

## บทที่ 2

### วารสารปริทัศน์

#### 2.1 การเผาไหม้

การเผาไหม้ (Combustion) หมายถึง การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารบางชนิดที่เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนอย่างรวดเร็ว ทำให้มีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิสูงมากเนื่องจากไม่สามารถถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาได้ทันไม่ว่าจะเป็นกระบวนการแผ่รังสี (Radiation) หรือการพาความร้อน (Convection) ให้กับสิ่งแวดล้อม ดังนั้นข้อแตกต่างระหว่างกระบวนการเผาไหม้กับปฏิกิริยาออกซิเดชันในรูปแบบอื่นคือความร้อนที่เกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันทั่วไปจะเกิดแบบช้า ๆ ที่อุณหภูมิต่ำ (ใกล้อุณหภูมิห้อง)

องค์ประกอบที่จำเป็นในการเผาไหม้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

##### 2.1.1 เชื้อเพลิง (Fuel)

เชื้อเพลิงแบ่งตามลักษณะทางกายภาพออกเป็น 2 ประเภทคือ เชื้อเพลิงเหลวและเชื้อเพลิงแข็ง เชื้อเพลิงเหลวจะเป็นเชื้อเพลิงที่มีทั้งสถานะเป็นของเหลวและก๊าซ เชื้อเพลิงประเภทนี้ได้แก่ น้ำมันเชื้อเพลิงต่าง ๆ ที่ใช้กับเครื่องยนต์ ก๊าซหุงต้ม (LPG gas) เป็นต้น ส่วนเชื้อเพลิงแข็ง ได้แก่ เชื้อเพลิงประเภท ไม้ ถ่านหิน มูลฝอย เป็นต้น

เชื้อเพลิงส่วนใหญ่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประกอบด้วยพันธะเคมีต่าง ๆ ได้แก่ พันธะคาร์บอน-คาร์บอน พันธะคาร์บอน-ไฮโดรเจน และพันธะไฮโดรเจน-ไฮโดรเจน เป็นต้น ซึ่งเป็นแหล่งให้พลังงานเคมีทั่วไป ระหว่างการเผาไหม้เมื่อเชื้อเพลิงถูกออกซิไดซ์พลังงานพันธะซึ่งเป็นพลังงานเคมีอย่างหนึ่งจะถูกเปลี่ยนให้เป็นพลังงานความร้อนและพลังงานกลบางส่วน

### 2.1.2 สารออกซิแดนท์ (Oxidant)

องค์ประกอบพื้นฐานของการเผาไหม้อันดับต่อมาคือสารออกซิแดนท์ (oxidant) เป็นสารที่ช่วยให้เชื้อเพลิงเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน สารออกซิเดนท์ในปฏิกิริยาการเผาไหม้ทั่วไปคือก๊าซออกซิเจนซึ่งเป็นองค์ประกอบของอากาศ สารออกซิเดนท์ไม่จำเป็นต้องมีสถานะเป็นก๊าซอาจเป็นของเหลวหรือของแข็งก็ได้ อย่างไรก็ตามการเผาไหม้ส่วนมากจะเป็นการเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศดังนั้นก๊าซออกซิเจนจึงเป็นสารออกซิเดนท์ที่สำคัญในปฏิกิริยาการเผาไหม้

### 2.2 ปฏิกิริยาการเผาไหม้ของก๊าซแอลพีจี

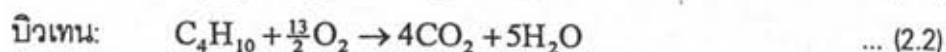
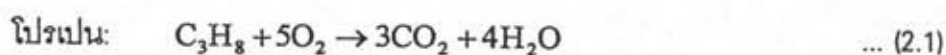
ก๊าซแอลพีจี (LPG gas) หมายถึงก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่มีส่วนประกอบของอะตอมคาร์บอน (C) 3 และ 4 โมเลกุลขึ้นไป ซึ่งไฮโดรคาร์บอนระดับนี้จะสามารถเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวได้ภายใต้ความดันที่ไม่สูงนักที่อุณหภูมิบรรยากาศปกติ (1) ไฮโดรคาร์บอนกลุ่มนี้ประกอบด้วย

โพรเพน	Propane	$C_3H_8$
โพรปีลีน	Propylene	$C_3H_6$
บิวเทน	Butane	$C_4H_{10}$
บิวทิลีน	Butylene	$C_4H_8$

ก๊าซแอลพีจีอาจแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ คือ พวกอิ่มตัว (saturated) และพวกไม่อิ่มตัว (unsaturated) ซึ่งทั้งสองกลุ่มนี้ต่างกันตรงลักษณะการจับตัวของคาร์บอนอะตอม

- กลุ่มไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว ได้แก่ Propane, n-Butane, i-Butane
- กลุ่มไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว ได้แก่ Propylene, n-Butylene, i-Butylene

ก๊าซแอลพีจีเมื่อเกิดการเผาไหม้กับก๊าซออกซิเจนในอากาศอย่างสมบูรณ์ทั้งหมดจะกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ การเปลี่ยนแปลงนี้เขียนเป็นสมการเคมีได้ดังต่อไปนี้



ดังจะเห็นได้จากสมการปริมาณของออกซิเจนที่จำเป็นต่อการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์จะเป็น 5 เท่าในกรณีของโปรเพน และ 6.5 เท่าในกรณีของบิวเทน และถ้าออกซิเจนไม่เพียงพอในการเผาไหม้ก๊าซแอลพีจีจะเกิดการเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนอกจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ แล้วยังเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) อีกด้วย

### 2.3 ประสิทธิภาพของการเผาไหม้ก๊าซแอลพีจี

ประสิทธิภาพของการเผาไหม้ก๊าซแอลพีจีในเตาเผาขึ้นกับตัวแปรที่สภาวะการเผาไหม้ (operational variables) ได้แก่ อัตราการป้อนก๊าซแอลพีจี อัตราการป้อนอากาศหรือสัดส่วนของอัตราการป้อนก๊าซแอลพีจีต่ออัตราการป้อนอากาศ อุณหภูมิภายในเตาเผา อุณหภูมิของปลุก๊าซ เป็นต้น

#### 2.3.1 สมการแสดงอุณหภูมิการเผาไหม้ก๊าซแอลพีจีในเตาเผา

การเผาไหม้ก๊าซแอลพีจีในเตาเผา สามารถแสดงปริมาณความร้อนที่ได้ในรูปของอุณหภูมิ โดยการทำสมดุลพลังงาน (2) คือ

$$\text{พลังงานความร้อนที่สะสม} = \text{พลังงานความร้อนที่เข้า} - \text{พลังงานความร้อนที่ออก} \quad \dots (2.3)$$

อ้างอิงที่อุณหภูมิ  $T_{ref}$ . ปลุก๊าซอยู่ในสถานะก๊าซ และน้ำอยู่ในสภาพของไอน้ำ

พลังงานความร้อนที่เข้า ที่อุณหภูมิ  $T_{in}$  ได้แก่

- ค่าความร้อนของก๊าซแอลพีจี =  $n_{LPG} (\Delta H_{C,LPG})$  kJ/min
- เอนทาลปีของก๊าซแอลพีจี =  $n_{LPG} C_{p,LPG} (T_{in} - T_{ref})$  kJ/min
- เอนทาลปีของอากาศแห้ง =  $n_{Air} C_{p,Air} (T_{in} - T_{ref})$  kJ/min
- เอนทาลปีของไอน้ำในอากาศ =  $n_{H_2O} C_{p,H_2O} (T_{in} - T_{ref})$  kJ/min

พลังงานความร้อนที่ออก ที่อุณหภูมิ  $T_{out}$  ได้แก่

- เอนทาลปีของฟลูเกียซ =  $\sum_{i=1}^N n_i C_{p,i} (T_{out} - T_{ref})$  kJ/min
- เอนทาลปีของไอน้ำในฟลูเกียซ =  $m_{H_2O} C_{p,H_2O} (T_{out} - T_{ref})$  kJ/min
- ค่าความร้อนของการเผาไหม้ของก๊าซ CO (ถ้าเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์)  
=  $n_{CO} (\Delta H_{C,CO})$  kJ/min
- ค่าความร้อนสูญเสีย (heat loss) =  $UA(T_{out} - T_{ref})$  kJ/min

พลังงานความร้อนสะสม โดยสมมุติให้ค่า  $C_{p,i}$  เป็นค่าคงที่ในช่วงอุณหภูมิที่พิจารณา

- ที่สภาวะคงที่ = 0 kJ/min
- ที่สภาวะไม่คงที่ =  $\sum_{i=1}^N n_i C_{p,i} \frac{d(T_{out} - T_{ref})}{dt}$  kJ/min

เมื่อทำสมดุลพลังงานที่สภาวะไม่คงที่โดยให้  $T = T_{out} - T_{ref}$  จะได้

$$n_{LPG} (\Delta H_{C,LPG}) + n_{LPG} C_{p,LPG} (T_{in} - T_{ref}) + n_{Air} C_{p,Air} (T_{in} - T_{ref}) + n_{H_2O} C_{p,H_2O} (T_{in} - T_{ref}) - \sum_{i=1}^N n_i C_{p,i} T - m_{H_2O} C_{p,H_2O} T - n_{CO} (\Delta H_{C,CO}) - UAT = \sum_{i=1}^N n_i C_{p,i} \frac{dT}{dt} \quad \dots (2.4)$$

จัดสมการใหม่ได้เป็น

$$\sum_{i=1}^N n_i C_{p,i} \frac{dT}{dt} + \sum_{i=1}^N n_i C_{p,i} T + m_{H_2O} C_{p,H_2O} T + UAT = n_{LPG} (\Delta H_{C,LPG}) + n_{LPG} C_{p,LPG} (T_{in} - T_{ref}) + n_{Air} C_{p,Air} (T_{in} - T_{ref}) + n_{H_2O} C_{p,H_2O} (T_{in} - T_{ref}) - n_{CO} (\Delta H_{C,CO}) \quad \dots (2.5)$$

พิจารณาว่า  $C_p$  มีค่าคงที่ในช่วงอุณหภูมิหนึ่ง จะจัดสมการได้

$$\left( \sum_{i=1}^N n_i C_{p,i} \right) \frac{dT}{dt} + \left( \sum_{i=1}^N n_i C_{p,i} + m_{H_2O} C_{p,H_2O} + UA \right) T = \left[ n_{LPG} (\Delta H_{C,LPG}) + n_{LPG} C_{p,LPG} (T_{in} - T_{ref}) \right] + \left[ n_{Air} C_{p,Air} (T_{in} - T_{ref}) + n_{H_2O} C_{p,H_2O} (T_{in} - T_{ref}) - n_{CO} (\Delta H_{C,CO}) \right] \quad \dots (2.6)$$

สมการที่ 2.6 เป็นสมการแสดงค่าความร้อนของระบบในรูปอุณหภูมิ จากสมการพบว่าระบบเป็นระบบลำดับที่หนึ่ง (first order system) สามารถเขียนโดยย่อได้เป็น

$$a_1 \frac{dT(t)}{dt} + a_0 T(t) = f_{LPG}(t) + f_{Air}(t) \quad \dots (2.7)$$

เมื่อ

$$a_1 = \sum_{i=1}^N n_i C_{p,i} \quad \dots (2.8)$$

$$a_0 = \sum_{i=1}^N n_i C_{p,i} + m_{H_2O} C_{p,H_2O} + UA \quad \dots (2.9)$$

$$f_{LPG}(t) = n_{LPG} (\Delta H_{C,LPG}) + n_{LPG} C_{p,LPG} (T_{in} - T_{ref}) \quad \dots (2.10)$$

$$f_{Air}(t) = n_{Air} C_{p,Air} (T_{in} - T_{ref}) + n_{H_2O} C_{p,H_2O} (T_{in} - T_{ref}) - n_{CO} (\Delta H_{C,CO}) \quad \dots (2.11)$$

