



สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

กระบวนการควบคุมทาง วิศวกรรมเคมี

Process Control in Chemical Engineering

ตัวอย่าง

สารก ไชยกุลขึ้นสกุล

สารบัญ

สารบัญรูป

หน้า (๙)

สารบัญตาราง

(๑๓)

1	บทนำ	1
1.1	พื้นฐานของระบบควบคุม (Fundamental of Process Control)	1
1.2	การสร้างกระบวนการควบคุมระบบ (Process Control System Design)	4
1.3	วัตถุประสงค์ของการควบคุม	5
1.4	ความรู้เรื่องระบบควบคุมอื่น	7
2	สมการคณิตศาสตร์ (Mathematical Equation)	9
2.1	แบบจำลองระบบ	10
2.2	การแปลงลาปลาซ (Laplace transform)	11
2.3	การแปลงลาปลาซของตัวแปรขาเข้า (Laplace transform of input)	14
2.4	ทฤษฎีค่าเริ่มต้นและค่าสุดท้าย (Initial & Final Value Theorems)	17
2.5	การกระจายเศษส่วนย่อย (Partial fraction)	19
2.5.1	รากเป็นจำนวนจริงที่แตกต่างกัน	19
2.5.2	รากเป็นจำนวนเชิงซ้อน	21
2.5.3	รากเป็นจำนวนจริงซ้ำกัน	21
2.6	ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน โพล ซีโร (Transfer function, Pole, Zero)	22
2.7	คุณสมบัติของโพล (Pole)	23
2.8	ตัวอย่างการสร้างแบบจำลอง	27
2.8.1	ในกรณีสองถึงสอง	27
2.8.2	ถึงกว่าที่ควบคุมอุณหภูมิ	28
2.9	การแปลงเป็นสมการเชิงเส้น (Linearization)	30
2.10	การลดรูปผังสัญญาณระบบควบคุม (Block diagram)	35

3	พฤติกรรมของอุปกรณ์ (Process Equipment Behavior)	45
3.1	ถังต่ออนุกรมแบบมีปฏิสัมพันธ์ (Interacting Tanks in Series)	45
3.2	เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน (CSTR)	46
3.2.1	ปฏิกรณ์ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ที่อุณหภูมิคงที่ (Isothermal 1 st order Reaction CSTR)	47
3.2.2	ปฏิกรณ์ของปฏิกิริยาย้อนกลับได้ (Reversible Reaction CSTR)	47
3.2.3	ปฏิกรณ์ของปฏิกิริยาต่อเนื่อง (Series Reaction CSTR)	48
3.3	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger)	48
3.4	หม้อต้มระเหย (Evaporator)	50
3.5	ถังแยก (Flash Tank)	53
3.6	หอกลิ้น (Distillation Column)	56
3.6.1	พฤติกรรมของอัตราการไหลของเหลว (Liquid Flow in Tray)	58
3.6.2	การเปลี่ยนแปลงของความดัน (Pressure Change)	61
3.6.3	การเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนโดยโมล (Mole Fraction Change)	61
3.7	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อ (Double Pipes Heat Exchanger)	62
3.7.1	การเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากอุณหภูมิขาเข้า	63
3.7.2	การเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากอุณหภูมิไอน้ำ (Steam Temperature Effect)	64
4	วิเคราะห์ระบบควบคุมแบบพื้นฐาน (Basic Process Control Analysis)	68
4.1	ระบบควบคุมแบบ PID	68
4.1.1	การควบคุมแบบเป็นสัดส่วน (Proportional control)	70
4.1.2	การควบคุมแบบสัดส่วนอินทิกรัล (Proportional Integral control)	71
4.1.3	การควบคุมแบบเป็นสัดส่วนอนุพันธ์ (Proportional Derivative control)	72
4.1.4	การควบคุมแบบเป็นสัดส่วนอินทิกรัลอนุพันธ์ (Proportional Integral Derivative control)	73

4.2	ทรานส์เฟอว์ฟังก์ชันในวงปิด (Closed loop transfer function)	73
4.2.1	ทรานส์เฟอว์ฟังก์ชันในวงปิด (Closed loop transfer function) และสมการลักษณะเฉพาะ (Characteristic equation)	73
4.2.2	แนวทางในการเลือกตัวแปร เป็นตัวแปรที่ต้องการควบคุม (Controlled variable) และตัวแปรปรับค่าได้ (Manipulated variable) ข้อเสนอแนะในการเลือก	75
4.2.3	องค์ประกอบในการควบคุมแบบป้อนกลับหนึ่งวง (Single loop feedback control)	75
4.3	พฤติกรรมของระบบในวงปิด (Closed loop system)	78
4.4	แนวทางการเลือกระบบควบคุม	82
5	การออกแบบและปรับแต่งระบบควบคุม	86
5.1	การปรับแต่งค่าตัวควบคุมเชิงประสบการณ์ (Empirical tuning)	86
5.1.1	การกำหนดค่าตัวควบคุม โดยใช้กราฟปฏิกิริยากระบวนการ (Process reaction curve)	87
5.1.2	วิธีปรับแต่งค่าตัวแปรควบคุม โดยเงื่อนไขผลรวมค่าความแตกต่าง (Error—Integral) ต่ำสุด	90
5.1.3	วิธี Ziegler—Nichols ultimate—cycle	94
5.2	วิธีการปรับแต่งตัวควบคุม โดยการแทนค่าโดยตรง (Direct synthesis) และแบบจำลองภายใน (Internal model)	96
5.2.1	การแทนค่าโดยตรง (Direct synthesis)	97
5.2.2	การปรับแต่งโดยวิธีแบบจำลองภายใน Internal model control, IMC	100
6	ความเสถียรในระบบวงปิด (Closed loop Stability)	115
6.1	นิยามของความเสถียร	115
6.2	Routh—Hurwitz criterion	116
6.3	การวิเคราะห์โดยการแทนค่าโดยตรง (Direct substitution)	118
6.3.1	ความเสถียรของเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน	120
6.4	การวิเคราะห์โดยทางเดินรากสมการลักษณะเฉพาะ (Root locus)	124
6.5	การออกแบบโดยกราฟทางเดินรากสมการลักษณะเฉพาะ (Root locus)	127

