

คู่มือเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิ เพื่อให้การควบคุมอุณหภูมิของท่านเกิดประสิทธิภาพสูงสุด

TEMPERATURE Control

เทคนิคการควบคุมอุณหภูมิ



OMRON

คำนำ

การควบคุมอุณหภูมิกับอุตสาหกรรมเป็นสิ่งที่คู่กันมาตลอดเกือบทุกอุตสาหกรรมต้องมีความเกี่ยวข้องกับการควบคุมอุณหภูมิ ไม่ว่าจะเป็นตั้งแต่อุตสาหกรรมอาหารจนถึงอุตสาหกรรมหนักอย่างโรงถลุงเหล็กเป็นต้น ในสมัยก่อนการควบคุมอุณหภูมิเป็นไปอย่างง่าย โดยการใช้เทอร์โมสแตตในการตัดต่อฮีตเตอร์ หรือเครื่องทำความเย็น ซึ่งจะได้ผลการควบคุมที่หยาบ แต่ในปัจจุบันการควบคุมอุณหภูมิได้มีการพัฒนาไปมาก มีการใช้การควบคุมแบบ PID มาเกี่ยวข้องหรือในการควบคุมระดับสูงได้มีการใช้การควบคุมแบบ Fuzzy หรือ แบบ 2-PID มาควบคุมเพื่อให้การควบคุมมีประสิทธิภาพและเสถียรภาพยิ่งขึ้น แต่คนทำงานในโรงงานอุตสาหกรรมที่ไม่ใช่ผู้ผลิตตัวควบคุมอุณหภูมิ น้อยคนนักที่จะรู้ซึ่งถึงการควบคุมอุณหภูมิ เมื่อมีปัญหาที่ต้องหาที่ปรึกษา หรือทำการแก้ไขเฉพาะหน้าโดยไม่ทราบหลักการที่แท้จริงของการควบคุมอุณหภูมิ

หนังสือการควบคุมอุณหภูมิเล่มนี้บริษัทออมนอน ผู้นำทางด้านอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ จัดทำขึ้นเพื่อจุดประสงค์เดียวคือเผยแพร่ความรู้ความเข้าใจในการควบคุมอุณหภูมิ ผู้อ่านสามารถนำความรู้ที่ได้ไปใช้กับตัวควบคุมอุณหภูมิทุกยี่ห้อ เพื่อให้การควบคุมอุณหภูมิของท่านเป็นไปอย่างถูกต้อง ทั้งยังช่วยท่านในการเลือกอุปกรณ์หรือวิธีควบคุมอุณหภูมิตามความต้องการของท่านอีกด้วย หากท่านมีข้อสงสัยในเรื่องของการควบคุมอุณหภูมิ ท่านสามารถขอข้อมูลเพิ่มเติมหรือคำปรึกษาจากบริษัทออมนอน อิเลคทรอนิคส์ จำกัด

หมายเหตุ คู่มือเล่มนี้เป็นลิขสิทธิ์ของบริษัท ออมนอน อิเลคทรอนิคส์ จำกัด ห้ามทำการลอกเลียนแบบ หรือเผยแพร่ส่วนหนึ่งส่วนใด เว้นแต่จะได้รับอนุญาตจากทางบริษัทฯ เป็นลายลักษณ์อักษร

บริษัท ออมนอน อิเลคทรอนิคส์ จำกัด โทรศัพท์ 0-2942-6700 โทรสาร 0-2937-0501

เว็บไซต์ www.omron-ap.co.th, www.plceasy.com

สารบัญ

หน้า

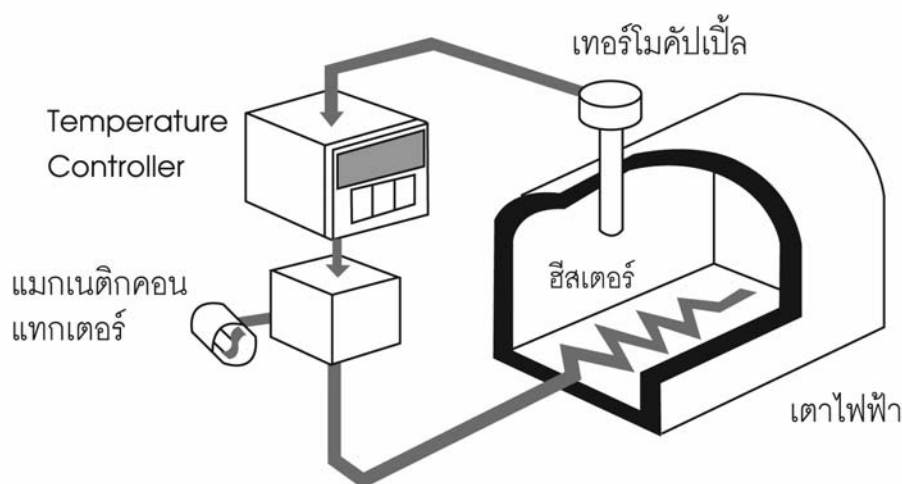
1.	การควบคุมอุณหภูมิ	1
2.	เอาต์พุตของตัวควบคุม	3
2.1	เอาต์พุตควบคุม	3
2.1.1	เอาต์พุตแบบตัดต่อ	4
2.1.1.1	เอาต์พุตหน้าสัมผัส (Relay Output)	4
2.1.1.2	เอาต์พุตแบบโซลิดสเตทรีเลย์ (SSR)	4
2.1.1.3	เอาต์พุตแรงดันสำหรับขับ SSR (Pulse Voltage for SSR)	5
2.1.2	อนาล็อกเอาต์พุต (Analog Output)	6
2.1.2.1	เอาต์พุตกระแส (Current Output)	6
2.1.2.2	เอาต์พุตแรงดัน (Voltage Output)	6
2.2	เอาต์พุตตามฟังก์ชัน	7
2.2.1	Alarm Output	8
■	ฟังก์ชัน Stand by Sequence ของ Alarm	9
■	การรีเซ็ตฟังก์ชัน Standby Sequence	10
■	Alarm Latch การค้างสถานะของเอาต์พุต Alarm	10
■	Close in Alarm / Open in Alarm (NO-NC Alarm Output)	11
■	Alarm Hysteresis	11
■	Alarm Delay	11
2.2.2	Transfer Output	12
■	Loop Burnout Alarm (LBA)	13
2.2.3	Heater Burnout Output	15
3.	อินพุตเซนเซอร์	18
3.1	เทอร์โมคัปเปิ้ล	18
3.1.1	การระบุชนิดของเทอร์โมคัปเปิ้ล	20
3.1.2	เทอร์โมคัปเปิ้ลและส่วนประกอบ	21
3.1.3	การต่อเทอร์โมคัปเปิ้ลกับตัวควบคุมอุณหภูมิ	24
3.1.4	วงจรชดเชยของจุดต่อด้านเย็น	24

3.1.5 สายต่อขยายของเทอร์โมคัปเปิ้ล	25
3.2 Resistance Temperature Device (RTD)	26
3.2.1 ชนิดของ Pt100	27
3.2.2 การต่อขยายสายของ RTD	28
3.3 เทอร์มิสเตอร์	29
3.3.1 เทอร์มิสเตอร์ที่มีสัมประสิทธิ์ความต้านทานต่ออุณหภูมิเป็นลบ	29
3.3.2 เทอร์มิสเตอร์ที่มีสัมประสิทธิ์ความต้านทานต่ออุณหภูมิเป็นบวก	29
3.4 อินฟราเรดเซนเซอร์	30
4. วิธีการควบคุมอุณหภูมิ	31
4.1 การควบคุมขั้นพื้นฐาน	35
4.1.1 การควบคุมแบบ ON/OFF	35
4.1.2 การควบคุมแบบ P	36
4.1.3 การควบคุมแบบ I	40
4.1.4 การควบคุมแบบ D	41
4.1.5 การควบคุมแบบ PID	42
4.1.6 การควบคุมแบบ 2-PID	43
4.1.7 การควบคุมแบบ Auto-tuning	45
4.1.8 การควบคุมแบบ Self-tuning	47
4.2 การควบคุมแบบพิเศษ	49
4.2.1 การควบคุมแบบร่อน/เย็น	49
4.2.2 การควบคุมแบบคาสเคด	51
4.2.3 การควบคุมแบบอัตราส่วน	53
4.2.4 การควบคุมแบบ Position-Proportional	54
5. ฟังก์ชันการทำงานของตัวควบคุม	56
5.1 Direct/reverse operation	56
5.2 Hysteresis	57
5.3 SP Ramp	58

5.4 Shifting Input	59
5.5 Event Input	60
5.6 Remote input	61
5.7 Programming	62
6. ตัวอย่างลักษณะการควบคุมอุณหภูมิ	63
6.1 การควบคุมด้วยวิธี ON/OFF	63
6.2 การใช้งาน Alarm Output	64
6.3 การตั้งค่าขีดเซตการวัด	67
6.4 การควบคุมแบบ PID โดยวิธี Self-tuning	67
6.5 การควบคุมแบบ PID โดยวิธี Auto-tuning	68
6.6 การใช้งานฟังก์ชันตรวจสอบฮีตเตอร์ขาด	70
6.7 การเปลี่ยนค่า SP จากสวิตช์ภายนอกโดยใช้ Event Input	71
6.8 การสั่ง Run/stop และเปลี่ยนค่า SP จากภายนอก	72
6.9 การใช้งานฟังก์ชัน SP Ramp	73
6.10 Heating/cooling control	74
6.11 การควบคุมความเย็น	76
6.12 การควบคุมความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างจุด 2 จุด	77
6.13 การต่อใช้งาน Temperature Controller ในลักษณะงานต่างๆ	78
7. ปัญหา และการแก้ไขในการควบคุมอุณหภูมิ	80
7.1 อุณหภูมิไม่ถึงค่าเซตพอยต์	80
7.2 อุณหภูมิเกินถึงค่าเซตพอยต์	81
7.3 อุณหภูมิที่วัดได้แกว่ง	81
7.4 อุณหภูมิแตกต่างจากค่าเซตพอยต์มาก	82

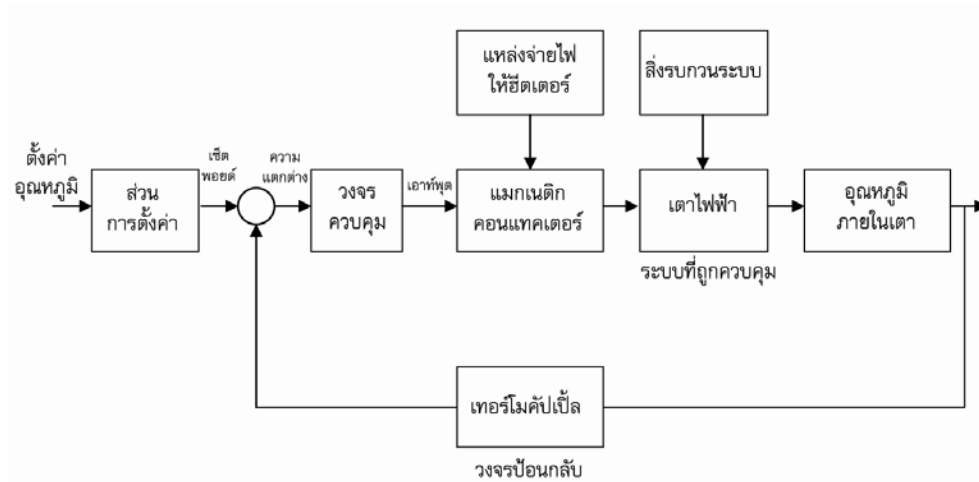
การควบคุมอุณหภูมิ

การควบคุมอุณหภูมิเป็นการควบคุมแบบระบบปิด โดยมีการตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการควบคุม (Set Point) ไว้ที่ตัวควบคุม เอาต์พุตของตัวควบคุมจะถูกต่อเข้ากับอุปกรณ์ที่เป็นตัวตัด/ต่อไฟให้กับแหล่งจ่ายความร้อน เช่น ฮีตเตอร์ อุณหภูมิของระบบจะถูกวัดโดยตัววัดอุณหภูมิ และส่งกลับมายังตัวควบคุมเพื่อเปรียบเทียบกับเซตพอยต์ ตัวควบคุมจะนำผลต่างที่ใช้ไปคำนวณเพื่อให้เอาต์พุตออกมาเพื่อทำให้อุณหภูมิที่วัดได้มีค่าเท่ากับเซตพอยต์ ดังรูปตัวอย่าง



รูปที่ 1 การควบคุมอุณหภูมิของระบบเตาเผาไฟฟ้า

จากรูป เตาเผาไฟฟ้าจะได้รับความร้อนจากฮีตเตอร์ เทอร์โมคัปเปิ้ลจะทำหน้าที่วัดอุณหภูมิในเตาแล้วส่งไปที่ตัวควบคุมที่ตั้งค่าเซตพอยต์ไว้ ถ้ามีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้กับค่าเซตพอยต์ (Deviation) ตัวควบคุมจะพยายามทำให้ความแตกต่างนั้นเหลือน้อยจนเท่ากับ 0 โดยจะทำการให้เอาต์พุต (Manipulate Variable: MV) ออกมา โดยตัวอย่างนี้ เอาต์พุตของตัวควบคุมเป็นรีเลย์หรือหน้าสัมผัสทำหน้าที่ตัดต่อไฟให้กับแมกเนติกคอนแทคเตอร์ที่เป็นตัวตัด/ต่อไฟให้กับฮีตเตอร์อีกทอดหนึ่ง บล็อกไดอะแกรมข้างล่าง แสดงถึงไดอะแกรมของการควบคุมอุณหภูมิของระบบเตาไฟฟ้านี้



รูปที่ 2 ไดอะแกรมของการควบคุมอุณหภูมิของระบบเตาไฟฟ้า

ส่วนประกอบของการควบคุมอุณหภูมิแบ่งออกเป็นส่วนหลักๆ ได้ดังนี้

1. เอาต์พุตของตัวควบคุม
2. อินพุตของตัวควบคุม
3. วิธีการควบคุมอุณหภูมิ
4. ฟังก์ชันของตัวควบคุม

รายละเอียดของส่วนประกอบดังกล่าวจะกล่าวถึงในบทถัดไป

เอาต์พุตของตัวควบคุม

เอาต์พุตของตัวควบคุมอุณหภูมิ แบ่งออกตามลักษณะการทำงานได้ 2 กลุ่มคือ

- เอาต์พุตควบคุม (Control Output)
- เอาต์พุตตามฟังก์ชัน (Functional Output)

2.1 เอาต์พุตควบคุม (Control Output)

เอาต์พุตควบคุม (Control Output) คือ เอาต์พุตที่ทำงานตามการควบคุมของตัวควบคุม โดยจะแปรเปลี่ยนไปตามค่า Manipulate Variable (MV) ที่คำนวณได้จากการควบคุม PID หรือ ON/OFF ซึ่งเอาต์พุตนี้จะทำหน้าที่ตอบสนองต่อค่าเซตพอยต์ (Target response) หรือ การรบกวนจากภายนอก (Disturbance response)

ลักษณะสัญญาณของเอาต์พุตควบคุมแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

1. เอาต์พุตแบบตัดต่อ (Pulse Output)
2. เอาต์พุตแบบอนาลอก (Analog Output)

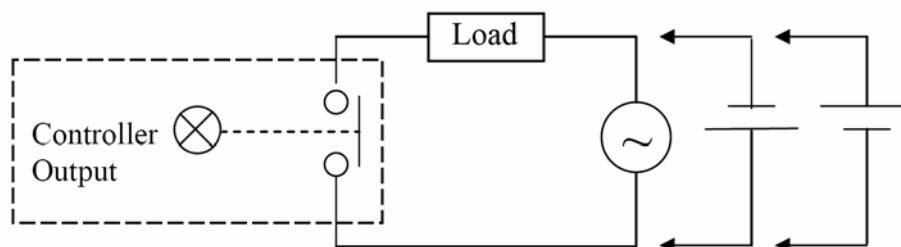
2.1.1 เอาต์พุตแบบตัดต่อ (Pulse Output)

เป็นเอาต์พุตที่ทำงานแบบดิจิทัล คือ ลอจิก 0 กับ 1 เท่านั้น เช่น เอาต์พุตแบบหน้าสัมผัส (Relay) หรือแบบแรงดัน (Voltage) สำหรับขับโซลิดสเตทรีเลย์ (SSR) หรือแบบโซลิดสเตทรีเลย์

2.1.1.1 เอาต์พุตหน้าสัมผัส (Relay Output)

เป็นเอาต์พุตที่นิยมใช้มากที่สุดเนื่องจากง่ายต่อการใช้งาน ทนทาน และทนกระแสได้สูง หลักการทำงานของเอาต์พุตแบบหน้าสัมผัสก็เหมือนกับ หน้าสัมผัสที่ใช้กับวงจรภาคพาวเวอร์ คือ เมื่อคอยล์รีเลย์ได้รับไฟจากตัวควบคุมจะทำให้แท่งโลหะที่ถูกพันอยู่ด้วยคอยล์นั้น แปรสภาพเป็นแม่เหล็กชั่วคราวขึ้น และดูดแผ่นเหล็กที่มีหน้าสัมผัสอยู่ลงมา ในกรณีเป็นแบบปกติเปิด หน้าสัมผัสกับเปลี่ยนมาต่อกัน หรือในกรณีปกติปิดหน้าสัมผัสจะจากออกจากกัน

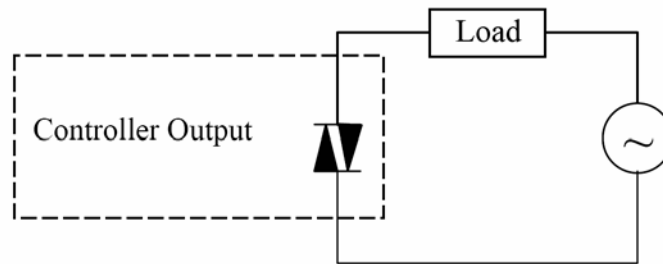
การอ่านสเปกของเอาต์พุตหน้าสัมผัส เช่น 250 VAC 5A (Resistive load) หมายความว่า หน้าสัมผัสใช้กับไฟ AC 250 V และทนกระแสไหลผ่าน (กระแสโหลด) ได้สูงสุด 5 A ในกรณีที่โหลดเป็นความต้านทาน



รูปที่ 3 วงจรภายในและการต่อใช้งานเอาต์พุตแบบหน้าสัมผัส

2.1.1.2 เอาต์พุตแบบโซลิดสเตทรีเลย์ (SSR)

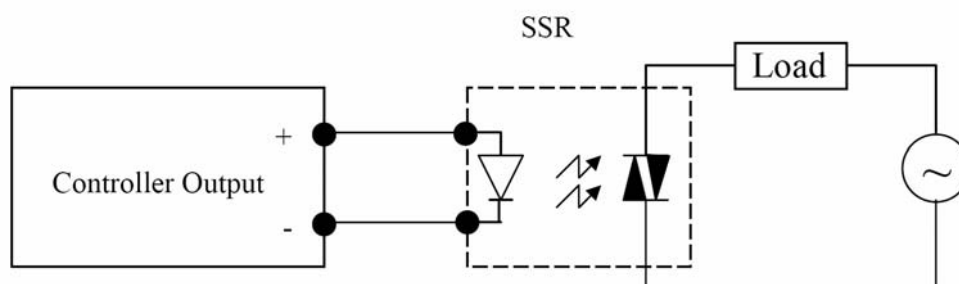
ในบางลักษณะงานต้องการความถี่ในการตัดต่อเอาต์พุตสูง ถ้าใช้เอาต์พุตแบบหน้าสัมผัส จะทำให้อายุการใช้งานของหน้าสัมผัสสั้น หรือเกิดการอาร์คของหน้าสัมผัส เอาต์พุตแบบ SSR ใช้หลักการของเซมิคอนดักเตอร์ในการตัดต่อวงจร จึงเหมาะสมกับงานที่ต้องการความถี่ในการตัดต่อสูง เพราะไม่มีส่วนของการเคลื่อนที่ เนื่องจากใช้หลักการการทะลุผ่านของสารกึ่งตัวนำที่นำมาสังเคราะห์ขึ้น อาจจะเป็นแบบทรานซิสเตอร์ (NPN, PNP) หรือไทรสเตอร์เช่น ไตรแอค เป็นต้น



รูปที่ 4 วงจรภายในและการต่อใช้งานของเอาต์พุตแบบ SSR

2.1.1.3 เอาต์พุตแรงดันสำหรับขับ SSR (Pulse Voltage for SSR)

เอาต์พุตชนิดนี้จะเป็นแรงดัน 12 หรือ 24 VDC เพื่อใช้สำหรับต่อเข้ากับอินพุตของเพาเวอร์โซลิดสเตตเรเลย์ (Power SSR) โดยเอาต์พุตนี้จะให้แรงดันเป็นลอจิก Hi กับ Lo เท่านั้นไม่เป็นเชิงเส้น (Linear) กล่าวคือ ถ้าเป็นเอาต์พุตแบบ 12 VDC เมื่อตัวควบคุมจ่ายเอาต์พุตนั้นคือจ่ายเอาต์พุต 12 VDC ไปยัง SSR ทันทีหรือถ้าไม่จ่ายก็จะเป็น 0 V ทันทีเช่นกัน เอาต์พุตแบบนี้นิยมใช้มากในงานที่ต้องการความถี่ในการตัดต่อสูง ง่ายต่อการต่อวงจร เพราะไม่ต้องการแหล่งจ่ายไฟจากภายนอกเหมือน เอาต์พุตแบบหน้าสัมผัสหรือ SSR



รูป 5 วงจรภายในและการต่อใช้งานของเอาต์พุตแบบแรงดันขับ SSR

ในกรณีสเปกของเอาต์พุตชนิดนี้เป็น 12 VDC 40 mA หมายถึงเอาต์พุต 12 VDC และสามารถจ่ายโหลดที่เป็น SSR ได้ 40 mA ในกรณีที่ต่อกับ SSR มากกว่า 1 ตัว ต้องตรวจสอบกระแสอินพุตของ SSR แต่ละตัวเช่น ถ้าแต่ละตัวใช้กระแส 12 mA ก็สามารถต่อได้ 3 ตัวเป็นต้น โดยปกติแล้ว SSR จะรับแรงดันอินพุตในช่วง 5 -32 VDC ได้ในกรณี SSR เป็นชนิดรับอินพุตแบบ DC

2.1.2 อนุาลอกเอาต์พุต (Analog Output)

เอาต์พุตอนุาลอกจะนิยมใช้กับงานที่ต้องการความเที่ยงตรงในการควบคุมสูง และมีความนุ่มนวลในการควบคุม โดยปริมาณเอาต์พุตจะแปรเปลี่ยนไปตามเปอร์เซ็นต์ที่ตัวควบคุมคำนวณได้ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าเอาต์พุตเป็นแบบกระแส 4 – 20 mA เอาต์พุตที่ตัวควบคุมจ่ายออกมาที่ 0% จะเท่ากับ 4 mA ในขณะที่ 100 % จะเท่ากับ 20 mA เป็นต้น อนุาลอกเอาต์พุตแบ่งออกเป็น 2 แบบดังนี้

2.1.2.1 เอาต์พุตกระแส (Current Output)

จะเป็นกระแสมาตรฐาน 0 – 20 mA และ 4 – 20 mA โดยการต่อกับโหลดต้องคำนึงถึงความต้านทานโหลดเป็นสำคัญ โดยทั่วไปสเปกของเอาต์พุตนี้จะระบุ เช่น 4 – 20 mA, Load 600 Ω Maximum หมายถึง ความต้านทานของโหลดที่นำมาต่อรวมต้องไม่เกิน 600 Ω เนื่องจากเอาต์พุตแบบนี้เปรียบเสมือนแหล่งจ่ายกระแส ถ้าความต้านทานของโหลดเกินกำหนดกระแสที่จ่ายจะไม่ได้ตามสเปก กระแสเอาต์พุตนี้ส่วนมากจะนิยมใช้กับ Proportion Value Phase Control หรือ Inverter เพื่อควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ เป็นต้น ข้อดีของเอาต์พุตแบบกระแสคือ ค่าความต้านทานในสายจะไม่มีผลต่อกระแสจ่ายตรงใดที่ความต้านทานในวงจรไม่เกินสเปก

2.1.2.2 เอาต์พุตแรงดัน (Voltage Output)

จะมีแรงดันในช่วงมาตรฐานคือ 0 – 5 V, 1 – 5 V, 0 -10 V และ ± 10 V สเปกจะระบุถึงความต้านทานต่ำสุดที่สามารถต่อกับเอาต์พุตชนิดนี้ได้ เช่น 0 ถึง 10 VDC Load Impedance 1 k Ω Min หมายถึงเอาต์พุตลิเนียร์ 0 ถึง 10 VDC สามารถต่อกับโหลดความต้านทานต่ำสุด 1 k Ω เพราะถ้าต่ำกว่านี้จะเกิดกระแสไหลผ่านวงจรสูงเกินสเปกได้ โดยเอาต์พุตแบบแรงดันที่ปรับเปลี่ยนได้นี้จะนำไปใช้กับโหลดที่ใช้ ปิด/เปิด เป็นสัดส่วนกับเอาต์พุตที่ได้รับไป เช่น Proportional Value หรือ Inverter

Final Elements

ในการควบคุมอุณหภูมิอุปกรณ์ที่ต่อกับโหลดไม่ว่าจะเป็น ฮีตเตอร์ แก๊ส หรือ ระบบน้ำเย็น โดยตรงคือ อุปกรณ์ที่เรียกว่า Final Elements เช่น คอนแทคเตอร์ โซลินอยด์ หรือเพาเวอร์โซลิดสเตทรีเลย์ Proportional Value ต่างๆ เป็นต้น เอาต์พุตจากตัวควบคุมมีหน้าที่ไปขับให้อุปกรณ์เหล่านั้นทำงานนั่นเอง



รูปที่ 6 Final Element แบบต่าง ๆ

2.2 เอาต์พุตตามฟังก์ชัน (Functional Output)

เป็นเอาต์พุตที่จะให้สัญญาณตามฟังก์ชันที่ตั้งไว้ โดยเอาต์พุตชนิดนี้เป็นอิสระจากการควบคุมของตัวควบคุม เอาต์พุตชนิดนี้เช่น

- ➡ Alarm Output
- ➡ Transfer Output
- ➡ Heater burnout Output

2.2.1 Alarm Outputs

Alarm เอาต์พุตเป็นเอาต์พุตช่วยในตัวควบคุม Alarm เอาต์พุตจะถูกกำหนดโดยผู้ใช้งานให้ทำงานตามเงื่อนไขที่ต้องการเช่น เมื่ออุณหภูมิสูงเกินหรือต่ำเกิน โดย Alarm เอาต์พุตจะทำงานตัดหรือต่อขึ้นอยู่กับการกำหนดว่าจะเป็นชนิด NO หรือ NC โดยปกติ Alarm เอาต์พุตจะเป็นแบบหน้าสัมผัส โดยอาจจะถูกต่อไว้กับไฟสัญญาณ หรือเสียงเพื่อแจ้งความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบตามที่ตั้งไว้ Alarm เอาต์พุตมีขั้นตอนการติดตั้งดังนี้

- เลือกชนิดของ Alarm หรือการทำงานของ Alarm ดังตารางต่อไปนี้

Set value	Alarm type	Alarm output operation		Description of function
		When alarm value X is positive	When alarm value X is negative	
0	Alarm function OFF	Output OFF		No alarm
1	Upper- and lower-limit *1		*2	Set the deviation in the set point by setting the alarm upper limit (H) and alarm lower limit (L). The alarm is ON when the PV is outside this deviation range.
2	Upper-limit			Set the upward deviation in the set point by setting the alarm value (X). The alarm is ON when the PV is higher than the SP by the deviation or more.
3	Lower-limit			Set the downward deviation in the set point by setting the alarm value (X). The alarm is ON when the PV is lower than the SP by the deviation or more.
4	Upper- and lower-limit range *1		*3	Set the deviation in the set point by setting the alarm upper limit (H) and alarm lower limit (L). The alarm is ON when the PV is inside this deviation range.
5	Upper- and lower-limit with standby sequence *1		*4	A standby sequence is added to the upper- and lower-limit alarm (1). *6
6	Upper-limit with standby sequence			A standby sequence is added to the upper-limit alarm (2). *6
7	Lower-limit with standby sequence			A standby sequence is added to the lower-limit alarm (3). *6
8	Absolute-value upper-limit			The alarm will turn ON if the process value is larger than the alarm value (X) regardless of the set point.
9	Absolute-value lower-limit			The alarm will turn ON if the process value is smaller than the alarm value (X) regardless of the set point.
10	Absolute-value upper-limit with standby sequence			A standby sequence is added to the absolute-value upper-limit alarm (8). *6
11	Absolute-value lower-limit with standby sequence			A standby sequence is added to the absolute-value lower-limit alarm (9). *6
12	LBA (alarm 1 type only)	-		*7
13	PV change rate alarm	-		*8
14	SP absolute value upper limit			This alarm type turns ON the alarm when the set point (SP) is higher than the alarm value (X).
15	SP absolute value lower limit			This alarm type turns ON the alarm when the set point (SP) is smaller than the alarm value (X).
16	MV absolute value upper limit *9			This alarm type turns ON the alarm when the manipulated variable (MV) is higher than the alarm value (X).
17	MV absolute value lower limit *9			This alarm type turns ON the alarm when the manipulated variable (MV) is smaller than the alarm value (X).
18	RSP absolute value upper limit *10			The alarm will turn ON when the remote SP (RSP) is larger than the alarm value (X).
19	RSP absolute value lower limit *10			The alarm will turn ON when the remote SP (RSP) is smaller than the alarm value (X).