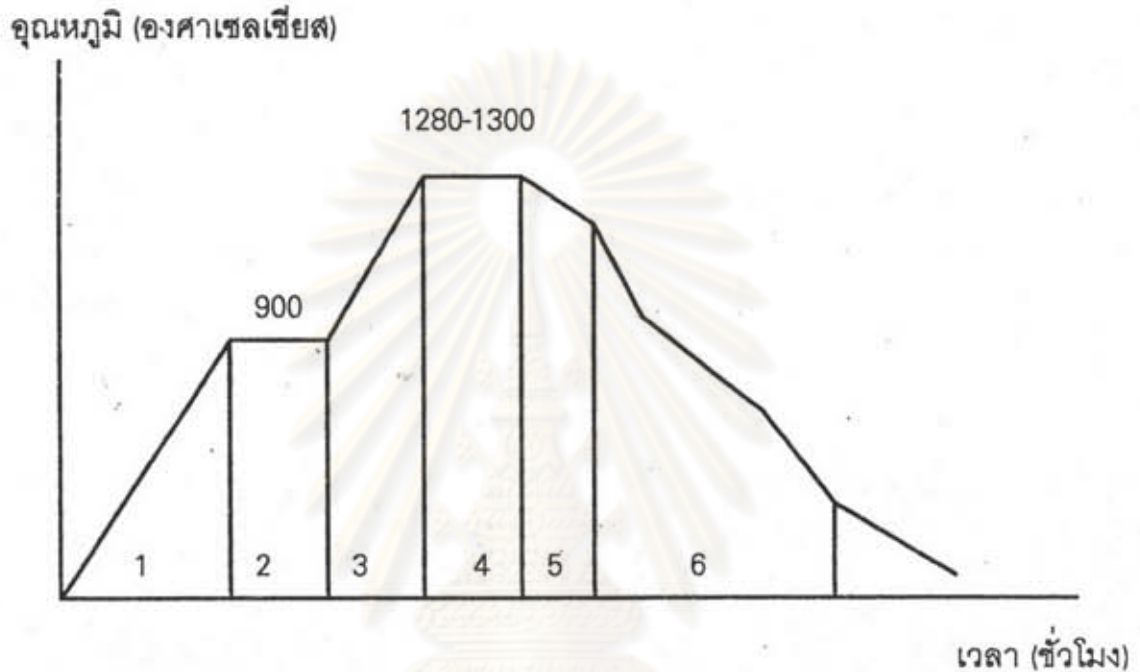
### 2.3.2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของก๊าซแอลพีจีจากค่าความร้อน

สาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ต่ำ คือการสูญเสียความร้อนไปกับก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้, ความชื้นในเชื้อเพลิง และการสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งในการเผาไหม้ก๊าซหากเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ขึ้นจะเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานดังนั้นประสิทธิภาพการเผาไหม้ของก๊าซจึงสามารถคำนวณโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนในรูปของพลังงานความร้อน (3) ได้ดังนี้

$$\eta_c = 100 \left( 1 - \frac{n_{CO} (\Delta H_{C,CO})}{n_{LPG} (\Delta H_{C,LPG})} \right) \quad \dots (2.12)$$

## 2.4 ขั้นตอนการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกในเตาเผา

สำหรับการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกในเตาเผานั้น รูปแบบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลาสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 อุณหภูมิการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกในเตาเผาที่เวลาต่าง ๆ

โดยแบ่งออกเป็นขั้นตอนสำคัญได้ 6 ช่วงคือ

### 2.4.1 Water Snoking & Dissociation Period

เป็นช่วงการเพิ่มอุณหภูมิเตาโดยก๊าซแอลทีจีเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ อุณหภูมิเตาจะเริ่มตันจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิประมาณ 900 °C อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอยู่ในช่วง 100-150 °C ต่อชั่วโมง การเพิ่มอุณหภูมิในช่วงนี้เพื่อให้ผลิตภัณฑ์เซรามิกและวัสดุทนไฟซึ่งใช้ทำผนังด้านในเตา สามารถปรับตัวให้ทันกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เพื่อป้องกันการแตกหัก

#### 2.4.2 Oxidation Period

เป็นช่วงรักษาอุณหภูมิเตาให้คงที่ต่อเนื่องจากช่วงที่ 1 และก๊าซแอลพีจียังเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ช่วงนี้จะทำให้สารระเหยง่ายที่อยู่ในเนื้อของผลิตภัณฑ์เซรามิก ระเหยออกไปเป็นส่วนใหญ่ ช่วงระยะเวลาอาจจะสั้นหรือยาวขึ้นกับลักษณะของผลิตภัณฑ์เซรามิก

#### 2.4.3 Reduction Period

เป็นช่วงการเพิ่มอุณหภูมิเตาโดยก๊าซแอลพีจีเกิดการเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์ อุณหภูมิเตาจะเพิ่มจากอุณหภูมิในช่วงที่ 2 จนถึงอุณหภูมิประมาณ 1280 °C อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิประมาณ 40 °C ต่อชั่วโมง การเพิ่มอุณหภูมิในช่วงนี้ผลิตภัณฑ์เซรามิก จะได้รับความร้อนโดยตรงจากเปลวไฟเนื่องจากเกิดการเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์

#### 2.4.4 Soaking Period

เป็นช่วงรักษาอุณหภูมิเตาให้คงที่ต่อเนื่องจากช่วงที่ 3 และก๊าซแอลพีจียังเกิดการเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์ ช่วงนี้จะทำให้ผลิตภัณฑ์เซรามิกเปลี่ยนเป็นสีต่าง ๆ โดยเป็นผลสืบเนื่องจากช่วง reduction period ผลิตภัณฑ์เซรามิกเมื่อถูก reduction ดินที่ใช้ทำผลิตภัณฑ์ซึ่งมีธาตุเหล็กเป็นองค์ประกอบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจาก  $Fe^{3+}$  เป็น  $Fe^{2+}$  ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีเขียวอมเขียว

#### 2.4.5 Neutral Period

เป็นช่วงการปรับให้ก๊าซแอลพีจีคืนสู่การเผาไหม้อย่างสมบูรณ์เพื่อให้ความดันซึ่งเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์จากขั้นตอนที่ 3 และ 4 ลดลงสู่ความดันบรรยากาศ

#### 2.4.6 Cooling Period

เป็นช่วงการลดอุณหภูมิเตา เพื่อที่จะนำเอาผลิตภัณฑ์ออกจากเตา

## 2.5 การควบคุมการเผาไหม้ก๊าซในเตาเผา

การควบคุมการเผาไหม้ก๊าซในเตาเผานั้นเป็นการควบคุมอุณหภูมิภายในเตาเผาให้ได้ค่าตามที่ต้องการ ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นมากเนื่องจากการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกมีขั้นตอนการควบคุมอุณหภูมิหลายขั้นตอน วิธีการควบคุมอุณหภูมิภายในเตาเผาทำได้หลายวิธีคือ

- ปรับอัตราการป้อนก๊าซเชื้อเพลิง โดยการปรับวาล์วควบคุมอัตราการไหลของก๊าซเชื้อเพลิง
- ปรับอัตราการป้อนอากาศ โดยการปรับวาล์วควบคุมอัตราการไหลของอากาศ และให้เป็นการควบคุมการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ หรือไม่สมบูรณ์
- ปรับการถ่ายเทของฟลูก๊าซ (Flue gas) ออกจากเตาเผา

การควบคุมอุณหภูมิในเตาเผาส่วนใหญ่จะควบคุมอัตราการป้อนก๊าซเชื้อเพลิงและอัตราการป้อนอากาศ ซึ่งสามารถประยุกต์เอาเครื่องควบคุมมาใช้ในการควบคุมได้ด้วย

## 2.6 ระบบการควบคุมกระบวนการทางเคมี

ในการผลิตหรือปฏิบัติงานของกระบวนการเคมีทั่ว ๆ ไปนั้นมีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงหลายอย่างด้วยกันคือ ความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน, ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ, มาตรฐานการผลิตและกำลังการผลิต, ผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อม, ชีตความสามารถหรือข้อจำกัดของอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ และความประหยัด เป็นต้น (4)

### 2.6.1 อิทธิพลที่มีผลต่อระบบการควบคุมกระบวนการทางเคมี (4, 5)

ในส่วนของ การควบคุมกระบวนการต่าง ๆ นั้น นอกจากจะต้องทราบวัตถุประสงค์ที่ต้องการจะควบคุมแล้ว ยังมีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงโดยทั่วไป 3 ประการคือ



### 2.6.1.1 การกำจัดสิ่งรบกวนจากสภาพแวดล้อมภายนอก (5)

สิ่งรบกวน (disturbance) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นภายนอกกระบวนการ หรือการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการเองที่ไม่สามารถควบคุมได้และส่งผลกระทบต่อสภาพของกระบวนการให้เปลี่ยนแปลงไปจากสภาพเดิมที่ต้องการ ถ้าสิ่งรบกวนเกิดขึ้นภายในกระบวนการเรียกว่า การรบกวนภายใน (internal disturbance) ถ้าสิ่งรบกวนเกิดขึ้นจากสภาพแวดล้อมภายนอกกระบวนการเรียกว่า การรบกวนภายนอก (external disturbance) การกำจัดหรือลดผลการเปลี่ยนแปลงจากสิ่งรบกวนภายนอกทำได้โดยการนำเครื่องควบคุม (controller) มาใช้ในกระบวนการ

### 2.6.1.2 การรักษาเสถียรภาพของระบบ

คือการทำระบบสามารถปรับตัวให้อยู่ในสภาวะเดิมหรือเปลี่ยนแปลงไปในช่วงที่ยอมรับได้เมื่อเวลาเปลี่ยนไป

### 2.6.1.3 ด้านเศรษฐกิจ

วัตถุประสงค์หลักในการสร้างระบบควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรมนอกจากต้องการความปลอดภัยในการปฏิบัติงานและควบคุมมาตรฐานและกำลังผลิตแล้ว ยังมีความต้องการอื่นเพิ่มขึ้นคือ การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตให้มากขึ้น ทำงานให้ได้ตามวัตถุประสงค์ และได้ประโยชน์สูงสุด

## 2.6.2 ตัวแปรในกระบวนการทางเคมี (5, 6)

ตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ

### 2.6.2.1 ตัวแปรเข้า (input variable)

คือตัวแปรภายนอกที่มีผลกระทบต่อสภาพของกระบวนการ และทำให้สภาพกระบวนการเปลี่ยนแปลง ประกอบด้วย

2.6.2.1.1 สัญญาณควบคุม และตัวแปรปรับกระบวนการ (manipulated variable) หมายถึงสัญญาณที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ตามต้องการโดยตรง หรือเปลี่ยนแปลงค่าผ่านเครื่องควบคุม โดยการกำหนดเป้าหมายให้เครื่องควบคุม คำนวณค่าสัญญาณควบคุมเพื่อเปลี่ยนแปลงสภาพกระบวนการอีกทีหนึ่ง

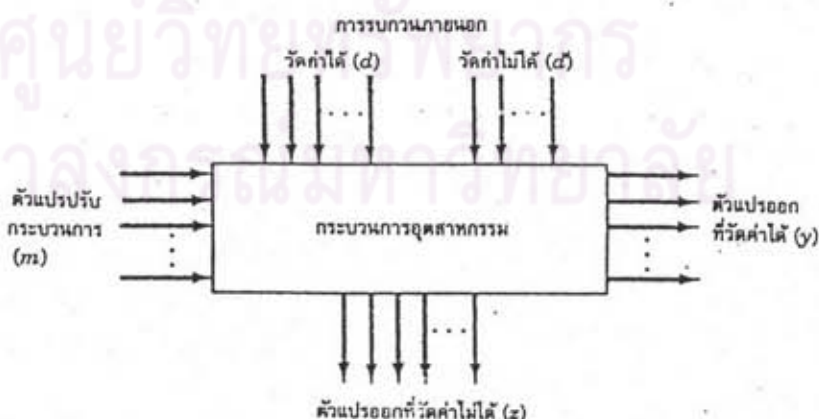
2.6.2.1.2 ตัวแปรรบกวน (disturbance variable) คือ สภาพแวดล้อมที่ไม่สามารถควบคุมและกำหนดค่าตามความต้องการได้โดยตรงหรือกำหนดค่าโดยผ่านอุปกรณ์ควบคุมอื่น แต่สภาพแวดล้อมเหล่านี้มีผลกระทบที่ทำให้สภาพของกระบวนการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

#### 2.6.2.2 ตัวแปรออก (output variable)

คือตัวแปรที่แสดงถึงสภาพต่าง ๆ ของกระบวนการที่เปลี่ยนแปลงค่าไปเนื่องจากผลกระทบของตัวแปรเข้า ประกอบด้วย

2.6.2.2.1 ตัวแปรวัดค่าได้ (measured output variable) คือ ตัวแปรที่แสดงถึงสภาพกระบวนการที่สามารถตรวจสอบหรือวัดค่าได้โดยตรงโดยใช้เครื่องวัดต่าง ๆ

