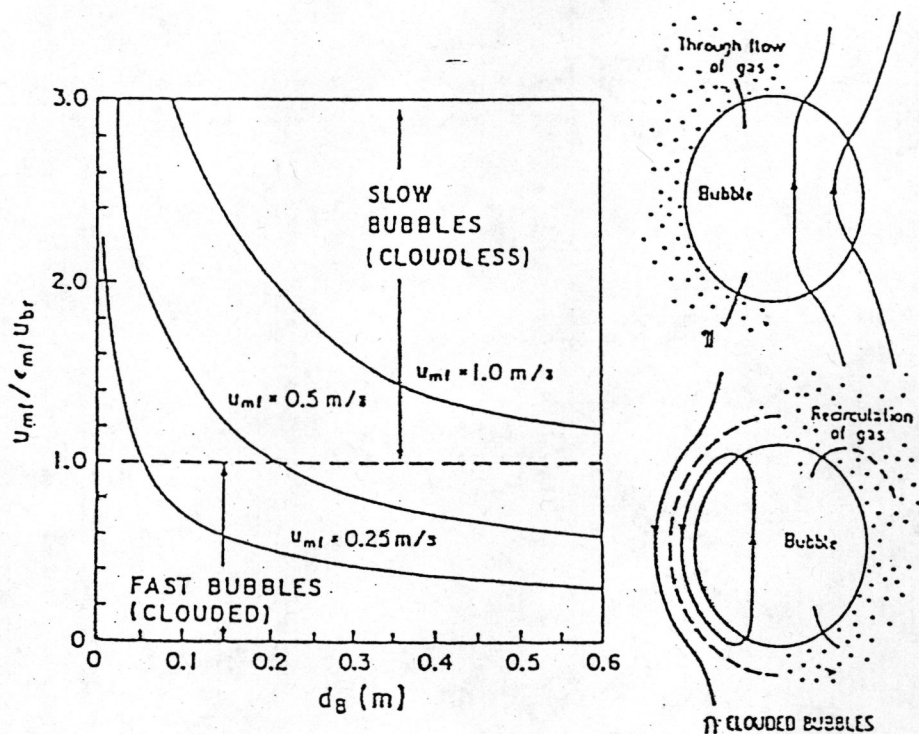




## 2.1 ไฮโดรไดนามิกในเตาเผาแบบฟลูอิโดซ์เบด

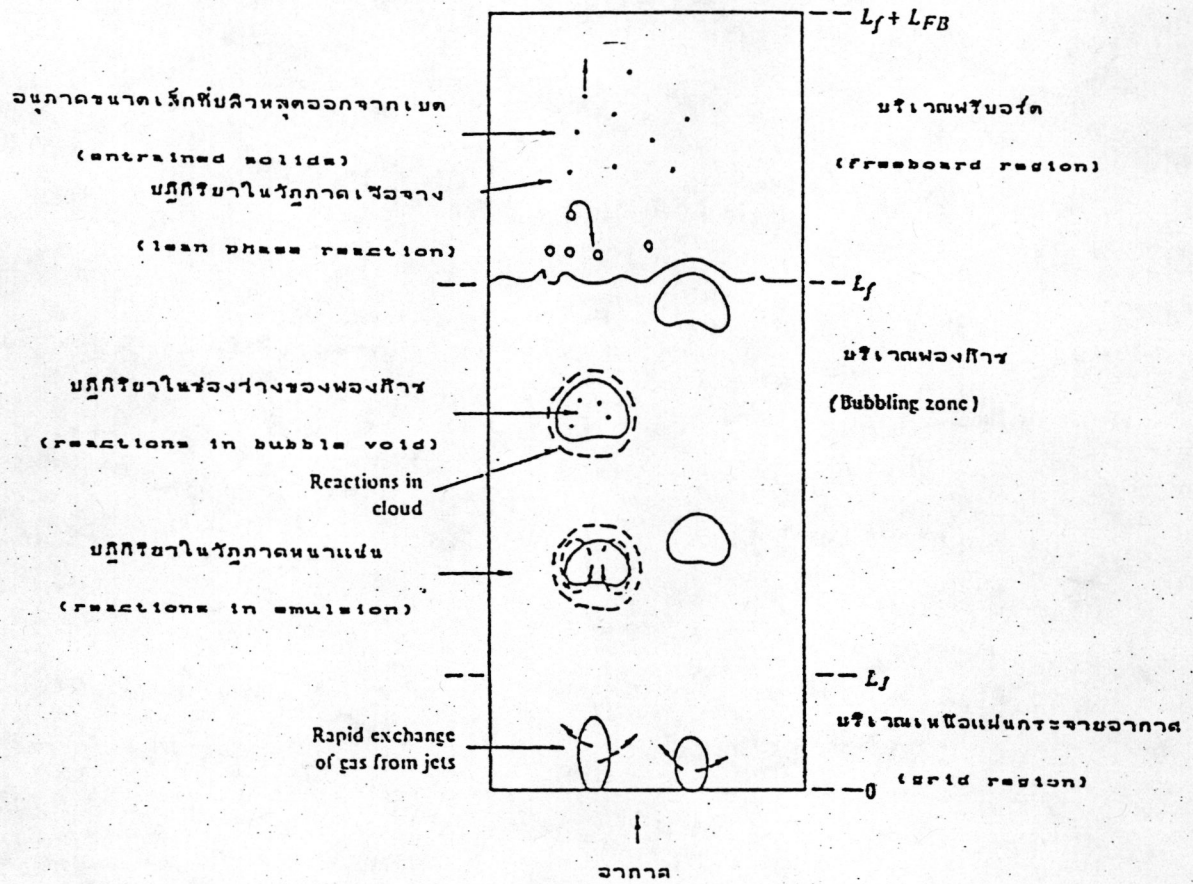
ในระบบฟลูอิโดเซชันแบบระบบก๊าซ-ของแข็งนั้น ก๊าซหรืออากาศที่ป้อนเข้าสู่เบดจะทำหน้าที่เป็นตัวพยุบของแข็งภายในเบดให้เคลื่อนที่อย่างอิสระและมีคุณสมบัติเหมือนของไหล (1) ช่วยให้การผสมผสานและสัมผัสกันระหว่างของแข็งและก๊าซดีขึ้น ภายในเบดของระบบฟลูอิโดเซชันแบบนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 วัฏภาค (two phase theory) (4,5) คือ วัฏภาคฟองก๊าซ (bubble phase หรือ dilute phase) และวัฏภาคหนาแน่น (dense phase หรือ emulsion phase) ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะมีคุณลักษณะสำคัญตามสมมติฐานของ Davidson คือ ภายในฟองก๊าซจะไม่มีของแข็งอยู่เลย, ฟองก๊าซจะวิ่งขึ้นสู่เบื้องบนของเบด และความดันภายในฟองก๊าซมีค่าสม่ำเสมอ

เนื่องจากการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิโดซ์เบดเป็นระบบฟลูอิโดเซชันโดยใช้ก๊าซ ทำให้ไฮโดรไดนามิกในเตาเผามีความซับซ้อนขึ้นอยู่กับความเร็วของก๊าซที่ป้อนเข้าสู่เบดและขนาดของเม็ดของแข็งที่ใช้ในเบด ลักษณะการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซจะเป็นอย่างไรขึ้นกับความเร็วสัมพัทธ์ของฟองก๊าซ (ความเร็วของฟองก๊าซเมื่อเทียบกับวัฏภาคหนาแน่น,  $U_{br}$ ) และความเร็วของก๊าซในเบดหนาแน่นที่สภาวะเริ่มต้นของการเกิดฟลูอิโดซ์ ( $U_f = U_{mf} / \epsilon_{mf}$ ) เมื่อฟองก๊าซเคลื่อนที่ด้วยความเร็วมากกว่าความเร็วของก๊าซในเบดหนาแน่น ( $U_{mf} / \epsilon_{mf} U_b < 1$ ) การไหลของก๊าซในเบดจะเสมือนว่าไหลสวนทางกับฟองก๊าซ โดยไหลวนกลับทางด้านล่างและออกทางด้านบนของฟองก๊าซ ทำให้เกิดการปกคลุมของอนุภาครอบฟองก๊าซคล้ายหมอก (cloud) ดังรูปที่ 2.1 ก ถ้าความเร็วของฟองก๊าซมีค่าน้อยกว่าความเร็วของก๊าซในเบดหนาแน่น ( $U_{mf} / \epsilon_{mf} U_b > 1$ ) ก๊าซในเบดหนาแน่นจะไหลผ่านฟองก๊าซจากทางด้านล่างออกทางด้านบน ทำให้ฟองก๊าซปราศจากหมอกปกคลุม ดังรูปที่ 2.1 ข (4,6)



รูปที่ 2.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของฟองก๊าซเคลื่อนที่ช้าเป็นฟองก๊าซเคลื่อนที่เร็ว (7)

ลักษณะการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซดังกล่าวยังขึ้นกับขนาดของอนุภาคในเบด เนื่องจากความเร็วอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดซ์ ( $u_{mf}$ ) เป็นฟังก์ชันกับขนาดหรือมวลของแต่ละอนุภาค ในระบบฟลูอิดไคเซชันความเร็วของก๊าซปกติอยู่ระหว่างขอบเขตของฟองก๊าซเคลื่อนที่ช้าและเร็ว (transition) (6) ในการเผาไหม้ถ่านหินขนาดของอนุภาคมีการเปลี่ยนแปลงโดยขนาดจะเล็กลงจึงทำให้ฟองก๊าซภายในเบดเคลื่อนที่จากความเร็วช้าไปสู่ความเร็วสูงขึ้น ปฏิิกิริยาเกิดขึ้นที่ส่วนต่างๆของเบดมีแบบจำลองของปฏิิกิริยาในเตาเผาแบบฟลูอิดไคเซชันในอุดมคติ (idealized fluid bed) (7) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงการเกิดปฏิกิริยาในส่วนต่างๆของฟลูอิไดซ์เบดในอุดมคติ (7)

