แผนภาพกระบวนการผลิต

(Piping & Instrument diagram : P&ID)

บทนำ

การออกแบบระบบเครื่องมือวัดและควบคุม (Instrumentation and Control System) ในโรงงานอุตสาหกรรมกระบวนการผลิตจะถูกเริ่มต้นขึ้น เมื่อได้รับความต้องการจากผู้ใช้งานหรือเจ้าของโครงการ ซึ่งจะเป็นรายละเอียดของกระบวนการผลิตที่ต้องการพร้อมกับมาตรฐานต่าง ๆ เพื่อให้ใช้เป็นมาตรฐานในการดำเนินการออกแบบ (Detailed Engineering) หรืออาจรวมไปถึงการควบคุมการก่อสร้าง (Program Management), การเป็นที่ปรึกษา (Consultant) และดำเนินการจะต้องมีการทำความเข้าใจกับรายละเอียดความต้องการ (Requirement Specification) และมาตรฐานนั้น ๆ เพื่อนำไปพัฒนาความต้องการต่าง ๆ ของผู้ใช้งานให้ได้มาเป็น ข้อมูลรายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ (Equipment data) และแผนภาพกระบวนการผลิต (Process Engineering Flow schemes : PEFS หรือ Piping & Instrument Diagram: P & ID) ที่ถูกต้องกับมาตรฐานและความต้องการของผู้ใช้งาน ในช่วงเวลาที่ทำการพัฒนา PEFS หรือ P & ID จะมีขั้นตอนหนึ่งที่จะมีการดำเนินการในทุกโครงการ คือ Hazard and Operability หรือ ที่เรียกกันทั่วไปว่า HAZOP เพื่อครวจสอบความเป็นอันตรายและความสามารถในการทำงานของกระบวนการที่ออกแบบว่ามีความปลอดภัยในการนำไปใช้งาน เมื่อผ่านขั้นตอนการพัฒนา PEFS หรือ P & ID จนเสร็จสมบูรณ์ แล้ว ก็จะทำให้ได้ข้อมูลต่าง ๆ ของกระบวนการ เช่น อัตราการไหล (Flow), ความดัน (Pressure), อุณหภูมิ (Temperature), ระดับ (Level), สถานะของการไหล (Fluid state) และส่วนประกอบของการไหล (Fluid Component) ในทุก ๆ จุดของกระบวนการผลิตนั้น และจะรวมไปถึง ระบบควบคุม, ลำดับการควบคุม (Sequence Control) , ฟังก์ชันควบคุม (Function Control) , ระบบ Interlocking และระบบ Safety Instrumented system (SIS) หลังจากนันจึงนำข้อมุลกระบวนการไปกำหนดรายละเอียดตัวแปรกระบวนการ (Process Data) ให้กับเครื่องมือวัดแต่ละตัว เพื่อที่จะนำไปใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการออกแบบระบบเครื่องมือวัดและควบคุมต่อไป

ดังนั้นในการทำงานที่เกี่ยวข้องกับระบบเครื่องมือวัดและควบคุมในอุตสาหกรรม กระบวนการผลิตประเภทต่าง ๆ จึงต้องทำความเข้าใจเป็นลำดับแรก ๆ กับแผนภาพกระบวนการผลิต (Piping & Instrument diagram)หรือที่นิยมเรียกกันว่า P&ID แผนภาพกระบวนการผลิตหรือ P&ID จะเป็นแผนภาพที่สำคัญสำหรับใช้ในการแสดงรายละเอียดของกระบวนการผลิต นอกจากนั้นยังใช้สำหรับแสดงรายละเอียดและชนิดของระบบเครื่องมือวัดและการควบคุม (Instrumentation and Control System) ที่ต้องมีการจัดเตรียมเพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการให้เป็นกระบวนการผลิต (Process) และอุปกรณ์หรือเครื่องจักรกลต่าง ๆ ที่มีอยู่ในกระบวนการผลิต นอกจากนั้นยังใช้สำหรับแสดงรายละเอียดและชนิดของระบบเครื่องมือวัดและการควบคุม (Instrumentation and Control System) ที่ต้องมีการจัดเตรียมเพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ ซึ่งตัวแผนภาพกระบวนการผลิตเองมีการเรียกชื่อที่แตกต่างกันได้อีกหลายชื่อโดยจะขึ้นอยู่กับผู้นำไปใช้งาน การแสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ บนแผนภาพจะใช้สัญลักษณ์มาตรฐานเป็นตัวแสดงอุปกรณ์ต่าง ๆ ในกระบวนการ โดยสัญลักษณ์จะเป็นไปตามมาตรฐานสากลที่ใช้อ้างอิง อาทิ เช่น ISA-S51,BS 1553: PART 1, ISO 561, IEC 617 เป็นต้น สัญลักษณ์ต่าง ๆ บนแผนภาพจะประกอบไปด้วยสัญลักษณ์เส้น (Line symbol), สัญลักษณ์หน้าที่การทำงานการทำงาน (Instrument symbol), หมายเลขประจำท่อ (Pipe line number) และคำจำกัดความ

ต่าง ๆ ที่ปรากฏบนแผนภาพ ข้อมูลต่าง ๆ เหล่านี้จะเป็นข้อมูลที่สำคัญในการนำไปใช้กำหนดรายละเอียดของระบบเครื่องมือวัดและควบคุม เพื่อให้การกำหนดรายละเอียดมีความถูกต้อง, เหมาะสมในการนำไปใช้งานและเป็นไปตามมาตรฐานสากล ดังนั้นก่อนจะเริ่มทำการกำหนดรายละเอียดระบบเครื่องมือวัดและควบคุมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจึงต้องมีการทำความเข้าใจในสัญลักษณ์ต่าง ๆ และแผนภาพก่อนเริ่มทำการกำหนดรายละเอียด ในที่นี้จะแสดงรายละเอียดของสัญลักษณ์หลัก ๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบเครื่องมือวัดและควบคุมเป็นส่วนใหญ่ สัญลักษณ์ที่แสดงนี้จะอ้างอิงตามมาตรฐานสากล ISA-S5.1 เป็น หลักเนื่องจากจะพบเห็นการใช้งานได้บ่อยครั้งและยังสามารถใช้เป็นพื้นฐานในการนำไปใช้กับมาตรฐานอื่น ๆ ในการใช้งานจริง ๆ แล้วผู้ใช้งานยังสามารถจะพัฒนาฐานของสัญลักษณ์บนแผนภาพกระบวนการขึ้นมาใช้ในกลุ่มธุรกิจของตนเองได้ ซึ่งในปัจจุบันจะพบเห็นได้บ่อยครั้งกับกลุ่มธุรกิจขนาดใหญ่ ๆ จากต่างประเทศนอกจากนั้นแล้วในบทนี้จะแสดงรายละเอียดระบบการควบคุมและจะแสดงตัวอย่างของแผนภาพบางส่วนเพื่อเป็นแนวทางในการใช้งาน

สัญลักษณ์ระบบเครื่องมือวัดและควบคุม

สัญลักษณ์ของระบบเครื่องมือวัดและควบคุมบนแผนภาพกระบวนการผลิต ตามมาตรฐานสากล ISA-S5.1 ได้แบ่งแยกสัญลัษณ์ออกเป็นส่วน ๆ เพื่อให้สามารถนำไปใช้แสดงบนแผนภาพได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมได้ดังนี้

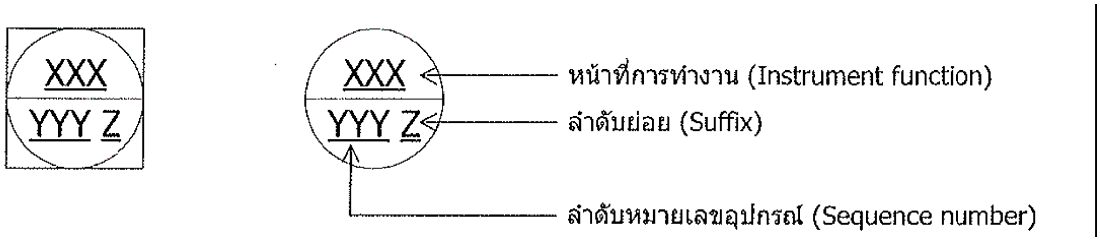
ตัวอักษรหน้าที่การทำงานของเครื่องมือวัด

เครื่องมือวัดทุก ๆ ตัวที่แสดงอยู่บนแผนภาพกระบวนการผลิตจะมีหน้าที่การทำงานที่ชัดเจน เพื่อให้ผู้ใช้งานได้ทราบเมื่อต้องการข้อมูลจากแผนภาพ มาตรฐานสากล ISA-S5.1 ได้จัดเตรียมตารางอักษรสำหรับใช้แสดงหน้าที่การทำงานของเครื่องมือวัดด้วยตัวอักษรดังกล่าวไปบนหมายเลขอุปกรณ์ (Tag Number) ซึ่งตัวอักษรเหล่านี้จะใช้บ่งบอกหน้าที่การทำงานของเครื่องมือวัดสามารถแสดงรายละเอียดตัวอักษรต่าง ๆ ที่ใช้แสดงหน้าที่การทำงานได้ดังตารางที่ 1

	FIRST-LETTER		SUCCEEDING-LETTERS		
	MEASURED	MODIFIER	PASSIVE FUNCTION	OUTPUT FUNCTION	MODIFIER
A	Analysis		Alarm		
B	Burner, combustion		User's Choice	User's Choice	User's Choice
C	User's Choice			Control	
D	User's Choice	Differential			
E	Voltage		Sensor (Primary Element)		
F	Flow Rate	Ratio			
G	User's Choice		Glass Viewing Device		
H	Hand				High
I	Current		Indicate		
J	Power	Scan			
K	Time	Time Rate of Change		Control Station	
L	Level		Light		Low
M	User's Choice	Momentary			Middle, Intermediate
N	User's Choice		User's Choice	User's Choice	User's Choice
O	User's Choice		Orifice, Restriction		
P	Pressure		Point		
Q	Quantity	Integrate, Totalize			
R	Radiation		Record		
S	Speed	Safety		Switch	
T	Temperature			Transmit	
U	Multivariable		Multifunction	Multifunction	Multifunction
V	Vibration			Valve	
W	Weight		Well		
X	Unclassified		Unclassified	Unclassified	Unclassified
Y	Event			Relay, Compute	
Z	Position			Driver, Actuator	

ตารางที่ 1 ตัวอักษรหน้าที่การทำงานตามมาตรฐาน ISA S.1

ในการแสดงรายละเอียดหน้าที่การทำงานของเครื่องมือวัดจะถูกกำหนดไปบนหมายเลขประจำเครื่องมือวัดซึ่งจะมีรูปแบบบนแผนภาพกระบวนการผลิต แสดงตัวอย่างบางส่วนในรูปที่ 1



รูปที่ 1 หมายเลขประจำเครื่องมือวัดบนแผนภาพกระบวนการผลิต

ส่วนแรก (XXX) จะใช้แสดงหน้าที่การทำงานและให้เป็นตัวกำหนดหน้าที่การทำงานของเครื่องมือวัด ซึ่งจำนวนของเครื่องมือวัด ซึ่งจำนวนที่ใช้จะขึ้นอยู่กับรายละเอียดข้อกำหนดในการกำหนดหน้าที่การทำงานของเครื่องมือวัดของผู้นำไปใช้งาน ซึ่งจะต้องกำหนดจำนวนหลักให้เพียงพอกับจำนวนหลักที่จะใช้แสดงหน้าที่การทำงานของเครื่องมือวัดในฐานข้อมูล (Instrument Data Base) เนื่องจากอาจจะมีปัญหาในภายหลังถ้ามีการเปลี่ยนแปลง ส่วนใหญ่จะอยู่ที่ ห้า หรือ หก หลัก อาทิเช่น เครื่องมือวัดที่อยู่บนระบบควบคุมจะเป็น FIC (Flow Indicator controller), PDAHH (Pressure Differential Alarm High High) หรือ TAH (Temperature Alarm High) ส่วนเครื่องมือวัดที่อยู่ในบริเวณใช้งาน (Local Instrument) จะเป็น FT (Flow Transmitter), LT (Level Transmitter)

ส่วนที่สอง (YYY) จะเป็นลำดับหมายเลขและจะใช้เป็นหมายเลขประจำเครื่องมือวัด (Instrument Tag Number) ส่วนใหญ่แล้วผู้ใช้งานจะใส่หน่วยการผลิตหรือชื่ออุปกรณ์หลัก (Main Equipment) ในกระบวนการลงไปในสนามหลักแรกเพื่อไม่ให้หมายเลขประจำเครื่องมือวัดเกิดความซ้ำซ้อนกัน อาทิเช่น หน่วยการผลิตที่ 100 หรือลำดับหมายเลขของถังเป็น 111 ก็จะใช้สามหลักแรกเป็น 100 หรือ 111 และสองหลักต่อไปจะเป็นลำดับหมายเลขประจำเครื่องมือวัดที่สามารถกำหนดได้สูงสุดที่ 99 หรือ เพียง100 หมายเลขเท่านั้น ถ้ามีจำนวนเครื่องมือวัดเป็นจำนวนมาก ๆ อาจกำหนดให้เป็น 4 หลัก

ในบางครั้งผู้ใช้งานหรือผู้ออกแบบโรงงานอาจจะกำหนดลำดับหมายเลขประจำเครื่องมือวัดตามกลุ่มระบบควบคุม เช่น เครื่องมือวัดสำหรับระบบควบคุมพื้นฐาน (Distributed Control System : DCS) อาจเริ่มจาก 1001 ถึง 2999, สำหรับระบบตรวจจับก๊าซรั่วและเพลิงไหม้ (Fire & Gas System : FGS) อาจเริ่มจาก 5001 ถึง 6999 และลำดับที่เหลืออาจสำรองไว้ใช้กับอุปกรณ์อื่น ๆ หรือสำรองไว้เพื่อการขยายระบบในอนาคต เป็นต้น การแบ่งลำดับหมายเป็นหมวดหมู่ที่แน่นอนจะทำให้สะดวกและรวดเร็วในการค้นหาเครื่องมือวัดว่าอยู่ในระบบควบคุมใดหรืออยู่บริเวณใดในกระบวนการผลิต

ส่วนสุดท้าย (Z) จะเป็นลำดับย่อยที่ใช้แยกหมายเลขลำดับที่ซ้ำกัน จะใช้ในกรณีที่นำไปใช้กับเครื่องมือวัดที่ติดตั้งอยู่บนอุปกรณ์เตรียมพร้อมทำงาน (Stand by) ในกระบวนการ เช่น ปั๊ม หรือ ถัง เป็นต้น โดยทั่วไปจะใช้เป็นอักษร หนึ่งหลักหรือ สองหลัก เช่น A, B,AA,AB เป็นต้น ตัวอย่างเช่น ถ้ามีปั๊ม 2 ตัวคือ P-101A และ P-101B

มีการติดตั้งเกจวัดความดัน (Pressure Gauge) ที่ด้านขาออกของปั๊มทั้งสอง หมายเลขประจำเกจวัดความดันจะเป็น PG-101A และ PG-101B

สัญลักษณ์ตำแหน่งและการเข้าถึงเครื่องมือวัด (Location/Accessibility)

เครื่องมือวัดบนแผนภาพกระบวนการผลิตจะต้องแสดงรายละเอียดความต้องการและตำแหน่งของเครื่องมือวัดอย่างชัดเจน เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถทราบได้ว่าเครื่องมือวัดตัวนั้นติดตั้งอยู่ที่ตำแหน่งใดสำหรับใช้ในการควบคุมกระบวนการและสามารถเข้าถึงเครื่องมือวัดนั้นได้อย่างไรในการควบคุมกระบวนการ นอกจากนั้นแล้วสัญลักษณ์ตำแหน่งยังเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับผู้ออกแบบในการนำไปใช้จัดเตรียมระบบเครื่องมือวัดและควบคุมได้อย่างถูกต้องและตรงกับความต้องการในการใช้งาน ดังนั้นจึงต้องมีสัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับแสดงการเข้าถึงและตำแหน่งของเครื่องมือวัดที่ต้องการในกระบวนการผลิต สัญลักษณ์จะมีรูปแบบที่แตกต่างกันไปที่แสดงอยู่บนแผนภาพขึ้นอยู่กับตำแหน่งและการเข้าถึง สามารถแสดงตัวอย่างสัญลักษณ์หลัก ๆ ได้ดังรูปที่ 2

เครื่องมือวัดที่ติดตั้งอยู่ในบริเวณใช้งาน (Locally Mounted)

เครื่องมือวัดที่ติดอยู่บนแผงควบคุมในห้องควบคุม (Panel Mounted)

เครื่องมือวัดที่ติดตั้งอยู่ในตู้คงบคุม (Inside cabinet mounted)

เครื่องมือวัดที่ติดตั้งอยู่บนแผงควบคุมในบริเวณใช้งาน (Local Panel Mounted)

เครื่องมือวัดที่แสดงค่าอยู่บนจอแสดงผลของระบบควบคุมที่สามารถติดต่อกับผู้ปฏิบัติงานได้ (Safety Display)

เครื่องมือวัดในระบบวัดคุมนิรภัย (Safety Instrumented System or Emergency Shut Down Sysem)

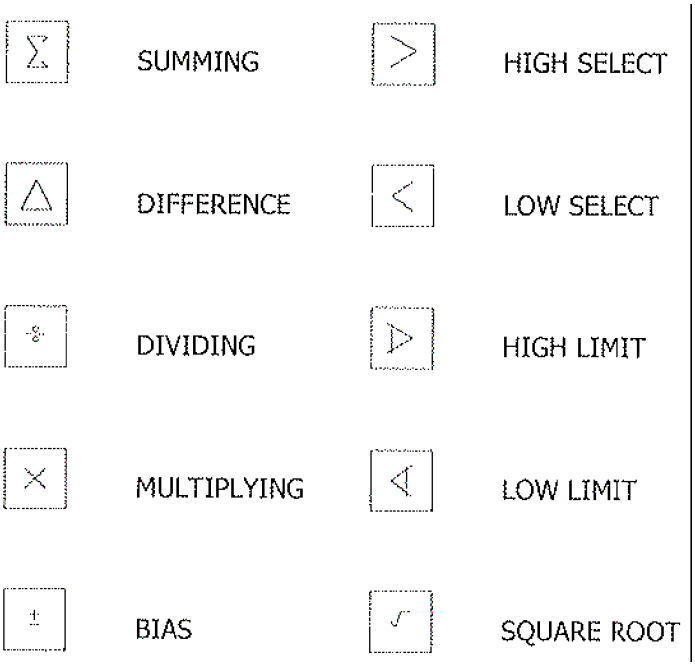
เครื่องมือวัดในระบบวัดควบคุมนิรภัยที่สามารถติดต่อกับผู้ปฏิบัติงานได้

XX เป็นอักษรแสดงหน้าที่การทำงานของเครื่องมือวัด
YY เป็นหมายเลขประจำเครื่องมือวัด

รูปที่ 2 สัญลักษณ์แสดงตำแหน่งเครื่องมือวัด

สัญลักษณ์ฟังก์ชันการคำนวณ (Calculation function symbol)

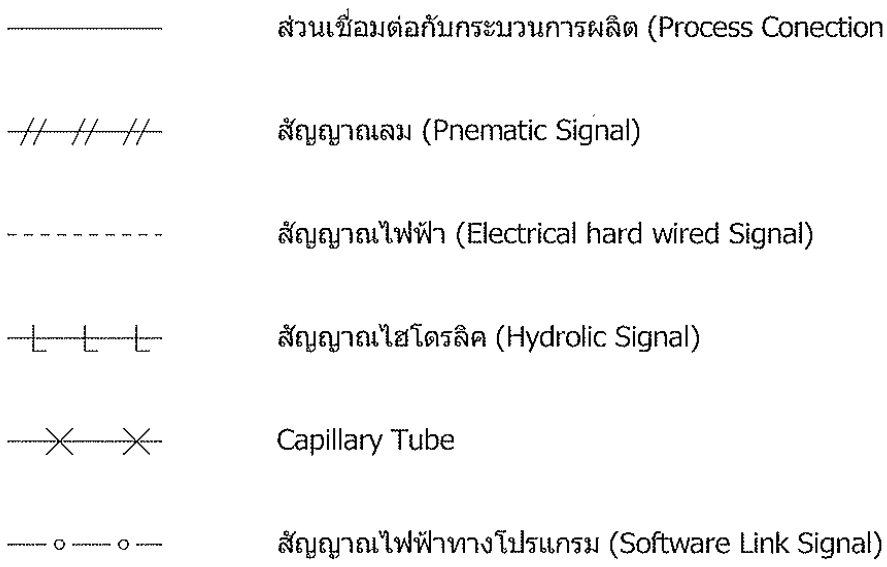
ในการควบคุมกระบวนการผลิตบางประเภทที่มีการทำงานซับซ้อน อาจจะต้องมีการจัดเตรียมฟังก์ชันการคำนวณของตัวแปรต่าง ๆ ในการกระบวนการก่อนที่จะส่งต่อไปยังส่วนอื่น ๆ ต่อไป ฟังก์ชันการคำนวณที่ต้องการจะต้องแสดงไว้บนแผนภาพ โดยมาตรฐานได้จัดเตรียมสัญลักษณ์สำหรับการคำนวณประเภทต่าง ๆ ไว้ สามารถแสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ฟังก์ชันการคำนวณ

สัญลักษณ์เส้น (Line Symbol)

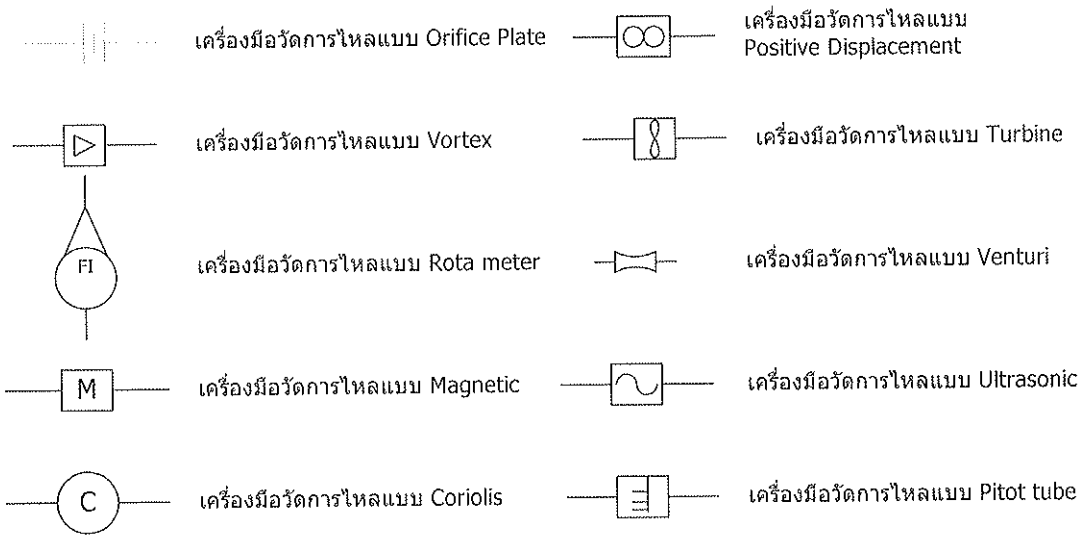
การทำงานของกระบวนการผลิตจะมีเครื่องมือวัดประเภทต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกันอยู่หลายชนิดและเครื่องมือวัดต่าง ๆ เหล่านี้ ต้องมีการทำงานร่วมกันหรือเชื่อมต่อกันในลักษณะต่าง ๆ อาทิ เช่น ฟังก์ชันควบคุม จะต้องมีการแสดงเครื่องมือวัดที่ต่อไปยังส่วนอินพุตของระบบควบคุมและแสดงส่วนเอาต์พุตออกไปยังอุปกรณ์ควบคุมประเภทต่าง ๆ การเชื่อมต่อกันนี้จะถูกแสดงบนแผนภาพได้โดยใช้สัญลักษณ์เส้น ตัวอย่างรายละเอียดของวัญลักษณ์เส้นที่สำคัญ ๆ จะแสดงได้ดังรูปที่ 4 เป็นสัญลักษณ์เส้นสำหรับระบบเครื่องมือวัดและควบคุมที่จะนำไปแสดงบนแผนภาพกระบวนการ เพื่อใช้แสดงการเชื่อมต่อเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ควบคุมต่าง ๆ เข้าด้วยกันและใช้แสดงว่าเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ควบคุมต่าง ๆ มีการเชื่อมต่อหรือส่งผ่านข้อมูลกันแบบใด



รูปที่ 4 สัญลักษณ์เส้น

สัญลักษณ์ Primary Element (Primary Element Symbol)

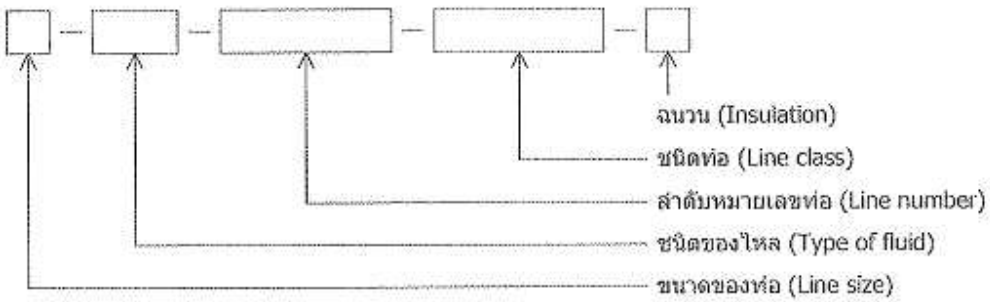
Primary Element หรือเครื่องมือวัดส่วนแรกเป็นเครื่องมือวัดที่จะถูกติดตั้งอยู่กับท่อกระบวนการผลิต เครื่องมือวัดส่วนแรกที่มีใช้งานในระบบเครื่องมือวัดและควบคุมจะมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับตัวแปรที่ต้องการวัดและความเหมาะสมในการใช้งาน นอกจากนั้นแล้วยังมีเครื่องมือวัดบางชนิดที่ต้องติดตั้งร่วมไปกับเครื่องมือวัดภายนอกที่ไม่ถูกติดตั้งบนท่อ เช่น เครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบออริฟิส (Orifice Flow Meter) จะต้องมีการติดตั้งแผ่นออริฟิสไปในท่อของกระบวนการ หรือจะถูกเรียกว่า In-line Instrument และต้องมีการติดตั้งเครื่องมือวัดความดันแตกต่าง (Differential Pressure Transmitter) เพื่อทำการวัดค่าความดันแตกต่างระหว่างแผ่นออริฟิสที่เกิดขึ้นจากอัตราการไหลหรือถูกเรียกว่า Off-Line Instrument เป็นต้น ดังนั้นจึงต้องมีการแสดงบนแผนภาพกระบวนการผลิตให้ชัดเจนว่าเป็นเครื่องมือวัดชนิดใด สัญลักษณ์นี้จะใช้แสดงว่าเครื่องมือที่ติดตั้งอยู่กับท่อในกระบวนการผลิตเป็นแบบหรือชนิดใด แสดงตัวอย่างสัญลักษณ์ต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 5



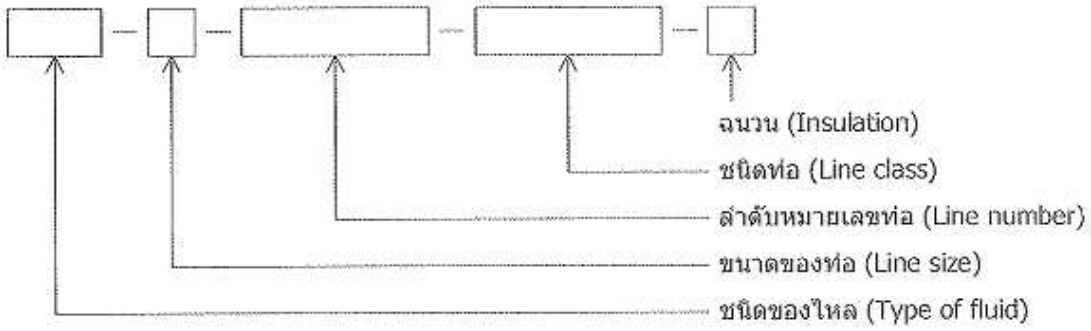
รูปที่ 5 สัญลักษณ์เครื่องมือวัดที่ติดตั้งอยู่กับท่อ

หมายเลขประจำท่อ (Pipe line number)

นอกจากสัญลักษณ์ต่าง ๆ ที่ได้แสดงรายละเอียดไปแล้วข้างต้น หมายเลขประจำท่อเป็นสัญลักษณ์อีกชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญสำหรับแผนภาพกระบวนการผลิต ซึ่งจะมีความคล้ายคลึงกับหมายเลขประจำอุปกรณ์ หมายเลขประจำท่อจะไม่มีรูปแบบมาตรฐานกำหนดที่แน่นอน แต่จะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของผู้ใช้งานหรือผู้ออกแบบกระบวนการผลิต แต่ข้อมูลต่างๆ ที่แสดงบนหมายเลขประจำท่อจะเหมือนกัน ความแตกต่างอาจจะเป็นที่ลำดับและจำนวนหลักของข้อมูลที่ใช้ โดยจะแสดงตัวอย่างการจัดรูปแบบหมายเลขประจำท่อทั้ง 2 แบบ ได้ดังรูปที่ 6 และรูปที่ 7



รูปที่ 6 หมายเลขประจำท่อแบบที่หนึ่ง



รูปที่ 7 หมายเลขประจำท่อแบบที่สอง

จากรูป 6 และ 7 สามารถแสดงรายละเอียดในส่วนต่าง ๆ ของหมายเลขประจำท่อได้ดังนี้

- ขนาดของท่อจะใช้แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจะเป็นตัวเลขที่ใช้แสดงขนาดของท่อกระบวนการผลิต ส่วนใหญ่แล้วตัวเลขเหล่านี้จะมีหน่วยเป็นนิ้ว เช่น 2”, 3”, 4” เป็นต้น

- ชนิดของไหลจะเป็นตัวอักษรย่อเพื่อใช้สำหรับแสดงชนิดของไหล (Fluid Type) ที่ไหลอยู่ในท่อ สามารถแสดงอักษรที่ใช้งานทั่ว ๆ ไปดังตารางที่ 2

สัญลักษณ์	รายละเอียด	สัญลักษณ์	รายละเอียด
BFW	Boiler Feed Water	IA	Instrument Air
CWS	Cooling Water Supply	ME	Methanol
CWR	Cooling Water Return	N	Nitrogen
FG	Fuel Gas	PA	Plant Air
FO	Fuel Oil	WO	Wash Oil
FW	Fire Water	WW	Waste Water

ตารางที่ 2 ชนิดของไหล

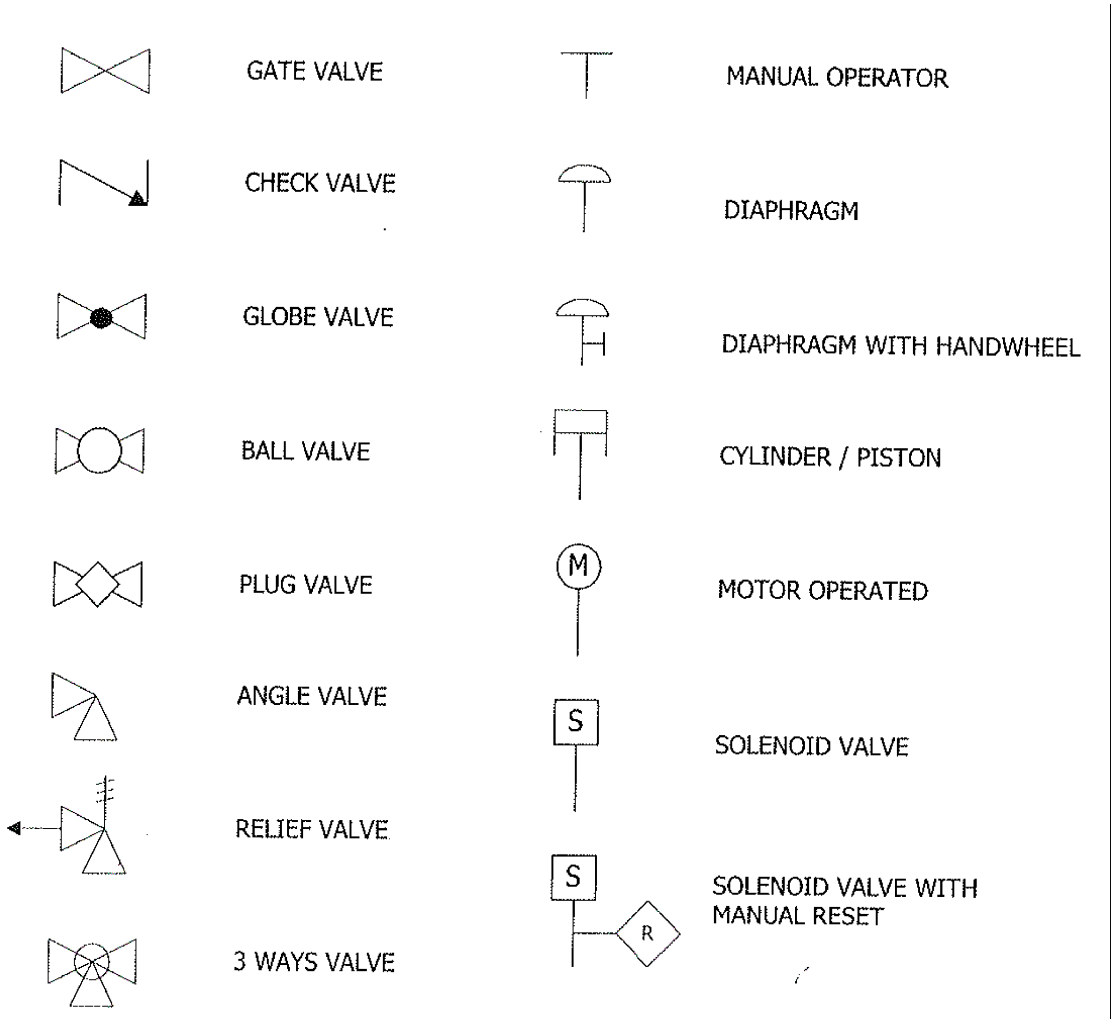
- ลำดับหมายเลข (Sequence Number) จะใช้เป็นหมายเลขประจำท่อ ส่วนใหญ่แล้วผู้ใช้งานจะใส่หน่วยการผลิตลงไปในสามหลักแรก จะมีลักษณะคล้ายกับหมายเลขประจำเครื่องมือวัด อาทิ เช่น หน่วยการผลิตที่ 100 ก็จะใช้สามหลักแรกเป็น 100 และหลักต่อไปจะเป็นลำดับหมายเลขอาจจะใช้สามหลักหรือ สี่ หลัก จาก 0000 – 9999 เป็นต้น

- ชนิดของท่อจะเป็นตัวเลขหรือตัวอักษร (จะขึ้นอยู่กับผู้นำไปใช้งาน) ที่ใช้แสดงรายละเอียดท่อซึ่งจะรวมไปถึงวัสดุที่ใช้ทำท่อ (Material), ขนาดความหนา (Thickness or Pipe Schedule), อัตราการทนต่อความดัน (Pressure rating) และอัตราการทนต่ออุณหภูมิ (Temperature rating) และจะให้เป็นข้อมูลสำหรับแสดงอัตราการทนต่อความดันและอุณหภูมิของจุดต่อแบบต่าง ๆ เช่น หน้าแปลน (Flange Connection) ตามมาตรฐาน ANSI B16.5 จะใช้แสดงเป็น Class 150, Class 300, แบบเกลียว (Screw) และแบบเชื่อม (Welded) เป็นต้น
- ฉนวนจะเป็นตัวอักษรบอกว่าต้องการหุ้มฉนวนแบบใด เช่น เพื่อป้องกันอัตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน หรือ ป้องกันอุณหภูมิจากภายในท่อ เป็นต้น

หมายเลขประจำท่อจะมีความสำคัญสำหรับนำไปใช้ในการกำหนดรายละเอียดของเครื่องมือวัดที่ติดตั้งอยู่กับท่อ (In-line Instrument) เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อสำหรับนำไปใช้ในการคำนวณแผ่นออริฟิส (Orifice plate), อัตราการทนต่อความดันและอุณหภูมิจะใช้สำหรับการเชื่อมต่อกับเครื่องมือวัด (Process connection), วัสดุของท่อจะใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการเชื่อมต่อกับเครื่องมือวัดที่ต่ออยู่กับท่อและกำหนดชนิดของวาล์วควบคุม เป็นต้น

สัญลักษณ์วาล์วควบคุม (Control Valve Symbol)

วาล์วควบคุมจะมีสัญลักษณ์สำหรับใช้แสดงบนแผนภาพตามชนิดของวาล์วควบคุมและ Actuator ซึ่งมีหลายชนิดจะต้องมีการเลือกแสดงให้ถูกต้องกับชนิดที่ต้องการ และต้องแสดงตำแหน่งของวาล์วควบคุมเมื่อเกิดความผิดพลาด ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปจะมีอยู่ 3 แบบคือ FO (Failure Open), FC (Failure Close) และ FL (Failure Lock) วาล์วควบคุมจะมีความผิดพลาดที่แตกต่างกัน เช่น Instrument Air failure และ Signal failure ดังนั้นต้องมีการกำหนดให้ชัดเจนบนแผนภาพนอกจากนั้นจะมีการแสดงรายละเอียดของการปิดสนิท (Tight Cutoff) ที่ต้องการ ANSI Class V หรือ VI จะถูกแสดงด้วยอักษร “TSO” รายละเอียดความต้องการเพิ่มเติมบนตัววาล์วควบคุมต้องแสดงอย่างชัดเจน รวมไปถึงขนาดของวาล์วควบคุม แสดงตัวอย่างสัญลักษณ์วาล์วควบคุมและ Actuator ได้ดังรูปที่ 8

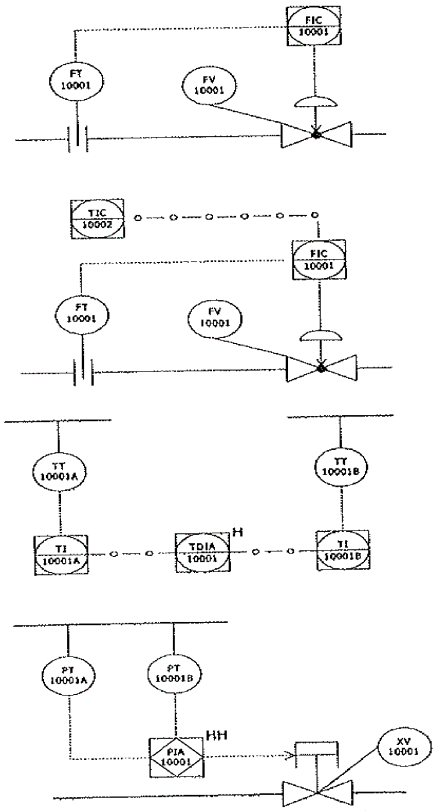


รูปที่ 8 สัญลักษณ์วาล์วควบคุมและ Actuator

สำหรับในโครงการก่อสร้างใหม่ ๆ ในช่วงการพัฒนาแผนภาพกระบวนการผลิต ชนิดและขนาดของวาล์วควบคุมอาจจะยังไม่มีข้อมูลชัดเจน เนื่องจากยังไม่ได้มีการจัดซื้อวาล์วควบคุมไปแก้ไขสัญลักษณ์ที่แสดงอยู่บนแผนภาพให้ถูกต้องก่อนที่จะนำแผนกระบวนการผลิตไปใช้งาน

ฟังก์ชันควบคุม (Control Function)

แผนภาพกระบวนการผลิตจะต้องมีการแสดงฟังก์ชันควบคุมของเครื่องมือวัดแต่ละชนิดที่แสดงอยู่บนแผนภาพ ฟังกชันควบคุมจะเป็นส่วนที่แสดงการทำงานที่สัมพันธ์กันระหว่างระบบเครื่องมือวัดและควบคุม ซึ่งจะเป็นข้อมูลพื้นฐานในการจัดทำโปรแกรมการทำงาน (Software configuration) ของระบบควบคุม สามารถแสดงตัวอย่างฟังก์ชันควบคุมพื้นฐานได้ดังรูปที่ 9



เป็นการควบคุมอัตราการไหลโดยใช้ตัวควบคุมในระบบการควบคุมพื้นฐานโดยอินพุทเป็นเครื่องมือวัดการไหลแบบOrifice Plate ต่อร่วมกับเครื่องมือวัดความดันแตกต่าง (Diff, Pressure) และเอาต์พุตเป็นวาล์วควบคุมแบบ GLOBE

เป็นการควบคุมอัตราการไหลโดยใช้การควบคุมแบบ Casecade กับการวัดอุณหภูมิ

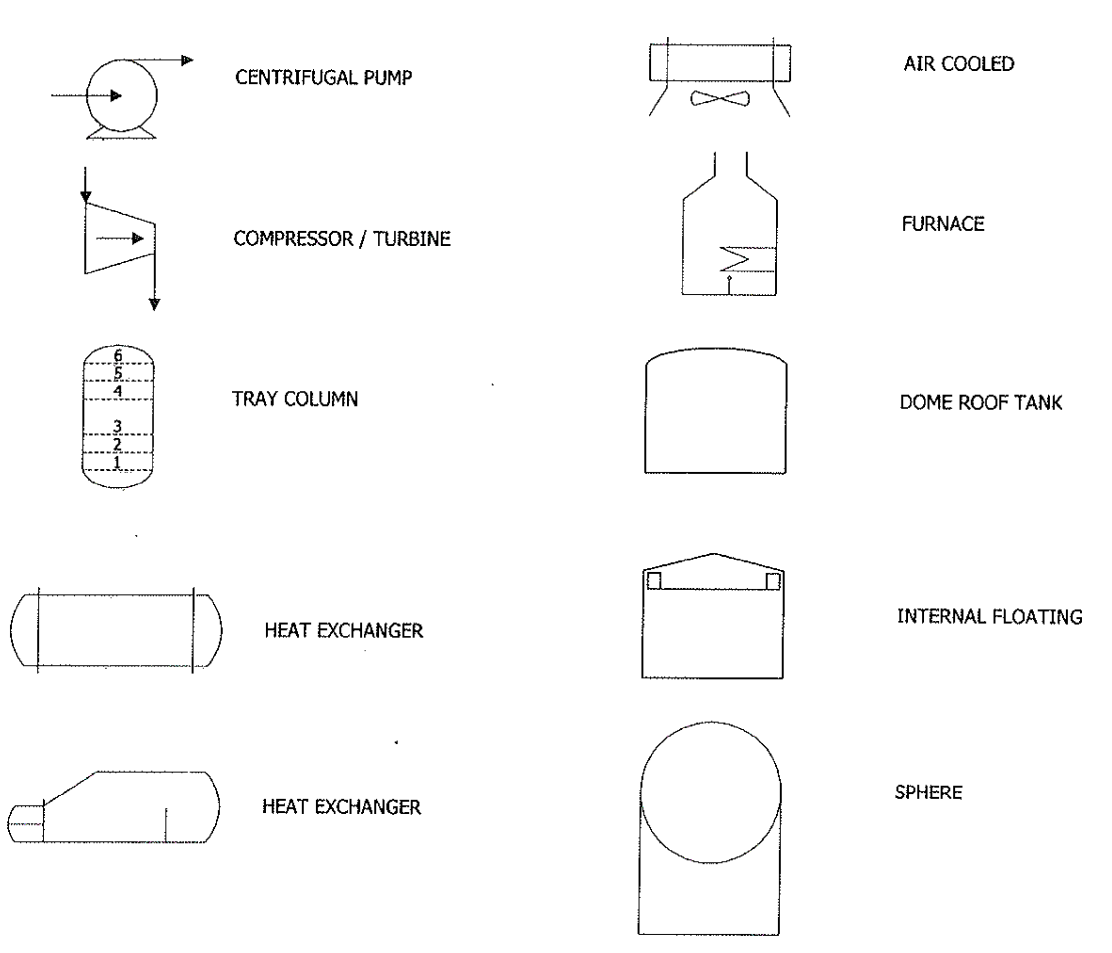
เป็นการแสดงค่าความแตกต่างของอุณหภูมิจากเครื่องมือวัอุณหภูมิจากจุดการวัดที่แตกต่างกันและมีสัญญาณเตือน (Alarm) เมื่อมีค่าสุงกว่าค่าที่กำหนด

เป็นการแสดงฟังก์ชันนิรภัยสำหรับป้องกันความดันเมื่อมีค่าที่กำหนดด้วยการลงมติแบบ 1002 (One out Of One voting) จากนั้นส่วนประมวลจะส่งสัญญาณไปปิดวาล์วนิรภัย

