



การควบคุมการทำงานของเครื่องกวนสารแบบพกพาด้วยระบบควบคุมวงลูปปิด

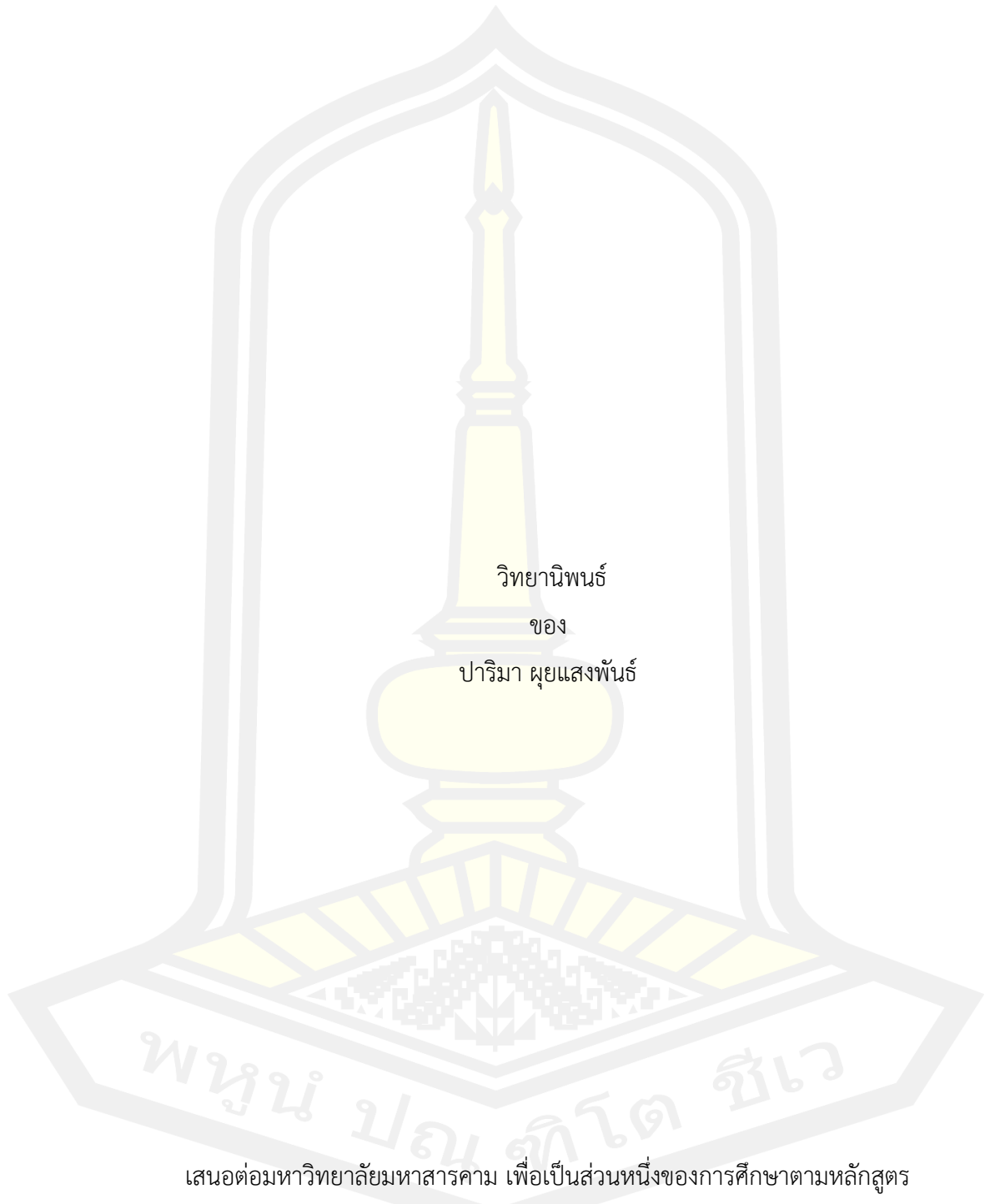
วิทยานิพนธ์  
ของ  
ปาริมา พุยแสงพันธ์

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

พฤษภาคม 2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การควบคุมการทำงานของเครื่องกวนสารแบบพกพาด้วยระบบควบคุมวงลูปปิด

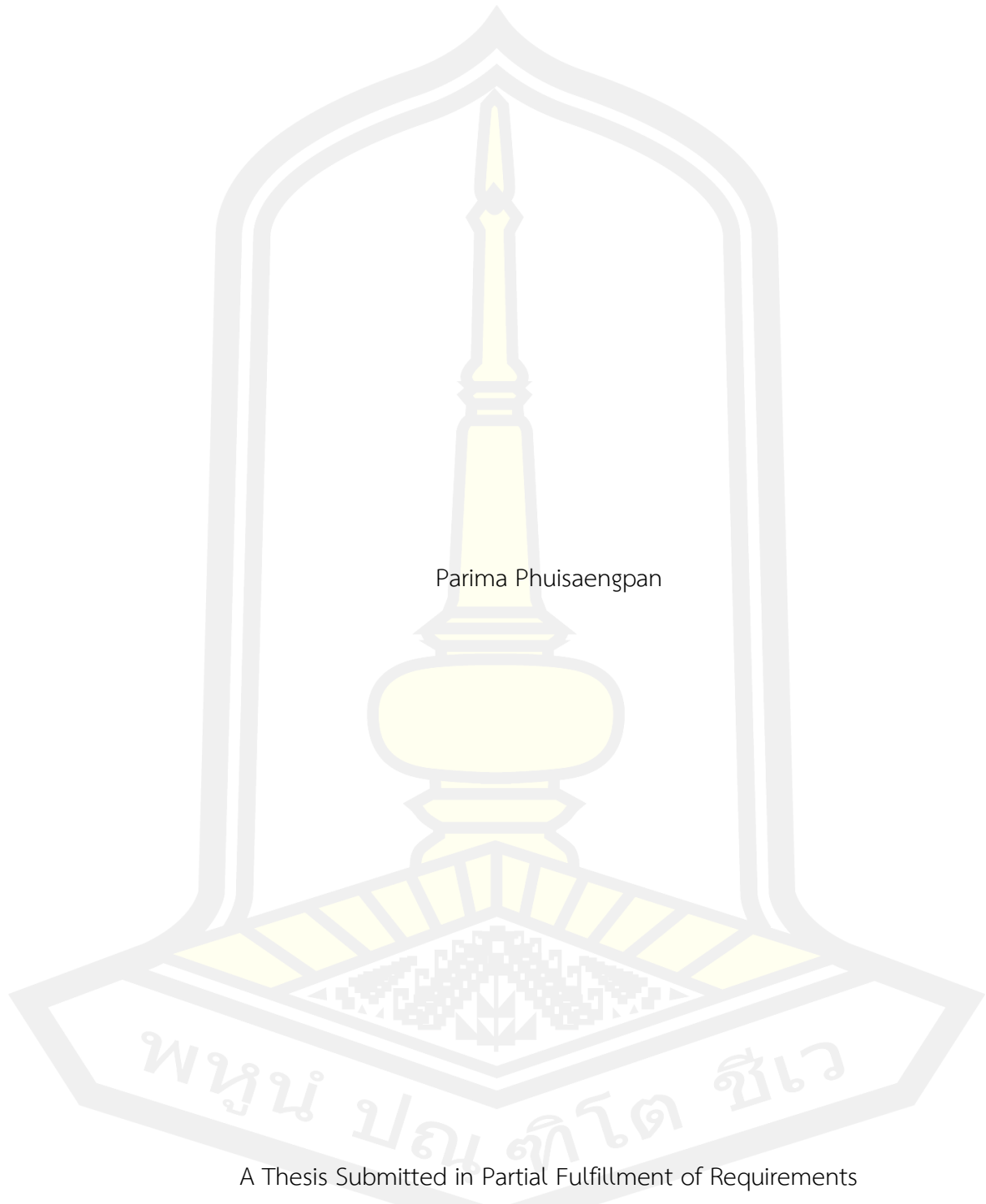


เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

พฤษภาคม 2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

The Operation Controlling of Portable Agitator using Closed Loop Control System



Parima Phuisaengpan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements  
for Master of Engineering (Electrical and Computer Engineering)

May 2022

Copyright of Maharakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนางสาวปาริมา ผุ่ยแสงพันธ์ แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

( ผศ. ดร. อติเรก จันทะคุณ )

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( ผศ. ดร. ชัยยงค์ เสริมผล )

..... กรรมการ

( รศ. ดร. ชลธิ์ โพธิ์ทอง )

..... กรรมการ

( ผศ. ดร. นิวัฒน์ อังควิศิษฐพันธ์ )

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....  
( รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป )

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....  
( รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การควบคุมการทำงานของเครื่องกววนสารแบบพกพาด้วยระบบควบคุมวงลูปปิด		
ผู้วิจัย	ปาริมา ผุยแสงพันธ์		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยยงค์ เสริมผล		
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2565

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อ ออกแบบ สร้าง และทดสอบประสิทธิภาพเครื่องกววนสารด้วยระบบควบคุมวงลูปปิด โดยได้ทำการศึกษาระบบการควบคุมการทำงานของเครื่องกววนสารแบบพกพา และการประเมินค่าความหนืด จากสูตรสมการพื้นฐานของเครื่องวัดความหนืดแบบหมุนโดยอาศัยหลักการของมอเตอร์ภายใต้สภาวะคงตัว ทอร์กหน่วงที่กระทำต่อพื้นผิวใบพัดอันเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของของเหลวจากการการทำงานของเครื่องกววนสาร ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความหนืด จะมีค่าเท่ากับทอร์กมอเตอร์ดังนั้นความหนืดจึงมีความสัมพันธ์กับทอร์กที่เกิดขึ้นจากมอเตอร์ผลการทดลองพบว่า ระบบควบคุมแบบวงลูปปิดหรือระบบป้อนกลับสามารถทำให้ความเร็วรอบในการผสมคงที่อย่างสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาในการผสม และลดระยะเวลาในกระบวนการผลิตทั้ง 3 ผลิตภัณฑ์อันได้แก่ แชมพูน้ำยาล้างจาน และเจลแอลกอฮอล์อยู่ในช่วง 45 -55 นาที เมื่อเทียบกับการใช้เครื่องผสมสารตามท้องตลาดในปริมาณ 10 ลิตรต่อครั้ง จะใช้เวลากววนด้วยระยะเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที นอกจากนี้การประเมินความหนืดของตัวอย่างผลิตภัณฑ์พบว่า งานวิจัยนี้เหมาะสมในการประเมินความหนืดของแชมพูเนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเพียง 3.17 %

คำสำคัญ : ประเมินค่าความหนืด, เครื่องกววนสาร, ระบบควบคุมแบบวงปิด

พหุ อนุ ทิ โต ชี เว

<b>TITLE</b>	The Operation Controlling of Portable Agitator using Closed Loop Control System		
<b>AUTHOR</b>	Parima Phuisaengpan		
<b>ADVISORS</b>	Assistant Professor Chaiyong Soemphol , Ph.D.		
<b>DEGREE</b>	Master of Engineering	<b>MAJOR</b>	Electrical and Computer Engineering
<b>UNIVERSITY</b>	Maharakham University	<b>YEAR</b>	2022

### ABSTRACT

The objective of this project was to develop, construct and test the performances of agitators using closed-loop control system. They conducted a study on the operation controlling of portable agitator and viscosity estimation of rotational viscometer formulae by relying on the principle of the motor under the condition at steady state. The retarding torque applied on the surface of impeller results from the movement of the liquid from operation of the agitator which is correlated to viscosity and equals the torque produced by the motor. Therefore, fluid viscosity has been connected to the torque produced by the motor. The experimental results have been showed that the closed-loop control system or feedback control system is able to make mixing speed constant a steady for the duration of mixing. It also helps reducing the production lead time of 3 product including: shampoo dishwashing and alcohol gel be in period range in 45 minutes. Compared to using a commercial mixer of 10 liters at a time, the stirring time is 1 hour and 30 minutes. In addition, the viscosity assessment of the product samples revealed that this research is suitable for assessing the viscosity of shampoo as it has only 3.17% percentage discrepancy.

Keyword : Viscosity Estimation, Agitator, Closed-Loop Control System

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ทางผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณบุคคลกรและหน่วยงานต่างๆที่ได้ให้การช่วยเหลือดูแล และให้คำแนะนำทางด้านงานวิจัย ตลอดจนสำเร็จการศึกษาดังต่อไปนี้

โครงการสร้างขีดความสามารถในการทำงานวัดกรรมของภาคอุตสาหกรรมเพื่อยกระดับความสามารถการแข่งขันของประเทศโดยการพัฒนากำลังคนระดับสูง จากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (TITE) ที่สนับสนุนทุนด้านการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

บริษัททอลล์ อินฟोर्मเช็น เทคโนโลยีส์ จำกัด ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และอำนวยความสะดวกในส่วนของสถานที่ทำงานวิจัย

ผศ.ดร. ชัยยงค์ เสริมผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ เมตตา และให้คำปรึกษา ในงานวิจัยนี้ ตลอดจนงานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์

คณะกรรมการสอบทุกท่านในการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ สำหรับข้อเสนอแนะที่ดีเพื่อที่จะได้นำไปพัฒนางานวิจัยให้ดียิ่งๆขึ้นไป

เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ สาขาวิชาวิศวกรรมชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้คำแนะนำ และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวที่เป็นกำลังใจที่ดี พร้อมทั้งคอยสนับสนุนในทุกๆด้านด้วยดีเสมอมา

ปาริมา ผุยแสงพันธ์

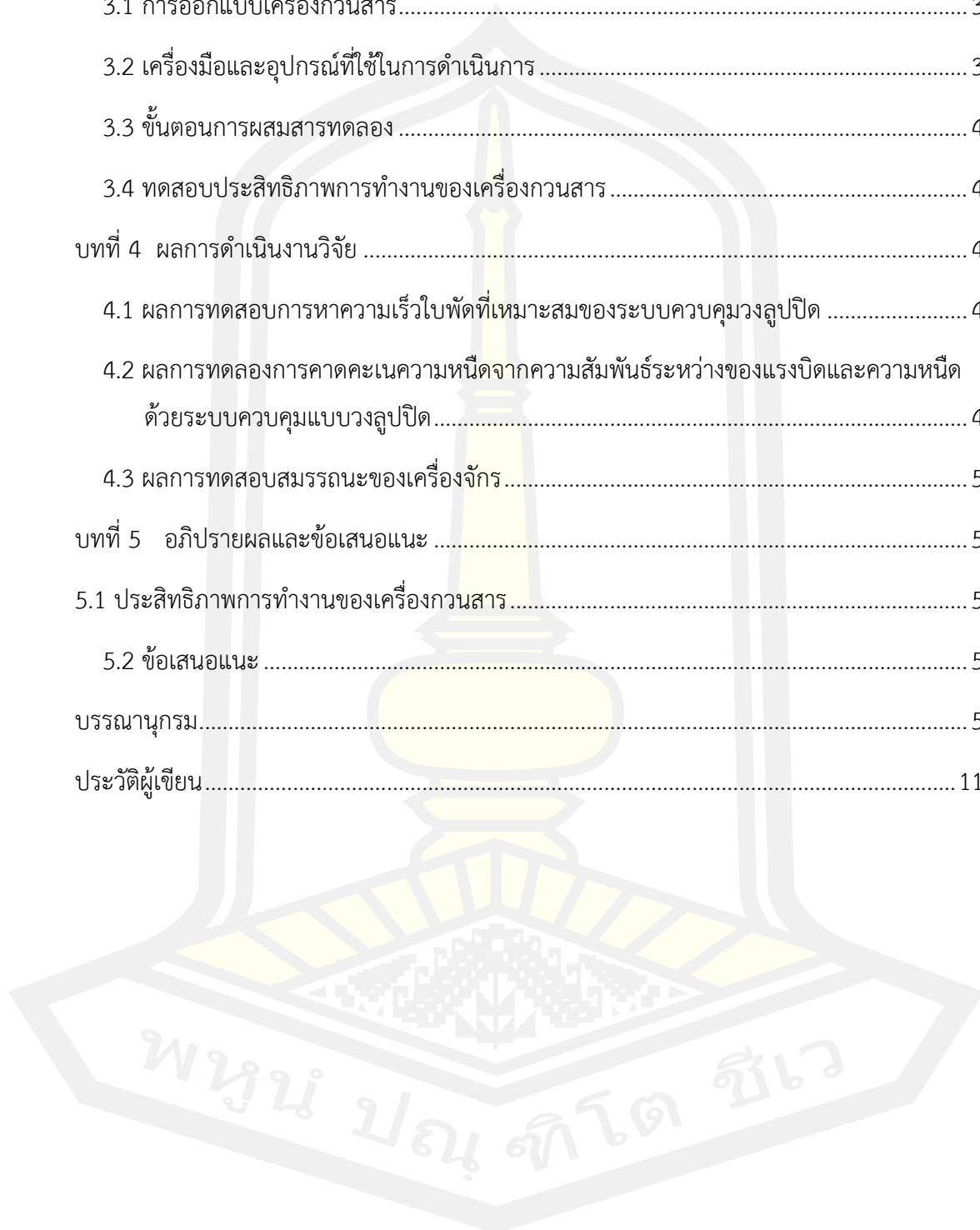
พหุณ ปณุ ทิโต ชีเว

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 หลักการและเหตุผล.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ความสำคัญของปัญหา.....	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 แผนการดำเนินการศึกษา.....	3
1.7 สถานที่ดำเนินการศึกษา.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ประเภทเครื่องกววนสาร.....	5
2.2 การควบคุมระบบ.....	9
2.3 ทอร์กและการเคลื่อนที่แบบหมุน.....	11
2.4 ทอร์กของมอเตอร์.....	15
2.4 หลักการประเมินความหนืด.....	24
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30



บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย .....	33
3.1 การออกแบบเครื่องกวนสาร.....	33
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการ .....	36
3.3 ขั้นตอนการผสมสารทดลอง .....	42
3.4 ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกวนสาร .....	43
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย .....	45
4.1 ผลการทดสอบการหาความเร็วใบพัดที่เหมาะสมของระบบควบคุมวงลูปปิด .....	45
4.2 ผลการทดลองการคาดคะเนความหนืดจากความสัมพันธ์ระหว่างของแรงบิดและความหนืด ด้วยระบบควบคุมแบบวงลูปปิด.....	48
4.3 ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องจักร .....	50
บทที่ 5 อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ .....	56
5.1 ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกวนสาร .....	56
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	57
บรรณานุกรม.....	59
ประวัติผู้เขียน.....	111



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 แผนการดำเนินการศึกษาวิจัย.....	4
ตาราง 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กระแสไฟฟ้ากับทอร์กของมอเตอร์ .....	21
ตาราง 3 ผลการทดลองจากการหาค่าความเหน็ดของสารตัวอย่างที่ทราบค่าความเหน็ดที่ยอมรับได้ .	48



## สารบัญภาพ

หน้า

ภาพประกอบ 1 เครื่องกวนสารแบบใบพัดสำหรับการใช้งานปั่นหรือบด [3].....	6
ภาพประกอบ 2 เครื่องกวนสารแบบใบพัดสำหรับการใช้ของสารที่มีความหนืดสูง [4] .....	7
ภาพประกอบ 3 เครื่องกวนสารแบบใบพัดสำหรับใช้งานด้านวิทยาศาสตร์และทางการแพทย์ [5] .....	8
ภาพประกอบ 4 เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก [6].....	8
ภาพประกอบ 5 ระบบควบคุมแบบเปิดหรือระบบควบคุมแบบไม่ป้อนกลับ.....	10
ภาพประกอบ 6 ระบบควบคุมแบบเปิด.....	11
ภาพประกอบ 7 ทอร์กที่กระทำต่อวัตถุ [8] .....	11
ภาพประกอบ 8 แสดงการเคลื่อนที่แบบหมุนในกรณีเมื่อไม่มีทอร์กมากระทำกับวัตถุ [8].....	12
ภาพประกอบ 9 แสดงแรงกระทำต่อวัตถุทำให้เกิดทอร์ก [8].....	13
ภาพประกอบ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับทอร์กของมอเตอร์ที่ใช้งานทั่วไป [8].....	16
ภาพประกอบ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ ทอร์ก และค่ากระแสของมอเตอร์ [8]	17
ภาพประกอบ 12 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับทอร์ก [8].....	19
ภาพประกอบ 13 สำหรับโหลดชนิดที่ต้องการทอร์กที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าความเร็วรอบ [8] .....	19
ภาพประกอบ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างทอร์กกับความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ความถี่กระแสไฟฟ้า ต่างๆ กัน โดยค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าคงที่ [8].....	22
ภาพประกอบ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและทอร์กของมอเตอร์ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าต่างกัน [8] .....	23
ภาพประกอบ 16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับทอร์กของมอเตอร์ [8] .....	24
ภาพประกอบ 17 แบบจำลองเครื่องกวนสาร.....	25
ภาพประกอบ 18 เครื่องกวนสาร.....	34
ภาพประกอบ 19 ระบบควบคุมแบบเครื่องกวนสารแบบวงลูปิด.....	34
ภาพประกอบ 20 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องกวนสาร .....	35

ภาพประกอบ 21 ระบบการทำงานของวงจรควบคุม.....	36
ภาพประกอบ 22 มอเตอร์ AC 220/380V [15].....	37
ภาพประกอบ 23 เครื่องวัดความหนืดของเหลวแบบดิจิตอล [16] .....	38
ภาพประกอบ 24 หน้าต่างการแสดงผล Arduino IDE .....	38
ภาพประกอบ 25 แอปพลิเคชัน Google Sheets [18].....	39
ภาพประกอบ 26 เซ็นเซอร์วัดค่า PH พร้อมโมดูล.....	39
ภาพประกอบ 27 โพรบเซ็นเซอร์อุณหภูมิ DS18B20 .....	40
ภาพประกอบ 28 เครื่องวัดความเร็วรอบแบบสัมผัส [21].....	41
ภาพประกอบ 29 โมดูลวัดพลังงานไฟฟ้า PZEM-004t [22].....	41
ภาพประกอบ 30 อินเวอร์เตอร์ Z-2000 Series [23].....	42
ภาพประกอบ 31 ความเร็วรอบในการผลิตแชมพู ด้วยระบบควบคุมแบบวงลูปปิด .....	45
ภาพประกอบ 32 ความเร็วรอบในการผลิตน้ำยาล้างจาน ด้วยระบบควบคุมแบบวงลูปปิด.....	46
ภาพประกอบ 33 ความเร็วรอบในการผสมเจลแอลกอฮอล์ ด้วยระบบควบคุมแบบวงลูปปิด.....	47
ภาพประกอบ 34 ความเร็วรอบในการผสมของระบบควบคุมแบบวงลูปปิด-เปิด .....	51
ภาพประกอบ 35 กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในระบบควบคุมแบบวงลูปปิด และระบบควบคุมแบบเปิด.....	53
ภาพประกอบ 36 ลักษณะความคงที่ของค่าความหนืดของ ของผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดทั้ง 3 สูตร .....	54
ภาพประกอบ 37 ลักษณะความคงที่ของค่า PH ของผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดทั้ง 3 สูตร.....	55

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 หลักการและเหตุผล

การผสมสารหรือของเหลวที่แตกต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป ถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญอย่างหนึ่งในกระบวนการผลิตต่างๆไม่ว่าจะเป็นในด้านเภสัชกรรม อาหาร กระบวนการผลิตพอลิเมอร์ เทคโนโลยีชีวภาพ และรวมถึงในภาคอุตสาหกรรม เป็นต้น จึงถือได้ว่าการใช้ประโยชน์จากการผสมกันของสารอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม การผสมที่ไม่ได้มาตรฐานส่งผลให้เกิดปัญหาขึ้นภายหลังเช่น การผสมของสารที่ทำให้เป็นเนื้อเดียวกันไม่เพียงพอ ใช้ระยะเวลาในการผสมนาน ทำให้เกิดคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ต่ำลง สินค้าไม่ได้มาตรฐาน ส่งผลให้เกิดการส่งของที่ล่าช้าซึ่งอาจทำให้ยอดขายลดลงได้ นอกจากนี้ตลาดการแข่งขันในปัจจุบันต้องการลดต้นทุนกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นปัญหาในการออกแบบเครื่องกวนสารที่สามารถผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันได้ในเวลาน้อยที่สุดโดยใช้พลังงานน้อยที่สุดจึงเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงอย่างยิ่งในกระบวนการผลิต รวมไปถึงจนถึงขนาดของเครื่องกวนสารในปัจจุบันบางประเภทที่มีขนาดกลางไปจนถึงใหญ่ โดยส่วนมากมักจะมีความยากลำบากในการเก็บรักษาและการเคลื่อนย้ายอยู่เสมอ ดังนั้นในการออกแบบเครื่องกวนสารจึงจำเป็นต้องพิจารณาทั้งเรื่องการผสมกันของสารที่เหมาะสมและความสะดวกในการเคลื่อนย้าย

โดยทั่วไปแล้วคุณภาพของการผสมที่เกิดจากเครื่องกวนสารขึ้นอยู่กับข้อกำหนดค่าทางกลและลักษณะของการกระตุ้น ตัวอย่างเช่น โครงสร้างทางกลของถังกวนที่ประกอบด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของถัง ตลอดจนรูปร่าง ตำแหน่งของใบพัด และลักษณะการหมุน เป็นต้น ซึ่งข้อกำหนดค่าทางกลขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงานของเครื่องกวนสาร เงื่อนไขการทำงานจะถูกออกแบบผ่านค่าของพารามิเตอร์ต่างๆที่ตั้งค่าไว้ในกระบวนการผสมและสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยไม่ต้องกำหนดค่าเชิงกลของเครื่องใหม่ อาทิเช่น อุณหภูมิ แรงบิด และความเร็รรอบ เป็นต้น

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องกวนสารพบว่า อุปสรรคส่วนใหญ่ที่ทำให้การผสมสารเป็นไปอย่างไม่ราบรื่นคือความหนืด เมื่อใดที่ทำการกวนสารผสมที่มีความหนืดสูงขณะความเร็วกวนสูง จะทำให้แรงต้านจากแรงเสียดทานระหว่างใบพัดกวนสารกับสารผสมมากกว่าแรงที่ถูกส่งมาจากมอเตอร์ [2] ส่งผลทำให้ความเร็วและประสิทธิภาพของเครื่องกวนสารลดลงไปด้วย ดังนั้นสมรรถนะที่ดีของเครื่องกวนสารถือเป็นสิ่งสำคัญ

นอกจากนี้การออกแบบตัวควบคุมได้ถูกนำเสนอหลายวิธีเช่น ระบบอัตราเกียร์ทดที่สูงกำลังด้วยระบบสายพาน ใช้ควบคุมความเร็วมอเตอร์ซึ่งมีข้อจำกัดในการคุมควมระดับความเร็วระบบควบคุมพีไอดี ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม แต่ก็มีข้อข้อขัดข้องในการปรับจูนพารามิเตอร์ในการควบคุม ปล่อยให้มอเตอร์ทำงานเต็มกำลังซึ่งสารบางอย่างไม่สามารถผสมในความเร็วที่สูงมากได้เนื่องจากเป็นสารประเภทเกิดฟอง เพื่อความยืดหยุ่นในการใช้งาน และลดข้อขัดข้องของระบบควบคุม

งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการควบคุมการทำงานของเครื่องกวนสารด้วยระบบควบคุมแบบปิด และสามารถประเมินความหนืดทางอ้อมได้ จากแรงบิดของมอเตอร์เครื่องกวนสาร โดยออกแบบให้สามารถพกพาง่าย สะดวกต่อการใช้งาน เพื่อตอบโจทย์ความต้องการในปัจจุบัน พร้อมกับเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกวนสารให้ดียิ่งขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาการควบคุมการทำงานของเครื่องกวนสารและระบบควบคุมแบบวงลูปปิด
2. ออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมของเครื่องกวนสารด้วยระบบควบคุมแบบวงลูปปิด
3. ทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องกวนสารแบบพกพาที่พัฒนาขึ้น

## 1.3 ความสำคัญของปัญหา

1. เครื่องกวนสารโดยทั่วไปไม่สามารถตรวจวัดค่าความหนืดของเนื้อสารได้ทำให้เมื่ออยากทราบค่าความหนืดต้องนำสารไปตรวจจับค่าความหนืดจากเครื่องวัดความหนืด
2. เครื่องกวนสารในปัจจุบันมีการออกแบบจำเพาะเจาะจงมากเกินไป ไม่สะดวกในการปรับใช้ตามปริมาตรของสารที่จะผสมในหลายๆปริมาตรได้ จึงทำให้เกิดปัญหาต่างขึ้นเช่น กำลังมอเตอร์ไม่เพียงพอ ไม่สามารถทำการผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันได้ หรือใช้ระยะเวลาในการผสม ทำให้ไม่ได้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการและเกิดการส่งของที่ล่าช้า
3. คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ต่ำลงและระยะเวลาในการผสมสารที่นาน ส่งผลต่อปริมาณของเสียของผลิตภัณฑ์ที่สูงขึ้น ปริมาณการผลิตลดลง อีกทั้งยังส่งผลเสียต่อชื่อเสียงของบริษัทได้
4. ขนาดของตัวเครื่องกวนสารที่มีขนาดกลางจนจึงใหญ่ ซึ่งมักจะมีปัญหาในส่วนของ การเก็บรักษาและการเคลื่อนย้ายออกนอกสถานที่

#### 1.4 ขอบเขตการศึกษา

1. ควบคุมความเร็วของเครื่องกวนสารด้วยระบบควบคุมวงลูปปิด ซึ่งเป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่จะช่วยประหยัดพลังงานในการกวนของเหลวที่ความเร็วรอบคงที่
2. เครื่องกวนสารสามารถผสมสารได้ในปริมาณสูงสุด 30 ลิตร
3. เครื่องกวนสารสามารถคาดคะเนความหนืดได้ จากการตรวจวัดแรงบิดที่ใช้ทำให้เกิดการหมุนด้วยความเร็วรอบที่กำหนดในแต่ละครั้ง
4. โดยเครื่องกวนสารนี้จะเป็นระบบกึ่งอัตโนมัติ สามารถสร้างโปรไฟล์การผสมขึ้นมาเองได้ เพื่อช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้งานยิ่งขึ้น โดยไม่ต้องตั้งค่าการผสมใหม่ทุกครั้ง
5. ของเหลวที่นำมาทำงานวิจัยคือ ส่วนประกอบผลิตภัณฑ์ 3 อย่าง ได้แก่ เจลแอลกอฮอล์ สบู่เหลว และน้ำยาล้างจาน

