่ ร้อยละผลได้เชิงมวล (Mass yield, MY) %MC %VC %AC %FC และค่า HV เพื่อ วิเคราะห์ความมีนัยสำคัญของปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อ สมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของทะเลสาปาล์ม ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ ผลการทดลองด้วย Analysis of Variance (ANOVA) จะสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรหลัก และ อันตรกิริยาของตัวแปรหลักต่อค่าตอบสนองทั้งหมดในรูป ของสมการถดถอยที่ไม่ใช่เชิงเส้น (polynomial regression) ดังสมการที่ 1 ซึ่งจะสามารถนำไปวิเคราะห์ เพื่อหาค่าระดับความมีนัยสำคัญของปัจจัยต่าง ๆ ซึ่งปัจจัยที่ ใช้ในการออกแบบการทดลองของงานวิจัยชิ้นนี้ ประกอบด้วยอุณหภูมิ และเวลา ซึ่งมีค่าสูงสุด และต่ำสุด เป็นดังแสดงในตารางที่ 2 โดยในการศึกษาวิจัยจะ ทำการศึกษาผลของตัวแปรอิสระที่ 5 ระดับ ได้แก่  $-\alpha$ ,  $-1$ ,  $0$ ,  $+1$  และ  $+\alpha$

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j X_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} X_j^2 + \sum_{i < j=2}^k \beta_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

โดย  $Y$  คือ ค่าตอบสนอง  $\beta_0$  คือ ค่าคงที่  $X_i$  และ  $X_j$  คือ ตัวแปรอิสระ และ  $\beta_j$ ,  $\beta_{jj}$  และ  $\beta_{ij}$  คือ ค่า สัมประสิทธิ์การถดถอย

ตารางที่ 2 ค่าสูงสุด และต่ำสุดของตัวแปรสำหรับ ออกแบบการทดลองด้วย CCD ของกระบวนการเทอร์รี่ แฟลคชันของทะเลสาปาล์ม

ตัวแปรอิสระ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
อุณหภูมิ ( $X_1$ , °C)	200	320
เวลา ( $X_2$ , min)	5	50

### 3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเชื้อเพลิง

#### 3.2.1 การวิเคราะห์แบบกะประมาณ (Proximate Analysis)

การวิเคราะห์แบบกะประมาณจะประกอบด้วย การวิเคราะห์ %MC %VC %AC และ %FC ซึ่งตัวอย่างที่ใช้จะมีการนำไปวิเคราะห์อย่างต่อเนื่องเพื่อหาองค์ประกอบของ %MC %VC %AC และ %FC ตามมาตรฐาน ASTM โดยเริ่มต้นจากการวิเคราะห์ %MC ด้วยการอบ ตัวอย่างในเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงชั่งน้ำหนักส่วนที่เหลือเพื่อคำนวณหา %MC ตามสมการที่ 2 ถ้าดับถัดไปตัวอย่างจะถูกนำไปให้ความร้อนในเตาเผาที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 7 นาที แล้วนำน้ำหนักตัวอย่างที่เหลือไปคำนวณหา %VC ตามสมการที่ 3 จากนั้นจึงนำตัวอย่างส่วนที่เหลือมาให้ความร้อนอีกครั้งที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักส่วนที่เหลือเพื่อคำนวณหา %AC ตามสมการที่ 4 และใช้สมการที่ 5 สำหรับคำนวณหา %FC ที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่าง

#### 3.2.2 การวิเคราะห์แบบละเอียด (Ultimate analysis)

เป็นการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ที่มีอยู่ในชีวมวล ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ โดยใช้เครื่อง CHNS/O analyzer, flash 2000, Thermoscientific, Italy

$$MC (\%) = \frac{\text{น้ำหนักก่อนอบ (กรัม)} - \text{น้ำหนักหลังอบ (กรัม)}}{\text{น้ำหนักก่อนอบ (กรัม)}} \times 100 \quad (2)$$

$$VC (\%) = \frac{\text{น้ำหนักก่อนแห้ง (กรัม)} - \text{น้ำหนักหลังอบที่อุณหภูมิ } 900^\circ\text{C (กรัม)}}{\text{น้ำหนักก่อนอบ (กรัม)}} \times 100 \quad (3)$$

$$AC (\%) = \frac{\text{น้ำหนักของเชื้อเพลิงหลังอบที่อุณหภูมิ } 750^\circ\text{C (กรัม)}}{\text{น้ำหนักก่อนอบ (กรัม)}} \times 100 \quad (4)$$

$$FC (\%) = 100\% - MC(\%) - VC(\%) - AC(\%) \quad (5)$$

#### 3.2.3 การวิเคราะห์ค่าความร้อน

ปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงจากทะเลสาบปาล์ม จะทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter รุ่น IKA C2000 basic

#### 3.2.4 การวิเคราะห์โครงสร้างบริเวณพื้นผิว

บริเวณพื้นผิวของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงแข็งที่ได้ จะศึกษาด้วยเครื่อง Scanning electron microscopy (SEM) รุ่น Apreo, FEI เพื่อถ่ายภาพลักษณะพื้นผิวที่กำลังขยายสูงๆ สำหรับดูการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของทะเลสาบปาล์ม

#### 3.2.5 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารตัวอย่าง

ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) รุ่น TGA8000, Perkin Elmer, USA เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อนในช่วงอุณหภูมิที่ศึกษา

### 4. ผลการวิจัย และอภิปรายผลการวิจัย

#### 4.1 ลักษณะทางกายภาพ และสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของทะเลสาบปาล์ม และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทอรรีแฟกชันของทะเลสาบปาล์ม

ทะเลสาบปาล์มเปล่า เป็นส่วนที่เหลือของทะเลสาบปาล์มจากการแยกผลปาล์มออกแล้ว มีลักษณะเป็นเส้นใยเหนียวสีน้ำตาล เมื่อผ่านกระบวนการทอรรีแฟกชันจะทำให้ทะเลสาบปาล์มมีลักษณะเป็นสีดำเข้มและเปราะ ดังรูปที่ 2 ซึ่งเมื่อวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงของทะเลสาบปาล์มและทอรรีไฟด์ทะเลสาบปาล์ม โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ ผลที่ได้เป็นดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งทะเลสาบปาล์มมีองค์ประกอบของ %MC %VC %AC และ %FC เท่ากับ 7.77% 86.72% 3.23% และ 2.28% (มาตรฐานเปียก) ตามลำดับ และมีค่าความร้อนเท่ากับ 4,332 cal/g และเมื่อวิเคราะห์แบบแยกธาตุ พบว่าทะเลสาบปาล์มมีองค์ประกอบของไนโตรเจน 0.515% คาร์บอน 41.502% ไฮโดรเจน 5.880% ซัลเฟอร์ 0.047% และออกซิเจน 52.056% ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับทอรรีไฟด์ทะเลสาบปาล์ม พบว่า %MC และ %VC ลดลง 90.2%

และ 31.3% ในขณะที่ %FC และค่า HV เพิ่มขึ้น 1,363.2% และ 26.7% ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากความร้อนในกระบวนการทอรีรีแฟกชันทำให้ MC และ VC เกิดการระเหยออกจากทะเลสาปาล์มจึงทำให้ FC มีค่าสูงขึ้น และส่งผลให้ค่า HV ของทะเลสาปาล์มเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า energy ratio ซึ่งเป็นอัตราส่วนของพลังงานในทอรีรีไฟด์ทะเลสาปาล์มต่อพลังงานในทะเลสาปาล์มดิบ พบว่ามีค่าเท่ากับ 1.27 ซึ่ง energy ratio ที่ได้แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของสมบัติทางด้านพลังงานของผลิตภัณฑ์เมื่อผ่านกระบวนการทอรีรีแฟกชัน



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 แสดงลักษณะของ (ก) ทะเลสาปาล์ม และ (ข) ทอรีรีไฟด์ทะเลสาปาล์ม

#### 4.2 การวิเคราะห์ความสำคัญของปัจจัยต่าง ๆ ต่อค่าตอบสนองในกระบวนการทอรีรีแฟกชันของทะเลสาปาล์ม

การศึกษากระบวนการทอรีรีแฟกชันของทะเลสาปาล์มที่มีปัจจัยอิสระจำนวน 2 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ และเวลา โดยการออกแบบการทดลองด้วย RSM แบบ CCD ได้จำนวนการทดลองทั้งสิ้น 11 การทดลอง ซึ่งผลการทดลองที่ได้เป็นดังแสดงในตารางที่ 4 และเมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองด้วย ANOVA จะสามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุด (Least square regression) ในรูปของรหัสตัวแปร (equation of coded factor) เพื่อใช้ในการอธิบายลำดับความมีนัยสำคัญของตัวแปรอิสระกับค่าตอบสนอง ผลปรากฏเป็นดังสมการที่ (2) – (7) โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรของปัจจัยนั้น ๆ กล่าวคือ ถ้าสัมประสิทธิ์หน้าปัจจัยใดมีค่าสูงสุดแสดงว่าปัจจัยนั้นมีนัยสำคัญต่อค่าตอบสนองสูงสุด ในทางกลับกัน ถ้าสัมประสิทธิ์หน้าปัจจัยใดมีค่าต่ำสุดแสดงว่าปัจจัยนั้นจะมีนัยสำคัญต่อค่าตอบสนองน้อยที่สุด โดยไม่คำนึงถึงเครื่องหมายบวก และลบหน้าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยนั้น ๆ เนื่องจากเครื่องหมายจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสัมพันธ์ของปัจจัยในลักษณะเชิงบวก หรือเชิงลบต่อค่าตอบสนอง ซึ่งผลการศึกษาพบว่าค่าตอบสนองทั้งหมดมีค่าสัมประสิทธิ์หน้าปัจจัยของอุณหภูมิสูงกว่าสัมประสิทธิ์หน้าปัจจัยของเวลา

$$MY (\%w.b.) = 39.00 - 9.06 X_1 - 8.02X_2 + 1.58X_1X_2 - 0.14X_1^2 + 3.91X_2^2 \quad (6)$$

$$MC (\%w.b.) = 0.84 - 0.93X_1 - 0.33X_2 + 0.056X_1X_2 + 0.57X_1^2 + 0.23X_2^2 \quad (7)$$

$$VC (\%w.b.) = 62.01 - 15.02X_1 - 8.46X_2 - 2.07X_1X_2 + 2.14X_1^2 + 4.29X_2^2 \quad (8)$$

$$AC (\%w.b.) = 6.04 + 2.44X_1 + 1.53X_2 + 0.72X_1X_2 + 0.56X_1^2 - 0.27X_2^2 \quad (9)$$

$$FC (\%w.b.) = +31.12 + 13.51X_1 + 7.26X_2 + 1.29X_1X_2 - 3.27X_1^2 - 4.25X_2^2 \quad (10)$$

$$HV (cal/g) = 5551.00 + 543.99X_1 + 358.19X_2 - 199.73X_1X_2 - 254.05X_1^2 - 191.05X_2^2 \quad (11)$$

ตารางที่ 3 สมบัติทางเชื้อเพลิงของทะลายน้ำมันดิบ และตัวอย่างที่ได้ทะลายน้ำมันที่ผ่านการทอร์รีเฟคชันที่อุณหภูมิ 278°C เป็นเวลา 23 นาที

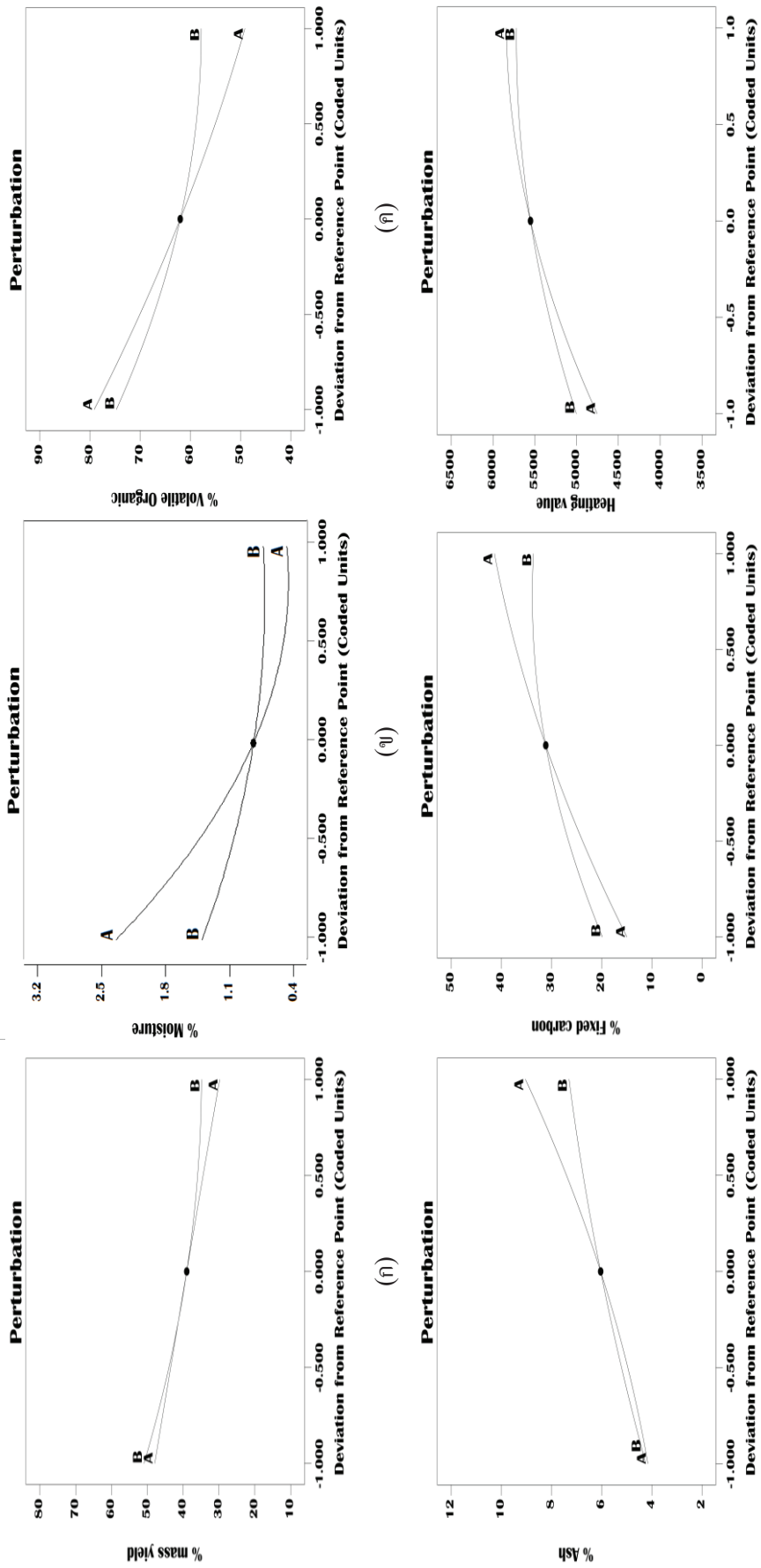
ชนิด	การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) (%w.b.)			การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) (wt%)					HV (cal/g)	
	MC	VC	AC	FC	N	C	H	S		O
ทะลายน้ำมันดิบ	7.77	86.72	3.23	2.28	0.515	41.502	5.880	0.047	52.056	4,332
ตัวอย่างที่ได้ทะลายน้ำมันดิบ	0.76	59.61	6.27	33.36	0.874	64.511	4.620	0.037	29.958	5,488

ตารางที่ 4 แสดงค่าการวิเคราะห์แบบประมาณ และค่าความร้อนของทะลายน้ำมันที่ผ่านกระบวนการทอร์รีเฟคชันสำหรับการออกแบบการทดลองด้วยวิธี CCD

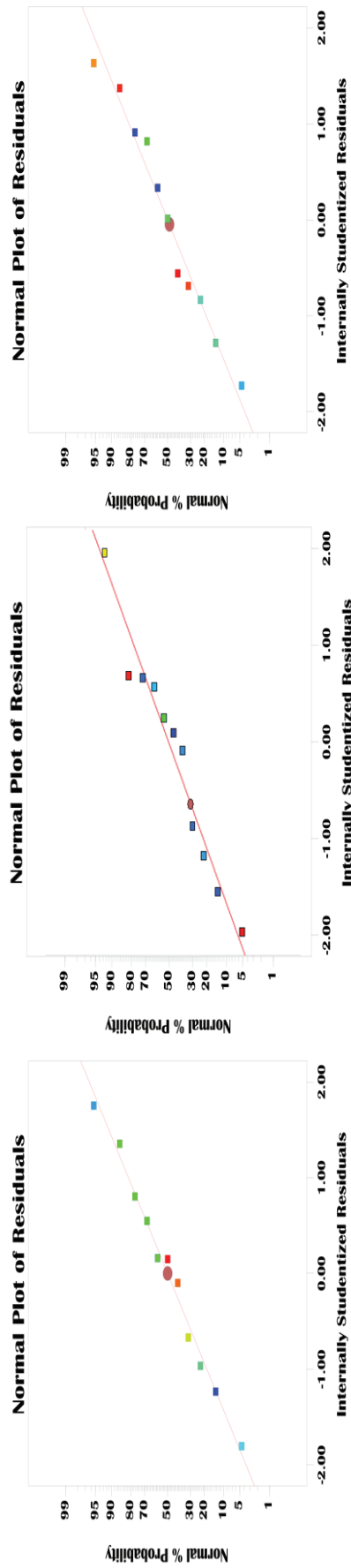
การทดลองที่	MY (%w.b.)		MC (%w.b.)		VC (%w.b.)		AC (%w.b.)		FC (%w.b.)		HV (cal/g)	
	ผลทดลอง	ผลทำนาย	ผลทดลอง	ผลทำนาย	ผลทดลอง	ผลทำนาย	ผลทดลอง	ผลทำนาย	ผลทดลอง	ผลทำนาย	ผลทดลอง	ผลทำนาย
1	24.00	25.92	0.74	0.66	46.10	45.04	10.95	10.61	42.21	43.69	5735	5812
2	30.00	27.27	0.45	0.43	45.77	42.87	10.80	11.03	42.98	45.67	5743	5808
3	44.33	42.23	2.39	2.18	82.26	77.07	4.38	4.69	10.97	16.06	4955	5120
4	58.00	58.15	1.80	1.76	86.90	82.54	3.93	3.34	7.37	12.36	4483	4662
5	37.00	39.00	0.84	0.84	62.06	62.01	6.60	6.04	30.5	31.12	5446	5551
6	50.50	51.54	3.10	3.29	85.35	87.54	4.16	3.70	7.39	5.48	4337	4274
7	61.67	61.43	3.04	2.95	88.08	89.85	2.50	3.08	6.38	4.12	4083	4004
8	32.67	35.47	0.68	0.82	53.13	58.61	7.88	7.66	38.31	32.90	5841	5675
9	41.00	40.15	0.87	0.98	59.87	63.94	6.03	6.52	33.23	28.57	5670	5491
10	39.33	39.00	0.93	0.84	58.48	62.01	5.95	6.04	34.64	31.12	5722	5551
11	40.67	39.00	0.74	0.84	65.47	62.01	5.57	6.04	28.22	31.12	5485	5551

หมายเหตุ MY คือ ร้อยละผลได้ทั้งหมด, MC คือ ปริมาณความชื้น, VC คือ ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่าย, AC คือ ปริมาณเถ้า, FC คือ ปริมาณคาร์บอนคงตัว,

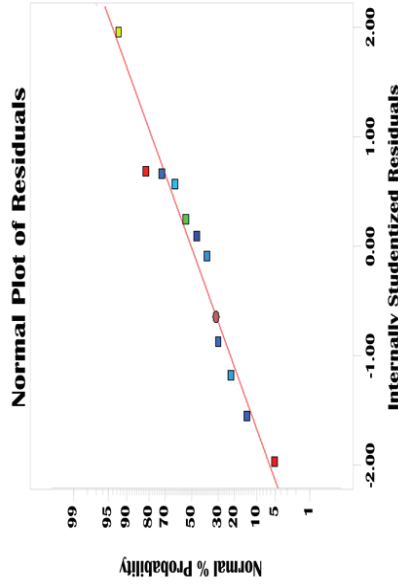
HV คือ ค่าความร้อน



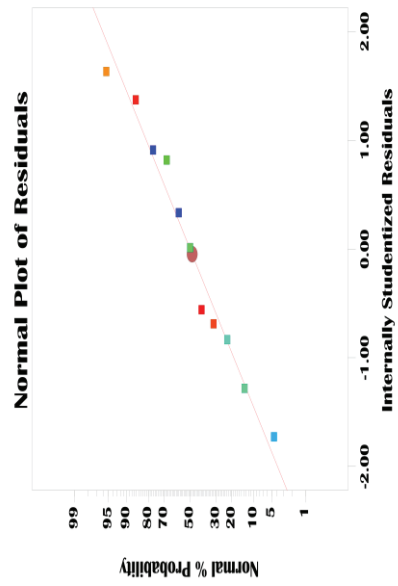
รูปที่ 3 Perturbation plot ของ (ก) MY (ข) MC (ค) VC (ง) AC (จ) FC และ (ฉ) HV ของทะลายนํ้ามัน (สัญลักษณ์ในรูป A คือ อุณหภูมิ และ B คือ เวลา)



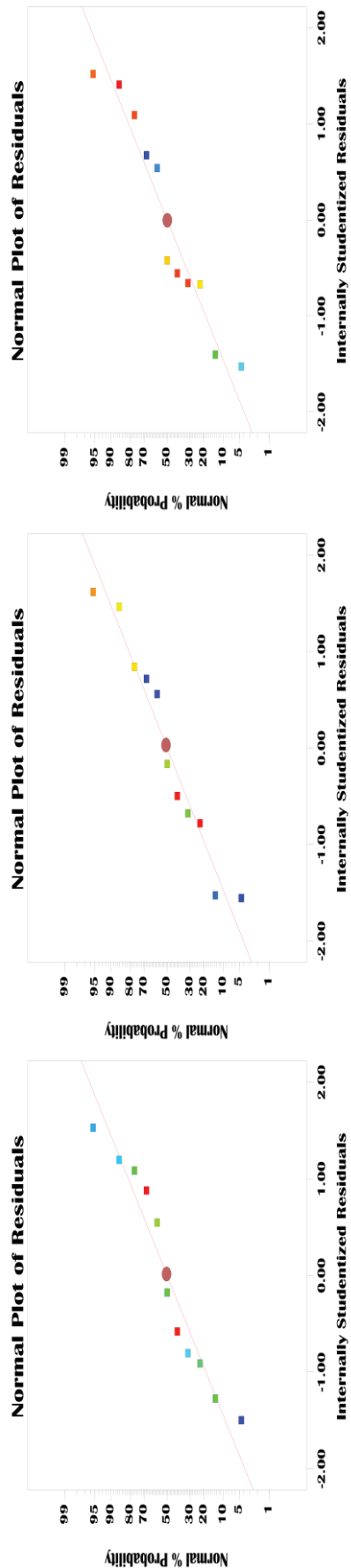
(ก)



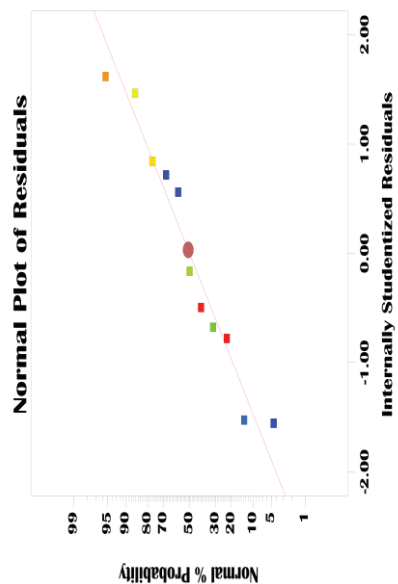
(ข)



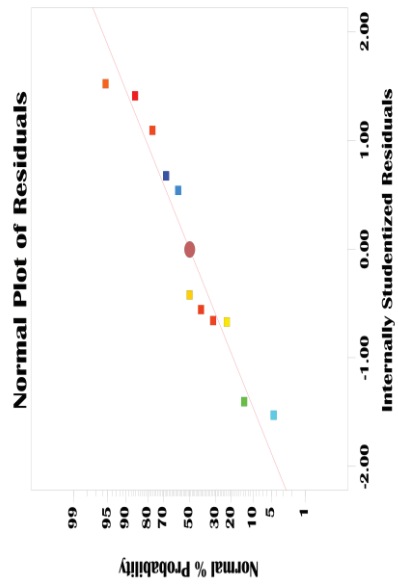
(ค)



(ง)



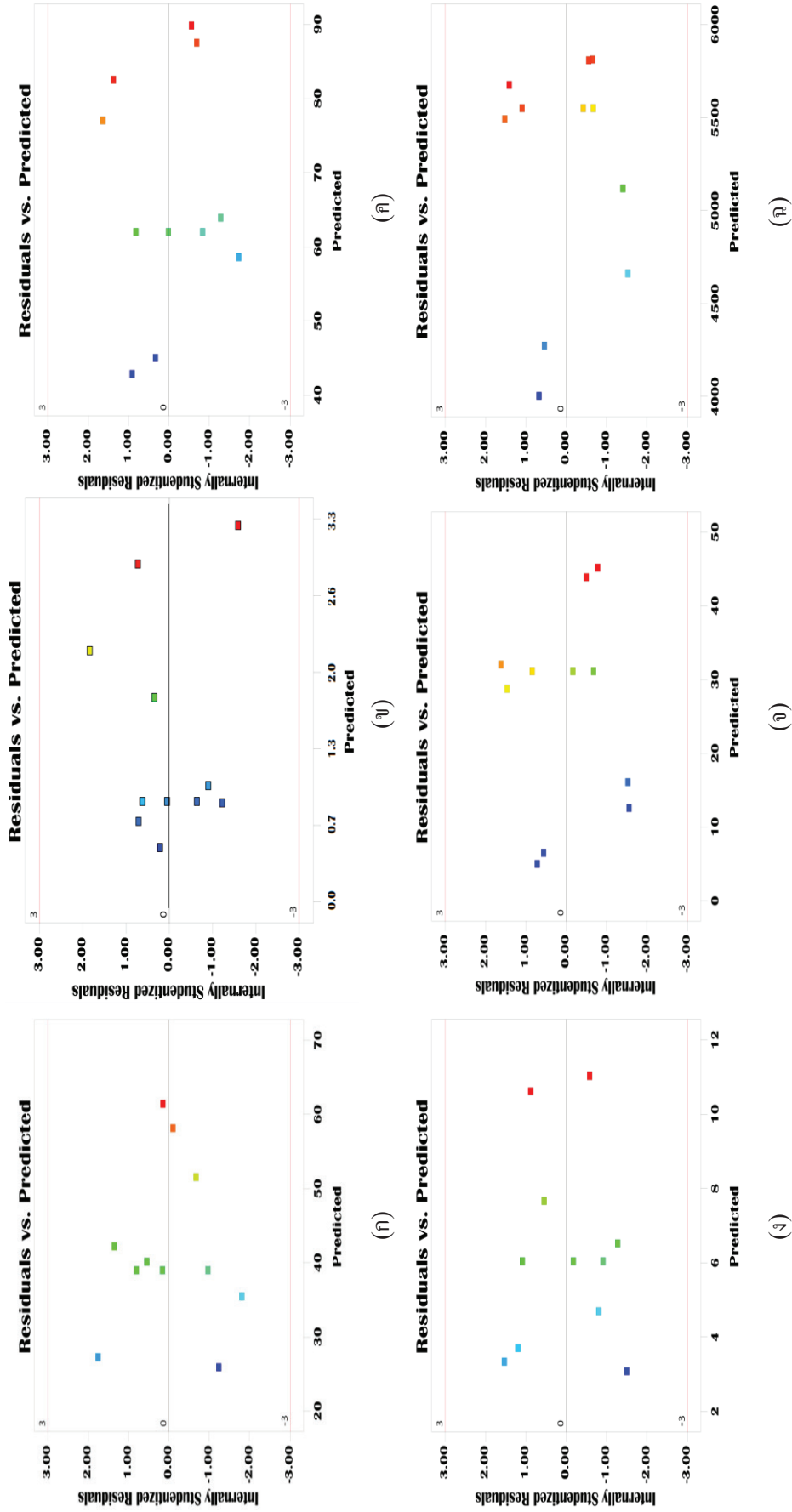
(จ)



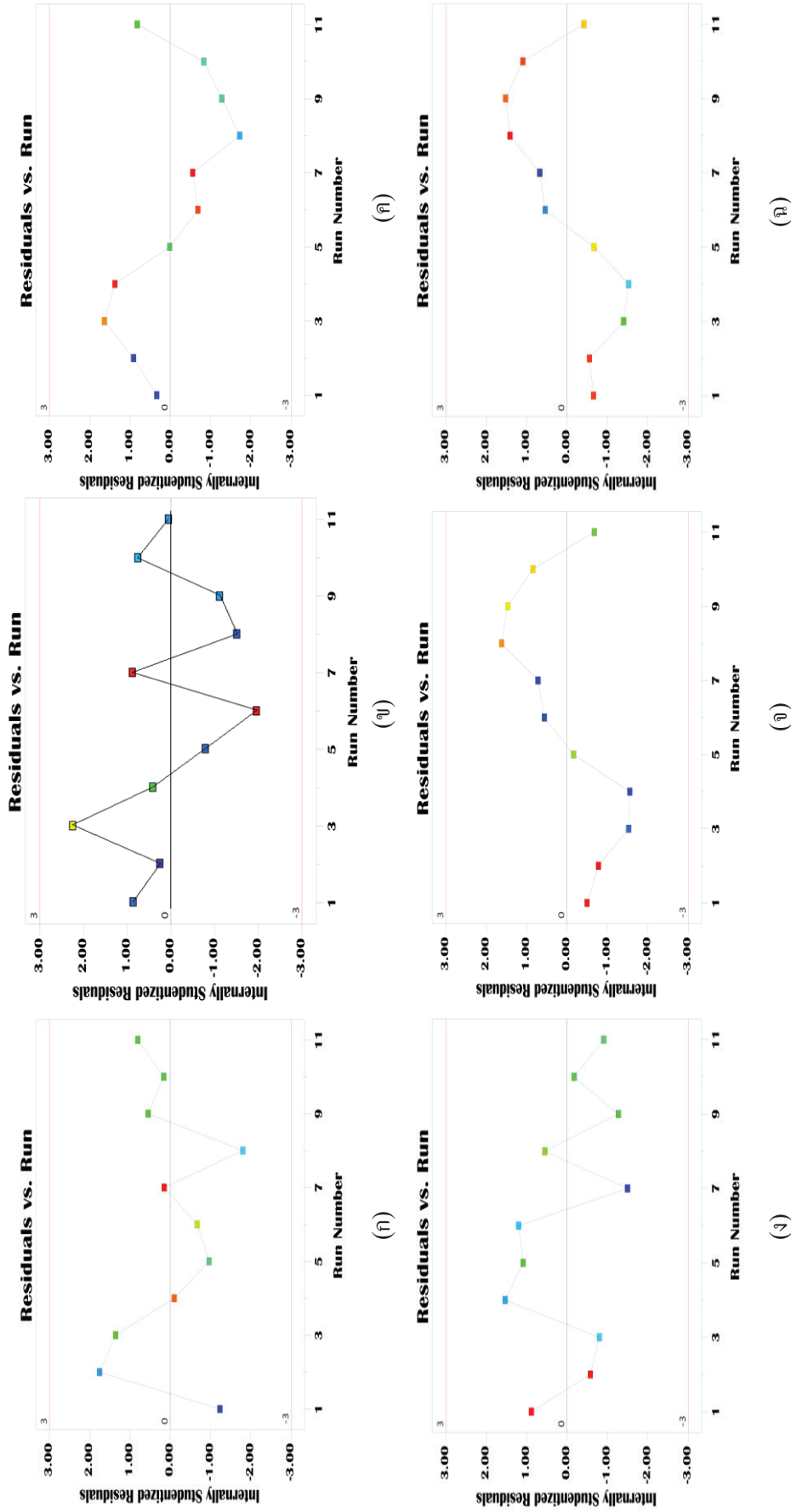
(ฉ)

รูปที่ 4 Normal probability plot ของ (ก) MY (ข) MC (ค) VC (ง) AC (จ) FC และ (ฉ) HV สำหรับกระบวนการทอรีไฟเบอร์ของทะเลสาบป่าล้ม