รูปที่ 9 ฟังก์ชันควบคุมพื้นฐาน

อุปกรณ์อื่นๆ (Other Equipment)

นอกจากสัญลักษณ์ที่ใช้แสดงระบบเครื่องมือวัดและควบคุมแล้ว ในระบบการผลิตยังมีอุปกรณ์หลัก ๆ ที่สำคัญอีกหลายชนิด โดยสัญลักษณ์ของอุปกรณ์ต่าง ๆ สามารถแสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 สัญลักษณ์อุปกรณ์อื่น ๆ ในกระบวนการผลิต

สำหรับอุปกรณ์หลักอื่น ๆ ในกระบวนการผลิตได้มีการแบ่งแยกหมวดหมู่อักษร ในการกำหนดชื่อให้กับอุปกรณ์เหล่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 3

CLASS	SUBJECT	DESCRIPTION
A	Mixing Equipment	Agitators, Aerators, Mechanical mixers
B	Blowers	Centrifugal Blowers, Positive Displacement Blowers, Fans
C	Compressors	Centrifugal, Reciprocating, Screw, Vacuum
D	Mechanical Drivers	Electrical and Pneumatic Motors, Diesel Engines, Steam and Gas Turbines
E	Heat Exchangers	Unfired Heat Exchanges, Condensers, Coolers, Reboilers, Vaporizers and Heating Coils, Double Pipe, Sprial, Plate & Frame, Air Coolers
F	Furnaces	Fired Heaters, Furnaces, Boilers, Kilns
P	Pumps	Horizontal and Vertical Centrifugal, Positive Displacement, Vertical Canned, Screw, Gear, Sump
R	Reactors	
T	Tower / Columns	
TK	Tanks	API atmospheric and low pressure
U	Miscellaneous Equipment	Filters, Bins, Silos
V	Drums	Separators, Driers, Accumulators

ตารางที่ 3 อักษรในการกำหนดชื่ออุปกรณ์อื่น ๆ

นอกจากชื่ออุปกรณ์ (Equipment Tag number) ที่ต้องแสดงอยู่บนแผนภาพกระบวนการผลิตแล้ว ยังต้องมีข้อมูลอุปกรณ์อื่น ๆ ที่สำคัญของแต่ละชนิดของอุปกรณ์ ซึ่งตัวอย่างข้อมูลทั่ว ๆ ไปที่ถูกแสดงอยู่บนแผนภาพ จะเป็นดังนี้ หน้าที่ทำงาน (Title/Service), พลังงานที่ต้องการ (Power requirements), วัสดุที่ใช้ทำอุปกรณ์ (Materials

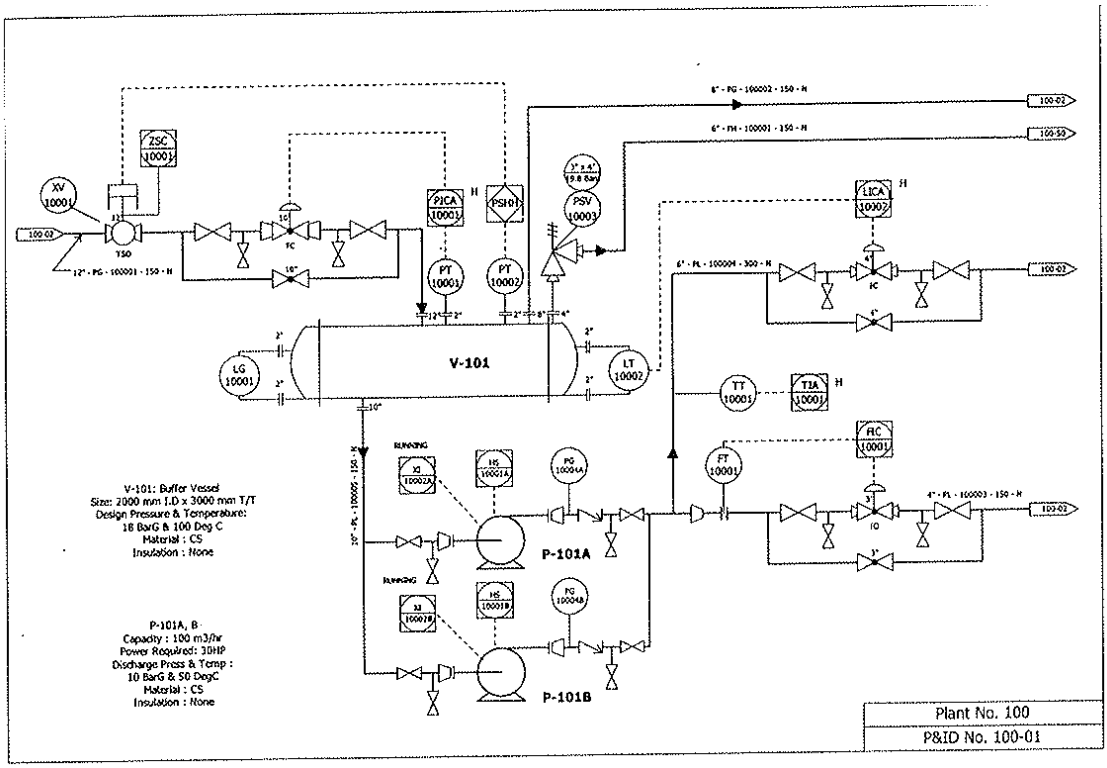
of Construction), ความสามารถ (Capacity), พื้นที่ผิว (Surface Area), อุณหภูมิและความดันออกแบบ (Design Temperature and Pressure), ฉนวน (Insulation)

จากรายละเอียดของสัญญาณต่าง ๆ ที่แสดงอยู่บนแผนภาพกระบวนการผลิตที่ได้แสดงมาทั้งหมดเป็นเพียงตัวอย่างบางส่วนเท่านั้น สำหรับในการใช้งานจริงแล้วรายละเอียดต่าง ๆ เหล่านี้จะถูกแสดงรายละเอียดทั้งหมดที่มีใช้งานไว้ในส่วนแรกของแผนภาพกระบวนการผลิต

จะเห็นได้ว่าข้อมูลต่าง ๆ ที่อยู่บนแผนภาพกระบวนการจะเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับใช้ในการนำไปกำหนดรายละเอียดของระบบเครื่องมือวัดและควบคุม นอกจากนั้นแล้วแผนภาพกระบวนการผลิตหรือ P&ID จะเป็นเอกสารที่ถูกต้องจัดทำเป็นลำดับแรก สำหรับการออกแบบกระบวนการผลิตและยังใช้เป็นเอกสารที่ใช้อ้างอิงสำหรับหลายส่วนที่เกี่ยวข้อง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงหรือเพิ่มเติมส่วนต่าง ๆ ในกระบวนการจึงต้องมีการแก้ไขแผนภาพกระบวนการผลิตให้ถูกต้องเสมอ ดังนั้นก่อนจะทำการกำหนดรายละเอียดให้กับระบบเครื่องมือวัดและควบคุมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตต่าง ๆ แล้ว จึงต้องมีการทำความเข้าใจกับสัญลักษณ์ต่าง ๆ และการทำงานของกระบวนการผลิตจากแผนภาพก่อน เพื่อความถูกต้องในการออกรายละเอียดและการจัดหาเครื่องมือวัดเหล่านั้น

ตัวอย่างแผนภาพกระบวนการผลิต

ตัวอย่างแผนภาพกระบวนการผลิต สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 ตัวอย่างแผนภาพกระบวนการผลิต

จากรูปที่ 11 จะเป็นตัวอย่างแผนภาพกระบวนการผลิตเพียงบางส่วน ในการกระบวนการแยกของไหลด้วย V-101 ของไหลด้านขาเข้ามาจาก P&ID 100-02 ด้วยท่อขนาด 12” มีอัตราการทนความดันที่ 150# (12” – PG-10001-150-N) ไม่มีฉนวนหุ้มท่อ

มีการควบคุมความดันภายในถังด้วยฟังก์ชันควบคุมความดัน (P-10001) ที่มีตัวควบคุมความดัน (Pressure Indicator Controller) พร้อมสัญญาณเตือนความดันสูง (High pressure alarm) บนระบบควบคุมพื้นฐานหรือระบบ DCS มีอินพุตที่เป็นเครื่องมือวัดความดัน (Pressure Transmitter) ที่ต่ออยู่กับถังด้วยหน้าแปลนขนาด 2” (สำหรับอัตราการทนความดันดูได้จากรายละเอียดของถัง) เพื่อวัดค่าความดันภายในถัง และส่งสัญญาณไฟฟ้าไปที่ตัวควบคุม ส่วนเอาต์พุตจากตัวควบคุมเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่ส่งไปยังวาล์วควบคุมแบบ Globe with Diaphragm Actuator เพื่อควบคุมความดันของไหลที่ท่อด้านเข้าถัง ตัววาล์วควบคุมจะมีขนาด 10” และเป็นแบบ Air Failure Close หรือปิดเมื่อไม่มีความดันลมที่จ่ายให้กับวาล์วควบคุม

มีระบบป้องกันความดันในถังเกินกว่าค่าที่ยอมรับได้ด้วยฟังก์ชันนิรภัย (P-10002) ที่มีส่วนประมวลผลความดันสูงเกิน (Pressure Switch High High) บนระบบควบคุมนิรภัยหรือระบบ SIS (Safety Instrumented System) มีอินพุตที่เป็นเครื่องมือวัดความดัน (Pressure Transmitter) ที่ต่ออยู่กับถังด้วยหน้าแปลนขนาด 2” (สำหรับอัตราการทนความดันดูได้จากรายละเอียดของถัง) เพื่อวัดค่าความดันภายในถังและส่งสัญญาณไฟฟ้าไปยังวาล์วปิดเปิด (On/Off valve) แบบ Ball with Piston Actuator ที่มีขนาด 12” และเป็นแบบ Air Failure Close และมีอัตราการรั่วเป็นแบบ tight shut off หรือ Class V มีสวิทช์แสดงตำแหน่งเมื่อวาล์วปิดไปแสดงผลบนระบบ DCS

โดยส่วนที่เป็นไอหรือก๊าซจะออกทางด้านบนของถังเพื่อออกไปยังกระบวนการส่วนอื่นต่อไป และส่วนที่เป็นของเหลวจะออกทางด้านล่าง จะมีปั๊ม 2 ตัวเพื่อใช้ทำงานหนึ่งตัวและเตรียมพร้อมทำงาน (Stand by) อีกหนึ่งตัวเพื่อส่งของเหลวไปยังกระบวนการอื่นต่อไป ซึ่งของเหลวที่ถูกส่งออกไปจะถูกควบคุมด้วยฟังก์ชันควบคุมอัตราการไหลและฟังก์ชันควบคุมระดับ การทำงานและอุปกรณ์ต่าง ๆ จะคล้ายกับฟังก์ชันควบคุมความดัน

นอกจากมีข้อมูลของระบบบนเครื่องมือวัดและควบคุมแล้ว ยังมีการแสดงข้อมูลรายละเอียดของอุปกรณ์อื่น ๆ ที่อยู่บนแผนภาพเช่น ถัง และ ปั๊ม เป็นต้น

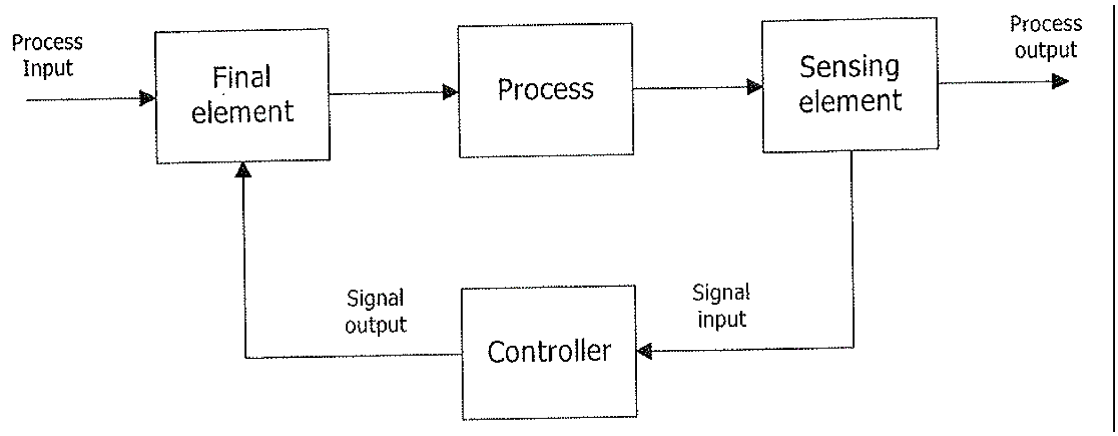
จากรายละเอียดที่แสดงไปแล้วทั้งหมด จะทำให้สามารถอ่านแผนภาพการระบวนการผลิตได้อย่างเข้าใจ ซึ่งจะเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการนำข้อมูลต่าง ๆ เหล่านี้ ไปใช้ในการออกแบบและกำหนดรายละเอียดระบบเครื่องมือวัดและควบคุมที่ต้องการได้อย่างถูกต้อง

ระบบควบคุมกระบวนการผลิตพื้นฐาน

(Basic process Control System)

บทนำ

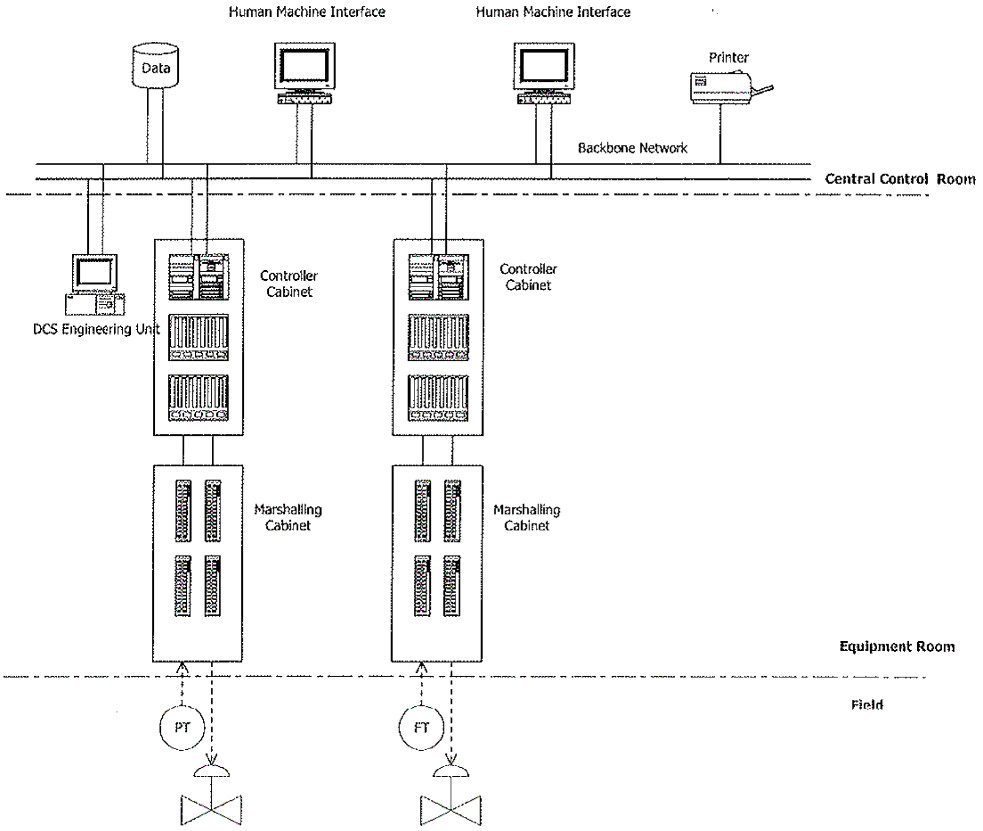
อุสาหกรรมกระบวนการผลิต (Industrial process) เป็นกระบวนการหรือขั้นตอนในการเปลี่ยนสภาพของวัตถุดิบ (Raw material) ชนิดต่าง ๆ ให้ไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ อุสหกรรมกระบวนการผลิตมีอยู่หลายประเภทซึ่งจะขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ในอุตสาหกรรมกระบวนการผลิตแต่ละชนิดจะต้องมีการจัดเตรียมระบบเครื่องมือวัดและควบคุมตัวแปรทางกระบวนการต่าง ๆ ให้อยู่ในค่าที่ต้องการและเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณสมบัติตามที่กำหนด ตัวแปรทางกระบวนการที่เป็นพื้นฐานในการควบคุมจะได้แก่ การไหล (Flow), ระดับ (Level), ความดัน (Pressure) และ อุณหภูมิ (Temperature) ตัวอย่างการควบคุมตัวแปรต่าง ๆ เป็นดังนี้ การควบคุมอัตราการไหลของไหลในท่อให้อยู่ในค่าที่ต้องการ, การควบคุมทิศทางการไหลให้ไหลไปทิศทางที่กำหนด, การควบคุมระดับของไหลตามถังหรือหอแยกต่าง ๆ, การควบคุมอุณหภูมิของไหลให้อยู่ในค่าที่กำหนดและการควบคุมความดันของไหล เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ในการควบคุมตัวแปรต่าง ๆ เหล่านี้ในกระบวนการผลิต จึงต้องมีการจัดเตรียมระบบควบคุม (Control system) ขึ้นทำหน้าที่ดังกล่าว โดยระบบควบคุมจะประกอบไปด้วยฟังก์ชันควบคุม (Control function) หลายฟังก์ชัน อุปกรณ์พื้นฐานที่สำคัญของฟังก์ชันควบคุมจะมีอยู่ 3 ส่วนดังนี้ เครื่องมือวัด (Sensing element of Instrument), ตัวควบคุม (Controller) และ อุปกรณ์สุดท้าย (Final element) สามารถแสดงแผนภาพการควบคุมได้ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 แผนภาพการควบคุม

โดยเครื่องมือวัดจะทำหน้าที่ในการเปลี่ยนตัวแปรจากกระบวนการให้เป็นสัญญาณไฟฟ้ามาตรฐานเพื่อส่งค่าไปยังอินพุตของตัวควบคุมและไปแสดงค่าตัวแปรที่หน่วยแสดงผลของระบบควบคุม เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงและควบคุมตัวแปรต่าง ๆ เหล่านี้ได้ จากนั้นตัวควบคุมจะทำการประมวลผลและส่งสัญญาณไฟฟ้าเอาต์พุตไปยังอุปกรณ์สุดท้ายที่เป็นวาล์วควบคุมเพื่อทำการปรับตัวแปรในกระบวนการให้อยู่ในค่าที่ต้องการ ระบบควบคุมกระบวนการผลิตพื้นฐาน (Basic Process Control System : BPCS) ที่ใช้งานกันอย่างกว้าง

ขวางสำหรับอุตสาหกรรมกระบวนการผลิตในปัจจุบันคือ ระบบ DCS (Distributed Control System) ซึ่งสามารถแดงตัวอย่างโครงสร้างพื้นฐานของระบบควบคุม (Control System Architecture) ได้ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 โครงสร้างระบบควบคุมกระบวนการผลิตพื้นฐาน

จากรูปที่ 13 ระบบควบคุมกระบวนการผลิตพื้นฐาน จะเป็นระบบที่ใช้สำหรับควบคุมการทำงานกระบวนการผลิตโดยผ่านเครื่องมือวัดและอุปกรณ์อื่น ๆ ในกระบวนการผลิตเพื่อให้กระบวนการผลิตทำงานเป็นไปตามที่ต้องการหรือที่ได้ออกแบบไว้ โดยสามารถแบ่งส่วนประกอบหลัก ๆ ที่สำคุญดังต่อไปนี้

1. อุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ในอาคารควบคุม

- ตู้ต่อสาย (Marshalling cabinet) เป็นส่วนที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างสายไฟจากเครื่องมือในกระบวนการผลิตไปยังส่วนอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุม ในตู้นี้จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักดังนี้ อุปกรณ์ต่อสายแบบต่าง ๆ (Terminal), รางสายไฟ (wire ways), แหล่งจ่ายพลังงาน (Power sappy unit), Safety Barrier, Relay

- ตัวควบคุม (Controller) เป็นส่วนที่ใช้สำหรับประมวลผล ตัวควบคุมจะประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก ๆ ดังนี้ แหล่งจ่ายพลังงาน (Power supply unit), ตัวประมวลผลกลาง (Central Processor Unit), ส่วนรับและส่งสัญญาณ (Input and Output Cards) ส่วนติดต่อสื่อสาร (Communication port) และโปรแกรมในการควบคุม (Control function program) ตัวควบคุมจะถูกติดตั้งอยู่ในตู้ที่แยกออกจากตู้ต่อสาย การทำงานหลักจะเป็นการควบคุมตัวแปรจากกระบวนการผลิตให้อยู่ในค่าที่ต้องการ
- เครือข่ายสื่อสารหลัก (Backbone Network) เป็นระบบสื่อสารหลักที่ใช้ในการส่งผ่านข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบควบคุม เครือข่ายสื่อสารหลักจะมีความเร็วในการสื่อสารที่มีอัตราความเร็วในการส่งผ่านข้อมูลสูง โดยจะขึ้นอยู่กับมาตรฐานเครือข่ายที่นำมาใช้ อาทิ เช่น มาตรฐาน IEEE 802.3 (Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection : CSMA/CD), IEEE 802.4 (Token Bus), IEEE 802.5 (Token Ring) หรือ Ethernet เป็นต้น
- ส่วนติดต่อกับผู้ปฏิบัติการ (Human Machine Internet ส่วนมากจะใช้เป็นจอภาพ (Monitor) และแป้นพิมพ์ (Key board) และ เมาส์ เป็นส่วนที่ใช้สำหรับแสดงแผนภาพ (Graphic display) กระบวนการผลิตและแสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ของกระบวนการผลิต สำหรับใช้เป็นส่วนติดต่อหรือรับคำสั่งต่าง ๆ จากผู้ปฏิบัติในการควบคุมกระบวนการผลิตและยังใช้เป็นส่วนแสดงสัญญาณเตือนต่าง ๆ ที่มาจากหน่วยการควบคุมอื่น ๆ เช่น จากระบบวัดคุมนิรภัย และระบบตรวจจับเพลิงไหม้และก๊าซรั่ว เป็นต้น
- ส่วนพิมพ์รายงาน (Printer) เป็นเครื่องพิมพ์ส่วนกลางที่ติดตั้งอยู่บนเครือข่ายหลักสำหรับพิมพ์รายงานหรือสัญญาณเตือนต่างๆ
- หน่วยวิศวกรรม (Engineering Unit) เป็นหน่วยที่ใช้ในการกำหนดคำสั่งการทำงานหรือสร้างภาพแสดงผล หน่วยนี้จะมีความจำเป็นตั้งแต่เริ่มทำการสร้างระบบการควบคุมจนถึงการซ่อมบำรุงและการแก้ไขเพิ่มเติมระบบการควบคุม หน่วยนี้จะต่ออยู่กับเครื่อข่ายสื่อสารหลักและบางครั้งยังใช้เป็นส่วนที่ใช้ติดต่อกับผู้ปฏิบัติงานด้วย

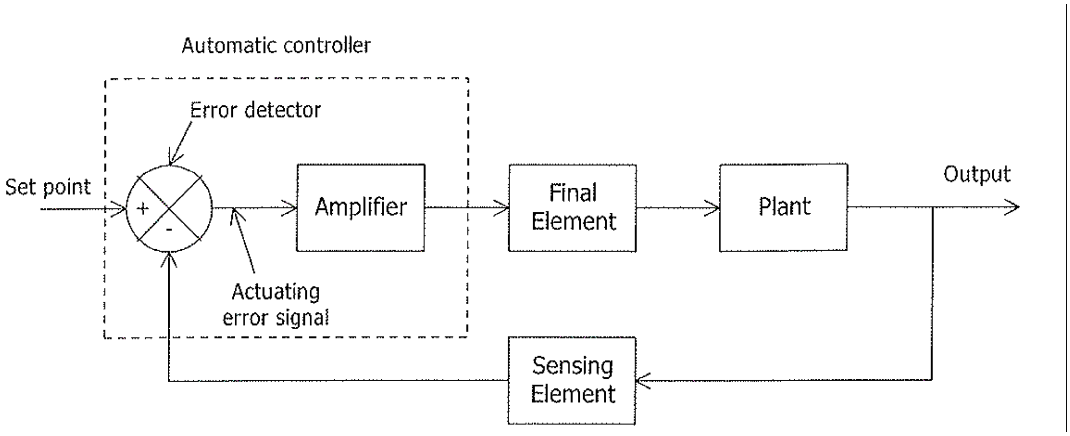
2 อุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ในกระบวนการ

- เครื่องมือวัด (Sensing element) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการผลิต (Process parameter) เช่น อัตราการไหลในกระบวนการ, ระดับของไหลในถัง, ความดันที่จุดต่าง ๆ ในกระบวนการอุณหภูมิตามจุดต่าง ๆ ในกระบวนการ และส่วนประกอบของไหลที่ต้องการ เป็นต้น ให้เป็นสัญญาณกระแสไฟฟ้ามาตรฐาน 4-20 mA ที่ 24 VDC หรือสัญญาณมาตรฐานชนิดอื่น ๆ เพื่อส่งข้อมูลของตัวแปรต่าง ๆ ไปยังอินพุตของตัวควบคุม (Controller) และใช้แสดงค่าที่หน่วยแสดงผล เครื่องมือวัดพื้นฐานจะมีดังนี้ เครื่องมือวัดการไหล (Flow Transmitter), เครื่องมือวัดระดับ (Level Transmitter), เครื่องมือวัดความดัน (Pressure Transmitter) และ เครื่องมือวัดอุณหภูมิ (Temperature Transmitter) เครื่องมือวัดเหล่านี้จะมีให้เลือกใช้ได้หลายชนิดในการเลือกใช้จึงต้องเลือกให้เหมาะสมกับสถานะและคุณสมบัติของไหลที่ต้องการวัด เพื่อให้ข้อมูลที่ได้จากการวัดมีค่าความถูกต้องมากที่สุดและอุปกรณ์เหล่านั้นมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

- อุปกรณ์สุดท้าย (Final Element) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้ามาตรฐาน 4-20 mA จากเอาต์พุตของตัวควบคุมไปเป็นการควบคุมตัวแปรกระบวนการผลิตตัวอย่างของอุปกรณ์สุดท้ายจะเป็นวาล์วควบคุม (Control Valve) ซึ่งจะทำการปิดเปิดของไหลตามสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุม

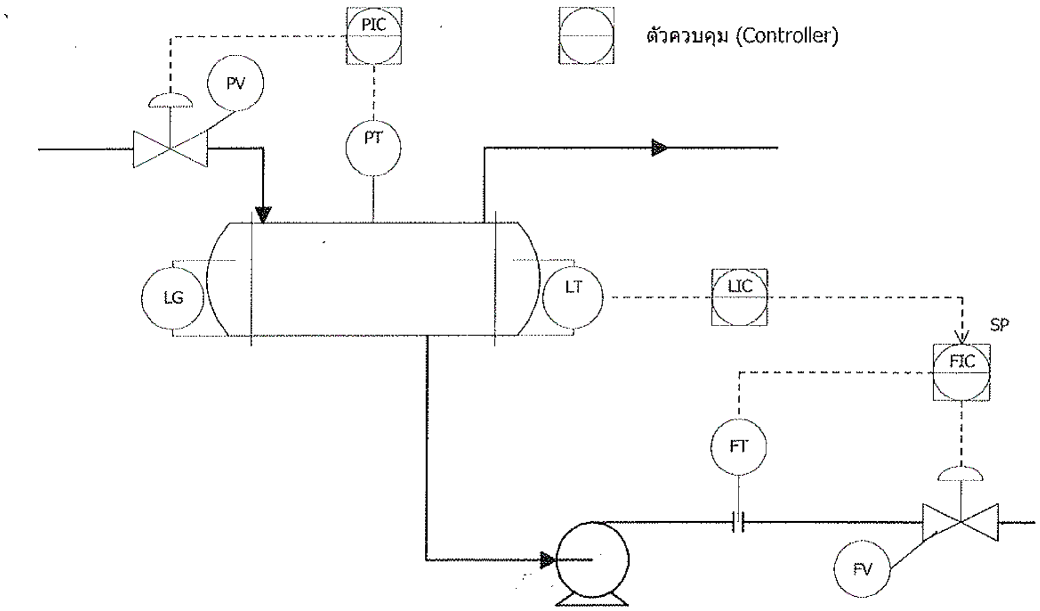
การควบคุมัตโนมัติ (Automatic control)

ตัวควบคุมในการควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการที่มีใช้ระบบควบคุมพื้นฐานนั้น จะมีการทำงานเป็นแบบอัตโนมัติ โดยการรับสัญญาณอินพุตมาจากเครื่องมือวัดเพื่อมาทำการเปรียบเทียบค่ากับค่าที่กำหนด (Set point) และทำการประมวลผลหาค่าที่เบี่ยงเบนออกไป จากนั้นจะส่งสัญญาณเอาต์พุตไปยังอุปกรณ์สุดท้ายเพื่อทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรกระบวนการ เพื่อให้ค่าตัวแปรที่เบี่ยงเบนออกไปจากค่าที่กำหนดมีค่าเป็นศูนย์หรือต่ำสุด รูปที่ 14 จะเป็นการแสดงไดอะแกรมการควบคุมอัตโนมัติที่ประกอบไปด้วย ตัวควบคุมอัตโนมัติ (Automatic controller), อุปกรณ์สุดท้าย (Final element), กระบวนการ (Process or Plant) และ เครื่องมือวัด (Sensing element)



รูปที่ 14 ไดอะแกรมการควบคุมอัตโนมัติ

ตัวควบคุมที่ต้องการในการควบคุมกระบวนการผลิตจะถูกแสดงอย่างชัดเจนบนแผนภาพกระบวนการผลิต เพื่อให้สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการจัดเตรียมระบบควบคุมได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม สามารถแสดงตัวอย่างตัวควบคุมบนแผนภาพกระบวนการผลิตได้ดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 ตัวควบคุมบนแผนภาพกระบวนการผลิต

จากรูปที่ 15 เป็นแผนภาพกระบวนการผลิต สำหรับตัวอย่างกระบวนการที่มีฟังก์ชันควบคุมอยู่ 2 ฟังก์ชัน คือ การควบคุมความดันที่ถังโดยการปรับวาล์วควบคุมที่ด้านขาเข้า และ การควบคุมระดับภายในถังโดยการปรับวาล์วควบคุมการไหลที่ต้องการด้านขาออก จากแผนภาพกระบวนการนี้ผู้ปฏิบัติงานสามารถทำการควบคุมค่าความดันและระดับ โดยการปรับเปลี่ยนค่า Set point ที่ตัวควบคุมที่อยู่ในระบบการควบคุมพื้นฐาน ซึ่งตัวควบคุมก็จะทำการส่งสัญญาณออกไปปรับวาล์วควบคุมเพื่อให้มีค่าความดันและระดับตามที่ต้องการ ตัวควบคุมจะทำการดำเนินการควบคุม (Control action) ตัวแปรต่าง ๆ โดยอัตโนมัติ ตัวควบคุมแบบอัตโนมัติที่มีใช้กันอย่างแพร่กลายในอุสาหกรรมกระบวนการผลิตสามารถแบ่งตามการควบคุมได้ดังนี้

1 การควบคุมแบบปิดเปิด (On-Off Control)

2 การควบคุมแบบ PI (Proportional-Intregral control)

3 การควบคุมแบบ PID (Proportional-Derivative control)

4 การควบคุมแบบ PIC (Proportional-Intregral-Derivative control)

ในการควบคุมแต่ละแบบสามารถแสดงการดำเนินการควบคุมของตัวควบคุมอัตโนมัติแต่ละแบบได้ดังนี้

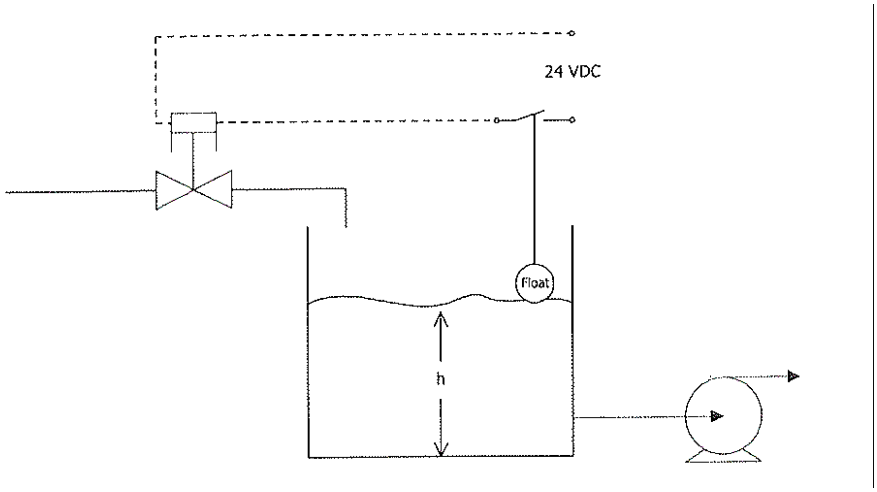
1. การควบคุมแบบปิดเปิด (On-Off Control)

การควบคุมแบบนี้จะเป็นการควบคุมแบบสองตำแหน่ง ซึ่งการทำงานของอุปกรณ์สุดท้ายจะมีการทำงานอยู่ที่สองตำแหน่งเช่นเดียวกัน คือ ปิดและเปิด จะมีการทำงานที่ง่ายเนื่องจากมีการทำงานเพียงสองตำแหน่ง และมีค่าใช้

จ่ายถูก ด้วยเหตุผลนี้ จึงทำให้การควบคุมแบบปิดเปิดมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายทั้งระบบควบคุมกับเครื่องใช้ในชีวิตประจำวันและในอุตสาหกรรมต่าง ๆ

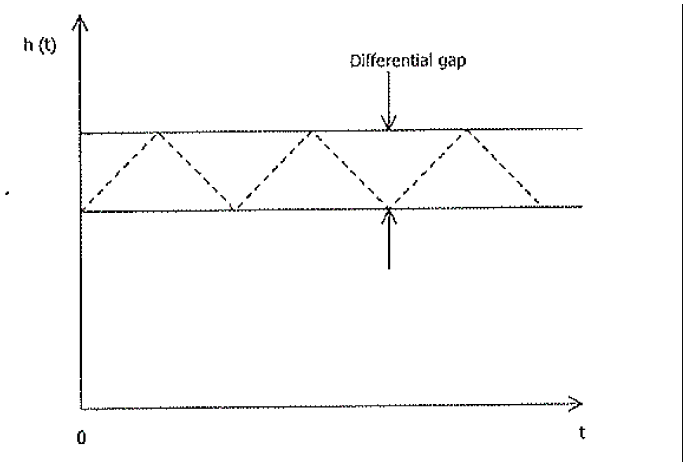
การควบคุมแบบปิดเปิดมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางกับการควบคุมโซลินอยส์วาล์ว (Solenoid valve) ในการควบคุมจะมีการเกิดช่วงเวลาการปิดเปิดที่เรียกว่า Differential gap คือ เมื่อเกิดการเบี่ยงเบนสัญญาณระหว่างค่าตัวแปรจากกระบวนการกับค่าที่กำหนดจนถึงค่า ๆ หนึ่งอุปกรณ์สุดท้ายจึงทำการปิดหรือเปิด ซึ่งอาจเกิดขึ้นมาจากแรงเสียดทานหรือความสูญเสียจากการเคลื่อนที่ในบางครั้งจะเกิดขึ้นจากความตั้งใจเพื่อใช้ลดความถี่ในการทำงานปิดเปิดของอุปกรณ์ทางกล

ตัวอย่างตัวควบคุมแบบปิดเปิด สามารถแดงได้ดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 ตัวควบคุมแบบปิดเปิด

จากรูปที่ 16 เป็นการควบคุมระดับของเหลวในถังเก็บโดยใช้โซลินอยส์วาล์วควบคุมอัตราการไหลเข้าถังด้วยการปิดเปิดของเหลว ของเหลวจะมีอัตราการไหลคงที่เมื่อวาล์วปิด สัญญาณเอาต์พุตจะเคลื่อนที่อยู่ระหว่างค่าที่กำหนดสองค่า หรือ Differential gap ถ้ามีการลดค่าลงจะทำให้มีจำนวนการปิดเปิดเพิ่มขึ้น ทำให้อายุการทำงานของอุปกรณ์สั้นลง แสดงค่าเอาต์พุตของการคงบคุมระดับได้ดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 แสดงค่าเอาต์พุตของตัวควบคุม

2. การควบคุมแบบ PI (Proportional-Integral control)

การควบคุมแบบ PI จะมีสมการของเอาต์พุตเป็นดังนี้

$$u(t) = K_p e(t) + (K_p / T_i)\int e(t)dt$$

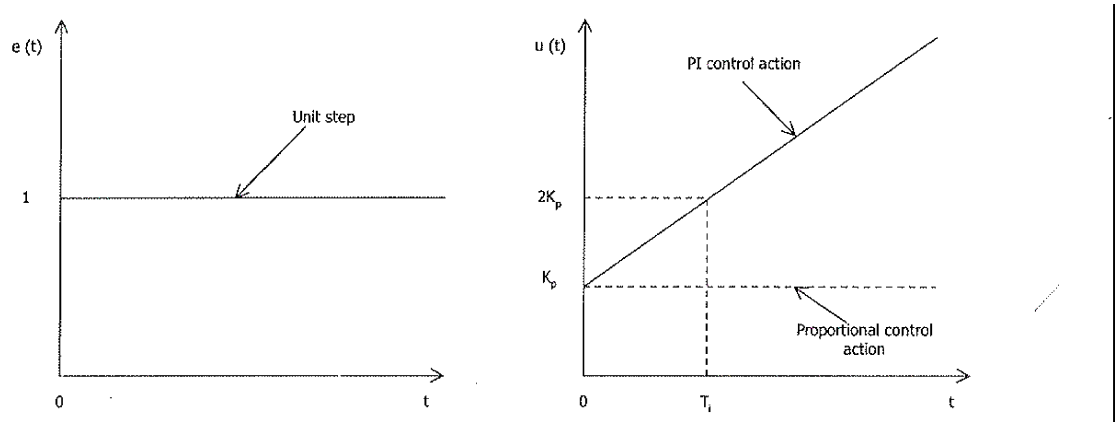
ค่าเอาต์พุตจากตัวควบคุม $u(t) = K_p e(t) + (K_p / T_i)\int e(t)dt$

$e(t)$ = ค่าเบี่ยงเบนจากค่ากำหนด

K_p = Proportional gain

T_i = Integral time

K_p และ T_i เป็นตัวแปรที่ปรับค่าได้ โดย T_i จะใช้ปรับค่าการควบคุมแบบ Integral ขณะที่การปรับค่า K_p จะมีผลกระทบต่อส่วนการควบคุม Proportional และ Integral สำหรับส่วนกลับของ (K_p/T_i) จะถูกเรียกว่า Reset time ซึ่งจะถูกวัดอยู่ในรูปของ การทำซ้ำต่อนาที (Repeats per) minute) สามารถแสดงค่าอาต์พุตของตัวควบคุม u(t) เมื่อมีค่าเบี่ยงเบน e(t) เป็นแบบ Unit step ดังในรูปที่ 18



รูปที่ 18 ค่าเอาต์พุตของการควบคุมแบบ PI เมื่อมีการเบี่ยงเบนแบบ Unit step

3. การควบคุมแบบ PD (Proportional-Derivative)

การควบคุมแบบ PD จะมีสมการของเอาต์พุตเป็นดังนี้

$$u(t) = K_p e(t) + (K_p T_d de(t)/dt$$

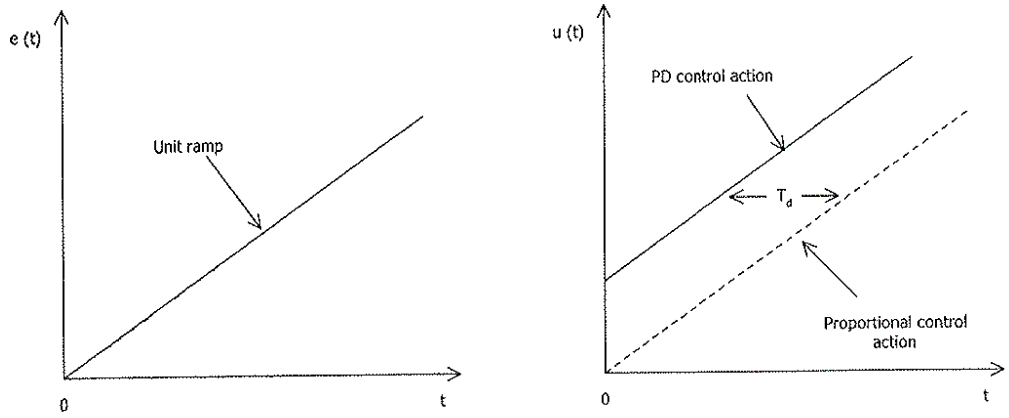
ค่าเอาต์พุตจากตัวควบคุม $u(t) = K_p e(t) + (K_p / T_i) \int e(t)dt$

$e(t)$ = ค่าเบี่ยงเบนจากค่ากำหนด

K_p = Proportional gain

T_d = Derivation time

K_p และ T_d เป็นตัวแปรที่ปรับค่าได้ การควบคุมแบบ Derivative ในบางครั้งถูกเรียกว่า rate control ซึ่งขนาดเอาต์พุตของตัวควบคุมจะมีขนาดเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลง (Rate of change) ของค่าเบี่ยงเบน T_d เป็นค่าช่วงเวลานำหน้าค่าเอาต์พุตจากส่วนการควบคุมแบบ Proportional สามารถแสดงค่าเอาต์พุตของตัวควบคุม u(t) เมื่อมีค่าเบี่ยงเบน e(t) เป็นแบบ Unit ramp ดังรูปที่ 19



ดังรูปที่ 19 ค่าเอาต์พุตของการควบคุมแบบ PD เมื่อมีการเบี่ยงเบนแบบ Unit ramp

4. การควบคุมแบบ PID (Proportional-Integral-Derivative control)

การควบคุมแบบนี้จะเป็นรวมการควบคุมทั้งสามแบบเข้าด้วยกัน การควบคุมแบบ PID จะมีสมการของเอาต์พุตเป็นดังนี้

$$u(t) = Kep(t) + (Kp/Ti)\int e(t)dt + K_p T_d de(t)/dt$$

ค่าเอาต์พุตจากตัวควบคุม $u(t) = K_p e(t) + (K_p / T_i)\int e(t)dt$

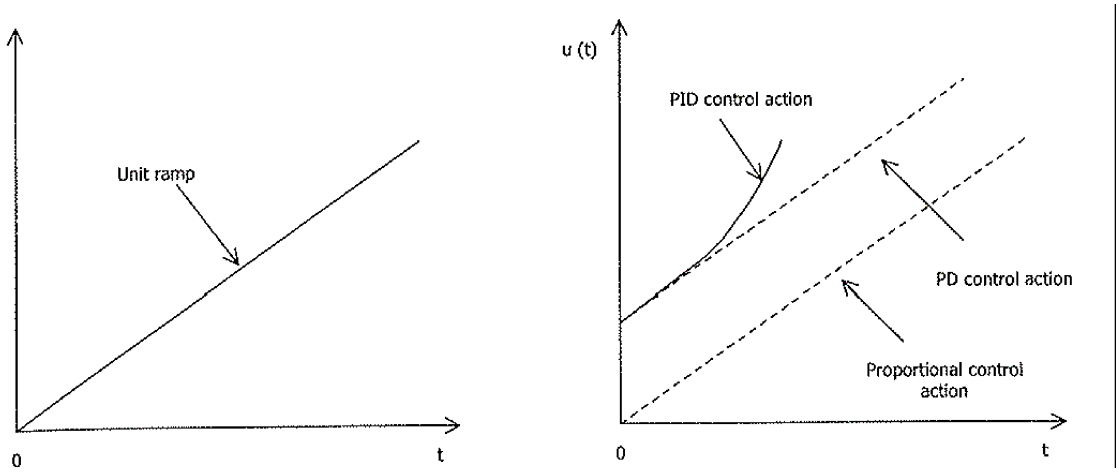
$e(t)$ = ค่าเบี่ยงเบนจากค่ากำหนด

K_p = Proportional gain

T_i = Integral time

T_d = Derivation time

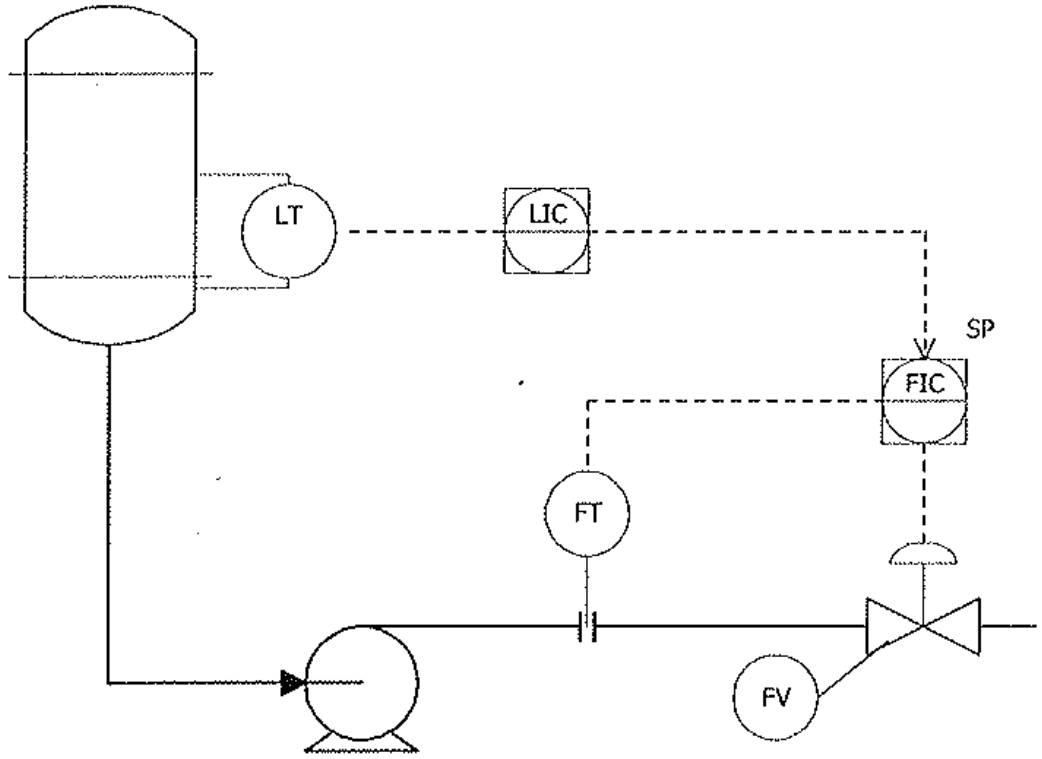
สามารถแสดงค่าอาต์พุตของตัวควบคุม u(t) เมื่อมีค่าเบี่ยงเบน e(t) เป็นแบบ Unit ramp ดังในรูปที่ 20