ตารางที่ 1 ชนิดของ Alarm ที่สามารถเลือกได้

การทำงานของ Alarm Output มีการอ้างอิง 2 แบบคือ

1.1 อ้างอิงกับค่า Set Point

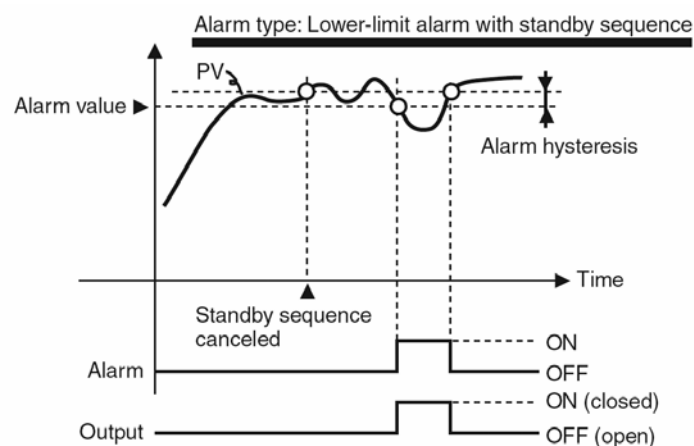
จากตารางการทำงานของ Alarm ตั้งแต่หมายเลข 1 ถึง 7 ค่า Alarm ที่ตั้งจะอ้างอิงกับค่า Set point ที่ตั้ง ตัวอย่าง เช่น ถ้า Set point เท่ากับ 100°C เลือกชนิด Alarm เป็นหมายเลข 2 คือ ทำงานเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า Set point และตั้งค่า X หรือค่า Alarm เท่ากับ 5°C Alarm เอาต์พุตจะทำงาน เมื่ออุณหภูมิสูงถึง $100^{\circ}\text{C} + 5^{\circ}\text{C} = 105^{\circ}\text{C}$ ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนค่า Set point ไปจุดทำงานของ Alarm เอาต์พุตก็จะเปลี่ยนตามไปด้วย

1.2 อ้างอิงจากศูนย์

Alarm เอาต์พุตจะทำงานตามค่าของ X ที่ตั้งไว้โดยอ้างอิงจากค่า "0" ดังการทำงานตั้งแต่หมายเลข 8 ถึง 11 ตัวอย่างเช่น ถ้าเลือกชนิด Alarm เป็นหมายเลข 8 และตั้งค่า X หรือค่า Alarm เท่ากับ 5°C Alarm เอาต์พุตจะทำงาน เมื่ออุณหภูมิเกิน 5°C ขึ้นไป โดยจะไม่สนใจว่า Set point เป็นเท่าไร

● ฟังก์ชัน Stand by Sequence ของ Alarm

ในบางกรณีการทำงานไม่ต้องการให้ Alarm ทำงานทันทีขณะเดินระบบใหม่ๆ โดยเฉพาะถ้าตั้งชนิด Alarm เป็นแบบค่าต่ำกว่า Set point เนื่องจากขณะเริ่มเดินระบบใหม่ๆ อุณหภูมิจะเริ่มจากค่าที่ต่ำกว่า Set point Alarm จะทำงานทุกครั้ง ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการ ฟังก์ชัน Standby sequence จะทำให้ Alarm ทำงานหลังจากค่าที่วัดได้ถึง Set point แล้ว 1 ครั้ง โดยตัวอย่างถ้าเลือกชนิดของ Alarm เป็นหมายเลข 7 และตั้งค่า Alarm ไว้ที่ 10°C Set point เท่ากับ 100°C ขณะเริ่มระบบอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้น จนถึงค่า Set point ที่ 100°C ขณะนี้ Alarm จะยังไม่ทำงานจนกว่าจะมีเหตุการณ์ที่ทำให้อุณหภูมิตกลงต่ำกว่า 90°C Alarm เอาต์พุตจึงจะทำงาน



รูปที่ 7 การทำงานของฟังก์ชัน Standby Sequence ของ Alarm

- การรีเซ็ตฟังก์ชัน Standby Sequence

ภายหลังจากฟังก์ชัน Standby Sequence ถูกยกเลิก (อุณหภูมิถึงค่าเซตพอยต์แล้ว 1 ครั้ง) ฟังก์ชัน Standby Sequence จะกลับมาทำงานอีกครั้งโดยสามารถเลือกเงื่อนไขได้ 2 เงื่อนไข ดังนี้

เงื่อนไข A

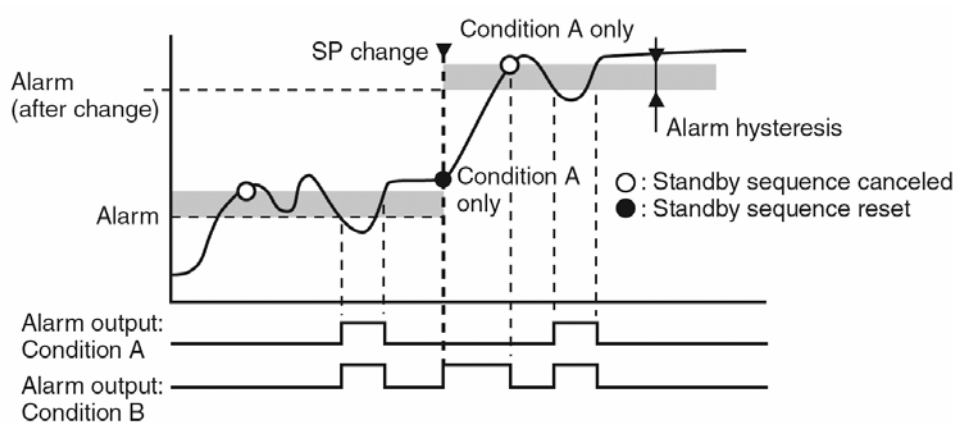
- ตัวควบคุมเริ่มทำงานอีกครั้ง (รวมถึงการปิด/เปิด ตัวควบคุมใหม่)
- การเปลี่ยนค่าเซตพอยต์
- การเปลี่ยนค่า Alarm (ชนิดสูงกว่า หรือต่ำกว่า)
- การเปลี่ยนค่าการชดเชยค่าแสดงผล (Input Shift)

เงื่อนไข B

- เฉพาะปิด/เปิด ตัวควบคุมใหม่

รูปตัวอย่างต่อไปนี้เป็นการทำงานของรีเซ็ตฟังก์ชัน Standby sequence ของตัว

ควบคุม



รูปที่ 8 การทำงานของรีเซ็ตฟังก์ชัน Standby sequence

- Alarm Latch การค้างสถานะของเอาต์พุต Alarm

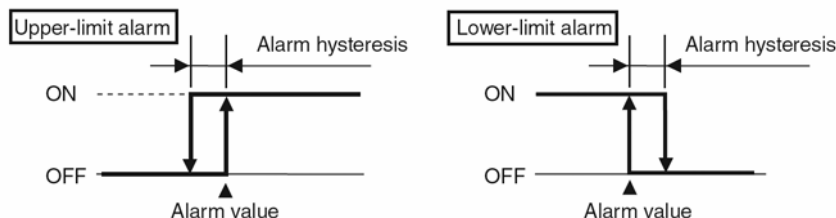
โดยปกติเอาต์พุต Alarm จะทำงานเมื่ออุณหภูมิถึงค่าที่ตั้งไว้ แต่เมื่ออุณหภูมิออกนอกช่วงที่ Alarm ทำงาน เอาต์พุตของ Alarm จะกลับสู่ภาวะปกติ ในบางการใช้งานถ้าต้องการให้เอาต์พุตของ Alarm ทำงานค้างตลอดถึงแม้ว่าอุณหภูมิจะไม่ได้อยู่ในเงื่อนไขแล้วก็ตาม ฟังก์ชัน Alarm Latch เป็นฟังก์ชันที่ช่วยให้ Alarm ทำงานค้างเมื่อถึงจุดที่ Alarm ทำงาน ฟังก์ชันจะถูกรีเซ็ตเมื่อปิด/เปิด ตัวควบคุมใหม่

- Close in Alarm / Open in Alarm (NO-NC Alarm Output)

โดยปกติที่โรงงานผู้ผลิตตั้งค่าการทำงานของหน้าสัมผัส Alarm จะเป็นแบบ Close in Alarm (Normally open) นั่นคือเมื่อ เอาต์พุต Alarm ทำงานหน้าสัมผัสจะเข้ามาต่อกัน แต่ในบางลักษณะงานต้องการใช้เอาต์พุต Alarm เพื่อตัดวงจร ดังนั้น ต้องตั้งค่าหน้าสัมผัสเป็นแบบ Open in Alarm หรือ NC (Normally Close) โดยภายหลังที่จ่ายไฟให้ตัวควบคุม หน้าสัมผัส Alarm จะต่อกันทันทีและจะจากออกเมื่อ Alarm ทำงาน

- Alarm Hysteresis

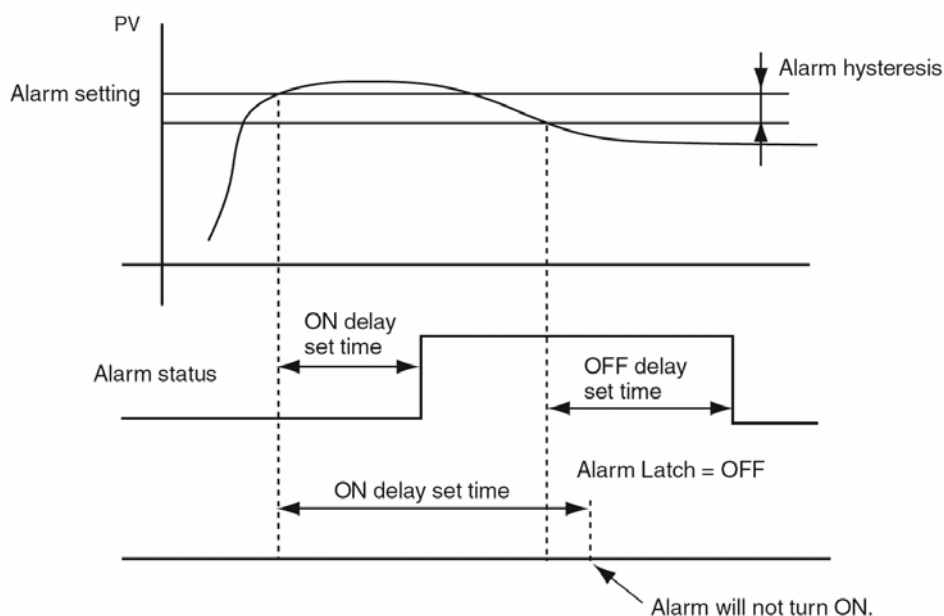
เป็นการตั้งค่าการกลับมารีเซ็ตเอาต์พุตของฟังก์ชัน Alarm ซึ่งโดยปกติ Alarm จะรีเซ็ตเอาต์พุตทันทีเมื่ออุณหภูมิออกจากเงื่อนไขที่ตั้งไว้ ดังเช่น ถ้าตั้งไว้ว่าถ้าอุณหภูมิเกิน 120°C Alarm จะทำงานเมื่ออุณหภูมิเกิน 120°C และจะรีเซ็ตเมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่า 120°C แต่ถ้าต้องการให้ Alarm ยังทำงานอยู่ระยะหนึ่งหลังจากที่อุณหภูมิต่ำกว่า 120°C ต้องตั้งค่าฮิสเตอร์สิสให้กับเอาต์พุต Alarm เช่น จากตัวอย่างเดิมถ้าตั้งค่าฮิสเตอร์สิสของ Alarm เท่ากับ 5°C เมื่ออุณหภูมิเกิน 120°C เอาต์พุต Alarm จะทำงาน แต่เมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 120°C เอาต์พุตของ Alarm จะยังคงทำงานอยู่จนกระทั่งอุณหภูมิต่ำกว่า 120°C ไป 5°C คือ 115°C เอาต์พุต Alarm จึงจะกลับมารีเซ็ต ดังรูป



รูปที่ 9 การทำงานของ Alarm Hysteresis

- Alarm Delay

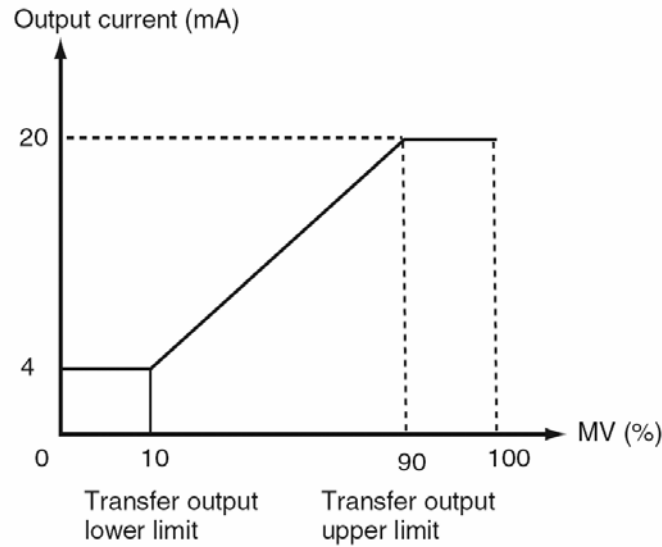
เอาต์พุต Alarm สามารถตั้งเวลาหน่วงการทำงานได้ ทั้งเริ่มทำงาน (Alarm on delay) และการรีเซ็ต (Alarm off delay) ดังรูป



รูปที่ 10 การทำงานของ Alarm Delay

2.2.2 Transfer Output

Transfer Output เป็นเอาต์พุต 4-20 mA ที่สามารถกำหนดได้ว่าค่าเอาต์พุตจะแปรเปลี่ยนไปตามค่าใด เช่น ถ้ากำหนดให้ Transfer Output เปลี่ยนไปตามค่า PV และย่านในการวัดนั้นเลือกใช้เป็นเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K ที่มีย่านการวัด -200 ถึง 1300°C เมื่อตัวควบคุมวัดอุณหภูมิได้ -200°C Transfer Output จะให้เอาต์พุต 4 mA และวัดได้ 1300°C Transfer จะให้เอาต์พุต 20 mA เป็นต้น Transfer Output นี้ สามารถนำไปใช้ประโยชน์เช่น ส่งไปยัง Recorder เพื่อพล็อตกราฟ หรือนำ Data logging ได้ นอกเหนือจากค่า PV แล้ว Transfer Output สามารถเปลี่ยนไปตามค่าอื่นๆ ได้เช่น ค่า MV หรือแม้กระทั่งค่า Set point Transfer Output สามารถทำสเกลได้ ดังรูป เป็นการนำสเกลในกรณีต้องการให้ Transfer Output แปรเปลี่ยนไปตามตัว MV

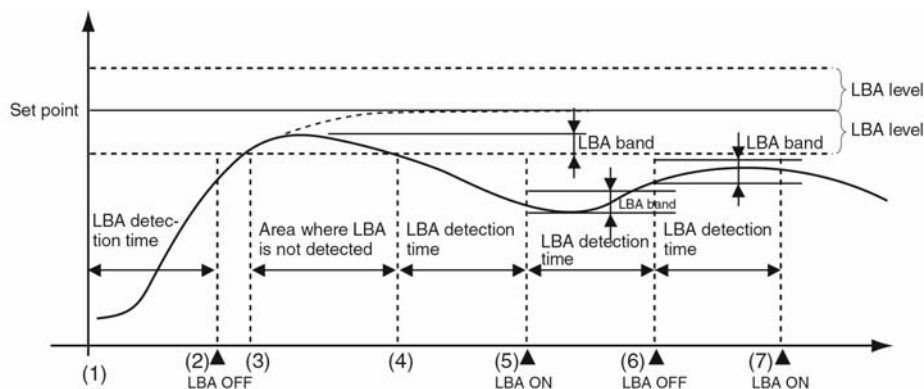


รูปที่ 11 การทำสเกล Transfer Output เป็นค่า MV

จากรูปถ้า MV ที่ค่าเท่ากับ 10% Transfer Output จะให้ Output 4 mA และถ้า MV เท่ากับ 100% Transfer Output จะให้ Output 20 mA

- Loop Burnout Alarm (LBA)

Loop Burnout Alarm (LBA) เป็นฟังก์ชันที่ใช้ตรวจสอบภาพรวมของการควบคุมทั้งหมดว่าผิดปกติหรือไม่ (มีการขาดวงจรหรือไม่) หลักการคือ LBA จะตรวจสอบว่า ความแตกต่างของการควบคุมซึ่งมาจากค่าเซตพอยต์ลบด้วยค่าที่วัดได้ (SP-PV) ออกนอกช่วงที่ตั้งไว้ (LBA Level) และถ้าความแตกต่างนี้ไม่สามารถถูกลดลงให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ (LBA detection band) ภายในเวลาที่กำหนด (LBA detection time) ตัวควบคุมจะให้เอาต์พุตออกมา



รูปที่ 12 การทำงานของฟังก์ชัน LBA

จากรูป ในช่วงที่ 1 – 2 : เป็นช่วงที่ความแตกต่างระหว่างเซตพอยต์กับค่าที่วัดได้ อยู่ นอกช่วง LBA level แต่ความแตกต่างนี้ถูกลดลงในอัตราที่มากกว่า LBA band ในระยะเวลา LBA detection time ดังนั้น LBA จะ OFF

ในช่วงที่ 3 – 4 : ค่าความแตกต่างอยู่ในช่วง LBA level ดังนั้น LBA จะไม่ทำงานหรือ OFF

ในช่วงที่ 4 – 5 : ค่าความแตกต่างออกนอกช่วง LBA Level และ ตัวควบคุมไม่สามารถลดความแตกต่างนี้ได้มากกว่า LBA band ภายในเวลา LBA detection time ดังนั้น เอาต์พุต LBA จะ ON

ในช่วงที่ 5 – 6 : ตัวควบคุมเริ่มจำกัดความแตกต่างจนเกินช่วง LBA band ภายใน ระยะเวลา LBA detection time ได้ จึงทำให้เอาต์พุต LBA OFF

ในช่วงที่ 6 -7 : ค่าความแตกต่างยังอยู่นอกช่วง LBA level และตัวควบคุมไม่สามารถ ลดความแตกต่างลงได้ ตาม LBA band ภายในระยะเวลา LBA detection time เอาต์พุต LBA จึง ON อีกครั้งหนึ่ง

โดยที่...

LBA Level

คือค่าที่ตั้งเพื่อให้ฟังก์ชัน LBA เริ่มทำการตรวจสอบระบบ เป็นค่าที่อ้างอิงจากเซต พอยต์เช่น $LBA\ level = 10^{\circ}C$ ถ้าเซตพอยต์เท่ากับ $100^{\circ}C$ ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า $90^{\circ}C$ เมื่อใด ฟังก์ชัน LBA จะเริ่มตรวจสอบระบบ โดยค่านี้ผู้ใช้งานจะต้องตั้งค่าเองตามความต้องการ

LBA band

คือค่าของอุณหภูมิที่ต้องการอย่างน้อยให้ตัวควบคุมลดความแตกต่างระหว่างค่าเซต พอยต์และค่าที่วัดได้ในช่วงเวลานึง เช่น $LBA\ band = 3^{\circ}C$ $LBA\ detection\ time$ เท่ากับ 1 นาที หมายความว่าโดยปกติ ตัวควบคุมต้องลดความแตกต่างระหว่างค่าเซตพอยต์กับค่าที่วัดได้ อย่าง น้อย $3^{\circ}C$ ภายใน 1 นาที

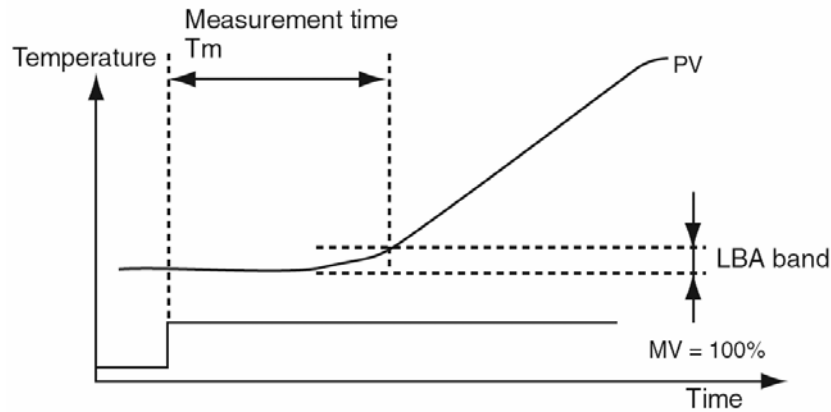
ตัวอย่าง ถ้าขณะนี้เซตพอยต์เท่ากับ $100^{\circ}C$ ค่าที่วัดได้เท่ากับ $30^{\circ}C$ เมื่อเวลาผ่านไป 1 นาที อุณหภูมิต้องมากกว่า $33^{\circ}C$ ($33-30 = 3^{\circ}C$) ถ้าไม่ถึง $33^{\circ}C$ LBA จะให้เอาต์พุตออกมา เพื่อแสดงว่าระบบมีจุดที่ขาดวงจรอยู่ที่ใดที่หนึ่ง ซึ่งค่า LBA band นี้ผู้ใช้งานต้องเป็นผู้กำหนดเอง โดยต้องศึกษาระบบของตนว่ามีคุณสมบัติของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างไร

LBA detection time

คือระยะเวลาที่ใช้ตรวจสอบการแก้ไขความแตกต่างระหว่างค่าเซตพอยต์กับค่าที่วัดได้ โดยทำงานร่วมกับ LBA band โดย LBA จะสามารถตั้งค่าได้โดยผู้ใช้งานเอง หรือ จากการทำ Auto-tuning ของตัวควบคุมได้

การตั้ง LBA detection time ด้วยตนเอง

ทำได้โดยการทดสอบระบบ โดยเริ่มต้นจ่ายเอาต์พุต 100% ให้กับโหลด (Step Response) และจับเวลาตั้งแต่เริ่มจ่ายเอาต์พุต จนอุณหภูมิสูงขึ้นจากเดิมเท่ากับค่า LBA band ที่ตั้งไว้ดังรูป เวลาที่ได้คือ T_m

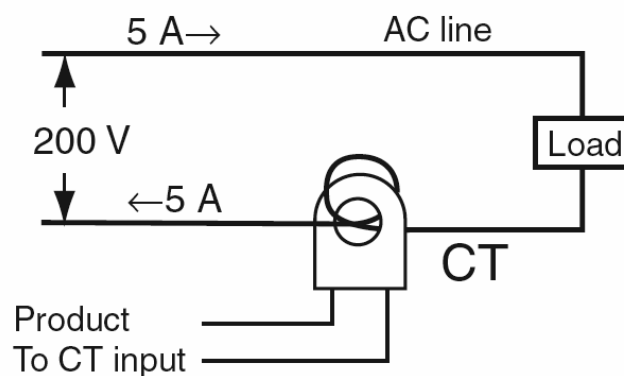


รูปที่ 13 การหา LBA detection โดยผู้ใช้งานเอง

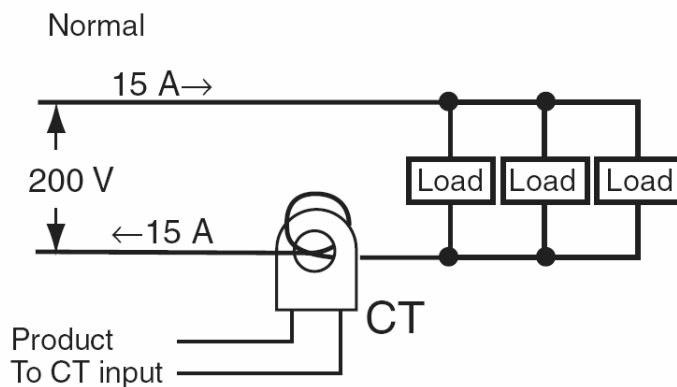
จากรูป LBA detection จะเท่ากับ $T_m \times 2$

2.2.3 Heater Burntout Alarm (HBA)

HBA หรือฟังก์ชันที่ใช้ตรวจจับฮีตเตอร์ขาด โดยจะให้สัญญาณเอาต์พุตออกมาเพื่อบอกผู้ใช้งาน ส่วนประกอบของการใช้งาน HBA ต้องมีหม้อแปลงกระแส (Current transformer, CT) คล้องกับสายไฟที่จ่ายไฟให้กับฮีตเตอร์ดังรูป



รูปที่ 14 การต่อ CT กับวงจรที่มีฮีตเตอร์เพียงตัวเดียว



รูปที่ 15 การต่อ CT กับวงจรที่มีฮีตเตอร์หลายตัว

จากรูปที่ 14 จะพบว่าถ้าฮีตเตอร์ขาด กระแสในวงจรจะเหลือ 0 A CT จะตรวจไม่พบกระแส ตัวควบคุมจึงสามารถรู้ว่าฮีตเตอร์ได้ ในรูปที่ 15 ถ้าพบว่าฮีตเตอร์ตัวใดตัวหนึ่งขาดไป กระแสรวมในวงจรจะลดลงจนตัวควบคุมสามารถตรวจจับได้เช่นกัน

● ขั้นตอนการใช้งาน HBA

1. ต้องมี CT เพื่อใช้ตรวจจับกระแส
2. ตัวควบคุมต้องมีฟังก์ชัน HBA
3. ทำการคำนวณค่าเซตพอยต์ให้กับ HBA โดยต้องทราบกระแสที่ใช้ของฮีตเตอร์แต่ละตัวเพื่อหากระแสรวม
4. ทำการคำนวณโดยคิดว่าถ้าฮีตเตอร์ขาดอย่างน้อย 1 ตัวกระแสรวมจะเหลือเท่าไรเพื่อเอามาคำนวณเป็นค่าเซตพอยต์ของ HBA โดยวิธีคำนวณทำได้ดังนี้

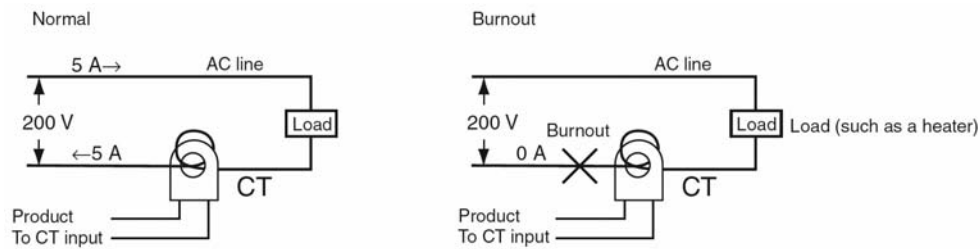
$$\text{HBA เซตพอยต์} = \frac{(\text{กระแสรวมปกติ}) + (\text{กระแสขณะฮีตเตอร์ขาด})}{2}$$

2

5. ตั้งค่าเซตพอยต์ของ HBA ที่ได้จากการคำนวณ ถ้าเมื่อใดที่กระแสที่ CT วัดได้ต่ำกว่าค่าเซตพอยต์นี้ ระยะเวลาที่พุตของตัวควบคุม ON ฟังก์ชัน HBA จะให้เอาต์พุตออกมา

ตัวอย่างการตั้งค่าเซตพอยต์

ตัวอย่างการใช้ HBA กับวงจรที่มีฮีตเตอร์ขนาด 1 kW 200 VAC ตัวเดียว

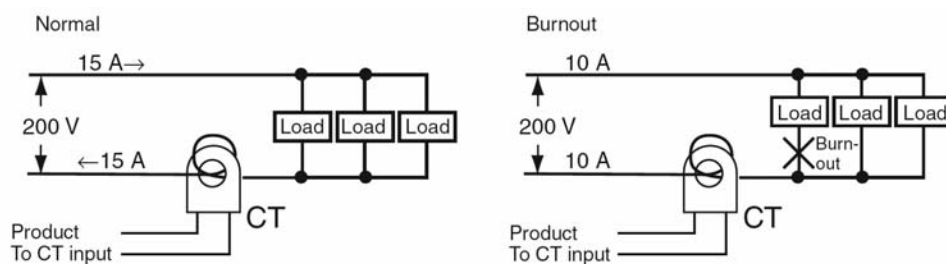


รูปที่ 16 การใช้ฟังก์ชัน HBA บนวงจรที่มีฮีตเตอร์ตัวเดียว

จากวงจรคำนวณกระแสรวมได้เท่ากับ 5 A เมื่อฮีตเตอร์ขาด กระแสจะเหลือ 0 A ดังนั้นค่าเซตพอยต์ของ HBA คือ

$$\text{HBA เซตพอยต์} = (5 + 0)/2 = 2.5 \text{ A}$$

ตัวอย่างการใช้ HBA กับวงจรที่มีฮีตเตอร์ขนาด 1 kW 200 VAC หลายตัว



รูปที่ 17 การใช้ฟังก์ชัน HBA บนวงจรที่มีฮีตเตอร์ 3 ตัว

จากวงจรคำนวณกระแสรวมได้เท่ากับ 15 A เมื่อฮีตเตอร์ขาดอย่างน้อย 1 ตัว กระแสจะเหลืออย่างมากสุด 10 A ดังนั้นค่าเซตพอยต์ของ HBA คือ

$$\text{HBA เซตพอยต์} = (15 + 10)/2 = 12.5 \text{ A}$$

อินพุตเซนเซอร์

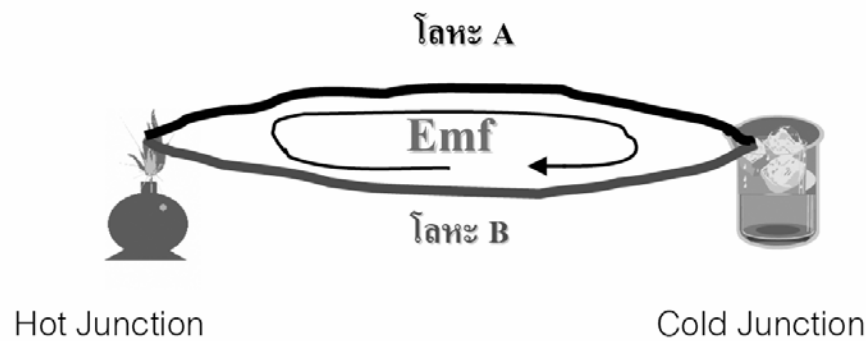
การควบคุมอุณหภูมิเป็นการควบคุมแบบลูปปิด นั่นคือจะต้องมีสัญญาณป้อนกลับมาจากระบบที่ควบคุมมาเปรียบเทียบกับเซตพอยต์เพื่อปรับแต่งการควบคุม อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณอุณหภูมิเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วส่งกลับไปที่ตัวควบคุมเรียกว่า “อินพุตเซนเซอร์”

อินพุตเซนเซอร์ที่นิยมใช้ในการควบคุมอุณหภูมิแบ่งออกเป็น 4 ประเภทคือ

1. เทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermocouple)
2. Resistance Thermometer Device (RTD)
3. เทอร์มิสเตอร์ (Thermister)
4. อินฟราเรด เซนเซอร์ (Infrared Sensor)

3.1 เทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermocouple)

เทอร์โมคัปเปิ้ลเป็นอุปกรณ์เปลี่ยนสัญญาณอุณหภูมิเป็นแรงดันไฟฟ้า หลักการของเทอร์โมคัปเปิ้ล คือการนำเอาโลหะสองชนิดต่างกันมาเชื่อมปลายทั้งสองเข้าด้วยกัน เมื่ออุณหภูมิที่ปลายทั้งสองมีความแตกต่างกันจะเกิดแรงดัน Emf (Electro motive force) ซึ่งบางครั้งเรียกว่าแรงดันซีเบค (Seebeck Voltage) ขึ้นดังรูป



รูปที่ 18 หลักการทำงานของเทอร์โมคัปเปิ้ล

จากรูปจะพบว่าเมื่อนำโลหะ A และ B ซึ่งเป็นโลหะที่ต่างชนิดกันมาเชื่อมปลายทั้ง 2 ข้างเข้าด้วยกัน และทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้ง 2 จะเกิดแรงดันปริมาณหน่วยเป็นมิลลิโวลท์ขึ้น ซึ่งแรงดันที่เกิดขึ้นนี้ ที่อุณหภูมิเดียวกัน แต่เทอร์โมคัปเปิ้ลที่ทำงานโลหะที่ต่างกันจะให้มิลลิโวลท์แตกต่างกันด้วย ซึ่งเป็นที่มาของเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิดต่าง ๆ ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

เทอร์โมคัปเปิ้ลสามารถแบ่งตามโลหะที่ใช้ทำได้ 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

1. ทำจากโลหะพื้นฐาน (Base Metal)
2. ทำจากโลหะหายาก (Rare Metal)

1. Base Metal Thermocouple

เทอร์โมคัปเปิ้ลกลุ่มนี้จะใช้วัสดุที่ใช้ทำเป็นโลหะที่หาง่าย ราคาถูก ดังนั้นเทอร์โมคัปเปิ้ลกลุ่มนี้จึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม เนื่องจากหาซื้อง่าย และราคาถูก ทั้งยังมีช่วงการใช้งานที่กว้างอีกด้วย

ชนิด	โลหะที่ใช้ทำ	ช่วงอุณหภูมิใช้งาน (°C)
E	Nickel-10% chromium (+) VS Copper-45% nickel (constantan) (-)	-200 ~ 900
J	Iron (+) VS Copper-45% nickel (constantan) (-)	0 ~ 750
K	Nickel-10% chromium (+) VS Nickel-5% (aluminum, silicon) (-)	-200 ~ 1250
N	Nickel-14% chromium, 1.5% silicon (+) VS Nickel-4.5% silicon-0.1% magnesium (-)	-270 ~ 1300
T	Copper (+) VS Copper-45% nickel (constantan) (-)	-200 ~ 350

ตารางที่ 2 เทอร์โมคัปเปิ้ลที่ทำจากโลหะพื้นฐาน

2. Rare metal Thermocouple

เป็นเทอร์โมคัปเปิ้ลกลุ่มที่ใช้วัสดุเป็นโลหะที่หายาก ราคาสูงมาทำได้แก่

ชนิด	โลหะที่ใช้ทำ	ช่วงอุณหภูมิใช้งาน (°C)
B	Platinum-30% rhodium (+) VS Platinum-6% rhodium (-)	0 ~ 1700
R	Platinum-13% rhodium (+) VS Platinum (-)	0 ~ 1450
S	Platinum-10% rhodium (+) VS Platinum (-)	0 ~ 1450

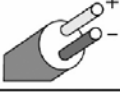
ตารางที่ 3 เทอร์โมคัปเปิ้ลที่ทำจากโลหะหายาก

ถ้าดูจากช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานจะพบว่าเทอร์โมคัปเปิ้ลแบบ Base metal มีช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานกว้างจึงถูกใช้งานในอุตสาหกรรมทั่วไป โดยเฉพาะชนิด K นั้นเป็นที่นิยมสูงสุด ส่วนมากแล้ว 90% ที่ใช้ในโรงงานเป็นเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K ส่วนชนิด B R และ S นั้นจะพบในอุตสาหกรรมบางประเภทที่ใช้อุณหภูมิสูง เช่น เซรามิก เกือบ 100 % ใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลทั้ง 3 ชนิดนี้

3.1.1 การระบุชนิดของเทอร์โมคัปเปิ้ล

ในกรณีไม่ทราบว่าเป็นเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ใช้อยู่ในเครื่องจักรเป็นชนิดใด วิธีตรวจสอบมีหลายวิธี เช่น สังเกตที่ตัวควบคุมอุณหภูมิว่าตั้งค่ารับอินพุตเป็นชนิดใด หรืออ่านรหัสชนิดที่สายเทอร์โมคัปเปิ้ลโดยตรง แต่มีอีกวิธีหนึ่งคือการเทียบรหัสสีของสายเทอร์โมคัปเปิ้ลกับตารางมาตรฐาน ซึ่งมาตรฐานสีของสายเทอร์โมคัปเปิ้ลนั้นมีหลายมาตรฐาน ดังนั้นจึงควรทราบว่าเครื่องจักรใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลมาตรฐานใด ง่ายที่สุดคือเครื่องจักรนั้นนำเข้าจากประเทศอะไรเทอร์โมคัปเปิ้ลควรจะเป็นมาตรฐานของประเทศ หรือภูมิภาคนั้น ๆ ตารางต่อไปนี้เป็นสีของสายเทอร์โมคัปเปิ้ลมาตรฐานของประเทศที่นิยมใช้กันทั่วโลกใช้เป็นประโยชน์ในการเทียบสีสายเทอร์โมคัปเปิ้ล

ตารางเทียบสีของสายเทอร์โมคัปเปิ้ล

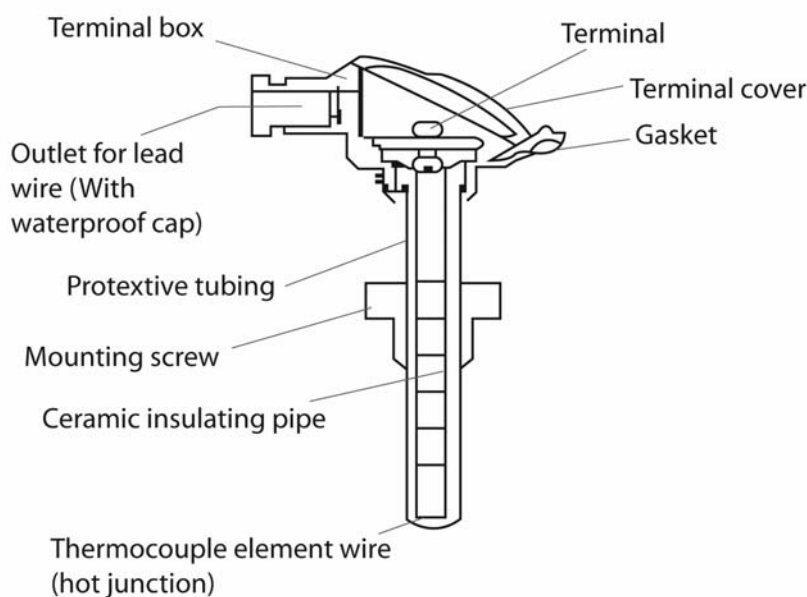
ANSI CODE	USA	British	German	Japanese
B		-		
E				
J				
K				
N			-	-
R,S				
T				

ตารางที่ 4 ตารางเทียบสีของสายเทอร์โมคัปเปิ้ล

สำหรับเทอร์โมคัปเปิ้ลนั้นชนิดที่แตกต่างกัน จะให้มิลลิโวลต์แตกต่างกัน (ยกเว้นที่ 0°C ที่มิลลิโวลต์จะเท่ากันทุกชนิด) ตัวอย่างเช่น ที่ 100°C เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K จ่ายเอาต์พุตออกมา 4.096 mV แต่เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด S จ่ายเพียง 0.646 mV เท่านั้น ตารางอุณหภูมิ-มิลลิโวลต์ของเทอร์โมคัปเปิ้ลแต่ละชนิดสามารถดูได้จากตาราง ITS-90 ในหนังสือ “Annual book of ASTM standards” (Volume 14.03) ที่ทางองค์กร ASTM จัดทำขึ้น ตาราง ITS-90 นี้มีประโยชน์มากในการสอบเทียบ (calibration) เทอร์โมคัปเปิ้ล โดยเทียบว่าเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิดนั้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ จ่ายแรงดันใกล้เคียงกับตารางเพียงใด

3.1.2 เทอร์โมคัปเปิลและส่วนประกอบ

ส่วนประกอบที่สำคัญ ในการใช้งานของเทอร์โมคัปเปิลมีหลายส่วน แต่ละส่วนนับแต่ตัวเทอร์โมคัปเปิลและส่วนประกอบอื่นๆ ก็ได้รับการออกแบบเพื่อให้เหมาะสมสอดคล้องกับสภาพที่จะนำไปใช้งาน และทำให้อายุการใช้งานยืนยาว



รูปที่ 19 โครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิ้ล

1. Thermocouple Element เป็นส่วนที่ประกอบด้วยเส้นลวดต่างชนิดกัน 2 เส้น เชื่อมปลายเข้าด้วยกัน เป็นจุดวัด (Measuring Junction) และหุ้มด้วยฉนวนซึ่งส่วนมากจะทำจาก เซรามิก ส่วนปลายสายอีกด้านจะต่อเข้ากับจุด (Terminal) ใน Thermocouple Head

2. Metal Sheath เป็นเปลือกโลหะครอบ ป้องกันตัวเทอร์โมคัปเปิ้ลชั้นแรก มักเรียก อีกชื่อว่า "Primary Protecting Tube" มีเพื่อให้สภาพของเทอร์โมคัปเปิ้ลเป็นชุดเรียบร้อยแข็งแรง พร้อมสะดวกที่จะนำไปใช้งาน คู่สายของเทอร์โมคัปเปิ้ลจะประกอบอยู่ภายใน Metal Sheath ซึ่ง ประกอบด้วยกัน 3 แบบใหญ่ ๆ

2.1 Exposed หรือ Bare Wire Junction

เป็นแบบที่จุดวัดจะเปลือยอยู่นอก Sheath ตัว Sheath และฉนวน มักทำไว้ให้ขยับตัว ได้ ให้ผลในการวัดรวดเร็ว ชำรุดเสียหายง่าย ไม่ทนต่อความดันหรือการไหล เพราะจุดวัด ไม่มีอะไร ป้องกัน อายุการใช้งานจึงสั้นกว่าแบบอื่นๆ



รูปที่ 20 โครงสร้างเทอร์โมคัปเปิ้ลแบบ Exposed หรือ Bare Wire Junction

2.2 Ground Junction

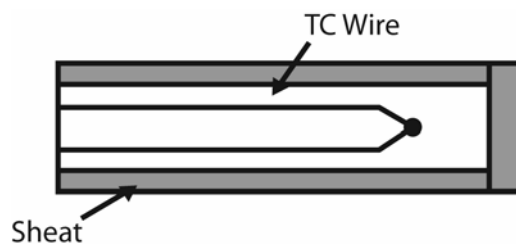
แบบนี้คู่สายของเทอร์โมคัปเปิล ส่วนที่เป็นจุดวัดนั้น จะเชื่อมติดกับ Sheath ใน Inert Gas แบบนี้จะทนความดัน การไหล หรือ ความเสียหายจากการถูกระทบกระแทกได้ดีเนื่องจากมี Sheath หุ้มหมด ดังนั้นผลในการวัดจะช้ากว่าแบบเปลือย แต่มีอายุการใช้งานยาวนานกว่าการทำต้องเลือก Sheath และสายเทอร์โมคัปเปิลที่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อนที่เท่าๆ กัน ข้อเสียของโครงสร้างแบบนี้คือ ถ้าเทอร์โมคัปเปิลแตะถูกกับส่วนที่มีกระแสไฟฟ้ารั่ว กระแสไฟฟ้าจะสามารถไหลเข้าไปในเส้นโลหะที่เป็น Thermocouple element ซึ่งมีผลต่อการวัด หรืออาจเข้าไปทำลายภาคอินพุทของตัวควบคุมอุณหภูมิได้



รูปที่ 21 โครงสร้างเทอร์โมคัปเปิลแบบ Ground Junction

2.3 Ungrounded หรือ Isolate Junction

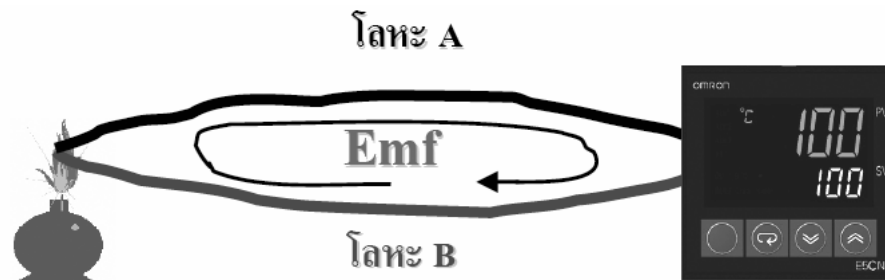
จุดวัดและสายจะถูกห่อหุ้มอยู่ภายใน Sheath และจุดวัดจะไม่สัมผัสกับ Sheath เลย ทำให้ผลของการวัดช้ากว่าทุกแบบ แต่ทนทานที่สุดและมีราคาแพงกว่าทุกแบบ ใช้กับบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าได้ดีกว่าแบบอื่นๆ



รูปที่ 22 โครงสร้างเทอร์โมคัปเปิลแบบ Ungrounded หรือ Isolate Junction

3.1.3 การต่อเทอร์โมคัปเปิลกับตัวควบคุมอุณหภูมิ

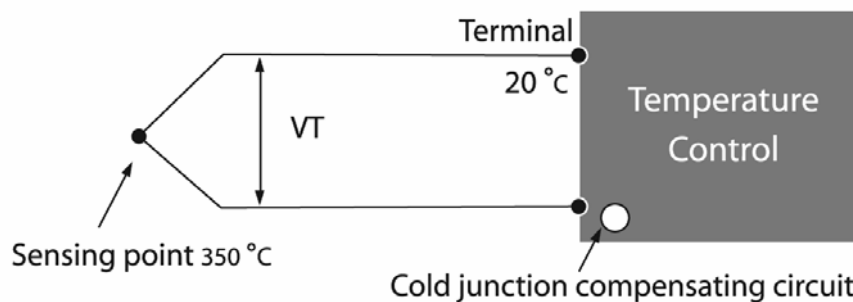
จากรูปที่ 18 เทอร์โมคัปเปิลจะมี 2 จุดต่อ คือ จุดต่อด้านร้อน (Hot Junction) และจุดต่อด้านเย็น (Cold Junction) Hot Junction จะเป็นส่วนที่ใช้วัดอุณหภูมิที่เราต้องการ ส่วน Cold Junction จะถูกต่อเข้ากับตัวควบคุมอุณหภูมิดังรูปที่ 23



รูปที่ 23 การต่อใช้งานเทอร์โมคัปเปิลกับตัวควบคุมอุณหภูมิ

3.1.4 วงจรชดเชยของจุดต่อด้านเย็น (Cold Junction Compensating Circuit)

เป็นที่ทราบกันแล้วว่า เทอร์โมคัปเปิลจะจ่ายสัญญาณแรงดันออกมา ซึ่งดูจากรูปด้านต่อไป่นี้



รูปที่ 24 การต่อเทอร์โมคัปเปิลกับตัวควบคุม

จากรูป ถ้าอุณหภูมิที่วัดขณะนั้นเท่ากับ 350 °C ขณะที่อุณหภูมิที่จุด Cold Junction ในตัวควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 20 °C จะเห็นว่ามีค่าความแตกต่างกันของปลายทั้ง 2 ข้าง ของเทอร์โมคัปเปิลจะเกิดแรงดัน (VT) โดยมีสมการดังนี้

$$VT = K (350 - 20)$$

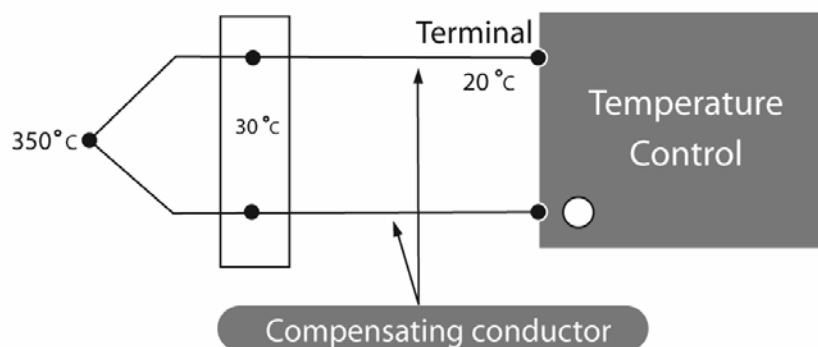
ถ้าพิจารณาสมการจะพบว่าสัญญาณที่เข้าไปในตัวควบคุมอุณหภูมิจริงจะเท่ากับ 330°C ดังนั้นผู้ผลิตตัวควบคุมอุณหภูมิทุกรายจะต้องเพิ่มวงจรชดเชย หรือ Cold Junction Compensating Circuit (CJC) ในภาคอินพุทของตัวควบคุมอุณหภูมิทุกตัว วงจรนี้จะมีตัววัดอุณหภูมิในตัวควบคุมอุณหภูมิแล้วนำไป ชดเชยกับสัญญาณที่ได้รับมาจากเทอร์โมคัปเปิ้ล ซึ่งในตัวอย่างนี้ CJC วัดได้ 20°C สมการจะเปลี่ยนไปดังนี้

$$V_T = K (350 - 20) + K 20 = K 350$$

CJC ในตัวควบคุมของผู้ผลิตบางรายสามารถตั้งให้ใช้งานหรือไม่ใช้ก็ได้ การไม่ใช้งาน CJC จะมีประโยชน์เวลาทำการสอบเทียบ (Calibration) ตัวควบคุมอุณหภูมิ โดยผู้สอบเทียบสามารถใช้แหล่งจ่ายแรงดันมาตรฐาน (Standard DC Source) จ่ายแรงดันโดยดูจากตารางอุณหภูมิ - แรงดัน ของเทอร์โมคัปเปิ้ลแต่ละชนิด เข้าโดยตรงที่ตัวควบคุมได้เลย ซึ่งตัวควบคุมก็จะอ่านค่าตรงกับตารางดังกล่าวไม่มีผลของ CJC มาเกี่ยวข้องและที่สังเกตได้อีกอย่างหนึ่งก็คือ ในตัวควบคุมอุณหภูมิที่รับสัญญาณเทอร์โมคัปเปิ้ล ถ้าไม่ต่อสายเทอร์โมคัปเปิ้ล แต่เพียงช้อนเทอร์มินอลที่ใช้ต่อเทอร์โมคัปเปิ้ลนั้น ตัวควบคุมอุณหภูมิจะแสดงผลอุณหภูมิได้ ซึ่งก็คืออุณหภูมิ ณ จุด CJC นั้นเอง

3.1.5 สายต่อขยายของเทอร์โมคัปเปิ้ล (Extension Wire)

กรณีต้องทำการต่อขยายสายเทอร์โมคัปเปิ้ล จากหลักการที่ว่าแรงดันที่เกิดจากเทอร์โมคัปเปิ้ลจะขึ้นอยู่กับโลหะที่ใช้ทำ ดังนั้นถ้าเอาโลหะต่างชนิดกับเทอร์โมคัปเปิ้ลเดินมาต่อ เช่น ลวดทองแดงจะทำให้ แรงดันเพี้ยนไป ดังนั้นสายที่นำมาต่อต้องเป็นสายที่มีโลหะเหมือนกับเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ใช้อยู่ เรียกว่าสาย Extension Wire



รูปที่ 25 การต่อขยายสายเทอร์โมคัปเปิ้ล

จากรูปจะพบว่ามีจุดต่อ 3 จุด คือจุดที่วัดอุณหภูมิ จุดที่ต่อขยายและจุด CJC ซึ่งสมการจะเปลี่ยนเป็นดังนี้

$$VT = K (350 - 30) + K (30 - 20) + K.20 = K.350$$

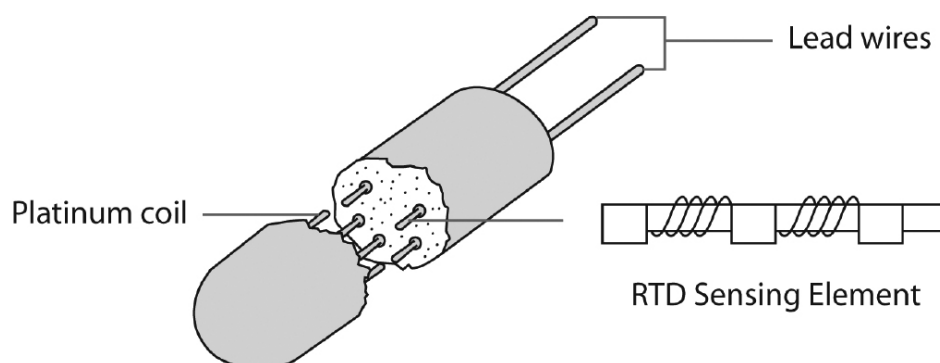
จากสมการจะพบว่าถ้าใช้สายที่ไม่ใช่โลหะชนิดเดียวกัน มาต่อเพิ่ม ค่าสัมประสิทธิ์ของโลหะ K จะไม่เหมือนกัน ทำให้ผลการวัดผิดพลาดไป

สาย Extension Wire มี 2 แบบ คือ

- แบบที่ 1 เป็นแบบที่ทำมาจากโลหะไม่เหมือนกันกับเทอร์โมคัปเปิล แต่ให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าความร้อนเหมือนกับเทอร์โมคัปเปิลทุกประการ สายชนิดนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “Compensating Extension Wire”
- แบบที่ 2 ทำมาจากโลหะเหมือนกันกับเทอร์โมคัปเปิล แต่ฉนวนไฟฟ้าไม่ดีเท่าเทอร์โมคัปเปิล ส่วนสีของสายจะเหมือนกับสายเทอร์โมคัปเปิล

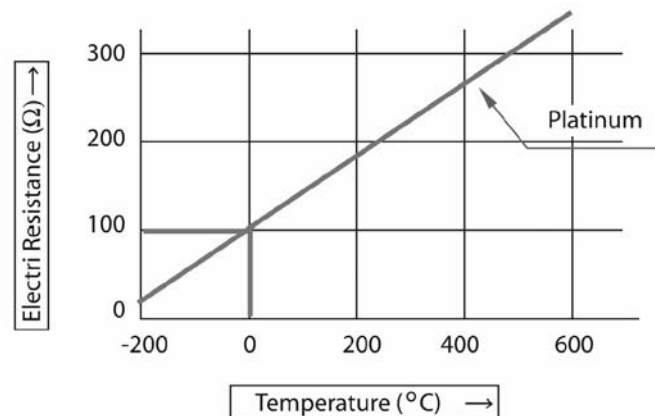
3.2 Resistance Thermometer Device (RTD)

RTD เป็นอินพุตเซนเซอร์ที่อาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงโดยจะแปรผันตรงกัน กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานของ RTD ก็เพิ่มขึ้นด้วย RTD ที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ Pt100 โดยใช้วัสดุจากธาตุทองคำขาว (Platinum) มาทำเป็นเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ



รูปที่ 26 โครงสร้างของ RTD แบบ Pt100

คุณสมบัติเด่นของ Pt100 คือมีความเป็นเชิงเส้นสูง นั่นคือความต้านทานที่เปลี่ยนไปต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจะเป็นสัดส่วนคงที่ ดังนั้น Pt100 จึงสามารถคำนวณหาอุณหภูมิที่วัดได้ เมื่อรู้ค่าความต้านทานที่ตัวมัน Pt100 จะมีช่วงของการวัดอยู่ที่ประมาณ -200°C ถึง 850°C และมีช่วงของความต้านทานอยู่ที่ประมาณ 18 ถึง 400Ω โดยที่อุณหภูมิ 0°C Pt100 จะมีความต้านทาน 100Ω พอดี

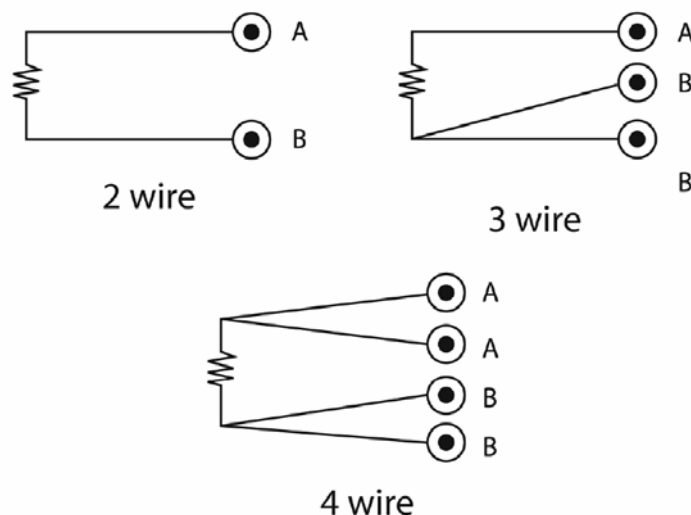


รูปที่ 27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานของ Pt100

Pt100 มีอยู่หลายมาตรฐาน ซึ่งแตกต่างกันที่ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปต่อ 1 หน่วยของอุณหภูมิ เช่น Pt100 มาตรฐานเยอรมัน ที่อุณหภูมิ 0°C Pt100 จะมีความต้านทาน 100Ω แต่ที่อุณหภูมิ 100°C จะมีความต้านทาน 138.5Ω นั่นคือ ความต้านทานเปลี่ยนไป 0.385Ω ทุกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 1°C ในขณะที่ Pt100 มาตรฐานญี่ปุ่น หรือ jPt100 ที่อุณหภูมิ 0°C jPt100 จะมีความต้านทาน 100Ω แต่ที่อุณหภูมิ 100°C จะมีความต้านทาน 139.2Ω นั่นคือ ความต้านทานเปลี่ยนไป 0.392Ω ทุกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 1°C ดังนั้นการที่ต้องทราบค่า Pt100 ที่ใช้อยู่เป็นมาตรฐานใดจึงเป็นสิ่งสำคัญ

3.2.1 ชนิดของ Pt100

Pt100 แบ่งตามจำนวนสายได้ 3 ชนิดดังรูป



รูปที่ 28 Pt100 แบบ 2 สาย 3 สาย และ 4 สาย

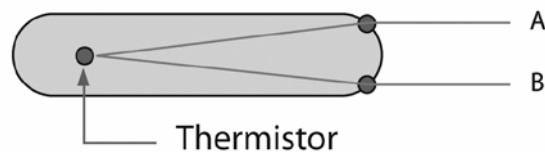
โดยที่ Pt100 อาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงความต้านทานตามอุณหภูมิ เอาต์พุตจาก Pt100 ก็คือความต้านทานนั่นเอง ดังนั้นถ้าค่าความต้านทานผิดไปจะทำให้การวัดคลาดเคลื่อน ความต้านทานในสาย Pt100 จึงถูกนำมาพิจารณาด้วย Pt100 แบบ 2 สายจะมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากผลของค่าความต้านทานในสายมากที่สุด ส่วน Pt100 แบบ 4 สายจะมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดราคาจึงสูงที่สุดเช่นกันเหมาะสำหรับงานที่ต้องการความเที่ยงตรงสูงมาก แต่ประเภทที่นิยมใช้กันมากที่สุดในงานอุตสาหกรรมจะเป็นแบบ 3 สาย ดังนั้นจะพบว่าที่เทอร์มินอลอินพุตของตัวควบคุมที่รับอินพุตแบบ RTD จะมี 3 เทอร์มินอลให้เข้าสายคือ A B และ B

3.2.2 การต่อขยายสายของ RTD

ความต้านทานสายของ RTD เป็นปัจจัยสำคัญในการวัดที่เที่ยงตรงของ RTD เพราะถ้าความต้านทานคลาดเคลื่อนไปเพียง 0.385Ω อุณหภูมิจะเปลี่ยนไป 1°C วงจรภาคอินพุตของตัวควบคุมที่รับอินพุตแบบ RTD จะถูกออกแบบมาเป็นแบบบริดจ์สมดุล คือจะมีความต้านทานคงที่ในบริดจ์ 3 ตัว ส่วนตัวที่ 4 จะเป็นความต้านทานจาก RTD นั่นเอง เมื่อความต้านทานของ RTD เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิจะทำให้บริดจ์ไม่สมดุลเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นในวงจรบริดจ์ ซึ่งจะนำไปเข้าวงจรประมวลผลแสดงค่าอุณหภูมิที่วัดได้ ใน RTD แบบ 2 สายความต้านทานของสายจะมีผลต่อการวัดมาก แต่ใน RTD แบบ 3 และ 4 สายวงจรบริดจ์จะถูกออกแบบให้สามารถชดเชยความต้านทานในสายให้หมดไปได้ แต่สายทุกเส้นต้องมีความต้านทานเท่ากัน กล่าวคือสายที่นำมาต่อเพิ่มต้องเป็นสายชนิดเดียวกันที่มีความยาว และขนาดเท่ากันทุกเส้น

3.3 เทอร์มิสเตอร์ (Thermistor)

เทอร์มิสเตอร์ เป็นตัววัดอุณหภูมิแบบสารกึ่งตัวนำที่ใช้หลักการการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป แต่จะมีทั้งการเปลี่ยนแปลงแบบสัมพัทธ์ตรงและผกผัน



รูปที่ 29 โครงสร้างของเทอร์มิสเตอร์

3.3.1 เทอร์มิสเตอร์ที่มีสัมประสิทธิ์ความต้านทานต่ออุณหภูมิเป็นลบ (Negative Temperature Coefficient, NTC)

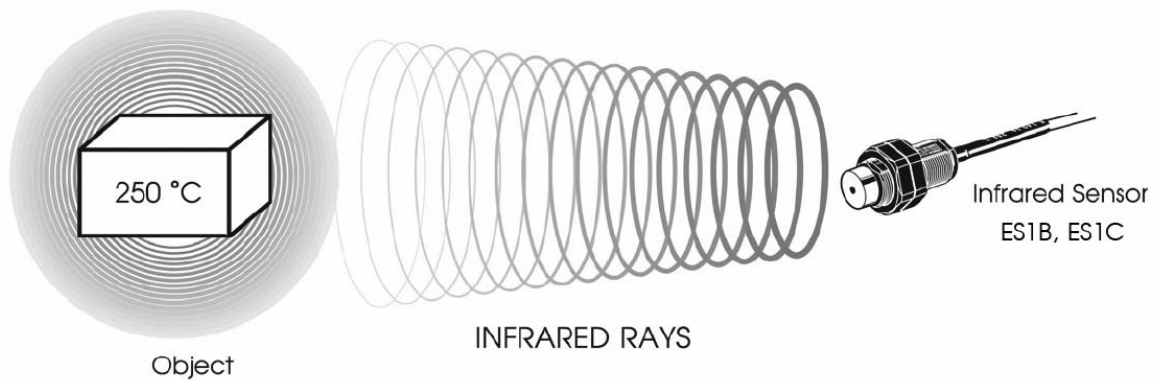
เป็นเทอร์มิสเตอร์ที่ความต้านทานลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่มีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานสูงมากเมื่อเทียบกับ RTD ตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิ 0°C NTC มีความต้านทาน $10\text{ k}\Omega$ แต่ที่อุณหภูมิ 100°C NTC จะมีความต้านทานลดลงเหลือเพียง 200Ω เท่านั้น ด้วยความไวต่อการเปลี่ยนแปลงมาก เทอร์มิสเตอร์แบบนี้จึงเหมาะกับงานที่ต้องการวัดความแตกต่างของอุณหภูมิที่ชัดเจน แต่เทอร์มิสเตอร์มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานจึงจำกัดอยู่ในช่วงแคบๆ เป็นช่วง ๆ ไป เช่นช่วง $50\text{-}150^{\circ}\text{C}$ หรือ $150\text{-}250^{\circ}\text{C}$ เป็นต้น

3.3.2 เทอร์มิสเตอร์ที่มีสัมประสิทธิ์ความต้านทานต่ออุณหภูมิเป็นบวก (Positive Temperature Coefficient, PTC)

เป็นเทอร์มิสเตอร์ที่ความต้านทานเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยค่าความต้านทานของ PTC จะมีค่าต่ำที่อุณหภูมิต่ำ แต่จะเปลี่ยนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมากเมื่อถึงอุณหภูมิถึงจุด ๆ หนึ่ง PTC บางชนิดมีการเติมสารเจือปนลงไปเพื่อให้มีความเป็นเชิงเส้น และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบเรียบขึ้นได้ PTC ส่วนมากจะนำไปตัดต่อวงจรให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วยหลักการที่ขณะที่กระแสปกติอุณหภูมิที่ PTC จะต่ำ แต่เมื่อกระแสสูงเกินกำหนดความต้านทานของ PTC จะสูงมากจนเปรียบเสมือนการตัดวงจรออกไป เมื่อ PTC จะเย็นลงและความต้านทานก็จะลดลงทำให้วงจรกลับมาต่ออีกครั้ง

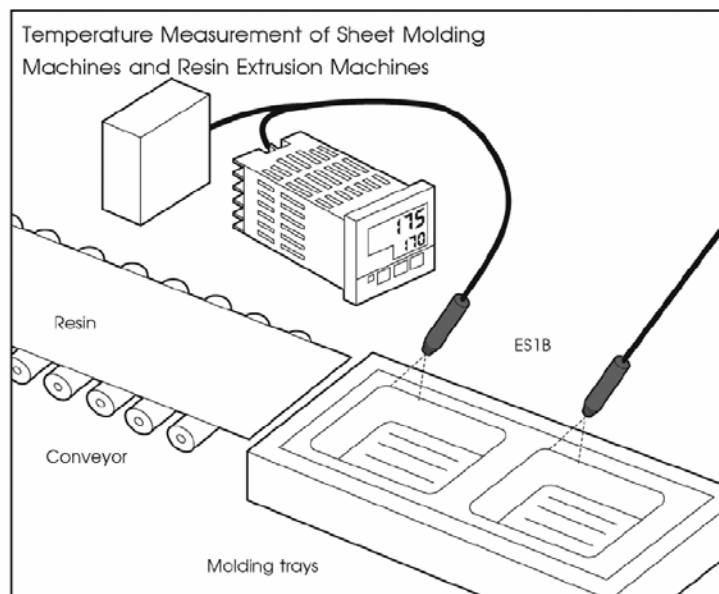
3.4 อินฟราเรดเซนเซอร์ (Infrared Sensor)

เซนเซอร์ตรวจจับอุณหภูมิชนิดนี้เหมาะสำหรับงานที่ไม่สามารถติดตั้งตัวเซนเซอร์กับงานได้ เช่นอุณหภูมิในอาหารที่มีการควบคุมเรื่อง HACCP หรือวัตถุที่มีการเคลื่อนที่เช่นลูกกลิ้ง เป็นต้น



รูปที่ 30 อินฟราเรดเซนเซอร์

อินฟราเรดเซนเซอร์จะใช้หลักการตรวจจับการแผ่รังสีอินฟราเรดจากวัตถุที่ต้องการวัดอุณหภูมิ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Radiation Thermometer โดยเอาต์พุตที่ได้จากอินฟราเรดเซนเซอร์นี้บางครั้งจะเป็น mV ที่มีปริมาณเทียบเท่ากับเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K หรือสัญญาณอนาลอก 4-20 mA.