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ต้นแบบของเครื่องกวนสารแบบพกพาด้วยระบบควบคุมวงลูปปิด ที่สามารถนำไปสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ได้
2. ระบบสามารถควบคุมการทำงานของมอเตอร์
3. เพื่อให้ผู้ใช้งานทั่วไป วิชาหกิจชุมชน หรือผู้ประกอบการ SME สามารถเข้าถึงเทคโนโลยีได้ง่ายขึ้น
4. เพื่อให้ลดเวลากระบวนการผสมวัตถุดิบและเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องกวนสาร

#### 1.6 แผนการดำเนินการศึกษา

แผนการดำเนินการศึกษาเป็นไปตามขั้นตอนดังนี้

1. ศึกษาค้นหาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบการควบคุมมอเตอร์โดยระบบควบคุมแบบวงลูปปิด
3. ออกแบบและสร้างต้นแบบในการทดลอง
4. เก็บข้อมูลประสิทธิภาพในการกวนสาร
5. เปรียบเทียบและสรุปผลที่ได้จากการทดสอบ

ซึ่งจากแผนการดำเนินงานข้างต้นสามารถเขียนอยู่ในรูปปฏิทินกิจกรรมได้ตามตาราง 1.1

ตาราง 1 แผนการดำเนินการศึกษาวิจัย

รายการ	ระยะเวลา									
	ภาคเรียนที่ 1/2564				ภาคเรียนที่ 2/2564					
	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1. ศึกษาค้นคว้า ข้อมูลและงานวิจัยที่ เกี่ยวข้อง	←————→									
2. ออกแบบการ ควบคุมมอเตอร์โดย ระบบควบคุมแบบวง ลูปปิด				←————→						
3. ออกแบบและ สร้างต้นแบบในการ ทดลอง					←————→					
4. เก็บข้อมูล ประสิทธิภาพในการ กวนสาร						←————→				
5. เปรียบเทียบและ สรุปผลที่ได้จากการ ทดสอบ							←————→			
6. จัดทำรูปเล่ม วิทยานิพนธ์				←————→						

### 1.7 สถานที่ดำเนินการศึกษา

1. บริษัทออล อินฟอร์เมชั่น เทคโนโลยีส์ จำกัด (All Information Technologies Co., Ltd)
2. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาการควบคุมการทำงานของเครื่องกวนสารด้วยระบบควบคุมวงลูปปิด และตรวจวัดความหนืดทางอ้อมจากความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับแรงบิดของมอเตอร์ โดยออกแบบให้สามารถพกพาได้ง่าย สะดวกต่อการใช้งาน เพื่อตอบโจทย์ความต้องการในปัจจุบันดังนั้นเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาวิจัยครั้งนี้ประกอบไปด้วยทฤษฎี และข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเครื่องกวนสาร มอเตอร์ รวมถึงข้อมูลระบบควบคุมวงลูปปิด ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 2.1 ประเภทเครื่องกวนสาร

การกวน คือ การคนหรือการผสมสารตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียว โดยจะต้องมีการเตรียมสารผสมก่อนเสมอ การเตรียมสารผสมนั้นจะต้องกำหนดสารผสมให้ได้ปริมาณตามสัดส่วนที่ต้องการก่อนเสมอเมื่อเตรียมสารผสมให้ได้ตามที่ต้องการเรียบร้อยแล้วก็จะนำสารที่เตรียมมาเข้ากระบวนการกวนหรือผสมให้เข้ากัน กระบวนการกวนจะต้องคำนึงถึง ความเร็วขณะกวน อุณหภูมิขณะกวน และชนิดของสารผสมด้วยเช่นกัน ในอดีตประเทศไทยนิยมนำการกวนมาใช้ในการทำอาหารเป็นส่วนใหญ่ อย่างเช่นการกวนเพื่อการถนอมอาหาร เช่น การกวนมะม่วง การกวนทุเรียน เป็นต้น โดยสมัยอดีตนั้นยังไม่มีเครื่องกวนสารหรือเครื่องมือทันสมัย การกวนจึงต้องใช้แรงงานมนุษย์เป็นส่วนใหญ่ เมื่อวิวัฒนาการของโลกเปลี่ยนแปลงไปการกวนไม่ได้กวนเพื่อทำอาหารเพียงอย่างเดียวแต่ยังกวนสารสำหรับยารักษาโรคในทางการแพทย์ กวนสารสำหรับสร้าง สิ่งประดิษฐ์หรือสร้างนวัตกรรมใหม่ๆ รวมถึงนำไปใช้ในกระบวนการผลิต เช่น อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ อุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น สารผสมบางชนิดที่นำมาผสมนั้นอาจจะเป็นสารที่ส่งผลกระทบต่อผู้กวน หรืออาจจะเป็นสารที่ผสมยากและใช้เวลานานในการผสมให้เข้ากัน จึงจำเป็นต้องนำเครื่องกวนสารมาใช้แทนแรงงานมนุษย์อีกทั้งเพื่อให้กระบวนการผลิตที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ดังนั้น เครื่องกวนสารจึงถูกนำมาใช้งานเพิ่มมากขึ้น

เครื่องกวนสารเป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในภาคการศึกษา อุตสาหกรรม และทางการแพทย์ เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วเครื่องกวนสารจะกวนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) หรือมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Motor) เป็นอุปกรณ์ต้นกำลังของการกวนสารผสม สารผสมแต่ละชนิดมีความหนืดและลักษณะไม่เหมือนกันการเลือกใช้เครื่องกวนสาร ก็

ขึ้นอยู่กับลักษณะของสารผสม โดยเครื่องกวนสารสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือแบบใบกวน (Stirrer Machine) และเครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer Machine)

### 2.1.1 เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือใบกวน (Stirrer Machine)

เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือใบกวนเป็นเครื่องกวนที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายด้วยลักษณะการกวนโดยใช้ใบกวนทำการกวนสารผสมซึ่งใบกวนจะเชื่อมต่อกับมอเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ต้นกำลังโดยผ่านก้านใบกวน

ใบพัดหรือใบกวนของเครื่องกวนประเภทนี้นิยมใช้สแตนเลส (Stainless Steel) เพราะวัสดุชนิดนี้สามารถป้องกันสนิมจากการทำปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนกับธาตุโลหะ และสามารถป้องกันการกัดกร่อนจากสารผสมได้อีกทั้งใบพัดหรือใบกวนมีหลากหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานทำให้เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือใบกวนสามารถกวนสารผสมหรือของเหลวที่มีความหนืดสูงหรือต่ำได้ขึ้นอยู่กับกำลังของมอเตอร์และชนิดของเครื่องกวนสารโดยสามารถแบ่งลักษณะการใช้งาน ดังนี้

#### 2.1.1.1 เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือใบกวนสำหรับการใช้งานปั่นหรือบด

เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือใบกวนประเภทนี้จะมีลักษณะการใช้งานแตกต่างจากเครื่องกวนสารประเภทอื่นตรงที่สารหรือของที่จะนำมากวนนั้นจะเป็นลักษณะของแข็งเป็นส่วนใหญ่ แต่จะมีของเหลวผสมขณะกวนบางส่วนเพื่อกวนได้ง่ายขึ้น เช่น การทำน้ำผลไม้ปั่น เป็นต้น ดังนั้นใบพัดหรือใบกวนสำหรับการกวนประเภทนี้จะต้องมีลักษณะที่คมและแข็งแรงพอสมควร และมอเตอร์ควรมีแรงบิดที่มากพอที่จะเอาชนะแรงต้านของสิ่งที่ทำการกวน



ภาพประกอบ 1 เครื่องกวนสารแบบใบพัดสำหรับการใช้งานปั่นหรือบด [3]

### 2.1.1.2 เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือใบกวนสำหรับการใช้งานของสารที่มีความหนืดสูง

เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือใบกวนประเภทนี้จะนำไปใช้กวนสารที่มีความหนืดสูง เช่น การกวนผลไม้เพื่อการถนอมอาหาร เป็นต้น ซึ่งสารผสมหรือของเหลวที่นำมากวนปกติจะมีความหนืดค่อนข้างสูง และกวนแต่ละครั้งจะกวนให้ปริมาณที่มาก ดังนั้นลักษณะของเครื่องกวนสารและใบกวนจึงต้องมีขนาดใหญ่เพื่อกวนในปริมาณที่มาก จึงทำให้เครื่องกวนสารประเภทนี้มีกำลังมอเตอร์ที่สูง แต่ความเร็วขณะกวนไม่เร็วมากขึ้นอยู่กับสารผสมหรือของเหลว



ภาพประกอบ 2 เครื่องกวนสารแบบใบพัดสำหรับการใช้ของสารที่มีความหนืดสูง [4]

### 2.1.1.3 เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือใบกวนสำหรับการใช้งานด้านวิทยาศาสตร์และ

ทางการแพทย์

เครื่องกวนประเภทนี้จะมีลักษณะการใช้งานคล้ายกับ เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือใบกวนสำหรับการใช้งานของสารที่มีความหนืดสูง แต่จะต่างตรงที่เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือใบกวนสำหรับการใช้งานด้านวิทยาศาสตร์และทางการแพทย์ จะมีขนาดของเครื่องและใบกวนที่เล็กกว่า และมีความแม่นยำมากกว่า เพราะเครื่องกวนประเภทนี้นิยมมาใช้ในการทดลองและการทำวิจัยเป็นส่วนใหญ่ สารผสมที่นำมากวนหรือผสมจะมีหลากหลายชนิด แต่ละชนิดจะมีความเร็วสำหรับกวนและลักษณะการกวนไม่เหมือนกันขึ้นอยู่กับประเภทของสาร จึงทำให้เครื่องกวนประเภทนี้มีความแม่นยำสูง



ภาพประกอบ 3 เครื่องกวนสารแบบใบพัดสำหรับใช้งานด้านวิทยาศาสตร์และการแพทย์ [5]

### 2.1.2 เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer Machine)

เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็กเป็นเครื่องกวนสารที่นิยมใช้งานด้านวิทยาศาสตร์และการแพทย์เป็นส่วนใหญ่ มีลักษณะการกวนคือใช้แท่งแม่เหล็กหรือแท่งกวน (Magnetic Bar) ทำหน้าที่กวนหรือผสมสาร โดยใช้มอเตอร์เป็นอุปกรณ์ต้นกำลังในการกวนสารซึ่งแท่งกวนสารกับมอเตอร์มิได้เชื่อมต่อกันโดยตรง แต่จะใช้หลักการการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กระหว่างแท่งกวนกับแม่เหล็กถาวรที่ยึดติดกับก้านเพลลาของมอเตอร์ดังแสดงในภาพประกอบ 2.4



ภาพประกอบ 4 เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก [6]

การที่แท่งกวนสารไม่เชื่อมต่อกับมอเตอร์โดยตรงจึงทำให้ไม่มีสารตกค้างจากสารอื่น เช่น น้ำยาหล่อลื่นที่มอเตอร์ เป็นต้น และแท่งกวนสารสามารถทำความสะอาดได้ง่ายกว่าใบกวนของเครื่องกวนแบบใบพัดหรือใบกวน จึงทำให้เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็กเหมาะกับการใช้ผสมสารเคมีของงานทดลองทั้งในส่วนทางการแพทย์ วิทยาศาสตร์ และกระบวนการอื่นๆ แต่เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็กไม่เหมาะกับการกวนสารผสมที่มีความหนืดสูงขณะความเร็วกวนสูง เนื่องจากจะทำให้แรงต้านจากแรงเฉือนระหว่างแท่งกวนสารกับสารผสมมากกว่าแรงจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กจะส่งผลทำให้แท่งกวนไม่สามารถกวนสารได้

## 2.2 การควบคุมระบบ

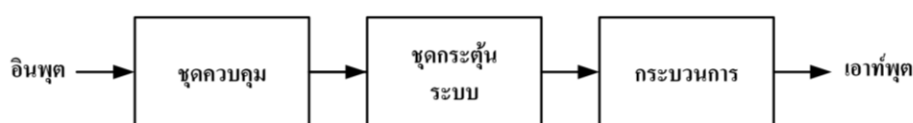
การควบคุมระบบในปัจจุบันมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการเข้ามาพัฒนาเทคโนโลยีในอุตสาหกรรม เช่น การควบคุมเครื่องจักรเพื่อกระบวนการผลิตที่รวดเร็วและชีวิตประจำวัน เช่น การควบคุมเครื่องปรับอากาศของระบบปรับอากาศภายในอาคารให้คงที่ โดยทั่วไปแล้วระบบในธรรมชาติเป็นสิ่งที่เราไม่เข้าใจการทำงานของมันอย่างถ่องแท้ เหมือนกับเป็นกล่องดำที่เราทราบแต่เพียงว่าหากมีข้อมูลการกระตุ้นหรือระบบหรืออาจเรียกว่า อินพุท (Input) และเราทราบว่าระบบจะมีการตอบสนอง ซึ่งเราเรียกว่า เอาท์พุท (Output) ดังนั้นแทนที่จะพยายามที่จะทำความเข้าใจกับระบบ แต่จะเลี้ยวไปทำความเข้าใจกับความสัมพันธ์ระหว่างอินพุทและเอาท์พุทของระบบมากกว่า เพื่อที่จะหาวิธีการกำหนดอินพุทให้กับระบบเพื่อที่จะให้ระบบมีเอาท์พุทตามที่ต้องการ อย่างไรก็ตามการควบคุมระบบเรามีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเข้าใจการทำงานของระบบ แม้ว่าในหลายกรณีที่ระบบนั้นมีความซับซ้อนมากก็ตาม อาจจะต้องใช้วิธีการสร้างแบบจำลอง (Model) การทำงานของระบบขึ้นมา ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการสร้างแบบจำลองระบบ (System Modeling) จะเป็นการประมาณและกำหนดข้อจำกัดบางอย่างขึ้นมาเพื่อให้ระบบสามารถที่จะจำลองเป็นสมการคณิตศาสตร์ที่จะสามารถเข้าใจได้ ดังนั้นในการศึกษาเรื่องการควบคุมระบบเราจะต้องศึกษาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างอินพุทกับเอาท์พุทและกำหนดอินพุทเพื่อที่ระบบจะให้เอาท์พุทตามที่ต้องการ การศึกษาในวิธีการควบคุมระบบมีความจำเป็นมากขึ้นเนื่องจากความต้องการในการใช้ทรัพยากรต่างๆให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ระบบควบคุมที่มีประสิทธิภาพทำให้เราสามารถประหยัดพลังงาน เวลา และอื่นๆได้อย่างมาก ในขณะเดียวกันก็ได้ผลลัพธ์ออกมาตรงตามรูปแบบที่เราต้องการอย่างถูกต้อง

ระบบควบคุม คือ ส่วนประกอบหลายๆส่วนต่อเชื่อมกันขึ้นเป็นระบบที่จะให้การตอบสนองตามต้องการ พื้นฐานของการวิเคราะห์ระบบจะมีพื้นฐานจากทฤษฎีระบบเชิงเส้น ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ของอินพุทและเอาท์พุทหรือการตอบสนอง ในส่วนอินพุทและเอาท์พุทของ ระบบมัก

แทนด้วยสัญญาณโดยสัญญาณอินพุตจะเป็นส่วนสำคัญของผลลัพธ์หรือเอาต์พุต ระบบควบคุมสามารถแบ่งออกเป็น ระบบควบคุมแบบวงเปิด (Open Loop Control System) และระบบ ควบคุมแบบวงปิด (Closed Loop Control System)

### 2.2.1 ระบบควบคุมแบบวงเปิดหรือระบบควบคุมแบบไม่ป้อนกลับ (Open Loop Control System or No Feedback Control System)

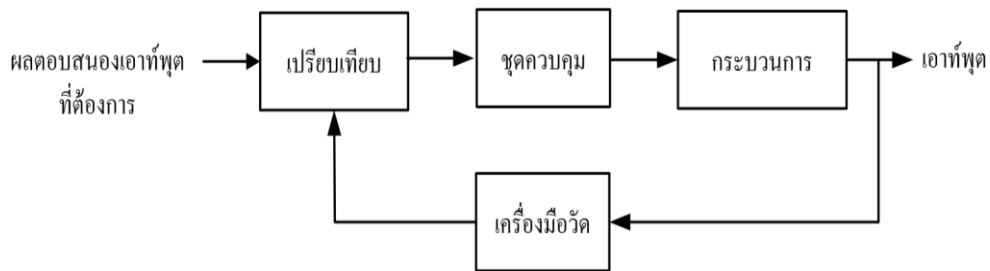
ระบบควบคุมวงเปิดเป็นระบบควบคุมส่วนใหญ่จะต้องอาศัยการคาดคะเน และการตัดสินใจในการกำหนดอินพุต ตัวอย่างเช่น การควบคุมอัตราการไหลของน้ำประปาในครัวเรือน การควบคุมมอเตอร์ของพัดลมเพื่อระบายอากาศที่มีการติดตั้งอุปกรณ์เปิด – ปิดเท่านั้น ซึ่งผู้ใช้จะต้องตัดสินใจในการเปิดการใช้งาน ดังนั้นระบบควบคุมแบบวงเปิด การใช้อุปกรณ์ Controller หรือ อุปกรณ์กระตุ้น (Control Actuator) เพื่อให้ได้การตอบสนองหรือเอาต์พุตที่เราต้องการโดยไม่นำผลการตอบสนองของระบบเข้าสู่การพิจารณา ลักษณะของระบบควบคุมแบบเปิด ดังแสดงในภาพประกอบ



ภาพประกอบ 5 ระบบควบคุมแบบเปิดหรือระบบควบคุมแบบไม่ป้อนกลับ

### 2.2.2 ระบบควบคุมแบบวงปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed Loop Control System or Feedback Control System)

ระบบควบคุมแบบป้อนกลับจะแตกต่างจากระบบควบคุมแบบเปิดก็คือ มีการนำเอาผลที่ได้จากการตอบสนองของระบบมาป้อนกลับเพื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุตหรืออินพุตอ้างอิงจะทำให้ได้ผลต่างความคาดเคลื่อน (Error) ระหว่างสัญญาณอินพุตอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตเพื่อนำมาสร้างสัญญาณกระตุ้นระบบแก้ไขให้ผลต่างความคาดเคลื่อนลดน้อยลง ซึ่งผู้ควบคุมสามารถกำหนดเอาต์พุตให้กับระบบควบคุมแบบป้อนกลับได้ ดังแสดงภาพประกอบ 2.6 มีหลักการดังนี้ โดยการนำผลต่างความคลาดเคลื่อนระหว่างสัญญาณอินพุตกับสัญญาณเอาต์พุตมาประมวลผลผ่านระบบควบคุม (Controller) เพื่อกระตุ้นสัญญาณ (Actuator) ในระบบ (System) ให้ตอบสนองตามที่ต้องการ ซึ่งระบบควบคุมแบบปิดเป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบันและมีประสิทธิภาพในการควบคุมการตอบสนองมากกว่าระบบควบคุมแบบเปิด

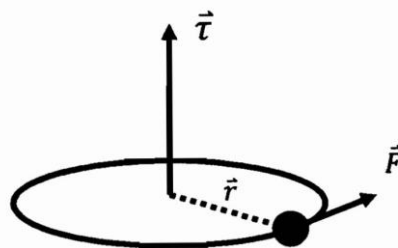


ภาพประกอบ 6 ระบบควบคุมแบบเปิด

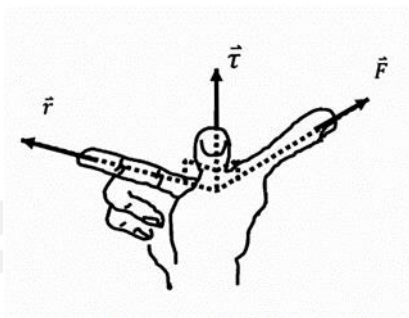
สำหรับระบบควบคุมหนึ่งๆนั้น อาจจะมีพารามิเตอร์หรือตัวแปรที่ต้องการจะควบคุมมากกว่าหนึ่งพารามิเตอร์ ซึ่งระบบควบคุมดังกล่าวเป็นระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น แต่หลักการของระบบควบคุมก็จะเหมือนเดิมคือ ทุกตัวแปรที่เราต้องการควบคุมจะต้องมีการวัดค่าที่ได้จากเอาต์พุต และนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่เราต้องการของตัวแปรนั้นๆ สำหรับระบบควบคุมหลายตัวแปร (Multivariable Control System)

### 2.3 ทอร์กและการเคลื่อนที่แบบหมุน

จากหลักการของโมเมนต์ เมื่อออกแรงกระทำต่อวัตถุและแนวแรงไม่ผ่านจุดศูนย์กลางมวลหรือแกนหมุน ผลที่เกิดขึ้นจะมีการหมุนเกิดขึ้นซึ่งเรียกว่าเกิดโมเมนต์ของแรงรอบจุดหมุนนั้น เรียกว่าทอร์ก ( $\tau$ ) โดยทอร์กเป็นปริมาณเวกเตอร์ มีขนาดเท่ากับแรงคูณระยะทางที่ลากจากจุดหมุนมาตั้งฉากกับแนวแรงและทิศทางของทอร์กมีทิศตั้งฉากกับระนาบการหมุน ดังภาพประกอบ 7 และ 8



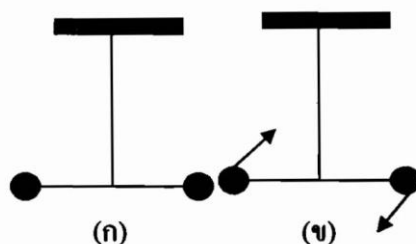
ภาพประกอบ 7 ทอร์กที่กระทำต่อวัตถุ [8]



ภาพประกอบ 8 แสดงการหาทิศของทอร์ก [8]

จากภาพประกอบ 7 การหาทิศทางของทอร์กโดยใช้มือขวา ในลักษณะนิ้วชี้ นิ้วกลาง และ นิ้วหัวแม่มือ ตั้งฉากซึ่งกันและกัน แล้ววางนิ้วชี้ไปทางทิศของแรง  $F$  นิ้วกลางชี้ตามแนวรัศมีพุ่งเข้าหา จุดหมุน จะได้ว่า นิ้วหัวแม่มือชี้ทิศทางของทอร์ก ดังภาพประกอบ 8

ดังนั้นอาจกล่าวสรุปได้ว่า การเคลื่อนที่แบบหมุนจะเกิดการหมุนในลักษณะที่เกิดทอร์ก เมื่อ มีทอร์กที่ไม่เป็นศูนย์มากระทำ



ภาพประกอบ 8 แสดงการเคลื่อนที่แบบหมุนในกรณีเมื่อไม่มีทอร์กมากระทำกับวัตถุ [8]

(ก) วัตถุอยู่นิ่งเมื่อไม่มีทอร์กมากระทำกับวัตถุ และ

(ข) วัตถุเคลื่อนที่เมื่อไม่มีทอร์กมากระทำกับวัตถุ

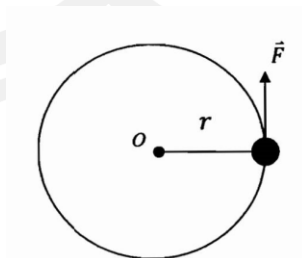
ภาพประกอบ 9 (ก) และ ภาพประกอบ (ข) มีลูกตุ้ม 2 ลูกติดกับคาน แล้วผูกด้วยเชือกแขวนไว้ ภาพประกอบ 9 (ก) วัตถุจะอยู่นิ่ง จะไม่มีทอร์กเกิดขึ้น เพราะ  $\sum \vec{M} = 0$  ภาพประกอบ 9 (ข) เมื่อมีแรงมากระทำให้เกิดการหมุน จะมีทอร์กเกิดขึ้นผลจะทำให้เชือกเส้นนี้ขาด

### 2.3.1 การหาทอร์ก

ในการศึกษาเรื่องการหมุนของวัตถุเมื่อมีทอร์กที่ไม่เป็นศูนย์มากระทำ ผลที่เกิดขึ้นวัตถุจะหมุนในลักษณะการเปลี่ยนสภาพการหมุนที่มีความเร่งเชิงมุมตามทิศของทอร์ก ลักษณะเกี่ยวกับการชันนืดและคายชันนืด ในที่นี้เราจะเริ่มศึกษาหาทอร์กที่เกิดขึ้นจากการหมุนแบบง่ายๆ เช่น เมื่อมีมวล  $m$  ติดอยู่กับปลายแท่งวัตถุเล็กๆ เบา ยาว  $r$  โดยปลายอีกข้างหนึ่งตรึงอยู่กับจุด  $O$  บนพื้น ซึ่ง



ปราศจากแรงเสียดทาน เมื่อมีแรง  $\vec{F}$  มากระทำต่อมวล  $m$  ในทิศตั้งฉากกับแนวรัศมีใดๆ ตลอดเวลา โดยแนวแรง  $\vec{F}$  สัมผัสกับแนววงกลมหรือตั้งฉากกับรัศมี  $r$  ดังภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 9 แสดงแรงกระทำต่อวัตถุทำให้เกิดทอร์ก [8]

จากกฎการเคลื่อนที่ข้อ 2 ของนิวตัน มวล  $m$  จะเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง  $\vec{a}$  ซึ่งมีทิศทางเดียวกับแรง  $\vec{F}$  คือ มีทิศสัมผัสวงกลมตลอดเวลา จะได้ว่า

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (2.1)$$

หรือเมื่อกล่าวถึงขนาดของปริมาณต่างๆ จะได้ว่า

$$Fr = mar \quad (2.2)$$

เมื่อ  $F$  = แรง (N)

$m$  = มวล (kg)

$a$  = ความเร่ง (m/s<sup>2</sup>)

$r$  = ระยะจากจุดศูนย์กลางของวงกลมมายังแนวแรง (m)

ถ้าภายในช่วงเวลาสั้นๆ  $\Delta t$  ขนาดของความเร็วในแนวสัมผัสเปลี่ยนไป  $\Delta v$  และขนาดของความเร็วเชิงมุมเปลี่ยนไป  $\Delta \omega$  จะได้ว่า

$$\Delta v = r\Delta \omega \quad \text{เมื่อ } (v = \omega r)$$

หรือ

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = r \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$$

เมื่อกำหนดให้ความเร่งเชิงมุม  $\alpha$

ดังนั้น

$$a = r\alpha$$

แทนค่า  $a$  ในสมการที่ 2.3 จะได้ว่า

$$F_r = mr^2\alpha \quad (2.3)$$

จากนิยามของ ทอร์ก

$$\tau = F_r$$

จึงได้ว่า

$$\tau = mr^2\alpha \quad (2.4)$$

จากสมการ  $\tau = mr^2\alpha$  แสดงว่า ทอร์กทำให้วัตถุหมุนด้วยความเร่งเชิงมุมค่าหนึ่ง ความเร่งเชิงมุมจะมีค่ามากหรือน้อย นอกจากขึ้นอยู่กับทอร์ก แล้วยังขึ้นอยู่กับค่ามวลของวัตถุ และ ระยะห่างของมวลจากจุดหมุน  $r$  ด้วย หรือกล่าวได้ว่าขึ้นอยู่กับ  $mr^2$  ดังสมการ

$$\alpha = \frac{\tau}{mr^2} \quad (2.5)$$

แสดงว่าเมื่อใช้ทอร์กค่าหนึ่งกระทำต่อวัตถุ ถ้าวัตถุมีค่า  $mr^2$  มากจะหมุน โดยมีความเร่งเชิงมุม น้อย ค่า  $mr^2$  จึงบอกถึงสมบัติด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพการหมุนหรือความเฉื่อยของการหมุนของวัตถุ ซึ่งเรียกว่า โมเมนต์ความเฉื่อย ( $I$  : Moment of inertia) จึงได้ว่า

$$I = mr^2 \quad (2.6)$$

เมื่อ  $I =$  โมเมนต์ความเฉื่อย ( $Kg/m^2$ )

ซึ่งโมเมนต์ความเฉื่อย เป็นปริมาณสเกลาร์ ดังนั้นทอร์กอาจเขียนใหม่ได้ว่า

$$\vec{\tau} = I\vec{\alpha} \quad (2.7)$$

จากสมการที่ได้พบว่า ทอร์ก และ ความเร่งเชิงมุม มีทิศทางเดียวกัน

จากการศึกษาในขั้นสูงขึ้นไปพบว่าค่าโมเมนต์ความเฉื่อยขึ้นอยู่กับมวลและการกระจายของมวลและที่สำคัญอย่างยิ่งคือแกนหมุน ดังนั้นการบอกค่าโมเมนต์ความเฉื่อยต้องบอกทิศทางด้วยว่าหมุนรอบแกนใดจากการทดลองวัตถุเดียวกัน ถ้าแกนหมุนต่างกันค่าโมเมนต์ความเฉื่อยจะมีค่าต่างกันด้วย

## 2.4 ทอร์กของมอเตอร์

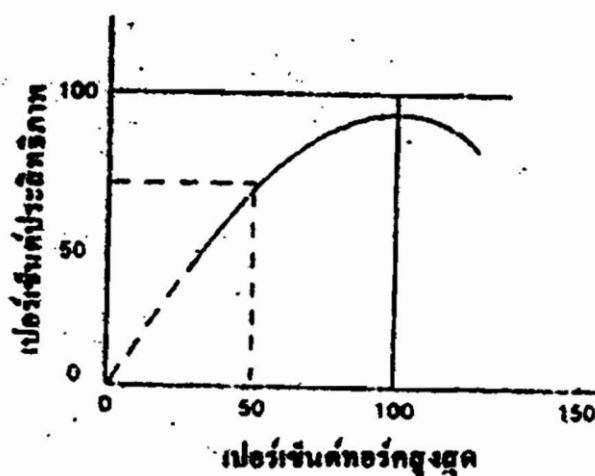
ทอร์กของมอเตอร์นั้นจะเป็นปัจจัยสำคัญในการที่จะทำให้เราสามารถใช้งานมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและช่วยลดค่าไฟของมอเตอร์ ความเข้าใจในเรื่องทอร์กของมอเตอร์จำเป็นสำหรับการเลือกมอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดีที่สุดกับงานแต่ละอย่าง เพราะราคาของมอเตอร์นั้นขึ้นกับแรงบิดของมอเตอร์โดยตรง ถ้าสามารถเลือกมอเตอร์ที่มีแรงบิดเหมาะสมกับโหลด ก็จะทำให้มอเตอร์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ถ้าเลือกมอเตอร์ที่มีแรงบิดสูงๆ ไปใช้กับโหลดที่ต้องการแรงบิดต่ำแล้ว ประสิทธิภาพในการทำงานของมอเตอร์จะตกลงไปเป็นอย่างมาก