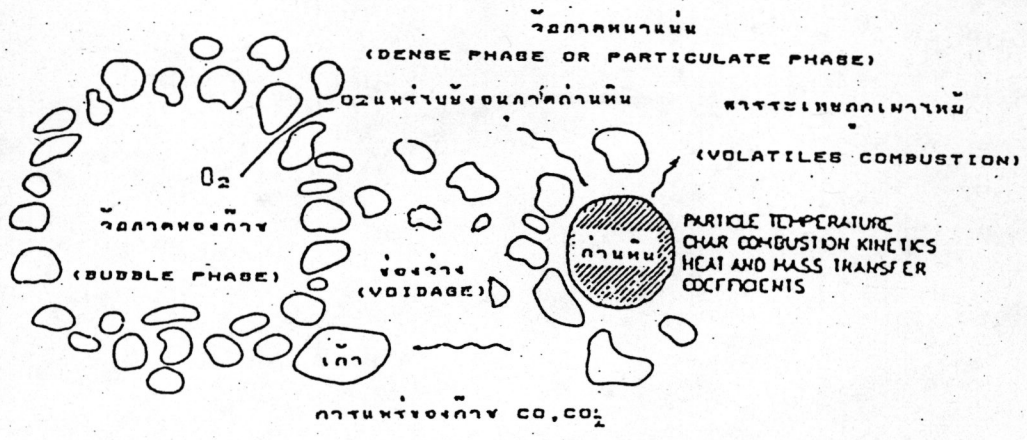
ขอบเขตของการเกิดปฏิกิริยาแบ่งเป็น 3 บริเวณคือ บริเวณเหนือแผ่นกระจายอากาศ (grid region) ประกอบด้วยพองก๊าซขนาดเล็กที่เริ่มก่อตัวขึ้น บริเวณที่สองถัดจากส่วนแรกขึ้นมา ประกอบด้วยพองก๊าซขนาดใหญ่มากมายเรียกบริเวณนี้ว่า bubbling region บริเวณสุดท้ายเป็นบริเวณเหนือเบดมีอนุภาคขนาดเล็กแขวนลอยอยู่เรียกว่า freeboard region ปฏิกิริยาการเผาไหม้ในแต่ละส่วนขึ้นกับความเข้มข้นของก๊าซ กรณีที่อัตราของปฏิกิริยาเกิดมากไฮโดรไดนามิกในเบดได้แก่ คุณสมบัติของพองก๊าซจะเป็นส่วนสำคัญ ในกรณีปฏิกิริยาเกิดช้าระยะเวลาที่ก๊าซอยู่ในเบด (resident time) เป็นส่วนสำคัญ

### 2.2 กลไกการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิโดเบด

กลไกการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิโดเบดยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด แต่สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนอย่างหยาบๆ ได้ 2 ขั้นตอน คือ

2.2.1 กลไกการเผาไหม้ของสารระเหย ขณะที่เม็ดถ่านหินเข้าสู่เบด ความร้อนส่วนหนึ่งจากเบดทำให้อนุภาคถ่านหินมีอุณหภูมิสูงขึ้น สารระเหยเริ่มแพร่ออกมาอยู่บริเวณรอบๆ เม็ดถ่านหินหลังจากนั้นสารระเหยเริ่มติดไฟ อนุภาคถ่านหินที่เหลืออยู่มีสีดำเป็นถ่านชาร์ (char) กลไกการเผาไหม้ของสารระเหยยังไม่เป็นที่เข้าใจอย่างแน่ชัด (2,8) เนื่องจากความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ (yield) องค์ประกอบของถ่านหิน และเวลาที่ใช้ในการระเหย (devolatilization time) มีค่าน้อยมาก Gregory และ Littlejohn (9) ได้เสนอว่าปริมาณของสารระเหยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและปริมาณสารระเหยในถ่านหิน

2.2.2 กลไกการเผาไหม้ของอนุภาคคาร์บอน หลังจากทีสารระเหยระเหยออกไป และถูกเผาไหม้แล้ว เมื่ออุณหภูมิในเบดสูงขึ้นถ่านชาร์เกิดการเผาไหม้ลุกแดงทั่วทั้งเบด กลไกการเผาไหม้เกิดจากการแพร่ของออกซิเจนจากวัฏภาคฟองก๊าซผ่านวัฏภาคหนาแน่น ไปยังผิวของถ่านชาร์ดังรูปที่ 2.3 (8,9)



รูปที่ 2.3 กระบวนการเผาไหม้ของอนุภาคคาร์บอนในฟลูอิโดเบด (10)

เนื่องจากอนุภาคคาร์บอนเป็นสารที่มีรูพรุน ก๊าซออกซิเจนบางส่วนจะทำปฏิกิริยาที่ผิวและบางส่วนแพร่เข้าไปในรูพรุนทำปฏิกิริยากับพื้นผิวภายในรูพรุนของคาร์บอน ที่สภาวะคงที่ (Steady state) จะได้อัตราการเผาไหม้ถ่านหินเป็น

อัตราการเผาไหม้, ( $W_c$ ) = อัตราการถ่ายเทของก๊าซออกซิเจนมาที่ผิวของอนุภาค  
= อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ผิวของอนุภาค

$$W_c = R_m (C_p - C_s) = R_c C_s \quad \dots (2.1)$$

โดย  $R_m = W_m / C_p$

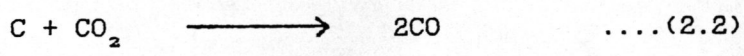
สำหรับอัตราการเผาไหม้ของอนุภาคคาร์บอนขนาดเล็กในฟลูอิโดซ์เบดที่อุณหภูมิต่ำไม่ขึ้นกับการแพร่ของออกซิเจน แต่จะขึ้นอยู่กับอัตราของการเกิดปฏิกิริยา (kinetic controlled) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วมาก ทำให้การแพร่ของออกซิเจนจากภายนอกเป็นส่วนควบคุมอัตราการเผาไหม้ (rate determining step) สำหรับอนุภาคขนาดใหญ่ Field, Malcahy (11) พบว่าอัตราการเผาไหม้ถูกควบคุมโดยอัตราการแพร่ของออกซิเจนไปยังผิวของถ่าน

### 2.3 โมเดลการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้กับเม็ดถ่านหิน

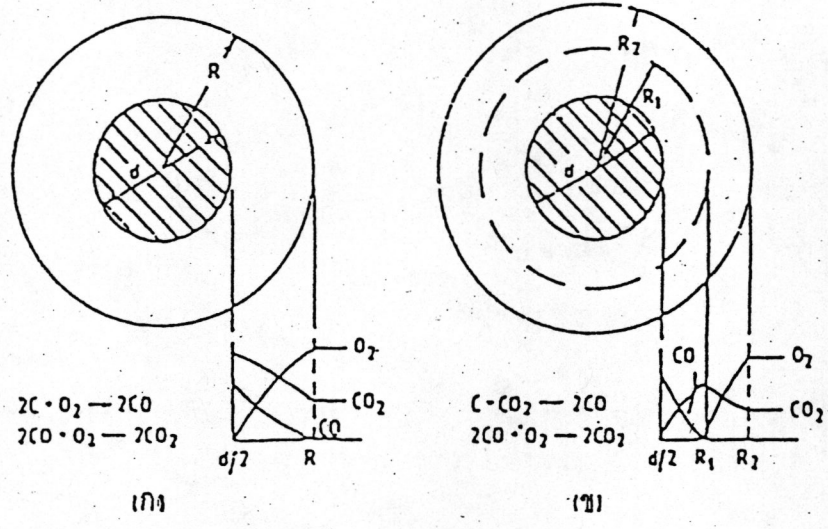
Water (12), Caram และ Amundson (13) และ Calleja และผู้ร่วมงาน (14) ได้วิเคราะห์กลไกพื้นฐานของการเผาไหม้ และเสนอแบบจำลองของแผ่นฟิล์มเชิงเดี่ยว (single film model) โดยอธิบายว่าคาร์บอนจะทำปฏิกิริยาโดยตรงกับก๊าซออกซิเจนอย่างรวดเร็ว เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังรูปที่ 2.4 ก

Avedesian และ Davidson (10) เสนอแบบจำลองแบบแผ่นฟิล์มเชิงคู่ (Double film model) เพื่ออธิบายปฏิกิริยารอบอนุภาคคาร์บอนโดยตั้งสมมติฐานว่า

- ออกซิเจนจะทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนที่ก๊าซออกซิเจนจะแพร่ไปยังผิวของอนุภาคคาร์บอน
- ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในเบดสามารถแพร่ได้ 2 ทิศทางคือ แพร่ออกจากผิวของคาร์บอนและส่วนหนึ่งจะแพร่เข้าหาผิวของคาร์บอน เกิดปฏิกิริยารีดักชันต่อไปดังนี้



ทำให้มีปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่บริเวณใกล้ผิวของอนุภาคมากขึ้น ซึ่งก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จะแพร่ออกจากอนุภาคทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังรูปที่ 2.4 ข



รูปที่ 2.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซต่างๆตามแนวรัศมีของอนุภาค ถ่านหินที่กำลังเผาไหม้ภายในขอบเขตการแพร่  
 ก. แผ่นฟิล์มเชิงเตี้ย      ข. แผ่นฟิล์มเชิงคู้

จากข้อสมมติฐานของ Avedesian และ Davidson ดังกล่าวนั้น Basu และผู้ร่วมงาน (16) ได้ทดลองวิจัยและชี้แนะว่าอุณหภูมิในเตาเผาแบบฟลูอิโดซ์ไม่สูงพอที่จะทำให้ปฏิกิริยารีดักชันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น

2.4 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของอนุภาค

ประสิทธิภาพการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิโดซ์เบดขึ้นกับตัวแปรต่างๆ คือ  
 - ตัวแปรที่สภาวะการเผาไหม้ (operational variables) ได้แก่ ความเร็วอากาศ อุณหภูมิในเบด ขนาดเชื้อเพลิงและความสูงเบด เป็นต้น

- ตัวแปรที่เกิดจากการออกแบบ (design variables) ได้แก่ ความสูงของฟรึบอร์ตและจุดบ่อนเชื้อเพลิง เป็นต้น

#### 2.4.1 ประสิทธิภาพการเผาไหม้จากค่าความร้อน

สาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ต่ำลง คือ การสูญเสียความร้อนไปกับก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ ความชื้นในเชื้อเพลิงและการสูญเสียอนุภาคที่เผาไหม้ไม่หมด ซึ่งในระบบฟลูอิโดส์ส่วนใหญ่จะสูญเสียความร้อนไปเนื่องจากการสูญเสียของอนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมด และสภาวะที่ไม่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา HIRAMA และคณะ (17) ได้คำนวณการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนในรูปของความร้อนเป็นประสิทธิภาพการเผาไหม้,  $\eta_c$

$$\eta_c = 100 \left( 1 - \frac{\text{ความร้อนที่สูญเสียไปกับการปลิวหลุดและท่อไหลสั้น}}{\text{ความร้อนของถ่านหินที่บ่อนเข้าเตาเผาทั้งหมด}} \right) \dots (2.3)$$

#### 2.4.2 สมการแสดงอุณหภูมิการเผาไหม้ถ่านหินและโตโลไมท์ในฟลูอิโดส์เบด

การเผาไหม้ถ่านหินผสมโตโลไมท์ในฟลูอิโดส์เบดสามารถแสดงค่าพลังงานความร้อนที่ได้ในรูปของอุณหภูมิ โดยการทำสมดุลพลังงาน (18) ที่สภาวะคงที่ (steady state) คือ

$$\text{พลังงานความร้อนที่สะสม} = \text{พลังงานความร้อนที่เข้า} - \text{พลังงานความร้อนที่ออก} \dots (2.4)$$

อ้างอิงที่อุณหภูมิเดียวกับอุณหภูมิของอากาศและถ่านหินที่เข้า;  $T_{ref} = T_{in}$

พลังงานความร้อนที่เข้า ได้แก่

- ค่าความร้อนจากถ่านหินที่เกิดการเผาไหม้ =  $G_1(\Delta H_c)$  กิโลแคลอรี/นาทึ
- เอนทาลปีของถ่านหิน =  $G_1 C_p (T_{in} - T_{ref}) = 0$  "
- เอนทาลปีของโตโลไมท์ =  $G_2 C_p (T_{in} - T_{ref}) = 0$  "
- เอนทาลปีของอากาศแห้ง =  $(F - n_{H_2O}) C_p (T_{in} - T_{ref})$  "
- เอนทาลปีของน้ำในอากาศ =  $n_{H_2O} (\Delta H_v)$  "

