การใช้โปรแกรมแมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมการผลิตข้าวกล้องงอก

THE USING PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER: PRODUCTION OF GERMINATED BROWN RICE

กิตติพัฒน์ ฉันทศิลป
นันทิชา อ่วมบุญมี

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมการผลิตข้าวกล้องงอก

THE USING PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER: PRODUCTION OF GERMINATED BROWN RICE

กิตติพัฒน์ ฉันทศิลป์

นันทิชา อ่วมบุญมี

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE USING PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER: PRODUCTION OF GERMINATED BROWN RICE

KITTIPAT CHANTASILP

NUNTICHA UOMBOONMEE

THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BECHELOR OF FOOD ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KINGMONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมการผลิตข้าวกล้องงอก
THE USING PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER: PRODUCTION OF GERMINATED BROWN RICE

ผู้จัดทำ

1. นายกิตติพัฒน์ ฉันทศิลป รหัสประจำตัว 56010092
2. นางสาวนันทิชา อ่วมบุญมี รหัสประจำตัว 56010673

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.เอกพงษ์ ชีวิตโสภณ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงาน	การใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมการผลิตข้าวกล้องงอก	
นักศึกษา	นายกิตติพัฒน์ ฉันทศิลป	รหัสนักศึกษา 56010092
	นางสาวนันทิชา อ่วมบุญมี	รหัสนักศึกษา 56010673
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.เอกพงษ์ ชีวิตโสภณ	
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
ภาควิชา	วิศวกรรมอาหาร	
ปีการศึกษา	2559	

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (PLC) ในการผลิตข้าวกล้องงอก ซึ่งโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์สามารถควบคุมอุปกรณ์ของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก ให้ทำงานตามสภาวะกระบวนการ เพื่อเพิ่มปริมาณสารกาบาในระหว่างกระบวนการงอกของข้าวกล้อง ได้แก่ สภาวะของการแช่น้ำ (อุณหภูมิของน้ำ และเวลาของการแช่น้ำ) และสภาวะของการบ่ม (อุณหภูมิของอากาศ เวลาของการบ่ม และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ) เครื่องเพาะข้าวกล้องงอกประกอบด้วย 6 ส่วนหลัก ได้แก่ ห้องเพาะ ปั๊มน้ำ ถังน้ำ ฮีตเตอร์ วาล์วควบคุมการไหลของน้ำ และตู้ควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ ทำการทดลองเพาะข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ด้วยการใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก และบันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศ และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศตลอดกระบวนการงอก ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิของน้ำและอากาศ และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ค่อนข้างคงที่ตลอดกระบวนการงอก ข้าวกล้องงอกที่ได้จากการปฏิบัติตามวิธีห้องปฏิบัติการและการใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก มีอัตราการงอกเป็นร้อยละ 80.76 ± 7.33 และ 82.32 ± 3.50 ตามลำดับ มีค่าความแข็ง 93.94 ± 10.03 และ 90.17 ± 6.45 ตามลำดับ ค่าความเหนียว 13.52 ± 2.24 และ 12.18 ± 2.13 ตามลำดับ ซึ่งจากการวิเคราะห์ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ และมีปริมาณสารกาบาเฉลี่ย 2.89 และ 2.46 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมข้าวกล้องงอก ตามลำดับ และข้าวกล้องงอกที่ได้จากการใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทางานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก มีปริมาณจุลินทรีย์น้อยกว่าข้าวกล้องงอกที่ได้จากกระบวนการผลิตด้วยการปฏิบัติตามวิธีห้องปฏิบัติการประมาณ 3 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	The Using Programmable Logic Controller: Production of Germinated Brown Rice		
By	Mr. Kittipat	Chantasilp	Student ID 56010092
	Ms. Nunticha	Uomboonmee	Student ID 56010673
Thesis for	Bechelor's Degree of Food engineering Department of Food engineering Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		
Year	2016		
Advisor	Dr. Ekkapong Cheevitsopon		

Abstract

The objective of this research was to apply programmable logic controller (PLC) for production of germinated brown rice. The PLC can control all equipment of the Germinated Brown Rice machine for maintain the process parameters to increase gamma aminobutyric acid (GABA) content in germinated brown rice such as soaking condition (soaking temperature and time) and incubation condition (incubation temperature, time, and relative humidity). This machine consists of 6 main components include that room incubation, pump, heater, flow control valve and PLC control system. During germination, the brown rice (KDML 105) was conducted by PLC. The soaking temperature, incubation temperature, and relative humidity were also recorded. The results showed that the soaking temperature, incubation temperature, and relative humidity were almost constant during germination process. The germination rate of brown rice conducted by laboratory method and PLC were 80.76 ± 7.33 and 82.32 ± 3.50, respectively. The hardness were 93.94 ± 10.03 and 90.17 ± 6.45 respectively. The stickiness were 13.52 ± 2.24 and 12.18 ± 2.13, respectively. There were no statistically significant differences. The average GABA content was 2.89 and 2.46 mg/100 g of germinated brown rice, respectively. Germinated brown rice produced by PLC has less microorganism content approximately 3 times, when comparing with the laboratory method.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีโดยความกรุณาและความอนุเคราะห์จากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.เอกพงษ์ ชีวิติโสภณ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำ และชี้แนะแนวทางในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ตลอดมา

ขอขอบคุณ คณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ประสิทธิประสาทวิชาความรู้จนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

ขอขอบคุณ คุณอำนาจ คูตะคุ คุณวราภรณ์ มาไพศาลทรัพย์ และคุณบุญนำ ผลโพธิ์ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สุดท้ายขอขอบคุณ บิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่ให้การอุปการะในด้านการศึกษาและให้กำลังใจ กำลังทรัพย์ ความห่วงใยและการสนับสนุนเป็นอย่างดีเสมอมา

คณะผู้วิจัย
กิตติพัฒน์ ฉันทศิลป
นันทิชา อ่วมบุญมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ตรวจเอกสาร	3
2.1 ข้าว	3
2.2 ข้าวกล้องงอก	3
2.3 โปรแกรมเมเบิลโลจิกคอนโทรลเลอร์	4
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.5 หลักการพื้นฐานของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล	10
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	28
3.1 การทดลองเบื้องต้น	28
3.2 การออกแบบระบบควบคุมเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกแบบต่อเนื่องด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์	31
3.3 การทดสอบสมรรถนะของการใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก	38
3.4 การทดสอบคุณภาพของข้าวกล้องงอก	39
3.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ	41
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	42
4.1 ผลการทดลองเบื้องต้น	42
4.2 ระบบควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์	43
4.3 ผลการทดสอบสมรรถนะของการใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก	48
4.4 ผลการทดสอบคุณภาพของข้าวกล้องงอก	54
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	57
5.1 สรุปผลการทดลอง	57
5.2 ข้อเสนอแนะ	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	58
ภาคผนวก	58
ภาคผนวก ก โปรแกรมคำสั่งควบคุมโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์	61
ภาคผนวก ข ข้อมูลดิบ	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	การทำงานของ PLC	4
2.2	สัญลักษณ์ตามมาตรฐานของ Ladder Diagram	5
2.3	สัญลักษณ์ตามมาตรฐานของ Function Block	5
2.4	ถังแช่ข้าวเปลือก	9
2.5	ระบบเพาะงอกข้าวมอลต์	10
2.6	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ	11
2.7	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	11
2.8	ฮีตเตอร์แท่ง	12
2.9	ฮีตเตอร์แผ่น	12
2.10	ฮีตเตอร์รัดท่อ	13
2.11	ฮีตเตอร์อินฟราเรด	13
2.12	ฮีตเตอร์ครีบและฮีตเตอร์ท่อกลม	13
2.13	ฮีตเตอร์บอบบิ้น	14
2.14	ฮีตเตอร์เส้นหรือฮีตเตอร์สายไฟ	14
2.15	ฮีตเตอร์ต้มน้ำ	14
2.16	อุปกรณ์รีเลย์	15
2.17	จุดมาตรฐานภายในรีเลย์	16
2.18	แสดงอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ	16
2.19	การควบคุมแบบ ON-OFF Control	17
2.20	กราฟของการควบคุมในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปร P, I และ D	17
2.21	เครื่องสูบแบบโรตารี	18
2.22	เครื่องสูบแบบชัก	19
2.23	เครื่องสูบแบบใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์	19
2.24	Moody Diagram	22
2.25	กราฟคุณลักษณะ (กราฟเฮด หรือกราฟ H-Q) ของปม	23
2.26	จุดทำงานของปั๊มคือจุดตัดของกราฟเฮดของระบบ และกราฟเฮดของปั๊ม	23
2.27	แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานแบบต่าง ๆ	24
2.28	อุปกรณ์ Solid state Relay	27
2.29	องค์ประกอบและวงจรพื้นฐานของ Solid state Relay แบบ Non Zero Crossing Type	27
2.30	องค์ประกอบและวงจรพื้นฐานของ Solid state Relay แบบ Zero Crossing Type	27
3.1	เครื่องกะเทาะข้าวเปลือก	29
3.2	เครื่องคัดขนาดเมล็ดข้าว	30
3.3	อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ	30
3.4	แช่ข้าวกล้องในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ	30
3.5	กระบวนการผลิตข้าวกล้องงอกด้วยวิธีห้องปฏิบัติการ	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.6	ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการล้าง	31
3.7	ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการแช่	32
3.8	ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการบ่ม	32
3.9	ส่วนประกอบของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์	33
3.10	เครื่องเพาะข้าวกล้องงอกแบบต่อเนื่องควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์	33
3.11	ห้องเพาะของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก	34
3.12	ถาดบรรจุข้าวกล้อง	35
3.13	ตู้ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกตามคำสั่งของโปรแกรมเมเบิลลอจิก - คอนโทรลเลอร์	35
3.14	โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ รุ่น Omron CP1L	36
3.15	แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 24 โวลต์	36
3. 16	กระบวนการเพาะข้าวกล้องงอกของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกควบคุมด้วยโปรแกรมเม - เบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์	37
3.17	มิเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้วัดปริมาณไฟฟ้า	39
3.18	กระบวนการทดสอบเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องงอก	40
3.19	เครื่อง Texture Analyzer	41
4.1	ข้าวกล้องเริ่มต้น	42
4.2	ข้าวกล้องหลังผ่านการแช่น้ำเป็นเวลา 4 ชั่วโมง	42
4.3	ข้าวกล้องงอก หลังผ่านกระบวนการบ่มเป็นเวลา 20 ชั่วโมง	42
4.4	ชุดควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์	43
4.5	หลักการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก	44
4.6	โปรแกรมคำสั่งควบคุมกระบวนการล้าง	44
4.7	โปรแกรมคำสั่งควบคุมกระบวนการแช่	45
4.8	โปรแกรมคำสั่งควบคุมกระบวนการบ่ม	46
4.9	หัวพ่นละอองน้ำภายในห้องเพาะ	49
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเพาะกับเวลา	50
4.11	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศ และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ในห้องเพาะ กรณีที่ไม่มีตัวอย่างข้าวกล้อง	51
4.12	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศ และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ในห้องเพาะ กรณีที่มีตัวอย่างข้าวกล้อง	52
4.13	ลักษณะทางกายภาพของข้าวกล้องงอกจากการเพาะด้วยการปฏิบัติตามวิธีห้องปฏิบัติการ	53
4.14	ลักษณะทางกายภาพของข้าวกล้องงอกจากการเพาะด้วยการใช้ โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก	53
4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลา ของค่าความแข็ง และความเหนียว	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงกระบวนการที่เหมาะสมในการเพาะข้าวกล้องงอก	8
2.2	ข้อดี-ข้อเสียของเครื่องคุมแต่ละประเภท	18
2.3	แสดงคุณสมบัติและลักษณะของเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานแต่ละชนิด	24
2.4	แสดงส่วนประกอบของเหล็กกล้าไร้สนิม	26
4.1	ผลการทดลองหาอัตราการไหลของน้ำเข้าห้องเพาะ, การระบายน้ำออกจากห้องเพาะและการพ่นละอองน้ำ	49
4.2	สรุปผลการทดลองสภาวะภายในห้องเพาะของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก	52
4.3	อัตราการงอกของข้าวกล้องจากวิธีการเพาะ 2 วิธี	53
4.4	ปริมาณสารกาบาในข้าวกล้องงอก	54
4.5	ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดของข้าวกล้องงอกที่ได้จากการเพาะ 2 วิธี	55
4.6	ค่าความแข็งและความเหนียวของข้าวกล้องงอกหุงสุก	56
ข.1	อัตราการไหลของน้ำเข้าห้องเพาะ อัตราการระบายน้ำออกจากห้องเพาะและอัตราการพ่นละอองน้ำ	70
ข.2	ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเพาะ	70
ข.3.1	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศ และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเพาะ กรณีที่ไม่มีตัวอย่างข้าวกล้อง จากการทดลองครั้งที่ 1	72
ข.3.2	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศ และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเพาะ กรณีที่ไม่มีตัวอย่างข้าวกล้อง จากการทดลองครั้งที่ 2	74
ข.3.3	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศ และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเพาะ กรณีที่ไม่มีตัวอย่างข้าวกล้อง จากการทดลองครั้งที่ 3	76
ข.4.1	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศ และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเพาะ กรณีที่มีตัวอย่างข้าวกล้อง จากการทดลองครั้งที่ 1	78
ข.4.2	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศ และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเพาะ กรณีที่มีตัวอย่างข้าวกล้อง จากการทดลองครั้งที่ 2	80
ข.4.3	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศ และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเพาะ กรณีที่มีตัวอย่างข้าวกล้อง จากการทดลองครั้งที่ 3	82
ข.5	อัตราการงอกของข้าวกล้อง	84
ข.6	ค่าความแข็งและความเหนียวของข้าวกล้องงอกหุงสุก	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ข้าว (*Oryza sativa* L.) เป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรต และเป็นอาหารหลักที่สำคัญของประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2557 ประเทศไทยมีการส่งออกข้าวถึง 10.9 ล้านตัน ซึ่งเป็นอันดับ1ของโลก คิดเป็นมูลค่ากว่า 174 ล้านบาท และมีแนวโน้มที่จะส่งออกสูงขึ้นเรื่อยๆ (สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย, 2557) ซึ่งในเมล็ดข้าวแต่ละเมล็ดมีวิตามินแร่ธาตุ และสารอาหารที่สำคัญมากกว่า 20 ชนิดโดยคนไทย และชาวต่างชาตินิยมรับประทานข้าวในรูปแบบที่เป็นข้าวขาว ซึ่งผ่านกรรมวิธีสีเอาเปลือกข้าว และจมูกข้าวออกไป โดยจะแตกต่างกับข้าวกล้องที่ผ่านการขัดสีเพียงน้อยครั้งทำให้ยังมีจมูกข้าว และเยื่อหุ้มเมล็ดข้าว (รำข้าว) ซึ่งจมูกข้าว และเยื่อหุ้มเมล็ดข้าวนี้มีคุณค่าอาหารที่มีประโยชน์มาก ที่ประกอบด้วยโปรตีน ไขมัน แร่ธาตุ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส มีสรรพคุณในการช่วยเสริมสร้างพลังงาน ป้องกันสารต้านอนุมูลอิสระ ลดคอเลสเตอรอล ลดความเสี่ยงต่อการเป็นเบาหวาน บำรุงหัวใจ และหลอดเลือดหัวใจ หอบหืด เสริมสร้างกระดูกให้แข็งแรง ต้านมะเร็ง และป้องกันนิ่วในถุงน้ำดี

ในปัจจุบันข้าวกล้องเป็นที่นิยมมากขึ้นสำหรับคนรักสุขภาพเพราะมีคุณประโยชน์มาก และยังพบว่าข้าวกล้องที่เกิดการงอกจะมีประโยชน์มากยิ่งขึ้นเนื่องจากข้าวกล้องงอกมีปริมาณวิตามินบี 1 และสารกาบา (Gamma amino butyric acid, GABA) สูง ซึ่งสารกาบานี้เกิดจากกระบวนการ Decarboxylation โดยมีความสำคัญในการทำหน้าที่เป็นสารสื่อประสาท (Neurotransmitter) ในระบบประสาทส่วนกลาง และเป็นสารสื่อประสาทประเภทสารยับยั้ง (Inhibitor) จะทำหน้าที่รักษาสมดุลในสมองที่ได้รับการกระตุ้น ช่วยทำให้สมองผ่อนคลาย และนอนหลับสบาย อีกทั้งยังทำหน้าที่ช่วยกระตุ้นต่อมไร้ท่อ (Anterior pituitary) ที่ผลิตฮอร์โมนเพื่อช่วยในการเจริญเติบโต (HGH) ทำให้เกิดการสร้างเนื้อเยื่อ และเกิดสาร lipotropic ป้องกันการสะสมไขมัน (บุษยา และรัตนสุภา, 2009) ซึ่งการเพาะข้าวกล้องงอกนั้นจะต้องนำข้าวกล้องที่ผ่านการสีนำมาแช่น้ำเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และบ่มเป็นเวลา 20 ชั่วโมง โดยจะมีการล้างเพื่อลดปริมาณจุลินทรีย์ทุก ๆ 4 ชั่วโมง และควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลาในการเพาะข้าวกล้องงอก ซึ่งทำให้การควบคุมระยะเวลา และอุณหภูมิได้ยาก ทำให้ผู้ผลิตข้าวกล้องงอกตลอดระยะเวลา 24 ชั่วโมงเกิดความยากลำบาก และความเหนื่อยล้าในการเพาะข้าวกล้องงอก

โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (PLC) เป็นอุปกรณ์ที่คิดค้นขึ้นมาเพื่อควบคุมการทำงานของเครื่องจักรต่างในอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยแทนวงจรรีเลย์แบบเก่าที่มีความยุ่งยาก ซับซ้อน ซึ่งโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ จะสามารถใช้คำสั่งผ่าน Ladder diagram โดยสามารถทำการแก้ไข ปรับเปลี่ยนข้อมูล หรือติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มได้ง่าย และทำให้การทำงานของอุปกรณ์ภายในเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกเป็นไปอย่างต่อเนื่อง

ด้วยเหตุนี้คณะวิจัยมีแนวคิดที่จะสร้างเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกแบบอัตโนมัติโดยใช้ชุดควบคุมโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมระยะเวลา อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก ได้แก่ โซลินอยด์วาวล์ ปั๊มน้ำ มอเตอร์ ฮีตเตอร์ ให้การทำงานเป็นไปอย่างราบรื่นทำให้เครื่องเพาะข้าวกล้องงอกมีสมรรถนะสูงสุด อีกทั้งยังลดการใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงงานคนในการเพาะข้าวกล้องงอก โดยการสร้างเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกอัตโนมัตินี้ยังสามารถพัฒนาในเชิงอุตสาหกรรม และนำไปประยุกต์ใช้กับการเพาะเมล็ดพืชชนิดอื่นได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบระบบควบคุมเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์

1.2.2 เพื่อทดสอบสมรรถนะของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกและคุณภาพของข้าวกล้องงอก

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 พันธุ์ข้าวที่ใช้คือข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105)

1.3.2 ใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก ได้แก่ โซลินอยด์วาวล์ ปั๊มน้ำ มอเตอร์ และฮีตเตอร์

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เครื่องเพาะข้าวกล้องงอกที่สามารถควบคุมสภาวะตามกระบวนการเพาะงอกได้

1.4.2 ข้าวกล้องงอกที่มีคุณภาพจากเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก

1.4.3 นำไปประยุกต์ใช้กับการเพาะเมล็ดพืชชนิดอื่นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ตรวจเอกสาร

การออกแบบระบบโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมเวลา อุณหภูมิ และความชื้นสัมพันธ์ในอากาศของเครื่องเพราะข้าวกล้องงอกแบบอัตโนมัติ จำเป็นต้องมีการศึกษาสมบัติของข้าว งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง อุปกรณ์ต่าง ๆ ในเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก ซึ่งสามารถรวบรวมข้อมูลได้ดังต่อไปนี้

2.1 ข้าว (Rice)

ข้าว เป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรต และเป็นอาหารหลักที่สำคัญของประเทศไทย เป็นเมล็ดพืชจำพวกหญ้า เมล็ดข้าวที่เอาเปลือกออกแล้วสามารถนำไปทำให้สุก โดยการต้ม หรือนึ่งเพื่อรับประทานเป็นอาหาร (บุษยา, 2009) ซึ่งเมล็ดข้าวที่มีคุณภาพแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ สมบัติของเมล็ดทางกายภาพ และสมบัติของเมล็ดทางเคมี (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน)

1) สมบัติของเมล็ดทางกายภาพ คือ ลักษณะที่เกี่ยวข้องกับความยาว ความกว้าง และความหนาของเมล็ดข้าวกล้อง ซึ่งคุณภาพในการสีเป็นข้าวสารถือว่า เป็นคุณภาพทางกายภาพของเมล็ด โดยเมล็ดที่ได้มาตรฐานนั้น เมล็ดข้าวกล้องจะต้องมีความยาวประมาณ 7 - 7.5 มิลลิเมตร ความกว้างและความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร และมีหน้าตัดของเมล็ดค่อนข้างกลม

2) สมบัติของเมล็ดทางเคมี คือ ลักษณะขององค์ประกอบของแป้งในเมล็ดข้าวกล้อง ข้าวเหนียว และข้าวเจ้า โดยจะมีชนิดของแป้งที่แตกต่างกันซึ่งรวมกันเป็นเอ็นโดสเปิร์ม เมล็ดข้าวเหนียวประกอบด้วยแป้งชนิดอะมิโลเพกทินเป็นส่วนใหญ่ และมีแป้งอะมิโลสน้อยมาก ประมาณ 5 - 7 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเมล็ดข้าวเจ้าประกอบด้วย แป้งชนิดอะมิโลส ประมาณ 15 - 30 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาณของอะมิโลสในเมล็ดข้าวเจ้าประเภทอินดิกา และจาปอนิกา จะแตกต่างกัน โดยข้าวประเภทอินดิคามีแป้งอะมิโลสอยู่ในช่วง 20 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ส่วนข้าวประเภทจาปอนิกาสอยู่ในช่วง 15 - 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งข้าวไทยที่มีเปอร์เซ็นต์ของแป้งอะมิโลสต่ำ ได้แก่ ข้าวขาวดอกมะลิ 105

2.2 ข้าวกล้องงอก (Germinated brown rice)

ข้าวกล้องงอก หมายถึง ผลผลิตของข้าวที่ผ่านกระบวนการทำให้งอก โดยแช่ข้าวกล้องในน้ำและบ่มจนเกิดราก มีความยาวประมาณ 0.5 - 1 มิลลิเมตร แล้วนำไปผ่านความร้อน หรือลดความชื้นเพื่อทำให้แห้ง โดยมีนิยามดังนี้ (มกษ., 2555)

2.2.1 ข้าวกล้องงอกเต็มเมล็ด (Whole germinated kernel) หมายถึง ข้าวกล้องงอกซึ่งอยู่ในสภาพเต็มเมล็ดที่ไม่มีส่วนใดหัก

2.2.2 เมล็ดที่มีสีผิดปกติ หมายถึง ข้าวกล้องงอกที่มีสีผิดปกติไปจากพันธุ์ข้าวที่ใช้

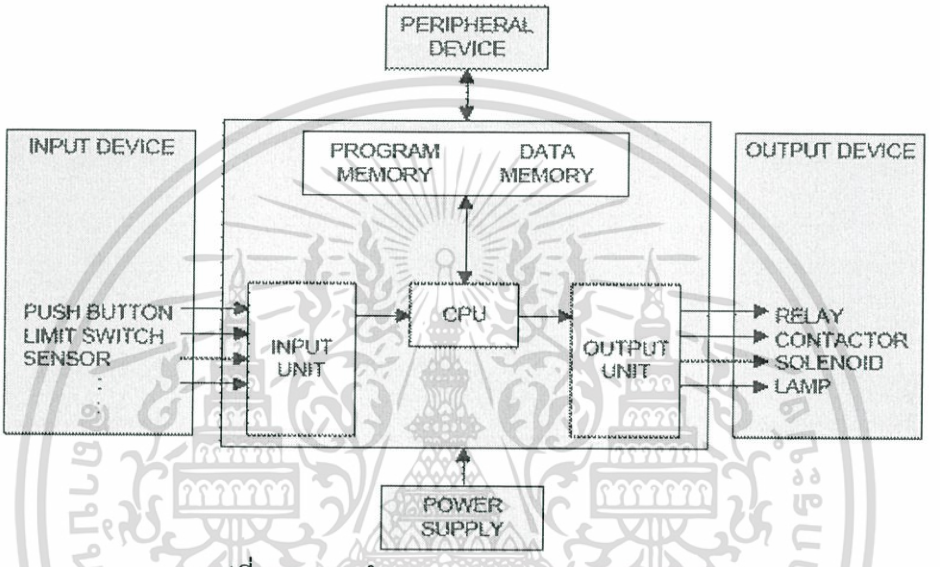
2.2.3 เมล็ดเสีย (Damaged kernel) หมายถึง เมล็ดข้าวกล้องงอกที่เสียอย่างเห็นได้ชัดเจนด้วยตาเปล่า ซึ่งเกิดจากความชื้น ความร้อน เชื้อรา แมลง หรืออื่น ๆ

2.2.4 เมล็ดแตกหัก หมายถึง เมล็ดข้าวกล้องงอกที่หัก ความยาวตั้งแต่ 5 ส่วนขึ้นไป (เมื่อแบ่งข้าวทั้งเมล็ด ออกเป็น 10 ส่วน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์

PLC (Programmable logic controller) เป็นอุปกรณ์ที่คิดค้นขึ้นมาเพื่อควบคุมการทำงานของเครื่องจักรในอุตสาหกรรม (Iriondo et al., 2012)โดยสามารถทดแทนระบบควบคุมแบบเก่าที่มีความยุ่งยาก และเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมอาหาร PLC มีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน ได้แก่ ภาครับสัญญาณ และภาคส่งสัญญาณ โดยภาครับสัญญาณจะทำหน้าที่เป็นตัวรับค่าต่าง ๆ เช่น สวิตช์ลิมิตสวิตช์ และเซนเซอร์ โดยจะนำข้อมูลส่งต่อให้ CPU เพื่อประมวลผลคำสั่งที่เราตั้งไว้ และสุดท้าย CPU จะส่งสัญญาณให้ภาคส่งสัญญาณต่อไป (ดังรูปที่ 2.1)



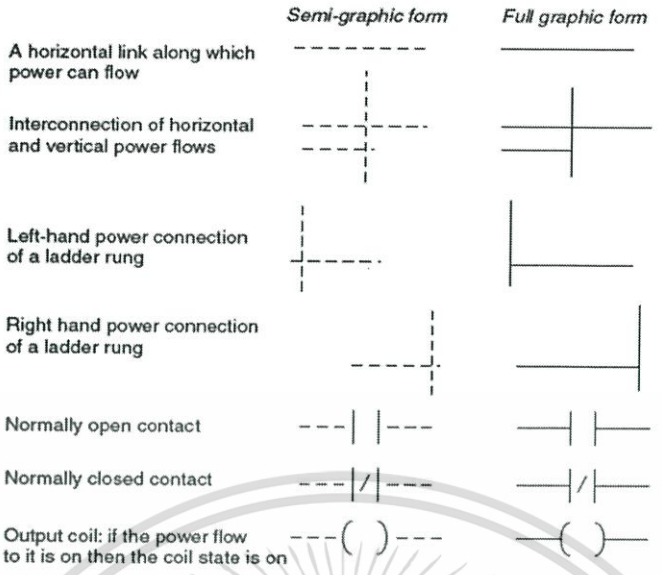
รูปที่ 2.1 การทำงานของ PLC (MORO, 2015)

มาตรฐาน IEC 61131-3 เป็นมาตรฐานของภาษาในการควบคุม PLC ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 5 ภาษาดังนี้ 1) Ladder Diagram (LD), 2) Function Block Diagram (FBD), 3) Structured Text (ST), 4) Sequential Function Chart (SFC) และ 5) Instruction List (IL) โดยส่วนใหญ่การเขียนภาษาของ PLC จะนิยมใช้ภาษา Ladder Diagram และ Function Block Diagram (Milik, 2013)

2.3.1 Ladder Diagram

Ladder Diagram เป็นพื้นฐานในการแก้ปัญหาต่างๆที่เรากำหนดไว้ จัดเป็นสัญลักษณ์ที่สามารถดูตามโครงสร้างแล้วเข้าใจการทำงาน เวลาที่ PLC ทำงานจะอาศัยชุดคำสั่ง (Instruction) ทำงานโดยวิธีการเขียนลงในหน่วยความจำ ข้อมูลในหน่วยความจำนั้นจะจัดเก็บเป็นรหัส (Code) ไม่สามารถจัดเก็บในลักษณะของ Ladder Diagram ได้โดยตรง ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์ตามมาตรฐาน (ดังรูปที่ 2.2)

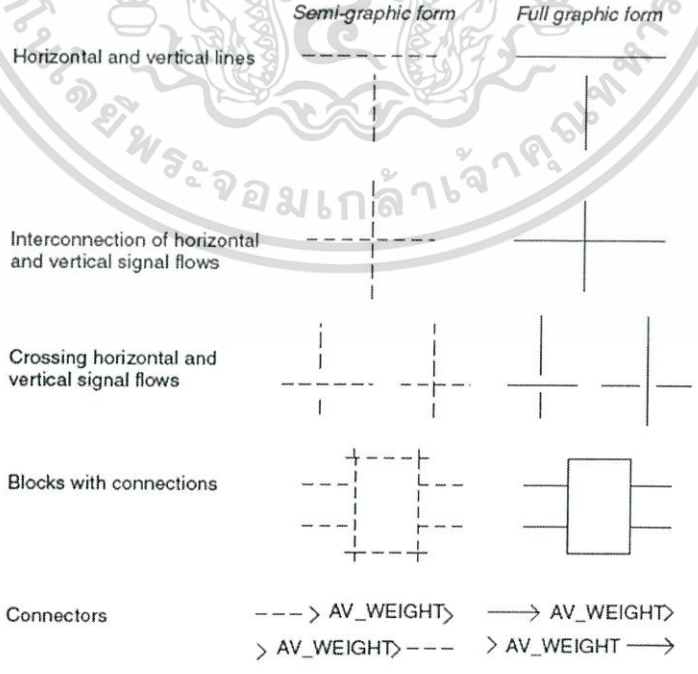
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 สัญลักษณ์ตามมาตรฐานของ Ladder Diagram (Bolton, 2006)

2.3.2 Function Block Diagram

Function Block Diagram เป็นภาษามาตรฐานที่ใช้สำหรับเขียนในโปรแกรม PLC โดยนำบล็อคคำสั่งหลาย ๆ อันมาเชื่อมต่อกันด้วยเส้น (Line) ลงบนแผ่นงาน (Sheet) คล้ายลอจิกไดอะแกรม Function Block จึงเหมาะกับระบบที่ทำงานต่อเนื่องกัน โดย Function Block ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ อินพุต และเอาท์พุต โดยโปรแกรมจะทำการสั่งงานข้อมูลอินพุตจากอุปกรณ์ไปยัง Function Block เพื่อประมวลผล โดยมีสัญลักษณ์ตามมาตรฐาน (ดังรูปที่ 2.3)



รูปที่ 2.3 สัญลักษณ์ตามมาตรฐานของ Function Block (Bolton, 2006)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 กระบวนการเพาะข้าวกล้องงอก

Komatsuzaki et. al. (2007) ศึกษาผลของการแช่ และทำการพ่นละอองน้ำที่มีต่อปริมาณสารกาบาในข้าวกล้องงอก โดยใช้ข้าว 5 พันธุ์ นำไปแช่น้ำอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง โดยเก็บตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ ใส่กล่องซึ่งควบคุมอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ทำการบ่มเป็นเวลา 23.5, 23, 22, 21, 20 และ19 ชั่วโมงตามลำดับ โดยกล่องที่ไม่มีการถ่ายเทอากาศ พบว่าจะมีการแช่ข้าวเป็นเวลา 3 ชั่วโมงแล้วทำการบ่มต่ออีก 21 ชั่วโมง โดยมีปริมาณสารกาบามากที่สุด คือ 24.9 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมข้าวกล้องงอก