ดังรูปที่ 20 ค่าเอาต์พุตของการควบคุมแบบ PID เมื่อมีการเบี่ยงเบนแบบ Unit ramp

5. Cascade Control System

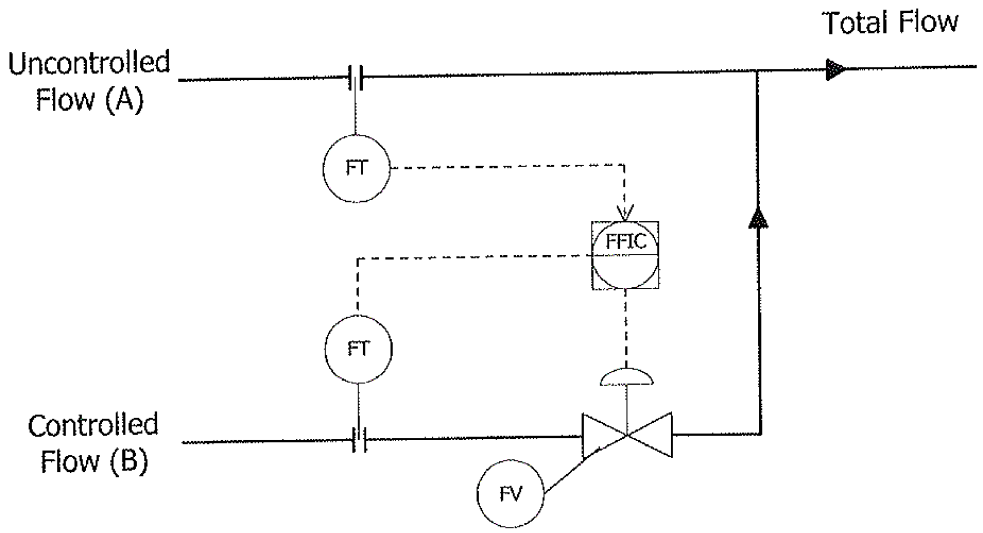
เป็นการคงบคุมตัวแปรหนึ่งดดยการใช้ค่ากำหนดมาจากอีกตัวแปรหนึ่งดังเน กรควบคุมระดับในถังโดยการส่งค่าระดับไปเป็นค่ากำหนดให้กับตัวควบคุมอัตราการไหล ดังแดสงในรูปที่ 21



รูปที่ 21 Cascade Control System

6. Ratio control System

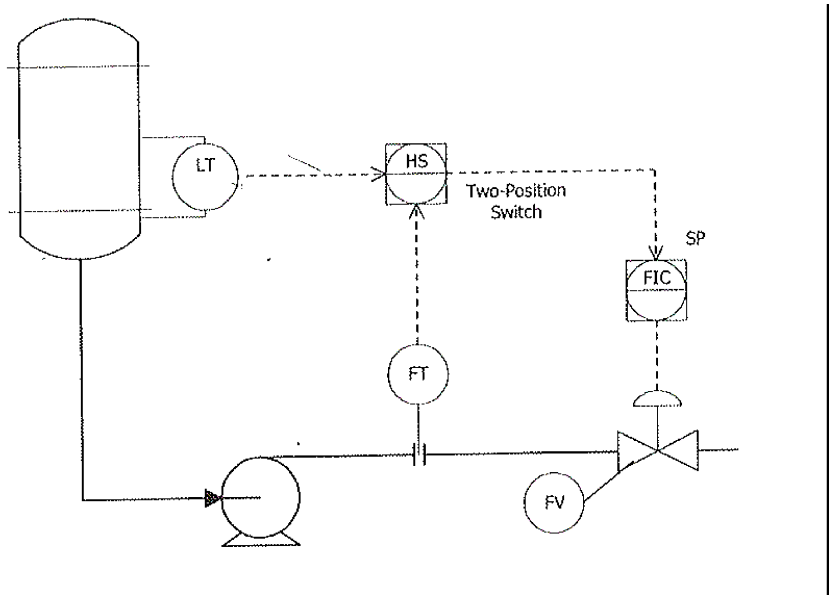
เป็นการควบคุมแบบอัตราส่วนระหว่างสองตัวแปร ดังเช่น การควบคุมอัตราการไหลดังแสดงในรูปที่ 22



รูปที่ 22 Ratio Control System

7. Hand Switching

ควบคุมโดยใช้ Hand Switch เป็นตัวเลือกค่ากำหนดจากตัวแปรที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 23



รูปที่ 23 Hand Switching Control

8. Advanced Control

นอกจากการควบคุมที่กล่าวไปแล้ว ระบบควบคุมควรจะต้องมีการควบคุมแบบ Advanced Control ดังต่อไปนี้

- Fuzzy Logic Control
- Multivariable Control
- Neural Control
- Real Time Optimization
- Auto Self-Tuning

หน่วยการวัด (Unit of measurement)

หน่วยการวัดสำหรับเครื่องมือวัดจะต้องมีการกำหนดให้กับเครื่องมือวัดที่จะนำไปใช้ในกระบวนการผลิต เพื่อให้มีหน่วยการวัดที่เหมือนกันทั้งหมดและสะดวกในการปฏิบัติงานของผู้ใช้งาน นอกจากนั้นยังจะใช้เป็นข้อกำหนดให้กับระบบเครื่องมือวัดและควบคุมที่มีอยู่บนเครื่องจักรต่างๆ (Packages Equipment) สามารถแบ่งได้ตามประเภทการวัดดังนี้

- อัตราการไหล (Flow)

ก๊าซหรือไอ (Gas or Vapour)	มีหน่วยเป็น	scfh, Sm3/h หรือ kg/h
ของเหลว (Liquid)	มีหน่วยเป็น	gpm, m3/h หรือ kg/h
ไอน้ำ (Steam)	มีหน่วยเป็น	lb/h หรือ kg/h
- การวัดระดับ (Level)	มีหน่วยเป็น	%, mm หรือ in
- ความดัน (Pressure)	มีหน่วยเป็น	psi, kpa, kg/cm2, bar, in H2O หรือ mBar
- อุณหภูมิ (Temperature)	มีหน่วยเป็น	Deg F หรือ Deg C

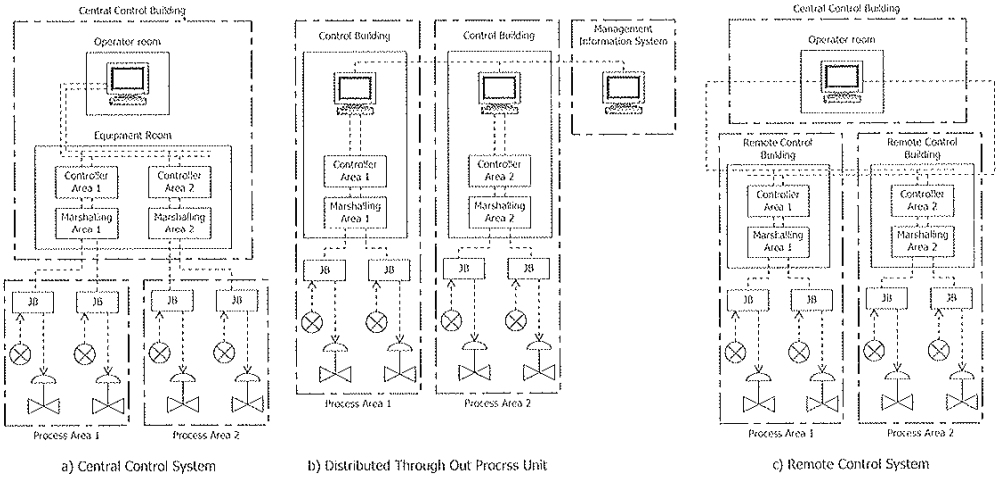
ตำแหน่งของระบบควบคุม (Control System location)

ความต้องการและข้อคิดเห็น โดยรวมในการจัดวางระบบควบคุม ที่ต้องการ สำหรับโครงการใหม่ๆ ซึ่งอาจจะแสดงตัวอย่างเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

- ควบคุมจากส่วนกลางทั้งหมด (Centralized Control Building) ในการควบคุมแบบนี้จะมีอาคารควบคุมเพียงอาคารเดียว โดยระบบควบคุมมีระบบเดียวควบคุมกระบวนการผลิตทั้งหมด ตัวควบคุมและตู้ต่อสายจะถูกติดตั้งอยู่ภายในอาคารนี้ทั้งหมด
- ควบคุมแยกเป็นส่วนๆตามหน่วยการผลิต (Distributed through out process unit) ในการควบคุมแบบนี้ จะแยกอาคารควบคุมออกไปตามหน่วยการผลิตและมีผู้ควบคุมอยู่ในแต่ละหน่วยของตัวเอง ซึ่งอาจจะมีการเชื่อมต่อข้อมูลกันบางส่วน สำหรับส่วนสนับสนุนที่ใช้ร่วมกัน
- ควบคุมจากระยะไกล (Remote Instrument Enclosure) การควบคุมแบบนี้จะแยกตัวควบคุมไว้

ใกล้กับหน่วยการผลิต ใช้การควบคุมจากระยะไกลจากอาคารควบคุมกลาง โดยหน่วยแสดงผลและผู้ควบคุมจะอยู่ที่อาคารควบคุมกลาง

ข้อกำหนดเหล่านี้จะเป็นส่วนสำคัญในการนำไปออกแบบระบบควบคุมและอาคารควบคุมต่างๆที่เหมาะสม ดังแสดงตัวอย่างระบบควบคุมได้ดังรูปที่ 24



รูปที่ 24 ระบบควบคุมแบบต่างๆ

แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply system)

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ, ระยะเวลาของระบบจ่ายไฟสำรองที่ต้องการ (UPS back up time), แหล่งจ่ายไฟพร้อมทำงานสำรองที่ต้องการ (Redundant feeder)

ข้อมูลทั่วไปของเครื่องมือวัด (General specification)

แสดงรายละเอียดความต้องการของเครื่องมือวัด โดยทั่วไปจะมีดังนี้
เรื่องใบเสนอราคาและระยะเวลาในการส่งของ, จัดเตรียมรายละเอียดของเครื่องมือวัดและระบบควบคุมที่ต้องการใช้ในการดำเนินเการ, จัดทำรายงานจากฐานข้อมูล

ส่วนออกแบบ (Design work)

จะเป็นส่วนที่เกี่ยวข้องกับการจัดทำแผนผังรายละเอียดเครื่องมือวัด (Drawing), รายละเอียดการติดตั้งจัดทำรายละเอียดอุปกรณ์ที่ไม่มีชื่อ (Non-Tag equipment) อาทิเช่น สายไฟ, Tubing Fitting, Gland, Junction Boxes, Air pipe or Air header

ส่วนรายละเอียดการติดตั้งเครื่องมือวัดและระบบควบคุม จะเป็นการจัดทำ รายละเอียดความต้องการทั่วไป (General Specification for instrumentation installation), รายละเอียดสายไฟและ Tubing (Cable and instrument pipe specification), รายละเอียดการเชื่อมต่อกับกระบวนการ (Process connection specification), ใส่ข้อมูลที่เกี่ยวข้องในฐานข้อมูลเครื่องมือวัด, คำนวณขนาดสายไฟ (Cable sizing), I.S. Calculation, จัดทำรายการจำนวนของอุปกรณ์ที่ไม่มีชื่อ (Bill of material) พร้อมใบสั่งซื้อ, ติดต่อประสานงานกับผู้จัดจำหน่ายและส่วนจัดซื้อในเรื่องใบเสนอราคาและระยะเวลาในการส่งของ, ตรวจสอบการติดตั้งเครื่องมือวัดในระบบท่อและในโมเดล

ส่วนแผนผังรายละเอียด จะเป็นการจัดทำ Loop Diagram, Process & Pneumatic Hook-Up, Instrument Lay-out, Control room Lay-out, Instrument Air Lay-out, Cable routing, Typical installation detail, Power distribution diagram, Grounding detail, Cable block diagram, JB termination, Cabinet termination ในส่วนนี่จะเป็นการเขียนแผนภาพบนคอมพิวเตอร์ หรือที่เรียก CAD

การติดตั้งเครื่องมือวัดในโครงการก่อสร้าง

เมื่อทำการออกแบบและจัดทำรายละเอียดเสร็จสิ้นแล้ว เครื่องมือวัดและระบบควบคุมต่างๆ จะถูกจัดส่งไปยังบริเวณโครงการก่อสร้าง เพื่อนำไปติดตั้งตามที่ได้ออกแบบไว้ ก่อนที่จะนำเครื่องมือวัดไปติดตั้งและใช้งานจะต้องมีขั้นตอนในการตรวจสอบและทดสอบให้ตรงกับที่ได้ทำการสั่งซื้อ โดยมีลำดับขั้นตอนทั่วไปดังนี้

การปรับเทียบเครื่องมือวัด (Instrumentation Calibration)

เครื่องมือวัดแต่ละตัวจะต้องถูกปรับเทียบ โดยการเทียบกับมาตรฐานการวัดต่างๆ และต้องใช้ลำดับขั้นตอนในการทำงานที่ผ่านการตรวจสอบแล้ว การดำเนินการปรับเทียบจะต้องดำเนินการโดยผู้มีประสบการณ์และช่างเทคนิคที่มีความชำนาญและต้องใช้ลำดับขั้นตอนการปรับเทียบที่ถูกแนะนำจากผู้ผลิต

ก่อนที่จะนำเครื่องมือวัดไปติดตั้งที่บริเวณใช้งาน เครื่องมือวัดและวาล์วควบคุม ต้องถูกเก็บอยู่ในอาคาร สำหรับเครื่องมือวัดที่เป็นอุปกรณ์อิเลคทรอนิกส์ต้องอยู่ในห้องที่มีการปรับอากาศ ซึ่งต้องเป็นไปตามข้อแนะนำจากผู้ผลิต

เครื่องมือวัดที่ถูกส่งไปยังบริเวณที่ทำการติดตั้ง จะต้องมีรายละเอียดเป็นไปที่ได้กำหนดไว้ในตอนสั่งซื้อ ถ้าพบว่ามีการเสียหายหรือเกิดการชำรุด จะต้องมีการซ่อมแซมหรือถูกส่งคืนไปยังผู้ผลิต

การปรับเทียบและการตรวจสอบเครื่องมือวัดจะต้องมีการดำเนินการกับเครื่องมือวัดที่อยู่ใน Package vender โดยผู้จำหน่ายจะต้องจัดเตรียมเอกสารรายละเอียดที่เพียงพอ เพื่อนำไปใช้ในการตรวจสอบ

การดำเนินการปรับเทียบเครื่องมือวัดจะต้องกระทำโดยใช้เครื่องมือที่มีความแม่นยำสูงกว่าของเครื่องมือวัด เครื่องมือสำหรับใช้ในการปรับเทียบบางชนิดจะถูกกำหนดโดยผู้ผลิต

การตรวจสอบเครื่องมือวัด

เครื่องมือวัดทุกตัวจะต้องมีรายละเอียดเป็นไปตามที่กำหนดไว้ทุกประการ ดังต่อไปนี้

- ชื่อ (Instrument tag number)
- รุ่น (Model number)
- ขนาดและจุดต่อ (Size and connection)
- วัสดุที่ใช้ (Material of construction)
- ช่วงการวัดและย่านการวัดใช้งาน (Instrument rang and Span)
- ตำแหน่งของวาล์วเมื่อเกิดการผิดพลาด (Valve failure action)
- ความยาวเทอร์โมเวลส์ (Thermowell lenght)

การปรับเทียบเครื่องมือวัดอัตราการไหล

การวัดอัตราการไหลที่ใช้เครื่องมือวัดความดันแตกต่อง ต้องการปรับเทียบโดยใช้เครื่องมือจำลองความดันป้อนให้กับจุดวัดความดันที่ตำแหน่ง

การตรวจสอบแผ่นออริฟิส ทำการตรวจสอบเทียบกับเอกสารจากผู้ผลิต โดยจะต้องมีขนาดที่เป็นไปตามเอกสาร ตรวจสอบความเรียบของผิวไม่มีความเสียหาย ขนาดรูต้องมีการตรวจสอบเยบกับรายละเอียดที่ได้จากการคำนวณ และบันทึกลงในรายงานการปรับเทียบ การวัดขนาดควรจะทำในห้องที่มีการปรับอากาศ

การปรับเทียบเครื่องมือวัดระดับ

การวัดระดับที่ใช้เครื่องมือวัดความดันแตกต่าง ต้องการปรับเทียบโดยใช้เครื่องมือจำลองความดันป้อนให้กับจุดวัดความดันที่ตำแหน่ง 0, 25%, 50%, 75% และ 100% ของย่านความดันที่ใช้งาน บันทึกค่าสัญญาณกระแสที่ได้ พร้อมกับทำการปรับเทียบ ถ้ามีค่าไม่ถูกต้อง

การปรับเทียบเครื่องมือวัดความดัน

เครื่องมือวัดความวัดความดัน ทำการปรับเทียบโดยใช้เครื่องมือจำลองความดันป้อนให้กับจุดวัดความดันที่ตำแหน่ง 0, 25%, 50%, 75% และ 100% ของย่านความดันที่ใช้งาน บันทึกค่าสัญญาณกระแสที่ได้ พร้อมกับทำการปรับเทียบ ถ้ามีค่าไม่ถูกต้อง

การปรับเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบ Filled system ต้องทำการปรับเทียบโดยใช้ Temperature bath โดยการปรับเทียบที่ย่านการใช้งานที่ตำแหน่ง 0, 25%, 50%, 75% และ 100%

สำหรับเครื่องมือวัดอุณหภูมิ (Temperature Transmitter) ที่มีเซนเซอร์เป็นแบบ Thermocouple ต้องใช้ Thermocouple calibration box ในการจำลองความต้านทาน ที่ตำแหน่ง 0, 25%, 50%, 75% และ 100% ของย่านการใช้งาน

การปรับเทียบวาล์วควบคุม

ก่อนดำเนินการปรับเทียบวาล์วควบคุม จะต้องมีการตรวจสอบรายละเอียดของตัววาล์วที่จะทำการปรับเทียบว่า มีรายละเอียดตรงกับที่ได้ทำการจัดซื้อไปหรือไม่ โดยวาล์วควบคุมต้องมีการตรวจสอบรายละเอียดให้ตรงกับที่กำหนดไว้ ดังนี้

- Valve body and trim material
- Body size and type
- Trim size and type
- Valve connection size and type
- Valve failure action
- อุปกรณ์เพิ่มเติมอื่นๆ

การปรับเทียบโดยการต่อความดันอากาศให้กับวาล์วควบคุม และป้อนสัญญาณอินพุตที่ตำแหน่ง 0, 25%, 50%, 75% และ 100% บันทึกการเคลื่อนที่ของก้านวาล์วและบันทึกลงรายงาน ปรับเทียบตามคู่มือการใช้งาน ถ้ามีค่าการเคลื่อนที่ของก้านวาล์วไม่ถูกต้อง

การตรวจสอบการติดตั้งเครื่องมือวัด (Installation Checkout)

เครื่องมือวัดทุกตัวๆที่ติดตั้งไปแล้วต้องการตรวจสอบด้วยวิธีการมองเห็น (Visual Check) ทั้งด้านความถูกต้องและความเสียหาย ถ้าพบว่ามี่วามเสียหายเกิดขึ้นหลังจากการติดตั้งจะต้องมีการดำเนินการแก้ไขให้อยู่ในสภาพปกติด้วยวิธีการที่ถูกต้อง การติดตั้งเป็นไปตามรายละเอียดที่ได้ออกแบบไว้ ชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ที่ถูกยึดติดไว้ชั่วคราวกับเครื่องมือวัดต้องทำการถอดออกและทำความสะอาดให้เรียบร้อย ตรวจสอบการต่อสายไฟให้ถูกต้อง การติดป้ายชื่อ (Tag Number) ทำอย่างถูกต้อง ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดถูกต้อง

เครื่องมือวัดอัตราการไหลและวาล์วควบคุม ต้องมีการติดตังให้ถูกต้องกับทิศทางการไหลที่แสดงอยู่บนตัวเครื่องมือวัด, ตำแหน่งที่ติดตั้ง ต้องสะดวกสำหรับการเข้าไปทำงานและซ่อมบำรุง ตรวจสอบการต่อาสยไฟและการครบวง

จร การต่อสายไฟแน่นไม่หลุดหลวม ท่อ Impulse line ที่ต่อมายังเครื่องมือวัดมีขนาดวัสดุ และชนิด ถูกต้อง มีการจับยึดที่แข็งแรงไม่สั่น

สำหรับเครื่องมือวัดที่ต้องมีการเติมของเหลวลงไปใน ท่อ Impulse line ต้องมีการเติมของเหลวให้ถูกต้อง

ตรวจสอบความดันอากาศ (Instrument Air) และแรงดันไฟฟ้ามีการต่อ (Connection) ที่ถูกต้อง

การติดตั้งเครื่องมือวัดท่อยู่กับระบบท่อจะต้องติดตั้งหลังจากที่มีการทำความสะอาดท่อเรียบร้อยแล้ว เครื่องมือวัดจะต้องถูกแยกออกจากกระบวนการผลิตและเปิดระบายออกสู่บรรยากาศ เพื่อป้องกันความดันเกิน และการกระทบกระเทือนจากการทดสอบความดันระบบท่อและการล้างท่อ

วาล์วควบคุมต้องมีการป้องกันสิ่งสกปรกแปลกปลอมเข้าไปยังตัววาล์วในระหว่างการทำความสะอาดท่อ อีกทางเลือกหนึ่งในการป้องกันวาล์วควบคุม ในระหว่างการทำงความสะอาดท่อ โดยการใช้ส่วนของท่อมาใช้ติดตั้งแทนวาล์วควบคุม (Spool Piece) เป็นการใช้ชั่วคราวในระหว่างการทำความสะอาดท่อ

การตรวจสอบเครื่องมืออัตราการไหล

เครื่องมือวัดอัตราการไหลด้วยแผ่นออรอฟิส ต้องมีการตรวจสอบการติดตั้งเครื่องมือวัดความดันแตกต่างเป็นดังนี้

- ควรติดตั้งแผ่นออริฟิสหลังจากการทำความสะอาดท่อ
- การติดตั้งแผ่นออริฟิส มีระยะท่อที่เป็นทางตรงที่ถูกต้อง ทั้งทางด้านหน้าและด้านหลัง
- ความเอียงของท่อ Impulse line ต้องเหมาะสม เป็น ไปตามรายละเอียดที่กำหนดไว้
- ติดตั้ง Manifold ถูกต้อง ทั้ง ชนิด, ขนาด และวัสดุที่ใช้

เครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบโรตาร์มิเตอร์ ต้องให้ลูกลอยสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างสะดวก

การตรวจสอบเครื่องมือวัดระดับ

สำหรับเครื่องมือวัดระดับชนิดต่างๆสามารถตรวจสอบการติดตั้งได้ดังนี้

- เครื่องมือวัดระดับด้วยเครื่องมือวัดความดันแตกต่าง ต้องมีการจัดเติมของเหลวที่ถูกต้อง ในแต่ละท่อ Impulse
- เครื่องมือวัดระดับด้วยเครื่อวัดความดันแตกต่าง การติดตั้งจุดต่อด้านความดันสูง (High pressure side) และความดันต่ำ (Low pressure side) ต้องมีความถูกต้อง ตามรายละเอียดที่กำหนด
- เครื่องมือวัดระดับแบบ External Displacer ต้องตรวจสอบค่าความถ่วงจำเพาะ (S.G.) ที่ค่าอุณหภูมิที่กำหนด ในตัว Displacer และอุณหภูมิจากกระบวนการผลิตมีความแตกต่างกันหรือไม่
- ตรวจสอบว่าตัว Displacer มีการเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ
- เครื่องวัดระดับแบบ Internal Displacer ต้องตรวจสอบว่าตัว Displacer มีขนาดไม่ใหญ่เกินไป มีการจัดว่างตำแหน่งที่เหมาะสม ไม่มีการแกว่งตัว เนื่องจากผิวหน้าของเหลว

- เครื่องมือวัดระดับแบบ Float type ต้องตรวจสอบว่า ลูกลอยมีความเหมาะสมกับของไหล, ลูกลอยเคลื่อนที่ได้ตลอดย่านการใช้งาน มีการตั้งค่า Zero และ Span อย่างถูกต้อง
- เกจวัดระดับ ต้องมีตำแหน่งในการติดตั้งที่สามารถมองเห็นได้ในการปฏิบัติงาน, ตรวจสอบว่ามีการติดตั้ง Drain valve อย่างถูกต้อง

การตรวจสอบเครื่องมือความดัน

มีการติดตั้งความเอียงของท่อ Impulse line ไปยังเครื่องมือวัดความดันได้อย่างถูกต้อง มีการติดตั้งวาล์วต่อย่างถูกต้องและอุปกรณ์เพิ่มเติมอื่นๆ ติดตั้งครบถ้วน เช่น Diaphragm, Snubber เป็นต้น

การตรวจสอบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

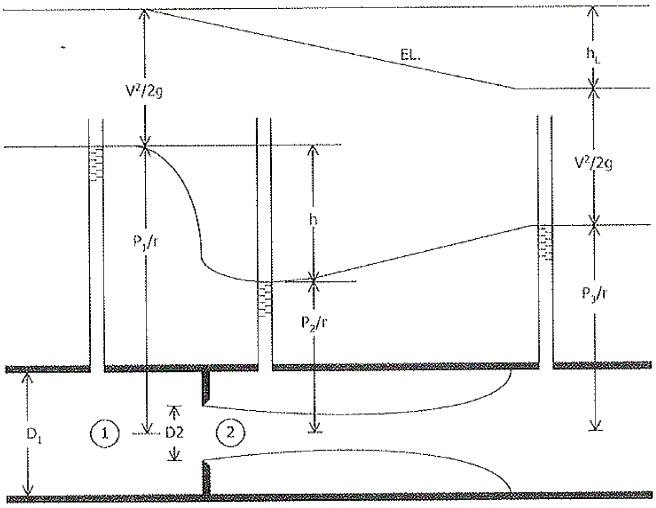
ตรวจสอบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิมีการสัมผัสกับของไหลที่ทำการวัด, ตรวจสอบความยาวของเทอร์โมเวลส์ถูกต้องตามรายละเอียด, ชนิดของเซนเซอร์ถูกต้อง Thermocouple หรือ RTD

การตรวจสอบวาล์ควบคุม

ตรวจสอบวาล์วควบคุมว่าตัววาล์วมีการติดตั้งทิศทางการไหลถูกต้อง สามารถเข้าไปปฏิบัติงานและซ่อมบำรุงได้อย่างสะดวก การต่อความดันอากาศและการต่อสายไฟฟ้ามีความถูกต้อง อุปกรณ์เพิ่มเติมตามรายละเอียดมีการติดตั้งครบถ้วนและถูกต้อง

การวัดอัตราการไหลด้วยแผ่นออริฟิส

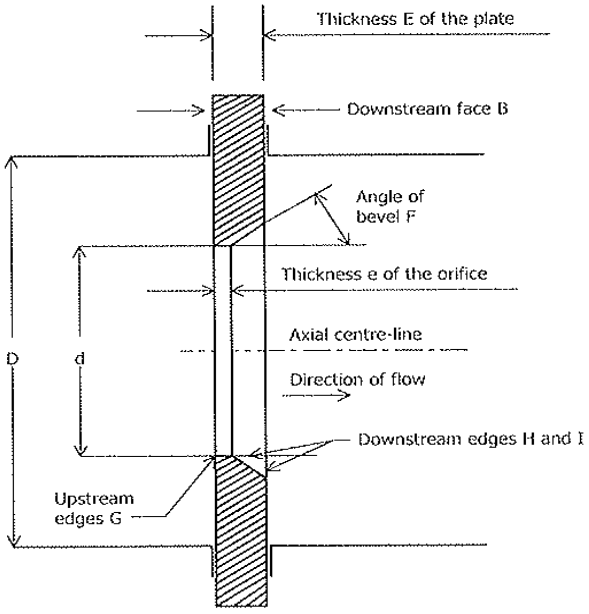
จากการค้นพบที่ว่า เมื่อมีการไหลผ่านส่วนของท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดที่ลดลง ทำให้ความดันของไหลในท่อหลังจากผ่านส่วนที่มีพื้นที่หน้าตัดที่ เล็กกว่านั้นจะมีค่าลดลง และค่าความแตกต่างของความดันที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นสัดส่วนแบบรากที่สอง (square root) กับอัตราการไหล ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 25



รูปที่ 25 การไหลผ่านแผ่นออริฟิส

1 แผ่นออริฟิส (Orifice Plate)

แผ่นออริฟิสมีลักษณะเป็นแผ่นโลหะที่มีรูไว้สำหรับให้ของไหลผ่าน ในการติดตั้งจะถูกติดตั้งอยู่ระหว่างหน้าแปลน (Orifice flange) ของท่อในลักษณะตั้งฉากกับกระแสการไหล เนื่องจากมีการจัดทำได้ง่ายและมีราคาถูก จึงทำให้มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย นอกจากนั้นแล้วยังมีความเชื่อถือในการวัดอัตราการไหลเป็นอย่างดี แผ่นออริฟิสสามารถทำขึ้นจากวัสดุได้หลายชนิด รวมทั้งวัสดุที่ทนทานต่อการกัดกร่อนจากของไหลที่นำไปใช้งาน เช่น 316 Stainless steelrss, Monel หรือ Inconel Orifice Plate ลักษณะพื้นฐานของแผ่นออริฟิสตามมาตรฐาน ISO 5167 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 26



รูปที่ 26 แผ่นออริฟิสมาตรฐาน

เมื่อ ϕD = เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อ

ϕd = เส้นผ่าศูนย์กลางของรูที่แผ่นออริฟิส

ตามมาตรฐาน ISO 5167 ค่าความหน่า e ของแผ่นออริฟิสจะอยู่ระหว่าง 0.005D ถึง 0.02D และค่าความหนา E จะอยู่ระหว่างขนาดความหนา e ถึง 0.05D โดยทั่วไปแล้ว ขนาดรูที่แผ่นออริฟิส จะแสดงในรูปอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางรูกับเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อหรือ ค่า $\beta = d / D$ ซึ่งปกติจะมากกว่าหรือเท่ากับ 0.20 และน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.75 ข้อดีและข้อเสียของการวัดอัตราการไหลด้วยแผ่นออริฟิสเป็นดังนี้

- ข้อดี

สะดวกในการติดตั้ง, ราคาถูก, มีแบบและวัสดุหลายชนิดให้เลือกใช้

- ข้อเสีย

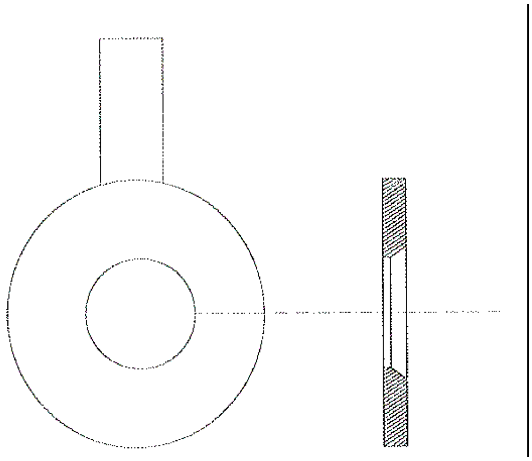
แผ่นออริฟิสจะมีความไวต่อความเสียหายเมื่อเลือกใช้วัสดุไม่เหมาะสมเนื่องจากแผ่นออริฟิสเป็นแผ่นโลหะที่ต้องสัมผัสกับกระแสการไหลอยู่ตลอดเวลา ซึ่งจะทำให้อาจโค้งงอหรือสึกหรอได้ง่าย และต้องการระยะท่อที่เป็นทางตรง (straight run) มากกว่าแบบอื่น

แผ่นออริฟิสมีหลายแบบให้เลือกใช้ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน ดังนี้ Concentric, Eccentric, Segmental และ Quadrant Orifice Plate

Concentric Orifice Plate หรือ Square edge

เป็นชนิดพื้นฐานของแผ่นออริฟิสและสามารถนำไปใช้กับของไหลได้เกือบทุกประเภท ยกเว้นของไหลที่มีสารแขวนลอย, มีส่วนผสมของสิ่งสกปรกหรือของแข็ง และของไหลที่มีความหนืดสูง

จุดต่อสำหรับวัดค่าความดันความแตกต่างจากแผ่นออริฟิส สามารถใช้ได้หลายแบบดังนี้ แบบต่อที่หน้าแปลน (Flange Taps), แบบต่อที่จุด Vena Contrcta (Vena Contrcta Taps) และแบบต่อที่จุด Corner (Corner Taps) ลักษณะของแผ่นออริฟิสชนิดนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 27

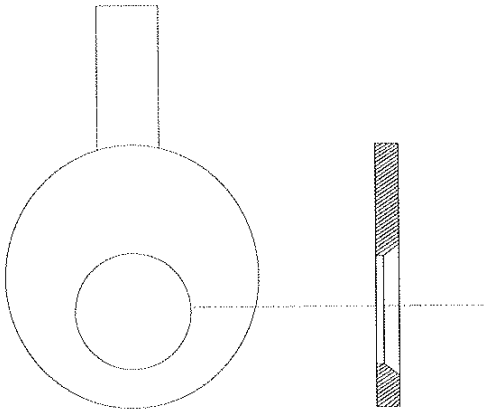


รูปที่ 27 Concentric Orifice plate

Eccentric Orifice Plate

แผ่นออริฟิสแบบนี้จะมีรูเยื้องลงมาทางด้านบล่างของแผ่นออริฟิสที่ติดตั้งอยู่ภายในท่อ เพื่อลดการตกค้างของสารแขวนลอยหรือการตกตะกอนที่บริเวณด้านหน้าของแผ่นออริฟิส ซึ่งจะเหมาะสมกับของไหลที่มีสารแขวนลอย, มีส่วนผสมของสิ่งสกปรกหรือของแข็ง

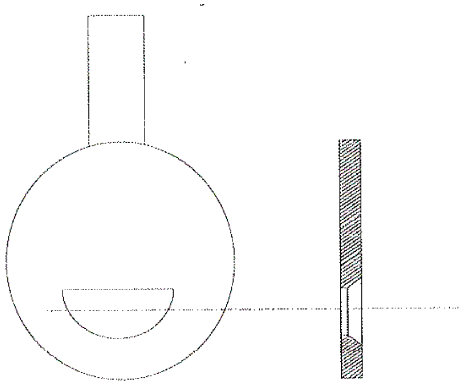
จุดต่อสำหรับวัดค่าความแตกต่างของความดันสามารถใช้ได้ทั้งแบบ แบบต่อที่หน้าแปลน (Flange Taps) และแบบที่ต่อจุด Vena Contrcta (Vena Contrcta Taps) ลักษณะของแผ่นออริฟิสชนิดนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 28



รูปที่ 28 Eccentric Orifice plant

Segmental Orifice place

แบบนี้จะมีลักษณะและการใช้งานคล้ายกันแบบ Eccentric Orifice Plate แต่จะมีช่องเป็นครึ่งวงกลมลักษณะของออริฟิสชนิดนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 29

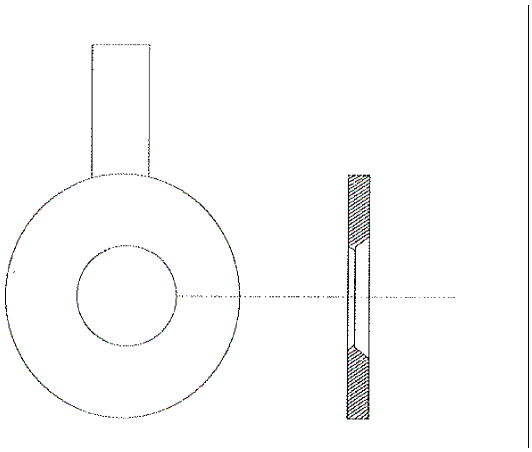


รูปที่ 29 Segmental Orifice Plate

Quadrant Orifice Plate

แผ่นออริฟิสแบบนี้รูทางด้านเข้าจะเอียงประมาณ 1/4 ของวงกลม และเหมาะสมที่จะนำไปใช้กับของไหลที่มีความหนืดสูงๆ หรือมีค่า Reynolds ต่ำ

จุดต่อสำหรับวัดค่าความแตกต่างของความดันสามารถใช้ได้หลายแบบดังนี้ แบบต่อที่หน้าแปลน (Flange Tape), แบบต่อที่จุด Vena Contrcta (Vena Contrcta Taps) และแบบต่อที่จุด Corner (Corner Taps) ลักษณะของแผ่นออริฟิสชนิดนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 30



รูปที่ 30 Quadrant Orifice Plate

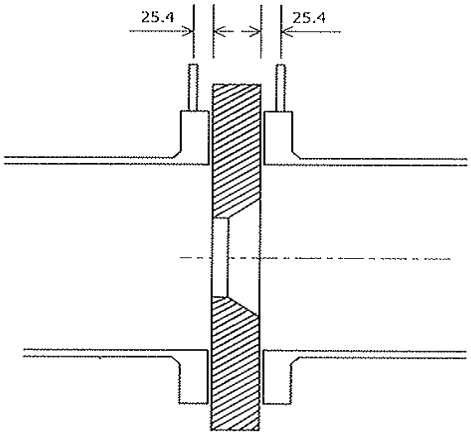
จุดต่อสำหรับวัดค่าความดันแตกต่าง (Pressure Tappings)

ในการใช้งานแผ่นออริฟิสสำหรับวัดอัตราการไหลจะต้องมีจุดต่อสำหรับใช้วัดค่าความดันความแตกต่าง ทางด้านหน้า (Upstream) และ ด้านหลัง (Downstream) อย่างน้อยด้านละหนึ่งจุด เพื่อใช้สำหรับต่อไปยังเครื่องมือวัดความดันแตกต่าง (Differential Pressure Transmitters) ที่ใช้วัดค่าความดันแตกต่างที่เกิดจากแผ่นออริฟิส สามารถแบ่งลักษณะจุดต่อได้ 3 แบบ ดังนี้

จุดต่อที่หน้าแปลน (Flange Taps)

จุดต่อแบบนี้จะอยู่ที่หน้าแปลน ซึ่งวัดจากด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นออริฟิส ออกไปด้านละ 25.4 มิลลิเมตร โดยระยะอาจเปลี่ยนแปลงได้เล็กน้อยขึ้นอยู่กับค่า β ของแผ่นออริฟิสที่เลือกใช้ โดยมีข้อกำหนดดังนี้

- $\beta > 0.6$ และ $D > 150$ มิลลิเมตร ; ระยะเท่ากับ 25.4 ± 0.5 มิลลิเมตร
- $\beta < 0.6$ หรือ $\beta > 0.6$ และ $150 < D < 1000$ มิลลิเมตร ; ระยะเท่ากับ 25.4 ± 1.0 มิลลิเมตร



รูปที่ 31 Flange Taps

ข้อจำกัดในการใช้จุดต่อแบบนี้เป็นดังนี้

เมื่อ $d \geq$ 12.5 มิลลิเมตร

50 มิลลิเมตร $\leq D \leq$ 1000 มิลลิเมตร

$0.2 \leq \beta \leq 0.75$

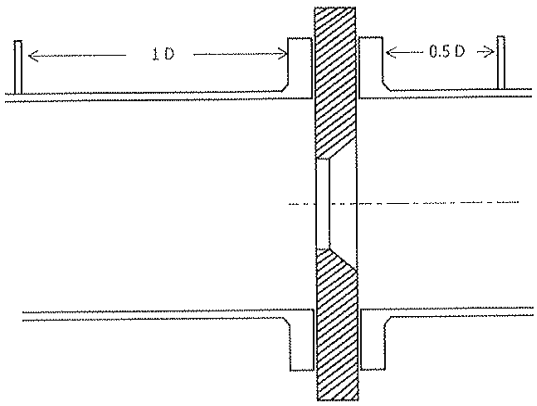
$\mathrm{Re}_D \geq 5000$; สำหรับ $0.2 \leq \beta \leq 0.45$

$\mathrm{Re}_D \geq 10000$; สำหรับ $\beta > 0.45$

จุดต่อที่ระยะ D และ 0.5D (Vena Contracta Taps)

จุดต่อแบบนี้จะอยู่ที่ท่อแทนที่จะอยู่ที่หน้าแปลนเมือนกันแบบแรก ซึ่งวัดจากด้านหน้าของแผ่นออริฟิสออกไปที่ระยะ 1D และด้านหลังของแผ่นออริฟิสออกไปที่ระยะ 0.5D โดยระยะอาจเปลี่ยนแปลงได้เล็กน้อยขึ้นอยู่กับค่า β ของแผ่นออริฟิสที่เลือกใช้ โดยมีข้อกำหนดดังนี้

- $\beta < 0.6$, ระยะด้านหน้าเท่ากับ $D \pm 0.1D$ ระยะด้านหลังเท่ากับ $0.5D \pm 0.02D$
- $\beta > 0.6$, ระยะด้านหน้าเท่ากับ $D \pm 0.1D$ ระยะด้านหลังเท่ากับ $0.5D \pm 0.01D$

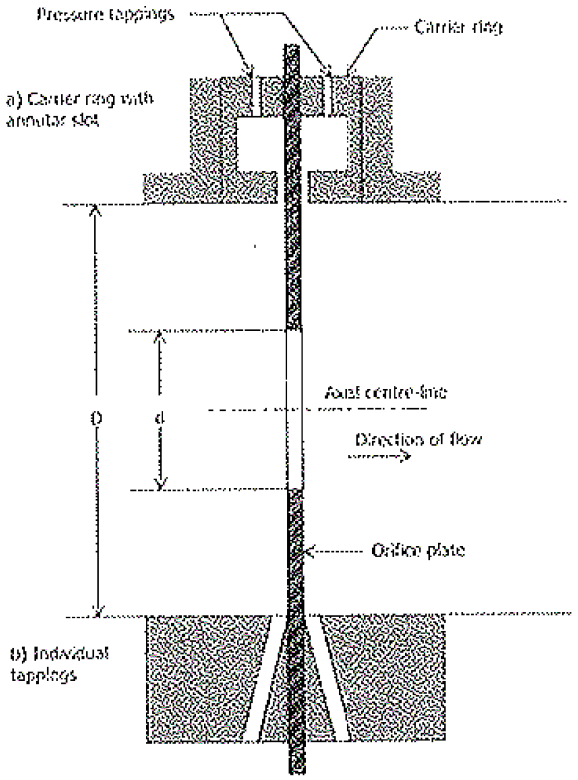


รูปที่ 32 Vena contracta Taps

ข้อจำกัดในการใช้จุดต่อแบบนี้จะเหมือนกับแบบจุดต่อที่หน้าแปลน

จุดต่อที่ Corner (Corner Taps)