2.6.2.2.2 ตัวแปรวัดค่าไม่ได้ (unmeasured output variable) คือ ตัวแปรที่แสดงถึงสภาพกระบวนการที่ไม่สามารถตรวจสอบค่าหรือวัดค่าได้โดยตรงโดยใช้เครื่องวัดต่าง ๆ ต้องใช้เครื่องวัดค่าตัวแปรอื่นเพื่อคำนวณค่าตัวแปรที่วัดค่าไม่ได้อีกทีหนึ่ง



รูปที่ 2.2 ตัวแปรเข้าและตัวแปรออกของกระบวนการอุตสาหกรรม (4)

### 2.6.3 องค์ประกอบของระบบควบคุม (6, 7)

2.6.3.1 กระบวนการที่ต้องการควบคุมคืออุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการปฏิบัติงาน เช่นเตาเผา, เครื่องปฏิกรณ์ต่าง ๆ เป็นต้น

2.6.3.2 เครื่องวัดหรือเครื่องส่งสัญญาณ (measuring instrument) คือเครื่องมือที่ใช้วัดค่าตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการ เช่น เทอร์โมคัปเปิล ก๊าซโครมาโตกราฟ เป็นต้น เครื่องวัดที่ดีจะช่วยให้การควบคุมถูกต้องแม่นยำและได้ผลดีด้วย

2.6.3.3 เครื่องส่งสัญญาณ (transmitter หรือ transducer) เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยแปลงชนิดของสัญญาณและปรับสัญญาณให้เหมาะสม ก่อนที่จะส่งไปให้อุปกรณ์อื่นในระบบควบคุม เช่น แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 1 ถึง 5 โวลต์, กระแสไฟฟ้าตรง 4 ถึง 20 มิลลิแอมป์ เป็นต้น

2.6.3.4 สายสัญญาณ (Transmission line) เป็นตัวกลางนำสัญญาณไปยังเครื่องควบคุมหรืออุปกรณ์ที่ถูกควบคุม เช่น สายเทอร์โมคัปเปิล Transmission lines ที่ดีจะต้องมีความต้านทานสัญญาณน้อยมาก เพื่อไม่ให้สัญญาณผิดพลาดไปมากก่อนจะถึงที่หมาย เพราะจะเกิดความผิดพลาดในการควบคุมได้

2.6.3.5 เครื่องควบคุม (Controller) คือ เครื่องรับสัญญาณมาเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนดและส่งสัญญาณไปปรับอุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย เครื่องควบคุมมีหลายชนิดตั้งจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป ซึ่งคอมพิวเตอร์นั้นการควบคุมจะเป็นแบบไหนขึ้นกับโปรแกรมที่ใช้

2.6.3.6 อุปกรณ์ควบคุมขั้นสุดท้าย (final control element) คือเครื่องที่รับสัญญาณจากเครื่องควบคุมมาปรับค่าตัวแปรที่ปรับเปลี่ยนค่าได้ (manipulated variable) เช่นวาล์วควบคุมอัตราการป้อนก๊าซเชื้อเพลิง

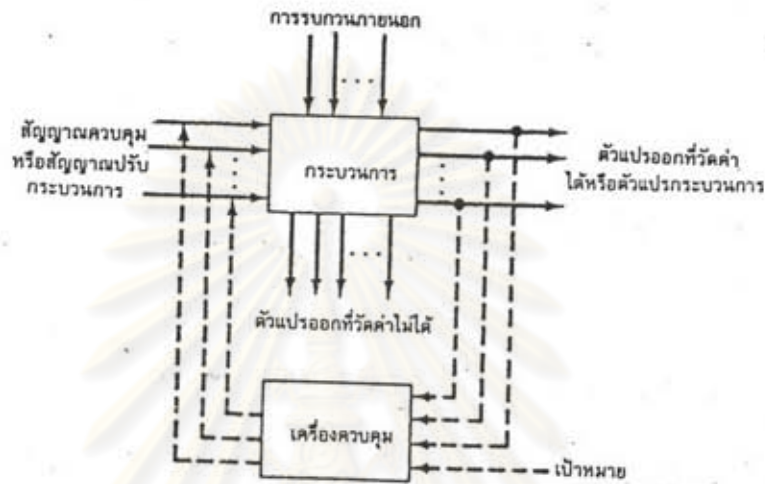
2.6.3.7 อุปกรณ์บันทึกสัญญาณ ทำหน้าที่บันทึกและแสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ภายในกระบวนการ ตัวแปรที่ต้องการบันทึกแสดงอยู่ในรูปค่าตัวเลข หรือกราฟของค่าตัวแปรต่อเวลา

## 2.7 รูปแบบของระบบการควบคุม

เมื่อทราบลักษณะของชนิดของตัวแปร องค์ประกอบของระบบควบคุมแล้ว จากนั้นพิจารณาถึงรูปแบบของการควบคุมที่จะใช้ว่าการควบคุมรูปแบบใดเหมาะสมกับกระบวนการและวัตถุประสงค์ของการควบคุม รูปแบบการควบคุมของกระบวนการทางเคมีโดยทั่ว ๆ ไปมี 3 แบบคือ

2.7.1 การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control)

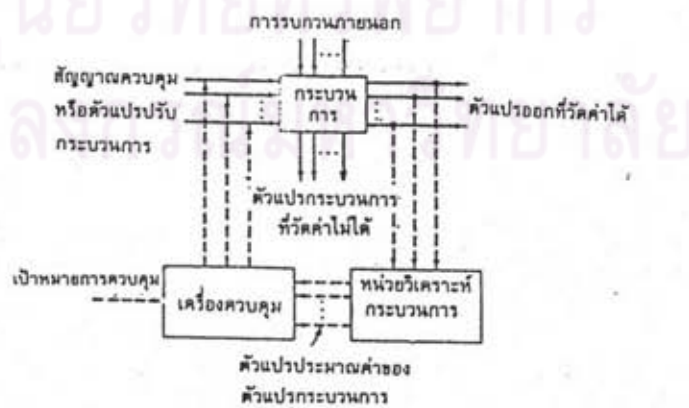
คือการควบคุมโดยใช้ตัวแปรวัดค่าได้ (measured output variable) โดยตรงจากระบบไปปรับตัวแปรปรับค่าได้ (manipulated variable) เพื่อให้ตัวแปรที่ต้องการควบคุมมีค่าตามที่กำหนด (set point) การควบคุมแบบนี้เป็นรูปแบบการควบคุมที่ใช้กันส่วนมาก ลักษณะการควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (4)

2.7.2 การควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ค่าวัดรองวิเคราะห์กระบวนการ (Inferential Control) (4)

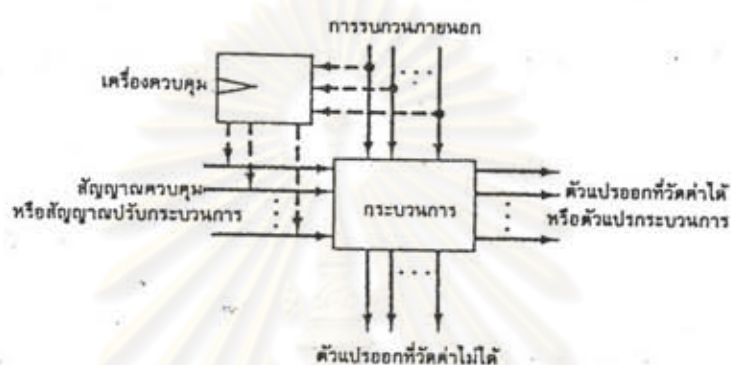
คือการควบคุมโดยใช้ผลที่ได้จากการคำนวณหรือประมาณค่าจากตัวแปรที่สามารถวัดค่าได้ไปปรับค่าตัวแปรที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้เพื่อให้ได้ค่าตัวแปรที่ต้องการควบคุมอยู่ในช่วงที่กำหนด แสดงลักษณะการควบคุมได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ค่าวัดรองวิเคราะห์กระบวนการ (4)

### 2.7.3 การควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า (Feedforward Control)

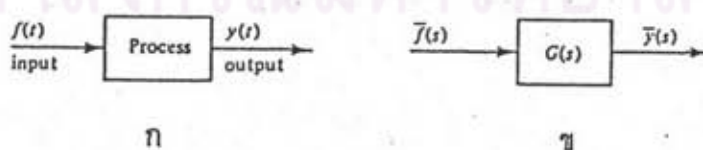
คือการควบคุมโดยใช้ค่าตัวแปรรบกวน (disturbance variable) ไปปรับค่าตัวแปรปรับค่าได้ โดยให้ตัวแปรป้อนออกอยู่ในช่วงที่กำหนด และลดผลการรบกวนที่จะเกิดขึ้นซึ่งต่างจากการควบคุมแบบป้อนกลับที่สัญญาณจากเครื่องควบคุมจะเกิดขึ้นเมื่อสภาพกระบวนการต่างจากค่าเป้าหมายที่ต้องการ แสดงลักษณะการควบคุมได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ระบบควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า (4)

### 2.8 Transfer Function ของระบบ (5, 6)

สมการที่แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรในระบบมักจะแสดงในรูปของสมการดิฟเฟอเรนเชียลที่เทียบกับเวลา ดังนั้นเพื่อให้สมการอยู่ในรูปที่ง่ายจึงแปลงสมการให้อยู่ในรูปของ Laplace domain จากสมการรูปแบบทั่วไปของระบบตัวแปรเข้าและตัวแปรออกเดี่ยวดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ก. แผนภาพของระบบตัวแปรเข้าออกตัวเดียว

ข. แผนภาพ transfer function ของระบบ (5)

ความสัมพันธ์ทั่วไปของตัวแปรเข้า ตัวแปรออก และเวลาสามารถแสดงได้ดังนี้

$$a_n \frac{d^n Y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} Y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dY(t)}{dt} + a_0 Y(t) = bf(t) \quad \dots (2.13)$$

โดย  $a_0, a_1, \dots, a_n$  และ  $b$  คือค่าคงที่ของสมการ  
 $Y(t)$  และ  $f(t)$  คือตัวแปรออกและตัวแปรเข้าของระบบ

การแปลงสมการให้อยู่ในรูปของ Laplace domain สามารถทำได้ดังสมการ

$$L[f(t)] = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad \dots (2.14)$$

$$\text{และ } L[f(t)] \equiv f(s) \quad \dots (2.15)$$

เมื่อ  $L$  คือ ตัวกระทำใน Laplace transform  
 $s$  คือ ตัวแปรใน Laplace transform  
 $F$  คือ function ของ  $f(t)$  ใน Laplace domain

จากสมการที่ (2.13) เมื่อทำให้อยู่ในรูปของ Laplace domain

$$\frac{Y(s)}{f(s)} = \frac{b}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} = G(s) \quad \dots (2.16)$$

โดย  $G(s)$  คือ transfer function ของระบบ

ค่า transfer function ค่าหนึ่งจะเป็นค่าของการเปรียบเทียบระหว่างตัวแปรออกและตัวแปรเข้าเทียบกับเวลาคู่หนึ่ง ๆ เท่านั้น ถ้าระบบมีตัวแปรเข้าและตัวแปรออกหลายตัว ระบบนั้นจะมี transform function หลายค่าด้วยกัน

## 2.9 ลักษณะของระบบกระบวนการอันดับที่หนึ่ง (5, 8)

กระบวนการทางเคมีส่วนใหญ่กว่า 80% จะเป็นระบบที่มีกระบวนการเป็นอันดับที่หนึ่ง สำหรับกระบวนการอันดับหนึ่งที่มีตัวแปรเข้าและตัวแปรออกตัวเดียวจะมีสมการของกระบวนการดังนี้

$$a_1 \frac{dY(t)}{dt} + a_0 Y(t) = bf(t) \quad \dots (2.17)$$

หรือ 
$$\frac{a_1 dY(t)}{a_0 dt} + Y(t) = \frac{b}{a_0} f(t) \quad \dots (2.18)$$