รูปที่ 31 การใช้งานอินฟราเรดเซนเซอร์

วิธีการควบคุมอุณหภูมิ

การควบคุมอุณหภูมิ คือ การทำให้อุณหภูมิในระบบที่เราต้องการควบคุมมีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่เราตั้งไว้ (Set point) ในระบบการควบคุมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ระบบคือ ระบบเปิด (Open Loop Control) หรือ Sequence Control และระบบปิด (Close Loop Control) หรือ Feedback Control การควบคุมอุณหภูมิเป็นการควบคุมระบบปิด

- **การควบคุมแบบระบบเปิด (Open Loop Control หรือ Sequence Control)**

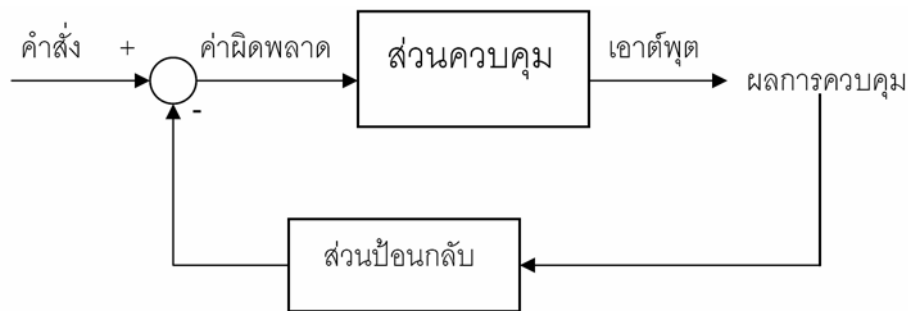
เป็นการควบคุมที่เป็นการสั่งงานเป็นขั้นตอนหรือ กำหนดเป็นเวลาให้ระบบทำงาน เช่น การปิด/เปิดไฟสัญญาณจราจร การตั้งเวลาปิด/เปิดแอร์ในตัวควบคุมชุดสายโทรศัพท์ เป็นต้น ซึ่งการควบคุมนี้จะไม่คำนึงถึงผลของการควบคุม เพียงแต่ทำให้การทำงานของระบบเป็นไปตามลำดับขั้นเท่านั้น



รูปที่ 32 ไตรอะแกรมของการควบคุมแบบระบบเปิด (Open Loop Control)

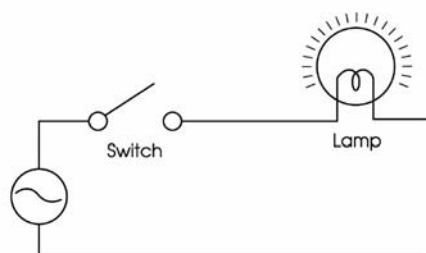
- **การควบคุมแบบระบบปิด (Close Loop Control หรือ Feed back Control)**

เป็นการควบคุมที่คำนึงถึงผลของการควบคุมตลอดเวลา โดยจะมีการวัดผลของการควบคุมเปรียบเทียบกับค่าที่เราต้องการ ตัวควบคุมจะทำการเปิด/ปิด เอาต์พุตเพื่อให้ค่าที่วัดได้เท่ากับค่าที่ตั้งไว้ การควบคุมแบบนี้เป็นหลักการของการควบคุมทั่วไป เช่น การควบคุมอุณหภูมิ การควบคุมระดับน้ำ การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ เป็นต้น



รูปที่ 33 ไตอะแกรมของการควบคุมแบบระบบปิด (Close Loop Control)

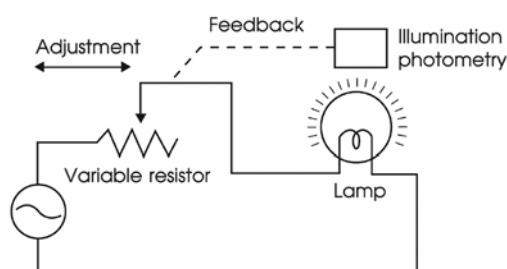
ยกตัวอย่างการควบคุมทั้ง 2 แบบกับระบบแสงสว่างระบบหนึ่ง ในการควบคุมแบบระบบเปิด หลอดไฟจะเปิดเองอัตโนมัติโดยการตั้งเวลาไว้ทุกเย็นประมาณ 18:00 น. ดังรูป



รูปที่ 34 การควบคุมหลอดไฟแบบระบบเปิด

แต่เนื่องจากแต่ละฤดูความสว่างในช่วงเวลา 18:00 น. จะแตกต่างกัน ในฤดูร้อนการเปิดไฟเวลา 18:00 น. อาจจะเร็วเกินไป หรือในฤดูหนาวการเปิดไฟ ในเวลาเดียวกันนี้อาจช้าเกินไป ซึ่งการควบคุมแบบนี้ไม่มีตัวตรวจสอบที่จะปรับเปลี่ยนการเปิดไฟให้เหมาะสมกับความมืด

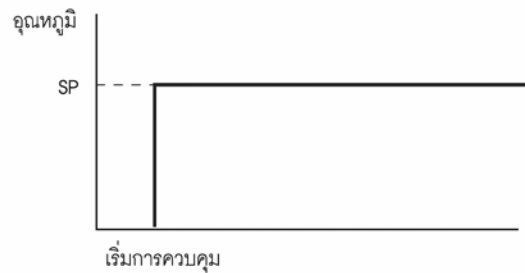
แต่ในการควบคุมแสงสว่างแบบระบบปิด ได้มีการเพิ่มการตรวจวัดสภาพแสงสว่าง ณ เวลานั้นและได้ใช้ตัวปรับแรงดัน เพื่อปรับความสว่างของหลอดไฟให้เหมาะสมกับความสว่างของเวลานั้นๆ ดังนั้น ระบบการควบคุมแสงสว่างนี้ ความสว่างของหลอดไฟจะสามารถปรับได้อัตโนมัติโดยอาศัยการตรวจสอบสภาพความสว่าง ณ บริเวณควบคุมและนำมาปรับความสว่างหลอดไฟให้เพียงพอต่อแสงสว่างที่ต้องการ ดังรูป



รูปที่ 35 การควบคุมหลอดไฟแบบระบบปิด

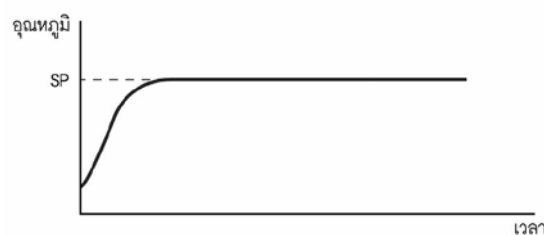
➡ การควบคุมอุณหภูมิในอุดมคติ

การควบคุมอุณหภูมิในอุดมคติ คือ การที่ระบบสามารถตอบสนองการควบคุมทันที และเข้าสู่เซตพอยต์โดยไม่เกิด Over shoot และ hunting รวมถึงการตอบสนองต่อสิ่งรบกวนระบบ (Disturbance) หรือการเปลี่ยนเซตพอยต์โดยทันที ดังรูป



รูปที่ 36 การควบคุมอุณหภูมิทางอุดมคติ

แต่ในความเป็นจริง การควบคุมอุณหภูมิที่จะทำให้อุณหภูมิเข้าสู่ค่าเซตพอยต์ทันทีนั้น เป็นไปไม่ได้หรือถ้าเข้าสู่เซตพอยต์เร็วเกินไปก็จะทำให้เกิด Overshoot หรือ hunting แต่ถ้าต้องการขจัด Overshoot หรือ hunting ระบบก็จะเข้าสู่เซตพอยต์ก็ได้ช้า ในบางลักษณะงาน ต้องการอุณหภูมิเข้าสู่ค่าเซตพอยต์เร็ว บางลักษณะงานก็ไม่ต้องการให้เกิด Overshoot เลย ซึ่งจะทำให้ระบบเข้าสู่เซตพอยต์ค่อนข้างช้า ดังนั้นการควบคุมอุณหภูมิที่ดีที่สุดจะขึ้นอยู่กับความต้องการในการควบคุมของแต่ละลักษณะงานนั้นๆ อย่างไรก็ตามโดยทั่วไป การตอบสนองแบบรูปที่ 36 คือ การตอบสนองที่ทุกการควบคุมอุณหภูมิต้องการ



รูปที่ 37 ลักษณะการควบคุมตามความเป็นจริงที่ทุกการควบคุมต้องการ

➡ วิธีควบคุมที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

วิธีควบคุมที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิในปัจจุบันแบ่งออกเป็น

1. การควบคุมขั้นพื้นฐาน ประกอบด้วย การควบคุมแบบ ON/OFF, Proportional (P), PID, 2-PID, 2-PID + Fuzzy และอื่นๆ
2. การควบคุมขั้นสูง ประกอบด้วย Cascade, position, proportional, heat/cool Control และอื่นๆ

คุณลักษณะของการควบคุมขั้นพื้นฐาน

วิธีการควบคุม	ข้อดี	ข้อเสีย
ON / OFF	- ง่าย - ไม่มี offset	- มี Overshoot และ hunting เกิดขึ้น
P	- เกิด Overshoot และ hunting น้อย	- ใช้เวลานานกว่า ระบบจะเข้าสู่เสถียรภาพ - เกิด Offset
I	- ขจัด Offset	- ใช้เวลานานกว่าการควบคุมแบบ P ในการทำให้ระบบเข้าสู่เสถียรภาพ - ไม่สามารถทำงานได้ตามลำพัง
D	- ตอบสนองเร็ว	- เกิด Overshoot - ไม่สามารถทำงานได้ตามลำพัง
PID	- เป็นการควบคุมที่ดีที่สุด	- จำเป็นต้องตั้งค่า P, I, และ D - ความสามารถในการตอบสนองต่อเซตพอยต์กับสิ่งรบกวนระบบสวนทางกัน
2-PID	- การตอบสนองในการเข้าสู่เซตพอยต์และสิ่งรบกวนระบบเป็นอิสระต่อกัน	
2-PID + Fuzzy	- การตอบสนองต่อสิ่งรบกวนดีกว่าแบบ 2-PID	

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบการควบคุมขั้นพื้นฐาน

4.1 การควบคุมพื้นฐาน

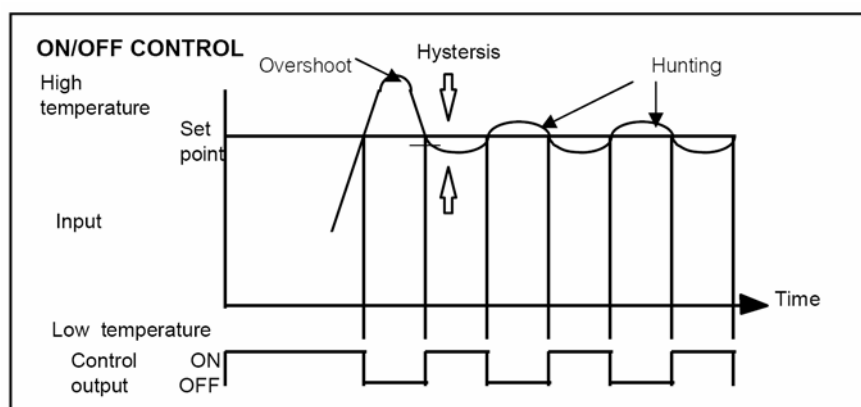
เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจ การยกตัวอย่างนี้จะเป็นการใช้งานตัวควบคุมในการควบคุมความร้อน

4.1.1 การควบคุมแบบ ON/OFF

เป็นการควบคุมแบบ 2 ตำแหน่ง คือ ตัดและต่อ หรือ เอาต์พุตจะเปลี่ยนระหว่าง 0% กับ 100% เอาต์พุตจะตัดเมื่ออุณหภูมิถึงค่าเซตพอยต์เท่านั้น โดยถ้าเป็นการควบคุมความร้อน เอาต์พุตจะต่อเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าค่าเซตพอยต์ และจะตัดทันทีเมื่ออุณหภูมิถึงค่าเซตพอยต์ ในทางกลับกันในการควบคุมความเย็น เอาต์พุตจะต่อตลอด เมื่ออุณหภูมิสูงกว่าค่าเซตพอยต์ และตัดเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงมาถึงค่าเซตพอยต์

- Hysteresis

ในการควบคุมแบบ ON/OFF ทั้งการตัด/ต่อเอาต์พุต จะทำอยู่รอบๆ ค่าเซตพอยต์ เช่น ค่าเซตพอยต์เท่ากับ 100°C เอาต์พุตจะตัดที่ 100°C และจะต่อทันทีเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 100°C ในกรณีที่เอาต์พุตเป็นแบบหน้าสัมผัส การตัดต่อด้วยความถี่สูงๆ จะทำให้หน้าสัมผัสเสื่อมสภาพเร็ว หรือเกิดการฮักติดกัน ค่าฮิสเตอร์ซิส (Hysteresis) เป็นค่าที่ใช้ตั้งเพื่อกำหนดให้เอาต์พุตที่ตัดที่จุดเซตพอยต์แล้วนั้น กลับมาต่อเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าเซตพอยต์เท่าใด (ในกรณีควบคุมความร้อน) ตัวอย่างเช่น ถ้าตั้งเซตพอยต์ไว้ที่ 100°C และตั้งค่าฮิสเตอร์ซิสไว้ที่ 5°C เอาต์พุตจะตัดที่ 100°C และจะกลับมาต่อที่ 95°C เป็นอย่างนี้ไปเรื่อยๆ ทำให้ลักษณะการควบคุมแบบ ON/OFF นี้จะมีค่าอุณหภูมิแกว่งไปมา (Hunting) รอบ ๆ ค่าเซตพอยต์ และจะมี Overshoot ทุกครั้งขณะเริ่มต้นการควบคุม ดังรูป



รูปที่ 38 ลักษณะการควบคุมแบบ ON/OFF

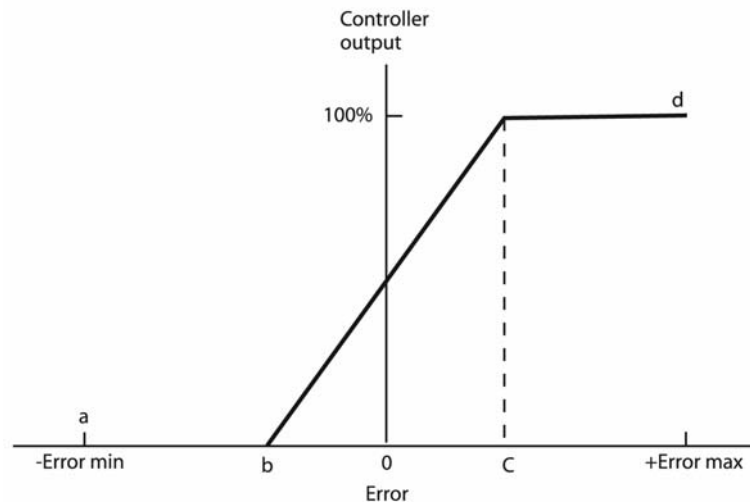
คำศัพท์ที่สำคัญ

- **Overshoot** คือ อุณหภูมิที่สูงเกินค่า เซตพอยต์ ครั้งแรกขณะเริ่มทำการควบคุม หรือจากการที่ระบบถูกรบกวนจากภายนอก หรือ การเปลี่ยนค่าเซตพอยต์
- **Hunting** คือ อุณหภูมิที่แกว่งไปมาตามไซเคิลของเอาต์พุตที่จ่ายออกมาจากการควบคุมโดยส่วนมากจะแกว่งรอบๆ ค่าเซตพอยต์
- **Set point (SP)** คือค่าที่ตั้งเพื่อเป็นจุดมุ่งหมายให้ตัวควบคุมทำการควบคุมระบบให้ได้อุณหภูมิเท่ากับค่านี้
- **Process Value (PV)** คืออุณหภูมิที่แสดงที่หน้าจอแสดงผลการวัดอุณหภูมิ PV อาจจะเป็นอุณหภูมิที่วัดได้จริง หรืออุณหภูมิที่ผ่านการตั้งค่าชดเชยแล้ว ในการควบคุมตัวควบคุมจะถือว่าค่า PV คือค่าที่แสดงอยู่บนหน้าจอแสดงผลเท่านั้น

4.1.2 การควบคุมแบบ P (Proportional Action)

การควบคุมแบบ P จะใช้ในการขจัด Overshoot และ hunting จากการควบคุมแบบ ON/OFF ซึ่งสาเหตุของ Overshoot ก็คืออุณหภูมิสะสมที่เกิดจากการที่ตัวควบคุมตัดเอาต์พุตตรงจุดที่อุณหภูมิเท่ากับค่าเซตพอยต์พอดี จึงทำให้เกิดอุณหภูมิสะสมในระบบ ทำให้อุณหภูมิเกินค่าเซตพอยต์ไป และจะลดลงมาจนกว่าอุณหภูมิสะสมจะลดลง

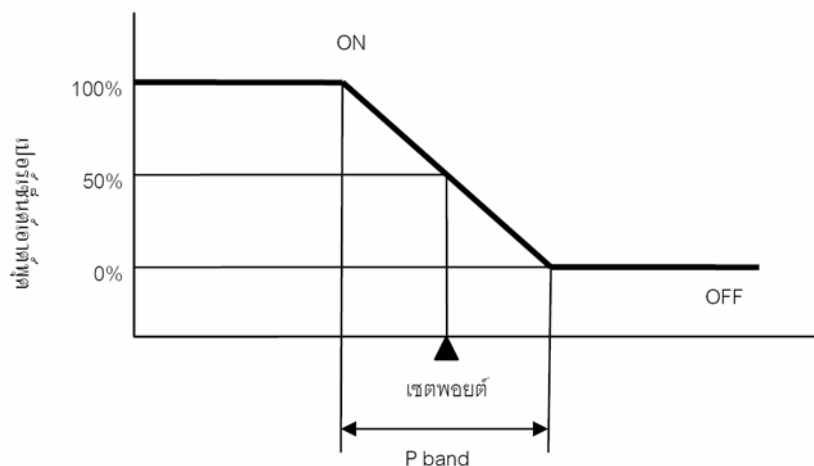
หลักการในการควบคุมแบบ P ตัวควบคุมจะให้เอาต์พุต 100% จนกว่าอุณหภูมิจะเข้าสู่ย่านหนึ่งต่ำกว่าเซตพอยต์และภายในย่านนี้ เอาต์พุตจะค่อยๆ ลดลงเป็นสัดส่วนจนอุณหภูมิเข้าสู่เซตพอยต์ โดยที่ไม่มี Overshoot เกิดขึ้น ย่านอุณหภูมิดังกล่าวเรียกว่า Proportional Band หรือ P band ในการควบคุมแบบ P ค่าเอาต์พุต (MV) จะเป็นสัดส่วนตรงกับค่าความแตกต่างระหว่างค่าเซตพอยต์กับค่าที่วัดได้ เมื่อค่าที่วัดได้เข้าสู่ย่าน P band แล้ว นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิที่วัดได้มีค่าอยู่ต่ำกว่าช่วง P band ตัวควบคุมจะให้เอาต์พุต 100% จนกระทั่งอุณหภูมิที่วัดได้เข้าสู่ช่วง P band เอาต์พุตจะค่อยๆ ลดลงตามสัดส่วนของค่าความแตกต่าง (Deviation) และจะลดลงเท่ากับ 50%* เมื่ออุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับค่าเซตพอยต์พอดี นั่นคือไม่มีความแตกต่างเกิดขึ้น (Deviation = 0) ดังนั้น การควบคุมแบบ P จะทำให้อุณหภูมิเข้าสู่เซตพอยต์อย่างนุ่มนวล และมี hunting เกิดขึ้นน้อยกว่าการควบคุมแบบ ON/OFF



รูปที่ 39 การควบคุมแบบ Proportional (P)

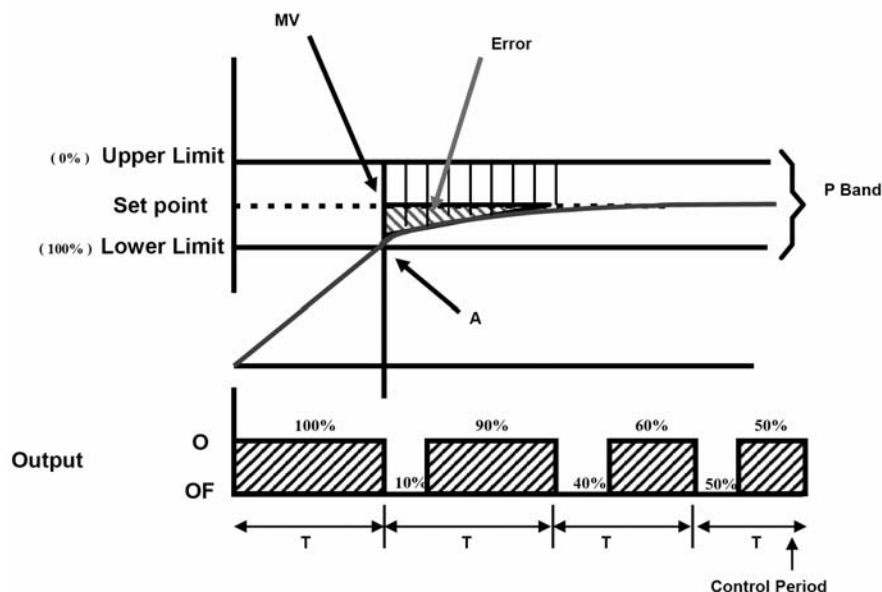
* เฉพาะตัวควบคุมของ Omron

● **P band** คือย่านที่เอาต์พุตแปรผันตรงกับค่าความแตกต่างระหว่างเซตพอยต์กับค่าที่วัดได้ ยกตัวอย่างเช่น เมื่อเซตพอยต์เท่ากับ 100°C และ P band เท่ากับ 20°C ย่าน P band จะอยู่ในช่วง 90°C จนถึง 110°C เอาต์พุตจะเท่ากับ 100% ถ้าอุณหภูมิที่วัดได้ต่ำกว่า 90°C แต่เมื่ออุณหภูมิเกิน 90°C เอาต์พุตจะแปรผันเป็นสัดส่วนตรงกับค่าความแตกต่างจนอุณหภูมิเท่ากับ 100°C เอาต์พุตจะมีการตัด/ต่อ เป็นเวลาเท่าๆ กัน (50%)



รูปที่ 40 ปริมาณเอาต์พุตในย่าน P band

ในกรณีที่เอาต์พุตเป็นลักษณะทำงานแบบตัด/ต่อ เช่น รีเลย์, SSR หรือ แรงดันสำหรับขับ SSR เอาต์พุตจะตัด/ต่อ อยู่ภายในคาบเวลาที่คงที่ ซึ่งช่วงการต่อจะแปรผันตรงกับค่าความแตกต่าง นั่นคือ ถ้าค่าความแตกต่างมาก เวลาการต่อเอาต์พุตในคาบเวลาคงที่นั้นจะนานกว่าเวลาการตัดดังรูป



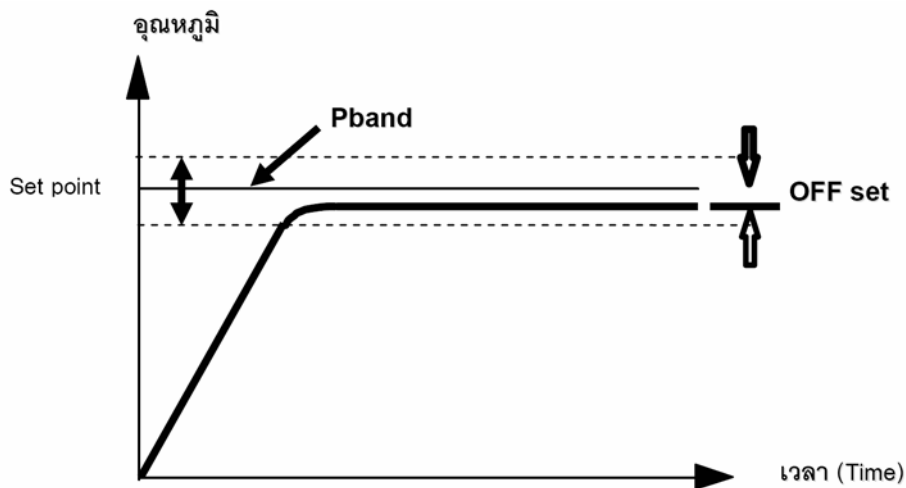
รูปที่ 41 เาต์พุต และ Control period ของการควบคุมแบบ P

คาบเวลาคงที่ที่กล่าวเรียกว่า Proportional Period (P Period) หรือ Control Period (CP) จากรูปคือคาบเวลา T ตัวอย่างถ้าตั้งค่า CP = 20 วินาที เมื่อเอาต์พุตจ่าย 100% เอาต์พุตจะต่อ 20 วินาทีเต็ม ถ้าเอาต์พุตจ่าย 50% เอาต์พุตจะต่อ 10 วินาที และตัด 10 วินาที หรือถ้าเอาต์พุตจ่าย 20% เอาต์พุตจะต่อ 2 วินาที และตัด 18 วินาที เป็นต้น

การตั้งค่า CP น้อย ๆ จะทำให้ได้การควบคุมที่ละเอียดขึ้น เอาต์พุตมีความการติดต่อที่เร็วขึ้น ทำให้ผลของการควบคุมดี แต่จะเหมาะกับเอาต์พุตที่เป็นลักษณะติดต่อโดยเคมีคอนดักเตอร์ เช่น โซลิดสเตท หรือแรงดันที่ใช้ขับโซลิดสเตท แต่ไม่เหมาะสมกับเอาต์พุตแบบหน้าสัมผัส เพราะการติดต่อเร็วจะทำให้อายุใช้งานของหน้าสัมผัสสั้น ดังนั้นการเลือกเอาต์พุตของตัวควบคุมจะต้องคำนึงถึงความเที่ยงตรงของการควบคุมด้วย ค่า CP เป็นค่าที่สำคัญ และเป็นค่าที่ต้องตั้งทุกครั้งในการควบคุมแบบ PID

ในกรณีที่เอาต์พุตเป็นแบบอนาล็อก (4 – 20 mA) จะไม่มีคาบเวลา CP ให้ตั้ง เอาต์พุตจะเปลี่ยนแปลงเป็นช่วง 4 – 20 mA เมื่อคุณหมุมที่วัดได้อยู่ในย่าน P band

อย่างไรก็ตามการควบคุมแบบ P เมื่อถึงจุดๆ หนึ่งแล้วก็จะเกิดความแตกต่างระหว่างค่าเซตพอยต์กับค่าที่วัดได้ คงที่ค่าหนึ่งเสมอ ซึ่งเกิดจากคุณสมบัติของระบบและฮาร์ดแวร์เอง ค่านี้เรียกว่า Offset จะเกิดขึ้นเสมอในการควบคุมแบบ P เมื่อระบบเข้าสู่เสถียรภาพแล้ว (Steady State) ค่า Offset นี้ อาจเป็นค่าที่สูงกว่า เซตพอยต์หรือ ต่ำกว่าค่าเซตพอยต์ตลอดก็ได้ การตั้งค่า P band ให้แคบๆ สามารถลด Offset ได้ แต่ถ้าแคบมากๆ อาจทำให้เกิด hunting ได้

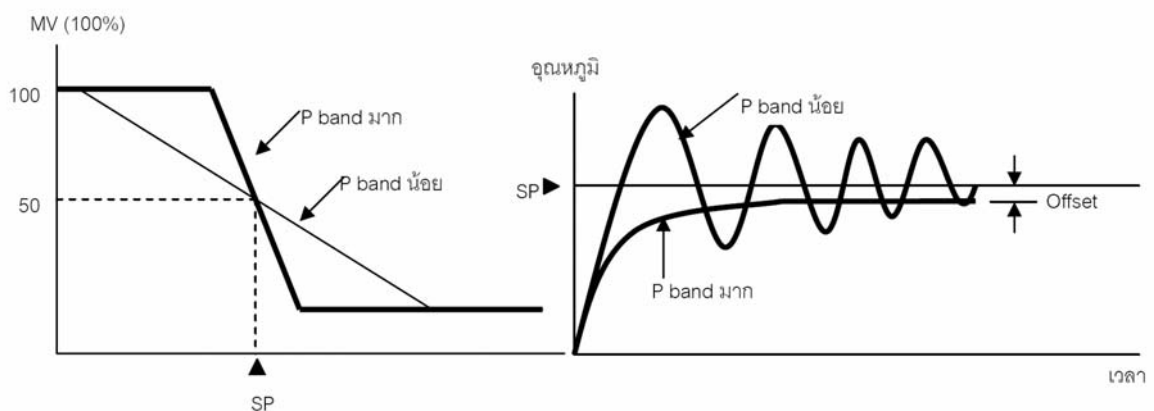


รูปที่ 42 การเกิด Offset ในการควบคุมแบบ Proportional (P)

- ผลของค่า P band

ถ้าค่า P band มาก (กว้าง) ระบบจะเข้าสู่เซตพอยต์ช้าไม่เกิด Overshoot แต่จะเกิด Offset ขึ้น

ถ้าค่า P band น้อย (แคบ) ระบบจะเข้าสู่เซตพอยต์เร็ว จะเกิด Overshoot ขึ้น และลักษณะของกราฟอุณหภูมิจะคล้ายกับการควบคุมแบบ ON/OFF



รูปที่ 43 ผลของการปรับค่า P band

- การปรับค่า

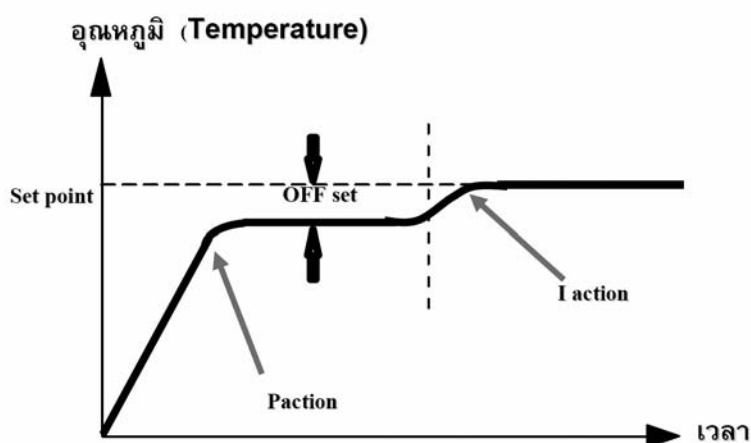
โดยปกติ P band จะเริ่มจากการตั้งค่ามากและปรับเข้าสู่ค่าน้อย เมื่อเกิด Hunting ขึ้นในระบบต้องทำการเพิ่มค่า P band เพื่อลด Hunting

4.1.3 การควบคุมแบบ I (Integral Action)

การควบคุมแบบ I จะทำการแก้ไข Offset ที่เกิดขึ้นจากการควบคุมแบบ P โดยทำการอินทิเกรต ความแตกต่างระหว่างค่าเซตพอยต์ และค่าที่วัดได้ เพื่อนำไปเป็นค่าเอาต์พุตเพื่อลดความแตกต่างนี้ ดังสมการ

$$MV(i) = e \times (1/T_i) \int dt \quad (\%)$$

จากสมการจะพบว่าค่า T_i กำหนดการทำงานของ การควบคุมแบบ I โดยที่ถ้าค่า T_i น้อย จะส่งผลให้เอาต์พุตมาก ทำให้การแก้ไข Offset เป็นไปอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามถ้ามากเกินไปจะทำให้เกิด Overshoot หรือ Hunting ได้ ในทางกลับกันถ้า T_i มาก จะไม่เกิด Overshoot แต่จะใช้เวลานานกว่าในการแก้ไข Offset



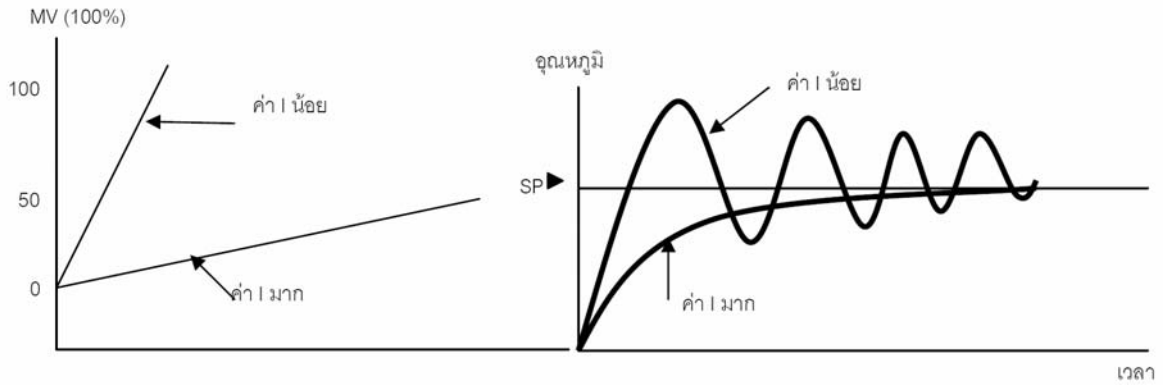
รูปที่ 44 การควบคุมแบบ Integral (I)

การควบคุมแบบ I จะไม่สามารถทำงานได้โดยลำพังจะต้องทำงานร่วมกับการควบคุมแบบ P เสมอ เรียกว่าการควบคุมแบบ PI

- การปรับค่า

โดยปกติค่า I ควรเริ่มปรับตั้งแต่ค่ามากไปสู่น้อย

เมื่อเกิด Hunting หรือ Overshoot และ Undershoot ขึ้นในระบบอาจเกิดจากค่า I มากเกินไป Hunting จะลดลงได้เมื่อทำการปรับค่า I ให้มากขึ้น นั่นคือการทำให้การควบคุมแบบ I ให้เอาต์พุตลดลง หรืออีกวิธีหนึ่งคือ เพิ่มค่า P band ให้กว้างขึ้นจะทำให้การควบคุมแบบ I ให้เอาต์พุตลดลงได้เช่นกัน



รูปที่ 45 ผลของการปรับค่า I

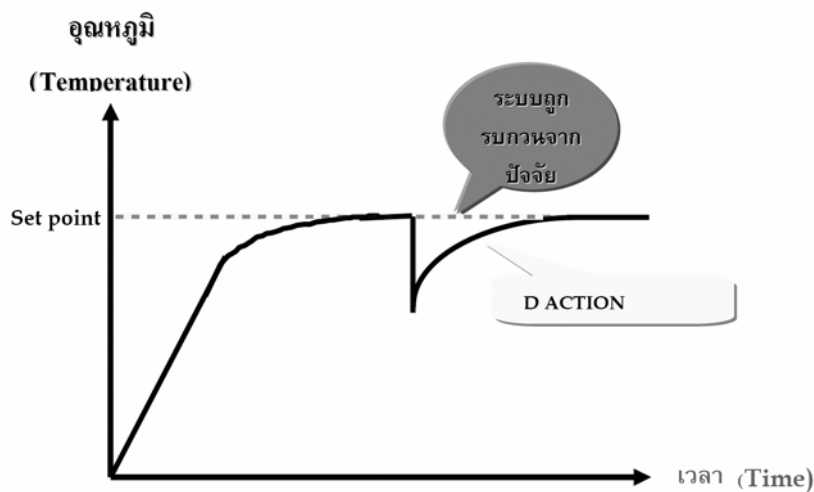
4.1.4 การควบคุมแบบ D (Derivative Action)

การควบคุมแบบ D จะช่วยแก้ความแตกต่างที่เกิดขึ้นรวดเร็วอันเนื่องมาจากสิ่งรบกวนระบบภายนอก โดยการให้เอาต์พุตในปริมาณมากทันทีเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น ดังสมการ

$$MV(d) = e \times T_d \frac{d}{dt} \quad (\%)$$

T_d คือ Derivative time

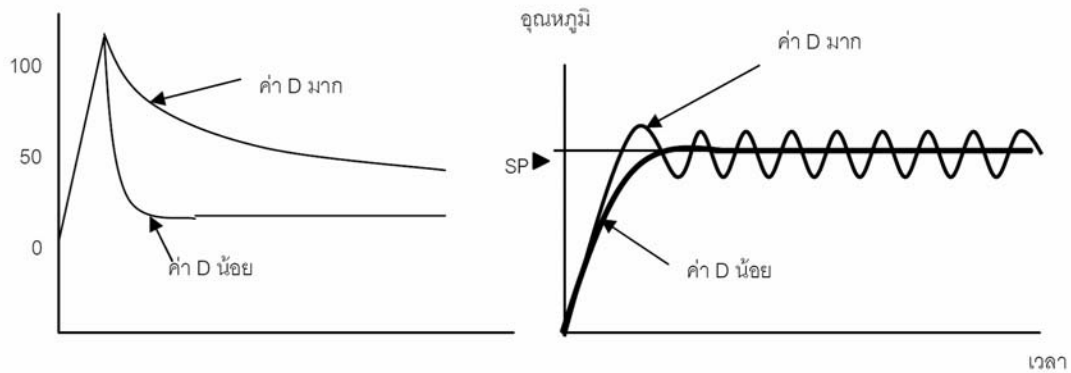
จากสมการจะพบว่าค่า T_d จะกำหนดการทำงานของ การควบคุมแบบ D โดยถ้าค่า T_d มากจะให้เอาต์พุตมากทำให้การแก้ไขให้อุณหภูมิกลับเข้าสู่เซตพอยต์ได้รวดเร็ว แต่ถ้ามากเกินไปจะเกิด Hunting และ Overshoot



รูปที่ 46 การควบคุมแบบ Derivative (D)

- การปรับค่า

- โดยปกติค่า T_d การได้รับการปรับจากค่าน้อยไปหาค่ามาก
- ถ้าเกิด Hunting ในช่วงแรกของการควบคุม สันนิษฐานได้ว่าค่า T_d มากเกินไป แก้ไขโดยการลดค่า T_d

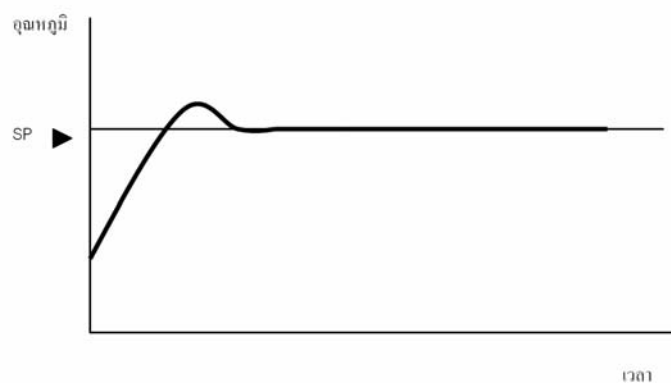


รูปที่ 47 ผลของการปรับค่า D

การควบคุมแบบ D ไม่สามารถทำงานได้โดยลำพังได้ ต้องทำงานร่วมกับการควบคุมแบบ P เรียกว่า การควบคุมแบบ PD หรือใช้งานร่วมกับการควบคุมแบบ PI เรียกว่า การควบคุมแบบ PID

4.1.5 การควบคุมแบบ PID

เป็นการรวมเอาการควบคุมแบบ P, I และ D เข้าด้วยกันคุณสมบัติของแต่ละการควบคุมจะช่วยให้การควบคุมมีประสิทธิภาพสูงสุด การควบคุมแบบ P ลด Overshoot และ Hunting การควบคุมแบบ I ลด Offset ส่วนการควบคุมแบบ D จะตอบสนองต่อสิ่งรบกวนจากภายนอก

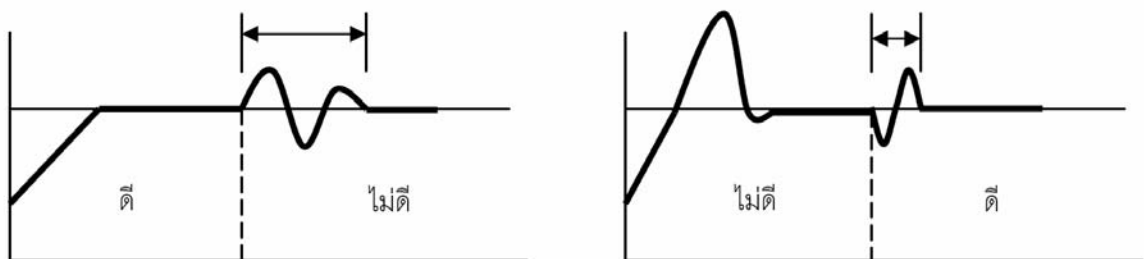


รูปที่ 48 การควบคุมแบบ PID

4.1.6 การควบคุมแบบ 2 – PID Control

ในการควบคุมแบบ PID ปกติ การตอบสนองต่อค่าที่ตั้งที่ต้องการ (Set point) กับ สิ่งรบกวนระบบใช้ PID ชุดเดียวกัน ดังนั้นเมื่อค่า PID ถูกตั้งสำหรับตอบสนองต่อสิ่งรบกวนระบบ ได้ดี (ซึ่งค่า P และ I จะน้อย ส่วน D จะมาก) จะทำให้การตอบสนองต่อ SP ทำได้ไม่ดี คือเกิด Overshoot ขึ้น ในทางกลับกันถ้าค่า PID ถูกตั้งให้สามารถตอบสนองต่อ SP ได้ดี (ค่า P และ I มาก) จะส่งผลให้การตอบสนองต่อสิ่งรบกวนระบบทำได้ช้า การตอบสนองทั้ง 2 อย่างนี้ ไม่สามารถทำได้ ดี พร้อมๆ กัน

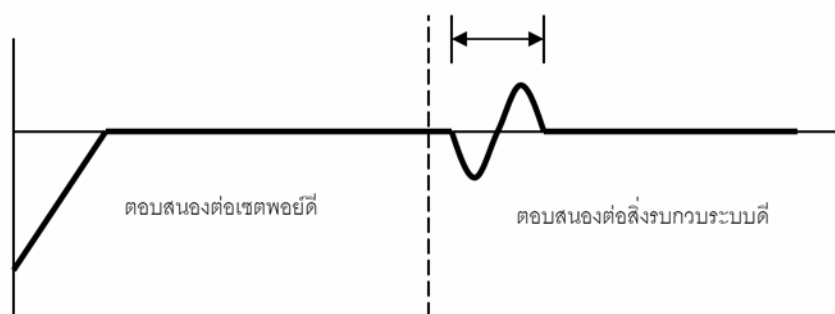
2 – PID (2 – degrees – of – freedom PID) หรือ PID ที่มีฟังก์ชัน Feedforward เป็น การควบคุมที่แยกการตอบสนองต่อ SP และสิ่งรบกวนระบบอย่างอิสระ



ตอบสนองต่อเซตพอยต์ดี แต่ตอบสนองต่อสิ่งรบกวนระบบไม่ดี
พอยต์ไม่ดี

ตอบสนองต่อสิ่งรบกวนระบบดี แต่ตอบสนองต่อเซต
พอยต์ไม่ดี

รูปที่ 49 การควบคุม PID ปกติ



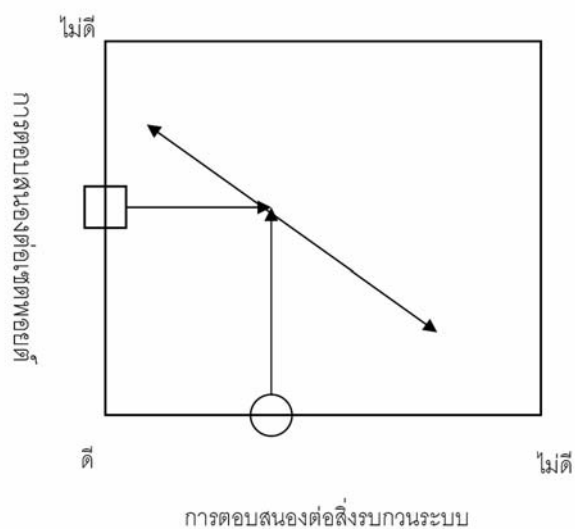
รูปที่ 50 การควบคุมแบบ 2 – PID Control

● การทำงานของการควบคุมแบบ 2 – PID

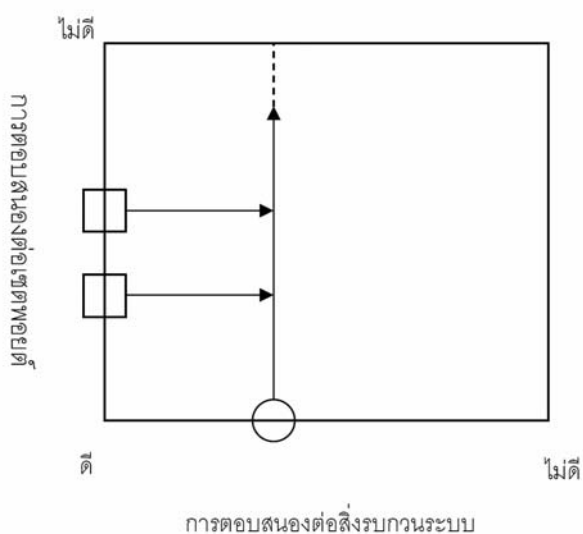
ความแตกต่างระหว่างการควบคุมแบบ PID (1 – PID) และ 2 – PID คือ การ ควบคุมแบบ PID จะมีลักษณะการควบคุมแบบเป็นเส้นตรง (ทิศทางเดียว) ส่วน การควบคุมแบบ 2 – PID การควบคุมจะเคลื่อนที่ลักษณะระนาบ (2 ทิศทาง)

ในการควบคุมแบบ PID ปกติ ทั้งการตอบสนองต่อ SP และสิ่งรบกวน จะถูกกระทบจากการปรับค่า PID ความสัมพันธ์แสดงดังรูปที่ 50 แกนตั้งเป็นความสามารถในการตอบสนองต่อ SP แกนนอนเป็นความสามารถในการตอบสนองต่อสิ่งรบกวนระบบ ความสัมพันธ์จะเป็นลักษณะกราฟเส้นตรงที่มีความชันเป็นลบ กล่าวคือ ถ้าปรับค่า PID ให้ตอบสนองต่อด้านใดให้ดีขึ้น การตอบสนองอีกด้านหนึ่งจะลดลง

ในขณะที่การควบคุมแบบ 2-PID การตอบสนอง SP และสิ่งรบกวนระบบสามารถทำงานอย่างเป็นอิสระกัน ทำให้เกิดผลดีทั้งในด้านการตอบสนองต่อ SP และสิ่งรบกวนระบบไปพร้อมๆ กัน ดังรูปที่ 51 จุดทำงานของ 2 – PID สามารถเลื่อนไปในแนวระนาบแนวใดก็ได้เป็นอิสระ ดังนั้นการควบคุมแบบ 2 – PID จะถูกเรียกว่าการทำงานแบบ 2 องศาอิสระ (2-degrees-of-freedom PID)



รูปที่ 51 การตอบสนองของการควบคุมแบบ 1-PID



รูปที่ 52 การตอบสนองของการควบคุมแบบ 2-PID

การควบคุมแบบ 2 – PID เป็นการเพิ่มรูปแบบ Feedforward (FF) เข้าไปใน PID เดิม ซึ่งหลักการของ PID เดิมที่เป็น Feedback Control จะทำการเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุตหลังได้รับการป้อนกลับจากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระบบแล้ว ส่วน Feedforward จะทำการประมาณการเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุตก่อนการเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นในระบบภายหลังจากการให้เอาต์พุตออกไป กล่าวคือ Feedforward จะทำการพยากรณ์ Overshoot ที่จะเกิดขึ้น เมื่อเกิดความแตกต่างระหว่าง PV และ SP มาก และทำการลด Overshoot นั้น ก่อนที่จะเกิด แทนที่จะลด Overshoot หลังจากที่เกิดขึ้นแล้ว

ในการควบคุมแบบ 1 – PID PID จะทำงานโดยลำพัง เพื่อตอบสนองทั้ง SP และสิ่งรบกวน ระบบ ดังนั้น การตอบสนองจะถูกจำกัด

ในการควบคุมแบบ 2 – PID เฉพาะ PID จะทำการตอบสนองต่อสิ่งรบกวนระบบ แต่ PID กับ FF จะร่วมกันทำการตอบสนองต่อ SP ซึ่งทำให้การตอบสนองทั้ง 2 แยกกันทำงานอย่างอิสระ

เมื่อค่า PID ถูกตั้งให้เหมาะสำหรับทำการตอบสนองต่อสิ่งรบกวนระบบ การทำงานของค่า PID นี้จะทำให้เกิด Overshoot ขึ้นในระบบ แต่ค่า MV จากรูปแบบ Feedforward จะทำการลด MV จาก PID นี้ เพื่อลด Overshoot ที่จะเกิดขึ้นในระบบ ดังนั้นการปรับค่าในรูปแบบ FF การตอบสนองต่อ SP จะสามารถตั้งค่าได้ตามความต้องการ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานตอบสนองต่อสิ่งรบกวนระบบ

- 1-PID

ทั้งการตอบสนองต่อ SP และสิ่งรบกวนถูกควบคุมโดยค่า PID เท่านั้น

- 2-PID

PID จะทำการตอบสนองต่อสิ่งรบกวนระบบ ซึ่งจะส่งผลให้เกิด Overshoot ในขณะที่ทำการตอบสนองต่อ SP แต่ Feedforward จะเป็นตัวลด Overshoot ที่กำลังจะเกิดขึ้น

4.1.7 การควบคุมแบบ Auto-tuning

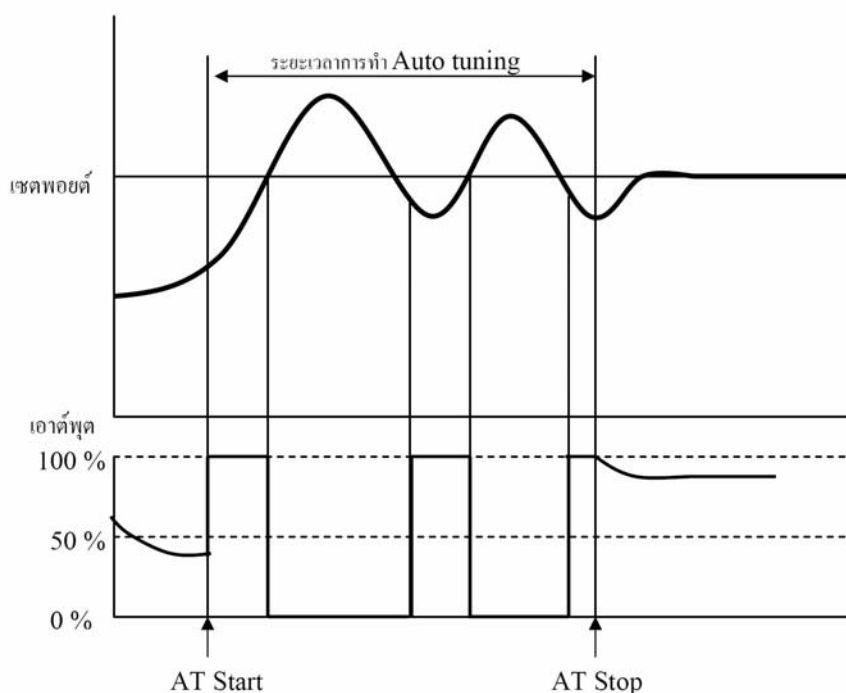
ค่า P, I และ D ของแต่ละการควบคุมจะแตกต่างกัน การตั้งค่า PID ไม่เหมาะสมจะทำให้การควบคุมไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระบบอาจจะไม่เสถียรเกิด Overshoot หรือ Hunting ขึ้น อีกทั้งการตอบสนองต่อสิ่งรบกวนระบบไม่สามารถทำได้ดี ช้าลงมากกว่าจะกลับเข้าสู่ SP

ค่า PID สามารถคำนวณได้โดยผู้ใช้งานแต่ต้องใช้ประสบการณ์มาก ฟังก์ชัน Auto-tuning เป็นฟังก์ชันของตัวควบคุมที่ช่วยในการคำนวณค่า PID โดยอัตโนมัติเพียงแค่สั่งการให้ตัวควบคุมทำฟังก์ชันนี้เท่านั้น

ค่า PID ที่ได้จากการทำ Auto-tuning จะเป็นค่า PID ที่เหมาะสมกับระบบนั้นๆ แต่บางครั้งระบบต้องการลักษณะการควบคุมแบบพิเศษขึ้นไป เช่น ต้องการให้อุณหภูมิเพิ่มอย่างรวดเร็วในขณะเริ่มต้นและสามารถยอมรับการเกิด Overshoot ได้ แต่บางระบบต้องการให้ระบบมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นช้าๆ โดยไม่ให้เกิด Overshoot เลย ซึ่งจะต้องการปรับค่า PID จากเดิมที่ทำ Auto-tuning ไว้แล้ว การปรับแต่ง PID นี้ เรียกว่าการ Fine-tuning

● การทำ Auto-tuning

เมื่อตัวควบคุมถูกสั่งให้ทำ Auto tuning ขั้นแรกตัวควบคุมจะจ่ายเอาต์พุต 100% จนอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงค่า SP และตัดเอาต์พุตจนเหลือ 0% ตัวควบคุมจะรอจนกว่าอุณหภูมิตกลงมาต่ำกว่าค่า SP จนถึงค่าฮิสเตอร์ซิสของฟังก์ชัน Auto-tuning จากนั้นจะให้เอาต์พุตอีก 100% จนอุณหภูมิถึง SP เอาต์พุตจะเป็น 0% อีกครั้งหนึ่ง ตัวควบคุมจะรอจนกว่าอุณหภูมิลดต่ำกว่า SP อีกครั้งหนึ่ง เป็นการเสร็จการทำ Auto tuning ดังรูป



รูปที่ 53 อุณหภูมิขณะทำ Auto-tuning

ดังนั้นการทำ Auto-tuning จะใช้เวลานานเท่าใด ขึ้นอยู่กับระบบว่ามีความตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ไว – ช้า เพียงใด ซึ่งบางระบบอาจใช้เวลาหลายชั่วโมงในการทำ Auto tuning ก็เป็นไปได้ จากลักษณะการทำ Auto tuning ของระบบจะพบว่าขณะทำ AT

นั่น อุณหภูมิจะมีการแกว่งมาก ไม่ควรนำชิ้นงานจริงเข้ามาในระบบ ค่า PID ที่ ได้จากการทำ Auto-tuning จะไม่ถูกเปลี่ยนแปลงไม่ว่าระบบจะเปลี่ยนไปอย่างไร (เปลี่ยน SP) จนกว่าจะทำ Auto-tuning อีกครั้งหนึ่ง

หมายเหตุ ก่อนการทำ AT จะต้องติดตั้งหรือต่อระบบให้ใช้งานได้เหมือนจริง

4.1.8 การควบคุมแบบ Self-tuning (ST)

Self tuning เป็นฟังก์ชันที่ช่วยในการคำนวณค่า PID ที่เหมาะสมกับระบบอีกวิธีหนึ่ง Self-tuning จะต่างจาก Auto-tuning คือ ST จะทำการคำนวณค่า PID ใหม่เองทุกครั้งเมื่อการควบคุมเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยการ tuning จะกระทำเพื่อตอบสนองต่อเหตุการณ์ต่าง ๆ ดังนี้

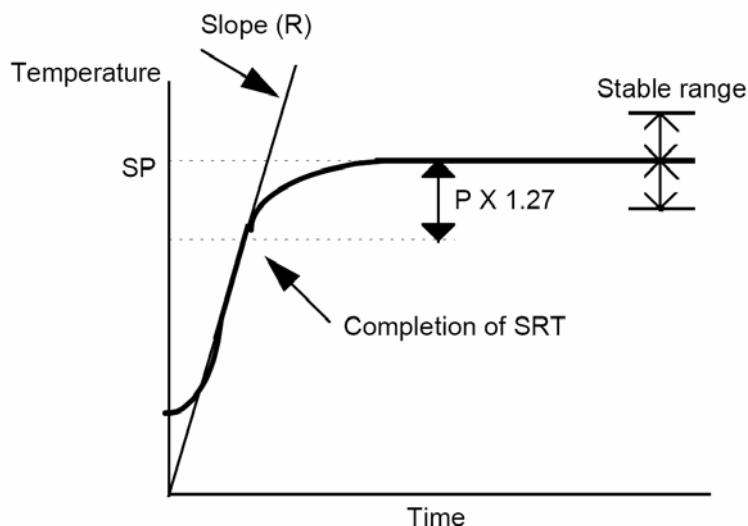
1. Step Response tuning (SRT)
2. Disturbance tuning (DT)
3. Hunting tuning (HT)

4.1.8.1 Step response tuning (SRT)

เป็นการ Tuning โดยการศึกษาระบบจากการจ่าย Step output ณ เวลาที่มีการตอบสนองต่อค่า SP ครั้งแรก และค่า PID จะถูกคำนวณ

เงื่อนไขต่อไปนีที่ฟังก์ชัน ST ของตัวควบคุมจะทำการ tuning เพื่อหา SRT

- 1) SP หลังจากเปลี่ยนแล้ว ไม่เท่ากับ SP เดิมที่เคยทำ SRT แล้ว
- 2) ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่วัดกับ SP หลังจากเปลี่ยน SP มีค่ามากกว่า $P \text{ band} \times 1.27^*$
- 3) มีการเปลี่ยนแปลงค่าสู่ SP สูงขึ้น ในการควบคุมความร้อนหรือมีการเปลี่ยนแปลง SP ต่ำลงในการควบคุมความเย็น
- 4) เมื่ออุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงหลังจากเปิดไฟให้ตัวควบคุมหรือไม่มี MV



รูปที่ 54 การตอบสนองต่อ SRT

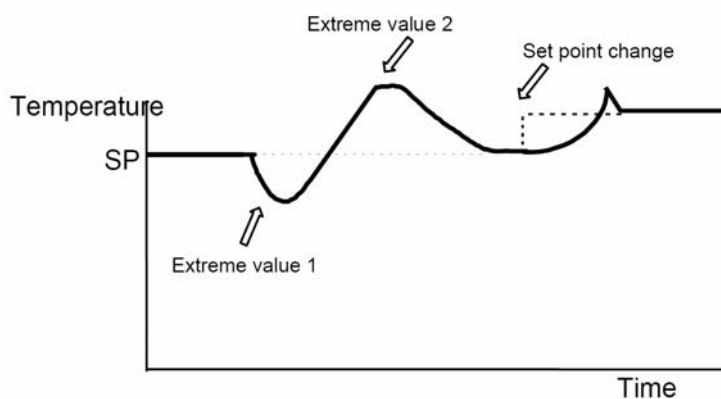
* เฉพาะตัวควบคุมของ Omron

4.1.8.2 Disturbance Tuning (DT)

ค่า PID จะถูกปรับเมื่อเกิดการรบกวนเข้ามาในระบบจนการควบคุมกลับเข้าไปสู่ภาวะปกติ DT จะทำงานเมื่อเกิดเงื่อนไขต่อไปนี้

- DT ทำงานในการตอบสนองต่อสิ่งรบกวน
อุณหภูมิออกนอก ST stable range ขณะที่ SP ไม่เปลี่ยนแปลง และคงที่ก่อนที่จุดสูงสุด (Extreme value) และต่ำสุด 3 จุดจะถูกตรวจจับได้
- DT ทำงานในการตอบสนองต่อเซตพอยต์
DT จะเริ่มทำงานก็ต่อเมื่อ ค่าของเซตพอยต์เปลี่ยนแปลงไป แต่โหมด SRT ไม่ทำงาน และอุณหภูมิกลับมาอยู่ในช่วง Stable อีกครั้ง โดยค่าของจำนวนการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะต้องมีค่าน้อยกว่า 4 ครั้ง
ถ้าจำนวนการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีค่าเท่ากับ 4 ครั้ง หรือมากกว่า HT

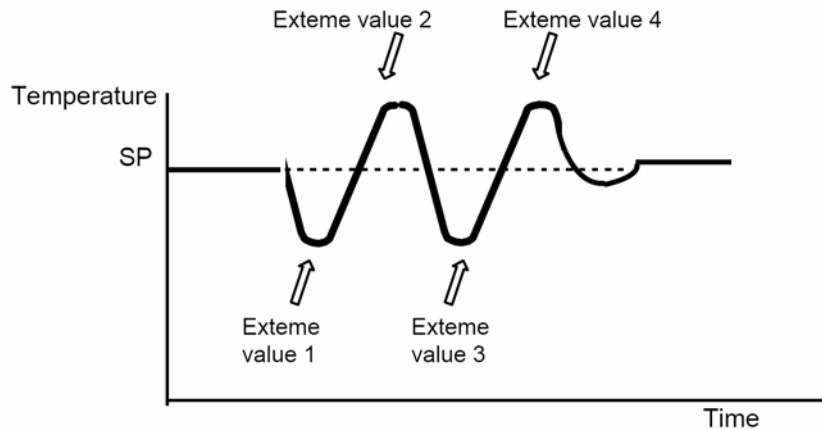
(Hunting Tuning) จะเริ่มทำงานแทน



รูปที่ 55 เงื่อนไขการทำงานของ DT

4.1.8.3 Hunting Tuning

HT จะเริ่มทำงาน เมื่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Extreme Values) เกิดขึ้นในระบบ 4 ครั้ง หรือมากกว่า (Hunting) ขณะที่โหมด SRT ไม่ทำงาน