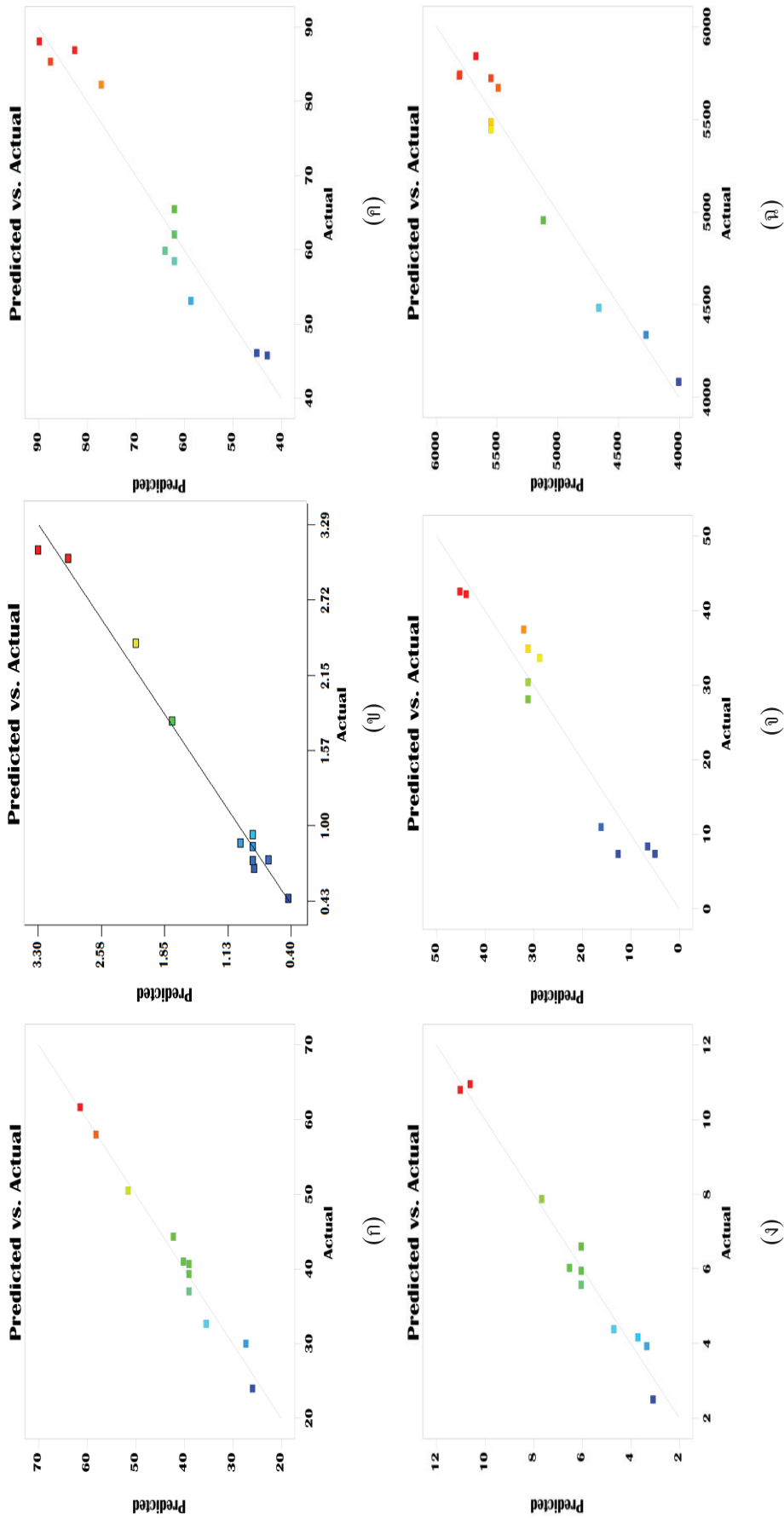




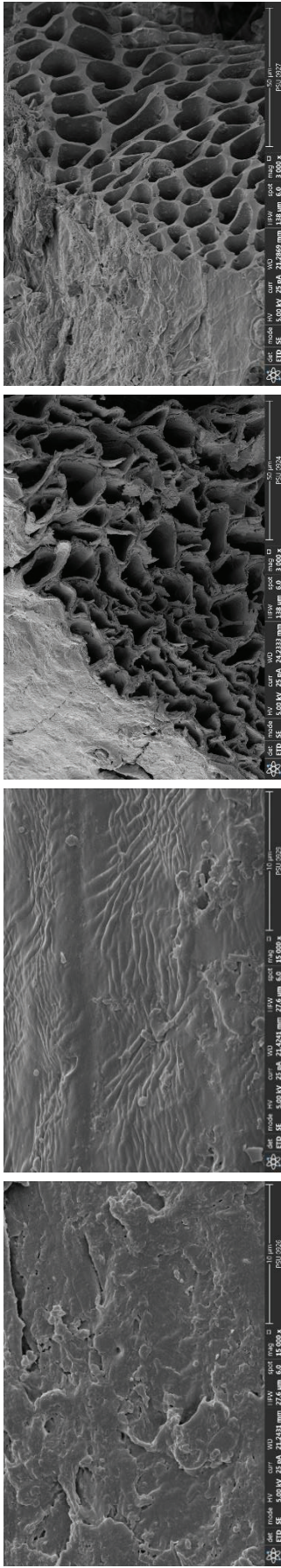
รูปที่ 5 Scatter plot ของ (ก) MY (ข) MC (ค) VC (ง) AC (จ) FC และ (ก) HV สำหรับกระบวนการทอรีรีไฟต์นของทะลายนาลัม



รูปที่ 6 Outlier t plot ของ (ก) MY (ข) MC (ค) VC (ง) AC (จ) FC และ (ฉ) HV สำหรับกระบวนการทอวีไฟต์ชั้นของทะเลสาบป่าส้ม

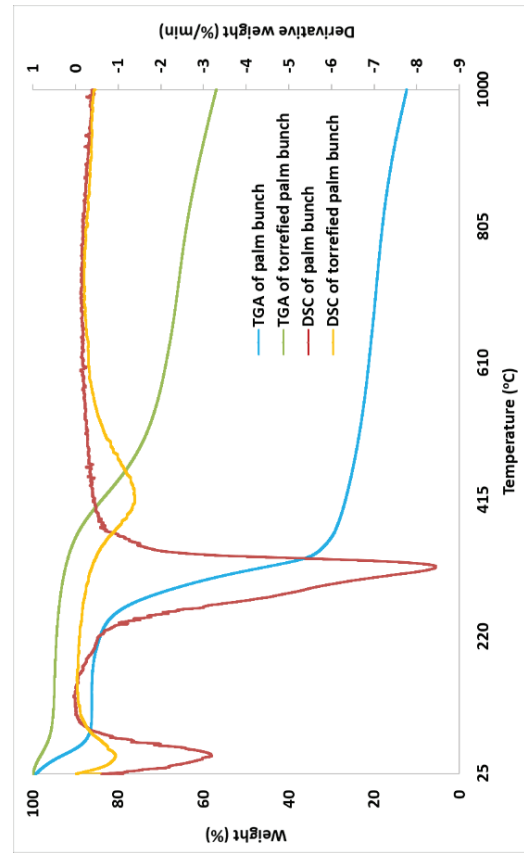


รูปที่ 7 Actual & predicted plot ของ (ก) MY (ข) MC (ค) VC (ง) AC (จ) FC และ (ฉ) HV สำหรับกระบวนการทอรีรีแพคชั่นของทะเลสาบป่าดิม



(ก) (ข) (ค) (ง)

รูปที่ 8 ภาพถ่ายโครงสร้างพื้นผิวจากเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 15,000 เท่า (ก) ทะลายปาล์ม (ข) ทอรรีไฟต์ทะลายปาล์ม และภาพตัดขวางจากเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า (ค) ทะลายปาล์ม (ง) ทอรรีไฟต์ทะลายปาล์ม



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก (TGA) และอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (DTG) ต่อดูมทภูมิของทะลายปาล์ม และทอรรีไฟต์ทะลายปาล์ม

นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์ความสำคัญของปัจจัยต่าง ๆ ต่อค่าตอบสนองในกระบวนการทอรีรีแฟกซ์ของทะเลสาบปาล์มได้โดยใช้ perturbation plot ดังแสดงในรูปที่ 3(ก)–3(ฉ) ซึ่งจะเป็นการพิจารณาค่าตอบสนองที่มีการเบี่ยงเบนไปจากจุดศูนย์กลาง และอธิบายผลของปัจจัยต่าง ๆ ว่าส่งผลในทางบวก หรือทางลบต่อค่าตอบสนอง กล่าวคือถ้าปัจจัยใดมีผลในเชิงลบจะแปรผกผันกับค่าตอบสนอง และปัจจัยใดมีผลในเชิงบวกก็จะแปรผันตรงกับค่าตอบสนอง [12] ซึ่งผลที่ได้พบว่าปัจจัยของอุณหภูมิส่งผลในทางลบต่อ %MY %MC และ %VC ส่วนปัจจัยของเวลาส่งผลในทางลบต่อ %MY และ %VC ในขณะที่ทั้งสองปัจจัยจะส่งผลในเชิงบวกต่อ %AC %FC และค่า HV นอกจากนี้ความลาดชันของเส้นกราฟใน perturbation plot ยังสามารถใช้บ่งบอกถึงลำดับความมีนัยสำคัญของปัจจัยต่าง ๆ ได้เช่นกัน โดยปัจจัยใดที่มีความชันสูงสุดจะเป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญสูงสุดต่อค่าตอบสนอง ในทางกลับกันปัจจัยใดที่มีความชันต่ำสุดก็จะมีนัยสำคัญน้อยที่สุดต่อค่าตอบสนอง [13] ซึ่งผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิจะมีความชันของ perturbation plot สูงกว่าเวลา ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอุณหภูมิจะมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าตอบสนองของกระบวนการทอรีรีแฟกซ์ของทะเลสาบปาล์มสูงกว่าเวลา

### 4.3 การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง

ในการทวนสอบความน่าเชื่อถือของสมการทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาจากผลการทดลอง สามารถทำได้โดยการตรวจสอบความเหมาะสมของสมการการถดถอย (model adequacy checking) ดังนี้

#### 4.3.1 การทดสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ

การทดสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติของผลการทดลองใช้สำหรับตรวจสอบการกระจายตัวของส่วนตกค้าง ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนาย ซึ่งผลการศึกษาการกระจายตัวของส่วนตกค้างของ %MY %MC %VC %AC %FC และค่า HV เป็นดังแสดงในรูปที่ 4(ก)–4(ฉ) พบว่าค่าที่ได้มีความเป็นอิสระ มีการกระจายตัว และมีค่าใกล้เคียงตาม

แนวเส้นตรง โดยไม่มีค่าใดที่มีความผิดปกติตลอดช่วงที่ทำการศึกษา จึงสรุปได้ว่า ค่าส่วนตกค้างที่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ และสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับปัจจัยตอบสนองได้อย่างแม่นยำ [14]

#### 4.3.2 การทดสอบความเสถียรของความแปรปรวนของส่วนตกค้าง

การทดสอบความเสถียรของความแปรปรวนของส่วนตกค้างเป็นการทวนสอบความมีอิสระ และความเสถียรของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า residue กับค่า predicted ของ %MY %MC %VC %AC %FC และค่า HV ดังแสดงในรูปที่ 5(ก)–5(ฉ) ซึ่งพบว่า ค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวรอบ ๆ ค่าศูนย์ในลักษณะที่สมมาตร นั่นคือมีการกระจายตัวสม่ำเสมอทั้งในทางบวกและทางลบ อีกทั้งมีการกระจายตัวที่เป็นอิสระไม่มีรูปแบบที่แน่นอน และส่วนตกค้างมีค่ากระจายตัวอยู่ในช่วง  $\pm 5$  [15] ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าผลการทดลองของกระบวนการทอรีรีแฟกซ์ของทะเลสาบปาล์มมีความเสถียรของความแปรปรวน

#### 4.3.3 การทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนเป็นตัวแปรสุ่มและมีความอิสระต่อกัน

การทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนเป็นตัวแปรสุ่มและมีความอิสระต่อกันใช้ในการตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าส่วนตกค้าง (residue) โดยใช้กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง และลำดับการทดลอง เพื่อตรวจสอบการกระจายตัวของข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 6(ก)–6(ฉ) ซึ่งเป็นกราฟแสดงความอิสระของส่วนตกค้างของ %MY %MC %VC %AC %FC และค่า HV โดยพบว่า ส่วนตกค้างของค่าตอบสนองทั้งหมดไม่มีรูปแบบที่แน่นอน และไม่สามารถคาดการณ์รูปแบบที่แน่นอนได้ นอกจากนี้ค่าของส่วนตกค้างยังมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอแสดงว่าข้อมูลที่ได้มีความเป็นอิสระต่อกัน [16]

#### 4.3.4 การเปรียบเทียบค่าจริงจากการทดลองและค่าทำนาย

การตรวจสอบความสอดคล้องของค่าจริงที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนายโดยใช้สมการของ %MY %MC %VC %AC %FC และค่า HV เป็นดังแสดงในรูปที่ 7(ก)–7(ง) โดยจะเห็นว่าค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายมีแนวโน้มของทิศทางที่สอดคล้องกัน และมีค่าที่กระจายตัวอยู่ใกล้เคียงกับเส้นตรง ซึ่งแสดงถึงความแม่นยำของสมการการถดถอยที่ได้ นั่นคือค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโมเดลมีค่าสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลอง [17]

#### 4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวของทะเลาะปาล์ม

เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวของทะเลาะปาล์ม และทอรรีไฟด์ทะเลาะปาล์มด้วยเครื่อง Scanning electron microscopy (SEM) กำลังขยาย 15,000 เท่า เป็นดังแสดงในรูปที่ 8(ก) และ 8(ข) ตามลำดับ พบว่าพื้นผิวของทะเลาะปาล์มจะมีความขรุขระมากกว่าพื้นผิวของทอรรีไฟด์ทะเลาะปาล์ม และจากรูปที่ 8(ค) และ 8(ง) ซึ่งแสดงภาพตัดขวางของทะเลาะปาล์ม และทอรรีไฟด์ทะเลาะปาล์มที่กำลังขยาย 3,000 เท่า พบว่าช่องว่างภายในเซลล์ของทะเลาะปาล์มมีลักษณะขรุขระไม่สม่ำเสมอ เมื่อผ่านกระบวนการทอรรีไฟด์จะส่งผลให้ช่องว่างภายในเซลล์มีความราบเรียบเพิ่มขึ้น โดยเกิดจากการสลายตัวขององค์ประกอบภายในเซลล์ของทะเลาะปาล์ม ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เมื่อได้รับความร้อนในช่วงของอุณหภูมิที่ทำการศึกษา [18]

#### 4.5 ผลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโดยการวิเคราะห์ผลต่างเชิงความร้อน (Differential thermal analysis, DTA) และวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA)

การศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของทะเลาะปาล์ม และทอรรีไฟด์ทะเลาะปาล์ม ทำได้โดยใช้การวิเคราะห์ผลต่างเชิงความร้อน และวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเชิงความร้อน ซึ่งโดยทั่วไปการสูญเสียน้ำหนักจะเกิดจากการระเหยของ MC และ VC ที่มีอยู่ในทะเลาะปาล์ม

นอกจากนี้ยังเกิดจากการสลายตัวขององค์ประกอบที่มีอยู่ในชีวมวล ได้แก่ เฮมิเซลลูโลสซึ่งจะเกิดการสลายตัวตั้งแต่อุณหภูมิ 190°C เซลลูโลสจะเกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 325–410°C และลิกนินจะเกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 405–750°C [19]

จากการวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนของทะเลาะปาล์ม และทอรรีไฟด์ทะเลาะปาล์ม ผลที่ได้เป็นดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่าทะเลาะปาล์มมีการเปลี่ยนแปลง 3 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิ 25–110°C มีเปอร์เซ็นต์การหายไปของน้ำหนักเท่ากับ 13.9% ซึ่งน้ำหนักที่สูญเสียไปเป็นผลจากการระเหยของความชื้นที่มีอยู่ในวัตถุดิบ และ volatile organic โมเลกุลเล็ก ๆ ขั้นตอนที่สองมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 110–395°C มีเปอร์เซ็นต์การหายไปของน้ำหนักเท่ากับ 58.5% ซึ่งเป็นการสูญเสียที่เกิดจากการระเหยของ organic volatile การสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส และขั้นตอนที่สาม การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 395-1000°C มีเปอร์เซ็นต์การหายไปของน้ำหนักเท่ากับ 15.4% โดยเป็นการสูญเสียที่เกิดจากการสลายตัวของเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งเมื่อพิจารณาพฤติกรรมทางความร้อนของทอรรีไฟด์ทะเลาะปาล์ม พบว่า มีการเปลี่ยนแปลง 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 25-110°C มีเปอร์เซ็นต์การหายไปของน้ำหนักเท่ากับ 4.8% ซึ่งน้ำหนักที่สูญเสียไปเป็นผลจากการระเหยของความชื้น และ volatile organic ที่เหลืออยู่ ขั้นตอนที่ 2 จะเป็นขั้นตอนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องในช่วงอุณหภูมิ 110-1000°C มีเปอร์เซ็นต์การหายไปของน้ำหนักเท่ากับ 38.4% ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบขั้นตอนการสูญเสียน้ำหนักของทะเลาะปาล์มและทอรรีไฟด์ทะเลาะปาล์มพบว่ามีเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเป็นผลมาจากประสิทธิภาพการปรับปรุงสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของทะเลาะปาล์มด้วยกระบวนการทอรรีไฟด์ที่สามารถกำจัดความชื้น volatile organic รวมทั้ง เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน ที่มีอยู่ในทะเลาะปาล์ม



ส่งผลให้มืองค์ประกอบของคาร์บอนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลดีต่อคุณภาพของทะลายปาล์มในการที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง

## 5. สรุปผลการวิจัย

จากการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธี RSM แบบ CCD เพื่อศึกษากระบวนการทอรีรีแฟคชันของทะลายปาล์มสำหรับปรับปรุงสมบัติทางด้านเชื้อเพลิง ได้แก่ %MY %MC %VC %AC %FC และค่า HV พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะทางกายภาพ และสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงที่ดีขึ้น โดย %MC และ %VC จะลดลงประมาณ 90.2% และ 31.3% ในขณะที่ปริมาณ %FC เพิ่มขึ้น 1,363.2% จึงส่งผลให้ค่า HV เพิ่มขึ้น 26.7% ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย

ANOVA พบว่าทั้งปัจจัยของอุณหภูมิ และเวลามีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อกระบวนการทอรีรีแฟคชัน โดยปัจจัยของอุณหภูมิจะมีนัยสำคัญต่อสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงสูงกว่าปัจจัยของเวลา นอกจากนี้ เมื่อทำการวิเคราะห์บริเวณพื้นผิว และการสูญเสียน้ำหนักเชิงความร้อน พบว่ากระบวนการทอรีรีแฟคชันเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการที่จะใช้สำหรับการปรับปรุงสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของทะลายปาล์ม

## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประเภททุนสร้างสถานภาพนักวิจัยรุ่นใหม่ ประจำปีงบประมาณ 2560

## เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. ศักยภาพพลังงานชีวมวลจากปาล์มน้ำมัน : กรณีศึกษาทะลายเปล่า (Empty Fruit Bunch). 2562. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา : <http://webkc.dede.go.th/testmax/node/2529>
- [2] Sukiran, M. A., Abnisa, F., Daud, W. M. A. W., Bakar, N. A. and Loh, S. K. A Review of Torrefaction of Oil Palm Solid Wastes for Biofuel Production. *Energy Conversion and Management*, 2017; 149: 101-120.
- [3] Gan, Y. Y., Ong, H. C., Show, P. L., Ling, T. C. Chen, W. -H., Yu, K. L. and Abdullah, R. Torrefaction of Microalgal Biochar as Potential Coal Fuel and Application as Bio-Adsorbent. *Energy Conversion and Management*, 2018; 165: 152-162.
- [4] Xin, S., Huang, F., Liu, X., Mi, T. and Xu, Q. Torrefaction of Herbal Medicine Wastes: Characterization of The Physicochemical Properties and Combustion Behaviors. *Bioresource Technology*, 2019; 287: 1-7.
- [5] Singh, R. K., Sarkar, A. and Chakraborty, J. P. Effect of Torrefaction on the Physicochemical Properties of Pigeon Pea Stalk (*Cajanus Cajan*) and Estimation of Kinetic Parameters. *Renewable Energy*, 2019; 138: 805-819.
- [6] Kanwal, S., Chaudhry, N., Munir, S. and Sana, H. Effect of Torrefaction Conditions on the Physicochemical Characterization of Agricultural Waste (Sugarcane Bagasse). *Waste Management*, 2019; 88: 280-290.
- [7] Szwaja, S., Magdziarz, A., Zajemska, M. and Poskart, A. A Torrefaction of *Sida Hermaphrodita* to Improve Fuel Properties. Advanced Analysis of Torrefied Products. *Renewable Energy*, 2019; 141: 894-902.
- [8] Martín-Lara, M. A., Ronda, A., Zamora, M. C. and Calero, M. Torrefaction of Olive Tree Pruning: Effect of Operating Conditions on Solid Product Properties. *Fuel*, 2017; 202: 109-117.
- [9] Wang, L., Barta-Rajnai, E., Skreiberg, Ø., Khalil, R., Czégény, Z., Jakab, E. Barta, Z. and Grønli, M. Effect of Torrefaction on Physicochemical Characteristics and Grindability of Stem Wood, Stump and Bark. *Applied Energy*, 2018; 137-148.

- [10] Singh, S., Chakraborty, J. P. and Mondal, M. K. Optimization of Process Parameters for Torrefaction of *Acacia Nilotica* Using Response Surface Methodology and Characteristics of Torrefied Biomass as Upgraded Fuel. *Energy*, 2019; 186: 1-14.
- [11] ปันตดา อินทร์ดำ โชคชัย เหมือนมาศ และสุกฤทธิรา รัตนวิไล. การคัดเลือกปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการทอรีรีแฟกชันของทะลายปาล์มโดยใช้การออกแบบการทดลองด้วย Plackett-Burman Design. *วารสารวิจัย มช. (ฉบับบัณฑิตศึกษา)*, 2019; 19(4).
- [12] Erfani, S. M. H., Danesh, S., Karrabi, S. M., Gheibi, M. and Nemati, S. Statistical Analysis of Effective Variables on the Performance of Waste Storage Service Using Geographical Information System and Response Surface Methodology. *Journal of Environmental Management*, 2019; 235: 453–462.
- [13] Pakalapati, H., Arumugasamy, S. K. and Khalid, M. Comparison of Response Surface Methodology and Feedforward Neural Network Modeling for Polycaprolactone Synthesis Using Enzymatic Polymerization. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2019: 18: 1–11.
- [14] Majdi, H., Esfahani, J. A. and Mohebbi, M. Optimization of Convection Drying by Response Surface Methodology. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019; 156: 574–584.
- [15] Nayak, M. G. and Vyas, A. P. Optimization of Microwave-Assisted Biodiesel Production from Papaya Oil Using Response Surface Methodology. *Renewable energy*, 2019; 138: 18–28.
- [16] Ooi, T. Y., Yong, E. L., Md Din, M. F., Rezanía, S., Aminudin, E., Chelliapan, S., Rahman, A. A. and Park, J. Optimization of Aluminium Recovery from Water Treatment Sludge Using Response Surface Methodology. *Journal of Environmental Management*, 2018; 228: 13–19.
- [17] Zhang, P., Akobi, M. and Khattab, A. Recyclability/Malleability of Crack Healable Polymer Composites by Response Surface Methodology. *Composites Part B*, 2019; 168: 129–139.
- [18] Sabil, K. M., Aziz, M. A., Lal, B. and Uemura, Y. Effect of Torrefaction on the Physiochemical Properties of Oil Palm Empty Fruit Bunches, Mesocarp Fiber and Kernel Shell. *Biomass and bioenergy*, 2013; 56: 351-360.
- [19] Cao, W., Li, J., Martí-Rosselló, T. and Zhang, X. Experimental Study on the Ignition Characteristics of Cellulose, Hemicellulose, Lignin and Their Mixtures. *Journal of the Energy Institute*, 2019; 29(5): 1303-1312.



# การทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างสะพานลอยที่ตั้งอยู่ใน สภาวะแวดล้อมคาร์บอนเนชันในจังหวัดนครปฐม

## Service life Prediction of Pedestrian Bridge Structures in Carbonation Environment in Nakhonpathom Province

บัญญัติ วารินทร์ไหล<sup>1\*</sup> และ ปิติสานต์ กร้ามาตร<sup>2</sup>

Banyut Warinlai<sup>1\*</sup> and Pitisan Krammart<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม  
 อ.เมืองนครปฐม จ.นครปฐม 73000

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
 อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

<sup>1\*</sup>Civil Engineering, Faculty of Science and Technology

Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom, Thailand, 73000

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology  
 Thanyaburi, Pathum Thani, Thailand, 12110

\*Corresponding author: Email: nowsurvey@hotmail.com, Telephone Number 034-261065

### บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการตรวจสอบการเกิดคาร์บอนเนชันของโครงสร้างสะพานลอยคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดนครปฐม โดยทำการวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของโครงสร้างสะพานลอย วัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมพร้อมเจาะเก็บชิ้นตัวอย่างเพื่อทดสอบความลึกคาร์บอนเนชันของโครงสร้างสะพานลอยทั้งหมด 3 อำเภอในจังหวัดนครปฐม คืออำเภอกำแพงแสน อำเภอเมืองนครปฐม และอำเภอนครชัยศรี ข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์การเกิดคาร์บอนเนชันและทำนายอายุของโครงสร้างสะพานลอยโดยใช้สมการของ Fick's first law of diffusion และมาตรฐานการออกแบบความคงทนสำหรับ โครงสร้างที่เผชิญคาร์บอนเนชันของกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยพ.) ผลการศึกษาพบว่า ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของโครงสร้างสะพานลอยมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 49.75 ถึง 55.73 มิลลิเมตร ส่วนระยะคาร์บอนเนชันเฉลี่ยของโครงสร้างสะพานลอย มีค่าอยู่ระหว่าง 19.20 ถึง 31.40 มิลลิเมตร และสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชันมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.93 ถึง 8.39 มิลลิเมตร/ปี<sup>1/2</sup> โดยพื้นที่ในเขตชุมชนจังหวัดนครปฐมมีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนเนชันในระดับรุนแรง นอกจากนี้พบว่า อัตราการเกิดคาร์บอนเนชันของโครงสร้างสะพานลอยที่มีตำแหน่งที่ตั้งในเขตอำเภอเมืองนครปฐมสูงกว่าของเขตอำเภอนครชัยศรีและอำเภอกำแพงแสน สุดท้ายด้วยวิธีการตามสมการ Fick's first law of diffusion และมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง สามารถทำนายและคำนวณอายุการใช้งานของโครงสร้างที่สัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยผลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบวางแผน

ดูแลบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญกับสภาวะแวดล้อมคาร์บอนเข้มข้น ตลอดจนป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้

**คำสำคัญ:** สะพานลอย คอนกรีตเสริมเหล็ก คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนเข้มข้น การทำนายอายุการใช้งาน

## ABSTRACT

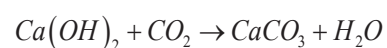
This study was an investigation on the carbonation depth of pedestrian bridge structures (PDS) in community area of Nakhonpathom province. Cover thickness of PDS, carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) concentration and relative humidity (RH) of the environment and carbonation depth of PDS were measured. In this study, the PDS were selected in 3 districts of Nakhonpathom province, namely Kamphaengsaen district, Mueang district and Nakhon Chai Si district. The study results were analyzed the occurrence and the effect on the carbonation depth of PDS. The predict for free service life of PDS in both by Fick's first law of diffusion equation and durability design of carbonation structure of Department of Public Works and Town & Country Planning were considered. The results indicated that the average of the cover thickness of PDS, the average of the carbonation depth of PDS and the average of the carbonation coefficient of PDS were 49.75-55.73 mm, 19.20-31.40 mm and 4.93-8.39 mm/year<sup>0.5</sup>, respectively. Nakhonpathom community area having a high amount of CO<sub>2</sub> and RH of the environment was at risk of severe deterioration due to carbonation. Moreover, the rate of carbonation depth of PDS located in Mueang district was higher than that of Kamphaengsaen district and Nakhon Chai Si district, respectively. Finally, the proposed method to Fick's first law of diffusion equation and durability design of carbonation structure of Department of Public Works and Town & Country Planning can predict and calculate the free service life of the PDS exposed to CO<sub>2</sub>, the result can be used in the design, planning and maintenance of reinforced concrete structures faced by the carbonation environment as well as preventing damage that will occur in the future.

**Keywords:** Pedestrian bridge, Reinforced concrete, Carbon dioxide, Carbonation, Service life prediction

## 1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้างกันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เพราะเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมทั้งด้านราคาและคุณสมบัติต่างๆ เช่น การนำมาใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างรูปแบบต่างๆ อาทิ อาคารหรือโครงสร้างสาธารณะ หรือนำคอนกรีตมาหล่อขึ้นรูป และตกแต่งรูปทรงตามที่ต้องการ นอกจากนี้คอนกรีตยังมีความสามารถในการรับแรงอัดสูง ไม่ติดไฟ ซึ่งคอนกรีตประกอบด้วยส่วนผสม 2 ส่วน คือ วัสดุประสาน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ น้ำ และน้ำยาผสมคอนกรีตผสมกับวัสดุมวลรวมต่างๆ ได้แก่ ทราย หินหรือกรวด เมื่อนำมาผสมกันจะคงสภาพคอนกรีตสดเป็นของเหลวอยู่ช่วงเวลาหนึ่ง พอที่จะนำไปเทลงในแบบหล่อที่มีรูปร่างตามต้องการ หลังจากนั้นจะแปรสภาพเป็นของแข็งที่มีความแข็งแรง และสามารถรับน้ำหนักได้ ถึงแม้ว่าคอนกรีตสามารถรับแรงอัดได้สูง แต่ถ้าคอนกรีตมีการก่อสร้างใน

สภาวะแวดล้อมที่เสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพ ก็จะทำให้อายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตแตกต่างกัน ซึ่งสภาพแวดล้อมเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเสื่อมสภาพเนื่องจากปัญหาความคงทนได้ เช่น การเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนเข้มข้นคลอไรด์ เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในเขตที่มีการจราจรหนาแน่นหรือในเขตเมืองจะมีโอกาสสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ในปริมาณที่สูง ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังกล่าวจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ Ca(OH)<sub>2</sub> ในซีเมนต์เพสต์ ทำให้เกิดแคลเซียมคาร์บอเนตดังสมการ



ปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่าปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน ซึ่งทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงและส่งผลให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ จากผลการวิจัยในอดีตพบว่าอัตราการเกิด

คาร์บอนชั้นในคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น จากผลงานวิจัยในอดีตของ Alexander et al [1] มีการทดสอบอัตราการเกิดคาร์บอนชั้นของโครงสร้างสะพาน 3 แห่งในแอฟริกาใต้ที่มีอายุระหว่าง 11-76 ปี พบว่าสภาพแวดล้อมที่ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 51-68 จะมีโอกาสที่การเกิดคาร์บอนชั้นมากกว่าสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์ที่ประมาณมากกว่าร้อยละ 70 ส่วน Roy et al [2] พบว่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ มีผลต่อการเกิดคาร์บอนชั้น โดยความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 50 ถึง 75 ทำให้อัตราการเกิดคาร์บอนชั้นสูง ส่วนในกรณีของ Castro et al [3] พบว่าตำแหน่งที่ตั้งอาคารห่างจากทะเลประมาณ 100 ถึง 200 เมตร มีแนวโน้มอัตราการเกิดคาร์บอนชั้นสูงกว่าตำแหน่งอื่นๆ และระดับความสูงเพิ่มขึ้นของอาคารตัวอย่างทำให้อัตราการเกิดคาร์บอนชั้นสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้ Khunthongkeaw et al [4] พบว่าชนิดของวัสดุประสานมีผลต่อการเกิดคาร์บอนชั้น โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้เกิดคาร์บอนชั้นได้เร็วขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง และปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งต่างก็มีส่วนทำให้ลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) จึงทำให้ความลึกคาร์บอนชั้นมากขึ้น ในส่วนของ Fattuhi [5] ยังพบอีกว่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ในอัตราที่สูงจะทำให้เกิดคาร์บอนชั้นได้เร็วขึ้น อย่างไรก็ตามก็ยังไม่มีการตระหนักอย่างเพียงพอถึงการวางแผนและการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตที่มีผลกระทบเกี่ยวกับการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนชั้นอย่างจริงจัง รวมถึงการนำมาตรฐานการออกแบบต่างๆ ที่ช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพให้อยู่ในเกณฑ์ที่ป้องกันได้ในสภาพแวดล้อมนั้นๆ มาประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีตที่แพร่หลาย จึงทำให้โครงสร้างคอนกรีตเกิดความเสียหายการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนชั้นเป็นผลให้อายุการใช้งานของโครงสร้างลดลงตามลำดับ

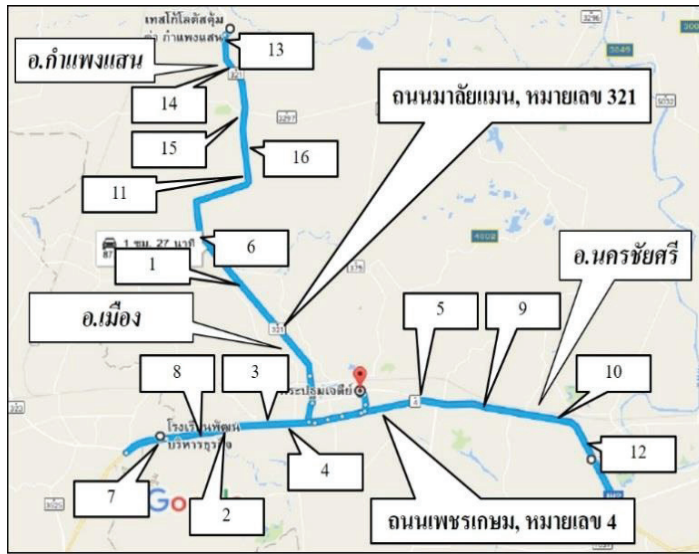
การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาความลึกคาร์บอนชั้นของโครงสร้างสะพาน พร้อมกับการวางแผนการออกแบบและทำนายอายุการใช้งาน โครงสร้างที่เสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนชั้นโดยใช้สมการ Fick's first law of diffusion และมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง โดยโครงสร้างสะพานลอยที่ศึกษาเป็นพื้นที่เมืองนครปฐม ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงในระดับหนึ่ง (ประมาณ 600 ppm) และมีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นสูง โดยข้อมูลที่ได้สามารถเป็นฐานข้อมูลที่น่าไปใช้ในการพิจารณาออกแบบให้มีความสอดคล้องกับสภาวะแวดล้อมที่เกิดขึ้นจริงโดยเฉพาะในเขตพื้นที่ชุมชนจังหวัดนครปฐม ตลอดจนวางแผนดูแลบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในอนาคตต่อไป

## 2. ระเบียบวิธีการศึกษา

### 2.1 การคัดเลือกตัวอย่างสะพานลอย

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ทำการประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้ามประเภทคอนกรีตเสริมเหล็ก มีการตรวจสอบด้วยตาเปล่า การวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม และการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อนำมาทดสอบทางเคมีในห้องปฏิบัติการหาระยะความลึกคาร์บอนชั้น โดยได้ทำการเจาะเก็บตัวอย่างจากโครงสร้างสะพานลอยคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสกับสภาวะแวดล้อมที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่สูงทั้งหมด 16 สะพานลอย ซึ่งมีที่ตั้งอยู่ใน 3 อำเภอของจังหวัดนครปฐม ได้แก่ อำเภอกำแพงแสน 5 สะพานลอย อำเภอเมืองนครปฐม 8 สะพานลอย และอำเภอนครชัยศรี 3 สะพานลอย โดยอายุของโครงสร้างมีตั้งแต่อายุ 12 ถึง 22 ปี รูปที่ 1 แสดงแผนที่อำเภอ ถนน ตำแหน่งที่ตั้งและสภาพทั่วไปของสะพานลอยในเขตจังหวัดนครปฐมในงานวิจัยนี้ ส่วนรูปที่ 2 แสดงสิ่งแวดล้อมรอบข้างและสภาพทั่วไปของโครงสร้างสะพานที่ศึกษาในครั้งนี้





- P1 : KM 24+166 (โลตัสกำแพงแสน)
- P2 : KM 23+325 (ร.ร.กำแพงแสนวิทยา)
- P3 : KM 19+235 (หนองปลาไหล)
- P4 : KM 17+835 (ทุ่งเศรษฐี)
- P5 : KM 15+760 (ลาดหญ้าไทร)
- P6 : KM 10+300 (ทัพหลวง)
- P7 : KM 5+650 (กิโล 5)
- P8 : KM 66+780 (ร.ร.พัฒนบริหารธุรกิจ)
- P9 : KM 64+075 (หนองดินแดง)
- P10 : KM 63+230 (ศาลเขาวงคน)
- P11 : KM 61+585 (บ้านหนองหิน)
- P12 : KM 59+785 (วัดลาดปลาเค้า)
- P13 : KM 50+174 (วัดธรรมศาลา)
- P14 : KM 47+485 (วัดเสถียร)
- P15 : KM 45+648 (วัดศิระทอง)
- P16 : KM 42+960 (วัดท่าตำหนัก)