กำหนดให้  $\tau_p = \frac{a_1}{a_0}$  และ  $K_p = \frac{b}{a_0}$  แทนลงในสมการ (2.18) ได้

$$\tau_p \frac{dY(t)}{dt} + Y(t) = K_p f(t) \quad \dots (2.19)$$

เมื่อ  $\tau_p$  คือ time constant ของระบบ  
 $K_p$  คือ ค่า gain ของระบบ

จากสมการ (2.19) เมื่อทำให้อยู่ในรูป Laplace domain จะได้ transfer function ของระบบคือ

$$G(s) = \frac{Y(s)}{f(s)} = \frac{K_p}{\tau_p s + 1} \quad \dots (2.20)$$

ในระบบที่เป็นกระบวนการอันดับที่หนึ่ง โดยตัวระบบเองสามารถเข้าสู่สภาวะคงที่ได้เองถ้ามีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรเข้า ถ้าตัวแปรเข้าถูกเปลี่ยนไปเป็นค่าคงที่หนึ่งหน่วย (unit step change) จะให้ผลของตัวแปรเข้าในรูปของ Laplace domain คือ

$$f(s) = \frac{1}{s} \quad \dots (2.21)$$

เมื่อแทนลงในสมการ (2.20) จะได้

$$G(s) = sY(s) = \frac{K_p}{\tau_p s + 1} \quad \dots (2.22)$$

$$Y(s) = \frac{K_p}{s(\tau_p s + 1)} = \frac{K_p}{s} - \frac{K_p \tau_p}{\tau_p s + 1} \quad \dots (2.23)$$

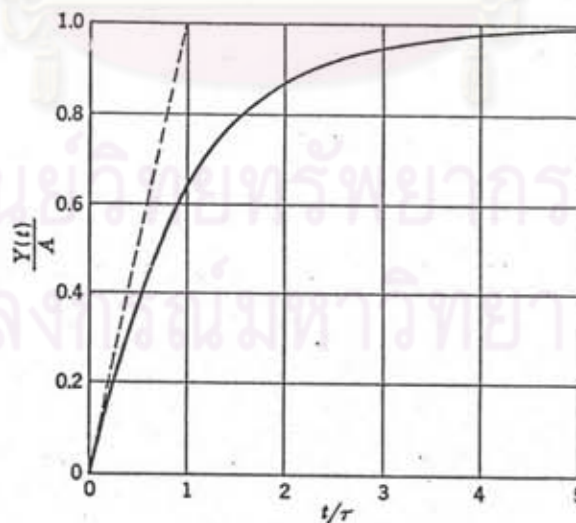
เมื่อแปลงสมการให้กลับมามีอยู่ในรูปของสมการที่เทียบกับเวลาจะได้

$$Y(t) = K_p \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad \dots (2.24)$$

หรือ 
$$Y(t) = AK_p \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad \dots (2.25)$$

เมื่อ  $A$  คือค่าตัวแปรเข้าที่เปลี่ยนไปเป็นจำนวนเท่าของค่าคงที่หนึ่งหน่วย

ความสัมพันธ์จากสมการ (2.25) แสดงได้ดังนี้



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของตัวแปรออกกับเวลาของกระบวนการอันดับที่หนึ่ง  
เมื่อเปลี่ยนตัวแปรเข้าไปคงที่ค่าหนึ่ง (8)



เมื่อเวลาผ่านไปเท่ากับค่า time constant ( $\tau_p$ ) ค่าของตัวแปรออกจะเปลี่ยนไป 63.2% ของค่าที่เปลี่ยนแปลงไปจริงทั้งหมด

## 2.10 กระบวนการตอบสนองเชิงความถี่ (8, 9)

การตอบสนองเชิงความถี่ของกระบวนการหรือระบบที่ต้องการควบคุมคือคุณสมบัติการตอบสนองของกระบวนการหรือระบบที่ต้องการควบคุมเมื่อได้รับสัญญาณเข้ารูปคลื่น sine ที่ความถี่ต่าง ๆ และให้ผลตอบสนองภายหลังเมื่อกระบวนการหรือระบบควบคุมเข้าสู่สภาพสมดุล ซึ่งสัญญาณออกจะมีลักษณะเป็นรูปคลื่น sine เช่นเดียวกับสัญญาณเข้าแต่มีขนาดและมุมเฟสต่างกัน โดยขนาดและมุมเฟสจะเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของสัญญาณเข้า

### 2.10.1 การตอบสนองเชิงความถี่ของกระบวนการอันดับหนึ่ง

การตอบสนองเชิงความถี่ของกระบวนการอันดับหนึ่งที่มี transfer function ทั่วไปคือ

$$G_p(s) = \frac{Y(s)}{f(s)} = \frac{K_p}{\tau_p s + 1} \quad \dots (2.26)$$

ถ้าสัญญาณเข้า  $f(t)$  เป็นสัญญาณรูปคลื่น sine ที่มีขนาด  $A$  และความถี่  $\omega$

$$f(t) = A \sin \omega t \quad \dots (2.27)$$

สัญญาณรูปคลื่น sine ใน Laplace domain เขียนได้ดังนี้

$$f(s) = \frac{A\omega}{s^2 + \omega^2} \quad \dots (2.28)$$

แทนค่าในสมการ (2.26)

$$Y(s) = \frac{K_p}{\tau_p s + 1} \frac{A\omega}{s^2 + \omega^2} \quad \dots (2.29)$$

แปลงกลับมาอยู่ในรูปของสมการเทียบกับเวลาจะได้

$$Y(t) = \frac{K_p A \omega \tau_p}{\tau_p^2 \omega^2 + 1} e^{-\frac{t}{\tau_p}} - \frac{K_p A \omega \tau_p}{\tau_p^2 \omega^2 + 1} \cos \omega t + \frac{K_p A}{\tau_p^2 \omega^2 + 1} \sin \omega t \quad \dots (2.30)$$

เมื่อกระบวนการเข้าสู่สภาวะคงที่  $t$  มีค่า  $\infty$  และ  $e^{-\frac{t}{\tau_p}}$  มีค่าเท่ากับ 0 พจน์แรกของสมการ (2.30) จะมีค่าเป็น 0 การตอบสนองสุดท้ายของกระบวนการ  $Y_{SS}$  คือ

$$Y_{SS}(t) = -\frac{K_p A \omega \tau_p}{\tau_p^2 \omega^2 + 1} \cos \omega t + \frac{K_p A}{\tau_p^2 \omega^2 + 1} \sin \omega t \quad \dots (2.31)$$

จากสูตรทางตรีโกณมิติ

$$A \cos \alpha + B \sin \alpha = \sqrt{A^2 + B^2} \sin \left( \alpha + \tan^{-1} \left( \frac{A}{B} \right) \right)$$

แทนค่าลงในสมการ (2.31)

$$Y_{SS}(t) = \frac{K_p A}{\sqrt{\tau_p^2 \omega^2 + 1}} \sin(\omega t + \phi) \quad \dots (2.32)$$

เมื่อ

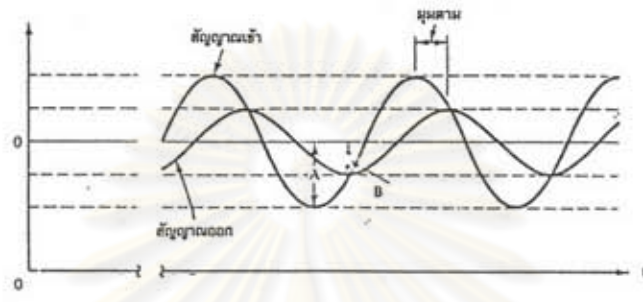
$$\phi = \tan^{-1}(-\omega \tau_p) \quad \dots (2.33)$$

ผลการตอบสนองเชิงความถี่เมื่อได้รับสัญญาณเข้ารูปคลื่น sine มีดังนี้

- ผลตอบสนองสุดท้ายของกระบวนการ เมื่อป้อนสัญญาณเข้ารูปคลื่น sine จะมีลักษณะเป็นสัญญาณรูปคลื่น sine ความถี่  $\omega$  เดียวกับสัญญาณเข้า
- อัตราส่วนระหว่างขนาดของสัญญาณออกกับขนาดของสัญญาณเข้า คืออัตราขยายเชิงความถี่ (amplitude ratio) ของกระบวนการ จะผันแปรตามความถี่ของสัญญาณเข้า อัตราขยายเชิงความถี่ของกระบวนการอันดับที่หนึ่ง แสดงได้ดังนี้

$$\text{อัตราขยายเชิงความถี่} = \frac{K_p A}{\sqrt{\tau_p^2 \omega^2 + 1}} \quad \dots (2.34)$$

- ผลการตอบสนองของกระบวนการ จะมีมุมเฟสช้ากว่ามุมเฟสของสัญญาณเข้า เรียกว่า มุมตาม (phase lag) เนื่องจากความเฉื่อยของกระบวนการ โดยมุมนี้จะแปรผันตามความถี่  $\omega$  ของสัญญาณเข้าตามสมการ (2.33)



รูปที่ 2.8 การตอบสนองเชิงความถี่ของกระบวนการอันดับที่หนึ่ง (9)

### 2.10.2 แผนภูมิโบด (7, 8, 9)

ผลการตอบสนองเชิงความถี่ของกระบวนการสามารถหาโดยแทนค่า  $s=j\omega$  ใน transfer function และหาค่าอัตราขยายและมุมเฟสของกระบวนการ

แผนภูมิโบด (Bode diagram) คือแผนภูมิรูปภาพแสดงผลการตอบสนองเชิงความถี่ของกระบวนการในรูปอัตราขยายและมุมเฟส ประกอบด้วยแผนภูมิ 2 ภาพคือ

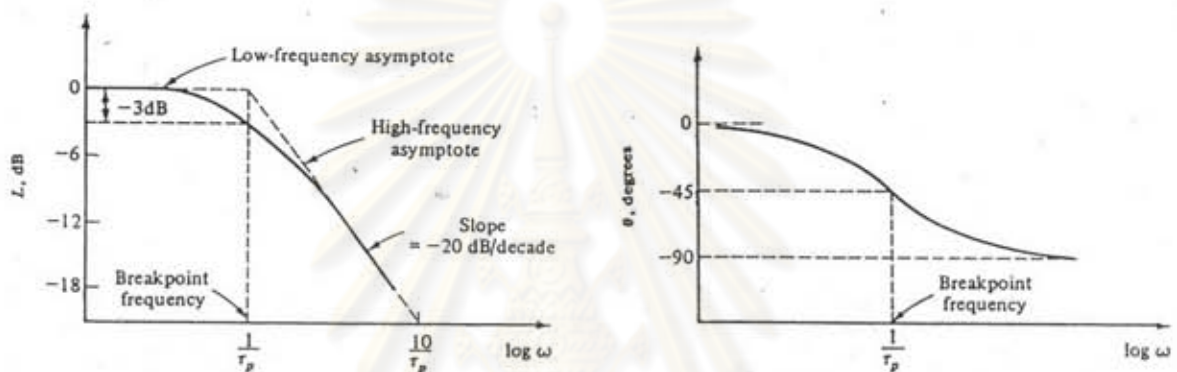
2.10.2.1 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายของกระบวนการในรูป logarithm กับความถี่ โดยความถี่เป็นตัวแปรอิสระแสดงด้วยค่าตามแกนนอน ใช้มาตราส่วน logarithm และค่า logarithm ของอัตราขยายเป็นตัวแปรตาม แสดงด้วยค่าตามแนวตั้ง โดยใช้มาตราส่วนเชิงเส้น (linear scale)

2.10.2.2 แผนภูมิที่สองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเฟสของกระบวนการกับความถี่ โดยความถี่เป็นแกนนอนใช้มาตราส่วน logarithm และมุมเฟสเป็นแกนตั้งใช้มาตราส่วนเชิงเส้น

อัตราขยายในแผนภูมิโบนินิยมใช้ค่าอัตราขยายของกระบวนการโดยใช้หน่วยเดซิเบล (dB หรือ decibel) หรือเรียกว่า Log modulus มีสมการดังนี้

$$\text{Log modulus} = 20 \log_{10} (\text{อัตราขยาย}) \quad \dots (2.35)$$

แผนภูมิโบนิตของกระบวนการอันดับหนึ่ง แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แผนภูมิโบนิตของกระบวนการอันดับหนึ่ง (10)

### 2.10.3 โคงเชิงมุม (8, 10)

โคงเชิงมุม (polar plot) หรือเรียกอีกอย่างว่า แผนภูมิ Nyquist (Nyquist diagram) คือเส้นโคงแสดงค่าของ transfer function ของกระบวนการ  $G(j\omega)$  ในรูปขนาด  $|G(j\omega)|$  และมุมเฟส  $\angle G(j\omega)$  บนระนาบเชิงซ้อน  $G(s)$  เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงจาก 0 ถึง  $\infty$  ความสัมพันธ์ระหว่างขนาด  $|G(j\omega)|$  และมุมเฟส  $\angle G(j\omega)$  กับค่าจริง  $\text{Re}[G(j\omega)]$  และค่าจินตภาพ  $\text{Im}[G(j\omega)]$  คือ

