



รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

เพิ่มประสิทธิภาพการผลิตส่วนของฉนวนหุ้มบัสบาร์ของตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำ
Production Performance Enhancement Part of Insulation
on Bus Bar of Low - Voltage Switchgear

นางสาวสุกัญญา กิจอิทธิพัทธ์

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560



รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

เพิ่มประสิทธิภาพการผลิตส่วนของฉนวนหุ้มบัสบาร์ของตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำ

Production Performance Enhancement Part of Insulation

on Bus Bar of Low - Voltage Switchgear

นางสาวสุกัญญา กิจอิทธิพัทธ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องวัดและควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

ชื่อโครงการสหกิจศึกษา เพิ่มประสิทธิภาพการผลิตส่วนของฉนวนหุ้มบัสบาร์ของตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำ

ชื่อ-สกุล นักศึกษา นางสาวสุกัญญา กิจอิทธิพัทธ์

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชา วิศวกรรมการวัดและควบคุม

ชื่อ-สกุล อาจารย์นิเทศ รศ.ดร.สุพรรณ กุลพาณิชย์ และ รศ.วิริยะ กองรัตน์

ชื่อ-สกุล ผู้นิเทศงาน นายภัทรพงษ์ มณีวงศ์

ชื่อสถานประกอบการ บริษัท เอบีบี (ประเทศไทย) จำกัด

บทคัดย่อ

รายงานสหกิจศึกษานี้ได้รับการสนับสนุนจาก บริษัท เอบีบี (ประเทศไทย) จำกัด แผนก-Low-Voltage System ฝ่าย Production นักศึกษาทำโครงการร่วมกับทางสถานประกอบการเป็นระยะเวลาหนึ่งภาคการศึกษา เกี่ยวกับการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องอบพลังงานความร้อนสำหรับหุ้มฉนวนที่บัสบาร์ ซึ่งกระบวนการให้พลังงานความร้อนที่มีอยู่เดิมนั้นเป็นแบบ Manual จึงสิ้นเปลืองพลังงานมาก และ ไม่สามารถรักษาระดับอุณหภูมิที่ต้องการได้ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้มีคุณภาพไม่สม่ำเสมอ รายงานฉบับนี้ขอเสนอการปรับปรุงเครื่องอบพลังงานความร้อนให้เป็นแบบอัตโนมัติ โดยอาศัยตัวควบคุม TAIE รุ่น FY 700 ที่มีฟังก์ชันพีไอดี (PID Controller) เพื่อปรับและรักษาระดับอุณหภูมิควบคุมให้สม่ำเสมอสอดคล้องกับขนาด และฉนวนหุ้มบัสบาร์ การทดลองแสดงถึงการปรับตั้งค่า PID แบบ Trial and Error เพื่อรักษาอุณหภูมิไว้ที่ $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ สามารถลดการแกว่งของอุณหภูมิได้ถึง 6 เท่าและลดเวลาการทำงานได้ถึง 1.6 เท่า โดยสายพานลำเลียงชิ้นงานเข้าห้องอบปรับความเร็วได้ตั้งแต่ 0.0064 ถึง 0.0185 เมตรต่อนาที นอกจากนี้ยังได้แสดงค่าใช้จ่ายต่อปีที่ประหยัดได้ ไม่ต่ำกว่า 2 แสน 5 หมื่นบาท เมื่อใช้เครื่องอบพลังงานความร้อนอัตโนมัติ แทนกระบวนการผลิตที่มีอยู่เดิม จึงเป็นที่มาของโครงการ

Co-operative Title: Production Performance Enhancement Part of Insulation on Bus Bar
of Low-Voltage Switchgear

Student Intern Name: Ms.Sukanya Kitaitthiphat

Faculty: Engineering **Department:** Instrumentation and Control Engineering

Advisor Name: Assoc. Prof. Dr. Suphan Gulpanich , Assoc. Prof. Viriya Kongrat

Mentor Name: Mr.Pattarapong Maneewong.

Company: ABB (Thailand) Limited.

ABSTRACT

This cooperative educational report describes is supported by ABB (Thailand) Limited. Low-Voltage System Division, Production Department, Students to do a project together with a company for one semester. This cooperative educational report investigates the temperature control of the busbar insulation shroud heaters The conventional heat energy process is manual, so it consumes a lot of energy and cannot maintain the desired temperature level, resulting in uneven quality of the workpiece. This report is for informational purposes only. Improve the heat energy machine automatically. PID controller was implemented on the TAIE FY 700 digital temperature controller. To adjust and maintain the temperature control to be consistent with the size and busbar insulation Experiment shows the PID Trial and Error setting to maintain a temperature of 110 °C, can reduce the oscillate of the temperature up to 6 times and reduce the running time by 1.6 times. From 0.0064 to 0.0185 meters per minute, it also shows the cost saving per year is not less than 250,000 baths when using automatic heat energy. Instead of the existing production process. It is the source of the project.

กิตติกรรมประกาศ

รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่านก่อนอื่นต้องขอขอบพระคุณ บริษัท เอบีบี จำกัด ที่ให้โอกาสที่ดีสำหรับข้าพเจ้าได้เข้าไปฝึกปฏิบัติงานโครงการสหกิจศึกษาตลอดระยะเวลาหนึ่งภาคการศึกษา ทำให้ข้าพเจ้าได้รับความรู้ต่างๆและประสบการณ์ในการทำงานด้านวิศวกรรมการวัดคุม ไม่ว่าจะเป็นด้านภาคทฤษฎีไฟฟ้า ภาควิชาอุตสาหกรรมมากยิ่งขึ้น ด้านความรู้ ด้านสังคม และต้องกราบขอบพระคุณคุณมนัส สวัสดิ์ชัย ผู้จัดการ แผนกการผลิตตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำ คุณภัทรพงษ์ มณีวงศ์ ผู้นิเทศงานและพนักงานแผนกการผลิตตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและให้ประสบการณ์ในการทำงาน

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สุพรรณ กุลพานิชย์ และ รศ.วิริยะ กองรัตน์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ปรึกษาชี้แนะ และให้ข้อคิดในการแก้ไขปัญหานั้นอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่ข้าพเจ้าตลอดมา รวมถึงช่วยตรวจทาน แก้ไข ข้อบกพร่อง รายงานฉบับนี้ ทำให้รายงานสหกิจศึกษาฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ และคอยให้คำปรึกษาอย่างสม่ำเสมอ ขอขอบพระคุณคณาจารย์หลักสูตรวิศวกรรมการวัดคุมภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุมทุกท่านที่ได้สั่งสอนให้ความรู้อันเป็นประโยชน์ต่อการทำรายงานสหกิจฉบับนี้

และสุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัวเป็นอย่างสูง ที่เปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียนตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจเสมอมา รวมถึงการสนับสนุนในด้านต่างๆมาด้วยดีตลอดคุณค่าและประโยชน์อันใดพึงมีจากรายงานฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สุกัญญา กิจอิทธิพิพัทธ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	IX
สารบัญภาพ	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	3
1.3 ขอบเขตของโครงการ	3
1.4 วิธีดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการของเครื่องเป่าลมร้อนอัตโนมัติ	5
2.1 ตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำ	5
2.1.1 ตู้ไฟฟ้าสวิตช์เกียร์ควบคุมระบบจ่ายไฟฟ้าระดับแรงดันต่ำ	5
2.1.2 ตู้ไฟฟ้าสวิตช์เกียร์ควบคุมมอเตอร์ระดับแรงดันต่ำ	6
2.1.3 ดัชนีแสดงค่ามาตรฐานการป้องกัน	7
2.1.4 มาตรฐานตัวนำไฟฟ้า	8
2.1.5 บัสบาร์และฉนวน	9
2.1.5.1 คุณสมบัติบัสบาร์	9
2.1.6 ท่อฉนวน (Heat-Shrink Tube)	10
2.1.7 โครงสร้างตู้สวิตช์บอร์ดและอุปกรณ์ไฟฟ้า	11
2.1.7.1 สวิตช์บอร์ด (Switch Board)	11
2.1.7.2 โครงตู้สวิตช์บอร์ด (Enclosure)	11
2.1.8 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับความปลอดภัยในการปฏิบัติงานตู้สวิตช์บอร์ด (Information Safety)	12
2.1.9 เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงต่ำ	12

2.1.9.1	พิกัดกระแสต่อเนื่อง	12
2.1.9.2	พิกัดกระแสตัดกระแสลัดวงจร	13
2.1.10	ประเภทของเซอร์กิตเบรกเกอร์	13
2.1.10.1	Molded Case Circuit Breaker (MCCB)	13
2.1.10.2	Air Circuit Breaker (ACB)	14
2.1.11	เครื่องวัดไฟฟ้า	14
2.1.11.1	หม้อแปลงเครื่องวัด (Instrument Transformers)	14
2.1.12	เครื่องวัดไฟฟ้า สำหรับตู้สวิตช์บอร์ด (Meter)	15
2.1.13	Selector Switch สำหรับตู้สวิตช์บอร์ด	15
2.1.14	Power Meter	16
2.2	ตู้อบ (Oven)	16
2.2.1	หลักการทำงาน	16
2.3	ประเภทของการถ่ายเทความร้อน	18
2.3.1	การนำความร้อน: Heat Conduction	18
2.3.2	การพาความร้อน: Heat Convection	18
2.3.3	การแผ่รังสี : Radiation	18
2.4	ความร้อนกับการทำงาน	19
2.5	อันตรายและผลกระทบต่อสุขภาพคนงานที่ทำงานในที่ร้อน	19
2.6	การให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรด (Electric Infrared Heating)	20
2.6.1	หลักการพื้นฐานของเทคโนโลยี	20
2.6.2	ประเภทของการใช้งาน	21
2.6.3	ประโยชน์ของเทคโนโลยี	21
2.6.4	คุณลักษณะเด่นของฮีตเตอร์อินฟราเรด	21
2.6.5	ข้อควรระวัง	22
2.7	หลักการของควบคุมแบบ PID	22
2.7.1	การควบคุมแบบป้อนกลับด้วยตัวควบคุม PID	22
2.8	กิริยาการควบคุมของการควบคุมแบบป้อนกลับ	25
2.8.1	กิริยาการควบคุมแบบ ON-OFF	25
2.8.2	กิริยาการควบคุมแบบ Proportional (P)	26
2.8.3	กิริยาการควบคุมแบบ Integral (I)	27

2.8.4	กิริยาการควบคุมแบบ Derivative (D)	28
2.8.5	กิริยาการควบคุมแบบ Proportional-Integral (PI)	29
2.8.6	กิริยาการควบคุมแบบ Proportional-Derivative (PD)	30
2.8.7	กิริยาการควบคุมแบบ Proportional-Integral-Derivative (PID)	31
2.9	การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี	31
2.9.1	การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี โดยวิธีของ Ziegler-Nichols	31
2.9.1.1	วิธี Process Reaction Curve	32
2.9.1.2	วิธี Ultimate Method	33
2.9.2	การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี โดยวิธี Damped Oscillation	34
2.9.3	การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี โดยวิธี Trial & Error Close-Loop Tuning (วิธีการลองผิดลองถูก)	35
2.10	การควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรม	36
2.10.1	ตัวควบคุมแบบ Duplex	36
2.10.2	ตัวควบคุมแบบ Auto-Selector	36
2.10.3	ตัวควบคุมแบบอัตราส่วน (Ratio Control)	37
2.10.4	ตัวควบคุมแบบ Cascade	37
2.11	เครื่องวัดอุณหภูมิ	37
2.11.1	การวัดอุณหภูมิโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า	38
2.11.1.1	อาร์ทีดี (Resistance Temperature Detector: RTD)	38
2.11.1.2	เทอร์โมคัปเปิล	39
2.11.1.2.1	เทอร์โมคัปเปิลมาตรฐาน	40
2.11.1.2.2	โครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิล	42
2.11.1.3	ความแตกต่างระหว่าง RTD และ Thermocouple	44
2.11.2	การวัดอุณหภูมิโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงแสง และการแผ่รังสี	46
2.11.2.1	ไพโรมิเตอร์แบบอินฟราเรด	47
บทที่ 3	วิธีการดำเนินการการเพิ่มประสิทธิภาพของ Heat Shrink Machine	48
3.1	บทนำ	48

3.2	ขั้นตอนการศึกษาและรวบรวมข้อมูล	48
3.2.1	ศึกษากระบวนการผลิตตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำ	48
3.2.2	ประเภทของอุปกรณ์เพื่อหุ้มฉนวนที่บัสบาร์	51
3.2.3	ศึกษาเครื่องอบความร้อนอัตโนมัติรูปแบบเดิม	52
3.2.4	สายพานลำเลียงขับเคลื่อนชิ้นงาน	55
3.3	อุปกรณ์ควบคุมฟังก์ชันพีไอดี (PID controller) และอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ใช้งาน	57
3.3.1	การปรับตั้งค่าพีไอดีที่เครื่องควบคุมฟังก์ชันพีไอดี และการปรับปรุงการทำงานของกระบวนการ	59
3.3.1.1	ขั้นตอนการปรับและใช้งานของเครื่องควบคุมฟังก์ชันพีไอดี	59
3.4	ขั้นตอนการเลือกขนาดบัสบาร์ และ การคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของฉนวนหุ้มบัสบาร์	61
3.4.1	วิธีคำนวณเพื่อเลือกขนาดฉนวนให้เหมาะกับขนาดของบัสบาร์	63
3.4.2	การวิเคราะห์ขนาดฉนวนให้เหมาะกับขนาดของบัสบาร์	63
3.4.3	ขั้นตอนทดสอบ อุณหภูมิที่เหมาะสมกับบัสบาร์และ ฉนวนแต่ละขนาดของบัสบาร์หลัก	68
3.4.4	เปรียบเทียบปรับปรุงการใช้งานจาก ฟันแก๊สหุงต้มผ่านหัวฟันแก๊ส แบบ Manual → Electric Blower Heater → เครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ	69
บทที่ 4	ผลการดำเนินการ	70
4.1	บทนำ	70
4.2	การเลือกขนาดฉนวน	70
4.3	ผลของการปรับค่าพีไอดี	71
4.3.1	ผลการปรับค่าพีไอดี เพื่อควบคุมกระบวนการ ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น	72
4.4	ผลการทดสอบ	74
4.4.1	ขั้นตอนการออกแบบตารางการทดลอง	75
4.4.2	ผลการทดสอบบัสบาร์ขนาด 30 x 10 mm ² กับฉนวนขนาด 31.8 mm.	79
4.4.3	ผลการทดสอบบัสบาร์ขนาด 40 x 10 mm ² กับฉนวนขนาด 38.1 mm.	80

4.4.4 ผลการทดลองบัสบาร์ขนาด 60 x 10 mm ² กับฉนวนขนาด 50.8 mm.	82
4.5 ช่วงค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมกับแต่ละขนาดของบัสบาร์และฉนวน	84
4.6 การเปรียบเทียบการเป่าให้ความร้อนโดยเครื่อง ทั้ง 3 ชนิด	85
4.6.1 การคำนวณการประหยัดค่าใช้จ่ายลดลงจาก การใช้เครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ	86
4.6.1.1 ค่าใช้จ่ายที่ลดลงจากการเปลี่ยนจาก การใช้แก๊สหุงต้มเป็นเครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ	88
4.6.1.2 ค่าใช้จ่ายที่ลดลงจากการเปลี่ยนจากการใช้ Electric Blower Heater (Hot Air Gun) เป็นเครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ	88
4.6.2 ข้อดีและข้อด้อยของการใช้งานอุปกรณ์ต่างกัน จากการหุ้มฉนวนที่บัสบาร์	89
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	92
5.1 สรุปผล	92
5.2 ปัญหาและอุปสรรค	92
5.3 แนวทางการแก้ไขปัญหา	93
บรรณานุกรม	94
ภาคผนวก	95
ภาคผนวก ก.	96
ภาคผนวก ข.	101
ภาคผนวก ค.	106
ประวัติผู้เขียน	108

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	ดัชนีแสดงค่ามาตรฐานการป้องกันตามมาตรฐาน IEC 529 และ มอก. 513	7
2.2	ปริมาณการทนกระแสได้ของบัสบาร์และฉนวน	10
2.3	แสดงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบต่างๆตามวิธี Process Reaction Curve	33
2.4	แสดงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบต่างๆตามวิธี Ultimate Method	34
2.5	เทอร์โมคัปเปิลมาตรฐาน	41
2.6	แสดงการเปรียบเทียบจุดเด่นของอาร์ทีดีและเทอร์โมคัปเปิล	44
3.1	ตารางแสดง บัสบาร์แต่ละขนาดเทียบกับลักษณะการใช้งานของบัสบาร์	62
3.2	แสดงการเลือกใช้งานบัสบาร์ที่สามารถใช้งานได้ทั้ง 3 อุปกรณ์ ในการเป่าความร้อน	63
3.3	แสดงค่าความยาวพื้นที่หน้าตัดและระยะหัดสั้นที่สุดที่หัดได้	66
3.4	แสดงตัวอย่างการเลือกใช้ท่อฉนวน กับขนาดบัสบาร์ขนาด $30 \times 10 \text{ mm}^2$	67
3.5	ตารางการเลือกแสดงขนาดบัสบาร์และขนาดของฉนวนที่ใช้งานร่วมกันได้ทั้งหมด	67
4.1	ตารางแสดง ขนาดบัสบาร์และขนาดของฉนวน	70
4.2	ตารางแสดงการปรับค่าพีไอดี ของกระบวนการเครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ	72
4.3	ตารางเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิก่อนปรับพีไอดี และหลังจากการปรับพีไอดีได้ค่าที่เหมาะสม	73
4.4	ตารางทดลอง บัสบาร์ขนาด $30 \times 10 \text{ mm}^2$	75
4.5	ตารางทดลอง บัสบาร์ขนาด $40 \times 10 \text{ mm}^2$	76
4.6	ตารางทดลอง บัสบาร์ขนาด $60 \times 10 \text{ mm}^2$	77
4.7	ตารางทดลอง บัสบาร์ขนาด $30 \times 10 \text{ mm}^2$	79
4.8	ตารางทดลอง บัสบาร์ขนาด $40 \times 10 \text{ mm}^2$	80
4.9	ตารางทดลอง บัสบาร์ขนาด $60 \times 10 \text{ mm}^2$	82
4.10	ตารางผลการทดลองโดยใช้อุปกรณ์ทั้ง 3 ประเภท	84
4.11	ตารางแสดงการเปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์ทั้ง 3 ชนิด	85
4.12	เวลาที่ใช้ในการเป่าบัสบาร์แต่ละขนาดโดยการเป่าด้วยแก๊สหุงต้ม	86
4.13	เวลาที่ใช้ในการเป่าบัสบาร์แต่ละขนาด โดยการเป่าด้วย Electric Blower Heater	87

4.14	เวลาที่ใช้ในการเป่าสปาร์แต่ละขนาดโดย การเป่าด้วยเครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ	87
4.15	ตารางแสดงค่าใช้จ่ายที่ลดลงจากการเปลี่ยนจาก การใช้แก๊สหุงต้มเป็นเครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ	88
4.16	ตารางแสดงค่าใช้จ่ายที่ลดลงจากการเปลี่ยนจากการใช้ Electric Blower Heater (Hot Air Gun) เป็นเครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ	89
4.17	ตารางแสดงข้อดีและข้อด้อยของการใช้งานอุปกรณ์แต่ละประเภท ในการเป่าให้ความร้อนของการหดตัวของฉนวน	89
4.18	ตารางแสดงกสนเรียงลำดับการใช้งานเปรียบเทียบ 3 อุปกรณ์	97

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำ	5
2.2 ภาพประกอบแผงสวิตช์แรงดันต่ำ ของ บริษัท เอบีบี จำกัด	6
2.3 ตัวอย่างตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำ ประเภท Motor Control Center :MCC ของ บริษัท เอบีบี จำกัด	6
2.4 ภาพตัวอย่างบัสบาร์ทองแดง	9
2.5 ภาพตัวอย่างฉนวน	11
2.6 โครงสร้างส่วนประกอบตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำ	12
2.7 Molded Case Circuit Breaker (MCCB) ของ บริษัท เอบีบี จำกัด	13
2.8 ตัวอย่าง (ก) ACB: Fixed Type และ (ข) ACB: Withdrawable Type ผลิตภัณฑ์ของบริษัท เอบีบี จำกัด	14
2.9 Current Transformer : CT หรือหม้อแปลงกระแส	15
2.10 เครื่องวัดไฟฟ้า สำหรับตู้สวิตช์บอร์ด (Meter)	15
2.11 Selector Switch	16
2.12 Power Meter	16
2.13 แสดงองค์ประกอบพื้นฐานของตู้อบลมร้อน	17
2.14 ภาพประกอบการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี	19
2.15 ตัวอย่างการทำงานที่มีความร้อนในสถานประกอบการ	20
2.16 ตัวอย่าง ฮีตเตอร์รังสีอินฟราเรด	20
2.17 แผนภาพประกอบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	21
2.18 แสดงโครงสร้างของระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยทั่วไป	23
2.19 ระบบการควบคุมแบบพีไอดี	24
2.20 แสดงการทำงานของระบบควบคุมแบบ ON-OFF	25
2.21 แสดงคุณสมบัติของการทำงานของระบบควบคุมแบบ Proportional	26
2.22 แสดงผลตอบสนองของการทำงานของระบบควบคุมแบบ Integral	28
2.23 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของการทำงานของระบบควบคุมแบบ Derivative	29
2.24 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของการทำงานของระบบควบคุมแบบ PI (Direct action)	30
2.25 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของการทำงานของระบบควบคุมแบบ PD	30

2.26	แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ PID	31
2.27	แสดงค่าพ่วงเกินที่ต้องการเมื่อใช้การปรับด้วยวิธี Ziegler-Nichols	32
2.28	แสดงผลตอบสนองรูปตัว S เมื่อปรับโดยใช้วิธี Process Reaction Curve	32
2.29	แสดงผลตอบสนองเวลาเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง เมื่อปรับโดยใช้วิธี Ultimate method.	33
2.30	แสดงค่าอัตราการเสื่อม $\frac{1}{4}$ เมื่อปรับโดยวิธี Damped Oscillation	35
2.31	แสดงค่า quarter-amplitude decay (Decay Ratio ~ 0.25)	36
2.32	ภาพตัวอย่างอาร์ทีดี Pt 100 Ω	38
2.33	ลักษณะวงจรต่อใช้งานของอาร์ทีดี	39
2.34	การทดลองของซีเบค (Seeback)	39
2.35	แสดงแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากผลต่างของอุณหภูมิ ของเทอร์คัปเปิลมาตรฐานทั้ง 7 แบบ	42
2.36	จุดเชื่อมต่อแบบเปลือย (Exposed Junction)	42
2.37	จุดต่อแบบไม่เชื่อมต่อกับตัวยึด (Ungrounded Junction)	43
2.38	จุดต่อแบบเชื่อมต่อลงบนส่วนปลาย Sheath (Grounded Junction)	43
2.39	ไพโรมิเตอร์ชนิดอินฟราเรด	47
3.1	กระบวนการผลิตตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำ	49
3.2	ตัวอย่าง Main BusBar และ Distribution Bar	49
3.3	ตัวอย่าง Dropper Bar	50
3.4	ตัวอย่าง Module Bar	50
3.5	ตัวอย่างถังแก๊สและอุปกรณ์เป่าให้ความร้อนกับฉนวน	51
3.6	เป็นเครื่องเป่าลมร้อน (Hot Air Gun) ที่ใช้ในการเป่าหุ้มฉนวน	51
3.7	เครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ	52
3.8	ตัวอย่างภาพถ่ายของวงจร เครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ	53
3.9	ตัวอย่างภาพถ่ายของวงจร เครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ	54
3.10	ตัวอย่างวงรูปการทำงานภาพถ่ายของเครื่อง Heat Shrink Machine	55
3.11	สายพานลำเลียงขับเคลื่อนขึ้นงาน	55
3.12	ตัวอย่างภาพถ่ายของวงจร สายพานลำเลียงขับเคลื่อนขึ้นงาน	56
3.13	ตัวอย่างเครื่องควบคุมฟังก์ชันพีไอดี (PID controller) ยี่ห้อ TAIE รุ่น FY 700	58
3.14	เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K ช่วงการวัดอุณหภูมิ 0 - 400°C	58

3.15	Fluke 568 Infrared and Contact Thermometer	58
3.16	แสดงหน้าจอของเครื่องควบคุมฟังก์ชันพีไอดี อยุธยาโหมด Manual	59
3.17	แสดงหน้าจอของเครื่องควบคุมฟังก์ชันพีไอดี ไม่ได้อยู่ในโหมด Manual	59
3.18	ตัวอย่างหน้าจอแสดงค่าของการควบคุมพี	60
3.19	ตัวอย่างหน้าจอแสดงค่าของการควบคุมไอ	60
3.20	ตัวอย่างหน้าจอแสดงค่าของการควบคุมดี	61
3.21	แสดงภาพตัวอย่างการแปลงพื้นที่หน้าตัดของฉนวนทรงกลม มาเป็นตามลักษณะของบัสบาร์	63
4.1	กราฟเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิก่อนปรับค่าพีไอดี และหลังการปรับค่าพีไอดี	74
4.2	กราฟแสดงการเปรียบเทียบเวลาการใช้งานของอุปกรณ์ทั้ง 3 ประเภท	85

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เอบีบี (ABB Limited) เป็นบริษัทต่างชาติมีสำนักงานใหญ่อยู่ที่เมืองซูริก ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ มีการดำเนินธุรกิจทางด้านวิศวกรรมหุ่นยนต์ ระบบไฟฟ้า และเทคโนโลยีระบบอัตโนมัติ เอบีบีเป็นหนึ่งในบริษัทวิศวกรรมที่มีเครือข่ายใหญ่ที่สุดแห่งหนึ่งของโลก โดยมีสำนักงานไม่น้อยกว่า 100 ประเทศ และพนักงานไม่น้อยกว่า 150,000 คน ซึ่งสามารถแบ่งเป็นกลุ่มตามหน้าที่ความรับผิดชอบได้ดังนี้

- 1) แผนกบริหารงานส่วนกลาง มีหน้าที่จัดการและควบคุมการปฏิบัติงาน
- 2) Discrete Automation and Motion รับผิดชอบ ผลิตภัณฑ์ สินค้า และบริการสำหรับการผลิตในอุตสาหกรรมอัตโนมัติ
- 3) Low Voltage Products รับผิดชอบผลิตภัณฑ์ อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันต่ำ เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ สวิตช์ประเภทต่างๆ อุปกรณ์ควบคุม ตู้ไฟฟ้า และระบบสายไฟฟ้า
- 4) Power Products รับผิดชอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้ากำลังแรงดันสูง และแรงดันปานกลาง ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญสำหรับระบบการส่งและจ่ายกำลังไฟฟ้า แผนกนี้มีหน้าที่ผลิตหม้อแปลงไฟฟ้า สวิตช์เกียร์ เซอร์กิตเบรกเกอร์ สายไฟฟ้า และอุปกรณ์ติดตั้งสนับสนุนระบบส่งจ่ายกำลัง
- 5) Power Systems แผนกระบบไฟฟ้ากำลังรับผิดชอบการบริการระบบเทิร์นคีย์ สำหรับการส่งและกระจายไฟฟ้าในโครงข่าย และในโรงไฟฟ้า โดยผลิตภัณฑ์ที่สำคัญคือสร้างสถานีไฟฟ้าย่อย (Sub Station) และระบบอัตโนมัติสำหรับสถานีไฟฟ้าย่อย
- 6) Process Automation จุดมุ่งหมายหลักของเอบีบี คือการประยุกต์เพื่อนำผลิตภัณฑ์ของบริษัทมาสร้างโครงข่ายให้เป็นระบบควบคุมอัตโนมัติ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับอุตสาหกรรมการผลิตที่มีลักษณะเฉพาะ เช่น อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ เป็นต้น

การปฏิบัติงานสหกิจศึกษาของนักศึกษาที่บริษัทเอบีบีคือ แผนก Low Voltage Systems ในส่วนของ Production ซึ่งจะทำการผลิตตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำ (Low Voltage Switchgear) ตามความต้องการของลูกค้าโดยคำนึงถึงฟังก์ชันการใช้งานเป็นหลัก ในการผลิตตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำจะอาศัยแรงงานคนเป็นหลักในขั้นตอนของการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้ากับตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำที่ได้

ออกแบบไว้ เพื่อให้ง่ายและสะดวกในการติดตั้ง ลำดับของการประกอบตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำเริ่มต้นจากการประกอบโครง สร้างของตู้ การตัดบัสบาร์ (Bus Bar) การติดตั้งบัสบาร์ หรือหุ้มฉนวน (Heat Shrink Tube) การต่ออุปกรณ์ต่างๆ ที่เป็นโมดูล (Module) สำเร็จ ตลอดจนการเดินสายวงจรไฟฟ้า (Wiring) ในตู้ควบคุม และขั้นตอนสุดท้ายเป็นการทดสอบหลังการประกอบตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำก่อนส่งตู้ให้กับลูกค้า ในบางกรณีที่ลูกค้าต้องการจะหุ้มฉนวนที่บัสบาร์ เพื่อเพิ่มความปลอดภัยก็สามารถทำได้

ในอดีตกระบวนการหุ้มฉนวนของบริษัทใช้พนักงานทำการเป่าหรือพ่นแก๊สหุ้มฉนวน ผ่านหัวพ่นแก๊สแบบ Manual หรือใช้ Electric Blower Heater (Air Hot Gun) เป่าลมร้อนเพื่อทำการหุ้มฉนวนที่บัสบาร์ พนักงานหนึ่งคนทำงานได้เพียงทีละชิ้น จึงใช้ระยะเวลาในการหุ้มทีมนานและต้องใช้จำนวนพนักงานในการหุ้มฉนวนหลายคน ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและที่สำคัญส่งผลเสียต่อสุขภาพของพนักงาน ผู้ปฏิบัติงาน อันเนื่องมาจากการสูดดมแก๊สหุ้มฉนวนหรือแก๊ส LPG เป็นระยะเวลานานๆ ซึ่งมีผลต่อระบบทางเดินหายใจ เช่น เกิดการระคายเคืองที่ระบบทางเดินหายใจ เกิดหลอดลมอักเสบ จมูกอักเสบ หากสูดดมเข้าไปจะทำให้ปริมาณก๊าซออกซิเจนในปอดลดลง ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนในเลือดและเนื้อเยื่อต่างๆ ลดลงตามไปด้วย ซึ่งมีผลต่อระบบประสาทส่วนกลาง ทำให้เกิดอาการหายใจสั้น หัวใจเต้นเร็ว มึนงง ปวดศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน ทรงตัวไม่อยู่ อาจทำให้เกิดอาการชก หมดสติ และเสียชีวิตได้ นอกจากนี้แสงสว่างของแก๊สยังมีผลต่อสุขภาพตาทำให้เยื่อตาอักเสบอีกด้วย บริษัทเอบีพีได้คำนึงถึง “ความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน” มากที่สุดเป็นอันดับหนึ่ง จึงได้พัฒนาเครื่องเป่าลมร้อนอัตโนมัติ (Heat Shrink Machine) สำหรับการหุ้มฉนวนเพื่อให้สามารถหุ้มฉนวนได้ปริมาณมากๆ ประหยัดแรงงานและค่าใช้จ่าย ผู้ปฏิบัติงานมีความปลอดภัย หลักการทำงานของเครื่องเป่าลมร้อนอัตโนมัติมีดังนี้ ห้องอบลมร้อนมีพื้นที่ภายในห้อง 0.587 ลูกบาศก์เมตร บรรจุด้วย Heater ชนิดรังสีอินฟราเรด จำนวน 15 แท่ง แต่ละแท่งมีขนาดกำลังงาน 1,500 วัตต์ ความร้อนที่ได้อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 0°C ถึง 180°C ควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องควบคุมที่มีฟังก์ชันการควบคุมแบบพีไอดี ชิ้นงานบัสบาร์ที่หุ้มฉนวนแล้วรอการเป่าและอบความร้อน จะถูกลำเรียงโดยสายพานลำเรียงที่ปรับความเร็วได้ตั้งแต่ 0.0064 ถึง 0.0185 เมตรต่อนาที เพื่อนำชิ้นงานเข้ามาที่ห้องอบ เมื่อชิ้นงานเข้าสู่ห้องอบแล้วจะมีการใช้ Blower ขนาดความเร็วลม 0.1668 ลูกบาศก์เมตร/นาที เพื่อหมุนเวียนลมร้อนภายในเตาอบและเป่าลมร้อนลงบนชิ้นงานเพื่อเร่งให้ฉนวนหดตัวได้เร็วยิ่งขึ้น จากการพัฒนาเครื่องเป่าลมร้อนอัตโนมัตินี้ ทำให้สามารถเพิ่มปริมาณการผลิตได้มากขึ้นจากเดิม ส่งผลให้กระบวนการผลิตตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำ นั้นก็จะมีประสิทธิภาพที่มากขึ้นตามไปด้วย อีกทั้งยังสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในระยะเวลาการผลิตที่เท่าเดิม

1.2 วัตถุประสงค์ของการปฏิบัติงานสหกิจศึกษา

- 1) เพื่อศึกษากระบวนการหุ้มฉนวนของบัสบาร์ ในส่วนของการประกอบตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำ
- 2) เพื่อศึกษาหลักการทำงานและการปรับแต่งค่าของตัวควบคุม PID เพื่อควบคุมอุณหภูมิในห้องอบลมร้อนให้มีเสถียรภาพ
- 3) เพื่อปรับปรุงและลดการแกว่งของอุณหภูมิในห้องอบลมร้อนให้มีค่าน้อยที่สุด และอุณหภูมิเข้าสู่ค่าเป้าหมาย (Set Point) มากที่สุด
- 4) เพื่อศึกษาและทดลองอุณหภูมิที่เหมาะสมกับแต่ละขนาดของบัสบาร์และฉนวนที่ใช้หุ้มบัสบาร์
- 5) เพื่อเรียนรู้กระบวนการทำงานทางวิศวกรรม ภายในบริษัทเอบีบี จำกัด

1.3 ขอบเขตของการปฏิบัติงานสหกิจศึกษา

การปฏิบัติงานสหกิจศึกษาจะศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องเป่าลมร้อนอัตโนมัติ ด้วย ตัวควบคุม PID หลักการทำงานของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิและทดลองหาอุณหภูมิที่เหมาะสมกับฉนวนและ บัสบาร์แต่ละขนาดที่สัมพันธ์กับความเร็วของสายพานลำเลียง เพื่อให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นและสามารถลดค่าใช้จ่ายการผลิตได้มากที่สุด และยังคงรักษาในเรื่องความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานได้อีกด้วย

1.4 วิธีการดำเนินงาน

- 1) ศึกษากระบวนการผลิตตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำ
- 2) รวบรวม และศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการหุ้มฉนวน
- 3) ศึกษาการทำงานของตัวควบคุม PID และศึกษาการทำงานของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ
- 4) ศึกษาขั้นตอนในการปรับค่า PID ที่เหมาะสม และเสนอแนะการปรับปรุงเครื่องเป่าลมร้อนอัตโนมัติเพื่อให้สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตามที่ต้องการ
- 5) ศึกษาวิธีการคำนวณเพื่อเลือกขนาดฉนวนให้เหมาะสมกับขนาดของบัสบาร์
- 6) การทดสอบแต่ละช่วงอุณหภูมิของบัสบาร์แต่ละขนาดและเปรียบเทียบค่าใช้จ่าย, ข้อดี-ข้อดีของการใช้งานก่อนการเพิ่มประสิทธิภาพและหลังการเพิ่มประสิทธิภาพโดยการปรับค่า PID และการติดตั้งลมเข้ามา

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้เรียนรู้และเข้าใจกระบวนการผลิตตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำ
- 2) ได้เรียนรู้จากการศึกษาการทำงานของตัวควบคุม PID และอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ และเรียนรู้การปรับแต่งค่า PID เพื่อควบคุมอุณหภูมิ
- 3) ได้เรียนรู้กระบวนการหุ้มฉนวนที่บัสบาร์
- 4) ได้เรียนรู้กระบวนการทำงานภายในบริษัท เอบีบี จำกัด (ประเทศไทย)
- 5) สามารถนำความรู้จากการศึกษาไปประยุกต์ใช้กับงานจริงได้และสามารถทำให้เกิดประโยชน์
- 6) ได้รับความรู้ทางด้านไฟฟ้าและด้านอุตสาหกรรมมากขึ้น
- 7) ได้รับประสบการณ์การทำงานจริงและการทำงานร่วมกับคนอื่น

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการของเครื่องเป่าลมร้อนอัตโนมัติ

ในบทนี้จะกล่าวถึงตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำเบื้องต้น บัสบาร์ และฉนวน หลักการของการควบคุมแบบพีไอดี (PID Control) ตู้อบ ประเภทของความร้อน อันตรายจากการทำงานบริเวณร้อน การให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรด (Electric Infrared Heating) และหลักการของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

2.1 ตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำ (Low-Voltage Switchgear)



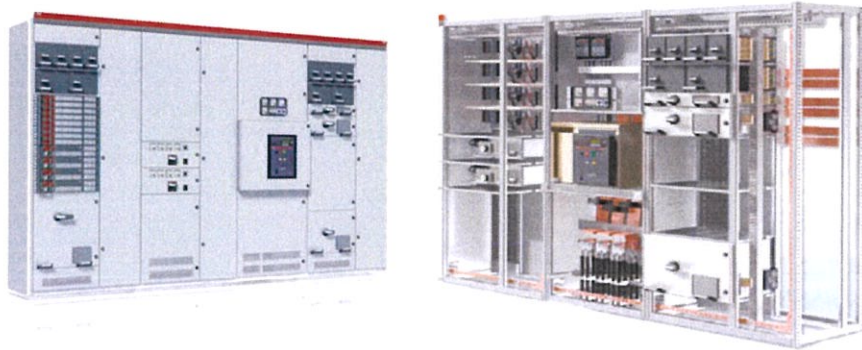
ภาพที่ 2.1 ตัวอย่างตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำ

ในระบบพลังงานไฟฟ้าสวิตช์เกียร์ (Switchgear) เป็นการร่วมกันทำงานของสวิตช์ตัดต่อ (Disconnecting Switch) ฟิวส์ (Fuse) หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) เพื่อใช้ในการควบคุม ป้องกันและแยกอุปกรณ์ไฟฟ้าออกจากระบบ สวิตช์เกียร์จะถูกนำมาใช้ทั้งเพื่อตัดไฟออกจากอุปกรณ์และเพื่อความสะดวกการทำงาน ระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำคือแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 1-1,000 Volt หรือ 1 kV.