จุดต่อแบบนี้อยู่ที่หน้าแปลน ซึ่งจะติดกับแผ่นออริฟิส ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง



รูปที่ 33 Corner taps

ข้อจำกัดในการใช้จุดต่อแบบนี้เป็นดังนี้

เมื่อ $d \geq$ 12.5 มิลลิเมตร

50 มิลลิเมตร $\leq D \leq$ 1000 มิลลิเมตร

$0.2 \leq \beta \leq 0.75$

$\mathrm{Re}_D \geq 1260\beta^2 D$

ค่า Reynolds Number (Re_D)

ค่าที่ใช้บอกลักษณะการไหลในท่อเป็นแบบใด สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.4)

$$\mathrm{Re}_D = 3160\frac{Q.SG}{\mu.D}$$

เมื่อ D = เส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อ (นิ้ว)

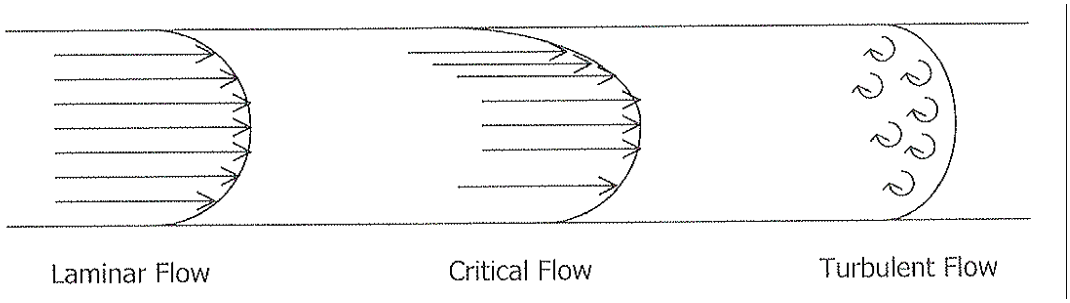
μ = ความหนืดของของไหล (C_p)

SG = ความหนาแน่นของของไหล

Q = อัตราการไหล (แกลลอน ต่อ นาที)

ค่าที่ได้จากสมการจะเป็นค่าที่บอกลักษณะการไหลดังนี้

- $\mathrm{Re}_D < 2000$, การไหลในท่อเป็นระเบียบ (Laminar Flow)
- $2000 < \mathrm{Re}_D < 4000$, การไหลในท่อเป็นช่วงการเปลี่ยนแปลงจากแบบเป็นระเบียบ ไปเป็นแบบไม่เป็นระเบียบ (Critical Flow)
- $\mathrm{Re}_D > 4000$,การไหลในท่อเป็นแบบไม่เป็นระเบียบ (Turbulent Flow)

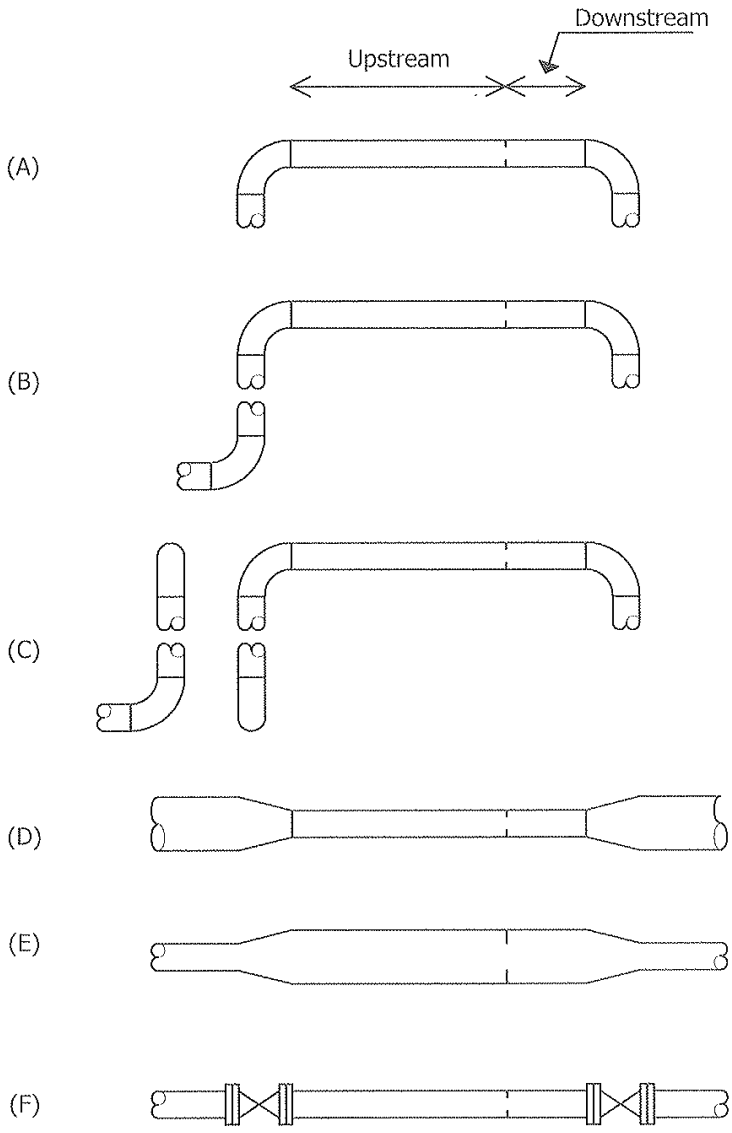


รูปที่ 34 ลักษณะการไหลในท่อ

การติดตั้งแผ่นออริฟิส

ในการติดตั้งแผ่นออริฟิสจะต้องติดตั้งอยู่กับท่อในส่วนที่รูปแบบการไหล (Flow profile) ของไหลไม่เปลี่ยนแปลงมากๆ ถ้ารูปแบบการไหลมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาจะทำให้มีผลต่อความแม่นยำของค่าอัตราการไหลที่วัดได้จากแผ่นออริฟิส ในโครงการก่อสร้างการติดตั้งท่อจะมีรูปแบบต่างๆหลายรูปแบบ ซึ่งจะส่งผลต่อการวัดด้วยเช่นกัน ดังนั้นการวัดค่าอัตราการไหลในกระบวนการผลิตที่ต้องการความถูกต้อง จะต้องมีการจัดเตรียมท่อด้านหน้า

(Upstream) และด้านหลัง (Downstream) ของแผ่นออริฟิสที่เป็นเส้นตรง ให้มีระยะความยาวตามมาตรฐานสากลที่ใช้อ้างอิง ตัวอย่างของรูปแบบท่อในลักษณะต่างๆดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.11 และความต้องการท่อที่เป็นเส้นตรงดังตารางที่ 4



รูปที่ 35 รูปแบบท่อในลักษณะต่างๆ

*** Values expressed as multiples of D (Pipe diameter)**

Beta ratio	Upstream (Inlet) side of the primary devices							Downstream (Outlet) side of the primary devices
	Single bend or tree (A)	Two bends in the same plans (B)	Two bends in the differerent plans (C)	Reducer (D)	Expander (E)	Globe valve fully open (F)	Ball or Gate valve fully open (F)	
0.20	10	14	34	5	16	18	12	4
0.25	10	14	34	5	16	18	12	4
0.30	10	16	34	5	16	18	12	5
0.35	12	16	36	5	16	18	12	5
0.40	14	18	36	5	16	20	12	6
0.45	14	18	38	5	17	20	12	6
0.50	14	20	40	6	18	22	12	6
0.55	16	22	44	8	20	24	14	6
0.60	18	26	48	9	22	26	14	7
0.65	22	32	54	11	25	28	16	7
0.70	28	36	62	14	30	32	20	7
0.75	36	42	70	22	38	36	24	7
0.80	46	50	80	30	54	44	30	7

ตารางที่ 4 ความต้องการท่อที่เป็นเส้นตรง

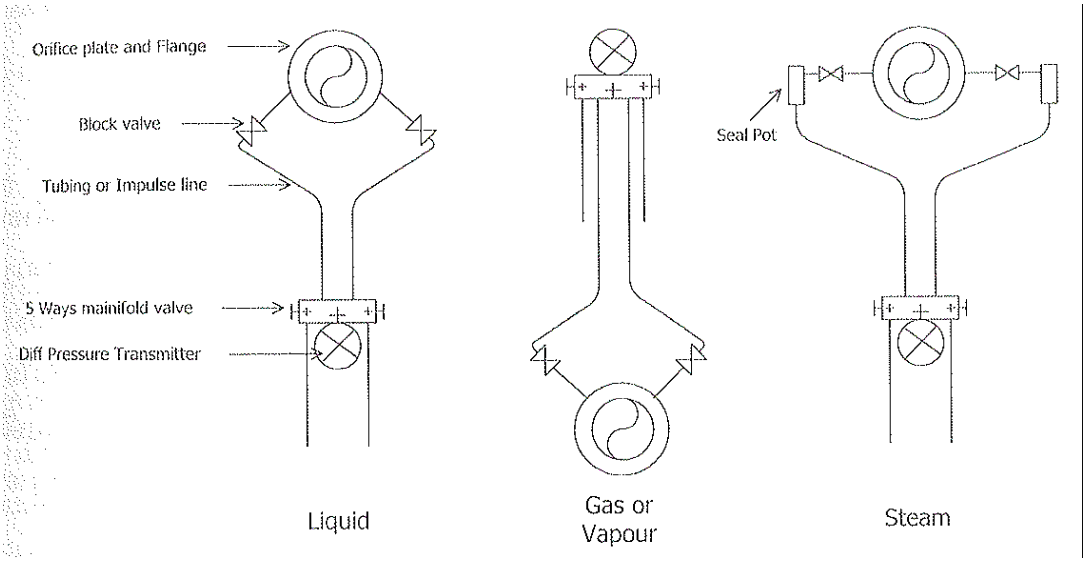
การวัดอัตราการไหลด้วยแผ่นออริฟิสจะต้องมีการติดตั้งร่วมกับเครื่องมือวัดความดันแตกต่างด้วยเสมอ เพื่อใช้ในการเปลี่ยนสัญญาณความดันแตกต่างจากหน้าแปลนของแผ่นออริฟิสไปเป็นสัญญาณมาตรฐานทางไฟฟ้า 4-20 มิลลิแอมป์หรือสัญญาณลมมาตรฐาน 3-15 Psi ซึ่งปัจจุบันสัญญาณลมมีการใช้งานกันน้อยมากสัญญาณมาตรฐานที่ได้จะถูกส่งต่อไปยังระบบควบคุมหรือระบบแสดงผลต่อไป ในทำนองเดียวกันกับการติดตั้งแผ่นออริฟิส การติดตั้งเครื่องมือวัดความดันแตกต่างจะต้องทำการติดตั้งให้ถูกต้องเพื่อให้ค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดความดันแตกต่างมีความผิดพลาดต่ำ ตัวแปรหลักๆสำหรับใช้พิจารณาการติดตั้งจะเป็นดังนี้

- ตำแหน่งของเครื่องมือวัดความดันแตกต่างจะขึ้นอยู่กับสถานะของไหลที่ต้องการวัด ถ้าของไหลมีสถานะเป็นก๊าซหรือไอ จะต้องติดตั้งเครื่องมือวัดให้อยู่เหนือจุดที่ทำการวัด ถ้าของไหลมีสถานะเป็นของเหลวจะต้องติดตั้งเครื่องมือวัดให้อยู่ต่ำกว่าจุดที่ทำการวัด เหตุผลหลักๆคือ ในกรณีของไหลที่เป็นก๊าซนั้นไม่ต้องการให้ของไหลมีการกลั่นตัวเป็นของเหลวคงค้างอยู่ในท่อจากจุดวัดไปยังเครื่องมือวัด ในทำนองเดียวกันกับของไหลที่เป็นของเหลวที่ไม่ต้องการให้มีฟองอากาศอยู่ในท่อ เนื่องจากย่านการวัดของเครื่องมือวัดความดันแตกต่างจะมีค่าต่ำมาก เป็น

มิลลิบาร์ ถ้าเป็นของเหลวหรือก๊าซปนอยู่ในท่อจากจุดวัดไปยังเครื่องมือวัดที่ไม่เท่ากัน ทำให้ความดันแตกต่างที่วัดได้มีค่าไม่ตรงกับค่าคามดันแตกต่างที่ได้จากแผ่นออริฟิส ซึ่งจะทำให้ค่าอัตราการไหลที่อ่านได้บนหน่วยแสดงผลมีค่าไม่ถูกต้อง

- ความยาวของท่อทั้งสองด้านควรมีระยะให้สั้นที่สุด
- ความเอียงของท่อต้องเหมาะสม
- สถานะของไหลในท่อจนถึงตัวเครื่องมือวัดจะต้องมีสถานะเดียวกัน ในบางครั้งอาจมีข้อจำกัดของ
-

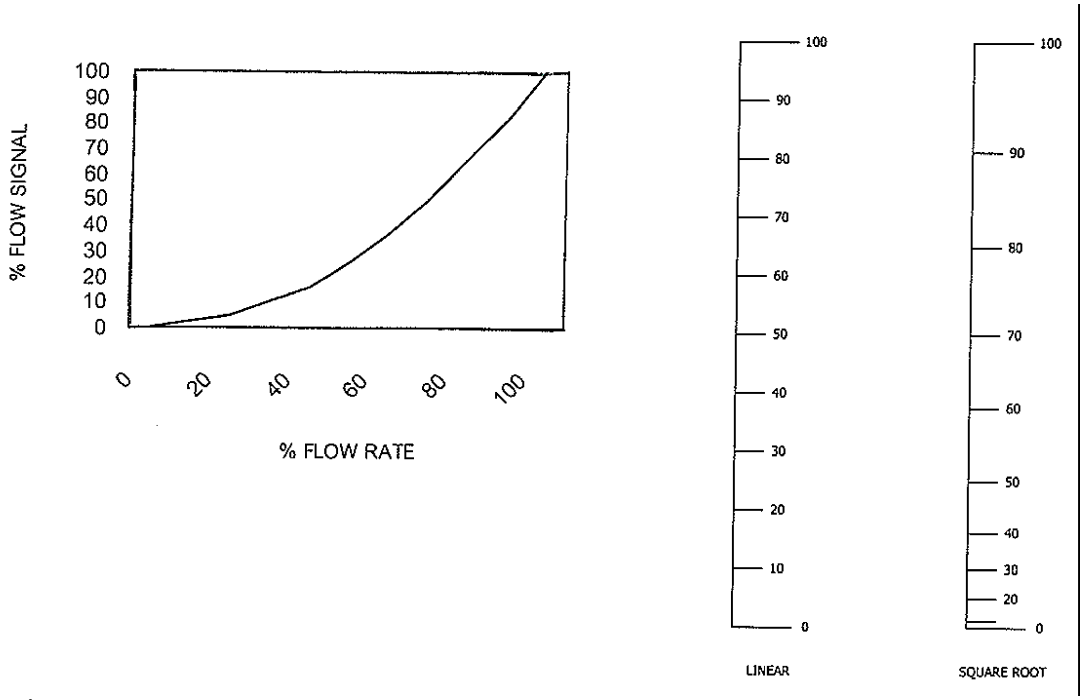
เครื่องมือวัดในเรื่องความดันหรืออุณหภูมิ ต้องจัดเตรียมอุปกรณ์เสริมเพิ่มเติม เช่น การติดตั้ง Seal Pot สำหรับใช้วัดไอน้ำอุณหภูมิสูงๆ หรือใช้การผนึกด้วยเคมี (Chemical Seal) สำหรับของไหลที่มีความหนืดสูงหรืออาจพันรอบท่อด้วยท่อความร้อน (Steam Tracing) เป็นต้น การติดตั้งเครื่องมือวัดความดันแตกต่างในรูปแบบต่างๆสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 36



รูปที่ 36 การติดตั้งเครื่องมือวัดความดันแตกต่างในรูปแบบต่างๆ

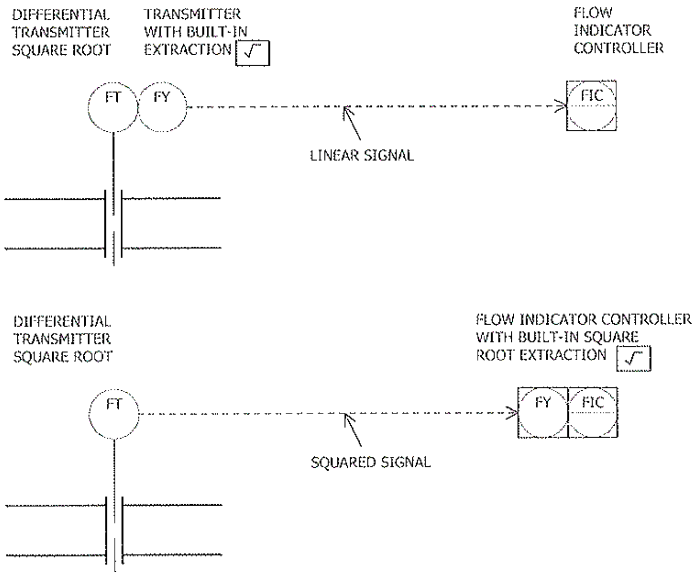
ความเป็นเชิงเส้น

จากสมการจะเห็นได้ว่าค่าอัตราการไหลที่ได้จากแผ่นออริฟิสจะเป็นสัดส่วนกับรากที่สอง (Square root) ของความดันแตกต่างจากแผ่นออริฟิส ดังแสดงได้ดังรูปที่ 37



รูปที่ 37 Squared Flow Signal และ สเกลแบบต่างๆ

จากรูปที่ 37 จะเห็นได้ว่าที่ค่าอัตราการไหลต่ำๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงของความดันแตกต่างเพียงเล็กน้อย แต่ที่อัตราการไหลสูงๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงของความดันมากตามไปด้วย ดังตัวอย่างเช่น ที่อัตราการไหล 0-10% ความดันแตกต่างจะเปลี่ยนแปลงจาก 0-1% ถ้าอัตราการไหล 90-100% ความดันแตกต่างจะเปลี่ยนแปลงจาก 81-100% การเปลี่ยนสัญญาณให้เป็นเชิงเส้นสามารถทำได้ โดยการเพิ่มฟังก์ชั่นในการเปลี่ยนสัญญาณบนเครื่องมือวัดหรือบนระบบควบคุม สำหรับการใช้งานทั่วไปจะใส่ฟังก์ชั่นในการเปลี่ยนสัญญาณบนระบบควบคุม เพื่อความสะดวกในการปรับตั้งค่าตัวแปรต่างๆ ฟังก์ชั่นการเปลี่ยนสัญญาณสามารถดังแสดงได้ในรูปที่ 38



รูปที่ 38 การเปลี่ยนแปลงสัญญาณรากที่สองไปเป็นเชิงเส้น

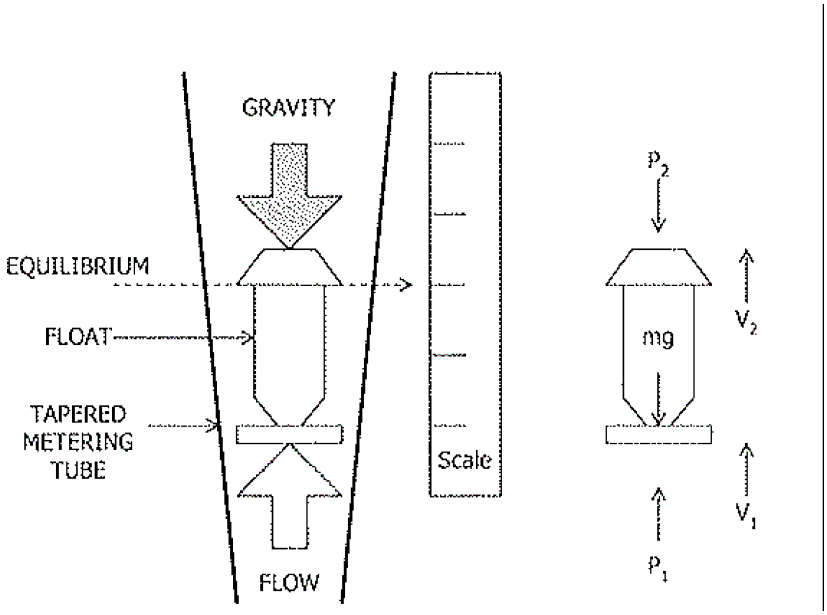
การใช้งานโรตามิเตอร์ (Rota meters Approve)

โรตามิเตอร์เป็นเครื่องมือวัดอัตราการไหลที่ใช้หลักการทำงานด้วยการเปลี่ยนแปลงพื้นที่จะเป็นฟังก์ชั่นของอัตราการไหลที่ผ่านตัวโรตามิเตอร์หรือที่เรียกกันว่า Variable Area Flow meter เครื่องมือวัดอัตราการไหลชนิดนี้มีการใช้งานกันมาเป็นเวลายาวนานและในปัจจุบันก็ยังคงมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีข้อดีอยู่หลายประการและเป็นเครื่องมือวัดอัตราการไหลด้วยวิธีการแบบง่ายๆ นอกจากนั้นยังสามารถนำไปใช้งานกับของไหลได้หลายสถานะทั้งที่เป็นก๊าซ และของเหลวที่มีความหนืด (Viscosity) ไม่สูงมากและที่สำคัญยังมีค่าใช้จ่ายไม่แพงเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดอัตราไหลชนิดอื่นๆ ในปัจจุบันได้มีการออกแบบและนำเสนอเครื่องมือวัดอัตราการไหลด้วยเทคโนโลยีใหม่ๆ หรือมีส่วนประกอบไปด้วยอุปกรณ์อิเลคทรอนิกส์หรือส่วนประมวลผล (Microprocessor) หรือที่เรียกว่าเครื่องมือวัดแบบชาญฉลาด (Smart Transmitter) เข้ามาเสนอกขายในท้องตลาดและยังมีการยืนยันถึงสมรรถนะในการทำงานหรือแม้กระทั้งความคุ้มค่าทางด้านราคาในการนำไปใช้งาน จะเห็นได้ว่าโรตามิเตอร์กำลังจะถูกแทนที่ด้วยเครื่องมือวัดอัตราการไหลกับเทคโนโลยีใหม่ๆ ดังกล่าวข้างต้น ถึงกระนั้นก็ตามยังมีผู้จำหน่ายโรตามิเตอร์จำนวนมากในท้องตลาดเนื่องจากโรตามิเตอร์เป็นเครื่องมือวัดอัตราการไหลที่มีข้อดีและยังมีความเหมาะสมกับการใช้งานอยู่หลายประเภทในอุตสาหกรรมการะบวนการผลิตต่างๆหรือแม้แต่ในห้องทดลอง ในหัวข้อนี้จะเป็นการแสดงรายละเอียดหลักการทำงานพื้นฐานของโรตามิเตอร์, การใช้งานประเภทต่างๆ ข้อดีหลายประการและข้อมูลต่างๆที่ต้องการในการกำหนดรายละเอียด

การทำงานของโรตามิเตอร์

โรตามิเตอร์หรือเครื่องมือวัดอัตราการไหลโดยใช้การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ ซึ่งจะประกอบไปด้วยชิ้นส่วนที่สำคัญดังนี้ คือท่อเรียว (Tapered Tube) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางด้านล่างขนาดเล็กกว่าด้านบนและลักษณะการติดตั้งจะต้องอยู่ในแนวตั้งเท่านั้น ภายในท่อเรียวจะมีลูกลอย (Float) ที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ โดยบริเวณท่อด้านล่างจะมีจุดรองรับลูกลอยเพื่อลูกลอยหยุดอยู่ที่ด้านล่างของท่อในตำแหน่งที่ต้องการ การทำงานพื้นฐานจะใช้จุดสมดุลย์ของลูกลอยที่รู้ค่าความหนาแน่นที่แน่นอน เมื่อมีอัตราการไหลผ่านโรตามิเตอร์จะทำให้มีแรงกระทำด้านล่างของลูกลอยทำให้ลูกลอยทำให้ลูกลอยเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบน เมื่ออัตราการไหลคงที่ค่าหนึ่งจะทำให้แรงกระทำกับลูกลอยด้านล่างจากการไหลจะเท่ากับแรงกระทำกับลูกลอยด้านบนเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ลูกลอยจะหยุดอยู่ที่ตำแหน่งหนึ่งเป็นตำแหน่งสมดุลย์ของแรงทั้งสอง และจะใช้ตำแหน่งที่สมดุลย์ของลูกลอยนี้แสดงอัตราการไหลที่ไหลตัวโรตามิเตอร์ การเคลื่อนที่ของลูกลอยจะทำให้พื้นที่รอบๆลูกลอยกับผนังท่อภายในจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งของลูกลอยซึ่งจะเป็นสัดส่วนกับอัตราการไหล

อัตราการไหลนี้สามารถอ่านค่าได้โดยตรงจากสเกลที่ได้รับการปรับเทียบแล้วที่บริเวณท่อภายนอก ดังแสดงได้ดังรูปที่ 39



รูปที่ 39 การทำงานของโรตามิเตอร์

จากรูปที่ 39 อัตราการไหลที่ผ่านตัวโรตามิเตอร์สามารถแสดงโดยใช้สมการ Bernoulli ได้ดังนี้

$$\frac{(P_1 - P_2)}{\rho g} = \frac{(V_2^2 - V_1^2)}{2g} \tag{1}$$

เมื่ออัตราการไหลที่จุดต่างๆมีค่าเท่ากันดังนั้น

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2 \tag{2}$$

หรือ $v_1 = \frac{A_2 v_2}{A_1}$ (3)

แทนค่าสมการที่ (3) ลงในสมการที่ (1) จะได้

$$u(t) = K_p e(t) + (K_p / T_i) \int e(t) dt \tag{4}$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(1 - A_2 / A_1)^2}} \tag{5}$$

เมื่อความดันตกคร่อมลูกลอยจะเท่ากับน้ำหนักของลอยหารด้วยพื้นที่หน้าตัดแนวนอนสูงสุด สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$(P_1 - P_2) = \frac{V_f(\rho_f - \rho)g}{A_f} \qquad (6)$$

แทนค่าสมการที่ (2) และ (6) ลงในสมการที่ (5) จะได้

$$Q = C_d A_2 \sqrt{\frac{2gV_f(\rho_f - \rho)}{\rho A_f (1 - A_2 / A_1)^2}} \qquad (7)$$

จากสมการที่ (7) จะเห็นได้ว่าอัตราการไหลผ่านโรตามิเตอร์จะเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ระหว่างลูกลอยกับผนังท่อภายใน (A_2) และจะมีความเป็นเชิงเส้นสูง

เมื่อ Q = Volumetric flow rate

A_1 = Tube cross-section area

A_2 = Cross-section area of annulus (area between the tube and float)

A_f = Maximum cross-section area of the float in horizontal plan

v = Average fluid velocity

V_f = Volume of the float

P = Static pressure

g = Acceleration due to gravity

ρ_f = Density of the material of the float

ρ = Density of the fluid

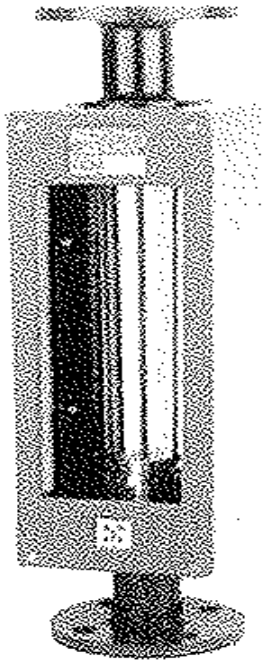
C_d = coefficient depends on the shape of the float and the Reynold number

ชนิดของโรตามิเตอร์

โรตามิเตอร์จะประกอบด้วยชิ้นส่วนพื้นฐานอยู่ 2 ส่วนคือ ท่อที่มีลักษณะเรียวและลูกลอย ขนาดของท่อจะมีตั้งแต่ 1/16 ถึง 4 นิ้ว แต่ขนาดมาตรฐานที่มีการใช้งานกันอย่างทั่วไปจะอยู่ที่ขนาด 1/8 ถึง 2 นิ้ว ในแต่ละขนาดจะมีข้อจำกัดในการใช้งานโดยจะขึ้นอยู่กับ ปริมาณความจุ, อุณหภูมิ, ความดัน, คุณสมบัติของไหลและความหนืด ชนิดของโรตามิเตอร์สามารถแบ่งออกตามชนิดของท่อได้เป็น 3 ชนิดใหญ่ๆดังนี้

โรตามิเตอร์แบบท่อแก้ว (Glass Tube Rotameter)

โรตามิเตอร์แบบนี้จะเป็นชนิดดั้งเดิมของโรตามิเตอร์ ที่เริ่มมีการนำมาใช้งานตั้งแต่กลางปี 1940 ตัวท่อของโรตามิเตอร์จะทำมาจากแก้ว Borosilicate จากลักษณะของท่อที่เป็นแก้วใสจึงสามารถทำให้มองเห็นการเคลื่อนที่ของลูกลอยภายในท่อแก้วได้ชัดเจน และสามารถอ่านค่าอัตราการไหลได้โดยตรงจากสเกลบนท่อ โรตามิเตอร์แบบนี้ที่มีความจุต่ำๆ จะนิยมกันอย่างกว้างขวางในระบบ Purge System และนิยมเรียกกันว่า Purge meter ซึ่งการใช้งานในระบบนี้จะใช้โรตามิเตอร์แบบท่อแก้ว เนื่องการใช้งานที่ง่าย แต่ค่าอัตราการไหลมีความเชื่อถือได้สูง และมีค่าการอ่านซ้ำที่ดี (Repeatability) สามารถติดตั้งหน้าสัมผัสเพิ่มเติมเข้าไปบนตัวโรตามิเตอร์สำหรับส่งสัญญาณเตือนในกรณีที่อัตราการไหลสูงหรือต่ำกว่าที่กำหนด สเกลในการอ่านค่าอัตราการไหลสามารถปรับเทียบให้เป็นเชิงเส้นได้จาก 0-100% และอ่านค่าได้เฉพาะเจาะจงกับของเหลวหรือก๊าซชนิดใดชนิดหนึ่งได้ นอกจากนั้นจุดต่อเข้ากับท่อยังสารถทำได้หลายแบบ ทั้งแบบเกลียวและแบบหน้าแปลน ซึ่งบางชนิดจะถูกออกแบบให้สามารถถอดทำความสะอาดท่อแก้วได้โดยไม่ต้องถอดตัวโรตามิเตอร์ออกจากท่อ โรตามิเตอร์แบบท่อแก้วแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 40

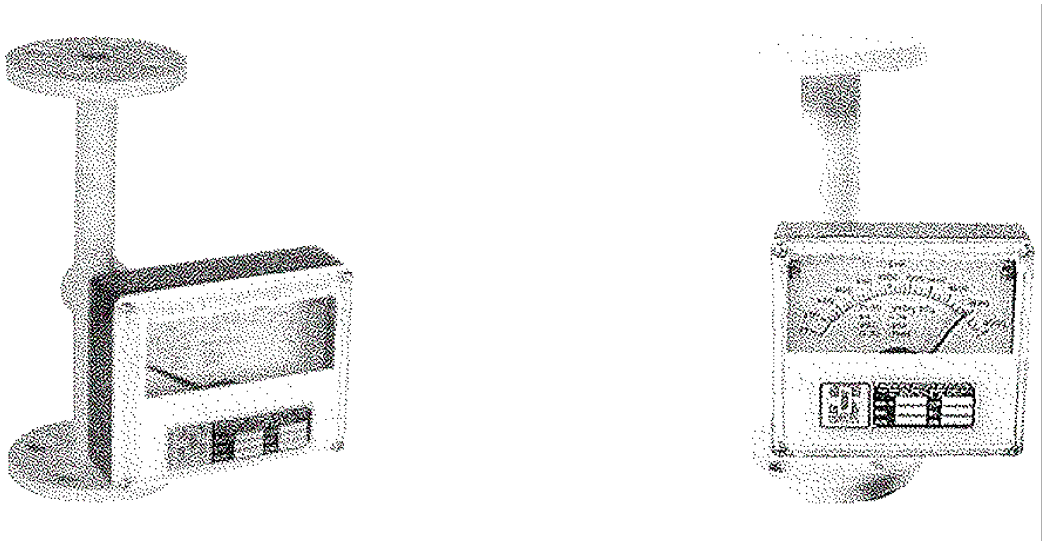


รูปที่ 40 โรตามิเตอร์แบบท่อแก้ว

โรตามิเตอร์แบบท่อโลหะ (Metal Tube Rotameter)

โรตามิเตอร์แบบนี้จะรู้จักกันดีในชื่อของ Armored Meter จะถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานกับของไหลที่มีอุณหภูมิและความดันที่เกินขีดจำกัดของแบบท่อแก้ว โดยตัวท่อของโรตามิเตอร์จะทำด้วยโลหะชนิดต่างๆ และมีลูกลอยเคลื่อนที่อยู่ภายใน การอ่านค่าอัตราการไหลจะถูกแสดงโดยตัวชี้ค่าบนสเกลที่ถูกเชื่อมโยงกับแม่เหล็กที่อยู่ภานในลูกลอย และไม่ต้องการพลังงานไฟฟ้าจากภายนอกสำหรับการออกแบบที่ต้องการแสดงค่าอัตราการไหลที่ตัวโรติเตอร์เพียงอย่างเดียว นอกจากนั้นยังสามารถติดตั้งอุปกรณ์สำหรับส่งสัญญาณอัตราการไหลไปแสดงผลยังหน่วยสแดงผลอื่นๆ ด้วยสัญญาณมาตรฐาน 4 - 20 mA ซึ่งคุณสมบัติข้อนี้โดยทั่วไปจะไม่มีอยู่ในโรตามิเตอร์แบบท่อแก้ว

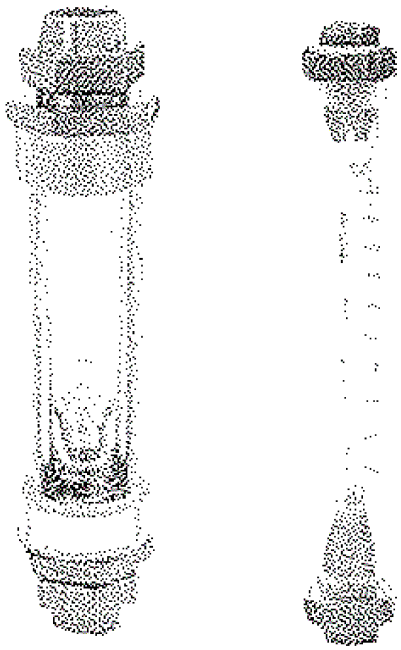
วัสดุที่ใช้ทำท่อและลูกลอยจะมีให้เลือกใช้ได้หลายชนิด โดยทั่วไปจะทำขึ้นจากวัสดุที่ทนต่อการกัดกร่อน เช่น 316 Stainless Steel สำหรับลูกลอยจะมีการเชื่อมโยงทางแม่เหล็กออกไปยังตัวชี้ค่าสเกลการอ่านค่าหรือยังสามารถตัดตั้งหน้าสัมผัสเพิ่มเติมสำหรับสัญญาณเตือนหรือตัวแปลงสัญญาณกระแสมาตรฐาน 4-20 mA ดังแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 41



รูปที่ 41 โรตามิเตอร์แบบท่อโลหะ

โรตามิเตอร์แบบท่อพลาสติก (Plastic Tube Rotameter)

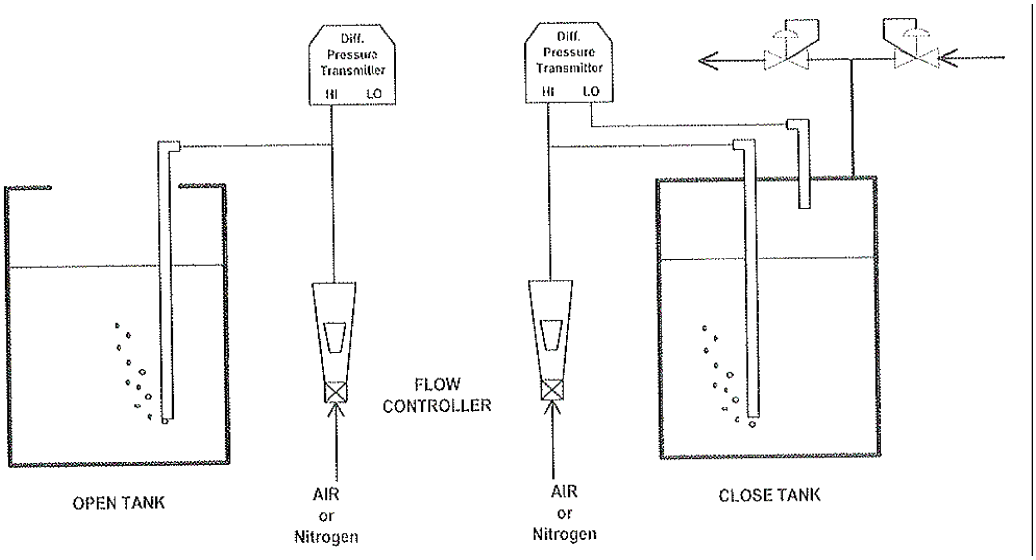
โรตามิเตอร์แบบนี้จะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งนอกจากแบบท่อแก้วและแบบท่อโลหะ เนื่องจากมีราคาที่ถูกกว่าทั้งสองแบบ ซึ่งสามารถนำไปใช้งานกับของไหลชนิดต่างๆได้ วัสดุที่นิยมใช้ทำโรตามิเตอร์แบบนี้จะเป็น อะคิลิกใส (Clear Acrylic) หล่อเป็นชิ้นเดียวกันทั้งตัว ซึ่งจะมีความแข็งแรงหรือไม่แตกง่ายสำหรับการใช้งานทั่วไปในอุตสาหกรรมกระบวนการผลิต ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 42



รูปที่ 42 โรตามิเตอร์แบบท่อพลาสติก

การวัดค่าระดับของเหลวแบบท่อปล่อยฟองอากาศ (Bubble tube liquid level measurement)

การวัดระดับของเหลวแบบนี้ เป็นการวัดระดับแบบพื้นฐานและมีราคาไม่แพงในการวัดระดับของเหลว ซึ่งจะเหมาะสมกับการนำไปใช้วัดระดับของเหลวที่มีสิ่งสกปรกเจือปนหรือมีถังเก็บอยู่ใต้ดิน โดยการวัดความดันย้อนกลับในท่อปล่อยฟองอากาศที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากระดับของเหลว ซึ่งความดันนี้จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของเหลวด้วย ดังแสดงในรูปที่ 43



รูปที่ 43 การวัดระดับของเหลว

จากรูปที่ 43 แสดงการวัดระดับของเหลวแบบท่อปล่อยอากาศบนถังแบบเปิดและแบบปิด โดยทั้งสองแบบจะใช้โรตามิเตอร์หนึ่งตัวกับอุปกรณ์การวัดความดัน ในถังเปิดสามารถแสดงค่าระดับของเหลวโดยใช้เกจล์วัดความดันในการวัดค่าความดันย้อนกลับจากท่อปล่อยฟองอากาศ อีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางโดยใช้เครื่องมือวัดความดันแตกต่าง ซึ่งด้านความดันสูงต่อเข้ากับท่อความดันย้อนกลับ ส่วนด้านความดันต่ำปล่อยออกสู่บรรยากาศภายนอก สำหรับถังปิดจะต่อด้านความดันต่ำเข้ากับด้านบนของถัง

ข้อดีของโรตามิเตอร์

- สะดวกในการคงสภาพการอ่านค่าที่ตัวมิเตอร์ เนื่องจากแบบท่อแก้ว จะทำให้สามารถมองเห็นสิ่งสกปรกต่างๆที่เกาะที่บริเวณท่อหรือที่ลูกลอยได้ง่าย และแบบท่อแก้วสามารถทำความสะอาดได้ง่าย นากจากนั้นยังสามารถใช้เป็นตัวอ่านค่าอัตราการไหล เพื่อใช้ในการตรวจสอบสมรรถนะของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลชนิดอื่นๆ ที่แสดงค่าอยู่บนหน่วยแสดงผลในห้องควบคุมกลาง
- มีค่าการอ่านซ้ำได้สูง (Repeatability) เนื่องจากลูกบอยที่เคลื่อนที่ได้อย่างอิสระภายในท่อ โดยปราศจากแรงเสียดทานต่างๆ ดังนั้นโรตามิเตอร์จึงเป็นอุปกรณ์วัดอัตราการไหลทางอุดมคติที่มีค่าการอ่านซ้ำได้สูงและมีระยะเวลาการใช้งานที่ยาวนาน
- มียานการวัดที่กว้าง (Wide rangeability) โรตามิเตอร์เป็นอุปกรณ์การวัดที่มีย่านการวัดที่กว้าง และมีค่า Rangeability สูงถึง 10:1 ของอัตราการไหลสูงสุดถึงอัตราการไหลสูงสุดถึงอัตราการไหลต่ำสุด หรืออาจกล่าวได้ว่าค่าอัตราการไหลต่ำสุดที่สามารถอ่านค่าได้ทำได้ถึง 1/10 ของอัตราการไหลสูงสุดที่อ่านค่าได้โดยมีมีผลกระทบต่อค่าการอ่านซ้ำ
- สเกลในการอ่านค่าจะเป็นเชิงเส้น (Linear Scale) การวัดอัตราการไหลโดยการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ การ

ปรับเทียบในทางปฏิบัติจะเป็นเส้นตรง นั้นคือสามารถทำสเกลในการแสดงอัตราการไหลให้มีช่องที่เท่าๆ กัน ถ้าเปรียบเทียบกับอุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบวัดความดันแตกต่างแล้ว สเกลของโรตามิเตอร์ที่ค่าอัตราการไหลต่ำๆ จะไม่ถูกบีบ ทำให้สามารถอ่านค่าได้อย่างแม่นยำตลอดย่านการวัด

- ค่าความดันสูญเสียต่ำ (Low Pressure Loss) เพราะว่าพื้นที่ระหว่างลูกลอยและผนังภายในท่อจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหล ดังนั้นความดันสูญเสียที่ลูกลอยจึงต่ำและค่อนข้างจะคงที่
- สามารถชดเชยเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความหนืด ลูกลอยสามารถออกแบบให้มีการชดเชยการเปลี่ยนแปลงความหนืดและความหนาแน่นของไหล ดังเช่น สามารถใช้วัดอัตราการไหลชของ Sulfuric Acid ที่มีช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่กว้าง
- สามารถขยายสเกลในการอ่านค่า โดยปกติสามารถกำหนดระยะการเคลื่อนที่ของลูกลอยในแนวตั้งได้ตั้งแต่ 5 นิ้ว ถึง 24 นิ้ว ผู้ออกแบบมิเตอร์สามารถออกแบบระยะการเคลื่อนที่ของลูกลอยเพื่อให้การวัดมีความแม่นยำมากขึ้น
- ป้องกันการกัดกร่อน เพราะว่าการออกแบบที่ง่ายของโรตามิเตอร์ จึงเป็นการประหยัดในการใช้วัสดุที่สามารถทนต่อการกัดกร่อนได้สูง นอกจากนั้นยังสามารถใช้วัดอัตราการไหล ซึ่งมิเตอร์บางชนิดไม่สามารถใช้งานได้
- ง่ายในการติดตั้งและบำรุงรักษา โดยการติดตั้งกับท่อในแนวตั้ง ไม่ต้องการจุดต่อออกมายังภายนอกหรือระยะท่อตรง (Straight Run) เหมือนกับเครื่องมือวัดบางประเภท
- สามารถทำหน้าที่เหมือน Sight Glass เนื่องจากท่อแก้วที่ใสจึงสามารถมองเห็นของไหลที่ไหลผ่านได้
- ไม่ต้องการพลังงานไฟฟ้าจากภายนอก เมื่อต้องการอ่านที่ตัวมิเตอร์เพียงอย่างเดียว
- สามารถไปใช้วัดอัตราการไหลที่ค่าต่ำๆได้

จากรายละเอียดที่แสดงไปทั้งหมดข้างต้น สามารถที่จะนำไปใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้โรตามิเตอร์ในระบบเครื่องมือวัดทางอุตสาหกรรมสำหรับอุตสาหกรรมกระบวนการผลิตประเภทต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม

ข้อดีและข้อเสียของเครื่องมือวัดการไหลชนิดต่างๆ

ในหัวข้อจะแสดงข้อดีและข้อเสียของเครื่องมือวัดการไหลที่มีใช้งานกันอยู่ในอุตสาหกรรมกระบวนการผลิต เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการเลือกใช้เครื่องมือวัดการไหลกับอุตสาหกรรมกระบวนการผลิตได้อย่างเหมาะสม ในการแสดงนี้ จะกล่าวถึงหลักการทำงานของเครื่องมือวัดการไหลในแต่ละชนิดเพียงเล็กน้อย เพื่อให้ทราบหลักการทำงานเบื้องต้น สำหรับข้อดีและข้อเสียสามารถแสดงได้ดังนี้

Primary Element ของเครื่องมือวัดการไหลแบบความดันแตกต่าง (Deferential Pressure Transmitter)

Primary Element เป็นอุปกรณ์ที่จะถูกติดตั้งอยู่กับท่อเพื่อทำให้เกิดค่าความดันแตกต่างตามอัตราการไหล เพื่อส่งค่าความดันแตกต่างนี้ไปยังเครื่องมือวัดสำหรับทำการเปลี่ยนค่าความดันไปเป็นสัญญาณที่เหมาะสม Primary Element จะมีหลายชนิดให้เลือกใช้ดังนี้

Orifice Plate

- ข้อดี

ง่ายในการติดตั้ง, สามารถใช้เครื่องมือวัดความดันแตกต่าง (Differential Pressure Transmitter) ร่วมกันได้, มีค่าใช้จ่ายต่ำ และมีวัสดุและรูปแบบหลายชนิดให้เลือกใช้

- ข้อเสีย

มีค่า Turndown ต่ำ เนื่องจากฟังก์ชันรากที่สอง (Square function), มีค่าความแม่นยำในการวัดลดลงถ้าความเสียหายหรือเกิดการสึกหรอที่แผ่นออริฟิส, ต้องการระยะท่อทางตรงทั้งด้านหน้าและด้านหลัง, มีโอกาสเกิดการรั่วไหลตามรอยต่อต่างๆได้สูง เนื่องจากมีจำนวนจุดต่อเป็นนจำนวนมาก, มีค่าความดันสูญเสียที่ตัวออริฟิสสูงท่อ Impulse อาจมีโอกาสอุดตันจากของไหล

Flow Nozzle

- ข้อดี

มีค่าความดันสูญเสียต่ำกว่า แบบออริฟิส, สามารถใช้งานได้กับของไหลที่มีของแข็งปะปนอยู่, มีขนาดคงที่มากกว่าตัวออริฟิสที่ค่าอุณหภูมิและความเร็วการไหลสูงๆ

- ข้อเสีย

ต้องใช้แรงงานฝีมือสูงในการจัดทำ จึงทำให้มีค่าใช้จ่ายที่สูง เมื่อเทียบกับแผ่นออริฟิสที่มีขนาดเท่าๆกัน

Venturi

- ข้อดี

มีค่าความดันสูญเสียต่ำกว่า แบบออริฟิส, สามารถใช้งานได้กับของไหลที่มีของแข็งปะปนอยู่, ต้องการระยะท่อทางตรงน้อยกว่าแบบออริฟิส

- ข้อเสีย

มีราคาสูงสำหรับขนาดใหญ่ๆ, มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก, ต้องใช้แรงงานฝีมือสูงในการจัดทำ, มีค่าการวัดไม่แน่นอน เมื่อค่า Reynold น้อยกว่า 100,000

Pitot tube

- ข้อดี

มีค่าใช้จ่ายต่ำ, ค่าความดันสูญเสียต่ำ, ไม่มีส่วนที่ขัดขวางการกไหล, สามารถติดตั้งกับท่อด้วยวิธีการ Hot taps, ต้องการระยะท่อทางตรงน้อยกว่าแบบออริฟิส

- ข้อเสีย

มีค่าความดันแตกต่างที่เกิดจากการไหลต่ำ, Impulse line ต้องมีระยะสั้นที่สุด, มีข้อจำกัดทางด้านค่า Turn down, มีโอกาสเกิดการอุดตันจากของไหล, อาจเกิดความเสียหายจากการสั่นเนื่องจากความเร็วการไหล

Integral Orifice

- ข้อดี

เหมาะสำหรับการวัดการไหลในท่อขนาดเล็กๆ, สามารถใช้ได้ดีกับการไหลต่ำๆ

- ข้อเสีย

อาจเกิดการอุดตัน, มีความแม่นยำต่ำ, ต้องสั่งซื้อเป็นชุดมาจากผู้ผลิต

Wedge type

- ข้อดี

ใช้ได้ดีกับของไหลที่มีสิ่งสกปรกปะปนหรือของเหลวที่ผสมของแข็ง, มีค่าความดันสูญเสียต่ำ, เป็นแบบที่ทำความสะอาดด้วยตัวเอง, ใช้ได้ดีเมื่อค่า Reynolds ต่ำ, สามารถใช้ได้กับการไหลสองทิศทาง

- ข้อเสีย

การติดตั้งบางครั้งต้องใช้ Remote seal, ค่าใช้จ่ายสูงกว่าแบบออริฟิส

Turbine (Liquid)

เครื่องมือวัดการไหลแบบ Turbine มีหลักการทำงาน โดยให้การไหลผ่านใบพัดให้เกิดการหมุน ซึ่งความเร็วในการไหมุนของใบพัดเป็นสัดส่วนกับความเร็วการไหล การหมุนของใบพัดจะถูกตรวจจับ และถูกเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณเอาต์พุตที่ต้องการ

เครื่องมือวัดการไหลแบบ Turbine จะถูกใช้งานเมื่อต้องการค่าความแม่นยำสูงๆ การใช้หลักๆจะเป็นการวัดเพื่อการซื้อขาย (Custody Transfer) สัญญาณความถี่ที่ได้มาจากเครื่องมือวัดการไหลแบบ Turbine อาจจะเป็นค่าโดยตรงกับค่าการไหลรวม (Total flow) และยังสามารถชดเชยค่าความไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากค่าความหนืดได้

- ข้อดี

มีความแม่นยำสูง, มีค่า Turn down สูง, ง่ายในการติดตั้ง, ค่าความดันสูญเสียต่ำ, มีสัญญาณเอาต์พุตเป็นแบบเชิงเส้น

- ข้อเสีย

เกิดความเสียหายได้ง่าย, ต้องมีการซ่อมบำรุงมากกว่าเครื่องมือวัดแบบอื่นๆ, ของไหลในการวัดต้องสะอาด, มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของไหล, การสึกหรอของจุดหมุนจะทำให้ค่าความแม่นยำลดลง, ต้องการเทคนิคพิเศษในการเริ่มใช้งาน

Turbine (Gas)

- ข้อดี

มีความแม่นยำสูง, มีค่า Turn down สูง, ง่ายในการติดตั้ง, ค่าความดันสูญเสียต่ำ, มีสัญญาณเอาต์พุตเป็นแบบเชิงเส้น

- ข้อเสีย

เกิดความเสียหายได้ง่าย, ต้องมีการซ่อมบำรุงมากกว่าเครื่องมือวัดแบบอื่นๆ, ของไหลในการวัดต้องสะอาด, มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของไหล, การสึกหรอของจุดหมุนจะทำให้ค่าความแม่นยำลดลง, ต้องการเทคนิคพิเศษในการเริ่มใช้งาน

Positive Displacement

เครื่องมือวัดการไหลแบบ Positive-displacement มีหลักการวัดการไหลโดย จะให้ส่วนปริมาณการไหลที่ต่อเนื่องกันไปไหลผ่านตัวมิเตอร์ จำนวนของส่วนปริมาณการไหล จะถูกเปลี่ยนไปเป็นการหมุนของแกน เกียร์และตัวปรับเทียบจะทำการเปลี่ยนการหมุนของแกนไปเป็นปริมาณการไหล

ชนิดที่สำคัญของเครื่องมือวัดการไหลแบบ Positive-displacement คือ Oscillating piston และ Oval gear ซึ่งทั้งสองแบบจะมีการชดเชยอุณหภูมิเพื่อความถูกต้องของค่าสัญญาณเอาต์พุต ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของไหล

เครื่องมือวัดการไหลแบบ Positive-displacement ยังคงมีการใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน เนื่องจากมีความสามารถอ่านซ้ำ (Repeatability) ที่ดีบนย่านการวัดการไหลที่กว้าง และยังถูกใช้สำหรับของไหลที่มีความหนืดมากในการวัดสำหรับการซื้อขาย

- ข้อดี

มีความแม่นยำสูง, มีย่านการวัดใช้งานกว้าง, เหมาะสมกับของไหลที่มีค่าความหนืดสูง, สามารถแสดงค่าการไหลที่ระยะไกลได้โดยไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้า

- ข้อเสีย

การสึกหรอของชิ้นส่วนเคลื่อนที่มีผลทำให้ความแม่นยำในการวัดลดลง, ต้องมีการซ่อมบำรุงเป็นระยะๆ, มีค่าความดันสูญเสียสูง, ไม่เหมาะสมในการวัดของไหลที่มีส่วนผสมของของแข็งหรือก๊าซ, สามารถขัดขวางการไหลได้ถ้าชิ้นส่วนเคลื่อนที่มีการติดขัด

Magnetic Flow

เครื่องมือวัดการไหลแบบ Magnetic ต้องนำไปใช้วัดของไหลที่มีค่าความนำไฟฟ้า หลักการวัดการไหลหาได้จากกฎการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของฟาราเดย์

สารไฮโดรคาร์บอนเกือบทั้งหมดในอุตสาหกรรม จะมีค่าความนำไฟฟ้าไม่เพียงพอ ในการใช้งานกับเครื่องมือวัดการไหลแบบ Magnetic ดังนั้น การใช้งานเครื่องมือวัดการไหลแบบนี้ในอุตสาหกรรมการผลิต จึงเห็นการใช้งานกับ ของไหลที่เป็นน้ำ, กรดบางชนิด และของไหลที่มีค่าความนำไฟฟ้า ชนิดอื่นๆ

เครื่องมือวัดการไหลแบบ Magnetic ใช้กันกว้างขวางในของไหลที่เป็นเส้นใย, เยื่อ เนื่องจากเครื่องมือวัดการไหลแบบ Magnetic ไม่มีชิ้นส่วนที่ขัดขวางการไหล และการใช้งานกับของไหลที่มีการกัดกร่อนสูงเนื่องจากมีส่วนสัมผัสกับของไหล เฉพาะตัวเคลือบและอิเลคโทรด, ยังเหมาะสมกับของไหลที่มีความหนืดมาก หรือไม่ต้องการให้มีความดันสูญเสีย

- ข้อดี

ไม่มีส่วนที่ขัดขวางการไหล, มีค่าความดันสูญเสียต่ำมากหรืออาจไม่มี, สามารถใช้กับของไหลที่มีส่วนผสมของของแข็งหรือของไหลที่มีโอกาสทำให้อุดตัน, ใช้ได้ดีกับของไหลที่มีการกัดกร่อน, ไม่มีผลกระทบจากการเปลี่ยนคุณลักษณะของไหล นอกจากการเปลี่ยนค่าความนำ, ต้องการระยะท่อทางตรงน้อย, สามารถใช้ได้กับการไหลสองทิศทาง

- ข้อเสีย

ของไหลต้องมีค่าความนำไฟฟ้า (อย่างน้อย 2 uS/cm), วัสดุเคลือบผิวเสียหายได้ง่าย, ไม่สามารถใช้ได้กับของไหลที่เป็นก๊าซ, การต่อลงดินมีความสำคัญ เพื่อป้องกันความผิดพลาด, ต้องการแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าเพิ่มเติม, มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก, มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสำหรับขนาดใหญ่ๆ, การเคลือบผิวบริเวณ electrode อาจทำให้เกิดปัญหา, มีข้อจำกัดด้านอุณหภูมิ

Coriolis

เครื่องมือวัดการไหลแบบ Coriolis ทำงานโดยให้การไหลผ่านท่อขนานกันสองท่อซึ่งสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติ แรงที่เกิดจากมวลของๆไหลทำให้ท่อบิดตัวเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับมวลของการไหล และถูกตรวจจับโดยตัวตรวจจับตำแหน่งแม่เหล็ก ซึ่งเฟสของข้อมูลจะนำหน้าและล้าหลัง ขึ้นอยู่กับการบิดตัวของท่อ ข้อมูลจะถูกนำไปคำนวณเพื่อเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณเอาต์พุตที่เหมาะสม

- ข้อดี

  มีค่าความแม่นยำในการวัดค่าการไหลเป็นน้ำหนัก, สามารถใช้ได้ดีกับของไหลทุกประเภทและของไหลที่มีค่าความหนืดสูง, สามารถวัดค่าความหนาแน่นได้

- ข้อเสีย

  มีค่าใช้จ่ายสูง, มีขั้นตอนการติดตั้งมากกว่าแบบอื่นๆ, มีข้อจำกัดของอุณหภูมิในการใช้งาน, มีขนาดที่จำกัด, มีค่าความดันสูญเสียสูง

Thermal Mass

- ข้อดี

  สามารถใช้ได้กับของไหลที่มีความเร็วต่ำๆ, มีค่าความดันสูญเสียต่ำ

- ข้อเสีย

  ผิวของท่อต้องสะอาด, ไม่มีความแข็งแรงในบางชนิด, ความเร็วในการตอบสนองต่ำ, โดยทั่วไปจะใช้งานกับของไหบที่เป็นก๊าซหรือไอ, ต้องมีการปรับเทียบด้วยการไหลเมื่อต้องการความแม่นยำ, ค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง เมื่อนำไปใช้กับการไหลที่ต่ำมากๆ, ส่วนประกอบของไหลมีผลกระทบต่อความแม่นยำ

Ultrasonic

เครื่องมือวัดการไหลแบบ Ultrasonic จะมีหลักการทำงานพื้นฐาน 2 ชนิดดังนี้

1) วัดเวลาที่ส่งผ่าน (Transit time)
2) วัดผลกระทบจากการสูยเสีย (Dropper)

ตัวสัญญาณ Ultrasonic จะส่งสัญญาณไปยังกระแสการไหลที่เคลื่อนที่อยู่ในท่อ การวัดที่ตัวรับจะเป็นไปตามหลักการดังกล่าวข้างบน โดยที่ตัวรับจะเปลี่ยนสัญญาณ Ultrasonic ไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าที่เป็นสัดส่วนกับการไหล

- ข้อดี

  บางประเภทสามารถติดตั้งภายนอกท่อโดยไม่ต้องสัมผัสกับของไหล, ไม่มีค่าความดันสูญเสีย, ใช้ได้กับการไหลสองทิศทาง, สามารถใช้ได้ดีกับของไหลที่สะอาดและสกปรก ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีที่เลือกใช้, มีแบบเคลื่อนที่ได้, สามารถใช้ Turn down สูงได้กับบางประเภท

- ข้อเสีย

  ต้องการระยะท่อทางตรง, การติดตั้งค่อนข้างยุ่งยากกว่าแบบอื่นๆ, ตัวเซนเซอร์มีข้อจำกัดด้านอุณหภูมิใช้งาน, คุณลักษณะการไหลต้องคงที่ตลอดการใช้งาน, ชนิดติดตั้งภายนอกท่ออาจมีข้อจำกัดด้านความแม่นยำ

Vortex Meter

เครื่องมือวัดการไหลแบบ Vortex จะเป็นการวัดความถี่การไหลวนของของไหล ที่เกิดขึ้นจาก bluff body ที่อยู่ในกระแสการไหล ความถี่ของการไหลวนเป็นอัตราส่วนกับความเร็วการไหล ในตัวมิเตอร์จะมีตัวตรวจวัดความถี่ความดันที่เกิดขึ้นแล้วเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณเอาต์พุตที่ต้องการ เครื่องมือวัดแบบนี้จะถูกนำไปใช้งานกับการวัดที่ต้องการย่านการวัดที่กว้างและความแม่นยำสูง

- ข้อดี

  มีความแม่นยำสูง, มีค่าใช้จ่ายการติดตั้งต่ำ, ย่านการวัดใช้งานกว้าง, ไม่มีชิ้นส่วนเคลื่อนที่, สัญญาณเอาต์พุตเป็นเชิงเส้น, มีค่าความดันสูญเสียต่ำ

- ข้อเสีย

  มีข้อจำกัดค่า Reynolds ต่ำสุดที่ต้องการในการใช้งาน, ไม่เหมาะสมกับการวัดของไหลที่มีความหนืด, มีผลกระทบต่อการสั่นของท่อ

Variable Flow Meter

- ข้อดี

  ค่าใช้จ่ายต่ำ, อ่านค่าการไหลได้โดยตรง, ไม่ต้องการพลังงานไฟฟ้า, ต้องการระยะท่อทางตรงน้อยที่สุด

- ข้อเสีย

  ความแม่นยำจำกัด, ต้องติดตั้งในแนวตั้งเท่านั้น, ต้องมีค่าความดันย้อนกลับเมื่อใช้กับก๊าซ, ต้องมีอุปกรณ์เพิ่มเติมเมื่อต้องการส่งสัญญาณไปยังระบบอื่นๆ, ต้องการซ่อมบำรุงสูง

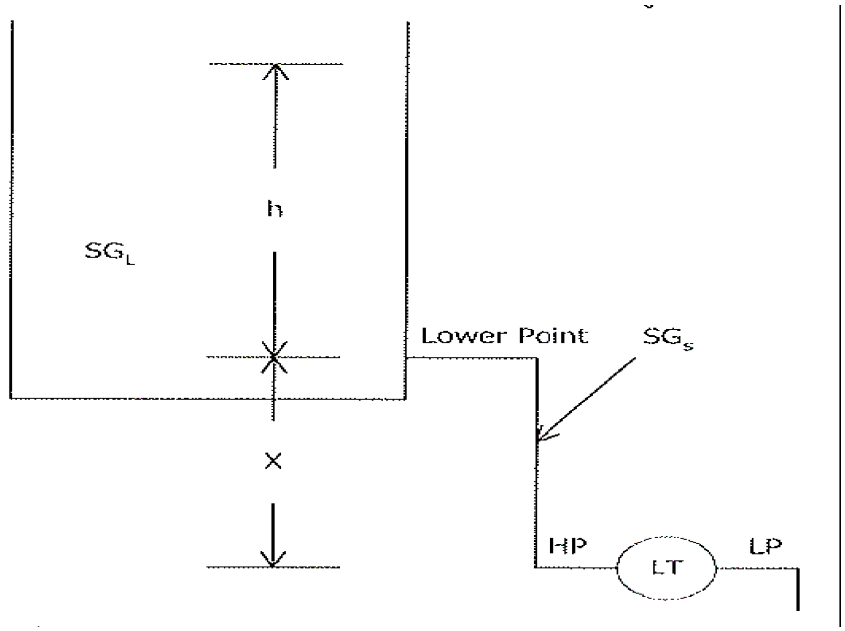
การวัดระดับความสูงจากความดัน (Head Measurement)

การวัดระดับความสูงจากความดันจะอยู่บนพื้นฐาน การวัดแรงกดจากความสูงของเหลว แรงกดนี้จะมีพื้นฐานมาจากความสูงของเหลวและความถ่วงจำเพาะของเหลว (Specific Gravity: S.G.) การวัดระดับของเหลวด้วยวิธีนี้จะถูกอ้างอิงไปถึงความสูงของน้ำ และจะถูกปรับเทียบเป็นความดันในหน่วยของนิ้วน้ำ (Inchs of Water Column: In WC) หรือมิลลิเมตรน้ำ (Millimeter of Water Column: mmWC) เมื่อค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำที่สภาวะมาตรฐาน (Standard Condition) มีค่าเท่ากับ 1

การคำนวณหาค่าความดันเพื่อนำไปใช้ในการปรับเทียบเครื่องมือวัด (Calibration) สำหรับนำไปใช้วัดระดับความสูงของเหลวทำได้โดยการคูณความสูงของเหลวด้วยค่าความถ่วงจำเพราะ จะแบ่งออกตามการใช้งานได้เป็น 2 แบบดังนี้

1. การวัดระดับในถังเปิด (Atmospheric Tank)

ถังเปิดจะเป็นถังที่ใช้บรรจุของเหลวที่มีส่วนบนถังเปิดออกสู่บรรยากาศ โดยไม่มีความดันจากส่วนอื่นมากระทำที่บริเวณผิวหน้าของเหลว ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 44



รูปที่ 44 การคำนวณหาความดันในถังเปิด

จากรูปที่ 44 เมื่อระดับความสูงของเหลวในถังอยู่ที่ตำแหน่ง Lower Point สามารถหาค่าความดันที่ด้าน HP ของเครื่องมือวัดระดับได้เป็นดังนี้

ความดันด้าน HP = $X * SG_2$

และความดันที่ด้าน LP ของเครื่องมือวัดระดับเป็นดังนี้

ความดันด้าน LP = Atmospheric(Atm)

ความดันแตกต่างที่เครื่องมือวัดระดับ (Level Transmitter) เมื่อของเหลวในถังอยู่ที่ตำแหน่ง Lower Point จะเป็นดังนี้

ความดันแตกต่างที่ตำแหน่ง Lower Point = $(X * SG_S)$-Atm

= $(X * SG_S)$

เมื่อระดับความสูงของเหลวในถัง Upper Point สามารถหาค่าความดันที่ด้าน HP ของเครื่องวัดระดับเป็นดังนี้

ความดันด้าน HP = $(X * SG_S)+(h * SG_L)$

และความดันที่ด้าน LP เป็นดังนี้

ความดันด้าน LP = Atmospheric(Atm)

ควาดันแตกต่างที่เครื่องมือวัดระดับ เมื่อของเหลวในถังอยู่ที่ตำแหน่ง Upper Point จะเป็นดังนี้

ความดันแตกต่างที่ตำแหน่ง Upper Point = $((X * SG_S)+(h * SG_L))$-Atm

= $(X * SG_S)+(h * SG_L)$

ดังนั้นช่วงการวัด (Span) ของเครื่องมือวัดความดันแตกต่างที่ใช้ในการปรับเทียบจะเป็นดังนี้

ช่วงการวัด (Span) = [ความดันแตกต่างที่ตำแหน่ง Lower Point]- [ความดันแตกต่างที่ตำแหน่ง Upper Point]

= 0 to $[(h * SG_L)]$

และย่านการวัด (Range) = [ความดันแตกต่างที่ตำแหน่ง Lower Point] to [ความดันแตกต่างที่ตำแหน่ง Upper Point]

= $(X * SG_S)$ to $(X * SG_S)+(h * SG_L)$

เมื่อ SG_S = ความถ่วงจำเพาะของเหลวในท่อ (SG of filling liquid)

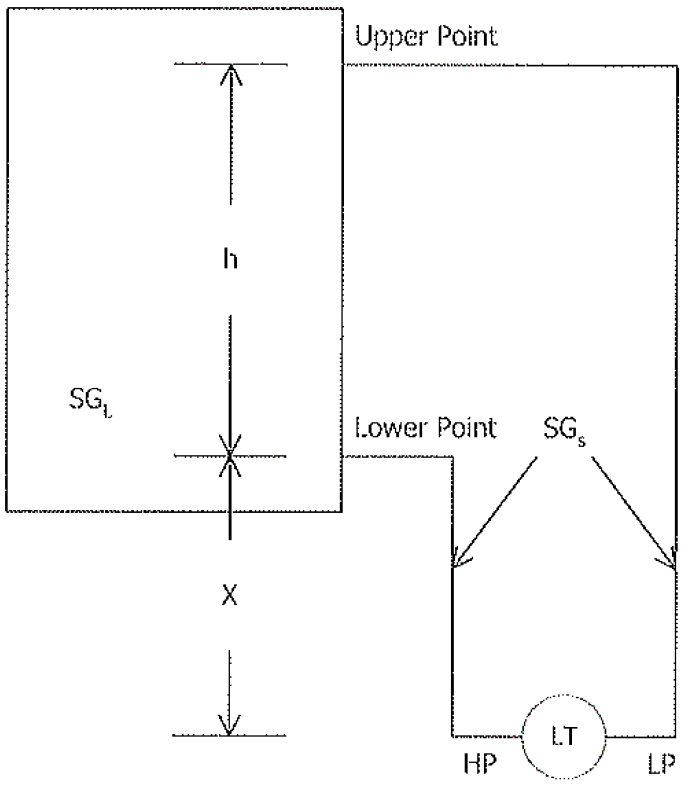
SG_L = ความถ่วงจำเพาะของเหลวในถัง (SG of measuring liquid)

h = ระยะความสูงของเหลวที่ต้องการวัด

X = ระยะระหว่างตัวเครื่องมือวัดกับจุดต่อด้านล่าง

2. การวัดระดับในถังปิด (Pressurized Tank)

ถังปิดจะเป็นถังที่ใช้บรรจุของเหลวที่มีส่วนบนถังต่อยู่กับส่วนอื่นๆที่มีความดัน จึงทำให้มีความดันอยู่ด้านบนผิวหน้าของระดับของเหลว ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 45



รูปที่ 45 การคำนวณหาความดัน

จากรูปที่ 45 เมื่อระดับความสูงของเหลวในถังอยู่ที่ตำแหน่ง Lower Point สามารถหาค่าความดันที่ด้าน HP ของเครื่องมือวัดระดับได้เป็นดังนี้

ความดันด้าน HP = $X * SG_2$

และความดันที่ด้าน LP ของเครื่องมือวัดระดับเป็นดังนี้

ความดันด้าน LP = $(h+X) * SG_S$

ความดันแตกต่างที่เครื่องมือวัดระดับ (Level Transmitter) เมื่อของเหลวในถังอยู่ที่ตำแหน่ง Lower Point จะเป็นดังนี้

ความดันแตกต่างที่ตำแหน่ง Lower Point = $(X * SG_S)- ((h+X) * SG_S)$

= $- (h * SG_S)$

เมื่อระดับความสูงของเหลวในถัง Upper Point สามารถหาค่าความดันที่ด้าน HP ของเครื่องวัดระดับเป็นดังนี้

ความดันด้าน HP = $(X * SG_S)+(h * SG_L)$

และความดันที่ด้าน LP เป็นดังนี้

ความดันด้าน LP = $(h+X) * SG_S$

ความดันแตกต่างที่เครื่องมือวัดระดับ เมื่อของเหลวในถังอยู่ที่ตำแหน่ง Upper Point จะเป็นดังนี้

ความดันแตกต่างที่ตำแหน่ง Upper Point = $((X * SG_S)+(h * SG_L))- ((h+X) * SG_S)$

= $(h * SG_L)-(h * SG_S)$

ดังนั้นช่วงการวัด (Span) ของเครื่องมือวัดความดันแตกต่างที่ใช้ในการปรับเทียบจะเป็นดังนี้

ช่วงการวัด (Span) = [ความดันแตกต่างที่ตำแหน่ง Lower Point]- [ความดันแตกต่างที่ตำแหน่ง Upper Point]

= 0 to $[(h * SG_L)]$

และย่านการวัด (Range) = [ความดันแตกต่างที่ตำแหน่ง Lower Point] to [ความดันแตกต่างที่ตำแหน่ง Upper Point]

= $-(h * SG_S)$ to $(h * SG_L)-(h * SG_S)$

เมื่อ SG_S = ความถ่วงจำเพาะของเหลวในท่อ (SG of filling liquid)

SG_L = ความถ่วงจำเพาะของเหลวในถัง (SG of measuring liquid)

h = ระยะความสูงของเหลวที่ต้องการวัด

X = ระยะระหว่างตัวเครื่องมือวัดกับจุดต่อด้านล่าง

เมื่อกำหนดรายละเอียดและระยะต่างๆเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะต้องมีการคำนวณหาย่านการวัดที่สำหรับใช้ในการปรับเทียบเครื่องมือวัดระดับที่เป็นชนิดวัดความดันแตกต่าง เมื่อกำหนดให้ความถ่วงจำเพาะของเหลวที่บรรจุในท่อ (SG_S) ทั้งสองด้าน = 1 และความถ่วงจำเพาะของของเหลวในถัง = 0.8 ดังนั้นช่วงการวัดและย่านการวัดจะได้ดังนี้

ช่วงการวัด (Span) = 0 to $[(h * SG_L)]$

= 0 to $[(750 * 0.8)]$

= 0 to 600 mmH_2O

และย่านการวัด (Range) = $-(h * SG_S)$ to $(h * SG_L)-(h * SG_S)$

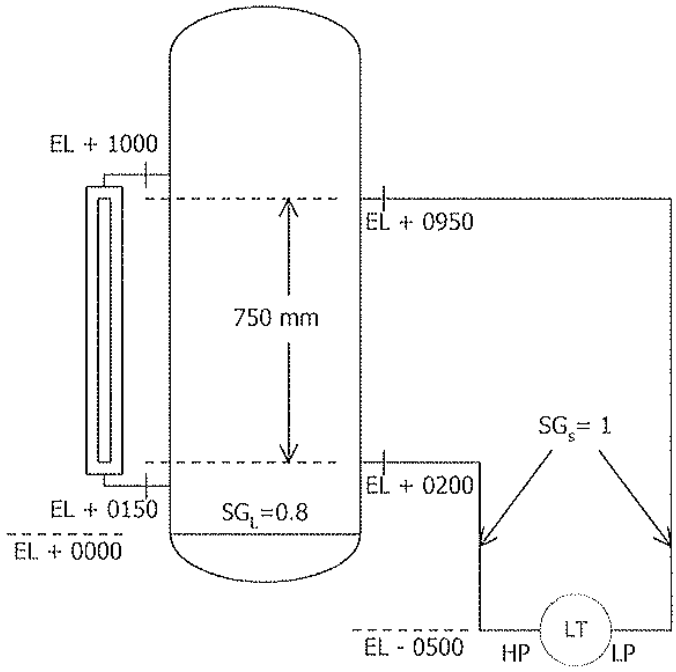
= $-(750 * 1)$ to $(750 * 0.8)-(750 * 1)$

= -750 mmH_2O to -150 mmH_2O

ค่าความดันแตกต่างที่ใช้ในการปรับเทียบให้เครื่องมือวัดจะเป็นดังนี้

- ย่านการวัดใช้งาน (Calibrated Range) = -750 ถึง -150 mmH_2O
- ช่วงการวัดใช้งาน (Calibrated Span) = 0 ถึง 600 mmH_2O

สามารถแสดงรายละเอียดระยะต่างๆที่ใช้ในการคำนวณในรูปที่ 46



รูปที่ 46 รายละเอียดในการคำนวณแบบถังปิด

ถ้าเป็นแบบถังเปิดสามารถหาค่าความดันได้ดังนี้

ช่วงการวัด (Span) = 0 to [(h * SG_L)]

= 0 to [(750 *0.8)]

= 0 to 600 mmH_2O

และย่านการวัด (Range) = (X * SG_S) to (X * SG_S)+(h * SG_L)

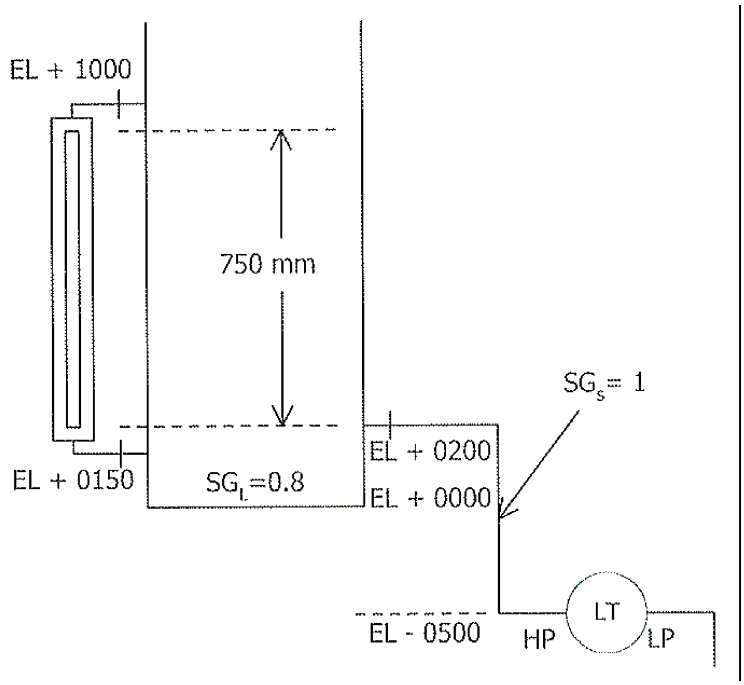
= (700 * 1) to (700 * 1)+(750 * 0.8)

= 700 mmH_2O to 1300 mmH_2O

ค่าความดันแตกต่างที่ใช้ในการปรับเทียบให้เครื่องมือวัดจะเป็นดังนี้

- ย่านการวัดใช้งาน (Calibrated Range) = 700 ถึง 1300 mmH_2O
- ช่วงการวัดใช้งาน (Calibrated Span) = 0 ถึง 600 mmH_2O

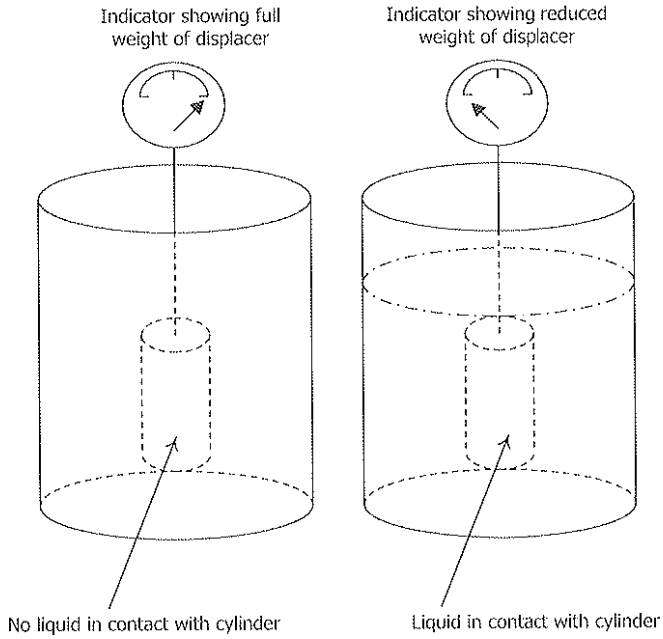
สามารถแสดงรายละเอียดระยะต่างๆที่ใช้ในการคำนวณในรูปที่ 47



รูปที่ 47 รายละเอียดในการคำนวณแบบถังเปิด

เครื่องมือวัดระดับแบบ Displacer

เครื่องมือวัดระดับแบบ Displacer เป็นเครื่องมือวัดที่ต้องมีการสัมผัสอยู่กับของเหลวที่ต้องการวัดอยู่ตลอดเวลา และถูกสร้างให้มีน้ำหนักมาก ดังนั้น Displacer จึงจมอยู่ในระดับของเหลวที่เพิ่มขึ้น ตัว Displacer จะเป็นแท่งรูปทรงกระบอกที่ถูกแขวนอยู่ในของเหลว น้ำหนักของแท่งรูปทรงกระบอกนี้จะเปลี่ยนไปตามส่วนที่จมอยู่ในของเหลว นั่นคือ ถ้าระดับของเหลวต่ำกว่าแท่งรูปทรงกระบอกนี้จะทำให้มีน้ำหนักสูงสุดเนื่องจากไม่มีแรงพยุงตัว (Buoyancy) ของ Displacer จากของเหลวที่ทำการวัด ซึ่งลักษณะการทำงานจะไม่เหมือนกับการลอยตัว Displacer จะมีการเคลื่อนทางกลที่สามารถไปเปลี่ยนเป็นระดับของเหลวได้ แสดงการทำงานได้ดังรูปที่ 48



รูปที่ 48 การทำงานของ Displacer

ข้อดี

มีย่านการใช้งานของอุณหภูมิและความดันที่กว้าง, เหมาะสมกับการนำไปวัดระดับที่เชื่อมต่อกันระหว่างของเหลวสองชนิด (Interface level) ถ้ามีค่าความถ่วงจำเพาะ (S.G.) ที่แตกต่างกันเพียงพอ

ข้อเสีย

ค่าระดับที่อ่านได้จะไม่ถูกต้อง ถ้ามีค่าอุณหภูมิและ/หรือค่าความหนาแน่นของเหลวในถังกับค่าที่ตัว Displacer มีค่าที่แตกต่างกัน, ต้องมีการจัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับลดการกระเพื่อมของระดับในถัง, มีค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงสูง, มีการปรับเทียบค่อนข้างยุ่งยาก โดยเฉพาะการวัดระดับแบบเชื่อมต่อกัน, ต้องมีการจัดเตรียมเครื่องมือในการติดตั้งและการถอด

เกจวัดระดับ (Level Gauage)

เครื่องมือวัดระดับอีกประเภทหนึ่งที่สามารถอ่านค่าระดับได้ที่ตัวเครื่องมือวัดเพียงอย่างเดียวที่บริเวณการใช้งานจะเป็น เกจวัดระดับ ซึ่งมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมกระบวนการการผลิตกันหลายชนิด ดังต่อไปนี้

1. แบบแม่เหล็ก (Magnetic level gauge)
2. แบบสะท้อนแสง (Reflex Type)
3. แบบโปร่งแสง (Transparent)
4. แบบท่อแก้ว (Tubular)

1. แบบแม่เหล็ก (Magnetic level gauge)

เกจวัดระดับแบบแม่เหล็กจะมีลักษณะเป็นท่อโลหะที่มีลูกลอยแม่เหล็กเคลื่อนที่อยู่ภายใน โดยจะมีการเชื่อมโยงทางแม่เหล็กกับสเกลแสดงผลด้านนอกท่อ เกจวัดระดับแบบนี้ควรจะมีการพิจารณาเลือกใช้ในการวัดระดับของเหลวที่ติดไฟได้ (Flammable), มีการกัดกร่อน (Corrosive), เป็นพิษ (Toxic), ความดันสูง (High pressure), อุณหภูมิสูง (High Temperature), ต้องการระยะการมองเห็นที่ยาว (Long visible length) แต่ไม่ควรนำไปใช้งานกับของเหลวที่สกปรกหรือมีสิ่งเจือปน เนื่องจากสิ่งเจือปนเหล่านี้ สามารถทำให้ลูกลอยแม่เหล็กมีโอกาสติดขัด ซึ่งจะเป็นผลทำให้ค่าระดับที่อ่านได้มีค่าไม่ถูกต้อง

ลูกลอยแม่เหล็กจะถูกออกแบบให้สามารถนำไปใช้งานกับของเหลวที่มีช่วงความหนาแน่นที่แน่นอน ถ้าค่าความหนาแน่นของดหลวที่นำไปใช้งานมีการเปลี่ยนแปลง นอกหนือจากย่านที่ออกแบบไว้ การแสดงผลจะไม่สามารถทำได้ ลูกลอยอาจจะจมลง ซึ่งจะเป็นจุดวิกฤติในการนำไปใช้งานกับของไหลที่เชื่อมต่อกัน

2. แบบสะท้อนแสง (Reflex Type)

เกจวัดระดับแบบนี้ใช้แก้วปริซึม (Prism) ซึ่งใช้ในการสะท้อนแสงจากของไหลหรือจากพื้นหลัง (Background) ของตัวเกจ ในการนำไปใช้ควรจะใช้กับของเหลวที่สะอาด, ใส, และไม่กัดกร่อน เกจวัดระดับแบบนี้จะไม่สามารถอ่านระดับที่เชื่อมต่อกันได้

3. แบบโปร่งแสง (Transparent)

เกจวัดระดับแบบนี้จะประกอบไปด้วยแผ่นกระจก 2 ชิ้นอยู่ตรงข้ามกันบนท่อ โดยจะให้ของไหลผ่านระหว่างกลาง เกจวัดระดับแบบโปร่งแสง ควรจะใช้กับของเหลวที่เป็นกรด, มีการกัดกร่อนสูง, สกปรกหรือมีสีทึบ, ไอน้ำความดันสูง, ของเหลวที่เชื่อมต่อกัน, หรือใช้งานกับบริเวณที่ต้องการแสงสว่างมาจากทางด้านหลัง และควรจะมีการเลือกใช้แบบที่มีฟิล์มบางป้องกันภายในตัวเกจถ้าของเหลวสามารถทำให้เกิดความเสียหายต่อกระจกได้ เช่น ไอน้ำที่มีความดันมากกว่า 600 Psig, Condensate, Hydrofluoric acid, Amines และ Caustic

4. แบบท่อแก้ว (Tubular)

เป็นเกจวัดระดับชนิดที่ทำด้วยหลอดแก้วที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกัน ในการนำไปใช้งานจะต้องได้รับการยินยอมจากผู้ใช้

การวัดระดับตามความสูง (High Measurement)

การวัดระดับตามความสูงจะแตกต่างจากการวัดระดับจากความดันเนื่องจากความสูง ค่าระดับที่อ่านได้จากความสูงไม่มีผลกระทบที่เกิดขึ้นจากค่าความถ่วงจำเพาะหรือความหนาแน่น อย่างไรก็ตามการอ่านค่าระดับจะมีผลกระทบมาจากการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบที่ละเอียดอ่อนในของเหลว ดังเช่น ค่าฉนวนไฟฟ้า (Dialectic), ช่วงระยะการเป็นไอ (Vapour Space), การเขย่า (Agitation), กระแสการไหลวน (Vortex) การวัดระดับตามความสูงเป็นการแสดงระดับผิวด้านบนของเหลว และมีความแม่นยำในการแสดงรายงานในรูปแบบปริมาณ (Volume) ในถัง แต่ไม่ได้แสดงผลรวมน้ำหนักของเหลวในถัง การวัดระดับตามความสูงจะมีข้อดีในการนำไปใช้งานในการป้องกันของเหลวล้นออกจากถัง

1. เครื่องมือวัดแบบคาแพซิสแตนซ์

เป็นการวัดระดับโดยการวัดค่าฉนวนไฟฟ้าระหว่างเซนเซอร์ที่จุ่มลงในของเหลวกับผนังของถัง และจะมีผลกับค่าความนำไฟฟ้าที่จะนำไปวัด

<u>ข้อดี</u>

ราคาไม่แพง, เหมาะสมกับการใช้งานกับความดันสูง, สามารถใช้ได้ดีในการใช้เป็นเครื่องมือวัดระดับสำรองสำหรับเครื่องมือวัดแบบอื่นๆ

<u>ข้อเสีย</u>

มีการใช้งานที่จำกัด, ของเหลวต้องมีค่าฉนวนไฟฟ้าที่คงที่, ยากในการปรับเทียบ และการตรวจสอบที่บริเวณใช้งาน, ไม่สามารถเปลี่ยนเซนเซอร์ในขณะที่กระบวนการผลิตทำงาน

2. เครื่องมือวัดระดับแบบไม่สัมผัส (Non-Contacting Instruments)

เทคโนโลยีการวัดระดับแบบไม่สัมผัสกับของเหลวที่มีใช้งานกันในอุสาหกรรมกระบวนการการผลิตจะประกอบไปด้วย Ultrasonic, Sonic, Radar และ Microwave เครื่องมือวัดระดับเหล่านี้จะวัดค่าระดับของเหลวโดยการคำนวณจากสัญญาณคลื่นสะท้อนกลับจากผิวด้านบนของของเหลว ด้วยการวัดระยะเวลาสะท้อนกลับของสัญญาณ

เทคโนโลยีการประมวลผลด้วยหน่วยประมวลกลางช่วยทำให้ค่าระดับที่ตรวจจับได้จากคลื่นสะท้อนกลับมีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น แต่ตัวแปรต่าง ๆ ในการใช้งานต้องมีการตรวจสอบอย่างระมัดระวังสำหรับการใช้งานต้องมีความถูกต้องและเหมาะสมกับเครื่องมือวัดระดับแบบนี้

เทคโนโลยี Radar และ Microwave สามารถนำไปใช้งานกับการวัดระดับที่มีค่าความดันและอุณหภูมิสูง และมีช่วงของไอที่บริเวณผิวด้านบน ซึ่งสามารถใช้งานได้ดีกว่าเทคโนโลยี Sonic และ Ultrasonic แต่ทั้งเทคโนโลยี Sonic และ Ultrasonic จะใช้งานได้ดีกับของเหลวที่ไม่มีค่าความนำไฟฟ้า

การติดตั้งเซนเซอร์สำหรับการวัดระดับแบบนี้จะมีความสำคัญ ถ้ามีสิ่งกีดขวางภายในถังจะทำให้ค่าที่อ่านได้ไม่แม่นยำ

ถ้าบริเวณด้านบนของเหลว มีหมอกหรือไอที่มีความความหนาแน่นสูง, มีไฮโดรคาร์บอนประกอบอยู่เป็นจำนวนมาก หรือมีฝุ่น ทำให้เครื่องมือวัดไม่สามารถทำงานได้ดี เนื่องจากมีการทำให้สัญญาณกระจายออกไป

นอกจากนั้นแล้วเครื่องมือวัดระดับแบบไม่สัมผัสยังนำไปใช้งานได้ดีกับของเหลวที่เป็นฟอง, โฟม หรือมีฟองอากาศผสมอยู่

เครื่องมือวัดระดับแบบ Ultrasonic ไม่ควรนำไปใช้งานกับบริเวณที่มีการกระเพื่อมของความดันไอในถัง หรือช่วงของไอ สำหรับการนำไปใช้งานกับของเหลวที่สามารถติดไฟได้ ต้องมีการเลือกใช้เซนเซอร์ที่เหมาะสมกับการป้องกันการเกิดประกายไฟจากตัวเซนเซอร์

เครื่องมือวัดระดับแบบไม่สัมผัสทั้งหมดอาจจะถูกนำไปใช้งานได้กับประเภทต่าง ๆ ดังนี้ ถ้ามีการเลือกใช้วิธีการที่เหมาะสม

a) ของเหลวที่สกปรก
b) ของเหลวที่มีการเกาะติด
c) ของเหลวที่มีการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบ ดังเช่น ความหนาแน่น, อุณหภูมิ, ความนำไฟฟ้า, คาแพซิสแตนซ์ หรือคุณลักษณะอื่น ๆ
d) ของเหลวมีการสั่นหรือมีคลื่นที่ผิวหน้า
e) ของเหลวที่กลัดกร่อน
f) บ่อเก็บของเสีย

<u>ข้อดี</u>

เครื่องมือวัดแบบไม่สัมผัสกับของเหลวควรจะพิจารณาในการใช้งานกับของเหลวที่มีการกัดกร่อน, เป็นพิษและมีความหนืดสูง, มีส่วนผสมเส้นใย และในถังเก็บที่มีรูปทรงที่ไม่เป็นระเบียบ หรือใช้งานกับกระบวนการผลิตที่สามารถทำความเสียหายกับเครื่องมือวัดได้

<u>ข้อเสีย</u>

เครื่องมือวัดแบบไม่สัมผัสจะไม่มีแบบสำเร็จรูปให้เลือกใช้จึงต้องมีการปรึกษากับผู้ผลิต เพื่อนำข้อมูลมาใช้ในการออกแบบถัง ในบางครั้งเพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดในการเลือกใช้

เครื่องมือวัดแบบไม่สัมผัสมีเทคโนโลยีการทำงานที่ซับซ้อน การติดตั้งและการแก้ปัญหาต่าง ๆ ต้องการบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญ และบ่อยครั้งต้องใช้เครื่องมือพิเศษในการปรับเทียบ

3. เครื่องมือวัดแบบ Nuclear

เครื่องมือวัดระดับแบบนี้จะมีแหล่งกำเนิดรังสีและตัวรับ (Radiation source and Detector) โดยหลักการทำงานจะให้แหล่งกำเนิดรังสีแพร่รังสีผ่านถังและของเหลวที่ต้องการวัดระดับไปยังตัวรับที่อยู่อีกด้านหนึ่งของถัง ปริมาณของเหลวในถังจะเป็นตัวดูดซับรังสีหรือป้องกันปริมาณรังสีที่จะผ่านไปยังตัวรับ

การออกแบบเครื่องมือวัดระดับแบบนี้ต้องมีการจัดเตรียมส่วนป้องกันแหล่งกำเนิดรังสี ที่สามารถป้องกันรังสีให้อยู่ภายในส่วนที่ห่อหุ้ม และต้องสามารถส่งสัญญาณเตือนระบบการป้องกันเมื่ออยู่ในสภาวะต่าง ๆ

การใช้งานจะเหมาะสมกับบริเวณที่ยากต่อการวัดระดับด้วยเครื่องมือวัดแบบอื่น ๆ ดังนี้

- มีความหนืดและสกปรกจนไม่สามารถวัดด้วยวิธีอื่นได้
- ของเหลวมีโอกาสเกิดโพลิเมอร์
- ของเหลวที่เย็นจัด (Cryogenic
- ของเหลวที่มีอากาศปะปน
- มีความเป็นพิษ
- ของเหลวผสมของแข็ง

<u>ข้อดี</u>

สามารถวัดระดับโดยไม่ต้องสัมผัสของเหลวที่ต้องการวัด, ใช้งานกับการวัดระดับที่ยากในการเลือกใช้เครื่องมือวัดระดับอื่น ๆ , มีความแม่นยำสูง ถ้ามีการปรับเทียบอย่างถูกต้อง, ไม่ต้องมีการเจาะถัง

<u>ข้อเสีย</u>

มีราคาแพง, มีโอกาสเกิดอันตรายกับผู้ปฏิบัติ ดังนั้นต้องมีการจัดเตรียมเอกสารขั้นตอนการใช้งาน, การตรวจสอบ, การติดตั้ง เพื่อเป็นข้อปฏิบัติให้กับผู้ใช้งาน

ในการใช้งานบางประเภทต้องการแหล่งกำเนิดรังสีที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งจะทำให้ระยะเวลาในการจัดหานานขึ้น , มีค่าใช้จ่ายที่สูง และต้องมีการติดตั้งแบบพิเศษ

อุปกรณ์และขั้นตอนในการป้องกันแหล่งกำเนิดรังสีต้องมีการจัดเตรียมเพื่อความปลอดภัยในการซ่อมบำรุง, ต้องมีการฝึกอบรมให้กับผู้ใช้งานและผู้ซ่อมบำรุง, มีความต้องการเครื่องมือพิเศษ, ต้องมีการแต่งตั้งผู้รับผิดชอบทางด้านผู้ใช้งาน เพื่อทำการประสานงานกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งทางด้านข้อปฏิบัติและข้อกฎหมาย

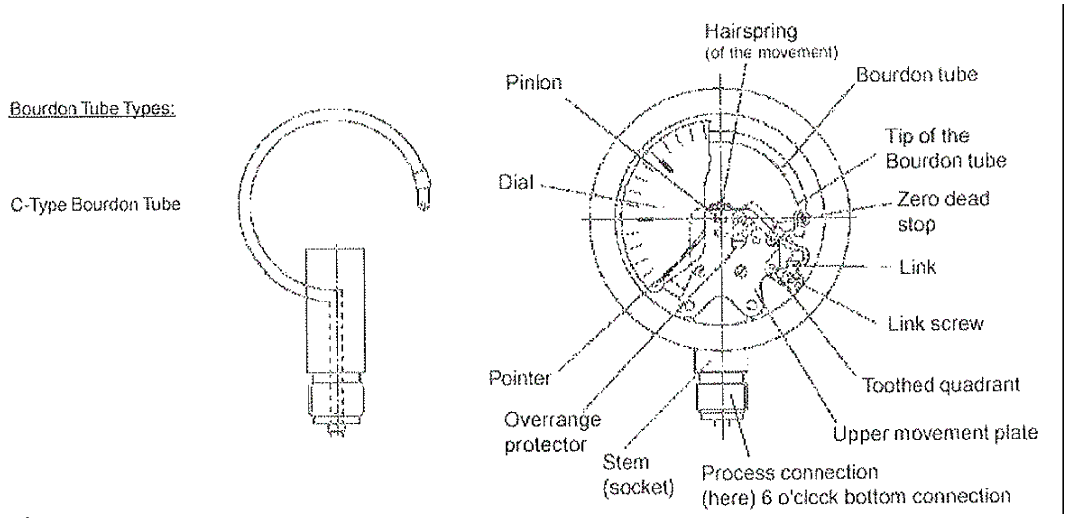
เครื่องมือวัดแบบนี้จะมีความไวต่อรังสีที่ใช้ในการตรวจสอบท่อ ดังนั้นอาจทำให้เกิดค่าความผิดพลาดขึ้นได้

LEVEL APPLICATION TABLE

Head measurement	Advantages								Disadvantages									
	Inexpensive	Not complex	Good for difficult applications	Not contact	Good for liquids	Good for solids	High accuracy	Good for interface measurement	High initial cost	Complex	Precautions for safe installation	Requires engineering the	Introduces foreign material to	Sensitive for dirty process	Need special license	Contains moving parts	Not good for agitated vessel	Not suitable for high temperature
Diff Pressure	X	X			X			X						X				
Purged systems	X				X								X					
Remote seals			X		X							X						
Displacer		X			X			X						X		X	X	
Level gauge	X	X			X			X						X				
High measurement																		
Capacitance			X		X	X		X				X		X			X	
Electromechanical switch	X	X			X	X								X		X	X	
Non-contact			X	X	X	X				X		X						X
Nuclear			X	X	X	X			X	X	X	X			X			
Floats	X	X			X		X							X		X	X	
Tank gauging					X		X		X	X		X				X	X	
Weight system			X	X	X	X	X		X	X	X	X						

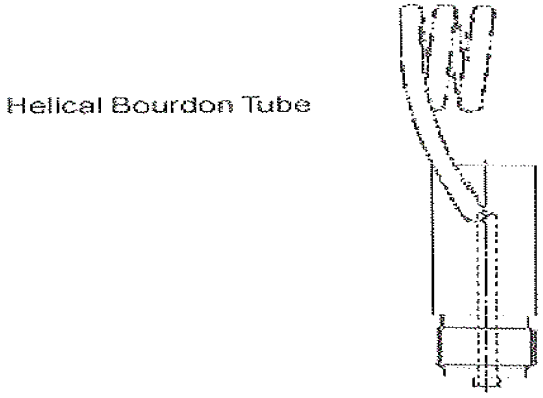
เกจวัดความดันชนิดหลอด Bourdon (Pressure gauge with Bourdon tube)

หลอด Bourdon เป็นหลอดรูปกลมรี (Oval) ทำให้เป็นส่วนโค้งของวงกลมมีด้านหนึ่งถูกยึดให้อยู่กับที่ ส่วนอีกปลายด้านหนึ่งปล่อยให้เป็นอิสระ โดยค่าความดันที่ต้องการวัดจะถูกต่อเข้ากับส่วนที่อยู่กับที่ งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 49



รูปที่ 49 Pressure gauge with Bourdon tube

จากรูป 49 เมื่อปล่อยความดันให้เข้าไปอยู่ภายในหลอดรูปกลมรี ซึ่งความดันที่ปล่อยเข้าไปนี้จะทำให้หลอดรูปกลมรี ด้านที่เป็นอิสระมีส่วนโค้งที่ถูกเปลี่ยนรูปไป ผลกระทบที่เกิดขึ้นทำให้เกิดความเครียดที่ด้านปลายทำให้หลอดรูปกลมรีนี้ นี้เคลื่อนที่เป็นแนวโค้ง ซึ่งการเคลื่อนที่นี้จะสามารถนำไปปรับเทียบเพื่อใช้ในการวัดความดันที่ต่ออยู่ได้ ส่วนโค้งของหลอดรูปกลมรีที่มีใช้งานกันอยู่ทั่วไปจะมีส่วนโค้งเป็นมุม 270 องศา สำหรับในการวัดความดันสูง ๆ จะใช้หลอดรูปกลมรีที่มีรูปร่างเป็นเหมือนขดลวดหลาย ๆ รอบ (Helicon Bourdon tube) หลอดรูปกลมรีนี้จะมีค่าการกลับสู่สภาพเดิมต่ำ (Low restore) ดังนั้นจึงต้องมีการระวังในการใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อื่น ๆ เพื่อลดผลกระทบจากค่าที่อ่านได้ ดังสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 50



รูปที่ 50 Helicon Bourdon tube

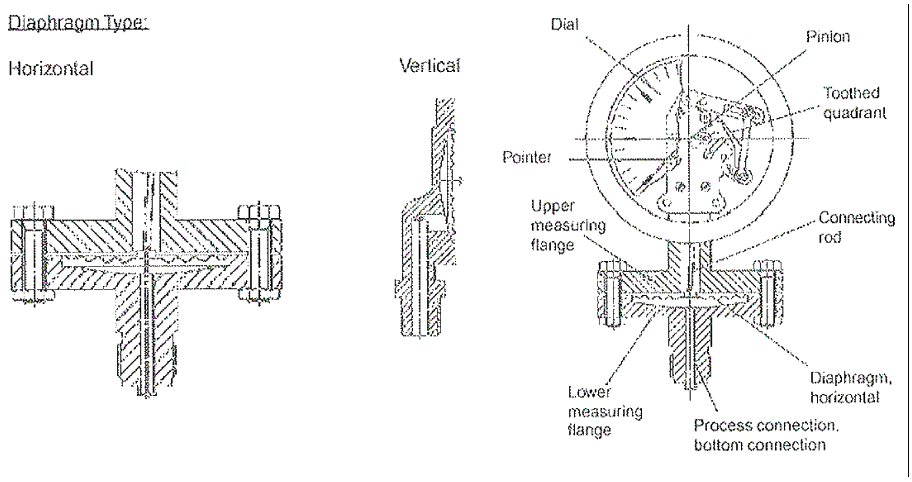
ความแม่นยำของเกจวัดความดันแบบหลอดรูปกลมรี จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.6 % ถึง 2.5 % ซึ่งจะเป็นแบบที่มีใช้งานกันในอุตสาหกรรมทั่วๆ ไป สำหรับใช้ในการวัดค่าความดันระหว่าง 0.6 บาร์ ถึง 4000 บาร์ เนื่องจากหลอดรูปกลมรีทำขึ้นมาจากโลหะ ดังนั้นจึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้จากอิทธิพลของอุณหภูมิ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์

ทางอุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ทำหลอดรูปกลมรี ความคลาดเคลื่อนของการวัดที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิอ้างอิงจะอยู่ระหว่าง 0.3 – 0.6 % ต่อ 10 K (องศาเคลวิน)

เกจวัดความดันแบบไดอะแฟรม (Diaphragm pressure gauge)

ไดอะแฟรมจะมีลักษณะของพื้นผิวเป็นแบบลูกฟูก (Corrugated) ในรูปวงกลม ค่าความดันที่ต้องการวัดจะกดอยู่ที่ด้านหน้าของแผ่นไดอะแฟรม การวัดค่าความดันได้จากการเคลื่อนที่ของไดอะแกรม ซึ่งไดอะแฟรมจะมีแรงดันคืนตัวสูง ดังนั้นผลกระทบจากอุปกรณ์ที่ติดตั้งเพิ่มเติมเข้าไปจึงมีค่าน้อยกว่าแบบหลอดรุกลมรี ในบางครั้งจะมีการจัดรูปแบบไดอะแฟรมในรูปวงแหวนเพื่อช่วยลดผลกระทบจากการสั่นทะเทือน การปกป้องผิวหน้าไดอะแฟรมด้วยวัสดุชนิดต่าง ๆ เป็นชั้นบาง ๆ จะใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนจากของไหลที่นำไปใช้งาน นอกจากนั้นแล้วข้อดีของไดอะแฟรม สามารถนำไปใช้กับของไหลที่มีความหนืด หรือมีส่วนผสมของแข็งได้

โดยทั่วไปแล้วย่านการวัดจะอยู่ต่ำกว่า 0.6 บาร์ และจะถูกใช้งานที่ย่านการวัดระหว่าง 10 มิลลิบาร์ ถึง 25 บาร์ ค่าความแม่นยำจะอยู่ระหว่าง 1.6 ถึง 2.5 %

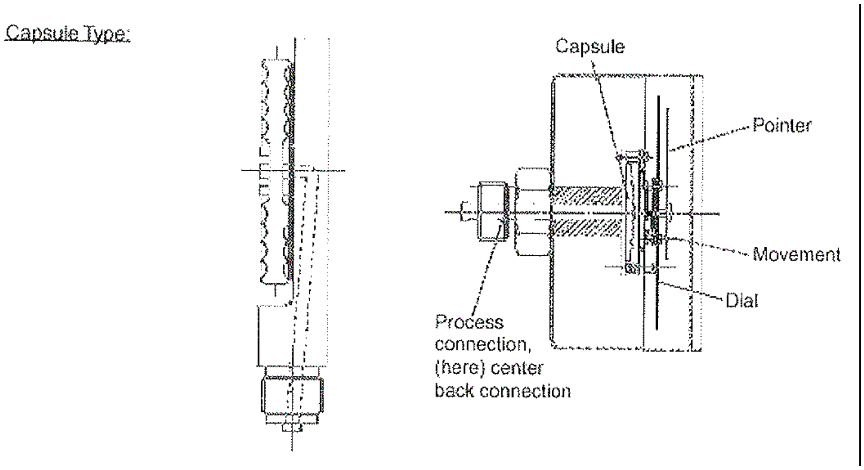


รูปที่ 51 Pressure gauge Diaphragm type

เกจวัดความดันแบบแคปซูล (Capsule pressure gauge)

เกจวัดความดันแบบแคปซูลจะใช้ไดอะแฟรมแบบลูกฟูกวงกลมประกบกันโดยให้ความดันที่ต้องการวัดเข้าไปตรงกลาง เป็นผลทำให้เกิดการเคลื่อนที่ เกจวัดความดันแบบนี้จะไม่เหมาะกับของไหลที่เป็นของเหลว จะมีใช้งานในย่านความดันต่ำ ๆ จาก 2.5 มิลลิบาร์ ถึง 600 มิลลิบาร์ ที่ค่าความแม่นยำระดับ 0.6 ถึง 1.6% ความคลาดเคลื่อนของ

การวัดที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิที่แตกต่างจากอุณหภูมิอ้างอิงจะอยู่ระหว่าง 0.3 – 0.4 % ต่อ 10 K (องศาเคลวิน) ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำไดอะแฟลม

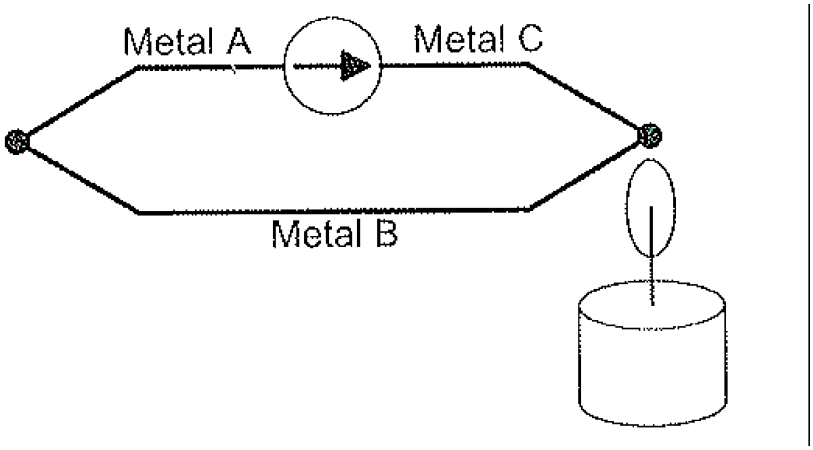


รูปที่ 52 Pressure gauge Capsule Type

เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

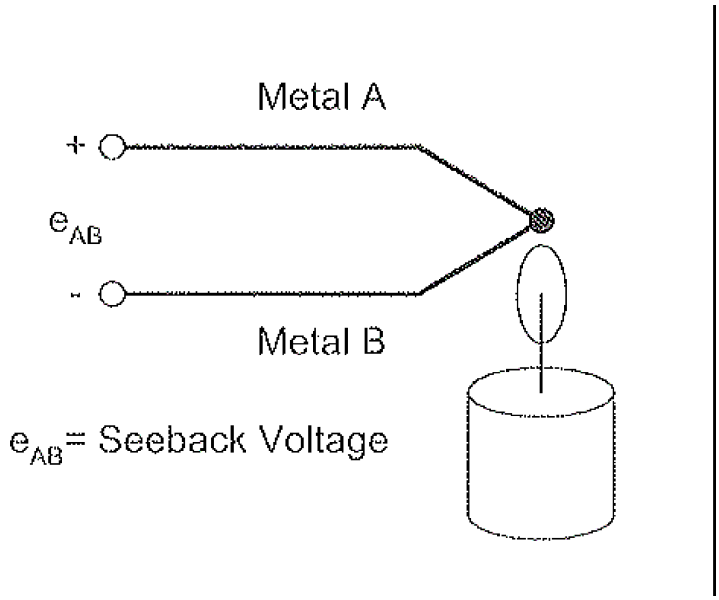
เทอร์โมคัลเปิลเป็นเซนเซอร์พื้นฐานสำหรับใช้วัดอุณหภูมิในอุสาหกรรมการผลิตประเภทต่าง ๆ และเป็นที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เทอร์โมคัปเปิลเป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและมีราคาไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับอุปกรณ์การวัดอุณหภูมิประเภทอื่น ๆ เทอร์โมคัปเปิลจะเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานกับอุณหภูมิที่สูง ๆ เพื่อให้เข้าใจในหลักการทำงานของเทอร์โมคัปเปิลและส่วนประกอบต่าง ๆ ที่มีความจำเป็นในการนำไปใช้งานและสำหรับเป็นพื้นฐานในการเลือกใช้งานเทอร์โมคัปเปิลกับอุสาหกรรมการผลิตได้อย่างเหมาะสม ในหัวข้อนี้จะแสดงรายละเอียดเกี่ยวกับการทำงานของเทอร์โมคัปเปิล หลักการในการเลือกใช้งานเทอร์โมคัปเปิล แสดงส่วนประกอบอื่น ๆ ที่จำเป็นสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมการะบวนการผลิต

หลักการทำงานพื้นฐานเกิดขึ้นจากการนำโลหะต่างชนิดกันมาเชื่อมต่อกันที่ปลายทั้งสองข้าง และเมื่อให้ความร้อนที่ปลายด้านใดด้านหนึ่งจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลอย่างต่อเนื่อง ซึ่งการไหลของกระแสจะเป็นไปตามความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนกับไฟฟ้า เป็นปรากฏการณ์ที่ค้นพบโดย Thomas Seebeck ในปี ค.ศ. 1821 วงจรของการเชื่อมต่อโลหะต่างชนิดกันแสดงได้ดังรูปที่ 53



รูปที่ 53 ปรากฏการณ์ของ Seebeck

จากรูปที่ 53 ถ้าทำการตัดแยกวงจรนี้ที่จุดกึ่งกลาง จะพบว่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่จุดปลายทั้งสองของโลหะจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิที่บริเวณจุดต่อและองค์ประกอบของโลหะทั้งสองชนิดดังแสดงในรูปที่ 54



รูปที่ 54 แรงดันไฟฟ้า Seebeck

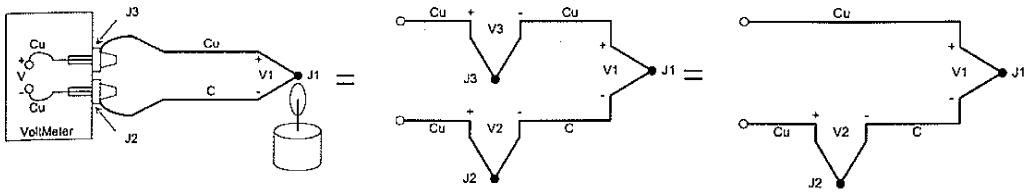
จากรูปที่ 54 แรงดันไฟฟ้า Seebeck จะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นกับอุณหภูมิหรือสามารถเขียนสมการของแรงดันไฟฟ้า Seebeck ได้ดังนี้

$$\Delta e_{AB} = \alpha \Delta T \qquad (1)$$

เมื่อ α = ค่าสัมประสิทธิ์ของ Seebeck (Seebeck Coefficient)

การวัดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากเทอร์โมคัปเปิล

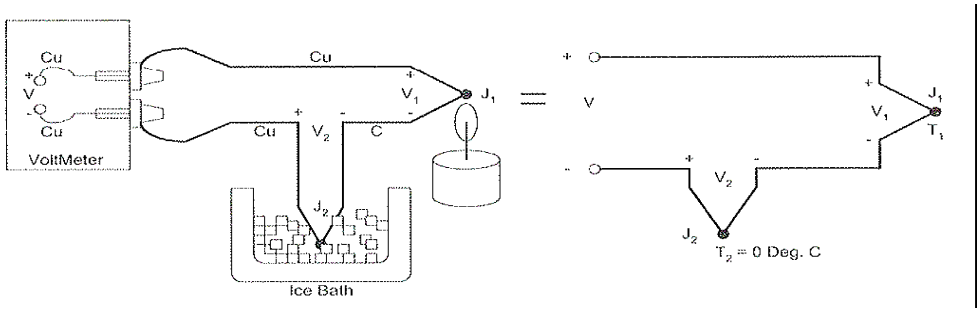
การวัดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากเทอร์โมคัปเปิลไม่สามารถใช้โวลท์มิเตอร์ต่อวัดโดยตรงที่ปลายทั้งสองด้านของเทอร์โมคัปเปิล เพราะค่าแรงดันเอาต์พุตที่อ่านได้จากโวลท์มิเตอร์จะไม่ใช่ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิที่จุดปลายสุดที่ต้องการ เนื่องจากในการวัดจะต้องทำการต่อสายไฟจากโวลท์มิเตอร์ที่เป็นทองแดง (Copper) ไปยังปลายของเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งในการต่อสายไฟนี้จะทำให้เกิดจุดต่อระหว่างโลหะที่แตกต่างกันขึ้นอีก ดังตัวอย่างต่อไปนี้ เมื่อทำการต่อสายไฟจากโวลท์มิเตอร์ที่เป็นทองแดงไปยังเทอร์โมคัปเปิลชนิด T ซึ่งเป็นเทอร์โมคัปเปิลที่ประกอบด้วยโลหะชนิด ทองแดงกับคอนสแตนแตน (Copper-Constantan) ดังแสดงในรูปที่ 55



รูปที่ 55 การวัดแรงดันไฟฟ้าจากเทอร์โมคัปเปิลด้วยโวลท์มิเตอร์

จากรูปที่ 55 แรงดันไฟฟ้าที่ต้องการวัดคือแรงดันไฟฟ้า V_1 แต่เมื่อทำการต่อสายไฟจากโวลท์มิเตอร์เข้ากับปลายทั้งสองข้างของเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิที่จุดต่อ J_1 จะเห็นได้ว่าในการต่อจะทำให้เกิดจุดต่อใหม่ของโลหะ 2 จุดคือจุดต่อ J_2 และ J_3 เมื่อจุดต่อ J_3 เป็นจุดต่อระหว่างโลหะชนิดเดียวกันระหว่างทองแดงกับทองแดง (Copper-Copper) ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากจุดต่อนี้เนื่องมาจากอุณหภูมิมีค่าเป็นศูนย์ ($V_3 = 0$) แต่ที่จุดต่อ J_2 เป็นจุดต่อระหว่างโลหะที่ต่างชนิดกันระหว่างทองแดงกันคอนสแตนแตน (Copper-Constantan) ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าจากจุดต่อนี้เนื่องมาจากอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางที่ตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้า V_1 ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านค่าได้จากโวลท์มิเตอร์จะเป็นสัดส่วนของความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของจุดต่อ J_1 กับ J_2 หรืออาจกล่าวได้ว่าถ้าต้องการรู้ค่าอุณหภูมิที่จุดต่อ J_1 จะต้องรู้ค่าอุณหภูมิที่จุดต่อ J_2 ก่อน

วิธีการหนึ่งในการหาค่าอุณหภูมิที่จุดต่อ J_2 ทำได้โดยการจุ่มจุดต่อ J_2 ลงในอ่างน้ำแข็ง (Ice Bath) เพื่อบังคับให้อุณหภูมิที่จุดต่อ J_2 นี้มีค่าเป็น 0 องศาเซลเซียสและกำหนดให้จุดต่อ J_2 เป็นจุดอ้างอิง (Reference Point) และจุดต่อที่ขั้วของโวลท์มิเตอร์ทั้งสองข้างจะเป็นการต่อกันระหว่างทองแดงกับทองแดง ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากจุดต่อนี้และแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากโวลท์มิเตอร์จึงเป็นสัดส่วนกับความแตกต่างของอุณหภูมิที่จุดต่อ J_1 กับ J_2 ดังแสดงในรูปที่ 56



รูปที่ 56 การใช้จุดอ้างอิงจากภายนอก

จากรูปที่ 56 จะสามารถเขียนสมการแรงดันไฟฟ้าที่อ่านค่าได้ที่โวลท์มิเตอร์ได้ดังนี้

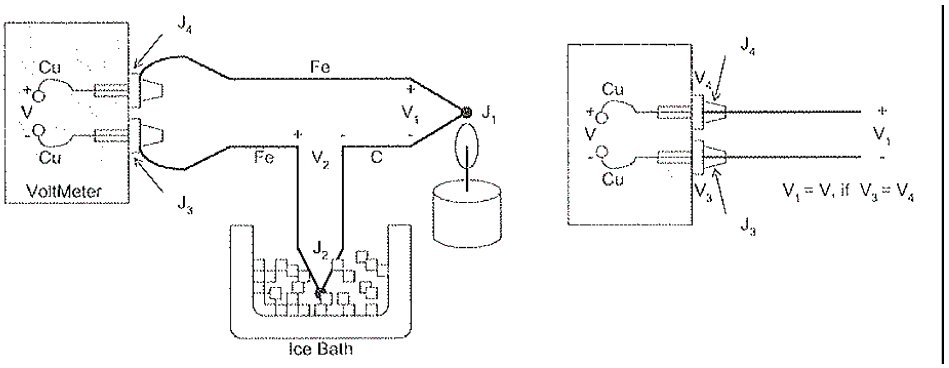
$$V = (V_1 - V_2) \cong \alpha(T_{J1} - T_{J2}) \quad (1)$$

หรือ $$V = \alpha(T_{J1} - 0) \quad (2)$$

$$V = \alpha\ T_{J1} \quad (3)$$

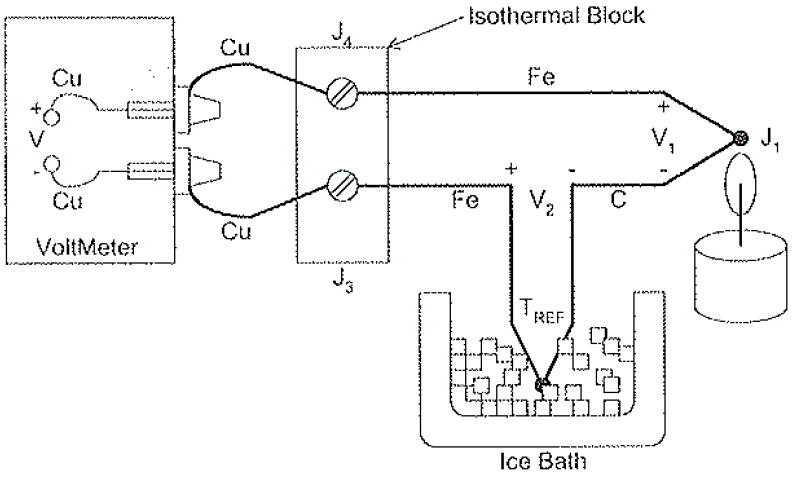
การใช้จุดต่ออ้างอิงโดยการใช้จุดต่อจุ่มลงในอ่างน้ำแข็ง เป็นการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (V) ที่อุณหภูมิอ้างอิงที่ 0 องศาเซลเซียส วิธีการนี้เป็นวิธีที่มีความแม่นยำมากเนื่องจากสามารถควบคุมอุณหภูมิที่จุดอ้างอิงได้ NBS (National Bureau Standards) ใช้จุดอ้างอิงที่จุดเยือกแข็งเป็นจุดอ้างอิงมาตรฐานสำหรับใช้แสดงตารางค่าแรงดันไฟฟ้าของเทอร์โมคัปเปิลชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิค่าต่าง ๆ

การต่อโวลท์มิเตอร์ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าจากเทอร์โมคัปเปิลชนิด T ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 7.4 เป็นตัวอย่างที่มีลักษณะเฉพาะเนื่องจากมีโลหะที่เป็นทองแดงซึ่งจะเป็นโลหะที่เหมือนกับโลหะของสายไฟและจุดต่อของโวลท์มิเตอร์ ถ้าทำการเปลี่ยนชนิดของเทอร์โมคัปเปิลเป็นชนิด J ที่ประกอบด้วยโลหะเหล็กกับคอนสแตนแตน (Iron-Constantan) โลหะเหล็กจะทำให้เพิ่มจำนวนจุดต่อของโลหะที่ต่างชนิดกัน ดังแสดงในรูปที่ 57



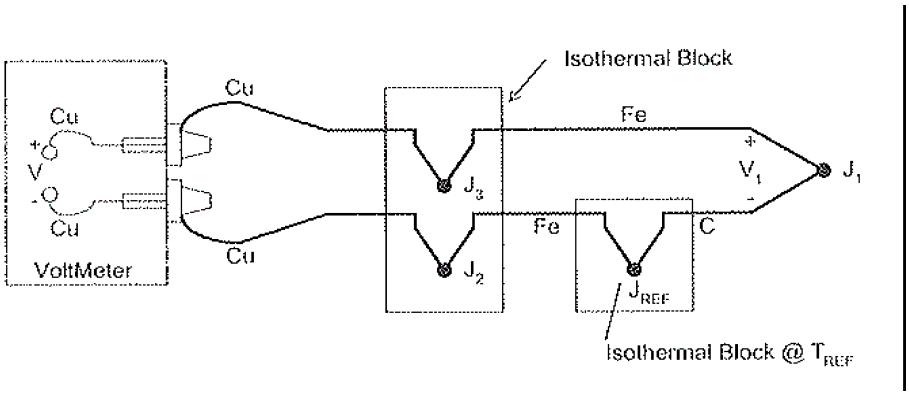
รูปที่ 57 แสดงการหักล้างแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากจุดต่อที่เพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 57 จะทำให้จุดต่อที่โวลท์มิเตอร์เป็นจุดต่อของทองแดงกับเหล็ก (Cu-Fe) จะทำให้เกิดความผิดพลาดในการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้า V เมื่อต่อจุด J_3 และ J_4 มีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน เพื่อให้การอ่านค่ามีความแม่นยำมากขึ้น สามารถทำได้โดยการขยายจุดต่อของโวลท์มิเตอร์หรือจุดต่อของโลหะเหล็กกับทองแดงออกไปและทำให้จุดต่อนี้อยู่ในอุณหภูมิค่าเดียวกันซึ่งจะเรียกจุดต่อนี้ว่า Isothermal Block ดังแสดงในรูปที่ 58



รูปที่ 58 จากขยายจุดต่อออกไปจากโวลท์มิเตอร์

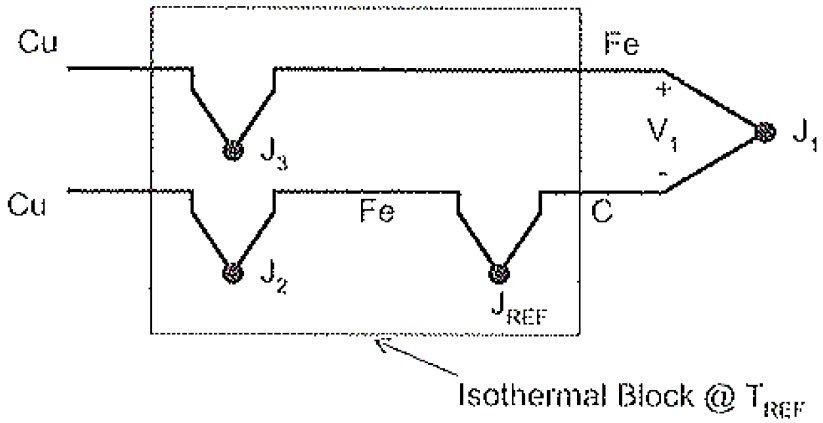
Isothermal Block จะเป็นฉนวนทางไฟฟ้าแต่จะเป็นตัวนำความร้อนที่ดีเพื่อทำให้อุณหภูมิที่จุดต่อ J_3 และ J_4 มีอุณหภูมิที่เท่ากัน อุณหภูมิอ้างอิงที่บริเวณ Isothermal Block จะไม่มีความสำคัญเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากจุดต่อ J_3 และ J_4 มีทิศทางที่ตรงข้ามกัน ซึ่งแรงดันไฟฟ้า V_1 ยังคงเท่ากับ $\alpha(T_{J1}-T_{REF})$ ถ้าทำการเปลี่ยนอ่างน้ำแข็งจากรูปที่ 58 ไปเป็น Isothermal Block ดังแสดงในรูปที่ 59



รูปที่ 59 การเปลี่ยนอ่างน้ำแข็งด้วย Isothermal Block

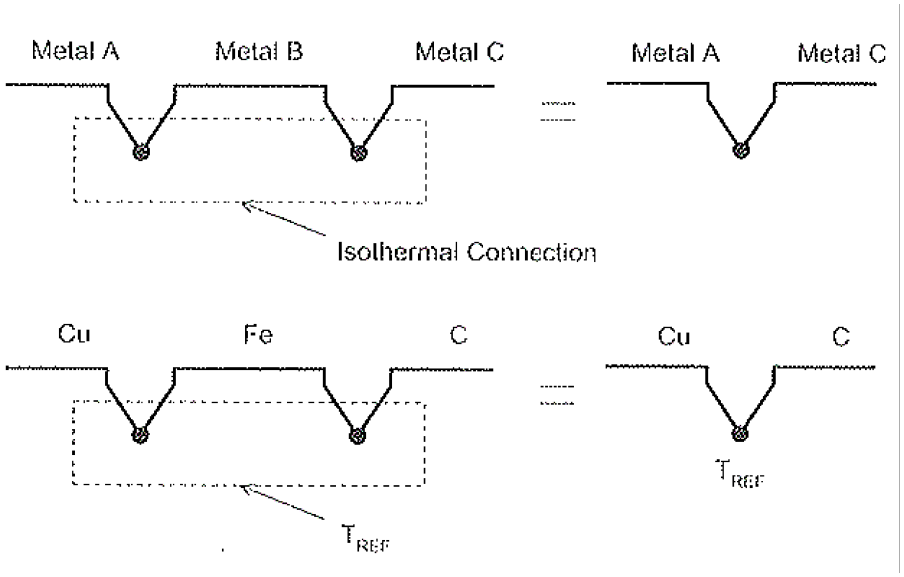
Isothermal Block ใหม่ที่เพิ่มขึ้นจะใช้เป็นอุณหภูมิอ้างอิง (T_{REF}) เพราะว่าจุดต่อ J3 และ J4 มีค่าอุณหภูมิที่เท่ากันสามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่โวลท์มิเตอร์ได้เท่ากับ $V = \alpha(T_{J1} - T_{REF})$

จากรูปที่ 59 จะเห็นได้ว่าวงจรเทอร์โมคัปเปิลดังกล่าวยังไม่สะดวกในการใช้งาน เนื่องจากต้องมีจุดต่อถึง 2 จุด ถ้าทำการลดบริเวณที่ทำการต่อสาย โดยการรวมจุดต่อทั้งสามจุดคือ จุดต่อ J_3, J_4 และ J_{ref} ให้อยู่บน Isothermal Block เดียวกันและให้อุณหภูมิที่ Isothermal Block เป็นอุณหภูมิอ้างอิง ดังแสดงในรูปที่ 60



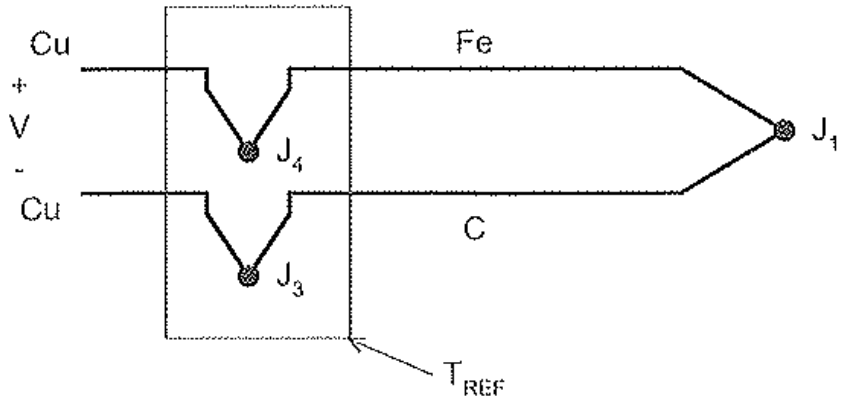
รูปที่ 60 การรวม Isothermal Block เป็นจุดเดียวกัน

รูปที่ 7.8 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากเทอร์โมคัปเปิล ยังคงมีค่าเท่ากับ $V = \alpha(T_{J1} - T_{REF})$ ดังนั้น จึงสามารถสรุปเป็นหลักการสำหรับใช้ลดจุดต่อที่เพิ่มขึ้นมา โดยสรุปได้ว่า เมื่อมีโลหะชนิดที่สามต่ออยู่ระหว่างโลหะที่ต่างชนิดกันสองชนิดและจุดต่อของโลหะชนิดที่สามทั้งสองจุดอยู่ในอุณหภูมิเดียวกัน จะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากจุดต่อทั้งสองจะไม่มีผลกระทบต่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากเทอร์โมคัปเปิล ดังแสดงในรูปที่ 61



รูปที่ 61 การลดจำนวนจุดต่อของโลหะที่อยู่ระหว่างโลหะสองชนิด

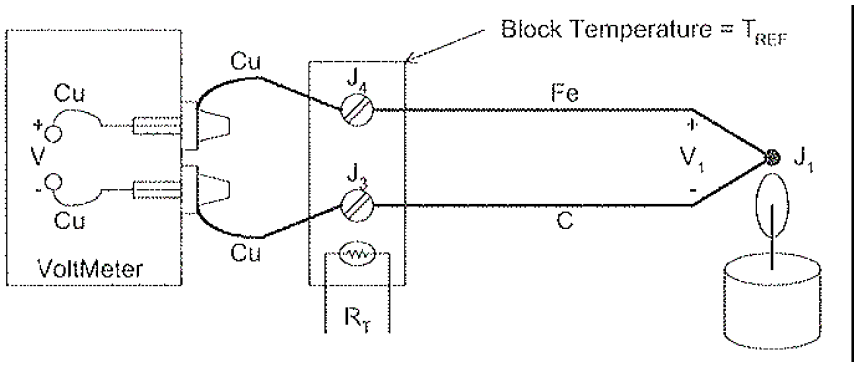
จากข้อสรุปดังกล่าวจะเป็นประโยชน์อย่างมากในสำหรับใช้ลดจำนวนจุดต่อของสายเหล็ก (Fe) ดังแสดงในรูปที่ 62



รูปที่ 62 การลดจำนวนจุดต่อของสายเหล็ก

จากรูปที่ 62 จะเห็นได้ว่าสายทองแดง (Cu) ที่ต่อไปยังโวลท์มิเตอร์จะเป็นจุดต่อโลหะที่แทรกอยู่ระหว่างสายเหล็ก (Fe) และสายคอนสแตนแตน (C) ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากจุดต่อทั้งสองจึงเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากจุดต่อของสายเหล็กและสายคอนสแตนที่อุณหภูมิอ้างอิง จึงทำให้แรงดันแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจะเท่ากับ $V = \alpha(T_{J1} - T_{REF})$ เมื่อ α เป็นสัมประสิทธิ์ Seebeck สำหรับเทอร์โมคัปเปิลแบบ เหล็กกับคอนสแตนแตน

ถ้าให้จุดต่อทั้งสอง J_3 และ J_4 จุ่มอยู่ในอ่างน้ำแข็งเพื่อทำให้จุดต่อทั้งสองเป็นจุดอ้างอิง ในทำนองเดียวกันจึงต้องมีการหาค่าอุณหภูมิที่ Isothermal Block และใช้ข้อมูลดังกล่าวสำหรับใช้ในการนำไปคำนวณหาค่าอุณหภูมิที่จุด T_{J1} ดังแสดงในรูปที่ 63



รูปที่ 63 การใช้จุดอ้างอิงโดยไม่ใช้อ้างน้ำแข็ง

R_T จะเป็นความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ซึ่งจะใช้เป็นข้อมูลในการหาค่าอุณหภูมิที่ Isothermal Block หรือที่จุดอ้างอิง ในการออกแบบ Isothermal Block จะกำหนดให้มีอุณหภูมิค่าเดียวกัน การหาค่าอุณหภูมิที่จุดปลายด้วยการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ สามารถทำได้ดังนี้

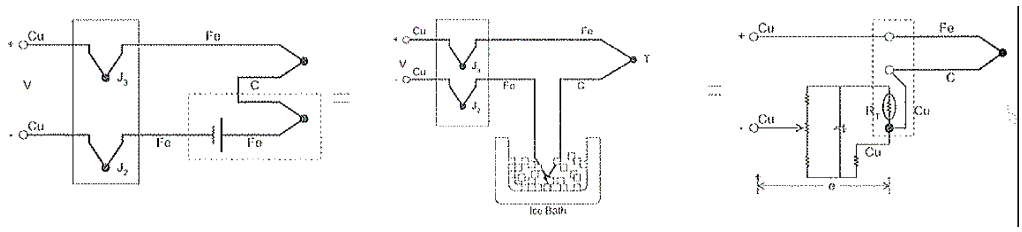
1. ทำการวัดค่า R_T เพื่อหาค่า T_{REF} และทำการเปลี่ยนค่า T_{REF} ไปเป็นแรงดันไฟฟ้าที่จุดอ้างอิง V_{REF} ตามชนิดของเทอร์โมคัปเปิล
2. หาค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุด J_1 ได้ด้วยการใช้แรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากโวล์มิเตอร์ลบด้วยแรงดันไฟฟ้าที่จุดอ้างอิง (V_{REF}) จากนั้นทำการเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้ไปเป็นอุณหภูมิที่จุด J_1