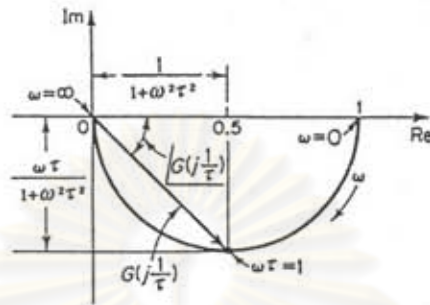
$$\text{Re}[G(j\omega)] = |G(j\omega)| \cos[\angle G(j\omega)] \quad \dots (2.36)$$

$$\text{Im}[G(j\omega)] = |G(j\omega)| \sin[\angle G(j\omega)] \quad \dots (2.37)$$

และ

$$|G(j\omega)| = \sqrt{\text{Re}[G(j\omega)]^2 + \text{Im}[G(j\omega)]^2} \quad \dots (2.38)$$

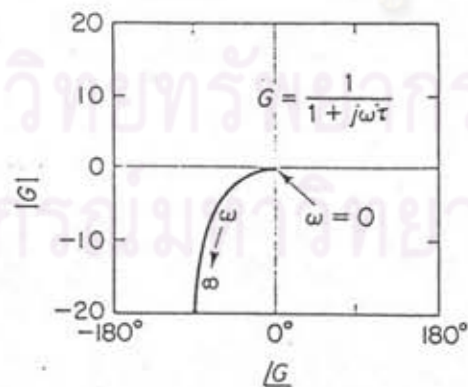
$$\angle G(j\omega) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}[G(j\omega)]}{\text{Re}[G(j\omega)]} \quad \dots (2.39)$$



รูปที่ 2.10 โคงเชิงมุมของกระบวนการอันดับหนึ่ง (9)

#### 2.10.4 โคงอัตราขยาย logarithm และมุมเฟส (5, 9)

โคงอัตราขยาย logarithm และมุมเฟส หรืออีกชื่อหนึ่งคือ แผนภูมิ Nichols (Nichols diagram) คือเส้นโค้งแสดงการตอบสนองเชิงความถี่ของกระบวนการโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า logarithm ของขนาดอัตราขยายในหน่วยเดซิเบลกับมุมเฟสของกระบวนการ



รูปที่ 2.11 โคงแสดงค่า logarithm ของอัตราขยายและมุมเฟส (9)

## 2.11 การหาความสัมพันธ์ของตัวแปรในระบบการเคมี

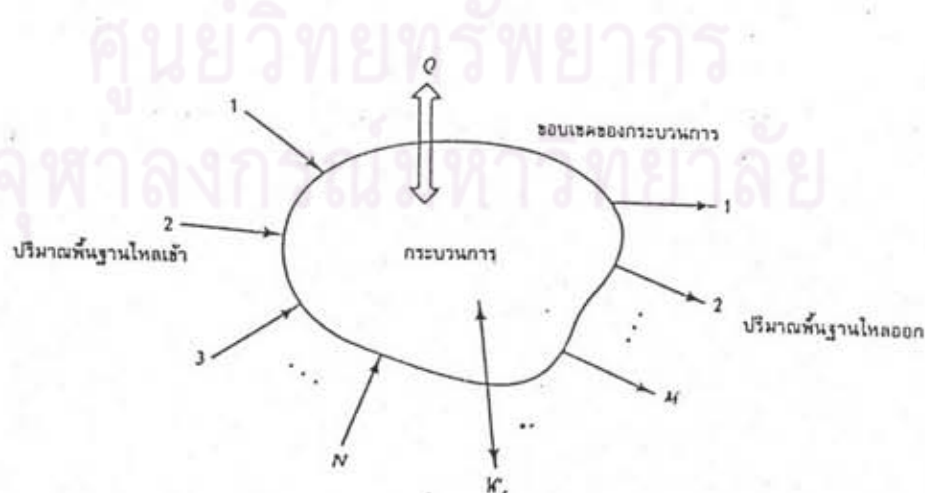
ในการควบคุมกระบวนการต่าง ๆ เราต้องทราบตัวแปรที่ต้องการควบคุมกับตัวแปรอื่น ๆ ที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการของระบบ ในการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรแต่ละตัว แบ่งเป็น 2 วิธี คือ

### 2.11.1 จากการพิจารณาทางทฤษฎี (5)

โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการที่ต้องการศึกษานั้น ๆ โดยมีส่วนประกอบหลักคือ

- ตัวแปรอิสระ (independent variable) คือตัวแปรแสดงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมและการรบกวนภายนอก ซึ่งทำให้สภาพของกระบวนการเปลี่ยนแปลงตาม
- ตัวแปรตาม (dependent variable) คือตัวแปรแสดงสภาพของกระบวนการที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอิสระ คือสัญญาณควบคุมและการรบกวนภายนอก
- สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตามโดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาณพื้นฐานทางฟิสิกส์ 3 ประการ คือ มวลสาร, พลังงาน และโมเมนตัม

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถหาได้โดยใช้หลักของการอนุรักษ์ (principle of conservation) (4) มวลสาร พลังงาน และโมเมนตัม สรุปความได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของปริมาณพื้นฐานคือ มวลสาร พลังงาน และโมเมนตัม ในกระบวนการ เท่ากับผลรวมทางพีชคณิตของปริมาณพื้นฐานนั้นที่เข้าสู่กระบวนการและออกจากกระบวนการ



รูปที่ 2.12 สภาพแวดล้อมภายนอกที่มีผลกระทบต่อสภาพของกระบวนการ (4)

การเลือกใช้สมการสมมูลแบบใดขึ้นอยู่กับชนิดของตัวแปรที่จะควบคุมและลักษณะกระบวนการของระบบ การทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้มีรูปสมการที่ง่ายขึ้นจำเป็นต้องกำหนดสมมุติฐานและสมการบางอย่างตามความเหมาะสม รูปแบบของสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปสมการที่เปรียบเทียบกับเวลาและสภาวะคงที่เนื่องจากกระบวนการทางเคมีส่วนใหญ่จะควบคุมที่สภาวะคงที่

## 2.11.2 จากการทำทดลอง (7, 10)

### 2.11.2.1 การทดสอบด้วย Step

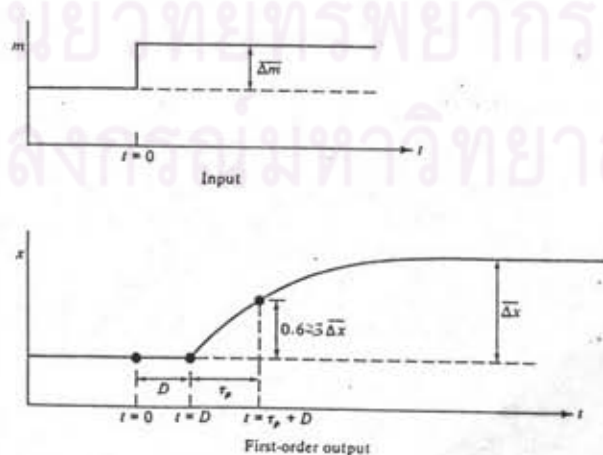
โดยการปรับค่าตัวแปรเข้าที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง เพื่อดูผลของตัวแปรออกที่ต้องการควบคุมกับเวลา ซึ่งโดยทั่วไปกระบวนการทางเคมีกว่า 80% จะเป็นกระบวนการอันดับหนึ่ง อยู่ในรูปของ gain, deadtime และ time constant ดังสมการ

$$G(s) = K_p \frac{e^{-Ds}}{\tau_p s + 1} \quad \dots (2.40)$$

เมื่อ  $D$  คือ delay time หรือ dead time

ค่า gain ที่สภาวะคงที่  $K_p$  หาได้จากอัตราส่วนของผลต่างของตัวแปรออก ( $\Delta x$ ) ต่อผลต่างของตัวแปรเข้า ( $\Delta m$ ) ที่สภาวะสมดุล dead time สามารถดูได้จากผลการตอบสนองของตัวแปรออกที่ปรากฏ และ time constant จะเป็นเวลาตั้งแต่ตัวแปรออกเริ่มเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งผลการเปลี่ยนแปลงเปลี่ยนไป 62.3% ของการเปลี่ยนแปลงทั้งหมด แสดงดังรูปที่

2.13



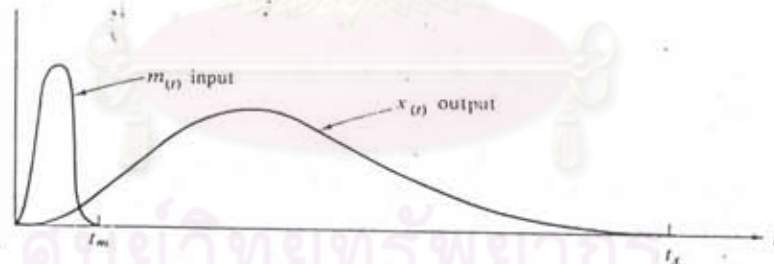
รูปที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรออก เมื่อปรับค่าตัวแปรเข้าเพื่อทำการทดสอบด้วย step ของกระบวนการอันดับหนึ่ง (10)

### 2.11.2.2 การทดสอบด้วย Sine-wave

โดยการปรับตัวแปรเข้าให้เป็นสัญญาณรูปคลื่น sine ที่ทราบขนาด (amplitude) และความถี่ที่แน่นอน แล้วนำการตอบสนองของตัวแปรออกมาวิเคราะห์ผล ด้วยวิธีการตอบสนองเชิงความถี่ เพื่อพิจารณาลักษณะของกระบวนการว่าเป็นอย่างไร

### 2.11.2.3 การทดสอบด้วย Pulse (7, 10)

การทดสอบด้วย step และ sine-wave นั้น จะมีข้อเสียคือการทดสอบด้วย step จะต้องรอจนกระทั่งผลการตอบสนองของตัวแปรออกคงที่หรือเข้าสู่สภาวะคงที่ ถ้าหากว่ากระบวนการเคมีที่ต้องการทดสอบมีค่า time constant สูงก็จะทำให้เสียเวลามาก สำหรับการทดสอบด้วย sine-wave ก็เช่นเดียวกันการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่จะทำได้ก็ต่อเมื่อการตอบสนองของตัวแปรออกมีขนาดและความถี่คงที่แล้วเท่านั้นถ้าหากกระบวนการนั้นมีค่า time constant สูง ก็จะทำให้ต้องใช้เวลานานมากในการทดสอบ แต่การทดสอบด้วย pulse ไม่จำเป็นต้องใช้เวลาในการทดสอบมาก โดยการปรับค่าของตัวแปรเข้าให้เป็นสัญญาณ pulse แล้วนำผลของตัวแปรออกซึ่งจะเป็นการตอบสนองในรูป pulse เช่นเดียวกันมาวิเคราะห์



รูปที่ 2.14 สัญญาณตัวแปรเข้าและตัวแปรออกรูป pulse (10)

การวิเคราะห์กระบวนการโดยการทดสอบด้วยสัญญาณ pulse สามารถทำได้โดยการใช้ Laplace transform และการวิเคราะห์การตอบสนองเชิงความถี่ประกอบกัน transfer function ของกระบวนการแสดงดังสมการ



$$G(s) = \frac{Y(s)}{f(s)} = \frac{\int_0^{\infty} y(t)e^{-st} dt}{\int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt} \quad \dots (2.41)$$

แทนตัวแปร Laplace,  $s$  ด้วยค่าความถี่  $j\omega$  จะได้

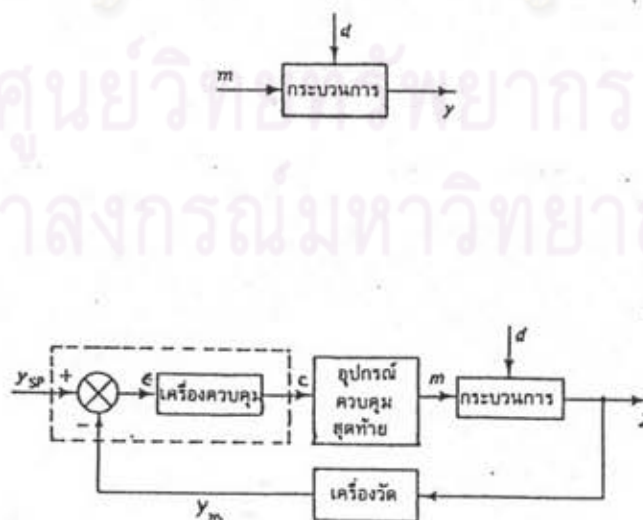
$$G(j\omega) = \frac{\int_0^{\infty} y(t)e^{-j\omega t} dt}{\int_0^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt} \quad \dots (2.42)$$

$$G(j\omega) = \text{Re}[G(j\omega)] + \text{Im}[G(j\omega)] \quad \dots (2.43)$$