พลังงานความร้อนที่ออก ได้แก่

- ค่าความร้อนของเถ้าจากท่อสั้น =  $G_3(\Delta H_{O,F})$  กิโลแคลอรี/นาทึ
- ค่าความร้อนของเถ้าจากไซโคลน =  $G_4(\Delta H_{CYC})$  "

- เอนทาลปีของผลึกก๊าซที่อุณหภูมิ  $T_c$  =  $\sum_{i=1}^N n_i C_{P_i} (T_c - T_{ref})$  กิโลแคลอรี/นาที่
- เอนทาลปีของน้ำในผลึกก๊าซที่อุณหภูมิ  $T_c$  =  $m_{H_2O}(\Delta H_V) + m_{H_2O} C_P (T_c - T_{ref})$  "
- ค่าความร้อนของการเผาไหม้ก๊าซ CO =  $n_{CO}(\Delta H_{CO})$  "
- ค่าความร้อนของปฏิกิริยาซัลเฟชันของโคโลไมท์ =  $n_s(\Delta H_s)$  "
- ค่าความร้อนสูญเสีย (heat loss) =  $UA(T_c - T_{ref})/dt$  "

พลังงานความร้อนสะสม

- ที่สภาวะคงที่ = 0 กิโลแคลอรี/นาที่
- ที่สภาวะไม่คงที่ =  $\sum_{i=1}^N n_i C_{P_i} d(T_c - T_{ref})/dt$  "

เมื่อทำสมดุลพลังงานที่สภาวะคงที่โดยให้  $T = T_c - T_{ref}$  จะได้

$$0 = G_1(\Delta H_C) + n_{H_2O}(\Delta H_V) - G_3(\Delta H_{O.F}) - G_4(\Delta H_{CYC}) - \sum_{i=1}^N n_i C_{P_i} T - m_{H_2O}(\Delta H_V) - m_{H_2O} C_P T - UA(T)/dt \dots (2.5)$$

จัดสมการใหม่ได้เป็น

$$UA(T)/dt + \sum_{i=1}^N n_i C_{P_i} T + m_{H_2O} C_P T = G_1(\Delta H_C) - G_3(\Delta H_{O.F}) - G_4(\Delta H_{CYC}) - m_{H_2O}(\Delta H_V) - n_{CO}(\Delta H_{CO}) - m_s(\Delta H_s) \dots (2.6)$$

หรือ

$$\frac{dT}{dt} + \frac{(n_i C_{P_i} + m_{H_2O} C_P)T}{UA} = \frac{1}{UA} \left[ G_1(\Delta H_C) - G_3(\Delta H_{O.F}) - G_4(\Delta H_{CYC}) - m_{H_2O}(\Delta H_V) - n_{CO}(\Delta H_{CO}) - m_s(\Delta H_s) \right] \dots (2.7)$$

สมการที่ 2.7 เป็นสมการแสดงค่าความร้อนของระบบในรูปอุณหภูมิ จากสมการพบว่าระบบเป็นระบบลำดับที่หนึ่ง (first order system) เขียนโดยย่อได้เป็น

$$dT/dt + aT = KF_c(t) + 1/\tau F_A(t) \dots (2.8)$$



เมื่อ

$$a = \frac{n_1 C_{P1} + m_{H_2O} C_P}{UA} \quad \dots (2.9)$$

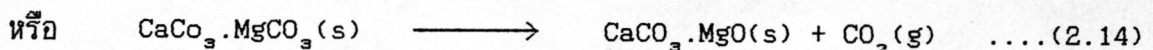
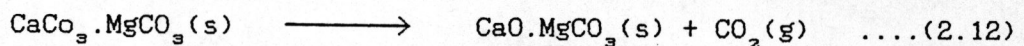
$$KF_c = \frac{1}{UA} \left[ G_1 (\Delta H_c) - G_3 (\Delta H_{O_2,F}) - G_4 (\Delta H_{C_{Yc}}) - m_s (\Delta H_s) \right] \quad \dots (2.10)$$

$$1/\tau F_A = \frac{1}{UA} \left[ m_{H_2O} (\Delta H_v) - n_{CO} (\Delta H_{CO}) \right] \quad \dots (2.11)$$

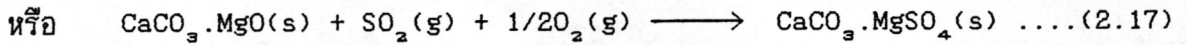
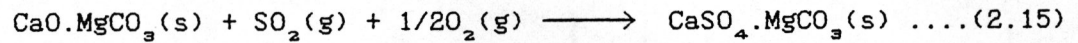
## 2.5 มลพิษและการควบคุมมลพิษในฟลูอิโดเบด

การเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิโดเบดจะก่อให้เกิดมลพิษที่สำคัญคือ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $SO_x$ ), ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ( $NO_x$ ) และอนุภาคมลสารรวมถึงเถ้าหรือของแข็งที่เหลือจากการเผาไหม้ ซึ่งในการเผาไหม้แบบนี้เราสามารถควบคุมมลพิษเหล่านี้ไม่ให้มีปริมาณเกินกำหนดที่จะเป็นอันตรายต่อทั้งมนุษย์และสัตว์ ลักษณะการกำจัดมลพิษแต่ละชนิดมีดังนี้

- ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ในถ่านหินมีกำมะถันเป็นองค์ประกอบอยู่ เมื่อนำมาเผาไหม้จะเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $SO_2$ ) ก๊าซชนิดนี้ละลายน้ำได้ดีให้สารละลายมีฤทธิ์เป็นกรดกัดกร่อนและเป็นอันตรายต่อมนุษย์ สัตว์เลี้ยงและพืช ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์สามารถกำจัดได้โดยการทำให้อยู่ในรูปของสารประกอบซัลเฟตจากการทำปฏิกิริยากับสารประกอบคาร์บอเนต การเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิโดเบดที่ใช้โดโลไมท์ (dolomite,  $CaCO_3 \cdot MgCO_3$ ) เป็นตัวกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (19,20) โดยเกิดปฏิกิริยาหลัก 2 ปฏิกิริยา คือ เริ่มแรกสารประกอบคาร์บอเนตจะเกิดการแตกตัว เรียกว่าปฏิกิริยาแคลซิเนชัน (calcination) จากนั้นทำปฏิกิริยากับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เรียกว่าปฏิกิริยาซัลเฟชัน เขียนสมการปฏิกิริยาได้เป็นปฏิกิริยาแคลซิเนชัน

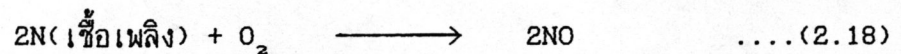


## ปฏิกิริยาซัลเฟชัน



สารประกอบคาร์บอนเนตมีลักษณะเป็นของแข็งที่มีรูพรุน ส่วนผิวด้านนอกจะเกิดปฏิกิริยาแคลซิเนชันก่อน จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาซัลเฟชันได้สารประกอบแคลเซียมซัลเฟตที่มีปริมาณโมเลกุลใหญ่ขึ้นและใหญ่กว่าขนาดความกว้างของรูพรุน สารประกอบแคลเซียมซัลเฟตที่ได้จึงไปอุดรูพรุนไว้ ทำให้ส่วนของสารประกอบคาร์บอนเนตภายในไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาแคลซิเนชันได้ จึงต้องใช้ปริมาณของสารประกอบคาร์บอนเนตมากเกินพอ (21,22) การกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยวิธีนี้ช่วยลดปริมาณก๊าซลงได้มาก แต่ยังมีปัจจัยอย่างอื่นที่มีผลร่วมด้วย เช่น อุณหภูมิของการเผาไหม้, ปริมาณอากาศ และอัตราส่วนของปริมาณซัลเฟอร์ในถ่านหินต่อปริมาณแคลเซียมในสารประกอบคาร์บอนเนต เป็นต้น

- ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) การเผาไหม้ถ่านหินเกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ในรูปของไนตริกออกไซด์ ( $\text{NO}$ ) มากกว่าก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ( $\text{NO}_2$ ) (4,23) ปริมาณของก๊าซที่เกิดขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านหินที่ใช้ อุณหภูมิการเผาไหม้ และปริมาณอากาศ ในระบบการเผาไหม้ถ่านหินแบบฟลูอิดไบท์เบด ก๊าซไนตริกออกไซด์ส่วนใหญ่จะเกิดจากสมการ



การกำจัดก๊าซไนตริกออกไซด์ต้องคำนึงถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชนิดนี้ดังที่กล่าวแล้ว

- อนุภาคมลสารและส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้ (24,25) การเผาไหม้ในฟลูอิดไบท์เบดอนุภาคมลสารประกอบด้วยเถ้าของเชื้อเพลิง, ตัวดูดซับและอนุภาคคาร์บอนขนาดเล็กที่ยังเผาไหม้ไม่หมด สามารถกำจัดโดยการใช้อุปกรณ์แยกเชิงกลแบบไซโคลนและลักษณะของฟลูอิดไบท์เบดที่ใช้ให้มีช่วงของพรีพอร์ตที่เหมาะสม ส่วนเถ้าและของเหลือที่ได้จากการเผาไหม้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เนื่องจากของเสียเหล่านี้ประกอบด้วย  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO} \cdot \text{CaO}$  และ  $\text{MgO} \cdot \text{CaCO}_3$  หรือ  $\text{MgO} \cdot \text{CaSO}_4$  และ  $\text{MgO} \cdot \text{CaO}$  วิธีการใช้ประโยชน์อาจนำไปผ่านกระบวนการทางเคมีให้เป็น

สารตั้งต้นในอุตสาหกรรม หรือนำไปใช้โดยไม่ผ่านกระบวนการทางเคมีคือ ใช้ปรับปรุงดิน , ทำคอนกรีต , ภูมิที่เป็นต้น ซึ่งไม่มีผลเสียต่อสภาพแวดล้อมแต่มีความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมได้ดี

## 2.6 การควบคุมการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิโดเบด (4, 15, 26, 27)

การควบคุมการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิโดเบดนั้นเสมือนกับว่าเป็นการควบคุมอุณหภูมิภายในเตาเผาให้มีค่าคงที่ตามต้องการ ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นมากเนื่องจากถ้าของถ่านหินที่เหลือจากการเผาไหม้และค้างอยู่ในเตา เมื่ออุณหภูมิในเตามีค่าสูงก็จะหลอมตัวแล้วรวมตัวกันเป็นก้อนใหญ่ (slag) ถ้ามีมากจะทำให้อากาศผ่านได้ลำบากอัตราการเผาไหม้ถ่านหินจะลดลง วิธีการควบคุมอุณหภูมิภายในเบดทำได้หลายวิธี คือ