2.1.1 ตู้ไฟฟ้าสวิตช์เกียร์ควบคุมระบบจ่ายไฟฟ้าระดับแรงดันต่ำ (Low-Voltage Distribution Board)

เป็นตู้ที่ใช้ในการตัดต่อและป้องกันระบบจ่ายแรงดันที่มีความสำคัญต่อระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโรงงานอุตสาหกรรมรวมถึงตึกและอาคารสูง ในการที่จะรักษาเสถียร ภาพการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลดและเครื่องจักรและอุปกรณ์สำนักงานต่างๆได้อย่างมั่นคงและต่อเนื่อง

มาตรฐานการผลิตหรือการทดสอบ: ผลิตกันที่ได้คุณภาพ และการประกอบตามมาตรฐานสากล IEC JIS ANSI DIN ภายใต้การควบคุมการผลิตตามระบบบริหารคุณภาพ ISO:9001



ภาพที่ 2.2 ภาพประกอบแผงสวิทช์แรงดันต่ำของบริษัท เอบีบี จำกัด

2.1.2 ตู้ไฟฟ้าสวิทช์เกียร์ควบคุมมอเตอร์ระดับแรงดันต่ำ (Low-Voltage Motor Control Center: MCC)

เป็นตู้ควบคุมไฟฟ้าศูนย์กลางในการควบคุมและป้องกันมอเตอร์ของเครื่องจักรต่างๆ ให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งกรณีการควบคุมกระบวนแบบอิสระ (Standalone) และการควบคุมแบบเครือข่าย (Network) เช่น เครื่องจักรกลในอุตสาหกรรมการผลิตแทบทุกประเภท ลิฟท์ สายพานลำเลียง พัดลม โบล์เวอร์ ปัมป์ของเหลว เป็นต้น ทำให้การผลิตและบริหารจัดการ เป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

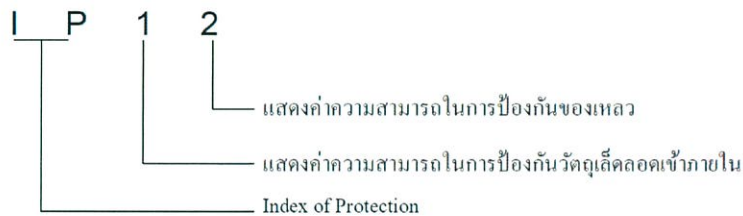
มาตรฐานการผลิตหรือการทดสอบ: ผลิตและประกอบตามมาตรฐานสากล IEC JIS ANSI DIN ภายใต้การควบคุมการผลิตตามระบบบริหารคุณภาพ ISO:9001



ภาพที่ 2.3 ตัวอย่างตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำประเภท Motor Control Center: MCC ของบริษัท เอบีบี จำกัด

2.1.3 ดัชนีแสดงค่ามาตรฐานการป้องกัน

ดัชนีแสดงค่ามาตรฐานการป้องกัน (Degree of Protection) เป็นการกำหนดค่าความสามารถในการป้องกันการสัมผัสส่วนที่มีไฟฟ้าที่เป็นอันตรายต่อบุคคล ทั้งจากการสัมผัสส่วนที่มีไฟฟ้าโดยตรงหรือโดยการใช้วัตถุสอดใส่เข้าไปในเครื่องอุปกรณ์ไฟฟ้าและยังเป็นตัวแสดงค่าความสามารถในการป้องกันความเสียหายจากของเหลวเข้าไปในตัวเครื่องอุปกรณ์ไฟฟ้าอีกด้วย การแสดงค่าความสามารถในการป้องกันจะกำหนดเป็นค่าตัวเลขหลังอักษร IP (Index of Protection) โดยมาตรฐาน IEC 529 และ มอก. 513 กำหนดให้เป็นตัวเลข 2 หรือ 3 หลัก หลังตัวอักษร IP แต่โดยทั่วไป นิยมกำหนดเพียง 2 หลักเท่านั้น ความหมายของแต่ละหลักแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 การแสดงความสามารถเขียนได้ดังนี้



ตารางที่ 2.1 ดัชนีแสดงค่ามาตรฐานการป้องกันตามมาตรฐาน IEC 529 และ มอก. 513

รหัส	รหัส “ตัวแรก” แสดงความสามารถในการป้องกันวัตถุ (ของแข็ง) เสียดลอดเข้าภายใน	รหัส “ตัวที่สอง” แสดงความสามารถในการป้องกันของเหลว เข้าไปทำความเสียหาย
0	ไม่มีการป้องกัน	ไม่มีการป้องกัน
1	สามารถป้องกันของแข็งที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 50 มม. ที่มากระทบไม่ให้ผ่านลอดเข้าไปข้างในได้	สามารถป้องกันน้ำที่ตกลงมาในแนวตั้งได้
2	สามารถป้องกันของแข็งที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 12 มม. ที่มากระทบไม่ให้ผ่านลอดเข้าไปข้างในได้	สามารถป้องกันน้ำที่ตกลงมาในแนวตั้งและในแนวที่ทำมุม 15 องศา กับแนวตั้งได้
3	สามารถป้องกันของแข็งที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 2.5 มม. ที่มากระทบไม่ให้ผ่านลอดเข้าไปข้างในได้	สามารถป้องกันน้ำฝนที่ตกลงมาในแนวทำมุม 60 องศา กับแนวตั้งได้
4	สามารถป้องกันของแข็งที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 1 มม. ที่มากระทบไม่ให้ผ่านลอดเข้าไปข้างในได้	สามารถป้องกันหยดน้ำหรือน้ำที่สาดมาจากทุกทิศทางได้

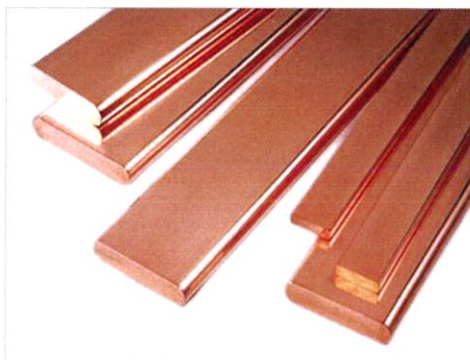
รหัส	รหัส “ตัวแรก” แสดงความสามารถในการป้องกันวัตถุ (ของแข็ง) เล็ดลอดเข้าภายใน	รหัส “ตัวที่สอง” แสดงความสามารถในการป้องกันของเหลว เข้าไปทำความเสียหาย
5	สามารถป้องกันฝุ่นได้	สามารถป้องกันน้ำที่ถูกฉีดมาตกกระทบในทุกทิศทางได้
6	สามารถป้องกันฝุ่นได้อย่างสมบูรณ์	สามารถป้องกันความเสียหายที่เกิดจากน้ำฉีดอย่างรุนแรงเข้าทุกทิศทางได้
7	-	สามารถป้องกันความเสียหายที่เกิดจากน้ำท่วมหรือจมน้ำได้ตั้งแต่ 15 เซนติเมตร ถึง 1 เมตร ได้เป็นเวลา 30 นาที
8	-	สามารถป้องกันความเสียหายที่เกิดจากน้ำท่วมหรือจมน้ำได้ที่มีความลึกมากกว่า 1 เมตร

2.1.4 มาตรฐานตัวนำไฟฟ้า

ต้องมีคุณสมบัติตามมาตรฐานที่การไฟฟ้านครหลวงยอมรับ เช่น UL, IEC, BS, DIN, JIS และ NEMA ตัวนำไฟฟ้า มีดังนี้

- Copper Bus Bar ต้องมีความบริสุทธิ์ของทองแดง ไม่น้อยกว่าร้อยละ 98%
- Aluminum Bus Bar ต้องมีความบริสุทธิ์ของอะลูมิเนียม ไม่น้อยกว่าร้อยละ 98%
- Busway ต้องเป็นชนิดที่ประกอบสำเร็จรูปจากบริษัทผู้ผลิตและได้มีการทดสอบตามมาตรฐานข้างต้น
- ตัวนำประเภทอื่นที่ได้รับความเห็นชอบจากการไฟฟ้านครหลวง

2.1.5 บัสบาร์และฉนวน



ภาพที่ 2.4 ภาพตัวอย่างบัสบาร์ทองแดง

บัสบาร์คือส่วนที่จะทำหน้าที่เชื่อมต่อทางไฟฟ้าระหว่างสายประธานกับสายป้อนบัสบาร์ ส่วนมากจะทำจากทองแดงที่มีความบริสุทธิ์สูงมาก เนื่องจากต้องนำกระแสปริมาณมากๆ เสมอ และเพื่อความปลอดภัยต้องหุ้มฉนวนที่ขั้วต่อทางไฟฟ้าด้วยเสมอ เนื่องจากบัสบาร์ต้องนำกระแสปริมาณมาก ถ้าหากเกิดการผิดพลาดและบกพร่องขึ้นจะเกิดแรงดึงกระชากที่ตัวบัสบาร์ ดังนั้นการยึดบัสบาร์จึงเป็นเรื่องที่สำคัญมากเช่นกัน การยึดจับจะต้องมีความแข็งแรงเพียงพอโดยผ่าน Insulator ปริมาณการทนกระแสได้ของบัสบาร์จะแสดงในตารางที่ 2.2 และวัสดุที่นำมาใช้ผลิตต้องมีคุณสมบัติทางไฟฟ้า และทางกลที่เหมาะสม โดยพิจารณาเบื้องต้นจากคุณสมบัติดังนี้ โลหะที่จะนำมาใช้เป็นบัสบาร์ ควรจะมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. มีความต้านทานต่ำ
2. ความแข็งแรงทางกลสูงในด้านแรงดึง แรงอัดและแรงเฉิก
3. ความต้านทานต่อ Fatigue Failure สูง
4. ความต้านทานของ Surface Film ต่ำ
5. การตัดต่อหรือตัด ทำได้สะดวก
6. ความต้านทานต่อการกัดกร่อนสูง

2.1.5.1 คุณสมบัติบัสบาร์

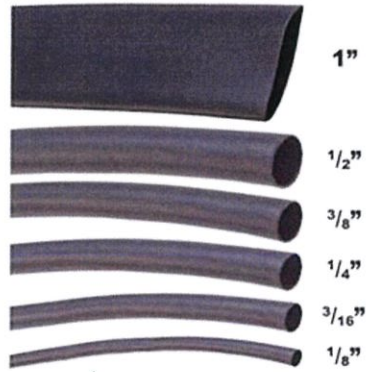
บัสบาร์เป็นชนิด Flat Copper โดยมีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมตามมาตรฐาน DIN และการเชื่อมต่อระหว่างตู้ บัสบาร์จะต้องถูกยึดขึ้นด้วยนอต (Bolts) อย่างแข็งแรง และบัสบาร์จะแยกเฟสที่อยู่ใน Gas Tighten Bus Bar Housing ในลักษณะขั้วเดียว (Single Pole) SF6 เป็นฉนวนหุ้มโลหะที่ส่วนปลาย (Insulated Metal Enclosed) โดยมี Manometers สำหรับตรวจวัดความดันแก๊ส ติดตั้งอยู่บริเวณผนังด้านหลังของตู้สวิตช์เกียร์

ตารางที่ 2.2 ปริมาณการทนกระแสได้ของบัสบาร์และฉนวน

CU.BUSBAR for ABB (DIN 43671)		
1	CU. BUSBAR 100A (12x2)mm	106 A
2	CU. BUSBAR 160A (12x2)mm	182 A
3	CU. BUSBAR 250A (20x5)mm	274 A
4	CU. BUSBAR 320A 2(20x5)mm	500 A
5	CU. BUSBAR 400A (30x10)mm	573 A
6	CU. BUSBAR 630A 2(30x5)mm	672 A
7	CU. BUSBAR 630A (40x10)mm	715 A
8	CU. BUSBAR 800A (50x10)mm	852 A
9	CU. BUSBAR 1250A 2(40x10)mm	1290 A
10	CU. BUSBAR 1600A 3(40x10)mm	1770 A
11	CU. BUSBAR 800A (60x10)mm	989 A
12	CU. BUSBAR 1600A 2(60x10)mm	1720 A
13	CU. BUSBAR 2000A 3(60x10)mm	2300 A
14	CU. BUSBAR 2000A 2(80x10)mm	2110 A
15	CU. BUSBAR 2500A 3(50x10)mm	2790 A
16	CU. BUSBAR 3200A 3(100x10)mm	3260 A
17	CU. BUSBAR 4000A 4(120x10)mm	4500 A
18	CU. BUSBAR 5000A 3(200x10)mm	5610 A
19	CU. BUSBAR 6300A 4(200x10)mm	6540 A
20	CU. BUSBAR 1250A (100x10)mm	1490 A
21	CU. BUSBAR 2500A 2(120x10)mm	2860 A
22	CU. BUSBAR 3200A 2(160x10)mm	3570 A

2.1.6 ท่อฉนวนหด (Heat-Shrink Tube)

เป็นท่อพลาสติกที่จะหดตัวเมื่อโดนความร้อน ทำจากไนลอนหรือพลาสติกตระกูลโพลีเอทิลีนที่ถูกยืด หลังการหดตัวท่อจะมีขนาดเท่ากับครึ่งหนึ่งตอนก่อนถูกยืด โดยส่วนใหญ่จะใช้หุ้มอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรือจุดต่อเชื่อมสายไฟขนาดเล็ก เพื่อป้องกันการลัดวงจร หรือสนิม หรือเพิ่มความเป็นฉนวนให้กับบัสบาร์



ภาพที่ 2.5 ภาพตัวอย่างฉนวน

ข้อดีของการหุ้มฉนวนที่บัสบาร์

- เพิ่มความเป็นฉนวนมากขึ้น
- สามารถระบายความร้อนมากขึ้น
- ปลอดภัยมากขึ้น
- ป้องกันผิวหน้าบัสบาร์ เช่น กรด-ด่าง การเกิดอาร์ค ซึ่งการเกิดอาร์คอาจจะทำให้เกิดไฟไหม้ได้

ข้อจำกัดของการหุ้มฉนวนที่บัสบาร์

- ต้นทุนในการผลิตเพิ่มขึ้น
- กระบวนการผลิตตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำมากขึ้น และยากขึ้น

2.1.7 โครงสร้างตู้สวิตช์บอร์ดและอุปกรณ์ไฟฟ้า

2.1.7.1 สวิตช์บอร์ด (Switch Board) หมายถึง บอร์ดจ่ายไฟขนาดใหญ่ที่รับไฟฟ้าจากการไฟฟ้า หรือหม้อแปลงด้านไฟฟ้าแรงดันต่ำ เพื่อไปจ่ายโหลด (Load) ต่างๆ บางครั้งเรียก Main Distribution Board (MDB) หรือ Main Distribution Panel (MDP)

2.1.7.2 โครงตู้สวิตช์บอร์ด (Enclosure) หมายถึง โครงตู้สวิตช์บอร์ดผลิตจากเหล็ก Cold Rolled Steel Sheet หรือบางครั้งอาจผลิตจากเหล็ก Electro Galvanized (EG) สำหรับผลิตตู้ Outdoor แล้วผ่านกระบวนการพ่นสีด้วยระบบ Electro Static Painting โดยมีเนื้อสีเป็นสารพวก Epoxy (กรณีใช้งานในร่ม) และ Polyester (กรณีใช้งานกลางแจ้ง) ซึ่งโครงตู้และสีเคลือบผิวตู้ จะต้องมีความสมบัติที่สำคัญ เช่น ทนทานต่อสภาวะแวดล้อมกลางแจ้ง แสงแดด ทนทานต่อการกัดกร่อนและทนทานต่อความร้อน ที่อาจเกิดจากความบกพร่องในระบบหรือการอาร์คจากการลัดวงจร ปัจจุบันการผลิตตู้สวิตช์บอร์ด มักจะผลิตและประกอบโครงตู้เป็นแบบ Modular หรือ Knock Down มีความสูงประมาณ 1900-2200 มิลลิเมตร ส่วนความกว้างและความหนา (Thickness) อาจขึ้นอยู่กับขนาดของอุปกรณ์ที่ประกอบอยู่ภายในตู้สวิตช์บอร์ด



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างส่วนประกอบตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำ

2.1.8 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับความปลอดภัยในการปฏิบัติงานตู้สวิตช์บอร์ด (Information Safety)

ตู้สวิตช์บอร์ดที่ออกแบบและผลิตให้มีความปลอดภัยสูงต่อผู้ปฏิบัติงาน ต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าและต่ออาคารสถานที่ ดังนั้นจะต้องปฏิบัติตามมาตรฐานอย่างเคร่งครัด มาตรฐานของสหรัฐอเมริกาที่นิยมใช้กันมากและแพร่หลาย ได้แก่ National Electrical Code (NEC) และ International Electrotechnical Commission (IEC) นอกจากนั้นจะต้องปฏิบัติตามมาตรฐานการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และการไฟฟ้านครหลวงด้วย รวมทั้งจะต้องมีทีมงานวิศวกรในภาคการออกแบบ การผลิต และการควบคุมคุณภาพที่จะทำให้การออกแบบและการผลิตระบบไฟฟ้าให้มีความปลอดภัย

2.1.9 เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงต่ำ

เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำหน้าที่เป็นสวิตช์สำหรับเปิด-ปิดวงจรไฟฟ้าแรงต่ำในสภาวะปกติ และจะเปิดวงจรโดยอัตโนมัติ เมื่อเกิดภาวะผิดปกติขึ้นอันเนื่องมาจากการใช้กำลังงานเกินหรือลัดวงจร หลังจากทำการแก้ไขสิ่งผิดปกติบกพร่องเรียบร้อยแล้ว ก็สามารถสับไฟเข้าให้ใช้งานต่ออีกได้

2.1.9.1 พิกัดกระแสต่อเนื่อง

พิกัดกระแต่อเนื่องของเซอร์กิตเบรกเกอร์คือ ค่ากระแส RMS ที่เซอร์กิตเบรกเกอร์สามารถทนได้โดยที่อุณหภูมิไม่เพิ่มเกินค่าที่กำหนดให้อุณหภูมิโดยรอบ บริษัทผู้ผลิตส่วนมากจะทำเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีโครงเป็นช่วงกว้างๆ แล้วปรับตั้งกระแสพิกัดในระหว่างช่วงให้ละเอียดขึ้น ดังนั้นจึงเกิดคำว่า Ampere Frame (AF) Ampere Trip (AT) ขึ้น

1) Amp Trip (AT): ขนาดกระแสที่ใช้งาน เป็นตัวบอกให้รู้ว่าเบรกเกอร์ที่พิจารณาอยู่นั้นสามารถทนต่อกระแสในภาวะปกติได้สูงสุดเท่าใด หากในกรณีที่ขนาดอุปกรณ์ของผู้ผลิตมีค่าไม่ตรงกับค่าที่กำหนดก็สามารถเลือกใช้ค่าที่สูงขึ้นแทนได้

2) Amp Frame (AF): พิกัดกระแสโครง หมายถึงขนาดการทนกระแสของเปลือกหุ้มเป็นพิกัดการทนกระแสสูงสุดของเบรกเกอร์นั้นๆ เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีขนาด AF เดียวกัน จะมีขนาดมิติ (กว้างxยาวxสูง) เท่ากัน สามารถเปลี่ยนพิกัด Amp Trip ได้โดยที่ขนาด (มิติ) ของเบรกเกอร์ยังคงเท่าเดิม

2.1.9.2 พิกัดกระแสตัดกระแสลัดวงจร

พิกัดกระแสลัดวงจร (Interrupting Capacitive : IC) คือ กระแสลัดวงจรสูงสุดที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัดได้โดยที่ตัวเซอร์กิตเบรกเกอร์ไม่ได้รับความเสียหาย ค่า IC ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ได้จากการทดสอบ และขึ้นกับตัวแปรหลายตัว เช่น แรงดัน ตัวประกอบกำลัง เป็นต้น ดังนั้น เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่สามารถใช้ได้หลายแรงดันจะต้องมีค่า IC ที่แต่ละแรงดัน ค่า IC ของเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็นพิกัดที่สำคัญมากอย่างหนึ่ง ในการเลือกเซอร์กิตเบรกเกอร์ในการนำไปใช้งานจะต้องให้มี IC เท่ากับหรือมากกว่ากระแสลัดวงจรสูงสุดที่จุดติดตั้ง

2.1.10 ประเภทของเซอร์กิตเบรกเกอร์

เซอร์กิตเบรกเกอร์ อาจแบ่งตามลักษณะภายนอกและการใช้งานได้เป็น 2 ชนิด คือ

2.1.10.1 Molded Case Circuit Breaker (MCCB)

เป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่เป็นอุปกรณ์ตรวจจับและอุปกรณ์ตัดต่ออยู่ภายในวัสดุฉนวน ซึ่งทำด้วยสารประเภทพลาสติกแข็ง MCCB มีตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ ใช้สำหรับป้องกันระบบไฟฟ้าตั้งแต่วงจรย่อย สายป้อนถึงสายประธานและอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วย โครงกรอบของ MCCB ส่วนมากทำด้วยโพลีเอสเตอร์พลาสติก วัสดุชนิดนี้จะทำหน้าที่ในการป้องกันอาร์ค ความร้อน และแก๊สได้ เป็นฉนวนและเป็นที่กั้นภายในระหว่างขั้วไฟฟ้ามีความแข็งแรงทางกล



ภาพที่ 2.7 Molded Case Circuit Breaker (MCCB) ของ บริษัท เอบีบี จำกัด

2.1.10.2 Air Circuit Breaker (ACB)

เป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำอีกชนิดหนึ่งสามารถดับอาร์คไฟฟ้าในอากาศ จึงเรียกว่า “Air Circuit Breaker (ACB)” เป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาดใหญ่ มีพิกัดกระแสต่อเนื่องสูง คืออาจมีตั้งแต่ 600 ถึง 6300A เป็นแบบเปิดโล่ง คือ มีอุปกรณ์และกลไกอยู่เป็นจำนวนมาก และติดตั้งอย่างเปิดโล่งเห็นได้ชัดเจน ACB นั้น มี 2 ประเภทคือ Fixed Type และ Withdrawable Type



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.8 ตัวอย่าง (ก) ACB: Fixed Type และ (ข) ACB: Withdrawable Type

ผลิตภัณฑ์ของบริษัท เอบีบี จำกัด

2.1.11 เครื่องวัดไฟฟ้า

2.1.11.1 หม้อแปลงเครื่องวัด (Instrument Transformers)

หม้อแปลงเครื่องวัดคือเครื่องวัดที่ใช้สำหรับแปลงแรงดันสูงหรือกระแสสูงให้เป็นค่ามาตรฐานของแรงดันต่ำและกระแสต่ำเพื่อใช้ในการวัดและป้องกัน หม้อแปลงเครื่องวัด มี 2 แบบ คือ

1) หม้อแปลงแรงดัน (Voltage Transformer: VT)

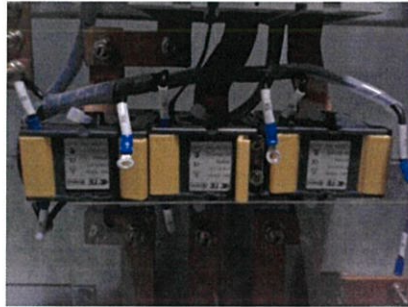
เป็นหม้อแปลงซึ่งแปลงแรงดันสูงเป็นแรงดันต่ำ เพื่อใช้ในการวัดและป้องกัน(VT)ส่วนมากจะใช้งานขณะไม่มีโหลด และเวลาใช้งานห้ามลัดวงจรด้านทุติยภูมิ (Secondary) เพราะกระแสจะสูงมากทำให้เกิดอันตรายได้ ในการเลือกใช้งานมีพิกัดที่ต้องพิจารณามีดังนี้

- พิกัดกำลังไฟฟ้า คิดเป็น VA (10, 15, 25, 50, 75, 100, 150, 200 VA)
- พิกัดแรงดันทางด้านปฐมภูมิ (Primary) โดยใช้ตามพิกัดแรงดัน
- พิกัดแรงดันทางด้านทุติยภูมิ

2) หม้อแปลงกระแส (Current Transformer: CT)

หม้อแปลงกระแสหมายถึงหม้อแปลงที่ใช้แปลงกระแสให้มีต่ำลง เพื่อให้เหมาะสมกับการวัดและทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน จะสามารถป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นกับ

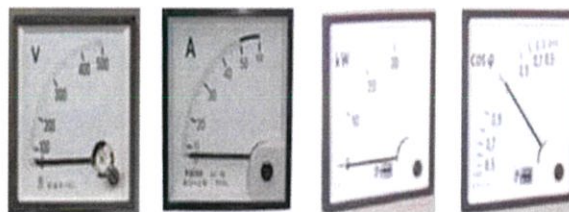
เครื่องมือวัดไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ควบคุมต่างๆ เนื่องจากการเกิดกระแสเกิน (Over Current) ได้ดี ใน การใช้งานหม้อแปลงกระแส (Current Transformer) จะต้องไม่ให้เกิดการเปิดวงจรทางด้านทุติยภูมิ เพราะจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าสูงมากอาจทำให้เกิดความเสียหายจะมีพิกัดในการวัดกระแสออกมาที่ 5 แอมป์ เช่น 400/5 A, 800/5 A, 1000/5 A, เป็นต้น



ภาพที่ 2.9 Current Transformer: CT หรือหม้อแปลงกระแส

2.1.12 เครื่องวัดไฟฟ้าสำหรับตู้สวิตช์บอร์ด (Meter)

เครื่องวัดพื้นฐานที่ใช้ในตู้สวิตช์บอร์ดทั่วไปคือโวลต์มิเตอร์และแอมมิเตอร์ ซึ่งต้องใช้ งานร่วม กับ Selector Switch เพื่อวัดแรงดันหรือกระแสในแต่ละเฟส พิกัดแรงดันของโวลต์มิเตอร์ คือ 0-500V ส่วนพิกัดกระแสของแอมมิเตอร์จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ Current Transformer เช่น 100/5A เป็นต้น สำหรับตู้สวิตช์บอร์ดขนาดใหญ่อาจมี P.F. Meter, Watt Meter หรือ Var Meter เพิ่มเติมขึ้นอยู่กับกรอกแบบตู้บางตู้ก็อาจติดตั้ง P.F. Controller เพื่อควบคุมค่า Power Factor ในวงจรด้วย



ภาพที่ 2.10 เครื่องวัดไฟฟ้า สำหรับตู้สวิตช์บอร์ด (Meter)

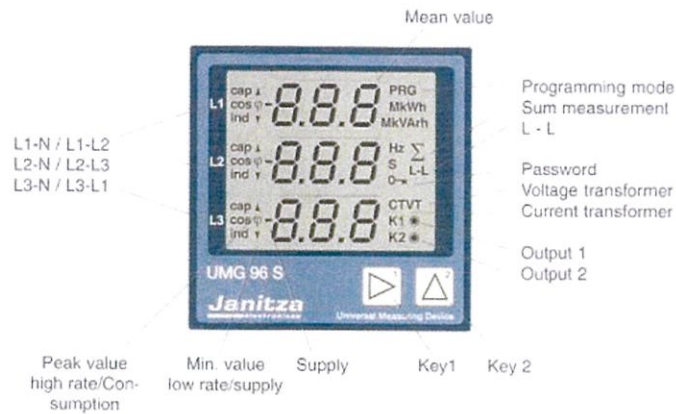
2.1.13 Selector Switch สำหรับตู้สวิตช์บอร์ด

โดย Ammeter Selector Switch จะใช้ร่วมกับหม้อแปลงกระแส และ Panel Ammeter เพื่อวัดกระแสในตู้สวิตช์บอร์ด ส่วน Voltmeter Selector Switch จะใช้ร่วมกับ Panel Voltmeter เพื่อวัดแรงดันภายในตู้ การต่อวงจรให้ดูจากไดอะแกรมที่มาพร้อมกับอุปกรณ์เพราะแต่ละยี่ห้ออาจมีวิธีการต่อที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 2.11 Selector Switch

2.1.14 Power Meter



ภาพที่ 2.12 Power Meter

Power Meter หรือ Digital Meter เป็นอุปกรณ์แสดงผลแบบดิจิทัล ความสามารถในการวัดค่าทางไฟฟ้า ได้แก่ค่าทั่วไป

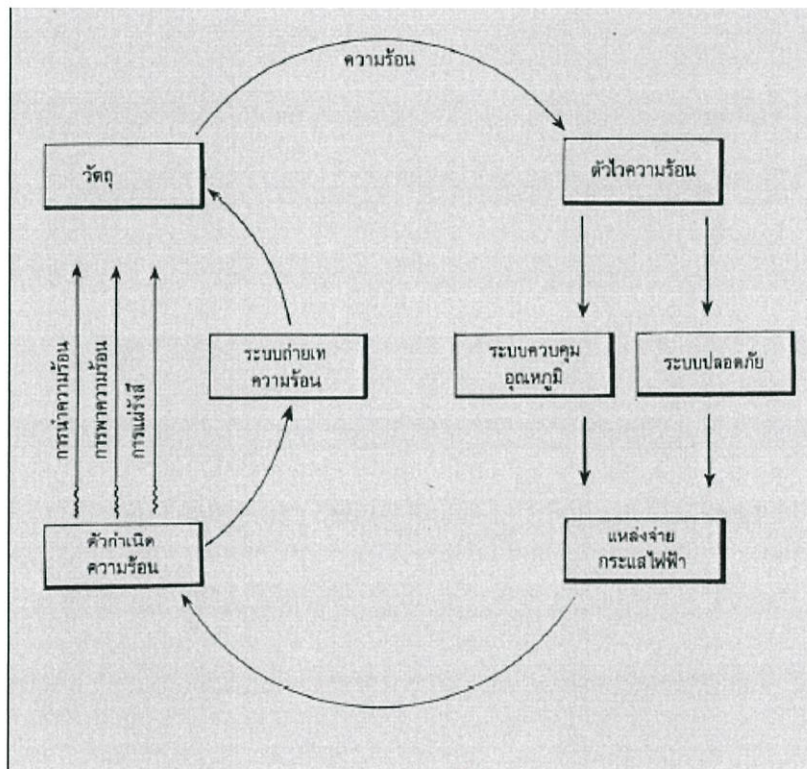
- I กระแสเฟส และกระแสนิวตรอล
- V แรงดันไฟฟ้า เฟส-เฟส, เฟส-นิวตรอล
- F ความถี่ (Hz)
- P (Watt), Q (Var), S (VA) กำลังไฟฟ้า
- PF เพาเวอร์แฟคเตอร์

2.2 ตู้อบ (Oven)

2.2.1 หลักการทำงาน

ความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนถูกถ่ายเทให้วัตถุ โดยกระบวนการนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสี (Radiation) ความร้อนที่ถูกควบคุมอย่างเหมาะสมด้วยตัววัดอุณหภูมิและระบบควบคุมอุณหภูมิ

- **ผนังตู้อบ** โดยทั่วไปจะออกแบบให้มีการกระจายความร้อนภายในได้ดี และป้องกันการสูญเสียความร้อนจากภายในสู่ภายนอก วัสดุที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นโลหะที่ไม่เป็นสนิม ไม่เปลี่ยนรูปร่างและทำความสะอาดง่าย ตัวอย่างเช่น เหล็กกล้าไร้สนิม หรือเหล็กพ่นสีกันสนิม ผนังตู้อบอาจมี 2-3 ชั้น และมีฉนวนหนา 1-2.5 นิ้ว อยู่ระหว่างกลาง ฉนวนกันความร้อนที่ใช้ควรมีความคงทนต่อความร้อน ไม่ดูดความชื้น และนำความร้อนไม่ดี ตัวอย่างเช่น ใยแก้ว (Glass Wool) และอิฐทนไฟ (Fire Brick)



ภาพที่ 2.13 แสดงองค์ประกอบพื้นฐานของตู้อบลมร้อน

- **การพาความร้อนโดยใช้ลม (Mechanical Convection)** นิยมใช้มอเตอร์หมุนพัดลมชนิดเหนี่ยวนำ (Induction Motor) ซึ่งไม่ต้องการการดูแลมาก เพราะไม่ได้ใช้แปรงถ่าน มอเตอร์ดังกล่าวจะทำหน้าที่หมุนพัดลมซึ่งอาจถูกติดตั้งไว้ที่ส่วนล่างของตู้อบ เพื่อเสริมการพาความร้อนในแนวตั้ง (Vertical Convection) หรือติดตั้งไว้ที่ส่วนบนของตู้อบ เพื่อเสริมการพาความร้อนในแนวระดับ (Horizontal Convection)

- การใช้พัดลมทำให้เกิดผลคืออยู่ 3 ประการคือ

- 1) ใช้เวลาในการทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นสั้นกว่า เนื่องจากอากาศภายนอกที่ถูกดูดเข้ามาภายในตู้อบจะผ่านตัวกำเนิดความร้อนโดยตรง

- 2) อุณหภูมิภายในตู้อบเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อเปิดประตูตู้อบ เพราะอากาศที่ถูกดูดเข้ามาด้วยพัดลมถูกทำให้อุ่นขึ้นก่อน เมื่อผ่านห้องเพิ่มความร้อนล่วงหน้า (Preheating Chamber) ตลอดเวลา

- 3) อุณหภูมิทุก ๆ จุดภายในตู้อบค่อนข้างสม่ำเสมอ ถึงแม้ว่าจะใส่วัตถุอบเต็มที่ เนื่องจากพัดลมช่วยให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่า