วัฒนา และคณะ (2007) สนใจเกี่ยวกับผลของความเป็นกรด ด่าง อุณหภูมิ และเวลาการแช่ข้าวต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก โดยใช้ข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และชัยนาท 1 นำมาแช่น้ำที่ค่าความเป็นกรด ด่าง ที่ 3, 4, 6, และ 8 อุณหภูมิ 25, 35 และ 45 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 และ 24 ชั่วโมง พบว่าสภาวะที่ทำให้ข้าวกล้องงอกทั้ง 2 พันธุ์ มีปริมาณสารกาบามากที่สุด คือ การแช่น้ำที่ความเป็นกรด ด่างเท่ากับ 6 อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และใช้เวลาการแช่ 24 ชั่วโมง โดยข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และชัยนาท 1 มีปริมาณสารกาบา 16.50 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมข้าวกล้องงอก และ 14.51 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมข้าวกล้องงอกตามลำดับ

Charoenthaikij et. al. (2009) ทำการศึกษาหาสภาวะต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้องงอก โดยใช้ข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ทดสอบที่ค่าความเป็นกรด ด่าง 4 สภาวะ เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง พบว่าการแช่ข้าวที่ความเป็นกรด ด่างเท่ากับ 3 อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง มีสารกาบามากที่สุด 67 มิลลิกรัมต่อ100 กรัมข้าวกล้องงอก ซึ่งหลังจากนั้นปริมาณสารกาบาจะลดลง

ยุพกนิษฐ์ และ วาสนา (2553) ทำการทดลองนำข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แบบกะเทาะเปลือก และไม่กะเทาะเปลือกแช่ในสารละลายโซเดียมอะซีเตตบัฟเฟอร์ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิโมล มีค่าความเป็นกรด ด่างเท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 0 ถึง 24 ชั่วโมง จากนั้นเพาะตัวอย่างที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 90 เปอร์เซ็นต์ ในที่มืด เป็นเวลา 0 ถึง 84 ชั่วโมง พบว่าชั่วโมงที่ 48 มีกาบาสูงที่สุดเท่ากับ 22.83 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมข้าวกล้องงอก และ 19.75 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมข้าวกล้องงอกในข้าวที่กะเทาะเปลือกและไม่กะเทาะเปลือกตามลำดับ

อธิป (2554) ได้วิจัยเรื่องการเพิ่มสารกาบาในข้าวกล้องงอกด้วยกรดกลูตามิก ในข้าวปทุมธานี 1 และข้าวเหนียว กข 6 ทดลองที่สภาวะความเป็นกรด ด่าง 4, 5 และ 6 อุณหภูมิ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของกรดกลูตามิก 5, 15 และ 25 มิลลิโมล พบว่าในข้าวปทุมธานี 1 และข้าวเหนียว กข 6 ที่สภาวะค่าความเป็นกรด ด่างเท่ากับ 5 อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของกรดกลูตามิก 15 มิลลิโมล มีปริมาณสารกาบามากที่สุดเท่ากับ 155.14 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมข้าวกล้องงอก และ 154.34 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมข้าวกล้องงอกตามลำดับ

จักรพงษ์ และคณะ (2554) ศึกษาผลของสภาพการงอกต่อสมบัติความหนืด และปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอกที่ผลิตจากข้าวเปลือก โดยใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มาทำการงอก 2 วิธี ได้แก่ การงอกโดยการแช่น้ำและการงอกบนผ้าขาวบางเปียกน้ำ กำหนดระยะเวลางอกเป็น 12, 24, 36, 48, 60, 72, 84 และ 96 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 35±2 องศาเซลเซียส พบว่าการงอกโดยการแช่น้ำที่ระยะเวลา 96 ชั่วโมง และการงอกบนผ้าขาวบางเปียกน้ำที่ระยะเวลา 48 ชั่วโมง มีปริมาณสารกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่าที่ระยะเวลาอื่นที่ 19.35 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมข้าวกล้องงอก และ 21.86 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมข้าวกล้องงอก ตามลำดับ

Cheevitsopon and Noomhorm (2011) ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของข้าวกล้องงอกที่ผ่านการนึ่งและการทำแห้งด้วยวิธีการฟลูอิไดซ์เบด (Fluidized bed) ซึ่งใช้ข้อมูลของ Komatsuzaki et. al. (2007) เพื่อกำหนดสภาวะในการทำข้าวกล้องงอกไปใช้ในงานวิจัย โดยใช้ข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แช่น้ำอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และนำไปบ่มในภาชนะปิดที่ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมงโดยนำออกมาล้างทุก ๆ 5 ชั่วโมงเพื่อลดจำนวนจุลินทรีย์

Karladee and Suriyong (2012) ได้ศึกษาปริมาณสารกาบาที่เกิดขึ้นระหว่างการงอกของข้าวกล้องงอก โดยใช้ข้าว 21 พันธุ์ มาหาปริมาณสารกาบา เมื่อแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0, 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมงพบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง ของการแช่ข้าวทั้ง 21 พันธุ์ จะมีปริมาณสารกาบามากที่สุด และในข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ปริมาณสารกาบาจะเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ และที่ 24 ชั่วโมง มีปริมาณสารกาบา 23.48 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมข้าวกล้องงอก หลังจากนั้นปริมาณสารกาบาจะลดลงอย่างต่อเนื่อง

อุไรวรรณ และคณะ (2556) นำตัวอย่างข้าวกล้องแช่น้ำ 30 และ40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมงแล้วนำมาเพาะเป็นเวลา 18, 26 และ 34 ชั่วโมง พบว่าข้าวกล้องงอกที่แช่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เพาะงอกที่ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง มีปริมาณสารกาบามากที่สุด เท่ากับ 20.73 ถึง 28.65 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมข้าวกล้องงอก

Zhang et al. (2014) ทดลองหาสภาวการณ์แช่ และการงอกที่ให้ปริมาณสารกาบามากที่สุดในข้าวสายพันธุ์อินดิกา (Indica rice) และจาปอนิกา (Japonica rice) โดยมีสภาวะอุณหภูมิการแช่ 25, 30 และ 35 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิในการงอก 20, 25, 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียส โดยแช่ข้าวเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจากนั้นทำให้งอกด้วยการพ่นละอองน้ำที่อุณหภูมิในการงอกทุกๆ 12 ชั่วโมง เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่าการแช่ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และการพ่นละอองน้ำอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส มีปริมาณสารกาบามากกว่าที่สภาวะอื่นๆ พบปริมาณสารกาบา 84 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมข้าวกล้องงอก และ 58 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมข้าวกล้องงอก ในข้าวสายพันธุ์อินดิกาและจาปอนิกาตามลำดับ

Sirisoontaralak et al. (2014) วิจัยเกี่ยวกับสภาวะการงอกที่รวดเร็ว และคุณประโยชน์ที่ดีต่อสุขภาพของข้าวกล้องงอก ซึ่งมีการทดลองเพื่อหาสภาวะการงอกโดยใช้ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มาแช่ในน้ำที่ค่าความเป็นกรด ด่าง เท่ากับ 6 โดยมีอุณหภูมิ 25 และ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 และ 24 ชั่วโมง พบว่าการแช่ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง มีปริมาณสารกาบาสูงที่สุดที่ 17 มิลลิกรัมต่อ100 กรัมข้าวกล้องงอก .

Cho and Lim (2015) วิจัยเกี่ยวกับการงอก และสารประกอบทางชีวภาพของข้าวกล้องงอก โดยใช้ข้อมูลของ Choi et al. (2006) ที่ทำการทดสอบผลกระทบของค่าความเป็นกรด ด่าง และอุณหภูมิของการแช่ ที่มีผลต่อปริมาณสารกาบา โดยใช้ข้าวพันธุ์ Keunnunbyeo และ Ilpumbyeo ซึ่งพบว่าการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และทำการพ่นละอองน้ำอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อีก 48 ชั่วโมง ซึ่งให้ปริมาณสารกาบามากประมาณ 35.9 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมข้าวกล้องงอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสามารถสรุปปัจจัยและสภาวะต่าง ๆ ในการเพาะข้าวกล้องงอกได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงกระบวนการที่เหมาะสมในการเพาะข้าวกล้องงอก

พันธุ์ข้าว	สภาวะการเพาะข้าวกล้องงอก	GABA (มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัมข้าวกล้องงอก)	อ้างอิง
Haiminori	แช่น้ำที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และเพาะต่อที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 21 ชั่วโมง	24.9	Komatsuzaki et al. (2007)
ขาวดอกมะลิ 105	แช่น้ำที่ความเป็นกรด ด่าง เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	16.50	วัฒนา และคณะ (2007)
ขาวดอกมะลิ 105	แช่น้ำที่ความเป็นกรด ด่าง เท่ากับ 3 อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา48 ชั่วโมง	67.00	Charoenthaikij et al. (2009)
ขาวดอกมะลิ 105	เพาะข้าวกล้องที่ความชื้นสัมพันธ์ 90% ในที่มืด เป็นเวลา 48 ชั่วโมง	22.83	ยุพกนิษฐ์ และวาสนา (2553)
ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105	งอกบนผ้าขาวบางเปียกน้ำ 35±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง	21.86	จักรพงษ์ โสวะพันธ์ และคณะ (2554)
ขาวดอกมะลิ 105	แช่น้ำที่ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และเพาะต่ออีกที่ 35 องศาเซลเซียส 20 ชั่วโมง โดยจะมีการล้างทุก ๆ 5 ชั่วโมง	23.31	Cheevitsopon and Noomhorm (2011)
ขาวดอกมะลิ 105	แช่น้ำที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	23.48	Karladee and Suriyong (2012)
ขาวดอกมะลิ 105	แช่น้ำ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และเพาะที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส 18 ชั่วโมง	28.65	อุไรวรรณ วัฒนกุล และคณะ (2556)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

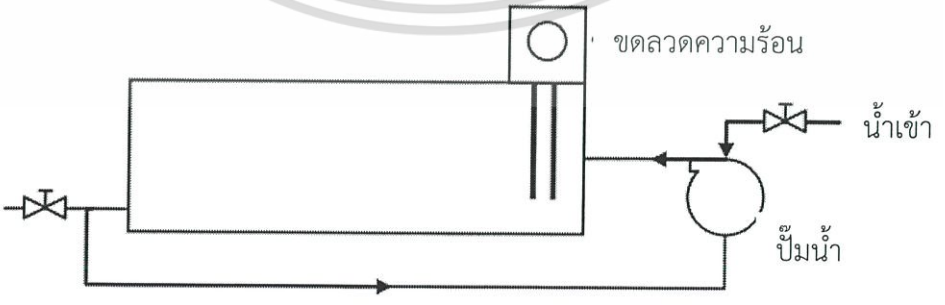
ตารางที่ 2.1 (ต่อ) แสดงกระบวนการที่เหมาะสมในการเพาะข้าวกล้องงอก

พันธุ์ข้าว	สภาวะการเพาะข้าวกล้องงอก	GABA (มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัมข้าวกล้องงอก)	อ้างอิง
อินดิกา และ จาปอนิกา	แช่น้ำ 30 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง และพ่นละอองน้ำ 35 องศาเซลเซียส ทุก ๆ 12 ชั่วโมง เป็นเวลา 48 ชั่วโมง	84.00	Zhang et. al. (2014)
ขาวดอกมะลิ 105	แช่น้ำที่ความเป็นกรด ด่าง เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง	17.00	Sirisoontaralak et. al. (2014)
Keunnu-nbyeo และ llpumb-yeo	แช่น้ำ 30 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง และพ่นละอองน้ำ 30 องศาเซลเซียส อีก 48 ชั่วโมง	35.9	Cho and Lim (2015)

2.4.2 เครื่องผลิตข้าวเปลือกงอก (ชาญวิทย์ และคณะ, 2552)

เครื่องเพาะข้าวกล้องงอก หมายถึง เครื่องจักรกลที่สามารถทำให้ผลผลิตของข้าวให้เกิดการงอกโดยแช่ข้าวเปลือกหรือข้าวกล้องในน้ำจนมีรากงอกออกมา 0.5 - 1 มิลลิเมตร การออกแบบ และการทำงานของเครื่องผลิตข้าวเปลือกงอก ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้าง และทดสอบการใช้งาน ประกอบด้วย

1) ถังแช่ข้าวเปลือก ทำจากสแตนเลสหุ้มทับภายนอกด้วยฉนวนกันความร้อน และมีขดลวดความร้อนที่ทำงานสัมพันธ์กับการไหลเวียนของน้ำจาก ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ถังแช่ข้าวเปลือก (ที่มา : ชาญวิทย์ และคณะ, 2552)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

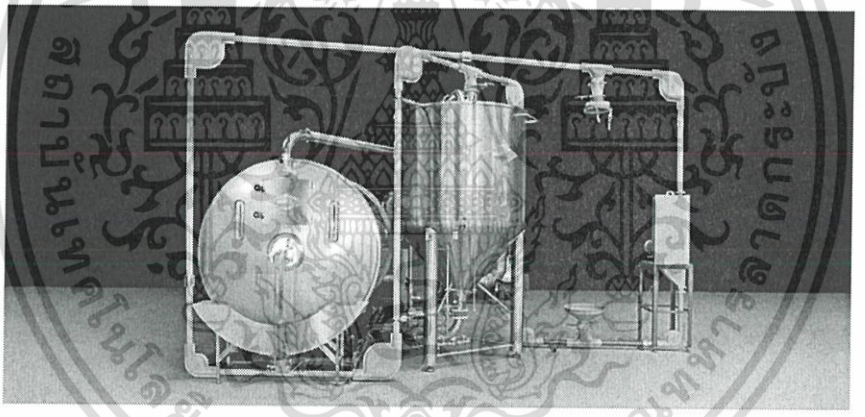
2) ถังงอก มีขนาดเท่ากับถังแช่ สามารถควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นภายในถังงอกด้วยขดลวดความร้อน และพัดลมหมุนเวียนอากาศตามลำดับ โดยขดลวดความร้อน และพัดลมจะทำงานเมื่ออุณหภูมิอากาศภายในถังมีค่าต่ำกว่าที่กำหนดไว้

3) ถาดนึ่ง ทำจากอะลูมิเนียม เพื่อใช้นึ่งข้าวเปลือกงอกด้วยไอน้ำที่ความดันบรรยากาศใช้พลังงานความร้อนจากก๊าซ LPG

4) เครื่องอบแห้ง เป็นเครื่องอบแบบถังหมุนชนิดไม่ต่อเนื่อง เพื่อลดปัญหาที่เกิดจากวิธีการตากแดดโดยตรงที่ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิ และปัจจัยจากสิ่งแวดล้อม ห้องอบมีอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส ความเร็วกระแสอากาศในห้องอบ 0.5 เมตรต่อวินาทีทำอากาศร้อนโดยการดูดอากาศแวดล้อมผ่านท่อเหล็กที่ถูกเผาโดยตรง ใช้เชื้อเพลิงการเผาไหม้จากชีวมวลทางการเกษตร ควบคุมการหมุนด้วยมอเตอร์ระบบเฟืองทดและสายพาน

2.4.3 ระบบเพาะงอกข้าวมอลต์ (Kaspar Schulz, 2556)

ระบบเพาะงอกข้าวมอลต์ที่ทำงานได้ต่อเนื่องตลอดกระบวนการเพาะงอกและนำมาใช้ในระบบอุตสาหกรรม โดยมีการควบคุมระบบน้ำ ระบบลำเลียง เวลาที่ใช้ในกระบวนการเพาะ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ในถังเพาะ ซึ่งอุปกรณ์ต่าง ๆ ทำงานอัตโนมัติตามคำสั่งของโปรแกรมควบคุมโดยไม่ต้องใช้แรงงานคน



รูปที่ 2.5 ระบบเพาะงอกข้าวมอลต์ (Kaspar Schulz, 2556)

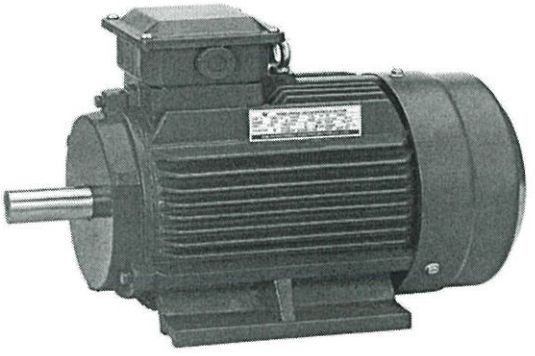
2.5 หลักการพื้นฐานของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล

2.5.1 มอเตอร์ (Motor)

มอเตอร์ คือ เครื่องกลไฟฟ้า (Electormechanical energy) ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้า (Electric energy) ให้เป็นพลังงานกล (Mechanical energy) ในรูปของการหมุนเคลื่อนที่ โดยมอเตอร์ไฟฟ้าแบ่งออกตามการใช้ของกระแสไฟฟ้าได้ 2 ชนิดดังนี้ (ไพฑูรย์, ม.ป.ป.)

1) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating current electricity motor) เป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่ประกอบด้วยสเตเตอร์ และโรเตอร์ซึ่งต่างมีขดลวดอาร์เมเจอร์ที่เป็นอิสระต่อกัน และทำงานด้วยการถ่ายทอดกำลังไฟฟ้าโดยใช้หลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าจากขดลวดด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง (ดังรูปที่ 2.6) ในสภาวะที่มีเครื่องหมุนด้วยความเร็วคงที่ ความเร็วนี้จะไม่เท่ากับความเร็วซิงโครนัส ขดลวดที่ต่อกับแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ เรียกว่า ขดลวดปฐมภูมิ ส่วนขดลวดอีกขดหนึ่งเรียกว่า ขดลวดทุติยภูมิ แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (ที่มา : www.brighthubengineering.com, 2011)

(1) อะซิงโครนัสมอเตอร์ (Asynchronous) หรือมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ (Induction Motor) มีทั้งชนิด 1 เฟส (Single Phase) และชนิด 3 เฟส (Three Phase) มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำนั้นส่วนมากจะหมุนด้วยความเร็วคงที่แต่มีบางชนิดที่สามารถเปลี่ยนแปลงความเร็วได้

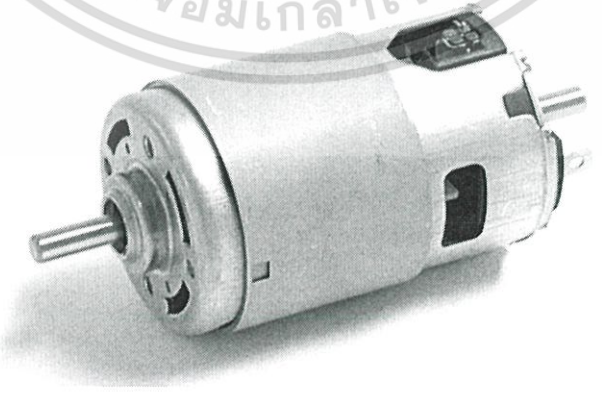
(2) ซิงโครนัสมอเตอร์ (Synchronous) ทำงานด้วยการหมุนและขณะที่หมุนด้วยความเร็วคงที่จะมีความเร็วรอบเท่ากับความเร็วซิงโครนัสซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนขั้วและความถี่กระแสสลับ

2) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current electricity Motor) ใช้หลักการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าทั้งขดลวดที่อยู่กับที่และที่เคลื่อนที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าผลักดันขึ้นทำให้มอเตอร์หมุน สามารถควบคุมความเร็วรอบได้อย่างแม่นยำ จึงใช้ในงานที่ต้องการความแม่นยำในการควบคุมความเร็วรอบ (ดังรูปที่ 2.7) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องจักรขนาดใหญ่ แบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่

(1) มอเตอร์แบบอนุกรม หรือเรียกว่าซีรีส์มอเตอร์ (Series Motor)

(2) มอเตอร์แบบอนุขนาน หรือเรียกว่าชันท์มอเตอร์ (Shunt Motor)

(3) มอเตอร์ไฟฟ้าแบบผสม หรือเรียกว่าคอมเปาวด์มอเตอร์ (Compound Motor)



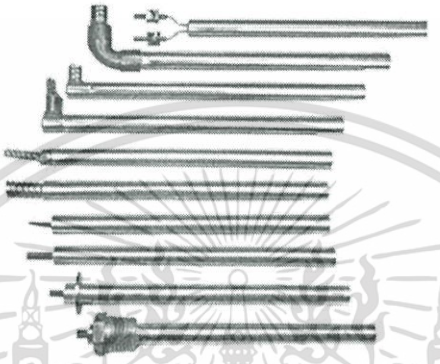
รูปที่ 2.7 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (ที่มา : www.dumotor.com, 2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 ฮีตเตอร์ (Heater)

ฮีตเตอร์ เป็นอุปกรณ์ให้ความร้อน โดยใช้หลักการจ่ายกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดตัวนำ (ตัวความต้านทาน R) ทำให้ลวดตัวนำมีความร้อนขึ้น สามารถใช้ได้กับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ที่ 220 และ 380 โดยมีประเภทของฮีตเตอร์ชนิดต่าง ๆ ตามลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกัน ดังนี้ (สุพรีม ไลนส์, 2014)

1) ฮีตเตอร์แท่ง (Cartridge heater) มีลักษณะเป็นแท่ง เหมาะสำหรับใช้ให้ความร้อนกับชิ้นงานที่เป็นของแข็ง หรือแม่พิมพ์ เช่น เหล็ก อลูมิเนียม ทองเหลือง และโลหะต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.8



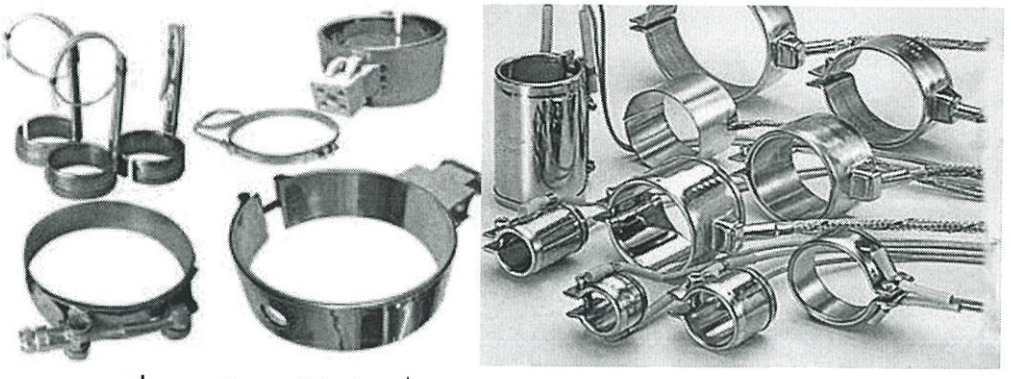
รูปที่ 2.8 ฮีตเตอร์แท่ง (ที่มา : www.heaterprimus.com, 2012)

2) ฮีตเตอร์แผ่น (Strip heater) มีลักษณะเป็นแผ่น สามารถออกแบบให้เป็นรูปทรงต่าง ๆ ได้ เช่น ทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ทรงกลม เป็นต้น เหมาะสำหรับใช้ให้ความร้อนกับชิ้นงานโดยแนบกับชิ้นงานโดยตรง ดังรูปที่ 2.9

รูปที่ 2.9 ฮีตเตอร์แผ่น (ที่มา : www.tic.co.th, 2013)

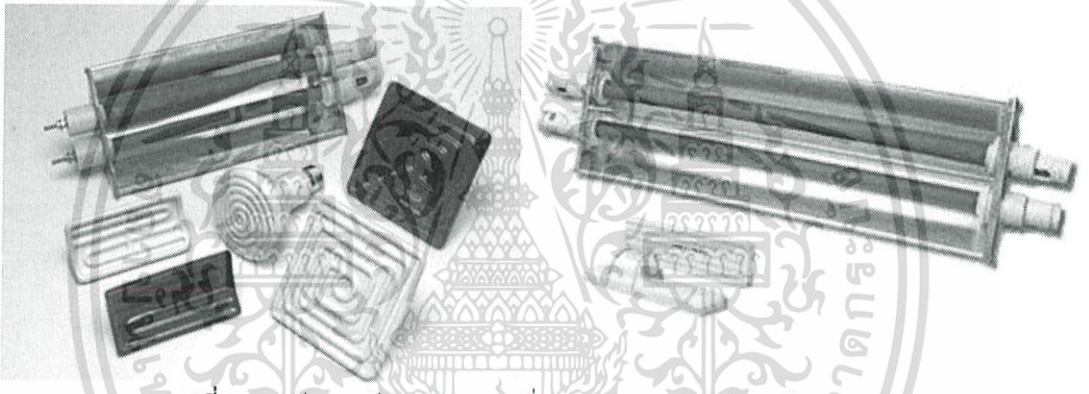
3) ฮีตเตอร์รัดท่อ (Band heater) มีลักษณะเป็นวงแหวน เหมาะสำหรับใช้ให้ความร้อนกับของเหลวที่อยู่ในท่อ หรือถังรูปทรงกระบอก โดยทำการรัดท่อจากภายนอก ดังรูปที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



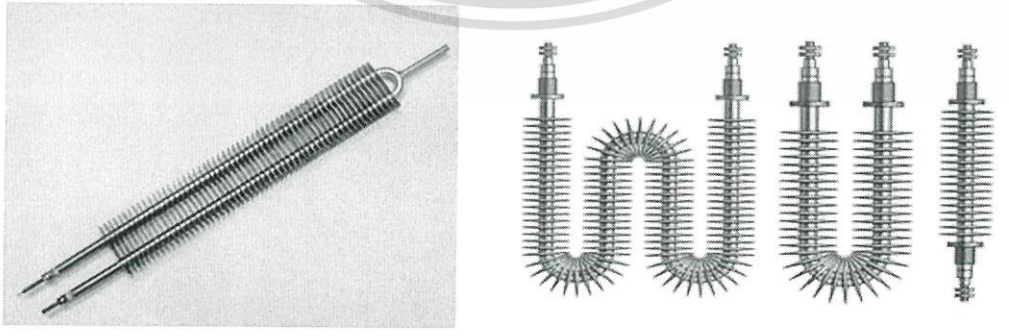
รูปที่ 2.10 ฮีตเตอร์รัดท่อ (ที่มา : www.heater-heater.com, 2013)

4) ฮีตเตอร์อินฟราเรด (Infrared heater) จะมีอยู่ 2 ชนิดด้วยกันคือ ฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบ Black มีลักษณะเป็นแท่งอินฟราเรดสีดำ และฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบ Quarzt มีลักษณะเป็นแท่งอินฟราเรดสีขาว ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ฮีตเตอร์อินฟราเรด (ที่มา : www.สุพรีมไลน์ส์.com, 2014)

5) ฮีตเตอร์ครีบ (Finned heater) และฮีตเตอร์ท่อกลม (Tubular heater) ติดตั้งแบบให้ความร้อนโดยตรง และแบบส่งผ่านความร้อนจากห้องเผาไปยังห้องอบโดยใช้ลมร้อน เป็นฮีตเตอร์ที่ใช้กับอากาศ ไม่ควรใช้กับของเหลว ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ฮีตเตอร์ครีบ และฮีตเตอร์ท่อกลม (ที่มา : www.sangchaimeter.com, 2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) ฮีตเตอร์บอบบิ้น (Bobbin heater) เป็นฮีตเตอร์แบบจุ่มน้ำ ชนิดหนึ่ง ซึ่งถูกออกแบบมีสำหรับให้ความร้อนกับของเหลว สามารถเคลื่อนย้ายได้ ดังรูปที่ 2.13

รูปที่ 2.13 ฮีตเตอร์บอบบิ้น (ที่มา : www.heaterprimus.com, 2012)

7) ฮีตเตอร์เส้นหรือฮีตเตอร์สายไฟ (Cable heater) ทำงานโดยการปรับกำลังเอาต์พุตให้เหมาะสมเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น กำลังเอาต์พุตจะลดลง ฮีตเตอร์เส้นแบบนี้จะไม่สามารถทำให้เกิดความร้อนสูงได้ ดังรูปที่ 2.14

รูปที่ 2.14 ฮีตเตอร์เส้น หรือฮีตเตอร์สายไฟ (ที่มา : www.ฮีต-เตอร์.com, 2014)

8) ฮีตเตอร์ต้มน้ำ (Immersion heater) เป็นฮีตเตอร์ที่ใช้กับของเหลว เช่น ต้มน้ำ หรืออุ่นน้ำมัน การติดตั้งสามารถทำได้โดยเชื่อมเกลียวตัวเมียติดกับถังแล้วใส่ฮีตเตอร์ขนานกับพื้นถัง ควรระวังไม่ให้ส่วนของฮีตเตอร์โผล่พ้นของเหลวร้อนจัดเกินไป เพราะจะทำให้อายุการใช้งานสั้น และเพื่อให้ความร้อนกระจายไปทั่วถึง ควรติดตั้งใบพัดกวนของเหลวด้วย รูปแบบทั่วไปมักจะทำดัดเป็นแบบตัวยู และเชื่อมติดกับเกลียว ขนาดของเกลียวจะขึ้นอยู่กับจำนวนเส้นของฮีตเตอร์ ซึ่งมีตั้งแต่ 1 ขด 3 ขด 6 ขด และ12 ขด ตามความเหมาะสมของกำลังวัตต์ และความยาวของตัวฮีตเตอร์ ดังรูปที่ 2.15

รูปที่ 2.15 ฮีตเตอร์ต้มน้ำ (ที่มา : www.heater-heater.com, 2013)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

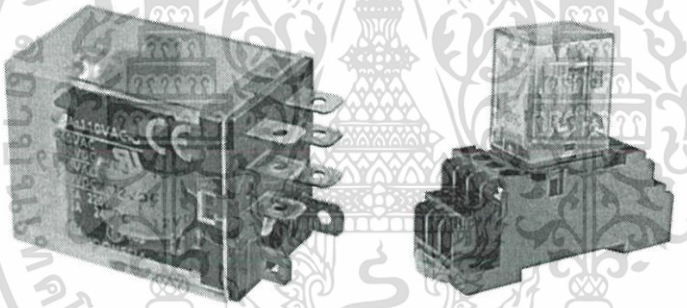
การคำนวณหาขนาดของฮีตเตอร์ไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญในกระบวนการเพาะ และบ่มข้าวกล้องงอก ซึ่งสามารถหากำลังไฟฟ้าได้จากสมการที่ 2.1

$$P = \frac{WC_P\Delta T}{t} \quad (2.1)$$

P คือ กำลังไฟฟ้า (วัตต์)
W คือ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ (กิโลกรัม)
C_P คือ ค่าความจุดร้อนของผลิตภัณฑ์ (กิโลจูลต่อกิโลกรัม x อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
ΔT คือ ผลต่างอุณหภูมิ (T สุดท้าย – T เริ่มต้น)
t คือ เวลา (วินาที)

2.5.3 รีเลย์ (Relay)

รีเลย์ เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานแม่เหล็ก (ดังรูป 2.16) เพื่อใช้ในการดึงดูดหน้าสัมผัสของคอนแทคให้เปลี่ยนสภาวะ โดยการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวด เพื่อทำการปิดหรือเปิดหน้าสัมผัสคล้ายกับสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งนำไปประยุกต์ใช้ ในการควบคุมวงจรต่าง ๆ ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนหลัก (PSP Tech Co., Ltd., 2014) คือ



รูปที่ 2.16 อุปกรณ์รีเลย์ (ที่มา : www.automationcad.com, 2016)

1) ส่วนของขดลวด (Coil) ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้แกนโลหะ โดยการรับแรงดันจากภายนอกต่อคร่อมที่ขดลวดเหนี่ยวนำ เมื่อขดลวดได้รับแรงดัน จะเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้แกนโลหะด้านในสัมผัสต่อกัน

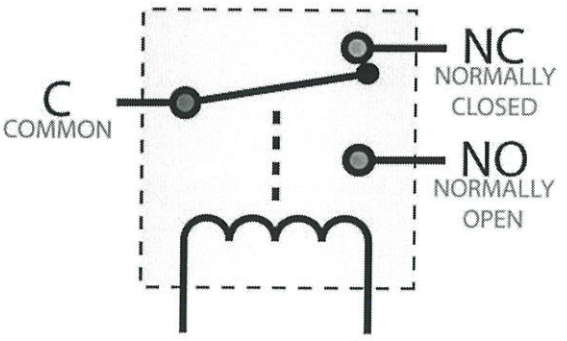
2) ส่วนของหน้าสัมผัส (Contact) ทำหน้าที่เหมือนสวิตช์จ่ายกระแสไฟให้กับอุปกรณ์ โดยภายในรีเลย์มีจุดที่ต่อใช้งานมาตรฐาน (ดังรูปที่ 2.17) ประกอบด้วย