- ควบคุมระดับความสูงของเบด โดยใช้ท่อระบายเชื้อเพลิงส่วนเกิน (overflow tube)
- ควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิง โดยการปรับอัตราเร็วของระบบการป้อน เช่น อัตราการหมุนของสกรู
- ควบคุมความเร็วหรือปริมาณของอากาศ โดยผ่านอากาศที่มากเกินไป (excess air) เพื่อดึงความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้บางส่วนออกจากเตาเผา
- ควบคุมโดยผ่านท่อถ่ายเทความร้อน (heat exchanger) โดยใช้ท่อโลหะขวางอยู่ในเบดที่บริเวณเฟรียร์คหรือบริเวณอื่นของเตาโดยมีน้ำหรือไอน้ำไหลผ่านด้วยความเร็วพอเหมาะ

การควบคุมอุณหภูมิในเบดส่วนใหญ่จะควบคุมอัตราการป้อนถ่านหินและอากาศ ซึ่งสามารถประยุกต์เอาเครื่องควบคุมมาใช้ในการควบคุมได้ด้วย เครื่องควบคุมที่ใช้กันโดยทั่วไปมี เครื่องควบคุมแบบเปิด-ปิด (on-off controller), เครื่องควบคุมแบบ Proportional , เครื่องควบคุมแบบ Proportional Integral และเครื่องควบคุมแบบ Proportional Integral Derivative หรืออาจจะประยุกต์เอาเครื่องคอมพิวเตอร์มาใช้ควบคุมให้ได้รูปแบบการควบคุมต่างๆ ตามที่ต้องการ

## 2.7 ระบบการควบคุมกระบวนการทางเคมี

ในการผลิตหรือปฏิบัติงานของกระบวนการเคมีต่างๆ ไปนั้นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงหลายอย่างด้วยกันคือ ความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน , ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ , ผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อม

ล้อม , ชีตความสามารถหรือข้อจำกัดของอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ และความประหยัดเป็นต้น แต่ใน ส่วนของการควบคุมกระบวนการต่าง ๆ นั้น นอกจากจะต้องทราบวัตถุประสงค์ที่ต้องการจะควบคุมแล้ว ยังมีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงโดยทั่วไป 3 ประการ (28) คือ

2.7.1. อิทธิพลของตัวแปรภายนอกที่มีต่อระบบ คือ ทราบว่าตัวแปรภายนอกเหล่านั้น มีผลต่อตัวแปรที่จะควบคุมอย่างไร เพื่อนำมาใช้พิจารณาเลือกรูปแบบการควบคุมและเครื่องควบคุม ให้เหมาะสม

2.7.2 ระบบอยู่ในสภาวะคงที่หรือไม่ คือ ตัวแปรของระบบสามารถอยู่ในสภาวะเดิม หรือเปลี่ยนแปลงไปในช่วงที่ยอมรับได้เมื่อเวลาเปลี่ยนไป ถ้าระบบไม่สามารถอยู่ในสภาวะคงที่ได้ จะต้องควบคุมอย่างไรให้ระบบอยู่ในสภาวะคงที่ได้

2.7.3. ด้านเศรษฐกิจ คือ เลือกควบคุมในช่วงที่จะให้ได้ผลตามวัตถุประสงค์แต่ให้ ผลกำไรมากที่สุด

ในกระบวนการเคมีสามารถแบ่งตัวแปรที่เกี่ยวข้องออกเป็น 2 กลุ่ม (29) คือ

- ตัวแปรป้อนเข้า (input variables) คือ ตัวแปรจากสิ่งแวดล้อมภายนอกที่มี อิทธิพลต่อกระบวนการของระบบ แบ่งเป็น

ก. ตัวแปรปรับค่าได้ (manipulated variables) คือ ตัวแปรป้อนเข้าที่ สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้อย่างอิสระโดยผู้ควบคุมหรือเครื่องควบคุม

ข. ตัวแปรคงที่ (disturbances variables) คือ ตัวแปรป้อนเข้าที่มีค่า เฉพาะไม่สามารถเปลี่ยนค่าได้อย่างอิสระโดยผู้ควบคุมหรือเครื่องควบคุม

- ตัวแปรป้อนออก (output variables) คือ ตัวแปรที่เป็นผลเนื่องมาจาก กระบวนการของระบบและมีอิทธิพลต่อสิ่งแวดล้อมนั้น แบ่งเป็น

ก. ตัวแปรวัดค่าได้ (measured output variables) คือ ตัวแปรป้อนออก ที่สามารถใช้อุปกรณ์ต่างๆ วัดค่าได้โดยตรง

ข. ตัวแปรวัดค่าไม่ได้ (unmeasured output variables) คือ ตัวแปรป้อน ออกที่ไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรงด้วยเครื่องวัด แต่อาจจะได้จากการคำนวณหรือการแปลงค่า

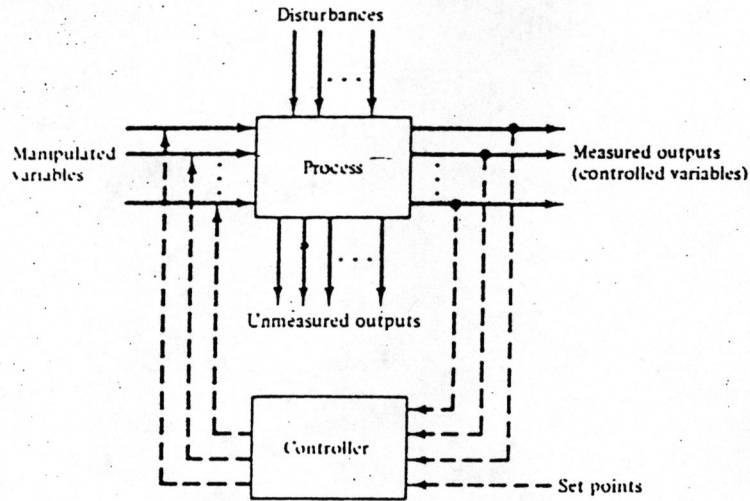
ในระบบการควบคุมทั่วไประบบจะมีส่วนประกอบของระบบดังนี้ คือ

- ระบบกระบวนการที่ควบคุม คือ อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการปฏิบัติงาน เช่น เตาเผา, หอกลิ้น , เครื่องปฏิกรณ์ต่างๆ เป็นต้น
- เครื่องวัดหรือเครื่องส่งสัญญาณ เช่น เทอร์โมคัปเปิล เครื่องวัดที่ติจะช่วยให้การควบคุมถูกต้องแม่นยำและได้ผลดีด้วย
- Transducers คือ เครื่องที่ใช้แปลงค่าที่วัดได้ก่อนนำไปใช้พิจารณาควบคุมในกรณีที่ค่าที่วัดได้นั้นไม่สามารถนำไปใช้ควบคุมได้ทันที
- Transmission lines เป็นตัวพาสัญญาณไปยังเครื่องควบคุมหรืออุปกรณ์ที่ถูกควบคุม เช่น สายเทอร์โมคัปเปิล Transmission line ที่ติจะต้องมีความต้านทานสัญญาณน้อยมาก เพื่อให้ไม่ให้อสัญญาณผิดพลาดไปมากก่อนจะถึงที่หมายเพราะจะเกิดความผิดพลาดในการควบคุมได้
- เครื่องควบคุม (controller) คือ เป็นเครื่องรับสัญญาณมาเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนดและส่งสัญญาณไปควบคุมต่อ เครื่องควบคุมมีหลายชนิดดังจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป ซึ่งในไมโครคอมพิวเตอร์นั้นการควบคุมจะเป็นแบบไหนขึ้นกับโปรแกรมที่ใช้
- เครื่องควบคุมขั้นสุดท้าย คือ เครื่องที่รับสัญญาณจากเครื่องควบคุมมาควบคุมค่าตัวแปรที่ปรับเปลี่ยนค่าได้ (manipulated variable) เช่น เครื่องควบคุมการหมุนของมอเตอร์ในการป้อนถ่านหินหรืออากาศ
- เครื่องบันทึกค่า คือ เครื่องมือที่ใช้แสดงค่าของตัวแปรที่เกิดจากกระบวนการที่สามารถวัดได้โดยตรง หรือตัวแปรที่ต้องการควบคุม ตัวแปรที่ต้องการควบคุมอาจแสดงอยู่ในรูปค่าตัวเลข หรือกราฟของค่าตัวแปรต่อเวลา

## 2.8 รูปแบบของระบบการควบคุม (29)

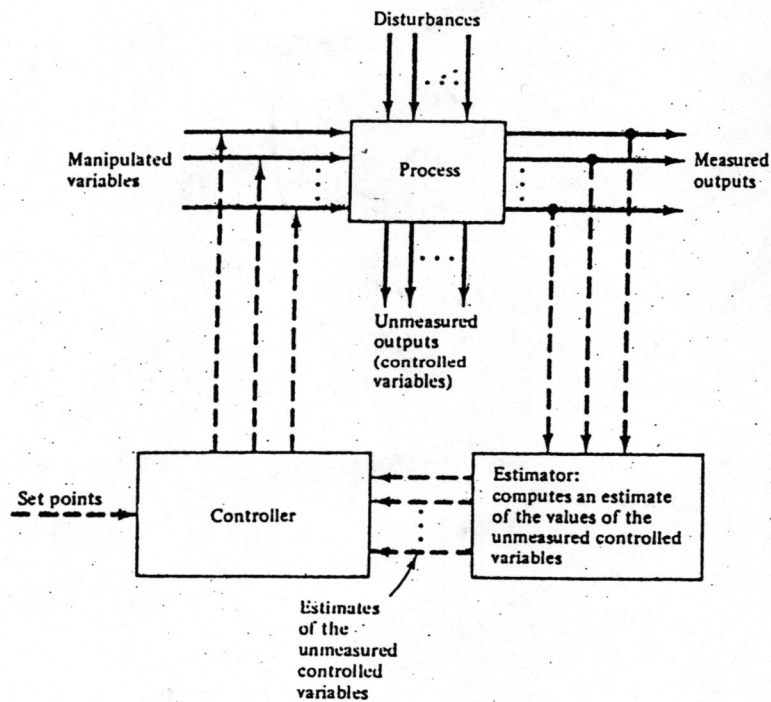
เมื่อทราบลักษณะชนิดของตัวแปรและ องค์ประกอบของระบบควบคุมแล้ว จากนั้นพิจารณาถึงรูปแบบของการควบคุมที่จะใช้ว่า การควบคุมรูปแบบใดเหมาะสมกับกระบวนการและวัตถุประสงค์ของการควบคุม รูปแบบการควบคุมของกระบวนการทางเคมีโดยทั่วไประบบมี 3 แบบ คือ

2.8.1. การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control) คือ การควบคุมโดยใช้ตัวแปรวัดค่าได้ (measured output variable) โดยตรงจากระบบไปควบคุมตัวแปรปรับค่าได้ (manipulated variable) เพื่อให้ตัวแปรที่ต้องการควบคุมอยู่ในช่วงที่กำหนด (set point) การควบคุมแบบนี้เป็นรูปแบบการควบคุมที่ใช้กันส่วนมาก ลักษณะการควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 2.5