รูปที่ 1 แผนที่แสดงตำแหน่งของสะพานลอยในเขตชุมชนจังหวัดนครปฐมที่ใช้ศึกษาในครั้งนี้



รูปที่ 2 สิ่งแวดล้อมรอบข้างและสภาพทั่วไปของสะพานลอยในเขตชุมชนจังหวัดนครปฐมที่ใช้ศึกษาในครั้งนี้

## 2.2 การหาตำแหน่งและวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

การทดสอบวัดระยะหุ้มเหล็กเสริมในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งที่เจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตทดสอบระยะคาร์บอนเช่นแสดงดังรูปที่ 3 โดยใช้เครื่อง Electromagnetic induction ซึ่งใช้ทฤษฎีการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้าในการวัดระยะห่างจากผิวโลหะ [6] ตรวจสอบบริเวณผิวของโครงสร้างคอนกรีตโดยเลือกหน้า

ตัดที่ผิวเรียบเท่านั้น ในแต่ละสะพานลอยจะวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม 6 ตำแหน่ง ตำแหน่งละ 4 ค่า โดยอำเภอกำแพงแสนทำการเก็บข้อมูลระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม 5 สะพานลอย อำเภอเมืองนครปฐม 8 สะพานลอย อำเภอนครชัยศรี 3 สะพานลอย ทำให้เก็บข้อมูลระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของอำเภอกำแพงแสน 120 ค่า อำเภอเมืองนครปฐม 192 ค่า และอำเภอนครชัยศรี 72 ค่า





รูปที่ 3 การวัดระยะหุ้มเหล็กเสริม

### 2.3 วิธีการเก็บตัวอย่างเพื่อทดสอบความลึกคาร์บอนชั้น

การทดสอบความลึกคาร์บอนชั้นของโครงสร้างสะพานลอยที่อยู่ในเขตชุมชน จังหวัดนครปฐม โดยการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตด้วยสว่านหัวเจาะแบบ HOLESAW ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 ถึง 6 เซนติเมตร โดยทำการศึกษาจากแบบโครงสร้างและพื้นที่ก่อสร้างสะพานจริง ซึ่งพิจารณาจากโครงสร้างหลักและสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนใหญ่ จึงทำการเลือกเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตจากบริเวณเสาของสะพานลอย ที่ระดับความสูง 1.50–2.50 เมตร ใน 3 อำเภอ โดยแต่ละสะพานลอยเจาะเก็บตัวอย่างทั้งหมด 6 ตัวอย่างต่อ 1 สะพานลอย ซึ่งอำเภอกำแพงแสนทำการเก็บตัวอย่างเพื่อทดสอบความลึกคาร์บอนชั้น 5 สะพานลอย อำเภอเมืองนครปฐม 8 สะพานลอยและอำเภอนครชัยศรี 3 สะพานลอย ทำให้ได้แท่งตัวอย่างคอนกรีตดังนี้ อำเภอกำแพงแสน 30 แท่งตัวอย่าง อำเภอเมืองนครปฐม 48 แท่งตัวอย่าง และอำเภอนครชัยศรี 18 แท่งตัวอย่าง จากนั้นทำการผ่าซีกชิ้นตัวอย่าง นิดด้วยสารละลายฟีนอล์ฟธาไลน์ เพื่อวัดระยะคาร์บอนชั้น

### 2.4 การวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม

ในการตรวจวัดครั้งนี้ใช้เครื่องวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ยี่ห้อ EXTECH รุ่น CO250 เก็บวัดค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และ

ความชื้นสัมพัทธ์บริเวณโครงสร้างสะพานลอยที่ทำการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตทดสอบความลึกคาร์บอนชั้น ทำการวัดค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ทั้งหมด 3 เดือน (ในช่วงเดือนมีนาคม เมษายน และพฤษภาคม) ใน 1 เดือนเก็บค่าทั้งหมด 9 วัน โดยในแต่ละวันทำการวัดค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ 3 ช่วงเวลา คือ ช่วงเช้า (เวลาประมาณ 9 ถึง 10 นาฬิกา) ช่วงเที่ยง (เวลาประมาณ 12 ถึง 13 นาฬิกา) และช่วงเย็น (เวลาประมาณ 17 ถึง 18 นาฬิกา) ซึ่งการเก็บข้อมูลดังกล่าวจะเก็บในวันเดียวกันทั้ง 16 สะพานลอยในช่วงเวลาที่กล่าวมาข้างต้น ช่วงเวลาอย่างละ 2 ค่า ในแต่ละสะพานลอยที่มีการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตทดสอบความลึกคาร์บอนชั้นรวมทั้งหมดจะเก็บค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ 162 ค่า ทั้งนี้การวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ครั้งนี้เป็นการวัด ณ ช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น ซึ่งอาจจะไม่ใช่ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ตลอดทั้งปี อย่างไรก็ตามเพื่อทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการเกิดคาร์บอนชั้นของโครงสร้างสะพานลอยครั้งนี้จะใช้ข้อมูลเฉลี่ยที่วัดได้ ณ ช่วงเวลาดังกล่าว

### 2.5 การทดสอบความลึกคาร์บอนชั้น

ตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากการเจาะจากตำแหน่งที่กล่าวมา นำมาผ่าซีกเพื่อทดสอบระยะความลึกคาร์บอนชั้น จากปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตลดลง (โดยทั่วไปค่า pH ของคอนกรีตประมาณ 13) ในการทดสอบนี้ได้ทำการทดสอบความลึกคาร์บอนชั้นออกจากส่วนที่ยังไม่เกิดคาร์บอนชั้น โดยฉีดพ่นด้วยสารละลายฟีนอล์ฟธาไลน์ไปยังคอนกรีตที่ผ่าซีกแล้วซึ่งสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีชมพูเข้มหาก pH ของคอนกรีตมีค่ามากกว่า 9 จากนั้นวัดค่าความลึกคาร์บอนชั้นจากรยะคอนกรีตที่ยังคงสีเดิมอยู่ไปจนถึงจุดตัดของสีชมพู ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การทดสอบและวัดความลึกคาร์บอนขึ้น

### 3. ผลการศึกษาและวิเคราะห์

จากการพิจารณาเพื่อตรวจสอบโครงสร้างสะพานลอย มีวิธีการตรวจสอบดังนี้ 1) การตรวจสอบด้วยตาเปล่า 2) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม 3) ความเข้มข้นก๊าซ

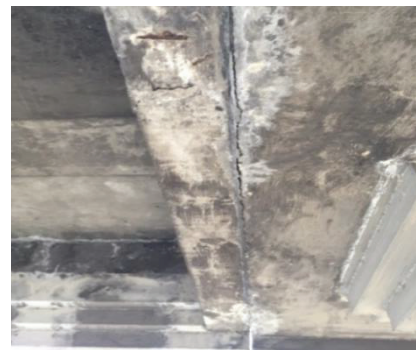
คาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม และ 4) ความลึกคาร์บอนขึ้น นำผลที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อทำนายอายุของโครงสร้างสะพานลอยต่อไป

#### 3.1 การตรวจสอบด้วยตาเปล่า

ความเสียหายที่พบจากการตรวจสอบด้วยตาเปล่าของโครงสร้างสะพานลอยที่ตั้งอยู่ในอำเภอกำแพงแสน อำเภอมืองนครปฐม และอำเภอนครชัยศรี จังหวัดนครปฐม ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่า ปัญหาส่วนใหญ่ เกิดจากการกะเทาะของผิวคอนกรีต โครงสร้างคอนกรีตเกิดรอยร้าว เหล็กเสริมเกิดสนิมเป็นบางจุดของโครงสร้าง โดยอำเภอมืองนครปฐมมีเหล็กเสริมเกิดสนิมค่อนข้างเห็นได้อย่างชัดเจน คอนกรีตเกิดการแตกร้าว โดยระดับความรุนแรงจะเกิดกับสะพานลอยที่มีความเสียหายประเภทรุนแรงมาก ซึ่งเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานโครงสร้าง และเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนขึ้น ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างในระยะยาวได้



ก) เหล็กเสริมท้องพื้นและคานสะพานลอยเกิดสนิม



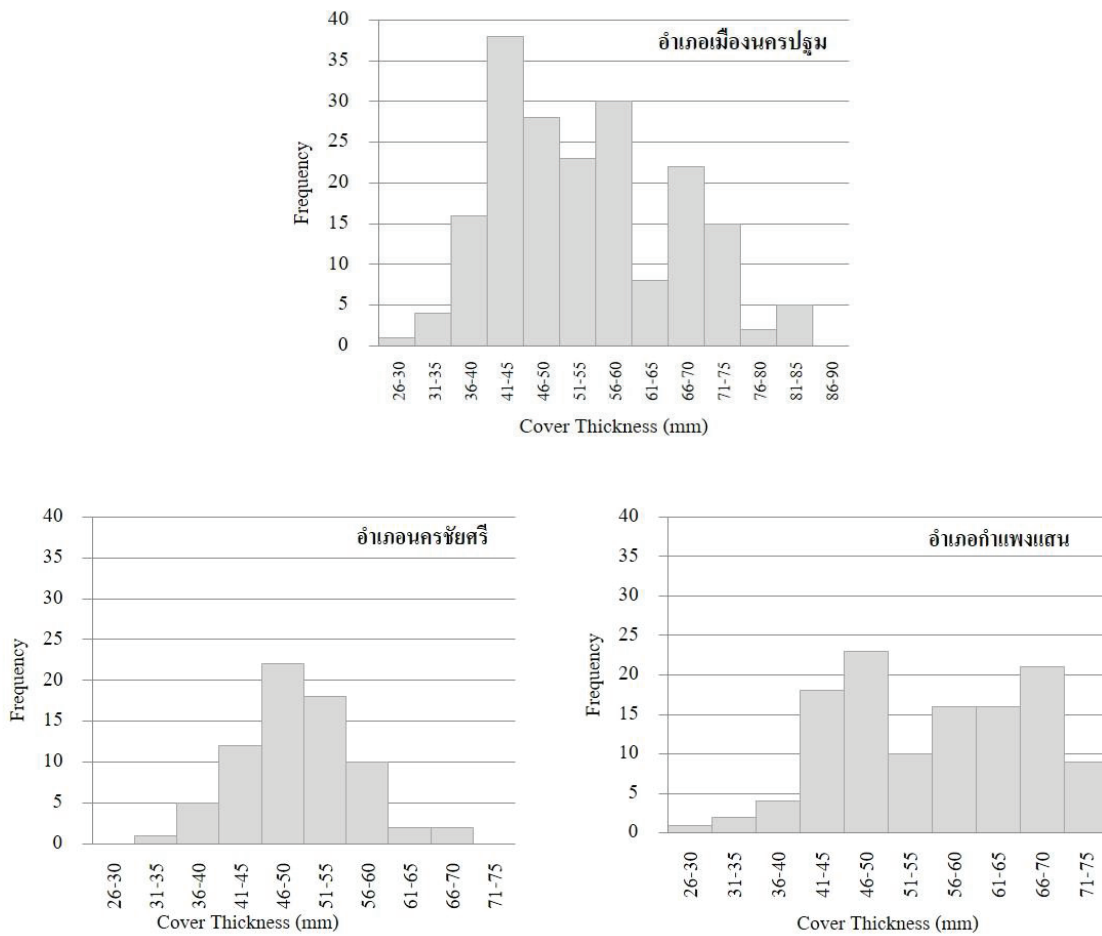
ข) โครงสร้างคอนกรีตเกิดรอยร้าวและเหล็กเกิดสนิม

รูปที่ 5 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างสะพานลอยที่ศึกษา

### 3.2 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

จากการวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของโครงสร้างสะพานลอยทั้งหมดที่ศึกษาในครั้งนี้ พบว่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมเฉลี่ยทั้ง 3 อำเภอ คือ ของอำเภอกำแพงแสน 55.73 มิลลิเมตร ของอำเภอเมืองนครปฐม 54.17 มิลลิเมตร และของอำเภอนครชัยศรี 49.75 มิลลิเมตร (ดังรูปที่ 3) ซึ่งมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ออกแบบ

มาตรฐานที่กำหนดไว้คือ 30 มิลลิเมตร [7] แสดงให้เห็นว่าการควบคุมคุณภาพการก่อสร้างของโครงการดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน โดยค่าการกระจายของระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมแสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งค่าการกระจายตัวดังกล่าวมีลักษณะเป็นแบบการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) ซึ่งข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปใช้เป็นตัวแทนข้อมูลที่ศึกษาต่อไปได้



รูปที่ 6 ค่าการกระจายตัวของระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

### 3.3 ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม

ในส่วนของปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ดังแสดงในตารางที่ 1 เป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้การพัฒนาคาร์บอนเนชันเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งการเกิดคาร์บอน

เนชันนั้นต้องอาศัยปัจจัยที่เหมาะสมของการทำปฏิกิริยาของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ โดยค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชันในระดับรุนแรงมีค่าเท่ากับ 400 ppm เป็นต้นไป [8] ในขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 40 ถึง 60 (ความชื้นสัมพัทธ์กึ่งชื้น

กึ่งแห้ง) จัดว่าเป็นสภาพแวดล้อมที่เสี่ยงต่อการเกิดคาร์บอนเนชันรุนแรงเช่นกัน [8] เมื่อปัจจัยทั้งสองด้านมีความเสี่ยงในระดับที่สูงย่อมทำให้การเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนเนชันสูงขึ้นตามลำดับ สำหรับภาพรวมของความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของโครงสร้างสะพานลอยทั้ง 3 อำเภอ พบว่ามีความเข้มข้นที่สูงในระดับหนึ่ง คือ 663 ถึง 683 ppm ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวมีภาวะความเสี่ยงต่อการเกิดระยะคาร์บอนเนชันที่ค่อนข้างชัดเจน ส่วนความชื้นสัมพัทธ์พบว่าบริเวณที่ตั้งสะพานลอยมีความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่างร้อยละ 43 ถึง 46 ซึ่งปริมาณร้อยละความชื้นสัมพัทธ์ดังกล่าวมีแนวโน้มอยู่ระหว่างกึ่งชื้นกึ่งแห้ง [8] ทำให้คอนกรีตเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความคงทนเกี่ยวกับคาร์บอนเนชันได้เร็วขึ้น เมื่อสองปัจจัยที่กล่าวมามีความเสี่ยงในระดับที่สูงย่อมส่งผลให้โครงสร้างสะพานลอยทั้ง 3 อำเภอ เกิดคาร์บอนเนชันในระดับที่สูงตามไปด้วย

### 3.4 ความลึกคาร์บอนเนชัน

สำหรับความลึกคาร์บอนเนชันเฉลี่ยของโครงสร้างสะพานลอยทั้ง 3 อำเภอ มีค่าการกระจายตัวของความลึกคาร์บอนเนชันแสดงดังตารางที่ 2 และรูปที่ 7 ซึ่งค่าการกระจายตัวดังกล่าวมีแนวโน้มเป็นแบบการแจกแจงแบบปกติ สามารถใช้เป็นตัวแทนข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ผลต่อไป โดย ความลึกคาร์บอนเนชันเฉลี่ยของโครงสร้างสะพานลอยในเขตอำเภอกำแพงแสนเท่ากับ 19.20 มิลลิเมตร ในเขตอำเภอเมืองนครปฐมเท่ากับ 31.40 มิลลิเมตร และในเขตอำเภอนครชัยศรีเท่ากับ 21.20 มิลลิเมตร โดยสะพานลอยที่มีสถานที่ตั้งอยู่ในเขตอำเภอเมืองนครปฐมมีแนวโน้มของความลึกคาร์บอนเนชันที่มากกว่าของสะพานลอยที่ตั้งอยู่ในเขตอำเภอนครชัยศรีและอำเภอกำแพงแสนตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจาก 1) สภาพอายุการใช้งานที่

แตกต่างกัน คือโครงสร้างสะพานลอยในเขตอำเภอเมืองนครปฐมมีแนวโน้มนำการก่อสร้างก่อน โครงสร้างสะพานลอยในเขตอำเภอนครชัยศรีและอำเภอกำแพงแสน 2) สภาพแวดล้อมที่ต่างกัน คือในเขตอำเภอเมืองนครปฐมมีสถานที่ตั้งติดกับศูนย์การค้า เป็นแหล่งชุมชนและมีอัตราการใช้น้ำในอัตราที่มากกว่าพื้นที่ชนบท ปริมาณการจราจรมาก ทำให้ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าในเขตอำเภอนครชัยศรีและอำเภอกำแพงแสน และ 3) คุณภาพของคอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้างของแต่ละพื้นที่อาจมีส่วนที่ต่างกัน

โดยสมการ Fick's first law of diffusion เมื่อทราบอายุของโครงสร้างและความลึกคาร์บอนเนชันสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชันได้จากสมการที่  $d = k\sqrt{t}$  โดยที่  $d$  คือค่าความลึกคาร์บอนเนชัน (มิลลิเมตร)  $t$  คือ อายุของโครงสร้าง (ปี) และ  $k$  คือค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชัน (มิลลิเมตร / ปี<sup>1/2</sup>)

จากผลการทดสอบโครงสร้างสะพานลอยสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชัน ( $k$ ) (ตารางที่ 2) พบว่าโครงสร้างสะพานลอยที่ตั้งอยู่ในเขตอำเภอเมืองนครปฐม มีค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันสูงกว่าโครงสร้างสะพานลอยที่ตั้งอยู่ในเขตอำเภอนครชัยศรีและในเขตอำเภอกำแพงแสน ตามลำดับ

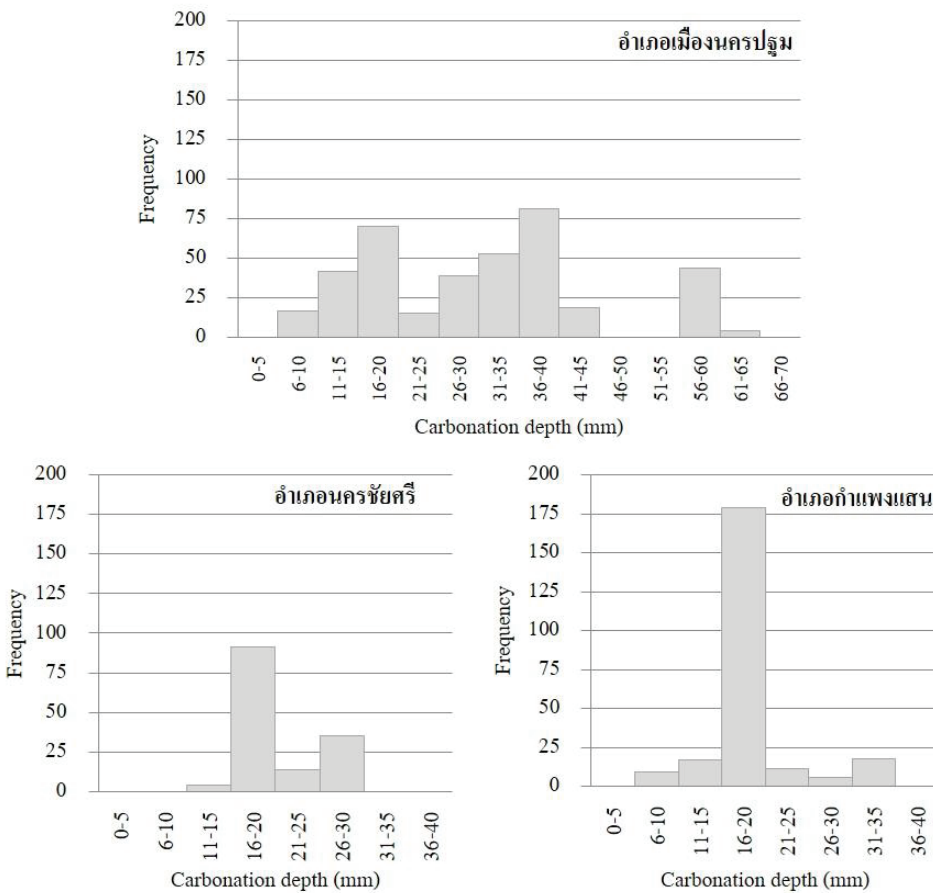
จากผลการศึกษาพบว่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความลึกคาร์บอนเนชันและสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชันของอำเภอเมืองนครปฐมสูงกว่าอำเภออื่น ๆ ทั้งนี้อาจเกิดจากคุณภาพคอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้างสะพานในเขตอำเภอเมืองนครปฐมอาจมีส่วนต่างกัน จึงส่งผลให้ค่าความลึกคาร์บอนเนชันกระจายตัวมากกว่าอำเภออื่น ๆ

**ตารางที่ 1** ปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ของสิ่งแวดล้อม

พื้นที่ที่ตรวจสอบ	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์		ความชื้นสัมพัทธ์	
	ความเข้มข้นเฉลี่ย (ppm)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ppm)	ปริมาณ (%)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (%)
อำเภอกำแพงแสน	663	10.84	44.36	6.90
อำเภอเมืองนครปฐม	683	8.25	43.18	8.76
อำเภอนครชัยศรี	681	8.28	45.29	11.31

**ตารางที่ 2** ความลึกคาร์บอนเนชัน และสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชัน

พื้นที่ที่ตรวจสอบ	ความลึกคาร์บอนเนชัน		สัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชัน (k)		ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม	
	เฉลี่ย (มม.)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (มม.)	เฉลี่ย (มม./ปี <sup>1/2</sup> )	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (มม./ปี <sup>1/2</sup> )	เฉลี่ย (มม.)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (มม.)
อำเภอกำแพงแสน	19.20	5.00	4.93	1.28	55.73	10.74
อำเภอเมืองนครปฐม	31.40	14.71	8.39	4.10	54.17	12.14
อำเภอนครชัยศรี	21.20	4.72	5.04	1.09	49.75	6.76



**รูปที่ 7** ค่าการกระจายตัวของระยะคาร์บอนเนชัน

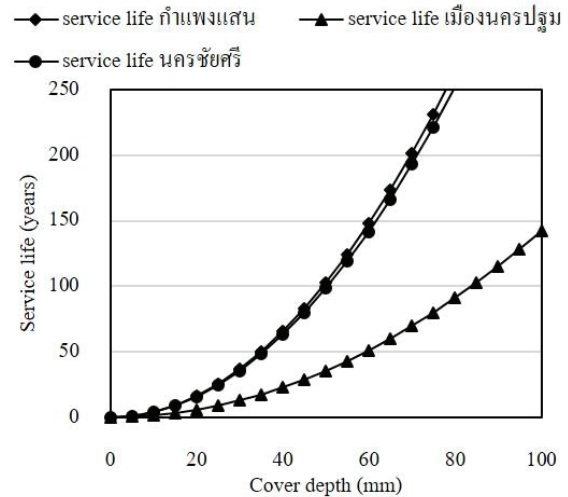


### 3.5 การทำนายอายุโครงสร้างสะพานลอยตามสมการ Fick's first law of diffusion

#### 3.5.1 ผลจากระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

เมื่อพิจารณาโครงสร้างสะพานลอยที่สัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่สูง โครงสร้างเหล่านี้มีความเสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนเนชันในอัตราที่สูง ซึ่งปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงและส่งผลให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้เร็วที่สุด จนทำให้โครงสร้างเกิดความวิบัติขึ้นตามมา ดังนั้นการวางแผนเพื่อจะให้โครงสร้างสะพานลอยมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นจึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยจากรูปที่ 8 ได้แสดงกราฟทำนายอายุการใช้งานของสะพานลอยที่แปรผันตามระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมโดยใช้สมการ Fick's first law of diffusion คือ  $d = k\sqrt{t}$  พบว่าที่ระยะหุ้มเหล็กเสริมเท่ากัน จะทำให้อายุการใช้งาน โครงสร้างสะพานลอยอำเภอเมืองนครปฐมน้อยกว่าของอำเภอนครชัยศรีและอำเภอกำแพงแสนตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่น อายุของโครงสร้างสะพาน สภาพแวดล้อม บริเวณที่ตั้งสะพาน และคุณภาพคอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้าง เป็นต้น

จากรูปที่ 8 สามารถทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างสะพานลอยที่ตั้งในเขตแต่ละอำเภอได้ กล่าวคือ จากผลการศึกษาได้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมเฉลี่ยของโครงสร้างสะพานลอยที่ตั้งในเขตอำเภอมืองนครปฐมเท่ากับ 54.17 มิลลิเมตร ในเขตอำเภอนครชัยศรี เท่ากับ 49.75 มิลลิเมตร และในเขตอำเภอกำแพงแสน เท่ากับ 55.73 มิลลิเมตร ส่งผลให้ได้อายุการใช้งานของสะพานลอยอยู่ที่ 42 ปี 97 ปี และ 128 ปี ตามลำดับ

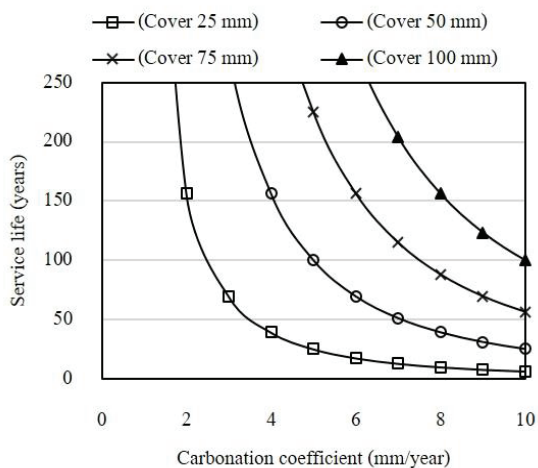


รูปที่ 8 อายุการใช้งานของสะพานลอยที่แปรผันตามระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมอ้างอิงสมการ Fick's first law of diffusion

#### 3.5.2 ผลจากสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชัน

จากค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชัน (ตารางที่ 2) สามารถทำนายอายุการใช้งานของสะพานลอยที่แปรผันตามสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชัน โดยใช้สมการ Fick's first law of diffusion คือ  $d = k\sqrt{t}$  ได้ดังรูปที่ 9 โดยในรูปดังกล่าวได้เสนอแนวคิดให้โครงสร้างสะพานลอยมีการออกแบบให้ระยะหุ้มเหล็กเสริมของโครงสร้างเท่ากับ 25 50 75 และ 100 มิลลิเมตร พบว่าโครงสร้างที่มีค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันน้อยทำให้อายุการใช้งานของโครงสร้างสะพานลอยมีมากกว่าของโครงสร้างที่มีค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันมาก ในขณะที่เดียวกันที่สัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันเท่ากัน พบว่าโครงสร้างสะพานลอยที่มีระยะหุ้มเหล็กเสริมมากกว่าจะมีอายุการใช้งานที่มากกว่า





รูปที่ 9 อายุการใช้งานของสะพานลอยที่แปรผันตามสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันอ้างอิงสมการ Fick's first law of diffusion

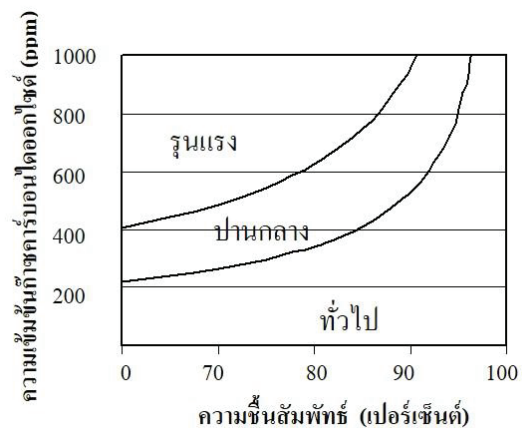
### 3.6 การทำนายอายุโครงสร้างสะพานลอยตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.)

เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ต้องเผชิญกับการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนเนชัน จึงจำเป็นที่จะต้องหาวิธีการเพื่อให้โครงสร้างคอนกรีตมีความคงทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันและมีอายุการใช้งานที่ปลอดภัยซ่อมแซมตามที่กำหนด ต้องควบคุมให้ระยะคาร์บอนเนชันในช่วงอายุการใช้งานที่ปลอดภัยซ่อมแซมมีค่าไม่มากกว่าระยะหุ้มเหล็กเสริม ซึ่งมาตรฐานการออกแบบของกรมโยธาธิการและผังเมืองก็เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถใช้ในการออกแบบได้ [8] โดยใช้สมการ  $X_c = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k \sqrt{t}$  โดยที่  $X_c$  คือ ความลึกคาร์บอนเนชัน (มิลลิเมตร) วัดจากผิวคอนกรีตที่เผชิญกับสภาพแวดล้อม ณ อายุคอนกรีตที่ออกแบบ  $\alpha_1$  คือสัมประสิทธิ์การสัมผัสความเปื่อยขึ้น โดยเท่ากับ 1.00 สำหรับผิวคอนกรีตที่ไม่สัมผัสความเปื่อยขึ้น และ 0.95 สำหรับผิวคอนกรีตที่สัมผัสความเปื่อยขึ้น ส่วน  $\alpha_2$  คือสัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชันพิจารณาได้จากตารางที่ 3 และ  $t$  คืออายุของโครงสร้าง (ปี)

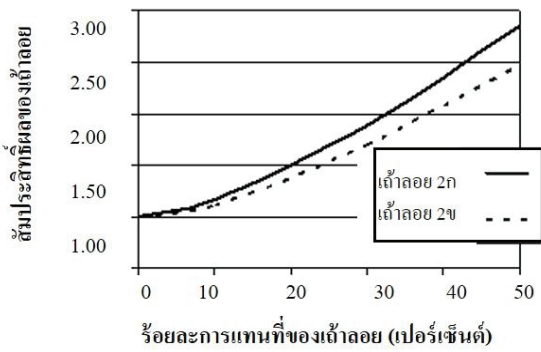
ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชันสามารถกำหนดได้โดยใช้รูปที่ 10 โดยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของบริเวณสถานที่ที่จะทำการก่อสร้างในช่วงอายุการใช้งาน ซึ่งอาจต้องคาดการณ์ล่วงหน้าไปในอนาคต และ  $k$  คือสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชัน ดังสมการ  $k = 17.5 \cdot k_r \cdot (w/b)^3$  เมื่อ  $w/b$  คืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดย  $k_r$  คือค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสาน (ชนิดของเถ้าลอย 2ก และ 2ข กำหนดตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545 หรือ วสท. 1014-46) แสดงดังรูปที่ 11

ตารางที่ 3 สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชัน [8]

ความรุนแรงของสภาพแวดล้อม	$\alpha_2$
สภาวะทั่วไป	0.65
เสี่ยงต่อคาร์บอนเนชันปานกลาง	0.85
เสี่ยงต่อคาร์บอนเนชันรุนแรง	1.00



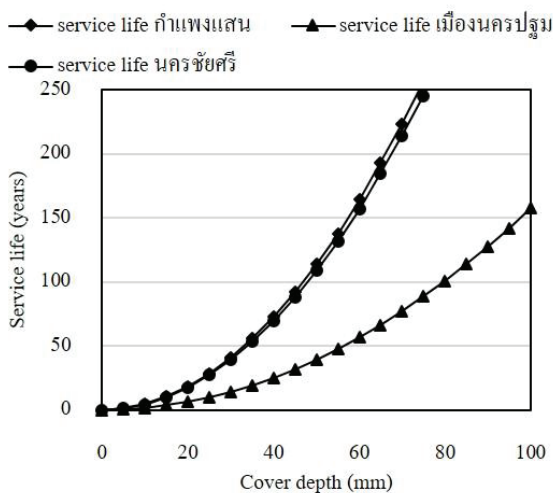
รูปที่ 10 การแบ่งระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชัน [8]



รูปที่ 11 ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสาน [8]

### 3.6.1 ผลจากระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

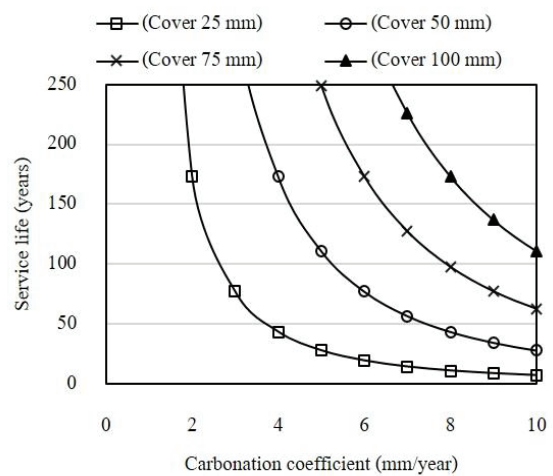
ผลจากการทำนายอายุที่แปรผันตามระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมตามมาตรฐาน มยผ. ดังแสดงในรูปที่ 12 ซึ่งมีอายุการใช้งานไปในทิศทางเดียวกันกับสมการ Fick's first law of diffusion กล่าวคือ จากผลการศึกษาได้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมเฉลี่ยของโครงสร้างสะพานลอยที่ตั้งในเขตอำเภอเมืองนครปฐม เท่ากับ 54.17 มิลลิเมตร ในเขตอำเภอนครชัยศรี เท่ากับ 49.75 มิลลิเมตร และในเขตอำเภอกำแพงแสน เท่ากับ 55.73 มิลลิเมตร ส่งผลให้อายุการใช้งานของสะพานลอยอยู่ที่ 46 ปี 108 ปี และ 142 ปี ตามลำดับ



รูปที่ 12 อายุการใช้งานของสะพานลอยที่แปรผันตามระยะหุ้มเหล็กอ้างอิงมาตรฐาน มยผ.

### 3.6.2 ผลจากสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชัน

จากผลสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชัน (ตารางที่ 2) สามารถทำนายอายุการใช้งานของสะพานลอยที่แปรผันตามสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชัน โดยใช้มาตรฐาน มยผ. ได้เช่นกัน ดังรูปที่ 13 โดยในรูปดังกล่าวได้เสนอแนวคิดให้ออกแบบโครงสร้างคอนกรีตที่มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมเท่ากับ 25 50 75 และ 100 มิลลิเมตร เหมือนกับวิธีของสมการ Fick's first law of diffusion ซึ่งสามารถทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างได้



รูปที่ 13 อายุการใช้งานของสะพานลอยที่แปรผันตามสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันอ้างอิงมาตรฐาน มยผ.

จากการทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างสะพานลอยที่ตั้งในเขตจังหวัดนครปฐม ตามสมการ Fick's first law of diffusion และตามมาตรฐาน มยผ. โดยการใช้ระยะหุ้มเหล็กเสริม และค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันเป็นตัวแปรในการวิเคราะห์เพื่อทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างสะพานลอย สามารถนำไปใช้ในการวางแผนออกแบบ บำรุงรักษา โครงสร้างสะพานลอยที่ตั้งในเขตจังหวัดนครปฐมที่ต้องเผชิญกับสภาวะแวดล้อมคาร์บอนเนชัน ตลอดจนป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้

#### 4. สรุป

จากผลการศึกษาวิจัยครั้งนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมของสะพานลอยทั้ง 3 อำเภอ มีความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยเท่ากับ 663 ถึง 683 ppm และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 43.18 ถึง 45.29 ซึ่งจัดอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนในในระดับรุนแรง

2) ความลึกคาร์บอนในชั้นเนื้อของโครงสร้างสะพานลอยที่ตั้งในเขตทั้ง 3 อำเภอ มีค่าอยู่ระหว่าง 19.20 ถึง 31.40 มิลลิเมตร ส่วนสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนในชั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 4.93 ถึง 8.39 มิลลิเมตร/ปี<sup>1/2</sup>

3) อัตราการเกิดความลึกคาร์บอนในชั้นของโครงสร้างสะพานลอยที่มีตำแหน่งที่ตั้งในเขตอำเภอเมืองนครปฐมมีแนวโน้มสูงกว่าของโครงสร้างสะพานลอยที่ตั้งอยู่ในเขตอำเภอนครชัยศรีและกำแพงแสนตามลำดับ

4) ตามสมการ Fick's first law of diffusion และมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง สามารถทำนายและคำนวณอายุการใช้งานของโครงสร้างที่สัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ คือ โครงสร้างสะพานลอยในอำเภอเมืองนครปฐมมีอายุการใช้งานอยู่ที่ 42 และ 46 ปี ในเขตอำเภอนครชัยศรีมีอายุการใช้งานอยู่ที่ 97 และ 108 ปี และในเขตอำเภอกำแพงแสนมีอายุการใช้งานอยู่ที่ 128 และ 142 ปีตามลำดับ โดยผลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบวางแผนดูแลบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญกับสภาวะแวดล้อมคาร์บอนในชั้นตลอดจนป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Alexander, M. G., Mackechnie, J. R. and Yam, W. Carbonation of Concrete Bridge Structures in Three South African Localities. *Cement & Concrete Composites*, 2007; 29: 750-759.
- [2] Roy, S. K., Poh, K. B. and Northwood, D. O. Durability of Concrete Accelerated Carbonation and Weathering Studies. *Building and Environment*, 1998; 34: 597-606.
- [3] Castro, P., Moreno, E. I. and Genesca, J. Influence of Marine Micro-Climates on Carbonation of Reinforced Concrete Buildings. *Cement and Concrete Research*, 2000; 30: 1565- 1571.
- [4] Khunthongkeaw, J., Tangtermsirikul, S. and Leelawat, T. A Study on Carbonation Depth Prediction for Fly Ash Concrete. *Construction and Building Materials*, 2006; 20: 744-753.
- [5] Fattuhi, N. I. Carbonation of Concrete as Affected by Mix Constituents and Initial Water Curing Period. *Materials and Structures*, 1986; 19: 131-136.
- [6] มาตรฐาน มยผ. 1501-51 ถึง มยผ. 1507-51. มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย. กรมโยธาธิการและผังเมือง.
- [7] Standard drawings. Kingdom of Thailand ministry of transport and communications department of highways, 1994.
- [8] มาตรฐาน มยผ. 1332 – 55. มาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน. กรมโยธาธิการและผังเมือง.

# การประเมินกำลังต้านทานแผ่นดินไหวของผนัง อิฐบล็อกประสานมวลเบาในโครงคอนกรีตเสริมเหล็ก

## Evaluation of Seismic Capacity on Interlocking Light Weight Masonry Wall in R/C Frame

อนุชาติ ลีอนันต์ศักดิ์ศิริ\* และ วรวิทย์ โปธิจันทร์

Anuchat Leeanansaksiri<sup>1</sup> and Worawit Phojan<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดขอนแก่น 40000

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, North Eastern University,  
 Muang Khonkaen ,40000, Thailand

\*E-mail:<sup>1</sup> anuchat.lee@neu.ac.th, <sup>2</sup>worawit.pho@neu.ac.th

Telephone Number: 0885089985

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรม โครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐบล็อกประสานมวลเบา ภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร โดยอาคารต้นแบบได้ทำการเลือกอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 3 ชั้นที่ไม่ได้มีการออกแบบให้รับแรงต้านทานแผ่นดินไหว สำหรับการประเมินกำลังภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร 3 ตัวอย่าง คือ โครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีผนังอิฐก่อ (BF) โครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐบล็อกประสานมวลเบาจากดินเบา (W1) และโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐบล็อกประสานมวลเบาจากเถ้าขานอ้อย (W2) การประเมินกำลังแบบวัฏจักรของผนังอิฐก่อภายในโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก 3 ลักษณะได้แก่ กำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวทแยง กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบเลื่อนไถล และกำลังต้านทานแรงกดอัดที่มุมผนัง จากการศึกษาพบว่าผนังก่อด้วยอิฐบล็อกประสานมวลเบาทำให้ความสามารถในการรับกำลังต้านทานแผ่นดินไหวของโครงคอนกรีตเสริมเหล็กเพิ่มมากขึ้นกว่าโครงคอนกรีตเสริมเหล็กเปล่าที่ไม่มีผนังก่อ การวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบวัฏจักรด้วยโปรแกรม RUAUMOKO พบว่าการประเมินกำลังแบบวัฏจักรของผนังอิฐก่อภายในโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก 3 ลักษณะเป็นการวิบัติจากกำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวทแยง และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์จากการสร้างแบบจำลองตัวอย่างโครงคอนกรีตเสริมเหล็ก W1 และ W2 ให้กำลังต้านทานแผ่นดินไหวที่ได้มีความใกล้เคียงกับการประเมินกำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวทแยง

**คำสำคัญ:** อิฐบล็อกประสาน ผนังอิฐก่อ กำลังต้านทานแผ่นดินไหว แรงกระทำแบบวัฏจักร

### ABSTRACT

The objective of this research was to investigate the behavior of interlocking lightweight infilled masonry wall in reinforced concrete frame under cyclic loading. In this study, a prototype frame was chosen from a three-story reinforced concrete building that was not designed for seismic load. The evaluation of three samples .ie., the reinforced concrete bare frame (BF), the frame with interlocking lightweight infilled masonry wall which block made from diatomite (W1) and the frame with interlocking lightweight infilled masonry wall which block made from bagasse ash (W2).

The evaluation of masonry infilled frame under cyclic loading of three types are diagonal compression resistance, sliding shear resistance and upper corner compression resistance. It was found that, the masonry infilled by interlocking lightweight cement block exhibited the higher seismic capacity than the reinforced concrete bare frame. An analytical model was under cyclic loading by the use of program, RUAUMOKO. The result revealed that, the evaluation of masonry infilled frame under cyclic loading of three types was failure for diagonal compression resistance and comparison of the samples of reinforced concrete frame W1 and W2 enhanced the seismic capacity similar on the evaluation for diagonal compression resistance.

**Keywords:** interlocking, masonry wall, seismic sapacity, cyclic loading

## 1. บทนำ

แม้ว่าในปัจจุบันนี้ ได้มีกฎหมายควบคุมอาคาร ตามประกาศกฎกระทรวงฉบับ พ.ศ. 2550 กำหนดพื้นที่ ภาคเหนือ ภาคตะวันตก รวมทั้งกรุงเทพมหานครและ ปริมณฑล เป็นเขตพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว อาคารที่จะ ปลูกสร้างใหม่จะต้องมีการออกแบบให้สามารถต้านทาน แผ่นดินไหวได้ แต่เนื่องจากอาคารในเขตพื้นที่ดังกล่าว ส่วนใหญ่ไม่ได้มีการออกแบบให้สามารถต้านทานแรง แผ่นดินไหวได้ อาคารเหล่านี้จึงมีความเสี่ยงต่อภัยพิบัติ เนื่องจากแรงแผ่นดินไหวได้ ดังนั้น การเสริมกำลัง โครงสร้างอาคารที่มีอยู่เดิมจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง ทั้งนี้ เพื่อจะได้ป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับอาคาร เหล่านี้ต่อไป

จากผลการวิจัยที่ผ่านมา Gates [1], Sugano [2] ซึ่งได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการเสริมกำลังโครงสร้าง อาคารในด้านเทคนิค ได้แก่ ค่ากำลัง ค่าสติเฟนส ค่าความ เหนียว ตลอดจนวิธีการทำงานและราคาค่าก่อสร้าง นำมา ประมวลผลได้ว่า การใช้ผนังกำแพงเสริมกำลังโดยรวม ของอาคารเหมาะสำหรับ โครงสร้างอาคารขนาดเล็ก เนื่องจากผลของผนังอิฐก่อในโครงคอนกรีตเสริมเหล็ก เปรียบเสมือนการค้ำยันต่อโครงอาคารทำให้โครงอาคารมี กำลังต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างได้เพิ่มขึ้น ดังนั้น ในการศึกษานี้ จึงนำวิธีการเสริมกำลังในผนังอิฐมาศึกษา พฤติกรรมการรับแรงแผ่นดินไหว เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ เสริมกำลังต้านทานแผ่นดินไหวสำหรับอาคารที่มีอยู่เป็น จำนวนมากในประเทศไทยและมีความสำคัญต่อสาธารณะ

นอกจากนี้งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาของผนัง อิฐมอญในโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วย

ตะแกรงเหล็กฉีก [3] รวมถึงเทคนิคการเสริมกำลังให้กับ ผนังอิฐก่อเพื่อช่วยให้ความสามารถของผนังอิฐก่อมีกำลัง และค่าสติเฟนสของโครงสร้างที่ดีขึ้น ได้มีเทคนิคการ เสริมกำลังผนังอิฐก่อหลายรูปแบบเพื่อช่วยในการรับแรง แผ่นดินไหว เช่น การใช้เทคนิคการเสริมกำลังโดยใช้แผ่น วัสดุคาร์บอนไฟเบอร์ [4-6] การใช้เทคนิคการเสริมกำลัง โดยใช้แผ่นวัสดุไฟเบอร์ [7-8] เทคนิคการเสริมกำลังโดย ใช้แผ่นเหล็ก [9] เทคนิคการใช้เหล็กเสริมในผนังอิฐก่อ [10] การใช้วัสดุแบบทอ [11] รวมถึงการใช้เหล็กตะแกรง โดยมีมวลรวมละเอียดเป็นตัวเชื่อมระหว่างโครงสร้างกับ วัสดุ [12] การเสริมกำลังวัสดุคอมโพสิตผสมซีเมนต์ [13] และการใช้วัสดุเสริมเหล็กพันด้วยวิธีช็อคกรีตกำลัง สูงให้กับผนังอิฐก่อ [14] ซึ่งแต่ละเทคนิคทำให้กำลังของ ผนังอิฐก่อที่ได้รับการเสริมกำลังรับแรง ค่าสติเฟนส มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นทุกวิธีการ

ดังนั้น ในการวิจัยจึงได้ศึกษากำลังต้านทาน แผ่นดินไหวของผนังอิฐบล็อกประสานมวลเบาจากเถ้า ชานอ้อยและดินเบาในโครงคอนกรีตเสริมเหล็ก

## 2. วิธีดำเนินการศึกษา

สำหรับขั้นตอนดำเนินการศึกษาในงานวิจัยได้แบ่ง ขั้นตอนศึกษาออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

### 2.1 ขั้นตอนการหาส่วนผสมที่เหมาะสมในการทำ อิฐบล็อกประสานมวลเบาจากดินตะกอนประปาผสม วัสดุพอซโซลาน

ในการทำอิฐบล็อกประสานมวลเบาได้แทนซีเมนต์ ด้วยดินตะกอนประปา ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 ของมวลปูนซีเมนต์ โดยน้ำที่ใช้



ในส่วนผสมมีค่าเท่ากับปริมาณที่ทำให้ความเหลวที่มอร์ตาร์มีการไหลแผ่  $110 \pm 5$  วิธีการผสมทำตามมาตรฐาน ASTM C305-14 [15] วิธีทดสอบค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ การหล่อ และวิธีการทำ ตามมาตรฐาน ASTM C349-18 [16] เมื่อได้อัตราส่วนของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินตะกอนประปาที่เหมาะสมได้นำดินเบา เถ้าขานอ้อย และเถ้าแกลบ แทนที่ในส่วนของดินตะกอนประปาเพื่อให้อิฐบล็อกประสานมีมวลที่เบาขึ้นโดยใช้อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 ของดินตะกอนประปา โดยเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสม พิจารณาจากกำลังรับแรงอัดที่ผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนและมวลเป็นเกณฑ์

**2.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปอิฐบล็อกประสานมวลเบา**

สำหรับขั้นตอนนี้ได้นำส่วนผสมที่เหมาะสมมาขึ้นรูปอิฐบล็อกประสานมวลเบาโดยมีรูปแบบของอิฐบล็อกประสานดังรูปแสดงในที่ 1 ซึ่งมีขนาด  $12.5 \times 25 \times 10$  cm และได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐตามมาตรฐาน ASTM C170-17 [17] และทดสอบกำลังรับแรงอัดปริซึมของอิฐก่อนตามมาตรฐาน ASTM C1314-18 [18]

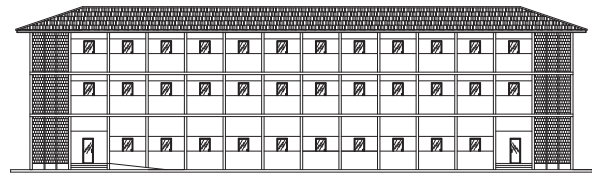


รูปที่ 1 รูปแบบอิฐบล็อกประสาน

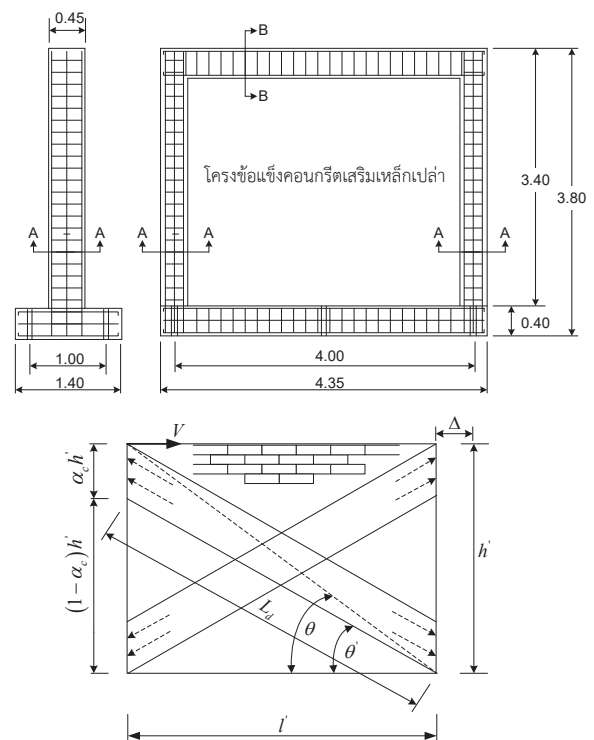
**2.3 ขั้นตอนการประเมินกำลังผนังอิฐบล็อกประสานในโครงคอนกรีตเสริมเหล็ก**

2.3.1 อาคารในศึกษานี้เป็นอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กในสังกัดกระทรวงศึกษาธิการสูง 3 ชั้น ที่ไม่ได้ออกแบบเพื่อด้านทานแรงแผ่นดินไหวดังแสดงในรูปที่ 2 สำหรับการสร้างโครงข้อแข็งต้นแบบคอนกรีตเสริมเหล็กในการประเมินกำลังต้านทานแผ่นดินไหว ได้แสดง

ในรูปที่ 3 ซึ่งโครงข้อแข็งมีขนาดความกว้าง 4.35 เมตร และความสูง 3.8 เมตร เสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีขนาดหน้าตัดเท่ากับ  $0.35 \times 0.45$  เมตร มีอัตราส่วนของการเสริมเหล็ก  $\rho_g$  เท่ากับ 2.49% ( $\rho_g$  คืออัตราส่วนของพื้นที่เหล็กเสริมต่อพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต) คานคอนกรีตเสริมเหล็กมีขนาดหน้าตัดเท่ากับ  $0.20 \times 0.40$  เมตร อัตราส่วนของการเสริมเหล็ก  $\rho_t$  เหล็กบนเท่ากับ 0.44% และเหล็กล่างเท่ากับ 0.66%



รูปที่ 2 อาคารเรียนที่ใช้ในการศึกษา [3]

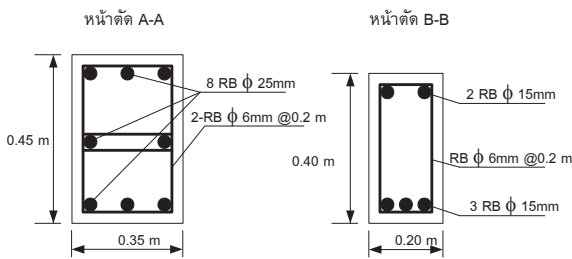


รูปที่ 3 โครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก [3]

สำหรับตัวอย่างโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีผนังอิฐก่อ จะมีลักษณะของเสาแข็งแรงและคานอ่อน (strong column and weak beam) โดยมีรายละเอียด



ของการเสริมเหล็กดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งโครงข้อแข็งไม่สามารถรับกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้ เนื่องจากเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีระยะของเหล็กปลอกที่ห่างจนเกินไปรวมถึงการที่ไม่ทำการตัดงอเหล็กปลอกให้ เป็นไปตามมาตรฐานและหน้าตัดคานเมื่อเทียบกับเสา มีขนาดเล็ก สำหรับกำลังรับแรงอัดของ โครงคอนกรีตเสริมเหล็ก  $f'_c$  เท่ากับ 21 Mpa และมีกำลังรับแรงดึงของเหล็ก  $f_y$  ของเหล็กเส้นกลมขนาด 25, 15 และ 6 มิลลิเมตร เท่ากับ 274, 246 และ 237 Mpa ตามลำดับ



รูปที่ 4 หน้าตัดของการเสริมเหล็กของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก [3]

2.3.2 การประเมินกำลังรับแรงดันทันข้างจะใช้ทฤษฎีการวิบัติของผนังอิฐก่อภายใน โครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก 3 ลักษณะ แรงค้ำยันที่ใช้ได้แก่ กำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวทแยง (Diagonal Compression Resistance) กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบเลื่อนไถล (Sliding Shear Resistance) และกำลังต้านทานแรงกดอัดที่มุมผนัง (Corner Compression Resistance)

2.3.3 การสร้างแบบจำลองผนังอิฐบล็อกประสานในโครงคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร โดยใช้โปรแกรม RUAUMOKO [19]

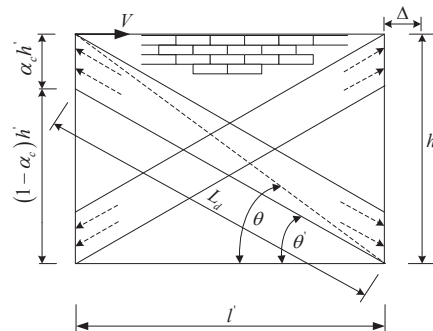
### 3. ทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษา

#### 3.1 แบบจำลองแรงค้ำยันที่ต้านทานแรงกดอัดผนังอิฐก่อในโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก

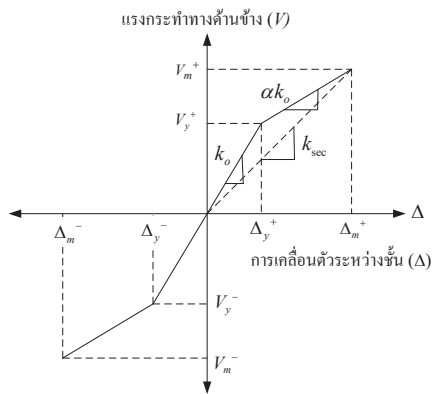
การสร้างแบบจำลองได้แรงค้ำยันแนวทแยงเทียบเท่า (Equivalent Strut) ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งเป็นการรวม

แรงดันทันข้างระหว่างผนังอิฐก่อกับ โครงข้อแข็งเปล่า โดยการวิเคราะห์กำลังต้านทานรวมจะแยกกำลังต้านทานออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนแรกกำลังต้านทานที่ได้จากการประเมินกำลังแบบวัฏจักรของผนังอิฐก่อภายใน โครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก 3 ลักษณะ ได้แก่ กำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวทแยง กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบเลื่อนไถล และกำลังต้านทานแรงกดอัดที่มุมผนัง ส่วนที่ 2 เป็นการประเมินกำลังต้านทานของโครงข้อแข็งเปล่า เมื่อได้กำลังต้านทานทั้ง 2 นำมารวมกันเพื่อเป็นกำลังต้านทานรวมที่เกิดจากกำลังต้านทานของผนังอิฐก่อและกำลังต้านทานของ โครงคอนกรีตเสริมเหล็กเปล่า

สำหรับการสร้างแบบจำลองของแรงดันทันข้างและการเคลื่อนตัวระหว่างชั้น ดังแสดงในรูปที่ 6 จำเป็นต้องหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อเป็นพื้นฐานในการสร้างแบบจำลองซึ่งประกอบด้วย ค่าสติเฟนสในช่วงแรก (initial stiffness)  $k_o$  แรงเฉือนที่จุดคราก  $V_y$  และค่าการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นที่จุดคราก  $\Delta_y$  แต่เมื่อผ่านจุดครากจะทำให้เกิดแรงเฉือนสูงสุด  $V_m$  และค่าการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นสูงสุด  $\Delta_m$  ซึ่งเป็นช่วงที่ทำให้เกิดค่าสติเฟนสหลังจุดคราก (post-yield stiffness)  $\alpha k_o$



รูปที่ 5 โมเดลจำลองแรงค้ำยันแนวทแยงเทียบเท่า



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์แรงดันทั้ง และการเคลื่อนตัวระหว่างชั้น

การสร้างแบบจำลองในการศึกษานี้ได้ใช้ค่ากำลังรับแรงอัดปรีซึมของอิฐก่อที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (stress-strain) ซึ่งเป็นการนำค่าที่ได้จากความสัมพันธ์ดังกล่าวมาใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ในรูปที่ 6 โดยแทนค่าในสมการที่เสนอโดย Saneinejad [20] ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานก่อนการสร้างแบบจำลองให้กับผนังอิฐก่อในโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยกำลังรับแรงอัดปรีซึมของอิฐก่อและค่าความเครียดจะใช้ในการคำนวณค่า  $V_y$ ,  $V_m$ ,  $\Delta_y$  และ  $\Delta_m$  ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ในการสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางดันทั้งและการเคลื่อนตัวระหว่างชั้น

สำหรับกรณีของการวิบัติที่เกิดจากการวิบัติแบบแรงกดอัดในแนวทแยง สามารถหาค่าแรงเฉือนที่จุดคราก  $V_y$  โดยการประยุกต์สมการที่เสนอโดย Saneinejad [20] มาใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์จากสมการที่ (1)

$$V_y = R_t = 2\sqrt{2}th'f_t \cos \theta \quad (1)$$

เมื่อ  $f_t = 0.25\phi\sqrt{f_m'}$  (MPa),  $\phi = 0.65$  (กรณีผนังก่ออิฐที่เกิดจากแรงในแนวค้ำยันเทียบเท่าแนะนำโดย Saneinejad [20]),  $R_t$  คือกำลังรับแรงเฉือนแตกร้าวในแนวทแยง,  $t$  คือ ความหนาของผนังอิฐ

ก่อ,  $h'$  คือ ความสูงของผนังอิฐก่อ และ  $f_m'$  คือกำลังรับแรงอัดปรีซึมของอิฐก่อ

สำหรับค่าแรงเฉือนสูงสุดของผนังอิฐก่อ  $V_m$  สามารถคำนวณได้โดยใช้ความสัมพันธ์ของแรงอัดในแนวทแยงเทียบเท่าดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์จากสมการที่ (2)

$$V_m = R_{DC} = \frac{0.5h'tf_a}{\cos \theta} \quad (2)$$

เมื่อ  $f_a = 0.6\phi f_m'$ ,  $\phi = 0.65$ , และ  $\theta$  คือ มุมในแนวทแยงของผนังอิฐก่อ

สำหรับกรณีของการวิบัติที่เกิดจากการวิบัติแบบกำลังต้านทานแรงเฉือนแบบเลื่อนไถล (Sliding Shear Resistance) เนื่องจากแรงเฉือนในผนังอิฐก่อที่สูง ดังนั้นจึงส่งผลให้เกิดการเลื่อนไถลของผนังอิฐก่อ สามารถคำนวณแรงเฉือนสูงสุดในผนังอิฐก่อ  $V_m$  ได้จากสมการที่ (3)

$$V_m = R_{ss} = \frac{\gamma v t l'}{1 - 0.45 \tan \theta} \quad (3)$$

เมื่อ  $\gamma$  คือ ตัวคูณสำหรับกำลังแรงเฉือนประลัย,  $v$  คือ กำลังแรงเฉือนของผนังอิฐ

สำหรับกรณีของการวิบัติที่เกิดจากการวิบัติแบบกำลังต้านทานแรงกดอัดที่มุมผนัง (Corner Compression Resistance) เนื่องจากแรงกดอัดที่มุมผนังอิฐก่อที่สูง ดังนั้นจึงส่งผลให้เกิดการกดอัดด้วยหน่วยแรงเข้าสู่มุมของผนังอิฐก่อที่สูง สามารถคำนวณแรงเฉือนสูงสุดในผนังอิฐก่อ  $V_m$  ได้จากสมการที่ (4)

$$V_m = R_{cc} = \frac{(1 - \alpha_c)\alpha_c th\sigma_c + \alpha_b t l \tau_b}{\cos \theta} \quad (4)$$

เมื่อ ค่าพารามิเตอร์ในสมการที่ 3 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.1) – (4.5)

$$\alpha_c = \frac{1}{h} \sqrt{\frac{2M_{pj} + 2\beta_c M_{pc}}{\sigma_c t}} \quad (4.1)$$

$$\alpha_b = \frac{1}{l} \sqrt{\frac{2M_{pj} + 2\beta_b M_{pb}}{\sigma_b t}} \quad (4.2)$$

$$\sigma_c = \frac{f'_m}{\sqrt{1+3\mu^2 r^4}} \quad (4.3)$$

$$\sigma_b = \frac{f'_m}{\sqrt{1+3\mu^2}} \quad (4.4)$$

$$\tau_b = \mu\sigma_b \quad (4.5)$$

$M_{pj}$  คือ ค่าพลาสติกโมเมนต์ต่ำกว่าระหว่าง  $M_{pc}$  และ  $M_{pb}$  โดยที่  $M_{pc}$ ,  $M_{pb}$  คือ ค่าพลาสติกโมเมนต์ของเสาและคานตามลำดับ,  $\mu$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของโครงข้อแข็งและหน้าสัมผัสของผนังอิฐก่อ,  $r$  คืออัตราส่วนของโครงข้อแข็ง ( $r = h/l$ ),  $\beta_c, \beta_b$  คือ ค่าแฟกเตอร์ตัวคูณลดกำลังของเสาและคานตามลำดับ ซึ่ง Saneinejad [20] แนะนำให้ใช้ที่ 0.2, ค่าพารามิเตอร์  $h, l$  คือ ระยะเส้นผ่านศูนย์กลางถึงเส้นผ่านศูนย์กลางของความสูงและความยาวของโครงข้อแข็งตามลำดับ

สำหรับกรณีที่เกิดแรงกระทำด้านข้างสูงสุดเนื่องจากการวิบัติแบบกำลังต้านทานแรงกดอัดที่มุมผนัง (Corner Compression Resistance) เป็นตัวควบคุมการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ การหาค่ากำลังรับแรงที่จุดครากที่เกิดจากกำลังต้านทานแรงกดอัดที่มุมผนัง สามารถนำสมการที่ (4) มาประยุกต์โดยใช้ค่ากำลังรับแรงอัดปริซึมของอิฐก่อในช่วงจุดครากแทนในสมการ ซึ่งทำให้ได้สมการใหม่ดังแสดงในสมการที่ (5)

$$V_y = R_{ycc} = \frac{(1-\alpha_c)\alpha_c t h \sigma_{yc} + \alpha_b t l \tau_{yb}}{\cos \theta} \quad (5)$$

เมื่อ ค่าพารามิเตอร์ในสมการที่ (5) คำนวณได้จากสมการที่ (5.1) – (5.3)

$$\sigma_{yc} = \frac{f_{ym}}{\sqrt{1+3\mu^2 r^4}} \quad (5.1)$$

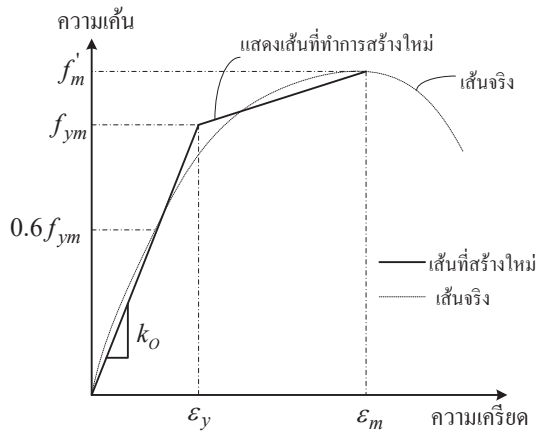
$$\tau_{yb} = \mu\sigma_{yb} \quad (5.2)$$

$$\sigma_{yb} = \frac{f_{ym}}{\sqrt{1+3\mu^2}} \quad (5.3)$$

ค่าพารามิเตอร์  $\sigma_{yc}$  คือ หน่วยแรงสัมผัสตั้งฉากที่จุดครากของหน่วยแรงกดอัดที่มุมของเสา,  $\sigma_{yb}$  และ  $\tau_{yb}$  คือ หน่วยแรงสัมผัสตั้งฉากที่จุดครากของแรงกดอัดที่คานและหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในหน้าตัดของคานตามลำดับ

ค่าพารามิเตอร์  $f_{ym}$  คือ กำลังที่จุดครากปริซึมของอิฐก่อ ซึ่งในการหาค่า  $f_{ym}$  หาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับค่าความเครียดที่ได้จากการทดสอบสมบัติกำลังรับแรงอัดปริซึมของอิฐก่อในห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในรูปที่ 7 สำหรับการหาความสัมพันธ์ของจุดครากที่เกิดขึ้นในช่วงเส้นโค้งของกราฟ หาโดยวิธีการหาแนวเส้นตรงสัมผัสกับแนวเส้นโค้งระหว่างความเค้นและความเครียด โดยใช้หลักการที่เสนอโดย Panyakapo [21] ซึ่งได้แสดงการหาแนวเส้นตรงเพื่อสัมผัสกับเส้นโค้งในช่วงของการหาค่าสติฟเนสช่วงแรก (initial stiffness) ซึ่งมีวิธีการในการสร้างความสัมพันธ์ 2 ข้อ ได้แก่ 1) ค่าสติฟเนสช่วงแรก (initial stiffness) ของเส้นสัมผัสกับเส้นโค้งสามารถหาได้โดยการใช้กำลังที่ 60% ของกำลังที่จุดครากของปริซึมอิฐก่อ 2) พื้นที่ใต้เส้นตรงสัมผัสด้านบนและด้านล่าง จะต้องมีความใกล้เคียงกัน

สำหรับการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นที่จุดคราก  $\Delta_y$  และการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นสูงสุด  $\Delta_m$  ของผนังอิฐก่อสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6.1) และ (6.2)



รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของปรีซีมอิฐก่อ

$$\Delta_y = \frac{\epsilon_y L_d}{\cos \theta} \quad (6.1)$$

$$\Delta_m = \frac{\epsilon_m L_d}{\cos \theta} \quad (6.2)$$

เมื่อ  $\epsilon_y, \epsilon_m$  คือ ค่าความเครียดที่จุดครากและค่าความเครียดสูงสุดของปรีซีมอิฐก่อ,  $L_d$  คือ ความยาวในแนวเส้นทแยงค้ำยันเทียบเท่า สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6.3)

$$L_d = \sqrt{(1 - \alpha_c)^2 h^2 + l^2} \quad (6.3)$$

เนื่องจากแรงกระทำทางด้านข้างและการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นที่จุดครากและจุดสูงสุด สามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาค่า สติฟเนสช่วงแรก (initial stiffness)  $k_o$  และค่าสติฟเนสช่วงซีแคนซ์ (secant stiffness)  $k_{sec}$  ส่วนค่าสติฟเนสหลังจุดคราก (post-yield stiffness)  $\alpha k_o$  และแฟคเตอร์ของแนวเส้นตรง (bilinear factor)  $\alpha$  สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ดังแสดงในสมการที่ (7.1) – (7.4)

$$k_o = \frac{V_y}{\Delta_y} \quad (7.1)$$

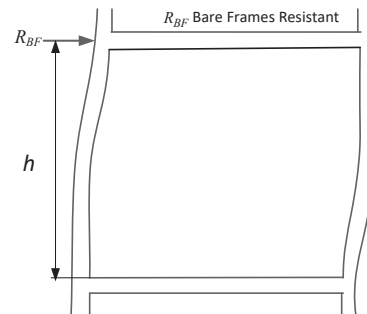
$$k_{sec} = \frac{V_m}{\Delta_m} \quad (7.2)$$

$$\alpha k_o = \frac{V_m - V_y}{\Delta_m - \Delta_y} \quad (7.3)$$

$$\alpha = \frac{V_m - V_y}{\Delta_m - \Delta_y} \cdot \frac{\Delta_y}{V_y} \quad (7.4)$$

### 3.2 พฤติกรรมของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กเปล้า

กำลังต้านทานของโครงข้อแข็งอาคารเปล้า (bare frame) เป็นพฤติกรรมของแรงกระทำทางด้านข้างซึ่งจะไม่มีผนังเป็นตัวค้ำยันของโครงสร้าง ดังนั้น จึงไม่มีการพิจารณาผลของการวิบัติทั้ง 3 ลักษณะเข้ามาเกี่ยวข้องกับจะคำนึงถึงผลของค่าโมเมนต์พลาสติกในเสา คานและโมเมนต์ที่จุดต่อระหว่างเสาและคานดังแสดงในรูปที่ 8 สำหรับกำลังต้านทานของโครงข้อแข็งอาคารเปล้า ดังสมการที่ (8)



