บทที่ 4

การควบคุมแบบเจเนริกโมเดลหรือตัวควบคุมจีเอ็มซี
(Generic Model Control or GMC-Controller)

การควบคุมแบบเจเนริกโมเดลเป็นการควบคุมแบบใช้โมเดลในการคำนวนหาค่าตัวแปรปรับ โดยแบบจำลองที่ใช้ในการควบคุมนั้นจะเป็นแบบจำลองเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นก็ได้ นอกจากนี้ยังสามารถปรับจูนค่าพารามิเตอร์เพียง 2 ค่าเท่านั้นเพื่อให้ได้ผลการตอบสนองของระบบที่เราต้องการ

อาจกล่าวได้ว่าจีเอ็มซีเป็นตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้น เนื่องจากสามารถใช้แบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นในตัวควบคุมได้โดยตรงเพื่อจะกำหนดผลการตอบสนองที่ต้องการ ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้จึงไม่ต้องทำให้เป็นเชิงเส้นก่อน แต่ข้อจำกัดในการใช้ตัวควบคุมแบบนี้คือระบบต้องมีความเป็นเชิงเส้นในตัวแปรปรับ (Linear in control) หรือระดับกำลังหนึ่งบนตัวแปรปรับ (relative degree one)
สิ่งที่ต้องการในการออกแบบตัวควบคุมจีเอ็มซี คือ

1) แบบจำลองของกระบวนการและพารามิเตอร์
2) การวัดค่าตัวแปรที่ต้องการควบคุม

4.1 อัลกอริธึมของจีเอ็มซี (GMC Algorithm)

แบบจำลองของระบบจะอยู่ในรูป

$$\frac{dx}{dt} = F(x,u,t) \qquad \text{.....4.1}$$

$$Y = H(x) \qquad \text{.....4.2}$$

เลือกตัวแปรปรับ "u" และกำหนดให้

$$Y' = K_1\varepsilon(t) + \int_0^{t_f} K_2\varepsilon(t)dt \qquad \text{.....4.3}$$

โดยที่ $\varepsilon = (Y^{sp} - Y)$

และ Y^{sp} เป็นเอาท์พุทที่ต้องการ

จากสมการ (4.2) ทำการหาอนุพันธ์ $Y' = \frac{\partial H(x)}{\partial x}.\frac{\partial x}{\partial t}$

$$Y' = \frac{\partial H(x)}{\partial x}.F(x,u,t)$$

ดังนั้นสามารถกำหนดให้

$$K_1\varepsilon(t) + \int_0^{t_f} K_2\varepsilon(t)dt = \frac{\partial H(x)}{\partial x}.F(x,u,t) \qquad \text{.....4.4}$$

สำหรับระบบที่ไม่เชิงเส้นที่เป็นเชิงเส้นที่ตัวแปรปรับ (u) สามารถจัดให้อยู่ในรูปเชิงเส้นได้ดังนี้

$$F(x,u,t) = F(x) + G(x)U$$

จากสมการ (4.4) ได้

$$K_1\varepsilon(t) + \int_0^{t_f} K_2\varepsilon(t)dt = \frac{\partial H(x)}{\partial x}.\left[F(x) + G(x)U\right]$$

โดยในกระบวนการในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ $\frac{\partial H(x)}{\partial x}$=1

ในที่สุดจะได้

$$K_1\varepsilon(t) + \int_0^{t_f} K_2\varepsilon(t)dt = \left[F(x) + G(x)U\right]$$

จัดสมการใหม่หาค่า U จะได้สมการสำหรับใช้ในการควบคุมแบบจีเอ็มซีดังนี้

$$U = \frac{K_1\varepsilon(t) + \int_0^{t_f} K_2\varepsilon(t)dt - F(x)}{G(x)} \qquad \text{.....4.5}$$

การทำอิมพลีเมนต์ (implement) ต้องอยู่ในสูตรรูปดิสครีต (discrete formulation)

$$U(k) = \frac{K_1(Y^{sp} - Y(k)) + \sum_{k=0}^{k} K_2(Y^{sp} - Y(k))\Delta t - F(x)}{G(x)} \qquad \text{.....4.6}$$

โดยที่ K_1, K_2 = ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องถูกปรับจูน

ตัวอย่าง 4.1 สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (CSTR) สมการอนุรักษ์มวลและพลังงานสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{dx}{dt} = x_1' = \beta\phi x_2 \exp\left(\frac{x_1}{1+\frac{x_1}{\gamma}}\right) - (q+\delta)x_1 + v + u \qquad \text{.....4.7}$$

$$\frac{dx_2}{dt} = x_2' = -\phi x_2 \exp\left(\frac{x_1}{1+\frac{x_1}{\gamma}}\right) + q(1-x_2) \qquad \text{.....4.8}$$

เนื่องจากค่าตัวแปรปรับ (u) ไม่ปรากฏอยู่ในสมการที่ 4.7 ดังนั้นการควบคุมแบบจีเอ็มซีจึงไม่สามารถประยุกต์ใช้กับการควบคุม x_2 ได้เนื่องจากไม่เป็นเชิงเส้นในตัวแปรปรับ

ดังนั้นเราสามารถที่จะควบคุม x_1 ได้เพราะสมการที่ 4.6 มีตัวแปรปรับ (u) ที่มีความเป็นเชิงเส้น ดังนี้

กำหนดให้ $Y = x_1$

และจากอัลกอริทึมของจีเอ็มซีในสมการที่ 4.5 จะได้

$$Y' = x_1' = \beta\phi x_2 \exp\left(\frac{x_1}{1+\frac{x_1}{\gamma}}\right) - (q+\delta)x_1 + v + u \qquad \text{.....4.9}$$

จัดสมการใหม่หาค่าตัวแปรปรับ (u) จะได้

$$u = Y' - \beta\phi x_2 \exp\left(\frac{x_1}{1+\frac{x_1}{\gamma}}\right) + (q+\delta)x_1 - v \qquad \text{.....4.10}$$

โดยที่กำหนดให้

$$Y' = K_1(x_1^{sp} - x_1) + \int_0^{t_f} K_2(x_1^{sp} - x_1)dt \qquad \text{.....4.11}$$

ดังนั้นแทนสมการที่ 4.11 ลงในสมการที่ 4.10 จะได้

$$u = K_1(x_1^{sp} - x_1) + \int_0^{t_f}(x_1^{sp} - x_1) - \beta\phi x_2 \exp\left(\frac{x_1}{1+\frac{x_1}{\gamma}}\right) + (q+\delta)x_1 - \nu \quad \text{.....4.12}$$

สมการที่ 4.12 เป็นตัวควบคุมจีเอ็มซีที่ใช้ควบคุมกระบวนการข้างบนนี้ แต่ก่อนการนำตัวควบคุมจีเอ็มซีไปใช้ควบคุมกระบวนการจำเป็นต้องตรวจสอบสองประการคือ

1. ความเป็นเชิงเส้นในตัวแปรปรับ u (linear in control)

2. ซีโรส์ไดนามิกส์ (zeros dynamics) หมายถึงอินเตอร์นอลไดนามิกส์ (internal dynamics) ในสภาวะที่ตัวแปรควบคุมถูกควบคุมให้อยู่ในตำแหน่งเซ็ทพอยท์ที่ต้องการ นั่นคือตัวแปรควบคุมมีค่าเท่ากับศูนย์ในรูปของตัวแปรเบี่ยงเบนหรือมีค่าเท่ากับค่าใดค่าหนึ่งในตัวแปรที่อยู่ในรูปธรรมดา ซึ่งจะบอกว่ากระบวนการที่ถูกควบคุมมีเสถียรภาพหรือไม่ เมื่อตัวแปรควบคุมถูกควบคุมโดยตัวควบคุมให้อยู่ที่ค่าเซ็ทพอยท์ที่ต้องการ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากการใช้สมการใดๆจากแบบจำลองของกระบวนการที่นอกเหนือจากสมการที่การควบคุมแบบจีเอ็มซีนำไปใช้ ดังนี้

จากตัวอย่างเมื่อควบคุม x_1

ดังนั้นอินเตอร์นอลไดนามิกส์คือสมการที่ 4.8

$$x_2' = -\phi x_2 \exp\left(\frac{x_1}{1+\frac{x_1}{\gamma}}\right) + q(1-x_2)$$

ที่ซีโรส์ไดนามิกส์นั่นคือที่ $x_1 = 0$ จะได้

$$x_2' = -\phi x_2 + q(1-x_2)$$

หรือ

$$x_2' = -(\phi+q)x_2 + q \text{ หรือ } \frac{dx_2}{dt} = -(\phi+q)x_2 + q \quad \text{.....4.13}$$

ที่ $x_2 = x_2(k) - x_2^{ss}$

อินทริเกรทสมการอนุพันธ์เพื่อหาค่า x_2

กำหนดให้ $x_3 = -(\phi+q)x_2 + q$ 4.14

จาก $$x_3' = \frac{\partial x_3}{\partial x_2}\frac{\partial x_2}{\partial t} = -(\phi + q)x_2' = -(\phi + q)x_3$$

$$\frac{dx_3}{x_3} = -(\phi + q)dt$$

$$\ln x_3 = -(\phi + q)dt$$

$$x_3 = e^{-(\phi+q)t} \qquad \text{.....4.15}$$

แทนสมการที่ 4.15ลงในสมการที่ 4.14จะได้

$$x_2 = \frac{e^{-(\phi+q)t} - q}{-(\phi + q)}$$

และ $$x_2(\infty) = \frac{q}{\phi + q}$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่า x_2 มีค่าลดลงเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าในการใช้ตัวควบคุมแบบจีเอ็มซีจะสามารถทำการควบคุมตัวแปรควบคุม x_1 ให้อยู่ที่ค่าเซ็ทพอยท์ที่ต้องการ โดยที่กระบวนการนี้จะมีเสถียรภาพนั่นคือค่าเอาท์พุทอื่นๆจะเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง

ความทนทานของตัวควบคุมจีเอ็มซี (Robustness)

- การควบคุมแบบจีเอ็มซีสามารถรับประกันความมีเสถียรภาพของระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงได้เป็นส่วนใหญ่
- การควบคุมแบบจีเอ็มซีสามารถใช้กับระบบที่มีความผิดพลาดในแพลนต์และแบบจำลอง (plant/model mismatch) อาจจะได้หรือไม่ได้แล้วแต่กรณี

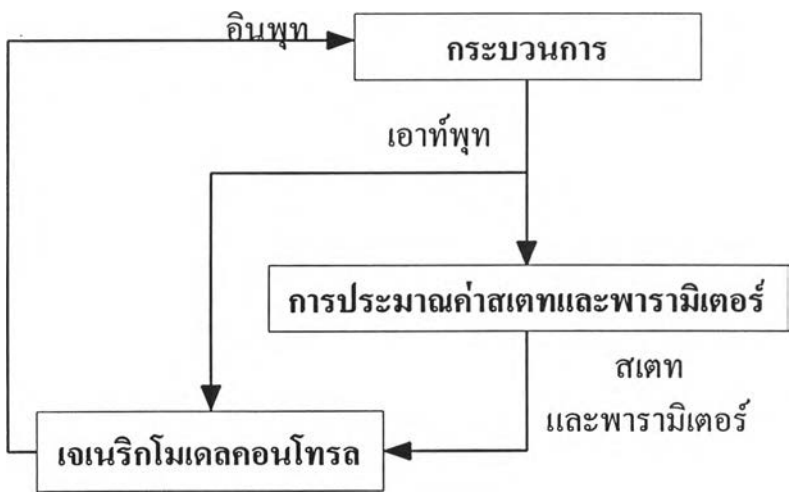
เนื่องจากการควบคุมแบบจีเอ็มซีเป็นการควบคุมที่ขึ้นกับแบบจำลองของกระบวนการ เพราะฉะนั้น ในการคำนวณค่าตัวแปรปรับเพื่อควบคุมตัวแปรควบคุมให้อยู่ที่ค่าที่ต้องการนั้น ค่าตัวแปรอื่นๆ รวมทั้งพารามิเตอร์ของกระบวนการมีส่วนเกี่ยวข้องด้วย ดังนั้น เมื่อค่าตัวแปรอื่นๆ ผิดพลาด หรือค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้แตกต่างไปจากกระบวนการจริง จะทำให้การคำนวณค่าตัวแปรปรับไม่เหมาะสม ทำให้การควบคุมไม่ได้ดังที่ต้องการ ในบางกรณีถ้าไม่สามารถวัดค่าตัวแปรสเตทได้จะทำให้ไม่สามารถประยุกต์ใช้การควบคุมแบบจีเอ็มซีได้ซึ่งการแก้ไข คือใช้การ

ประเมินค่าตัวแปรสเตทหรือพารามิเตอร์ เข้ามาช่วยประเมินค่าพารามิเตอร์ที่ไม่แน่นอนรวมทั้งตัวแปรสเตทที่วัดค่าไม่ได้

4.2 การควบคุมแบบเจเนริกโมเดลร่วมกับตัวประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์

(GMC with State and Parameter Estimator)

เป็นการควบคุมแบบจีเอ็มซีที่มีการนำเอาตัวประมาณค่าเข้ามาช่วยประมาณค่าสเตทหรือพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าหรือไม่รู้ค่าที่แท้จริง (ดังในรูปที่ 4.1)



รูปที่ 4.1 แสดงการควบคุมแบบเจเนริกโมเดลร่วมกับการประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์

จะเห็นได้ว่า ค่าเอาท์พุทของกระบวนการที่วัดค่าได้จะนำมาใช้ในการประมาณค่าสเตทหรือพารามิเตอร์โดยใช้ตัวประมาณค่าอย่างเช่น คาลมานฟิลเตอร์ หรือ ตัวประมาณค่าออนไลน์(On-line Estimator) ซึ่งค่าสเตทและพารามิเตอร์ที่ได้จากการประมาณจะส่งเข้าตัวควบคุมจีเอ็มซีเพื่อทำการคำนวณค่าตัวแปรปรับต่อไป ดังนั้นตัวประมาณค่าจะมีบทบาทอย่างมากต่อประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบจีเอ็มซี ถ้าตัวประเมินค่าให้ผลการประมาณที่ดีตัวควบคุมจีเอ็มซีจะสามารถคำนวณค่าตัวแปรปรับได้อย่างถูกต้องเหมาะสม ทำให้สามารถควบคุมตัวแปรควบคุมให้อยู่ที่ค่าที่ต้องการได้ โดยมีค่าออฟเซ็ตน้อยหรือไม่มีเลย

ความทนทาน(Robustness)

- การควบคุมแบบจีเอ็มซีที่มีการประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์สามารถรับประกันความมีเสถียรภาพของระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงได้และสามารถใช้ได้ในช่วงที่กว้าง
- การควบคุมแบบจีเอ็มซีที่มีการประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์สามารถจัดการกับระบบที่มีความผิดพลาดของกระบวนการและแบบจำลอง (plant/model mismatch) ได้

4.3 การปรับจูนค่าพารามิเตอร์

ดังสมการที่ 4.5 และ 4.6 ค่า K_1, K_2 เป็นค่าพารามิเตอร์ที่จะต้องทำการปรับจูน โดยที่สามารถเลือกรูปร่างของผลการตอบสนองที่ต้องการได้ ดังนี้

กำหนดให้ $K_1 = \frac{2\xi}{\tau}$ 4.16

และ $K_2 = \frac{1}{\tau^2}$ 4.17

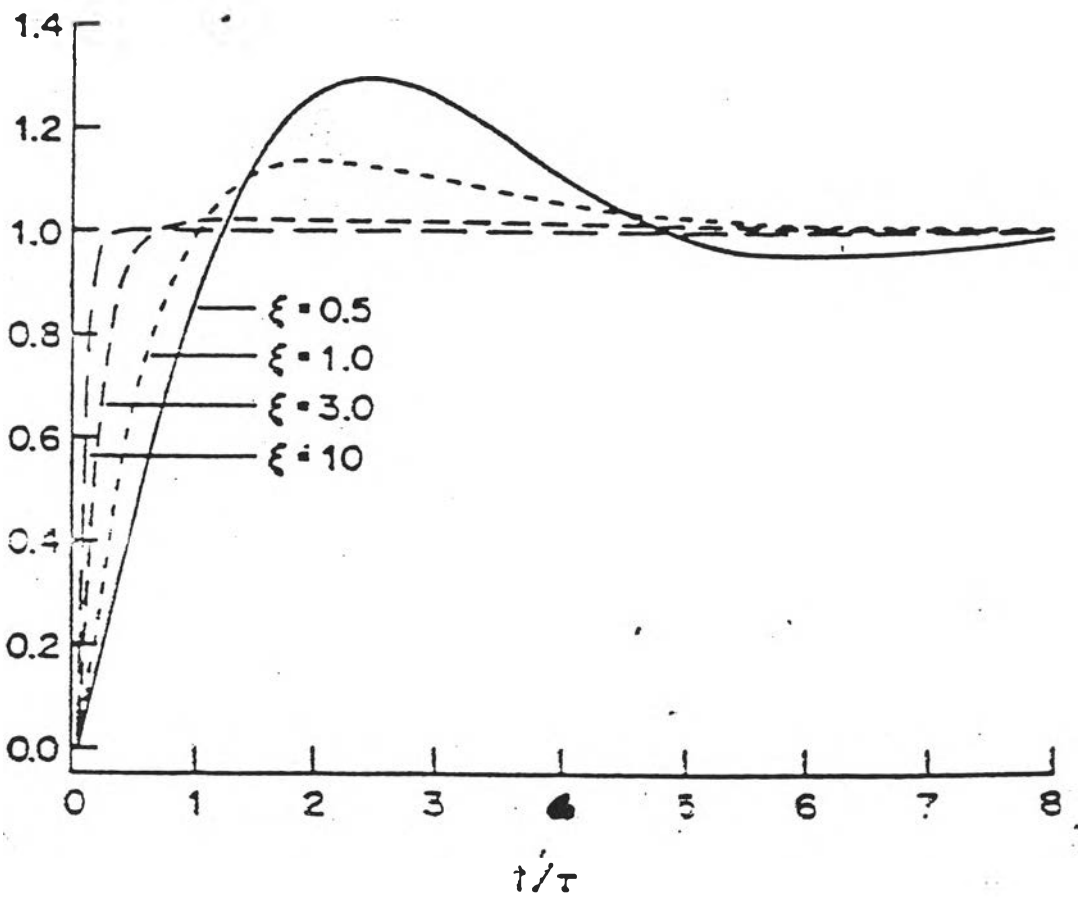
ซึ่งค่า ξ และ τ สามารถหาได้จากรูปที่ 4.2

หลักการปรับค่าตัวแปรปรับเพื่อให้ได้ผลการตอบสนองตามที่ต้องการ

1.) เลือก ξ จากรูปเพื่อให้ได้ผลการตอบสนองที่ต้องการ

2.) เลือก τ จากรูปเพื่อให้ได้จังหวะเวลาที่เหมาะสมที่สอดคล้องกับความเร็วของผลการตอบสนองของกระบวนการ

3.) คำนวนหาค่า K_1 และ K_2 จากสมการที่ 4.16 และ 4.17



รูปที่ 4.2 ผลการตอบสนองมาตรฐานเพื่อใช้ในการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจีเอ็มซี

<u>ตัวอย่าง</u> 4.2 **ถ้าต้องการให้ผลการตอบสนองเข้าสู่เซ็ทพอยท์ที่เวลา 20 นาที โดยเลือกรูปร่างของผลการตอบสนองที่มี** $\xi = 10, \tau = ?$

จากรูปที่ 4.2 $\frac{t}{\tau} = 0.25 \rightarrow \frac{20}{\tau} 0.25 \rightarrow \therefore \tau = 80$ **นาที**

ดังนั้น $K_1 = \frac{2\xi}{\tau} = \frac{2 \times 10}{80} = \frac{1}{4} = 0.25$

$K_2 = \frac{1}{\tau^2} = \frac{1}{80^2} = 1.5625^{-04}$

4.4. การประยุกต์ใช้การควบคุมแบบเจเนริกโมเดล (Generic Model Control Application)

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์แบทช์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนนั้น ส่วนมากมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นสูงและการดำเนินงานของระบบอาจเข้าสู่จุดที่ระบบไม่มีเสถียรภาพ ดังที่กล่าวมาบ้างแล้วในบทที่ 1 ดังนั้นจึงมีความต้องการเทคนิคการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ที่มีความทนทานและสามารถประยุกต์ใช้งานจริงได้

Cott and Marcheitto,1989 ได้ใช้ตัวควบคุมจีเอ็มซีในการควบคุมอุณหภูมิของปฏิกริยาคายความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบทช์ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ

$$A + B \rightarrow C$$
$$A + C \rightarrow D \qquad \text{.....4.18}$$

โดยเป้าหมายของการควบคุมคือให้ความร้อนกับเครื่องปฏิกรณ์เคมีเพื่อเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิเซ็ทพอยต์ที่กำหนดไว้และควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ไว้ที่ค่านี้ รายละเอียดของปฏิกิริยาและสภาวะที่เหมาะสมรวมถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆดูได้จากบทที่ 1 หัวข้อ 1.1-2.1

โดยที่จีเอ็มซีอัลกอริทึมของตัวควบคุมนี้ถูกกำหนดเป็นสูตรโดยการหาคำตอบของสมการสมดุลพลังงานรอบเครื่องปฏิกรณ์ จากสมการที่ 4.3 และ 2.34p สามารถเขียนสมการของตัวควบคุมจีเอ็มซีในรูปดิสครีตได้ดังนี้

$$T_J(k) = T_r(k) + \frac{W_r Cp_r}{UA}\left\{K_1\left(T_{rsp} - T_r(k)\right) + K_2\sum_0^k\left(T_{rsp} - T_r(k)\right)\Delta t\right\} - \frac{Q_r(k)}{UA} \qquad \text{.....4.18}$$

สมการที่ 4.18 นี้ใช้เป็นสมการของตัวควบคุมจีเอ็มซี โดยที่ $T_J(k)$ เป็นอุณหภูมิของแจ๊กเก็ตที่เป็นตัวแปรปรับให้อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เคมี T_r จะเข้าสู่อุณหภูมิเซ็ทพอยท์ที่ต้องการ ซึ่งหามาได้จากค่าคงที่ในการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจีเอ็มซี คือ K_1 และ K_2

แต่เนื่องจาก $T_J(k)$ ไม่ใช่อุณหภูมิเซ็ทพอยท์ของแจ๊กเก็ตแต่เป็นอุณหภูมิทั่วไปของแจ๊กแก็ต การหาอุณหภูมิเซ็ทพอยท์ของแจ๊กเก็ตสามารถหาได้ โดยการกำหนดให้แบบจำลองพลวัตของแจ๊กเก็ตเป็นแบบจำลองอันดับหนึ่ง ซึ่งเราใช้วิธีเชิงตัวเลขแทนสมการอนุพันธ์ ดังนี้

$$T_J(k) = T_J(k+1) + \frac{\Delta t\left(T_{Jsp}(k) - T_J(k-1)\right)}{\tau_J} \qquad \text{.....4.19}$$

เมื่อ τ_J เป็นค่าคงที่เวลาของแจ๊กเก็ตที่ถูกประมาณขึ้น จากสมการนี้สามารถหาอุณหภูมิเซ็ทพอยท์ที่ต้องการของแจ๊กเก็ตได้ ดังนี้

$$T_{Jsp}(k) = T_J(k-1) + \frac{\tau_J\left(T_J(k) - T_J(k-1)\right)}{\Delta t} \qquad \text{.....4.20}$$

จากสมการที่ 4.18 และ 4.20 จะให้ค่าอุณหภูมิเซ็ทพอยท์ทั่วไปของแจ๊กเก็ตของตัวควบคุมที่จะถูกใช้ในการควบคุมเวลาต่อไป

4.4-1. การประมาณค่าความร้อนที่ปล่อยออกมาสำหรับตัวควบคุมจีเอ็มซี(GMC)

การประยุกต์การควบคุมแบบจีเอ็มซีมาใช้กับอุตสาหกรรมทั่วไปนั้นเนื่องจากตัวแปรสเตทหรือพารามิเตอร์บางตัวไม่สามารถวัดได้หรือมีความถูกต้องไม่เพียงพอที่จะนำไปใช้ควบคุมได้ ดังนั้นจึงนำเทคนิคการประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์(State and Parameter Estimation) มาใช้ควบคู่กับการควบคุมแบบจีเอ็มซี ซึ่งการควบคุมแบบจีเอ็มซีนี้ต่างจากการควบคุมที่ใช้โมเดล (Model-based control) อื่นตรงที่การควบคุมแบบจีเอ็มซีนั้นต้องการการวัดและการประมาณค่าตัวแปรสเตทและพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ซึ่งในการวัดนั้นเป็นไปได้บ่อยครั้งที่จะมีปริมาณของการรบกวนแบบสุ่ม(Random noise) และค่าที่ผิดพลาดของระบบอยู่

ความสำเร็จของการประยุกต์การควบคุมแบบจีเอ็มซีในการควบคุมอณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์นั้นขึ้นอยู่กับความสามารถในการวัด และการประมาณค่าความร้อนที่ปล่อยออกจากปฏิกิริยาทุกๆคาบเวลา ซึ่ง Juba and Hamar ได้อธิบายเทคนิคที่สำคัญในการประมาณค่าความร้อนที่ปล่อยออกมาไว้ดังนี้

1. ใช้รายละเอียดโดยตรงของแบบจำลองทางจลศาสตร์เคมี
2. การกำหนดสมดุลพลังงานอย่างแน่ชัด
3. ใช้การสังเกตุ และทดลองในการประมาณค่าความร้อนที่ปล่อยออกมา

เนื่องจากระบบของปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมที่สนใจส่วนมาก การใช้แบบจำลองทางจลศาสตร์เคมีในการประมาณค่าความร้อนที่ปล่อยออกมานั้นไม่สามารถพอที่จะทำงานได้ดี เพราะขาด

แบบจำลองทางจลศาสตร์ที่ดี เนื่องจากปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว หรือช้าเกินกว่าที่จะมีเวลาศึกษาได้ ทำให้การหาแบบจำลองทางจลศาสตร์ที่ดีนั้นจำต้องมีค่าใช้จ่ายที่สูง

ส่วนปัญหาที่เกิดขึ้นในการกำหนดสมดุลพลังงานที่พบบ่อยๆนั้น เป็นสมมุติฐานที่กำหนดให้ความร้อนที่ผนังของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าน้อย แต่ถ้าค่าความจุความร้อนของผนังเครื่องปกิกรณ์มีค่าไม่น้อยพอที่จะละเลยได้ จะทำให้จำนวนพารามิเตอร์ของกระบวนการเพิ่มขึ้นทำให้การประมาณค่าความร้อนทั้งหมดที่ปล่อยออกมาทำได้ยาก