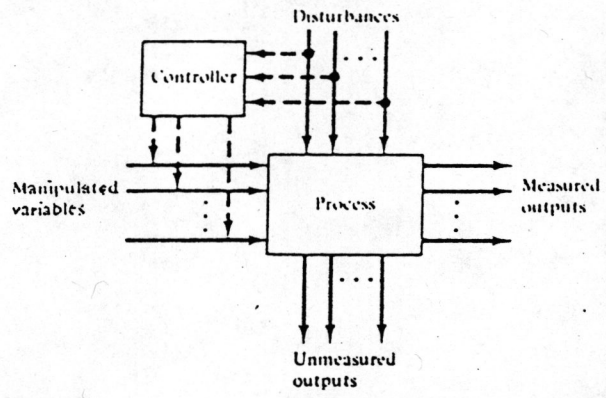
รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงลักษณะการควบคุมแบบป้อนกลับ (29)

2.8.2 การควบคุมแบบอินเฟอเรนเชียล (Inferential control) คือ การควบคุมโดยใช้ผลที่ได้จากการคำนวณหรือประมาณค่าจากตัวแปรที่สามารถวัดค่าได้ ไปควบคุมตัวแปรที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้เพื่อให้ค่าตัวแปรที่ควบคุมอยู่ในช่วงที่กำหนด แสดงลักษณะการควบคุมได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงลักษณะการควบคุมแบบอินเฟอเรนเชียล (29)

2.8.3. การควบคุมแบบฟีดฟอร์เวิร์ด (Feedforward control) คือ การควบคุมโดยใช้ค่าตัวแปรคงที่ (disturbance variables) ไปควบคุมตัวแปรปรับค่าได้ เพื่อควบคุมให้ตัวแปรป้อนออกอยู่ในช่วงที่กำหนด แสดงลักษณะการควบคุมได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงลักษณะการควบคุมแบบฟีดฟอร์เวิร์ด (29)

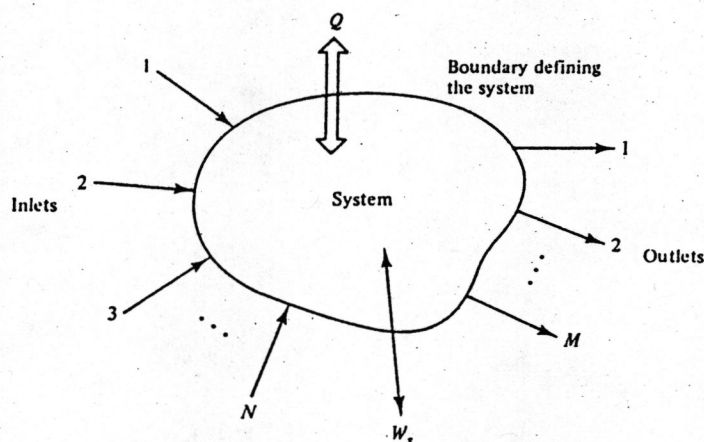
2.9 การหาความสัมพันธ์ของตัวแปรในกระบวนการเคมี (29)

ในการควบคุมกระบวนการต่างๆ เราต้องทราบตัวแปรที่ต้องการควบคุมกับตัวแปรอื่นๆ ที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการของระบบ ในการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรแต่ละตัวมีวิธีการหา 2 วิธี คือ

2.9.1 จากการพิจารณาทางทฤษฎี วิธีนี้เป็นการคาดเดาล่วงหน้าถึงความสัมพันธ์ที่จะเกิดขึ้นของตัวแปรในกระบวนการเคมีนั้นๆ ใช้ในกรณีที่ระบบยังไม่สามารถทำการทดลองได้ โดยต้องศึกษาไฮโดรไดนามิกและกลไกการทำงานของกระบวนการที่จะเกิดขึ้น จากนั้นนำมาสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ ขั้นตอนการหาสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ ทำได้ดังนี้

- ทราบวัตถุประสงค์ของการควบคุม
- ศึกษาและคาดเดาไฮโดรไดนามิกและกลไกที่จะเกิดขึ้นของกระบวนการ
- หาสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของตัวแปรป้อนเข้าและตัวแปรป้อน

ออกที่ต้องการควบคุม โดยใช้สมการสมดุลแรง, มวลสารและพลังงาน (30) ความสัมพันธ์ของระบบกับสิ่งแวดล้อมแสดงได้ดังรูปที่ 2.8

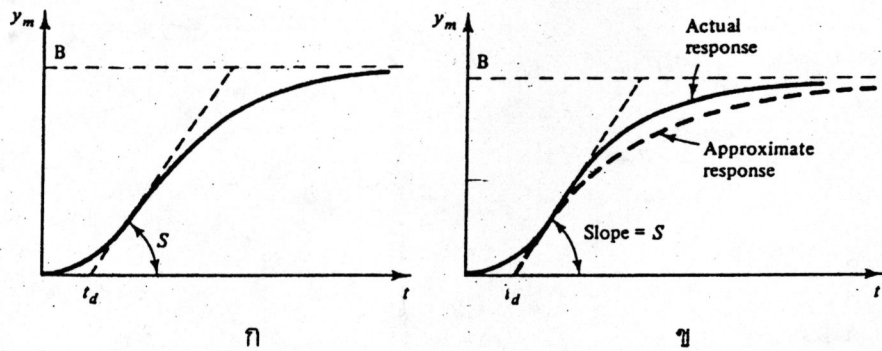


รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม (29)

การเลือกใช้สมการสมดุลแบบใดขึ้นกับชนิดของตัวแปรที่ควบคุมและลักษณะกระบวนการของระบบ การทำให้สมการทางคณิตศาสตร์มีรูปสมการที่ง่ายขึ้นจำเป็นต้องกำหนดสมมติฐานและสมการบางอย่างตามความเหมาะสม รูปแบบของสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปสมการที่เปรียบเทียบกับเวลาและสภาวะคงที่ เนื่องจากกระบวนการทางเคมีส่วนใหญ่จะควบคุมที่สภาวะคงที่

2.9.2 จากการทดลอง ใช้ในกรณีที่ระบบสามารถใช้ปฏิบัติงานได้แล้ว ค่าความสัมพันธ์ที่หาโดยวิธีนี้จะให้ค่าแน่นอนของระบบมากกว่าการคาดเดาทางทฤษฎี การหาค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรทำโดยเปลี่ยนค่าตัวแปรป้อนเข้าที่ใช้ปรับเปลี่ยนค่าไปเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง เพื่อดูผลของตัวแปรป้อนออกที่ต้องการควบคุมกับเวลา ตามสมมติฐานของ Cohen และ Coon (31) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรป้อนออกกับเวลาดังรูปที่ 2.9





รูปที่ 2.9 ก. กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรป้อนออกกับเวลา  
 ข. กราฟแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงโดยประมาณของค่าตัวแปรในระบบลำดับที่หนึ่ง

ซึ่งจะได้ค่าคงที่ต่างๆของระบบ คือ

$$\text{ค่า static gain } (K_p, K) = \frac{\text{ผลต่างของตัวแปรป้อนออกที่สภาวะคงที่}}{\text{ผลต่างของตัวแปรป้อนเข้าที่สภาวะคงที่}} = \frac{B}{A}$$

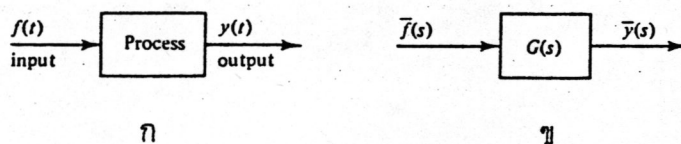
$$\text{ค่า time constant } (\tau_p, \tau) = \frac{\text{ผลต่างของตัวแปรป้อนออกที่สภาวะคงที่}}{\text{ค่าความชันสูงสุดที่สัมผัสเส้นกราฟ}} = \frac{B}{S}$$

$$\text{ค่า dead time } (t_d) = \text{ช่วงเวลาตั้งแต่เปลี่ยนค่าตัวแปรป้อนเข้าจนถึงจุดที่เส้นความชันสูงสุดตัดแกนเวลา}$$

ค่าคงที่ของระบบเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการความสัมพันธ์ของตัวแปรในระบบเครื่องควบคุมต่อไป

### 2.10 Transfer Function ของระบบ (29,32)

สมการที่แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรในระบบมักจะแสดงในรูปของสมการดิฟเฟอเรนเชียลที่เทียบกับเวลา ดังนั้นเพื่อให้สมการอยู่ในรูปที่ง่ายขึ้นเราจึงแปลงสมการให้อยู่ในรูปของ Laplace transforms จากสมการรูปแบบทั่วไปของระบบตัวแปรป้อนเข้าและป้อนออกตัวเดียว ดังรูปที่ 2.10 คือ



รูปที่ 2.10 ก. แผนภาพของระบบตัวแปรเข้าออกตัวเดียว  
 ข. แผนภาพ transfer function ของระบบ(29)

$$a_n \frac{d^n Y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} Y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dY}{dt} + a_0 Y = b f(t) \quad \dots (2.19)$$

โดย  $a_0, a_1, \dots, a_n$  และ  $b$  คือ ค่าคงที่ของสมการ  
 $Y$  และ  $f$  คือ ตัวแปรป้อนออกและป้อนเข้าของระบบ

เมื่อทำให้อยู่ในรูปของ Laplace transforms (33) โดยสมมติว่า ระบบอยู่ในสภาวะคงที่จะได้

$$\frac{Y(s)}{f(s)} = \frac{b}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} = G(s) \quad \dots (2.20)$$

โดย  $G(s) =$  transfer function ของระบบ  
 $= \frac{\text{Laplace transform ของตัวแปรป้อนออกที่เทียบกับเวลา}}{\text{Laplace transform ของตัวแปรป้อนเข้าที่เทียบกับเวลา}}$

ค่า transfer function ค่าหนึ่งจะเป็นค่าของการเปรียบเทียบระหว่างตัวแปรป้อนเข้าและออกคู่หนึ่ง ถ้าระบบมีตัวแปรป้อนเข้าและออกหลายตัวค่า transfer function จะมีหลายค่าด้วยกัน

## 2.11 ลักษณะของระบบกระบวนการลำดับที่หนึ่ง (34)

ระบบที่มีกระบวนการเป็นลำดับที่หนึ่ง มีตัวแปรป้อนเข้าและป้อนออกตัวเดียว จะมีสมการของกระบวนการอยู่ในรูปดังนี้

$$\left( \frac{a_1 dY}{dt} \right) + a_0 Y = b f(t) \quad \dots (2.21)$$

หรือ

$$\left( \frac{a_1 dY}{a_0 dt} \right) + Y = \frac{b f(t)}{a_0} \quad \dots (2.22)$$

สมมติให้  $a_1/a_0 = \tau_p$  และ  $b/a_0 = K_p$  แทนลงในสมการ 2.22 จะได้

$$\left( \tau_p \frac{dY}{dt} \right) + Y = K_p f(t) \quad \dots(2.23)$$

จากสมการเมื่อทำให้อยู่ในรูปของ Laplace transforms แล้วจะได้ transfer function ของระบบ คือ

$$G(s) = \frac{Y(s)}{f(s)} = \frac{K_p}{\tau_p s + 1} \quad \dots(2.24)$$

ในระบบที่มีกระบวนการเป็นลำดับที่หนึ่งแล้วโดยตัวของระบบเองจะสามารถเข้าสู่สภาวะคงที่ได้เองถ้ามีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรป้อนเข้า ถ้าตัวแปรป้อนเข้าถูกเปลี่ยนไปเป็นค่าคงที่หนึ่งหน่วย (unit step change) จะให้ผลของตัวแปรป้อนเข้าในรูปของ Laplace transforms คือ

$$f(s) = 1/s$$

ดังนั้นจากสมการ 2.24 จะได้

$$G(s) = sY(s) = \frac{K_p}{\tau_p s + 1} \quad \dots(2.25)$$

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

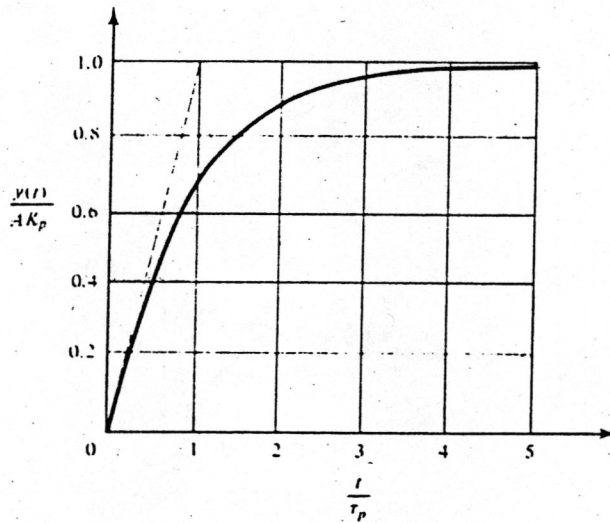
เมื่อทำสมการให้กลับมามีอยู่ในรูปของสมการที่เทียบกับเวลาแล้วจะได้

$$Y(t) = K_p(1 - e^{-(t/\tau_p)}) \quad \dots(2.27)$$

หรือ

$$Y(t) = AK_p(1 - e^{-(t/\tau_p)}) \quad \dots(2.28)$$

A = ค่าตัวแปรป้อนเข้าที่เปลี่ยนไปเป็นจำนวนเท่าของค่าที่เปลี่ยนไปหนึ่งค่าคงที่  
ซึ่งจะได้ค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ของตัวแปรป้อนออกกับเวลาของกระบวนการลำดับที่หนึ่ง  
เมื่อเปลี่ยนตัวแปรป้อนเข้าไปคงที่ค่าหนึ่ง (34)

เมื่อเวลาผ่านไปเท่ากับค่า time constant ( $\tau_p$ ) ค่าของตัวแปรป้อนออกจะเปลี่ยนไป 63.2 % ของค่าที่จะเปลี่ยนไปจริงทั้งหมด

ในระบบที่มีกระบวนการเป็นลำดับที่หนึ่งแต่มีตัวแปรป้อนเข้าสองตัวและป้อนออกหนึ่งตัวดัง  
ในกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินผสมโดโลไมท์ในฟลูอิโดซ์เบด ซึ่งสมการของระบบคือ

$$dT/dt + aT = KF_c(t) + 1/\tau F_A(t) \quad \dots(2.29)$$

เมื่อทำให้อยู่ในรูปของ Laplace transforms จะได้เป็น

$$(s+a)T(s) = KF_c(s) + 1/\tau F_A(s) \quad \dots(2.30)$$

$$T(s) = \frac{K}{s+a} F_c(s) + \frac{1/\tau}{s+a} F_A(s) \quad \dots(2.31)$$

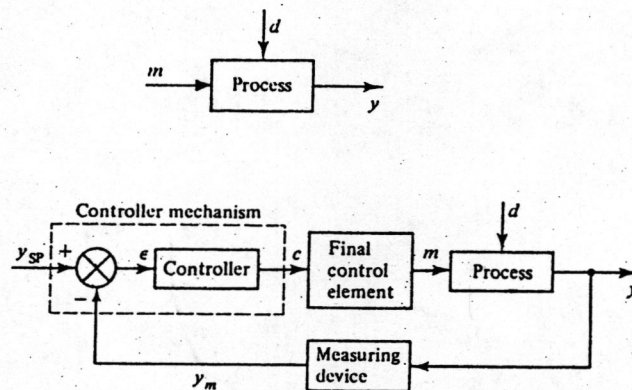
ดังนั้น transfer function ของระบบจะมี 2 แบบขึ้นกับอัตราการป้อนถ่านหินและอัตราการป้อนอากาศ คือ

$$\text{transfer function ของอัตราการป้อนถ่านหิน: } G_1(s) = \frac{T(s)}{F_c(s)} = \frac{K}{s+a}$$

$$\text{transfer function ของอัตราการป้อนอากาศ: } G_2(s) = \frac{T(s)}{F_a(s)} = \frac{1/T}{s+a}$$

## 2.12 ชนิดของเครื่องควบคุมแบบป้อนกลับ (Types of Feedback Controller) (29)

การควบคุมแบบป้อนกลับมีรูปแบบของการควบคุมและการทำงานของเครื่องควบคุมดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 วงจรการควบคุมแบบป้อนกลับ (29)

ระบบมีขั้นตอนการทำงาน คือ เครื่องควบคุมจะรับสัญญาณค่าตัวแปรป้อนออกที่วัดค่าได้และเป็นตัวแปรที่ต้องการควบคุม ( $Y_m$ ) มาเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนดไว้ (set point,  $Y_{sp}$ ) ค่าที่เปรียบเทียบได้คือ ค่าความผิดพลาด (error,  $e$ ) ซึ่งเท่ากับ

$$e = Y_{sp} - Y_m$$

จากนั้นเครื่องควบคุมจะนำค่าความผิดพลาดมาพิจารณาควบคุม และเปลี่ยนเป็นสัญญาณไปควบคุมเครื่องควบคุมตัวแปรป้อนเข้า เพื่อให้ตัวแปรป้อนเข้ารักษาสภาพของตัวแปรป้อนออกให้ได้ตามต้องการ ซึ่งการทำงานจะวนอยู่ในลักษณะเช่นนี้ตั้งแต่เริ่มควบคุมจนถึงที่สุดการควบคุม

การพิจารณาเปลี่ยนแปลงสัญญาณของเครื่องควบคุมมีความสำคัญมาก เพราะถ้าสัญญาณที่เปลี่ยนไปในการควบคุมไม่เหมาะสมกับกระบวนการของระบบแล้ว จะทำให้การควบคุมมีความยุ่งยากและไม่ให้ประสิทธิภาพที่ดีเท่าที่ควร การเปลี่ยนแปลงสัญญาณของเครื่องควบคุมขึ้นกับชนิดของเครื่องควบคุม เครื่องควบคุมที่ใช้กับระบบการควบคุมแบบย้อนกลับโดยปกติมี 3 ชนิด คือ

### 2.12.1 เครื่องควบคุมแบบ P (Proportional Controller)

เครื่องควบคุมแบบนี้ทำงานโดยเปลี่ยนค่าสัญญาณที่ส่งไปควบคุมจากค่าความผิดพลาดตามสมการ

$$C(t) = K_c E(t) + C_s \quad \dots (2.32)$$

เมื่อ

$K_c$  = ค่า proportional gain ของเครื่องควบคุม

$C_s$  = ค่าสัญญาณที่เครื่องควบคุมส่งไปเมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงที่ ( $E = 0$ )

$C(t)$  = ค่าสัญญาณที่เครื่องควบคุมส่งไปช่วงเวลาใด

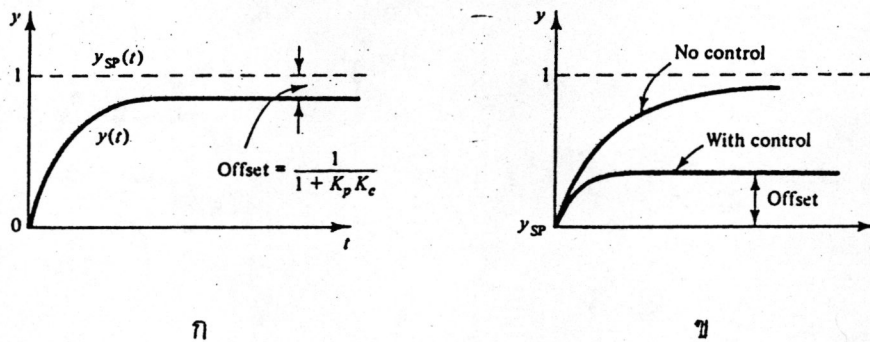
$E(t)$  = ค่าความผิดพลาดช่วงเวลาใด

จากรูปของสมการสามารถหาค่า transfer function ของเครื่องควบคุมได้เป็น

$$G_c(s) = K_c$$

ผลการใช้เครื่องควบคุมแบบนี้สามารถควบคุมระบบให้อยู่ในสภาวะคงที่ได้ แต่ค่าที่ได้ไม่ใช่ค่าที่ได้กำหนดไว้หรือค่าที่ต้องการดังรูปที่ 2.13 ผลต่างของค่าทั้งสองนี้เรียกว่า ค่า offset ซึ่งเท่ากับ

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



รูปที่ 2.13 ค่า offset ที่เกิดจากการควบคุมแบบ P ในกระบวนการลำดับที่หนึ่งเมื่อ  
 ก. เปลี่ยนค่าตัวแปรที่กำหนด ข. เปลี่ยนค่าตัวแปรป้อนเข้า (29)

2.12.2 เครื่องควบคุมแบบ PI (Proportional Integral Controller)  
 เครื่องควบคุมแบบนี้เรียกอีกอย่างว่า proportional-plus-reset controller ทำการเปลี่ยนสัญญาณการควบคุมตามสมการ

$$C(t) = K_c \epsilon(t) + \frac{K_c}{\tau_i} \int_0^t \epsilon(t) dt + C_s \quad \dots(2.33)$$

เมื่อ  $\tau_i$  = integral time constant หรือ reset time (นาที)  
 โดยปกติค่า  $\tau_i$  จะอยู่ในช่วง 0.1 - 50 นาที  
 จากรูปสมการสามารถหาค่า transfer function ของเครื่องควบคุมได้คือ

$$G_c(s) = K_c (1 + 1/\tau_i s)$$

เครื่องควบคุมแบบนี้เป็นเครื่องควบคุมที่เพิ่มส่วนของการอินทิเกรตค่าความผิดพลาดเข้า  
 รวมกับเครื่องควบคุมแบบ proportional เพื่อกำจัดค่า offset ที่จะเกิดขึ้น ผลของเครื่องควบ  
 คุมแบบนี้สามารถกำจัดค่า offset ได้แต่จะเกิดการแกว่งของค่าตัวแปรซึ่งเป็นข้อเสียของเครื่อง  
 ควบคุมแบบนี้ การแกว่งของค่าตัวแปรจะมากขึ้นเมื่อ  $K_c$  เพิ่มขึ้น หรือค่า  $\tau_i$  ลดลงเมื่อ  $K_c$  คงที่  
 ทั้งนี้เพราะเครื่องควบคุมแบบนี้เป็นการเพิ่มค่าลำดับของสมการการควบคุม

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

เครื่องควบคุมแบบนี้เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า proportional-plus-reset-plus-rate controller มีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณการควบคุมตามสมการ

$$C(t) = K_c \epsilon(t) + \frac{K_c}{\tau_i} \int_0^t \epsilon(t) dt + K_c \tau_d \frac{d\epsilon}{dt} + C_s \quad \dots(2.34)$$

เมื่อ  $\tau_d$  = derivative time constant (นาทีก)  
จากรูปสมการสามารถหาค่า transfer function ได้คือ

$$G_c(s) = K_c \left[ 1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right]$$

เครื่องควบคุมแบบนี้เป็นเครื่องควบคุมแบบคาดเดาเหตุการณ์ล่วงหน้า ช่วยลดค่าการแกว่งของตัวแปรที่เนื่องมาจากการควบคุมแบบ proportional integral ดังนั้นเครื่องควบคุมแบบนี้จึงเป็นเครื่องควบคุมที่ดีที่สุดเพราะไม่มีปัญหาเรื่องค่า offset และการแกว่งของค่าตัวแปรข้อคำนึงถึงของเครื่องควบคุมแบบนี้คือ

- ถ้าค่าความผิดพลาดมีค่าเท่ากันแต่ไม่เท่ากับศูนย์ จะไม่มีผลการควบคุมเนื่องจากเทอมของ derivative เพราะค่า  $d\epsilon/dt = 0$
- ถ้าการส่งสัญญาณมีความผิดพลาดไปจากค่าความเป็นจริงแล้วแม้ผิดพลาดไปเพียงเล็กน้อย แต่ค่าสัญญาณการควบคุมจะเปลี่ยนแปลงไปมากเกินไปกว่าที่ควรจะเป็น การควบคุมจึงผิดพลาดได้ง่าย

### 2.13 การหาค่าคงที่ของเครื่องควบคุม (31)

จากค่าคงที่ของกระบวนการในระบบที่หาได้จากการทดลองนั้นสามารถนำมาหาค่าคงที่ของเครื่องควบคุมที่จะใช้กับกระบวนการได้ ตามสมมติฐานของ Cohen และ Coon (31) สามารถหาค่าคงที่ของเครื่องควบคุมต่างๆ ได้ดังนี้



- เครื่องควบคุมแบบ Proportional หาค่าคงที่  $K_c$  ได้จากสมการ

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{t_d} \left[ \frac{1 + \frac{t_d}{\tau}}{3} \right] \quad \dots(2.35)$$

- เครื่องควบคุมแบบ Proportional Integral หาค่าคงที่  $K_c$  และ  $\tau_i$  ได้จากสมการ

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{t_d} \left[ \frac{0.9 + \frac{t_d}{\tau}}{12} \right] \quad \dots(2.36)$$

$$\tau_i = t_d \left[ \frac{30 + 3t_d/\tau}{9 + 20t_d/\tau} \right] \quad \dots(2.37)$$

- เครื่องควบคุมแบบ Proportional Integral Derivative หาค่าคงที่  $K_c$ ,  $\tau_i$  และ  $\tau_d$  ได้จากสมการ

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{t_d} \left[ \frac{4 + \frac{t_d}{\tau}}{3 - 4} \right] \quad \dots(2.38)$$

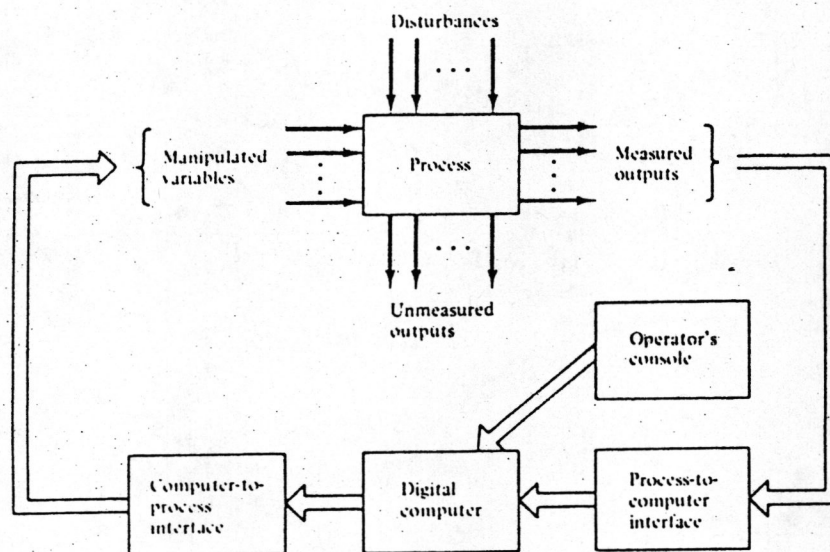
$$\tau_i = t_d \left[ \frac{32 + 6t_d/\tau}{13 + 8t_d/\tau} \right] \quad \dots(2.39)$$

$$\tau_d = t_d \left[ \frac{4}{11 + 2t_d/\tau} \right] \quad \dots(2.40)$$

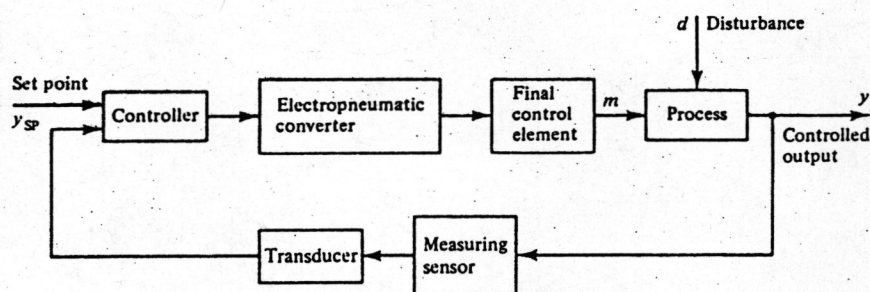
ค่าคงที่ของเครื่องควบคุมที่หาได้จะเหมาะสมกับกระบวนการที่หาเท่านั้น ซึ่งถ้าเป็นกระบวนการอื่นแล้วค่าคงที่ที่ใช้จะมีค่าต่างกันไปตามลักษณะของกระบวนการ

2.14 การควบคุมกระบวนการด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ (29,35)

เนื่องจากเทคโนโลยีพัฒนาไปอย่างรวดเร็วจึงได้มีการนำเอาไมโครคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมกระบวนการต่างๆ วงจรการทำงานของระบบที่ควบคุมด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 2.14 และ 2.15



รูปที่ 2.14 แผนภาพแสดงรูปแบบการควบคุมด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ (29)



รูปที่ 2.15 วงจรการควบคุมแบบป้อนกลับด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ (29)

องค์ประกอบของการควบคุมด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์มีองค์ประกอบเหมือนกับการควบคุมทั่วๆ ไปแต่ต่างกันว่าเครื่องควบคุม เพราะจะใช้เครื่องคอมพิวเตอร์แทนเครื่องควบคุมและเพิ่มส่วนของตัวขยายสัญญาณ (interface) เพื่อให้สัญญาณเหมาะสมกับเครื่องคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ที่ใช้ คอมพิวเตอร์สามารถแบ่งได้เป็นหลายประเภท ประเภทที่มีขนาดเล็กที่สุดเรียกว่า ไมโครคอมพิวเตอร์มีส่วนประกอบสำคัญ (36) คือ

- หน่วยรับข้อมูล (Input Unit) ทำหน้าที่รับข้อมูลและคำสั่งเข้าสู่หน่วยประมวลผลกลาง (CPU) หรือทำหน้าที่อ่านสื่อที่ส่งเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ เช่น เครื่องอ่านบัตร (Card Reader) เครื่องอ่านเทปแม่เหล็ก (Magnetic Reader) เครื่องอ่านแผ่นดิสเก็ต (Disk Drive) เป็นต้น

- หน่วยความจำ (Memory Unit) ทำหน้าที่เก็บข้อมูล คำสั่งและผลลัพธ์ที่ได้ หน่วยความจำหลักของคอมพิวเตอร์คือ RAM (Read Access Memory) และ ROM (Random Only Memory) ส่วนของ RAM จะสามารถบันทึกและอ่านข้อมูลก็ได้ แต่ส่วนของ ROM จะสามารถอ่านข้อมูลได้อย่างเดียวโดยใน ROM จะเก็บโปรแกรมถาวรไว้ เช่น มอนิเตอร์โปรแกรม โปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบ โปรแกรมใช้ในการบูสระบบในตอนแรก เป็นต้น

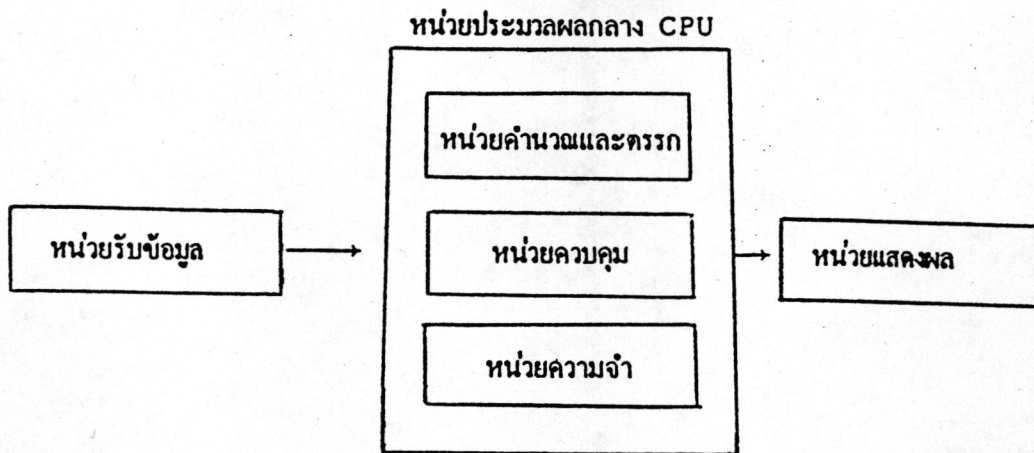
- หน่วยคำนวณและตรรก (เปรียบเทียบ) (Arithmetic and Logic Unit) ทำหน้าที่คำนวณและเปรียบเทียบค่าต่างๆ ที่ถูกป้อนเข้าสู่เครื่อง

- หน่วยควบคุม (Control Unit) ทำหน้าที่ควบคุมการปฏิบัติงานของหน่วยอื่น และสั่งงานหน่วยอื่นๆ ให้เป็นไปโดยเรียบร้อย

- หน่วยแสดงผลลัพธ์ (Output Unit) แสดงผลลัพธ์ หรือส่งข้อมูลออกจากหน่วยความจำอาจจะออกมาในรูปกระดาษ หรือเทปแม่เหล็ก หรือสื่อใดๆ ก็ได้ที่เราต้องการ