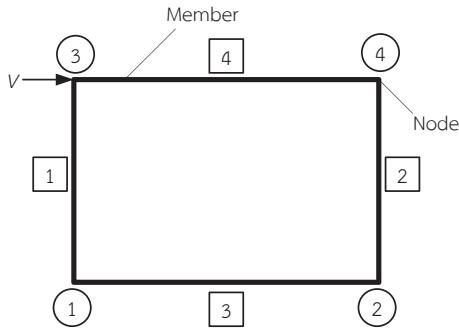
รูปที่ 8 กำลังต้านทานของโครงข้อแข็งอาคารเปล้า

$$R_{BF} = \frac{2(M_{pc} + M_{pj})}{h} \quad (8)$$

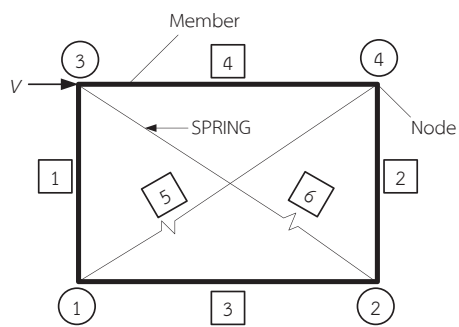
เมื่อ  $M_{pj}$  คือ ค่าโมเมนต์พลาสติกที่น้อยกว่าระหว่าง  $M_{pc}, M_{pb}$  และข้อต่อ  $M_{pc}$  คือ ค่าโมเมนต์พลาสติกของเสา และ  $h$  คือ ค่าระยะระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางถึงเส้นผ่านศูนย์กลางของความสูงของโครงข้อแข็ง

### 3.3 แบบจำลองโครงคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยโปรแกรม RUAUMOKO

การสร้างแบบจำลองโครงคอนกรีตเสริมเหล็กในการศึกษานี้ได้ใช้โปรแกรม RUAUMOKO ซึ่งเป็นโปรแกรมวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น สำหรับโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กเปล่า การสร้างแบบจำลองจะใช้การจำลองแบบ Modified Takeda ดังแสดงในรูปที่ 9 ส่วนโครงข้อแข็งผนังอิฐก่อรูปแบบของสปริงแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งนำมาใช้ในการจำลองแทนแรงอัดในแนวทแยงเทียบเท่าของผนังอิฐก่อ โดยใช้รูปแบบการจำลองแบบ SINA degrading tri-linear [19] ดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งการจำลองทั้ง 2 แบบเป็นพฤติกรรมการรับแรงแบบวัฏจักร (hysteretic)



(ก) แบบจำลองโครงข้อแข็งเปล่า

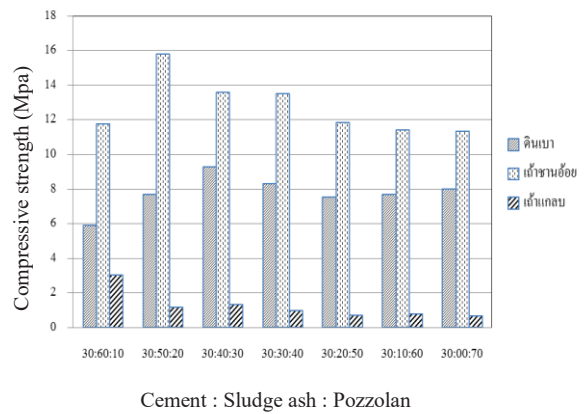


(ข) แบบจำลองโครงข้อแข็งผนังอิฐก่อ  
รูปที่ 9 แบบจำลองโครงข้อแข็ง

## 4. ผลการศึกษา

### 4.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดอิฐบล็อกประสานมวลเบาจากดินตะกอนประปาผสมวัสดุปอซโซลาน

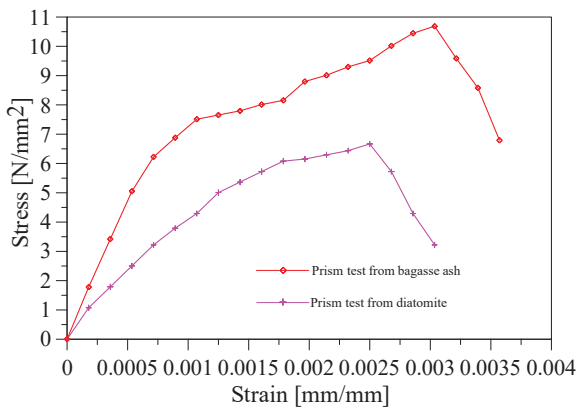
ผลการศึกษาพบว่าผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อดินตะกอนประปา ที่ใช้อัตราส่วนที่เหมาะสม 30:70 โดยได้กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 9.88 Mpa ซึ่งผ่านมาตรฐานกำหนดอิฐบล็อกประสานชนิดรับน้ำหนักเท่ากับ 7.35 Mpa หลังจากนั้นทำการแทนที่ในส่วนของดินตะกอนประปาด้วยวัสดุปอซโซลานทั้ง 3 ชนิดได้แก่ ดินเบา เถ้าขานอ้อย และเถ้าแกลบ ครั้งละ 10 เปอร์เซ็นต์ เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการนำไปผลิตเป็นอิฐบล็อกประสานมวลเบาจากดินตะกอนประปา ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ผลการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดที่ผสมวัสดุปอซโซลานทั้ง 3 ชนิด

จากการวิจัยได้พิจารณาเปรียบเทียบเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมของแต่ละอัตราส่วนผสม ดังนี้ อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ดินตะกอนประปา : ดินเบา พิจารณาเลือก อัตราส่วน 30:30:40 สำหรับอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ดินตะกอนประปา : เถ้าขานอ้อย พิจารณาเลือก อัตราส่วน 30:30:40 แต่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ดินตะกอนประปา : เถ้าแกลบ ไม่พิจารณาเลือกเนื่องจากกำลังการรับแรงอัดไม่ได้ตามมาตรฐาน ซึ่งไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด

ผลการทดสอบปริซึมของอิฐก่อได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของปริซึมอิฐก่อได้ ดังแสดงในรูปที่ 11 สำหรับความแตกต่างของกำลังรับแรงอัดของอิฐก่อและกำลังรับแรงอัดปริซึมของอิฐก่อในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐก่อจะใช้การทดสอบกดก้อนตัวอย่าง 1 ก้อนเท่านั้นแต่สำหรับปริซึมของอิฐก่อจะใช้การก่ออิฐเรียงกัน 3 ก้อนพร้อมกับการใช้ปูนก่อซึ่งตัวอย่างจะมีขนาดอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างเท่ากับ 2:1 จากนั้นจะใช้ความสัมพันธ์ดังกล่าวทำการประเมินกำลังต้านทานแผ่นดินไหวต่อไป



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของปริซึมอิฐก่อ

## 4.2 ผลการประเมินกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก

### 4.2.1 ผลการประเมินกำลังรับแรงของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กเปล่า

กำลังต้านทาน โครงอาคารเปล่าคำนวณได้จากค่าโมเมนต์พลาสติกในเสา ( $M_{pc}$ ) จากการคำนวณด้วยโปรแกรม CSI-Column ได้ค่าโมเมนต์พลาสติกเท่ากับ 101.37 kN-m และค่าโมเมนต์ของจุดต่อของเสาคาน ( $M_{pj}$ ) เท่ากับ 24.93 kN-m สามารถคำนวณกำลังต้านทาน โครงอาคารเปล่าซึ่งได้ค่ากำลังต้านทาน โครงอาคารเปล่า  $R_{BF}$  เท่ากับ 74.29 kN

### 4.2.2 ผลการประเมินกำลังรับแรงของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมก่อผนังด้วยอิฐบล็อกประสานมวลเบา

การประเมินกำลังใช้ทฤษฎีการวิบัติของผนังอิฐก่อภายใน โครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก 3 ลักษณะ ได้แก่ กำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวทแยง (Diagonal Compression Resistance) กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบเลื่อนไถล (Sliding Shear Resistance) และกำลังต้านทานแรงกดอัดที่มุมผนัง (Corner Compression Resistance) ได้ผลสรุปการประเมินกำลังภายใต้ทฤษฎีการวิบัติของผนังอิฐก่อ 3 ลักษณะ โดยโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กก่อผนังด้วยอิฐบล็อกประสานมวลเบาในอัตราส่วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ดินตะกอนประปะา : ฝ้าานอ้อย 30:30:40 (w1) ดังแสดงในตารางที่ 1 สำหรับโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กก่อผนังด้วยอิฐบล็อกประสานมวลเบาในอัตราส่วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ดินตะกอนประปะา : ฝ้าานอ้อย 30:30:40 (w2) ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 สรุปผลการประเมินกำลังรับแรงด้านข้างของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กก่อผนังด้วยอิฐบล็อกประสานมวลเบาในอัตราส่วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ดินตะกอนประปะา : ดินเบา 30:30:40 (W1)

รูปแบบการวิบัติ	แรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดจากการประเมิน (kN)	แรงกระทำทางด้านข้างรวมกับแรงของโครงข้อแข็งเปล่า (kN)
กำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวทแยง (สมการ (2))	478.03	552.32
กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบเลื่อนไถล (สมการ (3))	551.03	625.32



**ตารางที่ 1** (ต่อ) สรุปผลการประเมินกำลังรับแรงด้านข้างของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กก่อผนังด้วยอิฐบล็อกประสานมวลเบาในอัตราส่วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ดินตะกอนประปา : ดินเบา 30:30:40 (W1)

รูปแบบการวิบัติ	แรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดจากการประเมิน (kN)	แรงกระทำทางด้านข้างรวมกับแรงของโครงข้อแข็งเปล่า (kN)
กำลังต้านทานแรงกดอัดที่มุมผนัง (สมการ (4))	545.60	619.90

จากการประเมินกำลังของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กก่อผนังด้วยอิฐบล็อกประสานมวลเบาในอัตราส่วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ดินตะกอนประปา : ดินเบา 30:30:40 กำลังต้านทานกำหนดด้วยค่ากำลังต้านทานที่น้อยที่สุดจากการวิเคราะห์ทั้งกำลังด้านทั้ง 3 แบบ คือกำลังต้านทานในแนวทแยงรวมกับโครงข้อแข็งเปล่าเท่ากับ 552.32 kN

**ตารางที่ 2** สรุปผลการประเมินกำลังรับแรงด้านข้างของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กก่อผนังด้วยอิฐบล็อกประสานมวลเบาในอัตราส่วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ดินตะกอนประปา : ฝ้าชานอ้อย 30:30:40 (W2)

รูปแบบการวิบัติ	แรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดจากการประเมิน (kN)	แรงกระทำทางด้านข้างรวมกับแรงของโครงข้อแข็งเปล่า (kN)
กำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวทแยง (สมการ (2))	766.4	840.69

**ตารางที่ 2** (ต่อ) สรุปผลการประเมินกำลังรับแรงด้านข้างของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กก่อผนังด้วยอิฐบล็อกประสานมวลเบาในอัตราส่วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ดินตะกอนประปา : ฝ้าชานอ้อย 30:30:40 (W2)

รูปแบบการวิบัติ	แรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดจากการประเมิน (kN)	แรงกระทำทางด้านข้างรวมกับแรงของโครงข้อแข็งเปล่า (kN)
กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบเลื่อนไกล (สมการ (3))	563.03	637.32
กำลังต้านทานแรงกดอัดที่มุมผนัง (สมการ (4))	419.01	493.30

จากการประเมินกำลังของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กก่อผนังด้วยอิฐบล็อกประสานมวลเบาในอัตราส่วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ดินตะกอนประปา : ฝ้าชานอ้อย 30:30:40 กำลังต้านทานกำหนดด้วยค่ากำลังต้านทานที่น้อยที่สุดจากการวิเคราะห์ทั้งกำลังด้านทั้ง 3 แบบ คือกำลังต้านทานแรงกดอัดที่มุมผนังรวมกับโครงข้อแข็งเปล่าเท่ากับ 493.30 kN

#### 4.2.3 ผลการประเมินกำลังรับแรงของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมก่อผนังด้วยอิฐบล็อกประสานมวลเบา

ค่าพารามิเตอร์ของการสร้างแบบจำลองการรับแรงแบบวัฏจักร (hysteretic) ของผนังอิฐก่อคำนวณโดยใช้สมการที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น สำหรับตัวอย่างโครงข้อแข็งผนังอิฐบล็อกประสานมวลเบาในอัตราส่วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ดินตะกอนประปา : ดินเบา 30:30:40 และตัวอย่างโครงข้อแข็งผนังอิฐบล็อกประสานมวลเบาในอัตราส่วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ดินตะกอนประปา : ฝ้าชานอ้อย 30:30:40 แรงด้านข้างที่จุดคราก  $V_y$  และแรงด้านข้างสูงสุด  $V_m$  ของผนังอิฐก่อ

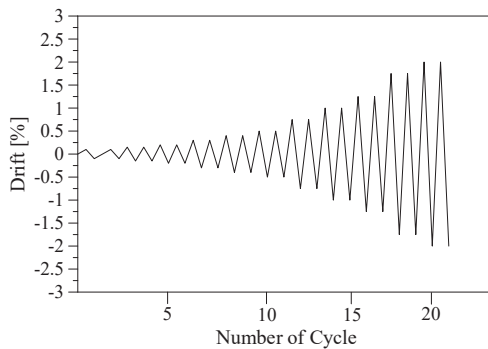
คำนวณค่าพารามิเตอร์ได้โดยใช้กำลังที่จุดครากในแนวทแยงของการวิบัติด้วยแรงอัดในแนวค้ำยัน  $R_t$  และกำลังรับแรงอัดในแนวทแยงค้ำยัน  $R_{DC}$  ตามลำดับ เนื่องจากการประเมินกำลังเป็นการวิบัติจากกำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวทแยงสำหรับตัวอย่าง W1 และสำหรับตัวอย่าง W2 ผลวิเคราะห์เป็นการวิบัติแบบกำลังต้านทานแรงกดอัดที่มุมดังนั้นจึงสรุปค่าพารามิเตอร์ในการสร้างแบบจำลองได้ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์การรับแรงแบบวัฏจักร (hysteretic) ของผนังอิฐก่อ สำหรับการสร้างแบบจำลองโครงสร้าง

โครง ข้อ แข็ง	$V_y$ (kN)	$\Delta_y$ (mm)	$V_m$ (kN)	$\Delta_m$ (mm)	$k_o$ (kN/mm)	$\alpha$
W1	338.99	5.88	552.32	17.64	57.65	0.3
W2	300.79	4.90	493.30	25.61	61.38	0.2

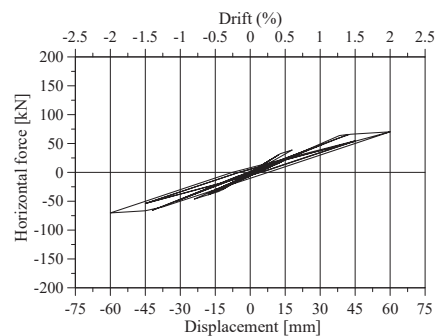
หมายเหตุ W1 คือ โครงข้อแข็งก่อผนังด้วยอิฐบล็อกประสานมวลเบาในอัตราส่วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ดินตะกอนประปา : ดินเบา 30:30:40 / W2 คือ โครงข้อแข็งก่อผนังด้วยอิฐบล็อกประสานมวลเบาในอัตราส่วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ดินตะกอนประปา : ฝ้าชานอ้อย 30:30:40

ในการให้แรงกระทำของโครงข้อแข็งเปล้า (BF) โครงข้อแข็งผนังอิฐก่อ (W1) และโครงข้อแข็งผนังอิฐก่อเสริมกำลัง (W2) โดยการจำลองพฤติกรรมจะใช้รูปแบบการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นดังแสดงในรูปที่ 12

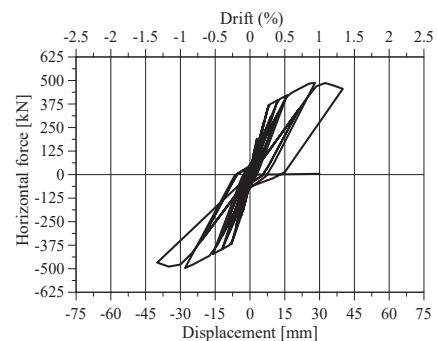


รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวระหว่างชั้น

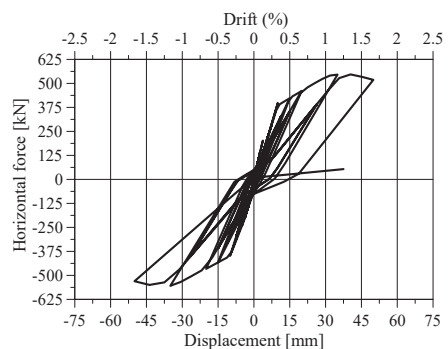
สำหรับแบบจำลองพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบวัฏจักร ของโครงข้อแข็งเปล้า (BF) ดังแสดงในรูปที่ 13 สำหรับแบบจำลองพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบวัฏจักร ของผนังอิฐก่อ (W1) ดังแสดงในรูปที่ 14 และแสดงกำลังรับแรงรวมของโครงข้อแข็งผนังอิฐก่อ (W1) ที่เกิดจากกำลังรับแรงของผนังอิฐก่อกับกำลังรับแรงของโครงข้อแข็งเปล้าดังแสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 13 ผลวิเคราะห์ของตัวอย่าง BF



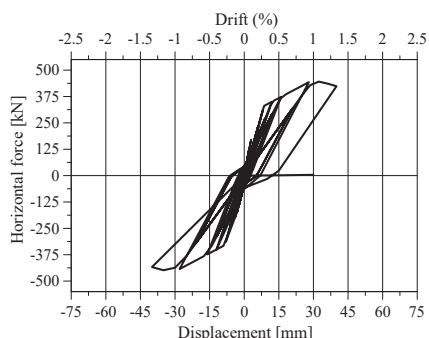
(ก) แบบจำลองของผนังอิฐก่อ (W1)



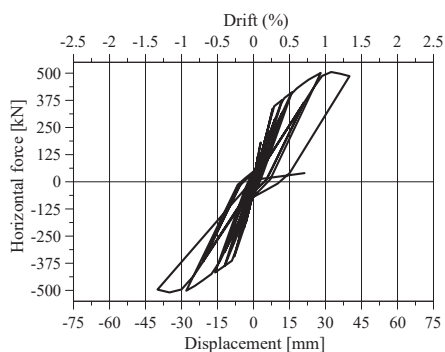
(ข) แบบจำลองของโครงข้อแข็งผนังอิฐก่อ (W1)

รูปที่ 14 ผลวิเคราะห์ของโครงข้อแข็งของตัวอย่าง W1

สำหรับแบบจำลองพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบวัฏจักร (hysteresis loop) ของผนังอิฐก่อเสริมกำลัง (W2) ดังแสดงในรูปที่ 15 และแสดงกำลังรับแรงรวมของโครงข้อแข็งผนังอิฐก่อเสริมกำลัง (W2) ที่เกิดจากกำลังรับแรงของผนังอิฐก่อกับกำลังรับแรงของโครงข้อแข็งเปล่าแสดงในรูปที่ 15



(ก) แบบจำลองของผนังอิฐก่อ (W2)



(ข) แบบจำลองของโครงข้อแข็งผนังอิฐก่อ (W2)

**รูปที่ 15** ผลวิเคราะห์ของโครงข้อแข็งของตัวอย่าง W2

สำหรับผลการเปรียบเทียบแบบจำลองและผลของการประเมินกำลังจากทฤษฎีการวิบัติ 3 ลักษณะ แสดงดังรูปที่ 14-15 จากการศึกษาแสดงให้เห็นพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบวัฏจักร (hysteresis loop) โดยจากการจำลองของตัวอย่างโครงข้อแข็ง W1 และ W2 ได้ค่ากำลังรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดเท่ากับ 505.42 kN และ 546.72 kN ซึ่งให้ค่ากำลังที่ได้มีความใกล้เคียงกับทฤษฎีการวิบัติ 3 ลักษณะ

**5. สรุป**

1. การก่อผนังด้วยอิฐบล็อกประสานมวลเบาทำให้ความสามารถในการรับกำลังด้านทานแผ่นดินไหวเพิ่มมากขึ้นกว่าโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กเปล่าที่ไม่มีการก่อผนัง

2. การประเมินกำลังของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก W1 กำลังด้านทานเกิดในแนวทแยงรวมกับโครงข้อแข็งเปล่าเท่ากับ 552.32 kN แสดงให้เห็นว่าลักษณะการวิบัติที่เกิดจากแนวทแยงทำให้อิฐบล็อกประสานมวลเบาจากดินเบาสามารถรับกำลังได้อย่างเต็มความสามารถ แต่สำหรับโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก W2 กำลังด้านทานแรงกดอัดที่มุมผนังร่วมกับโครงข้อแข็งเปล่าเท่ากับ 493.30 kN แสดงให้เห็นถึงการวิบัติในลักษณะของการเกิดแรงกดอัดที่มุมส่งผลให้บริเวณที่เกิดเป็นลักษณะเสาสั้นซึ่งจะทำให้เกิดการวิบัติที่โครงข้อแข็งก่อนที่จะวิบัติจากผนังอิฐบล็อกที่ผสมเข้าชานอ้อย ดังนั้นเพื่อต้องการให้เกิดการรับกำลังด้านข้างให้เต็มประสิทธิภาพจึงต้องมีการเสริมกำลังโครงข้อแข็งเพื่อให้มีกำลังรับแรงที่เพิ่มขึ้น

3. การจำลองพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบวัฏจักร (hysteresis loop) ด้วยโปรแกรม RUAUMOKO จากการจำลองของตัวอย่างโครงข้อแข็ง W1 และ W2 ให้ค่ากำลังรับแรงกระทำทางด้านข้างที่ได้มีความใกล้เคียงกันกับการประเมินกำลังจากทฤษฎีการวิบัติ 3 ลักษณะ

**6. กิตติกรรมประกาศ**

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มหาวิทยาลัยศรีปทุม และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนในการทำวิจัยในครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Gates, W. E., Nester, M. R. and Whitby, T. R. Managing Seismic Risk: A Case History of Seismic Retrofit for a Non-Ductile Reinforced Concrete Frame High Rise Office Building. Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, Spain, 1992.
- [2] Sugano, S. Seismic Strengthening of Existing Reinforced Concrete Buildings in Japan. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 1981; 14(4): 209-222.
- [3] Leeanansaksiri, A., Panyakapo, P. and Ruangrassamee, A. Seismic Capacity of Masonry Infilled RC Frame Strengthening with Expanded Metal Ferrocement. *Engineering Structures*, 2018; 159: 110–127.
- [4] Hamid, A., Wael, W., Zeyad, H. R. and Elgaaly, M. Behavior of Composite Unreinforced Masonry-Fiber-Reinforced Polymer Wall Assemblages Under In-Plane Loading. *Journal of Composites for Construction*, 2005; 9(1): 73-83.
- [5] Altin, S., Anil, O., Emin, K. M. and Kaya, M. An Experimental Study on Strengthening of Masonry Infilled RC Frames Using Diagonal CFRP Strips. *Composites Part B: engineering*, 2008; 39(4): 680-693.
- [6] Akin, E. and Ozecebe, G. CFRP Strengthening of Reinforced Concrete Frames with Masonry Infill Walls: A Numerical and Parametric Study. *Advanced Materials Research*, 2013; 747: 51-54.
- [7] Elgawady, M. A., Lestuzzi, P. and Badoux, M. A Seismic Retrofitting of Unreinforced Masonry Walls Using FRP. *Composites Part B engineering*, 2006; 37: 48-62.
- [8] Hernan, S. M., and Pablo, A. Repair of In-Plane Shear Damaged Masonry Walls with External FRP. *Construction and Building Materials*, 2011; 25(3): 1172-1180.
- [9] Taghdi, M., Bruneau, M. and Saatcioglu, M. Seismic Retrofitting of Low-Rise Masonry and Concrete Walls Using Steel Strips. *Journal of Composites for Construction*, 2000; 126(9): 1017-1025.
- [10] Ismail, N., Petersen, R., Masia, M. and Ingham, J. Diagonal Shear Behaviour of Unreinforced Masonry Wallettes Strengthened Using Twisted Steel Bars. *Construction and Building Materials*, 2011; 25(12): 4386–4393.
- [11] Harajli, M., ElKhatib, H., and Tomas San-Jose, J. Static and Cyclic Out-of-Plane Response of Masonry Walls Strengthened Using Textile-Mortar System. *Journal of Composites for Construction*, 2010; 22(11): 1171–1180.
- [12] Kazemi, M. T. and Morshed, R. Seismic Shear Strengthening of R/C Columns with Ferrocement Jacket. *Cement & Concrete Composites*, 2005; 27(7-8): 834–842.
- [13] Dehghani, A., Nateghi-Alahi, F. and Fischer, G. Engineered Cementitious Composites for Strengthening Masonry Infilled Reinforced Concrete Frames. *Engineering Structures*, 2015; 105(15): 197–208.
- [14] Altoubat, S., Maalej, M., Kazad, A. S. and Eatephane, P. Rapid Strengthening of Unreinforced Masonry Walls for Out-of-Plane Actions using Fiber Reinforced Shotcrete. 3rd RN Raikar Memorial Intl. Conference & Gettu-Kodur Intl. Symposium on ADVANCES IN SCIENCE & TECHNOLOGY OF CONCRETE, 14-15 December, India, 2018; 382–389.
- [15] American Society for Testing and Materials. ASTM C305-14:2014. Standard practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency. U.S.:ASTM, 2014.
- [16] American Society for Testing and Materials. ASTM C349-18:2018. Standard practice for compressive strength of hydraulic-cement mortars. U.S.:ASTM, 2018.
- [17] American Society for Testing and Materials. ASTM C170-17:2017. Standard test method for compressive strength of dimension stone. U.S.:ASTM, 2017.
- [18] American Society for Testing and Materials. ASTM C1314-18:2018. Standard test method for compressive strength of masonry prisms. U.S.:ASTM, 2018.
- [19] Carr AJ. RUAUMOKO computer program. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2006.

- [20] Saneinejad, A. and Hobbs, B. Inelastic Design of Infilled Frames. *Journal of Structural Engineering*, 1995; 121(4): 634–650.
- [21] Panyakapo, P. Cyclic Pushover Analysis Procedure to Estimate Seismic Demands for Buildings. *Engineering Structure*, 2014; 66: 10–23.



# Analysis on a Vibration Character of a Hollow Fiber Membrane for MBR using a High-Speed Camera and an Accelerometer

Prattakorn Sittisom<sup>1</sup> and Tomoaki Itayama<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Engineering, Nagasaki University, Nagasaki 852-8131, Japan.

\*Corresponding Author: E-mail address: itayama@nagasaki-u.ac.jp

## ABSTRACT

The dynamical character of the membrane vibration, which relates to membrane fouling phenomena in membrane bioreactors (MBRs), had not been well analyzed by the direct measurement for the motion of the hollow fiber membrane (HFM) in the MBR system. In this study, we aimed to develop the membrane vibration measurement method using an accelerometer (ACM) attached on an HFM to apply the measurement in an invisible MBR tank due to high turbidity. A single string HFM of 80cm length with different looseness (0%, 1%, 2% and 3%) was set in a transparent plastic tank, in which turbulence jet flow was induced from a submerged pump, to compare the vibration data using a high-speed camera (HSC) and ACM. Each obtained time series data of the membrane displacement by the HSC was sequentially processed by a low-pass digital filter and a derivative digital filter to obtain each velocity data and each acceleration data. And it was found that the membrane with the larger looseness showed the smaller value in the standard deviation (SD) of acceleration data, which means the average amplitude of acceleration in the random vibration, though the SD of the displacement and that of the velocity was larger. Moreover, the relation between the looseness of the membrane and the SD of the acceleration obtained by the ACM was just the same as the relation obtained by the HSC. Also, both power spectrums of the acceleration in the frequency domain by the ACM and the HSC presented a similar tendency in the relation with the looseness.

**Keywords:** MBR, membrane fouling, membrane vibration, high-speed camera, accelerometer

## 1. INTRODUCTION

Membrane bioreactor (MBR) technology, consisted with the membrane filtration technology and the biological reactor technology, have successfully spread to wastewater treatment [1]. The MBRs represent a steady way to provide enough long biomass retention and high MLVSS of sludge for high quality treated water [1,2]. However, the membrane fouling remains a significant problem in MBR technologies [3]. Thus, many studies have focused on addressing the membrane fouling problems [4, 5].

It is well known that aeration plays a vital role in the operation of MBR, not only to provide oxygen for the sludge microorganisms but also to prevent the membrane from fouling [3]. The crossflow induced by the air bubbles on the membrane surface prevents the particles from accumulating. Air bubbles itself can scrub the membrane surface when the bubbles touch

on the surface of the membrane [3]. In addition, the vibration of the membrane by the air bubbles has to be considered as one of the major parameters on the filtration performance, because the continuous collisions of air bubbles to the membrane and the turbulent jet flow induced by the ascending bubbles cause the random vibration of the membrane [4, 6, 7, 8].

The vibration membrane filtration methods had been studied before researching the vibration of the membrane of MBR [9, 10, 11]. The disk membrane filter was vibrated by the oscillating twisted shaft or torsion spring. The shear flow on the surface of the membrane by the vibration effectively made increase the permeate rate [11]. It was discussed on the effect of the vibration amplitude for the filtration [10, 11]. However, the frequency was set around the range between 50 Hz and 70 Hz in the experiments [10, 11].



The effect of the vibration for the hollow fiber membranes using MBRs was examined using the vertical oscillation mechanism [6]. They found that the clear relation between the critical flux for the membrane fouling and the vibration frequency changed from 0 Hz to 10 Hz [6]. Furthermore, the vibration of the membrane in the practical membrane module was installed in a model MBR tank made of transparent acrylic plates, because the motion of the hollow fiber bundles was measured using high-speed camera [12]. Video image was captured by a high-speed camera with 50 frames per second (fps), then it was manually processed by a video editing software in the study to obtain the motion data of the membrane. They examined a new design of a hollow fiber membrane module, which showed a higher amplitude of the vibration under the same aeration rate than that of the previous design. They succeeded to mitigate the fouling property of the membrane by the new configuration of the hollow fiber membrane module in the MBR based on the vibration data [12]. In the study, it was, of course, guessed that the air bubbles were disgusting obstacles for the video image processing though they didn't mention on the detail.

A laser displacement meter was applied to monitor the vibration of the flat sheet membrane as an alternative optical measurement method of motion [13, 14]. The laser displacement meter can measure the distance between the sensor (laser light source) and the light reflection point on the target [13]. Hence, the vibration of the front and back direction was only measured. They succeeded to remove the effect of bubbles to interfere with the data collection of the movement. According to these studies, the standard deviation of the displacement of the flat sheet membrane was 0.2~0.7mm in the vibration [14]. They found the major two peaks of the normal mode vibration at 4.4Hz and 2.2Hz in the power spectrum [14]. However, it is thought that the laser displacement meter is not adequate for measuring the motion of the hollow fiber membrane, because the hollow fiber membrane can move both left-right direction and front-back direction, unlike the sheet type membrane.

The measurement of the membrane vibration of MBRs had been conducted in clear water tank as a model system, because it was impossible to optically observe the motion in practical MBRs with high turbidity by the

sludge [12, 13, 14]. Considering that the development of a new MBR system is the final goal of the study, the membrane vibration should be measured in a practical MBR system. It is thought that the use of accelerometer (ACM) is an alternative method to measure the motion of the membrane because several kinds of ACM with small size and lightweight has been available in electric parts markets. If we succeed to attach the small ACM on a hollow fiber membrane, the motion of the membrane can be directly measured. The ACM can help to understand the vibration characteristic under the high turbidity condition where high-speed camera and other optical methods cannot be applied. When vibration in working condition can be understood, the better arrangement of a membrane module in the MBR system can be designed, and fouling can be reduced effectively and extend maintenance operation. Therefore, we examined the measurement method of the vibration of a hollow fiber membrane using a small size ACM. This study performed a direct comparison between the results by the ACM and the results by a high-speed camera, to confirm the reliability of vibration measurement by the ACM.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1 Experimental set-up of a hollow fiber membrane

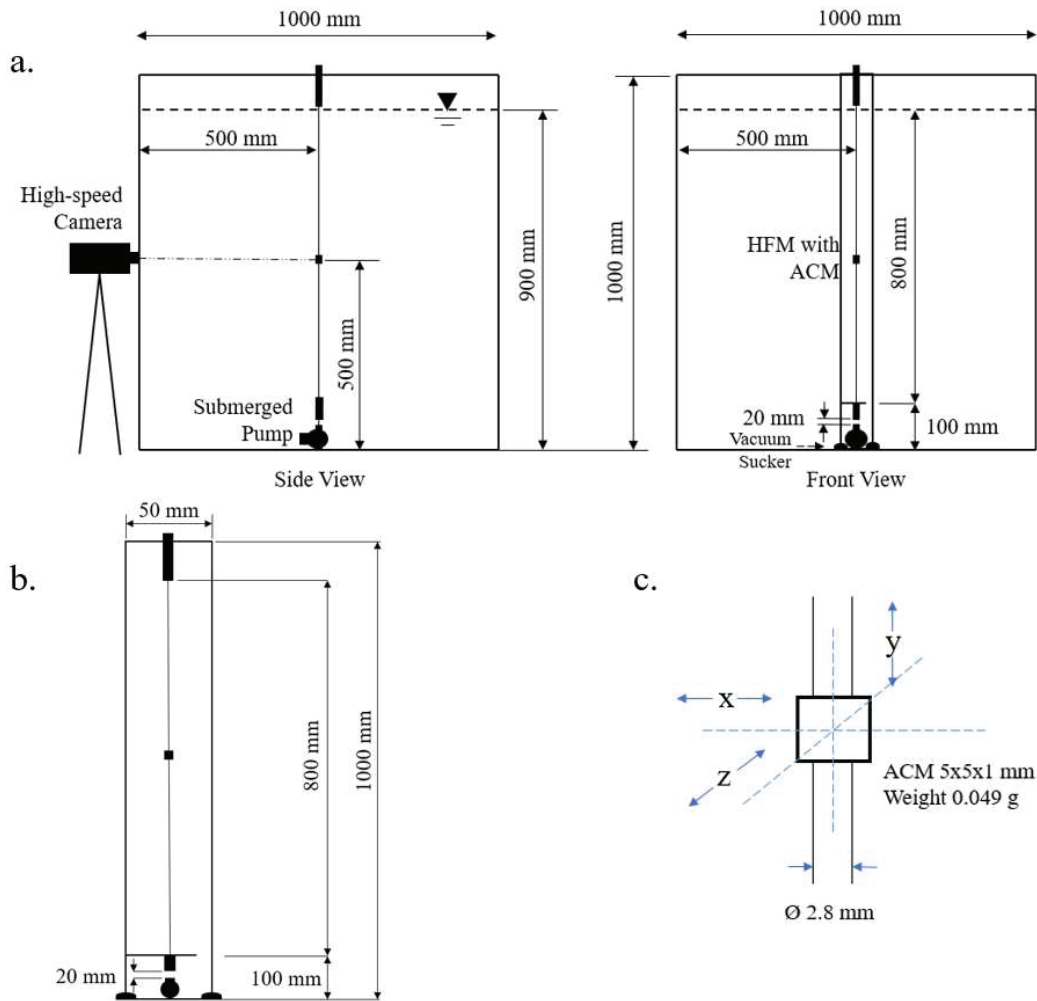
The experimental set-up for measuring the vibration of a single string hollow fiber membrane (HFM) is illustrated in Figure 1. A PVDF HFM of 0.4  $\mu\text{m}$  nominal pore diameter, 2.8 mm fiber diameter (Mitsubishi Chemical Co. Ltd., JAPAN) was set to the stainless steel frame which was tightly fixed at the bottom of the transparent plastic (acrylic) water tank (100cm widthx100cm lengthx100cm height) as shown Figure 1. Both ends of HFM were sealed with the PVC tubes (I.D.=8 mm) using the epoxy glue. Then the PVC tubes were tightly fixed on the upper and lower horizontal stainless-steel beams which were attached tightly to both vertical stainless beams of the frame structure. The distance between the upper-end point of HFM and the lower endpoint was able to be adjusted between 80 cm to 76 cm ( $=D_{frame}$ ) in length using a screw mechanism. When each HFM of looseness of 0%, 1%, 2%, and 3% was set, the actual length of HFM was kept to

80.0cm ( $=L_{HFM}$ ). The looseness is defined as follows.

$$looseness(\%) = \frac{L_{HFM} - D_{frame}}{D_{frame}} \times 100 \quad (1)$$

, where  $L_{HFM}$  is the length of HFM,  $D_{frame}$  is the distance between the upper and lower fixed points on the stainless-steel beams.