4.4-2. การประยุกต์ใช้การควบคุมแบบเจเนริกโมเดลร่วมกับตัวประมาณค่าความร้อนออนไลน์ (Generic Model Control and on-line Estrimator Application)

ส่วนในงานของ **Cott and Marcheitto,1989** ใช้วิธีการประมาณค่าความร้อนที่ปล่อยออกมาของ **Villier และ Bonvin,1989** โดยกำหนดสมการสมดุลพลังงานรอบๆเครื่องปฏิกรณ์ โดยจะเลือกประมาณค่าค่าความร้อนในเทอม $\frac{Q_r}{UA}$ เพื่อทำให้ปัญหาของพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าน้อยลง โดยการรวมพารามิเตอร์ทีไม่ทราบค่าเหล่านี้ไว้ในกลุ่มเดียว คือ $\frac{W_r Cp_r}{UA}$ ดังสมการนี้

$$\frac{Q_r}{UA} = \frac{W_r Cp_r}{UA}\frac{dT_r}{dt} + T_r - T_j \qquad \text{.....4.21}$$

ถึงแม้ว่าอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ T_r และอุณหภูมิของน้ำในแจ็กเก็ต T_J สามารถวัดได้โดยตรง แต่เนื่องจากเทอมอนุพันธ์ของ T_r ต้องถูกประมาณค่าออกมาจากวิธีอนุพันธ์เชิงตัวเลข (Numerical Differential Methode) ซึ่งมีความว่องไวต่อความผิดพลาดจากการวัดมาก แต่สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการใช้สมการความแตกต่างอันดับสูงๆ (High-order Difference) ซึ่งจะใช้สมการความแตกต่างอันดับสามเทอมของเจนนิ่ง (Tree-Term Difference eq^n, jenning,1964) และตัวกรองเอกซ์โปรแนนเชียลกับค่าคงที่เวลา 1 นาที บนทั้งคู่ของการวัดอุณหภูมิและการประเมินค่า Q/UA ดังนี้

$$T_{rf}(k) = T_{rf}(k-1) + \frac{\Delta t\left(T_{rm} - T_{rf}(k-1)\right)}{\tau_f} \qquad \text{.....4.22}$$

$$T_{Jf}(k) = T_{Jf}(k-1) + \frac{\Delta t\left(T_J - T_{Jf}(k-1)\right)}{\tau_f} \qquad \text{.....4.23}$$

$$\frac{\Delta T_{rf}(k)}{\Delta t} = \frac{3T_{rf}(k) - 4T_{rf}(k-1) + T_{rf}(k-2)}{2\Delta t} \qquad \text{.....4.24}$$

$$\left(\frac{Q_{re}}{UA}\right)^{(k)} = \frac{W_r Cp_r}{UA}\frac{\Delta T_{rf}^{(k)}}{\Delta t} + T_{rf}^{(k)} - T_{Jf}^{(k)} \qquad \text{.....4.25}$$

$$\left(\frac{Qre}{UA}\right)_f^{(k)} = \left(\frac{Qre}{UA}\right)_f^{(k-1)} + \frac{\Delta t\left(\left(\frac{Qre}{UA}\right)^{(k)} - \left(\frac{Qre}{UA}\right)_f^{(k-1)}\right)}{\tau_j} \qquad \text{.....4.26}$$

ซึ่งสัสคริป f ชี้ให้เห็นถึงค่าที่ถูกกรองของ T_r, T_J และ $\frac{Q_{re}}{UA}$

ขั้นตอนการประมาณค่าความร้อนที่ปล่อยออกมาจากปฏิกิริยาที่อธิบายในสมการ 4.22 ถึง 4.26 นี้ สามารถประยุกต์ใช้ได้กับปฏิกิริยาหรือเครื่องปฏิกรณ์แบบใดก็ได้ โดยการเปลี่ยนพารามิเตอร์ W_r, Cp_r, U และ A ที่มีผลกระทบกับระบบนั้น นอกจากนี้การทำให้การประมาณค่าง่ายขึ้นสามารถทำได้ ยกตัวอย่าง เช่น เมื่อรู้รูปร่างของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ และความหนาแน่นของส่วนผสมของปฏิกิริยา ดังนั้นสามารถพัฒนาความสัมพันธ์ระหว่าง W และ A ได้

ถ้ารูปร่างของเครื่องปฏิกรณ์เป็นทรงกระบอกความสัมพันธ์ของ W และ A ถูกหาได้ดังนี้

$$\frac{W_r}{A} = \frac{r^2 h\rho\pi}{2rh\pi} = \frac{r\rho}{2} \qquad \text{.....4.27}$$

เมื่อ h คือ ความสูงของส่วนผสมของปฏิกิริยา

ดังนั้นความสัมพันธ์ของ $\frac{W_r Cp_r}{UA}$ สำหรับกรณีนี้สามารถถูกแปลงเป็น

$$\frac{W_r Cp_r}{UA} = \frac{Cp_r \rho r}{2U} \qquad \text{.....4.28}$$

สำหรับการกำหนดเงื่อนไขของค่า $\frac{W_r Cp_r}{UA}$ เพื่อถูกใช้ในการประมาณค่าความร้อนและการควบคุมอุณหภูมิขึ้นกับว่า ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้เปลี่ยนแปลงความสำคัญเหนือทางเดินของปฏิกิริยานั้นหรือไม่ ถ้าพารามิเตอร์เหล่านี้เปลี่ยนแปลงเล็กนอ้ยมาก $\frac{W_r Cp_r}{UA}$ อาจถูกหาได้ง่ายโดยแสดงลูพเปิด ด้วยการเปลี่ยนอุณหภูมิของแจ๊กเก็ตเซ็ทพอยท์และการป้อนน้ำเย็นที่อุณหภูมิต่ำนี้แสดงว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นศูนย์แสดงว่าไม่มีความร้อนเกิดขึ้น ดังนั้น $\frac{W_r Cp_r}{UA}$ เป็นค่าคงที่เวลาของระบบถ้าพารามิเตอร์เหล่านี้มีความสำคัญของการเปลี่ยนแปลงอยู่เหนือทางเดินของปฏิกิริยา