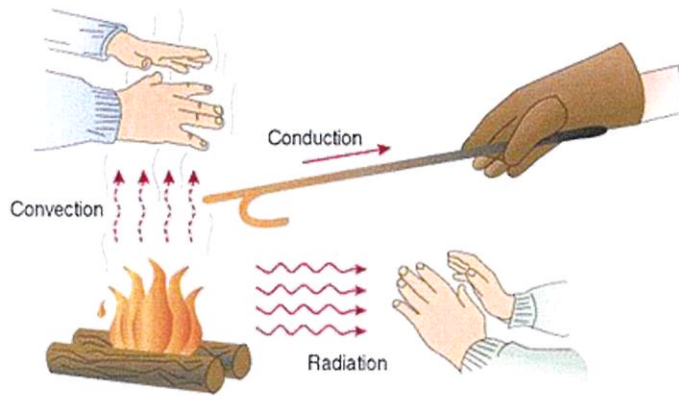
2.3 ประเภทของการถ่ายเทความร้อน

พลังงานความร้อนสามารถถ่ายเทจากสสารหนึ่งไปยังอีกสสารหนึ่ง โดยมีสื่อตัวกลางหรือไม่ก็ได้ สามารถแบ่งกลไกการถ่ายเทความร้อนออกเป็น 3 ประเภท การถ่ายเทความร้อนพื้นฐานแบ่งออกได้เป็น ดังนี้

2.3.1 การนำความร้อน: Heat Conduction หมายถึง กระบวนการที่ความร้อนถ่ายเทโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของอะตอมหรือโมเลกุลในของแข็งไปตามลำดับ

2.3.2 การพาความร้อน: Heat Convection หมายถึง กระบวนการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของของไหล โดยเฉพาะอย่างยิ่งการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวหน้าของวัตถุกับของไหลก็เรียกว่า “การพาความร้อน” ในอุปกรณ์ความร้อนสำหรับงานอุตสาหกรรม โดยมากการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับผิวหน้าของวัตถุ มักจะสำคัญกว่าการถ่ายเทความร้อนภายในตัวของไหลเอง ในที่นี้จึงจะกล่าวถึงการพาความร้อนในลักษณะดังกล่าว การพาความร้อนเกิดขึ้นได้ทั้งจากการไหลที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (หรือความหนาแน่น) และการไหลที่เกิดขึ้นจากปั๊มหรือพัดลม เป็นต้น ซึ่งแบบแรกจะเรียกว่า การพาความร้อนตามธรรมชาติแบบหลังจะเรียกว่า การพาความร้อนด้วยการบังคับ

2.3.3 การแผ่รังสี : Radiation หมายถึง วัตถุทุกชนิดจะแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาว และความเข้มค่าหนึ่งจากพื้นผิวอยู่ตลอดเวลา โดยความยาวและความเข้มจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของวัตถุนั้น การแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้เรียกว่า “การแผ่รังสีความร้อน” หากวัตถุอื่นดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้ก็จะได้รับพลังงานความร้อนทำให้อุณหภูมิของวัตถุสูงขึ้น การถ่ายเทความร้อนในลักษณะนี้เรียกว่าการแผ่รังสี ปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งออกเป็นกระบวนการคงที่ และกระบวนการไม่คงที่ กระบวนการคงที่หมายถึงในการถ่ายเทความร้อน การกระจายอุณหภูมิภายในตัววัตถุและปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ส่วนในกระบวนการไม่คงที่ ปริมาณเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามเวลา



ภาพที่ 2.14 ภาพประกอบการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี

2.4 ความร้อนกับการทำงาน

ความร้อนเป็นพลังงานรูปหนึ่งที่มนุษย์นำมาใช้ประโยชน์ทั้งในชีวิตประจำวัน และในการทำงาน โดยความร้อนจัดเป็นอันตรายทางกายภาพที่สำคัญอย่างหนึ่งในสถานประกอบการ ในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปจะพบว่า คนงานต้องประสบปัญหาความร้อนจากอุณหภูมิของกระบวนการผลิต หรือเครื่องจักรต่างๆ ปกติความร้อนสามารถถ่ายเทระหว่างคน และสิ่งแวดล้อมในรูปของการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน โดยปกติทั่วไปนั้นร่างกายจะได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อน หรือแหล่งพลังงานความร้อน 2 แหล่งด้วยกันคือ

1. ความร้อนจากภายในร่างกาย โดยจะได้จากกระบวนการเผาผลาญสารอาหารในร่างกาย (Metabolism Heat)
2. ความร้อนจากภายนอกร่างกายหรือความร้อนจากสิ่งแวดล้อม (Environmental Heat) เช่น จากสภาพการทำงาน กระบวนการทำงานจากเครื่องจักร

2.5 อันตรายและผลกระทบต่อสุขภาพคนงานที่ทำงานในที่ร้อน

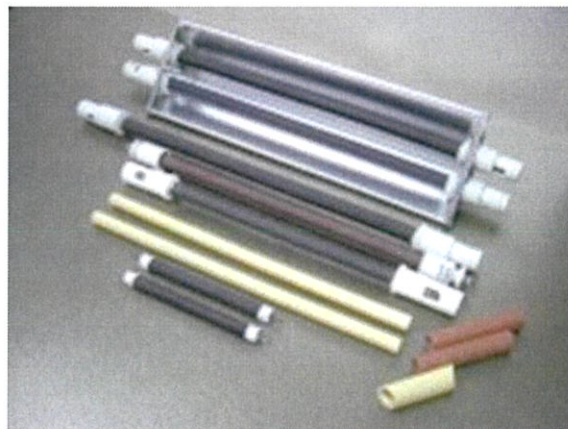
การเจ็บป่วยเนื่องจากความร้อนเกิดขึ้น เมื่อกลไกการระบายความร้อนภายในร่างกายของคนเราทำงานไม่ถูกต้องตามหน้าที่ จากการทำงานในที่ที่มีอากาศร้อนหรือได้รับความร้อนโดยตรง เมื่อร่างกายได้รับความร้อน หรือสร้างความร้อนขึ้น จึงต้องถ่ายเทความร้อนออกไป เพื่อรักษาสมดุลของอุณหภูมิร่างกาย ซึ่งปกติอยู่ที่ 98.6 องศาฟาเรนไฮต์ หรือ 37 องศาเซลเซียส ถ้าร่างกายไม่สามารถรักษาสมดุลของระบบควบคุมความร้อนได้จะเกิดความผิดปกติและเจ็บป่วย ทำให้เกิดอาการเจ็บป่วยต่างๆ เช่น เป็นลมแดด หน้ามืด อ่อนเพลีย หงุดหงิด ภายสมองของเราที่เรียก ไฮโปทาลามัส (Hypothalamus) ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิและกลไกการไหลเวียนของเหลว การระบายความร้อน เพื่อรักษาอุณหภูมิของร่างกายไว้ให้คงที่ 98 องศาฟาเรนไฮต์ (37 องศาเซลเซียส) ถ้าอุณหภูมิภายในร่างกายสูงเกินไป ไฮโปทาลามัส ก็จะทำให้เลือดไหลเวียนออกมาที่ผิวของร่างกายเพื่อระบายความร้อนเพิ่มขึ้น ต่อมเหงื่อจะระบายของเหลวออกมามากขึ้นเพื่อระบายความร้อนเช่นกัน ทำให้

หัวใจต้องทำงานหนักมากขึ้นเพื่อให้เลือดไหลเวียนมากขึ้นด้วย ลักษณะอาการและความเจ็บป่วยที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 2.15 ตัวอย่างการทำงานที่มีความร้อนในสถานประกอบการ

2.6 การให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรด (Electric Infrared Heating)

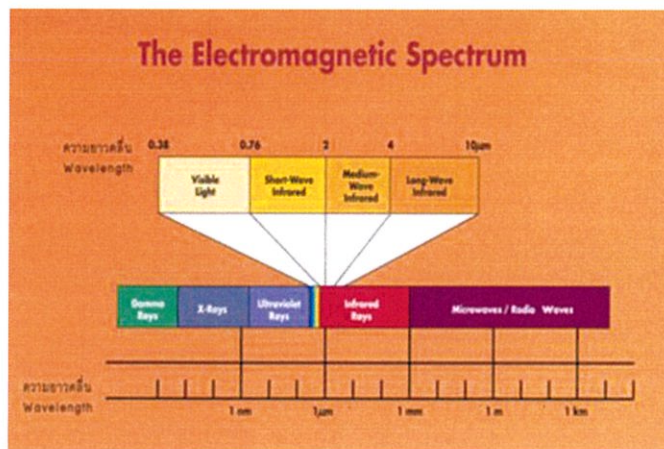


ภาพที่ 2.16 ตัวอย่างฮีตเตอร์รังสีอินฟราเรด

2.6.1 หลักการพื้นฐานของเทคโนโลยี

การให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดเป็นการให้ความร้อนในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยอยู่ในช่วงความยาวคลื่นของรังสีอินฟราเรด ซึ่งจะสัมพันธ์กับแสงที่มองเห็นได้และรูปแบบอื่นของพลัง งานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ช่วงรังสีอินฟราเรดสามารถแบ่งได้ 3 กลุ่ม คือ คลื่นสั้น คลื่นปานกลาง และคลื่นยาว การดูดซับรังสีอินฟราเรดจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความยาวของคลื่นอินฟราเรด

ส่วนประกอบของวัตถุ ลักษณะพื้นผิวของวัตถุ มุมการตกกระทบ และสีของวัตถุ วัตถุที่เป็นของแข็งส่วนใหญ่จะดูดซับรังสีอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 2 เมตร ได้ดี ยกเว้นโลหะที่ขัดขึ้นเงา เช่น ทอง เงิน การใช้งานรังสีอินฟราเรดจะต้องมีตัวปล่อยคลื่น



ภาพที่ 2.17 แผนภาพประกอบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

2.6.2 ประเภทของการใช้งาน

การประยุกต์ใช้งานจะขึ้นอยู่กับความยาวของคลื่น ลักษณะการใช้งานโดยมีตัวอย่างการใช้งานที่หลากหลาย ได้แก่ การอบสี การอบผลิตภัณฑ์แปรรูป การเคลือบภาชนะในการทำอาหาร การเคลือบสาร PVC บนผนัง การอบแห้งสารแม่เหล็กบนเทปคลาสเสีท การอบแห้งผลิตภัณฑ์กระดาษ นิรภัย การอบหนัง การอบแห้งกระดาษ การอบสี และแลคเกอร์การบัดกรีการทำให้หดตัวของโลหะ การเผากระเบื้อง ฯลฯ

2.6.3 ประโยชน์ของเทคโนโลยี

- ทำความร้อนและลดความร้อนได้อย่างรวดเร็ว โดยส่วนใหญ่เตาอบไฟฟ้าที่ใช้รังสีอินฟราเรดสามารถทำความร้อนให้ผลิตภัณฑ์ได้ในเวลาไม่กี่วินาที
- เตามีขนาดเล็ก เนื่องจากให้ความร้อนที่รวดเร็ว ทำให้ต้องการพื้นที่วางในเตาน้อยลง
- เป็นเตาที่สะอาด ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม
- มีการควบคุมที่แม่นยำ
- ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ
- ต้นทุนเริ่มแรกและค่าบำรุงรักษาต่ำ

2.6.4 คุณลักษณะเด่นของฮีเตอร์อินฟราเรด

- เป็นการส่งผ่านความร้อนแบบแผ่รังสี (แบบเดียวกับที่ดวงอาทิตย์ส่งความร้อนมายังโลก) จึงมีประสิทธิภาพสูง ความสูญเสียต่ำ (ประหยัดไฟ 30-50%)

- สามารถให้ความร้อนกับวัตถุได้ถึงเนื้อในจึงทำให้ประหยัดเวลาได้ 1 ถึง 10 เท่า (การให้ความร้อนแบบการนำและการพาจะทำให้วัตถุร้อนเฉพาะที่ผิว แล้วค่อยๆ ซึมเข้าไปเนื้อในจึงใช้เวลามาก)

- ให้ความปลอดภัยสูง เพราะไม่มีเปลวไฟและไฟไม่รั่ว
- ขนาดเล็กกว่าการให้ความร้อนแบบทั่ว ๆ ไป ทำให้ประหยัดเนื้อที่

2.6.5 ข้อควรระวัง

การให้ความร้อนแบบอินฟราเรด สิ่งที่สำคัญที่สุดคือ วัตถุจะต้องดูดซับรังสีได้ดี ดังนั้น วัตถุบางชนิดที่มีผิวมันวาวหรือมีคุณสมบัติในการสะท้อนแสงได้ดีจะไม่เหมาะกับการให้ความร้อนด้วยวิธีนี้ ถ้าต้องการควบคุมอุณหภูมิ พยายามวางหัววัตถุอุณหภูมิให้ใกล้วัตถุมากที่สุดหรือใช้หัววัตถุอุณหภูมิแบบอินฟราเรด

2.7 หลักการของควบคุมแบบ PID

เครื่องควบคุมหรือตัวควบคุมเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ ซึ่งทำหน้าที่สั่งการด้วยการสร้างสัญญาณ สำหรับควบคุมกระบวนการต่างๆ ให้มีผลตอบสนองเป็นไปตามต้องการ เครื่องควบคุมสามารถแบ่งตามโครงสร้างการทำงานได้ 3 ชนิด คือ 1. เครื่องควบคุมแบบนิวเมติกที่ทำงานโดยใช้สัญญาณลม 2. เครื่องควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์ทำงานโดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์เชิงเส้น (Linear Circuit) การสร้างสัญญาณควบคุมและเครื่องควบคุมแบบดิจิทัลทำงานโดยใช้วงจรตรรก (Logic Circuit) หรือ 3. ไมโครโปรเซสเซอร์สร้างสัญญาณควบคุม โดยเครื่องควบคุมที่นำมาใช้และเป็นที่รู้จักกันแพร่หลายที่สุดในวงการอุตสาหกรรมการผลิตคือ “ตัวควบคุมแบบพีไอดี”

2.7.1 การควบคุมแบบป้อนกลับด้วยตัวควบคุม PID

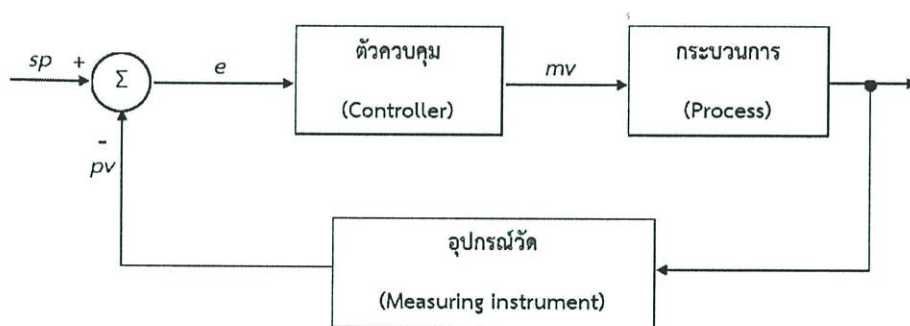
ระบบควบคุมแบบป้อนกลับหมายถึง ระบบควบคุมที่ต้องการควบคุมให้เอาต์พุตหรือผลตอบ สนองของระบบมีค่าตามที่ต้องการ โดยการนำเอาสัญญาณเอาต์พุตป้อนกลับมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุต ซึ่งการป้อนกลับนี้จะต้องเป็นการป้อนกลับแบบลบ (Negative Feedback) จากนั้นนำค่าความแตกต่างระหว่างอินพุตกับเอาต์พุต ส่งต่อไปยังส่วนสร้างสัญญาณควบคุมซึ่งจะทำการสร้างสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมตามกฎเกณฑ์การควบคุมที่เลือกไว้และส่งสัญญาณออกไปควบคุมระบบเพื่อทำให้เอาต์พุตของกระบวนการที่ถูกควบคุมมีค่าตามต้องการ และระบบควบคุมป้อนกลับนี้อาจจะเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ระบบควบคุมแบบลูปปิดหรือระบบอัตโนมัติก็ได้ ระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยทั่วไปประกอบด้วยอุปกรณ์ 3 ส่วน คือ

1. ตัวควบคุม (Controller) หมายถึงเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุม เพื่อทำหน้าที่ควบคุมให้ระบบหรือกระบวนการที่ต้องการควบคุม มีเอาต์พุตหรือ

ผลตอบสนองตามความต้องการ ตัวควบคุมจะมีหลายแบบ เช่น ตัวควบคุมแบบ ON – OFF ตัวควบคุมแบบ Proportional (P) ตัวควบคุมแบบ Integral (I) ตัวควบคุมแบบ Derivative (D) หรือการใช้ตัวควบคุมหลายๆแบบรวมกัน เช่น ตัวควบคุมแบบ PI ตัวควบคุมแบบ PD และตัวควบคุมแบบ PID เป็นต้น ซึ่งสัญญาณที่ออกจากตัวควบคุมจะเรียกว่า “ตัวแปรปรับกระบวนการ (Manipulated Variable: mv)”

2. กระบวนการ (Plant or Process) หมายถึงระบบหรือกระบวนการที่ถูกควบคุมหรืออาจจะเป็นวัตถุทางกายภาพที่ถูกควบคุมก็ได้ เช่น กระบวนการเกี่ยวกับการควบคุมอุณหภูมิ กระบวนการเกี่ยวกับการควบคุมความดัน เป็นต้น กระบวนการนี้รวมถึงอุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย (Final Control Element) ซึ่งสถานะของกระบวนการเรียกว่า “ตัวแปรกระบวนการ (Process Variable: pv)”

3. อุปกรณ์วัด (Measuring Instruments) หมายถึงอุปกรณ์ที่อาจจะได้แก่ เซนเซอร์ (Sensor) ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) อุปกรณ์แปลง (Transmitter) หรือวัดสัญญาณอื่นๆ ที่ทำหน้าที่วัดค่าของเอาต์พุตของระบบที่ถูกควบคุมแล้วป้อนกลับไปเพื่อทำการเปรียบเทียบกับอินพุตของระบบ โดยสัญญาณที่ใช้เป็นสัญญาณมาตรฐานทางอุตสาหกรรม ได้แก่ สัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง 4 – 20 มิลลิแอมป์แอมป์ (4 – 20 mA_{dc}) สัญญาณแรงดันไฟฟ้า กระแสตรง 1-5 โวลต์ (1-5 V_{dc}) หรือ สัญญาณลมขนาด 3 – 15 ปอนด์/ตารางนิ้ว (3-15 psi) เป็นต้น



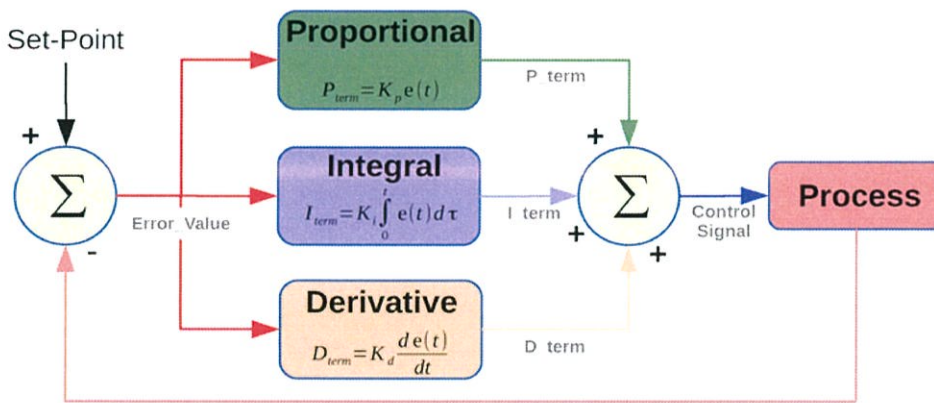
ภาพที่ 2.18 แสดงโครงสร้างของระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยทั่วไป

การควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรมโดยทั่วไปนิยมใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID) เพราะรูปแบบของตัวควบคุมเป็นตัวควบคุมที่สามารถควบคุมกระบวนการต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีโครงสร้างการทำงานที่ไม่ซับซ้อน สามารถเข้าใจได้ง่าย การใช้งานตัวควบคุมพีไอดีนี้ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ให้เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลตอบสนองของกระบวนการตามความต้องการ ตัวควบคุมแบบ PID ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) คือ

$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.1)$$

- โดย K_c = อัตราขยายของตัวควบคุม
 T_i = ค่าเวลา Integral or Reset (Integral Time) (วินาที)
 T_d = ค่าเวลา Derivative or Rate (Derivative Time) (วินาที)

จากสมการที่ (2.1) ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PID ทั้ง 3 ค่านี้จะใช้สำหรับปรับให้กับตัวควบคุมเพื่อควบคุมกระบวนการให้มีผลตอบสนองไปตามต้องการ ซึ่งประกอบด้วยตัวควบคุมแบบ Proportional (P) ตัวควบคุมแบบ Integral (I) ตัวควบคุมแบบ Derivative (D) ดังนั้นสัญญาณควบคุมของตัวควบคุม PID คือ



ภาพที่ 2.19 ระบบการควบคุมแบบพีไอดี

$$m(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.2)$$

- โดย K_p = ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบ P (Proportional Gain)
 T_i = ค่าเวลา Integral (Integral Time) (วินาที)
 T_d = ค่าเวลา Derivative (Derivative Time) (วินาที)

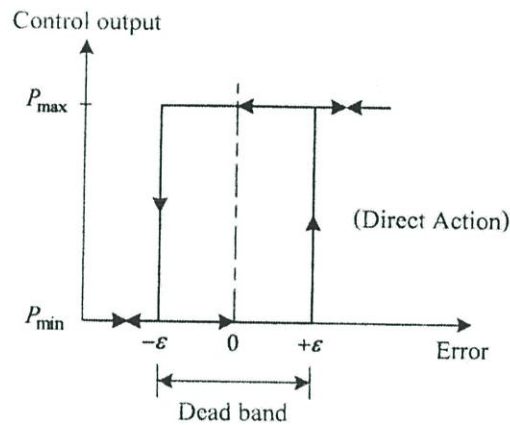
จากภาพที่ 2.18 จะเห็นได้ว่าสัญญาณควบคุมหรือตัวแปรปรับกระบวนการ (mv) ที่ได้จากตัวควบคุมพีไอดี จะถูกกำหนดด้วยความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเข้าตัวควบคุมหรือตัวแปรกระบวนการ (Process Variable) กับสัญญาณอ้างอิงหรือค่าเป้าหมาย (Set Point) โดยที่ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับกฎเกณฑ์ของการควบคุมที่พนักงานหรือผู้ควบคุมได้ปรับแต่งไว้

ล่วงหน้า (ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี) ซึ่งสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมจะเป็นไปตามกิริยาการควบคุมแบบต่างๆดังที่จะกล่าวต่อไป

2.8 กิริยาการควบคุมของการควบคุมแบบป้อนกลับ

2.8.1 กิริยาการควบคุมแบบ ON-OFF

การควบคุมแบบ ON-OFF เป็นการควบคุมแบบที่ง่ายที่สุดและนิยมใช้ในการควบคุมกระบวนการ การที่ไม่ต้องการความเที่ยงตรงสูง โดยการควบคุมจะทำงานเพียง 2 สถานะ คือ เปิด (100%) กับปิด (0%) เท่านั้น กิริยาการควบคุมแบบ ON-OFF ดังภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 แสดงกิริยาการควบคุมแบบ ON-OFF

จากภาพที่ 2.20 จะเห็นว่าถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่าค่าวิกฤต ($+\epsilon$) ค่าเอาต์พุทของตัวควบคุมจะเปลี่ยนจาก 0% เป็น 100% เมื่อค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าค่าวิกฤต ($-\epsilon$) ค่าเอาต์พุทของตัวควบคุมจะเปลี่ยนจาก 100% เป็น 0% ค่าเอาต์พุทที่อยู่ในช่วงเดธแบนด์ (Dead Band) จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการเสียดทานที่ไม่ได้คาดไว้ก่อนหรือบางครั้งก็จำเป็นต้องทำให้เกิดช่วงเดธแบนด์ขึ้น เพื่อป้องกันการ ON - OFF บ่อยเกินไปอันจะทำให้อุปกรณ์ควบคุมหรือกระบวนการได้รับความเสียหาย แต่ช่วงเดธแบนด์นี้ต้องไม่กว้างนักเพราะจะทำให้ค่าความเที่ยงตรงของการควบคุมลดลง กิริยาการควบคุมแบบ ON-OFF สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$m(t) = \begin{cases} 0\% & , e < -\epsilon \\ 100\% & , e > +\epsilon \end{cases} \quad (2.3)$$

เมื่อ $m(t)$ = สัญญาณควบคุมหรือเอาต์พุทของตัวควบคุม
 $e(t)$ = ค่าความคลาดเคลื่อน

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \text{ ของค่าเดทแบนด์}$$

2.8.2 กิริยาการควบคุมแบบ Proportional (P)

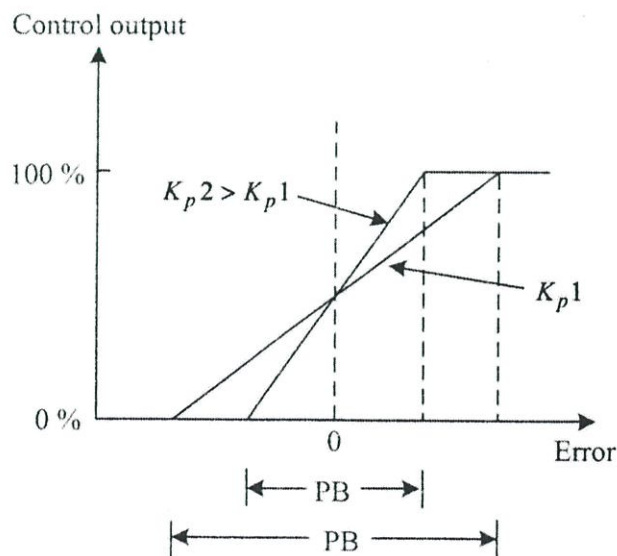
กิริยาการควบคุมแบบ P นั้น ค่าเอาต์พุทของตัวควบคุมจะแปรผันตรงกับค่าความคลาดเคลื่อนคือถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่ามากขึ้น ค่าเอาต์พุทของตัวควบคุมก็จะมีค่ามากขึ้นตาม และถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยลง ค่าเอาต์พุทของตัวควบคุมก็จะมีค่าน้อยลงตามกิริยาการควบคุมแบบ P สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$m_p(t) = K_p e(t) + \bar{m} \quad (2.4)$$

- เมื่อ $m_p(t)$ = ค่าเอาต์พุทของตัวควบคุมแบบ Proportional
 K_p = อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ Proportional
 \bar{m} = ค่าเอาต์พุทของตัวควบคุมที่ค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับศูนย์

ตัวควบคุมแบบ P บางตัวอาจจะใช้ค่า Proportional Band (PB) แทนการใช้ค่า K_p ซึ่ง PB คือช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างที่เอาต์พุทของตัวควบคุมมีค่า 0-100% ดังสมการที่ (2.5)

$$PB = \frac{100\%}{K_p} \quad (2.5)$$



ภาพที่ 2.21 แสดงคุณสมบัติของกิริยาการควบคุมแบบ Proportional

การควบคุมแบบนี้เหมาะกับกระบวนการที่มี Time Lag ไม่สูงมาก

ข้อดีของตัวควบคุมแบบสัดส่วน

- การเพิ่ม Gain ให้สูงขึ้น จะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ไวขึ้น

ข้อด้อยของตัวควบคุมแบบสัดส่วน

- ของกิริยาการควบคุมแบบ Proportional คือการเกิด Offset หรือไม่สามารถกำจัดค่า Offset ได้
- ถ้าใช้งานเดียวกับระบบที่มี System Type 0 จะไม่สามารถขจัด Steady State Error ได้
- สามารถลดผลกระทบได้ด้วยการเพิ่มค่า Gain ให้มีค่าสูงๆ
- สำหรับ 2nd Order Plant ขึ้นไป การเพิ่มค่า Gain ให้มีค่าสูง จะทำให้เกิด Overshoot ที่สูงขึ้นด้วย
- การเพิ่มค่า Gain ให้มีค่าสูงอาจจะทำไม่ได้ในทางปฏิบัติ เพราะเอาต์พุตมีค่าจำกัด

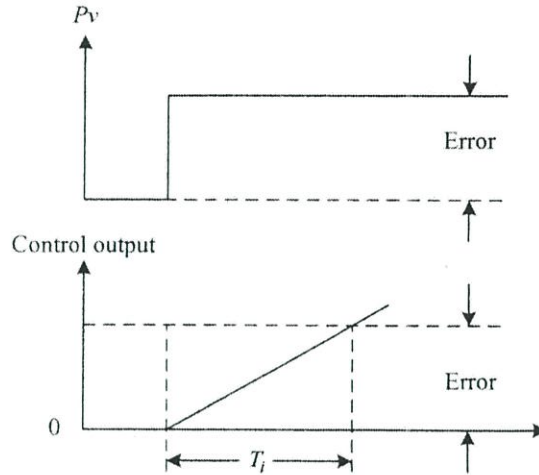
2.8.3 กิริยาการควบคุมแบบ Integral (I)

กิริยาการควบคุมแบบ I หรือสามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การควบคุมแบบรีเซ็ต (Reset Control) โดยค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมหาได้จากการหาค่าพื้นที่ทั้งหมดภายในกราฟของค่าความคลาดเคลื่อนต่อเวลาคูณกับค่าคงที่ที่เรียกว่า “อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ I (Integral Gain)” ดังสมการต่อไปนี้

$$m_I(t) = K_I \int_0^t e(t)dt + \overline{m}_I(0) \quad (2.6)$$

เมื่อ	$m_I(t)$	= ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ Integral
	K_I	= อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ Integral
	$\int_0^t e(t)dt$	= พื้นที่ทั้งหมดของค่าความคลาดเคลื่อน
	$\overline{m}_I(0)$	= ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมที่เวลา t เท่ากับศูนย์

ผลของกิริยาการควบคุมแบบนี้จะทำให้ไม่เกิดออฟเซ็ทขึ้นในระบบ และช่วยลดค่าพุ่งเกิน (Overshoot) ของระบบที่เกิดขึ้นลงได้ แต่ถ้ากิริยาการควบคุมมีค่าสูงเกินไปจะทำให้ผลตอบสนองของกระบวนการช้าลง ผลตอบสนองของกิริยาการควบคุมแบบ I แสดงดังภาพที่ 2.22



ภาพที่ 2.22 แสดงผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ Integral

จากภาพที่ 2.22 จะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุทของตัวควบคุมจะเพิ่มขึ้นจนมีค่าเท่ากับสัญญาณคลาดเคลื่อนที่เวลาเท่ากับ Integral หรือ Reset Time (T_i)

ข้อดีของตัวควบคุมแบบปริพันธ์

- ขจัด Steady State Error ได้
- สามารถใช้งานเดี่ยวๆได้ แต่ต้องใช้ ค่า Gain ที่เหมาะสม

ข้อด้อยของตัวควบคุมแบบปริพันธ์

- ไม่สามารถขจัด Overshoot ได้
- การใช้ค่า Gain ที่ไม่เหมาะสม อาจทำให้ผลตอบสนองเกิดการแกว่งตัวได้
- ระบบมี Order ที่สูงขึ้น และอาจทำให้ระบบมีผลตอบสนองที่ไม่พึงประสงค์

2.8.4 กริยาการควบคุมแบบ Derivative (D)

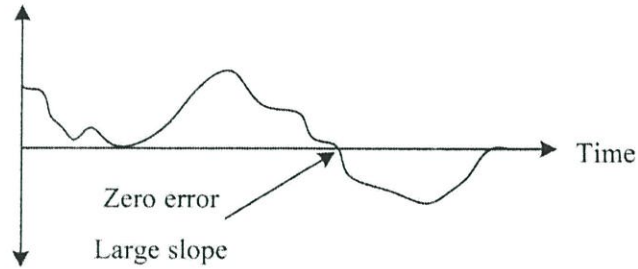
กริยาการควบคุมแบบ D เรียกอีกชื่อหนึ่งว่าการควบคุมแบบอัตราส่วน(Rate Action) โดยสัญญาณเอาต์พุทของตัวควบคุมจะขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความคลาดเคลื่อนต่อเวลา จะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนนี้มีโอกาสเป็นศูนย์ได้ และค่าเอาต์พุทก็สามารถเปลี่ยนแปลงให้มีค่าสูงขึ้น เมื่อความคลาดเคลื่อนเปลี่ยนแปลง ซึ่งเรียกการกระทำดังกล่าวว่า “อัตราการกระทำ (Rate Action)” ดังสมการต่อไปนี้

$$m_D(t) = K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.7)$$

เมื่อ $m_D(t)$ = ค่าเอาต์พุทของตัวควบคุมแบบ Derivative

$$K_D = \text{อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ Derivative}$$

$$\frac{de(t)}{dt} = \text{ค่าความคลาดเคลื่อนที่เวลา } t$$



ภาพที่ 2.23 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกิริยาการควบคุมแบบ Derivative

ข้อดีของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์

- ลดผลตอบสนองที่เป็น Overshoot ได้

ข้อด้อยของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์

- ไม่สามารถใช้งานเดี่ยวๆได้ ต้องใช้งานร่วมกับตัวควบคุมแบบสัดส่วน: Proportional (P)
- ไม่สามารถขจัด Steady State Error ได้
- ทำให้ผลตอบสนองช้าลง

2.8.5 กิริยาการควบคุมแบบ Proportional-Integral (PI)

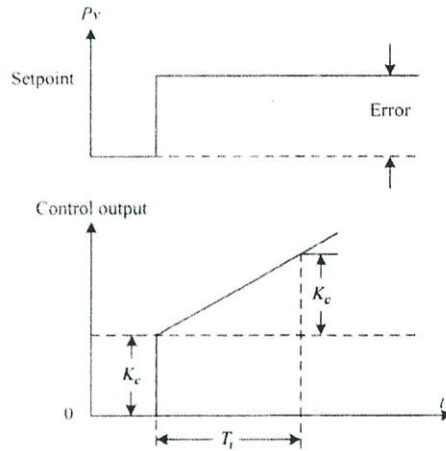
ตามที่กล่าวมาแล้วว่ากิริยาการควบคุมแบบ P นั้น จะมีออฟเซ็ทเกิดขึ้น ซึ่งการกำจัดค่าออฟเซ็ทนี้สามารถทำได้โดยการเพิ่มกิริยาการควบคุมแบบ I เข้าไป ดังนั้นสมการเอาท์พุทของตัวควบคุมแบบ PI นี้ ดังสมการที่ (2.8) หรือ สมการที่ (2.9)

$$m_{PI}(t) = \bar{m} + K_P e(t) + K_P K_I \int_0^t e(t) dt \quad (2.8)$$

หรือ

$$m_{PI}(t) = \bar{m} + K_C e(t) + \frac{K_C}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (2.9)$$

เมื่อ $K_C = K_P$ และ $K_I = \frac{1}{T_i}$
 $T_i = \text{ค่าเวลา Integral}$



ภาพที่ 2.24 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ PI (Direct action)

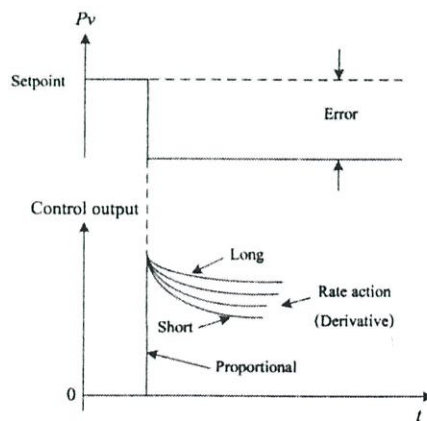
การควบคุมแบบนี้ ถ้าปรับค่า Integral มากไปก็จะทำให้การควบคุมเกิดการแกว่ง (Hunting) ขึ้นได้

2.8.6 กริยาการควบคุมแบบ Proportional-Derivative (PD)

การประยุกต์ใช้กริยาการควบคุมแบบ P ร่วมกับกริยาการควบคุมแบบ D เพื่อให้ได้ผลตอบสนองของระบบรวดเร็วขึ้น แต่จะไม่มีผลโดยตรงต่อผลตอบสนองของระบบที่สภาวะคงที่ ซึ่งสมการเอาท์พุทของกริยาการควบคุมแบบ PD แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$m_{PD}(t) = \bar{m} + K_P e(t) + K_P K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.10)$$

เมื่อ $K_D = T_d$
 $T_d =$ ค่าเวลา Derivative



ภาพที่ 2.25 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ PD

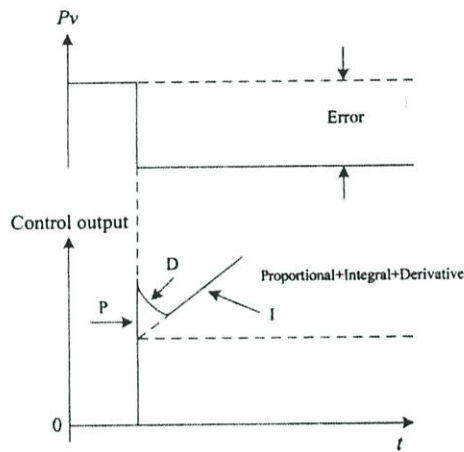
2.8.7 ฏรยการควบคุมแบบ Proportional-Integral-Derivative (PID)

จากที่ได้กล่าวมาแล้ว เพื่อให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมมีสมรรถนะเป็นไปตามต้องการจึงใช้ฏรยการควบคุมทั้ง 3 แบบร่วมกัน ซึ่งจะทำให้ได้ฏรยการควบคุมแบบ PID ที่มีสมการดังต่อไปนี้

$$m_{PID}(t) = \bar{m} + K_P e(t) + K_P K_I \int_0^t e(t) dt + K_P K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.11)$$

หรือ

$$m_{PID}(t) = \bar{m} + K_C e(t) + \frac{K_C}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_C T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.12)$$



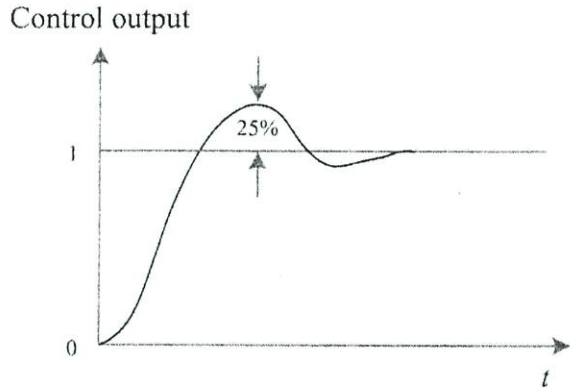
ภาพที่ 2.26 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของฏรยการควบคุมแบบ PID

2.9 การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี

การนำตัวควบคุมพีไอดีไปใช้ในการควบคุมกระบวนการต่างๆ จึงจะจำเป็นต้องปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีให้เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ดีตามความต้องการ ซึ่งการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีนี้สามารถทำได้หลายวิธี บางวิธีพิจารณาจากผลตอบสนองของกระบวนการจากการทดสอบกระบวนการและอาศัยประสบการณ์ และบางวิธีจะอาศัยทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ และส่วนใหญ่จะพิจารณาจากเงื่อนไขในโดเมนเวลามากกว่าในโดเมนความถี่ ซึ่งวิธีของ Ziegler-Nichols เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในทางปฏิบัติ

2.9.1 การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี โดยวิธีของ Ziegler-Nichols

การหาค่า K_P , T_i และ T_d จะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของผลตอบสนองชั่วครู่ของกระบวนการที่ถูกควบคุม ซึ่งมีอยู่ 2 วิธี แต่ละวิธีมีจุดมุ่งหมายที่จะทำให้ผลตอบสนองต่อเวลาของกระบวนการต่ออินพุทแบบขั้นบันได มีค่าพุ่งเกินสูงสุดไม่เกิน 25% ดังภาพที่ 2.27

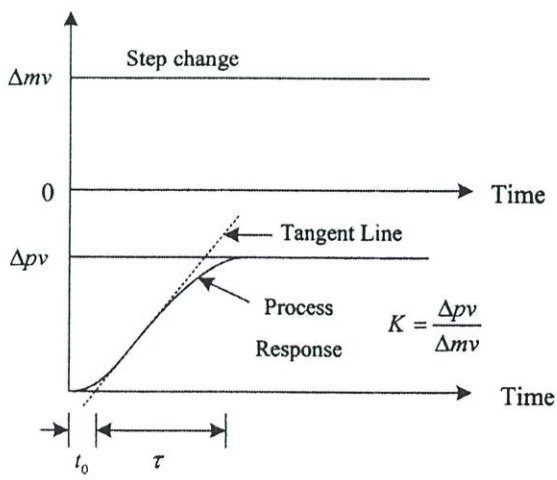


ภาพที่ 2.27 แสดงค่าพ่วงเกินที่ต้องการเมื่อใช้การปรับด้วยวิธี Ziegler-Nichols

2.9.1.1 วิธี Process Reaction Curve

วิธีนี้จะหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีจากผลตอบสนองการของกระบวนการแบบลูปเปิดที่ถูกควบคุมด้วยสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได โดยที่กระบวนการในกรณีนี้ จะไม่มี Pole ที่จุด Origin หรือไม่มี Dominant Complex-conjugate Poles ดังนั้นผลตอบสนองของเวลาจะได้ในลักษณะเป็นรูปตัว S (ถ้าผลตอบสนองของเวลาไม่มีลักษณะเป็นรูปตัว S วิธีนี้จะใช้ไม่ได้) จากผลตอบสนองต่อเวลาสามารถแยกพิจารณาเป็นค่าเวลาหน่วงของกระบวนการ (Delay Time: t_0) และเวลาคงที่ของกระบวนการ (Time Constant: τ) โดยลากเส้นสัมผัสกับจุดที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุด เส้นนี้จะตัดกับแกนเวลาและเส้นตรงของเอาท์พุท $C(t)$ ที่ $C(t) = K$ ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบจะถูกประมาณได้ด้วยระบบอันดับหนึ่งแบบมีการหน่วงเวลา (FOPDT) คือ

$$G(s) = \frac{C(s)}{U(s)} = \frac{K_C - t_0 s}{\tau s + 1} \quad (2.13)$$



ภาพที่ 2.28 แสดงผลตอบสนองรูปตัว S เมื่อปรับโดยใช้วิธี Process Reaction Curve

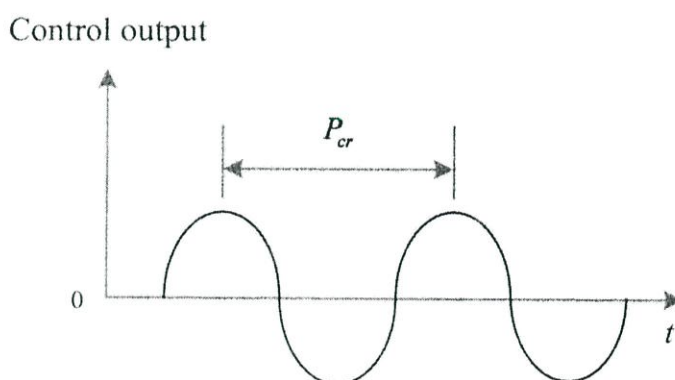
Ziegler-Nichols ได้กำหนดค่าของ K_p, T_i และ T_d สำหรับตัวควบคุมแบบต่างๆ ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบต่างๆตามวิธี Process Reaction Curve

Controller Type	Proportional Gain (K_c)	Integral Time (T_i)	Derivative Time (T_d)
Proportional only (P)	$\frac{1}{K} \left(\frac{\tau}{t_0} \right)$	-	-
Proportional-Integral (PI)	$\frac{0.9}{K} \left(\frac{\tau}{t_0} \right)$	$3.33t_0$	-
Proportional-Integral-Derivative (PID)	$\frac{1.2}{K} \left(\frac{\tau}{t_0} \right)$	$2.0t_0$	$0.5t_0$

2.9.1.2 วิธี Ultimate Method

วิธีนี้จะหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีจากการสังเกตผลตอบสนองของกระบวนการแบบลูปปิดที่ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ P ต่อสัญญาณอินพุทแบบขั้นบันได โดยปรับค่า K_p ไปเรื่อยๆ จนผลตอบสนองของกระบวนการเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง (Sustained Oscillations) ถ้าผลตอบสนองเวลาไม่เกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง วิธีการนี้จะใช้ไม่ได้ แสดงดังภาพที่ 2.29



ภาพที่ 2.29 แสดงผลตอบสนองเวลาเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง เมื่อปรับโดยใช้วิธี Ultimate method.

จากนั้นหาค่าของ

K_{cr} (Critical Gain) คือ อัตราการขยายที่ทำให้ผลตอบสนองเวลาเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง

P_{cr} (Oscillation Period) คือ คาบเวลาของการแกว่งอย่างต่อเนื่อง

Ziegler-Nichols ได้กำหนดค่าของ K_p, T_i และ T_d สำหรับตัวควบคุมแบบต่างๆดังตารางที่ 2.4

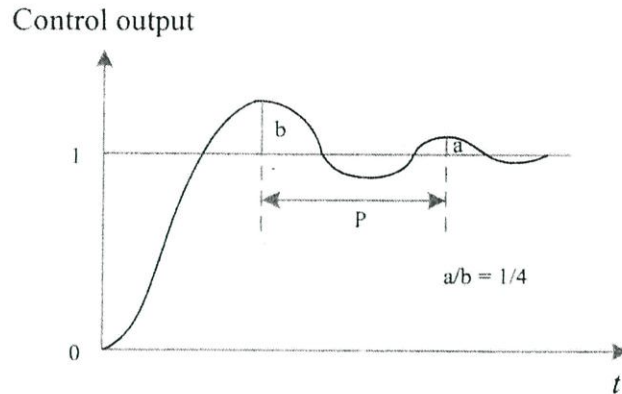
ตารางที่ 2.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบต่างๆตามวิธี Ultimate Method

Controller Type	Proportional Gain (K_c)	Integral Time (T_i)	Derivative Time (T_d)
Proportional only (P)	$K_{cr}/2$	-	-
Proportional-Integral (PI)	$K_{cr}/2.2$	$T_{cr}/1.2$	-
Proportional-Integral-Derivative (PID)	$K_{cr}/1.7$	$T_{cr}/2$	$T_{cr}/8$

การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID โดยวิธีของ Ziegler-Nichols นั้น ไม่ใช่เป็นค่าที่เที่ยงตรงที่จะนำไปใช้งานได้ทันที และมีค่าพุ่งเกินสูงสุด 25% ตามที่กล่าวไว้แต่เป็นเพียงค่าที่ใกล้เคียงเท่านั้น ผู้ควบคุมจะต้องทำการปรับค่าพารามิเตอร์เหล่านี้แบบละเอียด (Fine Tuning) อีกครั้งหนึ่ง

2.9.2 การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี โดยวิธี Damped Oscillation

วิธีนี้ปรับปรุงมาจากวิธี Ultimate Method โดย Harriott เพื่อใช้ในกรณีที่การปรับค่าของ K_p ไปอย่างไรก็ตาม แต่ผลตอบสนองต่อเวลาไม่เกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง แสดงดังภาพที่ 2.30



ภาพที่ 2.30 แสดงค่าอัตราการเสื่อม ¼ เมื่อปรับโดยวิธี Damped Oscillation

วิธี Damped Oscillation นี้จะปรับค่าของ K_p ไปจนผลตอบสนองต่อเวลาของระบบควบคุมแบบลูปิดมีอัตราเสื่อม ¼ ดังภาพที่ 2.30 จากนั้นวัดค่าของ P และใช้ค่าของ $K_p(1/4)$ เพื่อคำนวณหาค่า K_p , T_i และ T_d ดังนี้

$$K_p = K_p(1/4)$$

$$T_i = P/1.5$$

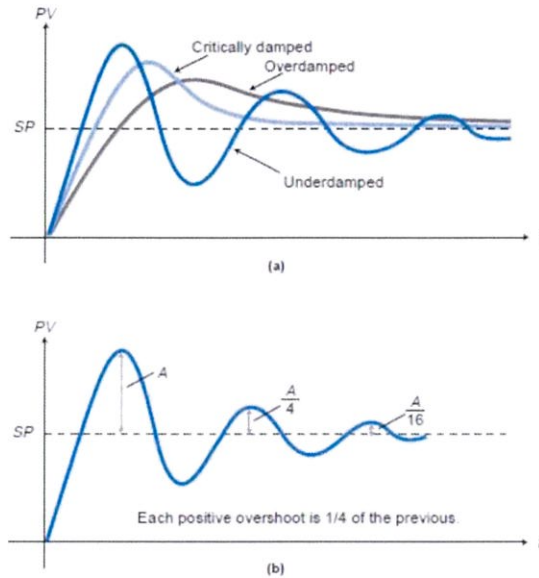
$$T_d = P/6$$

2.9.3 การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี โดยวิธี Trial & Error Close-Loop Tuning (วิธีการลองผิดลองถูก)

วิธีนี้คือการทดลองปรับ K_p, K_i เข้าคอนโทรล แล้วสังเกตค่าที่ทำให้ระบบสมดุล

ขั้นตอนการจูน

1. เริ่มพล็อตกราฟของ Process variable (PV)
2. เช็ต K_i และ K_p เป็นศูนย์
3. เช็ต K_p ค่าน้อยๆ
4. เปลี่ยน PID Controller ให้อยู่ในโหมด Auto
5. ทดสอบระบบโดยเปลี่ยนค่าเป้าหมายแล้วสังเกตว่า Damping ของระบบ
6. ปรับค่า K_p เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนระบบมี Damping ตามต้องการหรือให้เป็น Quarter-amplitude Decay (Decay Ratio ~ 0.25) ดังภาพที่ 2.31 (b)



ภาพที่ 2.31 แสดงค่า quarter-amplitude decay (Decay Ratio ~ 0.25)

7. ถ้าระบบยังมี Offset ระหว่างค่าเป้าหมายและตัวแปรกระบวนการให้ปรับ K_i เพิ่มขึ้นจนไม่มี Offset

2.10 การควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรม

ในการควบคุมการนั้น โดยทั่วไปก็มักจะเป็นการควบคุมแบบธรรมดาไม่ค่อยยุ่งยาก ซับซ้อนมากนักแต่สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามในกระบวนการควบคุม บางอย่างจะต้องทำการรวมตัวควบคุมอัตโนมัติเข้าด้วยกัน เพื่อปรับปรุงการควบคุมให้ดีขึ้น ตัวควบคุม เหล่านี้อาจได้แก่ ตัวควบคุมแบบ Duplex, ตัวควบคุมแบบ Auto-Selector, ตัวควบคุมแบบ Ratio, การควบคุมแบบ Feed Forward Control และตัวควบคุมแบบ Cascade

2.10.1 ตัวควบคุมแบบ Duplex

ตัวควบคุมแบบ Duplex เป็นตัวควบคุมที่มีอินพุตเพียงอินพุตเดียว แต่มีสัญญาณ เอาท์พุตสองเอาท์พุต

2.10.2 ตัวควบคุมแบบ Auto-Selector

ระบบควบคุมแบบ Auto-Selector นี้จะมึการทำงานที่ตรงข้ามกับตัวควบคุมแบบ Duplex กล่าวคือ ระบบควบคุมแบบ Auto-Selector นี้จะมีสัญญาณอินพุตสองอินพุตหรือมากกว่า และมีสัญญาณเอาท์พุตเพียงเอาท์พุตเดียว โดยการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบ Auto-Selector ให้ ได้ผลดีที่สุคนั้นสัญญาณทางด้านอินพุตทั้งหมดต้องสัมพันธ์โดยตรงซึ่งกันและกัน

2.10.3 ตัวควบคุมแบบอัตราส่วน (Ratio Control)

ตัวควบคุมแบบอัตราส่วน (Ratio Control) นี้เป็นตัวควบคุมที่มีสองอินพุทและมีเอาต์พุทเพียงหนึ่งเอาต์พุท คล้ายๆกับตัวควบคุมแบบ Auto-Selector แต่ลักษณะการควบคุมจะต่างกัน คือ ตัวควบคุมอัตราส่วนของตัวแปรสองตัวมีค่าให้เป็นที่ต้องการ

2.10.4 ตัวควบคุมแบบ Cascade

ระบบการควบคุมแบบ Cascade ประกอบด้วยตัวควบคุมหลัก (Master Controller) และตัวควบคุมรอง (Slave Controller) ตัวควบคุมจะทำหน้าที่รักษาค่าของตัวแปรควบคุมไปตามต้องการ ส่วนตัวควบคุมรองจะทำหน้าที่ควบคุมตัวแปรอื่นที่สามารถทำให้ตัวแปรที่ถูกควบคุมเปลี่ยนแปลงค่าได้ ดังนั้นสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมหลักจะเป็นค่าที่กำหนดไว้ (Set Point) ของตัวควบคุมรอง และนั่นก็คือไปควบคุมการทำงานของวาล์วควบคุมทางอ้อมด้วย

2.11 เครื่องวัดอุณหภูมิ

เครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมมีอยู่หลายชนิด ขึ้นอยู่กับการใช้งานเป็นหลัก แบ่งเครื่องมือวัดอุณหภูมิตามหลักการวัด จะแบ่งออกเป็น 4 แบบด้วยกัน คือ

1. การใช้วัดอุณหภูมิโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเชิงกล ได้แก่
 - การใช้ของเหลวบรรจุในหลอดแก้วปิด โดยของเหลวที่ใช้เป็นปรอทหรือแอลกอฮอล์
 - หลักการขยายตัวของของเหลว ไอ หรือ ก๊าซเป็นความดัน (Filled Thermal)
 - ใช้หลักการแถบโลหะ (Bimetal)
2. การวัดอุณหภูมิโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า
 - อาร์ทีดี (RTD) จะเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิเป็นความต้านทาน
 - เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) จะเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า
3. การวัดอุณหภูมิโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงแสงและการแผ่รังสี
 - ออปติคคอลลไพโรมิเตอร์ (Optical Pyrometer) อาศัยการเปลี่ยนแปลงของความเข้มของแสง
 - ไพโรมิเตอร์แบบอินฟราเรด
4. การวัดอุณหภูมิโดยวิธีการทางเคมี
 - อาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงสีของสารเคมี เมื่อได้รับความร้อนหรือหลอมละลาย

2.11.1 การวัดอุณหภูมิโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า

2.11.1.1 อาร์ทีดี (Resistance Temperature Detector: RTD)

อาร์ทีดีเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนค่าความต้านทานของขดลวดโลหะที่เปลี่ยนไปตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดยที่

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad (2.14)$$

- เมื่อ R_t คือ ค่าความต้านทานของขดลวดโลหะที่อุณหภูมิ t °C
 R_0 คือ ค่าความต้านทานของขดลวดโลหะที่อุณหภูมิ 0 °C
 α คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ออุณหภูมิ 1 °C (Temperature Coefficient of Resistance), หน่วย $\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$
 t คือ ค่าอุณหภูมิใดๆ ในหน่วย °C

อาร์ทีดีที่ใช้งานในอุตสาหกรรมมีแบบ 2 แบบด้วยกัน คือ Pt 50 Ω และ Pt 100 Ω

โดยที่

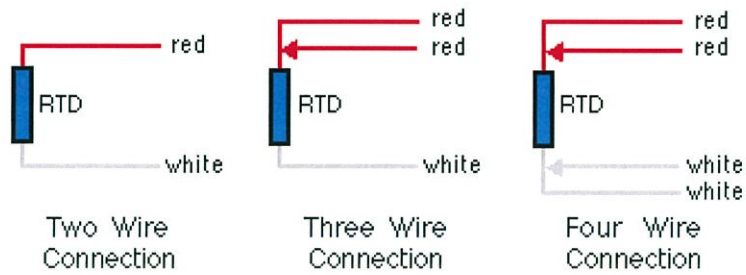
- อาร์ทีดีแบบ Pt 50 Ω หมายถึง ค่าความต้านทาน $R_t = 50 \Omega$ ที่อุณหภูมิ 0°C
- อาร์ทีดีแบบ Pt 100 Ω หมายถึง ค่าความต้านทาน $R_t = 100 \Omega$ ที่อุณหภูมิ 0°C



ภาพที่ 2.32 ภาพตัวอย่างอาร์ทีดี Pt 100 Ω

โดยทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ จะนิยมใช้อาร์ทีดีแบบ Pt 100 Ω มากที่สุด และแบบ 3 สาย ซึ่งโครงสร้างของอาร์ทีดีประกอบด้วย ลวดโลหะที่มีความยาวค่าหนึ่งพันอยู่รอบแกนที่เป็นฉนวน ไฟฟ้า ซึ่งมีคุณสมบัติทนต่อความร้อน โดยแกนที่ใช้เป็นสารประเภทเซรามิก หรือแก้ว เช่น อะลูมินาบริสุทธิ์ สภาพภายนอกของอาร์ทีดีจะคล้ายกับเทอร์โมคัปเปิล

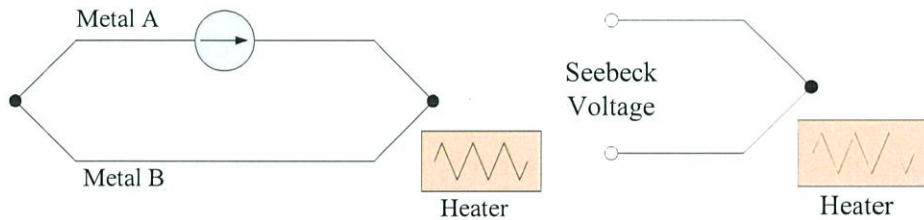
ลักษณะวงจรการต่อใช้งานของอาร์ทีดี มี 3 รูปแบบ คือ การต่อแบบ 2 สาย แบบ 3 สาย และการต่อแบบ 4 สาย โดยต่อเป็นวงจร “วีตสโตนบริดจ์ (Wheatstone Bridge)”



ภาพที่ 2.33 ลักษณะวงจรต่อใช้งานของอาร์ทีดี

2.11.1.2. เทอร์โมคัปเปิล

หลักการของเทอร์โมคัปเปิล ถูกค้นพบในปี ค.ศ.1821 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน ชื่อ โทมัส ซีเบ็ค (Thomas Seebeck) ที่พบว่าเมื่อนำลวดโลหะ 2 เส้น ที่ทำด้วยโลหะต่างชนิดกันมาเชื่อมปลายทั้งสองเข้าด้วยกัน ถ้าปลายจุดต่อทั้งสองได้รับอุณหภูมิที่ต่างกัน จะเกิดให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรเส้นลวดทั้งสองตามรูป ปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้านี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายจุดต่อทั้งสอง และถ้าเปิดปลายจุดต่อด้านหนึ่งออก จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นที่ด้านเปิด โดยแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ปลายด้านเปิดจะเป็นสัดส่วนกับผลต่างของอุณหภูมิที่จุดต่างทั้งสอง และแรง เคลื่อนไฟฟ้านี้เรียกว่า “ซีเบ็คโวลเตจ (Seebeck Voltage)”



ภาพที่ 2.34 การทดลองของซีเบ็ค (Seebeck)

$$e_{AB} = \text{Seebeck Voltage} = \alpha \Delta T \quad (2.15)$$

- เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์ของซีเบ็ค (Seebeck Coefficient) ซึ่งเป็นค่าคงที่ มีหน่วยเป็น Volt/K ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์นี้ เปลี่ยนแปลงตามชนิดโลหะ
- ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิ หน่วย K
- e_{AB} คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้

ต่อมาในปี ค.ศ. 1834 นักวิทยาศาสตร์ ฌอง ซี. เอ. เพลเทียร์ (Jean C.A, Peltier) พบว่าเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในวงจรลักษณะเดียวกับที่ซีเบ็คสร้างขึ้น จำทำให้เกิดอุณหภูมิที่ปลายทั้ง

สองของจุดต่อแตกต่างกัน โดยปลายข้างหนึ่งจะร้อนขึ้นและอีกปลายข้างหนึ่งจะเย็นลง วงจรการทดลองของเพลเทียร์

จากการค้นพบของซีเบ็คและเพลเทียร์ การศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับเทอร์โมคัปเปิลได้ดำเนินต่อมา จนเป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในวงการอุตสาหกรรม

เทอร์โมคัปเปิลที่นำมาใช้ในวงการอุตสาหกรรมนั้นมีอยู่หลายแบบด้วยกัน คือ แบบ S, R, B, T, E, K และ J สำหรับแบบ K และ J เป็นแบบที่ได้รับการยอมรับและนิยมนำไปประยุกต์ใช้งานมาก แต่ละชนิดจะมีข้อแตกต่างกันทั้งในด้านคุณสมบัติ และการใช้งาน โดยข้อแตกต่างที่สำคัญได้แก่

- 1) ชนิดของลวดโลหะที่ใช้
- 2) ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน
- 3) แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้
- 4) ลักษณะความเป็นเชิงเส้น (Linearity)

เทอร์โมคัปเปิลแบบ K เป็นชนิดที่ได้รับความนิยมสูงมากในปัจจุบัน ซึ่งเป็นเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้ส่วนผสมของโครเมล/อลูเมล ซึ่งโลหะทั้ง 2 มีราคาไม่สูงมาก จึงทำให้เทอร์โมคัปเปิลแบบ K นี้ มีราคาถูก นอกจากนี้ แรงดันที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก็จัดได้ว่าสูงมากเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามค่าแรงดันที่กำเนิดขึ้นจากตัวเทอร์โมคัปเปิลนั้น ก็มีค่าอยู่ในช่วงของ mV เท่านั้น

2.11.1.2.1 เทอร์โมคัปเปิลมาตรฐาน

1) เทอร์โมคัปเปิลแบบ S และ R

มีคุณสมบัติที่คล้ายกัน แต่แบบ R ให้ค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตที่สูงกว่า เหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง เช่น เตาหลอมเหล็ก อุตสาหกรรมแก้ว โดยสามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 1400°C ใช้งานได้ดีในสภาวะที่ไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ไม่เหมาะกับงานที่มีสภาวะแบบกัดกร่อน ไม่เหมาะกับงานในสภาวะสุญญากาศ และไม่เหมาะกับงานที่มีไอของโลหะและอโลหะ

2) เทอร์โมคัปเปิลแบบ B

ให้แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าแบบ S และ R แต่มีความแข็งแรงทนทานกว่า เหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเช่นเดียวกับแบบ S และ R ไม่เหมาะกับงานในสภาวะสุญญากาศ และไม่เหมาะสมกับงานที่มีไอของโลหะ และอโลหะ

3) เทอร์โมคัปเปิลแบบ J

ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าต่ออุณหภูมิที่ นิยมใช้กับงานทั่วไป ราคาไม่แพง เหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิไม่เกิน 760°C ไม่เหมาะกับงานที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 0 °C นิยมใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก

4) เทอร์โมคัปเปิลแบบ K

เป็นเทอร์โมคัปเปิลชนิดที่นิยมใช้แพร่หลายมากที่สุด สามารถวัดอุณหภูมิได้สูงกว่าแบบ J และมีราคาถูกกว่า ทนอุณหภูมิได้ถึง 1300°C และที่อุณหภูมิต่ำถึง -250°C มีค่าความเป็นเชิงเส้นสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมคัปเปิลชนิดอื่น ให้แรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตสูง (ให้อัตราการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าต่ออุณหภูมิดีกว่าแบบอื่นหรือมีค่าความชันใกล้เคียง) 1) สามารถใช้กับงานที่มีการแผ่รังสีความร้อน (Thermal Radiation) ได้ ไม่เหมาะกับงานในสภาวะสุญญากาศ (ยกเว้นการใช้งานในช่วงเวลาสั้น)

5) เทอร์โมคัปเปิลแบบ T

เหมาะสำหรับการวัดอุณหภูมิในย่านต่ำ เช่น การวัดอุณหภูมิในห้องเย็น (Cold Storage) และตู้แช่แข็ง (Freezer) มีเสถียรภาพในการวัดที่ดี สามารถทนต่อบรรยากาศที่มีการกัดกร่อนและความชื้นได้ดี ไม่เหมาะกับงานที่ต้องสัมผัสกับการแผ่รังสีความร้อนโดยตรง

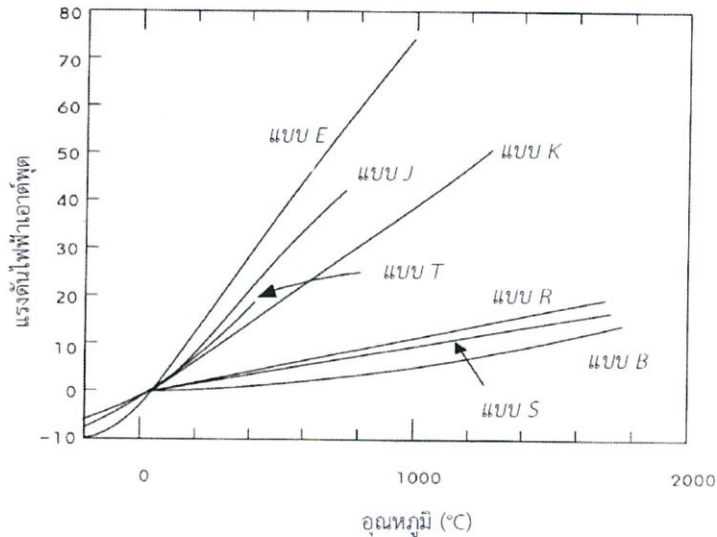
6) เทอร์โมคัปเปิลแบบ E

มีคุณสมบัติคล้ายเทอร์โมคัปเปิลแบบ K แต่ให้แรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตสูงกว่า มีย่านอุณหภูมิใช้งานอยู่ระหว่าง -250 °C ถึง 870°C

ตารางที่ 2.5 เทอร์โมคัปเปิลมาตรฐาน

ชนิด (Type)	วัสดุ (Material)	ย่านการวัด (Range)
J	Iron-Constantan	-190°C ถึง 760°C
T	Copper-Constantan	-200 °C ถึง 371°C
K	Chromel-Alumel	-190 °C ถึง 1260°C
E	Chromel-Constantan	-100°C ถึง 1260°C
S	90% Platinum +10% Rhodium-Platinum	0°C ถึง 1482°C
R	87% Platinum +13% Rhodium-Platinum	0°C ถึง 1482°C

จาก : หนังสือเครื่องมือวัดและควบคุม สำหรับการใช้งานทางอุตสาหกรรม ปี 2560 หน้าที่ 331



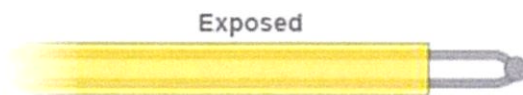
ภาพที่ 2.35 แสดงแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากผลต่างของอุณหภูมิของเทอร์คัปเปิลมาตรฐานทั้ง 7 แบบ

2.11.1.2.2 โครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิล

โครงสร้างของตัววัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิลมีลักษณะคล้ายกับอาร์ทีดี แต่ต่างกันตรงที่ตัวเซนเซอร์ที่ใส่ลงไปใน Bulb นั้นเอง โดยลักษณะการเชื่อมต่อของเทอร์โมคัปเปิลเพื่อให้สภาพของเทอร์โมคัปเปิลเรียบร้อยแข็งแรงพร้อมใช้งาน คู่สายของเทอร์โมคัปเปิลจะต้องประกอบอยู่ภายใน Metal Sheath และการประกอบจะมีอยู่ 3 วิธีด้วยกัน คือ

1. จุดเชื่อมต่อแบบเปลือย (Exposed Junction)

เหมาะสำหรับงานที่ไหลไม่มีการกัดกร่อน และต้องการผลการวัดที่เร็วที่สุด

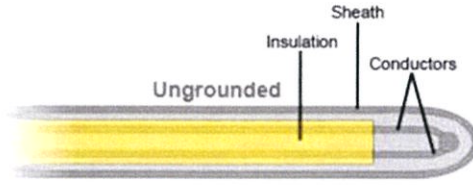


ภาพที่ 2.36 จุดเชื่อมต่อแบบเปลือย (Exposed Junction)

ข้อเสีย คือ ชำรุดและเสียหาย อายุการใช้งานสั้น และไม่เหมาะสมสำหรับงานความดันสูงด้วย

2. จุดต่อแบบไม่เชื่อมต่ออยู่กับตัวยึด (Ungrounded Junction)

ออกแบบไว้ใช้กับของไหลที่มีการกัดกร่อนและทนต่อสภาพความดันสูงๆ มีอายุการใช้งาน

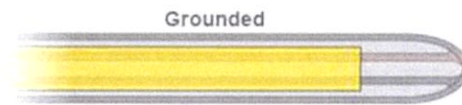


ภาพที่ 2.37 จุดต่อแบบไม่เชื่อมต่ออยู่กับตัวยึด (Ungrounded Junction)

ข้อเสีย คือ ให้ผลการวัดต่ำกว่าแบบแรก จึงเหมาะสำหรับงานที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซ้ำๆ

3. จุดต่อแบบเชื่อมต่อลงบนส่วนปลาย Sheath (Grounded Junction)

สายคู่ของเทอร์โมคัปเปิลจะถูกเชื่อมต่อลงบนส่วนปลาย เหมาะสำหรับงานที่มีของไหลที่มีการกัดกร่อน และให้ผลตอบสนองต่ออุณหภูมิไวกว่าแบบไม่เชื่อมต่ออยู่กับตัวยึด ทนต่อสภาพงานที่มีความดันสูงได้



ภาพที่ 2.38 จุดต่อแบบเชื่อมต่อลงบนส่วนปลาย Sheath (Grounded Junction)

ส่วนของ Metal Sheath ของเทอร์โมคัปเปิลแบบธรรมดาจะเป็นแบบสแตนเลสสตีล (SS304) ชนิดต่างๆ ที่ทนต่ออุณหภูมิสูงสุดได้ตั้งแต่ประมาณ 840 °C ขึ้นไปจนถึงประมาณ 1000 °C สำหรับการวัดอุณหภูมิสูงกว่านี้จะต้องใช้วัสดุอย่างอื่น เช่น โมลิบดีนัม แทนทาลัม เป็นต้น ขณะที่ส่วนของฉนวนของเทอร์โมคัปเปิล สำหรับกันตัวเทอร์โมคัปเปิลกับ Metal Sheath ส่วนใหญ่จะเป็นสารแมกนีเซียมออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์ และเซรามิก โดยที่เซรามิกสามารถทนอุณหภูมิได้สูงถึง 1800 °C

ในการใช้งานของเทอร์โมคัปเปิลจำเป็นจะต้องมี Reference ไว้อ้างอิงเสมอ ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ

วิธีที่ 1 ใช้น้ำแข็งบริสุทธิ์รักษาอุณหภูมิ ณ จุด Reference ที่ 0 °C

วิธีที่ 2 วงจรบริดจ์ โดยมีความต้านทานที่แปรค่าได้ตามอุณหภูมิ (R_T) เช่น อาร์ทีดี หรือ เทอร์มิสเตอร์ต่ออยู่วงจรบริดจ์ เพื่อชดเชยอุณหภูมิบรรยากาศที่เปลี่ยนไป สิ่งที่สำคัญที่ต้องคำนึงถึง คือสัญญาณของแหล่งจ่ายไฟจะต้องมีค่าคงที่ มิฉะนั้นค่าที่วัดได้จะเกิดความผิดพลาดได้

สิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งสำหรับการใช้งานเทอร์โมคัปเปิล คือสายต่อสำหรับนำสัญญาณที่ถูกวัดไปใช้งานจะต้องใช้สายตัวนำที่มีคุณสมบัติเหมือนกับโลหะที่ใช้ทำเทอร์โมคัปเปิล แต่เนื่องจาก