เรียกหน่วยความจำ หน่วยคำนวณ และหน่วยควบคุมทั้งสามหน่วยรวมกันว่า หน่วยประมวลผลกลาง หรือ ซีพียู (Central Processing Unit)

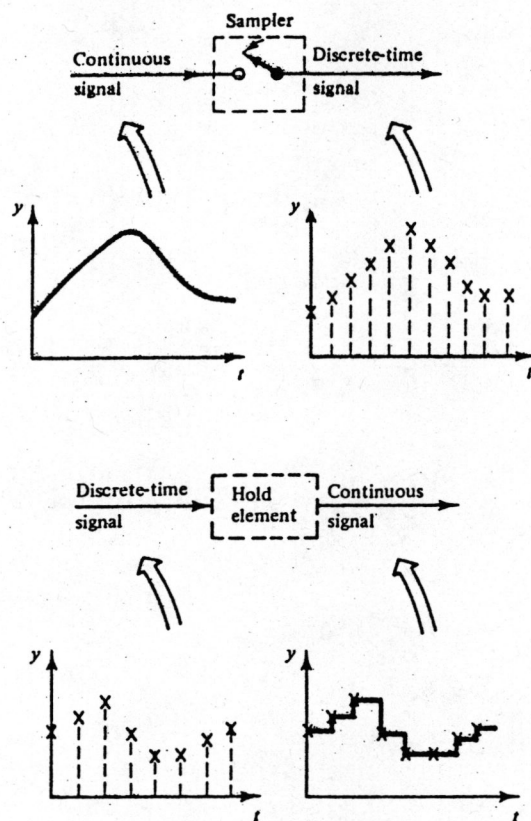
แผนผังองค์ประกอบของคอมพิวเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์ (36)

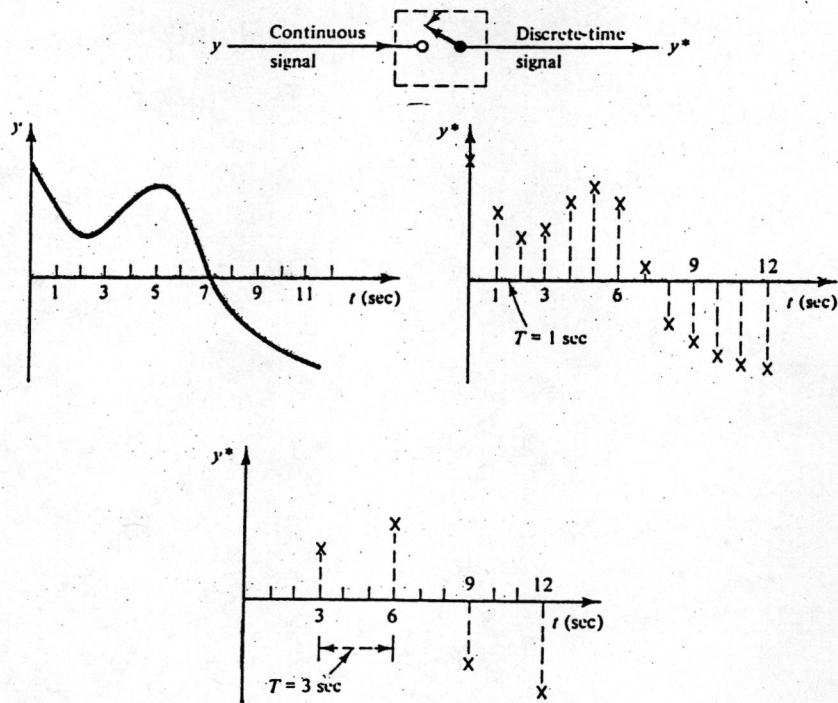
การควบคุมด้วยไมโครคอมพิวเตอร์นั้นจุดประสงค์สำคัญคือ ทำอย่างไรให้คอมพิวเตอร์สามารถควบคุมได้ตามที่ต้องการ ซึ่งการที่คอมพิวเตอร์จะทำงานอย่างไรนั้นขึ้นกับคำสั่งที่ผู้ใช้ป้อนเข้าไปนั่นคือ ส่วนของโปรแกรมซอฟต์แวร์ ดังนั้นคอมพิวเตอร์จะควบคุมกระบวนการได้ดีหรือไม่ขึ้นกับโปรแกรมซอฟต์แวร์ที่ใช้ การเขียนโปรแกรมสามารถเขียนเป็นภาษาของเครื่องคอมพิวเตอร์แบบใดก็ได้ แต่รูปแบบการทำงานของโปรแกรมจะเป็นไปตามรูปแบบของเครื่องควบคุมคือ มีการเปรียบเทียบค่าตัวแปรป้อนออกกับค่าที่กำหนดและไปควบคุมตัวแปรป้อนเข้าตามสมการความสัมพันธ์ของเครื่องควบคุมแต่ละชนิด เพื่อรักษาระบบให้อยู่ในสถานะคงที่ การใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมมีข้อดีคือ เราสามารถเขียนโปรแกรมซอฟต์แวร์ให้ทำงานแก้ไขข้อบกพร่องหรือปัญหาของเครื่องควบคุมได้อีกทั้งยังสามารถนำไปควบคุมกับกระบวนการอื่นๆ ได้โดยการเปลี่ยนค่าคงที่ของสมการความสัมพันธ์ที่ใช้

การควบคุมด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์นั้นมีการแปลงสัญญาณกลับไปกลับมาตามระบบของการประมวลผลของเครื่อง ทำให้สัญญาณที่ส่งเข้ามาขาดช่วงไป (37,38) คือ จากสัญญาณที่ส่งเข้ามาแบบต่อเนื่อง (continuous time signal) จะถูกเปลี่ยนเป็นแบบช่วงๆ (discrete-time signal) และสัญญาณที่ส่งออกจะถูกเปลี่ยนเป็นแบบต่อเนื่องอีกครั้งดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงการเปลี่ยนแปลงลักษณะของค่าสัญญาณ (29)

ดังนั้นช่วงเวลาที่นำค่าสัญญาณมาเปรียบเทียบจะต้องเป็นช่วงเวลาที่สัญญาณนั้นแทนลักษณะ  
 แนวโน้มของตัวแปรที่เกิดขึ้นจริง (38) คือ ไม่ดึงค่าสัญญาณมาเปรียบเทียบที่ระยะเวลาห่างเกินไป  
 เพราะจะทำให้ลักษณะแนวโน้มของตัวแปรเปลี่ยนไปจากความเป็นจริง หรือนำค่าสัญญาณเข้ามาที่  
 เกินไปทำให้มีการบันข้อมูลเกินความจำเป็น ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แนวโน้มของสัญญาณเมื่อเวลาในการชักตัวอย่างต่างกัน (29)

ช่วงเวลาที่เหมาะสมในการนำค่าสัญญาณมาเปรียบเทียบสำหรับระบบที่มีกระบวนการเป็นลำดับที่หนึ่งนั้น จะต้องมิต่ำน้อยกว่าค่าเวลาคงที่ของกระบวนการ (Process Time Constant,  $\tau_p$ ) คือ อยู่ในช่วง 0.1 - 0.2 เท่าของค่า  $\tau_p$

เนื่องจากลักษณะสัญญาณที่นำมาเปรียบเทียบเปลี่ยนไปทำให้สมการของกระบวนการและเครื่องควบคุมเปลี่ยนรูปไปดังนี้

- กระบวนการลำดับที่หนึ่ง มีค่า dead time เท่ากับ  $t_d$  โดยรูปแบบสมการในระบบสัญญาณแบบต่อเนื่อง คือ

$$dY/dt + Y = K_p m(t-t_d) \quad \dots(2.41)$$

เมื่อสัญญาณของระบบเปลี่ยนเป็นแบบช่วงๆ ให้  $t_d = kT$  สมการจะเปลี่ยนเป็น

$$Y_{n+1} = \left(1 - \frac{T}{\tau_p}\right) Y_n + \frac{K_p T}{\tau_p} m_{(n-k)} \quad \dots(2.42)$$

- เครื่องควบคุมแบบ P สมการการควบคุมเปลี่ยนเป็น

$$C_n = K_c \epsilon_n + C_s \quad \dots (2.43)$$

- เครื่องควบคุมแบบ PI สมการการควบคุมเปลี่ยนเป็น

$$C_n = K_c \epsilon_n + \frac{K_c T}{T_i} \sum_{k=0}^n k + C_s \quad \dots (2.44)$$

- เครื่องควบคุมแบบ PID สมการการควบคุมเปลี่ยนเป็น

$$C_n = K_c \epsilon_n + \frac{K_c T}{T_i} \sum_{k=0}^n k + \frac{K_c T_D}{T} (\epsilon_n - \epsilon_{n-1}) + C_s \quad \dots (2.45)$$

ส่วนค่า transfer function ของการควบคุมโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์จะไม่สามารถทำให้อยู่ในรูปของ Laplace transforms ได้ เนื่องจากค่าสัญญาณไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นค่า transfer function จึงแสดงอยู่ในรูปของ Zee-transform (38,40) ซึ่งสมการทั่วไปของระบบสัญญาณเข้าออกแบบเป็นช่วงเวลานี้ คือ

$$C_n = a_0 \epsilon_n + a_1 \epsilon_{n-1} + \dots + a_k \epsilon_{n-k} + b_1 C_{n-1} + b_2 C_{n-2} + \dots + b_m C_{n-m} \quad \dots (2.46)$$

เมื่อทำให้อยู่ในรูปของ Zee-transform จะได้ค่า transfer function คือ

$$D(z) = \frac{C(z)}{\epsilon(z)} = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_k z^{-k}}{1 - b_1 z^{-1} - b_2 z^{-2} - \dots - b_m z^{-m}} \quad \dots (2.47)$$

ส่วนค่า transfer function ของเครื่องควบคุมที่สัญญาณการส่งมีลักษณะเป็นช่วงๆ คือ

- เครื่องควบคุมแบบ P

$$D(z) = K_c \quad \dots(2.48)$$

- เครื่องควบคุมแบบ PI

$$D(z) = K_c \left[ 1 + \frac{T}{\tau_i} \frac{1}{1-z^{-1}} \right] \quad \dots(2.49)$$

- เครื่องควบคุมแบบ PID

$$D(z) = K_c \left[ 1 + \frac{T}{\tau_i} \frac{1}{1-z^{-1}} + \frac{\tau_d}{T} \frac{1-2z^{-1}+z^{-2}}{1-z^{-1}} \right] \quad \dots(2.50)$$

การควบคุมกระบวนการด้วยคอมพิวเตอร์นั้นมีข้อดีคือ สามารถเขียนโปรแกรมให้ควบคุมกระบวนการได้ตามความต้องการ ซึ่งสามารถเพิ่มเติมและแก้ไขส่วนที่บกพร่องของเครื่องควบคุมได้ อีกทั้งยังให้ความรวดเร็ว ถูกต้องและแม่นยำอีกด้วย ดังนั้นการควบคุมด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์จึงเป็นการควบคุมที่น่าจะนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมกระบวนการต่างๆ มากยิ่งขึ้น