หลักการดังกล่าวข้างต้นเรียกว่า การชดเชยทางโปรแกรม (Software Compensation) เนื่องจากอาศัยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ในการชดเชยผลกระทบจากจุดต่ออ้างอิง ตัววัดอุณหภูมิที่ Isothermal Block สามารถเลือกใช้อุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิชนิดต่าง ๆ ได้

การชดเชยทางโปรแกรมจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลจากหลาย ๆ จุด โดยให้เทอร์โมคัปเปิลหลายตัวต่อผ่านกล่องกวาดตรวจสัญญาณ (Scanner Box) ด้วยเทคนิคนี้สามารถเลือกใช้เทอร์โมคัปเปิลที่แตกต่างชนิดกันได้ และทำการติดตั้งตัวตรวจจับอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางกล่องกวาดตรวจสัญญาณ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการเปลี่ยนค่าในคอมพิวเตอร์ แต่ก็ยังมีข้อเสียคือระบบคอมพิวเตอร์ต้องใช้เวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้นในการคำนวณอุณหภูมิที่จุดอ้างอิง สำหรับการใช้งานที่ต้องการความเร็วสูง ๆ จึงควรเปลี่ยนไปเลือกใช้การชดเชยด้วย Hardware

การชดเชยแรงดันไฟฟ้าด้วย Hardware (Hardware Compensation)

นอกจากการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณหาค่าอุณหภูมิที่ต้องการแล้ว ยังสามารถทำได้อีกวิธีหนึ่งโดยการใส่แหล่งจ่ายแรงดันหรือแบตเตอรี่ เข้าไปในวงจรการวัดแรงดันไฟฟ้าจากเทอร์โมคัปเปิลเพื่อใช้สำหรับหักล้างกับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากอ้างอิง ซึ่งวิธีนี้เรียกว่าการชดเชยด้วย Hardware โดยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่จะนำไปใช้หักล้างนั้นจะมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่จากจุดต่อที่อุณหภูมิอ้างอิงหรือที่ 0 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 64



รูปที่ 64 การชดเชยด้วย Hardware

แรงดันไฟฟ้าชดเชย (e) จะเป็นสัดส่วนกับความต้านทานของตัวตรวจจับอุณหภูมิ (R_T) แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (V) จะเป็นแรงดันไฟฟ้าที่อ้างอิงกับอุณหภูมิที่ 0 องศาเซลเซียส หรือสามารถอ่านค่าอุณหภูมิได้จากตารางการแปลงค่า

ข้อดีของการชดเชยด้วย Hardware ทำให้สามารถลดเวลาในการประมวลผลหาค่าอุณหภูมิของคอมพิวเตอร์ลงได้สองขั้นตอนและทำให้เทคนิคการวัดแบบนี้มีความเร็วในการทำงานมากกว่าการใช้การชดเชยทางโปรแกรม

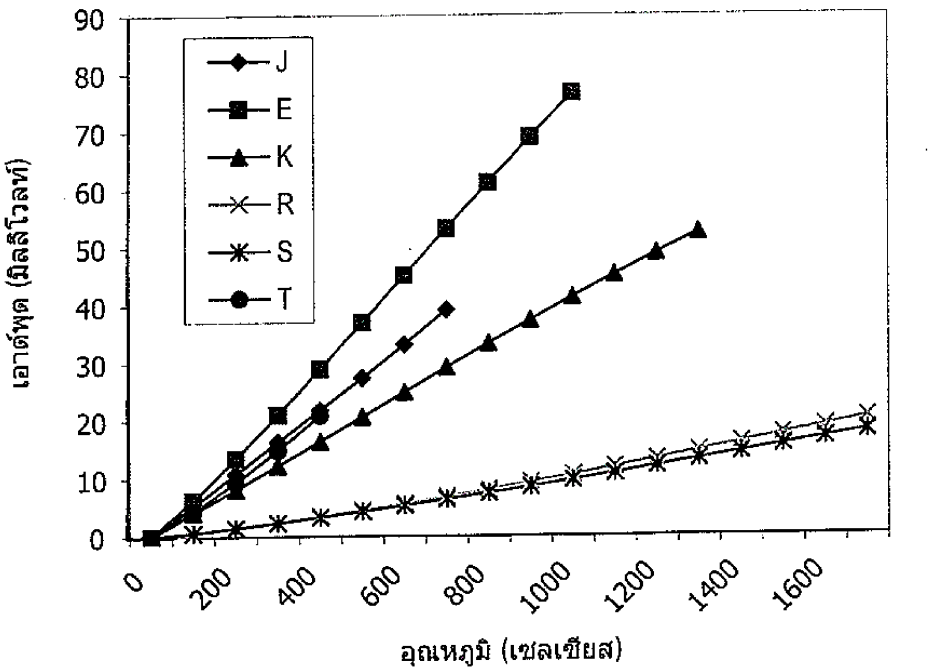
การแปลงค่าอุณหภูมิกับแรงดันไฟฟ้า (Voltage to Temperature Conversion)

หัวข้อที่ผ่านมาเป็นหลักการทำงานของเทอร์โมคัปเปิลและวิธีการชดเชยอุณหภูมิที่จุดอ้างอิงด้วย วิธีการทางโปรแกรมและ Hardware เทอร์โมคัปเปิลจะมีหลายชนิดและมีคุณลักษณะทีแตกต่างกันไป ดังแสดงได้ดังตารางที่ 5

Type	Alloy Combination		Color Coding		Nominal	Temperature-EMF	SeeBeck
	+ Lead	-Lead	Thermocouple Grade (+, -, Outer Sheath)	Extension Grade (+, -, Outer Sheath)	Temp. Range	@ Ref. Junction 0 °C	Coefficient (uV/°C) @ 20°C
E	Nickel – 10% Chromium	Constantan Copper-Nickel	Purple, Red, Brown	Purple, Red, Purple	-270 to 1000°C	-9.835 to 76.358 mV	62
J	Iron (Magnetic)	Constantan Copper-Nickel	White, Red, Brown	White, Red, Black	-210 to 760°C	-8.096 to 42.922 mV	51
K	Nickel-10% Chromium	Nickel-5% (Aluminum, Silicon) (Magnetic)	Yellow, Red, Brown	Yellow, Red, Yellow	-270 to 1372°C	-6.458 to 54.875 mV	40
R	Platinum-13% Rhodium	Platinum	Not Established	Black, Red, Green	-50 to 1768°C	-0.226 to 21.108 mV	7
S	Platinum-10% Rhodium	Platinum	Not Established	Black, Red, Green	-50 to 1768°C	-0.236 to 18.698 mV	7
T	Copper	Copper-Nickel	Blue, Red, Brown	Blue, Red, Blue	-270 to 400°C	-6.258 to 20.869 mV	40

ตารางที่ 5 เทอร์โมคัปเปิลชนิดต่าง ๆ

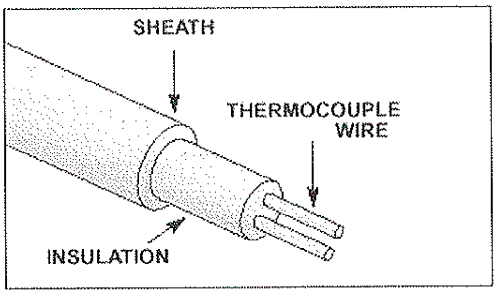
ในหัวข้อนี้เป็นการแสดงรายละเอียดการแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากโวลท์มิเตอร์ไปเป็นอุณหภูมิที่ต้องการ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างอุณภูมิกับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของเทอร์โมคัปเปิลจะไม่เป็นเชิงเส้น แรงดันไฟฟ้าเอาต์ของเทอร์โมคัปเปิลชนิดทั่ว ๆ ไปสามารถเขียนเป็นกราฟเทียบกับอุณหภูมิได้ดังรูปที่ 65

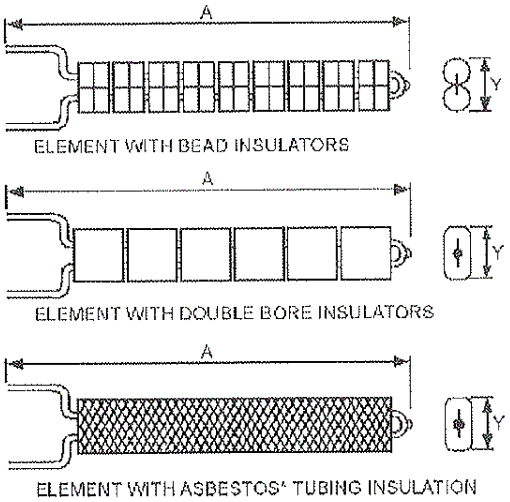


รูปที่ 65 กราฟแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละชนิด

จุดต่อของเทอร์โมคัปเปิล (Junction Type)

ในการนำเทอร์โมคัปเปิลไปใช้งานจะต้องมีปลอกหุ้ม (Sheath) สายเทอร์โมคัปเปิลเพื่อป้องกันความเสียหายจากสารเคมีหรือสิ่งแวดล้อมที่นำไปใช้งาน สามารถแสดงปลอกหุ้มและลักษณะของฉนวนป้องกันได้ดังรูปที่ 66





รูปที่ 66 ปลอกหุ้มและลักษณะของฉนวนป้องกัน

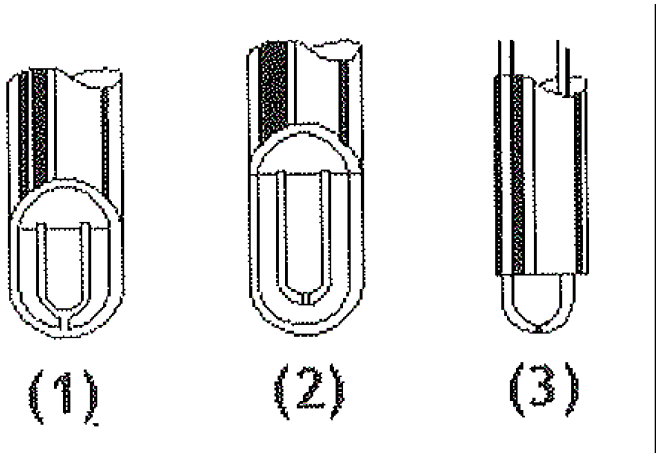
วัสดุที่ใช้ทำปลอกหุ้มมีให้เลือกใช้หลาย ๆ ชนิดขึ้นอยู่กับการใช้งาน เช่น Carbon Steel, 304 Stainless Steel, 316 Stainless Steel เป็นต้น สามารถแสดงตารางสำหรับอุณหภูมิการใช้งานของวัสดุที่ใช้ทำปลอกหุ้มได้ดังตารางที่ 6

Sheath material	Maximum Operation Temperature	
	Deg. C	Deg. F
Carbon Steel	540	1000
Wrought Iron	700	1300
Cast Iron	700	1300
304 Stainless Steel	870	1600
316 Stainless Steel	870	1600
446 Stainless Steel	980	1800
Nickel	980	1800
75 Nickel – 15 Chromium-Iron	1150	2100
Porcelain	1650	3000
Silicon Carbide	1650	3000
Alumina-Silica	1650	3000
Aluminum Oxide	1750	3200

ตารางที่ 6 อุณหภูมิการใช้งานของวัสดุที่ใช้ทำปลอกหุ้ม

เนื่องจากตัวเทอร์โมคัปเปิลจะต้องมีจุดต่อ ซึ่งการประกอบปลอกหุ้มกับตัวเทอร์โมคัปเปิลสามารถออกแบบลักษณะจุดต่อของเทอร์โมคัปเปิลกับปลอกหุ้มได้เป็น 3 แบบดังนี้

1. แบบ Grounded เทอร์โมคัปเปิลแบบนี้จะมีจุดต่อระหว่างโลหะสองชนิดสัมผัสอยู่กับเปลือกหุ้มตัวเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งจะมีผลดีในการส่งผ่านความร้อนจากภายนอกมายังปลอกหุ้มและส่งผ่านต่อมายังสายเทอร์โมคัปเปิล
2. แบบ Ungrounded เทอร์โมคัปเปิลแบบนี้จะมีจุดต่อระหว่างโลหะสองชนิดไม่สัมผัสกับเปลือกหุ้มตัวเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งจะทำให้มีความเร็วในการตอบสนองช้ากว่าแบบแรก
3. แบบ Exposed เทอร์โมคัปเปิลแบบนี้จะมีจุดต่อระหว่างโลหะสองชนิดโผล่พ้นออกมานอกเปลือกหุ้มตัวเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งจะมีผลการตอบสนองดีกว่าทั้งสองแบบ แต่จะมีข้อเสียคือเกิดความเสียหายต่อสายเทอร์โมคัปเปิลได้ง่ายกว่าทั้งสองแบบ ลักษณะของจุดต่อแสดงได้ดังรูปที่ 67



รูปที่ 67 จุดต่อลักษณะต่าง ๆ (1) Grounded, (2) Ungrounded, (3) Exposed

RTD (Resistance Temperature Detector)

RTD เป็นความต้านทานที่มีความไวในการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน เมื่ออุณหภูมิรอบตัวเปลี่ยนไป โดยจะมีค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient) การเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่ออุณหภูมิมีค่าเป็นบวกนั่นคือค่าความต้านทานของวัสดุจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 68

ค่าความต้านทานจะถูกกำหนดด้วยความยาวและพื้นที่หน้าตัดของวัสดุที่ใช้ทพตัว RTD ซึ่งจะเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับความยาวและจะเป็นอัตราส่วนกลับกับพื้นที่หน้าตัด ดังแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 1

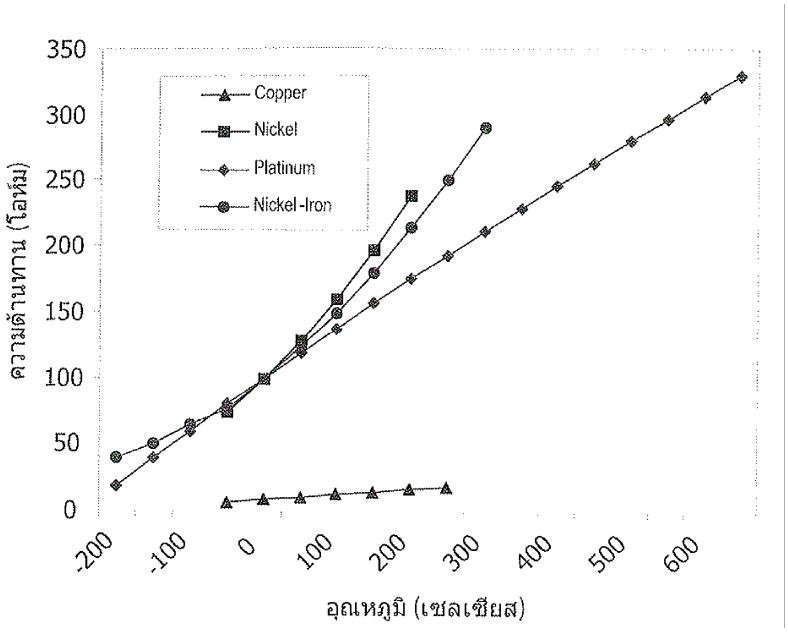
$$R = \rho L / A \qquad (1)$$

เมื่อ $R =$ ค่าความต้านทาน (Ω)

$\rho =$ ความต้านทานวัสดุ (Resistivity in Ω)

$L =$ ความยาว (Length)

A = พื้นที่หน้าตัด (Area)



รูปที่ 68 ความต้านทานของวัสดุชนิดต่าง ๆ

วัสดุที่ใช้ทำ RTD

นอกจากค่าความต้านทานของวัสดุที่จะนำมาใช้ทำตัว RTD แล้วยังมีตัวแปรอื่น ๆ ที่ต้องพิจารณาเพิ่มเติมสำหรับการเลือกใช้วัสดุ เป็นดังนี้

- ต้องเปลี่ยนแปลงรูปได้ง่าย เพื่อสามารถนำไปทำเป็นเส้นเล็ก ๆ ได้
- ต้องมีค่าความต้านทานที่คงที่
- ต้องทนต่อการกัดกร่อน
- ต้องมีราคาถูก
- มีค่าความต้านทานที่เป็นเชิงเส้นกับอุณหภูมิ

วัสดุที่นิยมมาใช้ทำ RTD จะมีอยู่ 4 ชนิด ดังนี้ คือ Copper, Nickel, Nickel/Iron และ Platinum สำหรับวัสดุที่นิยมนำมาใช้ทำตัว RTD ที่จะนำมาใช้วัดอุณหภูมิในอุสาหกรรมจะเป็นชนิด Platinum

Platinum ที่มีงานจะมีอยู่ 2 ชนิดคือ

1. IEC/DIN Grade
2. Reference Grade

คุณสมบัติของวัสดุทั้ง 4 ชนิด สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 7

Material	Temperature Coefficient	Temperature Range	Description	Primary use
Platinum	0.00385 – 0.003926 Ω/Ω/°C	-269°C to 593°C (-452°F to 1100°F)	Best accuracy and stability. Resistance vs. Temperature is linear. Wide range and high resistivity	Primary choice for most industrial
Nickel	0.0067 Ω/Ω/°C	-40°C to 300°C (-40°F to 570°F)	Highest temperature coefficient Highest output unit.	Used for some old Navy shipboard
Copper	0.0043 Ω/Ω/°C	-73°C to 149°C (-100°F to 300°F)	Most linear, but has limited temperature range. Very low resistivity	Used for electric motor and generator
Nickel/Iron (70/30)	0.0051 Ω/Ω/°C	-46°C to 343°C (-50°F to 650°F)	Like Nickel, has slight variations in temperature coefficient from one batch to next time	Used for windshield temperature measurements

ตารางที่ 7 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำ RTD

IEC/DIN Grade จะเป็นชนิดที่ใช้ Platinum บริสุทธิ์ที่มีส่วนผสมของโลหะเล็กน้อย เพื่อใช้ควบคุมความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิ RTD ชนิดนี้จะถูกใช้อ้างอิงเป็นมาตรฐานสำหรับผู้ผลิต สำหรับ Reference Grade เป็นชนิดที่ใช้ Platinum บริสุทธิ์ที่ 99.999%

สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิและความแม่นยำ (Temperature coefficient and Accuracy)

ชนิดของ Platinum จะมีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของ RTD โดยค่าความชันกราฟของความต้านทานกับอุณหภูมิตั้งแต่ 0 ° C ถึง 100 ° C จะถูกแสดงได้ดังสมการที่ 1

$$\alpha = (R_{100} - R_0)/(R_0 * t) \quad (1)$$

เมื่อ $\alpha =$ สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของ RTD

$R_{100} =$ ความต้านทานที่ 100 $°C$

$R_0 =$ ความต้านทานที่ 0 $°C$

$t =$ ค่าอุณหภูมิที่ค่าต่างๆ

Platinum RTD ที่ทำมาจาก IEC/DIN Grade จะมีค่าความต้านทานเท่ากับ 100 Ω ที่อุณหภูมิ 0 $°C$ และจะมีค่าความต้านทานเท่ากับ 138.5 Ω ที่อุณหภูมิ 100 $°C$ ซึ่งจะแตกต่างกับ Platinum RTD ที่ทำมาจาก Reference Grade จะมีค่าความต้านทานเท่ากับ 100 Ω ที่อุณหภูมิ 0 $°C$ แต่จะมีค่าความต้านทานเท่ากับ 139.26 Ω ที่อุณหภูมิ 100 $°C$ จะเห็นได้ว่าจะมีค่าความต้านทานแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 100 $°C$ ทั้งสองชนิดจะมีค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิดังนี้

- IEC/DIN Grade จะมีค่า $\alpha = 0.00385\Omega/\Omega/°C$
- Reference Grade จะมีค่า $\alpha = 0.003926\Omega/\Omega/°C$

ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานและอุณหภูมิสามารถประมาณค่าโดยใช้สมการของ Callender Van Dusen ที่ถูกทำให้สมการง่ายขึ้นดังสมการที่ 2

$$R_1 = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100°C)]t^3 \quad (2)$$

สำหรับการหาค่าความต้านทานของ RTD สำหรับค่าความอุณหภูมิที่มากกว่า 0 ° C ขึ้นไป สามารถหาค่าได้จากสมการที่ 3

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (3)$$

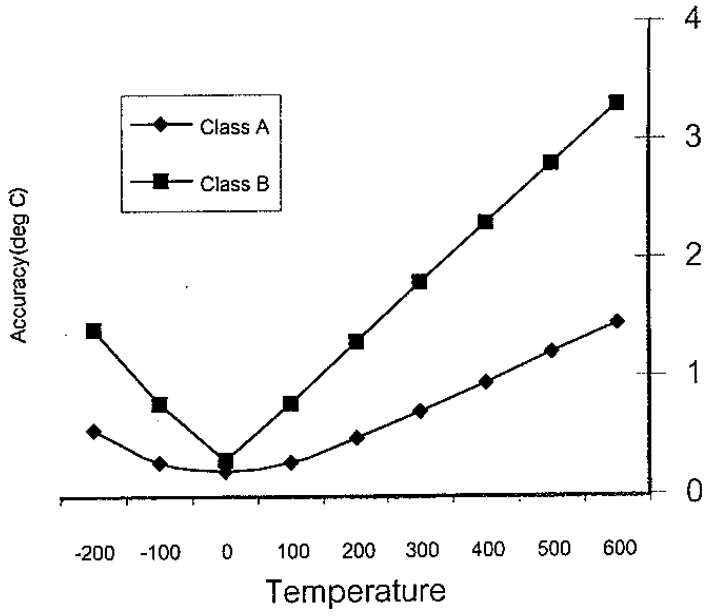
ค่าสัมประสิทธิ์ของ A, B และ C จะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ทำเส้นโลหะ RTD และความบริสุทธิ์ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ของ Platinum RTD ตามมาตรฐาน IEC 751-2 (ITS90) จะเป็นดังนี้

$$A = 3.90833 * 10^{-3} C^{-1}$$
$$B = -5.7753 * 10^{-7} C^{-2}$$
$$C = -4.1833 * 10^{-12} C^{-3}$$

มาตรฐาน IEC 751 ได้แสดงความแม่นยำของ Platinum RTD สำหรับ DIN Grade ไว้ 2 Class คือ Class A และ Class B

Class A จะมีค่าความแม่นยำสูง โดยจะมีค่าความฟิดพลาดที่ $\pm 0.06\Omega$ เมื่อเทียบกับจุดเยือกแข็ง (Ice-point) สำหรับ Class B จะมีค่ามาตรฐานความผิดพลาดที่ $\pm 0.12\Omega$ เมื่อเทียบกับจุดเยือกแข็ง ซึ่ง Class B จะมีการใช้งานกันอยู่ทั่วไปในอุตสาหกรรมและจะครอบคลุมย่านอุณหภูมิตั้งแต่ -200 $^{\circ}C$ ถึง 850 $^{\circ}C$ สำหรับ Class A จะครอบคลุมย่านอุณหภูมิตั้งแต่ -200 $^{\circ}C$ ถึง 650 $^{\circ}C$ และจะมีเฉพาะ RTD ที่เป็นแบบ 3 สาย (3 wires) และ 4 สาย (4 wires) เท่านั้น

RTD จะมีค่าความแม่นยำที่ลดลงเนื่องจากอุรหภูมิ สำหรับ Class A จะมีค่าความแม่นยำที่ $\pm 0.43\Omega$ ($\pm 1.45^{\circ}C$) ที่อุณหภูมิ 600 $^{\circ}C$ ส่วน Class B จะมีค่าความแม่นยำที่ $\pm 1.06\Omega (\pm 3.3^{\circ}C)$ ที่อุณหภูมิ 60 $^{\circ}C$ สามารถแสดงกราฟความแม่นยำของทั้งสองชนิดได้ดังรูปที่ 69



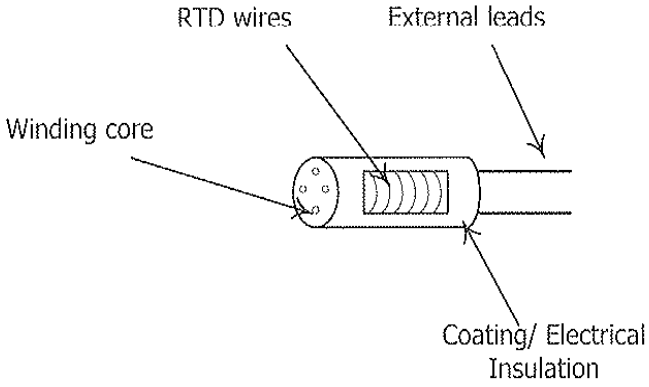
รูปที่ 69 กราฟความแม่นยำ

การออกแบบตัว RTD

Platinum RTD จะมีรูปแบบที่ถูกนำมาใช้งานด้วยกันอยู่ 2 แบบ คือ Wire wound และ Thin Film ซึ่งแต่ละแบบจะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป

RTD แบบ Wire-wound

มีการออกแบบง่ายและเป็นรูปแบบที่สามารถนำมาใช้กับเส้นวัสดุที่เป็น Copper, Nickel, Nickel/Iron และ Platinum เส้นวัสดุเหล่านี้จะถูกพันรอบอยู่บนแกนที่เป็นฉนวนและจะถูกปิดทับด้วยฉนวนอีกชั้นหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 70



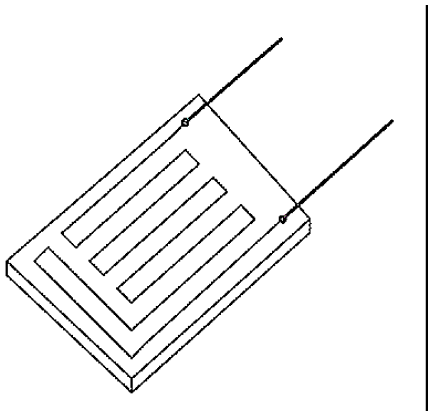
รูปที่ 70 RTD แบบ Wire- Wound

สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางอุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ทำแกนต้องมีความเหมาะสมกับการขยายตัวของเส้นวัสดุ RTD เพื่อป้องกันการตึงตัวเส้นวัสดุ RTD ที่พันอยู่บนแกน ความตึงตัวของเส้นวัสดุจะมีผลต่อความแม่นยำในการวัด

เส้นวัสดุ RTD ที่พันอยู่ยนแกนจะถูกต่อออกไปยังภายนอกด้วยสายไฟขนาดใหญ่ สายไฟที่จะนำมาต่อนี้ต้องไม่มีการกำหนด Thermal EMF ตรงบริเวณที่เชื่อมต่อกัน ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการวัด

RTD แบบ Thin Film

ถูกออกแบบขึ้นโดยการวางแผ่น Platinum บาง ๆ ลงบนฐานรองที่เป็นเซรามิค แผ่น Platinum จะมีความหนาประมาณ 10^{-8} เซนติเมตร จากนั้นทำการเคลือบผิวด้านหน้าด้วย Epoxy หรือกระจก เพื่อป้องกันความเสียหายของแผ่น Platinum ในปัจจุบันได้มีการปรับปรุงให้แข็งแรงขึ้น แต่ก็ยังไม่เทียบเท่ากับแบบ Wire Wound และจะมีเฉาะ DIN Grade เท่านั้น ดังแสดงได้ดังรูปที่ 71



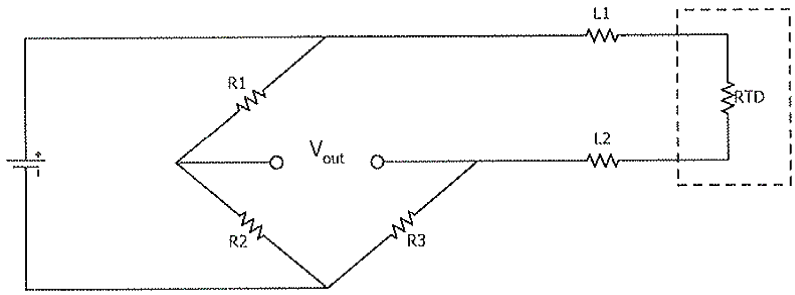
รูปที่ 71 RTD แบบ Thin Film

รูปแบบการต่อสาย RTD

การต่อสายไฟไปยังภายนอกของเส้นวัสดุ RTD ที่มีใช้งานกันทั่วไปในอุตสาหกรรมจะมีอยู่ด้วยกันอยู่ ด้วยกันอยู่ 3 แบบคือ 2 สาย (2wires), 3 สาย (3wires) และ 4 สาย(4 wires) การจะเลือกใช้งานแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับความแม่นยำที่ต้องการ

RTD แบบ 2 สาย

จะเป็นแบบพื้นฐานที่ง่ายในการต่อสาย โดยที่ปลายทั้งสองของเส้นวัสดุ RTD จะถูกต่อออกมายังภายนอกดังรูปที่ 72

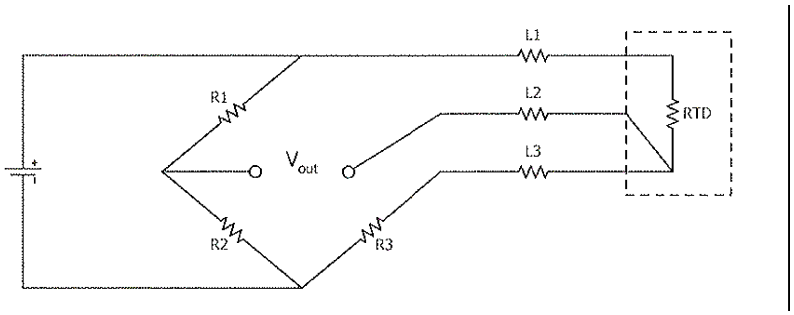


รูปที่ 72 RTD แบบ 2 สาย

แบบนี้จะมีความแม่นยำต่ำในการนำไปใช้วัดอุณหภูมิ เพราะสายไฟที่นำมาต่ออนุกรมกับเส้นวัสดุ RTD จะมีคุณลักษณะระหว่างอุณหภูมิและความต้านทานที่ต่างกัน ในการใช้งานสายไฟจะมีอุณหภูมิที่แตกต่างจากเส้นวัสดุ RTD ถ้ามีการใช้สายไฟที่ยาวมากก็จะส่งผลกระทบมากขึ้นตามไปด้วย

RTD แบบ 3 สาย

จะเป็นแบบที่มีการใช้งานกันในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีความแม่นยำในอุณหภูมิที่สูงขึ้น ด้วยการชดเชยค่าความต้านทานของสายไฟที่ต่ออนุกรมอยู่กับเส้นวัสดุ RTD การชดเชยกระทำโดยการต่อสายไฟ 2 เส้นที่ปลายด้านหนึ่งและต่อสายไฟเพียง 1 เส้นกับปลายอีกด้านหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 73

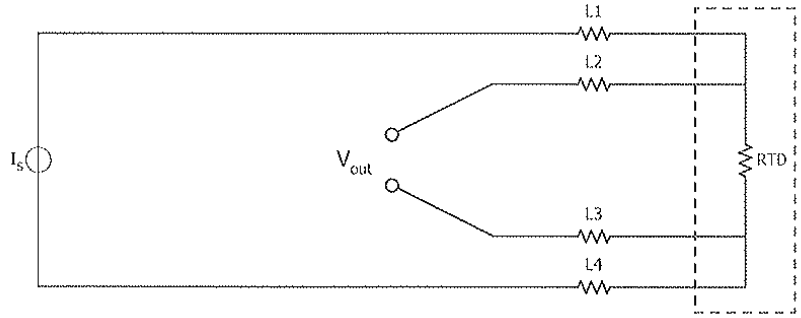


รูปที่ 73 RTDแบบ 3 สาย

จากรูปจะเห็นได้ว่าความต้านทานของสายไฟ L1 และ L3 ต้องมีคุณลักษณะที่เหมือนกันเพื่อชดเชยความต้านทานที่เกิดขึ้น สายไฟที่นำมาต่อจะมีการกำหนดเป็น สีแดง 2 เส้นและสีขาว 1 เส้น

RTD แบบ 4 สาย

จะเป็นแบบที่มีความแม่นยำมากที่สุด ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในห้องทดลองและไม่ค่อยนิยมใช้ในอุตสาหกรรม รูปแบบการต่อสายจะชดเชยความไม่เหมาะสมกันของความต้านทาน ดังแสดงในรูปที่ 74



รูปที่ 74
RTD แบบ 4 สาย

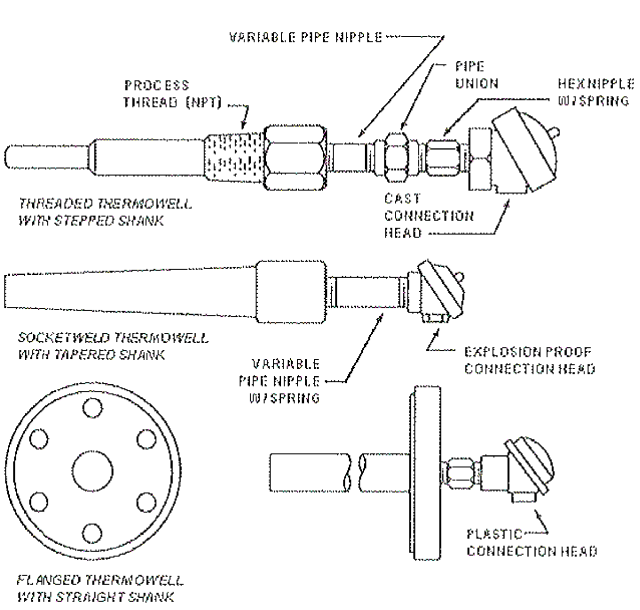
ในการทำงานจะทำให้กระแสที่ไหลผ่าน L1 และ L4 จากนั้นจะทำการวัดแรงดันที่ตกคร่อมตัว RTD ผ่านเส้น L2 และ L3 สายไฟที่นำมาต่อจะมีการกำหนดเป็น สีแดง 2 เส้นและสีขาว 2 เส้น

ข้อเปรียบเทียบระหว่าง Thermocouple และ RTD

Criterion	TC	RTD
Temperature Range	-450°F to 5,000 ° F	-300° to 1,000°F
Accuracy of Reading	0.75%	0.5%
Response Time: in TW:	grounded: 2 sec. ungrounded: 4 sec. 23 sec.	 5 sec. 26 sec.
Tip Sensitivity	Yes	No
Signal Output	Small	Large
Tolerance of Mechanical Vibration	Excellent	Fair

เทอร์โมเวลส์ (Thermowell)

เทอร์โมเวลส์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับป้องกันตัวเทอร์โมคัปเปิล หรือ RTD เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายที่ตัวอุปกรณ์ เมื่อนำไปใช้วัดอุณหภูมิในบริเวณที่มีการกัดกร่อนหรือของไหลที่มีความเร็วการไหลสูง (High Velocity) เทอร์โมเวลส์จะทำจากวัสดุที่มีความแข็งแรงและสามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดี เทอร์โมเวลส์จะมีการแบ่งตามลักษณะการติดตั้งได้ 3 แบบ คือ แบบ เกลียว (Threaded connection), แบบหน้าแปลน (Flange connection) และแบบเชื่อม (Welded connection) ดังแสดงในรูปที่ 75



รูปที่ 75 เทอร์โมเวลส์ชนิดต่าง ๆ

ในการเลือกใช้เทอร์โมเวลส์จะมีหลายตัวแปรที่ใช้ในการพิจารณาเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานโดยมีตัวแปรพื้นฐาน เช่น ชนิดของเทอร์โมเวลส์, อัตราการทนความดัน (Pressure Rating), วัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมเวลส์, ความยาวของเทอร์โมเวลส์ เป็นต้น ในการใช้งานเทอร์โมเวลส์กับกระบวนการผลิต โดยปกติเทอร์โมเวลส์จะถูกติดตั้งอยู่บยท่อ (Pipe Line), ถัง (Tank or Vessel) หรือ บนอุปกรณ์ต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตซึ่งบริเวณต่าง ๆ ที่ต้องการวัดอุณหภูมินั้นจะมีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกันไป ดังนั้นในการใช้งานควรจะมีการกำหนดขนาดและความยาวมาตรฐานเพื่อความสะดวกในการเก็บชิ้นส่วนสำรอง (Spare Parts) หรือการใช้งานทดแทนกันได้เมื่อเกิดความเสียหาย

คุณภาพของน้ำหม้อน้ำที่ได้จากการวิเคราะห์

1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง เป็นค่าที่แสดงถึงความเป็นกรด-ด่างของน้ำว่ามีค่ามากน้อย ค่า pH ขึ้นกับปริมาณของไฮโดรเจนอิออนที่แตกตัวในน้ำ

$$pH = -\log [H^-] = \log [1/[H^+]]$$

ในเมื่อ $[H^+]$ = ความเข้มข้นของไฮโดนเจนอิออน

น้ำบริสุทธิ์ที่ 25° C แตกตัวให้ไฮโดรเจน $[H^+]$ $= 1.0 \times 10^{-7}$, pH = 7

ถ้า $[H^+]$ $= 10^{-2}$, pH = 2

ถ้า pH น้อยกว่า 7 แสดงว่าเป็นกร

ถ้า pH มากกว่า 7 แสดงว่าเป็นด่าง

ค่า pH ย่อมเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่า pH จะลดลง

สำหรับน้ำหล่อเย็น ค่า pH เป็นค่าที่บอกแนวโน้มในการเกิดตะกรัน หรือเกิดการกัดกร่อนโลหะ ค่า pH มีค่าต่ำกว่า 7 น้ำจะมีสภาพเป็นกรดกัดกร่อนโลหะ ค่า pH มากกว่า 9 ขึ้นไปจะมีแนวโน้มเกิดตะกรันและอาจจะเกิด pitting ใต้ตะกรันได้ โดยทั่วไปจึงควบคุม pH ของน้ำหล่อเย็นให้อยู่ในช่วง 7-9 ขึ้นกับสภาพน้ำเดิมและโปรแกรมสารเคมีที่ใช้ด้วย

สำหรับ Boiler ปกติจะควบคุมค่า pH ของน้ำในหม้อไอน้ำให้มีค่าอยู่ระหว่าง 8.5-12.7 ซึ่งเป็นช่วงที่จะป้องกันการกัดกร่อนได้ดีที่สุด

การกัดกร่อนเนื่องจากความเป็นกรด-ด่างของน้ำที่อุณหภูมิสูง

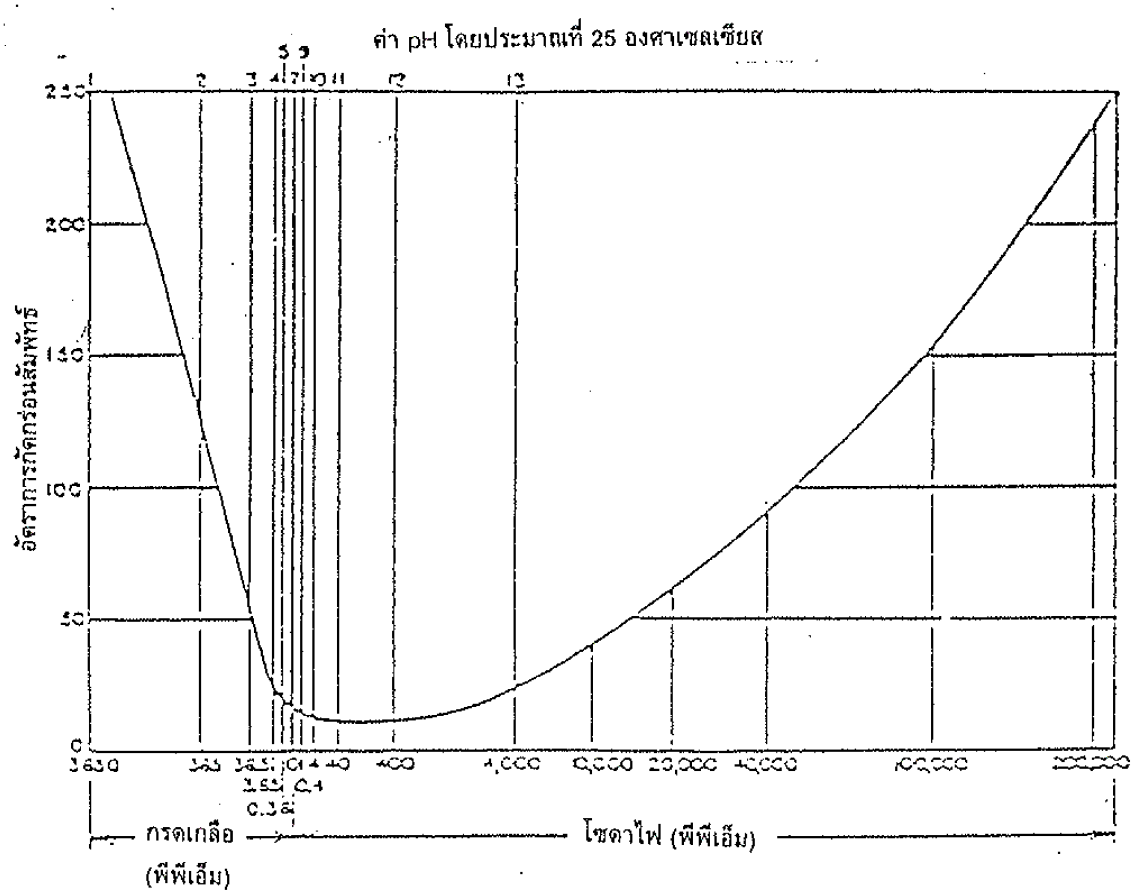
เหล็กถ้าจุ่มอยู่ในน้ำบริสุทธิ์ ไม่ว่าสภาวะแวดล้อมจะเป็นอย่างไร จะเกิดการออกซิไดซ์เสมอ ส่วนจะเกิดมากน้อยนั้นขึ้นอยู่กับค่า pH ของน้ำ สรุปได้ดังนี้

ถ้า pH < 9.7 เหล็กจะถูกออกซิไดซ์ และเนื้อเหล็กจะละลายในน้ำในรูป Fe^{2-}

ถ้า pH อยู่ระหว่าง 10-12 เหล็กจะถูกออกซิไดซ์กลายเป็นชั้นฟิล์มป้องกันของแมกเนไตท์

ถ้า pH >12 เหล็กจะถูกออกซิไดซ์ และเนื้อเหล็กจะละลายในน้ำในรูป $Fe(OH)_2$ อิออน

ตามรูปที่ 1 จะเห็นว่าอัตราการกัดกร่อนของเหล็กในน้ำจะเกิดต่ำสุดที่ pH ของน้ำระหว่าง 10-12 แต่ถ้าจะให้ดีกว่านี้ควรอยู่ระหว่าง 11-12 ถ้าหม้อไอน้ำที่มีความดันใช้งานต่ำกว่า 250 psi น้ำในหม้อไอน้ำจะควบคุมให้มีค่า pH 11.0-11.5 สำหรับหม้อไอน้ำความดันสูงกว่านี้ การกัดกร่อนจะมีโอกาสเกิดขึ้นได้มาก เนื่องจากการไหลหมุนเวียนของน้ำไม่ปกติ และมีความเข้มข้นของสารละลายสูงในบางจุด จึงต้องควบคุมให้น้ำในหม้อไอน้ำมีค่า pH 10.5-11.0



รูป 1 การกัดกร่อนของเหล็กที่อุณภูมิ 360 ° C ในน้ำมีความเป็นกรด-ด่าง หรือค่า pH ต่างๆ

2 <u>ค่าของแข็งที่ละลายในน้ำทั้งหมด</u> (Total Dissolved Solid)

คือสิ่งที่ละลายอยู่ในน้ำทั้งหมด ตรวจหาได้โดยการระเหยตัวอย่างน้ำที่กรองแล้วให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร

3 <u>ค่าการนำไฟฟ้า</u> (Electric Conductivity)

คือ ค่าที่บอกถึงความเข้มข้นของปริมาณเกลือแร่ต่าง ๆ ที่อยู่ในน้ำ ซึ่งวัดในรูปของค่าความนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็น μmho/cm (Micromho percentimerter) ค่านี้จะบอกถึงความสามารถที่น้ำตัวอย่างที่จะนำไฟฟ้าได้มากหรือน้อย ซึ่งขึ้นกับความเข้มข้นของสารที่แตกตัวเป็นประจุไฟฟ้า (ionized) อยู่ในน้ำพวกสารอนินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำมักจะแตกตัวเป็นอิออนที่มีประจุไฟฟ้า ซึ่งทำให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้น ซึ่งความนำไฟฟ้าขึ้นกับปัจจัยหลายประการ คือ คุณลักษณะของไอออนชนิดต่าง ๆ ปริมาณและความเข้มข้นของประจุ (ionic strength) และอุณหภูมิ