ความหมายทอร์กของตัวมอเตอร์เป็น 2 นัย นัยแรก คือ ทอร์กของตัวมอเตอร์เอง คือ แรงบิดที่มอเตอร์สามารถให้ในการขับโหลดได้ที่เรียกว่า มอเตอร์ทอร์ก (motor torque) ซึ่งเป็นแรงบิดที่แกนเพลลาของมอเตอร์ ปกติจะกำหนดค่าเป็น ฟุต-ปอนด์ นัยที่ 2 คือ โหลดทอร์ก (load torque) คือ แรงบิดที่แกนเพลลาของโหลดที่ต้องการในการหมุนให้ได้รอบที่ถูกต้อง และปกติจะมีค่าเป็นฟุต-ปอนด์เช่นเดียวกัน

### 2.4.1 ชนิดของทอร์กของมอเตอร์

โดยปกติแล้วเราจะมี ความคุ้นเคยกับแรงม้าของมอเตอร์มากกว่าทอร์กเพราะว่าข้อมูลเกี่ยวกับมอเตอร์ที่แสดงไว้บนแผ่นป้ายหรือ name plate ของมอเตอร์นั้น ตามมาตรฐาน จะกำหนดแต่เพียงค่าของแรงม้าและความเร็วโดยไม่มีกรกล่าวถึงค่าของทอร์กเอาไว้เลย แต่ค่าแรงม้าและค่าแรงบิดของมอเตอร์จะมีความสัมพันธ์กัน อย่างไรก็ตามค่าทอร์กของมอเตอร์จะเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อราคาของมอเตอร์เป็นอย่างมาก ยกตัวอย่างเช่น มอเตอร์ขนาด 10 แรงม้า ที่มีความเร็วรอบ 1,200 รอบต่อนาที จะมีราคาสูงกว่ามอเตอร์ขนาด 10 แรงม้าเท่ากัน แต่ความเร็วรอบ 1,800 รอบต่อนาที ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าทอร์กของมอเตอร์ลูกแรกนั้นสูงกว่ามอเตอร์ลูกหลังเกือบ 50% และก็เช่นเดียวกัน มอเตอร์ขนาด 10 แรงม้า ที่มีความเร็วรอบเพียง 900 รอบต่อนาที จะยังมีราคาสูงกว่ามอเตอร์ที่มีความเร็วรอบ 1,800 รอบต่อนาที แม้จะมีแรงม้าเท่ากันถึง 100% ซึ่งก็เป็นเหตุผลอธิบายได้ว่า ทำไมมอเตอร์ ที่มีความเร็วรอบต่ำๆ จึงไม่มีการผลิตออกมาขายกันมากนัก เพราะจะเป็นการประหยัดกว่าที่จะใช้มอเตอร์ ที่มีความเร็วรอบมาตรฐานและใช้การทดเกียร์หรือใช้สายพานเพื่อให้ได้ความเร็วรอบที่ปลายทางตามที่ต้องการ ค่าใช้จ่ายในการใช้งานมอเตอร์หรือค่าไฟของมอเตอร์นั้นจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการใช้งานร่วมกับโหลดเป็นสำคัญ จากเหตุผลเกี่ยวกับต้นทุนการผลิต บรรดาผู้ผลิตมอเตอร์จึงได้ออกแบบมอเตอร์ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ณ จุดที่มอเตอร์กินกระแสสูงสุดตามที่กำหนดไว้บนแผ่นป้ายตามภาพประกอบ 11 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของมอเตอร์กับทอร์ก เห็นได้ชัดว่า ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อค่าโหลดของมอเตอร์ต่ำกว่า

50% ของอัตราโหลดที่กำหนดไว้บนแผ่นป้าย เหตุผลที่ประสิทธิภาพของมอเตอร์ลดลงเช่นนี้ ก็เพราะว่าการสูญเสียพลังงานของมอเตอร์ทั้งหมดเป็น 1 ใน 3 ค่าแปรผันโดยตรงกับทอร์กของโหลด ในขณะที่ส่วนที่เหลือจะมีค่าคงที่ ดังนั้นถ้านำมอเตอร์ไปใช้กับโหลดที่มีค่าต่ำๆแล้ว ความสูญเสียส่วน ใหญ่จะเป็นค่าคงที่ อันทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ลดต่ำลงเป็นอย่างมาก ซึ่งเส้นตัดตั้ง ภาพประกอบ 11 แสดงให้เห็นว่า เมื่อค่าทอร์กของโหลดเหลือเพียง 50% ประสิทธิภาพของมอเตอร์ จะตกลงจากประสิทธิภาพสูงสุดคือ 93 % เหลือเพียง 70 % เท่านั้น



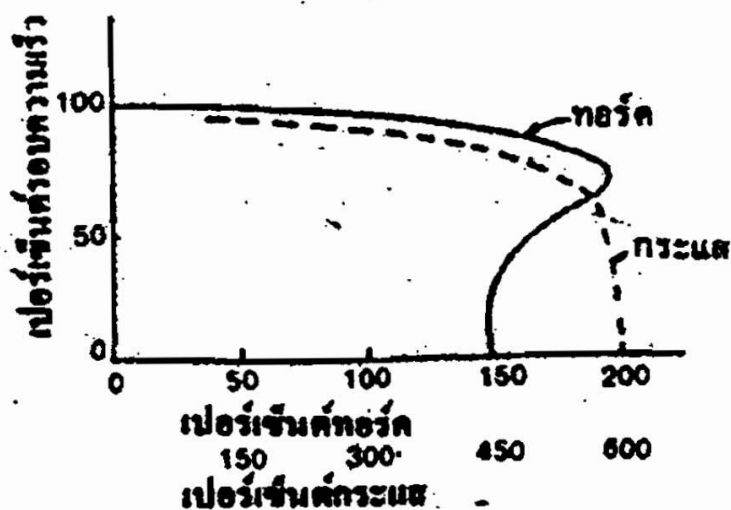
ภาพประกอบ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับทอร์กของมอเตอร์ที่ใช้งานทั่วไป [8]

แนวทางที่สำคัญ 2 ประการ ซึ่งเราควรจะยึดในการเลือกซื้อมอเตอร์มาใช้งานก็คือ เลือกมอเตอร์ให้มีกำลังเพียงพอกับการใช้งานเท่านั้น อย่าเลือกมอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่เกินไป และพยายามลดการนำเอามอเตอร์มาใช้งานในสภาวะที่ โหลดมีต่ำต่ำเป็นเวลานานๆ มีเทคนิคอยู่หลายๆ ประการที่จะนำมาใช้เพื่อให้การใช้งานของมอเตอร์เป็นไปตามแนวทางทั้งสองนั้น แม้ว่าในบางสถานการณ์การใช้งานของมอเตอร์อาจจะไม่เป็นไปตามทางที่ได้กล่าวไว้นี้ อย่าลืมนำมอเตอร์ที่จะถูกเลือกนำมาใช้ให้เหมาะสมกับโหลดที่ขับได้อย่างเหมาะสม เพื่อให้การทำงานของมอเตอร์มีประสิทธิภาพสูงสุด อันจะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและค่าไฟน้อยที่สุด ดังนั้นทอร์กที่โหลดต้องการรวมทั้งทอร์กที่มอเตอร์สามารถจ่ายให้ จึงเป็นเงื่อนไขอันสำคัญในการที่จะสามารถใช้งานมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

#### 2.4.2 ประเภททอร์กของมอเตอร์ตามการใช้งาน

ในการที่จะนำเอามอเตอร์ไปใช้งานอย่างได้ผลนั้น ผู้ใช้จำเป็นต้องเข้าใจถึงคุณสมบัติของมอเตอร์ตามที่ปรากฏในภาพประกอบ 12 อย่างถ่องแท้ เส้นโค้งที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว

รอบเปรียบเทียบกับทอร์กและค่ากระแสของมอเตอร์นั้นเป็นของมอเตอร์มาตรฐานชนิด NAME DESIGN B ที่แสดงให้เห็นทอร์กที่เกิดขึ้นเทียบกับความเร็วรอบต่างๆ ของมอเตอร์



ภาพประกอบ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ ทอร์ก และค่ากระแสของมอเตอร์ [8]

#### 1) ทอร์กในสภาวะการใช้งานปกติ (steady state torque)

ทอร์กในสภาวะการใช้งานปกติของโหลดนั้น คือ ทอร์กที่โหลดต้องการสำหรับการทำงานอย่างต่อเนื่องและจะก่อให้เกิดผลเกี่ยวกับความร้อน ซึ่งมอเตอร์จะต้องสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง ค่าแรงม้าที่ระบุไว้บนแผ่นป้ายของมอเตอร์จะเป็นสิ่งรับประกันว่าโหลดที่มีค่าดังกล่าวนี้จะสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง โดยไม่ก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเกินกว่าค่าที่ฉนวนของมอเตอร์จะทนได้

อย่างไรก็ตาม รายละเอียดที่แสดงไว้บนแผ่นป้ายของมอเตอร์จะบอกข้อมูลอื่นๆ ที่เกี่ยวกับการใช้งานโหลดน้อยมาก ด้วยเหตุนี้เองทอร์กที่โหลดต้องการในสภาวะการใช้งานปกติจึงมักไม่ค่อยเหมาะสมกับโหลดที่มอเตอร์สามารถจ่ายให้ได้ ดังนั้นมอเตอร์ตามมาตรฐานของ NEMA จึงมีการกำหนดค่าของปัจจัยบริการ (service factor) (ปกติจะมีค่า 1.15 สำหรับมอเตอร์ชนิดกันหยดน้ำ กระเซ็นหรือ drip proof motor) ทั้งนี้เพื่อให้มอเตอร์สามารถใช้งานได้กับสภาวะโหลดเกินกำลังที่อาจจะเกิดขึ้นในบางครั้ง

ค่าปัจจัยบริการนี้จะเป็นตัวรับประกันว่า ถ้านำมอเตอร์ไปใช้กับงานที่มีค่า 115 % ของค่าโหลดที่กำหนดไว้บนแผ่นป้าย อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะไม่เกินกว่าค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ยังถือว่าปลอดภัย ซึ่งจะทำให้ผู้ใช้สามารถเลือกมอเตอร์ที่มีขนาดประหัด สำหรับการใช้งานในสภาวะที่การเกิดโหลดกำลังมีไม่บ่อยครั้งนัก เมื่อใช้ค่าปัจจัยบริการนี้อย่างเหมาะสม แม้ว่าอายุการใช้งานของ

มอเตอร์จะลดลงบ้างก็ยังคุ้มค่ากับการประหยัดที่ได้จากราคาของมอเตอร์และการกินไฟของมอเตอร์สำหรับการใช้งานในสภาวะปกติ

การชดเชยกันของตัวแปรทั้งสองนี้สามารถกำหนดได้โดยกฎอย่างง่าย ๆ ว่าทุกๆ ชั่วโมงของการใช้งานมอเตอร์เกินกำลังไป 15 % อายุการใช้งานของมอเตอร์จะสั้นลงประมาณ 2 หรือ 3 ชั่วโมง ซึ่งก็นับว่าเป็นการแลกเปลี่ยนที่คุ้มค่าในกรณีที่การใช้มอเตอร์กับโหลดที่เกินกำลังนั้นมีได้เกิดขึ้นบ่อยนัก กรณีดังกล่าวมักจะเกิดขึ้นบ่อยๆ กับการใช้งานมอเตอร์กับเครื่องมือกลที่ต้องใช้งานมากกว่าปกติเป็นบางครั้งบางคราว ซึ่งการยอมเลือกมอเตอร์ขนาดเล็กและปล่อยให้มอเตอร์ถูกใช้งานเกินกำลังบ้างนี้ เป็นสิ่งที่ควรจะทำเป็นอย่างยิ่ง เพราะการเลือกขนาดของมอเตอร์ที่ใหญ่ขึ้นจะทำให้มอเตอร์ถูกใช้งานในสภาวะที่มีโหลดน้อยกว่าความเป็นจริงเป็นส่วนใหญ่ อันทำให้มอเตอร์ถูกใช้งานที่ประสิทธิภาพต่ำมอเตอร์จึงกินกระแสไฟสูง และราคาของมอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ดังกล่าวก็แพงขึ้นด้วย

## 2) ทอร์กสำหรับการเร่งรอบความเร็ว (acceleration torque)

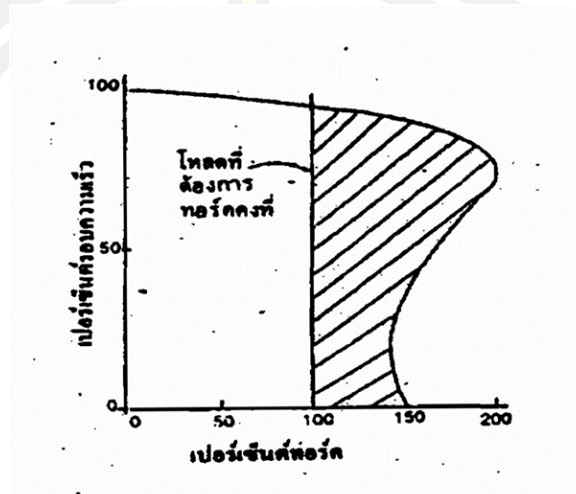
การเร่งรอบความเร็วของโหลดส่วนใหญ่่นั้นโดยปกติแล้วจะไม่ใช่ปัญหาอะไร ยกเว้นในกรณีที่โหลดซึ่งถูกขับนั้นมีค่าความเฉื่อยสูง ซึ่งเวลาที่ใช้ในการเร่งรอบความเร็วจากสภาวะหยุดที่จนถึงรอบความเร็วปกตินั้นอาจจะกลายเป็นปัญหาที่สำคัญได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่เวลาคงกล่าวนั้นเกินกว่า 10 วินาที เหตุผลเรื่องนี้สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 12 ที่ผ่านมาซึ่งแสดงให้เห็นว่า มอเตอร์จะดึงกระแสไฟฟ้าสูงมากในขณะที่เริ่มหมุนจนกว่ามันจะมีความเร็วรอบตามปกติ ถ้ากระแสที่มีค่าสูงของมอเตอร์นี้มีอยู่นานจนเกินไป ค่าการสูญเสียก็จะทำให้มอเตอร์เกิดความร้อนจัดหรือทำให้อุปกรณ์ป้องกันในวงจรไฟฟ้าเกิดการ trip บ่อยครั้ง ซึ่งล้วนแต่เป็นสภาวะที่ไม่อาจยอมรับได้

เวลาที่ใช้ในการเร่งรอบความเร็วนี้จะขึ้นกับค่าความเฉื่อยของอุปกรณ์ที่หมุนเป็นหลัก อย่างไรก็ตามเวลานี้ก็ยังขึ้นกับค่าความแตกต่างของทอร์กที่โหลดต้องใช้ในการหมุน และทอร์กที่มอเตอร์สามารถจ่ายให้ได้ที่แต่ละความเร็วรอบดังภาพประกอบ 13 จะเป็นมอเตอร์มาตรฐานชนิด NEMA B ซึ่งใช้กับโหลดที่ต้องการค่าทอร์กคงที่ บริเวณที่ขีดเส้นขวางจะแสดงให้เห็นค่าทอร์กที่ยังเหลืออยู่สำหรับการเร่งรอบความเร็ว

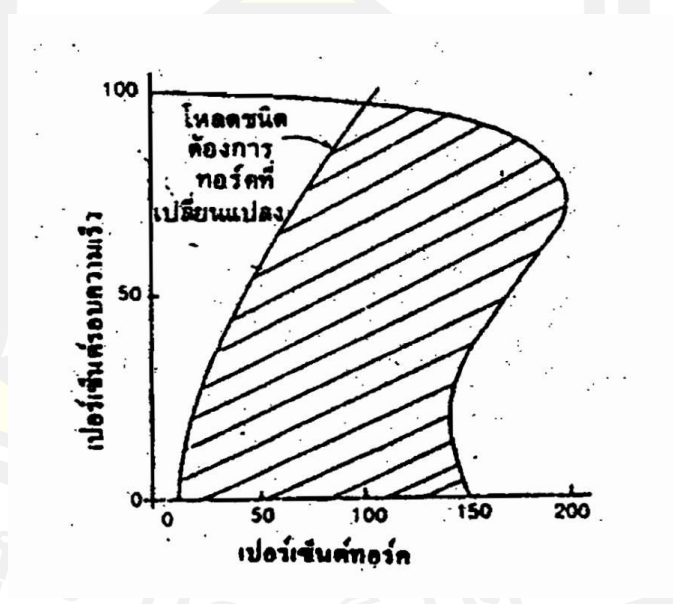
ส่วนโหลดชนิดอื่นๆ เช่น พัดลม จะเป็นโหลดที่ง่ายกว่าในการเร่งรอบความเร็ว และไม่ก่อให้เกิดความร้อนสูงขึ้นกับมอเตอร์คงที่ปรากฏในภาพประกอบ 13 ซึ่งเป็นเส้นโค้งทอร์กของมอเตอร์ประเภทเดียวกัน แต่โหลดที่มอเตอร์ขับนั้นจะเป็นพัดลมที่ต้องการค่าทอร์กที่เปลี่ยนแปลงไปตามรอบความเร็ว ทำให้มีค่าทอร์กเหลือสำหรับการเร่งรอบความเร็วได้ดียิ่งขึ้น ดังแสดงให้เห็นในบริเวณที่มีการขีดเส้นเฉียงเอาไว้นั่นเอง



การเลือกมอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่กว่าปกติ ย่อมทำให้มีทอร์กสำหรับการเร่งรอบความเร็วเหลือพอสำหรับแก้ปัญหาดังกล่าวนี้ได้ แต่ก็ทำให้ต้นทุนของมอเตอร์สูงขึ้น และสำหรับการใช้งานในสภาวะปกตินั้นมอเตอร์จะถูกใช้งานที่ค่าเปอร์เซ็นต์ของทอร์กต่ำกว่าทอร์กปกติ อันทำให้มอเตอร์ถูกใช้งานในสภาพที่มีประสิทธิภาพต่ำ



ภาพประกอบ 12 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับทอร์ก [8]



ภาพประกอบ 13 สำหรับโหลดชนิดที่ต้องการทอร์กที่เปลี่ยนไปตามค่าความเร็วรอบ [8]

โหลดบางประเภทก็อาจจะก่อให้เกิดปัญหาในด้านของทอร์กสำหรับการเริ่มต้นหมุนอุปกรณ์นั้น ซึ่งปกติแล้วจะมีความต้องการค่าทอร์กคงที่ ซึ่งบริเวณพื้นที่ในภาพที่ขีดเส้นเฉียงจะแสดงให้เห็นทอร์กที่มอเตอร์มีเหลืออยู่สำหรับใช้ขับโหลด ดังภาพประกอบ 14 ค่าทอร์กดังกล่าวนี้ส่วนใหญ่แล้วจะ

เป็นค่าความเสียดทานกลของชิ้นส่วนที่เกิดการหมุนทั้งหมด ค่าความเสียดทานในขณะที่ชิ้นส่วนเริ่มเกิดการหมุน(static friction) จะมีค่าสูงกว่าความเสียดทานในขณะที่มีการหมุน (rolling friction) แล้วหรือไม่นั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของแบริ่งที่ใช้ โดยเฉพาะแบริ่งแบบปลอก (sleeve bearing) ซึ่งต้องอาศัยน้ำมันหล่อลื่นเลี้ยงแบริ่ง ในตอนแรกนั้นจะไม่มีแรงกดตันของน้ำมันขึ้นมาหล่อลื่นเลี้ยงแบริ่งดังกล่าว จนกว่าแกนเพลลาจะหมุนไป 1 หรือ 2 รอบแล้ว คังนั้นก่อนที่แกนเพลลาของโพลดจะหมุนไปได้ นั้นทอร์คของมอเตอร์จะต้องสามารถเอาชนะค่าทอร์คที่โพลดต้องใช้ในขณะที่เริ่มต้นหมุน ซึ่งมีค่าสูงกว่าทอร์คในขณะที่โพลดได้หมุนไปแล้ว และเช่นเดียวกับกรณีอื่นๆ การเลือกมอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จะสามารถแก้ปัญหานี้ได้ แต่จะทำให้เกิดความสูญเสียพลังงานในสภาพการใช้งานตามปกติ ดังนั้นจึงควรเลือกมอเตอร์ที่มีคุณสมบัติเหมาะสำหรับการใช้กับงานบางประเภท โดยเฉพาะซึ่งเป็นทางเลือกที่ดีกว่าการใช้มอเตอร์ชนิดทั่วไปในการขับโพลดดังกล่าว

จากผลของการเปลี่ยนแปลงความถี่ของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่มีผลต่อทอร์คของมอเตอร์ ในปัจจุบันนี้ได้มีการคิดค้นอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้า ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรอบความเร็วของมอเตอร์ อันเป็นสิ่งที่รู้กันทั่วไป อย่างไรก็ตามในเรื่องของการเปลี่ยนแปลงทอร์คของมอเตอร์ที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงความถี่ของกระแสไฟฟ้านั้น กลับเป็นเรื่องที่แทบจะไม่มีใครพูดถึง ทั้งที่การเปลี่ยนแปลงทอร์คของมอเตอร์นั้นจะมีผลต่อการใช้งานของมอเตอร์เป็นอย่างมากในที่นี้เราจะพูดถึงผลการเปลี่ยนแปลงความถี่กระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อทอร์คของมอเตอร์ และในขณะเดียวกันก็จะได้กล่าวถึงผลการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีทอร์คของมอเตอร์ด้วยเช่นกัน อันจะทำให้ผู้ใช้สามารถนำไปพิจารณาในการเลือกมอเตอร์ใช้ขับโพลในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่กระแสไฟฟ้าหรือค่าแรงดันไฟฟ้าดังกล่าว โดยจะขอกกล่าวถึงมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ(induction motor) เป็นตัวอย่าง

ในกรณีแรกถ้าเราเอามอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส มาใช้งานที่ค่าความถี่ต่างกัน โดยค่าแรงดันไฟฟ้าจากต้นทางมีค่าคงที่ ค่าทอร์คของมอเตอร์ที่ความเร็วรอบต่างๆ นั้น จะเปลี่ยนแปลงไปเป็นสัดส่วนกับค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้ายกกำลังสอง (โดยประมาณ) ในขณะที่ค่าความเร็วรอบ synchronous ของมอเตอร์จะแปรผัน โดยตรงกับค่าความถี่กระแสไฟฟ้า ส่วนค่ากระแสมอเตอร์ที่ตั้งไปใช้ที่ความเร็วรอบต่างๆ กันนั้น จะประมาณได้ว่ามีค่าแปรผันกลับกับค่าของความถี่ไฟฟ้า

โดยปกติมอเตอร์จะได้รับการออกแบบให้ทำงานในช่วงสภาวะการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าประมาณ 10 % และค่าการเปลี่ยนแปลงของความถี่ประมาณ 5 % สาเหตุที่ความเร็วรอบของมอเตอร์และทอร์คของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงไปกับค่าความถี่กระแสไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ดังนี้ การลดค่าความถี่กระแสไฟฟ้าจะเป็นการลดค่า magnetizing reactance อันนั้นถ้าค่าแรงดันไฟฟ้าจากต้นทางยังมีค่าคงที่ ค่า magnetizing current และค่า magnetic flux ระหว่างช่องว่างที่เป็นอากาศ (air gap) จะเพิ่มสูงขึ้น



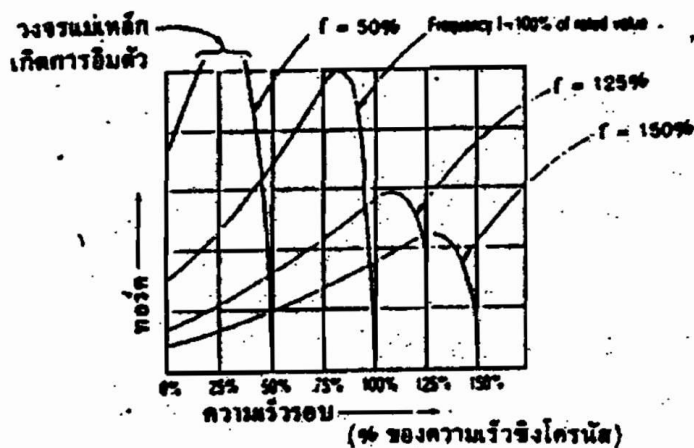
ค่าทอร์กของมอเตอร์จะแปรผันกับค่าความถี่กระแสไฟฟ้ายกกำลังสอง ดังนั้นเมื่อค่าความถี่กระแสไฟฟ้าลดลง ค่ารอบความเร็วของมอเตอร์จะลดลงไปด้วย ในขณะที่ค่าทอร์กของมอเตอร์เพิ่มขึ้น ส่วนเมื่อค่าความถี่กระแสไฟฟ้าสูงขึ้น ค่ารอบความเร็วของมอเตอร์ก็จะสูงขึ้นไปด้วย ในขณะที่ค่าทอร์กของมอเตอร์ลดลง ตัวอย่างเช่น มอเตอร์ขนาด 10 แรงม้า ค่าทอร์กที่ความเร็ว 1,800 รอบต่อนาที จะเท่ากับ 29.2 ฟุต-ปอนด์ แต่เมื่อค่าความถี่กระแสไฟฟ้าเพิ่มเป็น 1.5 เท่า หรือ 150 % ค่าทอร์กของมอเตอร์ขนาด 10 แรงม้า ตัวเดียวกันนั่นเอง ก็จะลดลงเหลือเพียง 19.45 ฟุต-ปอนด์

ดังนั้นเราจึงสามารถสร้างตารางเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงทอร์กของมอเตอร์และรอบความเร็วได้ ดังตารางที่ 2.1 แต่ในกรณีที่ความถี่กระแสไฟฟ้ามีค่าต่ำ ค่าความเหนียวนำแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ก็จะสูงเกินกว่าค่าการอิมตัวของสนามแม่เหล็ก และทำให้ค่ากระแสเหนียวนำที่เกิดขึ้นจากกระแสแม่เหล็กดังกล่าวนี้สูงเกินกว่าที่มอเตอร์จะทนได้ และทำให้มอเตอร์ไหม้

ตาราง 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กระแสไฟฟ้ากับทอร์กของมอเตอร์

ความถี่	ทอร์ก
0	เป็นศูนย์
25%	สูงขึ้น 150%
50%	สูงขึ้น 100%
70%	สูงขึ้น 50%
100%	เท่าอัตราปกติ
125%	ลดลง 50%
150%	สูงขึ้น 100%

เส้นโค้งที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างทอร์กของมอเตอร์กับความเร็วรอบที่ความถี่ต่างๆ กัน โดยค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่ จะปรากฏดังภาพประกอบ 15

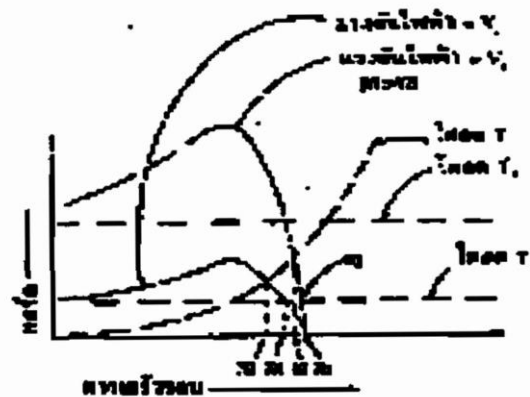


ภาพประกอบ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างทอร์กกับความเร็วยรอบของมอเตอร์ที่ความถี่กระแสไฟฟ้าต่างๆ กัน โดยค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าคงที่ [8]

ส่วนในกรณีที่สองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าโดยค่าความถี่กระแสไฟฟ้าคงที่ ค่าทอร์กของมอเตอร์นั้นจะแปรผันตรงกับค่าแรงดันไฟฟ้ายกกำลังสอง ซึ่งเส้นโค้งที่แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วยรอบของมอเตอร์และทอร์กของมอเตอร์ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าต่างๆ กัน ดังภาพประกอบ 16

การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้านอกจากจะมีผลโดยตรงต่อมอเตอร์แล้ว ก็จะมีผลเกี่ยวพันไปถึงโหลดที่มอเตอร์ขับด้วย สำหรับในกรณีที่โหลดซึ่งมอเตอร์ขับนั้นเป็นโหลดที่มีค่าทอร์กของโหลดเปลี่ยนแปลงไปเป็นสัดส่วนกับค่าความเร็วยรอบยกกำลังสอง ยกตัวอย่างเช่น การใช้มอเตอร์กับโหลดที่เป็นพัดลม ตามภาพประกอบ 16 การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นค่า  $V_1$  และ  $V_2$  จะทำให้ได้ค่าความเร็วยรอบคงที่เป็นค่า  $N_1$  และ  $N_2$  การควบคุมความเร็วยรอบจึงสามารถทำได้โดยการลดค่าแรงดันไฟฟ้า ซึ่งมีประโยชน์เป็นอย่างมากสำหรับการลดค่าความเร็วยรอบของมอเตอร์ให้ต่ำกว่าค่าความเร็วยรอบปกติซึ่งใช้กับมอเตอร์ขนาดเล็กที่ขับพัดลม

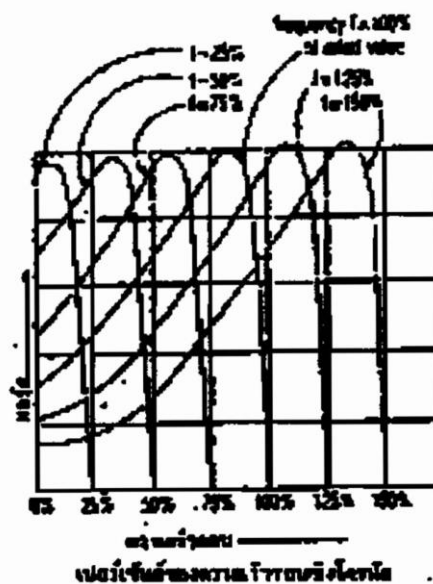
ส่วนในกรณีที่โหลดนั้นมีค่าคงที่ ตามในภาพประกอบ 16 ค่า  $T_2$  การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันกระแสไฟฟ้าจาก  $V_1$  เป็น  $V_2$  จะทำให้ค่าความเร็วยรอบของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงจากค่า  $N_3$  ไปเป็น  $N_4$  เนื่องจากค่าโหลด  $T_2$  มีค่าไม่สูงนัก จึงทำให้ค่าความเร็วยรอบของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงน้อย



ภาพประกอบ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและทอรัคของมอเตอร์ที่ค้ำแรงดันไฟฟ้ค้ำต่างกัน [8]

ส่วนในภาวะที่โหลดมีค้ำคงที่เช่นเดียวกัน แต่เป็นโหลดที่มีค้ำสูง ตามภาพประกอบ 17 โหลดที่มีค้ำสูง ตามในรูปคือโหลด  $T_3$  นั้น จะสามารถใช้งานมอเตอร์ใส้ที่ค้ำแรงนไฟฟ้ค้ำ  $V_1$  เพียงค้ำเดียว ส่วนที่ค้ำ  $V_2$  นั้นมอเตอร์จะไม่หมุน ซึ่งในแง่ของการใช้งานแล้วมอเตอร์ส่วนใหญ่อาจจะมีค้ำทอรัคเพียงพอสำหรับการเริ่มต้นการหมุนที่ค้ำความเร็วรอบประมาณ 75 % ส่วนเมื่อค้ำทอรัคของมอเตอร์ต่ำลงกว่านั้นแล้วมอเตอร์ก็จะเกิดการหยุดหมุนในเวลาอันรวดเร็ว