(1) จุดต่อ NC (Normal close) หมายความว่าปกติติดปิด หรือ หากยังไม่จ่ายไฟให้ขดลวดเหนี่ยวนำหน้าสัมผัสจะติดกัน โดยทั่วไปมักต่อจุดนี้เข้ากับอุปกรณ์ หรือเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ต้องการให้ทำงานตลอดเวลา

(2) จุดต่อ NO (Normal open) หมายความว่าปกติเปิด หรือหากยังไม่จ่ายไฟในขดลวดเหนี่ยวนำหน้าสัมผัส จะไม่ติดกัน โดยทั่วไปมักต่อจุดนี้เข้ากับอุปกรณ์ หรือเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ต้องการควบคุมการเปิดปิด

(3) จุดต่อ C (Common) คือ จุดร่วมที่ต่อมาจากแหล่งจ่ายไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 จุดมาตรฐานภายในรีเลย์ (ที่มา : www.phidgets.com, 2016)

2.5.4 อุปกรณ์ควบคุณอุณหภูมิ (Temperature Controller) (Factomart, 2016)

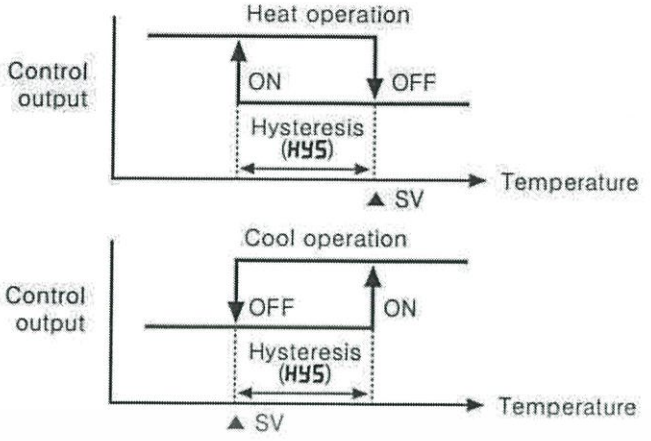
อุปกรณ์ควบคุณอุณหภูมิ คือเครื่องควบคุมที่ทำหน้าที่ในการประมวลผลสัญญาณอินพุตจากเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ และสั่งงานเอาต์พุตเพื่อไปควบคุมอุปกรณ์ในการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิ โดยกระบวนการควบคุมนั้นมีด้วยกันหลากหลายรูปแบบ การทำงานจะมีส่วนที่รับอุณหภูมิ (Input) จากหัววัดอุณหภูมิ หรือที่เรียกกันว่าเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิแล้วมาแสดงผลที่หน้าจอ Display พร้อมกับควบคุมอุณหภูมิให้ได้ตามค่าที่ได้กำหนดไว้ หากอุณหภูมิไม่ได้ตามที่กำหนดไว้ก็จะมีในส่วนของการสั่งงาน (Output) สั่งงานให้อุปกรณ์สำหรับทำความร้อน หรืออุปกรณ์ทำความเย็นทำงานให้ได้ตามค่าที่กำหนดไว้ ดังรูปที่ 2.18

รูปที่ 2.18 แสดงอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (ที่มา : www.dynisco.com, 2017

วิธีการควบคุมอุณหภูมิที่ใช้งานกันโดยทั่วไปมีอยู่ 2 รูปแบบ คือวิธีการควบคุมแบบ 2 ตำแหน่ง หรือ ON and OFF และการควบคุมแบบ PID ซึ่งวิธีการทั้งสองจัดอยู่ในระบบควบคุมแบบ Sequence Control System และ Feedback Control System ตามลำดับ

1) Sequence Control System เป็นระบบการควบคุมแบบหนึ่งที่มีลักษณะเป็นการควบคุมแบบตามลำดับ โดยระบบควบคุมจะทำงานตามที่ได้ออกแบบไว้ตามลำดับก่อน-หลัง ได้แก่ ON and OFF Control หรือการควบคุมแบบ 2 ตำแหน่ง การทำงานของวิธีการควบคุมลักษณะนี้เป็นเพียงแค่การตัดหรือต่อการจ่าย output ดังรูปที่ 2.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

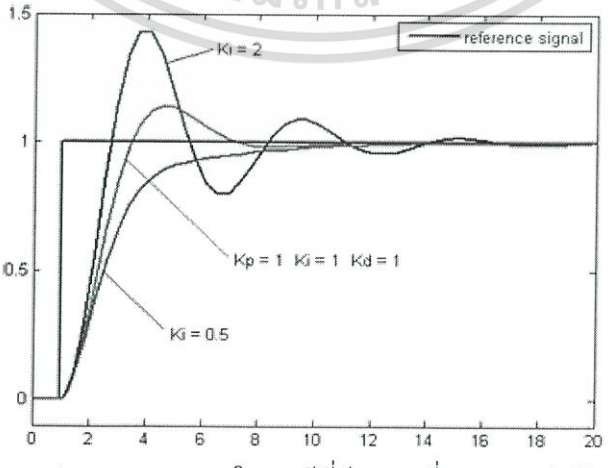


รูปที่ 2.19 การควบคุมแบบ ON-OFF Control (ที่มา : www.factomart.com, 2016)

2) Feedback Control System หรือการควบคุมแบบป้อนกลับ เป็นการควบคุมที่นำเอา output และ parameter ต่างๆกลับมาเปรียบเทียบกับค่าหรือสัญญาณทางด้านอินพุต เพื่อทำการประมวลผล และนำค่าที่ได้จ่ายเป็นเอาต์พุต ซึ่งจะทำงานลักษณะนี้ไปจนสิ้นสุดการควบคุม หรือมีลักษณะการทำงานเป็น loop (ดังรูปที่ 2.20) ได้แก่ การควบคุมแบบ PID (Proportional - Integral - Derivative Controller) โดยสามารถหาค่าตัวแปรของ PID ได้จากสมการที่ 2.2

$$U(t) = MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau)\,d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \qquad (2.2)$$

U(t) คือ สัญญานเอาท์พุตของตัวคอนโทรลเลอร์ ที่เวลา t
K_p คือ ค่า Proportional Gain
K_i คือ ค่า Integral Gain
K_d คือ ค่า Derivative Gain
e คือ ค่าความผิดพลาดที่เกิดจาก SV-PV
t คือ ค่าเวลาในขณะนั้น
τ คือ ผลรวมของตัวแปร error ตั้งแต่เวลา 0 ถึง t



รูปที่ 2.20 กราฟของการควบคุมในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปร P, I และ D (ที่มา : www.factomart.com, 2016)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

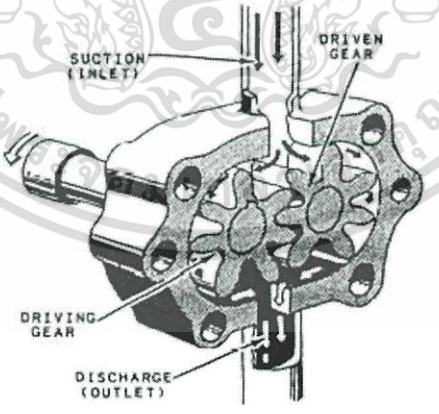
ตารางที่ 2.2 ข้อดี และข้อเสียของเครื่องคุมแต่ละประเภท

	การควบคุมแบบ ON and OFF หรือการควบคุมแบบ 2 ตำแหน่ง	เครื่องควบคุมแบบ PID
ข้อดี	1. การควบคุมง่าย 2. ราคาไม่แพง	1. ไม่เกิด Offset จาก Integral action 2. ให้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว 3. ระบบไม่แกว่ง มีค่า Overshoot น้อย
ข้อเสีย	1. สั่งเอาท์พุตทำงานเพียง 2 สภาวะเท่านั้น ทำให้เกิดการแกว่งของอุณหภูมิอยู่ตลอดเวลา	1. ค่อนข้างซับซ้อน 2. การตั้งค่าของเครื่องควบคุมค่อนข้างยาก 3. เกิดการแกว่งของสัญญาณ

2.5.5 ปั๊มน้ำ (Pump)

ปั๊มน้ำ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเพิ่มพลังงานให้กับของเหลว โดยจะทำให้ของเหลวเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งโดยผ่านทางท่อปิด กลไกที่ใช้ในการเพิ่มพลังงานให้กับของเหลวมีหลายลักษณะ ซึ่งเครื่องสูบจึงถูกออกแบบเป็นหลายชนิด ตามลักษณะของกลไกที่ใช้เพิ่มพลังงานให้ของเหลว โดยในจะแบ่งปั๊มออกเป็น 3 ชั้น (Class) ดังนี้

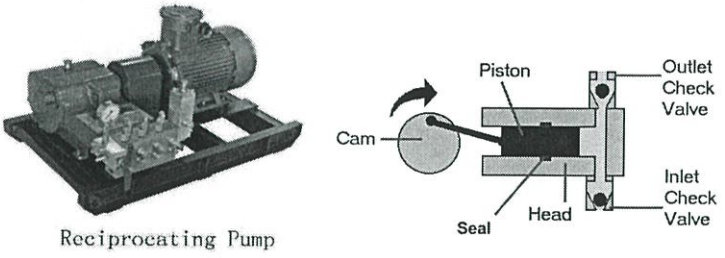
1) ปั๊มแบบโรตารี่ (Rotary pump) เป็นกลุ่มของปั๊มที่เพิ่มพลังงานให้กับของเหลว โดยที่ของเหลวจะถูกบีบหรือรีดผ่านช่องแคบ ๆ ที่อยู่ระหว่างผนังปั๊มกับกลไกเรียกว่า Rotating element ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ปั๊มแบบโรตารี่ (ที่มา : www.thaisafetywork.com)

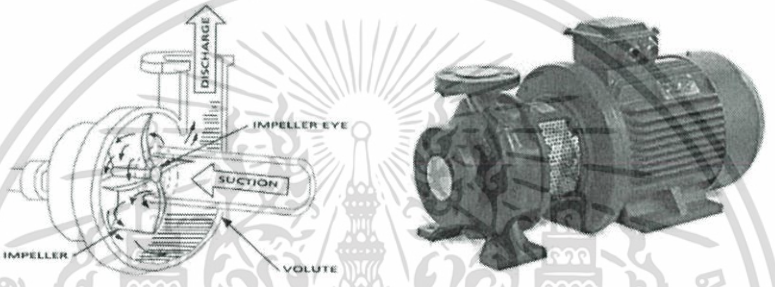
2) ปั๊มแบบชัก (Reciprocating pump) เป็นกลุ่มของปั๊มซึ่งของเหลวจะเข้าไปแทนที่ช่องว่างที่เกิดขึ้นในห้องสูบจากการเคลื่อนที่ของกลไกประเภทลูกสูบ และไดอะแฟรม ทำให้เกิดการขับดันของเหลวออกจากปั๊มอย่างเป็นจังหวะตามการเคลื่อนที่ของกลไก ดังรูปที่ 2.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 ปั๊มแบบชัก (ที่มา : www. instructables.com)

3) ปั๊มแบบใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์ (Centrifugal pump) เป็นกลุ่มของเครื่องสูบที่สร้างเฮดหรือพลังงานให้กับของเหลว โดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของเครื่องสูบ ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 ปั๊มแบบใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์ (ที่มา : www. processindustryforum.com)

4) เฮด (Head) (กระทรวงพลังงาน, 2553)

การกำหนดขนาดของปั๊มพลังงานของของไหลประกอบด้วยพลังงานสามส่วนคือ พลังงานเนื่องจากความดันของของไหล พลังงานจลน์เนื่องจากความเร็วของของไหล และพลังงานศักย์เนื่องจากความสูง พลังงานทั้งสามส่วนนี้ จะใช้ในการวิเคราะห์ในระบบปั๊มน้ำ หรือ Total Dynamic Head (TDH) ดังนี้

(1) เฮดความดัน (Pressure Head, HP) ค่าความดันนอกจากจะบอกเป็นแรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (นิวตันต่อตารางเมตร) โดยความดันของของเหลวนิยมบอกเป็นแท่งความสูงของของเหลวที่จะก่อให้เกิดความดันที่กำหนดบนผิวหนา ซึ่งรองรับแท่งของเหลวนั้น ความดันซึ่งบอกเป็นแท่งความสูงของของเหลวนี้เรียกว่า เฮดความดัน (Pressure Head) โดยความสัมพันธ์ระว่างความดันและเฮดความดัน H_P ดังสมการที่ 2.4

$$H_P = \frac{P}{\gamma} + \frac{P}{\rho g} \qquad (2.4)$$

เมื่อ H_P คือ เฮดความดัน (นิวตันต่อตารางเมตร)

γ คือ น้ำหนักจำเพาะ (นิวตันต่อลูกบาศก์เมตร)

ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลว (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (เมตรต่อวินาทียกกำลังสอง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) เฮดความเร็ว (Velocity Head, HV) ของเหลวที่ไหลในท่อหรือทางน้ำเปิดด้วยความเร็วใด ๆ นั้นมีพลังงานจลน์อยู่ พลังงานส่วนนี้อยู่ในรูปของเฮดความเร็ว ดังสมการที่ 2.5

$$H_V = \frac{V^2}{2g} \tag{2.5}$$

เมื่อ H_V คือ เฮดความเร็ว (เมตร)
V คือ ความเร็วของการไหล (เมตรต่อวินาที)
g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (เมตรต่อวินาทียกกำลังสอง)

(3) เฮดสถิตย์ (Potential Head, Z) คือระยะทางตามแนวดิ่งของของเหลวที่ไหลผ่านท่อ หรือทางน้ำเปิดซึ่งมีพลังงานศักย์อยู่ภายในพลังงานศักย์ส่วนนี้ ดังสมการที่ 2.6

$$\text{เฮดความสูง} = Z \tag{2.6}$$

(4) เฮดการสูญเสียรวม (Total Head Loss, HL) Osborne Reynolds วิศวกรชาวฝรั่งเศสได้ทำการทดลองเพื่อแบ่งรูปแบบการไหลของของไหล โดยกำหนดตามอัตราส่วนของแรงเฉื่อยต่อแรงหนืด (แรงที่เกิดเนื่องจากความฝืดของของไหล) และเรียกอัตราสวนของแรงเฉื่อยกับแรงหนืดนี้ว่าค่าเรย์โนลด์ (Re) ดังสมการที่ 2.7

$$\mathrm{Re} = \frac{\mathrm{VD}\rho}{\mu} + \frac{\mathrm{VD}}{\upsilon} \tag{2.7}$$

เมื่อ V คือ ความเร็วการไหลในท่อ (เมตรต่อวินาที)
D คือ ขนาดวัดผ่านศูนย์กลางท่อ (เมตร)
ρ คือ ความหนาแน่นของไหล (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
μ คือ ความหนืดสมบูรณ์(นิวตันเซคต่อลูกบาศก์เมตร)
υ คือ ความหนืดจลน์ (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)

การเสียเฮดความฝืด หรือการสูญเสียหลัก เมื่อของเหลวไหลภายในท่อจะเกิดแรงเสียดทานระหว่างผนังท่อกับของเหลว ซึ่งแรงเสียดทานที่เกิดนี้ จะทำให้เกิดความดันสูญเสียของของเหลวภายในท่อ การสูญเสียพลังงานในลักษณะนี้เรียกว่าการเสียเฮดความฝืด หรือการสูญเสียหลัก (Major Losses) โดยสามารถคำนวณได้จากวิธีคำนวณของ Darcy – Weisbach ดังสมการที่ 2.8

$$H_{Lf} = f\frac{L}{D} + \frac{V^2}{2g} \tag{2.8}$$

เมื่อ H_{Lf} คือ เฮดของการสูญเสียเนื่องจากความฝืด หรือเฮดการสูญเสียหลัก (เมตร)
f คือ ตัวประกอบความเสียดทาน
L คือ ความยาวท่อ (เมตร)
D คือ ขนาดวัดผ่านศูนย์กลางท่อ (เมตร)
V คือ ความเร็วของการไหล (เมตรต่อวินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าตัวประกอบความเสียดทาน f ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของท่อ ลักษณะการไหลว่าเป็นแบบราบเรียบ หรือแบบปั่นป่วน และความขรุขระของผนังท่อ (ε) ในกรณีที่การไหลเป็นแบบราบเรียบค่าสัมประสิทธิ์ความฝืดดังกล่าวสามารถหาได้จากสมการที่ 2.9

$$f = \frac{64}{Re} \text{ (Laminar Flow, Re} \leq \text{2,000)} \qquad (2.9)$$

สำหรับการไหลเป็นแบบปั่นป่วนที่มีค่าเรย์โนลด์มีค่ามากกว่าประมาณ 4,000 นั้น ค่าตัวประกอบความเสียดทาน f ก็จะขึ้นอยู่กับทั้ง Re และอัตราส่วนระหว่างความขรุขระของผนังต่อท่อความยาวของเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (ε ต่อ D) ค่าความขรุขระของผนังท่อ (ε) ขึ้นอยู่กับชนิดของท่อดังตารางที่ 2.4 และการหาค่าตัวประกอบความเสียดทาน f นั้นสามารถหาได้จาก Moody Diagram ดังรูปที่ 2.24

การเสียเฮดเนื่องจากการไหลผ่านอุปกรณ์ หรือการสูญเสียรองในระบบท่อจำเป็นต้องมีส่วนประกอบจำพวก ข้องอ ข้อต่อ ข้อลด ข้อขยาย และวาล์วชนิดต่าง ๆ การไหลของของเหลวผ่านอุปกรณ์ดังกล่าว จะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานจลน์ในการไหล การสูญเสียเนื่องจากการไหลผ่านอุปกรณ์ในระบบท่อดังกล่าวเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่า การสูญเสียรอง (Minor Losses) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.10

$$H_{Le} = K\frac{V^2}{2g} \qquad (2.10)$$

เมื่อ H_{Le} คือ การเสียเฮดเนื่องจากอุปกรณ์หรือการสูญเสียรอง (เมตร)
K คือ สัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหลซึ่งขึ้นอยู่กับชนิด และขนาดของอุปกรณ์
V คือ ความเร็วของการไหล (เมตรต่อวินาที)

การสูญเสียพลังงานทั้งหมดในการไหลของของไหลประกอบด้วยการสูญเสียเนื่องจากความฝืดหรือการสูญเสียเนื่องจากการไหลผ่านอุปกรณ์ หรือการสูญเสียรอง ดังสมการที่ 2.11

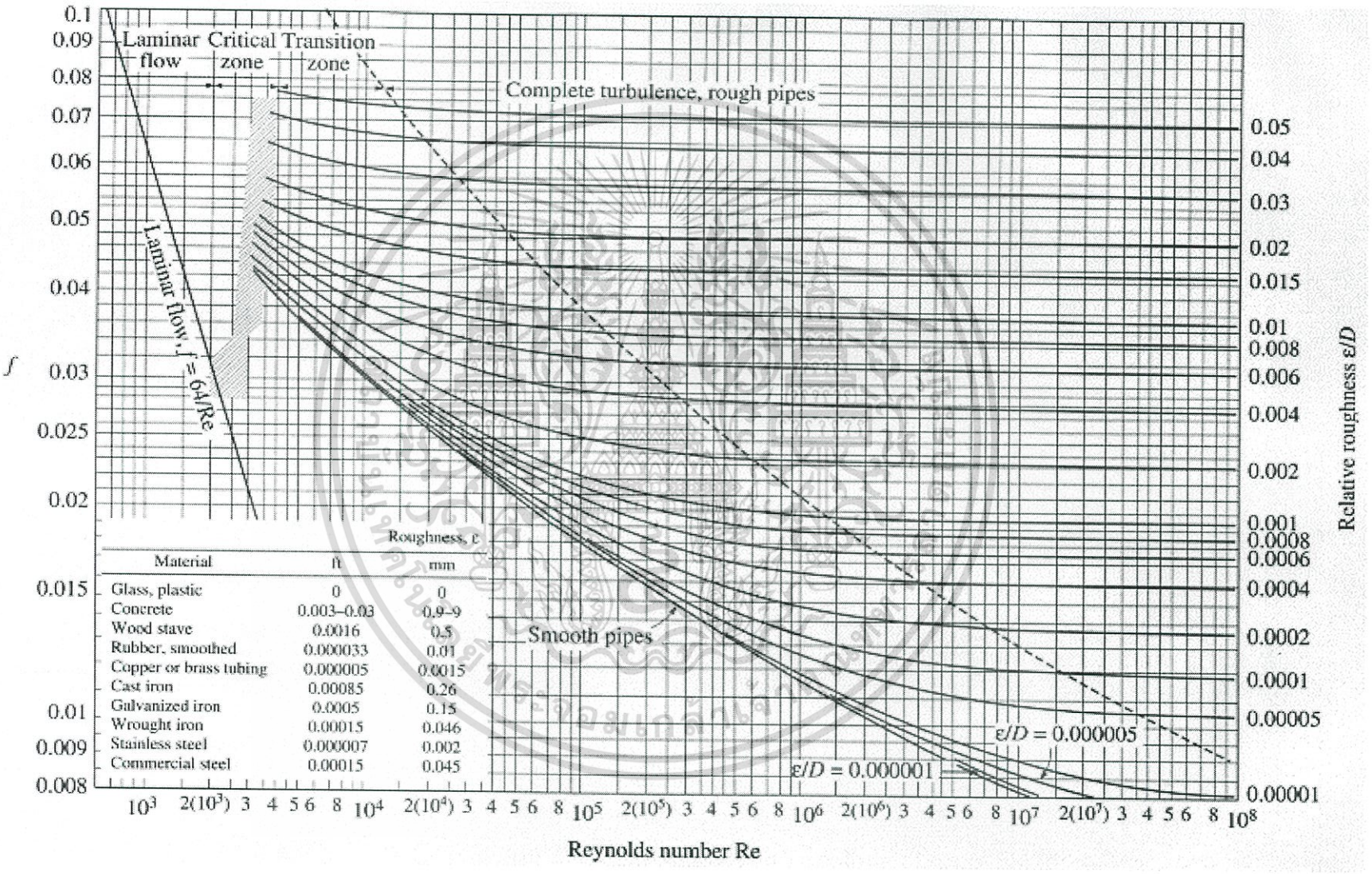
$$H_L = H_{Lf} + H_{Le} \qquad (2.11)$$

กราฟเฮดของระบบ คือ กราฟซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลผ่านระบบกับเฮดรวมของระบบ ซึ่งเฮดรวมก็คือพลังงานที่ปั๊มจะต้องเพิ่มให้แกของเหลวเพื่อก่อให้เกิดการไหล โดยพลังงานที่ปั๊มจะต้องให้ (บอกเป็นความสูงของแท่งของเหลว หรือเฮด) มีค่าเท่ากับผลรวมของพลังงานสองอย่างด้วยกัน คือ

(1) ความต่างระดับของของเหลวที่ปลายของท่อดูด หรือท่อจ่าย หรือเฮดสถิตย์

(2) พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากความฝืดในท่อ และจากการไหลผ่านอุปกรณ์ประกอบระบบท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Roughness, ε

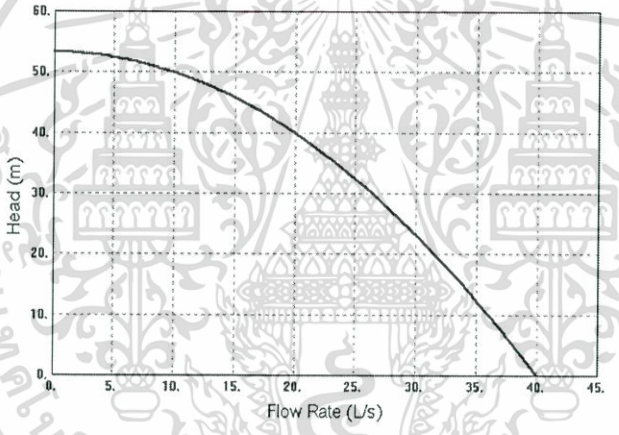
Material	ft	mm
Glass, plastic	0	0
Concrete	0.003–0.03	0.9–9
Wood stave	0.0016	0.5
Rubber, smoothed	0.000033	0.01
Copper or brass tubing	0.000005	0.0015
Cast iron	0.00085	0.26
Galvanized iron	0.0005	0.15
Wrought iron	0.00015	0.046
Stainless steel	0.000007	0.002
Commercial steel	0.00015	0.045

รูปที่ 2.24 Moody Diagram

กราฟเฮดของระบบเป็นสิ่งสำคัญในการพิจารณานำมาใช้ในการออกแบบระบบปั๊ม โดยการเขียนกราฟเฮดของระบบอาจจะแยกเขียนพลังงานที่ปั๊มจะต้องเพิ่มให้แก่ของเหลว ในกรณีที่ความต่างระดับของของเหลวมีค่าคงที่กราฟของพลังงานส่วนนี้จะเป็นเส้นราบขนานไปกับแกนนอน ซึ่งเป็นแกนของอัตราการไหลสำหรับการสูญเสียพลังงาน จะเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของอัตราการไหล ดังนั้นลักษณะของกราฟจะเป็นเส้นโค้งพาราโบลา เมื่อมีการเขียนแยกกัน กราฟข้อ 1 เรียกว่า กราฟเฮดสถิตย์ และกราฟข้อ 2 เรียกว่า กราฟเฮดความฝืด เมื่อรวมทั้งสองกราฟเข้าด้วยกันก็จะได้เป็นกราฟเฮดของระบบ (System Head Curve หรือ Total Dynamic Head -TDH- Curve) ดังสมการที่ 2.12

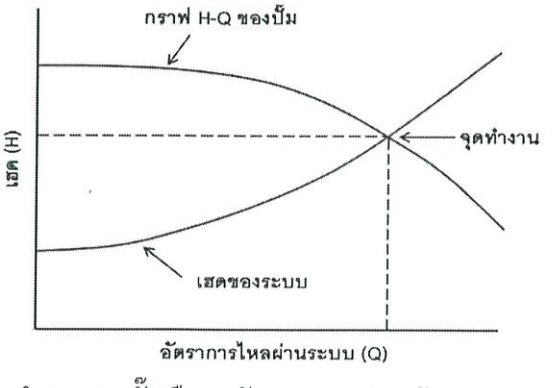
$$\mathrm{THD} = \left(\frac{P_2}{\gamma} - \frac{P_1}{\gamma}\right) + (Z_2 - Z_1) + H_L \qquad (2.12)$$

ในการเลือกใช้ปั๊มให้เหมาะกับสภาพการใช้งานจริง นอกจากพิจารณาถึงเฮดของระบบแล้วต้องพิจารณากราฟเฮด (กราฟ H-Q) ของปั๊มด้วย กราฟเฮดของปั๊มเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูบของปั๊ม ตั้งแต่อัตราการไหลศูนย์ถึงอัตราการไหลสูงสุดของปั๊ม ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 กราฟคุณลักษณะ (กราฟเฮด หรือกราฟ H-Q) ของปม

เมื่อนำกราฟเฮดของระบบ และกราฟเฮดของปั๊มมาเขียนรวมกัน พบว่าเส้นกราฟทั้งสองตัดกันที่จุดทำงาน(Operation Point) ของปั๊มดังรูปที่ 2.26



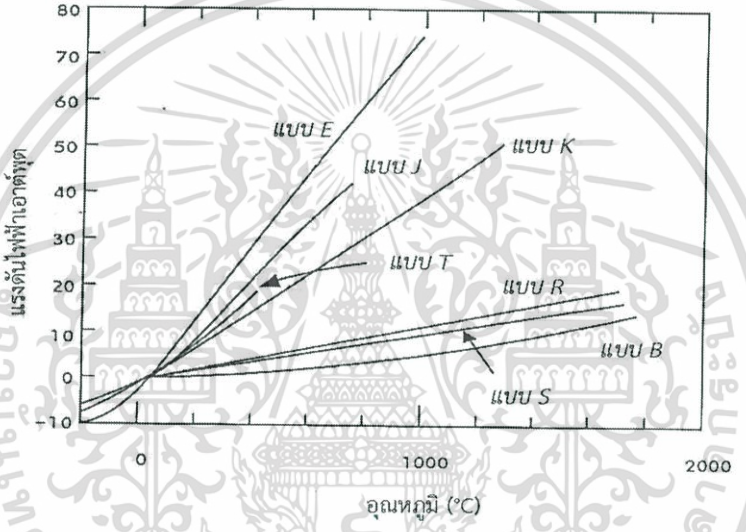
รูปที่ 2.26 จุดทำงานของปั๊มคือจุดตัดของกราฟเฮดข้องระบบ และกราฟเฮดของปั๊ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.6 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

เป็นทรานสดิวเซอร์ (Transducer) หรือเซนเซอร์ (Sensor) วัดอุณหภูมิที่ทำงานโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้าในรูปของแรงดันไฟฟ้า จัดเป็นทรานสดิวเซอร์ประเภทแอคทีฟ (Active transducer) สามารถกำเนิดแรงดันไฟฟ้าได้เองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างจุดสองจุด โดยไม่จำเป็นต้องกระตุ้นด้วยแหล่งจ่ายพลังงานจากภายนอก มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูง สามารถใช้งานได้โดยตรงในรูปของเครื่องมือวัด (Instrument) หรือการส่งสัญญาณทางด้านเอาต์พุตให้กับระบบควบคุม (นวภัทรา และทวีพล, 2556)

เทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน (Standard thermocouple) เป็นเทอร์โมคัปเปิลที่ผู้ผลิตทุกรายกำหนดส่วนผสมของคู่สายเทอร์โมคัปเปิลเป็นมาตรฐานเหมือนกัน สามารถใช้ตารางเทียบมาตรฐานได้ทั่วไป มี 7 แบบ ได้แก่ เทอร์โมคัปเปิลแบบ S R B J K T และ E ดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานแบบต่างๆ

ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติและลักษณะของเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานแต่ละชนิด

ชนิดของเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐาน	คุณสมบัติและลักษณะ	ชนิดลวดเทอร์โมคัปเปิล	ย่านอุณหภูมิใช้งาน (องศาเซลเซียส)
แบบ S และ R	เหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงโดยสามารถทนอุณหภูมิได้สูงถึง 1,400 องศาเซลเซียส ใช้งานได้ดีในสภาวะที่ไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ไม่เหมาะกับงานในสภาวะสุญญากาศ ไม่เหมาะกับงานที่มีไอของโลหะและอโลหะ	Pt13% Rh – Pt (ชนิด R) แพลทินัม 13% Pt10% Rh – Pt (ชนิด S) แพลทินัม 10% โรเดียม – แพลทินัม	-50 ถึง 1,768.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) แสดงคุณสมบัติและลักษณะของเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานแต่ละชนิด

ชนิดของเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐาน	คุณสมบัติและลักษณะ	ชนิดลวดเทอร์โมคัปเปิล	ย่านอุณหภูมิใช้งาน (องศาเซลเซียส)
แบบ B	ให้แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าแบบ S และ R แต่มีความแข็งแรงทนทานกว่า ไม่เหมาะกับงานในสภาวะสุญญากาศ ไม่เหมาะกับงานที่มีไอของโลหะและอโลหะ	Pt30% Rh - Pt6% Rhแพลทินัม 30% โรเดียม - แพลทินัม 6%โรเดียม	870 ถึง 1,700
แบบ J	ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ไฟฟ้าต่ออุณหภูมิดี นิยมใช้กับงานทั่วไป ราคาไม่แพง เหมาะสำหรับใช้งานที่อุณหภูมิไม่เกิน 760 องศาเซลเซียส ไม่เหมาะกับงานที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส	Fe – CuNi ไอรอน – คอปเปอร์นิกเกิล	-210 ถึง 1,200
แบบ K	นิยมใช้แพร่หลายมากที่สุดสามารถวัดอุณหภูมิได้สูงกว่าแบบ J และมีราคาถูกกว่า มีค่าความเป็นเชิงเส้นสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมคัปเปิลชนิดอื่น สามารถใช้กับงานที่มีการแผ่รังสีความร้อน (thermal radiation) ได้	NiCr - NiAl (NiCr - Ni) นิกเกิลโครเมียม - นิกเกิลอลูมิเนียม	-270 ถึง 1,372
แบบ T	เหมาะสำหรับการวัดอุณหภูมิในย่านต่ำ มีสเถียรภาพในการวัดที่ดี สามารถทนต่อบรรยากาศที่มีการกัดกร่อนและมีความชื้นได้ดี	Cu – CuNi คอปเปอร์ – คอปเปอร์นิกเกิล	-270 ถึง 400
แบบ E	มีคุณสมบัติคล้ายเทอร์โมคัปเปิลแบบ K แต่ให้แรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตสูงกว่า	NiCr – CuNi นิกเกิลโครเมียม - คอปเปอร์นิกเกิล	-250 ถึง 870