สายเทอร์โมคัปเปิลดังกล่าวมีราคาแพง ด้วยเหตุนี้ในกรณีที่มีการต่อจุดที่ต้องการวัดระยะไกลๆ จึงจำเป็นต้องใช้สายนำที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับสายเทอร์โมคัปเปิลเรียกว่า “Extension Wire” โดยที่ Extension Wire จะต้องเป็นสายตัวนำที่มีคุณสมบัติการเกิดแรงดันไฟฟ้าตามอุณหภูมิ (Thermoelectric) เหมือนกับเทอร์โมคัปเปิลในช่วงอุณหภูมิบรรยากาศ และควรเป็นสายหุ้มฉนวนที่ฉนวนป้องกันสนามแม่เหล็กภายนอกบริเวณ เนื่องจาก Extension Wire เป็นตัวนำไฟฟ้า เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีการเปลี่ยนแปลงอาจทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของค่าแรงดันที่วัดได้

2.11.1.3 ความแตกต่างระหว่าง RTD และ Thermocouple

ทั้ง อาร์ทีดี และ เทอร์โมคัปเปิลต่างก็เป็นเซนเซอร์ที่ถูกใช้เพื่อวัดความร้อนหรืออุณหภูมิของวัตถุร้อน

อาร์ทีดีปัจจุบันมีโครงสร้าง 2 ชนิดคือ 1) Wire-wound RTD และ 2) Thin-film RTD Wire-wound RTD ประกอบด้วยเส้นลวดเล็กๆพันเป็นขดลวดรอบๆเซรามิกหรือแก้ว ถูกใส่เข้าไปในโพรบพลาสติกเพื่อป้องกัน ส่วน Thin-film RTD เป็นการเคลือบแพททินัมหรือสารตัวนำบนฐานรองเซรามิก (Ceramic Substrate) Thin-film RTDs จะไม่อ่อนแอต่อการสัมผัสเหมือนเหมือนกับ Wire-wound RTDs แต่มีข้อจำกัดที่ย่านการวัดอุณหภูมิที่สามารถใช้งานได้ต่ำกว่า

ส่วนเทอร์โมคัปเปิลไม่แตกหักเหมือนกับอาร์ทีดี มีความทนทานมากกว่าและถูกป้องกันโดยการหุ้มโลหะที่สามารถขันติด (Bolted) เชื่อมติดกับพื้นผิวได้ ในบางกรณีจุดต่ออุณหภูมิสามารถเปิด (Exposed) ไว้กับสภาพแวดล้อม ซึ่งจะทำให้มีการตอบสนองได้รวดเร็วที่สุด โครงสร้างของจุดต่อเทอร์โมคัปเปิลแบบต่างๆ

จุดต่อของเทอร์โมคัปเปิลแบบ Grounded อาจมีปัญหาเกิดขึ้นนั่นคือเทอร์โมคัปเปิลจะสร้างไฟฟ้าสถิตขึ้นซึ่งส่งผลต่อความเที่ยงตรงในการวัด ดังนั้นจำเป็นต้องการลงกราวด์อย่างไรก็ตามเทอร์โมคัปเปิลยังสามารถเก็บสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์หรือเครื่องจักรได้ การตัดสินใจว่าจะใช้จุดต่อของเทอร์โมคัปเปิลแบบ Grounded หรือ Ungrounded จึงขึ้นอยู่กับข้อกำหนดรายละเอียดของการใช้งาน

ตารางที่ 2.6 แสดงการเปรียบเทียบจุดเด่นของอาร์ทีดีและเทอร์โมคัปเปิล

หัวข้อที่พิจารณา	RTD	Thermocouple
ย่านการวัด	< 600°C	> 600°C
เวลาในการตอบสนอง	เร็ว	เร็วมาก
ขนาด	>0.5 mm	< 0.5 mm
การสัมผัสเพื่อน	ดี	ดีมาก
ความร่อยภายใน	เล็กน้อย	ไม่มี
ความเสถียรภาพที่ยาวนาน	ดีมาก	ดี

หัวข้อที่พิจารณา	RTD	Thermocouple
ความเที่ยงตรง	ดีมาก	ดี
สายต่อ	สายเคเบิลเชื่อมต่อ	Thermo-cable
แหล่งจ่ายไฟ	ต้องการ	ไม่ต้องการ

จาก : หนังสือเครื่องมือวัดและควบคุม สำหรับการใช้งานทางอุตสาหกรรม ปี 2560 หน้าที่ 340

1. ย่านการวัด : อาร์ทีดีสามารถวัดอุณหภูมิได้สูงถึง 1,000 °C แต่เป็นเรื่องยากที่จะให้ความเที่ยงตรงที่อุณหภูมิสูงกว่า 400 °C ส่วนเทอร์โมคัปเปิลสามารถวัดอุณหภูมิได้สูงถึง 1,700 °C
2. กฎเกณฑ์ที่ยอมรับโดยทั่วไป : สำหรับอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 850 °C การใช้อาร์ทีดีจะให้ความเที่ยงตรง แต่อุณหภูมิที่สูงกว่า 850 °C ควรใช้เทอร์โมคัปเปิล การวัดทางอุตสาหกรรมโดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 200 °C ถึง 400 °C ดังนั้น อาร์ทีดีจึงเป็นตัวเลือกที่ดีในย่านการวัดดังกล่าว
3. เวลาในการตอบสนอง : ขณะที่เซนเซอร์ทั้งสองตอบสนองได้อย่างรวดเร็วกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เทอร์โมคัปเปิลจะเร็วกว่า ในบางกรณีกระบวนการผลิตจะยินยอมให้ใช้ Thin-film RTDs ที่มีการปรับปรุงเวลาในการตอบสนองให้เร็วขึ้น
4. ขนาด : เซนเซอร์ทั้งสองมีขนาดเล็กที่เดียว มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5 mm ถ้าพื้นที่มีปัญหาต่อการติดตั้งเซนเซอร์ ให้ตรวจสอบ Supplier หรือ Vender เพื่อเลือกขนาดและการติดตั้ง
5. การสิ้นสະเทือน : โดยทั่วไปเทอร์โมคัปเปิลมีความอ่อนแอต่อการสิ้นสະเทือนน้อยกว่าอาร์ทีดี อย่างไรก็ตาม Thin-film RTDs สามารถสร้างให้มันสามารถต้านทานต่อการสิ้นสະเทือนได้มากกว่าอาร์ทีดีมาตรฐาน
6. ความร้อนภายใน : อาร์ทีดีทำด้วยลวดเส้นเล็กๆหรือการเคลือบที่บางมากๆ และต้องการแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย (แต่เทอร์โมคัปเปิลไม่ต้องการแหล่งจ่ายไฟ) แม้ว่าการดำเนินงานที่ต้องการเพียง 1 mA ถึง 10 mA แต่มันเหตุให้ส่วนประกอบอาร์ทีดีร้อนขึ้นและมีผลต่อความเที่ยงตรงในการวัด และถ้าใช้สายต่อที่ยาวมากขึ้น ก็ต้องใช้กำลังงานมากขึ้นทำให้ปัญหาความร้อนภายในเพิ่มมากขึ้น

7. ความเสถียรภาพ : ความเสถียรภาพที่ยาวนานของอาร์ทีดีจะดีมาก ๆ หมายความว่า การอ่านค่าของมันเป็นสามารถอ่านซ้ำค่าเดิมได้ดีและเสถียรภาพในช่วงเวลาที่ยาวนาน อีกด้านหนึ่งเทอร์โมคัปเปิลมีแนวโน้มที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เพราะการ Oxidation การกัดกร่อน และการเปลี่ยนแปลงอื่นๆ ในคุณสมบัติทางโลหะขอตัวรับรู้ การเลื่อนไปของเทอร์โมคัปเปิลเป็นสิ่งที่ย้อนกลับไม่ได้ และการเตรียมการบางอย่างเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อการตรวจสอบมัน
8. ความเที่ยงตรง : หลักเกณฑ์โดยทั่วไป อาร์ทีดีจะมีความเที่ยงตรงมากกว่าเทอร์โมคัปเปิล อาร์ทีดีสามารถให้ความเที่ยงตรง 0.1 °C ขณะที่เทอร์โมคัปเปิลโดยทั่วไปให้ความเที่ยงตรง 1.0 °C แม้ว่ามันจะไม่ใช่ปัญหาทางเทคนิค เทอร์โมคัปเปิลมีค่าใช้จ่ายถูกกว่าอาร์ทีดี เนื่อง จากต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่า ขึ้นอยู่กับจำนวนตัวรับรู้ที่ต้องการ สำหรับการใช้งาน ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญ

การเลือกเทคโนโลยีการรับรู้อุณหภูมิที่ถูกต้องอย่างระมัดระวังเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อให้แน่ใจในสมรรถนะ (Performance) ที่ดีที่สุด ความน่าเชื่อถือ (Reliability) และเหมาะสมกับต้นทุน Supplier หรือ Vendor ที่ขายทั้งเทอร์โมคัปเปิลและอาร์ทีดีจะเป็นแหล่งข้อมูลที่ดีเมื่อต้องมีการตัดสินใจเลือกเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

2.11.2 การวัดอุณหภูมิโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงแสงและการแผ่รังสี

การวัดอุณหภูมิแบบนี้เป็นการวัดโดยไม่ต้องมีการสัมผัสโดยตรงกับวัตถุที่ต้องการวัดอุณหภูมิ เพราะจะวัดโดยอาศัยการแผ่รังสีความร้อนและแสงของวัตถุเพื่อบอกค่าอุณหภูมิของวัตถุแทน ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของการแผ่รังสีกับการเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นและอุณหภูมิ โดยความยาวคลื่นจะอยู่ในย่านไมครอน ($\times 10^{-6}$) คุณสมบัติทั่วไปของการแผ่รังสีในช่วงอุณหภูมิ 1000 °F ถึง 2800 °F พลังงานที่แผ่ออกมาเป็นรูปแสง แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า 1000 °F จนถึงอุณหภูมิห้อง พลังงานที่แผ่ออกมาจะอยู่ในรูปของการแผ่รังสีความร้อน (Thermal Radiation) โดยที่ ณ จุดอุณหภูมิที่แตกต่างกัน จะมีความยาวคลื่นหรือความถี่ของพลังงานแตกต่างกันออกไปด้วย

อุณหภูมิวัดอุณหภูมิที่อาศัยการแผ่รังสีความร้อนและแสงของวัตถุ เรียกว่า “ไพโรมิเตอร์ (Pyrometer)” ซึ่งแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ ชนิดที่มีการวัดคลื่นรังสีที่ตามนุษย์มองเห็น (Optical Pyrometer) และชนิดที่มีการวัดคลื่นรังสีอินฟราเรด (Infrared Pyrometer) โดยปกติความยาวคลื่นของแสงที่ตามนุษย์มองเห็นได้อยู่ในช่วงประมาณ 0.3 μm ถึง 0.7 μm เท่านั้น แต่อินฟราเรดมีความยาวคลื่นสูงกว่าในย่านที่ตามนุษย์มองเห็นโดยอยู่ในช่วง 0.75 μm ถึง 1000 μm ที่ความยาวคลื่นสูงกว่านี้จะเป็นย่าน Radar และย่าน Ultraviolet, X-Ray และ Gamma-Ray เป็นต้น

ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความเข้มข้นของการแผ่รังสีออกมามากที่สุด ในปัจจุบันหลักการวัดอุณหภูมิโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงแสงและการแผ่รังสีที่นิยมใช้มากที่สุด คือ “ไพโรมิเตอร์แบบอินฟราเรด” ส่วนไพโรมิเตอร์แบบอื่นๆ มีการใช้งานน้อยมากในการควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรม

2.11.2.1 ไพโรมิเตอร์แบบอินฟราเรด

อุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบนี้ นิยมใช้ในกรณีที่ต้องการวัดค่าอุณหภูมิเป็นครั้งคราว ซึ่งเป็นการตรวจสอบเฉพาะจุด เช่น การตรวจสอบความร้อนจากข้อต่อสายไฟ หรือต้องการหาจุด Hot-spot ที่ตัวหม้อแปลง โดยที่อุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบอื่นไม่สามารถทำได้ อุปกรณ์วัดแบบอินฟราเรดจะมีตัวตรวจวัดอุณหภูมิซึ่งเป็นสารประเภทสารกึ่งตัวนำที่เรียกว่า “โฟตอน (Photon)” หรือใช้เทอร์โมไพล์เป็นตัวรับคลื่นแสง เมื่อโฟตอนหรือเทอร์โมไพล์ได้รับพลังงานความร้อนที่อยู่ในรูปของการแผ่รังสีความร้อนจะเกิดเป็นแรงดันไฟฟ้าขึ้น ทำให้สามารถวัดค่าอุณหภูมิวัตถุต่างๆได้ สำหรับการเลือกใช้งานจะพิจารณาจากย่านวัดและความถูกต้องเท่านั้น



ภาพที่ 2.39 ไพโรมิเตอร์ชนิดอินฟราเรด (ก) เทอร์โมมิเตอร์ชนิดอินฟราเรด
(ข) กล้องถ่ายภาพความร้อน (ภาพผลิตภัณท์ FLUKE)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการการเพิ่มประสิทธิภาพของ Heat Shrink Machine

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึง การเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ (Heat Shrink Machine) ในกระบวนการผลิตตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำ ซึ่งจะดำเนินการ 6 ส่วนหลักๆคือ 1) ศึกษากระบวนการของผลิตตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำ 3 ส่วนหลักๆประกอบด้วย ส่วนของบัสบาร์ ส่วนของตู้และส่วนของโมดูล 2) ศึกษาเครื่องเป่าลมอัตโนมัติ อุปกรณ์เป่าความร้อน และอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ 3) ขั้นตอนในการปรับค่าที่เครื่องควบคุมฟังก์ชันพีไอดี (PID Controller) และการปรับปรุงกระบวนการ 4) ขั้นตอนการคำนวณเพื่อเลือกขนาดฉนวนให้เหมาะสมกับขนาดของบัสบาร์ในการใช้งาน 5) การทดสอบแต่ละช่วงอุณหภูมิของบัสบาร์แต่ละขนาด 6) การเปรียบเทียบการใช้งานก่อนการเพิ่มประสิทธิภาพและหลังการเพิ่มประสิทธิภาพโดยการปรับค่าพีไอดีและการติดตั้งการเป่าลมร้อนร่วมด้วย

3.2 ขั้นตอนการศึกษาและรวบรวมข้อมูล

3.2.1 ศึกษากระบวนการผลิตตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำ

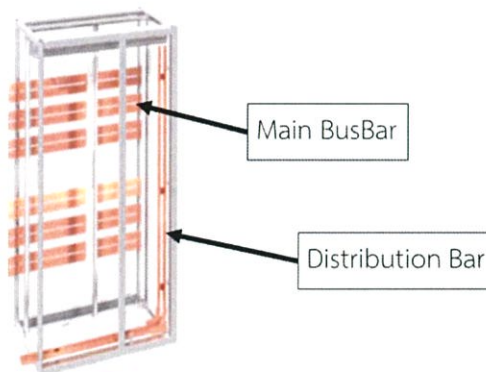
ศึกษากระบวนการผลิตตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำ จากภาพที่ 3.1 เป็นขั้นตอนและกระบวนการของการผลิตตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำนั้น สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ 1. ส่วนของบัสบาร์ 2. ส่วนของตู้ 3. ส่วนของโมดูล ซึ่งจะอธิบายต่อไปนี้

1. ส่วนของบัสบาร์ → จะเป็นขั้นตอนของการเตรียมงานในส่วนของบัสบาร์ โดยจะใช้เครื่อง CNC (Computer Numerical Control) เป็นการควบคุมเชิงตัวเลขด้วยระบบคอมพิวเตอร์ เป็นการใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องจักรกล ในที่นี้ของกล่าวถึงเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม ซึ่งจะเป็นการผลิตตามทีออกแบบบนโปรแกรม CAD เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่ถูกต้อง รวดเร็ว ซึ่งข้อดีของ CNC คือความคงเส้นคงวาและความถูกต้องแม่นยำของชิ้นงาน หมายความว่า เมื่อโปรแกรมทำงานถูกกำหนดมาอย่างถูกต้องแล้ว การผลิตชิ้นส่วนจะเหมือนกัน ทั้งหมด100% ทั้งส่วนของการตัด เจาะและการัด จะใช้เครื่อง CNC ทั้งหมด และส่วนของการหุ้มฉนวน ด้วยเครื่องเป่าลมร้อนหุ้มฉนวนอัตโนมัติ การหุ้มฉนวนนั้นจะใช้กับ ตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำ และขึ้นอยู่กับความต้องการของลูกค้า ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อถัดไป เมื่อเสร็จกระบวนการของบัสบาร์เรียบร้อยแล้วจะเป็นกระบวนการของการประกอบบัสบาร์กับโครงตู้ และประเภทของบัสบาร์จะแบ่งเป็น 4 ประเภทหลักๆมีดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3.1 กระบวนการผลิตตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำ

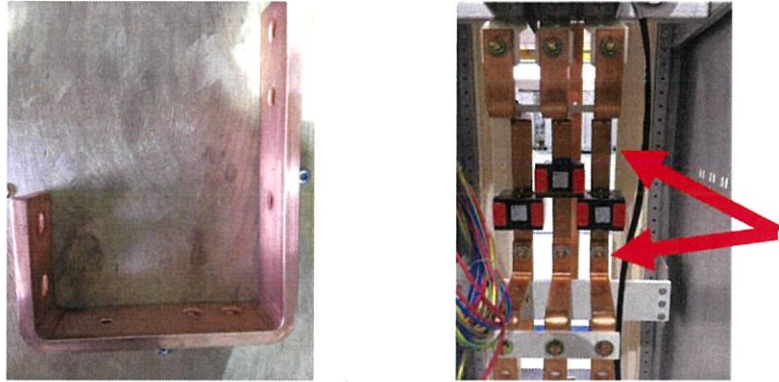
1.1 บัสบาร์หลัก (Main BusBar): จะมีลักษณะตรงและยาวที่สุดเมื่อเทียบกับประเภทอื่นๆ จะเป็นบัสบาร์หลักที่เชื่อมทุกตู้ จากความยาวที่เคยใช้มาสั้นสุด 438 mm. และยาวที่สุดคือ 3038 mm.และใช้งานที่เยอะที่สุด ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 ตัวอย่าง Main BusBar และ Distribution Bar

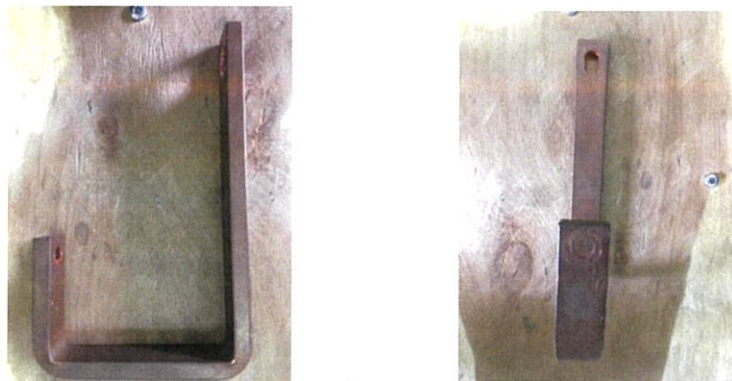
1.2 Distribution Bar: จะเป็นบัสบาร์ที่มีลักษณะตรงและยาวแต่จะมีรูตลอดเส้นบัสบาร์ ส่วนใหญ่จะใช้เป็น กราวด์บาร์ (Ground Bar) และบัสบาร์ลักษณะนี้จะไม่มีการหุ้มฉนวน ดังภาพที่ 3.2

1.3 Dropper Bar: จะเป็นบัสบาร์ที่มีลักษณะงอและเป็นบัสบาร์ที่ต่อเข้ากับอุปกรณ์หรือ ต่อระหว่างเฟสกับเฟส ดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 ตัวอย่าง Dropper Bar

1.4 Module Bar: จะเป็นบัสบาร์ที่มีลักษณะเล็ก มุมงอ และสั้น การใช้งานไว้ต่อเชื่อมกับโมดูล และส่วนใหญ่บัสบาร์ลักษณะนี้จะไม่มีการหุ้มฉนวน ดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 ตัวอย่าง Module Bar

2. ส่วนของตู้ จะเป็นขั้นตอนของการขึ้นโครงตู้และเมื่อขึ้นโครงตู้เรียบร้อยแล้วแล้วจะเป็นลำดับของการติดตั้งบัสบาร์เข้าตู้ และการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันหรืออุปกรณ์ต่างๆภายในตู้ เช่น คอนแทคเตอร์ (Contactor) ,ทรานส์ดิวเซอร์ (Transducer), รีเลย์อุณหภูมิ (Temperature Relay) และอุปกรณ์ต่างๆที่หน้าตู้รวมทั้งการเดินสายไฟต่างๆ
3. ส่วนของโมดูล จะเป็นขั้นตอนของการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ภายในโมดูลรวมทั้งการเดินสายไฟ ซึ่งสายไฟที่ใช้ในการเดินสายจะมีรูปแบบ สี และขนาดที่แตกต่างกันตามการออกแบบและตามกำลังไฟฟ้าที่ใช้งานซึ่งลูกค้าเป็นผู้กำหนด เมื่อเสร็จเรียบร้อยแล้วนำไปประกอบกับตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำต่อไป

เมื่อเสร็จกระบวนการของการประกอบตู้ทั้ง ในส่วนของบัสบาร์ ส่วนของโครงสร้างตู้ และ ส่วนของโมดูล จะประกอบเข้ารวมกันเป็นตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะเป็นส่วนของการทดสอบตู้ครั้งสุดท้ายก่อนส่งลูกค้า และเมื่อทดสอบแล้ว จะเป็นขั้นตอนของการทดสอบพร้อมลูกค้าเพื่อ ตรวจเช็คความถูกต้องและการทำงานตามความต้องการของลูกค้าในการทำงานจริง สุดท้ายจะเป็น กระบวนการของการแพ็คตู้เตรียมจัดส่งและการจัดส่งตู้ให้ลูกค้า

3.2.2 ประเภทของอุปกรณ์เพื่อหุ้มฉนวนที่บัสบาร์

- “การเป่าด้วยก๊าซปิโตรเลียมเหลว” (LPG: Liquefied Petroleum Gas) หรือ เรียกว่า “แก๊สหุงต้ม” ซึ่งค่าอุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 150 องศาเซลเซียส จะการเป่า โดยให้ความร้อนผ่านหัวพ่นแบบ Manual เพื่อให้ฉนวนเกิดการหดตัวที่บัสบาร์



ภาพที่ 3.5 ตัวอย่างถังแก๊สและอุปกรณ์เป่าให้ความร้อนกับฉนวน

- “การเป่าด้วย Electric Blower Heater (Hot Air Gun)” ที่เป่าด้วยอุณหภูมิ ช่วง 150 – 220 องศาเซลเซียส โดยจะเป็นการเป่าลมร้อนผ่านฮีตเตอร์ขนาดเล็ก ออกมา สามารถปรับระดับได้ 2 ระดับ เมื่อนำไปเป่าฉนวนทำให้ฉนวนหดตัวได้



ภาพที่ 3.6 เป็นเครื่องเป่าลมร้อน (Hot Air Gun) ที่ใช้ในการเป่าหุ้มฉนวน

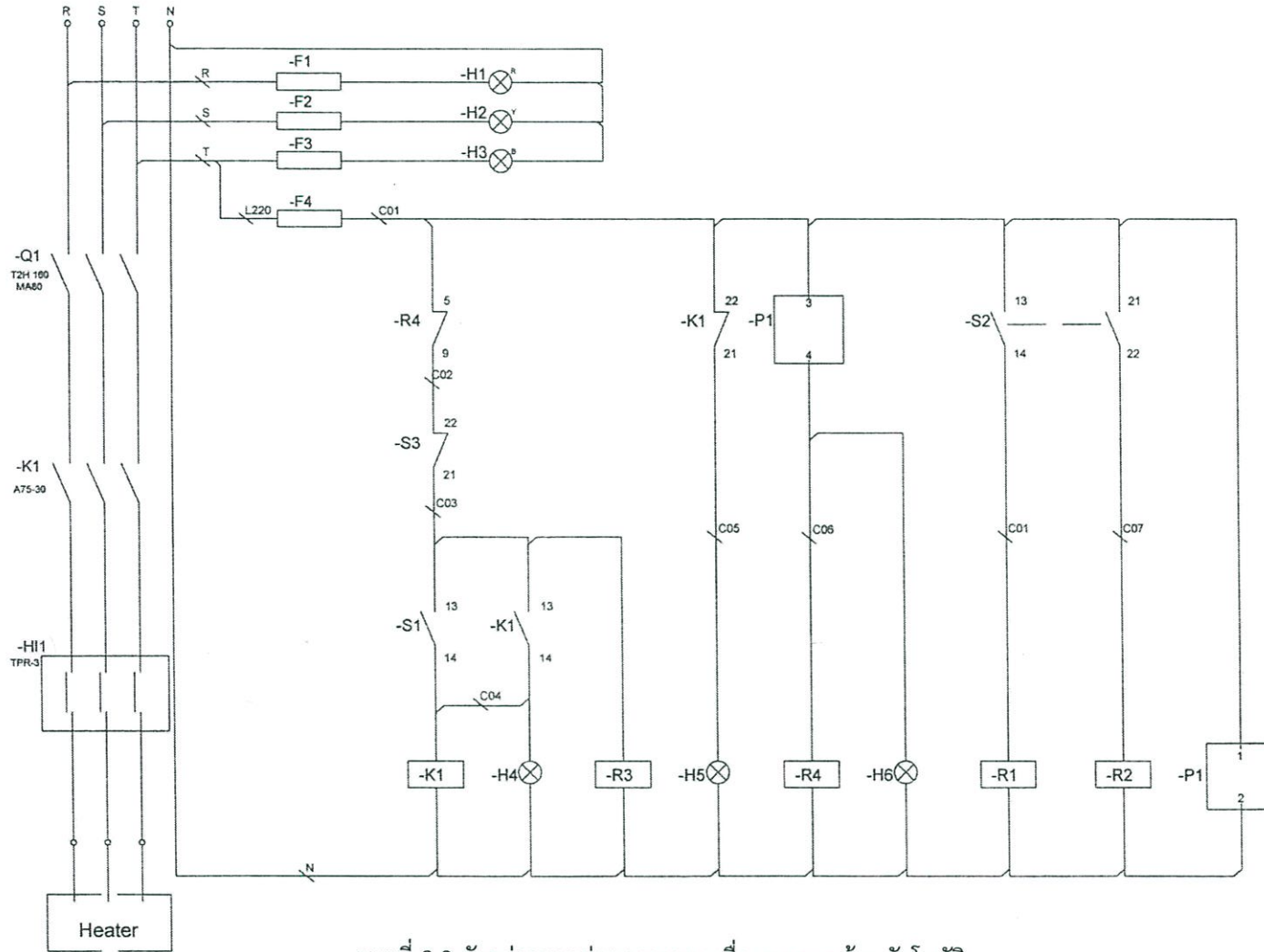
3.2.3 ศึกษาเครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ



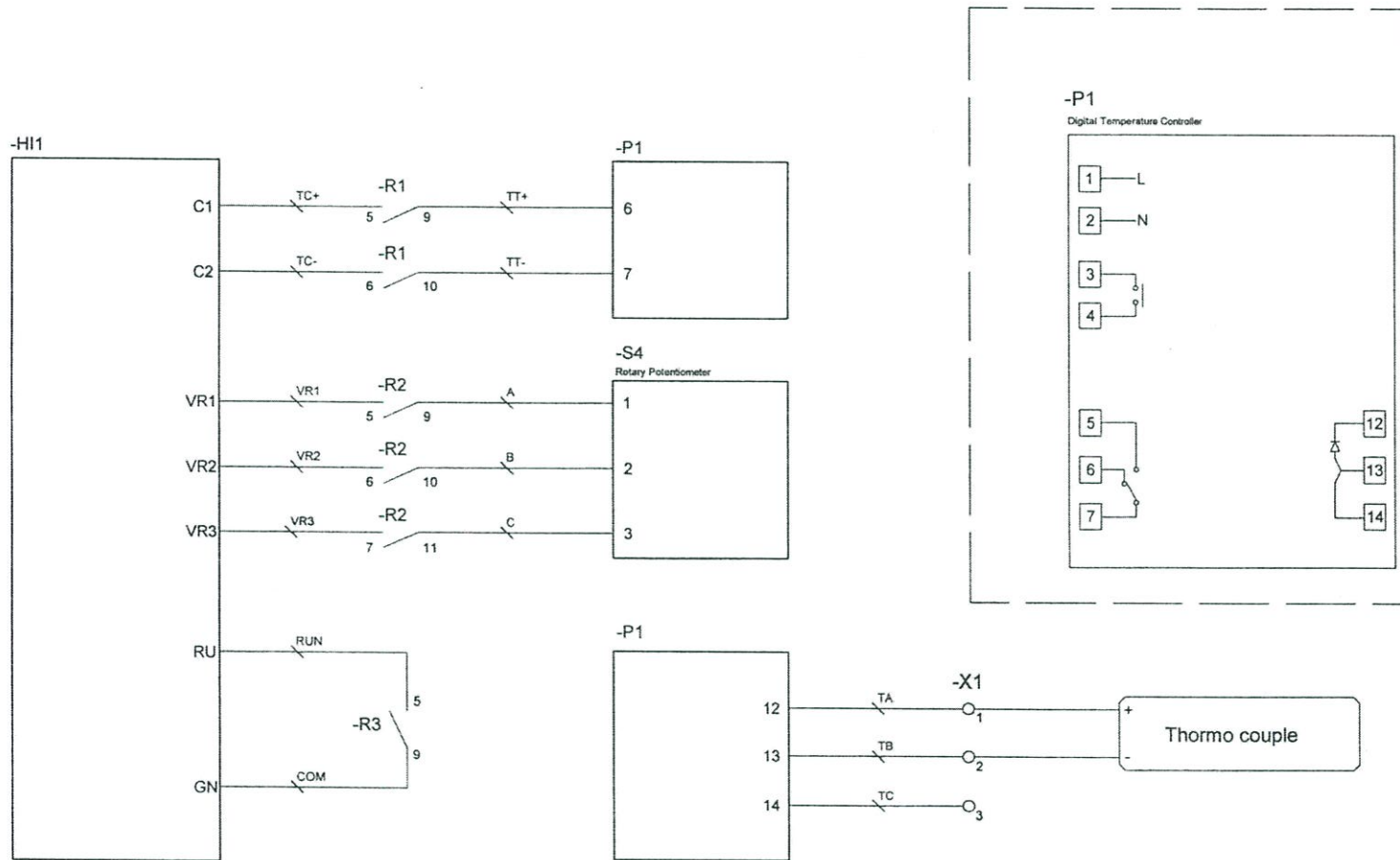
ภาพที่ 3.7 เครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ

คุณสมบัติของเครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ

- ความจุเตาอบ มีปริมาตร 0.587 ลบ.เมตร
- ใช้ไฟฟ้า 3 เฟส 380 Vac , Heater/phase 220 Vac 1,500 วัตต์ จำนวน 15 แห่ง
- พลังงานความร้อนเตาอบ 22,500 จูล หรือ วัตต์-วินาที
- ช่วงอุณหภูมิหรือความร้อนที่สามารถทำได้ตั้งแต่ 0°C ถึง 180 °C ในเวลา 20.07 นาที
- ลมหมุนเวียนภายในเครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ ใช้ปั๊มลม ความดัน 0.7 bar.
- ท่อลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว
- ปริมาณอัตราการร้อนที่หมุนเวียน 0.1668 ลบเมตร/นาที
- ความเร็วสายพานลำเลียง ตั้งแต่ 0.0064 ถึง 0.0185 เมตร/นาทีด้วย อินเวอร์เตอร์ ยี่ห้อ ABB รุ่น ACS800-04-0005-3+E200+P901
- ควบคุมด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ รุ่น TAIE type FY 700
- เครื่องขับเคลื่อนรังสีอินฟราเรด ยี่ห้อ Heater Thyristor power regulator รุ่น TPR-3

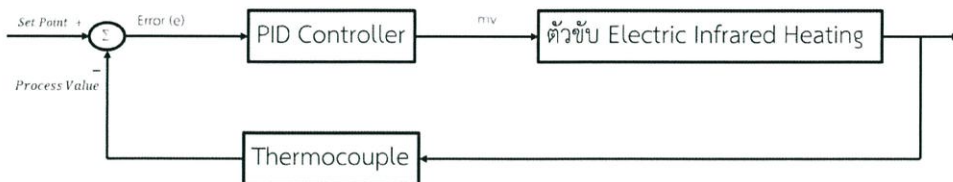


ภาพที่ 3.8 ตัวอย่างภาพย่อของวงจร เครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ



ภาพที่ 3.9 ตัวอย่างภาพย่อของวงจร เครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ

เครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ นั้นเป็นเครื่องอบความร้อนอัตโนมัติเพื่อหุ้มฉนวนที่บัสบาร์ที่ทางบริษัท เอบีบี จำกัด (ประเทศไทย) จัดทำขึ้นมาเอง โดยให้ความร้อนเพื่อให้ฉนวนหุ้มที่บัสบาร์เกิดการหดตัวขึ้น การหุ้มฉนวนนั้นเพื่อความปลอดภัยในการใช้งานและความเป็นฉนวนมากขึ้นของบัสบาร์



ภาพที่ 3.10 ตัวอย่างวงรูปการทำงานภาพย่อของเครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ

จากภาพที่ 3.10 เป็นวงรูปการทำงานวงปิดของกระบวนการที่เครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ เมื่อเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิได้จะได้ค่าตัวแปรของกระบวนการ (PV: Process Variable) เพื่อไปเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมาย (SP: Set Point) จะได้ค่าความผิดพลาด (Error) เมื่อค่า Error = Set point - Process variable เมื่อได้คือผิดพลาดหรือผลต่างของค่าที่ตั้งค่าจะส่งค่าไปสั่งงานที่ตัวควบคุมฟังก์ชันพีไอดี (PID Controller) โดยจะส่งสัญญาณมาตรฐานเป็น 4-20 mA เพื่อควบคุมเครื่องขับเคลื่อนความร้อนรังสีอินฟราเรดต่อไป

3.2.4 สายพานลำเลียงขับเคลื่อนขึ้นงาน



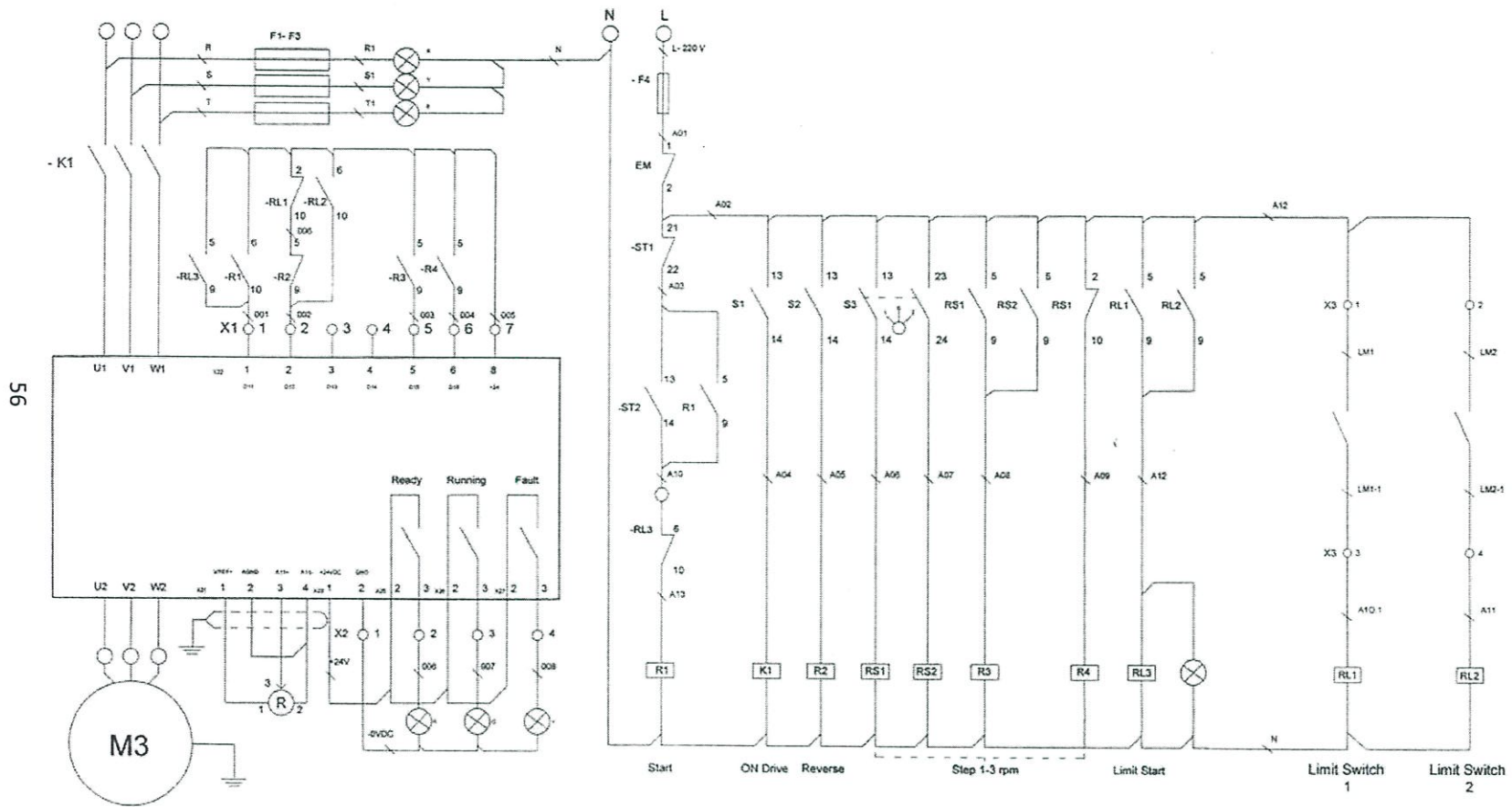
(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.11 (ก) สายพานลำเลียงขับเคลื่อนขึ้นงานเครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ

(ข) ตู้ควบคุมการเคลื่อนที่ของสายพานลำเลียงขึ้นงาน



ภาพที่ 3.12 ตัวอย่างภาพย่อของวงจร สายพานลำเลียงขับเคลื่อนขึ้นงานร้อนอัตโนมัติ

เป็นเครื่องที่ทำหลังจากมีเครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ แล้วการสั่งการจึงแยกการทำงานกับกระบวนการของเครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ การทำงานคือจะเป็นตัวเลื่อนชิ้นงาน โดยมีความเร็ว 3 ระดับ แต่ยังไม่มีการระบุความเร็วไว้เนื่องจากเป็นเครื่องที่ประกอบขึ้นมาเอง เพื่อสะดวกในการทำงานของการหุ้มฉนวนมากขึ้น การหาความเร็วของเครื่องจะหาได้จาก

1. ระยะการเคลื่อนที่ทั้งหมดของสายพานลำเลียงชิ้นงาน (S) มีหน่วยเป็น เมตร
2. เวลาของการเคลื่อนที่ทั้งหมดของสายพานลำเลียงชิ้นงาน (t) มีหน่วยเป็น วินาที

$$\text{จะหาได้จากสมการ} \quad V = \frac{S}{t} \quad (3.1)$$

เมื่อ $V =$ อัตราเร็วของการเคลื่อนที่ (m/s)
 $S =$ ระยะทางการเคลื่อนที่ทั้งหมด (m)
 $t =$ เวลาในการเคลื่อนที่ทั้งหมด (t)

โดยความยาวของเครื่องเลื่อนชิ้นงานทั้งหมด คือ 3.86 เมตร

ที่ความเร็วระดับ 1 ; เวลาในการเคลื่อนที่ทั้งหมด 10.03 Min. หรือ $10.03 \times 60 = 603$ Sec.

สามารถหาความเร็วได้ คือ $V = \frac{S}{t} = \frac{3.86}{603} = 0.0064$ m/s.

ที่ความเร็วระดับ 2 ; เวลาในการเคลื่อนที่ทั้งหมด 5.29 Min หรือ $5.29 \times 60 = 317.4$ Sec.

สามารถหาความเร็วได้ คือ $V = \frac{S}{t} = \frac{3.86}{317.4} = 0.0122$ m/s.

ที่ความเร็วระดับ 3 ; เวลาในการเคลื่อนที่ทั้งหมด 3.47 หรือ 208.2 Sec.

สามารถหาความเร็วได้ คือ $V = \frac{S}{t} = \frac{3.86}{208.2} = 0.0185$ m/s.

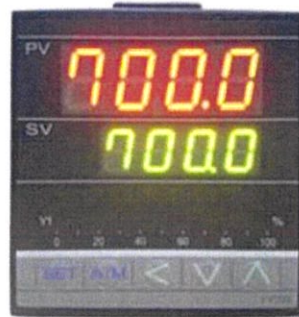
3.3 อุปกรณ์ควบคุมฟังก์ชันพีไอดี (PID controller) และอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ใช้งาน

สำหรับเครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ มีการใช้งานเดิมอยู่แล้วและมีการใช้เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K อยู่ในช่วงการวัดตั้งแต่ 0 - 400 °C อุปกรณ์ควบคุมฟังก์ชันพีไอดี (PID Controller) ยี่ห้อ TAIE รุ่น FY 700 จะมีช่วงของค่าพีไอดี ดังต่อไปนี้ P ตั้งแต่ 0 - 200 % ค่า I ตั้งแต่ 0 - 3600 Sec ค่า D ตั้งแต่ 0 - 900 Sec ทั้งเทอร์โมคัปเปิลและอุปกรณ์ควบคุมฟังก์ชันพีไอดี (PID controller) ได้มีการติดตั้งเดิมอยู่แล้วที่เครื่องเครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ แต่อุปกรณ์ควบคุมฟังก์ชันพีไอดี (PID controller) ยังไม่ได้มีการใช้งานเพื่อควบคุมและรักษาระดับอุณหภูมิ การใช้งานเพียงตั้งค่าอุณหภูมิเป้าหมายที่ต้องการ และดูผลอุณหภูมิที่วัดโดยเทอร์โมคัปเปิลเพื่อมาแสดงค่าที่จอเท่านั้น เพื่ออ่านค่าหรือทราบค่าอุณหภูมิจาก

กระบวนการ และจะใช้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิอีกตัวคือ Fluke 568 Infrared and Contact Thermometer ดังนั้นเพื่อใช้วัดเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิลในกระบวนการและค่าเป้าหมาย



FY700
72X72mm
(DIN 3/16)



FY700

ภาพที่ 3.13 ตัวอย่างเครื่องควบคุมฟังก์ชันพีไอดี (PID controller) ยี่ห้อ TAIE รุ่น FY 700



ภาพที่ 3.14 เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K ช่วงการวัดอุณหภูมิ 0 - 400°C



ภาพที่ 3.15 Fluke 568 Infrared and Contact Thermometer

3.3.1 การปรับตั้งค่าพีไอดีที่เครื่องควบคุมฟังก์ชันพีไอดีและการปรับปรุงการทำงานของกระบวนการ

โดยกระบวนการของอุปกรณ์ควบคุมฟังก์ชันพีไอดี (PID controller) จะใช้วิธีการปรับแบบการลองผิดลองถูก (Trial and Error) เนื่องจากการปรับจูนค่าพีไอดี นั้นค่า Gain ของตัวควบคุมแบบพีไอดีนั้น ซึ่งกระบวนการหุ้มฉนวนนั้นไม่ทราบสมการทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นสำหรับระบบที่ไม่มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และได้ติดตั้งลมเพิ่มเข้ามาโดยติดตั้งทางเข้าและทางออกของชิ้นงานและบริเวณภายในของเตาอบ

3.3.1.1 ขั้นตอนการปรับและใช้งานของเครื่องควบคุมฟังก์ชันพีไอดี

ขั้นตอนการปรับตั้งค่าพีไอดีที่เครื่องควบคุมฟังก์ชันพีไอดี ยี่ห้อ TAIE รุ่น FY 700 ตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. เมื่อเปิดเครื่องแล้ว ตรวจสอบเครื่องว่าอยู่ โหมด Manual หรือไม่โดยจะมีไฟสีส้มแสดงขึ้นที่ Manual ถ้าอยู่โหมด Manual การออกจากโหมด Manual โดยการกดปุ่ม A/M 1 ครั้ง เพื่อออกจากโหมด Manual สังเกตที่ไฟสีส้มที่แสดง Manual อีกครั้ง จึงทำการตั้งค่าอุณหภูมิเป้าหมาย โดยกดปุ่ม < เพื่อเลื่อนไปตำแหน่งที่ต้องการเปลี่ยนค่าอุณหภูมิ ตามภาพที่ 3.16 และ 3.17



ภาพที่ 3.16 แสดงหน้าจอของเครื่องควบคุมฟังก์ชันพีไอดี อยู่โหมด Manual



ภาพที่ 3.17 แสดงหน้าจอของเครื่องควบคุมฟังก์ชันพีไอดี ไม่ได้อยู่ในโหมด Manual

- เมื่อต้องการปรับแต่งการควบคุมพีไอดี ด้วยการปรับตัวควบคุมแบบพี (P) ตัวควบคุมแบบไอ (I) และตัวควบคุมแบบดี (D) โดยกดปุ่ม SET ค้างไว้ประมาณ 5 วินาที จะแสดงหน้าจอเป็นค่าของการควบคุมพี โดยสามารถปรับค่า Gain ของตัวควบคุมแบบพี และกดปุ่ม < เพื่อเลื่อนไปตำแหน่งที่ต้องการเปลี่ยนค่า แสดงดังภาพที่ 3.18



ภาพที่ 3.18 ตัวอย่างหน้าจอแสดงค่าของการควบคุมพี

- เมื่อทำการปรับค่าตัวควบคุมแบบพี แล้ว ต้องการปรับการตั้งค่าการควบคุมแบบไอ โดยกดปุ่ม SET อีกครั้ง โดยสามารถปรับค่า Gain ของตัวควบคุมแบบไอ และกดปุ่ม < เพื่อเลื่อนไปตำแหน่งที่ต้องการเปลี่ยนค่า แสดงดังภาพที่ 3.19



ภาพที่ 3.19 ตัวอย่างหน้าจอแสดงค่าของการควบคุมไอ

- เมื่อทำการปรับค่าตัวควบคุมแบบพีไอ แล้ว ต้องการปรับการตั้งค่าการควบคุมแบบดี โดยกดปุ่ม SET อีกครั้ง โดยสามารถปรับค่า Gain ของตัวควบคุมแบบดี และกดปุ่ม < เพื่อเลื่อนไปตำแหน่งที่ต้องการเปลี่ยนค่า แสดงดังภาพที่ 3.20



ภาพที่ 3.20 ตัวอย่างหน้าจอแสดงค่าของการควบคุมดี

5. เมื่อทำการปรับค่าตัวควบคุมแบบพี ค่าตัวควบคุมแบบไอ ค่าตัวควบคุมแบบดี แล้ว จึงกดปุ่ม SET ค้างไว้ประมาณ 5 วินาทีอีกครั้ง เพื่อกลับสู่หน้าตั้งค่าอุณหภูมิเริ่มต้น เมื่อเสร็จแล้วรอประมาณ 15 - 20 นาทีดูการตอบสนองของอุณหภูมิที่เกิดขึ้น หรือกดปุ่ม SET ค้าง 5 วินาทีอีกครั้งเพื่อปรับเปลี่ยนค่าตัวควบคุมแบบพี ค่าตัวควบคุมแบบไอ ค่าตัวควบคุมแบบดี
6. ทำสังเกตการตอบสนองของกระบวนการและค่าอุณหภูมิที่เข้าค่าเป้าหมายมากที่สุดและเกิดการแกว่งน้อยที่สุดจะได้ค่า ตัวควบคุมแบบพี ค่าตัวควบคุมแบบไอ ค่าตัวควบคุมแบบดี ที่เหมาะสมแล้ว

3.4 ขั้นตอนการเลือกขนาดบัสบาร์ และการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของฉนวนหุ้มบัสบาร์

สำหรับกระบวนการผลิตตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำของบริษัท เอบีบี (ประเทศไทย) จำกัด พบว่า บัสบาร์ ที่ใช้งานของการผลิตและการประกอบตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำ จะประกอบด้วย บัสบาร์ ขนาด $20 \times 5 \text{ mm}^2$, $30 \times 5 \text{ mm}^2$, $40 \times 5 \text{ mm}^2$, $50 \times 5 \text{ mm}^2$, $60 \times 5 \text{ mm}^2$, $30 \times 10 \text{ mm}^2$, $40 \times 10 \text{ mm}^2$, $50 \times 10 \text{ mm}^2$, $60 \times 10 \text{ mm}^2$, $80 \times 10 \text{ mm}^2$, $100 \times 10 \text{ mm}^2$, $120 \times 10 \text{ mm}^2$, $160 \times 10 \text{ mm}^2$, $200 \times 10 \text{ mm}^2$

โดยลักษณะการใช้งานของบัสบาร์แต่ละขนาดจะมีการใช้งานจะแบ่งเป็น 4 ประเภททั้ง Main Busbar, Dropper Bar, Distribution Bar, Module Bar จะแสดงลักษณะการใช้งานของแต่ละขนาดดังตารางที่ 3.1 ต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดง บัสบาร์แต่ละขนาดเทียบกับลักษณะการใช้งานของบัสบาร์

ขนาดบัสบาร์ (mm^2)	ลักษณะการใช้งาน			
	Main Bus Bar	Dropper Bus Bar	Distribution Bus Bar	Module Bus Bar
20 x 5	✗	✗	✗	✓
30 x 5	✗	✓	✗	✓
40 x 5	✗	✗	✗	✓
50 x 5	✗	✗	✓	✓
60 x 5	✗	✗	✗	✗
30 x 10	✓	✓	✓	✓
40 x 10	✓	✓	✓	✓
50 x 10	✗	✓	✓	✓
60 x 10	✓	✓	✗	✗
80 x 10	✗	✓	✗	✗
100 x 10	✗	✓	✗	✗
120 x 10	✗	✓	✗	✗
160 x 10	✗	✓	✗	✗
200 x 10	✗	✓	✗	✗

จากตารางที่ 3.1 จากการใช้งานบัสบาร์หลัก (Main Bar) จะมีขนาดบัสบาร์ต่อไปนี้ คือ ขนาด $30 \times 10 \text{ mm}^2$, $40 \times 10 \text{ mm}^2$, $60 \times 10 \text{ mm}^2$ เป็นบัสบาร์ที่ใช้งานจำนวนมากและลักษณะยาวที่สุดและมีการใช้งานบ่อยที่สุด ส่วน Dropper Bar จะมีลักษณะเป็นมุมที่งอ จึงไม่สามารถเข้าเครื่องอบความร้อนอัตโนมัติได้ ในการเลือกประเภทของบัสบาร์เพื่อมาทดสอบนั้นจะเลือกเฉพาะบัสบาร์หลักเท่านั้น

ตารางที่ 3.2 แสดงการเลือกใช้งานบัสบาร์ที่สามารถใช้งานได้ทั้ง 3 อุปกรณ์ในการเป่าความร้อน

บัสบาร์หลัก (mm^2)	GAS	Electric Blower Heater	Heat Shrink Machine
30 x 10	✓	✓	✓
40 x 10	✓	✓	✓
60 x 10	✓	✓	✓

3.4.1 วิธีคำนวณเพื่อเลือกขนาดฉนวนให้เหมาะกับขนาดของบัสบาร์

ขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนการเลือกขนาดฉนวนโดยคิดจากการคำนวณเปรียบเทียบหาขนาดที่เหมาะสมและใช้งานได้ ซึ่งจากการใช้งานจริงอยู่ ณ ปัจจุบันพนักงานจะใช้วิธีลองผิดลองถูกในการเลือกขนาด คือ การทดลองหาขนาดในการเลือกขนาดของฉนวน หรือการคาดคะเนในการใช้งาน ทำให้ใช้เวลาในการเลือกที่เพิ่มขึ้น หรือการเลือกขนาดผิดที่มีขนาดใหญ่เกินไปทำให้ไม่สามารถหัดตัวได้พอดีกับบัสบาร์ ก็จะทำให้เปลืองค่าใช้จ่ายของฉนวนมากขึ้น ดังนั้นเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน รวดเร็วขึ้น และทำให้สามารถประหยัดเวลาในการทำงานและยังง่ายต่อการทำงาน จึงคำนวณวิธีการเลือกขนาดฉนวน ให้เหมาะกับขนาดของบัสบาร์ ให้เหมาะสม โดยจะวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

3.4.2 การวิเคราะห์ขนาดฉนวนให้เหมาะกับขนาดของบัสบาร์

จากการศึกษาและสำรวจจะพบว่าขนาดฉนวนที่ใช้งานในกระบวนการประกอบตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำนั้น จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตามสเปคทางบริษัทผู้ผลิต จะมีขนาดดังนี้ 31.8 mm, 38.1 mm, 50.8 mm, 76.2 mm, 100 mm, 120 mm, 150 mm, 180 mm แต่เนื่องจาก ตามทางผู้ผลิต กำหนดขนาดมาเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขณะรูปร่างเป็นหน้าตัดเป็นวงกลมแต่การใช้งานจริงเป็นการใช้งานกับบัสบาร์ ซึ่งบัสบาร์ที่ใช้งานมีรูปร่างเป็นหน้าตัดสี่เหลี่ยมหรือรูปร่างแบน ดังนั้นจึงคำนวณหาขนาดฉนวนเพื่อเปรียบเทียบหาขนาดที่เหมาะสมกับบัสบาร์ ดังต่อไปนี้



(ก.) พื้นที่หน้าตัดของฉนวน

(ข.) พื้นที่หน้าตัดของบัสบาร์

ภาพที่ 3.21 แสดงภาพตัวอย่างการแปลงพื้นที่หน้าตัดของฉนวนทรงกลม มาเป็นตามลักษณะของบัสบาร์

จากสมการหาเส้นรอบวงของวงกลม (C) คือ $2\pi R$ เมื่อ $R = \frac{\emptyset}{2}$ ดังนั้นจะได้ระยะเส้นรอบวงทั้งหมดของฉนวน แต่ลักษณะของฉนวนนั้นเป็นวงกลมแบนเหมือนลักษณะหน้าตัดของบัสบาร์ ดังภาพที่ 3.21 (ข.) จึงหาความยาวความยาวของพื้นที่หน้าตัดลักษณะรูปร่างแบนของฉนวน (L) โดยเป็นครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางของฉนวน ดังวิธีต่อไปนี้

$$\text{จาก } C = 2\pi \frac{\emptyset}{2} = \pi\emptyset \quad (3.2)$$

$$\text{จะได้ } L = \frac{C}{2} = \frac{\pi\emptyset}{2} \quad (3.3)$$

- เมื่อ C คือ ระยะเส้นรอบวงของฉนวน (mm.)
 L คือ ความยาวของพื้นที่หน้าตัด ลักษณะรูปร่างแบนของฉนวน (mm.)
 R คือ รัศมีของฉนวน ขณะที่หน้าตัดเป็นวงกลม (mm.)
 \emptyset คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของฉนวน ขณะที่หน้าตัดเป็นวงกลม (ตามสเปคของบริษัทผู้ผลิต) (mm.)
 π คือ ค่าคงตัวทางคณิตศาสตร์ ที่เกิดจากความยาวเส้นรอบวงหารด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลม มีค่าเท่ากับ 3.14 หรือ $\frac{22}{7}$

ค่าจากการคำนวณ

- 1) เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 31.8 mm $\rightarrow L = \frac{3.14 \times 31.8}{2} = 49.93$ mm
- 2) เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 38.1 mm $\rightarrow L = \frac{3.14 \times 38.1}{2} = 59.82$ mm
- 3) เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 50.8 mm $\rightarrow L = \frac{3.14 \times 50.8}{2} = 79.76$ mm
- 4) เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 76.2 mm $\rightarrow L = \frac{3.14 \times 76.2}{2} = 119.63$ mm
- 5) เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 100 mm $\rightarrow L = \frac{3.14 \times 100}{2} = 157$ mm
- 6) เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 120 mm $\rightarrow L = \frac{3.14 \times 120}{2} = 188.4$ mm
- 7) เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 150 mm $\rightarrow L = \frac{3.14 \times 150}{2} = 235.5$ mm
- 8) เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 180 mm $\rightarrow L = \frac{3.14 \times 180}{2} = 282.6$ mm

จากการคำนวณ เมื่อได้ค่าขนาดความยาวหน้าตัด (L) ขณะที่เป็นรูปร่างแบนแล้ว ก็สามารถทราบได้ว่า ฉนวน ลักษณะแบนแต่ละขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจะมีขนาดเท่าใด แต่ก็ยังไม่ทราบขนาดหัดตัวที่น้อยที่สุดที่สามารถหัดได้ของแต่ละขนาดเพื่อช่วยในการเลือกให้เหมาะสม จะคำนวณได้จากสเปคของบริษัทผู้ผลิต ซึ่งกำหนดว่า “อัตราการหัด = 2 : 1” คือ อัตราขนาดก่อนหัดมีขนาดเป็น 2 เท่าของขนาดที่หัดได้น้อยที่สุดที่สามารถหัดได้ เช่น มีความยาว 20 mm สามารถหัดได้น้อยที่สุด คือ 10 mm จะได้ว่า

$$\text{ระยะหัดสั้นที่สุด} = \frac{L}{2} \quad (3.4)$$

เมื่อ L คือ ความยาวหน้าตัด(ขณะแบน) ของ ฉนวนจากการคำนวณก่อนหน้า (mm.)

ค่าจากการคำนวณ

- 1) เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 31.8 mm \rightarrow L = 49.93 mm ;
ระยะหัดสั้นที่สุด = $\frac{49.93}{2} \approx 25$ mm.
- 2) เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 38.1 mm \rightarrow L = 59.82 mm ;
ระยะหัดสั้นที่สุด = $\frac{59.82}{2} \approx 30$ mm.
- 3) เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 50.8 mm \rightarrow L = 79.76 mm ;
ระยะหัดสั้นที่สุด = $\frac{79.76}{2} \approx 40$ mm.
- 4) เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 76.2 mm \rightarrow L = 119.63 mm ;
ระยะหัดสั้นที่สุด = $\frac{119.63}{2} \approx 60$ mm.
- 5) เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 100 mm \rightarrow L = 157 mm ;
ระยะหัดสั้นที่สุด = $\frac{157}{2} \approx 80$ mm.
- 6) เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 120 mm \rightarrow L = 188.4 mm ;
ระยะหัดสั้นที่สุด = $\frac{188.4}{2} \approx 95$ mm.
- 7) เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 150 mm \rightarrow L = 235.5 mm ;
ระยะหัดสั้นที่สุด = $\frac{235.5}{2} \approx 118$ mm.
- 8) เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 180 mm \rightarrow L = 282.6 mm ;
ระยะหัดสั้นที่สุด = $\frac{282.6}{2} \approx 142$ mm.

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าความยาวพื้นที่หน้าตัดและระยะหัดสั้นที่สุดที่หัดได้

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ ฉนวน (\varnothing) (mm.)	ความยาวของพื้นที่หน้าตัด ลักษณะรูปร่างแบน ของ ฉนวน (L) (mm.)	ระยะหัดสั้นที่สุดที่สามารถ หัดได้ (mm.)
31.8 mm	L = 49.93 mm	≈ 25 mm
38.1 mm	L = 59.82 mm	≈ 30 mm
50.8 mm	L = 79.76 mm	≈ 40 mm
76.2 mm	L = 119.63 mm	≈ 60 mm
100 mm	L = 157.00 mm	≈ 80 mm
120 mm	L = 188.40 mm	≈ 95 mm
150 mm	L = 235.50 mm	≈ 118 mm
180 mm	L = 282.60 mm	≈ 142 mm

จากการคำนวณขนาดความยาวหน้าตัด (L) ขณะที่เป็นรูปร่างแบนและระยะหัดสั้นที่สุดที่สามารถหัดได้แล้วนั้น ดังนั้นในการเลือกจึงสามารถเลือกขนาดทั้งของฉนวนที่ใช้งานร่วมกับบัสบาร์ได้ทั้งหมดตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. ดูขนาดพื้นที่หน้าตัดบัสบาร์ที่ต้องการหุ้มฉนวน โดยดูขนาดความกว้างและความหนาของบัสบาร์
2. นำค่าความกว้างของบัสบาร์บวกกับค่าความหนาของบัสบาร์
3. เมื่อได้ค่าบวกกันแล้ว นำค่าไปเทียบกับขนาดความยาวหน้าตัด (L) ขณะที่เป็นรูปร่างแบน เมื่อเทียบแล้วขนาดต้องไม่น้อยกว่าความยาวของหน้าตัด (L) และ “ไม่น้อยกว่า” ระยะหัดสั้นที่สุดที่สามารถหัดได้ โดยขนาดค่าความกว้างและความหนาของบัสบาร์ที่บวกกันนั้นต้อง “ไม่น้อยกว่า” ขนาดระยะหัดที่น้อยที่สุดที่หัดได้ จะได้ว่า

$$\text{ความยาวพื้นที่หน้าตัด (L)} < (\text{ความกว้างบัสบาร์} + \text{ความหนาบัสบาร์}) < \text{ขนาดระยะหัดที่น้อยที่สุด}$$

ตัวอย่างเช่น

บัสบาร์ขนาด $30 \times 10 \text{ mm}^2$ คือ มีพื้นที่หน้าตัดที่มี ความกว้าง คือ 30 mm ความหนา คือ 10 mm จะได้ว่า $30 + 10 = 40 \text{ mm}$ เมื่อเทียบกับความยาวหน้าตัด (L) แล้วขนาดต้องไม่น้อยกว่าความยาวของหน้าตัด (L) และระยะหัดที่น้อยที่สุดที่หัดได้สามารถเปรียบค่าตารางที่ 3.4 ได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.4 แสดงตัวอย่างการเลือกใช้ท่อฉนวน กับขนาดบัสบาร์ขนาด $30 \times 10 \text{ mm}^2$

ข้อพิจารณา ในการเลือกใช้	ขนาด ϕ ของ ฉนวน(mm)							
	31.8	38.1	50.8	76.2	100	120	150	180
พิจารณา “ขนาดของความยาวหน้าตัด (L)” (mm)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
พิจารณา “ขนาดระยะหัดสั้นที่สุดที่สามารถหัดได้” (mm)	✓	✓	-	-	-	-	-	-
ขนาดที่ใช้งานร่วมกันได้	✓	✓	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ :

- ✓ คือ สามารถใช้งานร่วมกันได้
- คือ ไม่สามารถใช้งานร่วมกันได้

จากตารางที่ 3.3 จะเป็นการพิจารณาไม่น้อยกว่าขนาดของความยาวหน้าตัด (L) และการพิจารณาไม่น้อยกว่าขนาดระยะหัดสั้นที่สุดที่สามารถหัดได้ ดังนั้นเพื่อมาเลือกขนาดฉนวนให้เหมาะสมให้เหมาะสมที่สามารถใช้งานร่วมกันได้ จะได้ขนาดฉนวน คือ “31.8 mm., 38.1 mm.” และจากตารางที่ 3.1 ขนาดบัสบาร์ ทั้งหมด และตารางที่ 3.3 ขนาดฉนวนทั้งหมด สามารถเลือกขนาดฉนวนที่สามารถใช้งานร่วมกับบัสบาร์ได้พอดี ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.5 ตารางการเลือกแสดงขนาดบัสบาร์และขนาดของฉนวนที่ใช้งานร่วมกันได้ทั้งหมด

ขนาดบัสบาร์ (mm x mm)	ขนาด ϕ ของฉนวน (mm)							
	31.8	38.1	50.8	76.2	100	120	150	180
20 x 5	✓	-	-	-	-	-	-	-
30 x 5	✓	✓	-	-	-	-	-	-
40 x 5	✓	✓	✓	-	-	-	-	-
50 x 5	-	✓	✓	-	-	-	-	-
60 x 5	-	-	✓	✓	-	-	-	-
30 x 10	✓	✓	-	-	-	-	-	-
40 x 10	-	✓	✓	-	-	-	-	-
50 x 10	-	-	✓	-	-	-	-	-

ขนาด \emptyset ของฉนวน (mm) ขนาดบัสบาร์ (mm x mm)	31.8	38.1	50.8	76.2	100	120	150	180
60 x 10	-	-	✓	✓	-	-	-	-
80 x 10	-	-	-	✓	✓	-	-	-
100 x 10	-	-	-	✓	✓	✓	-	-
120 x 10	-	-	-	-	✓	✓	✓	-
160 x 10	-	-	-	-	-	✓	✓	✓
200 x 10	-	-	-	-	-	-	✓	✓

หมายเหตุ :

- ✓ คือ สามารถใช้งานร่วมกันได้
- คือ ไม่สามารถใช้งานร่วมกันได้

3.4.3 ขั้นตอนทดสอบ อุณหภูมิที่เหมาะสมกับบัสบาร์และฉนวนแต่ละขนาดของบัสบาร์

หลัก

ขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนที่ทดสอบเพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสม หากจำนวนรอบการทำงานของแต่ละค่าอุณหภูมิที่ทำการทดลองและฉนวนตามสเปคของบริษัทผู้ผลิตได้กำหนดไว้ว่า

- อุณหภูมิในการทำงาน : $-55^{\circ}\text{C} - 135^{\circ}\text{C}$
- อุณหภูมิ “ขั้นต่ำ” ในการทดสอบ : 70°C
- อุณหภูมิ “ต่ำสุด” ในการทดสอบเต็ม : 100°C

ดังนั้นในการทดลองจึงเลือกช่วงอุณหภูมิที่ทดลอง คือ $100 - 130$ □ มาใช้ในการทดสอบและได้ใช้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ เนื่องจากการใช้งานอุณหภูมิที่ > 135 □ ขึ้นงานเกิดการเสียหายฉีกขาด เพื่อเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลและวัดโดยรังสีอินฟราเรด คือ Fluke 568 Infrared and Contact Thermometer

ขั้นตอนการทดลองมีดังต่อไปนี้ โดยขั้นตอนการทดลองนี้จะเป็นการทดลองหลังจากการปรับค่า การควบคุมแบบพีไอดี และติดตั้งลม เรียบร้อยแล้ว

1. ออกแบบตารางการทดลอง โดยจะมีค่าอุณหภูมิที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิลภายในและค่าวัดอุณหภูมิจาก Fluke 568 Infrared and Contact Thermometer

2. นำบัสบาร์หลักทดลอง แต่ละขนาดคือ 1 เมตร มาทดสอบโดยมีขนาด
3. เลือกขนาดฉนวนตามการคำนวณและตัดขนาดฉนวน 1 เมตรและสวมเข้าแท่งบัสบาร์
4. ตั้งค่าอุณหภูมิเป้าหมายที่เครื่อง โดยกดปุ่ม < ที่เครื่องควบคุมฟังก์ชันพีไอดีไปตำแหน่งที่ต้องการปรับค่าอุณหภูมิเป้าหมายตามที่ต้องการ
5. เมื่อตั้งค่าอุณหภูมิเป้าหมายเรียบร้อยแล้ว รอประมาณ 15 – 20 นาที
6. ใส่ชิ้นงานเข้าเครื่องอบความร้อนอัตโนมัติโดยใช้ความเร็วของสายพานลำเลียงชิ้นงาน ระดับ 1 คือมีอัตราเร็ว 0.0064 m/s.
7. เริ่มจับเวลาเมื่อชิ้นงานเข้าเครื่อง และนำจำนวนรอบการทำงานจนชิ้นงานหดเรียบร้อยแล้วสวยงาม

3.4.4 เปรียบเทียบการปรับปรุงการใช้งานจาก พ่นแก๊สหุงต้มผ่านหัวพ่นแก๊สแบบ Manual → Electric Blower Heater → เครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ

จะเป็นขั้นตอนของการเปรียบเทียบค่าใช้จ่าย, ข้อดี-ข้อด้อยของการใช้งานของแต่ละเครื่อง มาเปรียบเทียบ 1) ระยะเวลาการทำงานทั้งหมด 2) จำนวนพนักงานในการทำงานของการในงานอุปกรณ์ ทั้ง 3 ประเภทที่แตกต่างกัน 3) ความปลอดภัยของการใช้งานอุปกรณ์แต่ละประเภท

บทที่ 4

ผลการดำเนินการ

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการปรับค่าพีไอดีของกระบวนการ ผลของอุณหภูมิหลังการปรับค่าพีไอดี ค่าช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการใช้งานของบัสบาร์และฉนวนแต่ละขนาด และการเปรียบเทียบการใช้งานของการเป่าให้ความร้อนโดยเครื่อง ทั้ง 3 ชนิดที่แตกต่างกัน ได้แก่ แก๊สหุงต้ม, Electric Blower Heater (Hot Air Gun) และ เครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ รวมถึงค่าใช้จ่ายที่ลดลงเมื่อเปลี่ยนมาใช้งานเครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ

4.2 การเลือกขนาดฉนวน

การหุ้มฉนวนที่บัสบาร์นั้น การเลือกฉนวนเพื่อให้เหมาะสมกับบัสบาร์นั้นก็เป็นส่วนสำคัญมาก ส่วนหนึ่งเมื่อเลือกขนาดที่ใหญ่เกินไปจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของฉนวน และ เรื่องราคาของฉนวนที่เพิ่มขึ้น ระยะเวลาในการเป่ามากขึ้น ดังนั้น เมื่อเราเลือกขนาดฉนวนที่เหมาะสม จะทำให้ฉนวนมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าแล้วยังสามารถลดระยะเวลาในการเป่าหุ้มและสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากขึ้น อีกด้วย จากการทดสอบ พบว่าเมื่อเลือกขนาดที่ใกล้เคียงกับบัสบาร์มาก ก็สามารถใช้เวลาในการหุ้มจนเสร็จสมบูรณ์ที่น้อยลงและ ฉนวนที่มีขนาดเล็กกว่าถูกกว่าฉนวนที่มีขนาดใหญ่กว่า การเลือกขนาดฉนวนกับบัสบาร์ที่เหมาะสมดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดง ขนาดบัสบาร์และขนาดของฉนวนที่เหมาะสม

ขนาด \varnothing ของ ฉนวน (mm) ขนาดบัสบาร์ (mm x mm)	31.8	38.1	50.8	76.2	100	120	150	180
20 x 5	✓	-	-	-	-	-	-	-
30 x 5	✓	-	-	-	-	-	-	-
40 x 5	✓	-	-	-	-	-	-	-
50 x 5	-	✓	-	-	-	-	-	-
60 x 5	-	-	✓	-	-	-	-	-
30 x 10	✓	-	-	-	-	-	-	-

ขนาด \varnothing ของ ฉนวน (mm) ขนาดบัสบาร์ (mm x mm)	31.8	38.1	50.8	76.2	100	120	150	180
40 x 10	-	✓	-	-	-	-	-	-
50 x 10	-	-	✓	-	-	-	-	-
60 x 10	-	-	✓	-	-	-	-	-
80 x 10	-	-	-	✓	-	-	-	-
100 x 10	-	-	-	✓	-	-	-	-
120 x 10	-	-	-	-	✓	-	-	-
160 x 10	-	-	-	-	-	✓	-	-
200 x 10	-	-	-	-	-	-	✓	-

จากตารางที่ 4.1 จะเป็นการเลือกขนาดฉนวนที่สามารถเข้าได้กับขนาดบัสบาร์ทั้งหมด จากการศึกษาทดลองและเปรียบเทียบ เมื่อทดลองใช้บัสบาร์ที่มีขนาดแตกต่างกัน โดยใช้ขนาดฉนวนที่เท่ากัน จะได้ว่าบัสบาร์ที่มีขนาดใหญ่กว่านั้นจะใช้ระยะเวลาในการหดตัวจนเสร็จสมบูรณ์นั้นจะน้อยกว่าการใช้ขนาดบัสบาร์ที่มีขนาดเล็กลงมา เมื่อเปรียบเทียบที่ใช้ขนาดฉนวนขนาดเท่ากัน ดังนั้นจึงควรเลือกขนาดบัสบาร์ที่มีขนาดใหญ่ใกล้เคียงกับขนาดฉนวนมากที่สุดจะทำให้ใช้ระยะเวลาของการหดตัวน้อยลง มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น และยังประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากที่สุด ดังนั้นจึงเลือกขนาดที่เหมาะสม เพื่อที่จะสามารถทำให้มีประสิทธิภาพสูงและประหยัดค่าใช้จ่ายมากที่สุด

4.3 ผลของการปรับค่าพีไอดี

กระบวนการของเครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ นั้น ก่อนการทดสอบยังไม่มี การปรับค่าพีไอดี ช่วงอุณหภูมิที่ได้ จะแกว่งอยู่ในช่วง ± 7 ถึง 15°C การแกว่งของอุณหภูมิจะแกว่งขึ้นลงตลอดเวลาไม่คงที่ค่าใดค่าหนึ่ง และถ้าปรับไปที่ Mode Auto tuning โดยเครื่องควบคุมฟังก์ชันพีไอดี จะทำการปรับหาค่าอัตโนมัติเอง ได้ช่วงอุณหภูมิที่ได้อยู่ในช่วง ± 5 ถึง 10°C แต่ยังคงเกิดการแกว่งของอุณหภูมิที่สูงอยู่ จึงทำการปรับพีไอดี โดย Manual วิธีการลองผิดลองถูก

4.3.1 ผลการปรับค่าพีไอดี เพื่อควบคุมกระบวนการให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงการปรับค่าพีไอดี ของกระบวนการเครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ

ค่าเป้าหมาย (°C)	P (%)	I (Sec)	D (Sec)	ค่าตัวแปรของกระบวนการ (°C)						ค่าผิดพลาดที่มากที่สุด (°C)
				Max	Min	Max	Min	Max	Min	
110.0	ก่อนปรับค่า			124.7	98.3	123.8	98.1	122.9	98.0	14.7
120.0	0.5	0	0	125.8	116.1	121.1	115.4	121.5	115.4	5.8
50.0	1.0	0	0	55.8	46.3	50.1	48.4	50.1	48.1	5.8
50.0	2.0	0	0	56.9	45.0	46.6	46.5	46.8	46.3	6.9
60.0	3.0	0	0	64.3	54.8	55.9	54.7	57.2	54.6	5.4
60.0	5.0	0	0	48.3	48.0	48.5	48.0	48.7	48.2	-11.3
70.0	10.0	0	0	48.7	48.2	47.9	48.0	48.1	48.0	-12.1
80.0	20.0	0	0	47.8	43.5	43.6	43.4	43.2	43.0	-37.0
90.0	50.0	0	0	41.3	41.2	41.3	40.7	40.8	40.3	-49.7
140.0	1.0	3.0	0	145.0	134.4	143.7	134.8	143.7	138.0	5.6
130.0	1.0	4.0	0	135.2	125.9	131.2	128.6	133.1	125.7	5.2
110.0	0.5	5.0	0	117.5	106.5	115.9	106.8	115.2	107.2	7.5
100.0	1.0	5.0	0	104.5	95.9	104.6	96.8	106.2	96.0	6.2
90.0	1.0	10.0	0	99.9	86.3	98.1	86.9	97.3	87.0	9.9
100.0	1.0	15.0	0	109.6	95.9	107.2	96.3	106.7	96.8	9.6
110.0	1.0	5.0	10.0	111.9	107.1	110.2	106.9	112.7	106.2	3.8
120.0	1.0	5.0	15.0	122.2	116.9	121.4	117.5	121.5	117.4	3.1
130.0	1.0	5.0	20.0	131.5	127.2	130.7	127.4	130.8	127.4	2.8
140.0	1.0	5.0	25.0	140.7	137.4	140.8	137.3	140.7	137.8	2.7
80.0	1.0	5.0	30.0	87.7	77.9	81.7	78.2	81.8	78.5	7.7
100.0	1.0	4.0	25.0	105.2	97.0	103.5	97.5	101.6	97.6	5.2
110.0	1.0	6.0	25.0	111.0	107.5	111.4	108.9	110.1	109.8	2.5
110.0	1.0	7.0	25.0	111.3	108.2	111.3	107.9	110.0	109.8	2.1

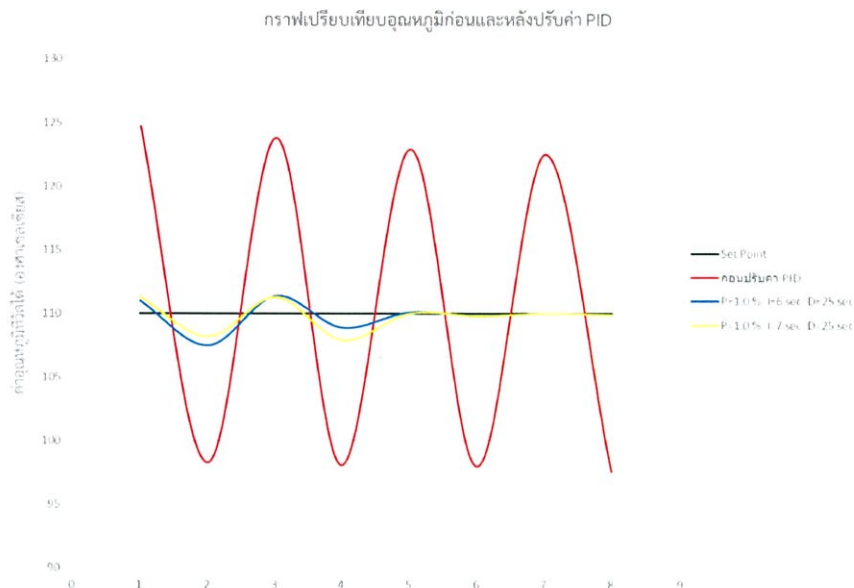
ค่าเป้าหมาย (°C)	P (%)	I (Sec)	D (Sec)	ค่าตัวแปรของกระบวนการ (°C)						ค่าผิดพลาดที่มากที่สุด (°C)
				Max	Min	Max	Min	Max	Min	
100.0	1.0	8.0	25.0	101.9	97.2	101.7	96.7	100.9	96.9	3.3
120.0	1.0	9.0	25.0	120.5	118.6	121.1	114.5	120.5	117.6	5.6
130.0	1.0	7.0	26.0	133.7	125.1	133.6	125.2	132.9	125.5	4.9

จากตารางที่ 4.2 เมื่อทำการปรับค่า โดยค่อยๆเพิ่มค่า Gain ของ P สูงขึ้น จาก 0.5 % ถึง 50 % พบว่า ค่า P=0.5 , I=0, D=0 และ P=1.0 , I=0, D=0 นั้นเกิดค่าแกว่งของอุณหภูมิ คือ 5.8 เช่นกัน แต่ P=1.0 , I=0, D=0 จะเข้าใกล้ค่า Set point เร็วๆมากกว่า P=0.5 , I=0, D=0 และเมื่อเพิ่ม Gain ขึ้นเรื่อยๆนั้น ทำให้กระบวนการเกิดเร็วแต่ไปไม่ถึงค่า Set point ดังนั้น Gain ของค่า P จึงเลือก Gain ของ P คือ P=1.0 , I=0, D=0 และเมื่อเพิ่มค่า Gain ของ I ตั้งแต่ 3 ถึง 15 Sec. พบว่า P=1.0 , I=3, D=0 เกิดค่าแกว่งของอุณหภูมิ คือ 5.6 กับ P=1.0 , I=4, D=0 เกิดค่าแกว่งของอุณหภูมิ คือ 5.2 และ P=1.0 , I=5, D=0 เกิดค่าแกว่งของอุณหภูมิ คือ 6.2 ทั้ง 3 ค่านั้นเข้าใกล้ Set point ทั้งหมดแต่ P=1.0 , I=5, D=0 สามารถเข้าใกล้ค่า Set point มากที่สุด และเพิ่มค่า Gain ของ I เพิ่มสูงขึ้น จะเกิดค่าการแกว่งสูงขึ้น ต่อไปเป็นกระบวนการ เพิ่ม Gain ของ D ทดลองเพิ่มค่าตั้งแต่ 10 ถึง 26 Sec. จะได้ว่า P=1.0 , I=5, D=25 ทำให้ค่าแกว่งน้อยที่สุด คือ 2.8 แต่ยังเกิด Offset ขึ้นเล็กน้อย จึงเพิ่มค่า Gain ของ D เป็น 6 ก็สามารถลดค่าการแกว่งลดลงเหลือ 2.5 เมื่อเพิ่มเป็น 7 เกิดการแกว่งลดลงเหลือ 2.1 แต่เมื่อเพิ่มค่าสูงขึ้น เกิดการแกว่งที่มากขึ้น ถึงแม้ค่า I = 7.0 มีการแกว่งมากที่สุด คือ 2.1 ซึ่งน้อยกว่า I = 6.0 ที่มีการแกว่งเท่ากับ 2.5 แต่ I = 6.0 ค่าของกระบวนการสามารถเข้าใกล้ค่า Set point มากกว่า การปรับ I = 7.0

ตารางที่ 4.3 ตารางเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิก่อนปรับพีไอดี และ หลังจากการปรับพีไอดีได้ค่าที่เหมาะสม

ค่าเป้าหมาย (°C)	P (%)	I (Sec)	D (Sec)	ค่าตัวแปรของกระบวนการ (°C)						ค่าผิดพลาดที่มากที่สุด (°C)
				Max	Min	Max	Min	Max	Min	
110.0	ก่อนปรับค่า			124.7	98.3	123.8	98.1	122.9	98.0	14.7
110.0	1.0	6.0	25.0	111.0	107.5	111.4	108.9	110.1	109.8	2.5
110.0	1.0	7.0	25.0	111.3	108.2	111.3	107.9	110.0	109.8	2.1

จากตารางที่ 4.3 สามารถแสดงเป็นกราฟ ดังภาพที่ 4.1 ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิก่อนปรับค่าพีไอดี และหลังการปรับค่าพีไอดี

จากการปรับค่า P ค่า I และค่า D แล้วโดยใช้วิธีการลองผิดลองถูก ค่าที่ได้คือ $P = 1.0 \%$, $I = 6.0 \text{ Sec}$, $D = 25.0 \text{ Sec}$ เป็นค่าพีไอดีที่เหมาะสมที่สุด คือให้ช่วงการแกว่งอุณหภูมิอยู่ในช่วง $\pm 2.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ทำให้สามารถแก้ปัญหาในเรื่อง อุณหภูมิไม่คงที่ได้ในบางส่วน ลดการแกว่งได้เพิ่มขึ้นจากของเดิมก่อนการปรับค่า ซึ่งก่อนการปรับค่าพีไอดี การแกว่งของอุณหภูมิอยู่ในช่วง ± 7 ถึง $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ แต่ค่าอุณหภูมิที่ได้ อาจจะยังคงแกว่งและไม่คงที่ เนื่องจาก สูญเสียอุณหภูมิให้กับสภาพแวดล้อมภายนอกที่สูงมาก และการรบกวนจากสภาพแวดล้อม อุณหภูมิจากภายนอกเครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ โดยเครื่องไม่มีการไหลวนภายในที่สม่ำเสมอ จากการทดสอบเครื่องนั้น พบว่าลักษณะนี้เกิดจากตัวเครื่องเป็นช่องเปิดเพื่อให้สายพานลำเลียงชิ้นงานเพื่อให้ชิ้นงานเลื่อนผ่านความร้อน จึงได้มีการติดตั้งลมภายในเตาอบ โดยบริเวณภายในและทางเข้าและทางออกของชิ้นงานเพื่อให้อุณหภูมิภายในห้องมีการหมุนเวียน จึงทำให้เกิดการสูญเสียอุณหภูมิให้กับชิ้นงานลดลงและอุณหภูมิชิ้นงานไม่สูงมากขึ้น

4.4 ผลการทดสอบ

การหุ้มฉนวนที่บัสบาร์แต่ละขนาด ตามตารางที่ 4.1 เป็นการเลือกบัสบาร์เหมาะสมกับขนาดของฉนวน เพื่อประหยัดเวลาและมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยจะใช้เทอร์โมคัปเปิลเป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิภายในจากเครื่องเตาอบและใช้ Fluke 568 Infrared and Contact Thermometer วัดเพื่อ

เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดสอบ จากการทดลอง การปรับค่าพีไอดี ให้กระบวนการและมีการติดตั้งลม สามารถทำให้ช่วยในการกระจายตัวความร้อนภายในเตานั้น ลดการสูญเสียความร้อนให้กับภายนอกและการรบกวนจากสภาพแวดล้อมภายนอก และในการทดลองใช้บัสบาร์แต่ละขนาดมีความยาว 1 เมตร

4.4.1 ขั้นตอนการออกแบบตารางการทดลอง

จากการทดสอบเพื่อทดลองค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกันและเปรียบเทียบค่าเวลากับอุณหภูมิที่ได้ โดยจะวัดค่าก่อนการปรับปรุงหรือก่อนการปรับค่าพีไอดีของกระบวนการของเครื่องอบความร้อนอัตโนมัติและค่า หลังจากการปรับค่าพีไอดี และมีการติดตั้งลม

ตารางที่ 4.4 ตารางทดลอง บัสบาร์ขนาด 30 x 10 mm^2

ขนาด บัสบาร์	รายละเอียด	ค่าเป้าหมาย ($^{\circ}C$)									
		100		110		120		130			
		ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง		
30 x 10 หุ้มฉนวน ขนาด 31.8 mm	จำนวนรอบการหุ้ม (รอบ)										
	เวลาในการหุ้ม (นาที)										
	อุณหภูมิโครง ($^{\circ}C$)										
	อุณหภูมิแผ่นเลื่อน ($^{\circ}C$)										
	อุณหภูมิชิ้นงาน ($^{\circ}C$)										
	อุณหภูมิ จาก Thermocouple ($^{\circ}C$)										
	อุณหภูมิจาก Thermo Gun ($^{\circ}C$)										

ขนาด บัสบาร์	รายละเอียด	ค่าเป้าหมาย (°C)							
		100		110		120		130	
		ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
	ช่วงอุณหภูมิ (ก่อนขึ้นงานเข้า) (°C)								
	ช่วงอุณหภูมิ (หลังขึ้นงานเข้า) (°C)								

ตารางที่ 4.5 ตารางทดลอง บัสบาร์ขนาด 40 x 10 mm²

บัสบาร์ ขนาด	รายละเอียด	ค่าเป้าหมาย (°C)							
		100		110		120		130	
		ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
40 x 10 หุ้มฉนวน ขนาด 38.1 mm.	จำนวนรอบการหุ้ม (รอบ)								
	เวลาในการหุ้ม (นาที)								
	อุณหภูมิโครง (°C)								
	อุณหภูมิแผ่นเลื่อน (°C)								
	อุณหภูมิขึ้นงาน (°C)								
	อุณหภูมิ จาก Thermocouple (°C)								
	อุณหภูมิจาก Thermo Gun (°C)								

บัสบาร์ ขนาด	รายละเอียด	ค่าเป้าหมาย (°C)							
		100		110		120		130	
		ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
	ช่วงอุณหภูมิ (ก่อนขึ้นงานเข้า) (°C)								
	ช่วงอุณหภูมิ (หลังขึ้นงานเข้า) (°C)								

ตารางที่ 4.6 ตารางทดลอง บัสบาร์ขนาด 60 x 10 mm²

บัสบาร์ ขนาด	รายละเอียด	ค่าเป้าหมาย (°C)							
		100		110		120		130	
		ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
60 x 10 หุ้มฉนวน ขนาด 50.8 mm.	จำนวนรอบการหุ้ม (รอบ)								
	เวลาในการหุ้ม (นาที)								
	อุณหภูมิโครง (°C)								
	อุณหภูมิแผ่นเลื่อน (°C)								
	อุณหภูมิขึ้นงาน (°C)								
	อุณหภูมิ จาก Thermocouple (°C)								
	อุณหภูมิจาก Thermo Gun								

巴士 ขนาด	รายละเอียด	ค่าเป้าหมาย (°C)							
		100		110		120		130	
		ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
	(°C)								
	ช่วงอุณหภูมิ (ก่อนขึ้นงานเช้า) (°C)								
	ช่วงอุณหภูมิ (หลังขึ้นงานเช้า) (°C)								

4.4.2 ผลการทดสอบบัสบาร์ขนาด 30 x 10 mm^2 กับฉนวนขนาด 31.8 mm.

อุณหภูมิขณะทำการทดลอง 27.2 °C ความชื้นขณะทำการทดลอง 59.0 %RH

ความเร็วของแผ่นเลื่อนขึ้นงาน ระดับ 1 คือ 0.0064 m/s.

ตารางที่ 4.7 ตารางทดลอง บัสบาร์ขนาด 30 x 10 mm^2

บัส บาร์ ขนาด	รายละเอียด	ค่าเป้าหมาย (°C)							
		100		110		120		130	
		ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
30 x 10 ฉนวน ขนาด 31.8 mm	จำนวนรอบการ หุ้ม (รอบ)	4	3	4	3	3	2	3	2
	เวลาในการหุ้ม (นาที) “ต่อจำนวน 10 ชั้น”	22.31	19.05	19.24	18.05	18.20	12.00	18.11	11.34
	อุณหภูมิโครง (°C)	41.3	39.1	51.8	39.8	55.2	40.2	56.3	46.7
	อุณหภูมิแผ่น เลื่อน (°C)	68.2	72.1	87.7	77.6	91.5	85.1	121.5	90.4
	อุณหภูมิขึ้นงาน (°C)	90.5	73.3	91.5	76.2	96.5	80.8	103.4	89.4
	อุณหภูมิ จาก Thermocouple (°C)	101.2	98.0	105.2	107.9	113.8	118.5	124.4	125.6
	อุณหภูมิจาก Thermo Gun (°C)	108.9	97.7	119.6	108.4	128.3	118.0	132.6	126.0
	ช่วงอุณหภูมิ (ก่อนขึ้นงาน เข้า) (°C)	91.4 -	99.5 -	95.0 -	107.1 -	104.6 -	114.7 -	115.7 -	125.4 -
	111.6	101.0	122.2	109.5	131.7	118.9	142.2	129.1	

บัสบาร์ ขนาด	รายละเอียด	ค่าเป้าหมาย (°C)							
		100		110		120		130	
		ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
	ช่วงอุณหภูมิ (หลังขึ้นงานเข้า)	85.4	97.2	90.0	105.6	100.8	113.0	110.3	123.4
	(°C)	-	-	-	-	-	-	-	-
		104.6	99.7	117.2	108.1	124.8	116.8	135.7	127.6

4.4.3 ผลการทดลองบัสบาร์ขนาด 40 x 10 mm² กับฉนวนขนาด 38.1 mm.

อุณหภูมิขณะทำการทดลอง 28.5 °C ความชื้นขณะทำการทดลอง 58.1 %RH
ความเร็วของแผ่นเลื่อนขึ้นงาน ระดับ 1 คือ 0.0064 m/s.

ตารางที่ 4.8 ตารางทดลอง บัสบาร์ขนาด 40 x 10 mm²

บัสบาร์ ขนาด	รายละเอียด	ค่าเป้าหมาย (°C)							
		100		110		120		130	
		ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
40 x 10 หุ้ม ฉนวน ขนาด 38.1 mm.	จำนวน รอบการ หุ้ม (รอบ)	4	4	4	4	3	3	3	3
	เวลาใน การหุ้ม (นาที) “ต่อ จำนวน 10 ชั้น”	22.31	19.05	19.24	18.05	18.20	12.00	18.11	11.33
	อุณหภูมิ โครง (°C)	41.3	39.1	51.8	39.8	55.2	40.2	56.3	46.7
	อุณหภูมิ แผ่นเลื่อน (°C)	68.2	72.1	87.7	77.6	91.5	85.1	121.5	90.4

บัสบาร์ ขนาด	รายละเอียด	ค่าเป้าหมาย (°C)							
		100		110		120		130	
		ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
อุณหภูมิ ชิ้นงาน (°C)		91.0	76.2	91.8	76.8	97.0	85.9	102.9	92.5
อุณหภูมิ จาก Thermoc ouple (°C)		101.2	98.0	105.2	107.9	113.8	118.5	124.4	125.6
อุณหภูมิ จาก Thermo Gun (°C)		108.9	97.7	119.6	108.4	128.3	118.0	132.6	126.0
ช่วง อุณหภูมิ (ก่อน ชิ้นงาน เข้า) (°C)		91.4 - 111.6	99.5 - 101.0	95.0 - 122.2	107.1 - 109.5	104.6 - 131.7	114.7 - 118.9	115.7 - 142.2	125.4 - 129.1
ช่วง อุณหภูมิ (หลัง ชิ้นงาน เข้า) (°C)		85.4 - 104.6	97.2 - 99.7	90.0 - 117.2	105.6 - 108.1	100.8 - 124.8	113.0 - 116.8	110.3 - 135.7	123.4 - 127.6

4.4.4 ผลการทดลองบัสบาร์ขนาด 60 x 10 mm^2 กับฉนวนขนาด 50.8 mm.

อุณหภูมิขณะทำการทดลอง 28.9 °C ความชื้นขณะทำการทดลอง 57.2 %RH
 ความเร็วของแผ่นเลื่อนขึ้นงาน ระดับ 1 คือ 0.0064 m/s.

ตารางที่ 4.9 ตารางทดลอง บัสบาร์ขนาด 60 x 10 mm^2

บัสบาร์ ขนาด	รายละเอียด	ค่าเป้าหมาย (°C)							
		100		110		120		130	
		ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
60 x 10 หุ้ม ฉนวน ขนาด 50.8 mm.	จำนวน รอบการ หุ้ม (รอบ)	4	4	4	3	3	2	3	2
	เวลาในการ หุ้ม (นาที) “ต่อ จำนวน 10 ชั้น”	22.31	15.10	19.24	18.05	18.20	12.00	18.11	11.34
	อุณหภูมิ โครง (°C)	41.3	38.4	51.8	39.1	55.2	39.8	56.3	40.2
	อุณหภูมิ แผ่นเลื่อน (°C)	68.3	63.4	87.7	72.1	91.5	85.1	121.5	90.4
	อุณหภูมิ ขึ้นงาน (°C)	91.0	64.0	91.8	81.4	97.0	84.4	102.9	89.3
	อุณหภูมิ จาก Thermoc	101.2	98.0	105.2	107.9	113.8	118.5	124.4	125.6

บัสบาร์ ขนาด	รายละเอียด	ค่าเป้าหมาย (°C)							
		100		110		120		130	
		ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
	ouple (°C)								
	อุณหภูมิ จาก Thermo Gun (°C)	108.9	97.7	119.6	108.4	128.3	118.0	132.6	126.0
	ช่วง อุณหภูมิ (ก่อน ขึ้นงานเช้า) (°C)	91.4 -	99.5 -	95.0 -	107.1 -	104.6 -	114.7 -	115.7 -	125.4 -
		111.6	101.0	122.2	109.5	131.7	118.9	142.2	129.1
	ช่วง อุณหภูมิ (หลัง ขึ้นงานเช้า) (°C)	85.4 -	97.2 -	90.0 -	105.6 -	100.8 -	113.0 -	110.3 -	123.4 -
		104.6	99.7	117.2	108.1	124.8	116.8	135.7	127.6

จากตารางที่ 4.7, ตารางที่ 4.8, ตารางที่ 4.9 พบว่าก่อนการปรับค่าพีไอดี และหลังการปรับค่าพีไอดี+ติดตั้งลมเข้ามา จะเห็นได้ว่าสามารถทำให้เวลาในการทำงานลดลง, อุณหภูมิที่โครงลดลง, อุณหภูมิแผ่นเลื่อนขึ้นงานลดลง, ค่าวัดอุณหภูมิที่วัดจากเทอร์โมคัปเปิลภายใน และ Thermo Gun นั้น มีค่าใกล้เคียงกันมากกว่า ก่อนการปรับค่าพีไอดี เนื่องจากอุณหภูมิก่อนการติดตั้งลมและก่อนการปรับค่าพีไอดี อุณหภูมิภายในไม่สม่ำเสมอ หมุนเวียน และช่วงอุณหภูมิ ทั้งก่อนและหลังขึ้นงานเช้า มีช่วงการแกว่งของอุณหภูมิต่ำลง เข้าใกล้ค่าเป้าหมายมากขึ้น

4.5 ช่วงค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมกับแต่ละขนาดของบัสบาร์และฉนวน

จากการทดสอบหุ้มฉนวน ทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 100 – 130 °C พบว่าการวัดอุณหภูมิของเครื่องอบความร้อนอัตโนมัติของการทดลองที่อุณหภูมิ 130 °C ใช้เวลาในการทำงานน้อยที่สุด เหมาะสมใช้งานหุ้มฉนวนมากที่สุด เนื่องจาก ถ้าใช้ที่อุณหภูมิต่ำลง จะใช้เวลาการทำงานที่มากขึ้น แต่ถ้าใช้ที่อุณหภูมิสูงกว่านี้จะเปลืองค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นหรือชิ้นงานเกิดความเสียหายที่ฉนวน(เกิดการฉีกขาด) จึงได้ทำการทดสอบที่อุณหภูมินี้อีก ทั้งหมด 5 ครั้ง และทดสอบการเป่าโดยแก๊ส, Electric Blower Heater (Hot Air Gun) และเครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ โดยจะทดลองอีก 5 ครั้ง ดังตาราง 4.7 ต่อไปนี้ แล้วหาค่าเฉลี่ยของแต่ละขนาดบัสบาร์

ตารางที่ 4.10 ตารางผลการทดลองโดยใช้อุปกรณ์ทั้ง 3 ประเภท

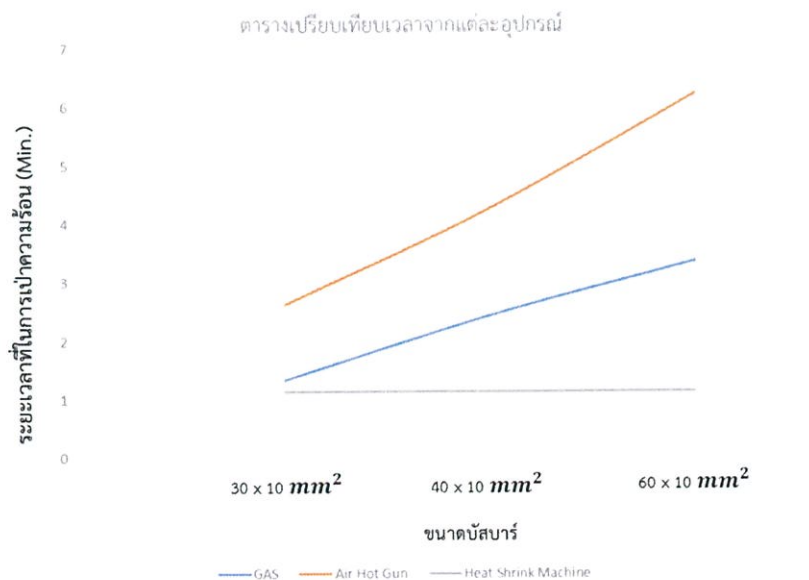
การทดลอง ครั้งที่	ชนิดอุปกรณ์เป่า ขนาดบัสบาร์ (mm x mm)	ระยะที่ใช้ในการเป่าความร้อน (ต่อชิ้น)		
		แก๊สหุงต้ม	Hot Air Gun	เครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ
ครั้งที่ 1	30 x 10	1.33 Min.	2.61 Min.	1.12 Min.
	40 x 10	2.42 Min.	4.25 Min.	1.16 Min.
	60 x 10	3.30 Min.	6.22 Min.	1.14 Min.
ครั้งที่ 2	30 x 10	1.32 Min.	2.60 Min.	1.13 Min.
	40 x 10	2.43 Min.	4.27 Min.	1.11 Min.
	60 x 10	3.39 Min.	6.23 Min.	1.12 Min.
ครั้งที่ 3	30 x 10	1.30 Min.	2.63 Min.	1.13 Min.
	40 x 10	2.42 Min.	4.25 Min.	1.15 Min.
	60 x 10	3.40 Min.	6.22 Min.	1.13 Min.
ครั้งที่ 4	30 x 10	1.34 Min.	2.62 Min.	1.11 Min.
	40 x 10	2.43 Min.	4.26 Min.	1.12 Min.
	60 x 10	3.35 Min.	6.22 Min.	1.15 Min.
ครั้งที่ 5	30 x 10	1.36 Min.	2.62 Min.	1.15 Min.
	40 x 10	2.43 Min.	4.26 Min.	1.11 Min.
	60 x 10	3.37 Min.	6.23 Min.	1.11 Min.
ค่าเฉลี่ย	30 x 10	1.33 Min.	2.62 Min.	1.13 Min.
	40 x 10	2.43 Min.	4.26 Min.	1.13 Min.
	60 x 10	3.36 Min.	6.22 Min.	1.13 Min.

4.6 การเปรียบเทียบการเป่าให้ความร้อนโดยเครื่อง ทั้ง 3 ชนิด

ตารางที่ 4.11 ตารางแสดงการเปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์ทั้ง 3 ชนิด

ชนิดอุปกรณ์เป่า	ระยะเวลาที่ใช้ในการเป่าความร้อน “ต้อขึ้น” แต่ละขนาดบัสบาร์ (นาที)			จำนวน คนทำงาน	ความ ปลอดภัย ในการใช้ งาน
	30 x 10 <i>mm</i> ²	40 x 10 <i>mm</i> ²	60 x 10 <i>mm</i> ²		
แก๊สหุงต้ม	1.33 Min.	2.43 Min	3.36 Min.	3 คน	น้อยที่สุด
Electric Blower Heater (Hot Air Gun)	2.62 Min.	4.26 Min.	6.22 Min.	3 คน	ปานกลาง
เครื่องอบความ ร้อนอัตโนมัติ	1.13 Min.	1.13 Min.	1.13 Min.	1 คน	มากที่สุด

จากตารางที่ 4.11 จะได้กราฟเปรียบเทียบเวลาการใช้งาน ดังภาพที่ 4.2 ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 4.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบเวลาการใช้งานของอุปกรณ์ทั้ง 3 ประเภท

4.6.1 การคำนวณการประหยัดค่าใช้จ่ายลดลงจากการใช้เครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ

จำนวน巴士ที่ใช้งานทั้งหมด 1 ปี เท่ากับ 15,600 คัน (巴士ทุกประเภท)

➤ แบ่งเป็น “巴士หลัก” ประมาณ 70 % ของ巴士ทั้งหมด

$$= 15,600 \times 70 \% = 10,920 \text{ คัน/ปี}$$

➤巴士หลักที่ต้อง “หุ้มฉนวน” ประมาณ 30 % ของ巴士หลัก

$$= 10,920 \times 30 \% = 3,276 \text{ คัน/ปี}$$

โดย巴士หลักที่หุ้มฉนวนแบ่งเป็นแต่ละขนาดดังนี้ (“โดย巴士แต่ละคันยาวเฉลี่ย 3 เมตร”)

- 巴士ขนาด 30 x 10 ประมาณ 30 % → $3,276 \times 30 \% \approx 983$ คัน/ปี
- 巴士ขนาด 40 x 10 ประมาณ 30 % → $3,276 \times 30 \% \approx 983$ คัน/ปี
- 巴士ขนาด 60 x 10 ประมาณ 40 % → $3,276 \times 40 \% \approx 1,311$ คัน/ปี

จากตารางที่ 4.11 สามารถคำนวณเวลาในการเป่าแต่ละคันโดยแต่ละอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

- เวลาจากการเป่าด้วยแก๊สหุงต้ม巴士ยาว 3 เมตร :

ขนาด巴士 : 30 x 10 mm^2 ใช้เวลา = $1.33 \times 3 = 4.39$ Min/คัน

ขนาด巴士 : 40 x 10 mm^2 ใช้เวลา = $2.43 \times 3 = 8.09$ Min/คัน

ขนาด巴士 : 60 x 10 mm^2 ใช้เวลา = $3.36 \times 3 = 10.48$ Min/คัน

ตารางที่ 4.12 เวลาที่ใช้ในการเป่า巴士แต่ละขนาดโดยการเป่าด้วยแก๊สหุงต้ม

ขนาด巴士	จำนวนคันที่หุ้ม (คัน)	เวลาที่ใช้ต่อคัน (Min.)	ชั่วโมงที่ใช้งาน (Hr)	วันที่ใช้งาน (วัน)
30 x 10	983	$1.33 \times 3 = 4.39$	76.18	9.52
40 x 10	983	$2.43 \times 3 = 8.09$	133.53	16.69
60 x 10	1,311	$3.36 \times 3 = 10.48$	236	29.5
รวม				55.71 ≈ 56

- เวลาจากการเป่าด้วย Electric Blower Heater บัสบาร์ยาว 3 เมตร :

ขนาดบัสบาร์ : $30 \times 10 \text{ mm}^2$ ใช้เวลา = $2.47 \times 3 = 8.21 \text{ Min/ชิ้น}$

ขนาดบัสบาร์ : $40 \times 10 \text{ mm}^2$ ใช้เวลา = $4.26 \times 3 = 13.18 \text{ Min/ชิ้น}$

ขนาดบัสบาร์ : $60 \times 10 \text{ mm}^2$ ใช้เวลา = $6.22 \times 3 = 19.06 \text{ Min/ชิ้น}$

ตารางที่ 4.13 เวลาที่ใช้ในการเป่าบัสบาร์แต่ละขนาดโดยการเป่าด้วย Electric Blower Heater

ขนาดบัสบาร์	จำนวนชิ้นที่หุ้ม (ชิ้น)	เวลาที่ใช้ต่อชิ้น (Min.)	ชั่วโมงที่ใช้งาน (Hr)	วันที่ใช้งาน (วัน)
30 x 10	983	$2.47 \times 3 = 8.21$	136.81	17.10
40 x 10	983	$4.26 \times 3 = 13.18$	217.89	27.24
60 x 10	1,311	$6.22 \times 3 = 19.06$	417.34	52.17
รวม				96.51 \approx 97

- เวลาจากเครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ บัสบาร์ยาว 3 เมตร :

ขนาดบัสบาร์ : $30 \times 10 \text{ mm}^2$ ใช้เวลา = $1.13 \times 3 = 3.39 \text{ Min/ชิ้น}$

ขนาดบัสบาร์ : $40 \times 10 \text{ mm}^2$ ใช้เวลา = $1.13 \times 3 = 3.39 \text{ Min/ชิ้น}$

ขนาดบัสบาร์ : $60 \times 10 \text{ mm}^2$ ใช้เวลา = $1.13 \times 3 = 3.39 \text{ Min/ชิ้น}$

ตารางที่ 4.14 เวลาที่ใช้ในการเป่าบัสบาร์แต่ละขนาดโดยการเป่าด้วยเครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ

ขนาดบัสบาร์	จำนวนชิ้นที่หุ้ม (ชิ้น)	เวลาที่ใช้ต่อชิ้น (Min.)	ชั่วโมงที่ใช้งาน (Hr)	วันที่ใช้งาน (วัน)
30 x 10	983	$1.13 \times 3 = 3.39$	34.08	4.26
40 x 10	983	$1.13 \times 3 = 3.39$	34.08	4.26
60 x 10	1,311	$1.13 \times 3 = 3.39$	79.77	9.97
รวม				18.49 \approx 19

4.6.1.1 ค่าใช้จ่ายที่ลดลงจากการเปลี่ยนจากการใช้แก๊สหุงต้มเป็นเครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ

ตารางที่ 4.15 ตารางแสดงค่าใช้จ่ายที่ลดลงจากการเปลี่ยนจากการใช้แก๊สหุงต้มเป็นเครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ

รายละเอียด	จำนวนคนลดลง (คน)	ค่าแรงต่อคน (บาท/วัน)	จำนวนวันลดลง	Saving (บาท/ปี)
จำนวนฉนวนลดลง 10 % ➤ ความยาวบัสบาร์ทั้งหมด = $3,276 \times 3 = 9,828$ เมตร ➤ ราคาเมตรละ 200 บาท	-	-	-	$10\% \times 9,828 \times 200 = 196,560$
GAS → Heat Shrink Machine	$3 - 1 = 2$	840	$56 - 19 = 37$	$2 \times 840 \times 37 = 62,160$
รวม				258,720

ดังนั้น สามารถประหยัดค่าใช้จ่าย คือ จำนวนพนักงานลดลง + การใช้ฉนวนที่ลดลง 10 % เท่ากับ $62,160 + 196,560 = 258,720$ บาท/ ปี

4.6.1.2 ค่าใช้จ่ายที่ลดลงจากการเปลี่ยนจากการใช้ Electric Blower Heater (Hot Air Gun) เป็น เครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ

ตารางที่ 4.16 ตารางแสดงค่าใช้จ่ายที่ลดลงจากการเปลี่ยนจากการใช้ Electric Blower Heater (Hot Air Gun) เป็นเครื่องอบความร้อนอัตโนมัติ

รายละเอียด	จำนวนคน ลดลง (คน)	ค่าแรงต่อ คน (บาท/ วัน)	จำนวนวัน ลดลง	Saving (บาท/ปี)
จำนวนฉนวนลดลง 10 % ➤ ความยาวบัสบาร์ ทั้งหมด = $3,276 \times 3$ = 9,828 เมตร ➤ ราคาเมตรละ 200 บาท	-	-	-	$10\% \times 9,828 \times 200$ = 196,560
Air Hot Gun → Heat Shrink Machine	$3 - 1 = 2$	840	$97 - 19 =$ 78	$2 \times 840 \times 78 =$ 131,040
รวม				327,600

ดังนั้น สามารถประหยัดค่าใช้จ่าย คือ จำนวนพนักงานลดลง + การใช้ฉนวนที่ลดลง 10 % เท่ากับ $131,040 + 196,560 = 327,600$ บาท/ ปี

4.6.2 ข้อดีและข้อด้อยของการใช้งานอุปกรณ์ต่างกันจากการหุ้มฉนวนที่บัสบาร์

จากการทดลองโดยใช้อุปกรณ์ทั้ง 3 ชนิดให้ความร้อน แต่ละชนิดก็มีข้อดี-ข้อด้อยดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.17 ตารางแสดงข้อดีและข้อด้อยของการใช้งานอุปกรณ์แต่ประเภทในการเป่าให้ความร้อนของการหุ้มตัวของฉนวน

ประเภทของอุปกรณ์	ข้อดี-ข้อด้อย	ข้อดี	ข้อด้อย
	แก๊สหุงต้ม	- รวดเร็วในการทำงาน ต่อขึ้นกว่า Electric Blower Heater (Hot Air Gun)	- มีรอยดำเกิดที่ชิ้นงาน - ทำได้ทีละ 1 ชิ้นต่อครั้ง - ใช้จำนวนคนในการ ทำงานมากกว่า 1 คน

ข้อดี-ข้อด้อย ประเภทของอุปกรณ์	ข้อดี	ข้อด้อย
		<ul style="list-style-type: none"> - อันตรายจากการใช้งานมากที่สุด
Electric Blower Heater (Hot Air Gun)	<ul style="list-style-type: none"> - ความปลอดภัยในการใช้แก๊สเพิ่มขึ้นระดับหนึ่ง - ชีงงานไม่เกิดรอยไหม้ (รอยดำ) 	<ul style="list-style-type: none"> - พังค่อนข้างง่าย เนื่องจากใช้ความร้อนสูงและเป่าระยะเวลานานติดต่อกัน - ใช้เวลาการทำงานนานที่สุด - ทำได้ทีละ 1 ชิ้น ต่อครั้ง - ใช้จำนวนคนในการทำงานมากกว่า 1 คน
เครื่องอบความร้อน อัตโนมัติ	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถทำได้ 10 ชิ้น ต่อครั้ง - มีความปลอดภัยมากที่สุด - ชีงงานไม่เกิดรอยไหม้ - ใช้จำนวนคนในการทำงาน 1 คน - ระยะเวลาในการทำน้อยที่สุด - การทำงานสะดวกขึ้น - ชีงงานมีความสวยงามมากขึ้นและมีคุณภาพมากขึ้น 	<ul style="list-style-type: none"> - อุณหภูมิแกว่ง ไม่คงที่ - สูญเสียอุณหภูมิให้กับภายนอก - ราคาค่าใช้ไฟฟ้ามากที่สุด

ตารางที่ 4.18 ตารางแสดงการเรียงลำดับการใช้งานเปรียบเทียบ 3 อุปกรณ์

รายละเอียด	GAS	Electric Blower Heater (Air Hot Gun)	Heat Shrink Machine
จำนวนคนทำงาน (คน)	3	3	1
ระยะเวลาทำงาน ต่อ 10 ชิ้น	ปานกลาง	ช้า	เร็ว
ความสวยงามชิ้นงาน	น้อยที่สุด	ปานกลาง	มากที่สุด
ความสะอาดของการ ทำงาน	น้อยที่สุด	ปานกลาง	มากที่สุด
ความปลอดภัยในการ ใช้งาน	น้อยที่สุด	ปานกลาง	มากที่สุด
ของเสียที่เกิดขึ้น	มากที่สุด	ปานกลาง	น้อยที่สุด
ค่าใช้จ่ายอื่นๆ - Gas - ค่าไฟ	น้อยที่สุด	ปานกลาง	มากที่สุด

บทที่ 5

บทสรุป

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลสรุปในการดำเนินงานทั้งหมด อุปสรรคและการแก้ไขปัญหาต่างๆในระหว่างการทำงานตลอดระยะเวลา 4 เดือน

5.1 สรุปผลการดำเนิน

จากการศึกษากระบวนการผลิตตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำ การดำเนินงานทั้งหมดในการปฏิบัติการสหกิจศึกษาทำให้ได้รับความรู้และประสบการณ์ต่างๆ เข้าใจกระบวนการของการผลิตตู้ควบคุมไฟฟ้าแรงดันต่ำและเพิ่มประสิทธิภาพในส่วนของเครื่องเป่าลมร้อนอัตโนมัติเป็นเครื่องให้ความร้อนโดยรังสีอินฟราเรด จากเมื่อก่อนใช้งานโดยใช้การความร้อนจากแก๊สและ Electric Blower Heater ในการหุ้มฉนวน ซึ่งการใช้แก๊สในการเป่าเพื่อหุ้มจะทำให้เกิดรอยไหม้บางส่วนและรอยดำที่บริเวณชิ้นงาน และยังเป็นอันตรายกับคนใช้งาน และได้มีการเปลี่ยนมาใช้ Electric Blower Heater ทำให้มีความปลอดภัยมากขึ้น และไม่มีรอยยับรอยไหม้แต่การเป่าระยะเวลาและอุณหภูมิที่สูง จึงทำให้เครื่อง Electric Blower Heater เกิดการเสียหายได้ง่าย จึงได้มีการเปลี่ยนมาเป็นเครื่องอบความร้อนอัตโนมัติโดยใช้อุปกรณ์ควบคุมฟังก์ชันพีไอดี ยี่ห้อ TAIE รุ่น FY 700 เพื่อปรับตั้งค่าพีไอดีและควบคุมและรักษาอุณหภูมิไว้ในระดับที่ต้องการใช้งาน แต่จากการศึกษาและทดลองนั้นหลอดรังสีความร้อนอินฟราเรดติดเป็นวงรอบบริเวณภายใน จำนวน 15 หลอด และได้เพิ่มการติดตั้งลมเพื่อให้อุณหภูมิภายในเกิดการกระจายตัวสม่ำเสมอภายในเตาและชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหุ้มนั้นมีการถ่ายเทความร้อนไปที่ชิ้นงานน้อยลง ลดการสูญเสียความร้อนให้กับชิ้นงาน จากการปรับพีไอดีและติดตั้ง Blower สามารถลดช่วงการแกว่งของอุณหภูมิลดลงจากเดิม 6 เท่า ลดระยะเวลาการทำงานจากเดิม 1.6 เท่า ทำให้มีประสิทธิภาพการทำงานดีขึ้นและยังทำให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิที่ลดลงจากการใช้งานเดิมก่อนหน้า โดยการใช้งานเครื่องเป่าลมร้อนอัตโนมัติทำให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายลดลงได้ สามารถลดการใช้จำนวนพนักงาน 2 คนต่อปี ลดเวลาในการทำงานมากขึ้น ลดอันตรายจากการใช้แก๊สและเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งานได้เพิ่มขึ้น สามารถลดค่าใช้จ่ายไปทั้งหมดอย่างน้อยประมาณ 258,720 บาทต่อปี

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

เนื่องจากตัวเครื่อง Heat shrink Machine เป็นเครื่องที่มีการใช้งานมาก่อนและมีปัญหาที่ฉนวนหลอดรังสีให้ความร้อนอินฟราเรด เกิดการชำรุดจึงเกิดการกระแสวิก ทำให้ต้องรอเครื่องซ่อมระยะเวลาประมาณเกือบ 3 เดือน และเมื่อเครื่องซ่อมเสร็จ ก็พบปัญหาว่า เครื่องมีช่องเพื่อให้ชิ้นงานเลื่อนผ่านเข้า

มาเป็นช่องเปิดตลอดเวลา ดังนั้นจึงเกิดการสูญเสียความร้อนให้กับภายนอกมากและการรบกวนจากสภาพแวดล้อมภายนอก ทำให้ค่าอุณหภูมิที่วัดได้ไม่คงที่จะเกิดการแกว่งตลอดเวลา และการทำงานจริงนั้น ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงมากๆ ตัวเครื่องนั้น ให้ความร้อนที่ไม่กระจายทั่วเครื่อง ความร้อนจะลอยไปบริเวณด้านบนของเครื่อง ทำให้บริเวณด้านบนมีอุณหภูมิที่สูงกว่าบริเวณด้านล่างของตัวเครื่อง ทำให้ไม่สามารถปรับค่าเพื่อให้อุณหภูมิคงที่และเข้าสู่ค่าเป้าหมายมากที่สุดได้ และการติดตั้งลมเข้าไปเป็นลมจากปัดลมภายนอกเข้าไปซึ่งเป็นลมเย็น จึงมีผลเล็กน้อยต่ออุณหภูมิ

5.3 แนวทางการแก้ไขปัญหา

เครื่องอบลมร้อนอัตโนมัติ เนื่องจากเครื่องมีการสูญเสียความร้อนให้กับสภาพแวดล้อมที่มาก และอุณหภูมิภายในตัวเครื่องไม่คงที่ ได้ปรึกษาอาจารย์ที่ปรึกษาและได้ให้คำแนะนำ ในการติดตั้ง Blower เข้ามาเพื่อช่วยให้อุณหภูมิภายในเกิดการหมุนเวียนสม่ำเสมอมากขึ้น ความร้อนถูกเป่าไปที่ฉนวนโดยตรง ขณะที่บัสบาร์ไม่จำเป็นต้องให้มีความร้อนสูงเหมือนแต่ก่อน จึงเป็นการลดการสูญเสียพลังงานความร้อนที่บัสบาร์และกับสภาพแวดล้อมภายนอก ดังนั้นการควบคุมอุณหภูมิจึงมีเสถียรมากขึ้นเมื่อใช้ร่วมกับฟังก์ชันการควบคุมแบบพีไอดี

บรรณานุกรม

- [1] ชนกานต์ สุกุลแถว. (2013). ความร้อนกับการทำงาน คุณวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
Journal of Science and Technology
- [2] Baily, M. (1994). A Survey of Thermodynamics, American Institute of Physics, New
York, ISBN 0-88318-797-3, page 23
- [3] เกษตร สันติสัมฤทธิ์. (2560). เครื่องมือวัดและควบคุม สำหรับการใช้งานทางอุตสาหกรรม.
- [4] สมศักดิ์ กীরติวุฒิสเรษฐ. (2550). หลักการและการใช้งานเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ:
ส.ส.ท.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

คุณสมบัติของท่อหดทนความร้อน ยี่ห้อ GAPEX รุ่น G5



G5 - ท่อหดทนความร้อน 135°C (เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม)



การจัดหมวดหมู่	ท่อหดบางทั่วไป
■ การใช้งาน	ใช้งานทั้งด้านการทหารและการค้า เช่น เป็นฉนวน ไฟฟ้า ป้องกันส่วนประกอบในสายการผลิต การปลด ชั่ว และการเชื่อมต่อ ใช้หุ้มรวมสายไฟ มีความยืดหยุ่น มาก และใช้ระบุสาย ชั่ว และส่วนประกอบได้
■ ลักษณะเฉพาะ	อัตราการหดตัว 2 : 1 ทนความร้อนมากกว่าท่อหด G5 ทั่วไป มีความยืดหยุ่นสูง ทนความร้อนได้ดี (เฉพาะสีเท่านั้น) ทนต่อของเหลวและตัวทำละลายที่พบได้ทั่วไป ลักษณะทางกายภาพ เคมี และคุณสมบัติทางไฟฟ้าดีเยี่ยม ผ่านมาตรฐาน RoHS
■ ช่วงอุณหภูมิในการทำงาน	อุณหภูมิในการทำงาน : -55°C - 135°C อุณหภูมิขั้นต่ำในการหดตัว : 70°C อุณหภูมิต่ำสุดในการหดตัวเต็มที่ : 100°C
■ การรับรอง/ ข้อมูลจำเพาะ	AMS-DTL-23053/5 class1 and class3 UL224 File no. E255532, 125°C VW-1 600V

■ ๓๘	สีส้ม (สามารถผลิตสี ขนาดพิเศษและตัดความยาวได้ ตามลูกค้าต้องการ)

ข้อมูลผลิตภัณฑ์

รหัสสินค้า	ขนาด		ก่อนหดตัว (มม.)	หลังหดตัว (มม.)		ความยาวมาตรฐาน (เมตร)
	มิลลิเมตร	นิ้ว	เส้นผ่านศูนย์กลางวงใน	เส้นผ่านศูนย์กลางวงใน (สูงสุด)	ความหนาผนัง	
G5135-0012	1.2	3/64	1.2	0.6	0.40±0.08	200
G5135-0016	1.6	1/16	1.6	0.8	0.43±0.08	200
G5135-0024	2.4	3/32	2.4	1.2	0.51±0.08	200
G5135-0032	3.2	1/8	3.2	1.6	0.51±0.08	200
G5135-0048	4.8	3/16	4.8	2.4	0.51±0.08	100
G5135-0064	6.4	1/4	6.4	3.2	0.64±0.08	100
G5135-0095	9.5	3/8	9.5	4.8	0.64±0.08	100
G5135-0127	12.7	1/2	12.7	6.4	0.64±0.08	100
G5135-0191	19.1	3/4	19.1	9.5	0.76±0.08	100
G5135-0254	25.4	1	25.4	12.7	0.89±0.12	50
G5135-0318	31.8	1 1/4	31.8	15.9	1.02±0.15	50
G5135-0381	38.1	1 1/2	38.1	19.1	1.02±0.15	50
G5135-0508	50.8	2	50.8	25.4	1.14±0.16	25

ข้อมูลทางเทคนิค

คุณสมบัติ	ค่ามาตรฐาน	วิธีทดสอบ	ผลทดสอบ
Concentricity ค่าความร่วมศูนย์กลาง	70% min.	ASTM D 2671	≥70%
Tensile strength ความต้านทานแรงดึง	10.4MPa min.	ASTM D 638	≥14.0MPa
Elongation at break เปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาด	200% min.	ASTM D 638	≥400%
Heat shock 250°C, 4hrs ความต้านทานช็อกความร้อน	No cracking, dripping or flowing	ASTM D 2671	Pass
Low temperature flexibility ความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ -55°C, 4hrs	No cracking	ASTM D 2671	Pass
Tensile strength after aging(175°C/168hrs) ความต้านทานแรงดึงหลัง เร่งอายุ	70% of original min.	ASTM D 638	≥90%
Elongation after aging(175°C/168hrs)	100% min.	ASTM D 638	≥300%
Dielectric voltage withstand	2500V, 60sec no breakdown	UL224	Pass
Dielectric strength	19.7KV/mm min.	ASTM D 2671	25KV/mm
Volume resistivity	1014Ω·cm min.	ASTM D 876	≥1014Ω·cm

คุณสมบัติ	ค่ามาตรฐาน	วิธีทดสอบ	ผลทดสอบ
Corrosion	No corrosion	ASTM D 2671	Pass
Flammability	VW-1	UL224	Pass

ภาคผนวก ข.

คุณสมบัติของอุปกรณ์ PID Controller ยี่ห้อ TAIE รุ่น FY700

FY Series Microprocessor PID Controller

SPECIFICATION



The FY Series Microprocessor PID Controllers are highly reliable and accurate digital controllers that are very suitable for critical HVAC control requirements such as clean rooms, isolation rooms, laboratory, central plants, and utilities. The industry grade control performance provides versatile input selections and PID plus fuzzy functions

FEATURES

- Multi range input (TC, RTD, mV, mA) Each 14 bit resolution.
- Fuzzy / PID control , with two individual outputs
- Three sets of alarm. Each one has 17 modes.
- Implement Zero / Phase control by trig SCR module directly
- E²PROM Non-volatile memory.
- RS232 and RS485 communication
- Self-diagnosis function.
- Auto-zero and Auto-span circuit keep good accuracy
- Free range voltage AC85 ~ 265V / DC15 ~ 50V.
- Data lock function.
- Auto / Manual output mode
- Output percent showing with 10 LED
- 2 patterns each 8 segments programming procedure available to be ordered.
- Input 2 can be used in Remote SV.

SPECIFICATIONS

- **Power supply:** AC85 to 265V 50/60HZ
- **Power consumption:** About 4VA
- **Memory element:** E² PROM
- **Display accuracy:** Within 0.2% of displayed value + 1 digit
- **Sampling time:** 250 ms
- **Input signal:** Thermocouple, RTD, DC, Voltage/current
- **Isolation:**
Output part (control, alarm, transfer) and input part (measuring, CPU) are isolated separately
- **Dielectricity:**
Measuring terminal-grounded terminal AC 1000V, 1 min.
Power supply terminal-grounded terminal AC 1500V, 1min.
- **Isolated resistance:**
Measuring terminal-grounded terminal DC 500V more than 10MΩ
Power supply terminal-grounded terminal DC 500V > 10 MΩ
- **Operating temperature:** 0 ~ 50°C
- **Storage temperature:** -25 ~ 65°C
- **Humidity range:** 50 ~ 85% RH (not dew)
- **Net weight:**
FY400 approx 150g , FY600/FY700/FY800 approx 225g ,
FY900 approx 300g

FY Series Microprocessor PID Controller

ORDER INFORMATION

FY -

A B C D E F G

A: Model No:

FY400 for 48 × 48mm (DIN 1/16),
 FY800 for 48 × 96mm (DIN 1/8),
 FY600 for 96 × 48mm (DIN 1/8),
 FY900 for 96 × 96mm (DIN 1/4),
 FY700 for 72 × 72mm

B: Out 1 control output mode:

0- None
 1- Relay, contact, 3A/240VAC
 2- Volt, voltage pulse, 20VDC/20mA
 3- 4~20mA
 4- 0~20mA
 5- 1 SSR (1 Zero crossing control)
 6- 3 SSR (3 Zero crossing control)
 7- Proportional motor 3 wired close loop control
 8- 1 SCR (1 Phase angle control)
 9- 3 SCR (3 Phase angle control)
 A- 0~5VDC
 B- 0~10VDC
 C- 1~5VDC
 D- 2~10VDC

C: Out 2 control output mode:

0- None
 1- Relay, contact, 3A/240VAC
 2- Volt, voltage pulse, 20VDC/20mA
 3- 4~20mA
 4- 0~20mA
 A- 0~5VDC
 B- 0~10VDC
 C- 1~5VDC
 D- 2~10VDC

D: Alarm:

0- None
 1- One set
 2- Two sets
 3- Three sets (for FY900/FY800/FY600)

E: Transmitter:

0- None
 1- 4~20mA (Adjustable)
 2- 0~20mA (Adjustable)
 A- 0~5VDC (Adjustable)
 B- 0~10VDC (Adjustable)
 C- 1~5VDC (Adjustable)
 D- 2~10VDC (Adjustable)
 E- 0~1VDC (Adjustable)

F: Second Input: (for Remote Set Point)

0- None
 1- 4~20mA
 2- 0~20mA
 A- 0~5VDC
 B- 0~10VDC
 C- 1~5VDC
 D- 2~10VDC
 E- 0~1VDC
 *This function except FY400

G: Communication:

0- None
 1- RS232
 2- RS485
 3- TTL Communication

Specifications

FY Series

Digital PID Controller

Standard Spec.

Model	FY400	FY600	FY700	FY800	FY900	FY100	FY101
Dimension	48X48mm	96X48mm	72X72mm	48X96mm	96X96mm	175X110mm	90X90mm
Supply voltage	AC 85~265V , DC24V (Optional)					AC 85~265V	
Frequency	50/60 HZ						
Power Consumption	approx 3VA	approx 4VA	approx 3VA	approx 4VA	approx 4VA	approx 4VA	approx 3VA
Memory	Non-volatile memory E ² PROM						
Input	Accuracy : 0.2%FS, Sample time : 250ms						
TC	K , J , R , S , B , E , N , T , W5Re/W26Re , PL2 , U , L						
RTD	DPT100 , JPT100 , JPT50						
mA dc	4~20mA , 0~20mA						
Voltage dc	0~1V , 0~5V , 0~10V , 1~5V , 2~10V -10~10mV , 0~10mV , 0~20mV , 0~50mV , 10~50mV						
DP Position	0000 , 000.0 , 00.00 , 0.000 (available for mA or Voltage dc input)						
Output 1	Main control output						
Relay	SPST type	SPDT type	SPDT type	SPDT type	SPDT type	SPDT type	SPDT type
Voltage Pulse	For SSR drive. ON:24V , OFF:0V , maximum load current:20mA.						
mA dc	4~20mA , 0~20mA .Maximum load resistance:560 Ω						
Voltage dc	0~5V , 0~10V , 1~5V , 2~10V. Maximum load current:20mA.						
Alarm 1	SPST type	SPDT type	SPST type	SPDT type	SPDT type	SPDT type	SPST type
Control algorithms	PID , P , PI , PD , ON/OFF(P=0) , FUZZY						
PID range	P:0~200% , I:0~3600 Secs , D:0~900 Secs						
Isolation	Output terminal (control output , alarm ,transmission) and Input terminal are isolated separately.						
Isolated resistance	10M Ω or more between input terminals and case(ground) at DC 500V 10M Ω or more between output terminals and case(ground) at DC 500V						
Dielectric strength	1000V AC for 1 minute between input terminals and case(ground) 1500V AC for 1 minute between output terminals and case(ground)						
Operating temperature	0~50° C						
Humidity range	20~90% RH						
Weight (approx)	approx 150g	approx 225g	approx 225g	approx 225g	approx 300g	approx 130g	approx 80g
Display Height	PV: 8mm SV: 8mm	PV: 7mm SV: 7mm	PV: 14mm SV: 10mm	PV: 8mm SV: 8mm	PV: 14mm SV: 10mm	—	—

Optional Spec.

Model	FY400	FY600	FY700	FY800	FY900	FY100	FY101
RAMP/SOAK Program	2 Patterns with 8 segments each . The 2 patterns can be linked together as 16 segments use						
Output 2	For heating and cooling control use						
Relay	SPST type	SPST type	SPST type	SPST type	SPST type	SPST type	SPST type
Voltage Pulse	For SSR drive. ON:24V , OFF:0V , maximum load current:20mA.						
mA dc	4~20mA , 0~20mA .Maximum load resistance:560 Ω						
Voltage dc	0~5V , 0~10V , 1~5V , 2~10V. Maximum load current:20mA.						
Alarm 2	SPST type	SPDT type	SPDT type	SPDT type	SPDT type	SPDT type	—
Alarm 3	—	SPST type	SPST type	SPST type	SPST type	SPST type	—
Heater Break Alarm (HBA)	Display Range of Heater Current:0.0~99.9A , Accuracy : 1%FS Included CT :SC,80,T (5.8mm dia , 0.0~80.0A) or SC,100,T(12mm dia , 0.0~99.9A) Alarm Relay :AL1						
Transmission	Available for PV or SV transmission						
mA dc	4~20mA , 0~20mA .Maximum load resistance : 560 Ω						
Voltage dc	0~5V,0~10V,1~5V,2~10V. Maximum load current : 20mA.						
Remote SV Input	4~20mA , 0~20mA , 0~5V , 0~10V , 1~5V , 2~10V are available						
Communication	Protocol : MODBUS RTU,MODBUS ASCII , TAIE Interface : RS232 , RS485 , TTL Baudrate : 38400 , 19200 , 9600 , 4800 , 2400 bps. 8 bit , Start bit : 1 bit , Parity : Odd or Even , Stop bit : 1 or 2 bit						
WaterProof/DustProof	IP65						

* — Not available

Order Information

FY Series

Digital PID Controller

Model & Suffix codes

Model	Output1	Output2	Alarm	TRS	Remote SV	Communication	Input Type	Power	Water/Dust Proof
FY400	1	0	1	0	0	0	02	A	N
FY400	48x48mm	0 None	0 None	0 None	0 None	0 None	See Input Codes	A AC 85~265V	N None
FY600	96x48mm	1 Relay	1 Relay	1 1 Set	1 4~20mA	1 4~20mA	1 RS232	D DC 24V	W IP65
FY700	72x72mm	2 Voltage Pulse	2 Voltage Pulse	2 2 Sets	2 0~20mA	2 0~20mA	2 RS485		
FY800	48x96mm	2 Voltage Pulse (SSR Drive)	2 Voltage Pulse (SSR Drive)	3 3 Sets	A 0~5V	A 0~5V	3 TTL		
FY900	96x96mm	3 4~20mA	3 4~20mA	B 0~10V	B 0~10V	B 0~10V	A RS232, MODBUS		
FY100	175x110mm	4 0~20mA	4 0~20mA	C 1~5V	C 1~5V	C 1~5V	B RS485, MODBUS		
FY101	90x90mm	4 0~20mA	4 0~20mA	D 2~10V	D 2~10V	D 2~10V			
(STANDARD)									
PFY400	48x48mm	A 0~5V	A 0~5V	A HBA*					
PFY600	96x48mm	B 0~10V	B 0~10V	B HBA+AL2					
PFY700	72x72mm	C 1~5V	C 1~5V	C HBA+AL2+AL3					
PFY800	48x96mm	D 2~10V	D 2~10V						
PFY900	96x96mm								
PFY100	175x110mm	5 1 φ SCR zero cross control							
PFY101	90x90mm	6 3 φ SCR zero cross control							
(RAMP/ISOAK Programmable)		7 Motor valve control							
		8 1 φ SCR phase angle control							
		9 3 φ SCR phase angle control							

* Block means optional functions with additional charge
* HBA : Heater Break Alarm(HBA must use AL1 as alarm relay)

FY100	AN Fixed terminals, AC 85~265V BN Plug in terminals, AC 85~265V
FY101	AN Fixed terminals, AC 85~265V

Combination of options and models

Options	RAMP/ISOAK PROGRAM	Output 1			Output2	Alarm2	Alarm3	HBA	Transmission	Remote SV	Communication	DC 24V Power
Model		1 φ SCR Z	3 φ SCR Z	Motor valve control	1 φ SCR P	3 φ SCR P						
FY400	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
FY600	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
FY700	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
FY800	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
FY900	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
FY100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
FY101	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Available Not available * Remote SV function is not available, if HBA Function has been specified.

Input type table

	TYPE CODE	RANGE	TYPE CODE	RANGE	TYPE CODE	RANGE	TYPE CODE	RANGE		
K	K1 01	0.0~200.0°C(392.0°F)	K2 02	0.0~400.0°C(752.0°F)	K3 03	0~600°C(1112°F)	AN1	61	-10~10mV	
	K4 04	0~800°C(1472°F)	K5 05	0~1000°C(1832°F)	K6 06	0~1200°C(2192°F)		62	-2~2V	
	J1 07	0.0~200.0°C(392.0°F)	J2 08	0.0~400.0°C(752.0°F)	J3 09	0~600°C(1112°F)		63	-5~5V	
	J4 10	0~800°C(1472°F)	J5 11	0~1000°C(1832°F)	J6 12	0~1200°C(2192°F)		64	-10~10V	
	R1 13	0~1600°C(2912°F)	R2 14	0~1789°C(3218°F)				AN2	71	0~10mV
	S1 15	0~1600°C(2912°F)	S2 16	0~1789°C(3218°F)				AN3	76	0~20mV
	B1 17	0~1820°C(3308°F)						AN4	81	0~50mV
	E1 18	0~800°C(1472°F)	E2 19	0~900°C(1652°F)				82	0~20mA	-1999~9999
	N1 20	0~1200°C(2192°F)	N2 21	0~1300°C(2372°F)				83	0~1V	or -199.9~999.9
	T1 22	-199.9~400.0°C(752.0°F)	T2 23	-199.9~200.0°C(392.0°F)	T3 24	0.0~350.0°C(662.0°F)		84	0~5V	or -19.99~99.99
W1 25	0~2000°C(3632°F)	W2 26	0~2320°C(4208°F)			85	0~10V	or -1.999~9.999		
PL1 27	0~1300°C(2372°F)	PL2 28	0~1390°C(2534°F)			86	0~5K ohm			
U1 29	-199.9~600.0°C(999.9°F)	U2 30	-199.9~200.0°C(392.0°F)	U3 31	0.0~400.0°C(752.0°F)	87	0~2V			
L1 32	0~400°C(752°F)	L2 33	0~800°C(1472°F)			AN5	91	10~50mV		
JPT1 41	-199.9~600.0°C(999.9°F)	JPT2 42	-199.9~400.0°C(752.0°F)	JPT3 43	-199.9~200.0°C(392.0°F)	92	4~20mA			
100 JPT4 44	0~200°C(392°F)	100 JPT5 45	0~400°C(752°F)	100 JPT6 46	0~600°C(1112°F)	93	1~5V			
PT DPT1 47	-199.9~600.0°C(999.9°F)	PT DPT2 48	-199.9~400.0°C(752.0°F)	PT DPT3 49	-199.9~200.0°C(392.0°F)	94	2~10V			
100 DPT4 50	0~200°C(392°F)	100 DPT5 51	0~400°C(752°F)	100 DPT6 52	0~600°C(1112°F)					
JPT1 53	-199.9~600.0°C(999.9°F)	JPT2 54	-199.9~400.0°C(752.0°F)	JPT3 55	-199.9~200.0°C(392.0°F)					
50 JPT4 56	0~200°C(392°F)	50 JPT5 57	0~400°C(752°F)	50 JPT6 58	0~600°C(1112°F)					



www.taie.com.tw

ภาคผนวก ค.

คุณสมบัติของอุปกรณ์ Thermometer ยี่ห้อ FLUKE รุ่น FLUKE 568 IR Thermometer

566 and 568 Multipurpose Thermometers

FLUKE®



Fluke 566

Fluke 568



The Fluke 566 and included accessories



The Fluke 568 and included accessories

The two-in-one infrared and contact thermometer with an innovative graphical display

With a straight-forward, menu-driven user interface and graphical display, the Fluke 566 and 568 multipurpose thermometers make even complex temperature measurements easy. Quickly navigate and adjust emissivity, start data logging, or turn on and off alarms, with just a few pushes of a button. For added convenience, both rugged handheld thermometers combine contact and non-contact temperature measurement capability, providing a total temperature measurement solution for any service and maintenance program.

- Easily access advanced features with the soft-key buttons and graphical display
- Measure smaller targets from farther away using the IR thermometer
- Adjustable emissivity and built-in table of common materials for higher IR accuracy
- Quickly identify problems with the MIN, MAX, AVG, and DIF functions
- 2-color flashing alarm alerts you visually when measurements exceed limits
- Includes Type K thermocouple bead probe
- Compatible with all standard mini-connector K-type thermocouples
- Data logging with a date/time stamp
- Soft rubber boot for increased ruggedness
- User interface available in 6 languages



Choose your language



Select the measurement surface



See complete measurement details in seconds

Product specifications

(Check the Fluke web for detailed specifications)

	566	568
Infrared temperature range	-40 °C to 600 °C	-40 °C to 800 °C
Infrared accuracy	$< 0\text{ °C} = \pm 0.2\text{ °C} + 0.1\%$ $> 0\text{ °C} = \pm 1\%$ or $\pm 1.0\text{ °C}$, whichever is greater	
Display resolution	0.1 °C	
Infrared spectral response	8 µm to 14 µm	
Infrared response time	< 100 msec	
Contact temperature range	-20 °C to 1372 °C	
Contact accuracy	$-20\text{ °C to }-40\text{ °C} = \pm 0.2\text{ °C}$ $-40\text{ °C to }1372\text{ °C} = \pm 1\%$ or 1 °C , whichever is greater	
DIF (Distance to measurement spot size)	30:1	100:1
Laser sighting	Single-point laser < 1 mW output Class 2 (IEC) operation, 600 mm to 670 mm	
Minimum spot size	to mm	
Emissivity adjustment	By built-in table of common materials or digitally adjustable from 0.10 to 1.00 by 0.01	
Data logging with Date/Time stamp	20 points	50 points
PC interface and cable	None	USB 2.0 with FlukeView® Forms software
Hi/Low alarm	Audible and two-color visual	
Min./Max./Avg./DIF	Yes	
Display	Dot matrix 96 x 96 pixels with function icons	
Backlight	Two levels, normal and extra bright for darker environments	
Trigger Lock	Yes	
Switchable between Celsius and Fahrenheit	Yes	

Power: 2 AA/LR5 Batteries (566); 2 AA/LR6 Batteries and USB for use with a PC (568)
Battery life: Used continuously, laser and backlight on: 12 hours; laser and backlight off: 100 hours

Weight: 0.965 kg (566); 1.026 kg (568)
Size (HxLxW): 25.4 cm x 19.1 cm x 6.9 cm
Operating temperature: 0 °C to 50 °C
Storage temperature: -20 °C to 60 °C
Two years warranty

Included accessories

FlukeView® Forms software (568 only), USB cable (568 only), K-type thermocouple bead probe, 2 AA batteries, hard carrying case, quick start guide, and users manual.

Ordering information

Fluke 566 Infrared thermometer
 Fluke 568 Infrared thermometer

11344-eng Rev. 01

Recommended Accessories



H6
Infrared Thermometer Housing



SOPK-3
Pipe Clamp Temperature Probe



SOPK-9
General Purpose Probe



SOPK-11
Velcro Temperature Probe



SOPK-25
SureGrip Piercing Probe



SOPK-26
SureGrip General Purpose Probe

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล นางสาวสุกัญญา กิจอิทธิพัทธ์
วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 18 สิงหาคม พ.ศ.2538
ที่อยู่ 36 ซอย ช่วยส่งเสริม ถนน วิวิธสุรการ ต.มุกดาหาร อ.เมือง จ.มุกดาหาร 49000
E-mail Sukanya_1688@hotmail.com
โทรศัพท์ 082-7809718

ประวัติการศึกษา

- ปีการศึกษา 2554-2556 ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนมุกดาหาร จังหวัดมุกดาหาร
- ปีการศึกษา 2557-ปัจจุบัน ระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์

- มิถุนายน - กรกฎาคม 2560 นักศึกษาฝึกงาน แผนก วิศวกรรมมาตรฐานวิศวกรรม ฝ่าย ระบบจัดการวิศวกรรม (Engineering Technical Services Division) บริษัท ปตท.สำรวจและผลิตปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) : PTTEP
- สิงหาคม - พฤศจิกายน 2560 นักศึกษาโครงการสหกิจศึกษา แผนก Low-voltage systems ฝ่าย Production บริษัท ABB Limited Thailand : ABB Limited