ดังนั้นการทดสอบอาจจะต้องแสดงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของพารามิเตอร์เหล่านี้ในเทอม $\frac{W_r Cp_r}{UA}$ ด้วย

ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้จากการจำลองในคอมพิวเตอร์ของ Cott and Marcheitto,1989 ในการประมาณค่าความร้อนที่ออกจากปฏิกิริยา และผลการตอบของตัวควบคุมจีเอ็มซีที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิของปฏิกิริยาคายความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบทซ์ของพวกเขา ปรากฏว่าสมรรถนะของตัวควบคุมจีเอ็มซีกับตัวประมาณค่าความร้อนออนไลน์ดีกว่าการควบคุมดูออลโมด โดยตัวควบคุมดูออลโมดใช้ลูพเปิดในการขึ้นอุณหภูมิและใช้ตัวควบคุมป้อนกลับแบบพีไอดีในการรักษาอุณหภูมิให้คงที่อยู่ที่เซ็ทพอยท์ โดยตัวควบคุมจีเอ็มซีสามารถกำหนดผลการตอบสนองให้เข้าสู่เซ็ทพอยท์โดยปราศจากการเกิดโอเวอชูตและการฉีกขาดทั้งในกรณีที่สภาวะการดำเนินการปกติและในกรณีที่มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์และโมเดล

4.4-3. การประยุกต์ใช้การควบคุมแบบเจเนริกโมเดลร่วมกับเอกซ์เทนด์คาลมานฟิลเตอร์ (Gerneric Model Control With Extended Kalman Filter)

P. Kittisupakorn,1992 ได้สร้างแบบจำลองอย่างง่ายๆโดยตั้งอยู่บนพื้นฐานทางจลศาสตร์เคมีในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบทซ์เพื่อใช้ในการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา (Q_{re}) โดยสมมติว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาเชิงเดี่ยว (Single Chemical Reaction) ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาแปรผันกับมวลรวมของสารทั้งหมด (M_r) และอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ในลักษณะที่เป็นไบลิเนี่ย (bilinear) ดังต่อไปนี้

$$\frac{dM_r}{dt} = R = b * M_r * T_{rm} \qquad \text{.....4.29}$$

โดยที่ b = ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา

และค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยามีค่าประมาณดังสมการดังต่อไปนี้

$$Q_{re} = R(-\Delta H) = -b * M_r * T_{rm} * (\Delta H) \qquad \text{.....4.30}$$

โดยที่ ΔH = ความร้อนของปฏิกิริยา

กำหนดให้

$$N = -b * M_r * \Delta H$$

ดังนั้น

$$\frac{dN}{dt} = -b * \Delta H * \frac{dM_r}{dt} \qquad \text{.....4.31}$$

เพราะฉะนั้นจะได้ว่า

$$\frac{dQre}{dt} = -b * \Delta H * (T_r * \frac{dM_r}{dt} + M_r * \frac{dT_r}{dt}) \qquad \text{.....4.32}$$

หรือ $$\frac{dQre}{dt} = T_r * \frac{dN}{dt} + N * \frac{dT_r}{dt}$$

ดังนั้น สมการสเตทสำหรับใช้ประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา โดยใช้ คาลมานฟิลเตอร์อัลกอริธึม คือ

จากสมการอนุรักษ์พลังงานรอบเครื่องปฏิกรณ์และแจ็กเก็ตมีดังนี้

$$\frac{dT_J}{dt} = -\frac{U_r A_r (T_J - T_r)}{V_J \rho_J Cp_J} + \tau_J (T_{Jsp} - T_J) \qquad \text{.....4.33}$$

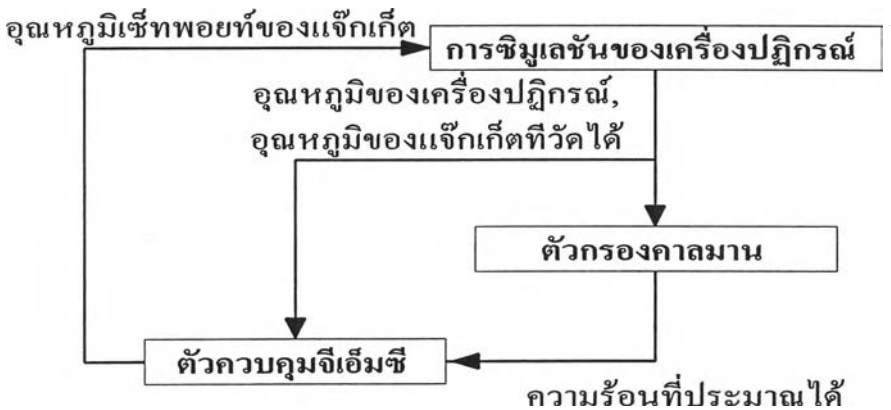
$$\frac{dT_r}{dt} = \frac{Q_{re}}{W_r Cp_r} + \frac{U_r A_r}{W_r Cp_r} (T_J - T_r) \qquad \text{.....4.34}$$

จากแบบจำลองของการคายความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยา

$$\frac{dN}{dt} = -b * N * T_r \qquad \text{.....4.34}$$

$$\frac{dQre}{dt} = T_r * \frac{dN}{dt} + N * \frac{dT_r}{dt} \qquad \text{.....4.35}$$

$$\frac{db}{dt} = 0 \qquad \text{.....4.36}$$



รูปที่ 4.5 แผนภาพแสดงการประยุกต์ใช้การควบคุมจีเอ็มซีร่วมกับตัวประเมินค่าความร้อนคาลมาน

จากแผนผังข้างบน จะเห็นว่าค่าเอาท์พุทจากกระบวนการคือค่าอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่วัดได้(Trm) และค่าอุณหภูมิของแจ๊กเก็ตที่วัดได้ (Tjm) จะส่งค่าให้กับตัวประมาณค่าความร้อนซึ่งในที่นี้จะใช้คาลมานฟิลเตอร์เพื่อประมาณค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา (Qre) ในขณะเดียวกันค่าเอาท์พุทเหล่านั้นจะป้อนให้กับตัวควบคุมจีเอ็มซีด้วย ซึ่งตัวควบคุมจีเอ็มซีจะใช้ค่า Trm, Tjm และ Qre เพื่อคำนวนค่าอุณหภูมิเซ็ทพอยท์ของแจ๊กเก็ต (Tjsp) เพื่อทำการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ให้อยู่ที่ค่าเซ็ทพอยท์ที่ต้องการ

ผลการทดลองของ P. Kittisupakorn, 1992 ชี้ให้เห็นว่าคาลมานฟิลเตอร์จะให้ค่าความร้อนที่ประมาณได้ใกล้เคียงกับค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาในกรณีที่ไม่มีความผิดพลาดของแบบจำลองและพารามิเตอร์ของแบบจำลองมีค่าเหมือนกับพารามิเตอร์ของกระบวนการ ทำให้การควบ

คุมจีเอ็มซีสามารถควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ได้เป็นอย่างดี ส่วนในกรณีที่มีความแตกต่างของพารามิเตอร์ ซึ่งในที่นี้จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผิดพลาด 50 % จะเห็นได้ว่าการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยามีความแตกต่างจากความร้อนที่เกิดขึ้นจริง แต่อย่างไรก็ตามการควบควบคุมจีเอ็มยังสามารถควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ให้อยู่ที่อุณหภูมิเซ็ทพอยท์ที่ต้องการได้

นอกจากนี้ การควบคุมจีเอ็มซียังสามารถประยุกต์ใช้ควบคุมกับระบบจริง (pilot plant) ซึ่งจะเห็นว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับผลที่ได้จากการจำลอง อย่างไรก็ตาม จะเห็นถึงความแตกต่างเช่น การแกว่งของค่าความร้อนที่ได้จากการประมาณเนื่องจากการทดสอบกับระบบจริงตัวแปรต่างๆมีค่าแตกต่างไปจากการจำลอง การหาแบบจำลองของกระบวนการมีการให้สมมติฐานซึ่งแน่นอนว่าทำให้แบบจำลองที่ได้แตกต่างจากกระบวนการจริง แต่อย่างไรก็ตามความแตกต่างเหล่านี้ไม่ได้ทำให้ความสามารถในการควบคุมของตัวควบคุมจีเอ็มซีเปลี่ยนแปลงมาก ซึ่งแสดงว่าการควบคุมแบบจีเอ็มซีที่ใช้ตัวประมาณค่าความร้อนมีความทนทานสูง สามารถประยุกต์ใช้กับกระบวนการจริงได้ดีกว่าการควบคุมแบบพีไอดีซึ่งไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เคมีให้อยู่ที่ค่าเซ็ทพอยท์ที่ต้องการ

สรุป

จะเห็นได้ว่า การควบคุมจีเอ็มซีเป็นการควบคุมแบบไม่เชิงเส้นที่ง่ายและสามารถประยุกต์ใช้จริงสำหรับการควบคุมกระบวนการที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ดี แต่อย่างไรก็ตามต้องตรวจสอบด้วยว่าอินเตอร์นอลไดนามิกส์(Internal Dynamics) ของกระบวนการคงที่หรือไม่ ซึ่งในกรณีนี้เป็นกระบวนการแบบแบทช์ซึ่งถ้าอุณหภูมิสามารถถูกควบคุมให้อยู่ที่ค่าเซ็ทพอยท์ที่ต้องการ ค่าความเข้มข้นของสารต่างๆจะค่อยๆลดลงจนกลายเป็นศูนย์ซึ่งแสดงถึงว่ากระบวนการนี้อุณหภูมิเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุด ถ้าไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ค่าความร้อนที่ที่เกิดจากปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นซึ่งมีผลทำให้กระบวนการเกิดความไม่เสถียร ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องปฏิกรณ์ และบุคคลากรที่ปฏิบัติงานบริเวณนั้นได้ ดังนั้นการควบคุมกระบวนการที่มีปฏิกิริยาคายความร้อน การควบคุมอุณหภูมิจึงเป็นสิ่งสำคัญ และได้แสดงให้เห็นแล้วว่าการควบคุมแบบจีเอ็มซีที่ใช้ร่วมกับตัวประมาณค่าความร้อนสามารถควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบแบทช์ได้อย่างดี