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.7 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) (EHEDG, 2004)

เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นโลหะผสมที่มีความแข็งแรงทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี และยังสามารถทำความสะอาดได้ง่าย จึงนิยมทำเหล็กกล้าไร้สนิมมาเป็นวัสดุในการผลิตเครื่องจักหรืออุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับอาหาร เหล็กกล้าไร้สนิมต้องมีโครเมียม (chromium) ผสมอยู่อย่างน้อย 10.5 เปอร์เซ็นต์ และอาจมีส่วนผสมอื่นๆ เพื่อเพิ่มสมบัติการต้านทานการกัดกร่อน เช่น โมลิบดินัม (molybdenum) และไนโตรเจน (nitrogen) ซึ่งช่วยขจัดการเกิดการกัดกร่อนประเภทรูเข็ม และมุมอับ ทองแดง (copper) จะช่วยเพิ่มคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นหลายชนิดตามส่วนประกอบของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนั้น (ดังตารางที่ 2.5) เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 มีส่วนประกอบคือ โครเมียม ร้อยละ 18 นิกเกิล ร้อยละ 9 เหล็กกล้าชนิดนี้ The American Iron and Steel Institute (AISI) แนะนำให้ใช้เป็นพื้นผิวที่สัมผัสอาหาร แต่ 3A Sanitary Standards (3A-SS) อนุญาตให้ใช้เฉพาะส่วน เช่น ท่อ เหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิห้อง ที่ความดันบรรยากาศ มีค่าพีเอชอยู่ในช่วงระหว่าง 6.5 ถึง 8.0 สามารถทนการกัดกร่อนของสารละลายคลอรีน ความเข้มข้นไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เหล็กกล้าไร้สนิม 316 มีส่วนประกอบคือ โครเมียม ร้อยละ 17 นิกเกิลร้อยละ 10 และโมลิบดินัมร้อยละ 2 เพื่อป้องกันการกัดกร่อน ซึ่ง 3A Sanitary Standards แนะนำให้ใช้เป็นพื้นผิวสัมผัสกับอาหาร สามารถทนอุณหภูมิสูงมาก และต่ำมากได้ ทนการกัดกร่อนของคลอรีนที่ความเข้มข้นสูง ใช้เป็นวัสดุสำหรับเครื่องจักรอุปกรณ์แปรรูปอาหาร

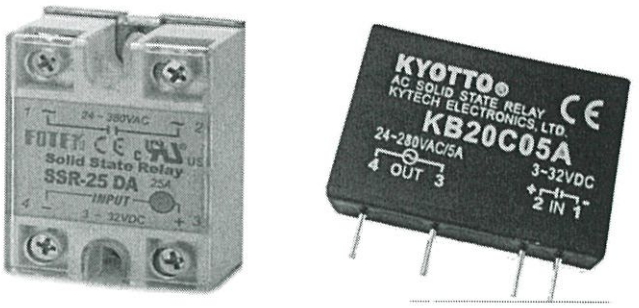
ตารางที่ 2.4 แสดงส่วนประกอบของเหล็กกล้าไร้สนิม

ชนิดต่าง ๆ ชนิดของเหล็กกล้าไร้สนิม	ส่วนประกอบ			
	คาร์บอน (ร้อยละ)	โครเมียม (ร้อยละ)	นิกเกิล (ร้อยละ)	โมลิบดินัม (ร้อยละ)
304	น้อยกว่า 0.08	18	9	-
304L	น้อยกว่า 0.03	18	9	-
316	น้อยกว่า 0.08	18	14	3
316L	น้อยกว่า 0.03	18	14	3

2.5.8 โซลิดสเตต รีเลย์ (SSR)

โซลิดสเตต รีเลย์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อ (Interface) ระหว่างภาคควบคุม (Control) ซึ่งเป็นส่วนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ กับวงจรภาคไฟฟ้ากำลัง (Power) โดยที่ภาคทั้งสองจะมีระบบกราวด์ (Ground) ที่แยกออกจากกันทำให้สามารถป้องกันการลัดวงจร (Short circuit) และการรบกวนซึ่งกันและกันได้ (Inno Ins Co., Ltd., 2017) นับเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ออกแบบมาเพื่อใช้แทนอาร์เมเจอร์รีเลย์ (Armature Relay) แต่มีข้อดีกว่าคือ มีขนาดเล็กกว่า ความไวในการทำงานที่สูงกว่า และมีอายุการทำงานนานกว่า ดังรูปที่ 2.28

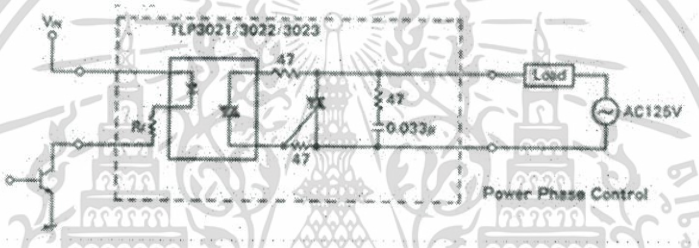
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.28 อุปกรณ์ Solid state Relay (ที่มา : www.hacktronics.co.in, 2014)

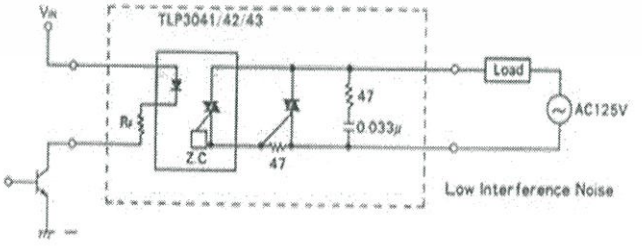
องค์ประกอบ และวงจรพื้นฐานของ Solid state Relay

1) แบบ Non Zero Crossing Type มีองค์ประกอบที่สำคัญคือ Photo Couple, Main Triac, Snuber circuit โดยกระแสไฟฟ้า และแรงดันที่ตกคร่อมโหลดจะปรากฏทันทีที่สัญญาณควบคุมที่ป้อนเข้าเป็นบวก ดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 องค์ประกอบและวงจรพื้นฐานของ Solid state Relay แบบ Non Zero Crossing Type (ที่มา : www.inno-ins.com, 2016)

2) แบบ Zero Crossing Type โดยกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดจะไม่ปรากฏทันทีที่สัญญาณควบคุมที่ป้อนเข้าเป็นบวกแต่จะหน่วงไปจนถึงจุดที่แรงดัน AC power เป็นศูนย์จึงจะให้กระแสไฟฟ้าไหลในวงจรโหลด (Zero Crossing On) และเมื่อสัญญาณควบคุมที่ป้อนเข้าเป็นศูนย์ก็จะไม่ตัดกระแสไฟฟ้าในวงจรโหลดทันทีแต่จะหน่วงไปจนถึงจุดที่แรงดัน AC power เป็นศูนย์จึงจะตัดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรโหลด (Zero Crossing Off) ดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 แสดงองค์ประกอบ และวงจรพื้นฐานของ Solid state Relay แบบ Zero Crossing Type (ที่มา : www.inno-ins.com, 2016)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

งานวิจัยเรื่องการใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกนี้ แบ่งออกเป็น 6 ส่วนที่สำคัญ ดังนี้

1. การทดลองเบื้องต้น
2. การออกแบบระบบควบคุมเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกแบบต่อเนื่องด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์
   1) การเลือกใช้อุปกรณ์ทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก
   2) การออกแบบโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์
3. การทดสอบสมรรถนะของการใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก
   1) อัตราการไหลของน้ำเข้าห้องเพาะ
   2) อัตราการระบายน้ำออกจากห้องเพาะ
   3) การทดสอบประสิทธิภาพของการพ่นละอองน้ำ
   4) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศ และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเพาะกรณีที่ไม่มีตัวอย่างข้าวกล้อง
   5) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศ และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเพาะกรณีที่มีตัวอย่างข้าวกล้อง
   6) อัตราการงอกของข้าวกล้อง (Germination rate)
   7) ปริมาณไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในการควบคุมและกระบวนการผลิตข้าวกล้องงอก
4. การทดสอบคุณภาพของข้าวกล้องงอก
   1) ปริมาณสารกาบาในข้าวกล้องงอก
   2) ปริมาณจุลินทรีย์มาตรฐานในข้าวกล้องงอก
   3) คุณภาพของข้าวกล้องงอกหุงสุก
5. การวิเคราะห์ทางสถิติ

3.1 การทดลองเบื้องต้น

ในการออกแบบระบบควบคุมเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกแบบต่อเนื่องด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ จำเป็นต้องศึกษากระบวนการเพาะข้าวกล้องงอกด้วยวิธีห้องปฏิบัติการ (Laboratory-scale method) ตามวิธีของ Cheevitsopon and Noomhorm (2011) เพื่อให้ได้ข้อมูลต่าง ๆ เช่น สภาวะของการแช่น้ำ (อุณหภูมิของน้ำ และเวลาของการแช่น้ำ) และสภาวะของการบ่ม (อุณหภูมิของอากาศ เวลาของการบ่ม) ที่เป็นแนวทางในการสร้างออกแบบระบบควบคุมเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกแบบต่อเนื่องด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ ที่สามารถทำงานได้ตามสภาวะที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 อุปกรณ์

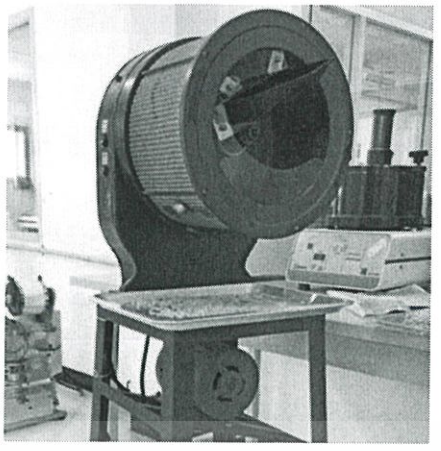
1) ข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105
2) ผ้าขาวบาง
3) อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) (รุ่น OB-20, Memmert GmbH + Co. KG, Schwabach, Germany)
4) เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง (รุ่น UX3200G, Shimadzu Corporation, Japan)
5) เครื่องกะเทาะข้าวเปลือก (รุ่น P-1 มอเตอร์ขนาด 373 วัตต์, Ngek Seng Huat Ltd., Part, Thailand)
6) เครื่องคัดขนาดเมล็ดข้าว (รุ่น I-1, Ngek Seng Huat Ltd., Part, Thailand)

3.1.2 วิธีการทดลอง

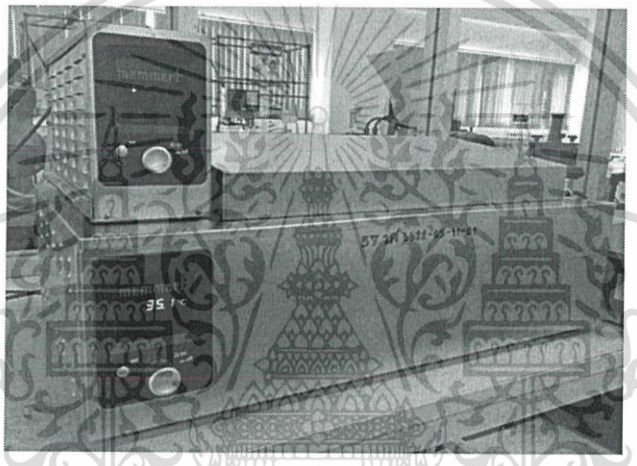
1) กะเทาะข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ด้วยเครื่องกะเทาะข้าวเปลือก ดังรูปที่ 3.1
2) คัดข้าวกล้องเต็มเมล็ดด้วยเครื่องคัดขนาดเมล็ดข้าว ดังรูปที่ 3.2
3) ล้างตัวอย่างข้าวกล้องจำนวน 300 กรัม ด้วยน้ำสะอาด ห่อด้วยผ้าขาวบาง นำไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.3 และ รูปที่ 3.4
4) นำข้าวกล้องออกมาล้างด้วยน้ำสะอาด และบ่มข้าวกล้องที่ห่อด้วยผ้าขาวบางที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง ทำการล้างตัวอย่างข้าวกล้องทุก 4 ชั่วโมง
5) เมื่อบ่มครบ 20 ชั่วโมง จมูกข้าวกล้องจะงอกออกมาประมาณ 0.5 - 1.0 มิลลิเมตร

รูปที่ 3.1 เครื่องกะเทาะข้าวเปลือก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



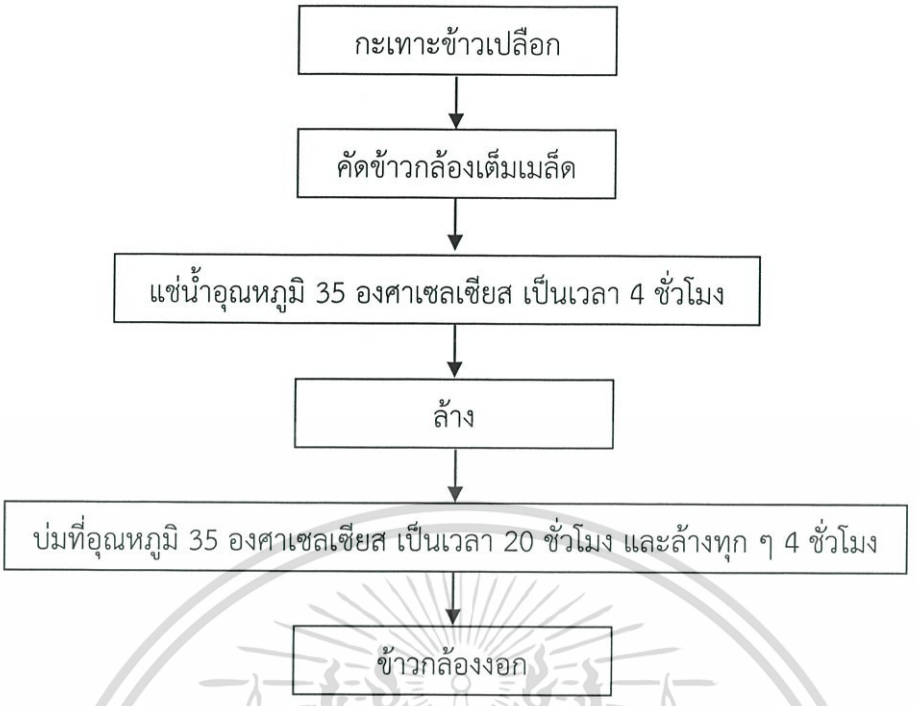
รูปที่ 3.2 เครื่องคัดขนาดเมล็ดข้าว



รูปที่ 3.3 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ

รูปที่ 3.4 แช่ข้าวกล้องในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

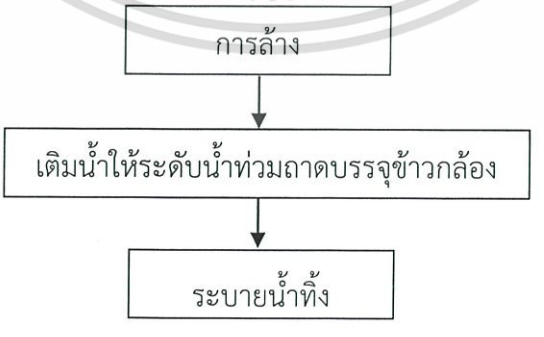


รูปที่ 3.5 กระบวนการผลิตข้าวกล้องงอกด้วยวิธีห้องปฏิบัติการ

3.2 การออกแบบระบบควบคุมเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกแบบต่อเนื่องด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์

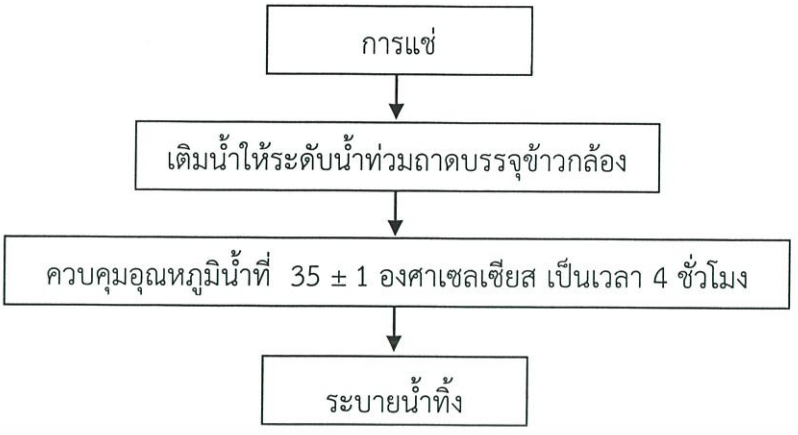
3.2.1 การเลือกใช้อุปกรณ์ทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก

จากผลการทดลองเบื้องต้น สามารถแบ่งกระบวนการเพาะออกเป็น 3 กระบวนหลัก คือ การล้าง, การแช่ และการบ่ม โดยแต่ละกระบวนการมีขั้นตอนการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3.6, 3.7 และ 3.8 จึงเลือกใช้อุปกรณ์ทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกที่สามารถควบคุมการไหลของน้ำ ควบคุมอุณหภูมิของน้ำ และปิดเปิดการทำงานของอุปกรณ์ได้อัตโนมัติ ให้เครื่องเพาะข้าวกล้องงอกทำงานตาม 3 กระบวนการข้างต้นได้

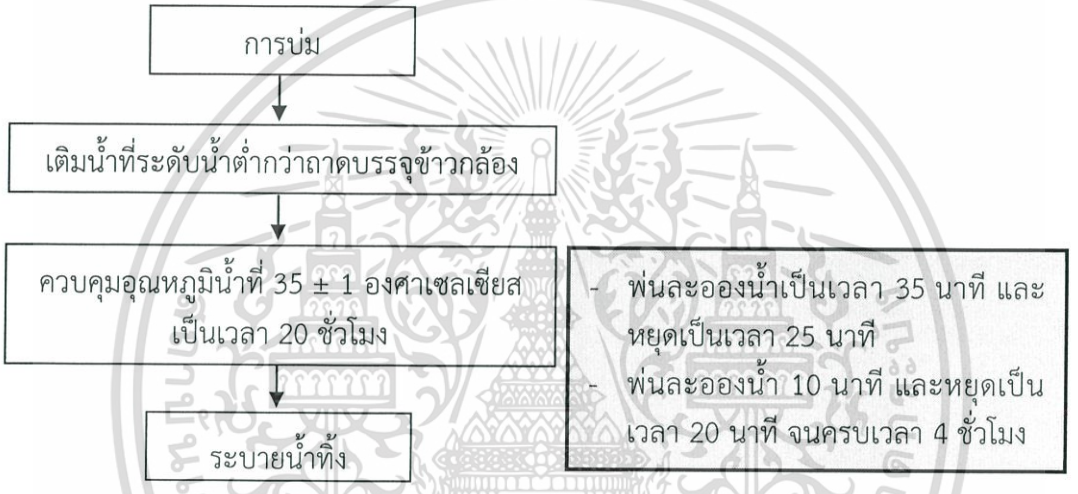


รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการล้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการแช่

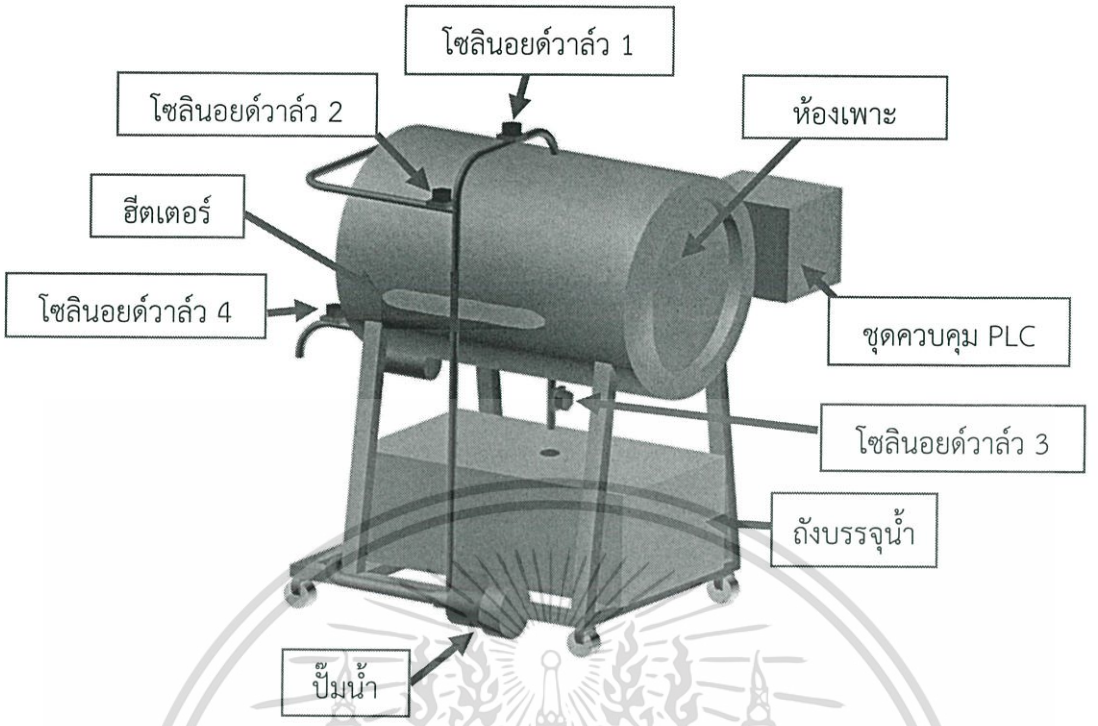


รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการบ่ม

เครื่องเพาะข้าวกล้องงอกแบบต่อเนื่องควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ จึงประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 6 ส่วน ได้แก่ ห้องเพาะ ปั๊มน้ำ ถังน้ำ ฮีตเตอร์ โซลินอยด์วาล์ว และชุดควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ ดังรูปที่ 3.9 และ 3.10 เพื่อให้เครื่องสามารถทำงานตามกระบวนการที่ต้องการได้

1. อุปกรณ์
   1) เครื่องเพาะข้าวกล้องงอก
   2) ปั๊มน้ำ จำนวน 1 ตัว
   3) โซลินอยด์วาล์ว 220 โวลต์กระแสสลับ จำนวน 4 ตัว
   4) ฮีตเตอร์ ขนาด 1500 วัตต์ จำนวน 1 ตัว
   5) รีเลย์ จำนวน 7 ตัว
   6) โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ รุ่น Omron CP1L จำนวน 1 ตัว
   7) สายไฟ ขนาด 2.5 ตารางมิลลิเมตร
   8) สายไฟ ขนาด 4 ตารางมิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



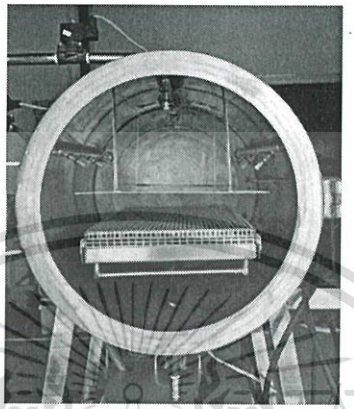
รูปที่ 3.9 ส่วนประกอบของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์

รูปที่ 3.10 เครื่องเพาะข้าวกล้องงอกแบบต่อเนื่องควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ส่วนประกอบของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกแบบต่อเนื่องควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์

1) ห้องเพาะ มีลักษณะเป็นทรงกระบอกแนวนอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 49 เซนติเมตร ความยาว 55 เซนติเมตร มีปริมาตร 104,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีประตูสามารถเปิดปิดได้ เป็นห้องที่ต้องควบคุมให้มีสภาวะตามกระบวนการเพาะที่เหมาะสม ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ห้องเพาะของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก

2) ปั๊มน้ำ มีขนาดกำลัง 0.37 กิโลวัตต์ ปริมาณการไหลของน้ำสูงสุดเป็น 40 ลิตรต่อนาที ทำหน้าที่ส่งน้ำจากถังบรรจุน้ำไปสู่ห้องเพาะ

3) ถังบรรจุน้ำ มีขนาดความกว้าง 40 เซนติเมตร ความยาว 60 เซนติเมตร และความสูง 40 เซนติเมตร ซึ่งสามารถบรรจุน้ำได้ 96,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

4) ฮีตเตอร์ เลือกใช้ Immersion Heater เพื่อเพิ่มอุณหภูมิน้ำที่ใช้ในกระบวนการ คำนวณหากำลังไฟฟ้าที่ฮีตเตอร์ใช้ในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำ โดยที่ P คือ กำลังไฟฟ้า, m คือ มวลของน้ำ, C_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะ, ΔT คือ ผลต่างอุณหภูมิ ($T_{สุดท้าย} - T_{เริ่มต้น}$), t คือ เวลา โดยกำหนดให้เพิ่มอุณหภูมิของน้ำจาก 30 องศาเซลเซียส เป็น 35 องศาเซลเซียส

กำลังไฟฟ้าที่ฮีตเตอร์ใช้เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำในกระบวนการแช่

m = 43.50 กิโลกรัม

C_p น้ำ = 4.178 กิโลจูลต่อกิโลกรัมต่อองศาเซลเซียส

ΔT = 5 องศาเซลเซียส

t = 900 วินาที

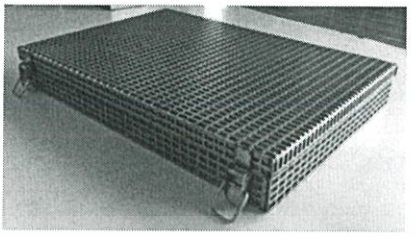
$$P = \frac{mC_p\Delta T}{t} = \frac{43.50 \times 4.178 \times 5}{900} = 1.01 \text{ กิโลวัตต์}$$

จากการคำนวณจึงเลือกใช้ฮีตเตอร์ที่มีขนาด 1,500 วัตต์

5) โซลินอยด์ สั่งการด้วยไฟฟ้ากระแสตรง 220 โวลต์ และมี IP00/65 ทำหน้าที่ควบคุมการไหลของน้ำที่ใช้ในกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) ถาดบรรจุข้าวกล้อง มีขนาดความกว้าง 30 เซนติเมตร ความยาว 45 เซนติเมตร และความสูง 5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.12 สามารถบรรจุข้าวกล้องได้ 1 กิโลกรัม ต่อความหนาของข้าวกล้อง 1 เซนติเมตร



รูปที่ 3.12 ถาดบรรจุข้าวกล้อง

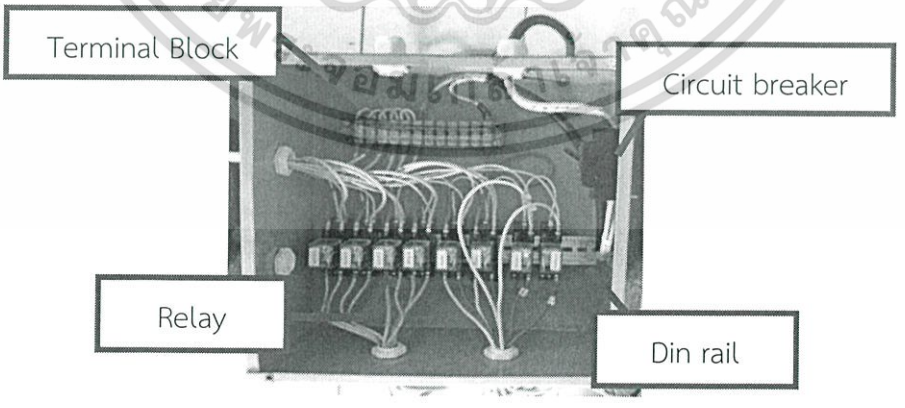
7) ชุดควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ จะควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในกระบวนการเพาะข้าวกล้องงอก ประกอบด้วยอุปกรณ์ ดังนี้

(1) ตู้ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกแบบต่อเนื่องตามคำสั่งของ PLC ดังรูปที่ 3.13 ประกอบด้วยอุปกรณ์ทางไฟฟ้า ดังนี้

- รีเลย์ ทำหน้าที่เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ควบคุมวงการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก ตามคำสั่งของ PLC
- เทอร์มินอลต่อสาย มีจุดเชื่อมต่อ 12 จุด ใช้เชื่อมต่อระหว่างสายไฟหลัก 220 โวลต์ กระแสสลับ กับสายไฟควบคุมอุปกรณ์ที่ผ่านรีเลย์
- สะพานไฟ อุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจรของกระแสไฟฟ้าหรือเกิดจากการใช้ไฟฟ้ามากเกินไป ทำหน้าที่ในการตัดและต่อกระแสไฟฟ้า

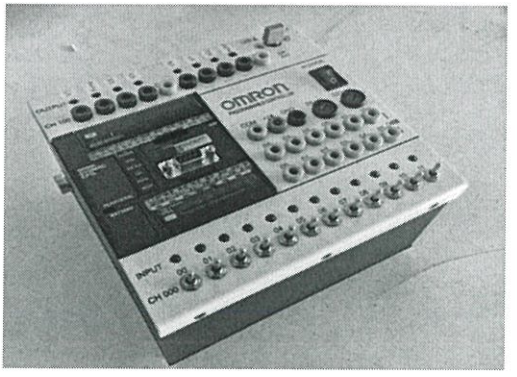
(2) โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ รุ่น Omron CP1L ดังรูปที่ 3.14

(3) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 24 โวลต์ ดังรูปที่ 3.15

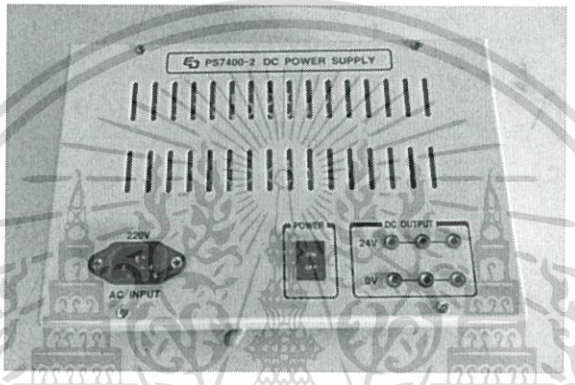


รูปที่ 3.13 ตู้ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกตามคำสั่งของโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ รุ่น Omron CP1L



รูปที่ 3.15 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 24 โวลต์

3.2.2 การออกแบบโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์

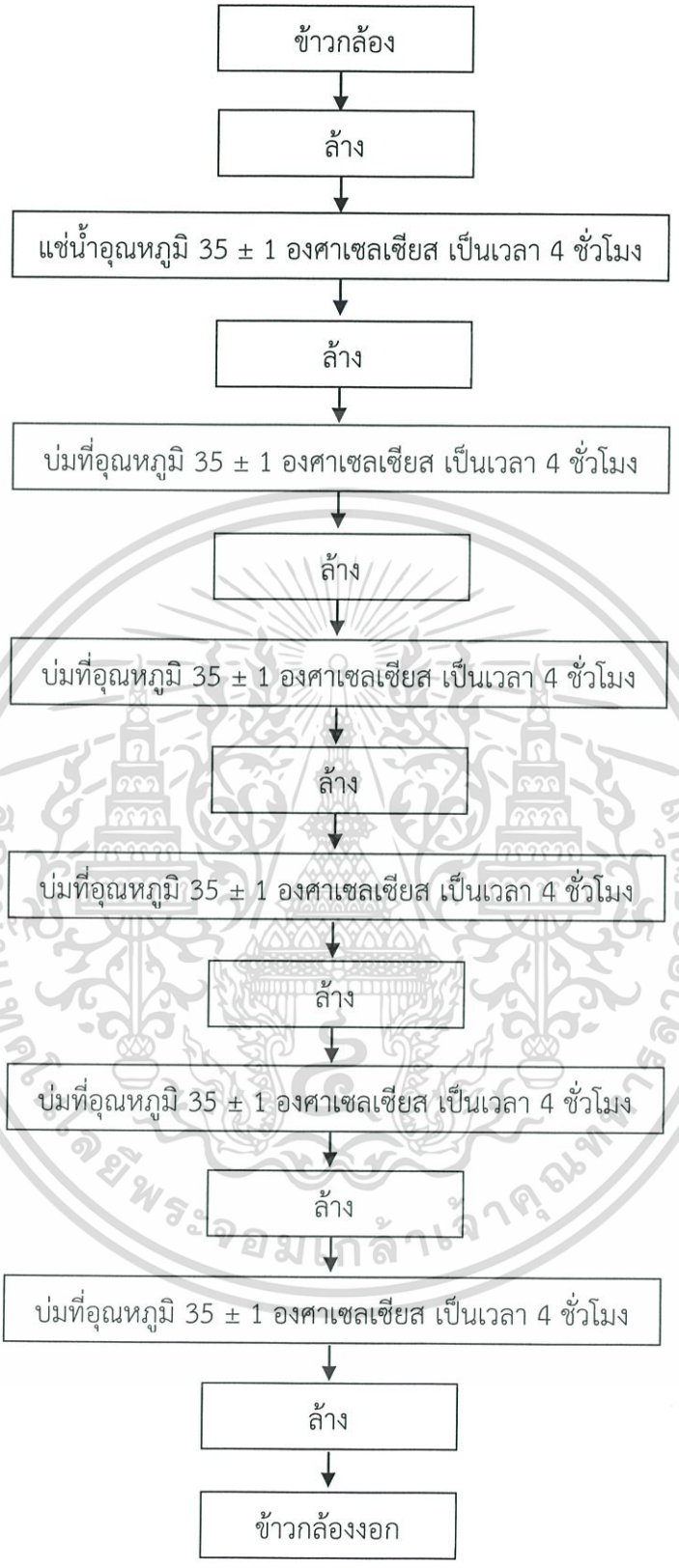
1) ศึกษาการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์

2) เลือกภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม คือ Ladder diagram

3) เขียนโปรแกรมคำสั่ง (Ladder diagram) ให้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกทำงานตามกระบวนการล้าง การแช่ และการบ่ม โดยโปรแกรมมีขั้นตอนการทำงานดังนี้ ข้าวกล้องถูกแช่น้ำที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส จนครบเวลา 4 ชั่วโมง และบ่มที่สภาวะ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง โดยมีการล้างข้าวกล้องทุก ๆ 4 ชั่วโมง

ซึ่งกระบวนการเพาะข้าวกล้องงอกเป็นเวลารวม 24 ชั่วโมง เครื่องเพาะข้าวกล้องงอกแบบต่อเนื่องควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์มีกระบวนการทำงานดังรูปที่ 3.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 กระบวนการเพาะข้าวกล้องงอกของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การทดสอบสมรรถนะของการใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก

3.3.1 อัตราการไหลของน้ำเข้าห้องเพาะ

ปั๊มน้ำผ่านวาล์วน้ำเข้าห้องเพาะ (โซลินอยด์วาล์ว 1) ดังรูปที่ 3.6 เป็นเวลา 1 นาที วัดปริมาตรน้ำด้วยกระบอกตวง คำนวณอัตราการไหลจากปริมาตรน้ำต่อเวลา ในหน่วยลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

3.3.2 อัตราการระบายน้ำออกจากห้องเพาะ

ระบายน้ำผ่านวาล์วระบายออกจากห้องเพาะ (โซลินอยด์วาล์ว 3) ดังรูปที่ 3.6 เป็นเวลา 1 นาที วัดปริมาตรน้ำด้วยกระบอกตวง คำนวณอัตราการไหลจากปริมาตรน้ำต่อเวลา ในหน่วยลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

3.3.3 การทดสอบประสิทธิภาพของการพ่นละอองน้ำ

1) อัตราการพ่นละอองน้ำ

ปั๊มน้ำผ่านวาล์วพ่นละอองน้ำในห้องเพาะ (โซลินอยด์วาล์ว 2) ซึ่งภายในห้องเพาะของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกมีหัวพ่นละอองน้ำจำนวน 9 ชิ้น ดังรูปที่ 3.6 เป็นเวลา 5 นาที วัดปริมาตรน้ำด้วยกระบอกตวง คำนวณอัตราการไหลจากปริมาตรน้ำต่อเวลา ในหน่วยลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

2) ความสามารถในการเพิ่มปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเพาะ

ปั๊มน้ำเข้าห้องเพาะที่ระดับน้ำในกระบวนการบ่ม เปิดให้ฮีตเตอร์และปั๊มน้ำผ่านวาล์วพ่นละอองน้ำตลอดเวลา จดบันทึกค่าปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ทุก ๆ 2 นาที เพื่อหาปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ที่เครื่องเพาะข้าวกล้องงอกสามารถเพิ่มขึ้นได้และเวลาที่ใช้

3.3.4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศ และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศใน ห้องเพาะ กรณีที่ไม่มีตัวอย่างข้าวกล้อง

ใช้ PLC ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก ให้เกิดกระบวนการล้าง การแช่และการบ่ม ดังแสดงในรูปที่ 3.16 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง บันทึกค่าอุณหภูมิของน้ำและอากาศ และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ทุกๆ 30 นาที ตลอดกระบวนการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก

3.3.5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศ และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเพาะ กรณีที่มีตัวอย่างข้าวกล้อง

นำข้าวกล้องที่กะเทาะแล้วมาจำนวน 300 กรัม ใช้ PLC ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก ให้เกิดกระบวนการล้าง การแช่และการบ่ม ดังแสดงในรูปที่ 3.16 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง บันทึกค่าอุณหภูมิของน้ำและอากาศ และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ทุก ๆ 30 นาที ตลอดกระบวนการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก

3.3.6 อัตราการงอกของข้าวกล้อง (Germination rate)

1) นำข้าวกล้องเต็มเมล็ด 300 กรัม มาผ่านกระบวนการเพาะงอก โดยทำการเพาะข้าวกล้องงอกด้วย 2 วิธี คือ ปฏิบัติตามวิธีห้องปฏิบัติการ (Laboratory-scale) และเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกแบบต่อเนื่องควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

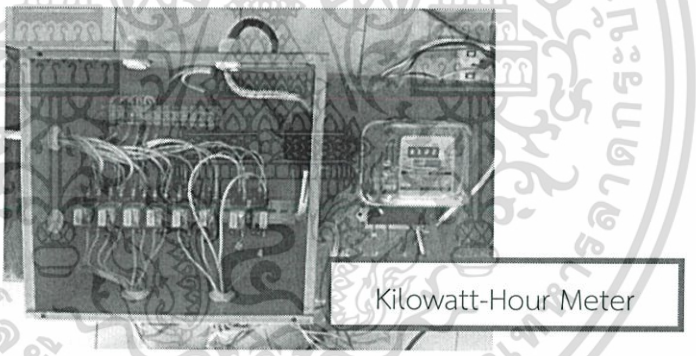
2) สุ่มข้าวกล้องที่ผ่านกระบวนการเพาะงอก 3 ครั้ง ครั้งละประมาณ 5 กรัม หาอัตราการงอกเฉลี่ยด้วยสมการที่ 3.1 กำหนดความยาวของจมูกข้าวกล้องอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 1 มิลลิเมตร (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติกระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2555)

$$\text{อัตราการงอก (\%)} = \frac{\text{จำนวนเมล็ดข้าวกล้องที่งอก}}{\text{จำนวนเมล็ดข้าวกล้องที่สุ่มมา}} \times 100\% \qquad (3.1)$$

3) เปรียบเทียบอัตราการงอกที่ได้จากการเพาะข้าวกล้องงอก 2 วิธี

3.3.7 ปริมาณไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในการควบคุมและกระบวนการผลิตข้าวกล้องงอก

1) ดาวน์โหลดโปรแกรมคำสั่ง เข้าชุดอุปกรณ์ PLC
2) ต่อสาย output จากชุดอุปกรณ์ PLC ไปควบคุมอุปกรณ์
3) ต่อไฟหลักเข้ากับมิเตอร์ไฟฟ้า (Kilowatt-Hour Meter) เพื่อวัดปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิตข้าวกล้องงอก ดังรูปที่ 3.17
4) นำข้าวกล้องที่ผ่านการกะเทาะเปลือกแล้วมา 300 กรัม ห่อด้วยผ้าขาวบาง วางบนถาดในเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก
5) เปิดสวิตช์ชุดอุปกรณ์ ให้เครื่องเพาะข้าวกล้องงอกทำงานจากการควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง บันทึกค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้



รูปที่ 3.17 มิเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้วัดปริมาณไฟฟ้า

3.4 การทดสอบคุณภาพของข้าวกล้องงอก

เตรียมข้าวกล้องงอกด้วยการปฏิบัติตามวิธีห้องปฏิบัติการ และการใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก เพื่อใช้สำหรับการทดสอบคุณภาพของข้าวกล้องงอก ดังนี้

3.4.1 ปริมาณสารกาบาในข้าวกล้องงอก

นำข้าวกล้องงอกที่เตรียมไว้ ไปอบแห้งด้วยเครื่องอบลมร้อนที่ 45 องศาเซลเซียส จนมีความชื้นประมาณ 12 %wb แล้วนำไปวิเคราะห์ปริมาณกาบาด้วย HPLC (High Performance Liquid Chromatography) (มกษ.4003, 2555) โดยศูนย์ปฏิบัติการวิจัยและทดสอบอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

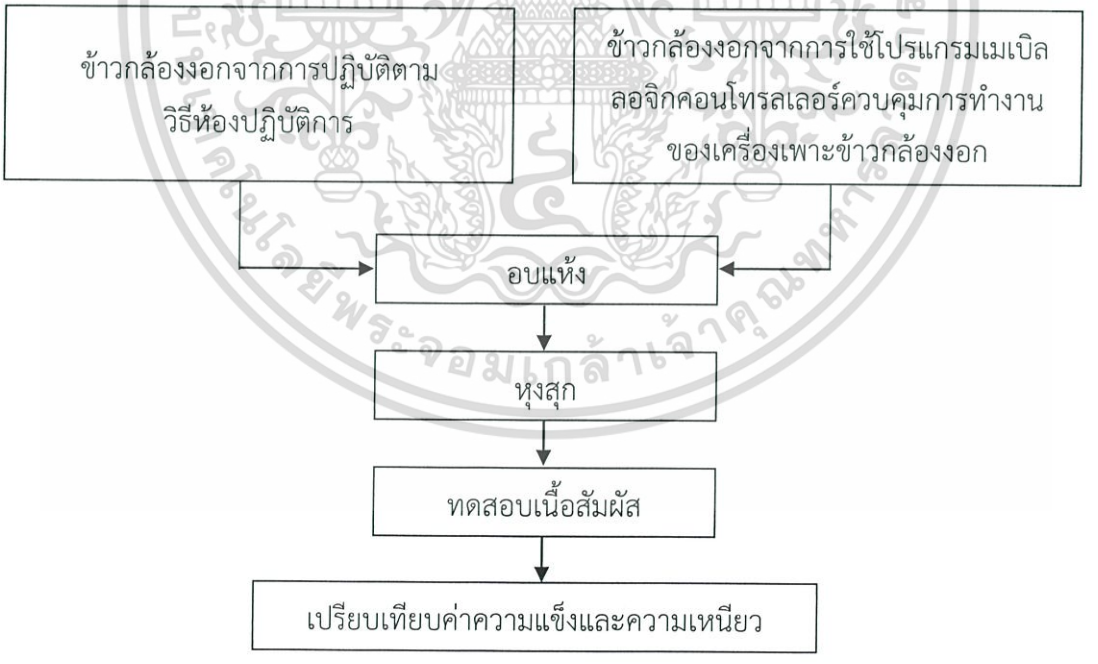
3.4.2 ปริมาณจุลินทรีย์มาตรฐานในข้าวกล้องงอก

วิเคราะห์หาปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่มีชีวิตทั้งหมด ของข้าวกล้องงอกที่ได้จากการปฏิบัติตามวิธีห้องปฏิบัติการและการใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก โดยการใช้ Butterfield's phosphate – buffered dilution water เตรียมสารละลายตัวอย่างให้ได้ระดับความเจือจางที่เหมาะสม และทดสอบการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ในอาหาร PCA นับจำนวนโคโลนี คำนวณและรายงานผลเป็น โคโลนีต่อกรัม (FDA BAM, 2001)

3.4.3 คุณภาพของข้าวกล้องงอกหุงสุก

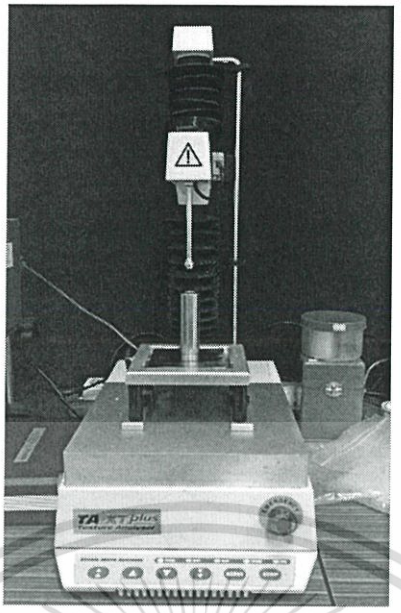
หุงข้าวกล้องงอกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า (Sharp Ksh - 215) โดยใส่ข้าวกล้องงอกต่อน้ำที่อัตราส่วน 1:1.2 ในหม้อหุงข้าวแล้วกดปุ่มหุง (Cook) รอจนหุงข้าวเสร็จ แล้วปล่อยทิ้งไว้ในหม้อหุงข้าวต่ออีก 10 นาที เมื่อครบเวลานำข้าวมาใส่ในกล่องตัวอย่าง เพื่อนำไปวิเคราะห์ค่าความแข็งและความเหนียวของข้าวกล้องงอก ด้วยการทดสอบ Back extrusion test ดังกระบวนการทดสอบที่แสดงในรูป 3.18

ทำการทดสอบ ด้วยเครื่อง Texture Analysis รุ่น XT.plus ด้วยชุดเครื่องมือทดลองทรงกระบอกกลวงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร และหัวกดรูปทรงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.19 โดยตั้งระยะความสูงของหัวกด 100 มิลลิเมตร สั่งให้กดลง 99 มิลลิเมตร เคลื่อนที่ด้วยความเร็วในการกด 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการถอนหัววัดขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยชั่งข้าวที่อยู่ในกล่องตัวอย่างครั้งละ 3 กรัม มาใส่ลงในชุดทดสอบ Back extrusion test ทรงกระบอกโดยขณะที่ใส่ข้าวลงไปห้ามกดเมล็ดข้าว (ปานมนัส และคณะ, 2555) นำข้อมูลมาวิเคราะห์ทางสถิติค่าที่ได้จากการวัด



รูปที่ 3.18 กระบวนการทดสอบเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องงอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 เครื่อง Texture Analyzer

3.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์โดยแสดงข้อมูลด้วยค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 วิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างวิธีการเพาะข้าวกล้องงอกด้วยวิธี Independent-sample T Test โดยใช้โปรแกรม SPSS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลอง

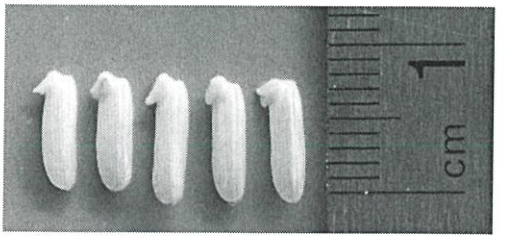
4.1 ผลการทดลองเบื้องต้น

จากการทดลองเพาะข้าวกล้องงอกด้วยวิธีห้องปฏิบัติการ โดยแช่ข้าวกล้องในน้ำอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และบ่มที่สภาวะอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง และทำการล้างข้าวกล้องทุก ๆ 4 ชั่วโมง

ข้าวกล้องเริ่มต้นเป็นข้าวกล้องเต็มเมล็ดที่ไม่มีส่วนใดหักซึ่งมีจมูกข้าว ดังรูปที่ 4.1 และเมื่อข้าวกล้องได้รับน้ำเข้าไปจากการแช่น้ำ ทำให้ขบวนการสังเคราะห์ต่าง ๆ ภายในเซลล์เริ่มทำงาน สังเคราะห์สารที่จำเป็นต่อการทำงานของเซลล์ และนำไปใช้สำหรับการเจริญเติบโตของจมูกข้าว (นงนุช, 2555) ข้าวกล้องที่แช่น้ำเป็นเวลา 4 ชั่วโมง มีลักษณะทางกายภาพดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งยังไม่มีการเจริญเติบโตของจมูกข้าว และเมื่อบ่มข้าวกล้องต่อที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง ทำให้จมูกข้าวกล้องเจริญเติบโตยาวออกมาประมาณ 0.5 – 1 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.3

รูปที่ 4.1 ข้าวกล้องเริ่มต้น

รูปที่ 4.2 ข้าวกล้องหลังผ่านการแช่น้ำเป็นเวลา 4 ชั่วโมง



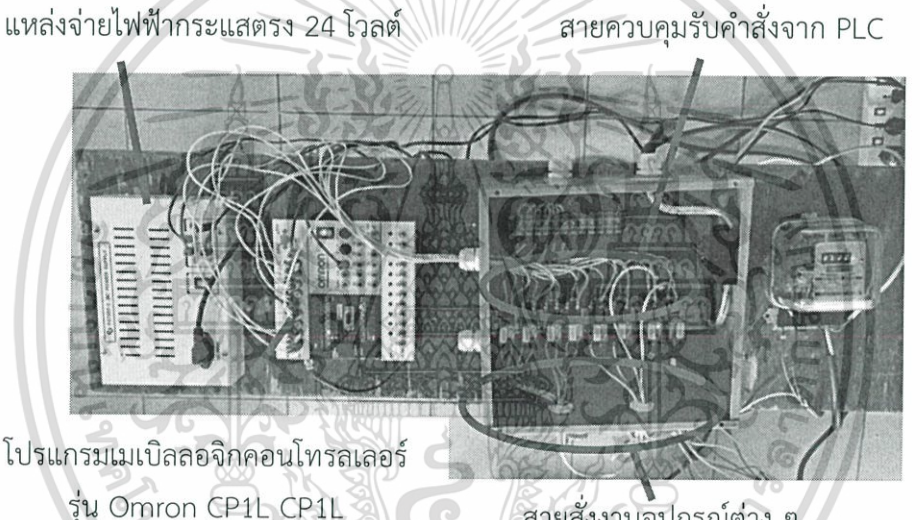
รูปที่ 4.3 ข้าวกล้องงอก หลังผ่านกระบวนการบ่มเป็นเวลา 20 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ระบบควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์

การเตรียมชุดควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ โดยดาวน์โหลดโปรแกรมคำสั่ง เข้าชุดอุปกรณ์โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ และต่อสายไฟควบคุมจากชุดอุปกรณ์โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ไปควบคุมอุปกรณ์ เครื่องเพาะข้าวกล้องงอกทำงานตามโปรแกรมคำสั่ง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชุดควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ ดังรูปที่ 4.4

หลักการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก เริ่มจากนำข้าวกล้องเต็มเมล็ดใส่ในถาดบรรจุข้าวกล้อง และห่อข้าวกล้องด้วยผ้าขาวบาง ปิดฝาถาดบรรจุข้าวกล้อง แล้วนำไปใส่ในเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก ปิดประตูห้องเพาะให้สนิท และกดสวิตช์เริ่มต้นการทำงานที่โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.5

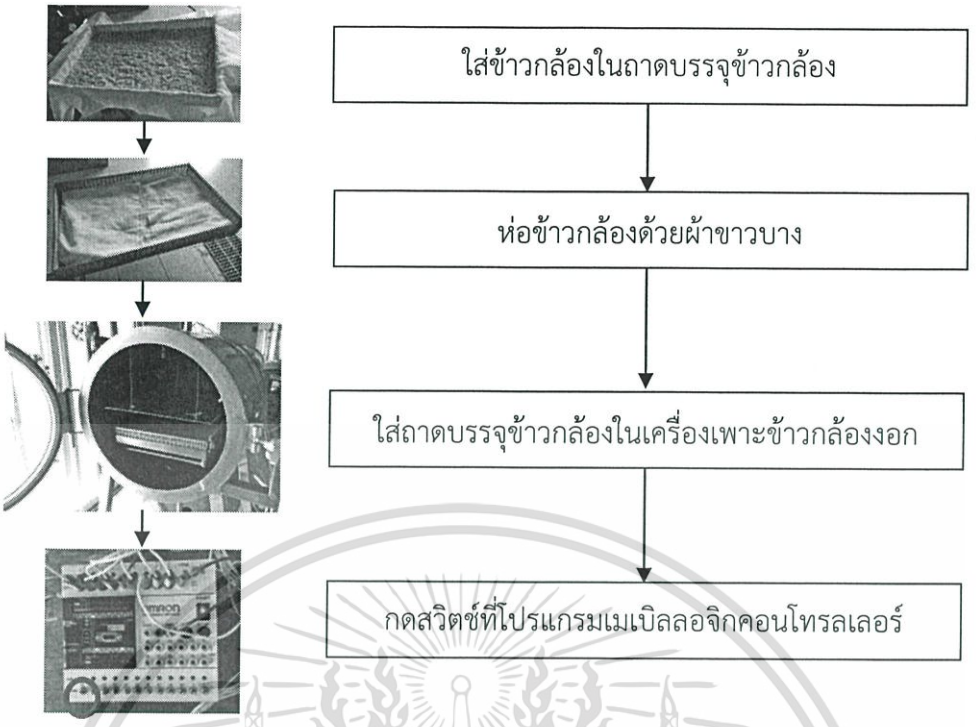


รูปที่ 4.4 ชุดควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์

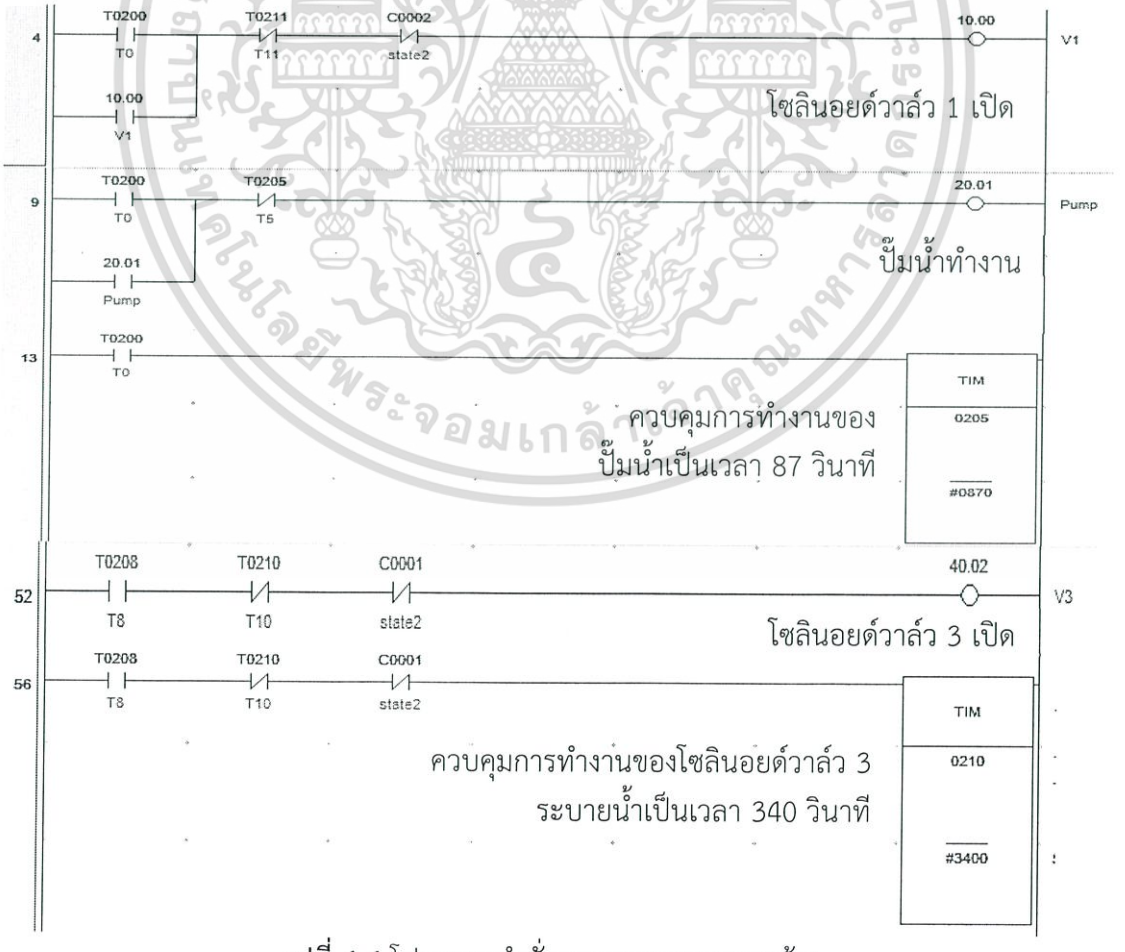
โปรแกรมคำสั่งควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ ประกอบด้วยขั้นตอนการทำงานของกระบวนการล้าง การแช่ และการบ่ม

1) กระบวนการล้าง มีขั้นตอนการทำงาน ดังนี้
   (1) โซลินอยด์วาล์ว 1 เปิด
   (2) โซลินอยด์วาล์ว 2, โซลินอยด์วาล์ว 3 และโซลินอยด์วาล์ว 4 ปิด
   (3) ปั๊มน้ำทำงานเป็นเวลา 87 วินาที ให้มีระดับน้ำท่วมถาดข้าวกล้อง
   (4) ปั๊มน้ำหยุดการทำงาน
   (5) โซลินอยด์วาล์ว 3 เปิด เพื่อระบายน้ำออกจากห้องเพาะ เป็นเวลา 340 วินาที
   (6) โซลินอยด์วาล์ว 3 ปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 หลักการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก



รูปที่ 4.6 โปรแกรมคำสั่งควบคุมกระบวนการล้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) กระบวนการแช่ มีลำดับการทำงาน ดังนี้

(1) โซลินอยด์วาล์ว 1 เปิด

(2) โซลินอยด์วาล์ว 2, โซลินอยด์วาล์ว 3 และโซลินอยด์วาล์ว 4 ปิด

(3) ปั๊มน้ำทำงาน เป็นเวลา 87 วินาที ให้น้ำท่วมถาดบรรจุข้าวกล้อง

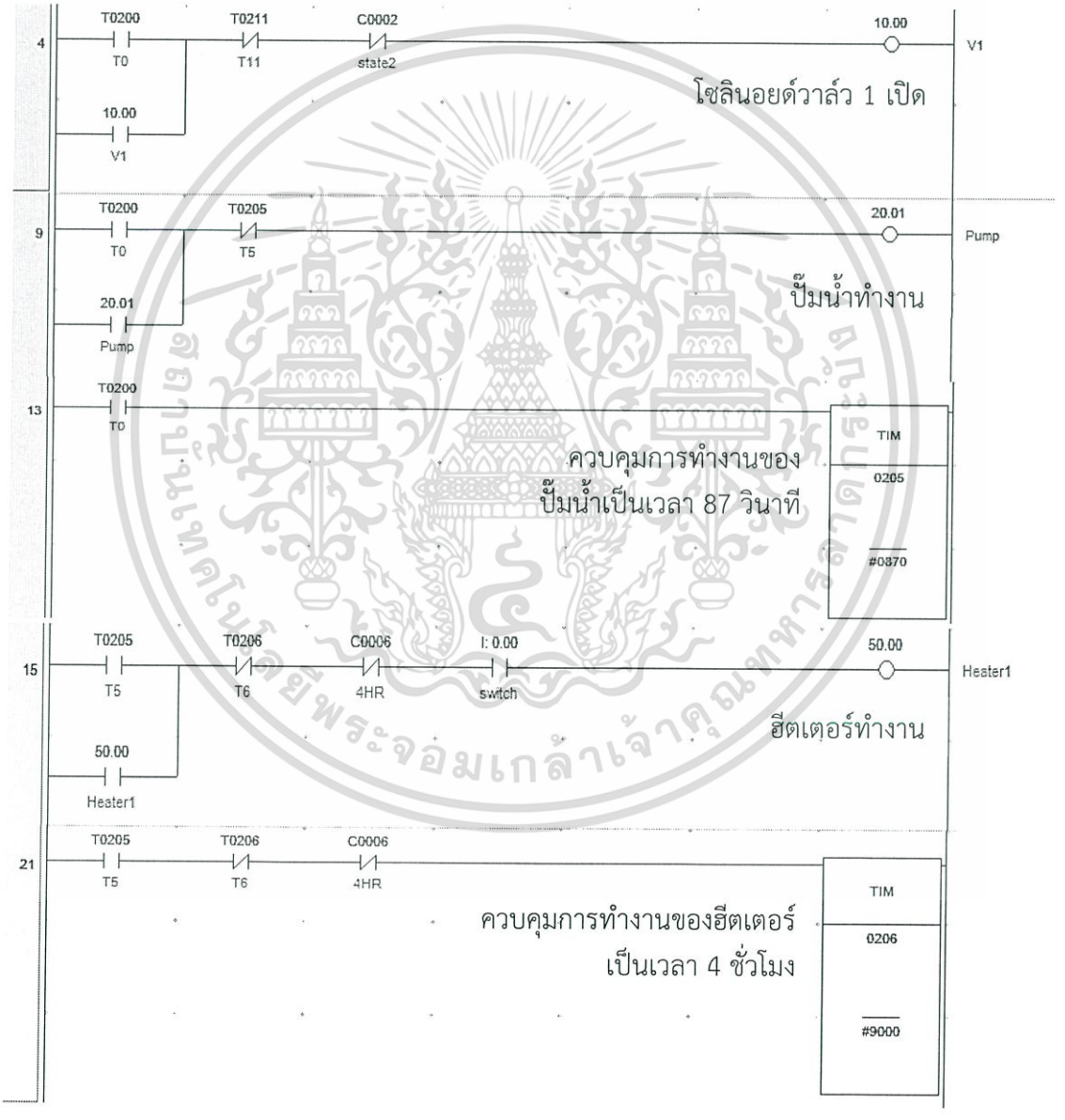
(4) ปั๊มน้ำหยุดการทำงาน

(5) ฮีตเตอร์ทำงาน เพื่อควบคุมอุณหภูมิน้ำที่ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

(6) ฮีตเตอร์หยุดการทำงาน

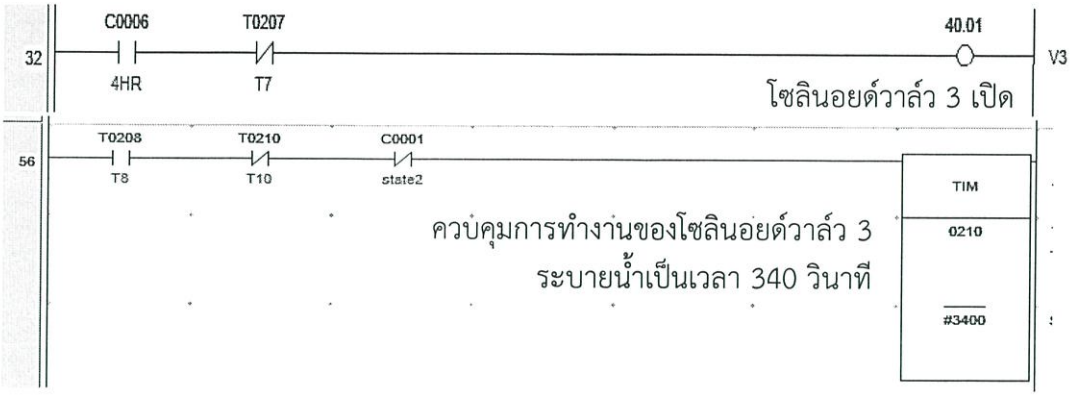
(7) โซลินอยด์วาล์ว 3 เปิด เพื่อระบายน้ำออกจากห้องเพาะ เป็นเวลา 340 วินาที

(8) โซลินอยด์วาล์ว 3 ปิด



รูปที่ 4.7 โปรแกรมคำสั่งควบคุมกระบวนการแช่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 (ต่อ) โปรแกรมคำสั่งควบคุมกระบวนการแช่

3) กระบวนการบ่ม มีการทำงานตามขั้นตอน ดังนี้

(1) โซลินอยด์วาล์ว 1 เปิด

(2) โซลินอยด์วาล์ว 2, โซลินอยด์วาล์ว 3 และโซลินอยด์วาล์ว 4 ปิด

(3) ปั๊มน้ำทำงาน ให้มีระดับน้ำต่ำกว่าถาดบรรจุข้าวกล้อง เป็นเวลา 30 วินาที

(4) ปั๊มน้ำหยุดการทำงาน

(5) ฮีตเตอร์ทำงาน เพื่อควบคุมอุณหภูมิน้ำที่ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง , โซลินอยด์วาล์ว 4 เปิด, โซลินอยด์วาล์ว 1 และโซลินอยด์วาล์ว 3 ปิด