ส่วนกรณีสุดท้ายที่น่าพิจารณาถึงก็คือ ในกรณีที่มีค้ำแรงดันไฟฟ้ค้ำและค้ำความถี่กระแสไฟฟ้ค้ำถูกเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะที่อัตราส่วนระหว่างค้ำทั้งสองนี้เป็นค้ำคงที่ ในกรณีนี้ค้ำความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (flux density) ระหว่างช่องว่างของอากาศมีค้ำเกือบจะคงที่ ถ้าเราตัดค้ำความต้านทานของขดลวดทางด้านสเตเตอร์ทิ้งไป ค้ำทอรัคสูงสุดจะลดลงเมื่อมีการลดค้ำความถี่ ในขณะที่ค้ำความเร็วรอบของมอเตอร์จะแปรผันโดยตรงกับค้ำความถี่ค้ำสลิป (slip) ที่ทอรัคสูงสุดจะแปรผันกลับกับค้ำความถี่ ส่วนค้ำทอรัคสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ความเร็วรอบค้ำต่ำ เมื่อความถี่กระแสไฟฟ้ค้ำลดลง เส้นโค้งที่เห็น จะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับทอรัคของมอเตอร์ที่มีค้ำความถี่ต่างๆโดยมีค้ำอัตราส่วนของแรงค้ำไฟฟ้ค้ำกับค้ำความถี่คงที่ จะปรากฏดังภาพประกอบ 17 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่า ค้ำทอรัคของมอเตอร์มีค้ำเกือบจะคงที่



ภาพประกอบ 16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับทอร์กของมอเตอร์ [8]

เหล่านี้คือปัจจัยต่างๆ ที่จะต้องคำนึงถึงในเรื่องทอร์กของมอเตอร์ อันจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรในด้านที่เกี่ยวกับค่าความถี่กระแสไฟฟ้า ซึ่งหากมองข้ามไปก็อาจจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้มอเตอร์เสียหายใช้การไม่ได้โดยที่ไม่ทราบเหตุผลที่แท้จริง

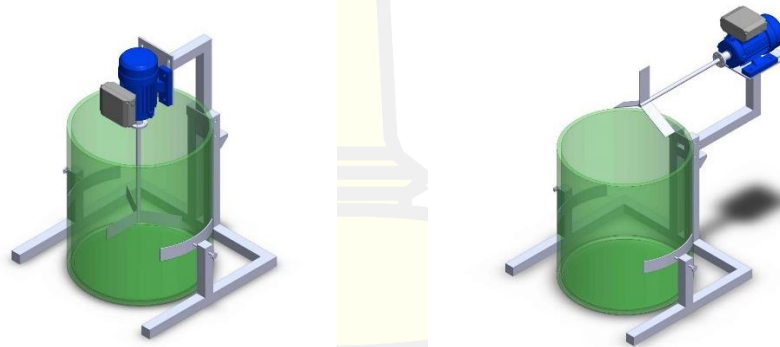
## 2.4 หลักการประเมินความหนืด

ความหนืดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของของเหลวที่ภาคอุตสาหกรรมอาหาร และภาคอุตสาหกรรมน้ำมันใช้ความหนืดเป็นตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์วัตถุดิบด้านอาหาร น้ำมันหล่อลื่น เป็นต้น ปัจจุบันเครื่องมือวัดความหนืดส่วนใหญ่มีราคาสูงและสามารถวัดความหนืดที่สถานะคงตัวได้เท่านั้น [7] -[12]

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดข้างต้น นำไปสู่หลักการออกแบบและการสร้างเครื่องกวนสารที่สามารถประเมินค่าความหนืดของสาร จากการนำหลักการทำงานของเครื่องวัดค่าความหนืดมาปรับใช้ โดยอาศัยหลักการดังนี้

การวัดความหนืดของของไหล ทำได้โดยการวัดแรงต้านทานการไหลภายในของของไหล หรือความต้านทานการเฉือนของของเหลว วัดเป็นอัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของเหลวซึ่งมีการต้านทานการไหลมากจะมีความหนืดสูง จากภาพประกอบ 18 เมื่อให้ของไหลอยู่ระหว่างวัตถุทรงระบอกและใบพัดผสมเครื่องกวนสาร โดยที่ตัวใบพัดผสมข้างในมีรัศมี  $r_1$  ซึ่งหมุนด้วย

ความเร็วเชิงมุมคงที่  $\omega$  และทรงกระบอกอันนอกซึ่งเป็นภาชนะสำหรับบรรจุของเหลวที่ต้องการหาค่าความหนืด ทรงกระบอกอันนอกนี้มีรัศมี  $r_2$  ซึ่ง  $r_1 < r_2$  เมื่อมีแรง  $F$  มากกระทำในแนวขนานกับพื้นผิวใบพัดเนื่องจากการหมุนของตัวใบพัดผสมข้างใน ก็จะเกิดแรงต้านของของเหลวต่อพื้นที่ผิวใบพัด แรงต้านที่เกิดขึ้นเรียกว่า แรงเฉือน (shear force) เมื่อพิจารณาให้การเคลื่อนที่ของของไหลมีลักษณะเป็นชั้น ชั้นที่อยู่นอกสุดของของไหลจะถูกยึดไว้ นั่นคือวัตถุทรงกระบอกอันนอกไม่เคลื่อนที่ ( $v = 0$ ) ชั้นถัดมาจากด้านนอกก็จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเพิ่มขึ้น จนถึงชั้นของไหลที่อยู่ติดกับแท่งใบพัดผสมข้างใน ก็มีความเร็ว  $v$  จะได้ความแตกต่างของความเร็ว ( $dv$ ) ระหว่างของไหลสองตำแหน่งกับระยะรัศมีที่เปลี่ยนแปลงไป ( $dr$ ) ซึ่งวัตถุทรงกระบอกทั้งสอง มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน อัตราส่วนระหว่าง  $dv$  กับ  $dr$  คือ velocity gradient เมื่อนำค่าคงที่ 1 คูณกับ velocity gradient จะได้ tangential stress และค่าแรง  $F$  ต่อหน่วยพื้นที่  $A$  ที่ทำให้เกิดการไหล เรียกว่า ความเค้นเฉือน ( $\frac{F}{A}$ )



ภาพประกอบ 17 แบบจำลองเครื่องกวนสาร

จากภาพประกอบ 18 สมการที่เกี่ยวข้อง

แรงต้านของของเหลว = แรงต้านของมอเตอร์ของเหลว

$$\tau_r = F_r$$

จากสมการความหนืดของนิวตันได้แสดงไว้ว่า

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dr}$$

หรือ

$$\frac{F}{A} = A\eta \frac{dv}{dr}$$

เมื่อ  $\eta$  = ความหนืดของของเหลว (mPa·s)

$A$  = พื้นที่ (m<sup>2</sup>)

$F$  = แรงหนืดของของเหลว (N)

$r$  = รัศมี (m)

$v$  = ความเร็ว (m/s)

เพื่อให้ตัวดำเนินการของการแก้มการง่ายขึ้นจึงกำหนดให้  $\dot{\gamma}(r) = \frac{dv}{dr} = r \frac{d\omega}{dr} = \text{shear rate}$

เมื่อ  $\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุม และ  $\sigma(r) = \eta\dot{\gamma}(r) = \text{tangential stress}$

จากความสัมพันธ์ที่กล่าวมาข้างต้น จะได้ว่า

$$\sigma(r) = \eta \frac{dv}{dr}$$

ดังนั้น

$$F = A\sigma(r)$$

$$F = A\sigma(r_1)$$

$$F = (2\pi_1 l)\sigma(r_1) \quad (2.8)$$

เมื่อให้  $r_1$  = รัศมีของวัตถุทรงกระบอก

$A$  = พื้นที่ผิวของวัตถุทรงกระบอก

$l$  = ระยะความยาวของวัตถุทรงกระบอกที่จุ่มอยู่ในของเหลว

เมื่อต้องการหาค่า  $v$  ที่มีความสัมพันธ์กับ  $r$  จะได้ว่า

$$\sigma(r) = \eta \frac{dv}{dr}$$

$$dv = \frac{\sigma(r)}{\eta} dr$$

ทำการอินทิเกรตทั้งสองข้างของสมการ  $\int dv = \frac{\sigma(r)}{\eta} \int dr$  เพื่อนำไปสู่การหาค่า  $v$

ค่าที่ได้จากอินทิเกรต คือ  $v = \frac{\sigma(r)}{\eta} r + c$  (2.9)

เมื่อ  $c$  เป็นค่าคงที่ใดๆ

จาก 
$$\sigma(r) = \eta \frac{dv}{dr} = \eta r \frac{d\omega}{dr}$$

สำหรับวัตถุทรงกระบอกจะกำหนดค่าคงที่  $\sigma(r) = \frac{c}{r^2}$

$$\sigma_r = \frac{c}{r^2}$$

$$r^2 \sigma_r = c \quad (2.10)$$

$$\frac{\dot{\gamma}(r)}{\sigma_r} = \eta$$

$$\frac{c}{r^2} = \eta r \frac{d\omega}{dr}$$

$$\frac{d\omega}{dr} = \frac{c}{\eta r^3}$$

$$d\omega = \frac{c}{\eta r^3} dr$$

ทำการอินทิเกรตเพื่อดูความสัมพันธ์

$$\int d\omega = \int \frac{c}{\eta r^3} dr$$

ความเร็วรอบกับขนาดรัศมี

เมื่อ  $n$  คือค่าคงที่จากการอินทิเกรต  $\omega(r) = \frac{c}{\eta} \left( \frac{1}{2r^2} \right) + n$  (2.11)

จากสมการที่ (2.10) ต้องกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) 2 เงื่อนไข เพื่อนำไปสู่การหาค่าคงที่  $c$  เมื่อแท่งวัตถุทรงกระบอกด้านในหมุน  $\omega(r) = \dot{\theta}$  และแท่งวัตถุทรงกระบอกนอกซึ่งอยู่กับที่โดยไม่หมุน  $\omega(r_2) = 0$  แทนเงื่อนไขขอบเขตลงในสมการ (2.11) เพื่อหาค่า  $c$  จะได้ว่า

$$\dot{\theta} = -\frac{1}{2} \frac{c}{\eta r_1^2} + n \quad (2.12)$$

และ

ดังนั้น

$$0 = -\frac{1}{2} \frac{c}{\eta r_2^2} + n \quad (2.13)$$

$$n = \frac{1}{2} \frac{c}{\eta r_2^2}$$

จากสมการที่ (2.35) แทนลงในสมการที่ 2.34

จะได้ว่า

$$\dot{\theta} = \frac{1}{2} \frac{c}{\eta r_1^2} + \frac{1}{2} \frac{c}{\eta r_2^2}$$

$$\dot{\theta} = \frac{1}{2} \frac{c}{\eta} \left( \frac{1}{r_2^2} - \frac{1}{r_1^2} \right)$$

$$\dot{\theta} = \frac{1}{2} \frac{c}{\eta} \left( \frac{r_1^2 - r_2^2}{r_1^2 r_2^2} \right)$$

$$\dot{\theta} = -\frac{1}{2} \frac{c}{\eta} \left( \frac{r_2^2 - r_1^2}{r_1^2 r_2^2} \right)$$

$$c = -2\dot{\theta} \eta \left( \frac{r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \right) \quad (2.14)$$

นำสมการที่ 2.36 แทนลงในสมการที่ 2.32

$$\sigma(r) = -2\dot{\theta} \frac{\eta}{r^2} \left( \frac{r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \right)$$



$$r^2 \sigma(r) = -2\dot{\theta} \eta \left( \frac{r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \right)$$

$$\sigma(r) = -2\dot{\theta} \frac{\eta}{r^2} \left( \frac{r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \right)$$

$$F = 2\pi r l \sigma(r_1) = \tau_r$$

จากความสัมพันธ์ดังกล่าว แสดงเห็นว่าทอร์กต้านภายใต้สภาวะคงตัว ทอร์กหน่วง (T) ที่กระทำต่อพื้นผิวของวัตถุทรงกระบอกเนื่องจากการเคลื่อนที่ของของเหลว ซึ่งเป็นสัดส่วนกับความหนืดของของเหลวจะมีค่าเท่ากับทอร์กที่เกิดขึ้นโดยมอเตอร์ ( $\tau_{motor} = F_r$ )

$$\tau_r = -2\pi l \left( -2\dot{\theta} \eta \frac{r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \right)$$

$$\tau_r = 4\pi l \eta \dot{\theta} \left( \frac{r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \right)$$

$$\tau_r = 4\pi l \eta \omega \left( \frac{r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \right)$$

$$\tau_r = 4\pi l \eta \omega r_1^2 \left( \frac{1}{1 - \frac{r_1^2}{r_2^2}} \right) = \tau_{motor} \quad (2.15)$$

เมื่อ  $\tau_r$  = ทอร์กหน่วง (N-m)

$\tau_r$  = ทอร์กของมอเตอร์ (N.m)

$r_1$  = รัศมีของแท่งวัตถุทรงกระบอก (m)

$r_2$  = รัศมีของภาชนะที่บรรจุของเหลว (m)

$l$  = ความยาวของแท่งวัตถุทรงกระบอกที่จุ่มอยู่ในของเหลว (m)

$\omega$  = ความเร็วเชิงมุมของแท่งวัตถุทรงกระบอก (rad/s)

จากสมการที่ (2.17) พบว่าความหนืดของของเหลวมีความสัมพันธ์ทอร์กหน่วงเนื่องจากของเหลวและมีความสัมพันธ์กับทอร์กของมอเตอร์ ซึ่งทอร์กของมอเตอร์มีความสัมพันธ์กับกระแสที่ไหลในขดลวดของมอเตอร์ผู้วิจัยเลยได้ทำการสร้างเครื่องมือวัดค่าความหนืดแบบหมุนอย่างง่ายและราคาถูกโดยการวัดค่ากระแสที่ไหลในขดลวดมอเตอร์เพื่อนำไปสู่การหาค่าความหนืดของของเหลว [8]

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กฤษณะ จันทสิทธิ์ (2561) [9] พัฒนาเครื่องกวนเนื้อมังคุดชนิดควบคุมอุณหภูมิถึงอัตโนมัติสำหรับกลุ่มวิสาหกิจชุมชนบ้านท่าศาลาอำเภอท่าใหม่ จังหวัดจันทบุรีโดยโครงสร้างของเครื่องจะผลิตจากเหล็กหนา ตัวกระทะกวนผลิตจากสแตนเลสทำความสะอาดได้อย่างง่ายดาย ในระบบไฟฟ้าติดตั้งแหล่งจ่ายไฟขนาด 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ พร้อมชุดพิวส์ขนาด 4 แอมป์จำนวน 1 ชุด ติดตั้งแมกเนติกส์คอนแทคเตอร์ เครื่องตั้งเวลาและเครื่องควบคุมอุณหภูมิอย่างละ 1 ชุดเช่นกัน ติดตั้งสวิทช์ควบคุมและอุปกรณ์แสดงผลการทำงานของเครื่อง ในส่วนการสร้างความร้อนจะใช้เป็นระบบแก๊สและมีชุดจ่ายแก๊ส จำนวน 2 ชุด ซึ่งแบ่งจ่ายให้ชุดหัวเตาแก๊สและชุดหัวปล่อยแก๊สจากการทดสอบกวนเนื้อมังคุดจำนวน 12 กิโลกรัม พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 90-100 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการกวนเนื้อมังคุดประมาณ 2 ชั่วโมง การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมพบว่า ใน 1 ปีจะกวนเนื้อมังคุดประมาณ 40 กระทะ ซึ่งจะมีต้นทุนที่ใช้เครื่องเท่ากับ 13,068.27 บาท/ปีเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับต้นทุนของการใช้แรงงาน คนกวนเนื้อมังคุด(14,000 บาท/ปี) พบว่า สามารถประหยัดต้นทุนได้ปีละ 931.73 บาท/ปีหรือคิดเป็น 6.65 %

ศุภเวทย์ สงคง และพงษ์พันธ์ ราชภักดี (2562) [10] นำเสนอเครื่องผสมเนื้อปลาสดกับเครื่องแกงสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารทอดมันปลา โดยเครื่องผสมเนื้อปลามีขนาดถึงกวน 20 กิโลกรัม ใช้มอเตอร์ไฟฟ้า ขนาด 1 แรงม้า เป็นต้นกำลังส่งผ่านเกียร์ทดไปยังสายพานและพูลเลย์ในการขับเคลื่อนที่ความเร็ว 242 รอบต่อนาที ผลทดลองการใช้เครื่องผสมเนื้อปลาพบว่า ในการทดลองเนื้อปลาบดผสมกับเครื่องแกง จำนวน 20 กิโลกรัม ใช้เวลาในการกวนเฉลี่ย 20.03 นาที และการใช้แรงงานคนใช้เวลาในการกวนเฉลี่ย 37 นาที สามารถบดผสมเนื้อปลาสดกับเครื่องแกงให้เข้ากันได้ดีและมีความเหนียวนุ่มตรงกับความต้องการ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพแล้ว เครื่องผสมเนื้อปลาบดได้เร็วกว่าการใช้แรงงานคน 16.97 นาที และเนื้อปลาที่ได้มีคุณภาพสะอาดปลอดภัยกับผู้บริโภค

สิทธิบุรณ์ ศิริพรอัครชัย และ ธัญทิพย์ ศิริพรอัครชัย (2021) [11] ออกแบบ สร้าง และ ทดสอบสมรรถนะของเครื่องผสมผลิตภัณฑ์ความงามและชำระล้าง เพื่อนำไปใช้งานในกิจการชุมชนได้ อย่างสอดคล้องกับกระบวนการผลิต ให้การควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ทำได้ง่ายขึ้น และสามารถเพิ่ม อัตราการผลิตให้เพียงพอแก่ความต้องการของตลาดได้โดยเครื่องจักรที่ออกแบบจะประกอบไปด้วย กระบอกตวงขนาด 30 ลิตร ถังผสมที่มีความจุ 74 ลิตร มีชุดใบพัดกวนผสมที่สามารถถอดออกจากถัง ผสมได้สะดวก ที่กั้นถังผสมติดตั้งมอเตอร์เกียร์กระแสสลับขนาด 0.5 แรงม้า ทำหน้าที่หมุนและ ปรับเปลี่ยนความเร็วใบพัดได้ในช่วง 0-180 รอบ/นาทีใช้ ป้อนไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 โวลต์ ทำ หน้าที่ดูดวัตถุติดจากกระบอกตวงส่งเข้าสู่ถังผสมด้วยอัตราการไหล 2.4 ลิตร/นาที ทดสอบใช้งาน พบว่าสามารถผลิตน้ำยาชำระล้างได้ในอัตรา 57.85 ลิตร/ชั่วโมง สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า 180.52 วัตต์ที่สภาวะนี้เครื่องจักรสามารถเพิ่มอัตราการผลิตได้ประมาณ 64.36 เปอร์เซ็นต์โดยเปรียบเทียบกับ แรงงานมนุษย์และมีระยะเวลาการคืนทุน 0.6 ปี

นายณภัศล สิงหะตา (2555) [12] บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการประมาณค่าความหนืดจาก การประมาณค่าแรงบิดที่รบกวนที่เกิดจากความหนืดของของเหลวต่อแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงโดยวิธีการชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวได้กับตัวสังเกต ในการประมาณค่าความหนืดของ ของเหลวที่สัมพันธ์กับแรงบิดที่รบกวนซึ่งสามารถประมาณค่าความหนืดที่สถานะคงตัวและสถานะชั่ว ครู่ได้ในการทดลองได้ทดสอบในช่วงความหนืด 80–320 cP เปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดความหนืด มาตรฐาน DV-III Ultra Rheometer พบว่าวิธีการดังกล่าวสามารถใช้ในการประมาณค่าความหนืด แบบสถานะคงตัวและความหนืดสถานะชั่วครู่ได้

วรวิทย์ วรนาวิณ (2550) [13] นำเสนอเครื่องกวนมะขามเปียกด้วยมอเตอร์ โดยระบบการ ทำงานนั้นจะใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นส่งกำลังผ่านเกียร์ทดรอบ ด้วยความเร็วรอบ 35.6 rpm เพื่อใช้ขับ ใบกวนและให้ความร้อนด้วยแก๊ส LPG ในขณะที่ถังชั้นนอกบรรจุน้ำเพื่อใช้ในการส่งผ่านความร้อนสู่ถัง ชั้นใน จากผลการทดสอบเครื่องกวนน้ำมะขามเปียกจำนวน 70 กิโลกรัม โดยใช้เชื้อเพลิง 0.7 กิโลกรัม พบว่า ภายใต้การพาความร้อนของน้ำที่อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่ 80 C และ 65 นาทีทำให้ คุณภาพของน้ำมะขามเปียกเพิ่มขึ้นหรือไม่มีการไหม้ของผลิตภัณฑ์เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการ ผลิตแบบเดิมและยังแสดงให้เห็นว่า เครื่องกวนน้ำมะขามเปียกนี้ยังสะดวกต่อการใช้งานอีกด้วย

กิตติศักดิ์ รอดเรือง (2554) ได้อธิบายถึงการสร้างเครื่องวัดความหนืดแบบหมุนโดยใช้วัสดุที่ หาได้ง่ายเพื่อลดต้นทุนการผลิต และอธิบายหลักการทำงานของเครื่องวัดความหนืดแบบหมุน เครื่องวัดค่าความหนืดแบบหมุนนี้ประกอบด้วยซูเปอร์สปีดทรานสดิวเซอร์ที่มีความยาว ยึดติดกับ เพลลาของมอเตอร์ และจุ่มอยู่ในภาชนะซึ่งบรรจุของเหลวที่ต้องการหาค่าความหนืด โดยภาชนะนี้ทำ จากแก้วและมีรัศมี เมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสตรงให้มอเตอร์ จะทำให้แท่งซูเปอร์สปีดหมุนด้วยอัตราเร็ว เชิงมุมคงที่ ภายใต้สภาวะคงตัว ทอร์กหน่วง ที่กระทำต่อพื้นผิวของซูเปอร์สปีดเนื่องจากการเคลื่อนที่

ของของเหลว ซึ่งเป็นสัดส่วนกับความหนืดของของเหลวจะมีค่าเท่ากับทอร์กที่เกิดขึ้นโดยมอเตอร์ ซึ่งแปรผันโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าในขดลวดโรเตอร์ ในงานวิจัยนี้ได้หาความหนืดของสารมาตรฐานที่อุณหภูมิต่างๆและนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน จากการทดลองพบว่า เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงให้เห็นว่าชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นนี้มีความถูกต้อง โดยงานวิจัยนี้จะช่วยอธิบายหลักการของมอเตอร์ ทอร์ก และกลศาสตร์ของไหลซึ่งเป็นพื้นฐานเกี่ยวกับการสร้างเครื่องวัดความหนืดแบบหมุนนี้ด้วย

Kraftmakher Y (2010) [14] นำเสนอสิ่งประดิษฐ์เครื่องวัดความหนืดแบบหมุนของโครงการนักเรียนที่เหมาะสมสำหรับของของเหลวที่มีความหนืดสูง ในช่วง 10 – 1000 (mPa.s) เช่น กลิเซอรอล และน้ำมัน ซึ่งมีการออกแบบหลักการและโครงสร้างง่ายลดความซับซ้อนลง โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าในการสร้างเครื่องวัดความหนืด อาศัยหลักการและกฎพื้นฐานของไฟฟ้าและแม่เหล็กอันได้ แรงของลอเรนซ์, กฎของการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าของฟาราเดย์ และกฎของเลนส์



### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยเรื่อง การควบคุมการทำงานของเครื่องกววนสารแบบพกพาด้วยระบบควบคุมแบบปดนี้ มีขั้นตอนเริ่มจากการศึกษารูปแบบการทำงานของเครื่องกววนสารในปัจจุบันว่ามีความบกพร่องอย่างไรบ้าง จากนั้นวิเคราะห์ปัญหาว่าเกิดจากสาเหตุใด แล้วนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์มาสู่การศึกษาและออกแบบชุดทดลองเพื่อลดปัญหานั้น ในส่วนของปัญหาบทวิเคราะห์ได้นำเสนอในบทที่ 1 และ บทที่ 2 แล้ว ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบชุดทดลองจากข้อมูลที่รวบรวมได้ ทั้งนี้ชุดทดลองจะสามารถทำงานได้ดียิ่งขึ้นอยู่ที่ขั้นตอนการออกแบบนี้เป็นสำคัญ ซึ่งได้แก่ รูปแบบโครงสร้าง การเลือกใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสม โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 การออกแบบเครื่องกววนสาร

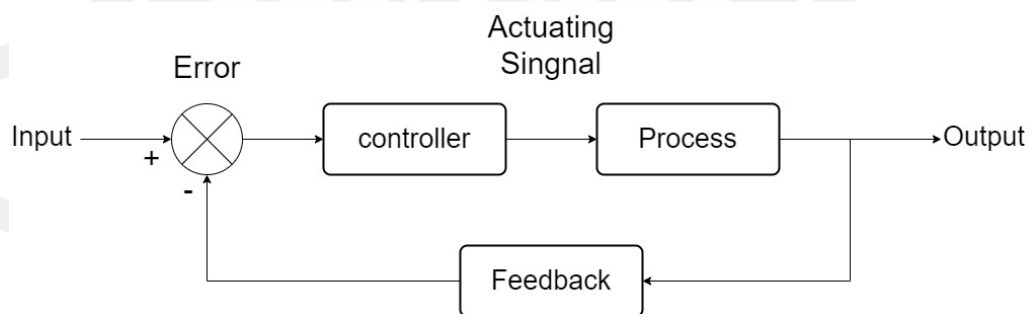
การออกแบบเครื่องกววนสารในที่นี้จำเป็นต้องคำนึงถึงการกำหนดโครงสร้างทางกลของเครื่องและระบบส่งงานต่างๆ ตัวอย่างเช่น การกำหนดค่าทางกลของเพลลาไบกวนที่ทำการกววนสารผสมซึ่งไบกวนจะเชื่อมต่อกับมอเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ต้นกำลังโดยผ่านก้านไบกวน เส้นผ่านศูนย์กลาง ความสูงของเพลลา ตลอดจนรูปร่างและตำแหน่งของใบพัด เป็นต้น และอีกสิ่งหนึ่งคือการปรับระดับความเร็วให้ได้หลายระดับ เพื่อที่จะควบคุมระดับความเร็วของเครื่องกววนให้ได้ตามความต้องการและเหมาะสมกับลักษณะของเนื้อสารที่จะนำไปผสมกันให้เกิดเป็นสารใหม่นั้นๆ รวมไปถึงจนถึงความเสถียรในการผสม เพื่อที่จะไม่ต้องกังวลถึงเรื่องเนื้อที่ไม่เท่ากัน น้ำหนักมือที่ลงมือไม่ทัน ความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และที่สิ่งสุดท้ายคือการลดระยะเวลาในการผสม เป็นต้น



ภาพประกอบ 18 เครื่องกวนสาร

### 3.1.1 การออกแบบการควบคุมความเร็วของมอเตอร์โดยระบบควบคุมแบบวงลูปปิด

สำหรับระบบควบคุมความเร็วของเครื่องกวนสาร การเลือกใช้ตัวควบคุมดังกล่าวมีข้อดีตรงที่มีการนำเอาผลที่ได้จากการตอบสนองของระบบ มาป้อนกลับเพื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุทหรืออินพุทอ้างอิงจะทำให้ผลต่างความคาดเคลื่อน (Error) ระหว่างสัญญาณอินพุทอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุทเพื่อที่จะนำมาสร้างสัญญาณกระตุ้นระบบให้แก้ไขให้ผลต่างความคาดเคลื่อนที่ได้นั้นลดน้อยลงจนหมดไปในที่สุดซึ่งผู้ควบคุมสามารถกำหนดเอาต์พุทให้กับระบบได้

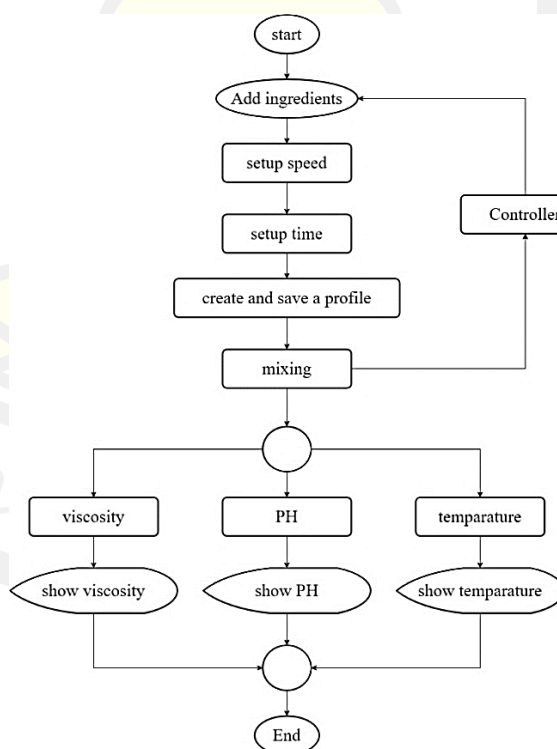


ภาพประกอบ 19 ระบบควบคุมแบบเครื่องกวนสารแบบวงลูปปิด

### 3.1.2 ออกแบบขั้นตอนการทำงานของเครื่องกวนสาร

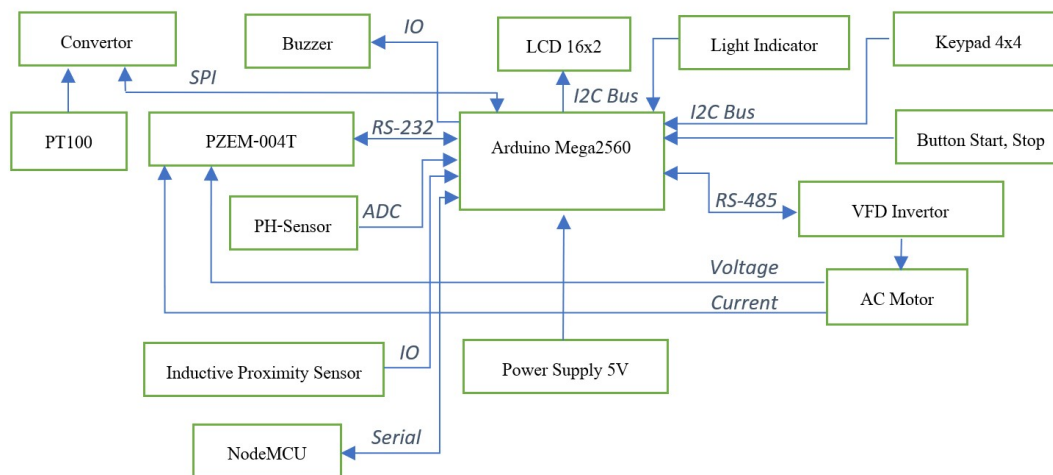
ออกแบบชุดคำสั่งการทำงานของเครื่องกวนสารโดยใช้โปรแกรม Arduino เขียนโค้ดชุดคำสั่งลงในไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU Board) โดยมีฟังก์ชันการทำงานของเครื่องดังต่อไปนี้