A small submerged pump (YS-15, SENDAK Co., Japan) was tightly set at the bottom 2 cm below from the lower PVC tube, as shown in Figure 1(a). The water flow was jetted from the pump nozzle with a velocity of 0.50 m/s on average at the nozzle point. The simple DC12 volt power supply of the half-wave rectifier circuit from AC (60Hz) was used for driving the pump.



**Figure 1** Experiment Set-up  
 a. Side-Front view of MBR  
 b. Stainless steel frame with ACM-attached HFM  
 c. ACM and axis references

## 2.2 Measurement of the membrane motion by a high-speed camera (HSC)

Digital camera (SONY, RX10iii) was used as a high-speed (video) camera to measure the vibration of HFM, as shown in Figure 1. The maximum recording speed and the maximum recording time of the camera are 960 frames per

second (fps) and 2 seconds at the resolution of 1920×1080 pixels. The measurement was repeated three times for each experimental condition. The exact time interval for capturing each frame was calibrated using a LED flashing light driven by a square signal (duty cycle = 50%) from a wave generator (Model 3390,

Agilent Technologies, Inc., USA), where the square waves with exact frequency (35.000 Hz, 70.000 Hz, 100.000 Hz, 150.000 Hz, and 170.000 Hz) were used for the calibration. The exact time interval was 0.00105 second.

The displacement of the marker point was analyzed by tracking software, “Tracker” (Tracker Software Products, Ltd.). The accelerometer, which was mentioned in the next, was used as the target marker for tracking. The displacement data was obtained as a time-series data of the position with the unit of meter-scale by use of a standard scale of 5mm in the frame.

### 2.3 Measurement of the membrane motion by an accelerometer

An accelerometer KXP84 (Kinonix, Inc., USA) with a weight of 0.049 g, the size of 5mm x 5mm x 1.2 mm (thickness) was used for the membrane motion measurement. The ACM measured the acceleration for the three directions (x, y, z), as shown in Figure 1(c).

The ACM was attached on HFM surface at 40cm below from the top end of the HFM with UV resin of 0.1 g. The X, Y and Z directions of the ACM for the sensing was defined as shown Figure 1(c). The ACM transmitted the acceleration data converted to each analog voltage of 660 mV/G. Polyurethane coated copper wires (0.06 mm diameter, 450 mm length) were connected to the ACM including three data lines, a positive power supply (6 V), ground and the logic line for data acquisition enable. The 6 wires were passed through inside the hollow fiber membrane. The total weight of the 6 wires was 0.08 g. Thus, the total weight of the assembled ACM was 0.229 g. It was attached on the HFM of 2.03 g weight. The accelerometer data line for X-direction was connected to data logger of 12bit ADC (DS1M12, Company name), where each data line from the ACM was also connected to the ground through a capacitance of 0.033 $\mu$ F according to the company’s instruction manual for the high-frequency noise reduction. The time interval for data collection of the data logger was set with 0.00100 seconds period for 60 seconds, where the time interval was tested by the same wave generator as the calibration of the HSC. The measurement was repeated three times for each experimental condition.

Before the experiment for HFM vibration measurement, the response of the ACM was tested in different frequency from 0 to 500 Hz by vertical and horizontal vibration testing

machine (LABTONE, Labtone Test Equipment, Co., Ltd.) at Nagasaki Industrial Technology Center.

### 2.4 Data Processing

The position data in the x-direction (Figure 1) obtained by the tracking software was saved as text files of numeric data of the unit of meter. At first, the average position during each total measurement time was subtracted from the raw data (mean centering). Then the processed data was through the low pass digital filter (6th order Butterworth filter) with the cut off frequency 150Hz [15]. It was designed by the software package “Signal (ver.0.6-7)” in R (ver. 3.6.0), where R is a language and environment for statistical computing. Then the processed data was through the low pass digital filter (6th order Butterworth filter) with the cut off frequency 150Hz designed by the software package “Signal (ver.0.6-7)” in a free software R (ver. 3.6.0) [15]. The filtered displacement (position) data was passed through a derivative digital filter of the 17th order FIR filter to obtain the velocity data [15]. To obtain the acceleration data expressed that the same derivative digital filter was again used for the velocity data subtracted from the average velocity in the whole measurement time.

Instead of the histogram showing the distribution of the displacement data, the probability density function (PDF) of the displacement was estimated for all data points of three repeating measurement data using the function “density” in the R software. The probability density functions of the velocity and the acceleration were also estimated using the same function. Root mean square value as an indicator of the strength of the random vibration corresponds to the standard deviation of the estimated probability density function.

The acceleration time series  $a(k)$  from the HSC and the ACM were Fourier transformed, where the following equation was used as the definition of the discrete Fourier transform (DFT) in a finite measurement time  $T$  [16].

$$Fa(f:T) = \sum_{k=0}^{N-1} a(k) e^{-i2\pi k/N} \Delta t : f = \frac{k}{T}, T = N\Delta t \quad (2)$$

, where  $\Delta t$  is the sampling period (second),  $N$  is the total data number,  $f$  is the discrete frequency and  $T$  is the total measurement time. The DFT

was calculated by “fft” command with the hamming window in the package “Signal (ver.0.6-7)” in a statistical software R (ver. 3.6.0), where fast Fourier transformation (FFT) is calculated by “fft” command [16]. Then the power spectrum density was calculated by use of the following formula [16].

$$P(f)=|Fa(f:T)|^2/T \quad (3)$$

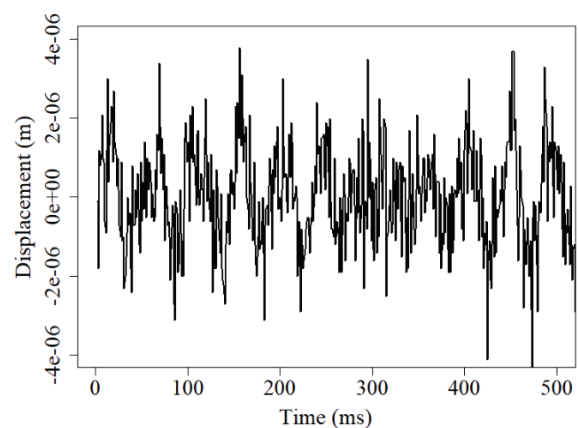
Then the power spectrum densities for three repeating measurements were averaged to one power spectrum density. The averaged power spectrum density was smoothed by using “ksmooth” function in the R software (ver. 3.6.0) to present distinct peaks in the spectrum. Furthermore, in order to test the numerical error of the FFT calculation and the power spectrum density calculation, Parseval’s identity was tested between the frequency domain data and the original time-domain data [16]. Both calculation results for sinusoidal time-series test data matched in all 7 digits on the R software.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1 HSC measurement for the membrane vibration

The membrane motion was captured by the HSC under the condition of the still water, which was realized by waiting for around one day after filling tap water to the tank. The water temperature in everywhere was 25°C (room temperature) in this measurement. It means that no thermal convection was induced. In addition, no significant airflow in the room caused the water surface wave. However, the slight displacement of the marker object, which the ACM was used for, was detected as shown in Figure 2. Because the order of the amplitude was micrometer, it was impossible to confirm the motion by our eye. The noise level gave the minimum detection threshold of the displacement. The noise level of velocity was estimated at 0.001 m/s from the derivative of displacement data. Then the noise level of acceleration was estimated as 0.25 m/s<sup>2</sup> from the derivative of the velocity data. Before the derivative calculation, the original data was passed through the low-pass filter (the cutoff frequency = 150 Hz), because the noise was extremely amplified in the higher frequency part by the derivative operation [15].

The fiber movement was analyzed using 80 cm fiber lengths at 4 different looseness, at 0, 1, 2 and 3%. The lateral displacement (x-direction) of the HFM induced by the turbulent water jet was measured for periods up to two seconds by the HSC. The results showed that fiber displacement has a summation of harmonic vibrations with different frequencies, as shown in Figure 3(a). It was apparent that the amplitude of displacement increased as the looseness increased. The velocity and the acceleration showed harder fluctuation than the displacement as shown in Figure 3(b), (c) respectively.



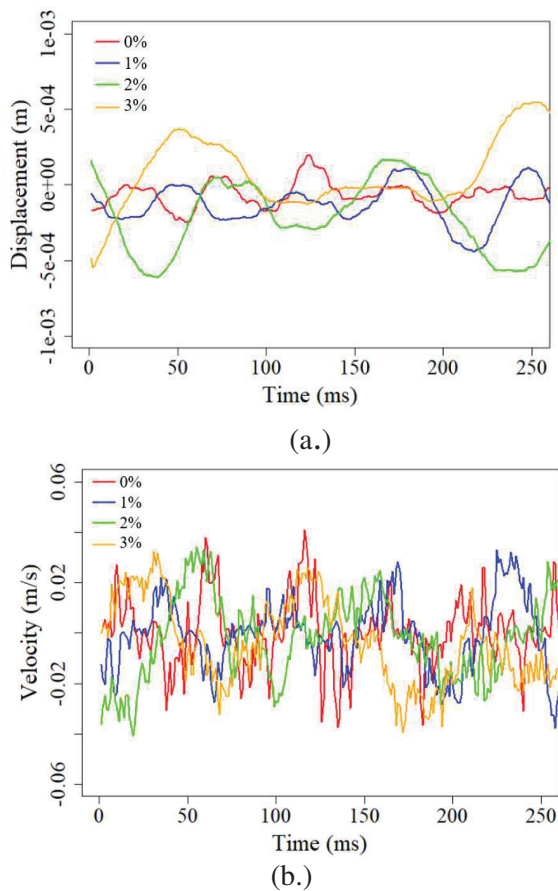
**Figure 2** The time series of displacement of HFM (looseness = 0%) in the still water measured by the high-speed camera

The results were qualitatively consistent with the results of Wicaksana, Chang, and Fane who used hollow fibers for microfiltration using different airflow rates [13]. Their results also suggested that the higher airflow rate was more effective for fiber movement with a higher amplitude.

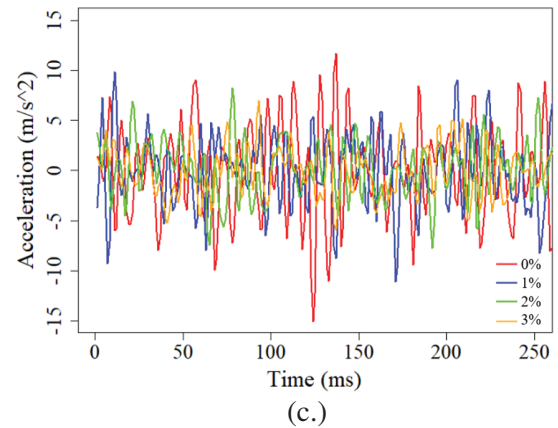
Figure 4 (a), (b) and (c) show estimated each PDF of the displacement, the velocity, and the acceleration from each time-series data, respectively. Each shape of each probability density for different looseness is like a normal distribution. The width of PDF of the displacement and the velocity increases as the looseness increases. On the other hand, as the looseness increases, the width of each PDF of the acceleration decreases. The width of the PDF corresponds to the standard deviation (SD). To clarify the relations between the looseness and these SDs, the plots were shown in Figure 5. It was obvious that the SDs of the displacement and the velocity increased as the looseness



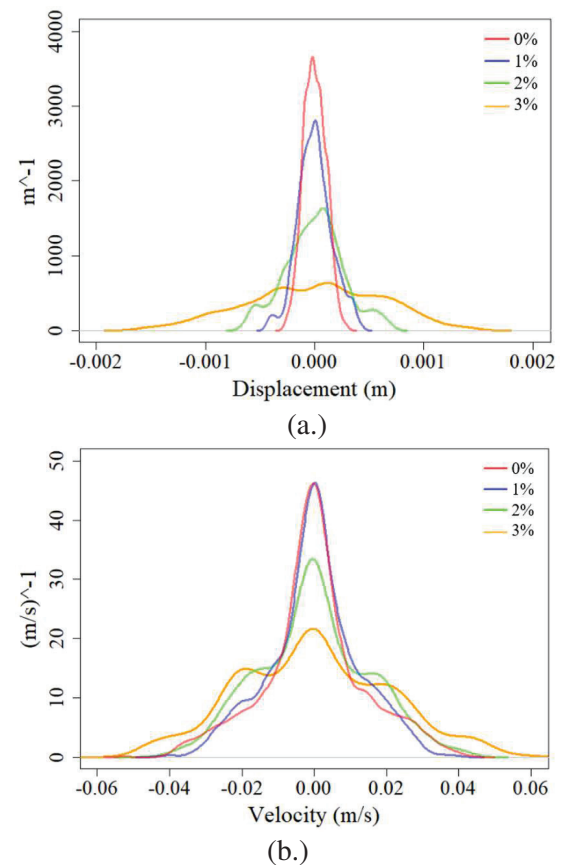
increased. However, the SD of the acceleration decreased. The motion of the HFM induces the shear flow on the surface of the membrane. In particular, the shear flow by the acceleration motion may give the strong force to particles causing clogging or fouling for the membrane. Therefore, the 0% looseness may be a suitable condition in terms of the antifouling character of HFM. In the previous study on the vibration of a hollow fiber membrane, it did not mention about the relations between the vibration character and looseness [12].



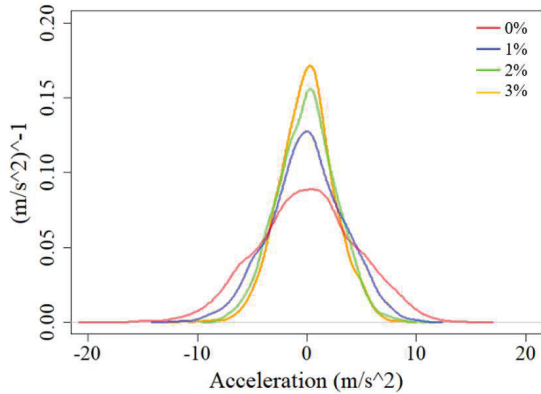
**Figure 3** Examples of time series of the displacement (a), the velocity (b) and the acceleration (c) of the motion of HFM. The data was obtained by the HSC for each looseness (0%, 1%, 2% and 3%) in the turbulent jet flow.



**Figure 3 (cont.)** Examples of time series of the displacement (a), the velocity (b) and the acceleration (c) of the motion of HFM. The data was obtained by the HSC for each looseness (0%, 1%, 2% and 3%) in the turbulent jet flow.

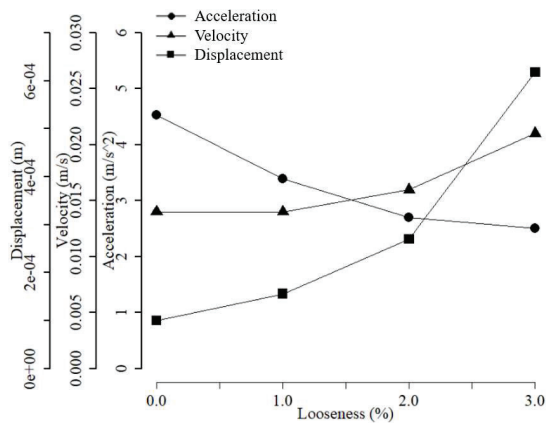


**Figure 4** Probability density of the measured values of the displacement (a), the velocity (b) and the acceleration (c). The data was obtained by the HSC for each looseness (0%, 1%, 2% and 3%) in the turbulent jet flow.

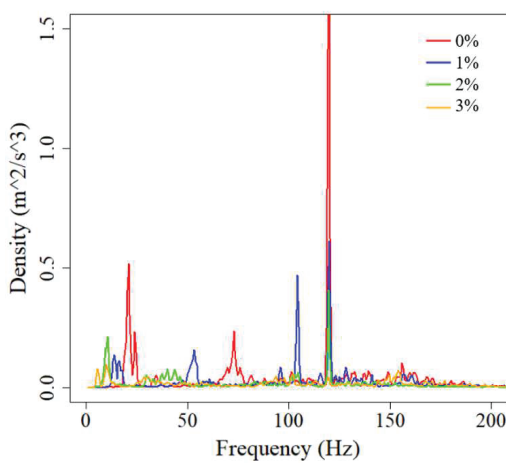


**Figure 4** (cont.) Probability density of the measured values of the displacement (a), the velocity(b) the acceleration (c).

The data was obtained by the HSC for each looseness (0%, 1%, 2% and 3%) in the turbulent jet flow.



**Figure 5** Standard Deviation of measured data from high-speed camera



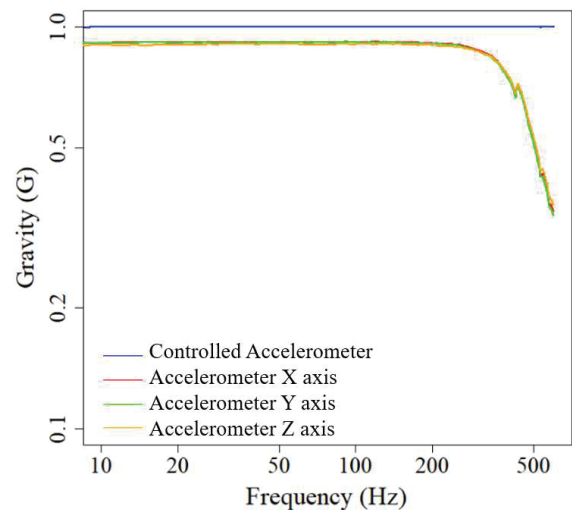
**Figure 6** Power spectrum density of acceleration from high-speed camera

Therefore, the results were new findings to provide the idea for a new design of an MBR.

Figure 6 shows the power spectrum density of the acceleration for each looseness. Every looseness shows the same major peak at around 120 Hz. We will discuss the detail of each spectra including this point later succeeded to elucidate several characters of the HFM vibration.

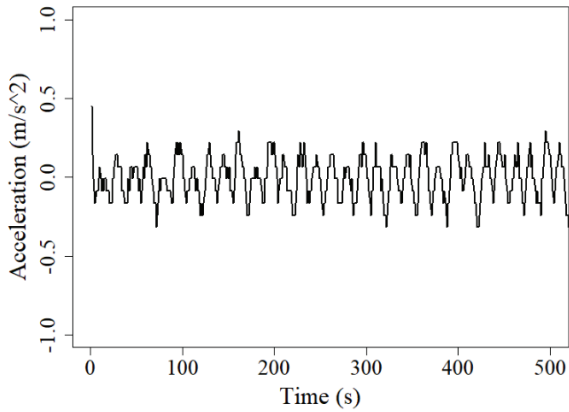
### 3.2 Measurement of membrane vibration using ACM

Before the use of the ACM in the experiment for the membrane vibration, the frequency response data was obtained by the vertical and horizontal vibration testing machine, from 0 to 500 Hz. The frequency responses for three-axis presented the flat character with 90% efficiency comparing to the reference accelerometer of the testing machine until around 150 Hz since the beginning of 0 Hz as shown in Figure 7. The value of the ACM was compensated using the efficiency factor in this experiment. Then the response curve starts to decrease the efficiency from 150 Hz. Therefore, in this study, we focused on the vibration with a lower frequency than 150 Hz. It was thought that the frequency region was reasonable because the frequency of the membrane vibration was mainly lower than 100 Hz in the previous studies [12, 13,14].



**Figure 7** Efficiency performance of ACM in horizontal axis from vibration testing machine





**Figure 8** Acceleration time series measured by ACM under the condition without turbulent water jet flow

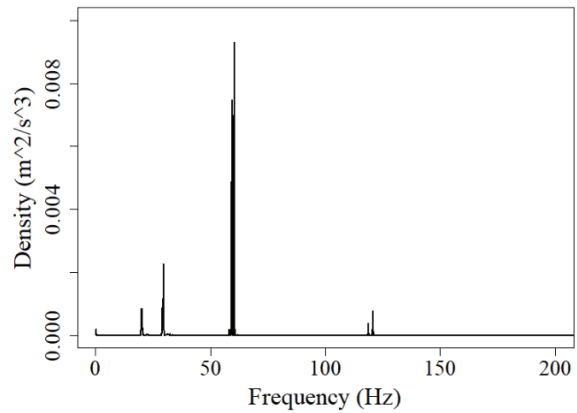
When the measurement was performed by the HSC method, the signal of the acceleration in the X-direction (Figure 1(c)) from the ACM was simultaneously recorded. Moreover, the data sampling period of the data logger was 1.00 ms, which was almost the same as the frame rate in the HSC measurement.

The periodic noise in the signal from the measurement for the still water condition without the water jet was detected as shown in Figure 8. After converting the data to the power spectrum density, a peak at 60 Hz. It was clear that the noise was originated from the electric power line was found. However, as the power spectrum density shows deficient value in Figure 8, the noise was neglected in the vibration analysis of the HFM.

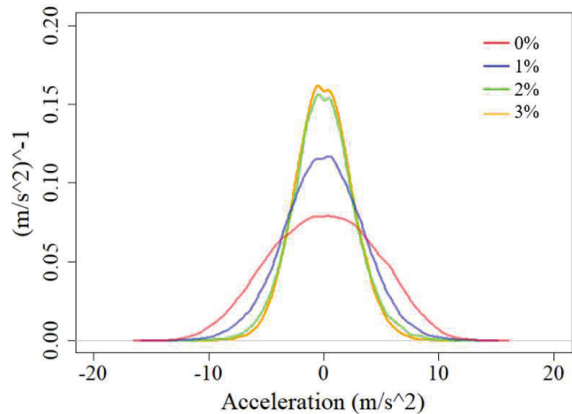
Figure 10 shows each PDF estimated from the time series of the acceleration of each different looseness condition. The shapes of the PDFs are like the plots in Figure 4(c). In addition, the foot of each PDF was wider as the looseness increased as well as the PDF of the HSC method. The plot of the change of the SD of the acceleration for the increment of the looseness entirely coincident for the plot in Figure 5. It resulted that the less looseness provided the higher acceleration of the motion of the HFM.

Power spectral densities of the acceleration of the HFM vibration with different looseness were presented in Figure 12. A remarkable peak at 120 Hz appeared in the power spectrum density for each looseness as well as the result by the HSC measurement. It was already confirmed that the electric noise from the AC

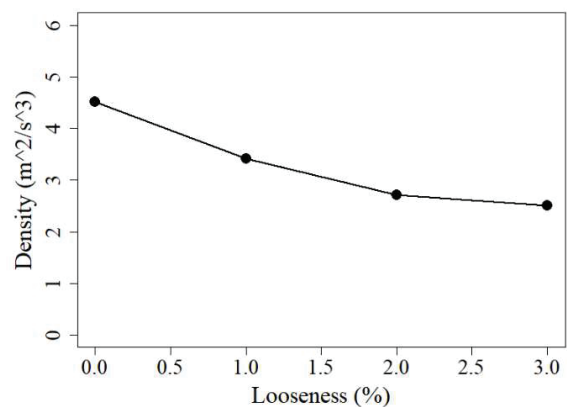
power line (60 Hz) was low enough (Figure 8). Moreover, the peak at 120 Hz was also observed in the power spectrum density using the HSC.



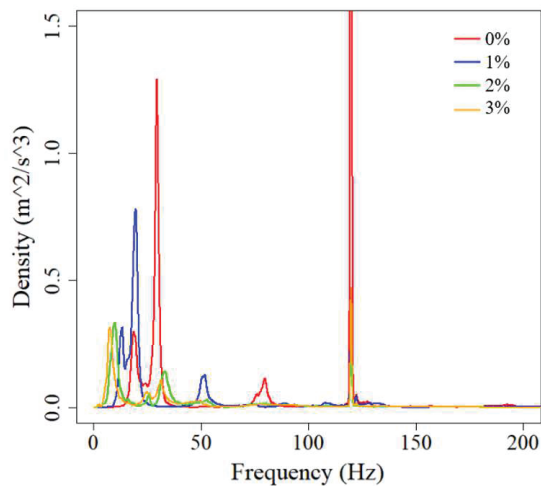
**Figure 9** Power spectrum density from ACM noise



**Figure 10** Probability Density of measured Acceleration by ACM



**Figure 11** Standard Deviation of acceleration from ACM



**Figure 12** Power spectrum density of acceleration from ACM

Hence, we speculated the following reason. The submersible pump used was driven by 12VDC supplied by a half-wave rectifier circuit without a capacitor to smooth the ripple. Thus, the waveform is an absolute value function of the sine function with 60 Hz, and the main periodicity of the function is 120 Hz. Therefore, the velocity of the water jet was modulated by the frequency of the change in the motor speed of the pump, resulting in the water jet shaking the HFM at 120 Hz.

Second, the external vibration of 120 Hz could excite the normal mode vibration of the HFM. Assuming that the vibration of the HFM with 0% looseness is an elastic beam vibration with the fixed boundary at the both ends, it is calculated that the frequency ratio between the first mode and the second mode is  $f_2/f_1 = 2.76$ , and the ratio between the third mode and the first mode  $f_3/f_1 = 5.40$ , where the frequency ratio is independent of the material constants such as Young's modulus [17]. Table 1 shows the top 5 peaks in height using the results of the power spectral densities of the acceleration from the HSC and ACM methods. Assuming the peak at 29 Hz is as the first mode peak, a small peak at 80 Hz could be recognized the second mode peak because the ratio of 80 Hz and 29 Hz is 2.76. In Table 1, the other combinations satisfying the frequency ratios cannot be found. For example, though the third mode peak must be estimated at 157 Hz, we cannot identify the peak in Table 1 and Figure 12. Moreover, although the general peak pattern is similar, the spectrum of the ACM method shows a different peak pattern in detail

than the HSC method as shown in Table 1. In particular, there is no peak at 120 Hz in the data of the 3% looseness by the HSC method though the peak at 120 Hz by the ACM method can be found at 120 Hz as shown in Table 1. The exactitude of the power spectra estimation depends on the length of the time series [16]. The length (data number) of time series by the HCM method was 1,500, and that by the ACM was 40,000. Thus, the spectra from the data of the ACM method is more reliable than the HSC method. However, observing Figure 6, Figure 12 and Table 1, it seems that those present the similar tendency that the frequency of some major peaks could shift to the lower frequency part as the larger looseness of the HFM. When the looseness of the HFM was increased, the axial compression force along the fiber of the HFM increased. As a result, the fiber bent with the arc shape. It is a kind of buckling phenomena. According to some research reports, a frequency of a normal mode vibration decreased as increasing an axial compression force for an elastic beam [18, 19]. The material of the HFM is a polymer which does not show the simple linear elasticity.

Moreover, the HFM has consisted of the complex porous layers which may show the nonlinear viscoelasticity. Therefore, we have to expect the development of material mechanics for the accurate analysis. In the aim of water engineering, the developed new method using the ACM could clarify the exciting character of the HFM vibration in the model experiment as well as the HSC method. In future work, we will apply the ACM to analyze the vibration phenomena and the relation to the fouling effect in real MBR in which the membrane motion cannot be observed due to the high turbidity.

#### 4. CONCLUSIONS

This study approach was succeeded to measure the vibration of a hollow fiber membrane using a high-speed camera. The measured displacement data of the vibration was converted to the velocity and the acceleration. The displacement and the velocity of the membrane motion increased as the looseness of the membrane increased. And the acceleration of the membrane was directly measured by an accelerometer. It was obtained the just same relation between the acceleration and the looseness as the relation by the high-speed

camera. Both power spectrum densities of the acceleration by the high-speed camera and the accelerometer presented a similar tendency in relation with the looseness. Finally, this study suggested that the accelerometer is a suitable option to measure the membrane vibration in a practical MBR system with high turbidity.

## 5. ACKNOWLEDGMENT

The authors gratefully acknowledge the Nagasaki Industrial Technology Center for vibration experiment. The supply of hollow fiber membranes by Mitsubishi Chemical Co., is also gratefully acknowledged. In addition, we would like to thank to Dr. Rameshprabu Ramaraj for valuable comments.

**Table 1** Major peaks from the power spectrum densities from Figure 6 and Figure 12

High-speed camera (Figure 6)							
Looseness 0 %		Looseness 1%		Looseness 2%		Looseness 3%	
Frequency (Hz)	Peak height (m <sup>2</sup> /sec <sup>3</sup> )	Frequency (Hz)	Peak height (m <sup>2</sup> /sec <sup>3</sup> )	Frequency (Hz)	Peak height (m <sup>2</sup> /sec <sup>3</sup> )	Frequency (Hz)	Peak height (m <sup>2</sup> /sec <sup>3</sup> )
119	1.42	119	0.399	119	0.247	153	0.058
72	0.15	103	0.181	44	0.051	152	0.047
69	0.07	53	0.114	43	0.051	101	0.049
22	0.14	16	0.100	39	0.051	10	0.075
20	0.41	13	0.109	10	0.164	5	0.042
Accelerometer (Figure 12)							
Looseness 0 %		Looseness 1%		Looseness 2%		Looseness 3%	
Frequency (Hz)	Peak height (m <sup>2</sup> /sec <sup>3</sup> )	Frequency (Hz)	Peak height (m <sup>2</sup> /sec <sup>3</sup> )	Frequency (Hz)	Peak height (m <sup>2</sup> /sec <sup>3</sup> )	Frequency (Hz)	Peak height (m <sup>2</sup> /sec <sup>3</sup> )
120	3.679	120	0.443	120	0.267	120	0.472
80	0.114	52	0.129	33	0.143	31	0.108
29	1.291	20	0.780	26	0.047	26	0.058
24	0.094	15	0.150	16	0.032	25	0.061
19	0.298	13	0.314	10	0.333	8	0.314

## REFERENCES

- [1] Liu, N., Zhang, Q., Chin, G. L., Ong, E. H., Lou, J., Kang, C. W. and Jordan, E. Experimental Investigation of Hydrodynamic Behavior in a Real Membrane Bio-Reactor Unit. *Journal of Membrane Science*, 2010; 353(1-2): 122–134.
- [2] Lindeboom, R., Smith, G., Jeison, D. Temmink, H. and van Lier, J. B. Application of High-Speed Imaging as a Novel Tool to Study Particle Dynamics in Tubular Membrane Systems. *Journal of Membrane Science*, 2011; 368(1–2): 95–99.
- [3] Cui, Z. F., Chang S. and Fane A. G. The Use of Gas Bubbling to Enhance Membrane Processes. *Journal of Membrane Science*, 2003; 221(1-2): 1–35.
- [4] Le-Clech P., Chen V. and Fane A. G. Fouling in Membrane Bioreactors Used in Wastewater Treatment. *Journal of Membrane Science*, 2006; 284(1-2): 17–53.
- [5] Meng, F., C., Chae, S.-R., Drews, A., Kraume, M., Shin, H.-S. and Yang, F. Recent Advances in Membrane Bioreactors (Mbrs): Membrane Fouling and Membrane Material. *Water Research*, 2009; 43(6):1489–1512.
- [6] Li, T., Law, A. W. K., Jiang, Y., Harijanto, A. K. and Fane, A. G. Fouling Control of Submerged Hollow Fibre Membrane Bioreactor with Transverse Vibration. *Journal of Membrane Science*, 2016; 505: 216–224.
- [7] Braak, E., Alliet, M., Schetrite, S., & Albasi, C. Aeration and Hydrodynamics in Submerged Membrane Bioreactors. *Journal of Membrane Science*, 2011; 379(1–2): 1–18.
- [8] Ghosh, R. and Cui, Z. F. Mass Transfer in Gas-Sparged Ultrafiltration: Upward Slug Flow in Tubular Membranes. *Journal of Membrane Science*, 1999; 162(1-2), 91–102.

- [9] Kazutaka, T. and Kazuyoshi, Y. Technical Characteristics and Application Summaries of Vibratory Shear Enhanced Processing Membrane Filtration Machine. *Journal of Membrane Science*, 1999; 269(1-2): 1-14.
- [10] Al Akoum, O., Jaffrin, M. Y., Luhui, D., Patrick, P. and Clotilde, V. A Hydrodynamic Investigation of Microfiltration and Ultrafiltration in a Vibrating Membrane Module. *Journal of Membrane Science*, 2002; 197(1-2): 37–52.
- [11] Low, S. C., Han H. J. and Jin W. X. Characteristics of a Vibration Membrane in Water Recovery from Fine Carbon-Loaded Wastewater. *Desalination*, 2004; 160(1): 83-90.
- [12] Miyoshi, T., Yamamura, H., Morita, T. and Watanabe, Y. Effect of Intensive Membrane Aeration and Membrane Flux on Membrane Fouling in Submerged Membrane Bioreactors: Reducing Specific Air Demand Per Permeate (SADp). *Separation and Purification Technology*, 2015; 148: 1-9.
- [13] Sakai, S., Nagaoka, H. and Inoue, M. Measurement of Vibration Patterns of Flat-Sheet Membrane Module Induced by Aeration Using Laser Displacement Meters in MBRs. *Journal of Environmental Engineering Research*, 2014; 70(7): 165-173.
- [14] Inoue, M., Sakai, S., Nagaoka, H. and Morita, Y. Influence of Vibration of Flat-Sheet Membrane Modules on Fouling in MBRs. *Journal of Environmental Engineering Research*, 2015; 71(7), III 437-III 446.
- [15] Richard, W.H. Digital Filter. 3<sup>rd</sup> Edition, ISBN-13: 978-0486650883, New York, 1997.
- [16] Brigham, E.O. The Fast Fourier Transform and Its Application. ISBN: 0-13-307505-2, Englewood Cliffs, New Jersey, 1988.
- [17] Landau, L. D. and Lifshitz, E. M. Theory of Elasticity. 2<sup>nd</sup> edition, ISBN-13: 978-0750626330, Course of Theoretical Physics, 1987.
- [18] Hosseini, H., Ganji, D. D., Abaspour, M. and Kaliji, H. D. Effect of Axial Force on Natural Frequency of Lateral Vibration of Flexible Rotating Shafts. *World Applied Sciences Journal*, 2011; 15(6): 853-859.
- [19] Nawal, H. and Al – Raheimy. Free Vibration of Simply Supported Beam Subjected to Axial Force. *Journal of Babylon University/Engineering Sciences*, 2012; 20(1): 301-314.