ของน้ำ ดังนั้นค่าการนำไฟฟ้าจึงนิยมแสดงผลที่ 25°C การวัดค่าการนำไฟฟ้าถือได้ว่าเป็นการประมาณค่าสารต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมาก

ปริมาณ TDS ในหน่วย mg/l = ค่าคงที่ x ค่าการนำไฟฟ้า
ค่าคงที่ = 0.55-0.80
น้ำบริสุทธิ์จะมีค่าความนำไฟฟ้าตั้งแต่ 0.04-2.0 μmho/cm

น้ำในหม้อน้ำที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงจะก่อให้เกิดปัญหาจากสารละลายต่างๆ มีความเข้มข้นสูงเกินไป การควบคุมค่าการนำไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งสำคัญทำได้โดยการ Blow down แล้วเติมน้ำ Make up ทดแทน เพื่อลดความเข้มข้นของสารละลายในน้ำลง การ Blow down จะ Blow down เมื่อความเข้มข้นของสารในน้ำหรือค่าความนำไฟฟ้าเกินค่ามาตรฐานที่ใช้ควบคุมโดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า “Automatic Blow down”

4 **<u>ค่าความกระด้างทั้งหมด</u> (Total Hardness)**

คือค่าที่บอกปริมาณความกระด้างแคลเซียม และแมกเซียมที่มีในน้ำในหน่วย ppm as $CaCO_3$ ค่าความกระด้างที่สูงจะมีแนวโน้มในการเกิดตระกรันได้ง่าย น้ำ Make up ที่ผ่าน softener การควบคุมปริมาณ Hardness Leak จาก Softener จะเป็นสิ่งสำคัญสำหรับกรณีที่ต้องการให้มีค่า Hardness ในน้ำป้อนเข้าหม้อน้ำมีค่าต่ำ ระบบที่มีการ Regenerate softener โดยอัตโนมัติ อาจไม่สามารถทำการ Regenerate ถัง Soft ได้ทันทีที่มีความกระด้างหลุดรอดจากเรซิน

อุปกรณ์ที่ช่วยแก้ปัญหานี้ได้ คือ อุปกรณ์ที่จะทำการตรวจเช็คค่า Hardness leak จาก softener โดยอัตโนมัติ ถ้าตรวจพบว่ามี Hardness leak ออกมานานกว่าเวลาที่ตั้งไว้ เครื่องจะส่งสัญญาณให้ระบบ Automatic Regeneration ทำการล้างเรซินในถัง Soft ปัญหาที่จะเกิดจาก Hardness leak จะสามารถควบคุมได้ง่ายขึ้น

5 <u>ค่าความกระด้างแคลเซียม</u> (Calcium Hardness)

คือค่าที่บอกถึงปริมาณความกระด้างแคลเซียมเพียงอย่างเดียวในหน่วย ppm as $CaCO_3$ ค่าความกระด้างแคลเซียมที่มีมากจะมีแนวโน้มในการเกิดตะกรันเฉพาะตะกรันแคลเซียมคาร์บอเนต

6 <u>ความเป็นด่าง</u> (Alkalinity)

ความเป็นด่างของน้ำ คือ ความสามารถที่จะฆ่าฤทธิ์กรด ความเป็นด่างจะมีสาเหตุเกิดจากเกลือของกรดอ่อน และบางครั้งก็เกิดจากด่างอ่อนหรือด่างแก่ น้ำธรรมชาติปกติจะมี pH อยู่ในช่วง 6-8 ซึ่งเกิดจากการสมดุลทางเคมีของไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนตอิออน ความเป็นด่างของน้ำจะประกอบด้วยอิออนต่างๆ เช่น คาร์บอเนต

(CO_3^{-2}) ไบคาร์บอเนต (HCO^-_3) และ ไฮดรอกไซด์ (OH^-) แต่ไอออนตัวอื่นๆ เช่น บอเรต (Borate) ซิลิเกต (Silicate) และ ฟอสเฟต (PO_4^{-3}) ก็มีส่วนในค่าความเป็นด่างทั้งหมด (Total Alkalinity) ด้วยเช่นกัน ส่วนมากจะพบว่าความเป็นด่างของน้ำในธรรมชาติจะอยู่ในรูปของแคลเซียมแมกนีเซียมไบคาร์บอเนต ซึ่งบางครั้งก็รวมเอาโซเดียมไบคาร์บอเนตด้วย

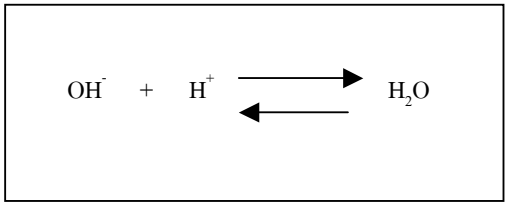
ความเป็นด่างของน้ำ หาได้โดยการไทเทรตตัวอย่างน้ำกับกรดกำมะถันมาตรฐานเข้มข้น 0.02 นอร์มัล มีหน่วยเป็นพีพีเอ็ม หรือ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูป $CaCO_3$ ความเป็นด่างจะมีความสัมพันธ์อยู่กับค่า pH ที่เป็นจุดเปลี่ยนสีของฟีนอฟทาลีนและเมททิลออเรนจ์อินดิเคเตอร์

ความเป็นด่างแสดงได้ 3 แบบคือ

6.1 Hydroxide or Caustic Alkalinity

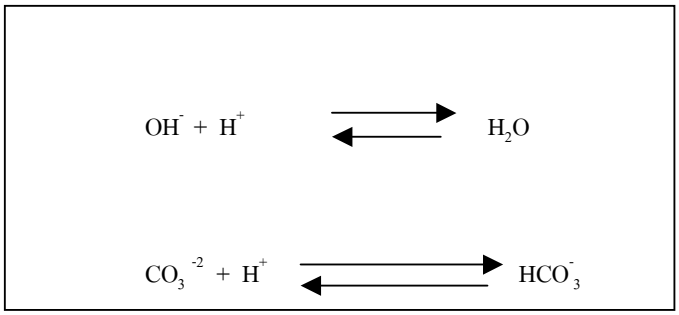
หมายถึง ค่าความเป็นด่างที่หาได้จากตัวอย่างน้ำ ที่เติมแบเรียมคลอไรด์ ($BaCl_2$) แล้วไทเทรตกับกรด จนถึง pH 8.3 ซึ่งเป็นจุดเปลี่ยนสีของของฟีนอฟทาลีนอินดิเคเตอร์ ความเป็นด่างนี้จะเกิดจากไฮดรอกไซด์ และไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์อิสระ

ปฏิกริยาที่เกิด



6.2 Phenolphthalein Alkalinity (P-Alkalinity)

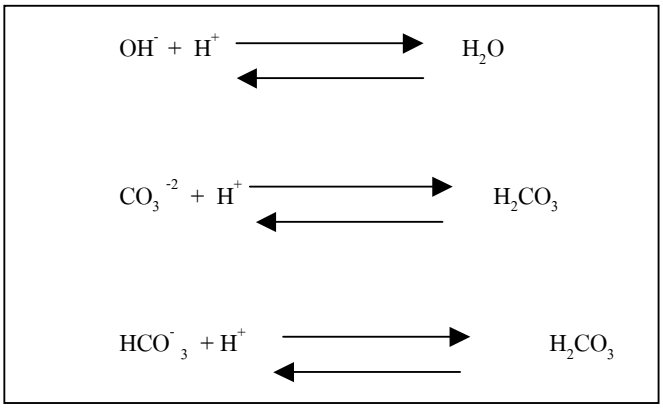
หมายถึง ค่าความเป็นด่างที่หาได้จากการไทเทรตกับกรด จนถึง pH 8.3 ซึ่งเป็นจุดเปลี่ยนสีของของฟีนอฟทาลีน P-Alkalinity จะประกอบด้วยความเป็นด่างเนื่องจากไฮดรอกไซด์ทั้งหมด และเนื่องจากคาร์บอเนตเพียงครึ่งหนึ่งของคาร์บอนเนตทั้งหมด น้ำธรรมชาติที่มีคาร์บอนไดออกไซด์อิสระละลายอยู่ จะไม่มีค่า P-Alkalinity
ปฏิกริยาที่เกิด



6.3 <u>Methyl Orange Alkalinity</u> (M-Alkalinity)

ในบางครั้งเรียกเป็นความเป็นด่างทั้งหมด (Total Alkalinity) หมายถึงค่าความเป็นด่างที่ได้จากการไทเทรตกับกรด จนถึง pH 4.5 ซึ่งเป็นจุดเปลี่ยนสีของเมททิลออเรนจ์ ความเป็นด่างทั้งหมดจะเกิดจากไฮดรอกไซด์ คาร์บอเนต ไบคาร์บอเนต และเกลือของกรดอ่อน

ปฏิกริยาที่เกิด



หมายเหตุ ถ้าหากไทเทรตกับกรดจนถึงจุดเปลี่ยนสีของของฟีนอฟทาลีน ที่ pH 8.3 แล้ว ไทเทรตต่อจากจุดนี้จนกระทั่งถึงจุดเปลี่ยนสีเมททิลออเรนจ์ ที่ pH 4.5 จะได้ความเป็นด่างที่เกิดจากคาร์บอเนตครึ่งหนึ่งของทั้งหมด (ครึ่งที่ไม่ใช่ส่วนของ P-Alkalinity) ไบคาร์บอเนตทั้งหมด ซึ่งถ้าหากในกรณีที่มี Total Alkalinity แล้ว ก็มักเรียกความเป็นด่างอันนี้ว่า M-Alkalinity

ในการวิเคราะห์น้ำโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการทำน้ำอ่อน (Softening) และการปรับสภาพน้ำ ในหม้อไอน้ำ จำเป็นต้องทราบชนิดและปริมาณของความเป็นด่างที่มีอยู่ ซึ่งความเป็นด่างนี้แบ่งออกได้เป็น

- Hydroxide Alkalinity
- Carbonate Alkalinity

- Bicarbonate Alkalinity

M-Alkalinity = ความเป็นด่างสในรูปไบคาร์บอเนตทั้งหมด + คาร์บอเนตทั้งหมด + ไฮดรอกไซด์ทั้งหมด

P-Alkalinity = ½ คาร์บอเนต + ไฮดรอกไซด์ทั้งหมด

ไบคาร์บอเนต และ ไฮดรอกไซด์ จะไม่อยู่ร่วมกันเช่นเดียวกันกับ คาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอเนตจะไม่อยู่ร่วมกันด้วยเช่นกัน

ที่ pH 11.0-9.4	จะมีแต่ความเป็นด่างไฮดรอกไซด์และคาร์บอเนต ไม่มีความเป็น ด่างไบคาร์บอเนต
ที่ pH 9.4-8.3	จะมีแต่ความเป็นด่างคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนต ไม่มีความเป็น ด่างไฮดรอกไซด์
ที่ pH 8.3-4.5	จะมีแต่ความเป็นด่างไบคาร์บอเนต ไม่มีความเป็นด่างคาร์บอเนตและไฮดรอกไซด์
ที่ pH 4.5-3.0	มี Mineral Acids

ความเป็นด่างมีความสำคัญในกระบวนการปรับสภาพน้ำ การป้องกันการกัดกร่อนของโลหะในน้ำ น้ำในหม้อไอน้ำมีทั้งความเป็นด่างคาร์บอเนตและไฮดรอกไซด์ ซึ่งก็เกิดจากไบคาร์บอเนตในน้ำสลายตัว เมื่อน้ำร้อนจนถึงจุดเดือดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำจะไม่ละลายน้ำต่อไปอีก จะระเหยไปพร้อมกับไอน้ำ ทำให้ค่า pH สูงขึ้น ซึ่งเป็นเหตุให้สมดุลของความเป็นด่างตามสมการต่างๆดังกล่าว เปลี่ยนจากไบคาร์บอเนตเป็นคาร์บอเนต และจากคาร์บอเนตเป็นไฮดรอกไซด์ ดังสมการ

$$2HCO^-_3 \rightleftharpoons CO_3^{-2} + H_2O + CO_2$$

$$CO_3^{-2} + H_2O \rightleftharpoons 2OH^- + CO_2$$

7 <u>คลอไรด์ , ซัลเฟต</u> (Chloride, Sulfate)

คือสารที่มีผลในการเร่งการกัดกร่อนของโลหะ ทั้งคลอไรด์และซัลเฟตไอออนจะเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ถ้ามีมากค่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มอย่างรวดเร็ว อีกทั้งทำให้ค่า pH ในน้ำลดลงเนื่องจากความเป็นกรด

คลอไรด์ (Chloride)

ปริมาณคลอไรด์ในน้ำจะเป็นดัชนีบอกถึงแนวโน้มของน้ำที่จะมีคุณสมบัติในการกัดกร่อน คลอไรด์ในน้ำมักพบในรูปที่รวมกับแคลเซียม แมกนีเซียม หรือ โซเดียมอิออน น้ำในธรรมชาติ เช่นน้ำจากแม่น้ำลำธาร น้ำบาดาลจะมีคลอไรด์ที่เกิดจากการละลายของน้ำจากหินต่างๆ แต่ก็มีปริมาณไม่มากนัก น้ำบนที่ราบสูงและแถบภูเขาจะมีคลอไรด์น้อย น้ำบาดาลจะมีคลอไรด์มาก น้ำทะเลมีคลอไรด์ไอออนมากกว่าไอออนชนิดอื่นๆ คือ Cl^-, SO_4^{2-}, HCO^-_3 แต่น้ำผิวดินมี HCO^-_3 , SO_4^{2-}, Cl^- ในน้ำฝนมีคลอไรด์ประมาณ 3 ppm ซึ่งเกิดจากคลอไรด์ที่อยู่ในน้ำทะเลถูกลมหอบพัดเข้าหาฝั่ง อากาศที่มีคลอไรด์ปนอยู่จะลอยตัวขึ้นสูงเกิดการขยายตัว และกลั่นตัวเป็นฝน เนื่องจากคลอไรด์ละลายน้ำได้ง่าย และมีเสถียรภาพสูงจึงสามารถปรากฏอยู่ในน้ำได้ โดยมีปริมาณค่อนข้างคงที่ตามมาตรฐานน้ำดื่มสากล ถ้าน้ำมีคลอไรด์มากกว่า 250 ppm น้ำจะมีรสกร่อยการตรวจหาปริมาณคลอไรด์ในน้ำเลี้ยงเข้าหม้อไอน้ำ และในน้ำหม้อไอน้ำจะเป็นเครื่องบอกอัตราการระบายน้ำทิ้ง (Blow down) ของหม้อไอน้ำ ร้อยละของน้ำปรับสภาพที่เป็นน้ำเพิ่ม (Make up)

ซัลเฟต (Sulfate)

พบในน้ำจากธรรมชาติทุกประเภท ปริมาณซัลเฟตมีความสำคัญต่อการปรับคุณภาพน้ำมากเพราะถ้าน้ำมีซัลเฟตมาก แสดงว่าซัลเฟตจะอยู่ในรูปของความกระด้างหรือในรูปของเกลือโซเดียมหรือทั้งสองอย่าง ซัลเฟตในน้ำบาดาลเกิดจากแร่ยิปซัม และ Glauber Salt (Na_2So_4) ซัลเฟตในรูปของความกระด้าง คือ แคลเซียมซัลเฟตทำให้เกิดตะกรันได้ ในกรณีนี้การขจัดปัญหาเรื่องตะกรันโดยการกำจัดซัลเฟตจะยุ่งยากกว่ากำจัดแคลเซียม ถ้าน้ำมีปริมาณซัลเฟตมากจะมีรสขม และมีคุณสมบัติเป็นยาระบายอย่างอ่อน

8 ซิลิก้า (Silica)

ในน้ำจะมีซิลิก้าปรากฏอยู่ในรูปซิลิเกตหรือกรด ซิลิสิก และในรูปคอลลอยด์ หรือ ซิลิกา (SiO_2) ซิลิกาในน้ำเกิดจากการที่น้ำไหลผ่านกัดเซาะหิน และทรายที่มีซิลิกาอยู่ แหล่งน้ำผิวดินจะมีซิลิกาไม่มากนัก แหล่งน้ำใต้ดินจะมีซิลิกามากกว่า เพราะส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของซิลิเกต น้ำที่มีซิลิกาอยู่แม้ในปริมาณน้อยก็ไม่ควรใช้เป็นน้ำเลี้ยงป้อนเข้าหม้อไอน้ำความดันสูงเพราะจะเกิดเป็นตะกรันซิลิเกตของแคลเซียมและแมกนีเซียม เป็นฉนวนป้องกันการถ่ายเทความร้อน ซิลิกามีความสามารถในการละลายสูงในไอน้ำภายใต้ความดันสูง เมื่อไอน้ำผ่านเทอร์ไบน์ความดันจะลดลง การละลายของซิลิกาจะลดลงด้วยทำให้เกิดการตกตะกอนของซิลิกาบนใบพัดของเทอร์ไบน์ ทำให้ประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์ลดลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องจำกัดความเข้มข้นของซิลิกาสำหรับหม้อน้ำอย่างเข้มงวด เนื่องจากซิลิกาไม่ทำปฏิกริยากับสารเคมีใดทั้งสิ้น จึงใช้วิธีการกำจัดโดยการเติมสารเคมีเพื่อตกตะกอนไม่ได้ แต่ใช้วิธีการดูดซับ (Adsorption) ด้วยเกลือของแมกนีเซียม หน่วยของค่าซิลิกาคือ ppm

9 <u>ค่าเหล็กทั้งหมด</u> (Total Iron)

ธรรมชาติจะมีเหล็กละลายอยู่บ้าง ในน้ำบาดาลมีเหล็กในรูปของเฟอร์รัสไบคาร์บอเนต ($Fe(HCO_3)_2$) ค่อนข้างมาก น้ำที่มีเหล็กคาร์บอเนตจะมีสภาพใส แต่เมื่อนำมาทิ้งไว้ในบรรยากาศจะเกิดตะกอนสีแดงของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์($Fe(OH)_3$) ดังสมการ

$$4Fe^{2+} + 8HCO^-_3 + 2H_2O + O_2 \rightleftharpoons 4Fe(OH)_3 + 8CO_2$$

เหล็กในน้ำจะปรากฏอยู่ 2 รูปคือ เฟอร์รัสไอออนและเฟอร์ริกไอออน เฟอร์รัสไอออนไม่ค่อยเสถียร เมื่อสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศจะถูกออกซิไดส์ เป็นเฟอร์ริกไอออน

การตรวจสอบปริมาณเหล็กทั้งหมดในน้ำ Make up เพื่อควบคุมลักษณะของน้ำ Make up และการตรวจสอบการตรวจสอบปริมาณเหล็กในน้ำหม้อน้ำ เพื่อตรวจสอบว่าเกิดการกัดกร่อนของเนื้อเหล็กที่เป็นส่วนประกอบของหม้อไอน้ำหรือไม่ เนื่องจากน้ำแม้ว่าจะเป็นน้ำบริสุทธิ์แล้วก็ตามยังมีโอกาสที่เกิดตะกรันเกาะจับของเหล็กในรูปต่าง ๆ ได้เนื่องจากน้ำทำปฏิกิริยากับเนื้อเหล็ก โดยปกติควบคุมปริมาณเหล็กทั้งหมดในน้ำหม้อน้ำไม่เกิน 1.0 ppm

ปฏิกริยาของเหล็กในหม้อไอน้ำมีดังนี้คือ

$$3Fe + 4H_2O \rightleftharpoons Fe_3O_4 + 4H_2$$

$$Fe + 2H^- \rightleftharpoons H_3 + Fe^{2+}$$

$$Fe + 2H_2O \rightleftharpoons Fe(OH)_2 + H_2$$

$$2Fe(OH)_2 + 2O_2 + H_2O \rightleftharpoons 2Fe(OH)_3$$

$$2Fe(OH)_3 + \textbf{HEAT} \rightleftharpoons Fe_2O_3 + 3H_2O$$

$$Fe + 2CO_2 + 2H_2O \rightleftharpoons Fe(HCO_3)_2 + H_2$$

สารประกอบเหล็กในน้ำหม้อน้ำเป็นสาเหตุทำให้เกิดตะกรันของเหล็กขึ้น ซึ่งตะกรันเหล็กจะทำให้มีการสูญเสียความร้อนมากกว่าตะกรันธรรมดาที่ปราศจากเหล็กผสมอยู่เมื่อความหนาของตะกรันเท่ากัน

10 ฟอสเฟต (Phosphate)

ในการปรับสภาพน้ำสำหรับหม้อน้ำจะใช้ฟอสเฟตมาก เพื่อป้องกันการเกิดตะกรันในหม้อไอน้ำ ดังนั้นการวิเคราะห์หาปริมาณฟอสเฟตสำหรับน้ำจากหม้อไอน้ำ เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าได้มีการเติมฟอสเฟตให้มีความเข้มข้นได้ตามที่กำหนดแล้วหรือไม่

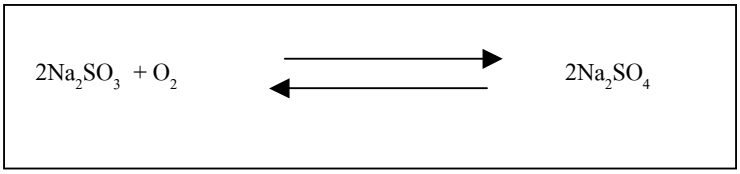
11 ซัลไฟท์

น้ำป้อนหม้อน้ำที่มีออกซิเจนละลายอยู่จะทำปฏิกริยากับเหล็กเกิดเป็นเหล็กออกไซด์ สีแดงหรือเฮมาไตท์ (Hematite) ทำให้เกิดการกัดกร่อนมีลักษณะเป็นหลุมลึกเฉพาะบริเวณจนถึงอาจทำให้ทะลุได้ ดังนั้น จึงต้องระมัดระวังไม่ให้น้ำเลี้ยงหม้อน้ำมีก๊าซออกซิเจนอยู่ เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนภายในหม้อน้ำ และระบบคอนเดนเสท การขจัดออกซิเจนมี 2 วิธีคือ วิธีทางกล และ วิธีการใช้สารเคมี ในกรณีที่ใช้โซเดียมซัลไฟท์ (สำหรับหม้อน้ำความดันต่ำ และปานกลาง ควรตรวจสอบน้ำหม้อไอน้ำ ว่ามีปริมาณโซเดียมซัลไฟท์เหลือค้างอยู่ในปริมาณที่เหมาะสมหรือไม่ โดยพิจารณาจากค่าที่แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณโซเดียมซัลไฟท์ที่ควรมีเหลือค้างอยู่ในหม้อน้ำ

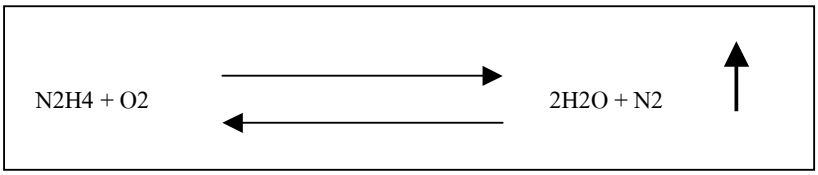
ความดันใช้งาน Psig	**โซเดียมซัลไฟต์ในรูป SO_3^{2-} มิลลิกรัมต่อลิตร**
ต่ำกว่า 300	30-60
301-600	20-40
601-900	15-30
900-1200	5-15
1200-1500	5-10

โซเดียมซัลไฟท์จะทำปฏิกริยากับออกซิเจนดังนี้

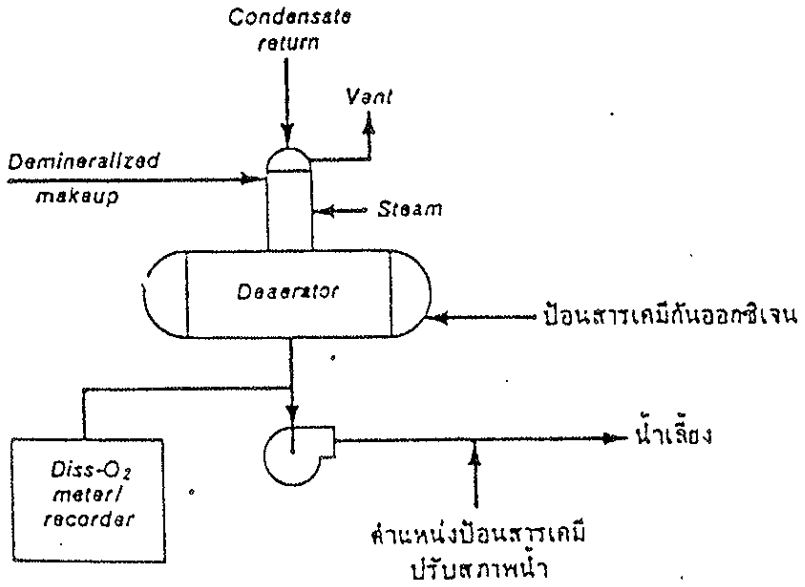


12 <u>ไฮดราซีน</u>

ในหม้อน้ำที่มีความดันสูงที่มีการใช้ระบบ Coordinated phosphate – pH ควบคุมสภาพน้ำในหม้อน้ำอยู่ ไม่ควรใช้โซเดียมซัลไฟท์ในการลดปริมาณออกซิเจน แต่จะใช้ไฮดราซีนในรูปของเหลวเข้มข้น 15-35% เพื่อกำจัดออกซิเจนแทน ดังสมการ



ในการใช้งาน ใช้ไฮดราซีน 1.5-2 พีพีเอ็มต่อออกซิเจน 1 พีพีเอ็ม ที่ความดันสูงกว่า 700 psig (110 °C) และการใช้งานต้องให้มีไฮดราซีนตกค้างในหม้อน้ำ 0.1-0.3 พีพีเอ็ม สำหรับหม้อไอน้ำความดันต่ำกว่า 600 psig จะควบคุมให้เหลือค้างอยู่ 0.05 – 0.1 พีพีเอ็ม ตำแหน่งมีป้อนไฮดราซีน หรือ โซเดียมซัลไฟท์ป้อนที่ตำแหน่งเดียวกันดังรูป 2



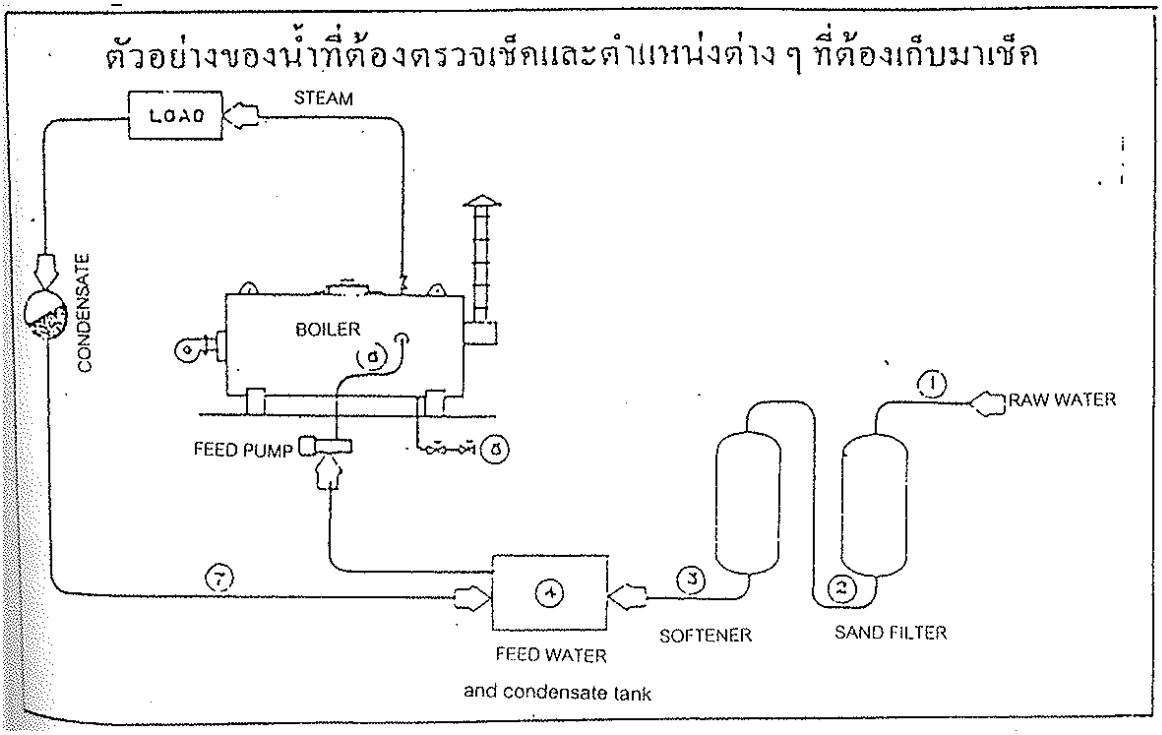
รูปที่ 2 แสดงตำแหน่งที่ดีที่สุดในการป้อนสารเคมีขจัดออกซิเจนในน้ำเสีย

ดังนั้น จึงต้องวิเคราะห์ปริมาณไฮดราซีนในน้ำหม้อน้ำเพื่อตรวจสอบดูว่ามีไฮดราซีนเหลือค้างอยู่ในปริมาณที่เหมาะสมหรือไม่

13 <u>การตรวจสอบระบบการทำงานของหม้อไอน้ำ</u>

การตรวจสอบระบบต่างๆ เพื่อป้องกันปัญหาที่จะเกิดขึ้นและความปลอดภัยในการใช้หม้อไอน้ำ เราจะต้องทำการตรวจสอบดังนี้

ก. เราจะต้องทำการตรวจเช็คค่าทางเคมี และสิ่งเจือปนของธาตุต่างๆ ของน้ำที่ใช้กับหม้อไอน้ำ โดยการใช้เครื่องมือตรวจเช็คแบบง่ายๆ ในขณะปฏิบัติงานในหม้อไอน้ำทุกวันและจัดส่งตัวอย่างน้ำไปทำการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการเพื่อให้ได้ค่าแน่นอนอย่างน้อยเดือนละ 1 ครั้ง และน้ำที่จะเข้าหม้อไอน้ำ ถ้าเป็นไปได้ควรจะนำเอาไอน้ำที่ใช้งานและปล่อยทิ้งไปกลับมาอุ่นกับน้ำก่อนเข้าหม้อไอน้ำเสียก่อน เพราะการสูญเสียเชื้อเพลิงจะลดลง 1% ทุก ๆ 6°C ของอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 3 แสดงตำแหน่งของน้ำตัวอย่างที่ต้องเก็บมาตรวจเช็ค

จุดที่ 1 น้ำดิบ (Raw Water)
จุดที่ 2 น้ำที่ผ่านเครื่องกรองทราย (Sand Filter)
จุดที่ 3 น้ำที่ผ่านเครื่องกรองน้ำอ่อน (Water Softener)
จุดที่ 4 น้ำที่ป้อนเข้าหม้อไอน้ำ (Feed Water Tank)
จุดที่ 5 น้ำในหม้อไอน้ำส่วนที่ตกตะกอน (Blow Down)
จุดที่ 6 น้ำในหม้อไอน้ำส่วนที่ลอย
จุดที่ 7 น้ำ Condensate

ข. การเดินหม้อไอน้ำขณะไอน้ำเย็นจะต้องอุ่นเครื่องที่ตำแหน่งไฟต่ำสุดหรือเดินเครื่องในตำแหน่งที่เบาสุดนั่นเอง จนกระทั่งความดันของไอน้ำมีความดันประมาณ 0.2 kg/cm^2 แล้วจึงค่อยเร่งไฟไปยังตำแหน่งที่ไฟแรงได้ เพื่อป้องกัน Thermal Shock และช่วยให้หม้อไอน้ำของท่านมีอายุยืนยาวไปอีกหลายปี

ค. อุณหภูมิของปล่องไอเสีย ถ้าขึ้นสูงกว่า 250 °C เป็นเวลานานโดยไม่ยอมลดลง ถึงแม้ว่าจะเดินหม้อไอน้ำในตำแหน่งไฟต่ำสุดแล้วก็ตาม แสดงว่าเขม่าที่อยู่ทางท่อไฟ (จุ๊ป) มีมากเกินไป หรือไม่ก็มีตะกรันจับท่อไฟทางด้านน้ำมาก จำเป็นต้องทำความสะอาดได้แล้ว แต่ถ้าสูงขึ้นเป็นบางขณะที่เร่งผลิตไอน้ำแล้วลดลงเป็นปกติก็ไม่จำเป็นต้องทำความสะอาด

สำหรับหม้อไอน้ำที่มีเทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิของน้ำหรือไอน้ำในหม้อไอน้ำ เราอาจวิเคราะห์ได้จากความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปล่องไฟ เปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายในหม้อไอน้ำ ซึ่งปกติไม่ควรแตกต่างกันเกิน 80 ˚C ซึ่งความแตกต่างระดับนี้ถือว่าสูงเกินไป

ง. ควรวิเคราะห์ไอเสียที่ออกจากปล่องไฟเป็นระยะๆ เพื่อการตรวจสอบว่าการเผาไหม้สมบูรณ์หรือไม่ ทั้งนี้โดยตรวจดูค่าของออกซิเจน (O_2) คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ค่าของออกซิเจนไม่ควรเกิน 1.2% และค่า CO ไม่ควรมีเลย ส่วนค่าของ CO_2 ที่ถูกต้องจะต่างกันไปตามชนิดของเชื้อเพลิงต่างๆที่ใช้ ดังตารางต่อไปนี้

ตาราง 2 เปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากน้ำมันโซล่าและน้ำมันเตาที่สภาวะการเผาไหม้ต่างๆ

การเผาไหม้	***GAS***	***น้ำมันโซล่าเบอร์ 2***	***น้ำมันเตาเบอร์ 6***
ดี่ที่สุด	10% CO_2	12.8% CO_2	13.8% CO_2
ดี	9% CO_2	11.5% CO_2	13% CO_2
พอใช้	8.5% CO_2	10% CO_2	12.5% CO_2
ใช้ไม่ได้	8% CO_2	8% CO_2	12% CO_2

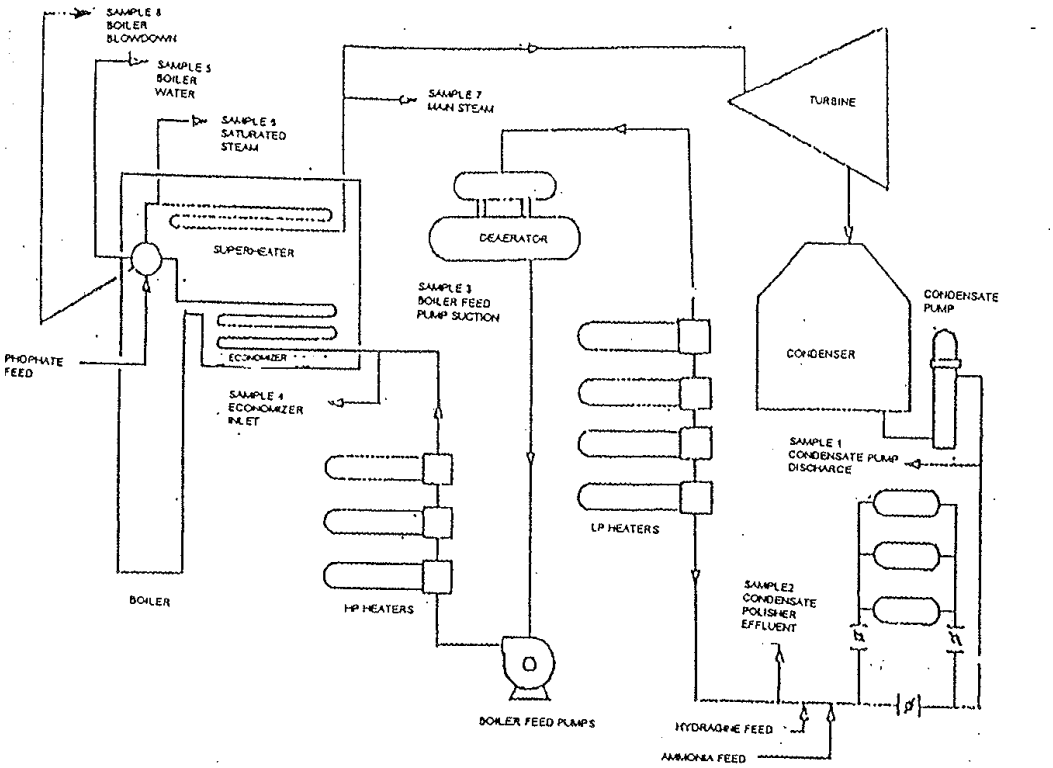
14 <u>การติดตามควบคุมคุณภาพน้ำป้อนหม้อน้ำระบบออนไลน์</u>

เพื่อยืดอายุการใช้งานของหม้อไอน้ำให้ยาวนานขึ้น และเพื่อลดปัญหาที่เกี่ยวกับบุคลากร สำหรับระบบหม้อน้ำขนาดใหญ่ อาจใช้วิธีการตรวจสอบเพื่อควบคุมคุณภาพน้ำ สำหรับหม้อไอน้ำด้วยระบบออนไลน์ ซึ่งสามารถควบคุมคุณภาพน้ำได้อย่างต่อเนื่อง ค่าที่ตรวจสอบคือ ค่าความเป็นกรดด่าง ค่าความนำไฟฟ้า ค่าออกซิเจนละลาย ซิลิกาและโซเดียม ตามจุดต่าง ๆของระบบผลิตไอน้ำ ซึ่งจะมีทั้งส่วนที่เป็นน้ำและไอน้ำ จุดที่มีการตรวจสอบค่า ข้อกำหนดและความจำเป็นที่ต้องตรวจสอบ จะขึ้นอยู่กับชนิด และขนาดของหม้อน้ำ ตารางที่ 3 แสดงพารามิเตอร์ และระดับความเข้มข้น ที่ต้องการวัด และรูปที่ 4 แสดงจุดตรวจสอบ และจุดป้อนสารเคมีในระบบ

ตาราง 3 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ควบคุมคุณภาพน้ำสำหรับหม้อไอน้ำ

Sample	Analysis	Normal Ratio	Unit
Condensate Makeup Water	SiO^2 Monitor anion resin exhaustion and final water quality	1-5	ppb.
	Na^+ Monitor anion resin exhaustion and final water quality	1-5	ppb.
	Cond. Monitor resin exhaustion and final water quality	<1	umho/cm.
Condensate Pump Discharge	DO Monitor Oxygen ingress, via condensate pump glands or condenser leaks	<10	ppm.,ppb.
	Na^+ Detect Condenser tube leaks	10	ppb.
	Cond. Detect Condenser tube leaks	5^+	umho/cm.
Condensate Plolishing Plant Outlet	Na^+ Monitor cation resin exhaustion	1-5	ppb.
	SiO^2 Monitor cation resin exhaustion	1-5	ppb.
	Cond. Monitor cation resin exhaustion	5^+	umho/cm.
Boiler Drum	SiO^2 Monitor Silica/ Chloride build	10-15	ppb.
	Cl^- up in boiler		
	pH Ensure pH of Boiler is within acceptable limits	8.5-9.3	
	Cond. Monitor total dissolved solids before and after cation give Cl^-,	5-10	umho/cm.

	SO_4^{2-} and NH_3		
Steam	SiO^2 Monitor Silica Carry over	1-5	ppb.
	Na^+ Monitor Sodium Carry over	1-5	ppb.
	Cond. Monitor total dissolved solids before and after cation give Cl^-, SO_4^{2-} and NH_3	5-10	umho/cm.
Condenser	Cond. Monitor Condenser tube leaks in each compartment	5^+	umho/cm.
Flue Gases	O_2, CO, CO_2,SO_2, NO, NO_2 Fuel efficiency and pollution		



รูปที่ 4 แสดงจุดตรวจสอบและจุดป้อนสารเคมีในระบบ

14.1 pH Analyzer

เป็นอุปกรณ์วัดค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำโดยใช้ pH Electrode โดยปกติการวัดค่า pH นิยมใช้ Glass Electrode กับ Reference Electrode แต่เมื่อ Sample มีปริมาณน้อยมาก ๆ หรือต้องวัดค่าของ pH Sample ใน Vassel ที่มีขนาดเล็กมากๆจึงจำเป็นต้องใช้ Combination Electrode ที่มีขนาดเล็ก และจะมีการติดตั้ง Temperature Condensate เพื่อลดปัญหาเรื่องอุณหภูมิมาด้วย และในบางครั้งเพื่อลดปัญหาการดูแลบำรุงรักษาจะมีการติดตั้ง Ultrasonic Cleaner ซึ่งทำให้สามารถใช้งานได้เป็นเวลานาน โดยไม่ต้องมีการหยุดทำความสะอาด นอกจากนี้ยังมี Preamplifier อยู่ภายในตัวเองด้วย ซึ่งจะทำหน้าที่ชดเชยอุณหภูมิ และขจัดปัญหา High Impedance ซึ่งเป็นตัวการรบกวน pH Electrode

14.2 DO Analyzer

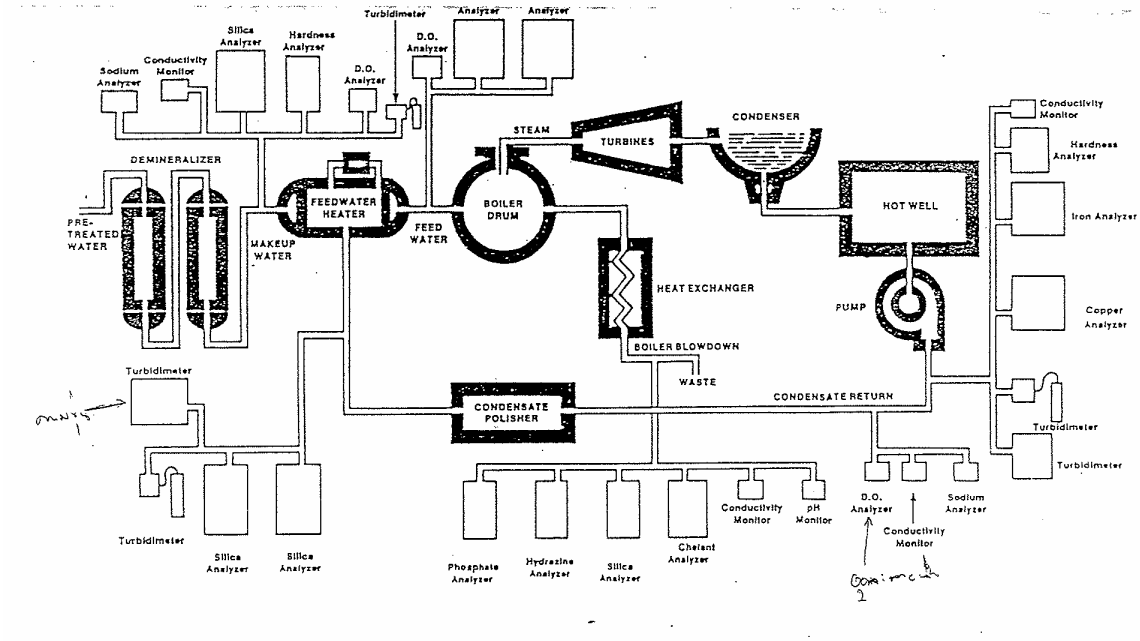
เป็นอุปกรณ์วัดปริมาณออกซิเจนในน้ำโดยใช้ Membrane Electrode ซึ่งสามารถวัดปริมาณออกซิเจนอย่างต่อเนื่องได้

14.3 Sodium Analyzer

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบความเข้มข้นของโซเดียม ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ระดับของ OH^- อิสระที่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบด่าง ซึ่งจะมีผลต่อความเสียหายของเทอร์ไบน์ปริมาณโซเดียมในหม้อไอน้ำความดันสูงควรอยู่ในช่วง 1-5 ppb ส่วนในหม้อน้ำความดันขนาดกลางและขนาดต่ำควรอยู่ในช่วง 10-20 ppb

14.4 Silica Analyzer

เครื่องมือวัดซิลิกา เป็นเครื่องมือวิเคราะห์โดยใช้หลักการ Heteropoly Blue Method (หรือ Molybdenum Method) ซึ่งเป็นวิธีการที่ดัดแปลงมาจาก Standard Method for the Examination of Water and Wastewater โดยสามารถวัดได้ในช่วง 0-5,000 ไมโครกรัม ต่อลิตร (□g หรือ ppb) และจะเป็นการวัด Silica (SiO_2) แบบต่อเนื่องโดบแต่ละตัวอย่างจะใช้เวลาในการวิเคราะห์ประมาณ 8.8-15 นาที



รูป 5 แสดงอุปกรณ์เครื่องมือวัดที่ใช้ที่ตำแหน่งต่างๆในระบบปรับสภาพน้ำของหม้อไอน้ำ

บรรณานุกรม

[1] ทวิช ชูเมือง ,"Industrial Instrumentation Engineering and Design Part I and Part 2" , H.N. group , 2549