7	ผลการตอบสนองความถี่ (Frequency response)	133
7.1	ขนาดและมุม	133
7.1.1	คุณสมบัติที่สำคัญ	134
7.2	การสร้างกราฟ	136
7.2.1	กราฟ Bode	136
7.2.2	กราฟ Nyquist	136
7.3	การวิเคราะห์ความเสถียร (Stability analysis)	147
7.3.1	เงื่อนไขความเสถียรของ Nyquist	147
7.3.2	Gain และ Phase margins	148
7.4	การออกแบบตัวควบคุม	150
8	ระบบควบคุมแบบหลายวงควบคุม (Multiloop Control)	158
8.1	การควบคุมแบบคาสเคด (Cascade control)	158
8.2	การควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า (Feedforward control)	165
8.3	การควบคุมแบบป้อนกลับร่วมกับป้อนล่วงหน้า (Feedback— feedforward control)	167
8.4	การควบคุมแบบอัตราส่วน (Ratio control)	169
8.5	Smith Predictor	170
8.6	การควบคุมแบบโอเวอร์ไดร (Overdrive Control)	172
ก	อุปกรณ์วัดและวาล์ว	177
ข	ความสามารถในการควบคุม และความสามารถในการติดตามค่า ในระบบสมการ	183
ค	การใช้โปรแกรม MATLAB	187
	บรรณานุกรม	192
	ดัชนี	193

สารบัญรูป

1.1	เครื่องปฏิกรณ์เคมี ที่ติดตั้งระบบควบคุมพีเอช (pH)	2
1.2	ผังสัญญาณระบบควบคุม (Block diagram) สำหรับการควบคุม pH (single input single output negative feedback control)	3
1.3	(ก) ถังน้ำที่ไหลเข้าและไหลออก ซึ่งต้องการรักษาระดับความสูงของถัง (ข) ควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control) (ค) ควบคุมแบบป้อน ล่วงหน้า (Feedforward control)	6
2.1	ถึงกวนแบบที่ผสมกันอย่างทั่วถึง	10
2.2	ลักษณะของฟังก์ชัน (ก) ค่าคงที่ (ข) เอกซ์โพเนนเชียล และ (ค) ลาดเอียง	12
2.3	ฟังก์ชัน (ก) ขั้นบันไดขนาดหนึ่งหน่วย (Unit step), (ข) มุมฉาก Rectangular, (ค) เวลาการตอบสนองล่าช้า (Time delay), (ง) อิมพัลส์ ฟังก์ชัน (Impulse functions)	15
2.4	การตอบสนองแบบแกว่งต่ำ (Underdamped)	25
2.5	ตำแหน่งและค่าโพล (Pole) ที่มีค่าต่างกัน	26
2.6	ถึงผสมสองถึงต่อเชื่อมกัน (ก) ลักษณะการต่อเชื่อมถึง (ข) พฤติกรรมการ เปลี่ยนแปลงของความเข้มข้น	27
2.7	ถึงกวนควบคุมอุณหภูมิ	28
2.8	ตำแหน่งค่า Pole และพฤติกรรมการตอบสนอง ในตัวอย่างถึงกวนควบคุม อุณหภูมิ	30
2.9	การเปลี่ยนแปลงความสูงของถังอันเนื่องมาจากอัตราการไหลของสาร A เพิ่ม ขึ้น โดยอัตราการไหลออก $F = c\sqrt{\rho h}$	35
2.10	(ก) ผังสัญญาณระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback block diagram) (ข) ผังสัญญาณระบบควบคุมแบบลดรูป (Reduced block)	36
2.11	ตัวอย่างการหาค่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันวงควบคุมแบบปิดแบบป้อนกลับ	36
2.12	ผังสัญญาณระบบควบคุม (Block diagram)	38
2.13	ผังสัญญาณระบบควบคุม (Block diagram)	39

3.1	ดังต่อไปนี้แบบมีปฏิสัมพันธ์กับระดับของเหลว	45
3.2	โครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน 3.2.1) $A \rightarrow B$, 3.2.2) AB , 3.2.3) $A \rightarrow B \rightarrow C$	46
3.3	โครงสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งมีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน UA	49
3.4	โครงสร้างหม้อต้มระเหย	50
3.5	การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของไอน้ำในหม้อต้ม อันเนื่องจากการไหลเข้า โดย $\tau_1 = 2.5$ นาที, $\tau_2 = 1.25$ นาที, $\tau_3 = 5$ นาที, $(T^s - T_{in}^s)/T^s = 0.4$, และ β ต่างๆ	53
3.6	โครงสร้างของถังแยก (Flash tank)	54
3.7	การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นในของเหลว อันเนื่องจากการไหลเข้าเพิ่มขึ้น ที่ค่า τ ต่างๆ	55
3.8	โครงสร้างของหอกลั่นอย่างง่าย	56
3.9	พฤติกรรมของการไหลของของเหลวและไอที่เกิดขึ้นบนเทรย์ (Tray)	58
3.10	มวล ในหม้อต้ม (Reboiler) ที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการไหลของไอเพิ่มขึ้น	60
3.11	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อคู่ (Double pipe heat exchanger)	62
3.12	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาออก เนื่องจากอุณหภูมิไอน้ำ เส้นประแทนแต่ละพจน์ของสมการที่ (3.87) (ก) เส้นผ่าศูนย์กลางมีขนาดใหญ่ (ข) เส้นผ่าศูนย์กลางมีขนาดเล็ก	64
4.1	ลักษณะของระบบควบคุมระดับความสูง	69
4.2	ที่ตำแหน่งจุดรวมข้อมูล สำหรับระบบการป้อนกลับด้านลบ (Negative feedback)	69
4.3	ผังสัญญาณระบบควบคุม (Block diagram) สำหรับระบบวงปิด (Closed loop system)	74
4.4	ระบบการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback) อย่างง่าย	78

5.1	ผังสัญญาณระบบควบคุม (Block diagram) สำหรับการทดสอบในวงเปิด (Open loop test)	87
5.2	การเขียนผลการทดลองให้อยู่ในสมการ (5.2)	88
5.3	การหาค่าคงที่สำหรับอนุพันธ์อันดับหนึ่งร่วมกับเวลาหน่วง (ก) หาค่าจากความชันและจุดตัดแกน (ข) หาค่าจากเวลา 28.3% และ 63.2%	89
5.4	สำหรับการปรับแต่งโดยวิธี Fertik สำหรับตัวควบคุมแบบ PI	92
5.5	สำหรับการปรับแต่งโดยวิธี Fertik สำหรับตัวควบคุมแบบ PID	93
5.6	พฤติกรรมของค่าการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย หรือตัวแปรรบกวน และพฤติกรรมของตัวแปรควบคุม	96
5.7	การควบคุมแบบ IMC	102
5.8	พฤติกรรมการตอบสนองก่อนการควบคุมและหลังจากการปรับค่าตัวควบคุม โดย Cohen—Coon(C—C), Ziegler—Nichols (Z—N), ITAE และ IMC	106
5.9	พฤติกรรมการตอบสนองจากการปรับค่าตัวควบคุม โดย IMC, Hägglund—Åström (H—A), ITAE	108
5.10	พฤติกรรมการตอบสนองจากการปรับค่าตัวควบคุม (ก) Set point (ข) Disturbance	111
6.1	ความร้อนจากปฏิกิริยาเคมี และความร้อนของการหล่อเย็น โดยระบบจะเสถียรเมื่อความชันของเส้นความร้อนจากปฏิกิริยาเคมี ต้องมีค่าน้อยกว่าเส้นความร้อนของการหล่อเย็น	123
6.2	ทางเดินรากสมการลักษณะเฉพาะ (Root locus) ของตัวอย่าง 6.5	125
6.3	Root locus ของฟังก์ชันแบบต่าง ๆ	126
6.4	ทางเดินรากสมการลักษณะเฉพาะ (Root locus) ของตัวอย่าง 6.6	128
6.5	กราฟ Bode ของระบบใน ตัวอย่าง 6.8 ที่ควบคุมด้วย PID Ziegler—Nichols (Z—N), Tyreus—Luyben (T—L)	130
7.1	กราฟ Bode และ Nyquist ของฟังก์ชันของอนุพันธ์อันดับหนึ่ง	138
7.2	กราฟ Bode และ Nyquist ของฟังก์ชันของอนุพันธ์อันดับสอง	140
7.3	กราฟ Bode และ Nyquist ของฟังก์ชันอนุพันธ์นำแรง $G(s) = \tau s + 1$	142
7.4	กราฟ Bode และ Nyquist ของฟังก์ชันเวลาหน่วง $G(s) = e^{-tas}$	143
7.5	กราฟ Bode ของฟังก์ชันอนุพันธ์อันดับหนึ่งบวกเวลาหน่วง	144
7.6	กราฟ Bode ของ $G(s) = \frac{K}{s(\tau s + 1)}$	145

7.7	กราฟ Bode ของ $G(s) = \frac{(5s + 1)}{(10s + 1)(2s + 1)}$	146
7.8	กราฟ Bode ของ $G(s) = \frac{1}{(0.1s + 1)(s + 1)(10s + 1)}$	148
7.9	สภาวะเสถียรและไม่เสถียรในกราฟ Nyquist	149
7.10	การวิเคราะห์ Gain และ Phase margins บนกราฟ Nyquist และ Bode	150
7.11	กราฟ Bode ในกรณีที่ใช้ $K_c = 35.5$ ซึ่ง $GM = 1.7$ และ $PM = 18.8^\circ$	153
7.12	การตอบสนองที่เวลาต่าง ๆ (ก) ตัวอย่าง 7.10 Ziegler—Nichols (Z-N), Tyreus—Luyben (T-L), (ข) ตัวอย่าง 7.11	154
8.1	ระบบควบคุมแบบคาสเคด (Cascade control) ของอุณหภูมิภายในเตาเผา โดยระบบควบคุมอุณหภูมิส่งสัญญาณควบคุมไปยังตัวควบคุมอัตราการไหล	159
8.2	ผังสัญญาณระบบควบคุม (Block diagram) ของการควบคุมแบบคาสเคด (Cascade control)	160
8.3	การควบคุมแบบคาสเคดในหม้อต้ม (ก) กรณีควบคุมแบบป้อนกลับ (ข) กรณีควบคุมแบบคาสเคด	161
8.4	กราฟทางเดินรากสมการลักษณะเฉพาะ (Root locus plot) ซึ่งโพล (Pole) = 0, -0.5, -10	164
8.5	การควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า (Feedforward control)	166
8.6	ก) การควบคุมแบบป้อนกลับร่วมกับป้อนล่วงหน้า (Feedback—feedforward control), ข) ผัง (Block) หลังจากย้าย	168
8.7	การควบคุมแบบอัตราส่วน (Ratio control)	169
8.8	ระบบควบคุมการควบคุมแบบป้อนกลับ ที่มีเวลาการตอบสนองล่าช้า (Feedback control plus dead time)	170
8.9	Smith predictor	171
8.10	การควบคุมแบบโอเวอร์ไดร (ก) ป้องกันระดับของเหลวในหม้อต้ม, LSS=Low Selective Switch (ข) ป้องกันการทำงานห่อหล่อเย็น, SHH=High Selective Switch	173
ก.1	ลักษณะของแผ่นไดอะแฟรม (Diaphragm)	178
ก.2	ลักษณะของอุปกรณ์ในการวัดอุณหภูมิ ความดัน และอัตราการไหลผ่านออริฟิส	179
ก.3	โครงสร้างของวาล์วและความสัมพันธ์ของอัตราการไหลและลื่นวาล์ว	180
ก.4	ลักษณะการทำงานของวาล์ว (ก) Fail—Open (ข) Fail—Close	181

สารบัญตาราง

2.1	ค่าในการแปลงลาปลาซ (Laplace transform) พื้นฐาน	40
5.1	สูตรการปรับแต่งค่าคงที่ของตัวควบคุม $G_{PRC} = \frac{K_p e^{-t_d s}}{\tau_p s + 1}$	90
5.2	สูตรการปรับแต่งค่าคงที่ของตัวควบคุม $G_{PRC} = \frac{K_p e^{-t_d s}}{s}$	91
5.3	ค่าตัวแปรควบคุม โดยเงื่อนไขผลรวมค่าความแตกต่าง (Error—Integral) ต่ำสุด (Ogunnaike & Ray 1994)	94
5.4	ค่าตัวแปรควบคุม โดยเงื่อนไข Ultimate—gain	95
5.5	ค่าคงที่ของตัวควบคุมแบบ PID โดยใช้แทนค่าโดยตรง (Direct synthesis) (Ogunnaike & Ray 1994)	101
5.6	ตัวควบคุมแบบ PID โดยวิธี IMC (Rivera <i>et al.</i> , 1986)	103
5.7	ค่าคงที่ของการควบคุมแบบ PID	105
5.8	พฤติกรรมของการตอบสนองจากการปรับค่าตัวควบคุม	106
5.9	ค่าคงที่ของการควบคุมแบบ PI	107
5.10	พฤติกรรมของการตอบสนอง	107
5.11	ตัวควบคุมแบบ PID โดยวิธี Chen และ Seborg (Chen & Seborg 2002)	108
5.12	ตัวควบคุมแบบ PID โดยวิธี SIMC (Skogestad 2003)	110
ก.1	เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ชนิดต่างๆ	178

คำนำ

ส่วนสำคัญของหนังสือเล่ม
หนึ่งนั้นไม่แน่นอน แต่จะ
แปรเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับว่า
ใครเป็นคนอ่านหนังสือเล่ม
นั้น

โยชิโนริ ยานางิซาวา

วิชากระบวนการควบคุม เป็นวิชาบังคับในหลักสูตรวิศวกรรมเคมี เนื้อหาประกอบด้วยสาม
ส่วนหลักๆ อันได้แก่ ความรู้ทางคณิตศาสตร์ โดยเฉพาะการแก้สมการอนุพันธ์ และความ
รู้ในการเขียนชุดมวล พลังงาน และวิธีการวิเคราะห์ปรับแต่งตัวควบคุมต่างๆ ด้วยเหตุนี้
นักศึกษาของภาควิชาฯ (ซึ่งน่าจะเกิดขึ้นในมหาวิทยาลัยอื่นๆ) คงจะมีปัญหาในการทำ
เข้าใจในเนื้อหาวิชาจนขาดความใส่ใจ และความสนใจในการใช้ความรู้

จากประสบการณ์การสอนวิชานี้ ตั้งแต่ พ.ศ. ๒๕๔๔ ซึ่งได้รับข้อเสนอแนะจากนักศึกษา และ
จากอาจารย์หลายๆท่าน ทำให้ผู้แต่งตระหนักถึงเรื่ององค์ความรู้ที่นักศึกษาสามารถรับได้
กับความรู้ที่นักศึกษาต้องเรียน คงจะสวนทางกันมากขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของตำรา
นี้เพื่อพยายามให้บรรลุทั้งสองด้าน โดยพยายามอธิบายเหตุผลและการนำไปใช้งาน ตลอดจน
จนตัวอย่างเลือกให้เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมเคมี

ในปัจจุบันโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ได้มีการพัฒนาไปอย่างมาก โปรแกรม MATLAB
เป็นโปรแกรมหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการเรียนและอธิบาย ในวิชากระบวนการควบคุม เนื่องจาก
สามารถเขียนฟังก์ชันอนุพันธ์ต่างๆ ในรูปของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันแล้ว ยังสามารถแสดง
พลวัตการเปลี่ยนแปลงของระบบที่ถูกควบคุม หรือไม่ถูกควบคุมได้ทั้งในรูปของการ
เปลี่ยนแปลงที่เวลาต่างๆ หรือในรูปของกราฟ Bode และ Nyquist ซึ่งเพียงพอสำหรับ
การเรียนรู้ในระดับปริญญาตรี

สาธก ไชยกุลชั้นสกุล
ปทุมธานี

1 บทนำ

สิ่งสำคัญสำหรับมนุษย์ ไม่ใช่
ว่าเราทำได้มากมายแค่ไหน
หรือเข้าใจได้รวดเร็วเพียงใด
แต่อยู่ที่เราสนใจหรือไม่
เรารักสิ่งนั้นอย่างลึกซึ้งเพียง
ใดต่างหาก
โยชิโนริ ยานางิซาวา

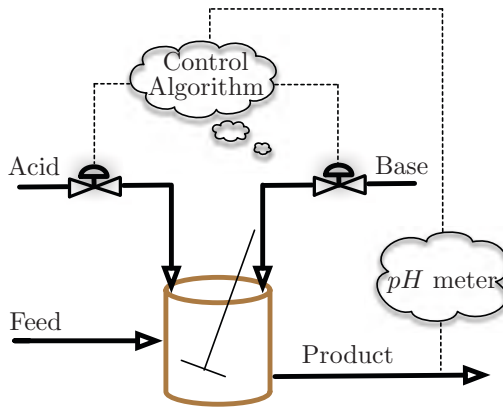
1.1 พื้นฐานของระบบควบคุม (Fundamental of Process Control)

ระบบควบคุม เข้ามาเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของเราอยู่ตลอดเวลา ตัวอย่าง เช่น ถูกลอย
ควบคุมระดับน้ำซึ่งไม่มีความซับซ้อนอย่างไร จนถึงรถยนต์ที่มีระบบควบคุมอยู่มากมายซ่อน
อยู่ภายใน (ระบบหัวฉีดควบคุมการจ่ายน้ำมัน ระบบทำความเย็น ระบบกันกระแทก เป็นต้น)
หรืออุปกรณ์เครื่องใช้ในปัจจุบันที่มีไมโครโปรเซสเซอร์ (Microprocessor) ประกอบอยู่
ภายใน

ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ระบบควบคุมเป็นหน้าที่สำคัญในการควบคุมในกระบวนการผลิตให้
ทำงานเป็นปกติอยู่ตลอดเวลา ตั้งแต่ สิ่งง่าย ๆ อย่างการเติมสารลงในถังเก็บ จนถึงการใช้
รักษาอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เคมีให้มีค่าคงที่ การปล่อยของเสียหรือมลพิษตามมาตรฐาน
ตลอดเวลาทำการและให้เข้าสู่ปริมาณมาตรฐานอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลง

ตัวอย่างเช่นในเครื่องปฏิกรณ์เคมีในสถานะปกติที่ต้องการให้ค่าพีเอช (pH) มีค่าคงที่ (เรียก
 pH ว่าตัวแปรที่ต้องการควบคุม Controlled variable) โดยเครื่องปฏิกรณ์มีอุปกรณ์ประกอบ
ได้แก่ ตัว pH Electrode ถูกใช้วัดค่า pH และเปลี่ยนค่า pH ไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วย
อุปกรณ์แปลงสัญญาณ (Transmitter) ซึ่งสัญญาณถูกส่งต่อไปยังตัวควบคุม (Controller)
ซึ่งอาจเป็นกล่องเล็ก ๆ หรือ คอมพิวเตอร์

การเปรียบเทียบค่า pH กับค่าที่ตั้งเป้าหมาย (เรียกว่า pH Set point หรือ Reference)
ในกรณีที่มีค่าแตกต่างระหว่างค่าทั้งสอง (Error) สัญญาณจะถูกส่งต่อไปตัวควบคุม ซึ่งตัว
ควบคุมจะทำหน้าที่ส่งสัญญาณไปเปิดปิดวาล์วของกรวดหรือต่าง (Actuator) โดยการปรับ
แต่งตัวควบคุมนี้อยู่บนพื้นฐานของกฎการควบคุม (Control algorithm หรือ Control

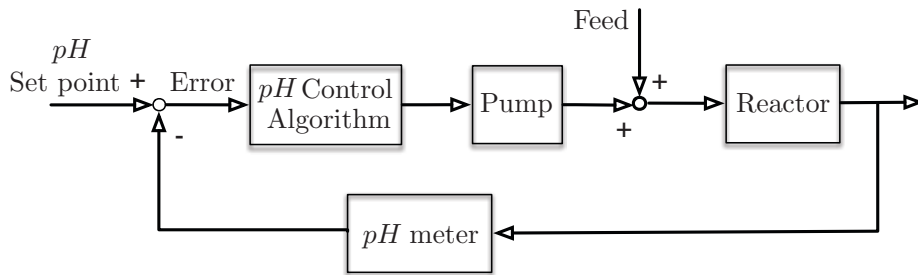


รูปที่ 1.1 เครื่องปฏิกรณ์เคมี ที่ติดตั้งระบบควบคุมพีเอช (pH)

law) ดังรูปที่ 1.1 การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback) เป็นการควบคุมที่พิจารณาจากค่า Output ไปเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมาย (Set point) ในการศึกษากระบวนการควบคุม มักจะเขียนในรูปของผังสัญญาณระบบควบคุม (Block diagram) ซึ่งในการได้มาของแต่ละผัง ต้องใช้ความรู้ทางคณิตศาสตร์ ในกรณีตัวอย่างนี้สามารถเขียนผังสัญญาณระบบควบคุม (Block diagram) ได้ตามรูปที่ 1.2 ซึ่งค่า pH ที่วัดผ่าน pH meter และค่าจะถูกเปรียบเทียบกับค่า ตั้งเป้าหมาย (เรียกว่า pH Set point) ผลต่างของค่าทั้งสองเรียกว่าค่าแตกต่าง (Error) แล้วส่งสัญญาณไปยังตัวควบคุม เพื่อปรับการเปิดปิดของวาล์วสัญญาณจากวาล์วจะไปรวมกับค่าของสายป้อน (Feed) ออกมาเป็นค่า pH ในสายขาออก

ตัวอย่างการควบคุมค่า pH ในเครื่องปฏิกรณ์นี้ เป็นตัวอย่างที่สมมุติขึ้นให้ง่ายต่อความเข้าใจ (ในอุตสาหกรรม ระบบการควบคุมสำหรับเครื่องปฏิกรณ์เคมีจะมีความซับซ้อนกว่ามาก) ในกรณีที่ควบคุมเฉพาะค่า pH อย่างเดียวจะเรียกว่า Single—Input Single—Output (SISO) โดยค่า pH ในสายป้อน (Feed) เป็นตัวแปร Input เพียงหนึ่งค่า และค่า pH ในสายขาออกจากเครื่องปฏิกรณ์ (Product) เป็นตัวแปร Output เพียงหนึ่งค่า ทั้งนี้ลักษณะของการหาค่าความแตกต่างของ pH ที่วัดได้จากอัตราการไหลขาออกจากเครื่องปฏิกรณ์เปรียบเทียบกับค่าเป้าหมาย (Set point) โดยหากค่าแตกต่างมีค่าเป็นลบ ค่า pH ในสายขาออกจากปฏิกรณ์มีค่าสูงกว่าค่าเป้าหมาย ตัวควบคุมจะสั่งการให้วาล์วเปิดลดลง เพื่อให้ค่า pH ในสายขาออกมีค่าต่ำลง หรือในทางกลับกันหากค่าแตกต่างมีค่าเป็นบวก ค่า pH ในสายขาออกมีค่าต่ำกว่าค่าเป้าหมาย ตัวควบคุมจะสั่งการให้วาล์วเปิดมากขึ้น เพื่อให้ค่า pH ในสายขาออกมีค่าสูงขึ้น การควบคุมในลักษณะนี้จะเรียกว่าเป็นการควบคุมแบบ

ป้อนกลับด้านลบ (Negative feedback control) ทั้งนี้การควบคุมแบบป้อนกลับด้านลบ
 นี้นิยมใช้กับกระบวนการควบคุมที่มีวัตถุประสงค์ในการควบคุมเพื่อรักษาค่า pH ในสายขา
 ออกให้มีค่าคงที่ตามค่าเป้าหมาย



รูปที่ 1.2 พังสัญญาณระบบควบคุม (Block diagram) สำหรับการควบคุม pH (single input single output negative feedback control)

ในกระบวนการจริงย่อมมีตัวแปรอื่น ๆ เข้ามาเกี่ยวข้องกับเครื่องปฏิกรณ์ เช่น อุณหภูมิของสารป้อน การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความเร็วของน้ำหล่อเย็น เป็นต้น ซึ่งในกรณีที่มีตัวแปรเกี่ยวข้องกับกระบวนการควบคุมหลาย ๆ ตัว จะถูกเรียกว่า Multiple Input Multiple Output (MIMO)

ในตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ของเครื่องปฏิกรณ์ อาจเกิดขึ้นเนื่องจากค่า pH ของสารที่ป้อน ความเร็วของสารที่ป้อนและสารที่ไหลออก รวมทั้งขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งถูกเรียกรวมว่าระบบ (System) หรือ กระบวนการ (Process) ในขณะที่ ตัวควบคุม และ อุปกรณ์อื่น ๆ เช่น ตัววัด วาล์ว ปั๊ม (Sensor transmitter, Actuator, Valve, Pump) เป็นเฉพาะส่วนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการควบคุม

ในการควบคุม จะเกิดขึ้นได้สองลักษณะ คือ การเปลี่ยนสถานะ หรือเงื่อนไขของระบบที่ตั้งเป้าไว้ (ในกรณีนี้ คือ pH Set point) ให้ไปอยู่ที่ค่าเป้าหมายใหม่ จะเรียกการควบคุมในลักษณะนี้ว่าการควบคุมเพื่อติดตามค่าเป้าหมาย (Servo control) อีกลักษณะหนึ่งของการควบคุมคือ การที่ตัวแปรอื่น ๆ เช่น ค่า pH ของสารป้อน หรือความเร็วของสารป้อน เรียกว่าตัวแปรบกวนระบบ (Disturbance variable) เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นผลให้ค่า pH ของเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้นหรือลดลง ซึ่งตัวควบคุมจะต้องกำจัดหรือขจัดผลกระทบจากตัวแปรบกวนระบบ (Regulatory control) นี้ออกไป การทำงานของระบบควบคุมทั้งสอง

ลักษณะ (Servo control และ Regulatory control) อาจทำให้ระบบปฏิกิริยาไม่เสถียร (Instability) ได้ อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมีในเครื่องปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ซึ่งความเสถียรนี้เป็นหัวใจของการออกแบบระบบควบคุม

1.2 การสร้างกระบวนการควบคุมระบบ (Process Control System Design)

เริ่มต้นต้องทราบถึงสิ่งที่ต้องการควบคุม หน้าที่ของตัวแปรแต่ละตัวว่ามีส่วนเกี่ยวข้องกับระบบอย่างไร ตัวแปรใดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงและไม่สามารถควบคุมได้ ตัวแปรที่ส่งผลต่อวัตถุประสงค์ของการควบคุม ตัวแปรใดที่จะเป็นตัวแปรปรับแก้ผลการเปลี่ยนแปลง เป็นต้น การเลือกอาจแตกต่างกันในลักษณะของการควบคุมว่าเป็น การควบคุมเพื่อติดตามค่าเป้าหมาย หรือ การควบคุมเพื่อกำจัดผลกระทบจากตัวระบบกระบวนการ ตลอดจนความต้องการในการตอบสนองของกระบวนการควบคุม (ช้า เร็ว เป็นต้น)

เพื่อให้ได้ตามเงื่อนไข และวัตถุประสงค์ต่าง ๆ จึงจำเป็นที่จะต้องเลือกเทคนิคในการควบคุมให้เหมาะสม และยังรวมถึงการเลือก ตัววัด วาล์ว ป้อน ให้เหมาะสมกับเทคนิคการควบคุมที่เลือกใช้อีกด้วย

จะเห็นได้ว่าการที่จะควบคุมระบบให้ได้ตามที่ต้องการ ขึ้นกับความเข้าใจว่าตัวแปรต่าง ๆ มีความเกี่ยวข้องกับระบบอย่างไร ซึ่งเกี่ยวข้องกับความรู้ต่าง ๆ ตั้งแต่คุณสมบัติและพลังงาน การถ่ายเทโมเมนตัม การถ่ายเทความร้อน การถ่ายโอนมวล สมดุลสถานะ และปฏิกิริยาเคมี (และยังรวมถึง วงจรไฟฟ้า กลศาสตร์ของแข็งด้วย) แต่แตกต่างกันตรงที่ในเรื่องการควบคุมระบบ จะวิเคราะห์ในสมการที่เกิดการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ที่รวมพจน์ของการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Accumulation) เข้ากับพฤติกรรมในสถานะคงตัว (Steady state) ในระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น (เช่นโรงกลั่นน้ำมัน) ย่อมมีสมการเหล่านี้จำนวนมากมายจนไม่สามารถสร้างแบบจำลองของระบบได้อย่างเหมาะสม จึงจำเป็นที่หาแบบจำลอง ด้วยวิธีการที่เรียกว่าการหาเอกลักษณ์ของระบบและการประมาณค่าพารามิเตอร์ (System identification and parameter estimation)

เมื่อได้แบบจำลองที่เหมาะสมที่เกี่ยวข้องกับสมการอนุพันธ์เชิงเส้นสามัญ (Linear ordinary differential equation) ในพื้นฐานของการศึกษาการควบคุมวิธีการทางคณิตศาสตร์ ถูกนำมาใช้คือการแปลงลาปลาซ (Laplace transform) ซึ่งการแปลงลาปลาซช่วยให้สามารถเปลี่ยนสมการอนุพันธ์ในรูปของสมการพีชคณิต และจัดรูปสมการพีชคณิตของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรขาออกและตัวแปรขาเข้า โดยเรียกสมการนี้ว่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer function) และแสดงในแต่ฟังก์ชันสัญญาณระบบควบคุม (Block Diagram) ดังรูปที่ 1.2

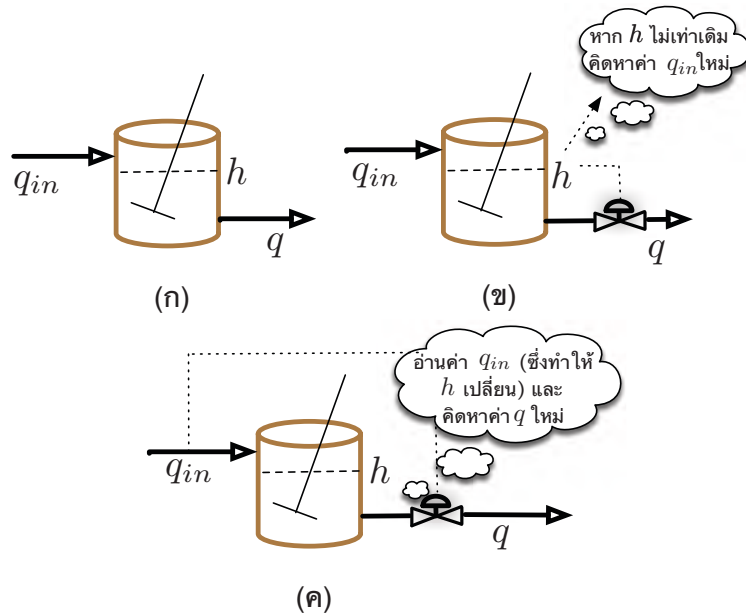
โดยทั่วไปเราจะไม่ทำการหาคำตอบของสมการอนุพันธ์ในรูปโดเมนของเวลา แต่จะทำการวิเคราะห์และเข้าใจค่าของสมการที่เรียกว่าสมการลักษณะเฉพาะ (Characteristic equation) เพื่อหาค่าโพล (Pole) ของสมการในการวิเคราะห์สภาวะคงตัวของระบบ