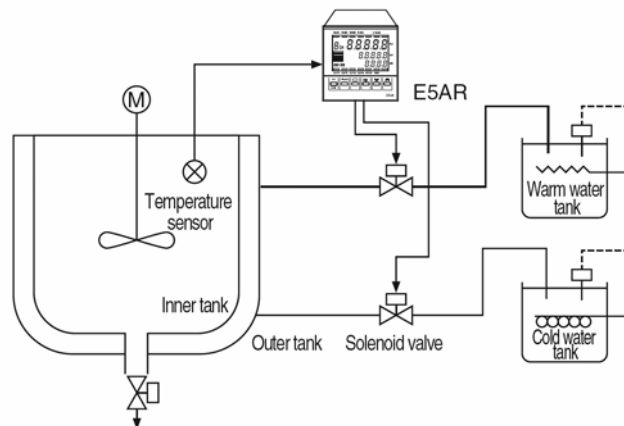


รูปที่ 56 เงื่อนไขการทำงานของของ HT

4.2 การควบคุมแบบพิเศษ

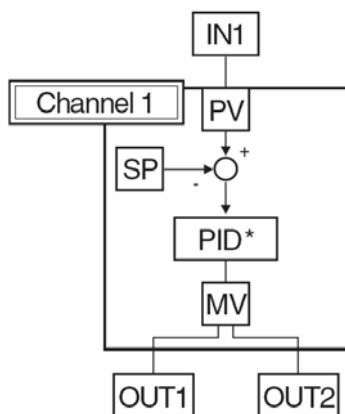
4.2.1 การควบคุมแบบร้อน/เย็น (Heating/Cooling Control)

การควบคุมแบบร้อน/เย็นนี้เป็นการควบคุมที่ใช้เอาต์พุต 2 ตัวทำงานตรงข้ามกัน เอาต์พุตตัวแรกจะทำงานเป็นลักษณะ Reverse operation ขณะที่เอาต์พุตอีกตัวหนึ่งทำงานแบบ Direct Operation เมื่อศึกษาจากบทถัดไปจะทราบว่าการทำงานแบบ Reverse operation ก็คือการควบคุมความร้อน และ การทำงานแบบ Direct Operation ก็คือการควบคุมความเย็นนั่นเอง โดยทั้ง 2 เอาต์พุตถูกควบคุมด้วย PID ชุดเดียวกัน โดยที่เอาต์พุตทั้งสองจะทำงานสลับกัน หรือพร้อมกันเพื่อควบคุมให้อุณหภูมิในระบบได้เท่ากับค่าเซตพอยต์ที่ตั้งไว้



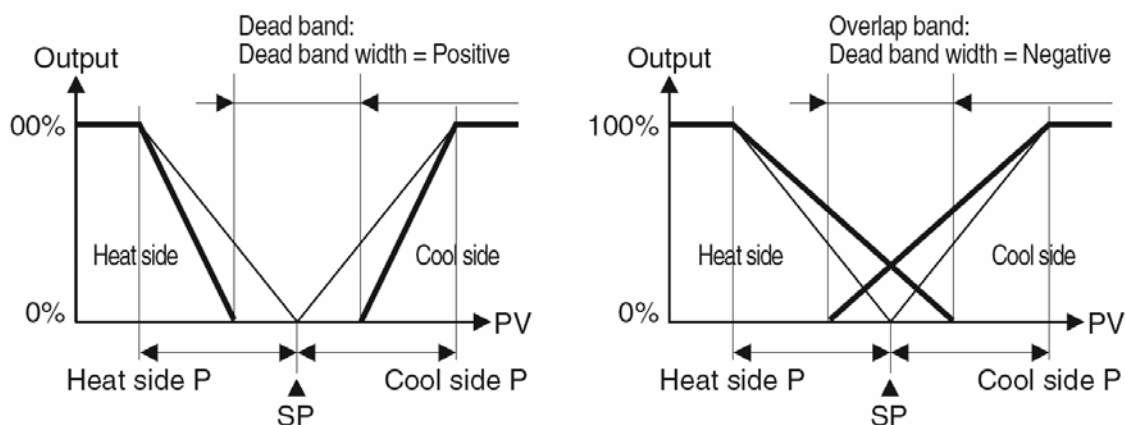
รูปที่ 57 ตัวอย่างการควบคุมแบบร้อน/เย็น

จากรูปเป็นการควบคุมอุณหภูมิในถังสารละลายที่มีการควบคุมอุณหภูมิภายในถัง โดยการเปิดน้ำร้อน และน้ำเย็นผ่านท่อเข้ามาในถังเพื่อใช้ความร้อน และความเย็นที่ได้ทำการควบคุมอุณหภูมิให้ได้ตามต้องการ จากตัวอย่างใช้โซลินอยด์วาล์วเป็นตัวเปิด/ปิดน้ำร้อน และน้ำเย็นดังกล่าว ไดอะแกรมการควบคุมเป็นดังนี้



รูปที่ 58 ไดอะแกรมการควบคุมแบบร้อน/เย็น

จากไดอะแกรม IN1 เป็นอินพุตที่วัดอุณหภูมิในถัง ตัวควบคุมจะทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดได้กับเซตพอยต์ และให้เอาต์พุต (MV) ออกมา ซึ่งจะไปสั่งให้วาล์วเปิดน้ำร้อน/เย็น เอาต์พุตทั้ง 2 สามารถตั้งให้สลับกันทำงาน โดยไม่คาบเกี่ยวกัน หรือทำงานคาบเกี่ยวกันได้ดังรูป

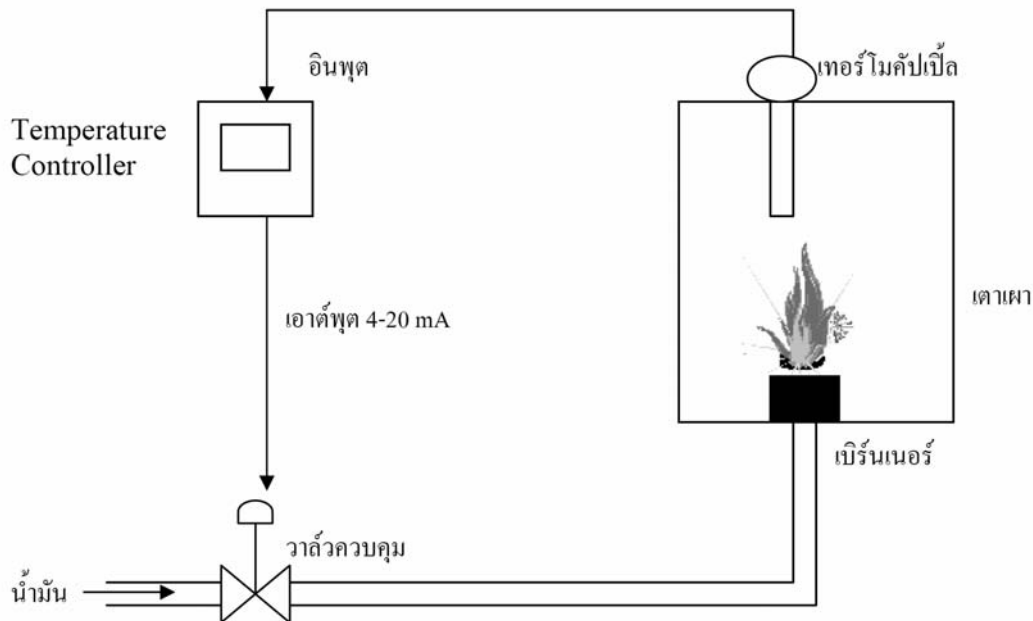


รูปที่ 59 ความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตความร้อน และเย็น

จากรูปค่า Dead band เป็นช่วงอุณหภูมิรอบ ๆ เซตพอยต์ที่กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตทั้ง 2 ถ้าค่า Dead band เป็นบวกดังรูปซ้ายมือ ช่วงอุณหภูมิในช่วง Dead band จะไม่มีการทำงานทั้งเอาต์พุตความร้อน และความเย็น ส่วนรูปด้านขวามือค่า Dead band เป็นลบ จะมีการทำงานทั้งเอาต์พุตความร้อน และความเย็นในช่วงอุณหภูมินี้

4.2.2 การควบคุมแบบคาสเคด (Cascade Control)

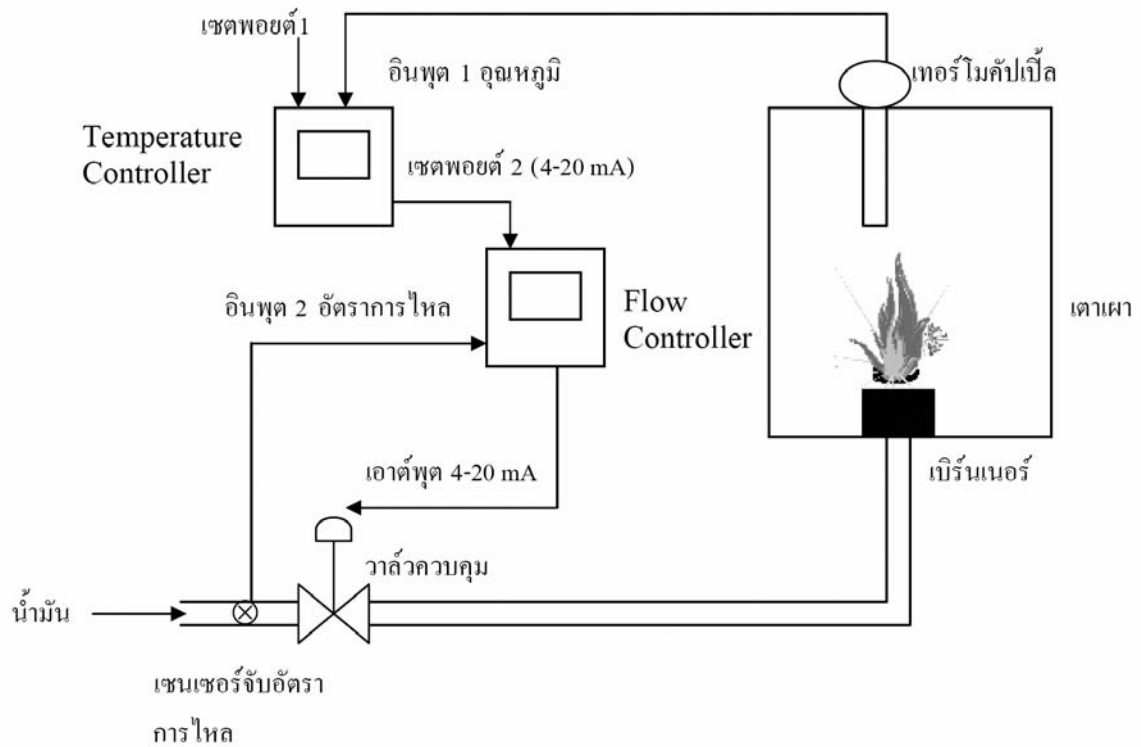
ในการควบคุมบางการควบคุมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงเป็นไปได้ช้า ทำให้บางครั้งทำให้การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นไม่ทัน ทำให้ความสามารถในการควบคุมระบบไม่ดีเท่าที่ควร ตัวอย่างต่อไปนี้เป็นตัวอย่างเป็นตัวอย่างของการควบคุมลักษณะดังกล่าว



รูปที่ 60 การควบคุมเตาเผาที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้

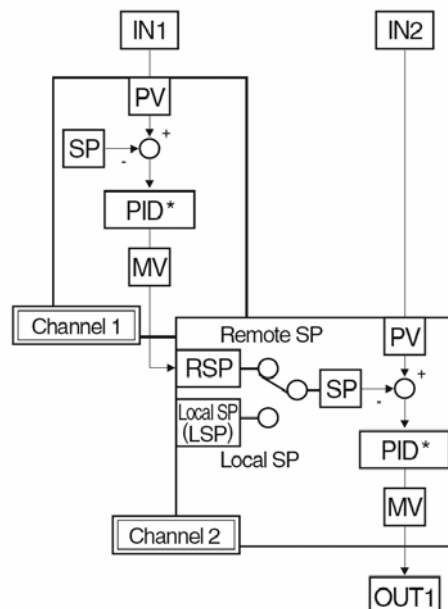
จากรูปเป็นระบบเตาเผาที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง เอาต์พุตของตัวควบคุมเป็นแบบกระแส 4-20 mA เพื่อจ่ายให้ Proportional Valve ทำการปิด/เปิดให้น้ำมันไหลเข้าไปในส่วนเผาไหม้ เทอร์โมคัปเปิลทำหน้าที่วัดอุณหภูมิภายในเตา และส่งกลับไปที่ตัวควบคุมเพื่อเปรียบเทียบกับค่าเซตพอยต์ ในกรณีปกติอัตราการไหลของน้ำมันคงที่จะไม่เกิดปัญหาในการควบคุม แต่ถ้าเมื่อใดอัตราการไหลของน้ำมันมีการเปลี่ยนแปลง การเปิดวาล์วเท่าเดิมจะทำให้มีน้ำมันเข้าไปในส่วนเผาไหม้มากขึ้น ซึ่งตัวควบคุมจะไม่รู้ตรงจุดนี้ กว่าที่รู้ก็ได้รับสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลว่าอุณหภูมิเกินค่าเซตพอยต์แล้ว

การควบคุมแบบ Cascade จะเป็นการควบคุมที่ช่วยขจัดปัญหาลักษณะเช่นนี้ โดยการควบคุมจะเพิ่มลูบควบคุม (Secondary Loop) เพื่อควบคุมอัตราการไหลของน้ำมัน โดยเพิ่มตัววัดอัตราไหลของน้ำมันเป็นอินพุตของลูบควบคุมที่เพิ่มขึ้นดังรูป



รูปที่ 61 การควบคุมเตาเผาที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้แบบ Cascade Control

โดยมีไดอะแกรมการทำงานดังนี้

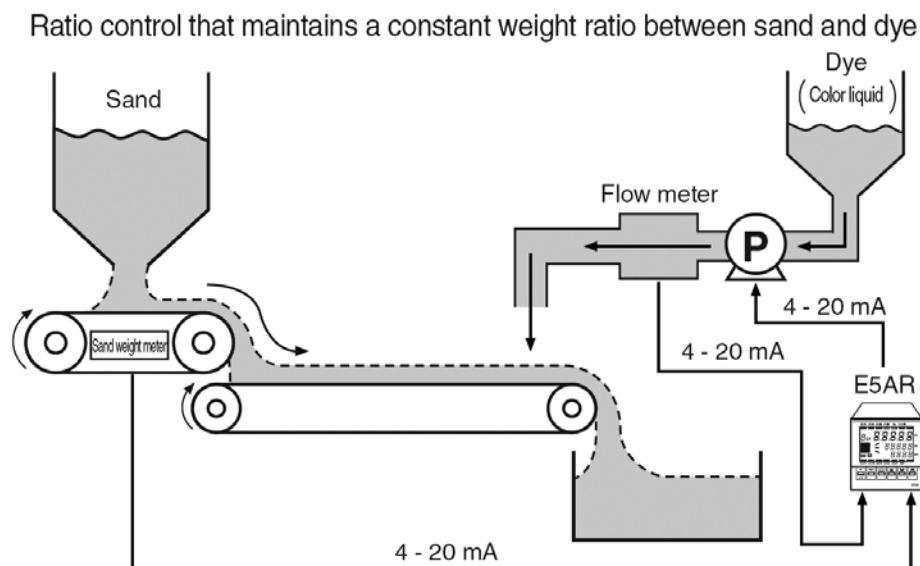


รูปที่ 62 ไดอะแกรมการทำงานของ Cascade Control

จากรูปและไดอะแกรมข้างต้นเอาต์พุตที่ได้จากการคำนวณในรูปแรกจะเป็นเซตพอยต์ให้รูปที่ 2 ซึ่งจากตัวอย่างนี้รูปแรกจะเป็นรูปของการควบคุมอุณหภูมิที่ให้เอาต์พุตออกมาเพื่อเป็นเซตพอยต์ในรูปของอัตราการไหลในรูปที่ 2 ซึ่งในรูปที่ 2 จะมีเซนเซอร์วัดอัตราการไหลเพื่อเทียบกับเซตพอยต์ที่ได้จากรูปแรก และให้เอาต์พุตสุดท้ายในการควบคุมอัตราการไหลของเชื้อเพลิง ซึ่งจะสอดคล้องกับการควบคุมอุณหภูมิที่ต้องการอัตราการไหลที่ทำให้อุณหภูมิได้ตามค่าเซตพอยต์อุณหภูมิที่ตั้งไว้

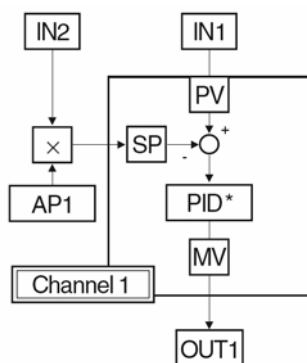
4.2.3 การควบคุมแบบอัตราส่วน (Ratio Control)

การควบคุมแบบอัตราส่วนเป็นการควบคุมอัตราส่วนผสมของอินพุตของระบบ 2 อินพุตขึ้นไปดังตัวอย่าง



รูปที่ 63 การควบคุมส่วนผสมระหว่างทราย กับสีย้อมสี

จากรูปเป็นการควบคุมการผสมกันระหว่างทรายกับสีย้อมสีโดยการอัตราส่วน ทราย 100 ส่วนต่อสีย้อมสี 5 ส่วน อินพุตหนึ่งของตัวควบคุมเป็นค่าอินพุตที่ได้จากตัววัดอัตราการไหลของสีย้อมสี หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อวินาที แปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า 4-20 mA ส่วนอีกอินพุตหนึ่งเป็นอินพุตที่ได้จากเครื่องชั่งน้ำหนักทรายหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อวินาที แปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า 4-20 mA เช่นกัน การควบคุมจะเป็นไปตามไดอะแกรมดังนี้

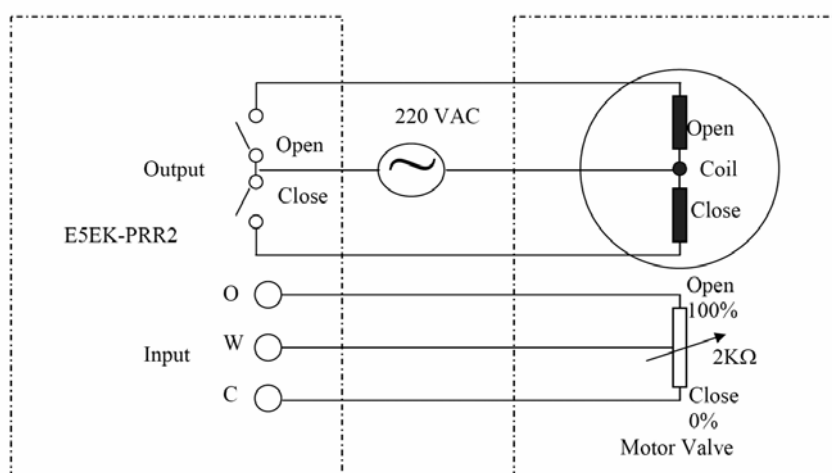


รูปที่ 64 ไดอะแกรมการควบคุมแบบอัตราส่วน

จากไดอะแกรม AP1 คือค่าอัตราส่วนของอัตราการไหลของสารสี IN1 ต่อ IN2 หรือน้ำหนักทราย ซึ่งเท่ากับ $5/100 = 0.05$ ค่าน้ำหนักของทรายจะนำมาคูณกับอัตราส่วน AP1 เพื่อเป็นเซตพอยต์ของอัตราการไหลของสารสี ซึ่งจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับ IN1 ที่เป็นอัตราการไหลของสารสี เอาต์พุตที่ได้จะไปขับอินเวอร์เตอร์ให้ปรับอัตราการไหลของสารสีให้ได้เท่ากับค่าเซตพอยต์ที่ถูกกำหนดโดยน้ำหนักของทราย

4.2.4 การควบคุมแบบ Position – Proportional Control

เป็นการควบคุมการปิด/เปิดที่ใช้กับโหลดที่เป็นมอเตอร์วาล์ว โดยโครงสร้างของมอเตอร์วาล์วนี้ภายในจะมีขดลวด 2 ขด คือ หมุนเพื่อเปิดและปิดวาล์ว เมื่อใดก็ตามที่ขดลวดใดได้รับแรงดันจาก มอเตอร์จะหมุนไปในทิศทางนั้น โดยเอาต์พุตแบบนี้จะเป็นตัดต่อ แรงดันที่จ่ายให้กับขดลวดทั้ง 2 สลับไปมา ดังรูป



รูปที่ 65 การควบคุมแบบ Position Proportional

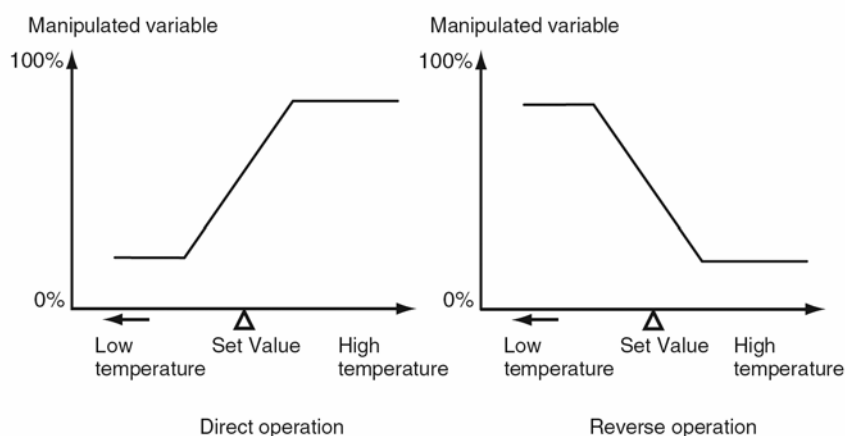
การควบคุมแบบนี้จะนิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมที่ใช้ความร้อนสูง เช่น เซรามิก เพราะต้องใช้มอเตอร์วาล์ว เป็นตัวปิด/เปิด แก๊สในการเผาไหม้ นอกจากนั้นการควบคุมลักษณะนี้ จะมีอินพุตที่รับสัญญาณป้อนกลับที่เป็นโพเทนชิโอมิเตอร์ (Potentiometer) จากมอเตอร์วาล์วเพื่อแสดงเปอร์เซ็นต์การปิด/เปิดของวาล์ว เรียกว่า Close Control ดังนั้นขณะติดตั้งระบบใหม่จะต้องทำการสอบเทียบ (Calibration) ตัวโพเทนชิโอมิเตอร์ กับตัวควบคุม เพื่อให้ตัวควบคุมรู้ว่าขณะเปิด/ปิดวาล์วแต่ละเปอร์เซ็นต์ ค่าที่ป้อนกลับมาจากมอเตอร์วาล์วผ่านทางโพเทนชิโอมิเตอร์มีค่าเท่าใด (หน่วยเป็นโอห์ม) ส่วนการควบคุมแบบนี้ที่ไม่มีการต่อโพเทนชิโอมิเตอร์เป็นสัญญาณป้อนกลับมาเรียกว่า Float Control โดยเปอร์เซ็นต์การปิด/เปิดของวาล์วจะแสดงจากคาบเวลาในเปิด/ปิดวาล์วนั่นเอง

ฟังก์ชันการทำงานของตัวควบคุม

เพื่อเป็นการควบคุมอุณหภูมิที่สมบูรณ์ ตัวควบคุมอุณหภูมิมีฟังก์ชันการควบคุมให้เลือกใช้หลัก ๆ ที่จำเป็นต้องตั้งค่าดังนี้

5.1 Direct (Cooling) / Reverse (Heating) Operation

การทำงานแบบตรง (Direct) เอาต์พุตจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า PV เพิ่มขึ้น เปรียบเหมือนการควบคุมความเย็น (Cooling) ในทางกลับกันการทำงานแบบผกผัน (Reverse) เอาต์พุตจะมีค่าลดลงเมื่อค่า PV เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นหลักการของการควบคุมความร้อน (Heating)



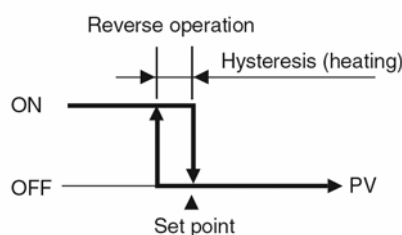
รูปที่ 66 การทำงานแบบ Direct และ Reverse operation

ยกตัวอย่างเช่น เมื่ออุณหภูมิที่วัดได้ (PV) ต่ำกว่าค่าตั้ง (Set Point) ในการควบคุมความร้อน ค่าเอาต์พุตจะเพิ่มขึ้นตามความแตกต่างของค่า PV และ SP ดังนั้นในการควบคุมความร้อน

เช่น ฮีตเตอร์ เบิร์นเนอร์ (Burner) จึงต้องเลือกการควบคุมแบบผกผัน (Reverse) และการควบคุมความเย็น เช่น Compressor คอยล์เย็น ต้องเลือกการควบคุมแบบตรง (Direct)

5.2 Hysteresis

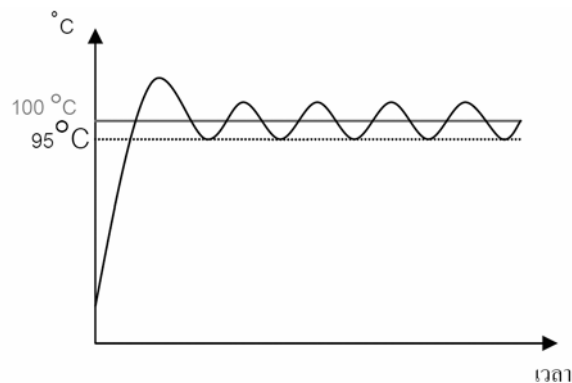
ในการควบคุมแบบ ON/OFF จะมีค่าฮีสเตอร์รีซิส (Hysteresis) ให้ตั้ง ฮีสเตอร์รีซิสนี้จะเป็นตัวกำหนดการกลับมา ON อีกครั้งของเอาต์พุต กล่าวคือ การควบคุมแบบ ON/OFF ไม่ว่าจะเป็นการควบคุมความร้อนหรือความเย็น เอาต์พุตจะตัดเมื่อค่า PV เท่ากับค่า SP พอดี ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องกำหนดค่าที่จะทำให้ เอาต์พุตกลับมาต่ออีกครั้งหนึ่งเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า SP ในการควบคุมความร้อนหรือเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า SP ในการควบคุมความเย็น หรือในการควบคุมแบบความร้อน/เย็น พร้อมกัน ค่าฮีสเตอร์รีซิสสามารถตั้งได้อย่างอิสระต่อกัน คือมีทั้งฮีสเตอร์รีซิสความร้อน (Heating Hysteresis) และฮีสเตอร์รีซิสความเย็น (Cooling Hysteresis)



รูปที่ 67 การทำงานของฟังก์ชันฮีสเตอร์รีซิส

ตัวอย่าง

ในการควบคุมแบบ ON/OFF สำหรับควบคุมความร้อนถ้า SP เท่ากับ 100°C ฮีสเตอร์รีซิสเท่ากับ 5°C ตัวควบคุมจะทำงานดังนี้ เอาต์พุตจะติดที่อุณหภูมิเท่ากับ 100°C และกลับมาต่อเมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่า SP 5°C นั่นคือที่ 95°C เอาต์พุตจะกลับมาต่ออีกครั้งหนึ่งดังรูป

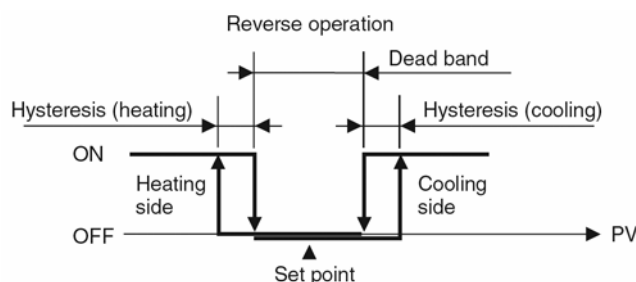


รูปที่ 68 การควบคุมอุณหภูมิแบบ ON/OFF ที่ใช้ฟังก์ชันฮีสเตอร์รีซิส

โดยค่า Hysteresis ที่ตั้งจะเป็นค่าความแตกต่าง (Deviation) เทียบกับค่าตั้ง (Set Point) (ดูเนื้อหาเพิ่มเติมในบทการควบคุมอุณหภูมิ)

- การควบคุมแบบ 3 ตำแหน่ง

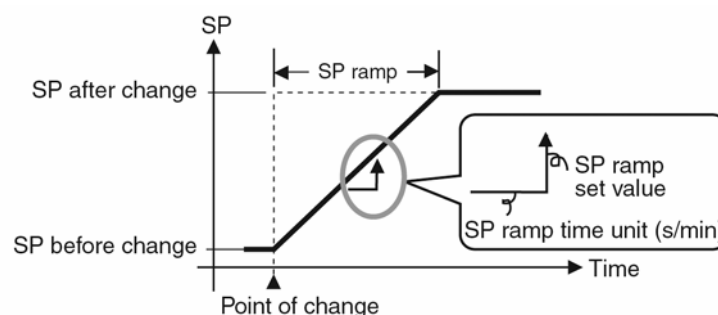
ในการควบคุมแบบความร้อน/เย็น (Heating/Cooling Control) จะมีช่วง Dead band (ช่วงที่เอาต์พุตทั้งความร้อนและความเย็นมีค่าเป็น 0%) ให้สามารถตั้งค่าได้ ทำให้เกิดการควบคุมแบบ 3 ตำแหน่ง ดังรูป



รูปที่ 69 การใช้ฟังก์ชันฮีสเตอร์ซีส์ในการควบคุมแบบ 3 ตำแหน่ง

5.3 SP Ramp Function: การจำกัดอัตราการเปลี่ยนค่าเซตพอยต์

ฟังก์ชัน SP ramp ใช้ควบคุมอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าเซตพอยต์ โดยเซตพอยต์จะค่อยๆ เปลี่ยนแปลงตามอัตราที่ตั้งไว้ซึ่งอาจเป็นองศาต่อวินาทีหรือวินาทีก็ได้ ดังรูป ฟังก์ชัน SP ramp จะถูกใช้ในกรณีที่การควบคุมไม่ต้องการให้ เอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วทันที่ทันใดขณะเริ่มต้นควบคุม ซึ่งการควบคุมปกติเมื่อเริ่มต้นการควบคุมค่าที่วัดได้ (PV) จะแตกต่างจากค่าเซตพอยต์มากทำให้ตัวควบคุมสั่งงานให้เอาต์พุตจ่ายเป็นเปอร์เซ็นต์มาก ทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและจะค่อยๆ ชลอเมื่อค่า PV เข้าใกล้ค่าเซตพอยต์ (เข้าสู่ช่วง P band) ซึ่งในบางงาน เช่น งานอบผิวเซรามิค การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วจะทำให้ผิวเซรามิคเสียหายได้



รูปที่ 70 การทำงานของฟังก์ชัน SP-Ramp

เมื่อฟังก์ชัน SP ramp ถูกใช้งาน ขณะเริ่มตั้งการควบคุม ค่าเซตพอยต์ที่ตัวควบคุมรับรู้จะเริ่มจากค่าที่เท่ากับค่าที่วัดได้ (PV) จากนั้นค่าเซตพอยต์จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นในอัตราที่ตั้งไว้จนถึงค่าเซตพอยต์ที่ต้องการ (Target set point) ซึ่งก็คือ เซตพอยต์เดิมของการควบคุมปกติ การทำงานแบบนี้ตัวควบคุมจะรับรู้ว่าจะเริ่มต้นค่าความแตกต่าง

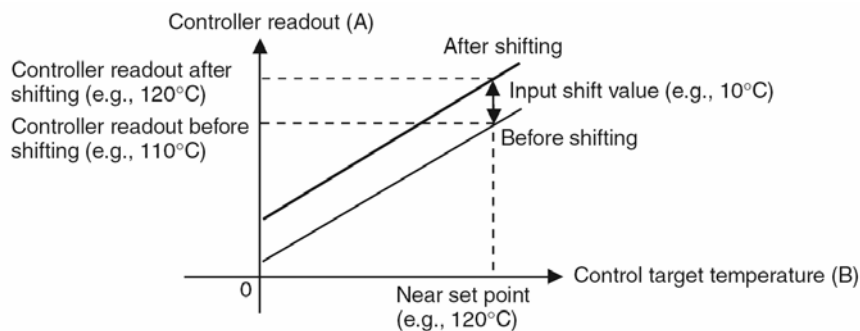
ระหว่างค่า PV กับเซตพอยต์ความแตกต่างก็น้อย (เนื่องจากฟังก์ชัน SP ramp ค่าเซตพอยต์จะเริ่มจากค่า PV ขณะเริ่มทำงาน) ทำให้ตัวควบคุมสั่งให้เอาต์พุตจ่ายเป็นเปอร์เซ็นต์ไม่มาก ส่งผลให้อุณหภูมิค่อยๆ เปลี่ยนไปตามเซตพอยต์ที่ค่อยๆ เปลี่ยนแปลงไปด้วย จะทำให้อุณหภูมิในระบบมีการเปลี่ยนแปลงในอัตราที่คงที่จนถึงค่าเซตพอยต์ที่ต้องการ

5.4 Shifting Input

เป็นฟังก์ชันที่ช่วยชดเชยค่าแสดงผลตามต้องการ ตัวอย่างเช่น ถ้าอุณหภูมิที่แสดงผลไม่ตรงกับค่าจริงที่วัดได้ ฟังก์ชันนี้สามารถตั้งค่าเพิ่มหรือลด ค่าที่แสดงผลได้ ฟังก์ชันชดเชยค่านี้มี 2 ชนิดคือ แบบ 1 จุด และแบบ 2 จุด

5.4.1 การชดเชยค่าแบบ 1 จุด

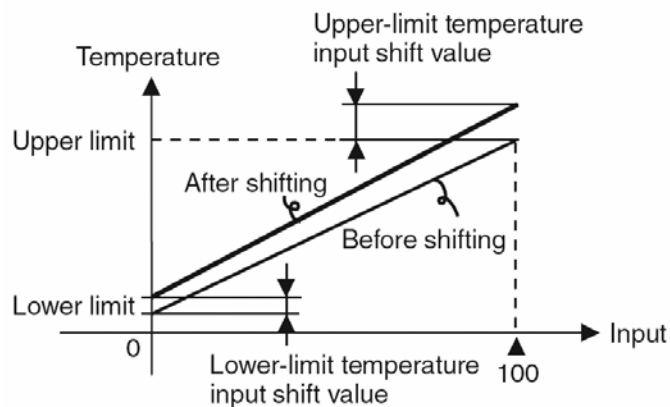
จะมีค่าให้ตั้งค่าเดียว โดย ค่าที่แสดงที่หน้าจอตัวควบคุมจะถูกเพิ่มหรือลดเท่าๆ กัน ตลอดย่านการวัดของเทอร์โมคัปเปิลชนิด K มีย่านการวัดเท่ากับ -200°C ถึง 1300°C ถ้ามีการใช้ฟังก์ชันชดเชยค่าแบบหนึ่งจุดและตั้งค่าเป็น 5 ค่าที่วัดได้จะแสดงผลมากกว่าค่าจริง 5°C ตลอดย่าน นั่นคือ -205 ถึง 1305°C ดังรูป



รูปที่ 71 การชดเชยแบบจุดเดียว

5.4.2 การชดเชยค่าแบบ 2 จุด

ในบางกรณีต้องการชดเชยค่าไม่เท่ากันระหว่างช่วง 2 ช่วง เช่น ถ้าพบว่าอุณหภูมิที่วัดได้ในช่วงอุณหภูมิต่ำผิดพลาดไม่เท่ากับช่วงอุณหภูมิสูง การตั้งค่าชดเชยแบบ 2 จุด สามารถช่วยแก้ไขปัญหาดังกล่าว

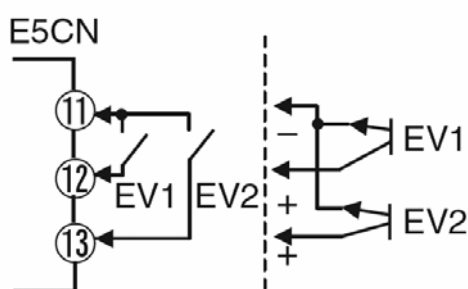


รูปที่ 72 การขจัดเซตแบบสองจุด

จากภาพถ้าตั้งค่า Lower limit เท่ากับ 1°C และ Upper limit เท่ากับ 2°C ความชันของกราฟจะเปลี่ยนไป นั่นคือที่กึ่งกลางของกราฟอุณหภูมิจะแสดงค่าเพิ่มจากค่าจริง 1.5°C

5.5 Event Inputs

โดยส่วนมาก Even Input จะเป็น Option พิเศษที่เพิ่มเข้ามาในตัวควบคุม ยกเว้นตัวควบคุมระดับสูงบางรุ่นจะมี Event Input มาให้เป็นฟังก์ชันมาตรฐาน Event Input เป็นอินพุตจะรับสัญญาณจากภายนอก โดยส่วนมากเป็นหน้าสัมผัส คือ เมื่อ Event Input ถูกต่อถึงกันดังรูป ตัวควบคุมจะทำงานตามที่ตั้งโปรแกรมไว้ล่วงหน้าแล้ว เช่น การสั่ง RUN/Stop การเปลี่ยนค่าเซตพอยต์ เป็นต้น



รูปที่ 73 การต่อใช้งาน Event Input

Event Input จะทำงานเมื่อขั้วอินพุต (จากรูปขั้ว 11 กับ 12) ถูกทำให้ต่อกับ Common ของมัน (ขั้ว 13) ซึ่งการทำให้อินพุตต่อกับ Common อาจใช้เป็นสวิตช์ปุ่มกดที่หน้าตู้ควบคุม เอาต์พุตจาก PLC หรือ Sensor ที่เอาต์พุตเป็นแบบหน้าสัมผัส หรือ ทรานซิสเตอร์

Event Input ในตัวควบคุมหนึ่งตัวอาจมีมากกว่า 1 Event Input ได้ เช่น 2 – 4 อินพุตแต่ละอินพุตอาจถูกกำหนดให้ทำงานเป็นอิสระกัน หรือสัมพันธ์กันได้เช่น การเลือกใช้เซตพอยต์ ดังตาราง

Event input 1	Event input 2	Selected set point
OFF	OFF	Set point 0
ON	OFF	Set point 1
OFF	ON	Set point 2
ON	ON	Set point 3

ตารางที่ 6 แสดงเงื่อนไขการเลือกใช้เซตพอยต์โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง Event Input 2 อินพุต

Event Input สามารถแยกทำงานอิสระกันดังการกำหนดในตาราง

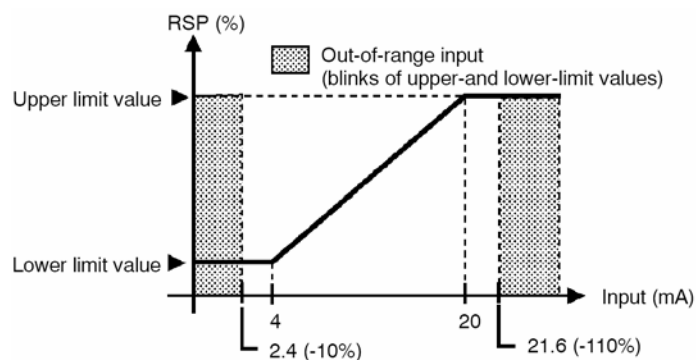
Setting	Input contact	Status
Event input 1 or 2	ON	STOP
Event input 1 or 2	OFF	RUN

Setting	Input contact	Status
Event input 1 or 2	OFF	Automatic
Event input 1 or 2	ON	Manual

ตารางที่ 7 แสดงเงื่อนไขการใช้ Event Input ในการสั่ง RUN/STOP หรือ เปลี่ยนระหว่าง AUTO/MANUAL ตามลำดับ

5.6 Remote input (set point)

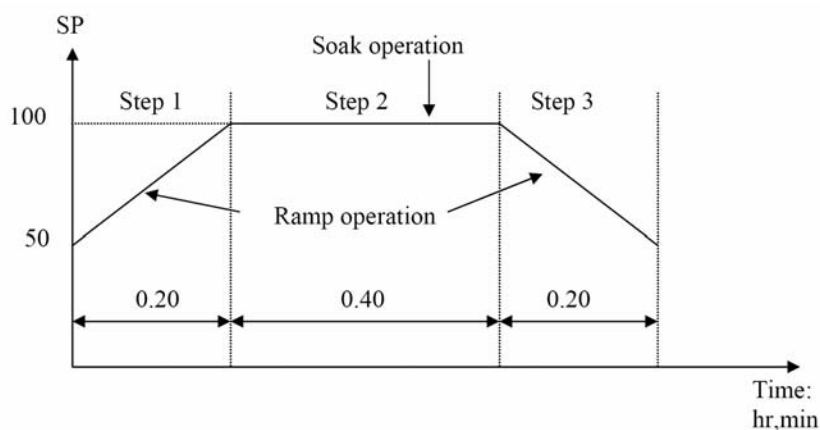
รีโมทอินพุตเป็นสัญญาณจากภายนอกซึ่งส่วนมากจะเป็นสัญญาณ 4-20 mA ตัวควบคุมจะนำสัญญาณนี้มาเป็นเซตพอยต์ให้กับตัวควบคุม โดยต้องทำการสเกลให้ค่าสัญญาณ 4-20 mA มาเป็นค่าอุณหภูมิ รีโมทเซตพอยต์นี้จะใช้ในลักษณะงานที่ต้องการให้เอาต์พุตจากอุปกรณ์อื่นทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดเซตพอยต์ให้กับตัวควบคุม ตัวอย่างเช่นการนำตัวควบคุม 2 ตัวมาประยุกต์ใช้ในงานควบคุมแบบคาสเคด (Cascade Control) โดยเอาต์พุตของตัวควบคุมในลูบแรกจะเป็นสัญญาณ 4-20 mA ต่อเข้ากับรีโมทอินพุตของตัวควบคุมในลูบที่สอง เพื่อเป็นการกำหนดค่าเซตพอยต์ให้กับตัวควบคุมในลูบ ซึ่งสุดท้ายแล้วเอาต์พุตของตัวควบคุมในลูบที่สองจะเป็นเอาต์พุตจริงของระบบ (ดูหลักการควบคุมแบบคาสเคดได้ในบทวิธีการควบคุมอุณหภูมิ)



รูปที่ 74 การทำสเกลของรีโมทอินพุต

5.7 Programming Function

ตัวควบคุมอุณหภูมิบางรุ่นสามารถตั้งโปรแกรมการควบคุมได้ดังรูป



รูปที่ 75 การควบคุมแบบตั้งโปรแกรมได้

ลักษณะของการโปรแกรมคือการตั้งค่าเซตพอยต์ให้ตัวควบคุมทำงานตามเวลาที่กำหนด เมื่อครบกำหนดแล้วตัวควบคุมจะเปลี่ยนไปทำการควบคุมที่เซตพอยต์ถัดไป ตามโปรแกรมจนครบตามที่โปรแกรมไว้ ซึ่งส่วนประกอบที่สำคัญของโปรแกรมนี้นี้

- Ramp operation

Ramp operation คือ ช่วงเวลาที่เซตพอยต์เปลี่ยนจากค่าหนึ่งไปยังเซตพอยต์ที่ต้องการอีกค่าหนึ่ง จากรูป step ที่ 1 เป็นช่วง ramp ที่เซตพอยต์เปลี่ยนจาก 50°C ไปเป็น 100°C ซึ่งมี ramp time เท่ากับ 20 นาที

- Soak operation

คือช่วงเวลาที่เซตพอยต์คงที่ไม่เปลี่ยนแปลง จากรูป step ที่ 2 เป็นช่วง soak ที่เซตพอยต์คงที่ที่ 100°C ซึ่งมี soak time เท่ากับ 40 นาที

ตัวอย่างลักษณะการควบคุมอุณหภูมิ

ในบทนี้จะเป็นการยกตัวอย่างการใช้ตัวควบคุมอุณหภูมิกับลักษณะงานต่าง ๆ รวมถึงหลักการพิจารณาเลือกใช้ตัวควบคุมให้เหมาะสมกับงาน โดยจะอ้างอิงจากตัวควบคุมของบริษัท ออมรอนฯ ในการตั้งค่าเพื่อความเข้าใจโดยง่าย

6.1 การควบคุมอุณหภูมิด้วยวิธี On/Off Control

ต้องการควบคุมอุณหภูมิตามเงื่อนไขดังนี้

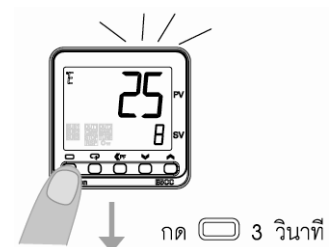
- A) Heater จะตัดเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 100 °C
- B) Heater จะต่อเมื่ออุณหภูมิลดลงจนถึง 95 °C

- Solution

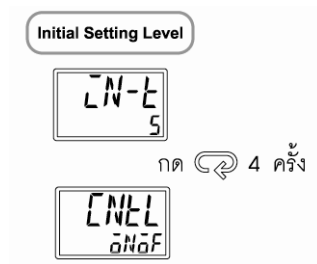
- a) เลือกการควบคุมเป็นแบบ On/Off
- b) ตั้งค่าฮิสเตอร์ซิส (Hyteresis) ไว้ที่ 5 °C
- c) ตัวควบคุมที่ใช้เป็นรุ่น E5CC-RX3A5M

- Parameter Setting

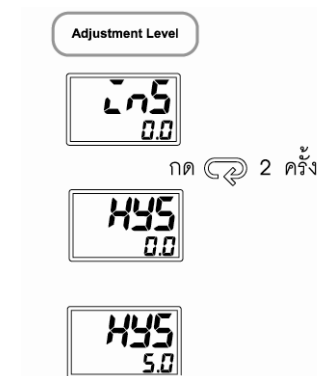
- 1) เข้าไปที่ Initial Setting Level เพื่อเลือกการควบคุมเป็น On/Off โดยการกด  นาน 3 วินาที จากนั้นกด  อีก 4 ครั้ง เพื่อเข้าสู่การตั้งระบบควบคุม หากระบบที่เป็นอยู่เป็น PID ให้เปลี่ยนเป็น ON/OFF โดยการกด  หนึ่งครั้ง



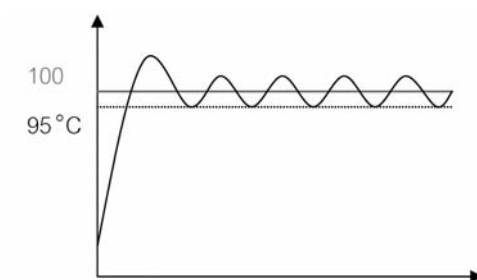
- 2) ออกจาก Initial Setting Level กลับสู่ Operation Level กด  1 วินาที



- 3) เข้า Adjustment Level เพื่อตั้งค่าฮิสเตอร์ซิสโดยกดปุ่ม  1 ครั้ง กด  จนได้หน้าจอ Hysteresis
- 4) ตั้งค่า hys เท่ากับ 5 โดยกดปุ่ม 
- 5) กดปุ่ม  อีกครั้งเพื่อกลับสู่ Operation Level



- 6) ทำการตั้งค่า SV (Set Value) เท่ากับ 100 °C ใน Operation Level การควบคุมจะได้ตามรูป



รูปที่ 76 ลักษณะการควบคุมแบบ ON/OFF

6.2 การใช้ Alarm output

จากข้อ 1 ถ้าเพิ่มเงื่อนไขดังนี้

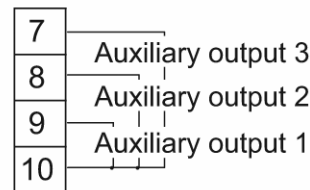
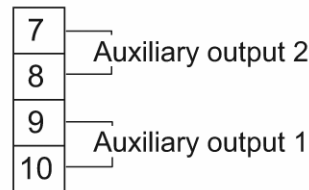
- A) มีหน้าสัมผัส output ไปต่อวงจรพัดลมกรณีอุณหภูมิสูงเกิน 120°C
- B) มีสัญญาณดังเตือนเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 75°C

● Solution

จากเงื่อนไขทั้ง 2 ต้องใช้ alarm เป็นหน้าสัมผัสช่วย 2 ตัว ดังนี้



Auxilliary outputs 1 and 2 Auxilliary outputs 1, 2, 3



รูปที่ 77 ตัวควบคุม และ Alarm

- a) เลือก alarm 1 เป็นแบบ deviation upper limit (type 2)
b) เลือก alarm 2 เป็นแบบ deviationlower limit + standby sequence ON (type 7)

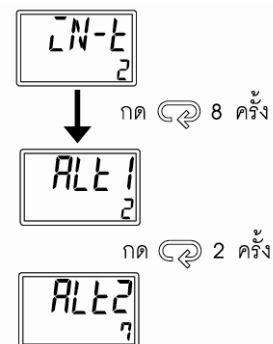
Set value	Alarm type	Alarm output operation		Description of function
		When alarm value X is positive	When alarm value X is negative	
0	Alarm function OFF	Output OFF		No alarm
1	Upper- and lower-limit *1		*2	Set the deviation in the set point by setting the alarm upper limit (H) and alarm lower limit (L). The alarm is ON when the PV is outside this deviation range.
2	Upper-limit			Set the upward deviation in the set point by setting the alarm value (X). The alarm is ON when the PV is higher than the SP by the deviation or more.
3	Lower-limit			Set the downward deviation in the set point by setting the alarm value (X). The alarm is ON when the PV is lower than the SP by the deviation or more.
4	Upper- and lower-limit range *1		*3	Set the deviation in the set point by setting the alarm upper limit (H) and alarm lower limit (L). The alarm is ON when the PV is inside this deviation range.
5	Upper- and lower-limit with standby sequence *1		*4	A standby sequence is added to the upper- and lower-limit alarm (1). *6
6	Upper-limit with standby sequence			A standby sequence is added to the upper-limit alarm (2). *6
7	Lower-limit with standby sequence			A standby sequence is added to the lower-limit alarm (3). *6
8	Absolute-value upper-limit			The alarm will turn ON if the process value is larger than the alarm value (X) regardless of the set point.
9	Absolute-value lower-limit			The alarm will turn ON if the process value is smaller than the alarm value (X) regardless of the set point.
10	Absolute-value upper-limit with standby sequence			A standby sequence is added to the absolute-value upper-limit alarm (8). *6
11	Absolute-value lower-limit with standby sequence			A standby sequence is added to the absolute-value lower-limit alarm (9). *6
12	LBA (alarm 1 type only)	-		*7
13	PV change rate alarm	-		*8
14	SP absolute value upper limit			This alarm type turns ON the alarm when the set point (SP) is higher than the alarm value (X).
15	SP absolute value lower limit			This alarm type turns ON the alarm when the set point (SP) is smaller than the alarm value (X).
16	MV absolute value upper limit *9			This alarm type turns ON the alarm when the manipulated variable (MV) is higher than the alarm value (X).
17	MV absolute value lower limit *9			This alarm type turns ON the alarm when the manipulated variable (MV) is smaller than the alarm value (X).
18	RSP absolute value upper limit *10			The alarm will turn ON when the remote SP (RSP) is larger than the alarm value (X).
19	RSP absolute value lower limit *10			The alarm will turn ON when the remote SP (RSP) is smaller than the alarm value (X).

X คือ อุณหภูมิแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของ Alarm กับอุณหภูมิ Set point

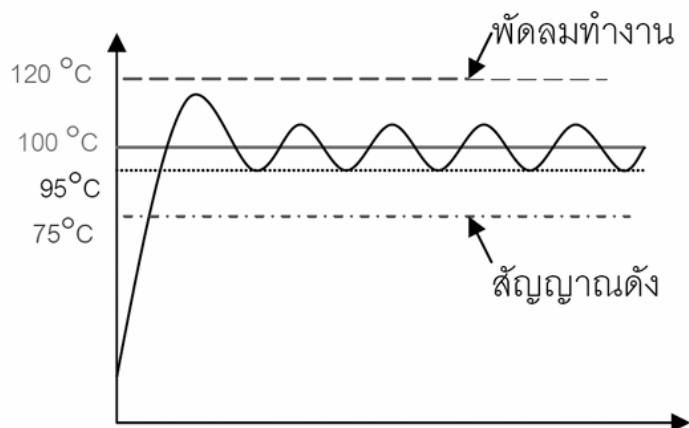
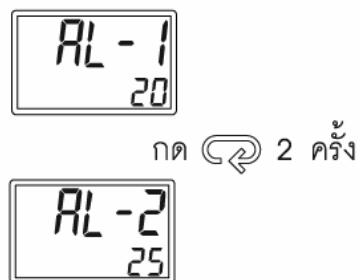
ตารางที่ 8 การเลือกชนิดของ Alarm1 และ Alarm2

● Parameter setting

- 1) เข้า Initial setting level เพื่อตั้งชนิดของ alarm 1 และ 2
กด  3 วินาที จากนั้นกด  เพื่อเข้าการเซตรูปแบบ
Alarm 1 ปรับให้เป็นหมายเลข 2 โดยใช้ปุ่ม  
- 2) กด  2 ครั้ง เพื่อตั้งรูปแบบ Alarm 2 ปรับให้เป็น
หมายเลข 7



- 3) จากนั้นกลับมาที่ Operation Level โดยกด  อีก 1 วินาที เพื่อตั้งค่า Alarm 1 เท่ากับ
20°C และ Alarm 2 เท่ากับ 25°C โดยกด  2 ครั้ง จากนั้นกด  จนได้หน้าจอ
หลัก



รูปที่ 78 ลักษณะการทำงานตามการตั้งค่า

6.3 การตั้งค่าชดเชยการวัด

A) งานควบคุมอุณหภูมิงานหนึ่งหัววัดอุณหภูมิไม่สามารถวัดโดยตรงที่ชิ้นงานได้ ต้องวัดห่างออกมาประมาณ 5 cm ทำให้ค่าที่วัดได้ต่ำกว่าค่าจริง 2°C ต้องการแสดงผลให้ตรงกับค่าจริง

- Solution

a) สามารถแก้ไขได้โดยใช้พารามิเตอร์ Input Shift ของ E5CC

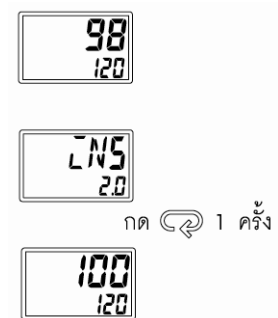
- Parameter setting

1) Display เดิมที่ operation level

2) เข้า Adjustment level เพื่อตั้งค่า Input Shift เป็น 2°C

(ชดเชยเพิ่ม 2°C) โดยการกด  1 ครั้ง และกด  อีก 3 ครั้ง แล้วแก้เป็น 2.0 ด้วยปุ่ม  

3) กลับมาที่ Operation level โดยการกด  อีก 1 ครั้ง ค่าจะแสดงดังรูป



6.4 การควบคุมแบบ PID โดยวิธี Self-tuning

เงื่อนไขที่ใช้งานมีดังนี้

A) Input เป็น Thermocouple type K แสดงทศนิยม 1 ตำแหน่ง

B) ต้องการให้ป้องกันการตั้งค่า SV เกิน 150°C และต่ำกว่า 50°C

C) ต้องการควบคุมอุณหภูมิที่ 90°C โดยใช้การควบคุมแบบ PID แต่ไม่ต้องการให้ระบบแกว่งในช่วงเริ่มแรก (Temperature เป็นรุ่น E5CC-RX3A5M)

- Solution

a) เลือกย่านการวัดที่แสดงผลเป็นทศนิยมในตาราง Input type

b) ตั้งค่าจำกัดช่วงของการตั้งค่า SV โดยใช้ฟังก์ชัน Set point upper & lower limit

c) เลือกการคำนวณค่า PID แบบวิธี Self Tuning เพราะจะไม่ทำให้ระบบแกว่งตอนเริ่มต้นคำนวณ

● Parameter setting

- 1) เลือก Input Type หมายเลข 3 ใน Initial setting level โดยกด  แล 3 วินาที จากนั้นเปลี่ยนชนิดของ Input โดยการกด   ให้ได้ค่า 6
- 2) ตั้งค่า Set point Upper & Lower Limit ใน Initial setting level เป็น 150°C และ 50°C ตามลำดับ กด  เข้าการตั้งค่า Upper ก่อน ใส่ค่า 150 ด้วยปุ่มขึ้น-ลง จากนั้น อีกครั้งเพื่อตั้ง Lower เป็น 50
- 3) เลือกการควบคุมเป็นแบบ PID ใน และเลือกฟังก์ชัน Self Tuning(ST) เป็น "On" ใน Initial setting level โดยกด  อีกครั้งหนึ่ง แก้ไขเป็น PID จากนั้นกด  อีก 2 ครั้ง เพื่อตั้ง Self tuning ให้ ON
- 3) ตั้งค่า Control Period(CP) เป็น 20 sec ใน Initial setting level โดยกด  2 ครั้ง เปลี่ยนค่าเป็น 20 ด้วยปุ่ม   ออกจาก Initial setting level โดยกด  ค้างไว้ 1 วินาที
- 4) ตั้งค่า SV เท่ากับ 90°C

LN-L
6

SL-H
150.0

กด  2 ครั้ง

SL-L
50.0

LNEL
PID

กด  2 ครั้ง

ST
ON

CP
20

กด  2 ครั้ง

30
90.0

** ตอนเริ่มต้นทำงานจะสังเกตเห็น **TUNE** กระพริบอยู่มุมบนด้านซ้ายของหน้าจอ แสดงถึงฟังก์ชัน ST กำลังทำงาน

6.5 การควบคุมแบบ PID โดยวิธี Auto-tuning

ต้องการควบคุมอุณหภูมิตามเงื่อนไขดังนี้

- A) ต้องการการควบคุมที่ค่อนข้างเที่ยงตรงเนื่องจากเป็นกระบวนการผลิตอาหาร โดยอุณหภูมิที่ต้องการคือ 125.0°C
- B) มีไฟแสดงสถานะเมื่ออุณหภูมิอยู่ในช่วงที่ต้องการ 120.0-150.0°C
- C) ต้องการตัวตรวจวัดอุณหภูมิที่ละเอียดและมีความเป็นเชิงเส้น (Linear)
- D) ต้องการตัวควบคุมขนาด 48X96 มม.

● Solution

- ต้องเลือกการควบคุมแบบ PID โดยตั้งค่า Control Period น้อย ๆ
- ต้องใช้หน้าสัมผัส Alarm มาเป็นตัวต่อวงจรไฟแสดง
- ต้องใช้ตัววัดอุณหภูมิแบบ Pt100 เนื่องจากมีความเป็นเชิงเส้นมากกว่าเทอร์โมคัปเปิ้ล
- ตัวควบคุมเลือกเป็นรุ่น E5CC-RX3A5M

● Parameter setting

- เลือก Input type ใน Initial setting level เป็น type 1 ทศนิยม 1 ตำแหน่ง โดยกด  แลไว้ 3 วินาที

IN-1

- เลือกการควบคุมเป็น PID และ Control Period เท่ากับ 2 sec ใน Initial setting level

CN-1
PID

- เลือก alarm 1 type เป็นชนิด Upper and lower-limit with standby sequence(deviation) หมายเลข 4 ใน Initial setting level จากนั้นกดกลับเข้าสู่ Operation Level โดยกด  น้อยกว่า 1 วินาที

CP
2

กด 

AL-1
4

- ตั้งค่า Alarm H เท่ากับ 25.0°C alarm L เท่ากับ 5.0°C โดยกด  เพื่อตั้งค่า

AL H
25.0

กด 

AL L
5.0

- ตั้งค่า SV เท่ากับ 125.0°C ใน Operation level

SV
125.0

- ทำการคำนวณค่า PID ด้วยวิธี Auto-tuning ใน Adjustment level โดยตั้งเป็น on โดยกด  1 ครั้ง

AL
on

- หลังจากทำ Auto-tuning แล้วจะสังเกตว่าตัวเลข SV จะกระพริบจนกว่าตัวควบคุมจะคำนวณค่า PID เสร็จตัวเลขจะหยุดกระพริบ เราสามารถเข้าไปดูค่า พารามิเตอร์ PID ได้ใน Adjustment level

P
8.0

กด 

I
223

กด 

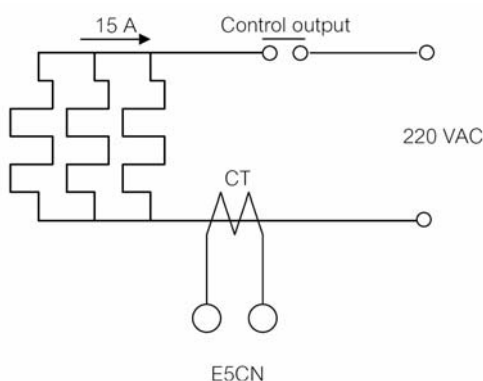
D
4.0

6.6 การใช้ฟังก์ชันตรวจสอบฮีตเตอร์ขาด

ในการใช้ Temperature Controller ควบคุมอุณหภูมิ ตัวให้ความร้อนคือฮีตเตอร์ โดยใช้ฮีตเตอร์ 3 ตัวต่อขนานกัน ใช้กับแรงดัน 220VAC 1 เฟส แต่ละตัวกินกระแส 5A ต้องการมีฟังก์ชันตรวจจับและมีเสียงเตือนถ้าฮีตเตอร์เส้นใดเส้นหนึ่งขาด

● Solution

ใน Temperature Controller รุ่น E5CC มีฟังก์ชัน Heater Burnout Alarm (HBA) ในรุ่น E5CC-RX3A5M-001 หรือ E5CC-X3A5M-003 พร้อมทั้ง E54-CT1 หรือ E54-CT3 : Current Transformer (CT)

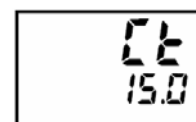
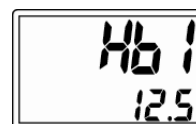


รูปที่ 79 การต่อวงจรการตรวจจับฮีตเตอร์ขาด

- กระแสรวมที่ไหลปกติในวงจรคือ 15 A (3X5 A)
- กระแสเมื่อฮีตเตอร์ขาดอย่างน้อย 1 เฟส : $15 - 5 = 10 \text{ A}$
- Set value ของค่ากระแสที่ตั้งในฟังก์ชัน HBA = $(15 + 10) / 2 = 12.5 \text{ A}$

● Parameter setting

- 1) เข้าไปตั้งค่า Set value ของ ฟังก์ชัน HBA ใน Adjustment level โดยกด และค้นหาด้วย หลายๆ ครั้ง
- 2) ในตอนนี้หน้าสัมผัส ALM1(alarm1) จะถูกกำหนดให้เป็น output ของ HBA โดยอัตโนมัติ นั่นคือเมื่อใดก็ตามที่กระแสที่ Temperature Controller วัดได้ต่ำกว่า 12.5 A หน้าสัมผัส ALM1 จะ “ON” เราสามารถดูกระแสที่วัดได้จากพารามิเตอร์ Heater current value monitor ใน Adjustment level



6.7 การเปลี่ยนค่า SP จากสวิตช์ภายนอกโดยใช้ Event input

การควบคุมอุณหภูมิ ต้องการเปลี่ยนค่า SV จากภายนอก SV ที่ต้องการเปลี่ยนมี 3 ค่า
ดังนี้

- SP0 = 100°C
- SP1 = 120°C
- SP2 = 150°C

● Solution

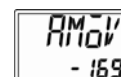
- a) ใช้ฟังก์ชัน Event input ของ E5CC จะมาพร้อมในรุ่นที่มีรหัสเสริมท้ายท้าย 001, 004, 005, 006, 007
- b) กำหนดให้ Event input ทำงานในฟังก์ชัน Multi-SP 4 set points
- c) ตั้งค่า SP0 ถึง SP3 โดยความสัมพันธ์ระหว่าง Event input กับ SP แสดงไว้ดังตาราง

Event input1	Event input 2	Selected Set point
OFF	OFF	Set point 0
ON	OFF	Set point 1
OFF	ON	Set point 2
ON	ON	Set point 3

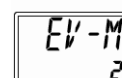
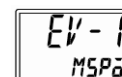
ตารางที่ 9 การกำหนดเซตพอยต์โดยใช้ฟังก์ชัน Event input

● Parameter setting

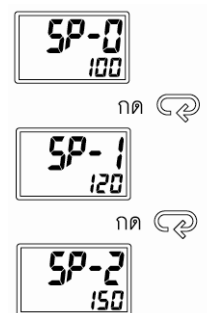
- 1) ใส่ Password “ -169” แล้วกด  ที่พารามิเตอร์ตัวสุดท้ายของ Initial setting level เพื่อเข้าไปยัง Advance function setting level



- 2) ตั้งค่าในพารามิเตอร์ “Event Input Assignment 1 = MSP0” และ “Event Input Assignment 2 = MSP1”



- 3) จากนั้นทำการตั้งค่า SP มีต้องการใน Adjustment level ดังนี้



- 4) นั่นคือ ถ้าไม่มีสัญญาณ Event input (หน้าสัมผัส)เข้ามา ตัวควบคุมจะใช้ค่า SP เป็น SP0 แต่ถ้ามีสัญญาณ EV1 เข้ามา SP จะเป็น SP1 และถ้า EV2 เข้ามา SP จะเป็น SP2

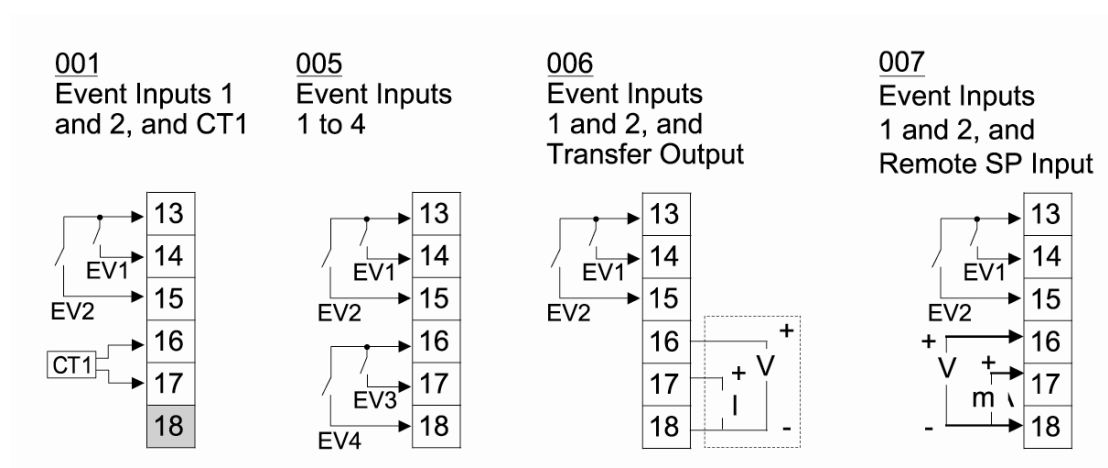
6.8 การสั่ง Run/Stop และเปลี่ยนค่า SP จากภายนอก

ต้องการควบคุมอุณหภูมิโดยมีเงื่อนไขพิเศษดังนี้

- A) สามารถสั่งให้ตัวควบคุม RUN/STOP ได้ที่สวิตช์หน้าตู้ควบคุม
- B) สามารถสั่งเปลี่ยน SP ได้ระหว่าง 110°C กับ 160°C โดยสวิตช์หน้าตู้ควบคุมได้เช่นกัน

• Solution

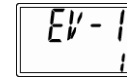
- a) ใช้ฟังก์ชัน Event input โดยเลือกใช้ EV1 ทำหน้าที่เปลี่ยนค่า SP
- b) ใช้ EV2 ทำหน้าที่เปลี่ยนการทำงานระหว่าง RUN/STOP



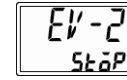
รูปที่ 80 เทอร์มินอล Event input ของ E5CC

- Parameter setting

- 1) ตั้งค่าพารามิเตอร์ “Event Input Assignment 1” ใน Advance function setting level เช่นเดียวกับ Application 7 ซึ่งการเลือกในลักษณะนี้ EV1 จะถูกกำหนดให้ทำหน้าที่เปลี่ยนค่า SP โดยอัตโนมัติ



- 2) ตั้งค่า Event input 2 (EV2) assignment เป็น “STOP”



- 3) จากนั้นทำการตั้งค่า SP ที่ต้องการใน Adjustment level



กด

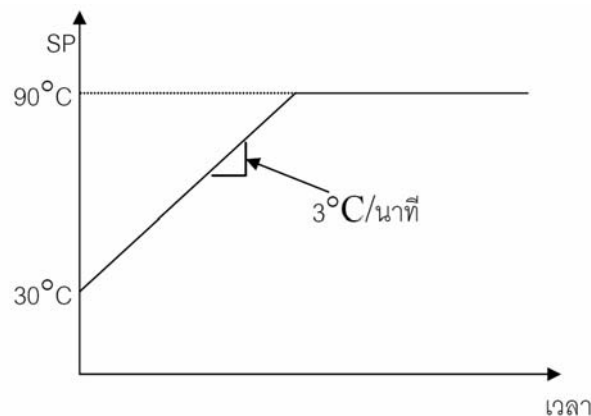


6.9 การเพิ่ม SP แบบเป็นอัตรา โดยใช้ฟังก์ชัน SP Ramp

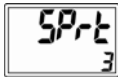
ในงานอบผิวเซรามิกต้องควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 90°C โดยอุณหภูมิก่อนการทำงานประมาณ 30°C แต่เนื่องจากคุณภาพของผิวเซรามิกจะไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมาก กล่าวคือถ้าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเร็วเกินไปจะทำให้ผิวของเซรามิกมีคุณภาพไม่ดี หรืออาจแตกร้าวได้ ดังนั้นต้องการการควบคุมที่ SP ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นทีละ 3°C ในขณะเริ่มเปิดเครื่องจนถึงค่าที่ตั้งไว้ (90°C) และควบคุมที่ค่านี้อย่างต่อเนื่อง

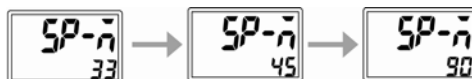
- Solution

- a) ใช้ฟังก์ชัน SP Ramp ของ E5CC โดยกำหนดให้ SP เปลี่ยน 3°C ทุก ๆ นาที
- b) การทำ Auto-Tuning ต้องทำ ณ SP เท่ากับ 90°C



● Parameter setting

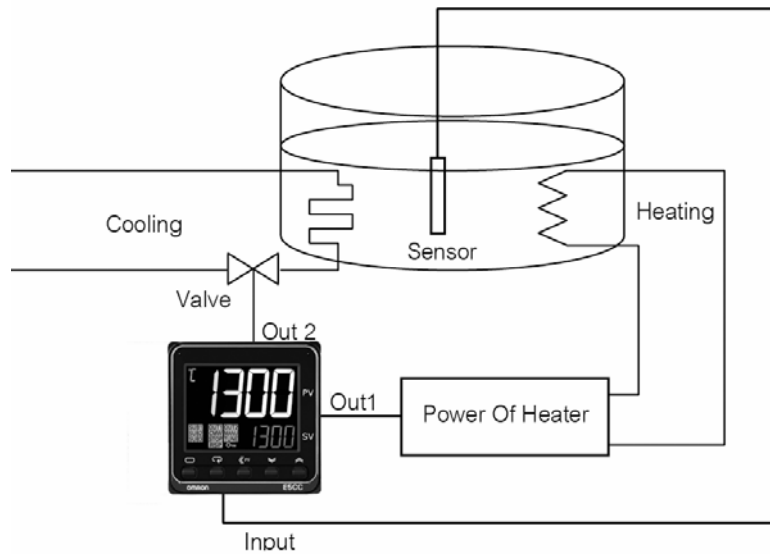
- 1) ตั้งค่า SP เท่ากับ 90°C ใน Operation level 
- 2) ทำ Auto-Tuning เพื่อหาค่า PID ที่เหมาะสม ใน Adjustment level โดยกด  น้อยกว่า 1 วินาที 
- 3) ตั้งค่า Self-Tuning(ST) เป็น Off (ฟังก์ชัน SP ramp จะไม่ทำงานถ้า ST On) ใน Initial setting level (เข้าเมนู โดยกด  3 วินาที 
- 4) ทำการตั้งค่า SP ramp set value เท่ากับ 3°C ใน Adjustment Level 
- 5) กลับมาที่หน้าจอปกติ(Operation level) เราสามารถดูการเปลี่ยนแปลงของ SP ได้ใน พารามิเตอร์ Set point during SP ramp โดย SP จะค่อย ๆ เพิ่มจากค่าที่วัดได้ (PV) เป็น อัตราส่วน 3°C/นาทีจนถึง 90°C SP จะหยุดเปลี่ยนแปลง



6.10 Heating/Cooling Control

ในการควบคุมบ่อน้ำยา ต้องการควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 50°C โดยระบบมีการใช้งานร่วมกัน ระหว่างฮีตเตอร์ เป็นตัวให้ความร้อน และ ท่อน้ำเย็นจะเป็นตัวให้ความเย็นโดยควบคุมการปิด/เปิด ท่อโดยวาล์วแบบตัดต่อ

- A) ต้องการควบคุมด้วยระบบ PID
- B) ต้องการให้มี output ไปควบคุมทั้ง ฮีตเตอร์ และวาล์ว
- C) ใช้หัววัดอุณหภูมิจุดเดียว และใช้ตัวควบคุมเพียงตัวเดียวเท่านั้น



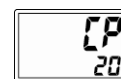
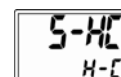
รูปที่ 81 การควบคุมแบบ Heating/Cooling

● Solution

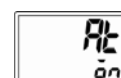
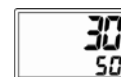
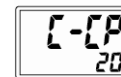
- ใช้ฟังก์ชัน Heating/Cooling ของ E5CN เฉพาะรุ่นที่มี alarm เพราะต่อใช้ output 2 output ในการควบคุม
- ในการควบคุมนี้จะใช้ output 1 เป็นตัวควบคุมความร้อน ขณะเดียวกัน ALM2(alarm 2) จะถูกกำหนดเป็น output 2 ควบคุมความเย็นโดยอัตโนมัติ

● Parameter setting

- เลือกการควบคุมเป็นแบบ PID ใน Initial setting level
- เลือกลักษณะการควบคุมเป็นแบบ Heating and cooling ใน level เดียวกัน
- เราสามารถตั้งค่า Control Period ทั้ง heat (CP) และ cool (C-CP)
- ตั้งค่า SP เท่ากับ 50°C ใน Operation level
- ทำ Auto-tuning เพื่อหาค่า PID ใน Adjustment level



กด



6.11 งานควบคุมความเย็น

ในกระบวนการผลิตกุ้งแช่แข็ง ต้องการควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้เนื้อกุ้งแข็งสำหรับบรรจุในถุงสุญญากาศ โดยตัวให้ความเย็นจะเป็นไฮโดรเจนเหลว ซึ่งถูกควบคุมโดยวาล์วที่ปิด/เปิดโดยเป็นสัดส่วน (Proportional Valve) กับกระแสอินพุต 4-20 mA

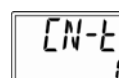
- A) ใช้ Pt100 เป็นตัววัดอุณหภูมิ และแสดงผลเป็นทศนิยม 1 ตำแหน่ง
- B) ต้องการควบคุมอุณหภูมิที่ -10°C
- C) ต้องการตัวควบคุมที่เหมาะสม ขนาด 48 X 96

● Solution

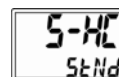
- a) เลือกใช้ Temperature Controller รุ่น E5EN-CX3A5M
- b) เลือกการควบคุมเป็นแบบ PID
- c) เลือกวิธีควบคุมแบบ Direct operation สำหรับงานควบคุมความเย็น

● Parameter setting

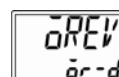
- 1) เลือกชนิดของอินพุตเซ็นเซอร์เป็นหมายเลข 1
(-199.9 ถึง 500.0°C) ใน Initial setting level



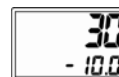
- 2) เลือกการควบคุมเป็นแบบ Standard ใน Initial setting level



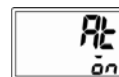
- 3) เลือกวิธีควบคุมแบบ Direct operation ใน Initial setting level



- 4) ตั้งค่า SP = -10.0°C ใน Operation level



- 5) ทำ Auto-tuning ใน Adjustment level

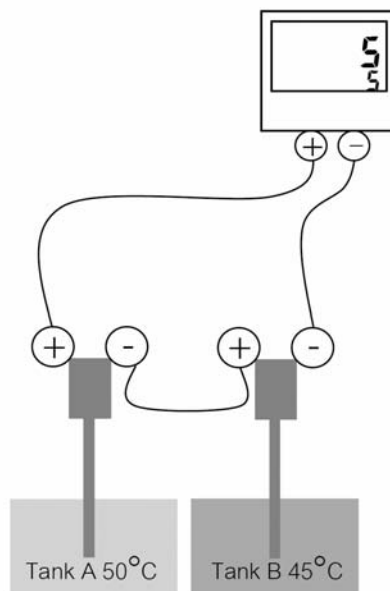


6.12 การควบคุมความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างจุด 2 จุด

ต้องการควบคุมอุณหภูมิระหว่างอ่าง 2 อ่าง ให้มีความแตกต่างกัน 5°C เสมอ

● Solution

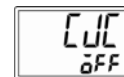
- สามารถทำได้โดยใช้ฟังก์ชัน Cold junction off ของ E5CN รุ่น 2 alarm
- โดยฟังก์ชันนี้จะวัดความแตกต่างระหว่างจุดวัด 2 จุด ค่าที่แสดงผลจะเป็นค่าความแตกต่าง เช่น ถ้าจุด A อุณหภูมิ 50°C จุด B อุณหภูมิ 45°C ตัวควบคุมจะแสดงผลที่หน้าจอเป็น $(50-45=5^{\circ}\text{C})$ แต่ถ้า จุด A = 50°C และ B = 55°C หน้าจอจะแสดงผลเป็น -5°C (จุด A คือจุดที่นำขั้วบวกต่อเข้ากับตัวควบคุม จุด B คือจุดที่นำขั้วลบต่อเข้ากับตัวควบคุม)
- การควบคุมจะใช้วิธี Heating/Cooling control คือ เอาต์พุตด้าน Heating(Out 1) จะควบคุมความร้อนที่จุด A เอาต์พุตทาง Cooling(Out2) จะควบคุมความร้อนที่จุด B
- การควบคุมวิธีนี้ตัวควบคุมจะพยายามควบคุมให้ความแตกต่างของจุดทั้ง 2 เท่ากับค่า SP (ซึ่งค่า SP ในวิธีนี้ก็คือค่าความแตกต่างที่ต้องการนั่นเอง) เมื่อความแตกต่างต่ำกว่าค่า SP เอาต์พุตด้าน Heating จะทำงาน แต่ถ้าค่าความแตกต่างสูงกว่า SP เอาต์พุตด้าน Cooling จะทำงาน



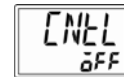
รูปที่ 82 การต่อเทอร์โมคัปเปิ้ลเพื่อวัดความแตกต่างของอุณหภูมิ 2 จุด

● Parameter setting

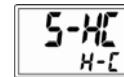
- 1) ตั้งค่าพารามิเตอร์ Cold junction compensation (CJC) ให้เป็น "Off" ใน Advance setting level



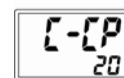
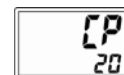
- 2) เลือกการควบคุมแบบ PID ใน Initial setting level



- 3) เลือกเป็นการควบคุมแบบ Heating/Cooling control ใน Initial setting level



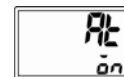
- 4) เลือกค่า Control Period ทั้ง CP และ Cool Control period



- 5) ตั้งค่า SP = 5° (ความแตกต่างที่ต้องการ) ใน Operation level

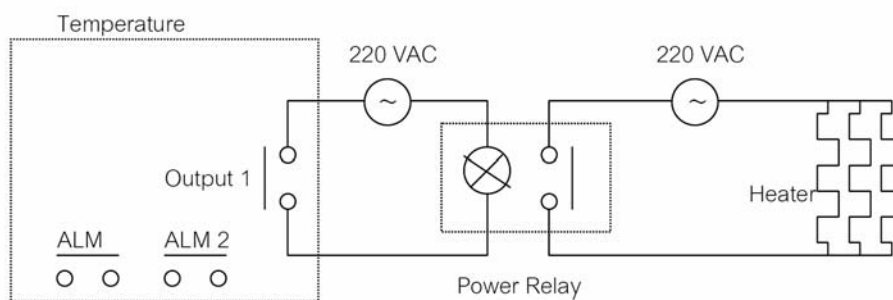


- 6) ทำ Auto-tuning ใน Adjustment level



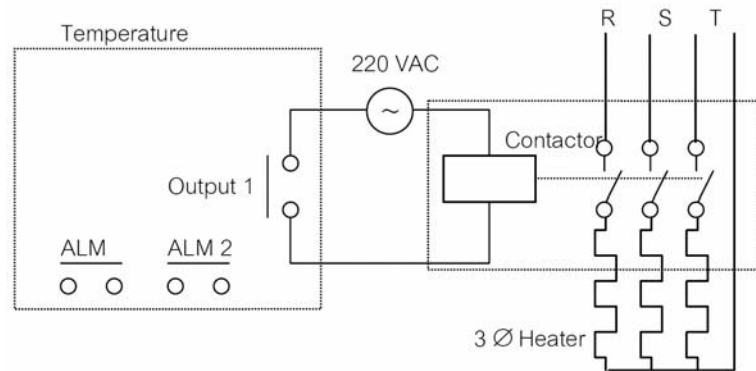
6.13 การต่อใช้งาน Temperature Controller ในลักษณะงานต่าง ๆ

- 1) การต่อใช้งาน Temperature Controller รุ่นเอาต์พุตรีเลย์ กับฮีตเตอร์ 1 เฟส



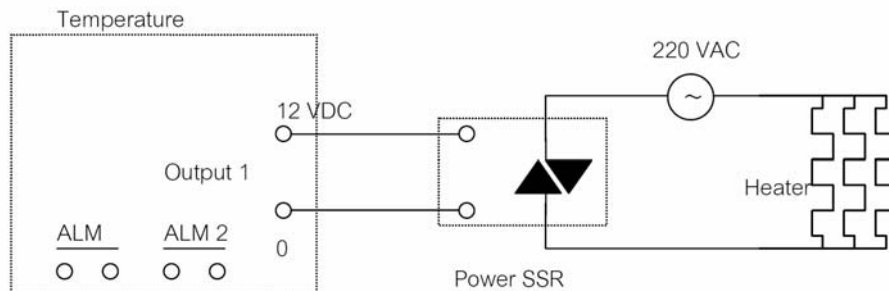
รูปที่ 83 การต่อใช้งาน Temperature Controller รุ่นเอาต์พุตรีเลย์ กับฮีตเตอร์ 1 เฟส

- 2) การต่อใช้งาน Temperature Controller รุ่นเอาต์พุตรีเลย์ กับฮีตเตอร์ 3 เฟส



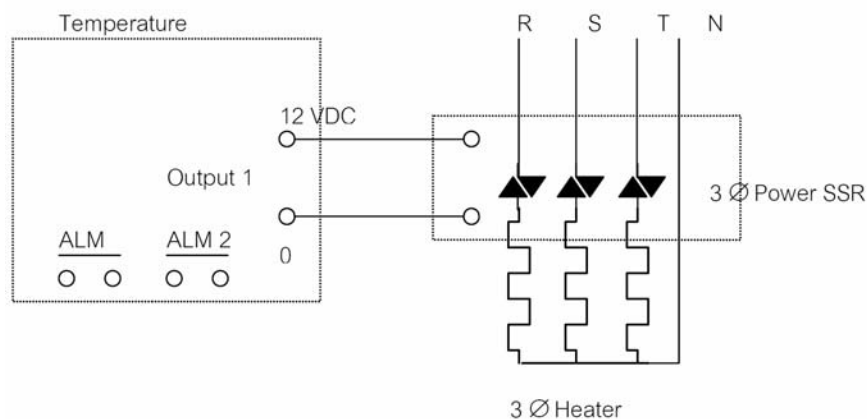
รูปที่ 84 การต่อใช้งาน Temperature Controller รุ่นเอาต์พุตรีเลย์ กับฮีตเตอร์ 3 เฟส

- 3) การต่อใช้งาน Temperature Controller รุ่นเอาต์พุต Pulse voltage for SSR กับฮีตเตอร์ 1 เฟส



รูปที่ 85 การต่อใช้งาน Temperature Controller รุ่นเอาต์พุต Pulse voltage for SSR กับฮีตเตอร์ 1 เฟส

- 4) การต่อใช้งาน Temperature Controller รุ่นเอาต์พุต Pulse voltage for SSR กับฮีตเตอร์ 3 เฟส



รูปที่ 86 การต่อใช้งาน Temperature Controller รุ่นเอาต์พุต Pulse voltage for SSR กับฮีตเตอร์ 3 เฟส

ปัญหา และการแก้ไขในการควบคุมอุณหภูมิ

7.1 ปัญหา: อุณหภูมิไม่ถึงค่าเซตพอยต์

สาเหตุ	การแก้ไข
1. ไม่ได้ติดตั้งอินพุตเซนเซอร์	1. ตรวจสอบการติดตั้งของอินพุตเซนเซอร์
2. การเข้าสายอินพุตไม่แน่น	2. ขันเทอร์มินัลอินพุตให้แน่น
3. อินพุตเซนเซอร์เสีย	3. เปลี่ยนอินพุตเซนเซอร์
4. ตั้งค่าอินพุตเซนเซอร์ในตัวควบคุมผิด	4. ตรวจสอบการตั้งค่าอินพุต
5. ติดตั้งอินพุตเซนเซอร์ไม่แน่น	5. ตรวจสอบการติดตั้งของอินพุตเซนเซอร์
6. ติดตั้งอินพุตเซนเซอร์ไม่ลึกพอ	6. ตรวจสอบความลึกของการเสียบเซนเซอร์ ควรถูกอย่างน้อย 10 เท่าของเส้นผ่าน ศูนย์กลาง
7. ต่อสายอินพุตผิดขั้ว	7. ต่อสายอินพุตใหม่
8. อินพุตเซนเซอร์ช็อต	8. เปลี่ยนอินพุตเซนเซอร์
9. ฮีตเตอร์ขาด	9. ซ่อม หรือเปลี่ยนฮีตเตอร์
10. เอาต์พุตของตัวควบคุมเสีย	10. ซ่อม หรือเปลี่ยนตัวควบคุม
11. SSR คอนแทคเตอร์ หรือวาล์วเสีย	11. ซ่อม หรือเปลี่ยน
12. เลือกรูปแบบการควบคุมเป็นแบบความเย็น	12. เลือกรูปแบบการควบคุมเป็นแบบความร้อน
13. ฮีตเตอร์ขนาดเล็กไป	13. เพิ่มขนาดฮีตเตอร์
14. ตั้งค่าควบคุมไม่เหมาะสม	14. ตรวจสอบการตั้งค่า
15. อุปกรณ์ทำความเย็นในระบบทำงานอยู่	15. ปิดระบบทำความเย็น
16. มีการเปลี่ยนตำแหน่งของหัวเซนเซอร์	16. ติดตั้งเซนเซอร์ในตำแหน่งเดิม

สาเหตุ	การแก้ไข
17. สายต่อชุดเซย์ของเซนเซอร์แบบเทอร์โมคัปเปิ้ลขาด หรือผิดชนิด	17. ตรวจสอบสายต่อชุดเซย์เกี่ยวกับชนิด และการเดินสาย
18. ค่า PID ไม่เหมาะสม	18. ทำการตั้งค่า PID ใหม่หรือทำ Auto-tuning

7.2 ปัญหา: อุณหภูมิเกินค่าเซตพอยต์

สาเหตุ	การแก้ไข
1. ติดตั้งเซนเซอร์ใกล้กับฮีตเตอร์มากเกินไป	1. ทำการวางตำแหน่งฮีตเตอร์ให้เหมาะสม
2. SSR คอนแทคเตอร์ หรือวาล์วทำงานผิดปกติ	2. ซ่อม หรือเปลี่ยนอุปกรณ์ที่ทำงานผิดปกติ
3. เซนเซอร์เสีย	3. เปลี่ยนเซนเซอร์
4. ต่อสายอินพุตเทอร์โมคัปเปิ้ลผิดขั้ว	4. ตรวจสอบการเข้าสายเทอร์โมคัปเปิ้ล
5. เอาต์พุตของตัวควบคุมเสีย	5. ซ่อม หรือเปลี่ยนตัวควบคุม
6. การตั้งค่าใช้งานในตัวควบคุมผิดพลาด	6. ตรวจสอบการตั้งค่าใช้งาน
7. เซตพอยต์ไม่เปลี่ยนในกรณีมีการเปลี่ยนย่าน การควบคุม	7. เปลี่ยนเซตพอยต์

7.3 ปัญหา: ค่าอุณหภูมิที่วัดได้กว้าง

สาเหตุ	การแก้ไข
1. ค่า P น้อยเกินไป	1. เพิ่มค่า P
2. ตั้งค่า Control Period ไม่เหมาะสม	2. ตั้งค่า Control Period ให้ต่ำสำหรับการควบคุมที่ดียิ่งขึ้น (แต่ต้องคำนึงถึงชนิดของเอาต์พุต)
3. การควบคุมเป็นแบบ ON/OFF	3. เปลี่ยนการควบคุมเป็นแบบ PID
4. ค่า I น้อยเกินไป	4. เพิ่มค่า I
5. ค่า D น้อยเกินไป	5. เพิ่มค่า D

สาเหตุ	การแก้ไข
6. ค่า D มากเกินไป	6. ลดค่า D จนกว่าระบบจะเสถียร
7. ฮีตเตอร์ขนาดใหญ่เกินไป	7. เปลี่ยนขนาดฮีตเตอร์
8. ติดตั้งเซนเซอร์ไม่ดี หลวม	8. ตรวจสอบการติดตั้งเซนเซอร์
9. ต่อเซนเซอร์กับตัวควบคุมไม่แน่น	9. ตรวจสอบการต่อเซนเซอร์
10. เซนเซอร์เสีย	10. เปลี่ยนเซนเซอร์
11. สายต่อขดเคเบิลของเทอร์โมคัปเปิ้ลขาดใน	11. ตรวจสอบหาจุดขาด ทำการเปลี่ยน

7.4 ปัญหา: อุณหภูมิแตกต่างจากค่าเซตพอยต์มาก

สาเหตุ	การแก้ไข
1. ชนิดของเซนเซอร์กับตัวควบคุมไม่เข้ากัน	1. เลือกชนิดเซนเซอร์กับตัวควบคุมให้เข้ากัน
2. ไม่ใช้สายต่อขดเคเบิลกรณีเซนเซอร์เป็นแบบเทอร์โมคัปเปิ้ล	2. ใช้สายต่อขดเคเบิลกรณีเซนเซอร์เป็นแบบเทอร์โมคัปเปิ้ล
3. ติดตั้งเซนเซอร์กับตัวควบคุมหลวม	3. ติดตั้งเซนเซอร์กับตัวควบคุมให้แน่น
4. เซนเซอร์ขาด หรือเสื่อมสภาพ	4. เปลี่ยนเซนเซอร์
5. การควบคุมยังไม่เข้าสู่สภาวะเสถียร	5. รอจนกว่าการควบคุมเข้าสู่สภาวะเสถียร
6. การเดินสายยาวเกินไป	6. เดินสายให้สั้นขึ้น หรือใช้สายที่มีขนาดเล็กขึ้น
7. ต่อสายผิดขั้ว	7. ตรวจสอบขั้วการเข้าสายทั้งอินพุต และเอาต์พุต
8. ใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลแบบกราวด์ ขณะที่ต่อเอาต์พุตแบบแรงดันลงกราวด์ไว้	8. แยกกราวด์ของทั้งคู่ออกจากกัน
9. สายเซนเซอร์กับสายไฟเดินรวมกัน	9. แยกการเดินสาย

เทคนิคการควบคุมอุณหภูมิ

หนังสือการควบคุมอุณหภูมิเล่มนี้ บริษัท ออมรอน อิเล็คทรอนิกส์ จำกัด ซึ่งเป็นผู้นำทางด้านอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ ได้จัดทำขึ้นเพื่อจุดประสงค์เดียวคือเผยแพร่ความรู้ความเข้าใจในการควบคุมอุณหภูมิ ผู้อ่านสามารถนำความรู้ที่ได้ไปใช้กับตัวควบคุมอุณหภูมิทุกยี่ห้อ เพื่อให้การควบคุมอุณหภูมิของท่านเป็นไปอย่างถูกต้อง ทั้งยังช่วยท่านในการเลือกอุปกรณ์ หรือวิธีควบคุมอุณหภูมิตามลักษณะงานของท่านอีกด้วย หากท่านมีข้อสงสัยในเรื่องของการควบคุมอุณหภูมิ ท่านสามารถขอคำปรึกษาจากบริษัท ฯ ได้



 **PLCEASY**
www.pleaseasy.com

บริษัท ออมรอน อิเล็คทรอนิกส์ จำกัด
อาคารสหภาพเวอร์ 2 ชั้น 16 เลขที่ 555 ถนนพหลโยธิน แขวงจตุจักร เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
โทร. 0-2942-6700 แฟกซ์ 0-2937-0504
<http://www.omron-ap.co.th>, www.pleaseasy.com