จากนั้นจึงนำผลของ  $G(j\omega)$  วิเคราะห์กระบวนการต่อการตอบสนองเชิงความถี่ต่อไป

## 2.12 ชนิดของเครื่องควบคุมแบบป้อนกลับ (5, 7, 9)

ระบบควบคุมแบบป้อนกลับมีรูปแบบของการควบคุมและการทำงานของระบบควบคุมดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ผังสัญญาณของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (9)

มีขั้นตอนการทำงานคือเครื่องควบคุมจะรับสัญญาณค่าตัวแปรออกที่วัดค่าได้และเป็นตัวแปรที่ต้องการควบคุม ( $Y_m$ ) มาเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนดไว้ (set point,  $Y_{sp}$ ) ค่าที่เปรียบเทียบได้คือ ค่าความผิดพลาด (error,  $\varepsilon$ ) ซึ่งเท่ากับ

$$\varepsilon = Y_{sp} - Y_m \quad \dots (2.44)$$

จากนั้นเครื่องควบคุมจะนำค่าความผิดพลาดมาพิจารณาควบคุมและเปลี่ยนเป็นสัญญาณไปปรับอุปกรณ์ปรับค่าตัวแปรเข้า เพื่อให้ตัวแปรเข้ารักษาสภาวะของตัวแปรออกให้ได้ตามต้องการ ซึ่งการทำงานจะวนอยู่ในลักษณะเช่นนี้ตั้งแต่เริ่มควบคุมจนถึงสิ้นสุดการควบคุม

การพิจารณาเปลี่ยนแปลงสัญญาณของเครื่องควบคุมมีความสำคัญมากเพราะถ้าสัญญาณที่เปลี่ยนไปในการควบคุมไม่เหมาะสมกับกระบวนการของระบบแล้วจะทำให้การควบคุมมีความยุ่งยากและไม่ให้ประสิทธิภาพที่ดีเท่าที่ควร การเปลี่ยนแปลงสัญญาณของเครื่องควบคุมขึ้นกับชนิดของเครื่องควบคุม เครื่องควบคุมที่ใช้กับระบบการควบคุมแบบย้อนกลับโดยปกติมี 3 ชนิดคือ

### 2.12.1 เครื่องควบคุมแบบ P (Proportional Controller)

เครื่องควบคุมแบบนี้ทำงานโดยเปลี่ยนค่าสัญญาณที่ส่งไปควบคุมจากค่าผิดพลาดตามสมการ

$$C(t) = K_c \varepsilon(t) + C_s \quad \dots (2.45)$$

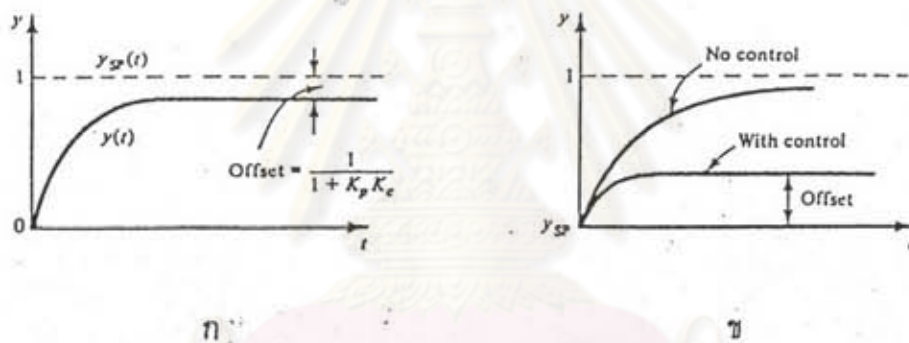
- เมื่อ
- $K_c$  = ค่า proportional gain ของเครื่องควบคุม
  - $C_s$  = ค่าสัญญาณที่เครื่องควบคุมส่งไปเมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงที่ ( $\varepsilon = 0$ )
  - $C(t)$  = ค่าสัญญาณที่เครื่องควบคุมส่งไปช่วงเวลาใด ๆ
  - $\varepsilon(t)$  = ค่าความผิดพลาดช่วงเวลาใด ๆ

จากรูปของสมการสามารถหา transfer function ของเครื่องควบคุมได้เป็น

$$G_c(s) = K_c \quad \dots (2.46)$$

ผลการควบคุมแบบนี้สามารถควบคุมระบบให้อยู่ในสภาวะคงที่ได้ แต่ค่าที่ได้ไม่ใช่ค่าที่กำหนดไว้หรือค่าที่ต้องการดังรูปที่ 2.16 ผลต่างของค่าทั้งสองนี้เรียกว่า ค่า offset ซึ่งเท่ากับ

$$\text{ค่า offset} = \text{ค่าที่กำหนด (set point)} - \text{ค่าที่ควบคุมได้จริง} \quad \dots (2.47)$$



รูปที่ 2.16 ค่า offset ที่เกิดจากการควบคุมแบบ P ในกระบวนการอันดับหนึ่ง (5)

ก. เปลี่ยนค่าตัวแปรที่กำหนด ข. เปลี่ยนค่าตัวแปรเข้า

### 2.12.2 เครื่องควบคุมแบบ PI (Proportional Integral Controller)

เครื่องควบคุมแบบนี้เรียกอีกอย่างว่า Proportional-Plus-Reset Controller ทำการเปลี่ยนสัญญาณการควบคุมตามสมการ

$$C(t) = K_c \varepsilon(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int_0^t \varepsilon(t) dt + C_s \quad \dots (2.48)$$

เมื่อ  $\tau_I$  = integral time constant หรือ reset time (นาที)

โดยปกติค่า  $\tau_I$  จะอยู่ในช่วง 0.1-50 นาที

จากรูปสมการสามารถหา transfer function ของเครื่องควบคุมได้คือ

$$G_c(s) = K_c \left( 1 + \frac{1}{\tau_I s} \right) \quad \dots (2.49)$$

เครื่องควบคุมแบบนี้เป็นเครื่องควบคุมที่เพิ่มส่วนของการอินทิเกรตค่าความผิดพลาด เข้าร่วมกับเครื่องควบคุมแบบ Proportional เพื่อกำจัดค่า offset ที่จะเกิดขึ้น ผลของเครื่องควบคุมแบบนี้สามารถกำจัดค่า offset ได้แต่จะเกิดการแกว่งของค่าตัวแปรซึ่งเป็นข้อเสียของเครื่องควบคุมแบบนี้ การแกว่งของค่าตัวแปรจะมากขึ้นเมื่อ  $K_c$  เพิ่มขึ้น หรือค่า  $\tau_I$  ลดลงเมื่อ  $K_c$  คงที่ ทั้งนี้เพราะเครื่องควบคุมแบบนี้เป็นการเพิ่มค่าลำดับของสมการการควบคุม

### 2.12.3 เครื่องควบคุมแบบ PID (Proportional Integral Derivative Controller)

เครื่องควบคุมแบบนี้เรียกอีกชื่อว่า proportional-plus-reset-plus-rate controller มีการเปลี่ยนสัญญาณการควบคุมตามสมการ

$$C(t) = K_c \varepsilon(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int_0^t \varepsilon(t) dt + K_c \tau_D \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + C_s \quad \dots (2.50)$$

เมื่อ  $\tau_D =$  derivative time constant (นาทีก)

จากรูปสมการสามารถหา transfer function ได้คือ

$$G_c(s) = K_c \left( 1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right) \quad \dots (2.51)$$

เครื่องควบคุมแบบนี้เป็นเครื่องควบคุมแบบคาดเดาเหตุการณ์ล่วงหน้าช่วยลดค่าการแกว่งของตัวแปรที่เนื่องมาจากการควบคุมแบบ Proportional Integral ดังนั้นเครื่องควบคุมแบบนี้จึงเป็นเครื่องควบคุมที่ดีที่สุดเพราะไม่มีปัญหาเรื่องค่า offset และการแกว่งของค่าตัวแปร ข้อคำนึงถึงของเครื่องควบคุมแบบนี้คือ

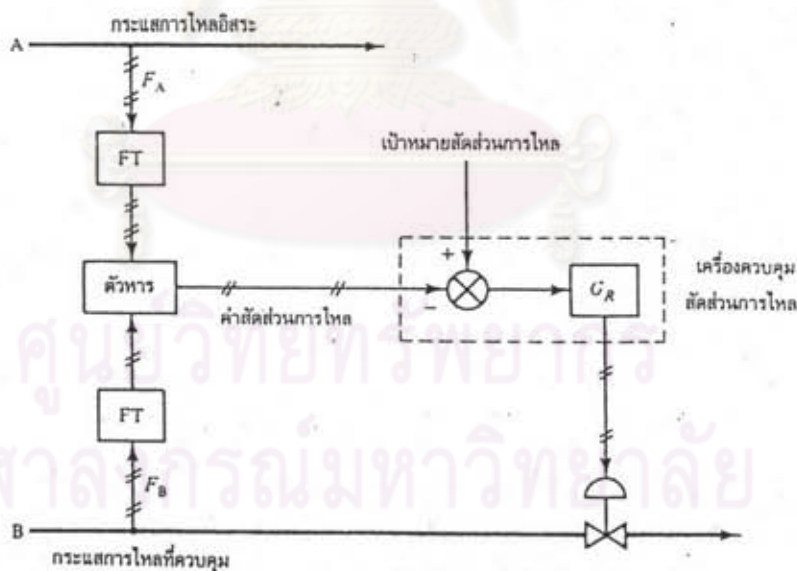
- ถ้าค่าความผิดพลาดมีค่าเท่ากับศูนย์ จะไม่มีผลการควบคุม เนื่องจากพจน์ของ derivative เพราะค่า  $\frac{d\varepsilon}{dt} = 0$

• ถ้าการส่งสัญญาณมีความผิดพลาดไปจากค่าความเป็นจริงแล้ว แม้มิตผลขาดไปเพียงเล็กน้อยแต่ค่าสัญญาณการควบคุมจะเปลี่ยนแปลงไปมากเกินกว่าที่ควรจะเป็น การควบคุมจึงผิดพลาดได้ง่าย

### 2.13 เครื่องควบคุมสัดส่วนการไหล (6, 9)

การควบคุมสัดส่วนการไหลเป็นการควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าแบบหนึ่งโดยวัดสัญญาณแสดงการรบกวนภายนอก 2 สัญญาณ และพยายามควบคุมอัตราส่วนของสัญญาณทั้งสองให้มีค่าคงที่ โดยจะใช้อัตราการไหลของกระแสการไหลหนึ่งควบคุมอัตราการไหลของอีกกระแสหนึ่ง ให้มีสัดส่วนคงที่ตามต้องการ

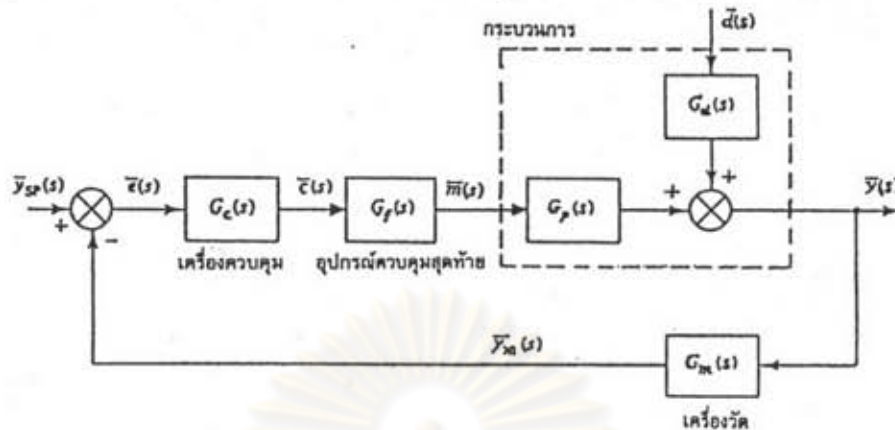
การควบคุมสัดส่วนการไหลสามารถทำได้เมื่อทราบอัตราการไหลของกระแสการไหล A และ B หาสัดส่วนการไหลระหว่างกระแสการไหล A และ B และควบคุมค่าสัดส่วนการไหล A:B ให้มีค่าคงที่ ดังรูป 2.17