1.3 วัตถุประสงค์ของการควบคุม

- เพื่อให้ระบบทำงานอยู่ในช่วงการทำงานที่ปลอดภัย และอยู่ในช่วงค่าสูงสุดและต่ำสุดที่เป็นไปได้ เช่น ความสูงระดับของเหลว
- เพื่อให้ระบบทำงานอยู่ในสภาวะสภาวะคงตัว
- เพื่อลดผลกระทบจากปัจจัยภายนอกต่าง ๆ ที่มีต่อระบบ
- เพื่อให้ระบบทำงานในช่วงที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

ตัวอย่างของถังเก็บน้ำ (ดังรูป 1.3) โดยมีน้ำไหลเข้าที่อัตรา q_{in} และอัตราไหลออกที่ก้นถังด้วยอัตรา q การควบคุมระดับน้ำภายในถัง สามารถทำได้ในสองลักษณะคือ การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control) และการควบคุมแบบป้อนลวงหน้า (Feed-forward control) ซึ่งการควบคุมแบบป้อนกลับนั้นความสูงของระดับน้ำ h ถูกใช้เป็นตัวแปรหรือสัญญาณกับการปรับค่าของตัวปรับค่า q (Manipulate variable) เพื่อจัดผลเนื่องจากตัวแปรรบกวน (Disturbance variable) เพื่อให้ผลต่างระหว่างระดับความสูงของน้ำกับค่าที่ตั้งไว้ (Set point) มีค่าเท่ากับศูนย์ ตัวอย่างเช่น หากกำหนดให้ q_{in} เป็นตัวแปรรบกวนระบบ (Disturbance variable) และ q เป็นอัตราการไหลเพื่อปรับรักษาให้ระดับความสูงของน้ำภายในถังคงที่ ดังรูป 1.3

จุดด้อยของการควบคุมแบบป้อนกลับ คือ ระบบควบคุมจะทำงาน ก็ต่อเมื่อระดับความสูงแตกต่างจากค่าที่ตั้งไว้ (ในกรณีของถังก่อนนี้ ข้อด้อยนี้ไม่ค่อยมีความสำคัญเท่าใด) เนื่องจากโดยทั่วไปในถังน้ำ เมื่อความสูงเกิดการเปลี่ยนแปลงไปสูงขึ้นหรือต่ำกว่าค่าเป้าหมาย ระดับ



รูปที่ 1.3 (ก) ถังน้ำที่ไหลเข้าและไหลออก ซึ่งต้องการรักษาระดับความสูงของถัง (ข) ควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control) (ค) ควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า (Feedforward control)

ความสูงยังของน้ำยังอยู่ในถัง เนื่องจากโดยทั่วไปค่าเป้าหมายมักอยู่ในช่วงกึ่งกลางของความสูงของถัง และระบบการควบคุมแบบป้อนกลับ จะปรับระดับความสูงใหม่ให้ได้ตามค่าเป้าหมาย

ในการควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า นั้น ค่าของตัวแปรรบกวนจะถูกวัด (q_{in}) และส่งสัญญาณให้ตัวปรับค่าจัดผลเนื่องจากตัวแปรรบกวนทันที (q) ดังรูป 1.3

จุดด้อยของการควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า คือ การไม่ทราบค่าของระดับความสูง แต่พิจารณาจากค่าของตัวแปรรบกวน ซึ่งการวัดค่าของตัวแปรรบกวนนั้น อาจมีค่าตัวแปรรบกวนอื่นที่ไม่ได้วัดเกิดขึ้นได้ เช่น อุณหภูมิที่เปลี่ยนไปจะมีผลต่อความหนาแน่นและส่งผลต่อความสูงของถัง หรือการมีการรั่วซึมของน้ำออกจากถัง ซึ่งไม่ได้ถูกพิจารณา

กระบวนการควบคุมทางวิศวกรรมเคมี

หนังสือเล่มนี้อธิบายถึงการควบคุม ซึ่งเหมาะสำหรับเรียนในหนึ่งภาคการศึกษา โดยประกอบด้วยสามส่วนหลักๆ อันได้แก่ ความรู้ทางคณิตศาสตร์ (การแก้สมการอนุพันธ์ และการแปลงลาปลาซ) การเขียนดุลมวล พลังงาน และการออกแบบระบบควบคุม วิธีการวิเคราะห์ปรับแต่งตัวควบคุมแบบ PID (ความเสถียร ผลการตอบสนองความถี่) ในแต่ละบทมีตัวอย่างและโจทย์ท้ายบท นอกจากนี้ยังแนะนำการใช้คำสั่งใน MATLAB เพื่อใช้งานร่วมไปในตัวอย่างของหนังสือในการหารากสมการเฉพาะ การเขียนกราฟ Bode, Nyquist

ตัวอย่าง

รองศาสตราจารย์ ดร.สาธก ไชยกุลชั้นสกุล

อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
การศึกษา

- วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2535
- M. Eng. (Chemical Engineering) Stevens Institute of Technology พ.ศ. 2537
- Ph.D. (Chemical Engineering) Polytechnic University พ.ศ. 2543

ISBN 978-616-602-213-1



9 786166 022131

ราคา 350 บาท

หมวดวิศวกรรมศาสตร์