1. สามารถตั้งค่าความเร็วรอบมอเตอร์ได้ไม่เกิน 300 รอบต่อนาที
2. สามารถตั้งค่าเวลาในการทำงานได้ตั้งแต่ 1 - 1 ชั่วโมง 30 นาที
3. ในการป้อนค่าการทำงานของเครื่อง สามารถบันทึกค่าลงในหน่วยความจำได้และเรียกค่าที่บันทึกไว้มาใช้งานในครั้งถัดไปได้
4. มีเสียงแจ้งเตือน การทำงาน เมื่อเครื่องทำงานเสร็จ
5. มีไฟแสดงสถานะทำงานของเครื่องในขั้นตอนต่างๆ
  - 5.1 ไฟแสดงสถานะเครื่องกำลังทำงาน
  - 5.2 ไฟแสดงสถานะ แจ้งเตือน เมื่อเครื่องทำงานผิดปกติ กรณีมอเตอร์กินกระแสไฟมากกว่าปกติ
6. แสดงผลบนจอ LCD ข้อมูลสำคัญที่ควรรู้
  - 6.1 แสดงค่าเวลาที่เหลือ ขณะเครื่องทำงาน
  - 6.2 แสดงค่าแรงดัน, กระแส, ค่าPH, อุณหภูมิ และค่าความหนืด เป็นต้น



ภาพประกอบ 20 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องกวนสาร

## รายละเอียดเพิ่มเติม



ภาพประกอบ 21 ระบบการทำงานของวงจรควบคุม

### รายละเอียด Hardware

1. ใช้จอ LCD ขนาด 16 อักขร 2 บรรทัด สำหรับแสดงผลการทำงานของเครื่อง
2. ใช้บอร์ด Arduino Mega2560 ควบคุมการทำงานของเครื่อง
3. ใช้Keypad สำหรับตั้งค่าการใช้งานเครื่อง
4. ใช้โมดูล PZEM-004T สำหรับอ่านค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้า เพื่อใช้ในการตรวจเช็คการทำงานของมอเตอร์
5. ใช้เซนเซอร์ PH สำหรับวัดค่าความเป็นกรดต่างของสาร
6. ใช้ VFD ควบคุมการทำงานของมอเตอร์กวนสาร
7. เซ็นเซอร์ตรวจจับโลหะ สำหรับวัดความเร็วรอบของมอเตอร์

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการ

ในส่วนนี้จะให้รายละเอียดของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการโดยสังเขป ดังนี้

#### 3.2.1 มอเตอร์ไฟฟ้า

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ คือ มอเตอร์ที่ป้อนไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไปเพื่อให้ได้พลังงานกลออกมา โครงสร้างของมอเตอร์คล้ายมอเตอร์กระแสตรง แต่จำนวนเฟสมีทั้ง 1 เฟสและ 3 เฟส โดย 3



เฟสจะมีจำนวนขดลวดจะเพิ่มเป็น 3 ชุด มอเตอร์กระแสสลับนิยมใช้งานทุกประเภทตั้งแต่อุปกรณ์ขนาดเล็กไปจนถึงในอุตสาหกรรมทุกประเภท เนื่องจากมีราคาถูกกว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง สามารถต่อกับไฟฟ้ากระแสสลับได้โดยง่าย และมีการบำรุงรักษาน้อย นิยมใช้งานของมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำ(induction motor) เป็นจำนวนมาก



ภาพประกอบ 22 มอเตอร์ AC 220/380V [15]

### 3.2.2 เครื่องมือวัดความหนืดแบบบรูคฟีลด์

เป็นเครื่องมือวัดความหนืดที่มีหน่วยการวัดเป็น cP เครื่องประกอบด้วย แท่งโลหะทรงกระบอก (spindle) จะหมุนอยู่ในของเหลวที่ต้องการวัด โลหะทรงกระบอกนี้ต่อกับมอเตอร์ เพื่อช่วยให้โลหะทรงกระบอกหมุนได้ และวัดแรงเสียดทานของของเหลวออกมาเป็นองศาการหมุน (degree of twist) ซึ่งค่านี้สามารถนำมาคำนวณ เปลี่ยนค่าเป็น cP โดยการคูณค่าคงที่ตามที่กำหนดมากับเครื่อง (factor) หรือสามารถอ่านค่าเป็น cP ได้เลยจากเครื่อง หรือเครื่องสามารถนำมาต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อให้คอมพิวเตอร์รายงานผลการทดสอบ

เครื่องมือวัดความหนืดแบบบรูคฟีลด์แต่ละรุ่น จะมีรายละเอียดเฉพาะในการใช้งานที่แตกต่างกัน แต่โดยทั่วไปสิ่งที่จะต้องพิจารณา ก่อน คือ การเลือกขนาดของหัวทดสอบให้เหมาะสมกับช่วงความหนืดของสารที่ต้องการวัดโดยพิจารณาประกอบกับคู่มือ ซึ่งหัวทดสอบที่ใช้สำหรับวัดความหนืดทางเซรามิกส่วนมากจะมีจำนวน 7 หัวทดสอบ คือ หมายเลข 01 ถึง 07 โดยหมายเลข 01 เหมาะสำหรับวัดน้ำเคลือบซึ่งมีความหนืดไม่สูงมาก นอกจากนี้การเลือกหัวทดสอบต้องคำนึงถึงเกณฑ์มาตรฐานเดิมของแต่ละสถานที่ทดสอบ เช่น สามารถวัดค่า ความหนืดของน้ำดินได้ โดยการใช้หัวทดสอบหมายเลข 03 หรือ 04 แต่หากต้องการปรับสมบัติของน้ำดินสูตรเดิมให้มีสมบัติตามที่กำหนดไว้ ก็ต้องเลือกใช้หัวทดสอบเพียงขนาดเดียวตลอดไป นอกจากการเลือกหัวทดสอบแล้ว การกำหนดความเร็วรอบก็จำเป็นต้องเลือกให้เหมาะสมกับความหนืดของสาร รวมทั้งเป็นไปตามมาตรฐานเดิมที่

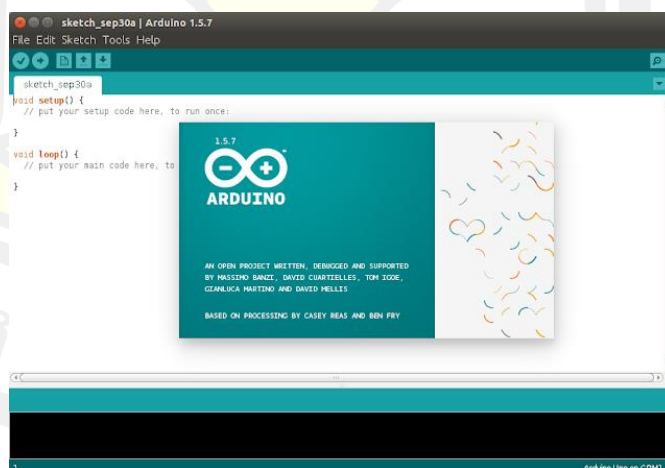
เคยปฏิบัติ หากความเร็วรอบไม่เหมาะสมกับหัวทดสอบแล้ว เครื่องจะไม่ทำงาน (error) หลังจากนั้น จึงทำการวัดค่าความหนืดตามวิธีการเฉพาะของแต่ละเครื่อง



ภาพประกอบ 23 เครื่องวัดความหนืดของเหลวแบบดิจิทัล [16]

### 3.2.3 Arduino IDE

เป็นแพลตฟอร์มอิเล็กทรอนิกส์แบบโอเพนซอร์สบนพื้นฐานของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่ง่ายต่อการใช้งาน สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายอย่าง เช่น ควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก อ่านค่าเซ็นเซอร์วัดสภาพแวดล้อมต่างๆแล้วแสดงค่าที่เซ็นเซอร์สามารถอ่านได้ออกมาทางจอแสดงผล นำไปประยุกต์เข้าเป็นชิ้นงานทางอิเล็กทรอนิกส์เพื่ออำนวยความสะดวกในการใช้ชีวิตประจำวัน เป็นต้น [17]



ภาพประกอบ 24 หน้าต่างการแสดงผล Arduino IDE

### 3.2.4 Google sheet

Google Sheets (กูเกิล ชีท) เป็นแอปพลิเคชันในกลุ่มของ Google Drive (กูเกิล ไดรฟ์) ซึ่งเป็นนวัตกรรมของ Google (กูเกิล) มีลักษณะการทำงานคล้ายกันกับ Microsoft Excel (ไมโครซอฟท์ เอ็กเซล) คือสามารถสร้าง Column, Row สามารถใส่ข้อมูลต่างๆ ลงไปใน Cell (เซลล์) ได้ และ คำนวณสูตรต่างๆได้



ภาพประกอบ 25 แอปพลิเคชัน Google Sheets [18]

### 3.2.4 เซ็นเซอร์วัดค่า PH

เป็นเซ็นเซอร์วัดค่า PH พร้อมโมดูลวัดค่า PH ของน้ำมาพร้อมกับ Probe วัด (ด้านในมีน้ำยา calibrate หัววัดค่า ควรถอดใช้อย่างระมัดระวัง) วัดความเป็นกรด-เบส ของสารละลายวัดได้ในช่วง 0-14PH โดยให้ค่าออกมาเป็น Analog 0-1024 สามารถเชื่อมต่อกับ Arduino ได้ [19]



ภาพประกอบ 26 เซ็นเซอร์วัดค่า PH พร้อมโมดูล

### 3.2.4 เซ็นเซอร์วัตถุหนี

เซนเซอร์วัตถุหนีแบบพื้นฐานหนีหนี หมายถึง ระดับพลังงานของสสารซึ่งสามารถพิสูจน์ได้จากการเปลี่ยนแปลงของสสาร เซนเซอร์วัตถุหนีมีหลายแบบและมีสิ่งหนึ่งที่เหมือนกันคือ หนีหนีทั้งหมดวัดได้โดยการตรวจจัดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพบางอย่าง

เทอร์มิสเตอร์ ถือเป็นเซนเซอร์หนีหนีอีกประเภทหนึ่งเป็นตัวต้านทานชนิดพิเศษซึ่งเปลี่ยนความต้านทานทางกายภาพเมื่อสัมผัสกับการเปลี่ยนแปลงของหนีหนี เทอร์มิสเตอร์โดยทั่วไปทำจากวัสดุเซรามิกเช่น ออกไซด์ของนิกเกิล แมงกานีสหรือโคบอลต์ที่เคลือบในแก้วซึ่งทำให้เสียหายได้ง่าย ข้อได้เปรียบหลักของเทอร์มิสเตอร์คือความเร็วในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงหนีหนี ความแม่นยำและการทำซ้ำ [20]



ภาพประกอบ 27 โพรบเซนเซอร์หนีหนี DS18B20

### 3.2.4 เซ็นเซอร์แบบตรวจจัดการระยะห่าง

พร็อกซิมิตี้เซนเซอร์ (Proximity Sensor) หรือ พร็อกซิมิตี้สวิตช์ (Proximity Switch) คือเซนเซอร์ชนิดหนึ่งที่สามารถทำงานโดยไม่ต้องสัมผัสกับชิ้นงานหรือวัตถุภายนอก โดยลักษณะของการทำงานอาจจะส่งหรือรับพลังงานรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งดังต่อไปนี้ คือ สนามแม่เหล็ก สนามไฟฟ้า แสง เสียง และ สัญญาณลม ส่วนการนำเซนเซอร์ประเภทนี้ไปใช้งานนั้น ส่วนใหญ่จะใช้กับงานตรวจจัดการตำแหน่ง ระดับ ขนาด และรูปร่าง ซึ่งโดยปกติแล้วนำมาใช้แทนลิมิตสวิตช์ (Limit Switch) เนื่องด้วยสาเหตุของอายุการใช้งานและความเร็วในการตรวจจัดการวัตถุเป้าหมาย ทำได้ดีกว่าอุปกรณ์ประเภทสวิตช์ซึ่งอาศัยหน้าสัมผัสทางกล



ภาพประกอบ 28 เครื่องวัดความเร็วรอบแบบสัมผัส [21]

### 3.2.5 โมดูลวัดการใช้พลังงาน

สำหรับการวัดค่าเพื่อบันทึกการใช้งานไฟฟ้า เพื่อการตรวจสอบ วัดค่าการใช้พลังงาน ควบคุมค่าไฟฟ้า แล้ว อุปกรณ์วัดจำเป็นต้องให้ข้อมูลหลายๆ ค่า ได้แก่ แรงดัน (VAC) กระแส (IAC) กำลังไฟฟ้าจริง (Active power) ค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor) ค่าพลังงานไฟฟ้า (Energy) เพื่อมาใช้ในการคำนวณ หรือควบคุมต่อ ซึ่งตัวโมดูล PZEM จะรับหน้าที่การคำนวณค่าต่างๆ ไปเรียบร้อย และส่งผลการคำนวณต่างๆ ออกมาจากโมดูลผ่านการสื่อสารแบบ serial (TX, RX) ซึ่งสามารถใช้เพื่อควบคุมสั่งการต่อด้วยบอร์ด Arduino หรือ ส่งค่าต่อไปที่คอมพิวเตอร์ได้



ภาพประกอบ 29 โมดูลวัดพลังงานไฟฟ้า PZEM-004t [22]

### 3.2.6 เครื่องแปลงความถี่ (VFD)

VFD ย่อมาจาก Variable Frequency Drives หรือไม่ก็อาจจะเรียกกันว่า VSD (Variable Speed Drives) หรือ อินเวอร์เตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับควบคุมแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ และสามารถที่จะใช้สำหรับการ สตาร์ทและสตอปมอเตอร์ได้

เมื่อเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้าทั่วไป VFD มีฟังก์ชันการทำงานและความสามารถในการทำงานที่มากกว่า นอกเหนือจากการควบคุมความเร็วที่ปรับได้ ควบคุมแรงบิดตัวแปรยังมีการป้องกันเช่น เฟสผิดและการป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกิน ซอฟต์แวร์และตัวเลือกการเชื่อมต่อของ VFD ช่วยให้ผู้ใช้สามารถควบคุมมอเตอร์ในระดับที่ต้องการได้



ภาพประกอบ 30 อินเวอร์เตอร์ Z-2000 Series [23]

## 3.3 ขั้นตอนการผสมสารทดลอง

### 3.3.2 แชมพู

โดยมีส่วนประกอบดังนี้ ได้แก่ หัวเชื้อ N70, ผงซัก, ลาโนลิน, ผงฟอง, น้ำหอม, สารแต่งสี และน้ำสะอาด

วิธีทำ

1. เทน้ำสะอาดลงในถังผสม แล้วเท N70 ลงไปละลายในน้ำ
2. เทผงซักลงไปผสม คนให้เข้ากัน จากนั้นตามด้วยลาโนลิน
3. เทผงฟองลงไปและผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน

4. เติมน้ำหอม และสี เพื่อปรับสีและกลิ่นของเนื้อแชมพู โดยคนส่วนผสมทุกอย่างอย่าง จนเข้ากัน

### 3.3.3 น้ำยาล้างจาน

โดยมีส่วนประกอบดังนี้ ได้แก่ หัวเชื้อ N70, สารขจัดคราบ LAS F50, เกลือ, สารกันบูด, สารแต่งสี, และน้ำสะอาด

วิธีทำ

1. เติมน้ำสะอาดลงในถังผสม แล้วเทหัวเชื้อ N70 ลงไปละลายในน้ำ
2. เทสารขจัดคราบ LAS F50 ลงไปผสม คนให้เข้ากัน
3. เติมเกลือ และ ผงฟองไปผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน
4. เติมสารกันบูด น้ำหอม และสารแต่งสีเพื่อปรับสีและกลิ่นของเนื้อน้ำยาล้างจาน โดยคนส่วนผสมทุกอย่างอย่าง จนเข้ากัน

### 3.3.1 เจลแอลกอฮอล์ล้างมือ

โดยมีส่วนประกอบดังนี้ ได้แก่ เอทิลแอลกอฮอล์ 95%, น้ำสะอาด, กลีเซอริน, คาร์โบพอล, และต่างไตรเอทาโนลามีน

วิธีทำ

1. เติมน้ำสะอาดลงในถังผสม แล้วเทผงคาร์โบพอลลงไปละลายในน้ำ
2. เทกลีเซอรินลงไปผสม คนให้เข้ากัน
3. เติมแอลกอฮอล์ลงไปผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน
4. เติมต่างไตรเอทาโนลามีนเพื่อปรับความหนืดของเนื้อเจล โดยคนส่วนผสมทุกอย่างอย่าง จนเข้ากันดี [24]

## 3.4 ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกววนสาร

ผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลองดังนี้

### 3.4.1 การทดลองที่ 1

เป็นการทดลองเพื่อหาความเร็วรอบที่เหมาะสมของใบพัด ซึ่งทางผู้วิจัยได้ทำการออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้ผสมสาร 2 ประเภท ได้แก่ สารเกิดฟอง สารไม่เกิดฟอง ซึ่งใช้ระบบควบคุมแบบวงลูปปิด โดยมีเงื่อนไขที่เกี่ยวข้องดังนี้

1. ทดลองกับใบพัดที่ทำการออกแบบ
2. ปริมาตรในการทดลองครั้งละ 10 ลิตร

3. ทดลองซ้ำเพื่อหาค่าเฉลี่ยที่เหมาะสมทั้งหมด 5 ครั้ง โดยเก็บค่าความเร็วในการผสม, เวลา กระแสไฟฟ้า, ค่าความหนืด

4. หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา

5. หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความเร็วรอบที่มีผลต่อเวลา

### 3.4.2 การทดลองที่ 2

เป็นการทดลองหาคาดคะเนความหนืดจากความสัมพันธ์ระหว่างของแรงบิดและความหนืดด้วยระบบควบคุมแบบวงลูปปิด เพื่อหาความแม่นยำ ซึ่งทางผู้วิจัยได้ทำการออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้ผสมสาร 2 ประเภท ได้แก่ สารเกิดฟอง สารไม่เกิดฟอง โดยมีเงื่อนไขที่เกี่ยวข้องดังนี้

1. ทดลองกับใบพัดที่ทำการออกแบบ

2. ปริมาตรในการทดลองครั้งละ 10 ลิตร

3. ทดลองซ้ำเพื่อหาค่าเฉลี่ยที่เหมาะสมทั้งหมด 5 ครั้ง โดยเก็บค่าความเร็วในการผสม, เวลา กระแสไฟฟ้า, ค่าความหนืด

4. หาค่าความคลาดเคลื่อนในการคำนวณหาความหนืดจากค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ยอมรับได้จากเครื่องวัดความหนืดแบบหมุน

### 3.4.3 ทดสอบหาสมรรถนะของเครื่องจักร

ทดสอบเพื่อหาการใช้พลังงานไฟฟ้า ระยะเวลาในกระบวนการผลิต และลักษณะทางกายภาพของผลผลิต โดยจะทำการทดลองผลิต ผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 สูตร สูตรละ 10 ลิตร และในแต่ละสูตรจะผลิตซ้ำ 5 ครั้ง โดยเปรียบเทียบกันระหว่างอัตราการผลิตโดยเครื่องจักรที่ควบคุมด้วยระบบควบคุมวงลูปปิดและเครื่องจักรที่มีระบบควบคุมแบบเปิด



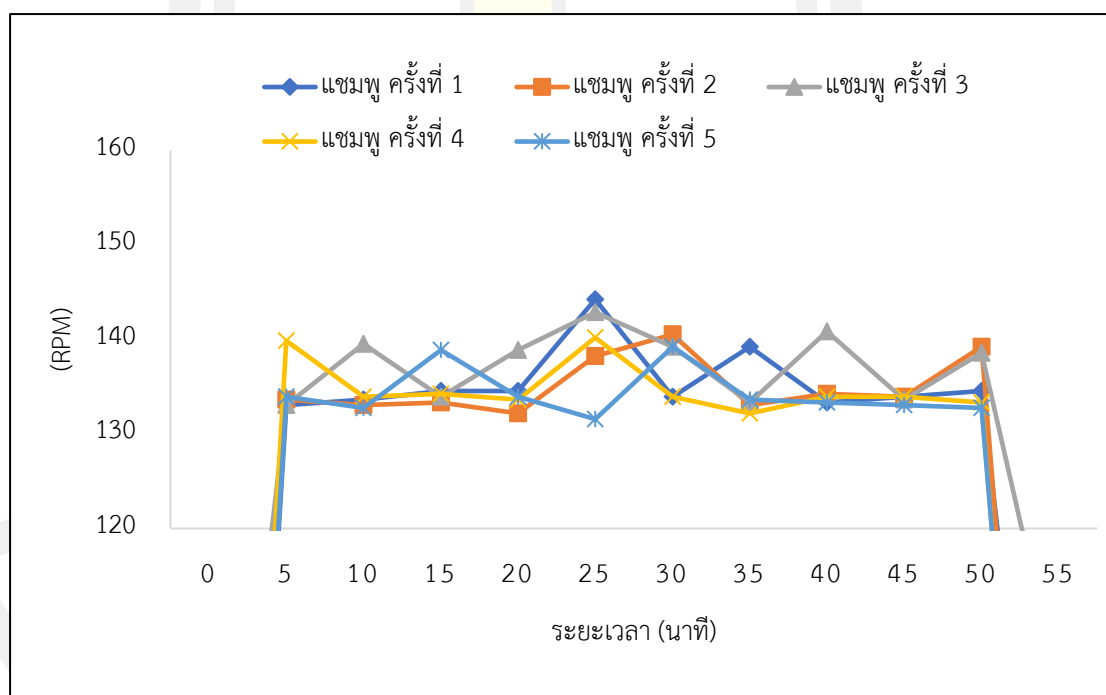
## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงานวิจัย

#### 4.1 ผลการทดสอบการหาความเร็วใบพัดที่เหมาะสมของระบบควบคุมวงรูปปิด

##### 4.1.1 แคมพู

จากการศึกษาพบว่า ความเร็วรอบที่เหมาะสมในการผสมแคมพูอยู่ที่ 135 รอบ/นาที ปริมาณ 10 ลิตร ในระยะเวลา 55 นาที เนื่องจากหากใช้ความเร็วต่ำ 135 รอบ/นาที จะไม่สามารถทำการละลายน้ำกับหัวเชื้อแคมพูให้ละลายได้หมด ในขั้นตอนแรกของกระบวนการผสมได้ ซึ่งเนื้อสารที่ได้อาจจะไม่พร้อมสำหรับการเติมสารผสมในขั้นตอนต่อไป จนกว่าจะครบจบกระบวนการผลิตแคมพู



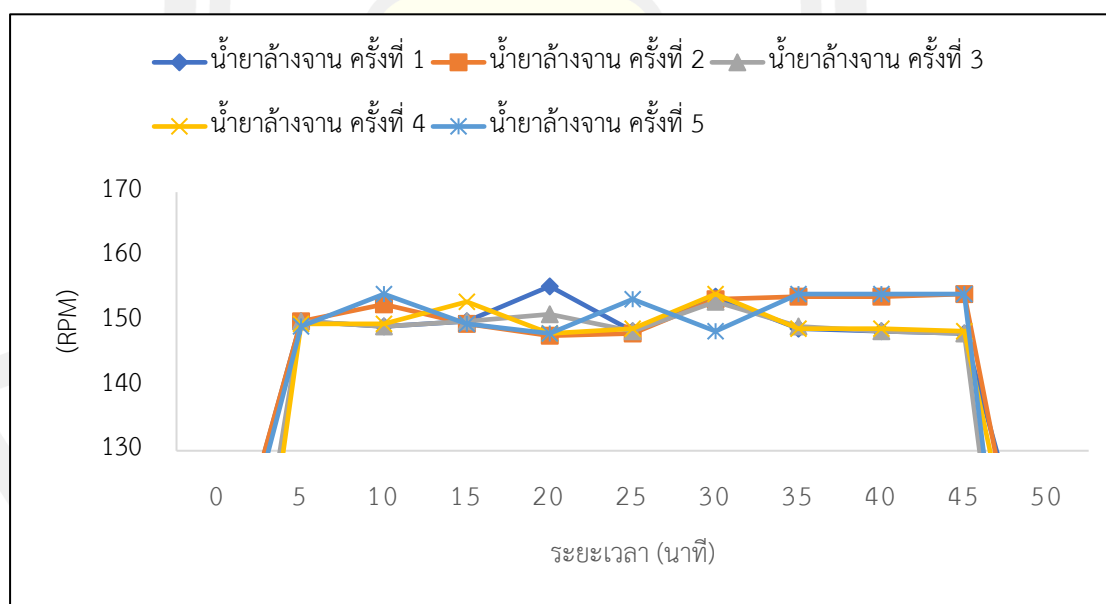
ภาพประกอบ 31 ความเร็วรอบในการผลิตแคมพู ด้วยระบบควบคุมแบบวงรูปปิด

จากกราฟพบว่า ช่วงความเร็วรอบที่มีการแกว่งสูง เกิดจากเมื่อมีการเติมส่วนผสม อันได้แก่ หัวเชื้อแคมพู N70 ผงขึ้น และโดยเฉพาะอย่างยิ่งลาโนลิน จะสังเกตเห็นได้ ในระยะเวลา 15 – 35 นาที หลังจากขั้นตอนการเติมสารลาโนลินเข้าไป พบว่า ณ ช่วงขณะหนึ่ง จะทำให้เกิดสภาวะความหนืดที่

เพิ่มขึ้นฉับพลัน ทำให้ระบบควบคุมเครื่องกวนสารแบบวงรูปปิด ทำงานมากขึ้นเนื่องจากความเร็วที่วัดได้นั้นต่ำลง โดยการไปสั่งการมอเตอร์ให้ปล่อยกระแสไฟฟ้า แรงดัน และกำลังมอเตอร์เพิ่มเพื่อพยายามที่จะให้เร่งความเร็วรอบของมอเตอร์กลับมาทำงานที่ความเร็วคงที่ตามที่ได้อ้างไว้ให้เร็วที่สุด เช่นเดิม จะสังเกตได้ว่าตลอดระยะเวลาที่มีการแกว่งของความเร็วรอบในการผสมเนื่องมาจากเนื้อสารยังไม่มีสถานะความหนืดคงที่ แต่เหมือนในกลไกกระบวนการผสม สารรวมเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว การแกว่งของความเร็วรอบในการผสมก็จะน้อยลงไปเรื่อยๆในที่สุด

#### 4.1.2 น้ำยาล้างจาน

จากการศึกษาพบว่า ความเร็วรอบที่เหมาะสมในการผสมน้ำยาล้างจานอยู่ที่ 150 รอบ/นาที่ ปริมาณ 10 ลิตร ในระยะเวลา 50 นาที เนื่องจากหากใช้ความเร็วต่ำ 150 รอบ/นาที่ จะไม่สามารถทำการละลายน้ำ, หัวเชื้อ N70 และสารขจัดคราบให้ละลายได้หมด ในขั้นตอนที่สองของกระบวนการผลิตน้ำยาล้างจาน ซึ่งเนื้อสารที่ได้อาจจะไม่พร้อมสำหรับการเติมสารผสมในขั้นตอนต่อไป จนกว่าจะครบจบกระบวนการผลิตน้ำยาล้างจาน และเนื่องจากน้ำยาล้างจานเป็นของเหลวที่มีความหนืดสูง ทำให้ความเร็วรอบในการผสมสำคัญมากในกระบวนการผสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการใช้ความเร็วรอบในการผสมอย่างเดียวยังไม่ใช้พลังงานความร้อน (หรืออุณหภูมิ) ในกระบวนการทำละลายของสาร

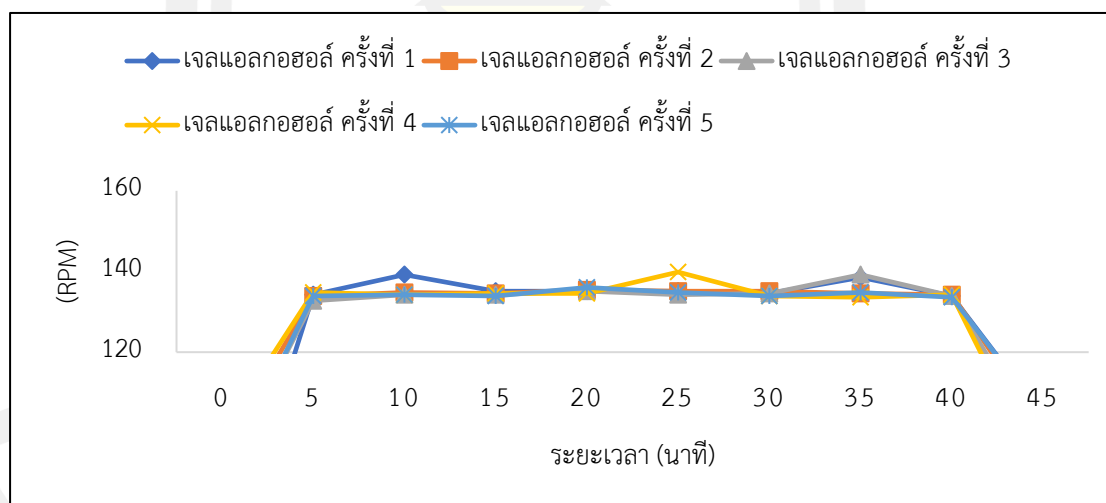


ภาพประกอบ 32 ความเร็วรอบในการผลิตน้ำยาล้างจาน ด้วยระบบควบคุมแบบวงรูปปิด

จากกราฟพบว่า เมื่อมีการเติมส่วนผสม อันได้แก่ หัวเชื้อN70 สารขจัดคราบ และผงซัก จะเห็นได้ว่า ระยะเวลาช่วงที่ 15 – 25 นาที ที่มีการเติมสารขจัดคราบที่มีความหนืดมาก ทำให้เกิดสถานะความหนืดที่เพิ่มขึ้นฉับพลัน ทำให้ระบบควบคุมแบบวงลูปปิดของเครื่อง มีการทำงานมากขึ้น เนื่องจากความเร็วที่วัดได้นั้นต่ำลง -เพิ่มขึ้นมากกว่าปกติ โดยการไปสั่งการมอเตอร์ให้ปล่อยกระแสไฟฟ้า แรงดัน และกำลังมอเตอร์เพิ่มเพื่อให้ความเร็วของเครื่องจักรกลับมาทำงานที่ความเร็วคงที่ตามที่ได้ตั้งค่าไว้ให้เร็วที่สุดเช่นเดิม ทั้งนี้ทั้งนั้นอาจเกิดจากการอัตราการไหล เนื่องขั้นตอนในการเติมสารใช้มนุษย์ในการผสมผสานในกระบวนการผสม

#### 4.1.3 เจลแอลกอฮอล์ล้างมือ

จากการศึกษาพบว่า ความเร็วรอบที่เหมาะสมในการผสมเจลแอลกอฮอล์อยู่ที่ 150 รอบ/นาาที ปริมาณ 10 ลิตร ในระยะเวลา 50 นาที เนื่องจากหากใช้ความเร็วต่ำ 150 รอบ/นาาที จะไม่สามารถต้านความหนืดของส่วนผสมในการทำเจลแอลกอฮอล์ได้ อันได้แก่ เนื้อเจล (ที่มีขั้นตอนในการนำผงคาโบพอลได้ แชน้ำไว้ก่อน 1 คิน เนื่องมาจากผงคาโบพอลเป็นสารที่ทำละลายได้ยากมากและมีความหนืดมากในระดับหนึ่ง) หมายเหตุสำคัญในการผสมเจลแอลกอฮอล์ไม่ควรใช้ความร้อนและขั้นตอนให้เกิดประกายไฟเด็ดขาด เนื่องจาก แอลกอฮอล์จัดเป็นสารเคมีชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติติดไฟง่าย



ภาพประกอบ 33 ความเร็วรอบในการผสมเจลแอลกอฮอล์ ด้วยระบบควบคุมแบบวงลูปปิด

จากกราฟพบว่า ในกระบวนการผสมสารทดลองตัวอย่าง ทั้ง 3 สาร กระบวนการผลิตเจลแอลกอฮอล์ถือได้ว่า มีแกว่งของความเร็วรอบในผสมที่สูงหรือต่ำมากจนเกินไป ทั้งนี้สืบเนื่องมาจากในขั้นตอนแรกที่มีการนำส่วนผสมของผงคาโบพอลนำไปแช่น้ำทิ้งไว้ 1 คิน ซึ่งช่วยในคาโบพอลกับน้ำทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นเนื้อเจลได้ง่ายขึ้น และมีความหนืดที่คงที่แล้วประมาณหนึ่ง ปัจจัยสำคัญที่มีผล

ต่อความหนืดของเจลแอลกอฮอล์ อันได้แก่ ผงคาร์โบพอล และต่างไตรเอทานอลามีนซึ่งสามารถปรับความหนืดของเนื้อเจลได้ ขึ้นอยู่กับปริมาณที่ใช้ในการผสม ในการเติมสารสองชนิดนี้จะทำให้เกิดสภาวะความหนืดที่เพิ่มขึ้นฉับพลัน ทำให้ระบบควบคุมแบบวงลูปปิด ทำงานมากขึ้นเนื่องจากความเร็วที่วัดได้นั้นต่ำลง โดยการไปสั่งการมอเตอร์ให้ปล่อยกระแสไฟฟ้า แรงดัน และกำลังมอเตอร์เพิ่มเพื่อให้ความเร็วของเครื่องกวนสารให้กลับมาทำงานที่ความเร็วคงที่ตามที่ได้ตั้งค่าไว้ให้เร็วที่สุดเช่นเดิม

#### 4.2 ผลการทดลองการคาดคะเนความหนืดจากความสัมพันธ์ระหว่างของแรงบิดและความหนืดด้วยระบบควบคุมแบบวงลูปปิด

โดยทำการทดลองเพื่อศึกษาขนาด ความยาว ความเร็วรอบ ของใบพัดที่เหมาะสมสำหรับหาค่าความหนืดของของเหลว ซึ่งขนาดของใบพัดที่เลือกใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 31 cm และความหนา 0.2 cm โดยนำเพลลาที่ต่อกับแกนใบพัดยึดติดกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V ซึ่งทำหน้าที่ในการหมุนแกนของใบพัด ด้วย ความเร็วรอบ 135 rpm โดยเพลลาใบพัดที่จุ่มลงไปของเหลวมีความยาว 60.5 cm ซึ่งจะได้ผลการทดลองแสดงดังตาราง 3

สามารถหาค่าความหนืดของของเหลวได้จากสมการ (2.15) ซึ่งผลที่ได้จากการหาค่าความหนืดของสารเคมีมาตรฐาน (general purpose silicone fluid, Brookfield) ในแต่ละครั้งด้วยเครื่องมือวัดความหนืดที่ยอมรับได้กับเครื่องมือที่สร้างขึ้น และเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนของเครื่องมือที่สร้างขึ้นเมื่อเทียบกับเครื่องมือที่ยอมรับได้ แสดงดังตาราง 4

ตาราง 3 ผลการทดลองจากการหาค่าความหนืดของสารตัวอย่างที่ทราบค่าความหนืดที่ยอมรับได้

แชมพู			
การทดลอง	ค่าความหนืดที่ยอมรับได้ (cP)	ค่าความหนืดที่ได้จากการทดลอง (cP)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (cP)
1	120.23	118.93	1.08%
2	112.90	109.96	2.60%
3	113.70	115.32	1.42%
4	117.32	119.34	1.72%
5	120.60	116.80	3.15%

(ก.)

น้ำยาล้างจาน			
การทดลอง	ค่าความหนืดที่ยอมรับได้ (cP)	ค่าความหนืดที่ได้จากการทดลอง (cP)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (cP)
1	4225	465.23	88.99%
2	4355	513.7	88.20%
3	4967	460.93	90.72%
4	4565	470.13	89.70%
5	4451	512.97	88.47%

(ข.)

เจลแอลกอฮอล์			
การทดลอง	ค่าความหนืดที่ยอมรับได้ (cP)	ค่าความหนืดที่ได้จากการทดลอง (cP)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (cP)
1	5939	155.53	97.38%
2	5733	140.16	97.55%
3	5991	155.71	97.40%
4	5630	136.34	97.57%
5	5572	146.2	97.38%

(ค.)

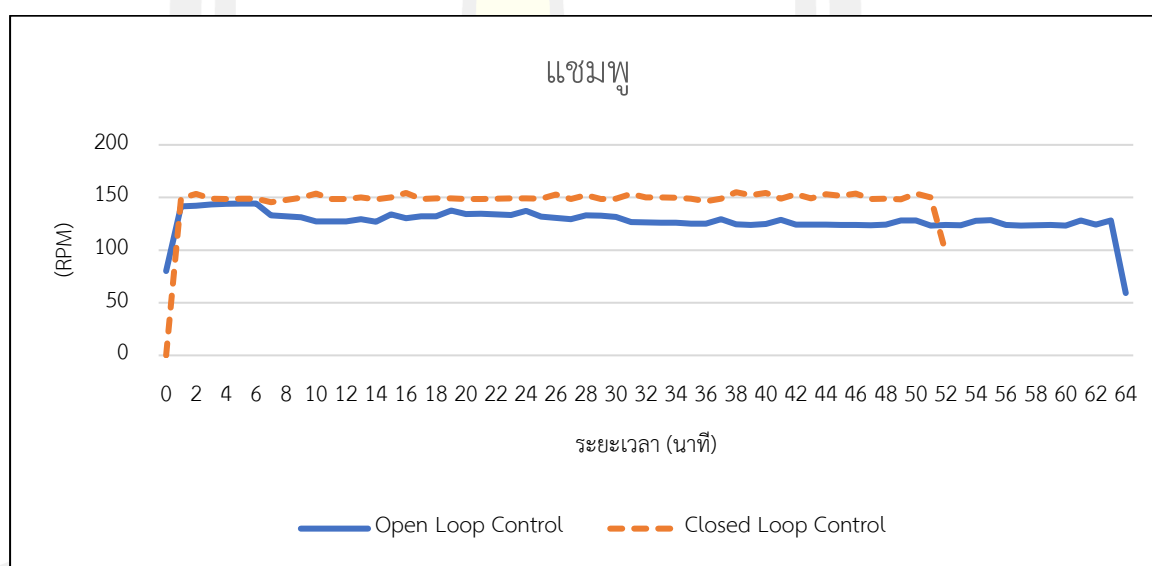
จากตาราง 3 แสดงให้เห็นว่าจำนวนในแต่ละครั้งในการทดลองของของเหลวและค่าความหนืดของของเหลวที่ได้ เมื่อเทียบกับค่าความหนืดที่วัดโดยใช้เครื่องมือที่ยอมรับได้ พบว่า แคมพูมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 3.15 ซึ่งถือว่าเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่น้อยมาก แสดงให้เห็นได้ว่าเครื่องมือที่สร้างขึ้นนี้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือเมื่อเทียบเคียงการค่าความหนืดที่วัดด้วยเครื่องวัดความหนืดแบบบรูคฟิลด์ ซึ่งแตกต่างจากค่าความหนืดของ น้ำยาล้างจาน และเจลแอลกอฮอล์ ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมากกว่า 80 - 98 %

### 4.3 ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องจักร

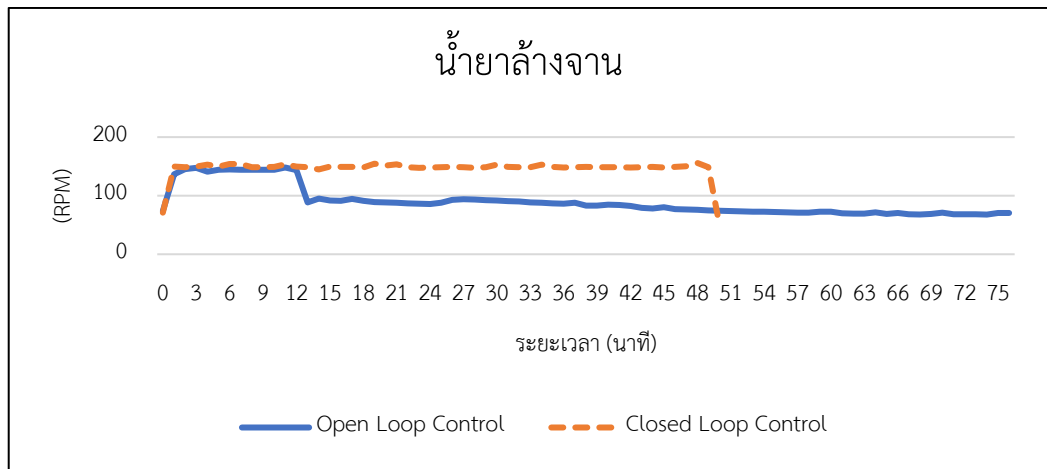
คำนวณหาการใช้พลังงานไฟฟ้า ระยะเวลาในกระบวนการผลิต และลักษณะทางกายภาพของผลผลิต โดยจะทำการทดลองผลิต ผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 สูตร สูตรละ 10 ลิตร และในแต่ละสูตรจะผลิตซ้ำ 5 ครั้ง โดยเปรียบเทียบกันระหว่างอัตราการผลิตโดยเครื่องกวนสารที่ควบคุมด้วยตัวระบบควบคุมวงลูปปิดและเครื่องกวนสารที่ควบคุมด้วยระบบควบคุมแบบเปิด

#### 4.3.1 ผลการทดสอบการใช้พลังงานไฟฟ้า ระยะเวลาในกระบวนการผลิต

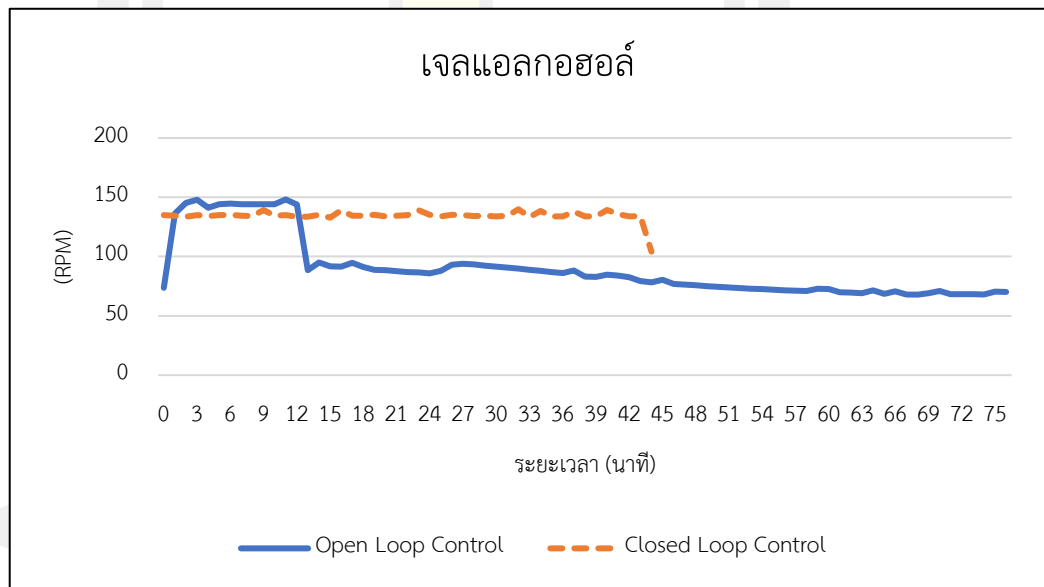
พบว่าการใช้งานเครื่องกวนสารด้วยระบบควบคุมแบบวงลูปปิด มีการใช้กำลังไฟฟ้าที่ขึ้นสูงกว่าระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ทั่วไป ซึ่งสามารถทำให้ความเร็วรอบในการผสมคงที่อย่างสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาในการผสม และระยะเวลาในกระบวนการผลิตทั้ง 3 ผลิตภัณฑ์ อยู่ในช่วง 45 – 55 นาที โดยถือว่าสามารถลดระยะเวลาในการผสมได้ถึง 38.88% เมื่อเทียบกับการเครื่องผสมทั่วไป ในเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที



(ก.) ความเร็วรอบในการผสมระหว่างระบบควบคุมแบบวงลูปปิด และระบบควบคุมแบบเปิด ของแชมพู



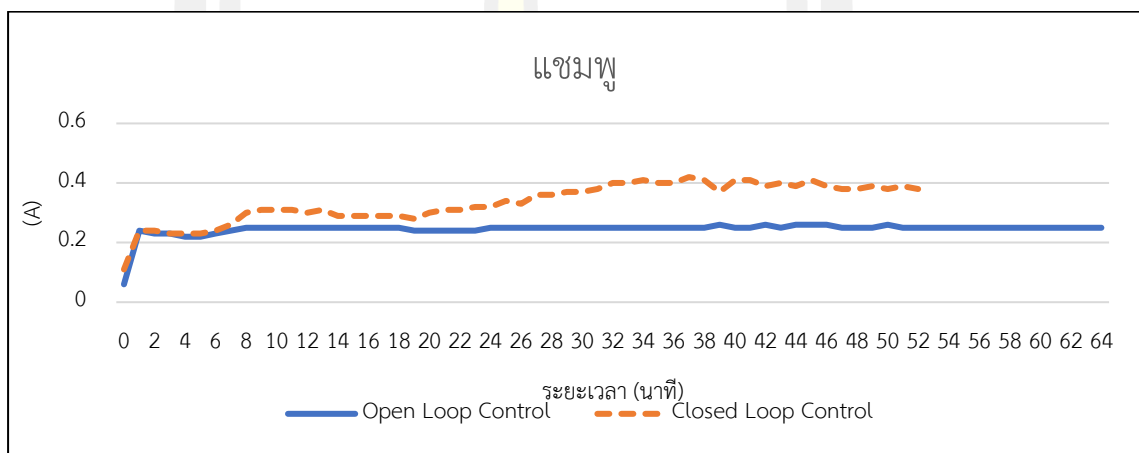
(ข.) ความเร็วรอบในการผสมระหว่างระบบควบคุมแบบวงลูปปิด  
และระบบควบคุมแบบเปิด ของน้ำยาล้างจาน



(ค.) ความเร็วรอบในการผสมระหว่างระบบควบคุมแบบวงลูปปิด  
และระบบควบคุมแบบเปิด

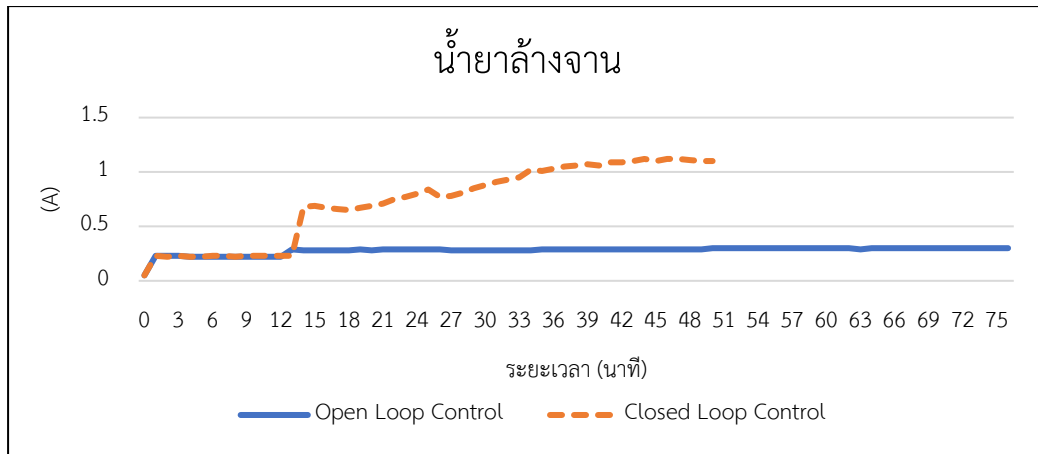
ภาพประกอบ 34 ความเร็วรอบในการผสมของระบบควบคุมแบบวงลูปปิด-เปิด

จากข้อมูลภาพประกอบ 35 พบว่า การทำงานของเครื่องกวนสารด้วยระบบควบคุมแบบวง ลูปปิด สามารถรักษาความเร็วรอบที่ลดลง-เพิ่มขึ้น จากความหนืดที่เปลี่ยนแปลงได้ดีโดยที่ระบบควบคุม วงลูปปิด จะทำหน้าที่พยายามรักษาสมดุลให้ความเร็วรอบในการผสมกลับมาเท่ากับความเร็วรอบที่ กำหนดไว้ให้เร็วที่สุด ซึ่งหากเปรียบเทียบกับระบบควบคุมแบบเปิด ถือว่าทำให้ประสิทธิภาพในการ ผสมสารมีความเสถียรมากขึ้น มีความยืดหยุ่นในการใช้งาน ทำให้ได้เนื้อสารที่มีความเนียนละเอียดที่ สม่ำเสมอ และประโยชน์หลักของเครื่องกวนสารที่จะต้องสามารถลดระยะเวลาในการผสมและและม ีความเร็วในการผสมที่สม่ำเสมอ

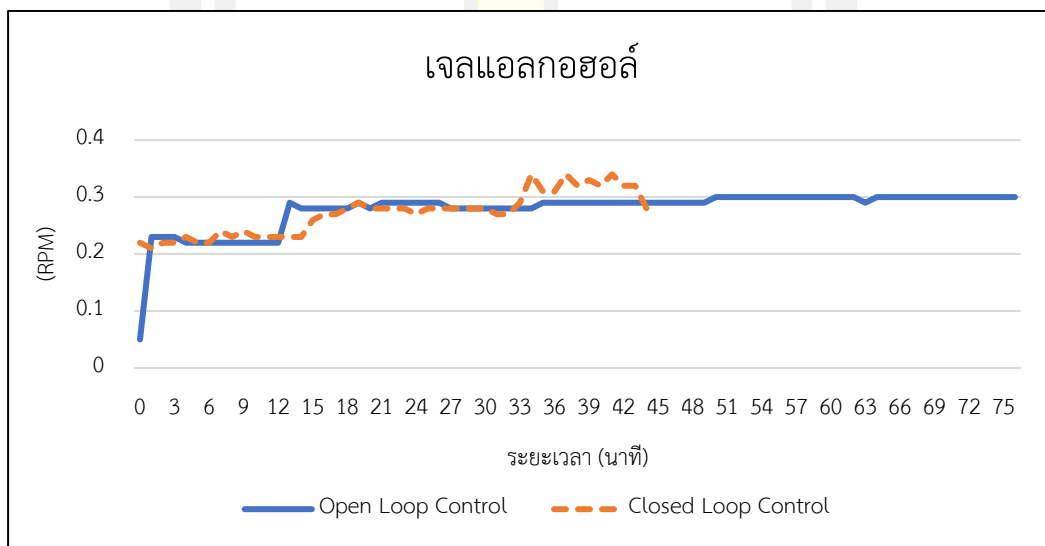


(ก.) กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในระบบควบคุมแบบวงลูปปิด และระบบควบคุมแบบเปิด ของแชมพู





(ข.) กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในระบบควบคุมแบบวงลูปปิด และระบบควบคุมแบบเปิด ของน้ำยาล้างจาน



(ค.) กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในระบบควบคุมแบบวงลูปปิด และระบบควบคุมแบบเปิดของเจลแอลกอฮอล์

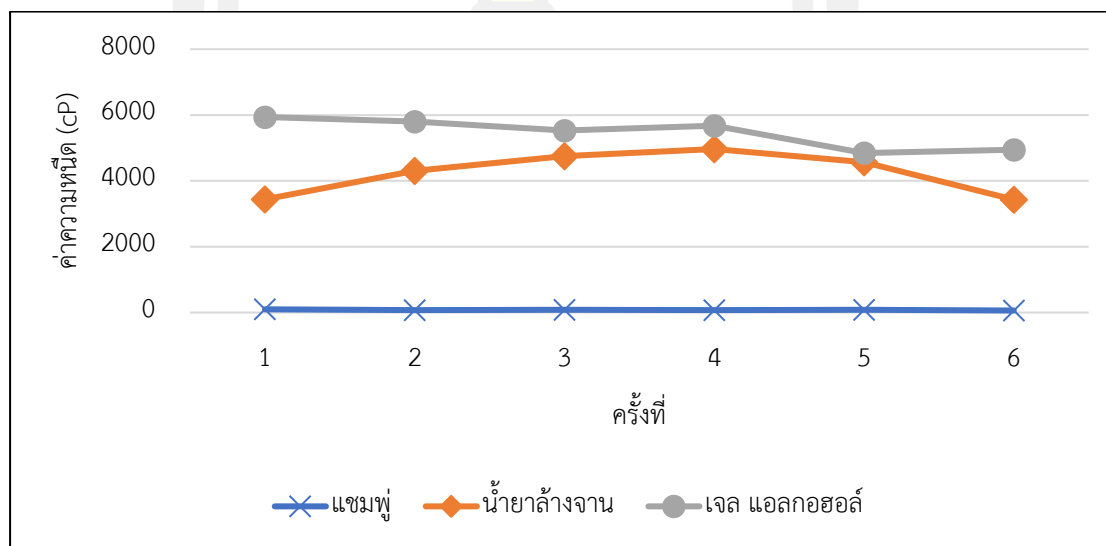
ภาพประกอบ 35 กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในระบบควบคุมแบบวงลูปปิด และระบบควบคุมแบบเปิด

จากภาพประกอบ ที่ 36 พบว่า การทำงานของเครื่องกวนสารด้วยระบบควบคุมแบบวงลูปปิดมีค่าเฉลี่ยการใช้ไฟฟ้าที่สูงกว่า การทำงานด้วยระบบควบคุมแบบเปิด เนื่องจากต้องเลี้ยงความเร็วรอบในการผสมให้ค่าที่คงที่ได้มากที่สุด เพื่อที่จะให้ทอร์คของมอเตอร์สามารถต้านทานความหนืดที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตสารเคมีตัวอย่างทั้ง 3 ชนิดได้

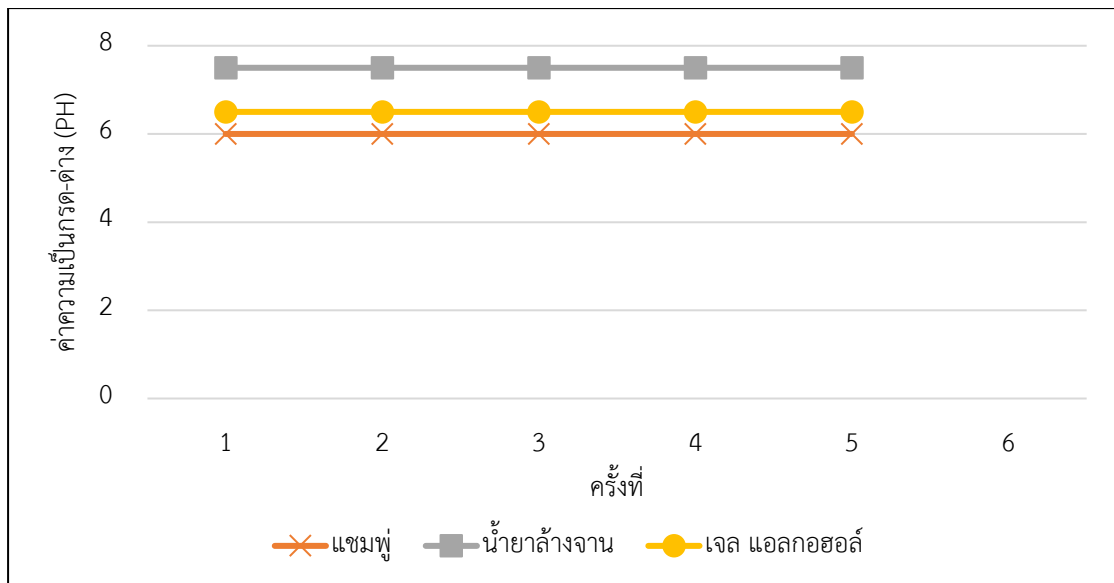
### 4.3.2 ทดสอบเพื่อหาลักษณะทางกายภาพของผลผลิต

เป็นการนำเอาผลผลิตทุกตัวที่ผลิตได้พร้อมบรรจุภัณฑ์ มาทำการทดสอบเพื่อหาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าความหนืดและการตกตะกอน เปรียบเทียบกันระหว่างการการผลิตโดยเครื่องจักรที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอดีและเครื่องจักรที่ไม่ได้ใช้ระบบควบคุมแบบวงลูปปิด

จากการนำเอาผลผลิตทุกตัวที่ผลิตได้มาทำการทดสอบเพื่อหาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าความหนืด โดยอ้างอิงข้อมูลจากเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ประเภทผลิตภัณฑ์ชุมชน (pH 5-7) จะสังเกตได้ว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผลิตโดยเครื่องจักรที่มีระบบควบคุมแบบวงลูปปิดจะให้ค่า pH และค่าความหนืด ที่มีความคงที่สม่ำเสมอมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่ผลิตโดยเครื่องผสมทั่วไปและแรงงานมนุษย์



ภาพประกอบ 36 ลักษณะความคงที่ของค่าความหนืดของ ของผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดทั้ง 3 สูตร



ภาพประกอบ 37 ลักษณะความคงที่ของค่า PH ของผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดทั้ง 3 สูตร



## บทที่ 5

### อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

โครงการนี้ทำการศึกษาและออกแบบการทำงานของเครื่องกวนสารด้วยระบบควบคุมแบบวงลูปปิด เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าและความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้ พร้อมทั้งคำนวณค่าความหนืดจากแรงบิดและโครงสร้างทางเทคนิคของเครื่องกวนสารที่ได้ทำการออกแบบ โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

#### 5.1 ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกวนสาร

เครื่องกวนสารที่ได้ทำการจัดสร้างขึ้นสามารถทำงานได้ตามขั้นตอน ภายใต้สภาวะการทำงานที่เหมาะสม ในระบบควบคุมแบบวงลูปปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ สามารถผสมสารทดสอบได้ดีในส่วนของชนิดของสารเคมีทดลอง อันได้แก่ แชมพู น้ำยาล้างจาน และเจลแอลกอฮอล์ โดยแชมพู มีความหนืดอยู่ที่ 100- 130 cP สามารถผสมได้ดีในความเร็วรอบที่ 135 รอบต่อวินาที เป็นต้นไป ซึ่งหากต้องการผสมสารที่มีความหนืดมากขึ้นกว่านี้จะต่อมีการเพิ่มความเร็วรอบในการผสม ยกตัวอย่างเช่น เจลแอลกอฮอล์ และ น้ำยาล้างจาน ที่มีความหนืดอยู่ที่ 4000- 6000 cP ที่สามารถผสมสารได้ดีที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อวินาที เป็นต้นไป

การคาดคะเนความหนืดจากสูตรสมการพื้นฐานของเครื่องวัดความหนืดแบบหมุนที่ได้มีการนำมาปรับใช้กับเครื่องกวนสารที่ได้ทำการออกแบบและสร้างขึ้น โดยอาศัยหลักการของมอเตอร์ ภายใต้สภาวะคงตัว ทอร์กหน่วง ( $\tau_r$ ) ที่กระทำต่อพื้นผิวของใบพัดเนื่องจากการเคลื่อนที่ของของเหลว ซึ่งเป็นสัดส่วนกับความหนืดของของเหลว จะมีค่าเท่ากับทอร์กที่เกิดขึ้น โดยมอเตอร์ ( $\tau_{motor}$ ) ซึ่งความหนืดของของเหลวจะมีความสัมพันธ์กับทอร์กที่เกิดขึ้น โดยมอเตอร์ ( $\tau_{motor}$ ) ดังสมการ

$$\tau_r = 4\pi l \eta \omega r_1^2 \left( \frac{1}{1 - \frac{r_1^2}{r_2^2}} \right) = \tau_{motor} \quad (2.15)$$

โดยสามารถหาค่าความหนืดได้จากการหาขนาด ความยาวของใบพัดที่จุ่มอยู่ในของเหลว และความเร็วรอบที่เหมาะสมตามวิธีการที่กล่าวไว้อย่างเป็นทางการเป็นลำดับในบทที่ 3 ดังนั้นเครื่องมือที่สร้างขึ้นนี้จึงเป็นการเพิ่มทางเลือกสำหรับการหาค่าความหนืดของของเหลว ซึ่งใช้ต้นทุนในการสร้างเครื่องมือ

ไม่สูงมาก อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเป็นอุปกรณ์พื้นฐานในห้องปฏิบัติการทั่วไปและหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาด เหมาะสำหรับสถาบันที่ขาดแคลนงบประมาณ ในการซื้อเครื่องมือทดลองทางวิทยาศาสตร์ นอกจากนั้นยังสามารถนำไปใช้ในการจัดการเรียนการสอนวิชาฟิสิกส์ ให้นักเรียนและนักศึกษารู้หลักการการทำงานของเครื่องมือวัดความหนืดของของเหลวแบบหมุนว่ามีหลักการอย่างไร อีกทั้งยังได้เรียนรู้ถึงหลักการการทำงานของมอเตอร์ ทอร์ค และกลศาสตร์ของไหลซึ่งเป็นพื้นฐานเกี่ยวกับการสร้างเครื่องมือวัดความหนืดแบบหมุนนี้อีกด้วย

พบว่า สามารถนำมาใช้ประมาณค่าความหนืดของสารเคมีได้เป็นบางชนิด ที่มีความหนืดอยู่ในช่วง 0-1,000 cP ได้ ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0-3.18 % อ้างอิงจากงานวิจัยที่มีการสร้างเครื่องมือวัดความหนืดแบบหมุน โดยหาค่าความหนืดจากสมการคำนวณความหนืดนี้

สรุปได้ว่าการใช้งานระบบควบคุมแบบวงลูปปิดหรือแบบป้อนกลับ มีการใช้กำลังไฟฟ้าที่ขึ้นสูงกว่าระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ทั่วไป ซึ่งสามารถทำให้ความเร็วรอบในการผสมคงที่อย่างสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาในการผสม และระยะเวลาในกระบวนการผลิตทั้ง 3 ผลิตภัณฑ์ อยู่ในช่วง 45 – 55 นาที โดยถือว่าสามารถลดระยะเวลาในการผสมได้ถึง 38.88% เมื่อเทียบกับการใช้เครื่องผสมสารที่ผสมในปริมาณ 10 ลิตร ต่อ ครั้ง ด้วยระยะเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที อ้างอิงจากเครื่องที่มีขายตามท้องตลาดโดยทั่วไป และงานวิจัยนี้ถือได้ว่าประสบความสำเร็จในการนำหลักการหาค่าความหนืดจากสมการของเครื่องมือวัดความหนืดแบบหมุนอย่างง่ายมาปรับใช้กับเครื่องกวนสารธรรมดาที่ได้ทำการจัดสร้างขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

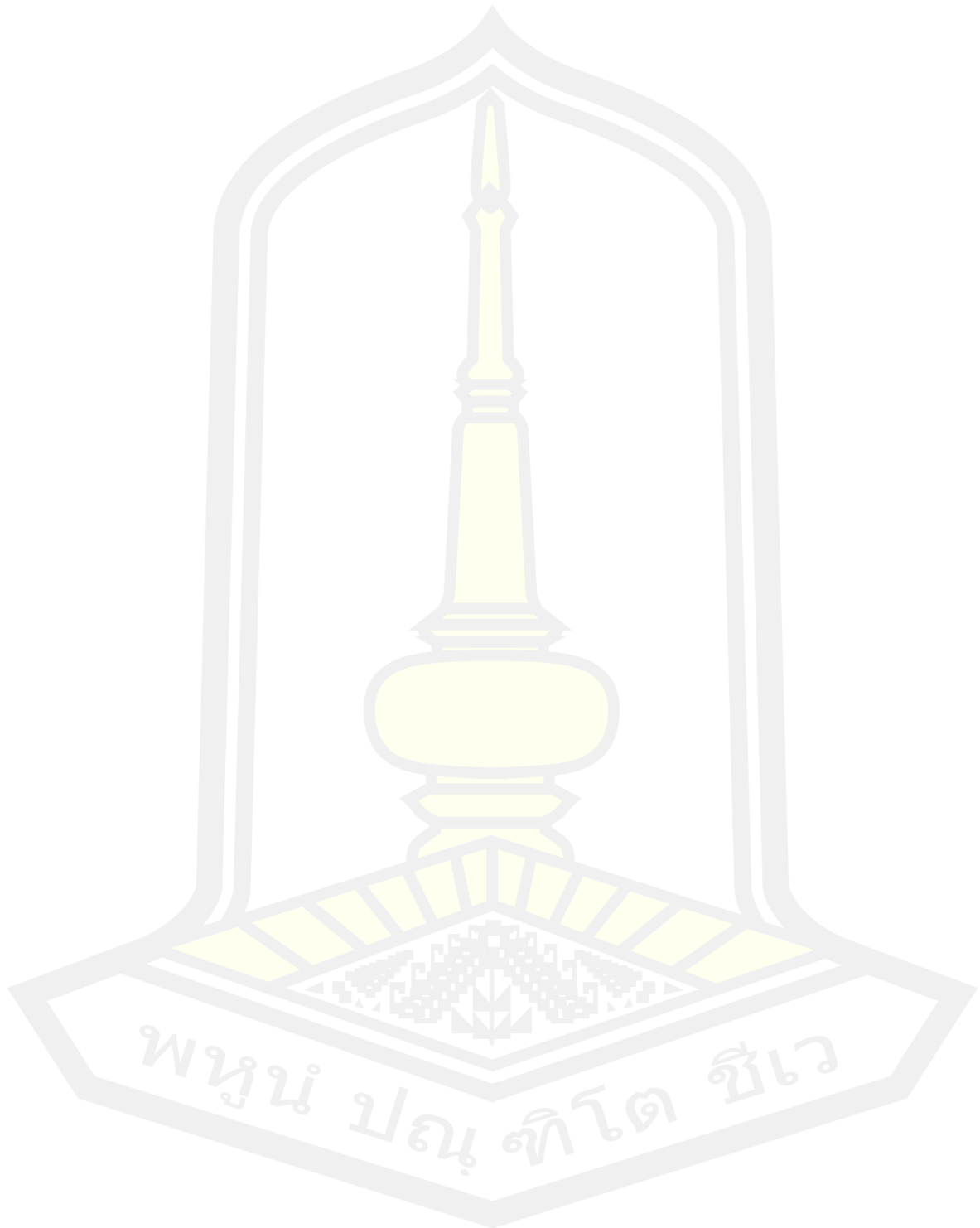
โครงการนี้ขอเสนอแนะให้มีการปรับโครงสร้างของเพลลาที่ต่อมอเตอร์และรูปร่างในพัด เนื่องจากเพื่อให้สามารถผสมสาร ที่ผสมกันได้ง่าย มีความหนืดมาก ต้องการแรงในการผสมมากกว่า การผสมสารทั่วไป ยกตัวอย่างเช่น การแตกตัวของผลิตภัณฑ์ที่เป็นผง เกร็ด เม็ด รวมถึงสารที่การความเหนียวละเอียดของเนื้อผสม เพื่อนำไปใช้งานได้ตรงความต้องการของผู้ใช้งาน การทดสอบนี้เป็นตัวอย่างการผลิตของผลิตภัณฑ์เพียง 3 ชนิดเท่านั้น หากต้องการจะทำการผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทเดียวกันนี้แต่เป็นสูตรอื่นนอกเหนือจากสูตรที่ได้ทำการทดสอบนี้ ควรที่จะทำการทดสอบการผลิตจริงอีกครั้ง เพื่อให้ได้ความเหมาะสมในการผสมที่ความเร็วรอบคงที่เฉพาะสูตรต่อไป

โดยเครื่องจักรนี้มีขีดจำกัดในการใช้กับของเหลวที่มีความหนืดไม่ควรเกิน 5,000 cP เพื่อป้องกันไม่ให้เครื่องจักรรับภาระโหลดมากเกินไป อีกทั้งยังสามารถพัฒนาต่อยอดเครื่องจักรให้ใช้กับของเหลวความหนืดสูงกว่านี้อีกได้ หรือให้ความร้อนร่วมในกระบวนการผลิต จะทำให้เครื่องจักรมีอัตราประโยชน์มากขึ้น

และในส่วนของการประมาณความหนืด จากการนำสมการคำนวณหาค่าความหนืดอย่างง่าย มาเปรียบใช้กับเครื่องกวนสาร ซึ่งมีปัจจัยสำคัญ 3 ปัจจัย อันได้แก่ รูปร่างใบพัด ความเร็วรอบในการ หมุน และความหนืด ที่ต้องสัมพันธ์กัน ดังนั้น หากต้องการประมาณค่าความหนืดจากสมการหาค่า ความหนืดที่มีความหนืดมากกว่า 1,000 cP ได้อย่างแม่นยำ ควรมีการออกแบบโครงสร้างของรูปร่าง ใบพัดผสมและปรับปรุงสมการดังกล่าวนี้ต่อไป และสุดท้ายออกแบบหัวกวนหลายขนาดเพื่อความ เหมาะสมในการวัด หาความหนืดได้ในหลายๆย่าน เนื่องจากปริมาณของสารในการวัดยังใช้ในปริมาณ ที่ค่อนข้างเยอะเมื่อเทียบกับเครื่องจริง



บรรณานุกรม



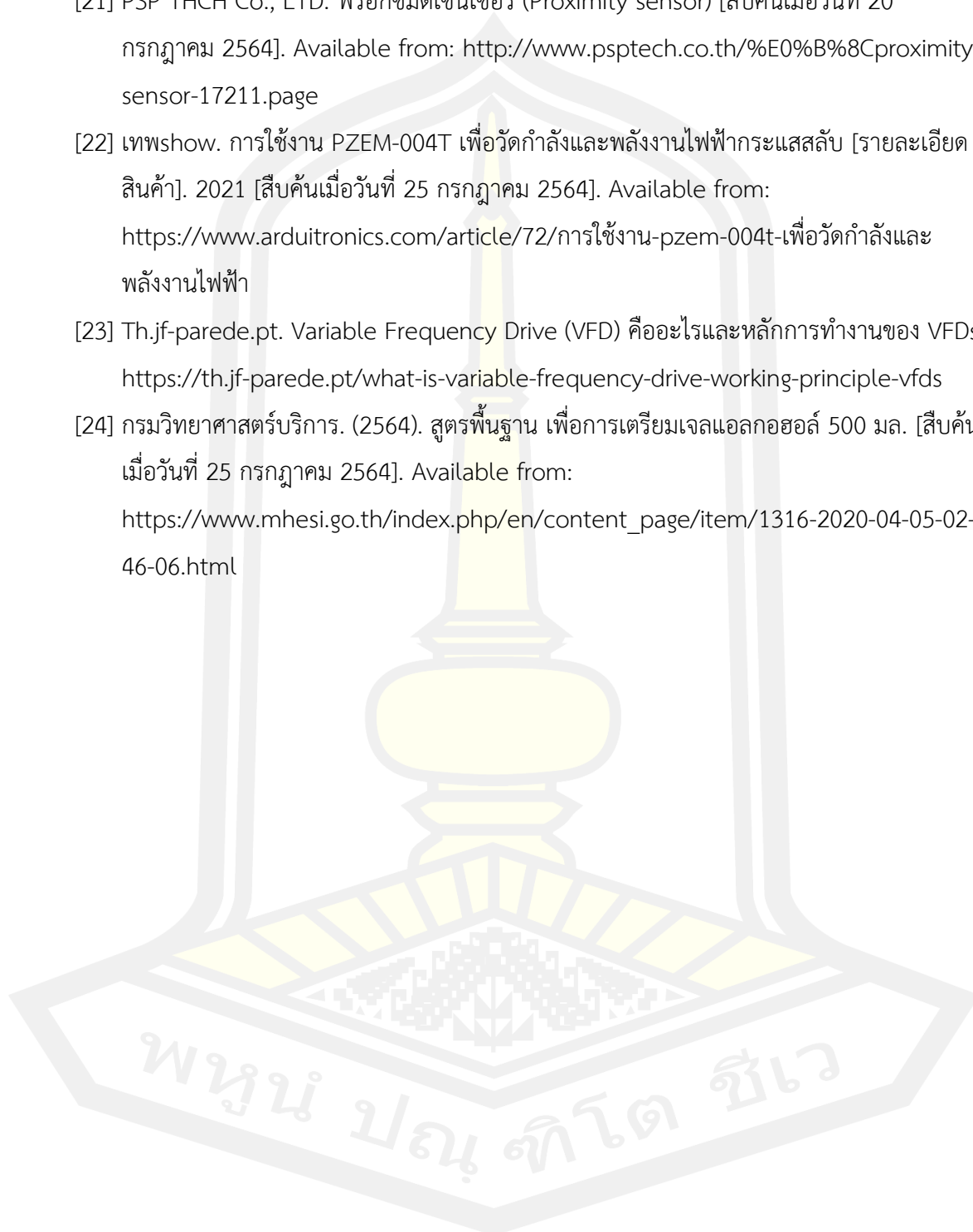
## บรรณานุกรม

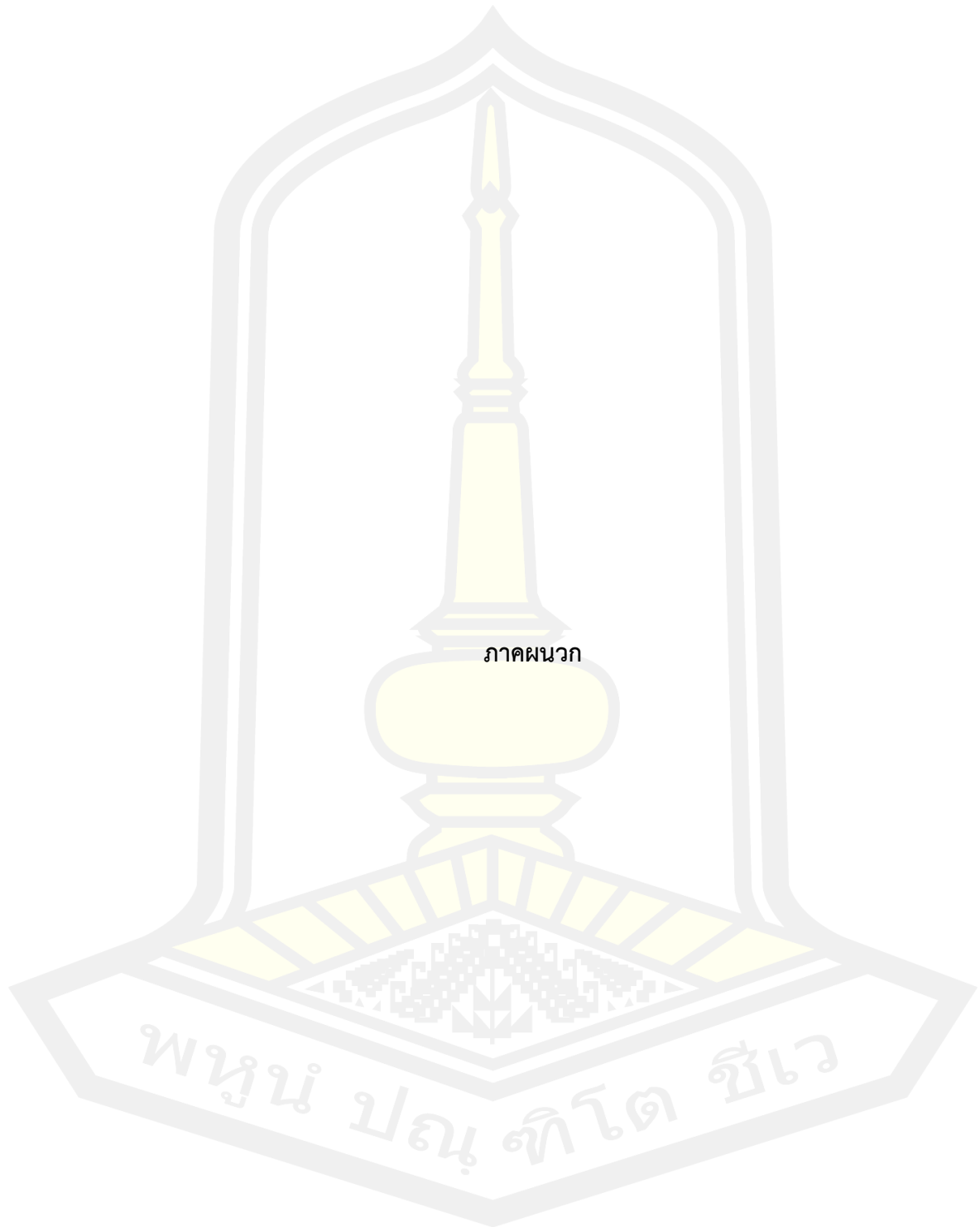
- [1] Gubanov, O., & Cortelezzi, L. (2010). Towards the design of an optimal mixer. *Journal of fluid mechanics*, 651, 27-53.
- [2] ชัชวาล เข้ม เงิน. การ ประมาณ ปริมาตร ใน ภาชนะ กวน ด้วย การ ชดเชย แรง บิด ของ เครื่อง กวน สาร แบบ แท่ง แม่เหล็ก (Doctoral dissertation, สาขา วิชา วิศวกรรม เครื่องกล สำนัก วิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยี สุร นาธิ).
- [3] (สำนักงานใหญ่) บสจ. DELIZI เครื่องปั่นน้ำผลไม้แรงสูง [สืบค้นเมื่อวันที่ 14 มิถุนายน 2564]. 2564 [Available from: <https://www.central.co.th/th/delizi-high-strength-juice-blender-265238-1-6-ml-silver-cds21277603>]
- [4] เครื่องกวน ก. ใบกวน ( Impeller Type) [สืบค้นเมื่อวันที่ 17 มิถุนายน 2564]. 2564 [Availablefrom:<https://kittakarn.com/3%E0%B9%83%E0%B8%9A%E0%B8%81%E0%B8%A7%E0%B8%99-impeller-type/>].
- [5] npchemsupply. เครื่องกวน ผสมสาร Overhead Stirrer RW20, IKA (GERMANY) [สืบค้นเมื่อวันที่ 17 มิถุนายน 2564]. 2564 [Available from: [http://www.npchemsupply.com/store/product/view/เครื่องกวน\\_ผสมสาร\\_Overhead\\_Stirrer\\_RW20\\_IKA\\_GERMANY-28157069-th.html](http://www.npchemsupply.com/store/product/view/เครื่องกวน_ผสมสาร_Overhead_Stirrer_RW20_IKA_GERMANY-28157069-th.html)].
- [6] ตลาดกลางสินค้าอุตสาหกรรมไทย. ขายเครื่องกวนสารแม่เหล็ก คุณภาพดี [สืบค้นเมื่อวันที่ 17 มิถุนายน 2564]. 2564 [Available from: <https://www.nanasupplier.com/tag/42013>].
- [7] Cullen, P.J., Duffy, A.P., Donnell, C.P. and Callaghan, D.J., 2000, "Process Viscometry for the Food Industry", *Trends in Food Science Science and Technology*, Vol. 11, No. 9, pp.451 – 457.
- [8] กิตติศักดิ์ รอดเรือง. การ สร้าง เครื่องวัด ความหนืด แบบหมุน อย่างง่าย และ ราคา ถูก (Doctoral dissertation, สาขา วิชา ฟิสิกส์ ศึกษา สำนัก วิชา วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยี พระจอมเกล้า ธน บური).
- [9] ก ฤ ษ ณะ จัน ท สิทธิ, คมสัน มุ่ย สี, & ศ รา ยุทธ์ จิตร พัฒนา กุล. (2018). การ พัฒนา เครื่อง กวน เนื้อ มังคุด ชนิด ควบคุม อุณหภูมิ กิ่ง อัตโนมัติ สำหรับ วิสาหกิจ ชุมชน บ้าน ท่าศาลา อำเภอ ท่าใหม่ จังหวัด จันทบุรี. *Rajabhat Rambhai Barni Research Journal*, 12(1), 58-67.



- [10] Songkong, S., & Ratchapakdee, P. (2019). เครื่องผสมเนื้อปลา.
- [11] สิทธิ บวรณ ศิริ พร อัคร ชัย. (2021). เครื่องผสมผลิตภัณฑ์ ความงาม และ ชำระ ล้าง. วารสารวิจัย เทคโนโลยี นวัตกรรม, 5(2), 19-29.
- [12] น ภั สด ล สิง ทะ ตา. การ ประมาณ ค่า ความ หนืด โดยใช้มอเตอร์ กระแสตรง ร่วมกับการชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวได้ (Doctoral dissertation, สาขาวิชาแมคคาทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี).
- [13] วรวิทย์ วรรณานิน. (2550) เครื่องกวนน้ำมะขามเปียก. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร: กรุงเทพฯ. DOI : [https://doi.nrct.go.th/ListDoi/listDetail?Resolve\\_DOI=](https://doi.nrct.go.th/ListDoi/listDetail?Resolve_DOI=)
- [14] Kraftmakher, Y. (2010). Rotational viscometers—a subject for student projects. *Physics Education*, 45(6), 622.
- [15] Chenggang Electrical Engineering (THILAND). มอเตอร์ไฟฟ้า [สืบค้นเมื่อวันที่ 23 มิถุนายน 2564] 2564 [Available from: <http://www.suntechgear.com/product.html>
- [16] Food Network Solution. Brookfield viscometer [สืบค้นเมื่อวันที่ 23 มิถุนายน 2564] 2564 [Available from: <https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/3079/brookfield-viscometer?fbclid=IwAR1ni1jz-yJWQmV5MDEVJdrJlxZ8Nu43-t8UG3w3b43mZYCCPEPYjUcJEy0>
- [17] Tommology Blog. Arduino คืออะไร [สืบค้นเมื่อวันที่ 23 มิถุนายน 2564] 2564 [Available from: <https://www.tommology.com/2018/08/13/arduino-%E0%B8%84%E0%B8%B7%E0%B8%AD%E0%B8%AD%E0%B8%B0%E0%B9%84%E0%B8%A3/>
- [18] Mindphp. google sheet [สืบค้นเมื่อวันที่ 23 มิถุนายน 2564] 2565 [Available from: <https://www.mindphp.com/%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1/google-for-work/223-google-sheets/4980-google-sheets.html>
- [19] เทพshow. PH Sensor Module with Probe เซ็นเซอร์วัดค่า PH ของน้ำ พร้อมโมดูลต่อ Arduino [รายละเอียดสินค้า]. 2021 [สืบค้นเมื่อวันที่ 20 กรกฎาคม 2564]. Available from: <https://www.mosfex.com/product/179/ph-sensor-module-with-probe-arduino>.
- [20] Neonics. เซ็นเซอร์อุณหภูมิ [สืบค้นเมื่อวันที่ 20 กรกฎาคม 2564]. Available from: <https://www.neonics.co.th/thermometers/temperature-sensor.html>

- [21] PSP THCH Co., LTD. พร็อกซิมิตีเซนเซอร์ (Proximity sensor) [สืบค้นเมื่อวันที่ 20 กรกฎาคม 2564]. Available from: <http://www.psptech.co.th/%E0%B%8Cproximity-sensor-17211.page>
- [22] เทพshow. การใช้งาน PZEM-004T เพื่อวัดกำลังและพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ [รายละเอียดสินค้า]. 2021 [สืบค้นเมื่อวันที่ 25 กรกฎาคม 2564]. Available from: <https://www.arduitronics.com/article/72/การใช้งาน-pzem-004t-เพื่อวัดกำลังและพลังงานไฟฟ้า>
- [23] Th.jf-parede.pt. Variable Frequency Drive (VFD) คืออะไรและหลักการทำงานของ VFDs <https://th.jf-parede.pt/what-is-variable-frequency-drive-working-principle-vfds>
- [24] กรมวิทยาศาสตร์บริการ. (2564). สูตรพื้นฐาน เพื่อการเตรียมเจลแอลกอฮอล์ 500 มล. [สืบค้นเมื่อวันที่ 25 กรกฎาคม 2564]. Available from: [https://www.mhesi.go.th/index.php/en/content\\_page/item/1316-2020-04-05-02-46-06.html](https://www.mhesi.go.th/index.php/en/content_page/item/1316-2020-04-05-02-46-06.html)





```
#include <EEPROM.h>
#include <Wire.h> //
#include <LiquidCrystal_I2C.h> //
#include <PZEM004Tv30.h> //
#include <Keypad_I2C.h> // เรียกใช้งานไฟล์ Keypad_I2C.h เพื่อใช้งาน Keypad ติดต่อผ่าน
I2C
#include <PID_v1.h> // เรียกใช้งานไฟล์ PID_v1.h เพื่อใช้งาน PID Controller
#include <OneWire.h> // เรียกใช้งานไฟล์ OneWire.h เพื่อใช้คำสั่งติดต่อกับเซนเซอร์
DS18B20
#include <DallasTemperature.h> // เรียกใช้งานไฟล์ DallasTemperature เพื่อใช้คำสั่งอ่าน
ค่าจาก DS18B20

#define MOTOR1_ID 1

#define DEBUG_PH
// #define DEBUG_PLOTTER
#define DEBUG_PID
#define DEBUG_DS18B20
// #define DEBUG_MODBUS
// #define DEBUG_POWER

#define TX 1
#define RX 0
const byte RS485_DIR = 7;
```

```

//#####
#####
//
//#####
#####
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2);

//#####
#####
//
//#####
#####
PZEM004Tv30 pzem(&Serial3);

//#####
#####
// เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ เบอร์ DS18B20
//#####
#####
#define ONE_WIRE_BUS 9 // กำหนดขา 9 สำหรับเชื่อมต่อกับเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS); // สร้างฟังก์ชันสำหรับเชื่อมต่อกับเซนเซอร์
DallasTemperature DS18B20(&oneWire); // สร้างฟังก์ชันเชื่อมต่อกับเซนเซอร์
DeviceAddress insideThermometer; // arrays to hold device address

```

```

#####
//#####
#####
// หลอด LED แสดงสถานะการทำงาน
//#####
#####
#define LED_ON    HIGH
#define LED_OFF   LOW
const byte LED_PROCESS = 4;
const byte LED_ALARM  = 5;

//#####
#####
// ปุ่มกด
//#####
#####
const byte BUTTON_START = 3;
const byte BUTTON_STOP  = 8;

//#####
#####
// BUZZER
//#####
#####
#define BUZZER_ON  HIGH
#define BUZZER_OFF LOW
const byte BUZZER = 6;

```

```

#####
#####
// INDUCTIVE PROXIMITY
#####
#####
const byte INDUCTIVE = 2;

#####
#####
// ตัวแปร
#####
#####
#define I2CADDR 0x21

const byte ROWS = 4; //four rows
const byte COLS = 4; //four columns

//define the symbols on the buttons of the keypad
char hexaKeys[ROWS][COLS] = {
  {'1','2','3','A'},
  {'4','5','6','B'},
  {'7','8','9','C'},
  {'*','0','#','D'}
};

byte rowPins[ROWS] = {0, 1, 2, 3}; //connect to the row pinouts of the keypad
byte colPins[COLS] = {4, 5, 6, 7}; //connect to the column pinouts of the keypad

Keypad_I2C customKeypad( makeKeymap(hexaKeys), rowPins, colPins, ROWS, COLS,
I2CADDR);

```

```

#####
//#####
#####
// ตัวแปร
//#####
#####
unsigned int SetSpeed;
byte Hour;
byte Minute;
byte Second;
float voltage;
float current;
float power;
float energy;
volatile float Rpm = 0;

float Kp = 0; //สร้างตัวแปร Proportional Gain
float Ki = 1; //สร้างตัวแปร Integral Gain
float Kd = 0; //สร้างตัวแปร Differential Gain

double Setpoint, Input, Output; //These are just variables for storing values
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);

//#####
#####
// PH Sensor
//#####
#####
const int analogPhPin = A0; // กำหนดขา A0 เชื่อมต่อกับ PH Sensor

```



```

const float C = 36.1788; //Constant of straight line (Y = mx + C)
const float m = -6.15; // Slope of straight line (Y = mx + C)

float Ph;
float Temperature;

volatile unsigned long Timeout = millis();

/*****
****/
/* FUNCTION : setup() */
/*****
****/
void setup() {

    /#####
    // เปิดใช้งาน Serial สำหรับดูการทำงานผ่าน Serial Monitor
    /#####
    Serial.begin(115200);

    /#####
    // เปิดใช้งาน Serial สำหรับติดต่อกับบอร์ด NodeMCU
    /#####
    Serial1.begin(9600);

    /#####

```

```

// เปิดใช้งาน Serial2 สำหรับติดต่อกับ Inverter
#####
Serial2.begin(9600);

pinMode(RS485_DIR,OUTPUT);
digitalWrite(RS485_DIR,TX);

#####
// กำหนดขาที่เชื่อมต่อกับปุ่ม Start, Stop เป็นขาอินพุต
#####
pinMode(BUTTON_START,INPUT_PULLUP);
pinMode(BUTTON_STOP ,INPUT_PULLUP);

#####
// กำหนดขาที่เชื่อมต่อกับหลอด LED เป็นขาเอาต์พุต
#####
pinMode(LED_PROCESS,OUTPUT);
pinMode(LED_ALARM,OUTPUT);

#####
// สั่งให้หลอด LED ดับ
#####
digitalWrite(LED_PROCESS,LED_OFF);
digitalWrite(LED_ALARM,LED_OFF);

#####
// กำหนดขาที่เชื่อมต่อกับ Buzzer เป็นขาเอาต์พุต และสั่งให้ Buzzer หยุดทำงาน
#####
pinMode(BUZZER,OUTPUT);
digitalWrite(BUZZER,BUZZER_OFF);

```

```

#####
// เริ่มต้นใช้งานจอ LCD
#####
lcd.begin();

#####
// เริ่มต้นใช้งาน Keypad
#####
customKeypad.begin( );

#####
// ส่งคำสั่งให้มอเตอร์หยุดทำงาน
#####
MotorStop();

#####
// กำหนดขาที่เชื่อมต่อกับ INDUVTIVE SENSOR เป็นขาอินพุตแบบ Pullup
#####
pinMode(INDUCTIVE, INPUT);

#####
#####
// เปิดใช้งานอินเตอร์รัพท์ขาที่เชื่อมต่อกับ INDUCTIVE SENSOR จับที่ขอบขาลง และเรียกฟังก์ชัน
ReadRPM

```

```

#####
#####
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(INDUCTIVE), ReadRPM, FALLING);

#####
// กำหนดค่า PID
#####
myPID.SetMode(AUTOMATIC); //Turn on the PID loop
myPID.SetSampleTime(100); // กำหนดค่า Sample
myPID.SetOutputLimits(100,5000); // กำหนดค่าลิมิตเอาต์พุต อยู่ในช่วง 0 - 5000

#####
// เริ่มต้นการทำงานของเซนเซอร์ DS18B20
#####
DS18B20.begin();

#ifdef DEBUG_DS18B20
Serial.print("Found ");
Serial.print(DS18B20.getDeviceCount(), DEC);
Serial.println(" devices.");
#endif

#ifdef DEBUG_DS18B20
// report parasite power requirements
Serial.print("Parasite power is: ");
if(DS18B20.isParasitePowerMode()){
Serial.println("ON");
}
}