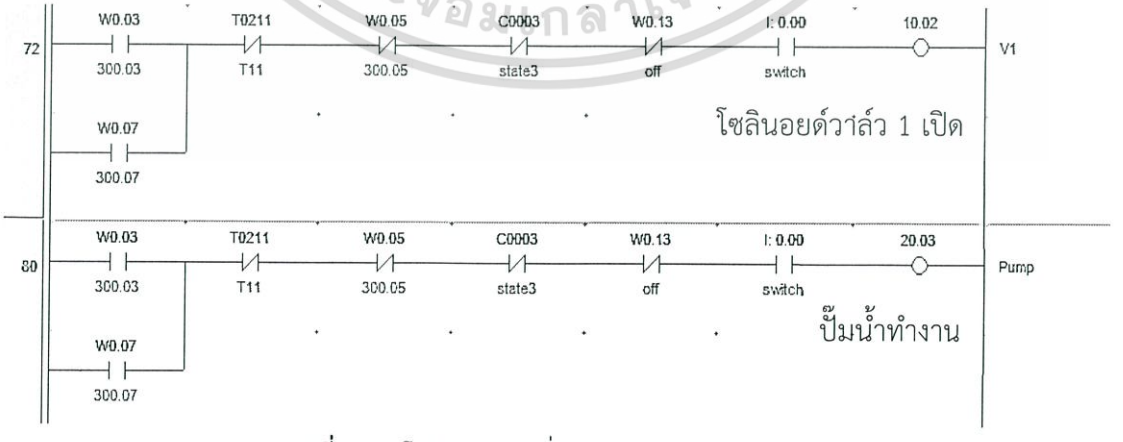
(6) โซลินอยด์วาล์ว 2 และปั๊มน้ำ เปิดทำงานเป็นเวลา 35 นาที เมื่อฮีตเตอร์เริ่มทำงาน และหยุดทำงานเป็นเวลา 25 นาที

(7) โซลินอยด์วาล์ว 2 และปั๊มน้ำ เปิดทำงาน 10 นาที และหยุดทำงานเป็นเวลา 25 นาที จนครบเวลา 4 ชั่วโมง ทำการพ่นละอองน้ำเพื่อเพิ่มปริมาณความชื้นในอากาศ

(8) ฮีตเตอร์หยุดการทำงาน โซลินอยด์วาล์ว 2 และ 4 ปิด

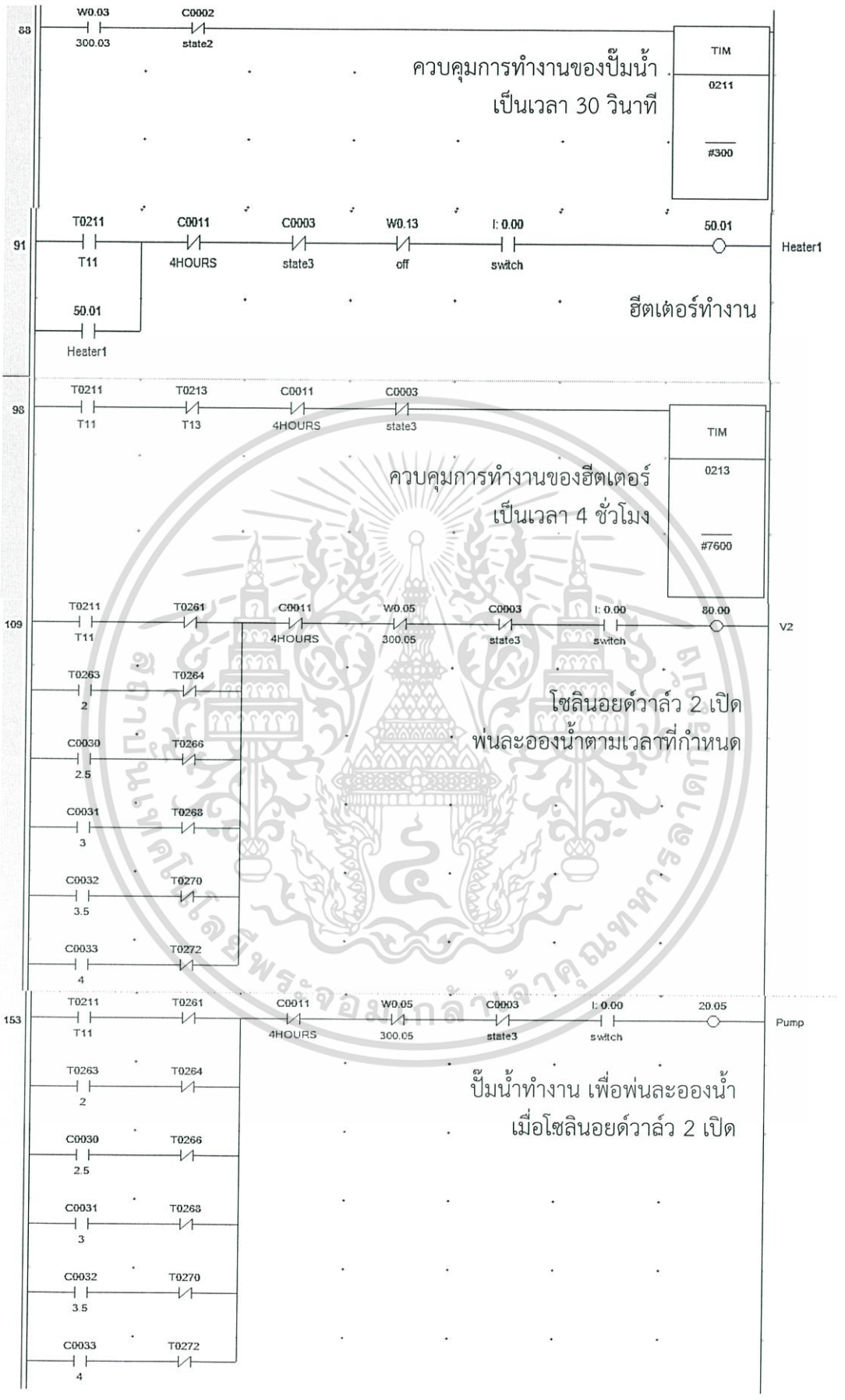
(9) โซลินอยด์วาล์ว 3 เปิด เพื่อระบายน้ำออกจากห้องเพาะ

(10) โซลินอยด์วาล์ว 3 ปิด



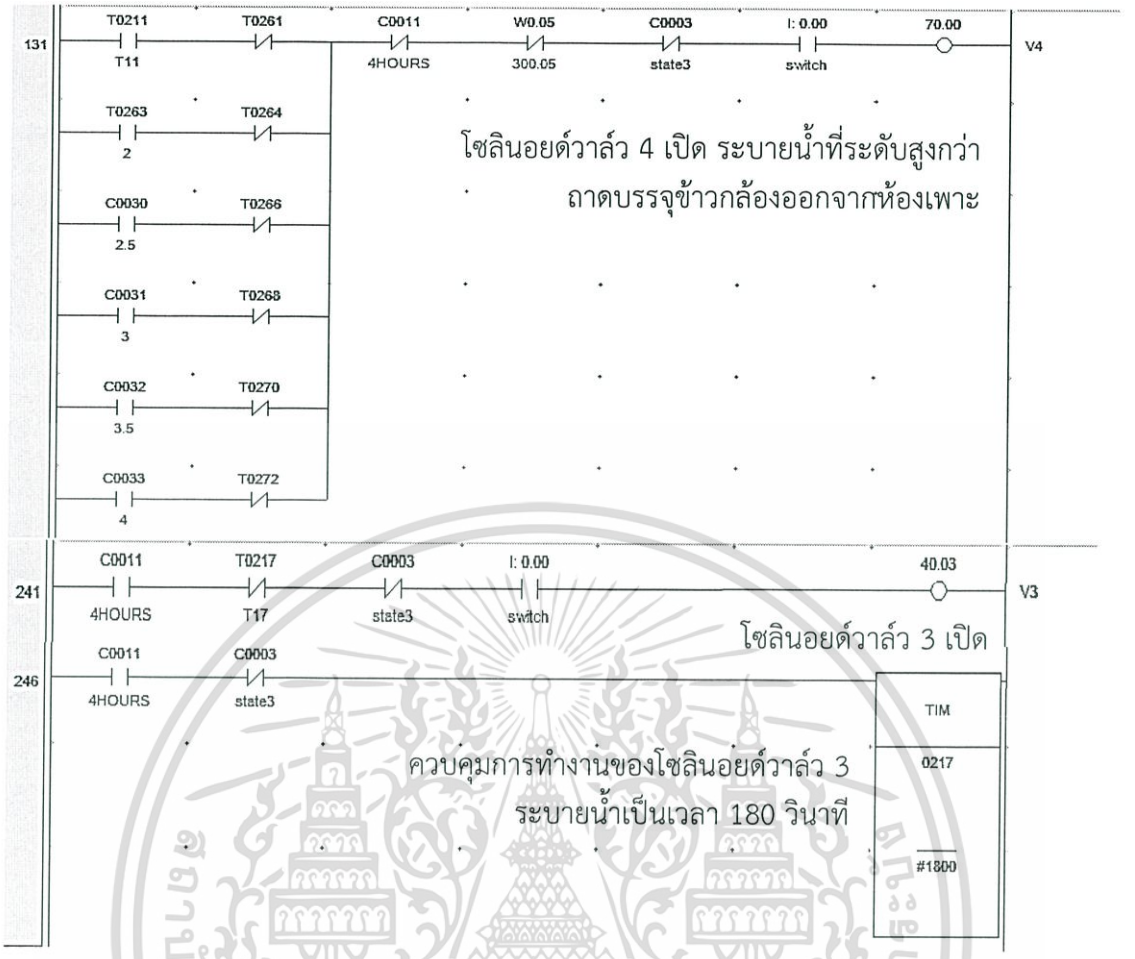
รูปที่ 4.8 โปรแกรมคำสั่งควบคุมกระบวนการบ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 (ต่อ) โปรแกรมคำสั่งควบคุมกระบวนการบ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 (ต่อ) โปรแกรมคำสั่งควบคุมกระบวนการบ่ม

การออกแบบระบบควบคุมเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์นี้ สามารถพัฒนาและนำมาใช้ในระบบอุตสาหกรรมเหมือนระบบเพาะงอกข้าวมอลต์ที่บริษัท Kaspar Schulz ทำได้ โดยมีการควบคุมระบบน้ำ ระบบลำเลียง เวลาที่ใช้ในกระบวนการเพาะ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในถังเพาะ ซึ่งอุปกรณ์ต่าง ๆ ทำงานอัตโนมัติตามคำสั่งของโปรแกรมควบคุม โดยไม่ต้องใช้แรงงานคน

4.3 ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกแบบต่อเนื่องควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์

4.3.1 อัตราการไหลของน้ำเข้าห้องเพาะ

ในการทดสอบปั๊มน้ำผ่านวาล์วน้ำเข้าห้องเพาะของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก พบว่ามีอัตราการไหลของน้ำค่อนข้างคงที่ โดยเฉลี่ย 470.00 ± 1.67 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที อัตราการไหลของน้ำเข้าห้องเพาะเกี่ยวข้องกับขนาดกำลังของปั๊ม ที่สามารถส่งน้ำจากถังบรรจุน้ำไปยังวาล์วเปิดเข้าห้องห้องเพาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

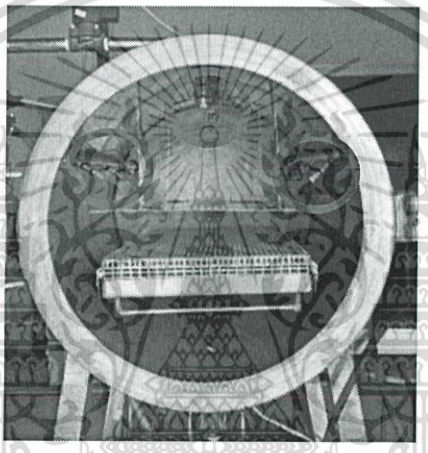
4.3.2 อัตราการระบายน้ำออกจากห้องเพาะ

ในการทดสอบระบายน้ำผ่านวาล์วระบายออกจากห้องเพาะของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก โดยการระบายน้ำอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก มวลน้ำไหลผ่านวาล์วเปิดจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำ พบว่าอัตราการระบายในช่วงแรกค่อนข้างสูงเพราะมีแรงดันน้ำสูง เนื่องจากปริมาณน้ำในห้องเพาะมาก และมีอัตราการระบายน้ำออกจากห้องเพาะเฉลี่ย 139.17 ± 2.17 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

4.3.3 ผลการทดสอบการพ่นละอองน้ำ

1) อัตราการพ่นละอองน้ำ

จากการหาอัตราการพ่นละอองน้ำจากการปั๊มน้ำผ่านหัวพ่นละอองน้ำภายในห้องเพาะของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก ที่มีหัวพ่นละอองน้ำจำนวน 9 ชิ้น พบว่ามีอัตราการพ่นละอองน้ำเฉลี่ย 37.83 ± 0.73 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.9 หัวพ่นละอองน้ำภายในห้องเพาะ

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองหาอัตราการไหลของน้ำเข้าห้องเพาะ, การระบายน้ำออกจากห้องเพาะ และการพ่นละอองน้ำ

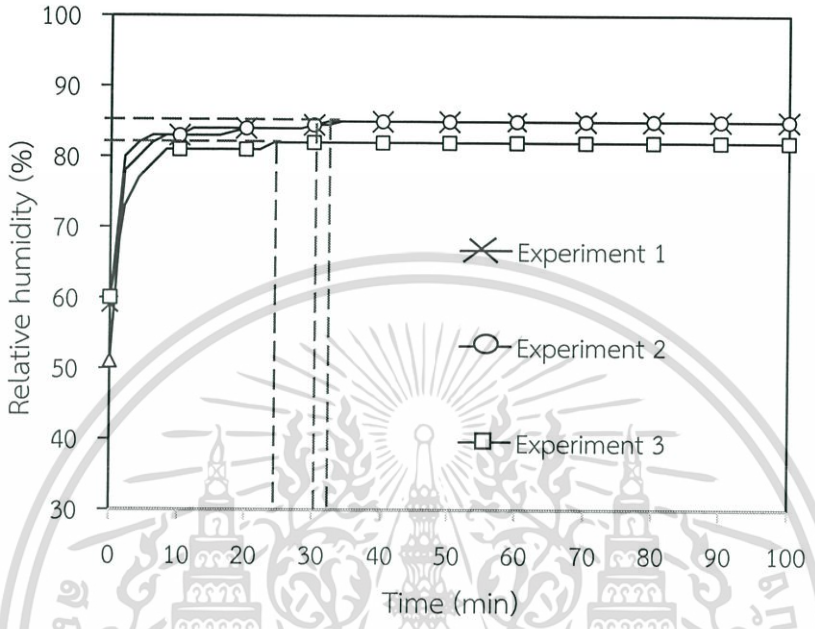
ผลการทดลอง	ค่าเฉลี่ย (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที)
อัตราการไหลของน้ำเข้าห้องเพาะ	470.00 ± 1.67
อัตราการระบายน้ำออกจากห้องเพาะ	139.17 ± 2.17
อัตราการพ่นละอองน้ำ	37.83 ± 0.73

2) ความสามารถในการเพิ่มปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเพาะ

ในการทดลองพ่นละอองน้ำตลอดเวลา ซึ่งเริ่มต้นภายในห้องเพาะมีปริมาณความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วงร้อยละ 50 - 60 พบว่าการพ่นละอองน้ำสามารถเพิ่มปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเพาะได้อยู่ในช่วงร้อยละ 80 - 85 และใช้เวลา 25 - 35 นาที เพื่อทำให้ภายในห้องเพาะมีปริมาณความชื้นสัมพัทธ์สูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ค่าปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเพาะสูงสุดที่การพ่นละอองน้ำสามารถเพิ่มได้ ในแต่ละครั้งมีค่าไม่เท่ากัน อาจเกิดจากสภาพแวดล้อมและช่วงเวลาในแต่ละวัน ที่ทำการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองจึงกำหนดระยะเวลาการพ่นละอองน้ำเริ่มต้นในกระบวนการบ่ม โดยกำหนดให้พ่นละอองน้ำเป็นเวลา 35 นาที เพื่อให้ภายในห้องเพาะมีปริมาณความชื้นสัมพัทธ์สูงที่สุด และหยุดเป็นเวลา 25 นาที หลังจากนั้นพ่นละอองน้ำ 10 นาที และหยุดเป็นเวลา 25 นาที จนครบเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อควบคุมปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ตามต้องการ



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเพาะกับเวลา

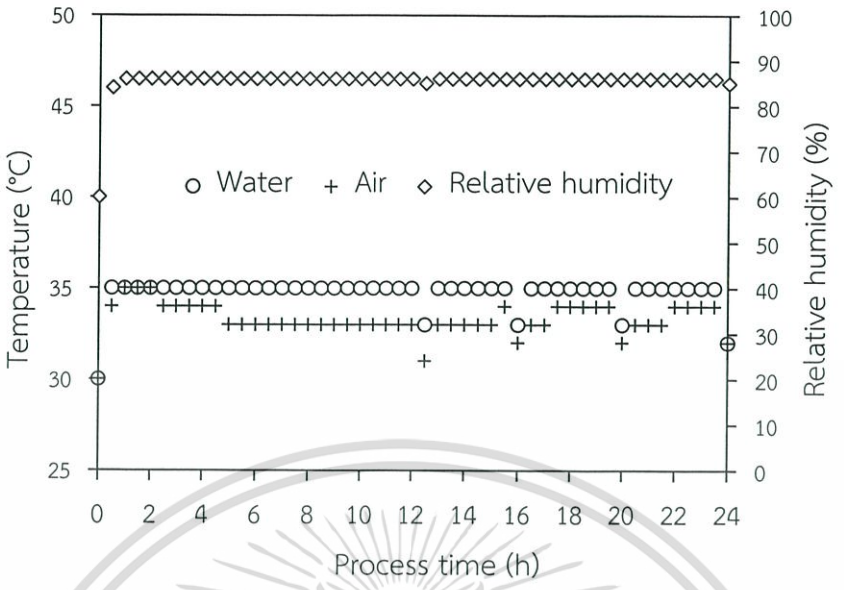
4.3.4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศ และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเพาะ กรณีที่ไม่มีตัวอย่างข้าวกล้อง

จากกราฟรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าสภาวะของอุณหภูมิน้ำในห้องเพาะค่อนข้างคงที่ตลอดกระบวนการ โดยเริ่มต้นน้ำมีอุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส เมื่อเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกทำงาน ทำให้น้ำมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส จากการทำงานของฮีตเตอร์ และในระหว่างกระบวนการเมื่ออุณหภูมิของน้ำในกระบวนการต่ำกว่า 35 องศาเซลเซียส ฮีตเตอร์จะทำงานเพื่อรักษาให้อุณหภูมิน้ำคงที่ตลอดเวลา โดยมีอุณหภูมิของน้ำเฉลี่ยตลอดกระบวนการเพาะข้าวกล้องงอกเป็น 34.66 $\pm$ 0.16 องศาเซลเซียส

สภาวะของอุณหภูมิของอากาศในห้องเพาะ เริ่มต้นอากาศมีอุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส เมื่อเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกเริ่มทำงานอุณหภูมิของอากาศมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 32 – 35 องศาเซลเซียส โดยมีค่าอุณหภูมิของอากาศเฉลี่ยเป็น 33.29 $\pm$ 0.12 องศาเซลเซียส

ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องเพาะเริ่มต้นมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 55 - 60 มีการเปลี่ยนแปลงโดยเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนภายในห้องเพาะมีค่าปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสูงสุด ซึ่งจากการทดลองพบว่าใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง ตั้งแต่เครื่องเพาะข้าวกล้องงอกทำงานในกระบวนการแช่ และหลังจากนั้นภายในห้องเพาะมีค่าปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศค่อนข้างคงที่ตลอด 24 ชั่วโมง โดยพบว่าปริมาณความชื้นสัมพันธ์ของอากาศเฉลี่ยตลอดกระบวนการเพาะเป็นร้อยละ 86.07 $\pm$ 0.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศ และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเพาะ กรณีที่ไม่มีตัวอย่างข้าวกล้อง

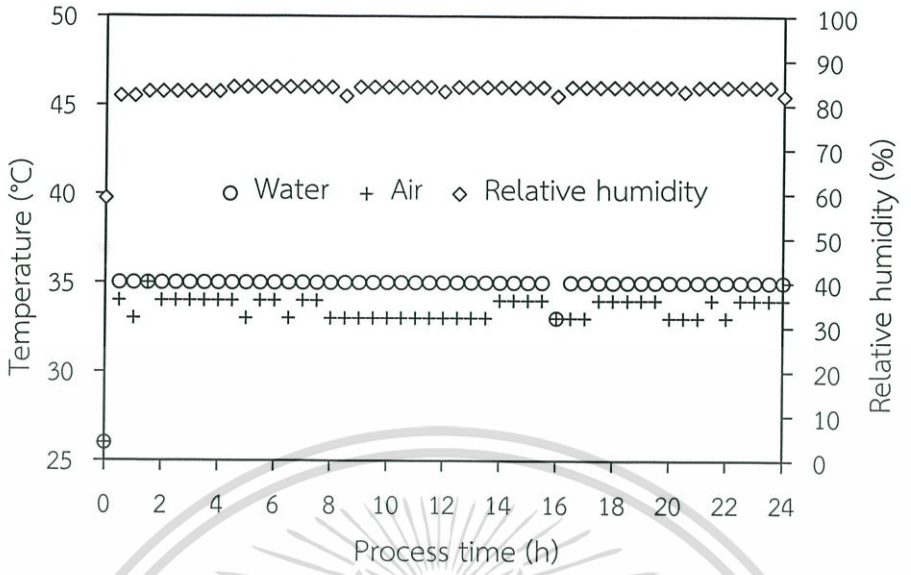
4.3.5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศ และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเพาะ กรณีที่มีตัวอย่างข้าวกล้อง

จากการทดลองพบว่าสภาวะของอุณหภูมิน้ำในห้องเพาะค่อนข้างคงที่ตลอดกระบวนการ 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.12 โดยเริ่มต้นน้ำมีอุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส เมื่อฮีตเตอร์ของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกเริ่มทำงาน ทำให้อุณหภูมิน้ำเพิ่มสูงขึ้นถึง 35 องศาเซลเซียส และรักษาอุณหภูมิน้ำให้คงที่ตลอดกระบวนการเพาะข้าวกล้องงอก พบว่ามีอุณหภูมิของน้ำเฉลี่ยเป็น 34.63 ± 0.16 องศาเซลเซียส

เริ่มต้นกระบวนการเพาะข้าวกล้องงอกมีอุณหภูมิอากาศในห้องเพาะประมาณ 30 องศาเซลเซียส และในระหว่างกระบวนการเพาะข้าวกล้องงอก 24 ชั่วโมง มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศอยู่ในช่วง 32 - 35 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าอุณหภูมิของอากาศเฉลี่ยเป็น 32.82 ± 0.58 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 4.11 และ 4.12 พบว่าค่าอุณหภูมิของอากาศในกรณีมีตัวอย่างข้าวกล้องมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่ากรณีไม่มีตัวอย่างข้าวกล้อง อาจเป็นเพราะมีการถ่ายเทความร้อนบางส่วนให้กับตัวอย่าง

เริ่มต้นในห้องเพาะของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก มีค่าร้อยละปริมาณความชื้นสัมพันธ์ของอากาศอยู่ในช่วง 55 - 60 และมีการเปลี่ยนแปลงโดยเพิ่มสูงขึ้นในช่วงเริ่มต้น ซึ่งใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง ตั้งแต่เครื่องเพาะข้าวกล้องงอกเริ่มทำงาน เพื่อให้ภายในห้องเพาะมีค่าปริมาณความชื้นสัมพัทธ์สูงสุด และตลอดกระบวนการเพาะข้าวกล้องงอก 24 ชั่วโมง มีค่าปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ค่อนข้างคงที่ โดยเฉลี่ยเป็นร้อยละ 83.13 ± 0.03 ซึ่งมีค่าต่ำกว่ากรณีที่ไม่มีตัวอย่างข้าวกล้องในห้องเพาะ อาจเพราะข้าวกล้องมีการดูดซับไอน้ำในอากาศเข้าไปในเมล็ดข้าว เพื่อใช้สำหรับการเจริญเติบโตของจมูกข้าว ทำให้มีปริมาณไอน้ำในอากาศลดลง ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในกรณีมีตัวอย่างข้าวกล้องจึงต่ำกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศ และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเพาะ กรณีที่มีตัวอย่างข้าวกล้อง

ตารางที่ 4.2 สรุปผลการทดลองสภาวะภายในห้องเพาะของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก

สภาวะ	ไม่มีตัวอย่างข้าวกล้อง	มีตัวอย่างข้าวกล้อง
อุณหภูมิน้ำเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)	34.66 ± 0.16 ns	34.63 ± 0.16 ns
อุณหภูมิอากาศเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)	33.29 ± 0.12 ns	32.82 ± 0.58 ns
ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์อากาศเฉลี่ย (ร้อยละ)	86.07 ± 0.25 ns	83.13 ± 0.03 ns

หมายเหตุ : ตัวอักษร ns หมายถึง no significant ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ระหว่างกรณีไม่มีตัวอย่างข้าวกล้องกับมีตัวอย่างข้าวกล้อง

4.3.6 ผลของอัตราการงอกของข้าวกล้อง

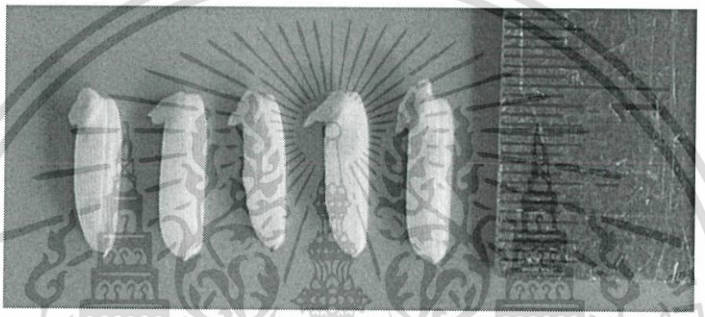
ข้าวกล้องงอกที่ได้จากกระบวนการผลิตด้วยการปฏิบัติตามวิธีห้องปฏิบัติการและการใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก (ระยะเวลาการงอก 24 ชั่วโมง) มีอัตราการงอกเป็นร้อยละ 80.76 ± 7.33 และ 82.32 ± 3.50 ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ รวมทั้งจากการสังเกตลักษณะการเปลี่ยนแปลงภายนอกบริเวณจมูกข้าวกล้องงอกที่ได้จากทั้งสองวิธีมีลักษณะใกล้เคียงกัน (มีความยาวประมาณ 0.5 - 1 มิลลิเมตร) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.13 และ 4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 อัตราการงอกของข้าวกล้องจากวิธีการเพาะ 2 วิธี

วิธีการเพาะข้าวกล้องงอก	อัตราการงอก (ร้อยละ)
ปฏิบัติตามวิธีห้องปฏิบัติการ	80.76 $\pm$ 7.33 ns
การใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก	82.32 $\pm$ 3.50 ns

หมายเหตุ : ตัวอักษร ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ของอัตราการงอก ระหว่างวิธีปฏิบัติตามวิธีห้องปฏิบัติการ กับการใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก



รูปที่ 4.13 ลักษณะทางกายภาพของข้าวกล้องงอกจากการเพาะด้วยการปฏิบัติตามวิธีห้องปฏิบัติการ

รูปที่ 4.14 ลักษณะทางกายภาพของข้าวกล้องงอกจากการเพาะด้วยการใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก

อัตราการงอกของข้าวกล้องจากการเพาะด้วยการใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกสูงกว่าการเพาะด้วยการปฏิบัติตามวิธีห้องปฏิบัติการ อาจเกิดจากเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก มีการพ่นละอองน้ำระหว่างกระบวนการบ่ม ทำให้ในอากาศมีปริมาณความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่าการเพาะด้วยการปฏิบัติตามวิธีห้องปฏิบัติการ ซึ่งส่งผลต่อการงอกของข้าวกล้อง สอดคล้องกับงานวิจัยของ พัชรี และคณะ (2553) ที่พบว่าอัตราการงอกของเมล็ดมีความสัมพันธ์กับกับสภาพแวดล้อม และข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 งอกได้ดีในฤดูฝน ซึ่งมีปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.7 ผลของปริมาณไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในการควบคุมและกระบวนการผลิตข้าวกล้องงอก

ในการทดลองเพาะข้าวกล้องจำนวน 1 กิโลกรัม ด้วยการใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก ตลอดกระบวนการเพาะข้าวกล้องงอกเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง พบว่ามีปริมาณการใช้ไฟฟ้า 2.49 $\pm$ 0.64 กิโลวัตต์ชั่วโมง

4.4 ผลการทดสอบคุณภาพของข้าวกล้องงอก

ในการทดสอบคุณภาพของข้าวกล้องงอก เปรียบเทียบระหว่างข้าวกล้องงอกที่ได้จากการปฏิบัติตามวิธีห้องปฏิบัติการ และการใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก มีผลการทดลองดังนี้

4.4.1 ปริมาณสารกาบาในข้าวกล้องงอก

ในการวิเคราะห์หาปริมาณสารกาบาในข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งแล้วด้วย HPLC พบว่าข้าวกล้องงอกที่ได้จากการใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก มีปริมาณสารกาบาน้อยกว่าข้าวกล้องงอกที่ได้จากการปฏิบัติตามวิธีห้องปฏิบัติการเล็กน้อย โดยมีปริมาณสารกาบาเฉลี่ย 2.46 และ 2.89 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมข้าวกล้องงอก ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ปริมาณสารกาบาในข้าวกล้องงอก

วิธีการเพาะข้าวกล้องงอก	ปริมาณสารกาบา (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม)
ปฏิบัติตามวิธีห้องปฏิบัติการ	2.89
การใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก	2.46

4.4.2 ปริมาณจุลินทรีย์มาตรฐานในข้าวกล้องงอก

จากตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าข้าวกล้องงอกที่ผลิตได้จากการเพาะด้วยการใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก มีปริมาณจุลินทรีย์น้อยกว่าข้าวกล้องงอกที่ได้จากกระบวนการผลิตด้วยการปฏิบัติตามวิธีห้องปฏิบัติการ ประมาณ 3 เท่า แสดงให้เห็นว่าเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกมีประสิทธิภาพในการทำความสะอาด และสามารถลดการสะสมของเชื้อจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการเพาะได้ เนื่องจากมีการล้างและเปลี่ยนน้ำในกระบวนการใหม่ทุก ๆ 4 ชั่วโมง ต่างจากการผลิตด้วยการปฏิบัติตามวิธีห้องปฏิบัติการที่ไม่มีการเปลี่ยนน้ำในกระบวนการ

สอดคล้องกับงานวิจัยของสุนัน (2556) ที่ได้ออกแบบและสร้างเครื่องผลิตข้าวกล้องงอกขนาดเล็กในครัวเรือน ซึ่งตลอดกระบวนการเพาะข้าวกล้องงอกมีการพ่นละอองน้ำล้างข้าวกล้องทุก 4 - 6 ชั่วโมง เพื่อลดปริมาณจุลินทรีย์ ซึ่งการล้างข้าวกล้องระหว่างกระบวนการเพาะและการเปลี่ยนน้ำทุก 4 – 6 ชั่วโมง เป็นคำแนะนำของการปฏิบัติที่ดีสำหรับการผลิตข้าวกล้องงอก ในมาตรฐานสินค้าเกษตร (มกษ. 4404-2555)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดของข้าวกล้องงอกที่ได้จากการเพาะ 2 วิธี