# ผลกระทบของอัตราส่วนปกคลุมและระยะระหว่างชั้นของตาข่ายเสริมกำลังแบบสองทิศทางที่มีต่อกำลังอัดของทรายเสริมกำลัง

## Effects of Covering Ratio and Vertical Spacing of Biaxial Geogrid on the Compressive Strength of Reinforced Sand

สุรพันธ์ สุดใจ และ วรัช ก้องกิจกุล\*

Suraphan Sutjai and Warat Kongkitkul

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถนนประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,  
King Mongkut's University of Technology Thonburi

126 Pracha Uthit Road, Bang Mod, Thung Khru, Bangkok 10140

\*E-mail: warat.kon@kmutt.ac.th, Tel: 02-470-9304, Fax: 02-427-9063

### บทคัดย่อ

การออกแบบโครงสร้างดินเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังในปัจจุบัน ใช้ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด ( $T_{ult}$ ) แต่เพียงเท่านั้นสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ แต่กระนั้นดินเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังที่มีค่า  $T_{ult}$  เหมือนกัน แต่มีค่าอัตราส่วนปกคลุม (CR) ที่ไม่เท่ากันอาจมีความแข็งแรงที่แตกต่างกันเป็นอันมาก งานวิจัยนี้ได้ผลิตต้นแบบตาข่ายเสริมกำลังแบบสองทิศทางที่มีค่า CR ที่แตกต่างกันแต่มีค่า  $T_{ult}$  ใกล้เคียงกันด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ โดยใช้โพลีเอทิลีน เทแรปทาเลต โกลโคโมดิฟิเคชั่น (PETG) เป็นวัสดุต้นกำเนิด ในการผลิตได้วางเส้นโครงของตาข่ายเสริมกำลังให้มีระยะห่างแตกต่างกันเพื่อให้ได้ค่า CR ที่แตกต่างกัน 4 ค่า กล่าวคือ ร้อยละ 14, 25, 50 และ 100 ในการนี้ได้ควบคุมความกว้างของเส้นโครงแต่ละเส้นให้มีค่าเท่ากันแต่แปรผันความหนา เพื่อให้ต้นแบบตาข่ายเสริมกำลังที่มีค่า CR แตกต่างกันมีค่า  $T_{ult}$  ใกล้เคียงกัน จากนั้นจึงทำการทดสอบแรงอัดสามแกนกับตัวอย่างทรายแห้งที่ไม่เสริมกำลังและเสริมกำลังด้วยต้นแบบตาข่ายเสริมกำลังที่มีค่า CR เหมือนกันจำนวน 3 ชั้นหรือ 6 ชั้น ผลจากงานวิจัยนี้พบว่า 1. ค่าอัตราส่วนความเค้นสูงสุด ( $R_{peak}$ ) ของตัวอย่างทรายที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังจำนวน 3 ชั้นถูกควบคุมด้วยการวิบัติในส่วนของทราย แต่ค่า  $R_{peak}$  สำหรับกรณีเสริมกำลังจำนวน 6 ชั้นถูกควบคุมด้วยการนิกขาดของตาข่ายเสริมกำลัง 2. การเพิ่มจำนวนชั้นการเสริมกำลังส่งผลให้ค่า  $R_{peak}$  สูงขึ้นเป็นอันมาก 3. ค่า  $R_{peak}$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อ CR มีค่ามากขึ้นจนกระทั่งถึงจุดที่มีความเหมาะสมที่สุด เมื่อเลขจุดนี้ไปแล้ว ค่า  $R_{peak}$  จะลดลงกับค่า CR ที่มากขึ้น ทั้งนี้พฤติกรรมนี้ยังขึ้นอยู่กับจำนวนชั้นการเสริมกำลังอีกด้วย นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้สมการการทำนายค่ากำลังอัดของดินเสริมกำลังจากงานวิจัยในอดีตมาใช้นำพยากรณ์ค่า  $R_{peak}$  ที่ได้จากการทดลองแรงอัดสามแกน ผลการทำนายพบว่า สามารถทำนายค่า  $R_{peak}$  ได้อย่างถูกต้องเมื่อเลือกใช้ค่ามุมเสียดทานภายใน ( $\phi$ ) ของทรายได้อย่างเหมาะสม



## ABSTRACT

In the current design method of a geogrid-reinforced soil structure, only the tensile strength ( $T_{ult}$ ) is taken into account for stability analysis. In fact, the geogrid is also characterised by covering ratio (CR) (i.e., the ratio of the area covered by geogrid on a plane to the area of that plane). A soil structure reinforced with the geogrids having the same  $T_{ult}$  but different CRs would behave differently. In the present study, various prototype biaxial geogrids having different CRs were produced by a 3D printer. The source material was Polyethylene Terephthalate with a Glycol modification (PETG). The strands were arranged in four different patterns such that four different CR values, i.e., 14%, 25%, 50%, and 100%, were achieved. In so doing, the width of each strand was kept constant, while the thickness of each strand was varied so that the geogrids with different CR values had similar rupture tensile strength. A series of triaxial compression tests were performed on uniform air-dried sand specimens, either unreinforced or reinforced with three or six layers of geogrid having the same CR value. The followings were found: i) the peak stress ratio ( $R_{peak}$ ) of sand specimens reinforced with three geogrid layers were controlled by failure of backfill without tensile rupture of reinforcement, while the  $R_{peak}$  of sand specimens reinforced with six geogrid layers by tensile rupture of reinforcement; ii) increasing in the number of geogrid layers increases the  $R_{peak}$ ; and iii)  $R_{peak}$  generally increases with an increase in CR until the optimum value, depending on the number of layer, beyond which  $R_{peak}$  decreases with an increase in CR. An approximate isotropic perfectly plastic solution was used to predict the  $R_{peak}$ . It was found that  $R_{peak}$  is well predicted if relevant equivalent angle of friction ( $\phi$ ) is used.

## 1. บทนำ

ปัจจุบัน ตาข่ายเสริมกำลัง (Geogrid) ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมเทคนิคธรณี เช่น การก่อสร้างกำแพงกันดินเสริมกำลัง คันดินเสริมกำลัง การปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดิน เป็นต้น ตาข่ายเสริมกำลังที่ผลิตขึ้นมาเชิงพาณิชย์มีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับผู้ผลิต โดยทั่วไปแล้ว คุณสมบัติที่สำคัญของตาข่ายเสริมกำลังคือ 1) ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) และ 2) ค่าสติฟเนส (Tensile stiffness) หรือมักจะแสดงด้วยค่าแรงดึงที่สอดคล้องกับค่าความเครียดดึงที่กำหนด อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาในอดีตพบว่า อัตราส่วนปกคลุม (Covering ratio, CR) ซึ่งนิยามโดยอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ที่ปกคลุมด้วยตาข่ายเสริมกำลังต่อพื้นที่ทั้งหมด มีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัดของทรายเสริมกำลังอย่างสำคัญ [1] กล่าวคือ จากการทดสอบกำลังอัดแบบระนาบความเครียด (Plane strain compression, PSC) กับตัวอย่างทรายเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังที่มีอัตราส่วนปกคลุมและค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดที่แตกต่างกันพบว่า กำลังอัดของทรายเสริมกำลังมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ตาข่ายเสริมกำลังที่มีค่าอัตราส่วนปกคลุมและค่ากำลัง

รับแรงดึงสูงสุดมากขึ้น โดยที่อิทธิพลจากอัตราส่วนปกคลุมมีความสำคัญมากกว่าค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด

การศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า หากตาข่ายเสริมกำลังมีค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดและค่าสติฟเนสเท่ากัน กำลังอัดของทรายเสริมกำลังจะมีค่ามากขึ้นเมื่อค่าอัตราส่วนปกคลุมมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การศึกษาดังกล่าวได้ประจักษ์ว่าตาข่ายเสริมกำลังโดยการตัดแปลงจากตาข่ายเสริมกำลังที่มีขายในท้องตลาดในเวลานั้น โดยการตัดขยายช่องเปิด (Aperture) เพื่อลดค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดและลดค่าอัตราส่วนปกคลุม หรือใช้การเสริมความหนาหรือเพิ่มจำนวนของเส้นโครง (Strand) ของตาข่ายเสริมกำลัง เพื่อเพิ่มค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดและ/หรือเพิ่มค่าอัตราส่วนปกคลุมโดยการเชื่อมด้วยกาวซีเมนต์ ซึ่งอาจส่งผลต่อความสม่ำเสมอของตาข่ายเสริมกำลังที่ใช้ นอกจากนี้ การวิบัติของทรายเสริมกำลังที่พบในการศึกษาดังกล่าวไม่ได้เกิดจากการนิกาบของตาข่ายเสริมกำลังเลย ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากวิธีการเตรียมตาข่ายเสริมกำลังดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้



ตารางที่ 1 สมบัติกายภาพและสมบัติดัชนีของทราย

Specific gravity, $G_s$	Coefficient of uniformity, $C_u$	Coefficient of curvature, $C_c$	Max. void ratio, $e_{max}$	Min. void ratio, $e_{min}$	Mean diameter, $D_{50}$ (mm)
2.64	1.87	0.94	1.033	0.678	0.285

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของตาข่ายเสริมกำลัง

Shape	Covering ratio, CR (%)	Thickness of each strand, t (mm)	Strand spacing, s (mm)	Tensile strength, $T_{ult}$ (kN/m)	Measured mass of geogrid, m (g/sheet)
Biaxial	14	7.6	52.50	10.42	12.21
Biaxial	25	3.7	26.25	10.15	12.12
Biaxial	50	1.8	11.67	11.11	12.17
Full sheet	100	0.4	-	9.60	12.06

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบอัตราส่วนปกคลุมของตาข่ายเสริมกำลังและระยะห่างระหว่างชั้นของตาข่ายเสริมกำลังที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของทรายเสริมกำลังโดยใช้การทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial compression test) ตาข่ายเสริมกำลังที่ใช้เป็นแบบสองทาง (Biaxial) ผลิตขึ้นจากเครื่องพิมพ์สามมิติ โดยใช้โพลีเอทีลีน เทเรพทาเลต ไกลโคโมดิฟิเคชัน (Polyethylene Terephthalate with a Glycol modification, PETG) เป็นวัสดุต้นกำเนิด ด้วยวิธีนี้จึงสามารถผลิตตาข่ายเสริมกำลังที่มีค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดและค่าสตีเฟนสเหมือนกัน แต่มีค่าอัตราส่วนปกคลุมแตกต่างกันได้ ตัวอย่างทรายจะถูกเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังที่ผลิตขึ้นด้วยวิธีดังกล่าวจำนวน 3 ชั้นหรือ 6 ชั้น แล้วจึงนำไปทดสอบหาลำดับรับแรงอัดเพื่อหาค่าอัตราส่วนปกคลุมที่เหมาะสมที่สุด นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังได้ประยุกต์ใช้สมการการทำนายค่ากำลังอัดของดินเสริมกำลังจากงานวิจัยในอดีต [2] มาใช้ทำนายค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของตัวอย่างทรายเสริมกำลังอีกด้วย

## 2. วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

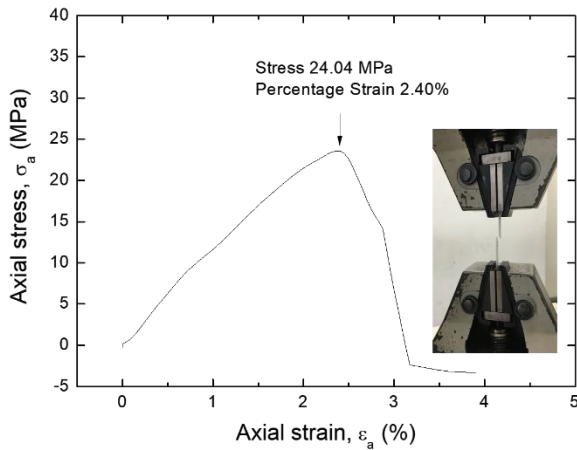
ในการทดสอบแรงอัดแบบสามแกนใช้ตัวอย่างที่เตรียมจากทรายแห้ง (Air-dried) ทั้งกรณีที่ไม่เสริมกำลังและเสริมกำลัง สมบัติของวัสดุที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างมีดังต่อไปนี้

### 2.1 ทราย

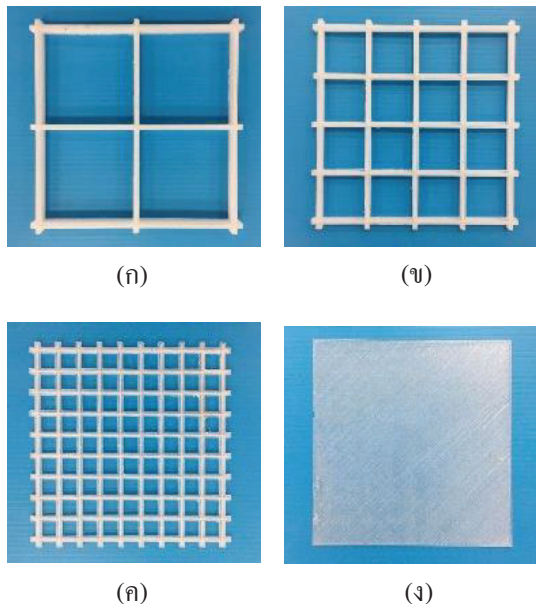
ทรายที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นทรายจากแม่น้ำแม่กลอง จ.ราชบุรี ก่อนนำมาใช้งานได้นำมาผ่านกระบวนการล้างด้วยน้ำประปาเพื่อขจัดอนุภาคฝุ่นออกจนสะอาด อบให้แห้งเพื่อขจัดสารอินทรีย์ แล้วจึงนำไปร่อนผ่านตะแกรง ส่วนที่นำมาใช้งานเลือกมาเฉพาะส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 (0.424 มม.) แต่ค้างตะแกรงเบอร์ 100 (0.150 มม.) ทรายที่ได้จากขั้นตอนสุดท้ายมีการกระจายขนาดอนุภาคแบบสม่ำเสมอ (Uniform graded) ตารางที่ 1 แสดงสมบัติกายภาพและสมบัติดัชนีของทรายภายหลังกระบวนการคัดเลือก

### 2.2 ตาข่ายเสริมกำลัง

ตาข่ายเสริมกำลังที่ใช้สำหรับการเตรียมตัวอย่างทรายเสริมกำลังในงานวิจัยนี้ผลิตขึ้นเองจากเครื่องพิมพ์สามมิติ (3D printer) ยี่ห้อ Flashforge รุ่น Creator Pro 3D Printer โดยใช้โพลีเอทีลีน เทเรพทาเลต ไกลโคโมดิฟิเคชัน (PETG) เป็นวัสดุต้นกำเนิด วัสดุชนิดนี้มีความยืดหยุ่นสูง สามารถรับแรงกระแทกได้ดี เหนียว ขึ้นรูปได้ง่าย หดตัวต่ำ [3] ซึ่งสมบัติเหล่านี้ความสอดคล้องกับสมบัติของตาข่ายเสริมกำลังที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้งานเชิงพาณิชย์อยู่จริง จากการทดสอบแรงดึงกับตัวอย่าง PETG ตามมาตรฐาน ASTM D638 [4] (รูปที่ 1) ได้ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 24 MPa



รูปที่ 1 กำลังรับแรงดึงของ PETG



รูปที่ 2 ตาข่ายเสริมกำลังที่ผลิตจากวัสดุ PETG ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติที่มีค่าอัตราส่วนปกคลุมเท่ากับร้อยละ (ก) 14, (ข) 25, (ค) 50, และ (ง) 100

ในการผลิตตาข่ายเสริมกำลังได้ออกแบบให้มีค่าอัตราส่วนปกคลุมแตกต่างกัน 4 ค่า กล่าวคือ ร้อยละ 14, 25, 50 และ 100 ตามลำดับ แต่ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด ( $T_{ult}$ ) ของตาข่ายเสริมกำลังทุกแผ่นมีค่าใกล้เคียงกัน หรือมีค่ามวล (m) ใกล้เคียงกันดังแสดงในตารางที่ 2 ตาข่ายเสริมกำลังที่มีค่าอัตราส่วนปกคลุมร้อยละ 100 จะมีลักษณะเป็นแบบเต็มพื้นหรือไม่มีช่องเปิด ตาข่าย

เสริมกำลังแต่ละแผ่นมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 120 mm ดังแสดงในรูปที่ 2 ความกว้างของเส้นโครงของตาข่ายเสริมกำลังที่มีค่าอัตราส่วนปกคลุมไม่เท่ากันมีค่าเท่ากัน ๆ ที่ 3 mm ส่วนความหนาของเส้นโครงมีค่าขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนปกคลุมที่ได้กำหนดล่วงหน้าไว้เพื่อให้กำลังรับแรงดึงสูงสุดของตาข่ายเสริมกำลังที่มีค่าอัตราส่วนปกคลุมแตกต่างกันมีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงในตารางที่ 2

### 3. วิธีการทดสอบ

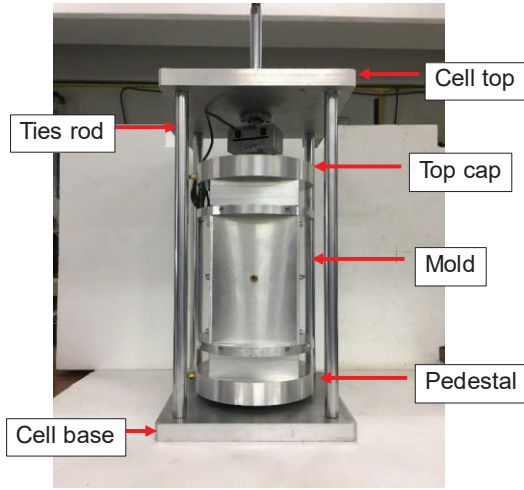
#### 3.1 เซลล์กดตัวอย่างและโมลเตรียมตัวอย่าง

ในงานวิจัยนี้ ได้พัฒนาเซลล์กดตัวอย่างและโมลเตรียมตัวอย่าง (รูปที่ 3) ขึ้นมาใหม่เป็นการเฉพาะ ในการออกแบบได้คำนึงถึงขนาดตัวอย่างที่สามารถเป็นตัวแทนของโครงสร้างดินเสริมกำลังที่ก่อสร้างจริงในสนาม ซึ่งตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะมีความเป็นตัวแทนที่ดีขึ้น และความสามารถของเครื่องกดที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่เกินไปอาจมีกำลังรับแรงอัดมากกว่าความสามารถของเครื่องกด งานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้ตัวอย่างรูปทรงปรีซึมที่มีขนาดหน้าตัด 120 mm x 120 mm สูง 240 mm การเตรียมตัวอย่างจะทำการตั้งโมลลงบนฐาน (Pedestal) ของเซลล์กดตัวอย่าง เซลล์กดตัวอย่างจะมีชุดลูกปืนติดตั้งอยู่ทางด้านบนเพื่อควบคุมทิศทางของแรงกดอยู่ในแนวเดียวกันกับทิศทางหลักของตัวอย่างเสมอ

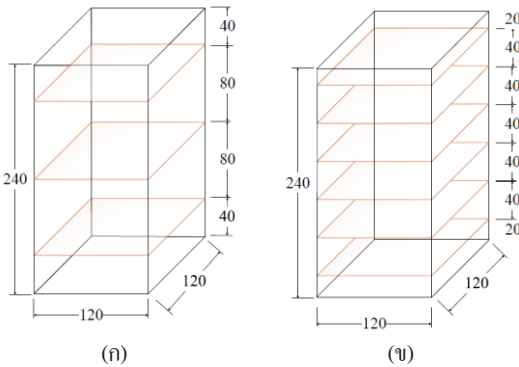
#### 3.2 วิธีการเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างเริ่มจากการหล่อลื่นบริเวณหัวตัวอย่างด้านบนและด้านล่างด้วยการทาจารบีซิลิโคนสุญญากาศ (High-vacuum silicone grease) หนา 50 ไมครอนลงบนผิวของฝาบน (Top cap) และฐาน (Pedestal) แล้ววางแผ่นยางพารา (Latex rubber sheet) ที่มีความหนา 0.3 mm ลงบนผิวจารบี [5] จากนั้นจึงนำเมมเบรนไปหุ้มกับฐานของเซลล์กดตัวอย่างแล้วจึงนำโมลไปประกอบล้อมรอบ จากนั้นจึงนำอีกปลายหนึ่งของเมมเบรนมาหุ้มปากโมลบริเวณด้านบนแล้วจึงให้แรงกด

เท่ากับ -40 kPa ต่อ โมล เพื่อให้ผิวเมมเบรนติดกับผิว  
ด้านในของโมล



รูปที่ 3 เซลล์กดตัวอย่าง



Unit : mm

รูปที่ 4 ระยะระหว่างชั้นของตาข่ายเสริมกำลัง  
(ก) 3 ชั้น และ (ข) 6 ชั้น

การบรรจุทรายลงในโมลจะใช้วิธีการโปรยทรายผ่าน  
เครื่องมือร่อนผ่านตะแกรงหลายชั้น (Multiple-sieving  
pluviating machine) เพื่อควบคุมอัตราการโปรยและ  
ความสม่ำเสมอของทราย [6] ในงานวิจัยนี้พบว่าค่าความ  
หนาแน่นสัมพัทธ์ของตัวอย่างที่เตรียมได้มีค่าประมาณ  
ร้อยละ 90–95 การโปรยทรายจะโปรยจนระดับผิวทราย  
สูงกว่าระดับที่ต้องการเล็กน้อย แล้วจึงดูดทรายส่วนที่อยู่  
เหนือระดับที่ต้องการนี้ด้วยการดูดออกผ่านท่อที่ควบคุม  
ระดับความสูงปากท่อจนได้ระดับที่ต้องการ วิธีการนี้จะ

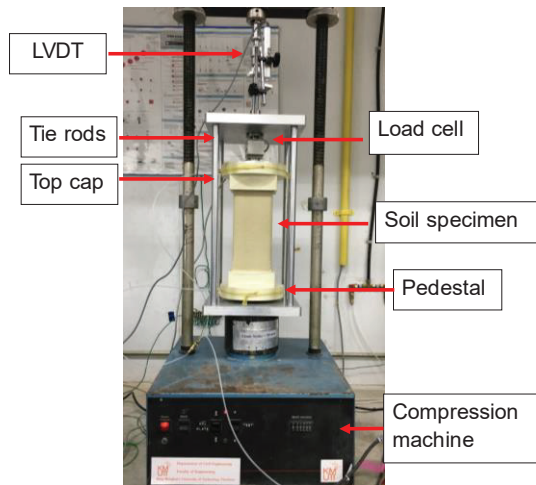
ทำให้ได้ชั้นทรายที่มีผิวได้ระดับและมีความหนาแน่นอย่าง  
สม่ำเสมอ [7] หลังจากนั้นจึงวางตาข่ายเสริมกำลังลงบน  
ผิวทรายที่ได้เตรียมไว้ แล้วจึงทำการโปรยทรายปิดทับหนา  
ประมาณ 1 cm แล้วจึงทำการกระทุ้งด้วยค้อนยางกับ  
ท่อนไม้จำนวน 25 ครั้ง เพื่อจัดการหลวมตัวของทรายที่  
อยู่ภายในช่องเปิดของตาข่ายเสริมกำลัง หลังจากนั้น  
เตรียมชั้นต่อ ๆ ไปเหมือนกับชั้นแรกให้ครบตามจำนวน  
ชั้นที่ต้องการ

ในงานวิจัยนี้ได้เตรียมตัวอย่างทรายเสริมกำลังด้วย  
ตาข่ายเสริมกำลังจำนวน 3 ชั้นหรือ 6 ชั้นดังแสดงในรูปที่  
4 ซึ่งมีระยะห่างระหว่างชั้นการเสริมกำลัง (h) เท่ากับ 80  
mm และ 40 mm ตามลำดับ ความกว้างของตาข่ายเสริม  
กำลัง (d) ทั้งสองทิศทางมีค่าเท่ากับ 120 mm ดังนั้นจะมี  
ค่าอัตราส่วนความหนาแน่นการเสริมกำลัง (d/h) เท่ากับ  
1.5 และ 3.0 ตามลำดับ เมื่อเตรียมทรายชั้นสุดท้ายเสร็จ  
แล้วทำการประกบฝาบนกับตัวอย่างแล้วย้ายปลาย  
เมมเบรนมาหุ้มที่ฝาบนและซีลตัวอย่าง จากนั้นจึงลด  
แรงดูดที่ให้กับโมลลงจนเป็นศูนย์ แล้วจึงให้แรงดูดเข้าไป  
ภายในตัวอย่างผ่านทางท่อที่บริเวณฝาบนและฐาน ให้มีค่า  
เท่ากับ -30 kPa ซึ่งถูกควบคุมให้คงที่ตลอดการทดสอบ  
จากนั้นจึงแกะ โมลออก

### 3.3 วิธีการทดสอบ

เมื่อเตรียมตัวอย่างแล้วเสร็จ จึงนำเซลล์กดตัวอย่าง  
พร้อมตัวอย่างไปติดตั้งกับเครื่องกดแล้วทำการต่อเพลลาของ  
เซลล์กดตัวอย่างเข้ากับเพลลาของเครื่องกดดังแสดงในรูปที่  
5 ในงานวิจัยนี้ใช้เซลล์วัดแรง (Load cell) ซึ่งติดตั้ง  
บริเวณเหนือฝาบนเพื่อวัดแรงกดที่กระทำต่อตัวอย่าง  
เซนเซอร์วัดระยะกระจัด (Displacement sensor) ซึ่ง  
ติดตั้งกับเพลลาของเซลล์กดตัวอย่างเพื่อวัดการเสียรูปของ  
ตัวอย่างในแนวตั้ง และทรานสดิวเซอร์วัดแรงดัน  
(Pressure transducer) ซึ่งติดตั้งกับท่ออากาศที่เชื่อมสู่  
ภายในตัวอย่างเพื่อวัดแรงดันโอบริด (แรงดูด) เมื่อทำการ  
ติดตั้งและตั้งค่าปรับเทียบเครื่องมือวัดตามที่กล่าวมา  
ข้างต้นแล้วเสร็จ จึงทำการกดตัวอย่างด้วยอัตราการ

เคลื่อนที่เท่ากับ 0.3 มิลลิเมตรต่อนาทีจนกระทั่งตัวอย่างวิบัติ



รูปที่ 5 การเตรียมตัวอย่างและติดตั้งเครื่องมือ

### 3.4 พารามิเตอร์ความเค้นและพารามิเตอร์ความเครียด

งานวิจัยนี้นำเสนอค่ากำลังรับแรงอัดของทรายเสริมกำลังด้วยพารามิเตอร์อัตราส่วนความเค้นเฉลี่ย (Average stress ratio, R) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$R = \frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{\sigma_c + q}{\sigma_c} = \frac{\sigma_c + (F/A_0)}{\sigma_c} \quad (1)$$

เมื่อ q คือความเค้นเบี่ยงเบน (Deviator stress, kPa) F คือแรงกดที่วัดได้จากเซลล์วัดแรง (kN) A<sub>0</sub> คือพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของตัวอย่าง (0.12 x 0.12 m<sup>2</sup>) และ σ<sub>c</sub> คือแรงดันโอบรัดที่ให้กับตัวอย่าง (30 kPa)

ส่วนค่าการเสียรูปของตัวอย่างถูกนำเสนอโดยค่าพารามิเตอร์ความเครียดแนวแกนเฉลี่ย (Average axial strain, ε<sub>a</sub>) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2)

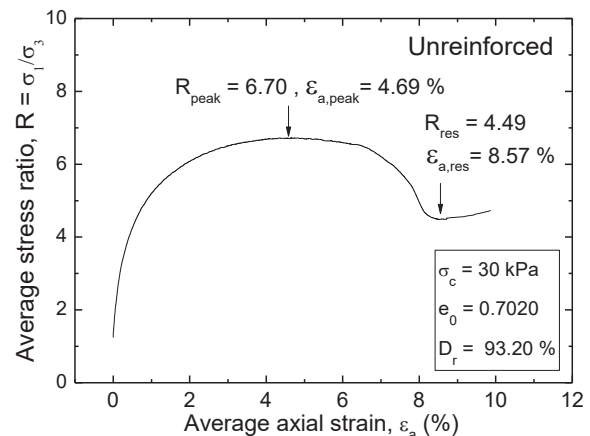
$$\epsilon_a = -\Delta H/H_0 \quad (2)$$

เมื่อ ΔH คือการเปลี่ยนแปลงความสูงของตัวอย่างซึ่งวัดได้จากเซนเซอร์วัดระยะกระจัด และ H<sub>0</sub> คือความสูงเริ่มต้นของตัวอย่าง (240 mm)

## 4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์

### 4.1 กำลังรับแรงอัดของทรายที่ไม่เสริมกำลัง

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเค้นเฉลี่ย (R) กับความเครียดแนวแกนเฉลี่ย (ε<sub>a</sub>) ของตัวอย่างทรายที่ไม่เสริมกำลัง จากรูปดังกล่าวจะเห็นได้ว่าค่า R เพิ่มขึ้นตามค่า ε<sub>a</sub> จนกระทั่งจุดสูงสุด หรือแสดงพฤติกรรมแข็งขึ้นด้วยความเครียด (Strain-hardening) ที่จุดสูงสุดนี้ อัตราส่วนความเค้นเฉลี่ยสูงสุด (R<sub>peak</sub>) เท่ากับ 6.70 และค่า ε<sub>a</sub> เท่ากับร้อยละ 4.69 จากนั้น ค่า R จะลดลงตามค่า ε<sub>a</sub> จนกระทั่งจุดต่ำสุด หรือแสดงพฤติกรรมอ่อนตัวลงด้วยความเครียด (Strain-softening) เมื่อเลยจุดนี้ไปแล้วค่า R จะมีแนวโน้มคงที่กับการเพิ่มขึ้นของค่า ε<sub>a</sub> ที่จุดต่ำสุดนี้จะนิยามค่า R เป็นค่าอัตราส่วนความเค้นคงเหลือ (R<sub>res</sub>) มีค่าเท่ากับ 4.49 และค่า ε<sub>a</sub> ที่จุดนี้มีค่าเท่ากับร้อยละ 8.57

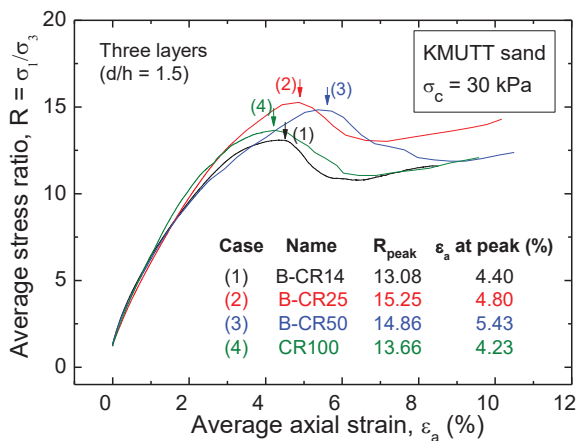


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง R กับ ε<sub>a</sub> จากตัวอย่างทรายที่ไม่เสริมกำลัง

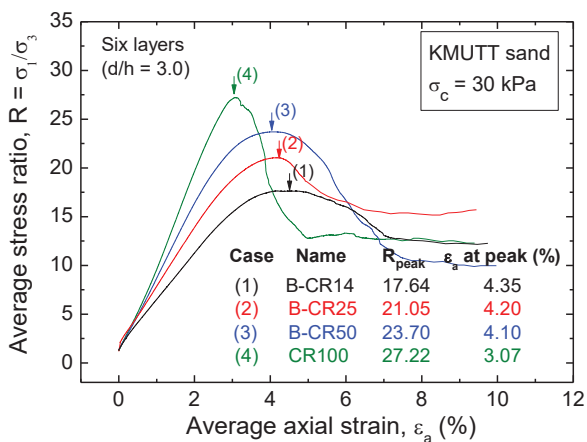
เมื่อสมมติให้ค่าความเชื่อมแน่น (Cohesion) ของทรายที่ใช้ทดลองมีค่าเท่ากับศูนย์ มุมเสียดทานภายใน (φ) จะสามารถคำนวณได้จากค่า R ดังแสดงสมการที่ 3

$$\phi = \sin^{-1} \left( \frac{R-1}{R+1} \right) \quad (3)$$

เมื่อนำค่า  $R_{peak}$  และ  $R_{res}$  มาคำนวณหาค่ามุมเสียดทานภายในตามสมการที่ 3 จะได้ว่า  $\phi_{peak} = 47.8^\circ$  และ  $\phi_{res} = 39.5^\circ$  ตามลำดับ ค่า  $\phi$  ที่ได้ดังกล่าวมีค่าสอดคล้องกันกับมุมเสียดทานภายในของทราย Toyoura ที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์เดียวกันจากการศึกษาของ Wu et al. (2008) [8]



(ก)



(ข)

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $R$  กับ  $\epsilon_a$  จากตัวอย่างทรายที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังจำนวน

(ก) 3 ชั้น และ (ข) 6 ชั้น

#### 4.2 กำลังรับแรงอัดของทรายที่เสริมกำลัง

รูปที่ 7ก และ 7ข แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $R$  กับค่า  $\epsilon_a$  ที่ได้จากตัวอย่างทรายที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังที่มีค่าอัตราส่วนปกคลุมแตกต่างกัน (ร้อยละ 14, 25, 50 และ 100) จำนวน 3 ชั้น (รูปที่ 4ก) และ

จำนวน 6 ชั้น (รูปที่ 4ข) ตามลำดับ จากรูปทั้งสองจะเห็นได้ว่า

1. ทรายเสริมกำลังแสดงพฤติกรรมแข็งขึ้นด้วยความเครียดจนกระทั่งแสดงค่า  $R$  สูงสุดแล้วจึงแสดงพฤติกรรมอ่อนตัวลงด้วยความเครียดในลักษณะที่คล้ายคลึงกับทรายที่ไม่เสริมกำลัง

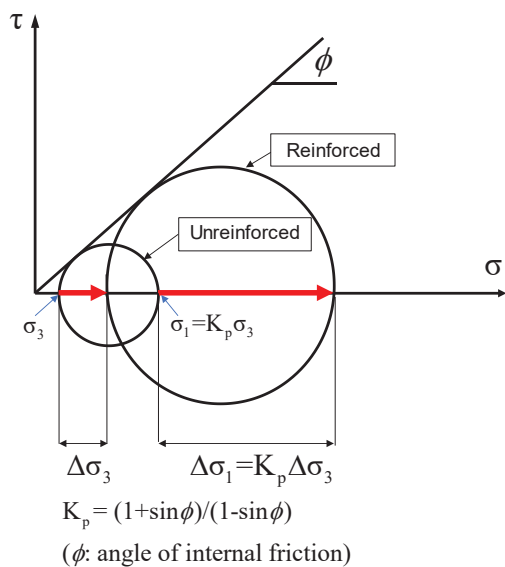
ตารางที่ 3 ค่า  $R_{peak}$ ,  $\epsilon_{a,peak}$  และ SR ของตัวอย่างทรายที่ไม่เสริมกำลังและที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังที่มีค่า CR ต่างกัน

Test name	No. of layer	Peak stress ratio, $R_{peak}$	Axial strain at peak, $\epsilon_{a,peak}$ (%)	Strength ratio, SR
Unreinforced	-	6.70	4.69	1.00
B-CR14-3L	3	13.08	4.40	1.95
B-CR25-3L	3	15.25	4.80	2.28
B-CR50-3L	3	14.86	5.43	2.22
CR100-3L	3	13.66	4.23	2.04
B-CR14-6L	6	17.64	4.35	2.63
B-CR25-6L	6	21.05	4.20	3.14
B-CR50-6L	6	23.70	4.10	3.54
CR100-6L	6	27.22	3.07	4.06

2. ค่า  $R_{peak}$  ของทรายที่เสริมกำลังมีค่าสูงกว่าของทรายที่ไม่เสริมกำลังเป็นอันมาก ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่า  $R_{peak}$  และค่า  $\epsilon_a$  จากตัวอย่างทรายที่ไม่เสริมกำลังและที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังจำนวน 3 ชั้นและ 6 ชั้น ค่าอัตราส่วนกำลัง (Strength ratio, SR) ที่แสดงในตารางที่ 3 นิยามจากอัตราส่วนระหว่างค่า  $R_{peak}$  ของทรายที่เสริมกำลังต่อค่า  $R_{peak}$  ของทรายที่ไม่เสริมกำลัง (เท่ากับ 6.70) จากผลการทดสอบและวิเคราะห์พบว่า ค่า  $R_{peak}$  ที่สูงที่สุดของทรายที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังจำนวน 3 ชั้นและ 6 ชั้นมีค่าเท่ากับ 15.25 (SR = 2.28) เมื่อ CR เท่ากับร้อยละ 25 และ 27.22 (SR = 4.06) เมื่อ CR เท่ากับร้อยละ 100 ตามลำดับ ตาข่ายเสริมกำลังสามารถทำให้กำลังอัดของ



ทรายที่เสริมกำลังมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นอันมากได้ เพราะเมื่อรับแรงอัดกระทำในแนวตั้ง ตัวอย่าง ทรายจะขยายตัวด้านข้างในแนวราบ (Poisson's effect) ทำให้ตาข่ายเสริมกำลังที่เรียงตัวอยู่ในแนวราบเช่นกันยืดตัวออก จึงเกิดแรงดึงขึ้นในตาข่ายเสริมกำลัง ในทางกลับกัน แรงดึงที่เกิดขึ้นในตาข่ายเสริมกำลังนี้ก็ถ่ายกลับไปสู่ทรายซึ่งจะทำให้แรงดันโอบรัดที่กระทำต่อ ทรายมีค่ามากขึ้น ( $\Delta\sigma_3$  ในรูปที่ 8) จึงทำให้กำลังรับแรงอัดในแนวตั้งมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นอันมาก ( $\Delta\sigma_1$  ในรูปที่ 8) จากรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของค่า  $\Delta\sigma_1$  มีค่ามากกว่าค่า  $\Delta\sigma_3$  เป็นอันมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังในดิน สามารถเพิ่มกำลังอัดได้อย่างมีประสิทธิภาพมาก



**รูปที่ 8** หลักการการเพิ่มกำลังอัดของทรายเสริมกำลัง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของแรงดันโอบรัดจากแรงดึงที่เกิดขึ้นในตาข่ายเสริมกำลัง

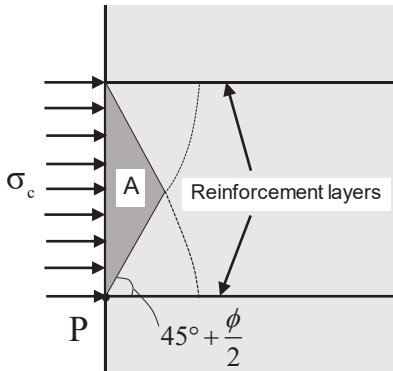
- ค่า  $R_{peak}$  ของทรายที่เสริมกำลังมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้นของตาข่ายเสริมกำลัง หรือเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นการเสริมกำลัง ( $d/h$ ) ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อค่า  $d/h$  เพิ่มขึ้น จะได้ว่า 1. การถ่ายแรงดึงจากตาข่ายเสริมกำลังไปสู่การพัฒนา

แรงดันโอบรัดต่อทรายมีประสิทธิภาพดีขึ้น และ 2. ขนาดของบริเวณในทรายที่แรงดึงจากตาข่ายเสริมกำลังไม่สามารถเพิ่มแรงดันโอบรัด (บริเวณ A ในรูปที่ 9, [7]) เล็กลง บริเวณนี้เรียกว่าเขตอันตราย (Deterministic zone) ใน ทฤษฎีพลาสติก

- เมื่อตัวอย่างทรายที่เสริมกำลังแสดงค่า  $R_{peak}$  แล้วก็จะเกิดพฤติกรรมอ่อนตัวลงด้วยความเครียดสำหรับทั้งตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังทั้งแบบ 3 ชั้นและแบบ 6 ชั้น แต่กระนั้น หากเปรียบเทียบการลดลงของค่า  $R$  จากจุดสูงสุด ไปสู่จุดที่ค่า  $R$  มีค่าคงที่กับความเครียดที่เพิ่มขึ้นแล้วจะพบว่า การลดลงของค่า  $R$  ( $\Delta R$ ) ในช่วงพฤติกรรมอ่อนตัวลงด้วยความเครียดของตัวอย่างทรายที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังจำนวน 3 ชั้นน้อยกว่า ยกตัวอย่างเช่นสำหรับกรณี CR เท่ากับร้อยละ 100 ค่า  $R_{peak}$  มีค่าเท่ากับ 13.66 และ 27.22 และค่า  $R_{res}$  มีค่าเท่ากับ 12.09 และ 12.30 สำหรับกรณีที่เสริมกำลังจำนวน 3 และ 6 ชั้น ตามลำดับ ดังนั้นค่า  $\Delta R$  จะมีค่าเท่ากับร้อยละ 19.5 และ 54.0 ตามลำดับ ค่า  $\Delta R$  ที่แตกต่างกันเป็นอันมากสำหรับตัวอย่างทรายเสริมกำลังด้วยจำนวนชั้นที่แตกต่างกันนี้ มีลักษณะตามการวิบัติที่แตกต่างกัน กล่าวคือ สำหรับตัวอย่างทรายที่เสริมกำลังจำนวน 3 ชั้นพบว่า การวิบัติเกิดขึ้นในบริเวณที่เป็นทรายโดยเริ่มจากการก่อตัวของแถบเฉือน (Shear band) ที่บริเวณปลายด้านข้างของตาข่ายเสริมกำลัง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าบริเวณนี้อยู่ในเขตอันตราย (รูปที่ 9) ซึ่งไม่ได้รับแรงดันโอบรัดส่วนเพิ่มจากแรงดึงในตาข่ายเสริมกำลัง แต่สำหรับตัวอย่างทรายที่เสริมกำลังจำนวน 6 ชั้น พบว่า การวิบัติเกิดขึ้นจากการฉีกขาด (Rupture) ของตาข่ายเสริมกำลัง ความแตกต่างของพฤติกรรมการวิบัติของทรายเสริมกำลังนี้



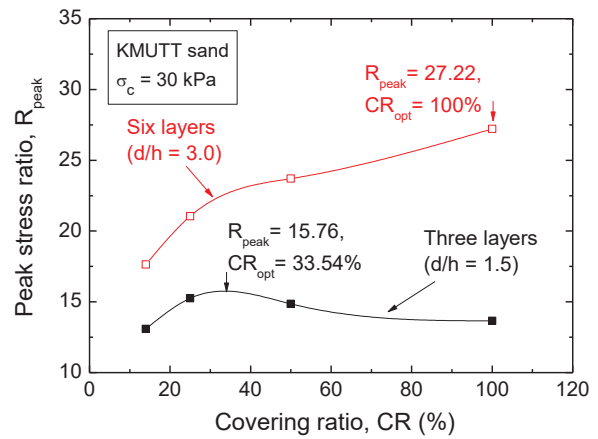
ส่งผลให้ต้องใช้สมการการทำนายในวิธีการประมาณค่ากำลังอัดสูงสุดที่แตกต่างกัน ดังจะได้อธิบายต่อไป



รูปที่ 9 เขตอันตราย (Deterministic zone) ในทรายเสริมกำลัง

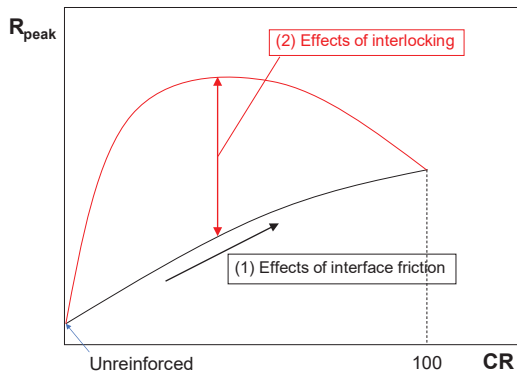
#### 4.3 อิทธิพลของอัตราส่วนปกคลุมต่อกำลังอัด

การถ่ายแรงดึงจากตาข่ายเสริมกำลังไปสู่ทรายมีอยู่ 2 ส่วน กล่าวคือ 1. แรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างทรายที่อยู่บนหรือล่างเส้นโครงของตาข่ายเสริมกำลังกับตาข่ายเสริมกำลัง (Interface friction) และ 2. การเชื่อมประสานกันระหว่างทรายที่อยู่ในช่องเปิดของตาข่ายกับตาข่ายเสริมกำลัง (Interlocking) ตาข่ายเสริมกำลังที่มีค่า CR แตกต่างกันจะมีการถ่ายแรงดึงที่มาจากสองส่วนนี้ในสัดส่วนที่ไม่เท่ากัน ส่วนตาข่ายที่มีค่า CR เท่ากับร้อยละ 100 จะมีการถ่ายแรงดึงที่มาจากส่วนแรกเท่านั้น เพราะไม่มีช่องเปิด รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $R_{peak}$  กับค่า CR จากการตัวอย่างทรายเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังจำนวน 3 ชั้น และ 6 ชั้น จากรูปนี้จะเห็นได้ว่า

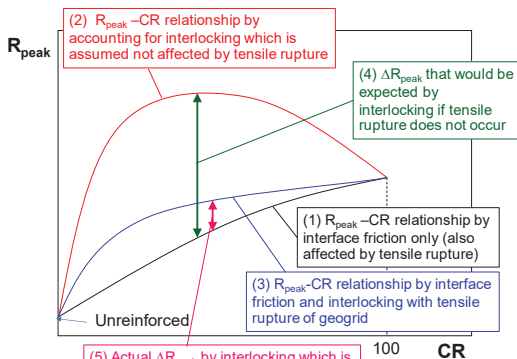


รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $R_{peak}$  กับค่า CR ของตัวอย่างทรายที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังจำนวน 3 ชั้น และ 6 ชั้น

- สำหรับกรณีเสริมกำลังจำนวน 3 ชั้น ค่า  $R_{peak}$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า CR จนไปถึงจุดที่มีค่า  $R_{peak}$  มากที่สุดเท่ากับ 15.76 ที่ค่า CR เท่ากับร้อยละ 33.54 หลังจากนั้น ค่า  $R_{peak}$  ก็จะค่อย ๆ ลดลงเมื่อค่า CR เพิ่มขึ้นจนเข้าสู่ร้อยละ 100 พฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายได้โดยอ้างอิงกับแนวคิดที่แสดงรูปที่ 11ก กล่าวคือ เมื่อค่า CR เพิ่มขึ้น การถ่ายแรงดึงจากตาข่ายเสริมกำลังไปสู่ทรายจาก Interface friction จะมากขึ้นเพราะพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างทรายกับเส้นโครงของตาข่ายเสริมกำลังมีมากขึ้น (ดังระบุด้วย (1) ในรูปที่ 11ก) ในอีกทางหนึ่ง อิทธิพลจาก Interlocking มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วกับค่า CR ในช่วงแรกจนกระทั่งถึงจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด หลังจากนั้น อิทธิพลส่วนนี้จะลดลงจนเป็นศูนย์เมื่อค่า CR เท่ากับร้อยละ 100 (ดังระบุด้วย (2) ในรูปที่ 11ก)



(ก)



(ข)

รูปที่ 11 อิทธิพลของแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส (Interface friction) และการเชื่อมประสานกัน (Interlocking) ระหว่างทรายกับตาข่ายเสริมกำลังที่แปรผันกับค่า CR สำหรับกรณี (ก)  $R_{peak}$  ถูกควบคุมด้วยการวิบัติในส่วนของทราย (กรณีเสริมกำลัง 3 ชั้น) และ (ข)  $R_{peak}$  ถูกควบคุมด้วยการฉีกขาดของตาข่ายเสริมกำลัง (กรณีเสริมกำลัง 6 ชั้น)

2. สำหรับกรณีเสริมกำลังจำนวน 6 ชั้น ค่า  $R_{peak}$  มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามค่า CR จากร้อยละ 14 ไปสู่ร้อยละ 100 พฤติกรรมนี้แตกต่างจากกรณีเสริมกำลังจำนวน 3 ชั้น เนื่องจากค่า  $R_{peak}$  ถูกควบคุมด้วยการวิบัติจากการฉีกขาดของตาข่ายเสริมกำลัง พฤติกรรมที่พบสำหรับกรณีเสริมกำลังจำนวน 6 ชั้นสามารถอธิบายได้โดยอ้างอิงกับแนวคิดที่แสดงรูปที่ 11ข กล่าวคือ ถ้าการถ่ายแรงดึงได้รับอิทธิพลจาก Interface friction เพียงอย่างเดียว ค่า  $R_{peak}$  จะเพิ่มขึ้นกับ

ค่า CR อย่างต่อเนื่องจนกระทั่ง CR เท่ากับร้อยละ 100 (ดังระบุด้วย (1) ในรูปที่ 11ข) ในกรณีที่พิจารณาอิทธิพลจาก Interlocking ร่วมด้วย ค่า  $R_{peak}$  จะเพิ่มขึ้นกับค่า CR จนกระทั่งถึงจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดแล้วจึงมีค่าลดลง (ดังระบุด้วย (2) ในรูปที่ 11ข) แต่ทั้งอิทธิพลจาก Interface friction และ Interlocking นั้นจะได้รับผลกระทบจากการฉีกขาดของตาข่ายเสริมกำลังด้วย ดังนั้นความสัมพันธ์  $R_{peak} - CR$  ที่ได้จริงจากการทดลองจะต่ำลง (ดังระบุด้วย (3) ในรูปที่ 11ข) ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าความแตกต่างของ  $R_{peak}$  ( $\Delta R_{peak}$ ) ที่ได้รับอิทธิพลจาก Interlocking หากไม่ได้รับอิทธิพลจากการฉีกขาดของตาข่ายจะมีค่าสูงมาก (ดังระบุด้วย (4) ในรูปที่ 11ข) อย่างไรก็ตาม ณ ขณะที่  $\Delta R_{peak}$  กำลังพัฒนาอยู่นั้น เกิดการฉีกขาดของตาข่ายเสริมกำลังขึ้น ซึ่งปัจจัยนี้ควบคุมค่า  $R_{peak}$  ของทรายเสริมกำลัง (ดังระบุด้วย (5) ในรูปที่ 11ข)

## 5. การทำนายค่ากำลังอัดของทรายเสริมกำลัง

Tatsuoka (2004) [2] เสนอชุดสมการสำหรับการทำนายกำลังอัดของดินเสริมกำลังจากค่ามุมเสียดทานภายในของดิน ( $\phi$ ) มุมเสียดทานระหว่างตาข่ายเสริมกำลังกับดิน ( $\delta$ ) ความหนาแน่นการเสริมกำลัง ( $d/h$ ) และกำลังรับแรงดึงของตาข่าย ( $T_{ult}$ ) โดยได้แบ่งการทำนายค่ากำลังอัดเป็นสองรูปแบบตามลักษณะการวิบัติของดินเสริมกำลังที่แตกต่างกัน กล่าวคือ 1. กรณีที่กำลังอัดถูกควบคุมด้วยการวิบัติดินและ 2. กรณีที่กำลังอัดถูกควบคุมด้วยการฉีกขาดของตาข่ายเสริมกำลัง

### 5.1 กรณีที่กำลังอัดถูกควบคุมด้วยการวิบัติในดิน

ในกรณีนี้ ค่าอัตราส่วนความเค้นที่ทำนายจะเรียกเป็นค่า  $R_{max.1}$  ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$R_{max.1} = \frac{P_1[1-(h/d)\tan\varepsilon]+1}{(\tan\varepsilon)^2} \quad (4ก)$$

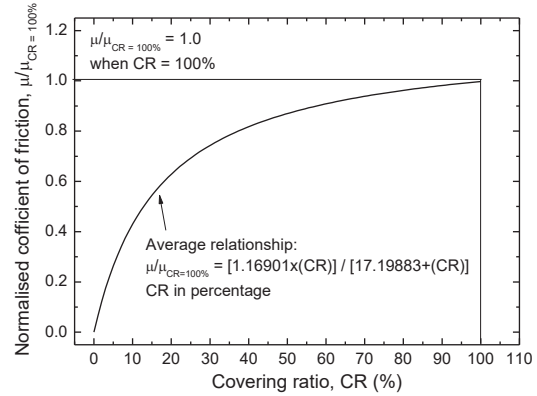
$$P_1 = \frac{\exp(B)-1}{B} \quad (4ข)$$

$$B = 2\delta_b \left( \frac{\cos\delta_b + \sin\phi}{\cos\phi} \right) \tan\left( \frac{d}{h} - \tan\varepsilon \right) \quad (4ค)$$

$$\delta_b = \frac{1}{2} \left[ \delta + \arcsin \left( \frac{\sin\delta}{\sin\phi} \right) \right] \quad (4ง)$$

$$\varepsilon = \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \quad (4จ)$$

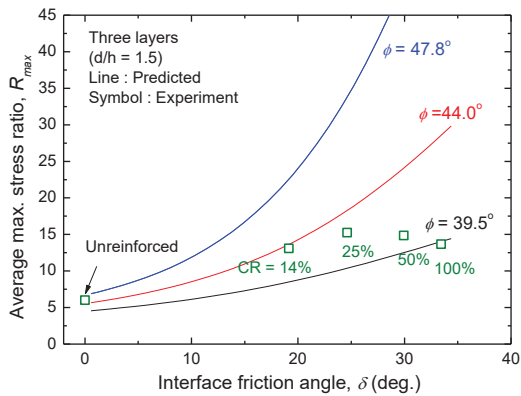
Peng et al. (2000) [1] ได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบ PSC ที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายที่มีจำนวนชั้นค่า CR และค่า  $T_{ult}$  ที่ไม่เท่ากัน ด้วยวิธีไฟไนต์เอมิเมนต์แบบสองมิติ (2D FEM) ในการจำลองด้วย 2D FEM ได้ทำการผันแปรค่า  $\delta$  แล้วจึงสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดที่ทำนายได้จาก 2D FEM กับค่า  $\delta$  แล้วจึงนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง เมื่อเลือกเปรียบเทียบที่ค่ากำลังอัดของทรายเสริมกำลังค่าเดียวกัน จะได้ค่า CR ตอบสนองจากผลการทดลองและค่า  $\delta$  ตอบสนองจาก 2D FEM จากนั้นจึงได้พัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\delta$  กับค่า CR ในการศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์  $\delta$ -CR ที่เสนอโดย Peng et al. (2000) [1] โดยพิจารณาในรูปแบบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of friction,  $\mu$ ) แล้วนำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วน  $\mu/\mu_{CR=100\%}$  กับค่า CR ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วน  $\mu/\mu_{CR=100\%}$  กับค่า CR ที่คิดแปลงจากผลการวิเคราะห์ด้วย 2D FEM โดย Peng et al. (2000) [1]

จากการทดสอบแรงเฉือนตรง (Direct shear test) เพื่อหาค่า  $\delta$  ระหว่างทรายและตาข่ายเสริมกำลังที่มีค่า CR เท่ากับร้อยละ 100 ( $\delta_{CR=100\%}$ ) ในการศึกษาพบว่าไม่มีค่าเท่ากับ  $33.5^\circ$  หรือคำนวณเป็นค่า  $\mu_{CR=100\%}$  ได้เท่ากับ 0.662 สำหรับตาข่ายเสริมกำลังที่มีค่า CR อื่นๆ จะสามารถหาค่า  $\mu$  เพื่อใช้ในการทำนายได้จากการแทนค่า CR ลงในความสัมพันธ์  $\mu/\mu_{CR=100\%} - CR$  ในรูปที่ 12 และค่า  $\mu_{CR=100\%}$  เท่ากับ 0.662 จากนั้นจึงคำนวณหาค่ามุมเสียดทานได้จาก  $\delta = \tan^{-1}(\mu)$

รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $R_{max.1}$  กับค่า  $\delta$  ที่ได้จากการทำนายโดยการแทนค่า  $\phi$  เท่ากับ  $47.8^\circ$ ,  $44.0^\circ$  และ  $39.5^\circ$  ซึ่งมีค่าเท่ากับมุมเสียดทานสูงสุด ( $\phi_{peak}$ ) ค่าระหว่างกลางจุดสูงสุดและค่าคงเหลือ และมุมเสียดทานคงเหลือ ( $\phi_{res}$ ) ตามลำดับ ที่ได้จากการทดสอบแรงอัดสามแกนกับตัวอย่างทรายที่ไม่เสริมกำลัง (รูปที่ 6) ลงในสมการที่ 4 และทำการเปรียบเทียบกับค่า  $R_{peak}$  ที่ได้จากการทดสอบแรงอัดสามแกนในการศึกษานี้ จากรูปนี้ จะเห็นได้ว่า ค่า  $\phi$  ที่ใช้ทำนายเพื่อหาค่า  $R_{max.1}$  สอดคล้องกับผลการทดสอบมีค่าลดลงเมื่อค่า  $\delta$  ที่ใช้ทำนาย (หรือค่า CR ของตาข่ายเสริมกำลัง) มีค่ามากขึ้น แนวโน้มของพฤติกรรมดังกล่าวอาจเกิดขึ้นเนื่องจากปัจจัยดังนี้



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $R_{\max.1}$  กับค่า  $\delta$  ที่ได้จากการทำนายด้วยค่า  $\phi$  เท่ากับ  $47.8^\circ$ ,  $44.0^\circ$  และ  $39.5^\circ$  เปรียบเทียบกับค่า  $R_{\max}$  ที่ได้จากการทดสอบในการศึกษาครั้งนี้ กรณีเสริมแรงกำลังจำนวน 3 ชั้น ( $d/h = 1.5$ )

1. ค่า  $\phi$  ของทราซลดลงเมื่อแรงดันโอบรัดมีค่ามากขึ้นจนสูงเกินกว่าค่าวิกฤติ [9] แรงดันโอบรัดต่อทราซเมื่อเสริมกำลังด้วยตาข่ายจะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากอิทธิพลจากแรงดึงที่เกิดขึ้นในตาข่ายเสริมกำลัง และแรงดันโอบรัดนี้จะมีค่าสูงยิ่งขึ้นตามค่า  $R_{\max}$  เพราะแรงดึงในตาข่ายเสริมกำลังมีค่ามากขึ้น เมื่อเป็นเช่นนี้ ค่า  $\phi$  ของตัวอย่างทราซเสริมกำลัง ณ ขณะที่เกิดการวิบัติจะมีค่าลดลง [2]
2. การวิบัติของตัวอย่างทราซเสริมกำลังมีลักษณะค่อยๆ เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยที่ ค่า  $\phi_{\text{peak}}$  ในทราซเสริมกำลังจะไม่ได้เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอเท่าๆ กันเมื่อตัวอย่างทราซเสริมกำลังเกิดการวิบัติ [2] การวิบัติของตัวอย่างทราซเสริมกำลังจะเกิดขึ้นเมื่อแถบเฉือนวิกฤติ (Critical shear band) ซึ่งเป็นตัวควบคุมค่ากำลังอัดของทราซเสริมกำลังได้เกิดขึ้น ซึ่งค่า  $\phi$  ของทราซในแถบเฉือนวิกฤตินี้มีค่าลดลงจากค่า  $\phi_{\text{peak}}$  มุ่งไปสู่ค่า  $\phi_{\text{res}}$  แล้ว

อนึ่ง จากรูปที่ 13 จะเห็นได้ว่า เพื่อให้ค่า  $R_{\max.1}$  ที่ได้จากการทำนายสอดคล้องกับผลการทดลอง ค่า  $\phi$  ที่ใช้

ทำนายจะต้องมีค่าลดลงกับค่า  $\delta$  หรือค่า CR ที่มีค่ามากขึ้น จาก  $\phi = 44.0^\circ$  ไปสู่ค่า  $\phi_{\text{res}} = 39.5^\circ$  หรืออาจกล่าวได้ว่า อิทธิพลจากปัจจัย 1. และ 2. ดังกล่าวข้างต้น เพิ่มขึ้นกับค่า  $\delta$  หรือค่า CR

## 5.2 กรณีที่กำลังอัดถูกควบคุมด้วยการฉีกขาดของตาข่ายเสริมกำลัง

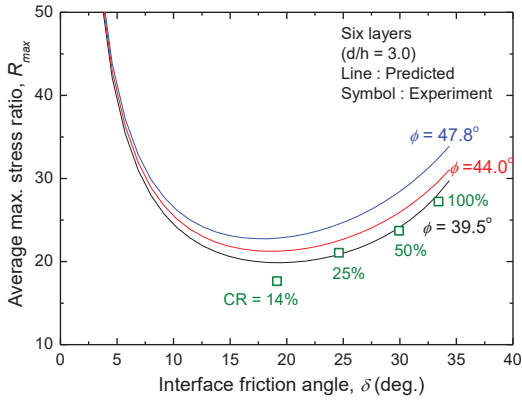
ในกรณีที่การวิบัติของดินเสริมกำลังเกิดขึ้นจากการฉีกขาดของตาข่ายเสริมกำลัง จะเรียกอัตราส่วนความเค้นที่ทำนายเป็นค่า  $R_{\max.2}$  ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5 [2]

$$R_{\max.2} = \frac{h}{d} \left[ \frac{(1 + \sin \phi) \exp(\delta_b 2 \tan \phi)}{\sin \phi \sin 2 \delta_b} \times \frac{T_{\text{ult}} - T_{\text{connection}}}{h \sigma_c} + \frac{1}{\tan \epsilon} \right] \quad (5)$$

โดยที่  $T_{\text{ult}}$  คือค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดของตาข่ายเสริมกำลังซึ่งมีค่าประมาณเท่ากับ 10 kN/m (ตารางที่ 2)  $T_{\text{connection}}$  คือค่ากำลังที่จุดเชื่อมต่อระหว่างปลายตาข่ายเสริมกำลังกับผิวหน้า ซึ่งในการศึกษานี้ไม่ได้เชื่อมต่อปลายตาข่ายเข้ากับเมมเบรนจึงมีค่า  $T_{\text{connection}}$  เท่ากับศูนย์ และ  $\sigma_c$  คือค่าแรงดันโอบรัดที่ให้กับตัวอย่างซึ่งมีค่าเท่ากับ 30 kPa

รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $R_{\max.2}$  กับค่า  $\delta$  ที่ได้จากการทำนายด้วยค่า  $\phi$  เท่ากับ  $47.8^\circ$ ,  $44.0^\circ$  และ  $39.5^\circ$  ลงในสมการที่ 9 และทำการเปรียบเทียบกับค่า  $R_{\max}$  ที่ได้จากการทดสอบแรงอัดสามแกนในการศึกษานี้ จากรูปนี้จะเห็นได้ว่า ค่า  $\phi$  ที่ใช้ทำนายเพื่อให้ค่า  $R_{\max.2}$  สอดคล้องผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่า  $\phi_{\text{res}} = 39.5^\circ$  พฤติกรรมนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องจาก ณ ขณะที่เกิดการฉีกขาดของตาข่ายเสริมกำลังขึ้นนั้น ส่วนของทราซที่วิบัติตามมาจากการฉีกขาดของตาข่ายเสริมกำลังได้เสียรูปเป็นอันมากจากความเค้นเฉือน จนทำให้ค่า  $\phi$  ได้พัฒนาเข้าสู่ค่า  $\phi_{\text{res}} = 39.5^\circ$  แล้ว ดังนั้น จึงอาจกล่าวได้ว่า ในกรณีที่การวิบัติของทราซเกิดขึ้นจากการฉีกขาดของตาข่ายเสริมกำลัง ค่า  $\phi$

ที่เหมาะสมสำหรับการทำนายผลตามสมการที่ 5 คือ ค่า  $\phi$  ที่สถานะคงเหลือ



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $R_{max,2}$  กับค่า  $\delta$  ที่ได้จากการทำนายด้วยค่า  $\phi$  เท่ากับ  $47.8^\circ$ ,  $44.0^\circ$  และ  $39.5^\circ$  เปรียบเทียบกับค่า  $R_{max}$  ที่ได้จากการทดสอบในการศึกษาครั้งนี้ กรณีเสริมแรงกำลังจำนวน 6 ชั้น ( $d/h = 3.0$ )

## 6. สรุปผลการศึกษา

จากการทดลอง การวิเคราะห์ และการทำนายด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอในบทความนี้ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

1. ตัวอย่างทรายที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังมีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าตัวอย่างทรายที่ไม่เสริมกำลังเป็นอันมาก เพราะแรงดึงที่เกิดขึ้นในตาข่ายเสริมกำลัง จะถ่ายเป็นแรงดันโอบรัดกลับคืนไปสู่ส่วนที่เป็นทราย เมื่อแรงดันโอบรัดที่กระทำต่อทรายมากขึ้น กำลังรับแรงอัดก็เพิ่มมากขึ้นตาม
2. เมื่อเพิ่มความหนาแน่นการเสริมกำลัง ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทรายเสริมกำลังจะมีค่ามากขึ้น เพราะการถ่ายแรงดึงจากตาข่ายเสริมกำลังไปสู่การพัฒนาแรงดันโอบรัดต่อทรายมีประสิทธิภาพดีขึ้นและขนาดของบริเวณที่อิทธิพลจากแรงดึงในตาข่ายเสริมกำลังจะถ่ายไปไม่ถึงเล็กน้อย

3. ค่าอัตราส่วนความเค้นสูงสุด ( $R_{peak}$ ) ที่ได้จากตัวอย่างทรายที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังที่มีค่าอัตราส่วนปกคลุมแตกต่างกันมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ การถ่ายแรงดึงจากตาข่ายเสริมกำลังไปสู่ทรายมี 2 ส่วน กล่าวคือ 1. Interface friction และ 2. Interlocking เมื่ออัตราส่วนปกคลุมมีค่าแตกต่างกัน จะทำให้สัดส่วนการผสมกันระหว่างส่วนที่ 1 และ 2 แตกต่างกัน ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของทรายเสริมกำลังมีค่าแตกต่างกัน ทั้งนี้อิทธิพลจากทั้งสองส่วนอาจได้รับผลกระทบจากการหักขาดของตาข่ายเสริมกำลังอีกด้วย

4. ในกรณีที่การวิบัติของตัวอย่างทรายเสริมกำลังถูกควบคุมด้วยการวิบัติในทราย ชุดสมการที่เสนอ โดย Tatsuoka (2004) [2] สามารถทำนายค่า  $R_{max}$  ได้สอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากการศึกษานี้ เมื่อใช้ค่ามุมเสียดทานภายในที่เหมาะสมซึ่งมีค่าระหว่างค่าสูงสุด ( $\phi_{peak}$ ) และค่าที่สถานะคงเหลือ ( $\phi_{res}$ ) เนื่องจาก 1. ค่า  $\phi$  ของทรายลดลงเมื่อแรงดันโอบรัดมีค่ามากขึ้นจนสูงเกินกว่าค่าวิกฤติ และ 2. การวิบัติของตัวอย่างทรายเสริมกำลังมีลักษณะค่อยๆ เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่ในกรณีที่การวิบัติของตัวอย่างทรายเสริมกำลังถูกควบคุมด้วยการหักขาดของตาข่ายเสริมกำลัง สมการที่เสนอโดย Tatsuoka (2004) [2] สามารถทำนายค่า  $R_{max}$  ได้สอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากการศึกษานี้ เมื่อใช้ค่ามุมเสียดทานที่สถานะคงเหลือ

## 7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยและวิชาการตามแผนกลยุทธ์เพื่อพัฒนาภาควิชาวิศวกรรมโยธา มจร. (CE-KMUTT 5908)

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Peng, F., Kotake, N., Tatsuoka, F., Hirakawa, D. and Tanaka, T. Plane Strain Compression Behavior of Geogrid-Reinforced Sand and Its Numerical Analysis. *Soils and Foundations*, 2000; 40(3): 55-74.
- [2] Tatsuoka, F. An Approximate Isotropic Perfectly Plastic Solution for Compressive Strength of Geosynthetic-Reinforced Soil. *Geosynthetics International*, 2004; 11(5): 390-405.
- [3] Szykiedans, K., Credo, W. and Osinski, D. Selected Mechanical Properties of PETG 3-D prints. The XXI International Polish-Slovak Conference, Machine and Simulations 2016, 6-8 August, Warsaw, Poland, 2016; 455-461.
- [4] ASTM D638. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [5] Tatsuoka, F. and Haibara, O. Shear Resistance Between Sand and Smooth or Lubricated Surfaces. *Soils and Foundations*, 1985; 25(1): 89-98.
- [6] Miura, S. and Toki, S. A Sample Preparation Method and Its Effect on Static and Cyclic Deformation-Strength Properties of Sand. *Soils and Foundations*, 1982; 22(1): 61-77.
- [7] Kongkitkul, W., Tatsuoka, F. and Hirakawa, D. Effects of Reinforcement Type and Loading History on the Deformation of Reinforced Sand in Plane Strain Compression. *Soils and Foundations*, 2007; 47(2): 395-414.
- [8] Wu, P.K., Matsushima, K. and Tatsuoka, F. Effect of Specimen Size and Some Other Factors on the Strength and Deformation of Granular Soil in Direct Shear Tests. *Geotechnical testing journal*, 2008; 31(1): 45-64.
- [9] Tatsuoka, F., Okahara, M., Tanaka, T., Tani, K., Morimoto, T. and Siddiquee, M. S. A. Progressive Failure and Particle Size Effect in Bearing Capacity of a Footing on Sand. *ASCE Geotechnical Special Publication*, 1991; 27: 788-802.