```

```
}else{
  Serial.println("OFF");
}
#endif

if (!DS18B20.getAddress(insideThermometer, 0)){
  Serial.println("Unable to find address for Device 0");
}

// กำหนดความละเอียดของเซนเซอร์
DS18B20.setResolution(insideThermometer, 9);

#ifdef DEBUG_DS18B20
Serial.print("Device 0 Resolution: ");
Serial.print(DS18B20.getResolution(insideThermometer), DEC);
Serial.println();
#endif

if(EEPROM.read(0)!=0x02){
  EEPROM.write(0,0x02);
  WriteProfile(0,100,0,10); // Profile 1
  WriteProfile(1,110,0,15); // Profile 2
  WriteProfile(2,115,0,20); // Profile 3
  WriteProfile(3,120,0,25); // Profile 4
  WriteProfile(4,125,0,30); // Profile 5
  WriteProfile(5,130,0,35); // Profile 6
  WriteProfile(6,135,0,40); // Profile 7
  WriteProfile(7,140,0,45); // Profile 8
  WriteProfile(8,145,0,50); // Profile 9
}
```

```

for(byte i=0; i<9; i++){
    ReadProfile(i,&SetSpeed,&Hour,&Minute);
    Serial.print("Profile"); Serial.print(i);
    Serial.print(" SetSpeed="); Serial.print(SetSpeed);
    Serial.print(" Time="); Serial.print(Hour); Serial.write(':'); Serial.println(Minute);
}

}

/*****
****/
/* FUNCTION : loop() */
/*****
****/
void loop() {
    static boolean ButtonStart = false;
    static byte State = 0;
    static boolean Display = true;
    static byte Index = 2;
    static char Buffer1[4] = {' ', ' ', '0', '\0'};
    static byte Buffer2[4] = {0,0,0,0};
    static byte Select = 0;
    char Key;
    const byte Cursor[4] = {8,9,11,12};

```

```

#####
// แสดงผลการทำงาน
#####
if(Display == true){
    Display = false;

    lcd.blink();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print(" SPEED: ");
    lcd.print(Buffer1);
    lcd.print(" RPM ");

    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(" TIME: ");
    lcd.print(Buffer2[0]);
    lcd.print(Buffer2[1]);
    lcd.write(':');
    lcd.print(Buffer2[2]);
    lcd.print(Buffer2[3]);
    lcd.print(" ");

    lcd.setCursor(0,Select);
    lcd.write('>');

    if(Select==0){
        lcd.setCursor(10,0);
    }else if(Select==1){
        lcd.setCursor(Cursor[Index],1);
    }
}
}

```

```
#####  
// ตรวจสอบการกด Keypad  
#####  
Key = customKeypad.getKey();  
  
if(Key!=NO_KEY){  
    switch(Key){  
  
        case '*':  
  
            SetSpeed = atoi(Buffer1);  
            Serial.print("SetSpeed= ");  
            Serial.println(SetSpeed);  
  
            Hour = Buffer2[0] * 10;  
            Hour += Buffer2[1];  
  
            Minute = Buffer2[2] * 10;  
            Minute += Buffer2[3];  
  
            Second = 0;  
            Serial.print("SetTime= ");  
            Serial.print(Hour);  
            Serial.print(":");  
            Serial.print(Minute);  
            Serial.print(":");  
            Serial.println(Second);
```



```
lcd.noBlink();
SelectMenu();

if(SetSpeed>=100){
    Buffer1[0] = (SetSpeed/100)+'0';
}else{
    Buffer1[0] = ' ';
}

if(SetSpeed>=10){
    Buffer1[1] = ((SetSpeed%100)/10)+'0';
}else{
    Buffer1[1] = ' ';
}

Buffer1[2] = ((SetSpeed%100)%10)+'0';

Buffer2[0] = Hour/10;
Buffer2[1] = Hour%10;
Buffer2[2] = Minute/10;
Buffer2[3] = Minute%10;
Display = true;
break;

case '#': break;

case 'A':
    Index = 2;
    Select = 0;
    Display = true;
```

```
break;

case 'B':
    Index = 0;
    Select = 1;
    Display = true;
break;

case 'C': break;
case 'D': break;

default:
    if(Select==0){
        Buffer1[0] = Buffer1[1];
        Buffer1[1] = Buffer1[2];
        Buffer1[2] = Key;
        if(++Index==3){
            Index = 0;
            Buffer1[0] = ' ';
            Buffer1[1] = ' ';
        }
    }else if(Select==1){
        Buffer2[Index] = Key-'0';
        if(++Index==4){
            Index = 0;
        }
    }
    Display = true;
break;
}
}
```

```

#####
// ตรวจสอบการกดปุ่มเริ่ม
#####
if(digitalRead(BUTTON_START)==0){
  delay(1);
  if(digitalRead(BUTTON_START)==0){
    if(ButtonStart==false){
      ButtonStart = true;

      SetSpeed = atoi(Buffer1);
      Serial.print("SetSpeed= ");
      Serial.println(SetSpeed);

      Hour = Buffer2[0] * 10;
      Hour += Buffer2[1];

      Minute = Buffer2[2] * 10;
      Minute += Buffer2[3];

      Second = 0;
      Serial.print("SetTime= ");
      Serial.print(Hour);
      Serial.print(":");
      Serial.print(Minute);
      Serial.print(":");
      Serial.println(Second);

      Run();

```

```

        Display = true;
    }
}
}else{
    ButtonStart = false;
}
}

/*****
****/
/* FUNCTION : ReadRPM()                                     */
/*****
****/
void ReadRPM (void)
{
    static boolean State = 0;
    static unsigned long StartTime;
    static unsigned long TotalTime;

    if(State == 0){
        StartTime = millis();
        State = 1;
    }else{
        TotalTime = millis() - StartTime;
        if(TotalTime>50){
            Rpm = 60000.0 / TotalTime;
            Input = Rpm;
            State = 0;
        }else{

```

```
    StartTime = millis();
  }
}
Timeout = millis();
}

/*****
****/
/* FUNCTION : Run()                                     */
/*****
****/
void Run (void)
{
  boolean Exit = false;
  byte SelectDisplay = 0;
  byte DisplaySecond = 0;
  unsigned long Time = millis();
  unsigned long ReadPzemTime = millis();
  unsigned long ReadPhTime = millis();
  unsigned long ReadDs18b20Time = millis();
  unsigned long DisplayTime = millis();
  unsigned long SentDataTime = millis();

  digitalWrite(LED_PROCESS,LED_ON);
```

```
Setpoint = SetSpeed;

while(Exit == false){

    if((millis()-Timeout)>3000){
        Rpm = 0;
        Input = 0;
    }

    ControlSpeedMotor();

    if((millis()-Time)>1000){
        Time = millis();

        if(Second==0){
            if(Minute==0){
                if(Hour==0){

                    MotorStop();

                    #####
                    // ส่งเสียงแจ้งเตือนผ่าน Buzzer
                    #####
                    for(byte i=0; i<3; i++){
                        digitalWrite(BUZZER,BUZZER_ON);
                        delay(200);
                        digitalWrite(BUZZER,BUZZER_OFF);
                        delay(200);
                    }
                }
            }
        }
    }
}
```

```
digitalWrite(LED_PROCESS,LED_OFF);
```

```
while(Exit==false){
```

```
#####
```

```
// อ่านค่า PH ทุกๆ 1 วินาที
```

```
#####
```

```
if((millis()-ReadPhTime)>1000){
```

```
    ReadPhTime = millis();
```

```
    Ph = ReadPHSensor();
```

```
}
```

```
#####
```

```
// อ่านค่าอุณหภูมิทุกๆ 1 วินาที
```

```
#####
```

```
if((millis()-ReadDs18b20Time)>1000){
```

```
    ReadDs18b20Time = millis();
```

```
    #ifdef DEBUG_DS18B20
```

```
        Serial.print("Requesting temperatures...");
```

```
    #endif
```

```
    DS18B20.requestTemperatures(); // Send the command to get
    temperatures
```

```
    #ifdef DEBUG_DS18B20
```

```
Serial.println("DONE");
#endif

Temperature = DS18B20.getTempC(insideThermometer);

#ifdef DEBUG_DS18B20
Serial.print("Temperature=");
Serial.println(Temperature);
#endif
}

#####
// แสดงผลข้อมูลที่อ่านได้บนจอ LCD
#####
if((millis()-DisplayTime)>1000){
    DisplayTime = millis();

    lcd.setCursor(0,0);

    lcd.print("PH=");
    if(Ph<10) {lcd.write(' ');}
    lcd.print(Ph,1);
    lcd.print(" T=");

    if(Temperature<10) {lcd.write(' ');}
    lcd.print(Temperature,1);
    lcd.print(" C");

    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Press Start:Exit");
```



```
}

```

```

#####
// เช็การกดปุ่ม Start
#####
if(digitalRead(BUTTON_START)==0){
  delay(1);
  if(digitalRead(BUTTON_START)==0){

    Serial1.write('#');

    Serial1.write(*(int8_t *)&voltage+0);
    Serial1.write(*(int8_t *)&voltage+1);
    Serial1.write(*(int8_t *)&voltage+2);
    Serial1.write(*(int8_t *)&voltage+3);

    Serial1.write(*(int8_t *)&current+0);
    Serial1.write(*(int8_t *)&current+1);
    Serial1.write(*(int8_t *)&current+2);
    Serial1.write(*(int8_t *)&current+3);

    Serial1.write(*(int8_t *)&power+0);
    Serial1.write(*(int8_t *)&power+1);
    Serial1.write(*(int8_t *)&power+2);
    Serial1.write(*(int8_t *)&power+3);

    float Set = SetSpeed;
    Serial1.write(*(int8_t *)&Set+0);
    Serial1.write(*(int8_t *)&Set+1);
    Serial1.write(*(int8_t *)&Set+2);

```

```
Serial1.write(*(int8_t *)&Set+3));
```

```
Serial1.write(*(int8_t *)&Rpm+0));
```

```
Serial1.write(*(int8_t *)&Rpm+1));
```

```
Serial1.write(*(int8_t *)&Rpm+2));
```

```
Serial1.write(*(int8_t *)&Rpm+3));
```

```
Serial1.write(*(int8_t *)&Ph+0));
```

```
Serial1.write(*(int8_t *)&Ph+1));
```

```
Serial1.write(*(int8_t *)&Ph+2));
```

```
Serial1.write(*(int8_t *)&Ph+3));
```

```
Serial1.write(*(int8_t *)&Temperature+0));
```

```
Serial1.write(*(int8_t *)&Temperature+1));
```

```
Serial1.write(*(int8_t *)&Temperature+2));
```

```
Serial1.write(*(int8_t *)&Temperature+3));
```

```
Serial1.write(';');
```

```
Exit = true;
```

```
}
```

```
}
```

```
}
```

พหุบัณฑิต ชีวะ

```
Exit = true;
```

```
}else{
```

```
Hour --;
```

```
}
```

```
Minute = 59;
}else{
    Minute--;
}
Second = 59;
}else{
    Second--;
}

#####
// แสดงผลบนจอ LCD
#####
if(SelectDisplay==0){

    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("  Time  ");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(" ");
    lcd.print(Hour/10);
    lcd.print(Hour%10);
    lcd.write(':');
    lcd.print(Minute/10);
    lcd.print(Minute%10);
    lcd.write(':');
    lcd.print(Second/10);
    lcd.print(Second%10);
    lcd.print(" ");

    if(++DisplaySecond==5){
```

```
    DisplaySecond=0;
    SelectDisplay = 1;
}
}else if(SelectDisplay==1){

    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.write(' ');
    if(voltage<100) {lcd.write(' ');}
    if(voltage<10) {lcd.write(' ');}
    lcd.print(voltage,2);
    lcd.print("V ");

    if(current<10) {lcd.write(' ');}
    lcd.print(current,2);
    lcd.print("A ");

    lcd.setCursor(0,1);
    if(power<1000) {lcd.write(' ');}
    if(power<100) {lcd.write(' ');}
    if(power<10) {lcd.write(' ');}
    lcd.print(power,2);
    lcd.print("W ");

    if(++DisplaySecond==5){
        DisplaySecond=0;
        SelectDisplay = 0;
    }
}
}
```

```
if((millis()-ReadPzemTime)>1000){
  ReadPzemTime = millis();

  #####
  // อ่านแรงดัน
  #####
  voltage = pzem.voltage();

  #ifdef DEBUG_POWER
  if(!isnan(voltage)){
    Serial.print("Voltage: ");
    Serial.print(voltage);
    Serial.println("V");
  }else{
    Serial.println("Error reading voltage");
  }
  #endif

  #####
  // อ่านกระแส
  #####
  current = pzem.current();

  #ifdef DEBUG_POWER
  if(!isnan(current)){
    Serial.print("Current: ");
    Serial.print(current);
    Serial.println("A");
```

```
}else{
  Serial.println("Error reading current");
}
#endif

//#####
// อ่านกำลังวัตต์
//#####
power = pzem.power();

#ifdef DEBUG_POWER
if(!isnan(power)){
  Serial.print("Power: ");
  Serial.print(power);
  Serial.println("W");
}else{
  Serial.println("Error reading power");
}
#endif

//#####
// อ่าน Unit
//#####
energy = pzem.energy();

#ifdef DEBUG_POWER
if(!isnan(energy)){
  Serial.print("energy: ");
  Serial.print(energy);
  Serial.println(" Unit");
}else{
```

```
Serial.println("Error reading unit");
}
#endif
}

if(Exit==false){
  if((millis()-SentDataTime)>2000){
    SentDataTime = millis();

    Serial.println("Send Data");

    Serial1.write('#');

    Serial1.write*((int8_t *)&voltage)+0);
    Serial1.write*((int8_t *)&voltage)+1);
    Serial1.write*((int8_t *)&voltage)+2);
    Serial1.write*((int8_t *)&voltage)+3);

    Serial1.write*((int8_t *)&current)+0);
    Serial1.write*((int8_t *)&current)+1);
    Serial1.write*((int8_t *)&current)+2);
    Serial1.write*((int8_t *)&current)+3);

    Serial1.write*((int8_t *)&power)+0);
    Serial1.write*((int8_t *)&power)+1);
    Serial1.write*((int8_t *)&power)+2);
    Serial1.write*((int8_t *)&power)+3);

    float Set = SetSpeed;
```

```

Serial1.write*((int8_t *)&Set)+0));
Serial1.write*((int8_t *)&Set)+1));
Serial1.write*((int8_t *)&Set)+2));
Serial1.write*((int8_t *)&Set)+3));

Serial1.write*((int8_t *)&Rpm)+0));
Serial1.write*((int8_t *)&Rpm)+1));
Serial1.write*((int8_t *)&Rpm)+2));
Serial1.write*((int8_t *)&Rpm)+3));

Ph = 255;
Serial1.write*((int8_t *)&Ph)+0));
Serial1.write*((int8_t *)&Ph)+1));
Serial1.write*((int8_t *)&Ph)+2));
Serial1.write*((int8_t *)&Ph)+3));

Temperature = 255;
Serial1.write*((int8_t *)&Temperature)+0));
Serial1.write*((int8_t *)&Temperature)+1));
Serial1.write*((int8_t *)&Temperature)+2));
Serial1.write*((int8_t *)&Temperature)+3));

Serial1.write(';');
}
}

#####
// ตรวจสอบการกดปุ่ม STOP
#####
if(digitalRead(BUTTON_STOP)==0){
  delay(1);

```



```

if(digitalRead(BUTTON_STOP)==0){
    digitalWrite(LED_PROCESS,LED_OFF);
    MotorStop();
    Exit = true;
}
}
}
}

/*****
****/
/* FUNCTION : ControlSpeedMotor() */
/*****
****/
void ControlSpeedMotor (void)
{

    /#####
    // คำนำวน PID
    /#####
    if(myPID.Compute()==true){
        MotorRun(Output);

#ifdef DEBUG_PLOTTER
        Serial.print(Setpoint);
        Serial.print(",");

```

```
Serial.println(Input);
#endif

#ifdef DEBUG_PID
Serial.print("SET:"); Serial.print(Setpoint);
Serial.print(" RPM:"); Serial.print(Input);
Serial.print(" OUT:"); Serial.println(Output);
#endif
}
}

/*****
****/
/* FUNCTION : MotorRun() */
/*****
****/
void MotorRun (unsigned int Speed)
{
    unsigned char data[10];

    // กำหนดความเร็วมอเตอร์
    data[0] = MOTOR1_ID;
    data[1] = 0x06;
    data[2] = 0xF0;
    data[3] = 0x0A;
    data[4] = Speed>>8;
```

```

data[5] = Speed;
ModbusSend(6,data);

// สั่งให้มอเตอร์หมุน
data[0] = MOTOR1_ID;
data[1] = 0x06;
data[2] = 0x20;
data[3] = 0x00;
data[4] = 0x00;
data[5] = 0x01;
ModbusSend(6,data);
}

/*****
****/
/* FUNCTION : MotorStop() */
/*****
****/
void MotorStop(void)
{
    unsigned char data[10];

// สั่งให้มอเตอร์ตัวที่ 1 หยุดทำงาน
data[0] = MOTOR1_ID;
data[1] = 0x06;
data[2] = 0x20;
data[3] = 0x00;
data[4] = 0x00;
data[5] = 0x06;

```

```

ModbusSend(6,data);
}

/*****
****/
/* FUNCTION : float ReadPHSensor() */
/*****
****/
float ReadPHSensor(void){

    long phTot;
    float phAvg, temAvg;
    float phVoltage;
    float pHValue;

    /*****
    ##
    // อ่านค่า PH ทั้งหมด 10 ครั้ง แล้วทำการหาค่าเฉลี่ย เก็บไว้ใน PH_Value
    /*****
    ##
    phTot = 0;
    phAvg = 0;

    // อ่านค่า PH ทั้งหมด 10 ครั้ง
    for(byte i=0; i<10; i++){
        phTot += analogRead(A0); // อ่านค่า PH จากอนาล็อกช่องที่ 0 เก็บค่าที่อ่านได้ไว้ใน
    phTot

```

```

    delay(10);
}

// หาค่าเฉลี่ย
phAvg = phTot / 10;

// แปลงเป็นค่าแรงดัน
phVoltage = phAvg * (5.0 / 1023.0);

// แปลงเป็นค่า PH
// = phVoltage * m + C;
pHValue = (phVoltage * (-6.1593)) + 23.745;

#####
##
// แสดงค่า PH ที่อ่านได้ผ่าน Serial Monitor

#####
##
#ifdef DEBUG_PH
Serial.print("phVoltage = ");
Serial.print(phVoltage);
Serial.print(" ");
Serial.print("pH=");
Serial.println(pHValue);
#endif

return(pHValue);
}

```

```

/*****
****/
/* FUNCTION : SelectMenu() */
/*****
****/
void SelectMenu (void)
{
  boolean Display = true;
  boolean Exit = false;
  byte Menu = 0;
  char Key;
  const char MenuTxt[3][17] = {" 1:Save Profile ",
                               " 2:Chose Profile",
                               " 3:Set Network  "};

  while(Exit==false){

    if(Display==true){
      Display = false;
      lcd.setCursor(0,0);
      lcd.print("Select Menu[1-3]");
      lcd.setCursor(0,1);
      lcd.print(MenuTxt[Menu]);
    }

    Key = customKeypad.getKey();

    if(Key!=NO_KEY){

```

```
switch(Key){
```

```
  case '*':
```

```
    switch(Menu){
```

```
      case 0: SaveProfile(); break;
```

```
      case 1: ChoseProfile(); break;
```

```
      case 2: SetNetwork(); break;
```

```
    }
```

```
    Exit = true;
```

```
  break;
```

```
  case '#':
```

```
    Exit = true;
```

```
  break;
```

```
  case 'A':break;
```

```
  case 'B':break;
```

```
  case 'C':break;
```

```
  case 'D':break;
```

```
  default :
```

```
    if(Key>='1'&&Key<='3'){
```

```
      Menu = Key - '1';
```

```
    }
```

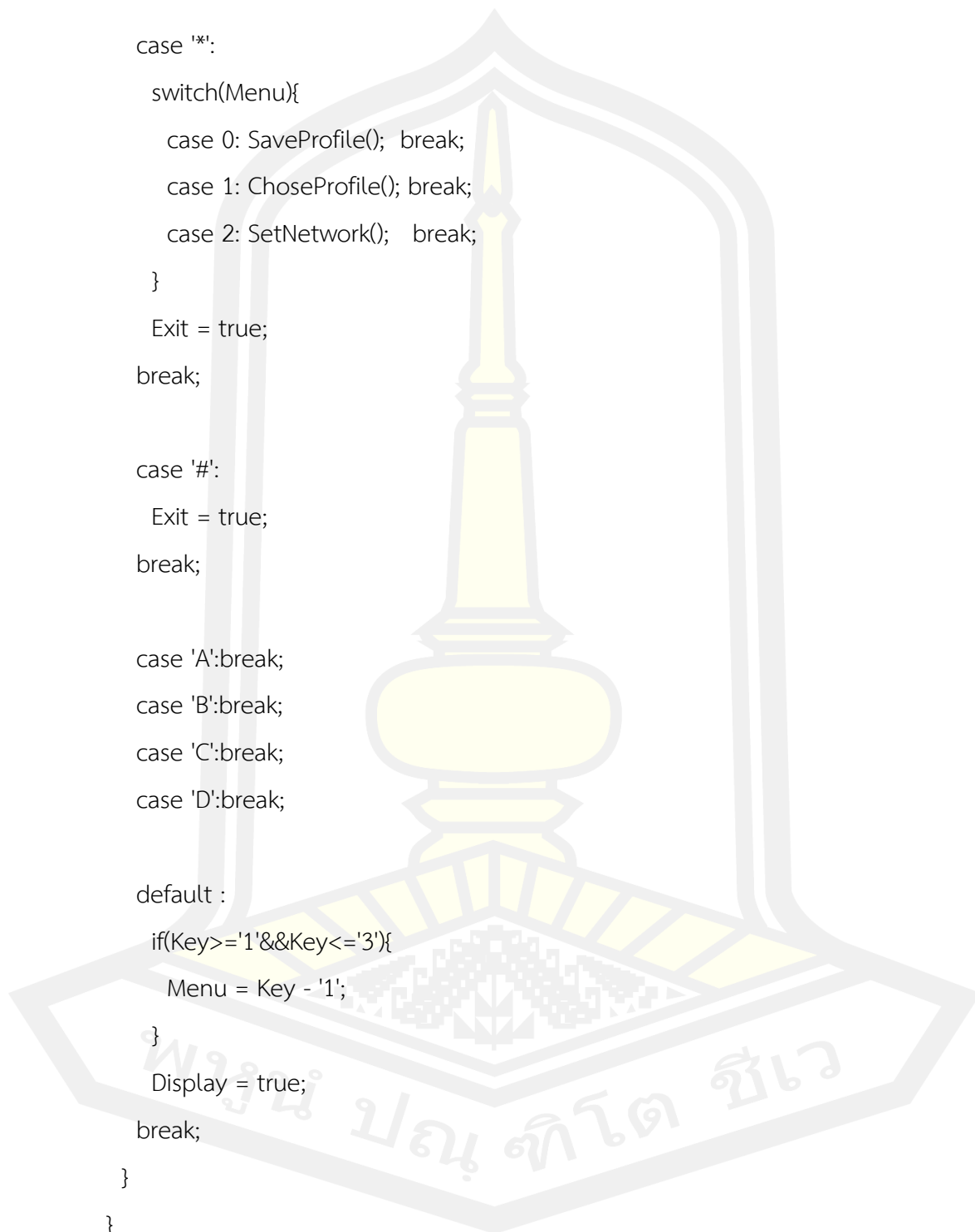
```
    Display = true;
```

```
  break;
```

```
}
```

```
}
```

```
}
```



```

}

/*****
****/
/* FUNCTION : SaveProfile() */
/*****
****/
void SaveProfile (void)
{
    boolean Exit = false;
    boolean Display = true;
    char Key;
    byte Select = 1;
    unsigned int spd;
    byte hr;
    byte mn;

    ReadProfile(Select-1,&spd,&hr,&mn);

    while(Exit==false){

        if(Display==true){
            Display = false;
            lcd.setCursor(0,0);
            lcd.print("Save Profile: ");
            lcd.print(Select);
            lcd.write(' ');

            lcd.setCursor(0,1);
            lcd.print("SPD=");

```



```
if(sp<100) {lcd.write(' ');}
if(sp<10) {lcd.write(' ');}
lcd.print(sp);
lcd.print(" T=");
lcd.print(hr/10);
lcd.print(hr%10);
lcd.write(':');
lcd.print(mn/10);
lcd.print(mn%10);
}

Key = customKeypad.getKey();

if(Key!=NO_KEY){

switch(Key){

case '*':

Serial.print("SetSpeed="); Serial.println(SetSpeed);
Serial.print("Hour="); Serial.println(Hour);
Serial.print("Minute="); Serial.println(Minute);

WriteProfile(Select-1,SetSpeed,Hour,Minute);
Exit = true;
break;

case '#':break;
case 'A':break;
case 'B':break;
case 'C':break;
```



```
while(Exit==false){

    if(Display==true){
        Display = true;
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("Profile[1-9]= ");
        lcd.print(Select);
        lcd.write(' ');
        lcd.setCursor(0,1);
        lcd.print("SPD=");
        if(SetSpeed<100) {lcd.write(' ');}
        if(SetSpeed<10) {lcd.write(' ');}
        lcd.print(SetSpeed);
        lcd.print(" T=");
        lcd.print(Hour/10);
        lcd.print(Hour%10);
        lcd.write(':');
        lcd.print(Minute/10);
        lcd.print(Minute%10);
    }

    Key = customKeypad.getKey();

    if(Key!=NO_KEY){

        switch(Key){

            case '*':
                Exit = true;
                break;
        }
    }
}
```

```

case '#':break;
case 'A':break;
case 'B':break;
case 'C':break;
case 'D':break;

default :
    if(Key>='1' && Key<='9'){
        Select = Key - '0';
        ReadProfile(Select-1,&SetSpeed,&Hour,&Minute);
    }
    Display = true;
    break;
}
}

}
}

/*****
****/
/* FUNCTION : SetNetwork() */
/*****
****/
void SetNetwork (void)
{
    boolean Exit = false;
    char Key;
    unsigned long SendTime = millis();

```

```
unsigned long Timeout = millis();  
boolean ConnectBoard = false;
```

```
lcd.setCursor(0,0);  
lcd.print(" Set Network  ");  
lcd.setCursor(0,1);  
lcd.print("Please wait...  ");
```

```
while((millis()-Timeout)<60000){  
  if((millis()-SendTime)>1000){  
    SendTime = millis();  
    Serial1.write('S');  
  }  
  
  if(Serial1.available()){  
    if(Serial1.read()=='s'){  
      ConnectBoard = true;  
      goto Exit;  
    }  
  }  
}
```

Exit:

```
if(ConnectBoard==true){  
  
  lcd.setCursor(0,0);  
  lcd.print("WIFI: WiFiconfig");  
  lcd.setCursor(0,1);  
  lcd.print(" IP: 192.168.4.1");
```

```

while(Exit == false){
  Key = customKeypad.getKey();
  if(Key!=NO_KEY){
    switch(Key){
      case '*':
        Exit = true;
        break;
      case '#':break;
      case 'A':break;
      case 'B':break;
      case 'C':break;
      case 'D':break;
      default :break;
    }
  }
  Serial1.write('E');

}else{
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print(" Set Network ");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print(" Not Respons! ");
  delay(2000);
}
}

```

```

/*****
****/

```

```

/* FUNCTION : ReadProfile (byte Select, int Speed, byte Hour,byte Minute)
*/
/*****
****/
void ReadProfile (byte Select, int *Speed, byte *Hour,byte *Minute)
{
  unsigned int spd;
  byte hr;
  byte mn;

  EEPROM.get(1+(Select*4),spd);
  hr = EEPROM.read(3 + (Select*4));
  mn = EEPROM.read(4 + (Select*4));

  /*
  Serial.print("spd="); Serial.print(spd);
  Serial.print(" hr="); Serial.print(hr);
  Serial.print(" mn="); Serial.println(mn);
  */

  *Speed = spd;
  *Hour = hr;
  *Minute = mn;
}

/*****
****/
/* FUNCTION : WriteProfile (byte Select, int Speed, byte Hour, byte Minute)
*/

```

```

/*****
****/
void WriteProfile (byte Select, int Speed, byte Hour, byte Minute)
{
  EEPROM.put (1 + (Select*4),Speed);
  EEPROM.write(3 + (Select*4),Hour);
  EEPROM.write(4 + (Select*4),Minute);
}

/*****
****/
/* FUNCTION : ModbusSend (unsigned char data_length,unsigned char *data)
*/
/*****
****/
void ModbusSend (unsigned char data_length,unsigned char *data)
{
  unsigned int crc;
  byte crc_hi;
  byte crc_lo;
  unsigned long Timeout;

  crc = crc_cal_value(data,data_length);
  crc_hi = crc>>8;
  crc_lo = crc&0x00FF;

#ifdef DEBUG_MODBUS
  Serial.print("TX:");

```



```
for(unsigned char i=0; i<data_length; i++){
    Serial.print((byte)data[i],HEX); Serial.write(' ');
}
// crc
Serial.print((byte)crc_lo,HEX); Serial.write(' ');
Serial.print((byte)crc_hi,HEX); Serial.write(' ');
#endif

for(unsigned char i=0; i<data_length; i++){
    Serial2.write((byte)data[i]);
}
Serial2.write((byte)crc_lo);
Serial2.write((byte)crc_hi);

delay(1);
//digitalWrite(RS485_DIR,RX);

#ifdef DEBUG_MODBUS
Serial.println();
Serial.print("RX:");

Timeout = millis();
while((millis()-Timeout)<50){
    if(Serial2.available()){
        Serial.print(Serial3.read(),HEX);
        Serial.write(' ');
    }
}
}
Serial.println("");
#endif
```

```

delay(30);
//digitalWrite(RS485_DIR,TX);
}

/*****
****/
/* FUNCTION : unsigned int crc_cal_value(unsigned char *data_value,unsigned char
data_length) */
/*****
****/
unsigned int crc_cal_value(unsigned char *data_value,unsigned char data_length)
{
int i;
unsigned int crc_value=0xFFFF;
while(data_length--){
crc_value^=*data_value++;
for(i=0;i<8;i++){
if(crc_value&0x0001)
crc_value = (crc_value>>1)^0xa001;
else
crc_value=crc_value>>1;
}
}
return(crc_value);
}

```

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	ปาริมา ผุยแสงพันธ์
วันเกิด	26 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2541
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลเลย
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	หอพักเคเคโสม 226/95 หมู่6 ซอยประชาสโมสร40 ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	วิศวกรวิจัยและพัฒนา
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัท ออล อินฟอร์มเมชั่น เทคโนโลยีส์ จำกัด 512 หมู่ 11 ตำบลศิลา อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2559 มัธยมปลาย โรงเรียนเลยพิทยาคม พ.ศ.2563 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (ว.ศ.บ.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ.2564 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (ว.ศ.ม.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ทุนวิจัย	โครงการสร้างขีดความสามารถในการทำนวัตกรรมของภาคอุตสาหกรรมเพื่อยกระดับความสามารถการแข่งขันของประเทศโดยการพัฒนากำลังคนระดับสูง จากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (TITE)

พหุ อนุ ภิ โต ชี เว