รูปที่ 2.17 ระบบควบคุมสัดส่วนการไหล (9)

### 2.14 คุณสมบัติของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

ระบบควบคุมแบบป้อนกลับในกระบวนการอุตสาหกรรมแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ กระบวนการ เครื่องวัด เครื่องควบคุม และอุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ผังสัญญาณและ transfer function ของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (9)

สมการสำหรับองค์ประกอบส่วนต่าง ๆ ของระบบควบคุมแบบป้อนกลับคือ

#### 2.14.1 กระบวนการ

$$y(s) = G_p(s)m(s) + G_d(s)d(s) \quad \dots (2.52)$$

#### 2.14.2 เครื่องวัด

$$y_m(s) = G_m(s)y(s) \quad \dots (2.53)$$

#### 2.14.3 เครื่องควบคุม

$$e(s) = y_{sp}(s) - y_m(s) \quad \dots (2.54)$$

และ 
$$c(s) = G_c(s)e(s) \quad \dots (2.55)$$

#### 2.14.4 อุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย

$$m(s) = G_f(s)c(s) \quad \dots (2.56)$$

เมื่อ	$G_p(s)$	คือ	transfer function กระบวนการ
	$G_d(s)$	คือ	transfer function ของตัวแปรรบกวน
	$G_m(s)$	คือ	transfer function ของเครื่องวัด
	$G_c(s)$	คือ	transfer function ของเครื่องควบคุม
	$G_f(s)$	คือ	transfer function ของอุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย

จาก transfer function ของแต่ละส่วน สามารถหาสมการตัวแทนของทั้งระบบควบคุมแบบป้อนกลับได้ดังนี้

$$y(s) = \frac{G_p(s)G_f(s)G_c(s)}{1+G_p(s)G_f(s)G_c(s)G_m(s)}y_{sp}(s) + \frac{G_d(s)}{1+G_p(s)G_f(s)G_c(s)G_m(s)}d(s) \quad \dots (2.57)$$

โดยพจน์แรกแสดงผลการตอบสนองของตัวแปรออกเนื่องจากการเปลี่ยนเป้าหมายการควบคุม และพจน์ที่สองแสดงผลการตอบสนองของตัวแปรออกเนื่องจากผลการรบกวนภายนอก

แทนค่า

$$\frac{G_p G_f G_c}{1+G_p G_f G_c G_m} = \frac{G}{1+GG_m} = G_{sp} \quad \dots (2.58)$$

$$\frac{G_d}{1+G_p G_f G_c G_m} = \frac{G_d}{1+GG_m} = G_{load} \quad \dots (2.59)$$

$G_{sp}$  คือ transfer function ของกระบวนการ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงเป้าหมายการควบคุม ผลการตอบสนองของตัวแปรออกมีค่า

$$y(s) = G_{sp}(s)y_{sp}(s) \quad \dots (2.60)$$

การควบคุมต้องการให้ตัวแปรออกของกระบวนการ  $y(t)$  มีค่าเท่ากับเป้าหมายการควบคุม  $y_{sp}(t)$  ตลอดเวลาไม่ว่าเป้าหมายจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร การศึกษาวิธีแก้ปัญหาในระบบควบคุมลักษณะเช่นนี้คือ การแก้ปัญหาในการติดตามเป้าหมาย (tracking control problem หรือ servo problem)

$G_{load}$  คือ transfer function ของกระบวนการ เมื่อพิจารณาผลกระทบจากสิ่งรบกวนภายนอกหรือการเปลี่ยนแปลงค่าการควบคุม (load) ที่รบกวนสภาพของกระบวนการ ผลตอบสนองของตัวแปรออกมีค่า

$$y(s) = G_{load}(s)d(s) \quad \dots (2.61)$$

การควบคุมต้องการให้ค่าตัวแปรออกของกระบวนการ  $y(t)$  มีค่าเท่ากับเป้าหมายการควบคุม  $y_{sp}(t)$  ตลอดเวลาไม่ว่าการรบกวนจะมีลักษณะอย่างไร การศึกษาวิธีการแก้ปัญหาในระบบการควบคุมลักษณะเช่นนี้คือ การแก้ปัญหาการรักษาสภาพกระบวนการ (regulator control problem)

## 2.15 การหาค่าคงที่ของเครื่องควบคุม (5, 6)

จาก transfer function แต่ละส่วนของระบบควบคุมแบบป้อนกลับสามารถนำมาใช้ในการหาค่าคงที่ของเครื่องควบคุม เพื่อใช้ในการควบคุมระบบให้ได้ตรงตามวัตถุประสงค์ โดยใช้วิธีการปรับของ Ziegler-Nichols (Ziegler-Nichols tuning) ขั้นแรกทำการหา open loop transfer function ของระบบดังนี้

$$G_{OL} = G_c G_r G_p G_m \quad \dots (2.62)$$

เมื่อ  $G_{OL}$  คือ open loop transfer function ของระบบ โดยที่กำหนดให้  $G_c$  เป็น proportional controller เท่านั้น

วิเคราะห์การตอบสนองเชิงความถี่ของ  $G_{OL}$  เพื่อให้ได้ค่าอัตราขยายเชิงความถี่ และค่ามุมเฟส เพื่อคำนวณค่า ultimate gain ( $K_u$ ) และ ultimate period ( $P_u$ ) ดังนี้

$$K_u = \frac{1}{M} \quad \dots (2.63)$$

$$P_u = \frac{2\pi}{\omega_{\infty}} \quad \text{time/cycle} \quad \dots (2.64)$$

เมื่อ  $\omega_{co}$  คือความถี่ crossover เป็นความถี่ที่มากที่สุดที่ระบบยังคงรักษาเสถียรภาพอยู่ได้โดยความถี่ crossover จะเป็นความถี่ที่ทำให้มุมเฟสของระบบเท่ากับ  $-180^\circ$  และ  $M$  คือค่าอัตราขยายเชิงความถี่ที่เกิดที่ความถี่ crossover

สามารถหาค่าคงที่ของเครื่องควบคุมแบบป้อนกลับโดยวิธีของ Ziegler-Nichols ดังนี้



ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ของเครื่องควบคุมแบบป้อนกลับโดยวิธีของ Ziegler-Nichols (5)

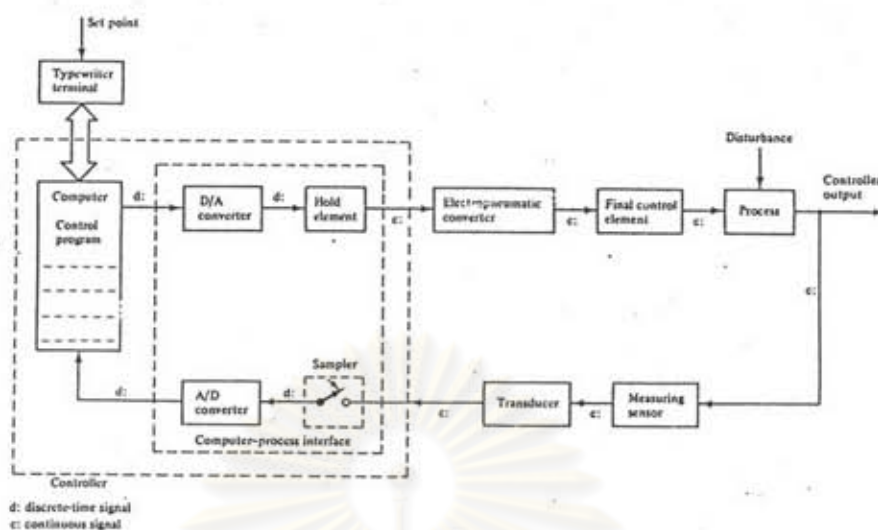
ชนิดของเครื่องควบคุม	Gain, $K_C$	Integral time constant, $\tau_I$	Derivative time constant, $\tau_D$
Proportional	$K_u/2$	—	—
Proportional integral	$K_u/2.2$	$P_u/1.2$	—
Proportional integral derivative	$K_u/1.7$	$P_u/2$	$P_u/8$

### 2.18 ระบบควบคุมกระบวนการด้วยคอมพิวเตอรื (4, 5)

เนื่องจากเทคโนโลยีพัฒนาไปมากจึงมีการนำเอาคอมพิวเตอรืมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมกระบวนการต่าง ๆ เพราะว่เมื่อเทียบกับระบบควบคุมการทำงานแบบเดิมคอมพิวเตอรืจะมีประสิทธิภาพสูงกว่า และความสามารถของคอมพิวเตอรืแทบไม่มีขีดจำกัด อีกทั้งยังสามารถสร้างวงจรควบคุมที่ซับซ้อนมาก ๆ ได้อย่างง่ายดาย รูปที่ 2.19 และ 2.20 แสดงระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอรื



รูปที่ 2.19 โครงสร้างการใช้คอมพิวเตอรืควบคุมระบบ (4)



รูปที่ 2.20 แผนผังสัญญาณควบคุมแบบป้อนกลับด้วยคอมพิวเตอร์ (5)

องค์ประกอบของการควบคุมด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์มีองค์ประกอบเหมือนกับการควบคุมทั่ว ๆ ไป แต่ต่างกันที่ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์แทนเครื่องควบคุม และเพิ่มส่วนของตัวขยายสัญญาณ (interface) เพื่อให้เหมาะสมกับเครื่องคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ที่ใช้ คอมพิวเตอร์มีส่วนประกอบสำคัญคือ (11)

- หน่วยรับข้อมูล (Input Unit) ทำหน้าที่รับข้อมูลและคำสั่งเข้าสู่หน่วยประมวลผลกลาง (CPU) หรือทำหน้าที่อ่านสื่อที่ส่งเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ เช่น เครื่องอ่านบัตร (card reader) เครื่องอ่านเทปแม่เหล็ก (magnetic reader) เครื่องอ่านแผ่นจากแม่เหล็ก (disk drive)

- หน่วยความจำ (Memory Unit) ทำหน้าที่เก็บข้อมูล คำสั่ง และผลลัพธ์ที่ได้ หน่วยความจำหลักของคอมพิวเตอร์คือ RAM (Random Access Memory) และ ROM (Read Only Memory) ส่วนของ RAM จะสามารถบันทึกและอ่านข้อมูลก็ได้ แต่ส่วนของ ROM จะสามารถอ่านข้อมูลได้อย่างเดียว โดยใน ROM จะเก็บโปรแกรมถาวรไว้ เช่นโปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบ

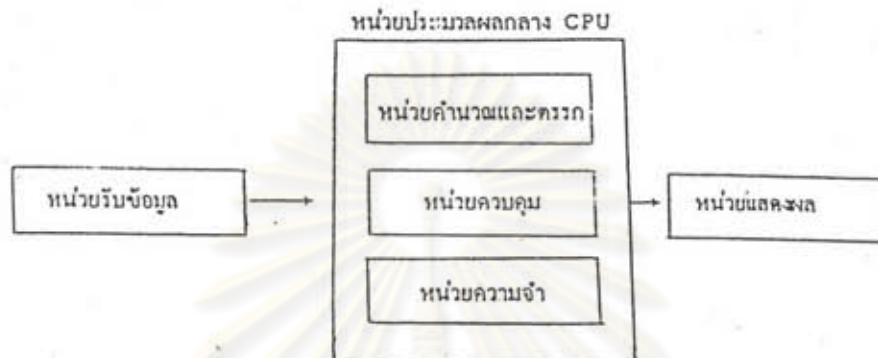
- หน่วยคำนวณและตรรก (Arithmetic and Logic Unit) ทำหน้าที่คำนวณและเปรียบเทียบค่าต่าง ๆ ที่ถูกป้อนเข้าเครื่อง

- หน่วยควบคุม (Control Unit) ทำหน้าที่ควบคุมการปฏิบัติงานของหน่วยอื่น และสั่งงานหน่วยอื่น ๆ ให้เป็นไปโดยเรียบร้อย