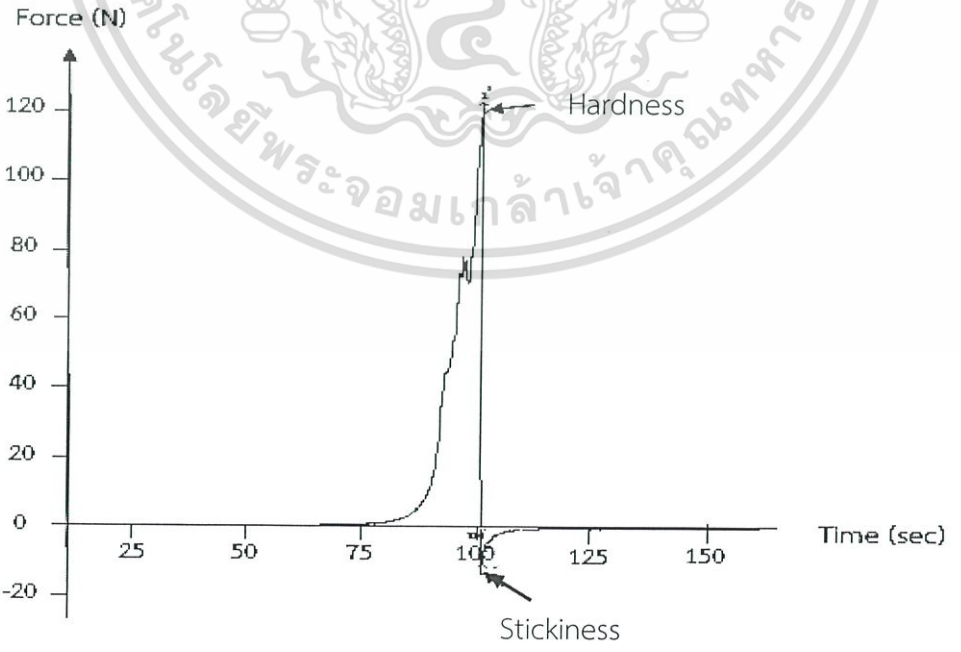
วิธีการเพาะข้าวกล้องงอก	ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (โคโลนีต่อกรัม)
ปฏิบัติตามวิธีห้องปฏิบัติการ	6.4×10^9
การใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก	2.1×10^9

4.4.3 คุณภาพของข้าวกล้องงอกหุงสุก

ในการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของข้าวกล้องงอกหุงสุก ที่หุงข้าวกล้องงอกต่อน้ำด้วยอัตราส่วน 1:1.2 ในหม้อหุงข้าว และนำมาทดสอบด้วยวิธี Back extrusion test เพื่อวิเคราะห์ค่าความแข็งและความเหนียวของข้าวกล้องงอกหุงสุก ที่ได้จากกระบวนการผลิตด้วยการปฏิบัติตามวิธีห้องปฏิบัติการ และการใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 4.15

พบว่าข้าวกล้องงอกหุงสุกที่ได้จากกระบวนการผลิตด้วยการปฏิบัติตามวิธีห้องปฏิบัติการมีค่าความแข็ง 93.94 ± 10.03 นิวตัน และค่าความเหนียว 13.52 ± 2.24 นิวตัน ส่วนข้าวกล้องงอกหุงสุกที่ได้การใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก มีค่าความแข็ง 90.17 ± 6.45 นิวตัน และมีค่าความเหนียว 12.18 ± 2.13 นิวตัน ดังแสดงในตารางที่ 4.6 ซึ่งจากการวิเคราะห์ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

แสดงให้เห็นว่าข้าวกล้องงอกที่ได้จากการใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก มีเนื้อสัมผัสที่ไม่แตกต่างจากข้าวกล้องงอกที่ผลิตด้วยการปฏิบัติตามวิธีห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลา ของค่าความแข็ง และความเหนียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ค่าความแข็งและความเหนียวของข้าวกล้องงอกหุงสุก

วิธีการเพาะข้าวกล้องงอก	ความแข็ง (นิวตัน)	ความเหนียว (นิวตัน)
ปฏิบัติตามวิธีห้องปฏิบัติการ	93.94 ± 10.03 ns	13.52 ± 2.24 ns
การใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก	90.17 ± 6.45 ns	12.18 ± 2.13 ns

หมายเหตุ : ตัวอักษร ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ของค่าความแข็งและความเหนียว ระหว่างวิธีปฏิบัติตามวิธีห้องปฏิบัติการ กับการใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบระบบควบคุมเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอลโทรลเลอร์ ทดสอบสมรรถนะของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก และคุณภาพของข้าวกล้องงอก จึงสรุปผลการทดลองได้ ดังนี้

1) ระบบควบคุมโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอลโทรลเลอร์ สามารถควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกให้เกิดกระบวนการเพาะข้าวกล้องงอก และสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องทดแทนการใช้แรงงานคนได้

2) การใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกสามารถควบคุมสภาวะที่เป็นปัจจัยสำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิของน้ำ อุณหภูมิของอากาศ และความชื้นสัมพันธ์ของอากาศ ของกระบวนการผลิตข้าวกล้องงอกได้คงที่

3) อัตราการงอกของข้าวกล้องที่ได้จากการควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ไม่แตกต่างจากวิธีห้องปฏิบัติการ

4) ปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอก ค่าความแข็ง และค่าความเหนียวของข้าวกล้องงอกหุงสุก ที่ได้จากการใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกไม่แตกต่างจากตัวอย่างข้าวที่ได้จากวิธีห้องปฏิบัติการ

5) การใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก มีประสิทธิภาพในการทำความสะอาด และสามารถลดการสะสมของเชื้อจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการเพาะข้าวกล้องงอกได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรทดลองหาสภาวะการเพาะข้าวกล้องงอกที่ดีที่สุด ในการควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอกด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ เช่น ระยะเวลาของการแช่ และระยะเวลาของการบ่ม

2) ควรศึกษาวิธีการผลิตข้าวกล้องงอกที่มีคุณภาพ และมีปริมาณสารกาบาสูง ให้ได้ข้าวกล้องงอกปริมาณมาก สำหรับการผลิตในระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก กลาง และใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตร และอาหารแห่งชาติ. 2555, **ข้าวกล้องงอก**.

กระทรวงพลังงาน. 2553. การอนุรักษ์พลังงานสำหรับเครื่องสูบน้ำ. **คู่มือรับผิดชอบด้านพลังงาน**, หน้า 1-11.

ชาญวิทย์ ศรีเพ็ญชัย, อภิชาต อาจนาเสียว และทินกร คำแสน. 2552. **เครื่องผลิตข้าวเปลือกงอก.** ขอนแก่น : คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

จักรพงษ์ โสวะพันธ์, กมลวรรณ แจ้งชัด และพัชรี ตั้งตระกูล. 2554. **ผลของสภาพการงอกต่อสมบัติความหนืดและปริมาณ GABA ของแป้งข้าวกล้องงอก ที่ผลิตจากข้าวเปลือก**. กรุงเทพฯ: คณะอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นงนุช วงศ์สินชวน, 2555. **การเพาะข้าวกล้องงอก.** ธรรมชาติบำบัดและสมุนไพร. 33(2): 57-62.

นวภัทรา หนูนาค และ ทวีพล ซื่อสัตย์. 2556. **การวัดและเครื่องมือวัด5Measurement & Instrumentation การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร.** ครั้งที่พิมพ์ 2. กรุงเทพ : มีนเซอร์วิส ซัพพลาย.

บุษยา รัตนสุภา. 2009, **ข้าวกล้องงอก.** [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : www.vcharkarn.com /varticle/39050 (สืบค้นเมื่อ 10มกราคม2560)

ปานมนัส ศิริสมบูรณ์, พิมพ์เพ็ญพรเฉลิมพงศ์ และเอกพงษ์ ชีวิตโสภณ. 2555. การพัฒนาเทคนิคมาตรฐานการวัดเนื้อสัมผัสข้าวสวยเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตข้าวสาร และข้าวแปรรูป. กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

พัชรี ตั้งตระกูล วารุณี วารัญญานนท์ วิภา สุโรจนะเมธากุล และลัดดา วัฒนศิริธรรม. 2549. **การเพิ่มปริมาณกรดแกมมา-แอมิโนบิวเทริกในคัพภะข้าวเจ้าและข้าวเหนียวโดยการแช่น้ำ**. การประชุมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 32 (STT32) . 264.

ไพฑูรย์ เรืองเพ็ง. ม.ป.ป. **การแบ่งประเภทมอเตอร์ไฟฟ้า**. ร้อยเอ็ด : วิทยาลัยเทคนิคร้อยเอ็ด

ยุพกนิษฐ์ พ่วงวีระกุล และวาสนา กล้าหาญ. (2553). **การเปลี่ยนแปลงปริมาณวิตามินบี1 และแกมมาแอมิโนบิวทิริกแอซิดในการผลิตข้าวงอกนึ่งขาวดอกมะลิ105 ระดับโรงงานต้นแบบ.** ขอนแก่น: เครือข่ายการวิจัยสถาบันอุดมศึกษา.

วัฒนา วัชรอาภาไพบูลย, ณัฏฐา เลาหกุลจิตต์, อรพิน เกิดชูชื่น และทรงศิลป์ พจน์ชนะชัย. 2550. **ผลของพีเอช อุณหภูมิ และเวลาการแช่ข้าวต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก**. กรุงเทพฯ: คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สุนัน ปานสาคร และจตุรงค์ ลังกาพินธุ์. 2556. **ข้าวกล้องงอกทำง่าย ได้ประโยชน์สูง**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพ : บริษัท ทริปเพิ้ล กรุ๊ป จำกัด.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูพรีมไลน์. 2015. **หลักการทำงานของฮีตเตอร์.** [ออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.supremelines.co.th/ฮีตเตอร์/547-ฮีตเตอร์-heater-หลักการทำงานของ-ฮีตเตอร์.html.

สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย. 2557, **สรุปสถานการณ์ส่งออกข้าวไทยปี 2557 และแนวโน้มและทิศทางการส่งออกข้าวไทย ปี 2558.**

สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯ. 2016, **ลักษณะของข้าวที่สำคัญทางเกษตร.** [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?book=3&chap=1&page=t3-1-infodetail05.html.

อุไรวรรณ วัฒนกุล, วัฒนา วัฒนกุล และชุตินุช สุจริต. 2556. **ผลของอุณหภูมิในการแช่งอก และหุงต้มต่อปริมาณไทอะมีน, GABA, สารต้านอนุมูลอิสระในข้าวมอลต์และข้าวกล้องงอกนึ่งสังข์หยดพัทลุง**. ตรัง: คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยวิทยาเขตตรัง.

อธิป บุญศิริวิทย์. 2554. **การเพิ่มกรดแกมมาอะมิโนบิวทีริก(กาบา) ในข้าวกล้องเพาะงอกด้วยกรดกลูตามิก**. กรุงเทพ : คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Bacteriological analytical manual Online, 2001. Chapter 3, **Aerobic plate count. USFDA.** 8 pp.

Bolton W. 2006. "Ladder and Functional Block Programming". Newnespress. 458-467.

Charoenthaikij, P., Jangchud, K., Jangchud, A., Piyachomkwan, K., Tungtrakul, P., & Prinyawiwatkul, W. 2009, **Germinated conditions affect physicochemical properties of germinated rice flour**, Journal of food science, Volume 74.

Cheevitsopon, E., & Athapol, N. (2011). Effects of parboiling and fluidized bed drying on the physicochemical properties of germinated brown rice. **Food Science and Technology**, Volume 46, 2498-2504.

Cho, H.D., & Lim, T.S. (2015). Germinated brown rice and its bio-functional compounds. **Food Chemistry**, Volume 196, 259-271.

EHEDG. 2004. **เกณฑ์การออกแบบอุปกรณ์และเครื่องมือตามหลักสุขลักษณะ**, EHEDG Guidelines, หน้า 1-15.

Factomart. 2016. **วิธีคิด และควบคุมของ Temperature Controller**. [ออนไลน์] แหล่งที่มา : www.factomart.com/th/factomartblog/how-to-control-a-temperature-controller/. (สืบค้นเมื่อ 10มกราคม2560)

Inno Ins Co., Ltd. 2017. **Soild State Relay**. [ออนไลน์] แหล่งที่มา : http://www.inno-ins.com/911124/โซลิดสเตตรีเลย์-ssr. (สืบค้นเมื่อ 10มกราคม2560)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Iriondo N., Estevez E., Priego R. and Marcos M. 2012. " PLC Based Supervision of Industrial Swiched Processes " **1st IFAC Conference on Embedded Systems.** 43.

Karladee, D., & Suriyonga, S. 2012. **γ-Aminobutyric acid (GABA) content in different varieties of brown rice during germination,** *ScienceAsia,* Volume 38, 13–17.

Kaspar Schulz. 2556. **Schulz malting system,** Kaspar Schulz, Germany. 4

Komatsuzaki, N., Tsukahara, K., Toyoshima, H., Suzuki, T., Shimizu, N., & Kimura, T. (2007). Effect of soaking and gaseous treatment on GABA content in germinated brown rice, **Journal of food engineering,** Volume 78, 556-560.

Milik A. 2013. "On Hardware Synthesis of Reconfigurable Logic Controllers From Ladder Diagrams According to IEC61131-3 " **12th IFAC Conference on Programmable Devices and Embedded Systems.** 256-261.

PSP Tech Co., Ltd. 2014. **รีเลย์คืออะไร.** [ออนไลน์] แหล่งที่มา : http://www.psptech.co.th/รีเลย์relayคืออะไร-15696.page (สืบค้นเมื่อ 10มกราคม2560)

Sirisoontaralak, P., Nakornpanom, N.N., Koakietdumrongkul, K., & Panumaswiwath, C. 2014. **Development of quick cooking germinated brown rice withconvenient preparation and containing health benefits.** Food Science and Technology, Volume 61, 138-144.

Zhang, Q.X., J., Zhang, L., Zhu, X., Evers, J., Werf, v.d. Wopke, & Duan, L. (2014). Optimizing soaking and germination conditions to improve gamma-aminobutyric acid content injaponica and indica germinated brown rice. **Journal of functional foods,** Volume 10, 283-291.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก โปรแกรมคำสั่งควบคุมโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์

ภาคผนวก ข ข้อมูลดิบ

ข.1 อัตราการไหลของน้ำ

ข.2 ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเพาะ

ข.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศ และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในกรณีที่ไม่มีตัวอย่างข้าวกล้อง

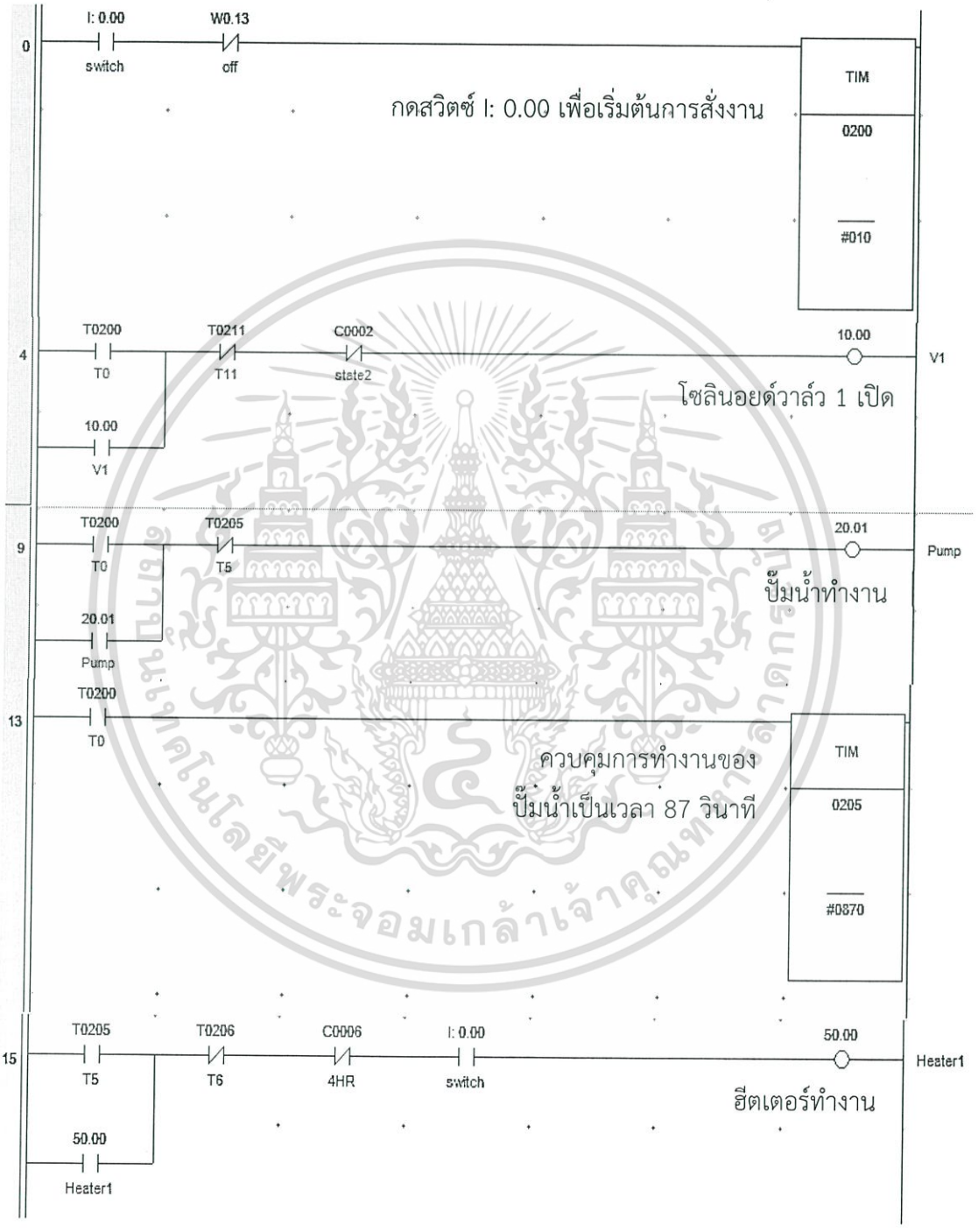
ข.4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศ และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในกรณีที่มีตัวอย่างข้าวกล้อง

ข.5 อัตราการงอกของข้าวกล้อง

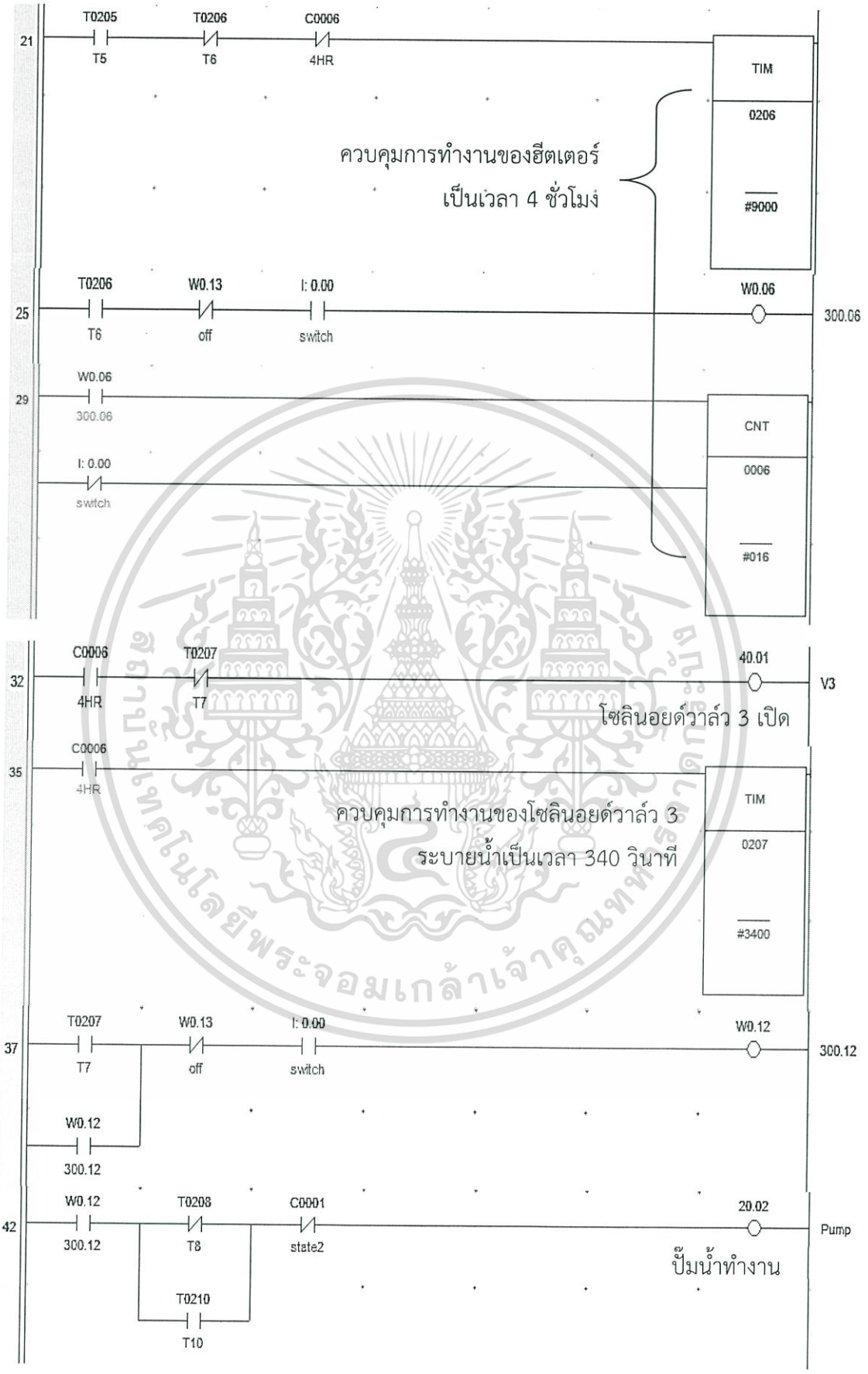
ข.6 ค่าความแข็งและความเหนียวของข้าวกล้องงอกหุงสุก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

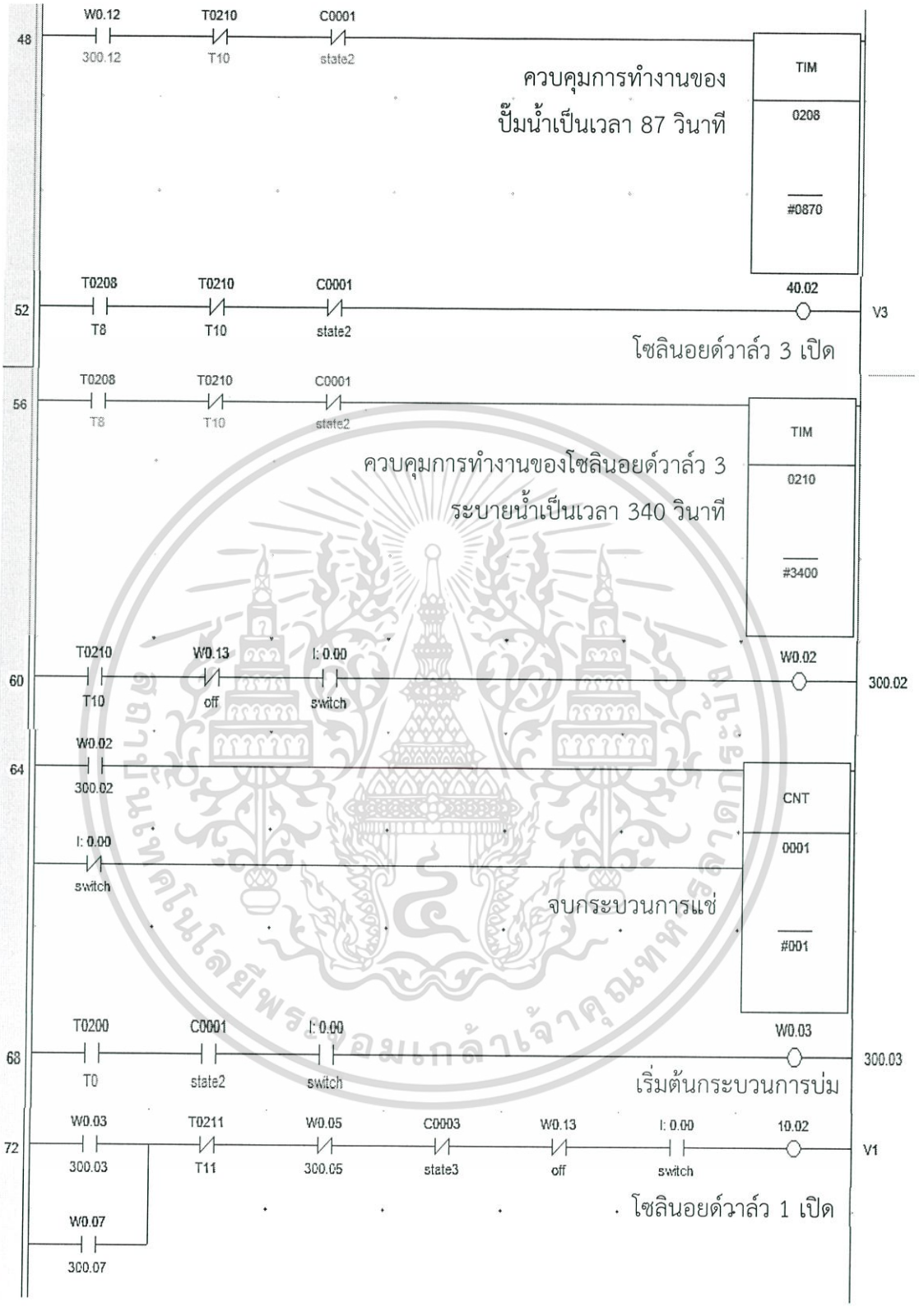
ภาคผนวก ก
โปรแกรมคำสั่งควบคุมโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์



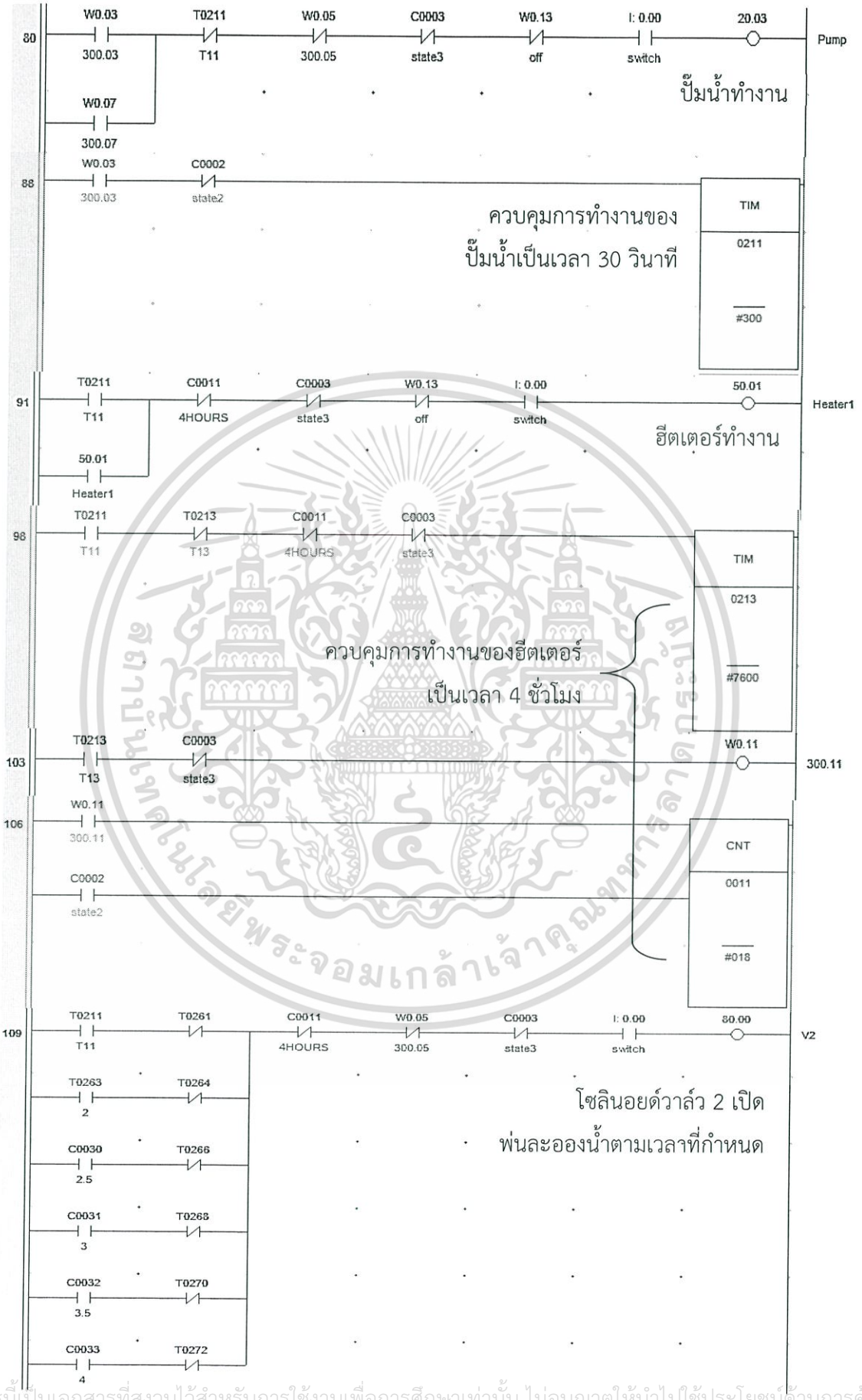
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



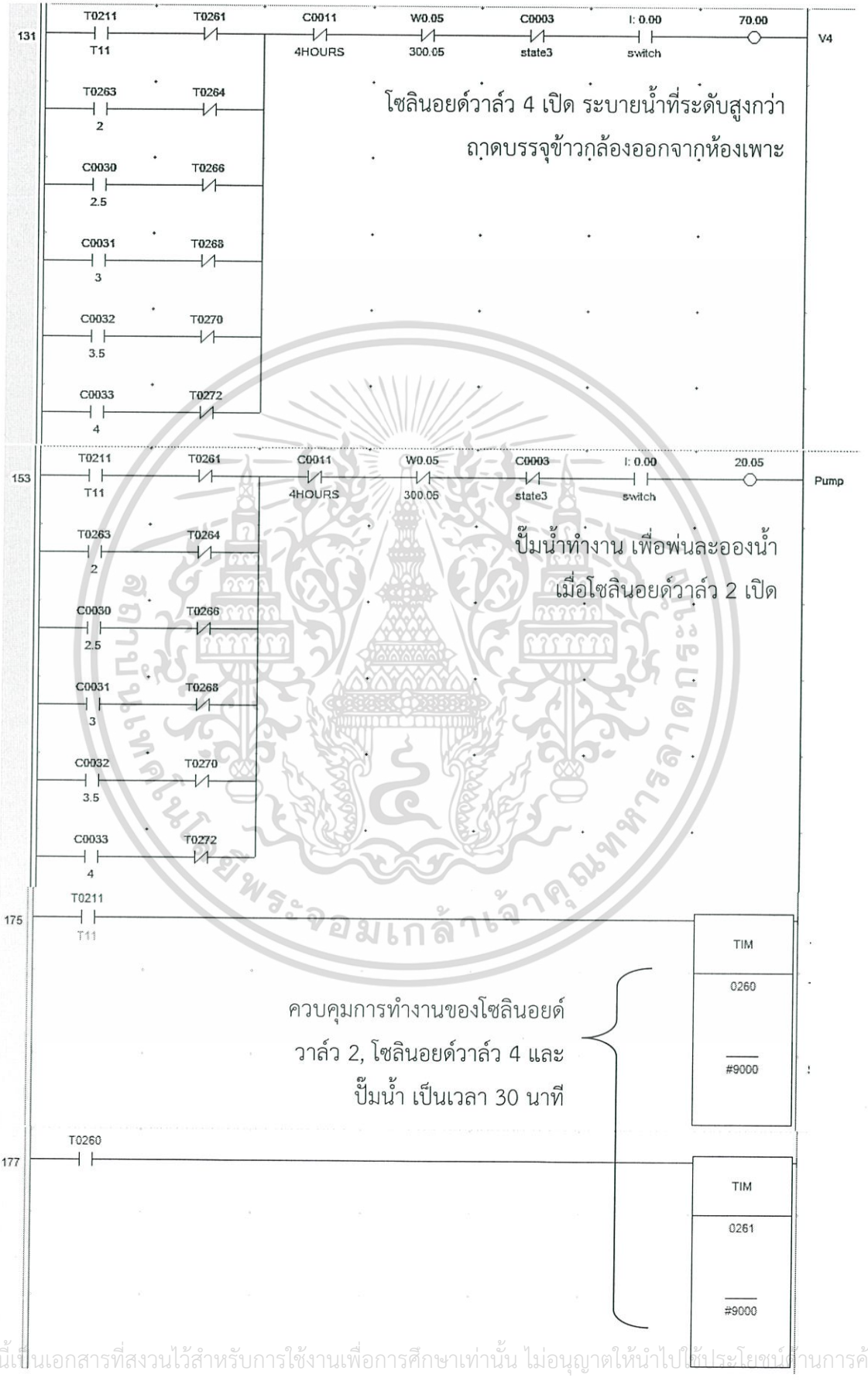
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



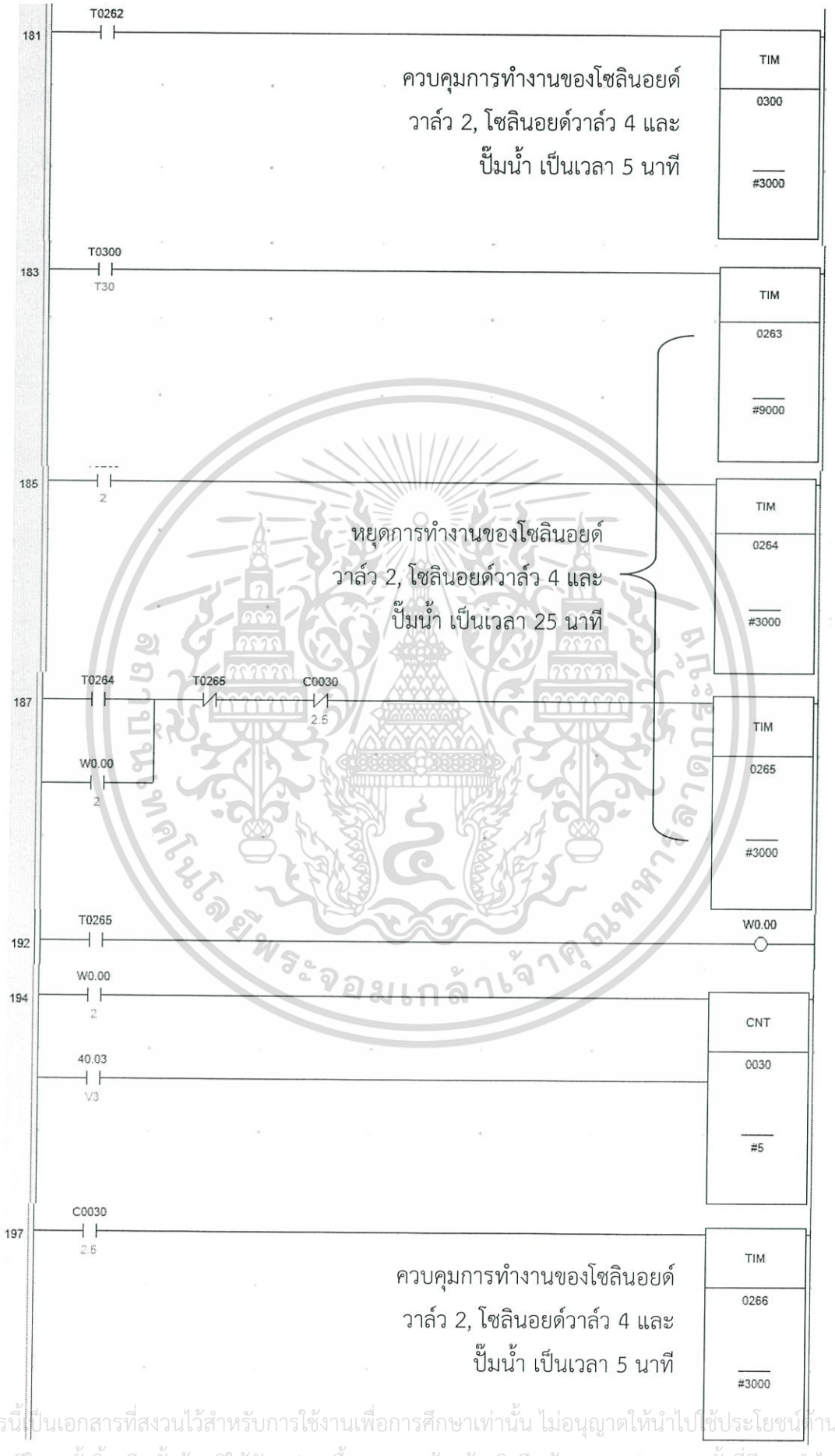
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



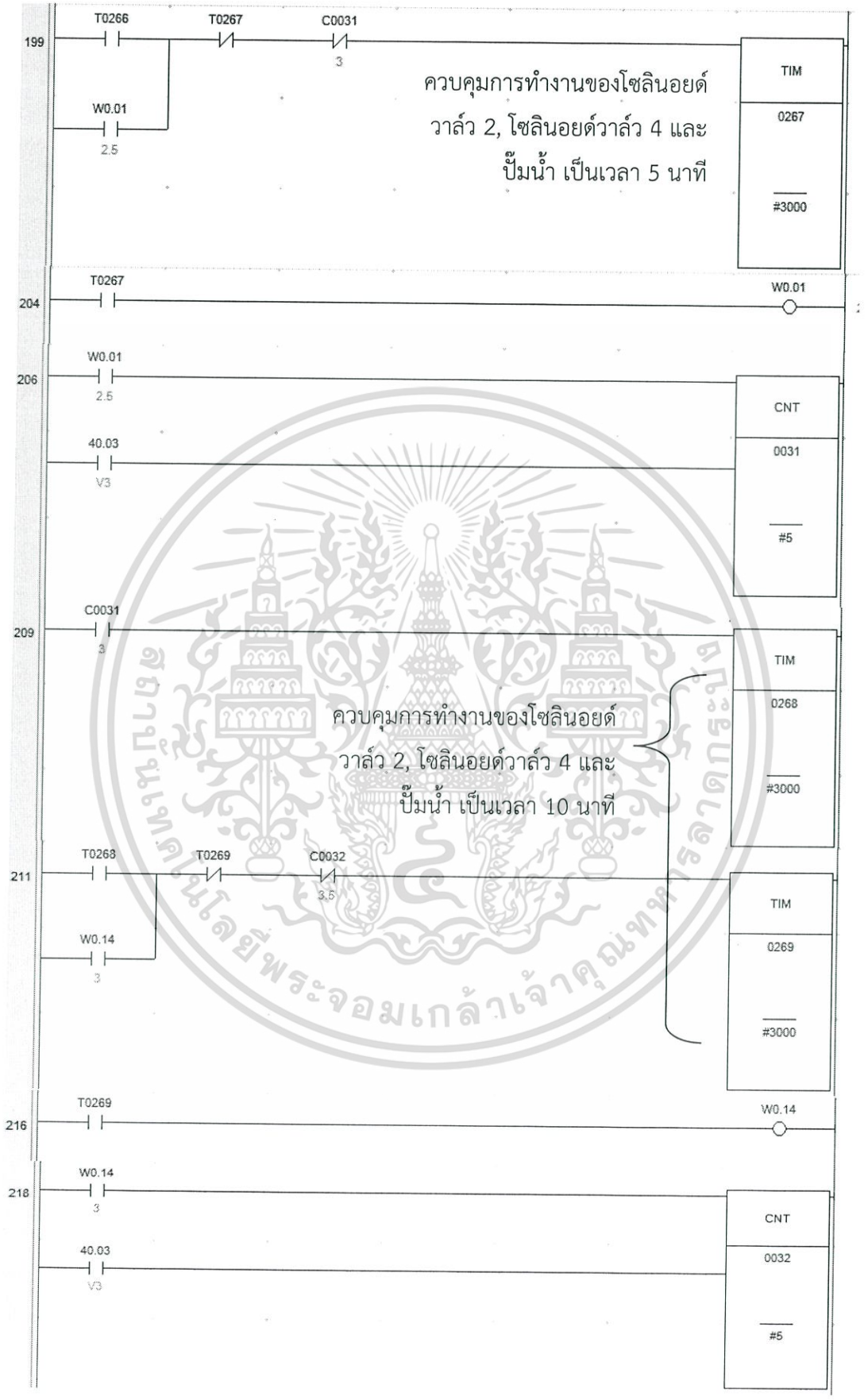
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



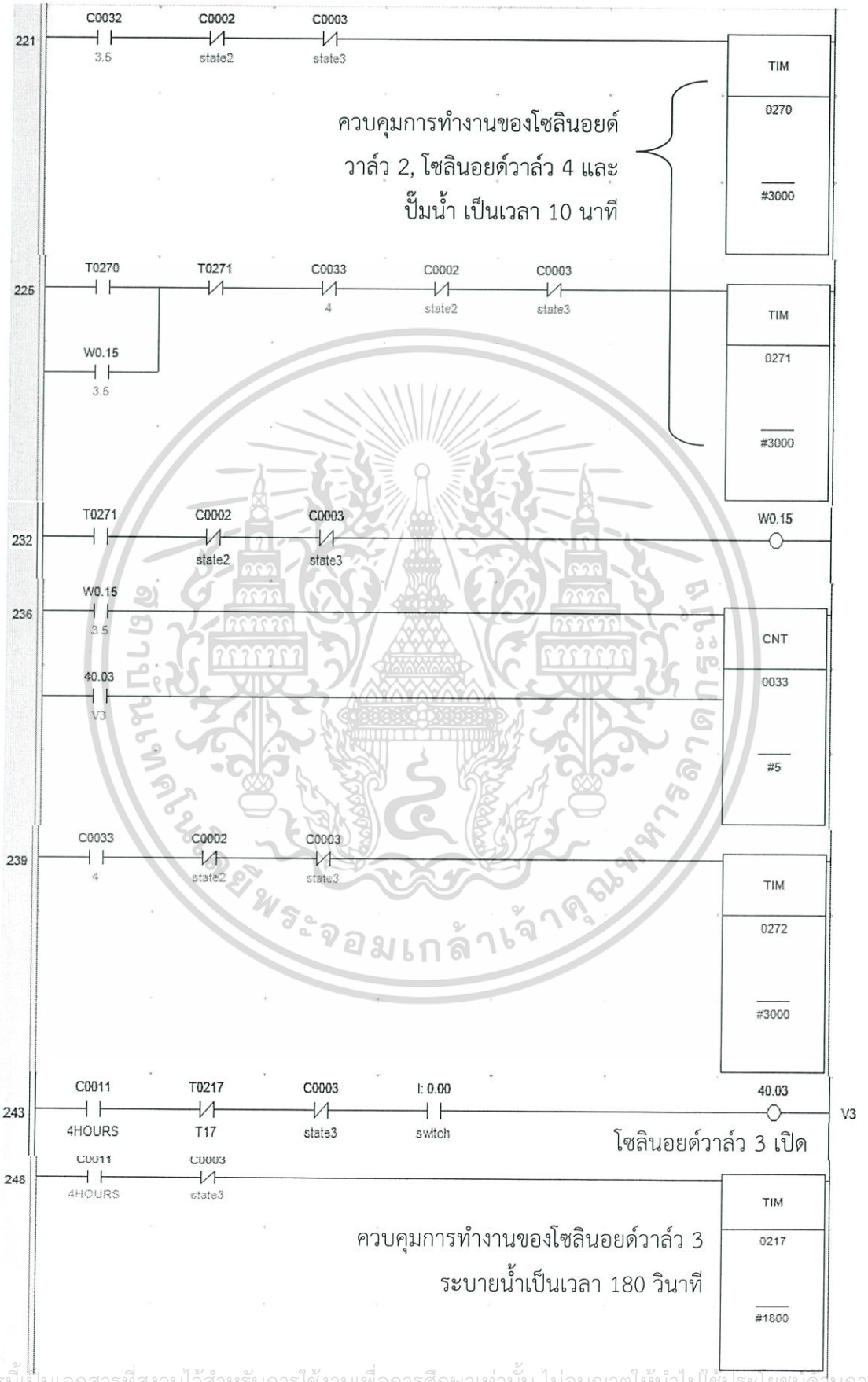
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



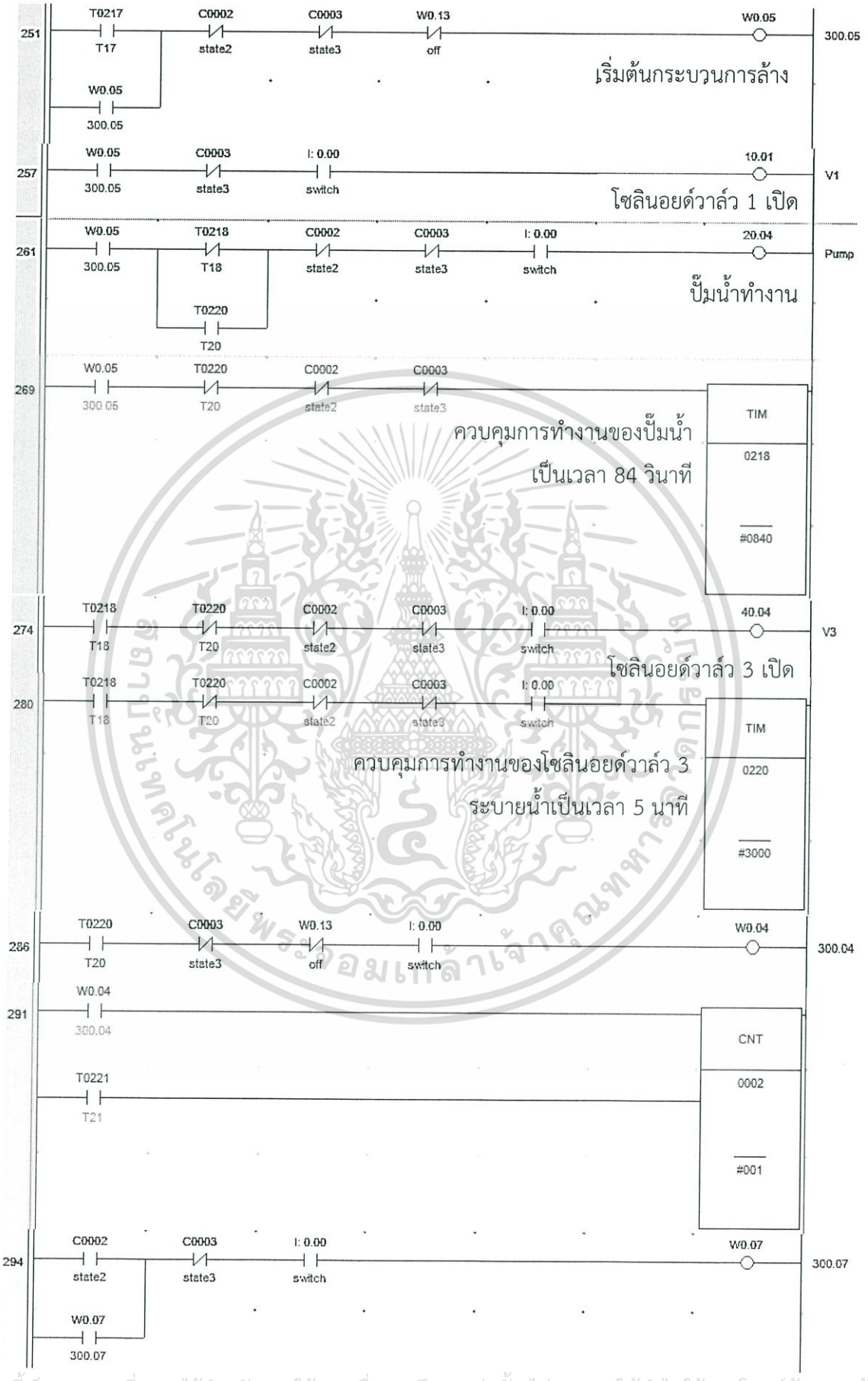
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

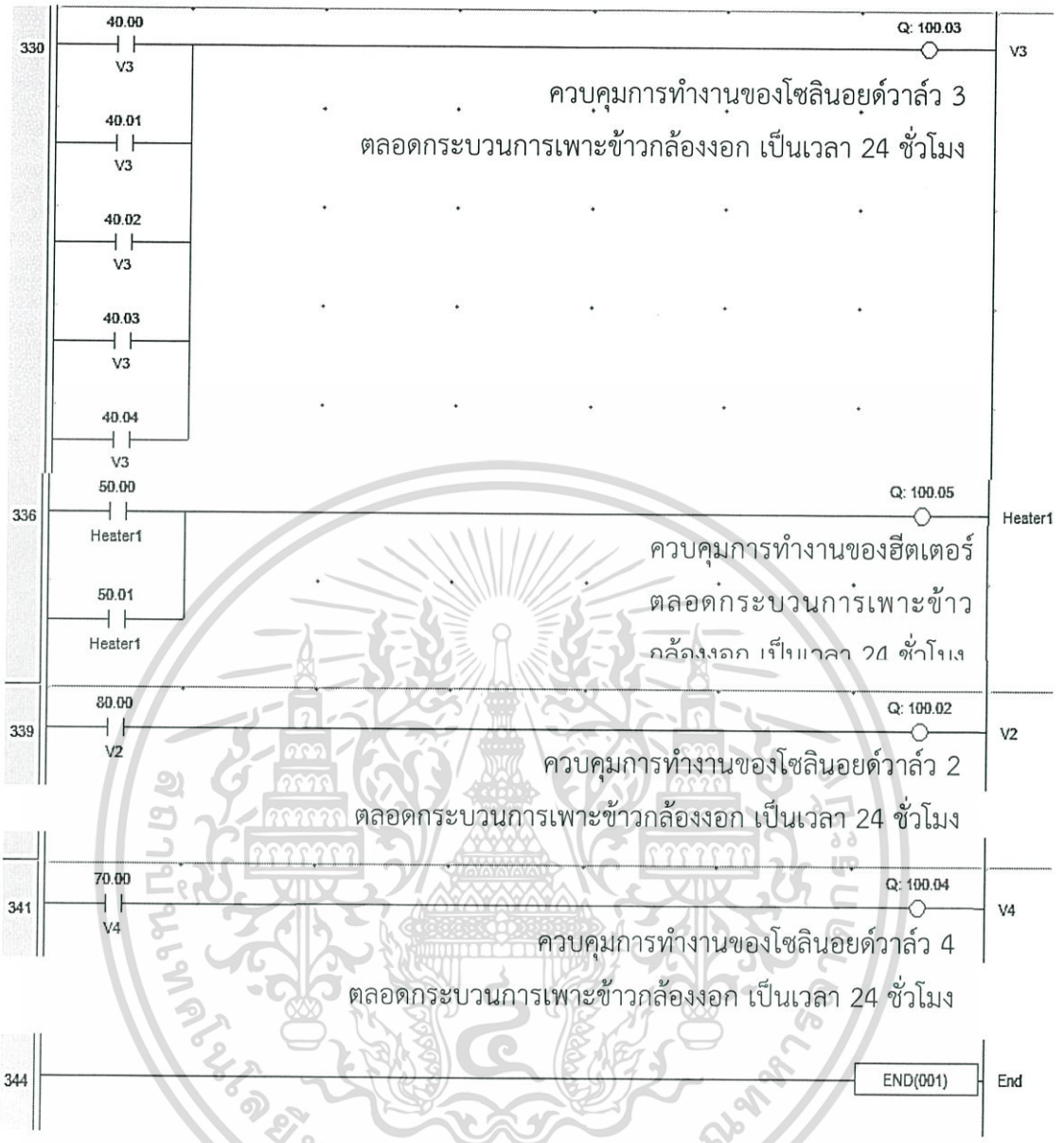


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
ข้อมูลดิบ

ภาคผนวก ข.1 อัตราการไหลของน้ำ

ตารางที่ ข.1 อัตราการไหลของน้ำเข้าห้องเพาะ อัตราการระบายน้ำออกจากห้องเพาะ และอัตราการพ่นละอองน้ำ

การทดลองครั้งที่	อัตราการไหลของน้ำเข้าห้องเพาะ (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที)	อัตราการระบายน้ำออกจากห้องเพาะ (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที)	อัตราการพ่นละอองน้ำ (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที)
1	471.67	141.67	37.50
2	468.33	138.00	38.67
3	470.00	137.83	37.33
เฉลี่ย	470.00	139.17	37.83

ภาคผนวก ข.2 ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเพาะ

ตารางที่ ข.2 ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเพาะ

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	59	51	60
2	80	78	73
4	82	80	77
6	83	82	79
8	83	83	81
10	83	83	81
12	83	84	81
14	83	84	81
16	83	84	81
18	83	84	81
20	84	84	81
22	84	84	81
24	84	84	82
26	84	84	82
28	84	84	82
30	84	84	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 (ต่อ) ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเพาะ

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
32	84	85	82
34	85	85	82
36	85	85	82
38	85	85	82
40	85	85	82
42	85	85	82
44	85	85	82
46	85	85	82
48	85	85	82
50	85	85	82
52	85	85	82
54	85	85	82
56	85	85	82
58	85	85	82
60	85	85	82
62	85	85	82
64	85	85	82
66	85	85	82
68	85	85	82
70	85	85	82
72	85	85	82
74	85	85	82
76	85	85	82
78	85	85	82
80	85	85	82
82	85	85	82
84	85	85	82
86	85	85	82
88	85	85	82
90	85	85	82
92	85	85	82
94	85	85	82
96	85	85	82
98	85	85	82
100	85	85	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศ และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเพาะ กรณีที่ไม่มีตัวอย่างข้าวกล้อง

ตารางที่ ข.3.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศ และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเพาะ กรณีที่ไม่มีตัวอย่างข้าวกล้อง จากการทดลองครั้งที่ 1

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิของน้ำ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิของอากาศ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (ร้อยละ)
0.0	30	30	60
0.5	35	34	84
1.0	35	35	86
1.5	35	35	86
2.0	35	35	86
2.5	35	34	86
3.0	35	34	86
3.5	35	34	86
4.0	35	34	86
4.5	35	34	86
5.0	35	33	88
5.5	35	33	88
6.0	35	33	88
6.5	35	33	88
7.0	35	33	88
7.5	35	33	88
8.0	35	33	88
8.5	35	33	87
9.0	35	33	87
9.5	35	33	86
10.0	35	33	87
10.5	35	33	87
11.0	35	33	87
11.5	35	33	87
12.0	35	33	87
12.5	33	31	87
13.0	35	33	87
13.5	35	33	87
14.0	35	33	86
14.5	35	33	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3.1 (ต่อ) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศ
และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเพาะ กรณีที่ไม่มีตัวอย่างข้าวกล้อง

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิของน้ำ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิของอากาศ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (ร้อยละ)
15.0	35	33	86
15.5	35	34	87
16.0	33	32	87
16.5	35	33	87
17.0	35	33	87
17.5	35	34	88
18.0	35	34	88
18.5	35	34	88
19.0	35	34	87
19.5	35	34	87
20.0	33	32	86
20.5	35	33	87
21.0	35	33	87
21.5	35	33	87
22.0	35	34	86
22.5	35	34	86
23.0	35	34	86
23.5	35	34	87
24.0	32	32	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศ
และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเพาะ กรณีที่ไม่มีตัวอย่างข้าวกล้อง
จากการทดลองครั้งที่ 2

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิของน้ำ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิของอากาศ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (ร้อยละ)
0.0	29	29	60
0.5	35	34	84
1.0	35	35	86
1.5	35	35	86
2.0	35	34	86
2.5	35	34	86
3.0	35	34	86
3.5	35	34	86
4.0	35	34	86
4.5	32	32	86
5.0	35	34	88
5.5	35	34	88
6.0	35	34	88
6.5	35	34	88
7.0	35	33	88
7.5	35	34	88
8.0	35	33	88
8.5	35	33	87
9.0	32	31	87
9.5	35	33	86
10.0	35	33	87
10.5	35	33	87
11.0	35	33	87
11.5	35	33	87
12.0	35	33	87
12.5	35	33	87
13.0	31	31	87
13.5	35	33	87
14.0	31	33	86
14.5	35	33	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3.2 (ต่อ) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศ และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเพาะ กรณีที่ไม่มีตัวอย่างข้าวกล้อง จากการทดลองครั้งที่ 2

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิของน้ำ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิของอากาศ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (ร้อยละ)
15.0	35	33	86
15.5	35	34	87
16.0	35	33	87
16.5	35	33	87
17.0	35	33	87
17.5	30	30	87
18.0	35	33	87
18.5	35	33	87
19.0	35	33	87
19.5	35	33	87
20.0	35	33	86
20.5	35	33	86
21.0	35	33	86
21.5	35	33	86
22.0	35	33	86
22.5	35	34	86
23.0	35	34	86
23.5	35	34	86
24.0	35	34	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศ
และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเพาะ กรณีที่ไม่มีตัวอย่างข้าวกล้อง
จากการทดลองครั้งที่ 3

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิของน้ำ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิของอากาศ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (ร้อยละ)
0.0	30	30	60
0.5	35	34	84
1.0	35	35	86
1.5	35	35	86
2.0	35	35	86
2.5	35	34	86
3.0	35	34	86
3.5	35	34	86
4.0	35	34	86
4.5	35	34	86
5.0	35	33	88
5.5	35	33	88
6.0	35	33	88
6.5	35	33	88
7.0	35	33	88
7.5	35	33	88
8.0	35	33	88
8.5	35	33	87
9.0	35	33	87
9.5	35	33	86
10.0	35	33	87
10.5	35	33	87
11.0	35	33	87
11.5	35	33	87
12.0	35	33	87
12.5	33	31	87
13.0	35	33	87
13.5	35	33	87
14.0	35	33	86
14.5	35	33	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3.3 (ต่อ) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศ และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเพาะ กรณีที่ไม่มีตัวอย่างข้าวกล้อง จากการทดลองครั้งที่ 3

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิของน้ำ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิของอากาศ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (ร้อยละ)
15.0	35	33	86
15.5	35	34	87
16.0	33	32	87
16.5	35	33	87
17.0	35	33	87
17.5	35	34	88
18.0	35	34	88
18.5	35	34	88
19.0	35	34	87
19.5	35	34	87
20.0	33	32	86
20.5	35	33	87
21.0	35	33	87
21.5	35	33	87
22.0	35	34	86
22.5	35	34	86
23.0	35	34	86
23.5	35	34	87
24.0	32	32	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศ และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในกรณีที่มีตัวอย่างข้าวกล้อง

ตารางที่ ข.4.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศ และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเพาะ กรณีที่มีตัวอย่างข้าวกล้อง

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิของน้ำ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิของอากาศ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (ร้อยละ)
0.0	30	30	60
0.5	35	34	84
1.0	35	35	86
1.5	35	35	86
2.0	35	35	86
2.5	35	34	86
3.0	35	34	86
3.5	35	34	86
4.0	35	34	86
4.5	35	34	86
5.0	35	33	88
5.5	35	33	88
6.0	35	33	88
6.5	35	33	88
7.0	35	33	88
7.5	35	33	88
8.0	35	33	88
8.5	35	33	87
9.0	35	33	87
9.5	35	33	86
10.0	35	33	87
10.5	35	33	87
11.0	35	33	87
11.5	35	33	87
12.0	35	33	87
12.5	33	31	87
13.0	35	33	87
13.5	35	33	87
14.0	35	33	86
14.5	35	33	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4.1 (ต่อ) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศ
และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเพาะ กรณีที่มีตัวอย่างข้าวกล้อง

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิของน้ำ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิของอากาศ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (ร้อยละ)
15.0	35	33	86
15.5	35	34	87
16.0	33	32	87
16.5	35	33	87
17.0	35	33	87
17.5	35	34	88
18.0	35	34	88
18.5	35	34	88
19.0	35	34	87
19.5	35	34	87
20.0	33	32	86
20.5	35	33	87
21.0	35	33	87
21.5	35	33	87
22.0	35	34	86
22.5	35	34	86
23.0	35	34	86
23.5	35	34	87
24.0	32	32	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศ
และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเพาะ กรณีที่มีตัวอย่างข้าวกล้อง จากการทดลองครั้งที่ 2

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิของน้ำ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิของอากาศ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (ร้อยละ)
0.0	30	30	45
0.5	35	34	81
1.0	35	35	82
1.5	35	35	83
2.0	35	35	83
2.5	35	35	83
3.0	35	35	84
3.5	35	35	84
4.0	35	34	84
4.5	33	33	84
5.0	35	33	85
5.5	35	33	85
6.0	35	33	85
6.5	35	33	86
7.0	35	33	86
7.5	35	33	86
8.0	35	33	86
8.5	35	33	84
9.0	32	32	84
9.5	35	33	84
10.0	35	33	84
10.5	35	33	85
11.0	35	33	85
11.5	35	33	85
12.0	35	33	85
12.5	35	33	86
13.0	32	32	83
13.5	35	32	84
14.0	35	33	85
14.5	35	33	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4.2 (ต่อ) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศ
และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเพาะ กรณีที่มีตัวอย่างข้าวกล้อง จากการทดลองครั้งที่ 2

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิของน้ำ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิของอากาศ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (ร้อยละ)
15.0	35	33	85
15.5	35	32	85
16.0	35	33	85
16.5	35	32	85
17.0	35	32	85
17.5	30	30	80
18.0	35	33	83
18.5	35	33	85
19.0	35	33	85
19.5	35	33	84
20.0	35	34	83
20.5	35	33	82
21.0	35	34	82
21.5	35	34	82
22.0	30	29	78
22.5	35	34	83
23.0	35	34	84
23.5	35	34	84
24.0	35	34	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศ
และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเพาะ กรณีที่มีตัวอย่างข้าวกล้อง จากการทดลองครั้งที่ 3

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิของน้ำ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิของอากาศ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (ร้อยละ)
0.0	30	30	58
0.5	35	33	81
1.0	35	34	81
1.5	35	34	81
2.0	35	34	82
2.5	35	35	82
3.0	35	34	82
3.5	35	35	82
4.0	35	35	82
4.5	33	32	82
5.0	35	33	84
5.5	35	34	85
6.0	35	34	85
6.5	35	33	85
7.0	35	33	85
7.5	35	33	85
8.0	35	33	85
8.5	31	30	83
9.0	35	33	85
9.5	35	33	85
10.0	35	33	85
10.5	35	33	85
11.0	35	32	85
11.5	35	32	85
12.0	35	32	85
12.5	31	30	85
13.0	35	33	85
13.5	35	33	85
14.0	35	33	85
14.5	35	33	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4.3 (ต่อ) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศ
และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเพาะ กรณีที่มีตัวอย่างข้าวกล้อง จากการทดลองครั้งที่ 3

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิของน้ำ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิของอากาศ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (ร้อยละ)
15.0	35	33	85
15.5	35	33	85
16.0	35	33	85
16.5	30	30	83
17.0	35	33	84
17.5	35	33	84
18.0	35	33	84
18.5	35	33	84
19.0	35	33	84
19.5	35	33	84
20.0	35	33	84
20.5	30	30	80
21.0	35	33	83
21.5	35	33	84
22.0	35	32	83
22.5	35	33	82
23.0	35	33	82
23.5	35	33	82
24.0	35	33	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.5 อัตราการงอกของข้าวกล้อง

ตารางที่ ข.5 อัตราการงอกของข้าวกล้อง

ครั้งที่	การปฏิบัติตามวิธีห้องปฏิบัติการ (ร้อยละ)	การใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก (ร้อยละ)
1	88.24	80.17
2	89.47	78.46
3	81.43	77.37
4	70.80	85.60
5	73.28	79.61
6	70.94	82.57
7	85.15	85.19
8	81.67	86.61
9	85.84	85.32
เฉลี่ย	80.76	82.32

ภาคผนวก ข.6 ค่าความแข็งและความเหนียวของข้าวกล้องงอกหุงสุก

ตารางที่ ข.6 ค่าความแข็งและความเหนียวของข้าวกล้องงอกหุงสุก

การปฏิบัติตามวิธีห้องปฏิบัติการ		การใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องเพาะข้าวกล้องงอก	
ความแข็ง (นิวตัน)	ความเหนียว (นิวตัน)	ความแข็ง (นิวตัน)	ความเหนียว (นิวตัน)
101.60	11.91	81.46	12.58
105.94	10.53	88.50	15.30
94.02	10.13	101.79	11.07
79.55	14.87	91.88	12.76
86.85	15.54	89.44	9.83
107.40	14.42	96.75	13.98
87.09	15.85	84.09	15.30
104.13	16.42	87.87	10.23
86.31	13.35	83.97	10.83
86.47	12.21	95.95	9.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้