- หน่วยแสดงผลลัพธ์ (Output Unit) แสดงผลลัพธ์ หรือส่งข้อมูลออกจากหน่วยความจำ อาจจะออกมาในรูปกระดาษ หรือผ่านจานแม่เหล็ก หรือสื่อใด ๆ ที่ต้องการ

เรียกหน่วยความจำ หน่วยคำนวณ และหน่วยควบคุม ทั้งสามหน่วยรวมกันว่า หน่วยประมวลผลกลาง หรือ CPU (Central Processing Unit)

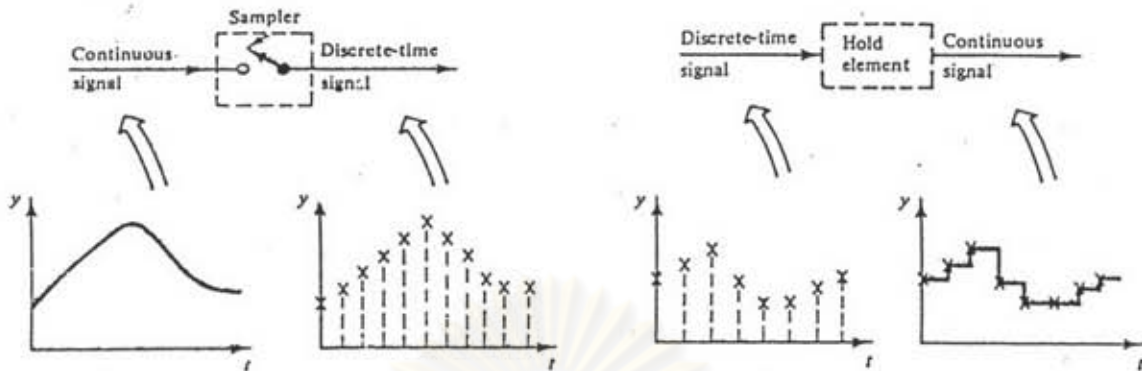
แผนผังองค์ประกอบของคอมพิวเตอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์ (12)

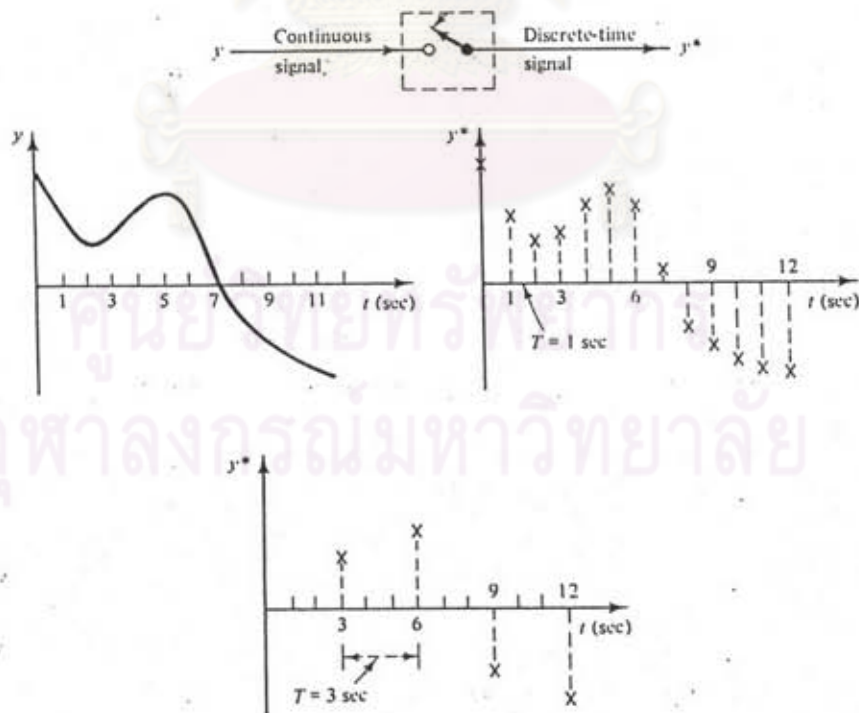
การควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์นั้นจุดประสงค์สำคัญคือทำอย่างไรให้คอมพิวเตอร์สามารถควบคุมกระบวนการได้ตามที่ต้องการ ซึ่งการที่คอมพิวเตอร์จะทำงานอย่างไรนั้นขึ้นกับคำสั่งที่ผู้ใช้ป้อนเข้าไปนั่นคือส่วนโปรแกรม รูปแบบการทำงานของโปรแกรมจะเป็นไปตามรูปแบบของเครื่องควบคุมคือมีการเปรียบเทียบค่าตัวแปรออกกับค่าที่กำหนดและไปควบคุมตัวแปรเข้าตามสมการความสัมพันธ์ของเครื่องควบคุมแต่ละชนิดเพื่อรักษาระบบให้อยู่ในสภาวะคงที่ การใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมมีข้อดีคือ สามารถเขียนโปรแกรมให้ทำงานแก้ไขข้อบกพร่องหรือปัญหาของเครื่องควบคุมได้

การควบคุมด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์นั้นมีการแปลงสัญญาณจากสัญญาณต่อเนื่องหรือ analog ไปเป็นสัญญาณ digital ทำให้สัญญาณที่ส่งเข้ามาขาดช่วงไป (discrete time signal) ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แสดงการเปลี่ยนลักษณะของค่าสัญญาณ (5)

ดังนั้นเพื่อให้สัญญาณที่ได้เป็นสัญญาณที่แสดงสภาพที่เกิดขึ้นจริงในกระบวนการการสุ่มตัวอย่างค่าสัญญาณจึงไม่ควรทิ้งระยะห่างจนเกินไป เพราะจะทำให้ลักษณะแนวโน้มของตัวแปรเปลี่ยนไปจากความจริงหรือนำค่าสัญญาณเข้ามาถี่เกินไปทำให้มีการบันทึกข้อมูลเกินความจำเป็น ดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 แนวโน้มของสัญญาณเมื่อเวลาในการสุ่มตัวอย่างต่างกัน (5)

ช่วงเวลาที่เหมาะสมในการสุ่มบันทึกค่าสัญญาณสำหรับระบบที่มีกระบวนการอันดับหนึ่งนั้นจะต้องมีค่าน้อยกว่าค่าเวลาคงที่ของกระบวนการ (process time constant,  $\tau_p$ ) คืออยู่ในช่วง 0.1-0.2 เท่าของค่า  $\tau_p$

## 2.17 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับด้วยคอมพิวเตอร์ (5, 7)

จากการที่สัญญาณเปลี่ยนจากสัญญาณแบบต่อเนื่องเป็นสัญญาณแบบ digital ทำให้รูปแบบสมการในระบบสัญญาณแบบต่อเนื่องต้องเปลี่ยนไปดังนี้

- เครื่องควบคุมแบบ P สมการควบคุมเปลี่ยนเป็น

$$c(nT) = K_c \varepsilon(nT) + c_s \quad \dots (2.65)$$

- เครื่องควบคุมแบบ PI สมการควบคุมเปลี่ยนเป็น

$$c(nT) = K_c \varepsilon(nT) + \frac{K_c T}{\tau_i} \sum_{k=0}^n \varepsilon(kT) + c_s \quad \dots (2.66)$$

- เครื่องควบคุมแบบ PID สมการควบคุมเปลี่ยนเป็น

$$c(nT) = K_c \varepsilon(nT) + \frac{K_c T}{\tau_i} \sum_{k=0}^n \varepsilon(kT) + \frac{K_c \tau_D}{T} \{\varepsilon(nT) - \varepsilon[(n-1)T]\} + c_s \quad \dots (2.67)$$

เมื่อ  $T$  คือ ช่วงเวลาในการสุ่มตัวอย่าง

เมื่อสัญญาณถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณแบบช่วงทำให้ transfer function เดิมที่อยู่ในรูปของ Laplace transform ไม่สามารถใช้งานได้ ดังนั้น transfer function จึงต้องเปลี่ยนแสดงในรูปของ Z-transform โดยมีนิยามดังนี้

$$Z[y(t)] = Z\{y(0), y(T), y(2T), \dots\} = \sum_{n=0}^{\infty} y(nT) Z^{-n} = \hat{y}(z) \quad \dots (2.68)$$

เมื่อ  $Z$  คือ ตัวกระทำ Z-transform

$\hat{y}(z)$  คือ Z-transform ของ  $y(t)$

ดังนั้น transfer function ใน Laplace domain ของเครื่องควบคุมสามารถเปลี่ยนเป็น Z-domain ดังนี้

$$D(z) = \frac{\hat{c}(z)}{\hat{e}(z)} = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_k z^{-k}}{1 - b_1 z^{-1} - b_2 z^{-2} - \dots - b_m z^{-m}} \quad \dots (2.69)$$

จากสมการ (2.65), (2.66) และ (2.67) เมื่อเขียนในรูป transfer function ใน Z-domain ได้คือ

- เครื่องควบคุมแบบ P

$$D(z) = K_o \quad \dots (2.70)$$

- เครื่องควบคุมแบบ PI

$$D(z) = K_o \left( 1 + \frac{T}{\tau_I} \frac{1}{1 - z^{-1}} \right) \quad \dots (2.71)$$

- เครื่องควบคุมแบบ PID

$$D(z) = K_o \left( 1 + \frac{T}{\tau_I} \frac{1}{1 - z^{-1}} + \frac{\tau_D}{T} \frac{1 - 2z^{-1} + z^{-2}}{1 - z^{-1}} \right) \quad \dots (2.72)$$

สำหรับสมการที่ (2.65), (2.66) และ (2.67) นั้นจะเรียกสมการในรูปแบบนี้ว่า position form ซึ่งสมการ (2.66) และ (2.67) ในรูปแบบนี้ยังไม่เหมาะสมนักสำหรับการนำไปใช้กับคอมพิวเตอร์เนื่องจากพจน์ของผลรวมในส่วนควบคุมแบบ integral จะทำให้คอมพิวเตอร์ทำงานได้ช้าเพราะที่เวลามากขึ้น ค่าที่คำนวณในพจน์นี้จะมากขึ้นไปด้วย ดังนั้นจึงควรปรับรูปแบบของสมการควบคุมดังนี้

เครื่องควบคุมแบบ PID จากสมการที่ (2.67) ที่เวลา  $nT$  และ  $(n-1)T$

$$c_n = K_o \left\{ \varepsilon_n + \frac{T}{\tau_I} \sum_{k=0}^n \varepsilon_k + \frac{\tau_D}{T} (\varepsilon_n - \varepsilon_{n-1}) \right\}$$

$$c_{n-1} = K_o \left\{ \varepsilon_{n-1} + \frac{T}{\tau_I} \sum_{k=0}^{n-1} \varepsilon_k + \frac{\tau_D}{T} (\varepsilon_{n-1} - \varepsilon_{n-2}) \right\}$$

จะได้

$$\Delta c_n = c_n - c_{n-1} = K_c \left( 1 + \frac{T}{\tau_I} + \frac{\tau_D}{T} \right) \varepsilon_n - K_c \left( 1 + \frac{2\tau_D}{T} \right) \varepsilon_{n-1} + K_c \frac{\tau_D}{T} \varepsilon_{n-2} \quad \dots (2.73)$$

สมการ (2.73) ที่ได้เรียกว่า Velocity form สำหรับเครื่องควบคุมแบบ PID

ในทำนองเดียวกันกับเครื่องควบคุมแบบ PI สมการ velocity form จะเขียนได้ดังนี้

$$\Delta c_n = c_n - c_{n-1} = K_c \left( 1 + \frac{T}{\tau_I} \right) \varepsilon_n - K_c \varepsilon_{n-1} \quad \dots (2.74)$$

สำหรับ Z-transform ของสมการควบคุมแบบ velocity form ของ PI และ PID เขียนใหม่ได้ดังนี้

- เครื่องควบคุมแบบ PI (velocity form)

$$D(z) = \frac{\Delta \hat{c}(z)}{\hat{\varepsilon}(z)} = K_c \left\{ \left( 1 + \frac{T}{\tau_I} \right) - z^{-1} \right\} \quad \dots (2.75)$$

- เครื่องควบคุมแบบ PID (velocity form)

$$D(z) = \frac{\Delta \hat{c}(z)}{\hat{\varepsilon}(z)} = K_c \left\{ \left( 1 + \frac{T}{\tau_I} + \frac{\tau_D}{T} \right) - \left( 1 + \frac{2\tau_D}{T} \right) z^{-1} + \frac{\tau_D}{T} z^{-2} \right\} \quad \dots (2.76)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย