

บทที่ 4

การควบคุมความเข้มข้นในเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนต่อเนื่องที่มี ปฏิกิริยาคายความร้อนอันดับหนึ่งแบบผันกลับไม่ได้

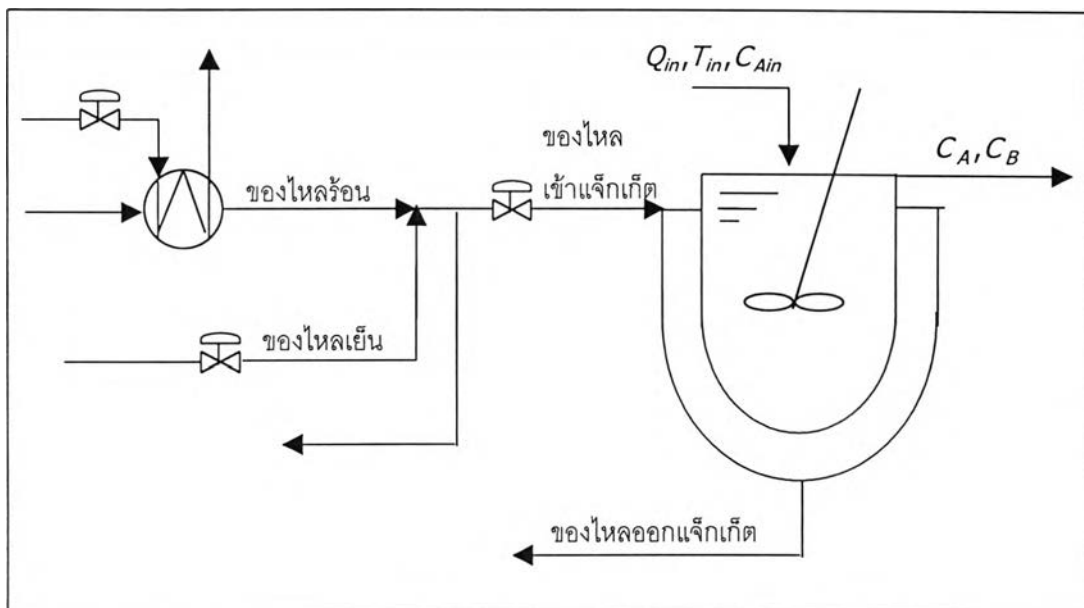
เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนต่อเนื่องเป็นระบบพื้นฐานอย่างหนึ่งในอุตสาหกรรมเคมี ซึ่งแบบจำลองที่ใช้อธิบายระบบดังกล่าวนี้มีให้เห็นอยู่ทั่วไปเช่นในงานวิจัยของ Uppal และคณะ (1974) หรือ Seborg และคณะ (1989) สาเหตุที่นำกระบวนการดังกล่าวมาศึกษาก็น่าจะเนื่องมาจากกระบวนการควบคุมความเข้มข้นของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนอันดับหนึ่งแบบผันกลับไม่ได้มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง (highly nonlinear) อีกทั้งยังมีระดับสัมพัทธ์มากกว่าหนึ่ง (higher relative degree than one) ในกรณีของระบบที่มีค่าระดับสัมพัทธ์มากกว่าหนึ่งนี้ การนำตัวควบคุมจีเอ็มซีมาประยุกต์ใช้กับระบบดังกล่าวโดยตรงจะไม่สามารถทำได้ ดังนั้นวิธีการควบคุมตัวแปรควบคุมภายในจึงถูกนำมาใช้กับจีเอ็มซีเพื่อให้สามารถใช้จีเอ็มซีในการควบคุมระบบดังกล่าวได้ อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการทดสอบสมรรถนะของวิธีการควบคุมตัวแปรควบคุมภายในจึงนำตัวควบคุมแบบจีแอลซีและพีไอซึ่งเป็นตัวควบคุมที่สามารถควบคุมระบบที่มีค่าระดับสัมพัทธ์สองได้มาเปรียบเทียบกับ นอกจากนี้แล้วยังทำการทดสอบตัวควบคุมในกรณีที่มีความคลาดเคลื่อนระหว่างแบบจำลองและกระบวนการจริงด้วย

4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ

เครื่องปฏิกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ทำการเปลี่ยนสาร A ซึ่งเป็นสารตั้งต้นให้เปลี่ยนเป็นสาร B ซึ่งเป็นสารผลิตภัณฑ์ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับไม่ได้ อันดับหนึ่งภายใต้เงื่อนไขของสมมติฐานดังนี้

- สารในเครื่องปฏิกรณ์มีการผสมกันอย่างสมบูรณ์แบบในทันทีทันใด
- สมบัติทางกายภาพของสารภายในเครื่องปฏิกรณ์มีค่าคงที่

- ไม่มีการสูญเสียความร้อนออกจากเครื่องปฏิกรณ์
- ปริมาตรของสารในเครื่องปฏิกรณ์มีค่าคงที่
- ปริมาตรของสารหล่อเย็นในแจ็กเก็ตมีค่าคงที่



รูปที่ 4.1 ภาพแสดงเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับไม่ได้

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบโดย Seborg และคณะ (1989) ซึ่งกำหนดตัวแปรและค่าที่สภาวะปฏิบัติงานตามตารางที่ 4.1 มีดังนี้

สมการอนุรักษ์มวล

$$\begin{aligned} \frac{d(\rho V)}{dt} &= \rho Q_{in} - \rho Q \\ \frac{dV}{dt} &= Q_{in} - Q \\ &= 0 \end{aligned}$$

(4.1)

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงภาวะปฏิบัติงานของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มี
ปฏิกิริยาคายความร้อนอันดับหนึ่งแบบผันกลับไม่ได้

| ลำดับที่ | ตัวแปร | คำอธิบาย | ภาวะ | หน่วย |
|----------|---------------|----------------------------------|----------------------|-------------------|
| 1 | Q_{in} | อัตราการไหลของสายป้อน | 100 | L/min |
| 2 | Q | อัตราการไหลของสายผลิตภัณฑ์ | 100 | L/min |
| 3 | C_{Ain} | ความเข้มข้นขาเข้าของสาร A | 1 | mol/L |
| 4 | T_{in} | อุณหภูมิของสายป้อน | 350 | K |
| 5 | V | ปริมาตรของเหลวในถังกวน | 100 | L |
| 6 | ρ | ความหนาแน่นของเหลวในถังกวน | 1000 | g/L |
| 7 | C_p | ค่าความจุความร้อนของสารในถังกวน | 0.239 | J/g.K |
| 8 | $(-\Delta H)$ | ความร้อนจากปฏิกิริยา | 5×10^4 | J/mol |
| 9 | $\frac{E}{R}$ | พลังงานกระตุ้นต่อค่าคงที่ของก๊าส | 8750 | K |
| 10 | k_0 | ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา | 7.2×10^{10} | min ⁻¹ |
| 11 | UA | สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม | 5×10^4 | J/min.K |
| 12 | T_c | อุณหภูมิสารหล่อเย็น | 300 | K |
| 13 | C_A | ความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เหลือ | 0.5 | mol/L |
| 14 | C_B | ความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ | 0.5 | mol/L |
| 15 | T | อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ | 350 | K |

กำหนดให้

ตัวแปรควบคุมคือค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เหลือ (C_A)

ตัวแปรที่วัดค่าได้คือค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เหลือ (C_A) และอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ (T)

ตัวแปรปรับคืออุณหภูมิของสารหล่อเย็น (T_c)

สมการอนุรักษ์องค์ประกอบย่อย

สาร A

$$\begin{aligned}\frac{d(C_A V)}{dt} &= Q_{in} C_{Ain} - Q C_A - rV \\ \frac{dC_A}{dt} &= Q_{in} (C_{Ain} - C_A) - rV \\ \frac{dC_A}{dt} &= \frac{Q_{in}}{V} (C_{Ain} - C_A) - r \\ \frac{dC_A}{dt} &= \frac{Q_{in}}{V} (C_{Ain} - C_A) - k_0 e^{\frac{E}{RT}} C_A\end{aligned}\tag{4.2}$$

สาร B

$$\begin{aligned}\frac{d(C_B V)}{dt} &= Q_{in} C_{Bin} - Q C_B + rV \\ \frac{dC_B}{dt} &= Q_{in} (C_{Bin} - C_B) + rV \\ \frac{dC_B}{dt} &= \frac{Q_{in}}{V} (0 - C_B) + r \\ \frac{dC_B}{dt} &= -\frac{Q_{in}}{V} C_B + k_0 e^{\frac{E}{RT}} C_A\end{aligned}\tag{4.3}$$

สมการอนุรักษ์พลังงาน

$$\begin{aligned}\rho C_p V \frac{dT}{dt} &= \rho Q_{in} C_p T_{in} - \rho Q C_p T - \Delta H r V - UA(T - T_C) \\ \frac{dT}{dt} &= \frac{Q_{in}}{V} (T_{in} - T) + \frac{-\Delta H k_0 e^{\frac{E}{RT}} C_A}{\rho C_p} - \frac{UA}{\rho C_p V} (T - T_C)\end{aligned}\tag{4.4}$$

สมการอนุรักษ์องค์ประกอบย่อยของสาร B สามารถใช้ได้เนื่องจากสามารถคำนวณได้จากปริมาณสารตั้งต้นขาเข้า (C_{Ain}) และปริมาณสารตั้งต้นที่เหลืออยู่ (C_A) ดังนี้

$$C_B = C_{Ain} - C_A \quad (4.5)$$

จะสามารถเขียนสมการหลักของแบบจำลองของระบบได้ดังนี้

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{Q_{in}}{V} (C_{Ain} - C_A) - k_0 e^{-\frac{E}{RT}} C_A \quad (4.2)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q_{in}}{V} (T_{in} - T) + \frac{-\Delta H k_0 e^{-\frac{E}{RT}} C_A}{\rho C_p} - \frac{UA}{\rho C_p V} (T - T_c) \quad (4.4)$$

กำหนดให้

C_A^{ss} คือค่าความเข้มข้นของสาร A ที่ภาวะปฏิบัติงาน

T^{ss} คือค่าอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ที่ภาวะปฏิบัติงาน

T_c^{ss} คือค่าอุณหภูมิของสารหล่อเย็นที่ภาวะปฏิบัติงาน

$$\tilde{C}_A = C_A - C_A^{ss}$$

$$\tilde{T} = T - T^{ss}$$

$$\tilde{T}_c = T_c - T_c^{ss}$$

และ

$$f_1 = \dot{\tilde{C}}_A$$

$$f_2 = \dot{\tilde{T}}$$

สามารถเขียนระบบในสมการที่ (4.2) และ (4.4) ในรูปสเตตสเปซได้

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{C}}_A \\ \dot{\tilde{T}} \end{bmatrix}_{2 \times 1} = [A]_{2 \times 2} \begin{bmatrix} \tilde{C}_A \\ \tilde{T} \end{bmatrix}_{2 \times 1} + [B]_{2 \times 1} \begin{bmatrix} \tilde{T}_c \end{bmatrix}_{1 \times 1} \quad (4.6)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{C}_A \\ \tilde{T} \end{bmatrix}_{2 \times 1} = [C]_{2 \times 2} \begin{bmatrix} \tilde{C}_A \\ \tilde{T} \end{bmatrix}_{2 \times 1} \quad (4.7)$$

จะให้

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial C_A} \right|_{ss} & \left. \frac{\partial f_1}{\partial T} \right|_{ss} \\ \left. \frac{\partial f_2}{\partial C_A} \right|_{ss} & \left. \frac{\partial f_2}{\partial T} \right|_{ss} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial T_c} \right|_{ss} \\ \left. \frac{\partial f_2}{\partial T_c} \right|_{ss} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

จะได้

$$\begin{aligned} a_{11} &= -\frac{Q_{in}}{V} - k_0 e^{-\frac{E}{RT^{ss}}} \\ a_{12} &= -k_0 C_A^{ss} \frac{E}{RT^{ss2}} e^{-\frac{E}{RT^{ss}}} \\ a_{21} &= \frac{(-\Delta H)}{\rho C_p} k_0 e^{-\frac{E}{RT^{ss}}} \\ a_{22} &= -\frac{Q_{in}}{V} + \frac{(-\Delta H)}{\rho C_p} k_0 C_A^{ss} \frac{E}{RT^{ss2}} e^{-\frac{E}{RT^{ss}}} - \frac{UA}{\rho V C_p} \end{aligned} \quad (4.11)$$

และ

$$\begin{aligned} b_{11} &= 0 \\ b_{21} &= \frac{UA}{\rho V C_p} \end{aligned} \quad (4.12)$$

แทนค่าตัวแปรและพารามิเตอร์จากตารางที่ 4.1 ลงในสมการที่ (4.11) และ (4.12) แล้วนำไปแทนในสมการที่ (4.8) และ (4.9) ตามลำดับจะได้

$$A = \begin{bmatrix} -2 & -0.036 \\ 209.191 & 4.379 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.092 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

4.1.1 เสถียรภาพของระบบ (System Stability)

ระบบที่มีเสถียรภาพคือระบบที่เมื่อถูกรบกวนแล้วตัวแปรออกหรือตัวแปรควบคุมสามารถกลับเข้าสู่ภาวะเดิมได้ ซึ่งในการตรวจสอบดูว่าระบบนั้นมีเสถียรภาพหรือไม่ สามารถดูได้จากค่าโพลของระบบขณะที่ยังไม่มีการควบคุม โดยรายละเอียดในการหาเสถียรภาพของระบบแสดงไว้ในภาคผนวก ก.

เมตริกซ์ A ของระบบคือ

$$A = \begin{bmatrix} -2 & -0.036 \\ 209.191 & 4.379 \end{bmatrix}$$

กำหนด λ แทนโพลของระบบขณะที่ยังไม่มีการควบคุม

ให้

$$\det(\lambda I - A) = 0 \quad (4.15)$$

$$\begin{vmatrix} (\lambda + 2) & 0.036 \\ -209.191 & (\lambda - 4.379) \end{vmatrix} = 0 \quad (4.16)$$

$$(\lambda + 2)(\lambda - 4.379) - (-209.191)(0.036) = 0 \quad (4.17)$$

$$\lambda = -0.436, 2.815 \quad (4.18)$$

เนื่องจากโพลขณะไม่มีการควบคุมมีค่าเป็นบวกหนึ่งค่า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าที่ภาวะปฏิบัติ งานนี้ระบบไม่มีเสถียรภาพ

4.1.2 ความควบคุมได้ของระบบ (Controllability)

ระบบที่กล่าวได้ว่าเป็นระบบที่สามารถควบคุมได้คือระบบที่สามารถควบคุมตัวแปรสแตต ที่ต้องการได้ด้วยตัวแปรปรับที่เลือกไว้ โดยรายละเอียดในการพิจารณาว่าระบบใดเป็นระบบที่สามารถควบคุมได้นั้นมีแสดงไว้ในภาคผนวก ก.

$$\text{เมตริกซ์การควบคุมได้} = [B \ AB]$$

เมื่อ

$$A = \begin{bmatrix} -2 & -0.036 \\ 209.191 & 4.379 \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.092 \end{bmatrix}$$

จะได้

$$\text{เมตริกซ์การควบคุมได้} = \begin{bmatrix} 0 & -0.075 \\ 2.092 & 9.161 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$$\begin{vmatrix} 0 & -0.075 \\ 2.092 & 9.161 \end{vmatrix} = 0.157 \quad (4.20)$$

เนื่องจากดีเทอร์มิแนนท์ของเมตริกซ์การควบคุมได้ให้ค่าเท่ากับ 0.157 ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการควบคุมความเข้มข้นของเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาแบบคายความร้อนอันดับหนึ่งนี้สามารถทำได้โดยใช้ตัวแปรปรับที่เลือกไว้

4.1.3 ความสังเกตได้ของระบบ (Observability)

ระบบที่กล่าวได้ว่าเป็นระบบที่สังเกตได้นั้นก็คือระบบที่ตัวแปรที่วัดได้สามารถใช้เป็นตัวแทนในการประมาณค่าสเตทหรือพารามิเตอร์ของระบบนั้นๆได้ โดยรายละเอียดในการพิจารณาว่าระบบใดเป็นระบบที่สังเกตได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.

$$\text{เมตริกซ์การสังเกตได้} = [C^T \ A^T C^T]$$

เมื่อ

$$A = \begin{bmatrix} -2 & -0.036 \\ 209.191 & 4.379 \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

จะได้

$$\text{เมตริกซ์การสังเกตได้} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -2 & 209.191 \\ 0 & 1 & -0.036 & 4.379 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

เนื่องจากแถวที่หนึ่งและแถวที่สองของเมตริกซ์การสังเกตได้นั้นมีลักษณะไม่ขึ้นอยู่กับกัน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ตัวแปรออกที่สามารถวัดค่าได้ในแบบจำลองนี้สามารถเป็นตัวแทนที่ใช้ประมาณค่าสเตทหรือค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าที่แน่นอนของระบบได้

4.2 ระดับสัมพัทธ์ของระบบ

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบตามสมการที่ (4.2) และ (4.4) ดังนี้

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{Q_{in}}{V} (C_{Ain} - C_A) - k_0 e^{-\frac{E}{RT}} C_A \quad (4.2)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q_{in}}{V} (T_{in} - T) + \frac{-\Delta H k_0 e^{-\frac{E}{RT}} C_A}{\rho C_p} - \frac{UA}{\rho C_p V} (T - T_c) \quad (4.4)$$

พิจารณาระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยทั่วไปที่มีตัวแปรสเกล 2 ตัว ดังนี้

$$\frac{dx_1}{dt} = f_1(x) + g_1(x)u \quad (4.22)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = f_2(x) + g_2(x)u \quad (4.23)$$

$$y = h(x) \quad (4.24)$$

เมื่อนำมาเทียบกับระบบในสมการที่ (4.2) และ (4.4) จะได้ว่า

$$x_1 = C_A$$

$$x_2 = T$$

$$u = T_c$$

$$y = h(x) = x_1 = C_A$$

$$f_1(x) = \frac{Q_{in}}{V}(C_{Ain} - C_A) - k_0 e^{-\frac{E}{RT}} C_A$$

$$g_1(x) = 0$$

$$f_2(x) = \frac{Q_{in}}{V}(T_{in} - T) + \frac{-\Delta H k_0 e^{-\frac{E}{RT}} C_A}{\rho C_p} - \frac{UAT}{\rho C_p V}$$

$$g_2(x) = \frac{UA}{\rho C_p V}$$

จากนิยามของระดับสัมพัทธ์ของระบบไม่เชิงเส้นที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อ (3.3.2) แล้วนั้น กล่าววาระดับสัมพัทธ์ก็คือจำนวนเต็ม r ที่น้อยที่สุดที่ทำให้ $L_g L_f^{r-1} h(x) \neq 0$

จากระบบในสมการที่ (4.2) และ (4.4) ได้ว่า

$$\begin{aligned} L_g h(x) &= \begin{bmatrix} \frac{\partial h(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial h(x)}{\partial x_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ g_2 \end{bmatrix} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (4.25)$$

$$\begin{aligned} L_f h(x) &= \begin{bmatrix} \frac{\partial h(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial h(x)}{\partial x_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \\ &= f_1 \end{aligned} \quad (4.26)$$

และ

$$\begin{aligned} L_g L_f h(x) &= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ g_2 \end{bmatrix} \\ &= g_2 \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \neq 0 \end{aligned} \quad (4.27)$$

ได้ว่า

$$L_g h(x) = 0 \quad \text{แต่} \quad L_g L_f h(x) \neq 0$$

นั่นคือ $r = 2$

จากนิยามของระดับสัมผัสระบบการควบคุมความเข้มข้นของสาร A ภายในเครื่องปฏิกรณ์ ถึงกวนต่อเนื้อที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนอันดับหนึ่งแบบผันกลับไม่ได้นี้จึงมีค่าระดับสัมผัสเป็นสองนั่นเอง

4.3 การใช้จีเอ็มซีควบคุมความเข้มข้น

เนื่องจากระบบที่ต้องการควบคุมมีค่าระดับสัมผัสเป็นสอง ดังนั้นจึงใช้วิธีการควบคุมตัวแปรควบคุมภายในเพื่อให้สามารถใช้จีเอ็มซีควบคุมความเข้มข้นได้ พิจารณาแบบจำลองของระบบตามสมการที่ (4.2) และ (4.4) ดังนี้

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{Q_{in}}{V} (C_{Ain} - C_A) - k_0 e^{-\frac{E}{RT}} C_A \quad (4.2)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q_{in}}{V} (T_{in} - T) + \frac{-\Delta H k_0 e^{-\frac{E}{RT}} C_A}{\rho C_p} - \frac{UA}{\rho C_p V} (T - T_c) \quad (4.4)$$

พบว่าสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งของอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ (T) มีพจน์ของตัวแปรปรับ (T_c) อยู่ และอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ก็มีผลโดยตรงกับอัตราการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นด้วย ดังนั้นจึงกำหนดให้ตัวแปรควบคุมภายในคืออุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์

กำหนดลักษณะอัตราผลตอบแทนของค่าความเข้มข้นของสาร A ($rate1$) ดังนี้

$$rate1 = k_{11}(C_A^{sp} - C_A) + k_{12} \int_0^t (C_A^{sp} - C_A) dt \quad (4.28)$$

โดยที่ k_{11} และ k_{12} คือค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจูนจีเอ็มซี นั่นคือ

$$rate1 = \frac{Q_{in}}{V} (C_{Ain} - C_A) - k_0 e^{-\frac{E}{RT}} C_A \quad (4.29)$$

แทนค่าอุณหภูมิ (T) ในสมการที่ (4.29) ด้วยค่าเป้าหมายของอุณหภูมิ (T^{sp}) จะได้

$$rate1 = \frac{Q_{in}}{V} (C_{Ain} - C_A) - k_0 e^{-\frac{E}{RT^{sp}}} C_A \quad (4.30)$$

ทำการคำนวณหา T^{sp} ได้

$$T^{sp} = -\frac{E}{R} / \ln \left(-\frac{rate1}{k_0 C_A} + \frac{Q_{in}(C_{Ain} - C_A)}{V k_0 C_A} \right) \quad (4.31)$$

กำหนดลักษณะอัตราผลตอบแทนของอุณหภูมิ ($rate2$) ดังนี้

$$rate2 = k_{21}(T^{sp} - T) + k_{22} \int_0^t (T^{sp} - T) dt \quad (4.32)$$

โดยที่ k_{21} และ k_{22} คือค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจูนจีเอ็มซี นั่นคือ

$$rate2 = \frac{Q_{in}}{V} (T_{in} - T) + \frac{-\Delta H k_0 e^{-\frac{E}{RT}} C_A}{\rho C_p} - \frac{UA}{\rho C_p V} (T - T_c) \quad (4.33)$$

คำนวณหาค่าตัวแปรปรับคืออุณหภูมิของสารหล่อเย็น(T_c) ได้

$$T_c = \frac{\rho C_p V}{UA} \text{rate2} - \frac{Q_{in} \rho C_p}{UA} (T_{in} - T) + \frac{\Delta H k_0 V}{UA} e^{-\frac{E}{RT}} C_A + T \quad (4.34)$$

อย่างไรก็ตามสมการที่ (4.28) , (4.31) , (4.32) และ (4.34) ล้วนอยู่ในรูปต่อเนื่องทั้งสิ้น ซึ่งเมื่อต้องการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงจะต้องทำให้อยู่ในรูปของดิสครีตก่อนเนื่องจากตัวควบคุมจะรับและส่งสัญญาณในรูปดิสครีต ดังนั้นสมการ (4.28) , (4.31) , (4.32) และ (4.34) จะเปลี่ยนรูปไปดังนี้

$$\text{rate1}(k) = k_{11} (C_A^{sp} - C_A(k)) + k_{12} \sum_0^k (C_A^{sp} - C_A(k)) \Delta t \quad (4.35)$$

$$T^{sp}(k) = -\frac{E}{R} / \ln \left(-\frac{\text{rate1}(k)}{k_0 C_A(k)} + \frac{Q_{in} (C_{Ain} - C_A(k))}{V k_0 C_A(k)} \right) \quad (4.36)$$

$$\text{rate2}(k) = k_{21} (T^{sp}(k) - T(k)) + k_{22} \sum_0^k (T^{sp}(k) - T(k)) \Delta t \quad (4.37)$$

$$T_c(k) = \frac{\rho C_p V}{UA} \text{rate2}(k) - \frac{Q_{in} \rho C_p}{UA} (T_{in} - T(k)) + \frac{\Delta H k_0 V}{UA} e^{-\frac{E}{RT(k)}} C_A(k) + T(k) \quad (4.38)$$

อย่างไรก็ตามค่า T_c ที่คำนวณได้ออกมานั้นก็ยังไม่สามารถทำให้เกิดได้ในทันที เพราะอุณหภูมิของสารหล่อเย็นนั้นมีพลวัตตามแบบจำลองอยู่ดังนี้

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{Q_c}{V_c} (T_c^{sp} - T_c) + \frac{UA}{\rho_c V_c C_{pc}} (T - T_c) \quad (4.39)$$

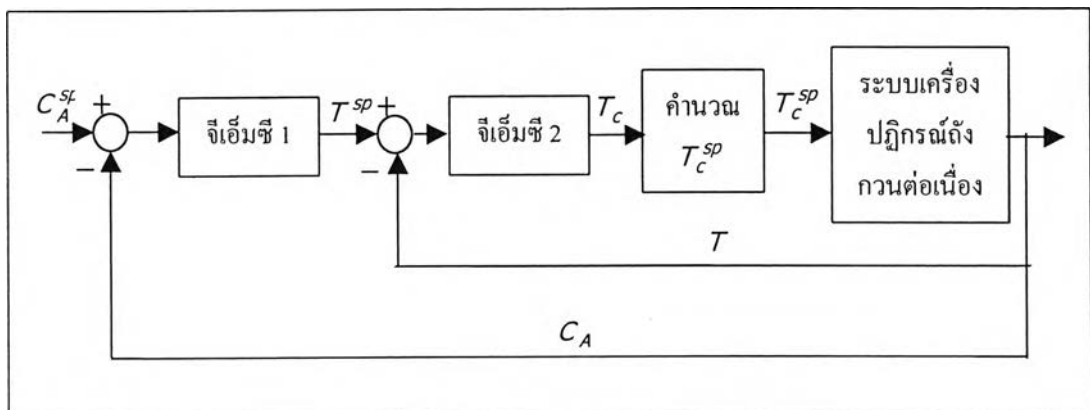
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองเชิงพลวัตของสารหล่อเย็น

| ลำดับที่ | ตัวแปร | คำอธิบาย | สถานะ | หน่วย |
|----------|----------|---------------------------------|-------|-------|
| 1 | Q_c | อัตราการไหลของสารหล่อเย็น | 523 | L/min |
| 2 | V_c | ปริมาตรของแจ็กเก็ต | 10 | L |
| 3 | ρ_c | ค่าความหนาแน่นของสารหล่อเย็น | 1000 | mol/L |
| 4 | C_{pc} | ค่าความจุความร้อนของสารหล่อเย็น | 0.239 | J/g.K |

โดยมี T_c^{sp} เป็นอุณหภูมิเป้าหมายของสารหล่อเย็นที่เข้าแจ็กเก็ตซึ่งสามารถคำนวณได้โดยประมาณให้มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิสารหล่อเย็นในรูปเฟิร์สออร์เดอร์ (Liptak, 1986) ดังนี้

$$T_c^{sp}(k) = T_c(k-1) + \frac{\tau_c}{\Delta t} (T_c(k) - T_c(k-1)) \quad (4.40)$$

ดังนั้นจะได้แผนการควบคุมความเข้มข้นโดยใช้จีเอ็มซีที่มีอุณหภูมิของสารในเครื่องปฏิกรณ์เป็นตัวแปรควบคุมภายในดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ภาพแสดงการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีที่มีการใช้ตัวแปรควบคุมภายใน

4.4 การใช้จ็อกแอตซีควบคุมความเข้มข้น

จากแบบจำลองของระบบในสมการที่ (4.2) และ (4.4)

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{Q_{in}}{V} (C_{Ain} - C_A) - k_0 e^{-\frac{E}{RT}} C_A \quad (4.2)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q_{in}}{V} (T_{in} - T) + \frac{-\Delta H k_0 e^{-\frac{E}{RT}} C_A}{\rho C_p} - \frac{UA}{\rho C_p V} (T - T_c) \quad (4.4)$$

นำมาพิจารณาอยู่กับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยทั่วไปที่มีตัวแปรสแตต 2 ตัวในสมการที่ (4.22) , (4.23) และ (4.24) คือ

$$\frac{dx_1}{dt} = f_1(x) + g_1(x)u \quad (4.22)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = f_2(x) + g_2(x)u \quad (4.23)$$

$$y = h(x) \quad (4.24)$$

จะได้ว่า

$$x_1 = C_A$$

$$x_2 = T$$

$$u = T_c$$

$$y = h(x) = x_1 = C_A$$

$$f_1(x) = \frac{Q_{in}}{V} (C_{Ain} - C_A) - k_0 e^{-\frac{E}{RT}} C_A$$

$$g_1(x) = 0$$

$$f_2(x) = \frac{Q_{in}}{V} (T_{in} - T) + \frac{-\Delta H k_0 e^{-\frac{E}{RT}} C_A}{\rho C_p} - \frac{UAT}{\rho C_p V}$$

$$g_2(x) = \frac{UA}{\rho C_p V}$$

โดยที่ C_A คือตัวแปรควบคุมของระบบที่มี T_c เป็นตัวแปรปรับจะได้สมการการควบคุมของจีแอลซีดังนี้

$$T_c = \frac{v - (\beta_2 L_f^2 h(x) + \beta_1 L_f h(x) + \beta_0 h(x))}{\beta_2 L_g L_f h(x)} \quad (4.41)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} L_f h(x) &= f_1(x) \frac{\partial h(x)}{\partial x_1} + f_2(x) \frac{\partial h(x)}{\partial x_2} \\ &= \frac{Q_{in}}{V} (C_{Ain} - C_A) - k_0 e^{-\frac{E}{RT}} C_A \end{aligned} \quad (4.42)$$

$$\begin{aligned} L_f^2 h(x) &= f_1(x) \frac{\partial L_f h(x)}{\partial x_1} + f_2(x) \frac{\partial L_f h(x)}{\partial x_2} \\ &= \left(-\frac{Q_{in}}{V} - k_0 e^{-\frac{E}{RT}} \right) \left(\frac{Q_{in}}{V} (C_{Ain} - C_A) - k_0 e^{-\frac{E}{RT}} C_A \right) \\ &\quad + \left(-k_0 C_A \frac{E}{RT^2} e^{-\frac{E}{RT}} \right) \left(\frac{Q_{in}}{V} (T_{in} - T) + \frac{-\Delta H k_0 e^{-\frac{E}{RT}} C_A}{\rho C_p} - \frac{UAT}{\rho C_p V} \right) \end{aligned} \quad (4.43)$$

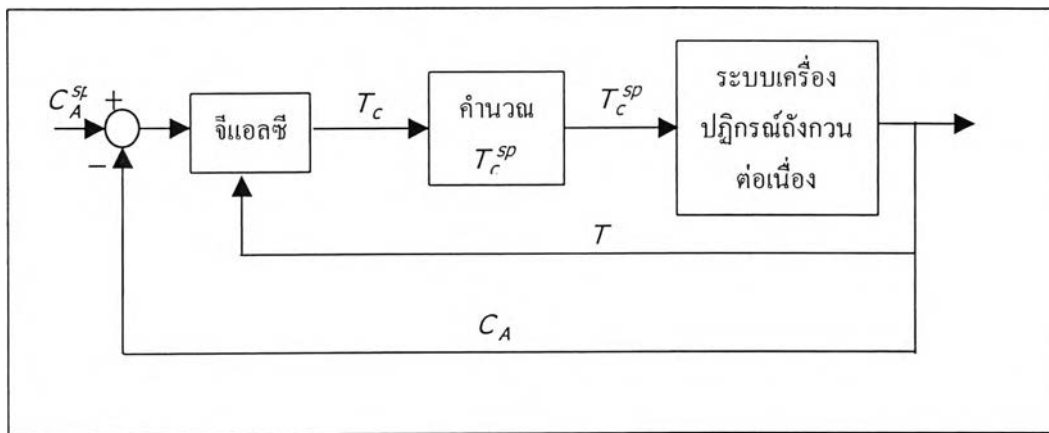
$$\begin{aligned} L_g L_f h(x) &= g_1(x) \frac{\partial L_f h(x)}{\partial x_1} + g_2(x) \frac{\partial L_f h(x)}{\partial x_2} \\ &= \left(-k_0 C_A \frac{E}{RT^2} e^{-\frac{E}{RT}} \right) \frac{UA}{\rho C_p V} \end{aligned} \quad (4.44)$$

และ

$$v = C_A^{sp} + k_c \left[(C_A^{sp} - C_A) + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t (C_A^{sp} - C_A) dt \right] \quad (4.45)$$

มี β_2 , β_1 , β_0 , k_c และ τ_I เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจูนตัวควบคุม

อย่างไรก็ตามตัวควบคุมจะรับและส่งสัญญาณในรูปดีสคริตเท่านั้น ดังนั้นเมื่อต้องการประยุกต์ใช้จีแอลซีจึงต้องทำให้สมการที่ (4.41), (4.42), (4.43), (4.44) และ (4.45) อยู่ในรูปดีสคริตก่อนเช่นเดียวกับจีเอ็มซี นอกจากนี้แล้วค่า T_c ที่คำนวณได้ออกมาจากสมการที่ (4.41) นั้นก็ยังไม่สามารถทำให้เกิดได้ในทันที เพราะอุณหภูมิของสารหล่อเย็นนั้นมีพลวัตตามแบบจำลองอยู่ ดังนั้นวิธีการคำนวณหาค่า T_c^{sp} ซึ่งเป็นอุณหภูมิเป้าหมายของสารหล่อเย็นที่เข้าแจ็กเก็ต ในสมการที่ (4.39) จึงถูกนำมาใช้เช่นเดียวกับการควบคุมแบบจีเอ็มซี ซึ่งจะได้รูปแผนการควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมจีแอลซีดังแสดงในรูปที่ 4.3 นี้



รูปที่ 4.3 ภาพแสดงการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีแอลซี

4.5 การทดสอบสมรรถนะในการควบคุมความเข้มข้นของจีเอ็มซีที่ใช้วิธีควบคุมตัวแปรควบคุมภายในกับตัวควบคุมจีแอลซีและพีไอ

จีเอ็มซีที่ใช้วิธีควบคุมตัวแปรควบคุมภายในนี้เมื่อนำมาใช้ควบคุมความเข้มข้นของสาร A ในเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนต่อเนื่องจะทำให้เกิดลูฟการควบคุมสองลูฟ จึงทำการทดสอบสมรรถนะตัวควบคุมจีเอ็มซีในสองกรณี โดยกรณีแรกจะใช้จีเอ็มซีทั้งสองลูฟการควบคุม ส่วนกรณีที่สองจะใช้ตัวควบคุมพีไอในลูฟนอกและใช้จีเอ็มซีในลูฟใน ดังนั้นเทคนิคในการควบคุมที่นำมาทดสอบสมรรถนะในการควบคุมความเข้มข้นจึงประกอบไปด้วยจีเอ็มซีที่ใช้การควบคุมตัวแปรควบคุมภายในซึ่งใช้จีเอ็มซีทั้งสองลูฟการควบคุม(จีเอ็มซี), จีแอลซี, จีเอ็มซีที่ใช้การควบคุมตัวแปรควบคุมภายใน

ในซึ่งใช้จีเอ็มซีในรูปของการควบคุมแต่ใช้ตัวควบคุมพีไอที่ลู่พนอก(พีไอร่วมกับจีเอ็มซี) และตัวควบคุมพีไอ

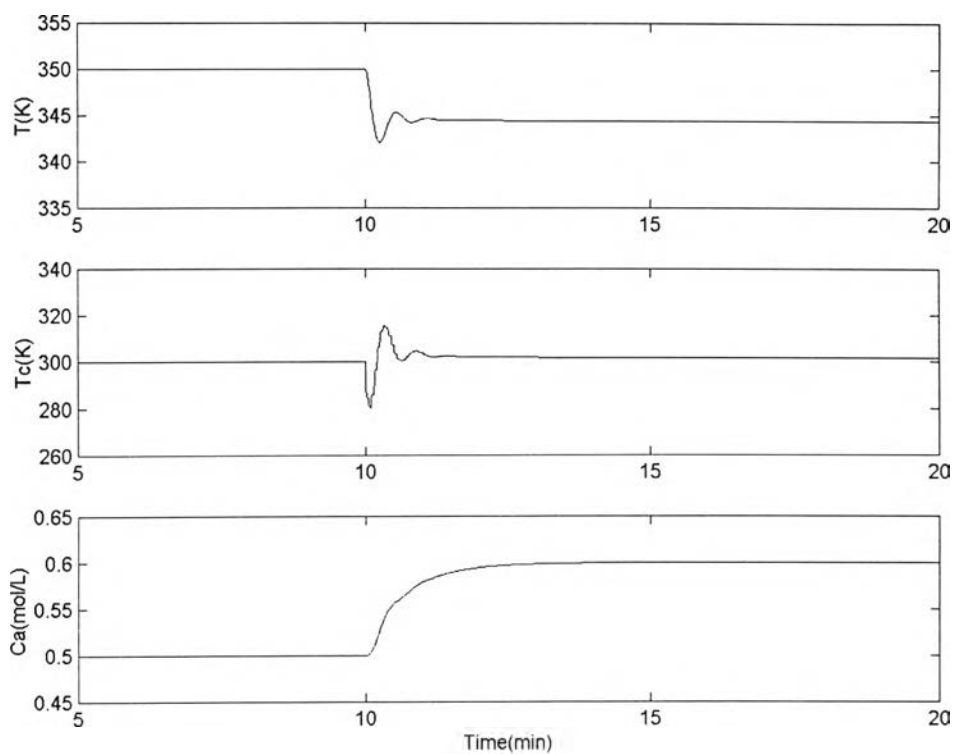
ในการทดสอบจะเริ่มด้วยการนำตัวควบคุมที่ปรับจนไว้แล้วมาทำการควบคุมความเข้มข้นของสาร A (C_A) โดยค่าเป้าหมายของความเข้มข้นของสาร A (C_A^sp) คือ 0.5 โมล/ลิตร จากนั้นเมื่อถึงนาที่ที่ 10 จึงทำการเปลี่ยนค่าเป้าหมายของความเข้มข้นเป็น 0.6 โมล/ลิตร สังเกตผลการควบคุมในรูปค่าผลรวมค่าสมบูรณ์ของความผิดพลาด (Integral of the Absolute Value of the Error : IAE) จากเทคนิคการควบคุมทั้งสี่ จากนั้นทำการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ในการควบคุมใหม่เพื่อให้ได้ผลการควบคุมในรูปของค่าไอเออีที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด

อย่างไรก็ตามในส่วนของการควบคุมแบบพีไอนั้น พบว่าเมื่อนำมาจำลองการควบคุมแล้วไม่สามารถทำการควบคุมให้ค่าความเข้มข้นลู่เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการได้ ในขณะที่ตัวควบคุมอีกสามตัวที่เหลือเมื่อนำมาจำลองการควบคุมสามารถทำการควบคุมให้ค่าความเข้มข้นลู่เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการได้ทั้งหมด โดยในการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ใหม่ตัวควบคุมทั้งสามชนิดนี้ให้ผลการควบคุมในรูปของค่าไอเออีที่ใกล้เคียงกันคือ 0.07

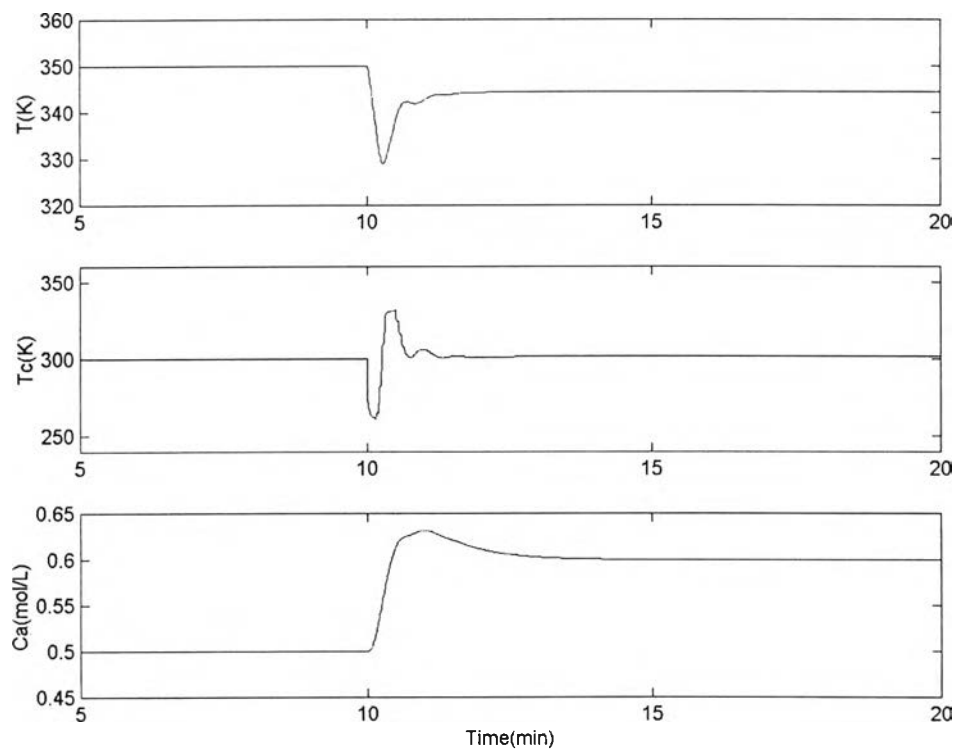
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจูนตัวควบคุม

| ตัวควบคุม | ค่าพารามิเตอร์ในการจูนตัวควบคุม |
|---------------|---|
| จีเอ็มซี | $k_{11} = 1.336, k_{12} = 0.0001, k_{21} = 25, k_{22} = 50$ |
| จีแอลซี | $\beta_2 = -1.35, \beta_1 = -45, \beta_0 = 1, k_c = -120.5, \tau_I = 1.2$ |
| พีไอ/จีเอ็มซี | $k_c = -12.56, \tau_I = 0.15, k_{21} = 15, k_{22} = 20$ |

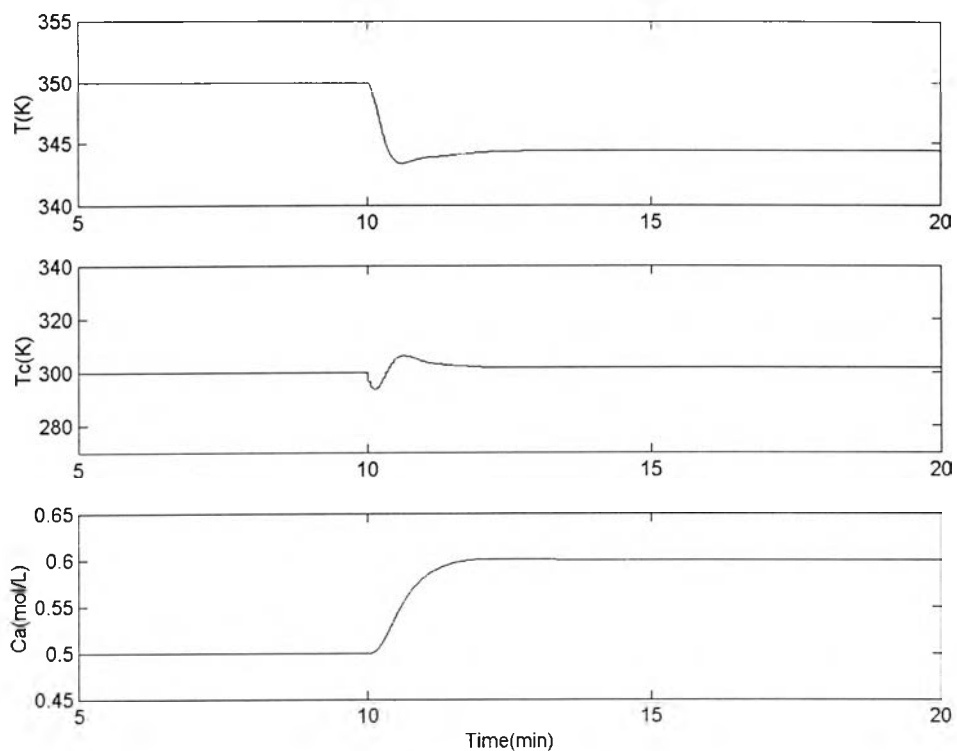
ผลการควบคุมความเข้มข้นของตัวควบคุมจีเอ็มซี, จีแอลซี และพีไอ/จีเอ็มซีที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ในการจูนตัวควบคุมตามตารางที่ 4.3 ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายของความเข้มข้นแสดงไว้ในรูปที่ (4.4), (4.5) และ (4.6) ส่วนในรูปที่ (4.7) แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีไอไม่สามารถควบคุมความเข้มข้นในเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวต่อเนื่องได้



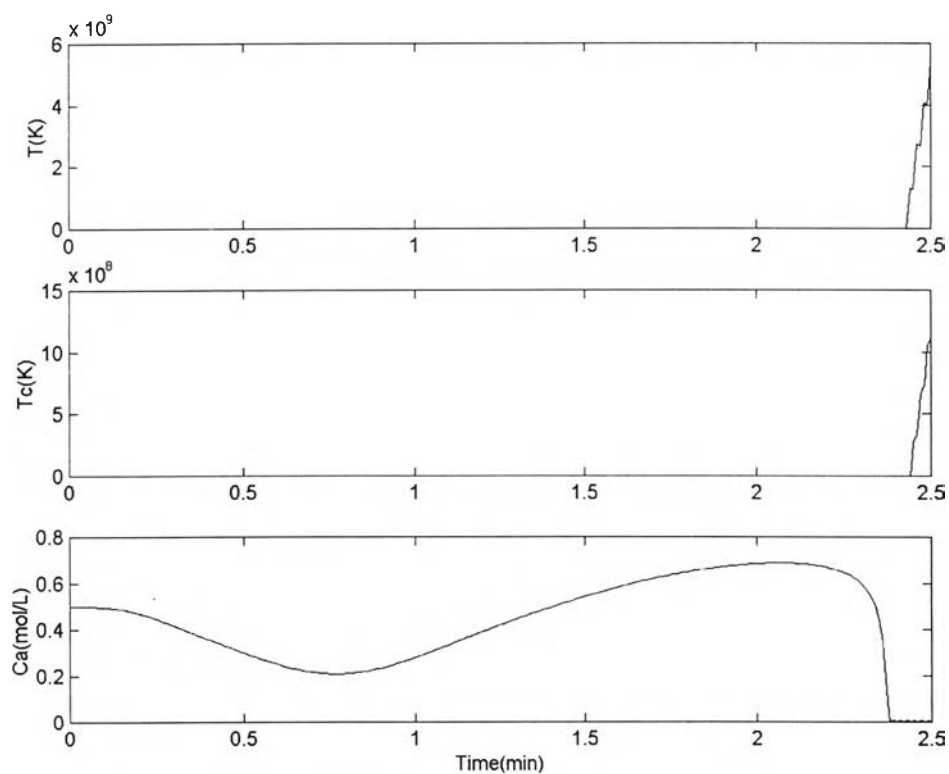
รูปที่ 4.4 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีเมื่อมีการเปลี่ยนค่าเป้าหมายของความเข้มข้น



รูปที่ 4.5 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีแอลซีเมื่อมีการเปลี่ยนค่าเป้าหมายความเข้มข้น



รูปที่ 4.6 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยพีไอ/จีเอ็มซีเมื่อมีการเปลี่ยนค่าเป้าหมายของความเข้มข้น



รูปที่ 4.7 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยพีไอ

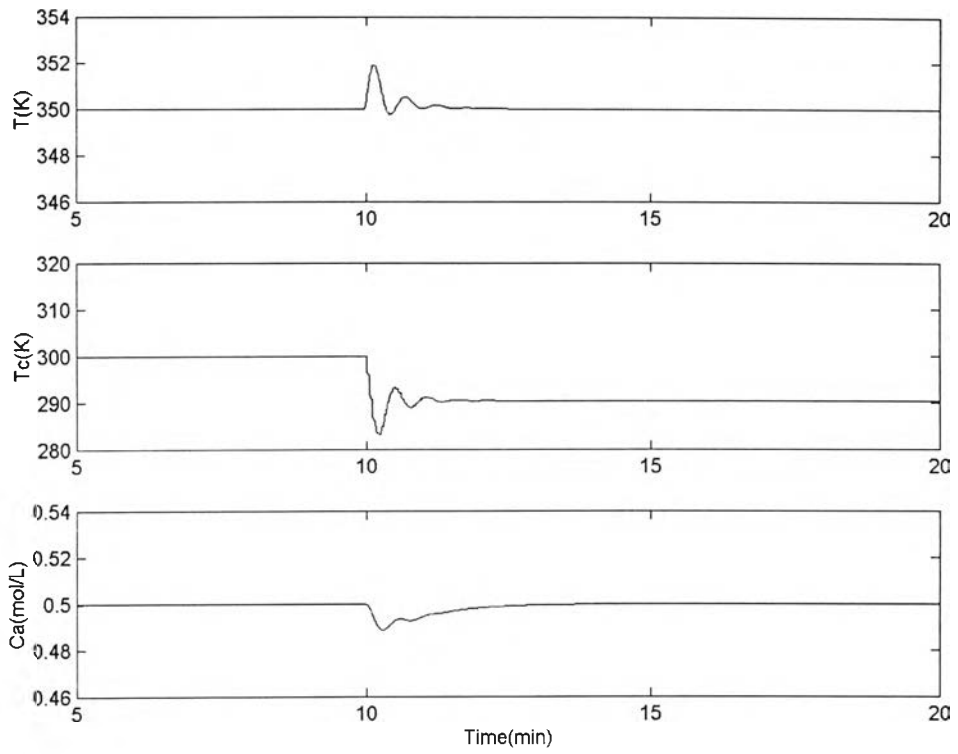
เมื่อจูนตัวควบคุมได้จนเป็นที่น่าพอใจแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการนำตัวควบคุมเพียงสามตัวคือ จีเอ็มซี, จีแอลซี และ พีไอร่วมกับจีเอ็มซีไปทดสอบสมรรถนะในการควบคุมเท่านั้นเนื่องจากในรูปที่ (4.7) แสดงให้เห็นแล้วว่าตัวควบคุมพีไอไม่สามารถควบคุมความเข้มข้นของสารภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนต่อเนื่องได้ โดยในการทดสอบสมรรถนะนี้เป็นการทดสอบผลการควบคุมในกรณีที่มีอุณหภูมิและอัตราการไหลของสารตั้งต้นขาเข้า (T_{in} และ Q_{in}) เป็นตัวแปรบกวนระบบ เนื่องจากการไหลของสารตั้งต้นก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์นั้นไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและอัตราการไหลเลย จึงทำให้ค่าดังกล่าวมีโอกาสคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ต้องการก็เป็นได้

ในการทดสอบการควบคุมความเข้มข้นในกรณีที่มี T_{in} และ Q_{in} เป็นตัวแปรบกวนนี้จะเริ่มจากการให้ตัวควบคุมทำการควบคุมค่าความเข้มข้นให้อยู่ที่ค่าเป้าหมายคือ $C_A^{sp} = 0.5$ โมล/ลิตร เมื่อถึงนาที่ที่ 10 ทำการเพิ่มค่า T_{in} ขึ้น 20 เคลวินแบบสเต็ป (Step) ในกรณีแรกและเพิ่มค่า Q_{in} ขึ้น 20 ลิตร/นาที่ในกรณีหลัง แล้วจึงตรวจสอบผลการควบคุมในรูปของค่าไอเออี ซึ่งผลการจำลองการควบคุมความเข้มข้นในกรณีที่มีตัวแปรบกวนนี้แสดงไว้ในตารางที่ 4.4

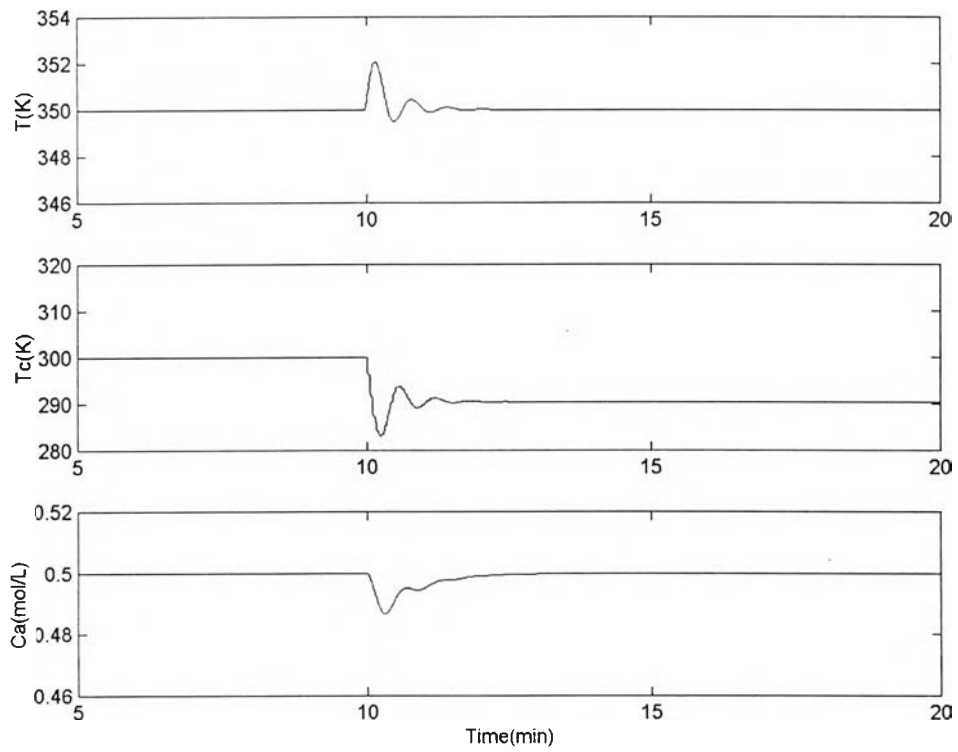
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงสมรรถนะของตัวควบคุมเมื่อมีตัวแปรบกวน

| ตัวแปรบกวน | ตัวควบคุม | ค่าไอเออี |
|------------------------------|---------------|-----------|
| T_{in} เพิ่ม 20 เคลวิน | จีเอ็มซี | 0.0116 |
| | จีแอลซี | 0.0101 |
| | พีไอ/จีเอ็มซี | 0.017 |
| Q_{in} เพิ่ม 20 ลิตร/นาที่ | จีเอ็มซี | 0.0162 |
| | จีแอลซี | 0.0222 |
| | พีไอ/จีเอ็มซี | 0.0307 |

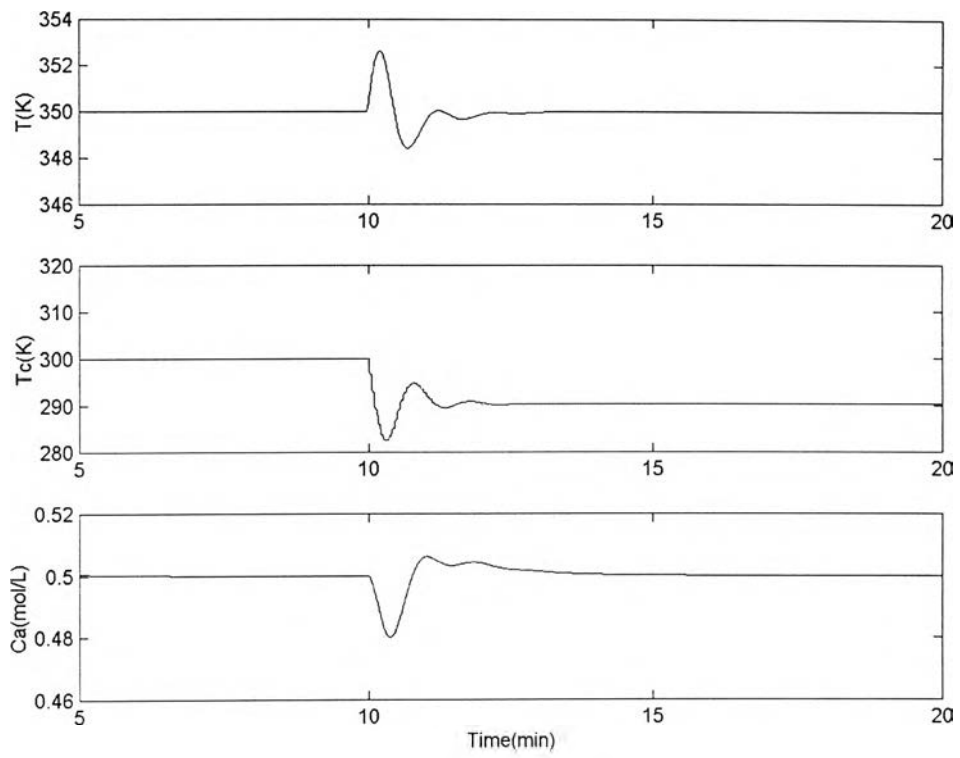
จากผลการจำลองการควบคุมความเข้มข้นของสาร A ที่ได้จากรายการที่ 4.4 พบว่าในกรณีแรกที่ T_{in} เป็นตัวแปรกรวนนั้นตัวควบคุมจีแอลซีให้ผลการควบคุมได้ดีที่สุดโดยให้ค่าไอเออีที่น้อยกว่าตัวควบคุมจีเอ็มซีเล็กน้อย ซึ่งทั้งจีแอลซีและจีเอ็มซีต่างก็ให้ผลการควบคุมได้ดีกว่าตัวควบคุมพีไอร่วมกับจีเอ็มซี ส่วนในกรณีหลังที่ Q_{in} เป็นตัวแปรกรวนระบบนั้นจีเอ็มซีให้ผลการควบคุมความเข้มข้นได้ดีกว่าจีแอลซี โดยทั้งจีเอ็มซีและจีแอลซีต่างก็ให้ผลการควบคุมได้ดีกว่าตัวควบคุมพีไอร่วมกับจีเอ็มซีเหมือนในกรณีแรก ซึ่งผลการจำลองการควบคุมความเข้มข้นในกรณีที่มีตัวแปรกรวนนี้แสดงไว้ในรูปที่ (4.8) ถึง (4.13)



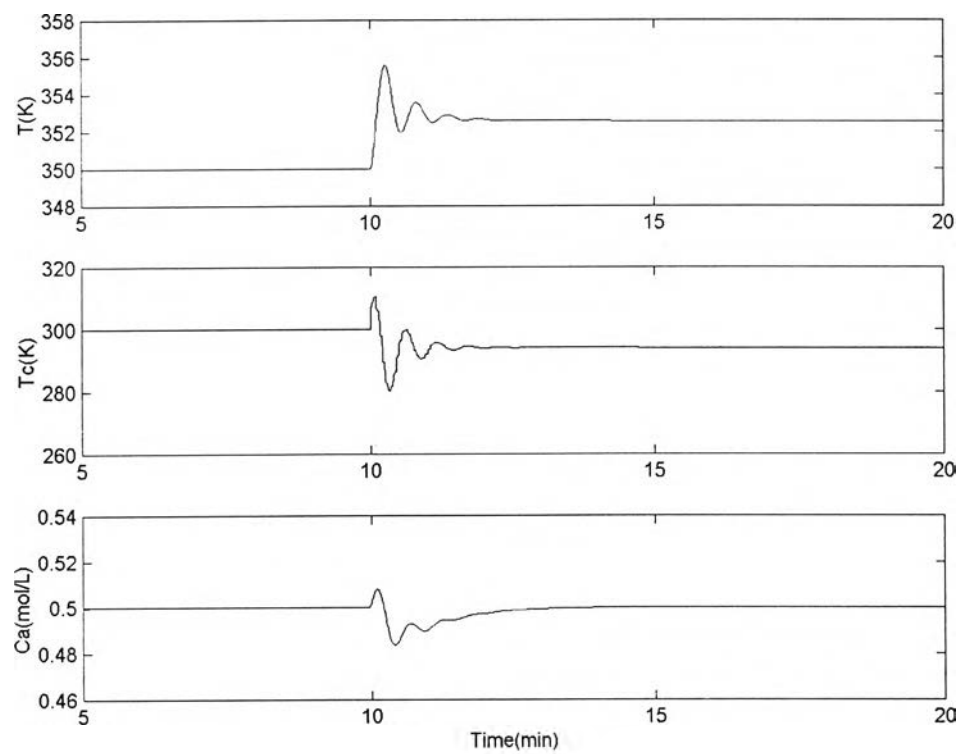
รูปที่ 4.8 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีเมื่อมี T_{in} เป็นตัวแปรบกวน



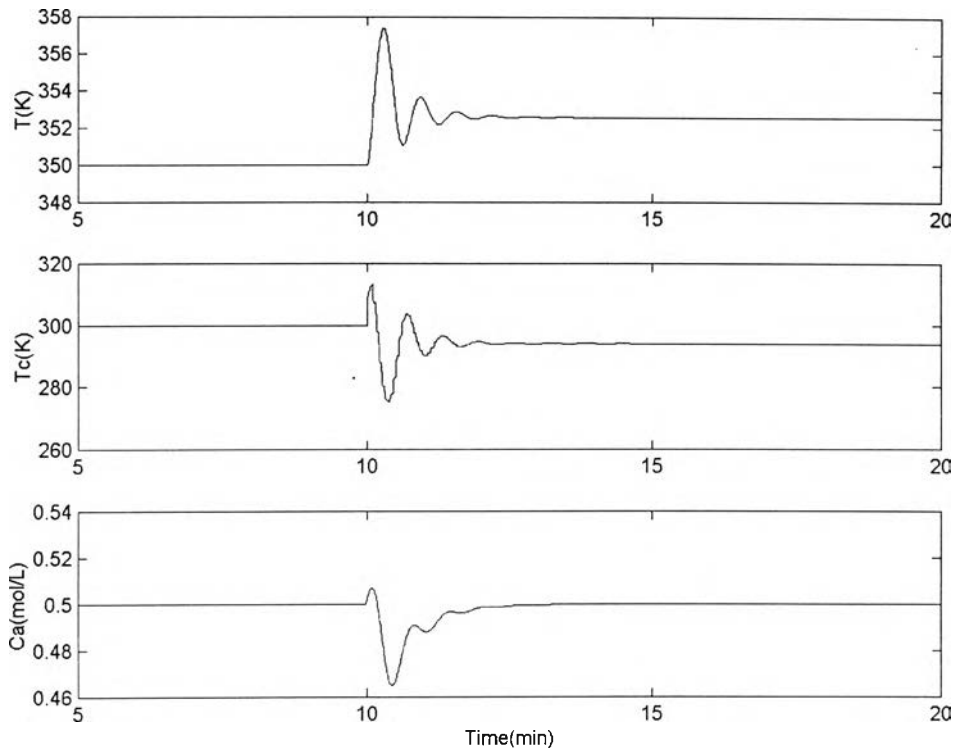
รูปที่ 4.9 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีแอลซีเมื่อมี T_{in} เป็นตัวแปรบกวน



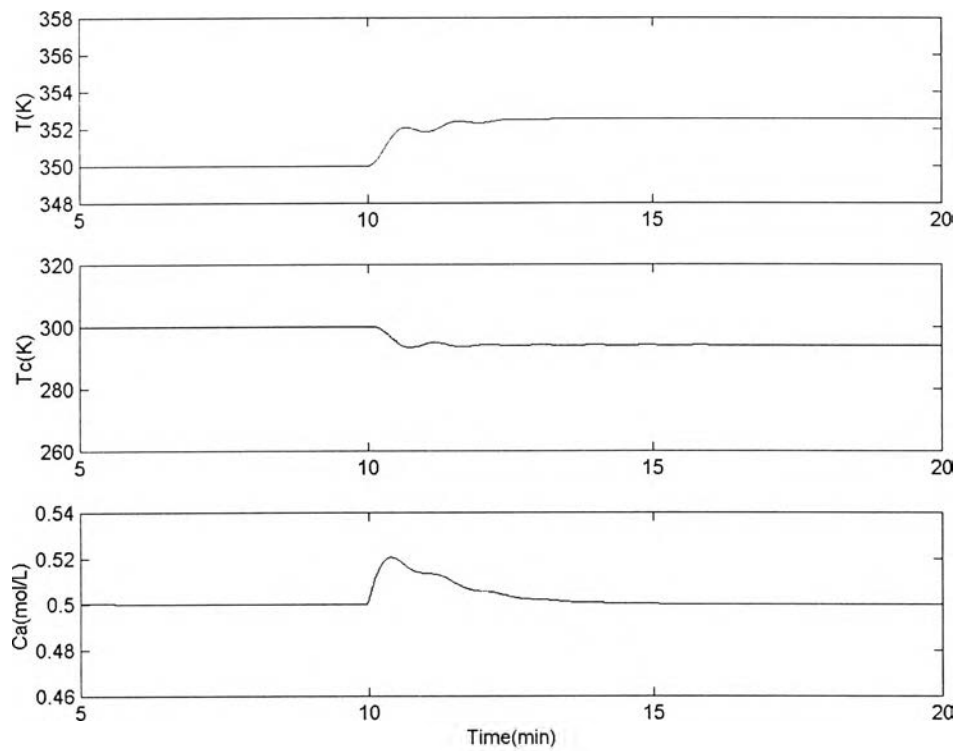
รูปที่ 4.10 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยพีไอ/จีสเอ็มซีเมื่อมี T_{in} เป็นตัวแปรรบกวน



รูปที่ 4.11 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีสเอ็มซีเมื่อมี Q_{in} เป็นตัวแปรรบกวน



รูปที่ 4.12 แสดงผลการควบคุมด้วยจีแอลซีเมื่อมี Q_{in} เป็นตัวแปรรบกวน



รูปที่ 4.13 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยพีไอ/จีเอ็มซีเมื่อมี Q_{in} เป็นตัวแปรรบกวน

จะเห็นว่าจีเอ็มซีและจีแอลซีซึ่งเป็นตัวควบคุมไม่เชิงเส้นนั้น เมื่อนำมาใช้ควบคุมระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นอย่างการควบคุมความเข้มข้นของเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวต่อเนื่องนี้ จะให้ผลการควบคุมได้ดีกว่าการใช้ตัวควบคุมเชิงเส้นแบบพีไอร่วมกับตัวควบคุมไม่เชิงเส้นแบบจีเอ็มซี ด้วยเหตุที่มาจากขั้นตอนการคำนวณค่าเป้าหมายให้กับตัวแปรควบคุมภายใน (T^{sp}) ด้วยตัวควบคุมพีไอ ในลูปนอกของการควบคุมนั้นทำได้ไม่ดีเท่ากับการใช้ตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้นเช่นจีเอ็มซีนั่นเอง นอกจากความไม่เป็นเชิงเส้นแล้ว ความสัมพันธ์ที่กระหว่างตัวแปรควบคุมและตัวแปรควบคุมภายในที่มีในตัวควบคุมจีเอ็มซีก็เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้การใช้จีเอ็มซีในทั้งสองลูปการควบคุมให้ผลที่ดีกว่าการใช้พีไอร่วมกับจีเอ็มซี

การควบคุมตัวแปรควบคุมภายในให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่เหมาะสมในแต่ละรอบการควบคุม นั้น สามารถทำให้ประยุกต์ใช้จีเอ็มซีกับการควบคุมความเข้มข้นซึ่งเป็นระบบที่มีค่าระดับสัมพัทธ์สองได้ ซึ่งเมื่อพิจารณาผลการควบคุมตามตารางที่ 4.4 นั้นพบว่าจีเอ็มซีให้สมรรถนะในการควบคุมความเข้มข้นได้ใกล้เคียงกับจีแอลซีมากในกรณีที่ใช้จีเอ็มซีทั้งสองตัวในลูปการควบคุม แต่สมรรถนะจะด้อยลงเมื่อใช้ตัวควบคุมพีไอแทนจีเอ็มซีในลูปนอกของการควบคุม

4.6 การทดสอบผลการควบคุมความเข้มข้นเมื่อมีความคลาดเคลื่อนระหว่างกระบวนการจริงกับแบบจำลอง

เนื่องจากทั้งจีเอ็มซีและจีแอลซีต่างก็เป็นตัวควบคุมที่อาศัยแบบจำลอง ดังนั้นในการคำนวณค่าการควบคุมจะมีความถูกต้องและให้สมรรถนะในการควบคุมที่ดีมากเมื่อแบบจำลองที่ใช้สามารถแทนกระบวนการจริงได้อย่างสมบูรณ์แบบ อย่างไรก็ตามโอกาสที่แบบจำลองนั้นจะมีความถูกต้องเหมือนกับกระบวนการจริงทุกประการนั้นมีน้อยมากเนื่องจากความซับซ้อนของกระบวนการ นอกจากนี้แล้วเมื่อกระบวนการดำเนินการไปได้ระยะเวลาหนึ่งแล้วค่าสมบัติบางอย่างอาจมีการเปลี่ยนแปลงไปได้ ทำให้ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ในแบบจำลองคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่แท้จริง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าสมบัติในแบบจำลองนี้อาจมีผลต่อเสถียรภาพของระบบได้ ดังนั้นจึงทำการทดสอบผลการควบคุมในกรณีที่ค่าสมบัติบางตัวในกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงไป

ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (k_0), ค่าความร้อนจากปฏิกิริยา (ΔH) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (UA) คือค่าพารามิเตอร์ 3 ตัวในแบบจำลองกระบวนการที่จะกำหนดให้มีความเบี่ยงเบนไปจากค่าที่ใช้ในสมการการควบคุม โดยจะทำการเบี่ยงเบนเมื่อค่าความเข้มข้นอยู่ที่ค่าเป้าหมายที่นาที่ที่ 10 ซึ่งในการทดสอบนี้จะแบ่งเป็น 6 กรณีด้วยกันคือ

- เมื่อ ΔH มีค่าเพิ่มขึ้น 20 %
- เมื่อ UA มีค่าเพิ่มขึ้น 20 %
- เมื่อ k_0 มีค่าเพิ่มขึ้น 20 %
- เมื่อ k_0 และ ΔH มีค่าเพิ่มขึ้น 20 %
- เมื่อ k_0 และ UA มีค่าเพิ่มขึ้น 20 %
- เมื่อ k_0 , UA และ ΔH มีค่าเพิ่มขึ้น 20 %

ซึ่งผลการจำลองการควบคุมในกรณีที่ค่าพารามิเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงไปแสดงไว้ในตารางที่ 4.5 ดังนี้

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นเมื่อมีความคลาดเคลื่อนของค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองกับกระบวนการจริง

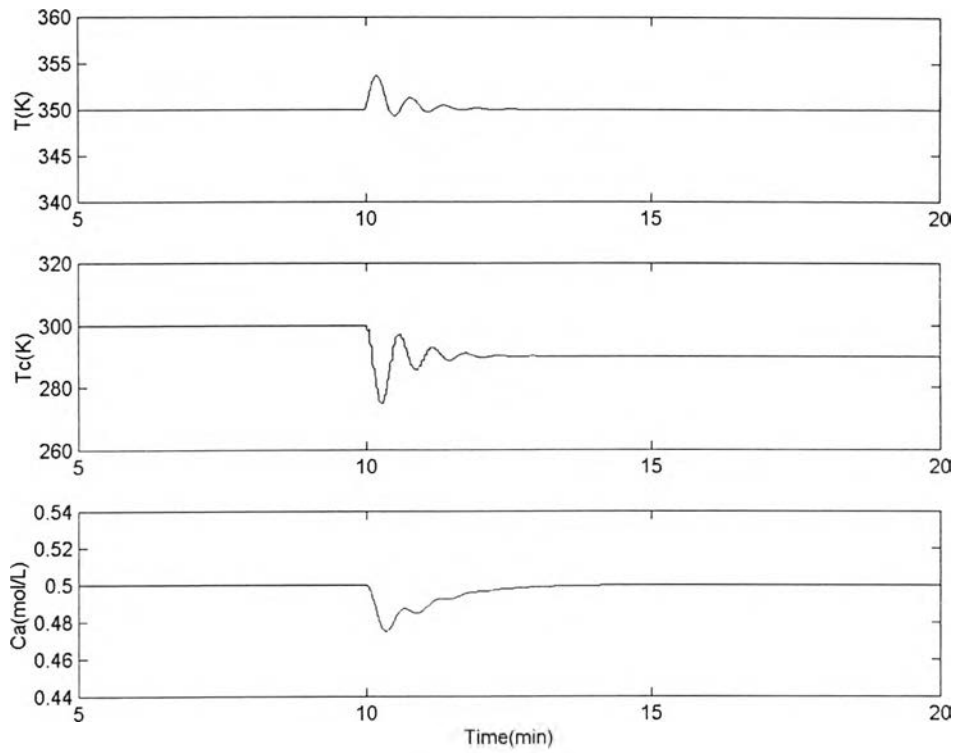
| ค่าพารามิเตอร์ที่มีความคลาดเคลื่อน | ผลการควบคุมในรูปของค่าไอเออี | | |
|--|------------------------------|---------|---------------|
| | จีเอ็มซี | จีแอลซี | พีไอ/จีเอ็มซี |
| ΔH เพิ่มขึ้น 20 % | 0.0249 | 0.0209 | 0.0672 |
| UA เพิ่มขึ้น 20 % | 0.0091 | 0.0084 | 0.0117 |
| k_0 เพิ่มขึ้น 20 % | 0.6835 | 0.0354 | 0.04 |
| k_0 และ ΔH เพิ่มขึ้น 20 % | - | - | - |
| k_0 และ UA เพิ่มขึ้น 20 % | 0.6704 | 0.0281 | 0.0303 |
| k_0 , UA และ ΔH เพิ่มขึ้น 20 % | 0.7055 | 0.0547 | - |

เมื่อพิจารณาจากการทดสอบในทั้ง 6 กรณีนั้นพบว่าจีแอลซีให้ผลการควบคุมได้ดีที่สุดซึ่งพิจารณาได้จากผลการควบคุมที่ให้ค่าไอเออีที่น้อยที่สุด ส่วนในกรณีของการควบคุมตัวแปรควบคุมภายในให้อยู่ในค่าที่เหมาะสมเพื่อควบคุมความเข้มข้นนั้น การใช้จีเอ็มซีในการควบคุมทั้งสองลูฟจะให้ผลดีกว่าการใช้จีเอ็มซีร่วมกับพีไอในกรณีแรกและกรณีที่สองเท่านั้น โดยในกรณีต่อมาที่มี

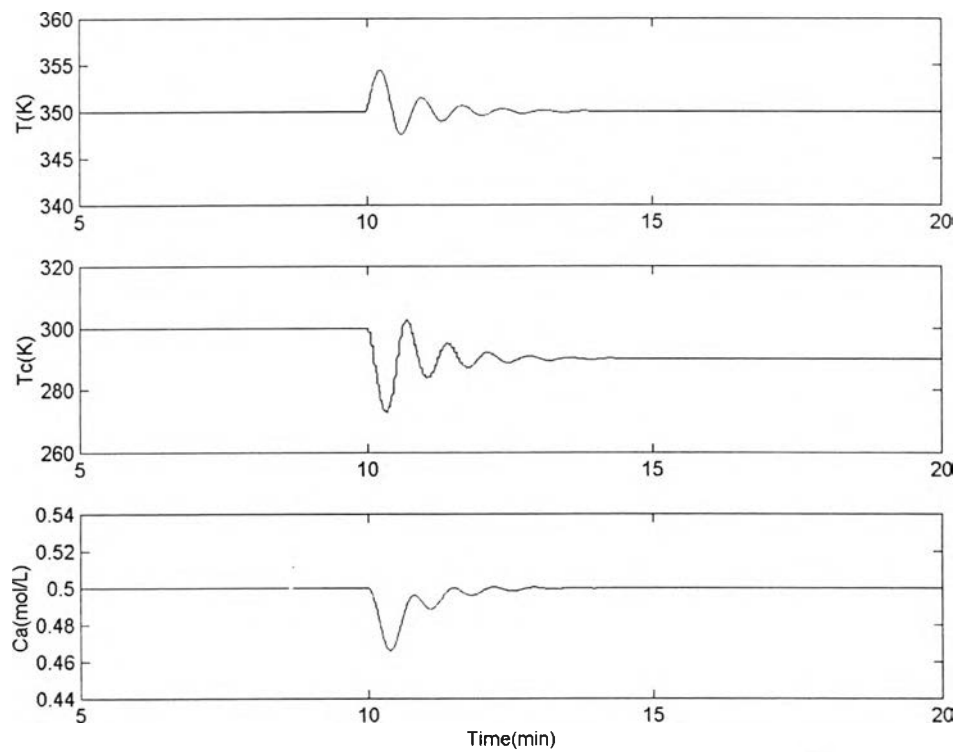
ความคลาดเคลื่อนของ k_0 เข้ามาเกี่ยวข้องนั้นจะพบว่าการใช้พีไอในลูพนอกและจีเอ็มซีในลูพใน นั้นจะให้ผลการควบคุมที่ดีกว่า เนื่องจากค่า k_0 มีผลโดยตรงต่อการคำนวณค่าเป้าหมายของตัวแปรควบคุมภายในของจีเอ็มซี ซึ่งถ้าค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในตัวควบคุมไม่ตรงกับความเป็นจริงจะทำให้ค่าเป้าหมายของตัวแปรควบคุมภายในที่คำนวณออกมาไม่เหมาะสมกับค่าที่ควรจะเป็นจึงเป็นเหตุให้ไม่สามารถทำให้ตัวแปรควบคุมเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ โดยในกรณีของการใช้ตัวควบคุมพีไอในลูพนอกเพื่อทำการคำนวณค่าเป้าหมายของตัวแปรควบคุมภายในนั้นอาศัยแต่เพียงค่าความผิดพลาดของตัวแปรควบคุมกับค่าเป้าหมายเท่านั้นจึงทำให้ผลกระทบจากความคลาดของกระบวนการจริงกับแบบจำลองมีไม่มากนัก

ในส่วนของจีแอลซีซึ่งเป็นตัวควบคุมที่อาศัยแบบจำลองกระบวนการเช่นเดียวกับจีเอ็มซี นั้นให้ผลการควบคุมความเข้มข้นในกรณีที่มีความคลาดเคลื่อนระหว่างกระบวนการจริงกับแบบจำลองได้ดีกว่าจีเอ็มซี โดยถ้าพิจารณาจากโครงสร้างการควบคุมของตัวควบคุมทั้งสองแล้วจะเห็นได้ว่าจีแอลซีนั้นมีลูพการควบคุมเพียงลูพเดียวแต่จีเอ็มซีจะมีลูพการควบคุมสองลูพ ซึ่งลูพการควบคุมเพียงลูพเดียวของจีแอลซีนั้นอาจจะทำให้การชดเชยความผิดพลาดระหว่างกระบวนการจริงกับแบบจำลองโดยพจน์อินทิกรัลนั้นมีประสิทธิภาพได้มากกว่าการมีลูพการควบคุมสองลูพก็เป็นได้ อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์ถึงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจูนจีเอ็มซีในลูพนอกของการควบคุมแล้วพบว่าพจน์ k_{12} ที่คูณอยู่กับพจน์อินทิกรัลที่เป็นตัวชดเชยความผิดพลาดระหว่างกระบวนการจริงกับแบบจำลองนั้นมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ k_{11} เป็นผลให้การชดเชยความผิดพลาดดังกล่าวมีผลน้อยลง ดังนั้นความผิดพลาดที่เกิดจากค่า k_0 จึงไม่อาจชดเชยได้นั่นเอง

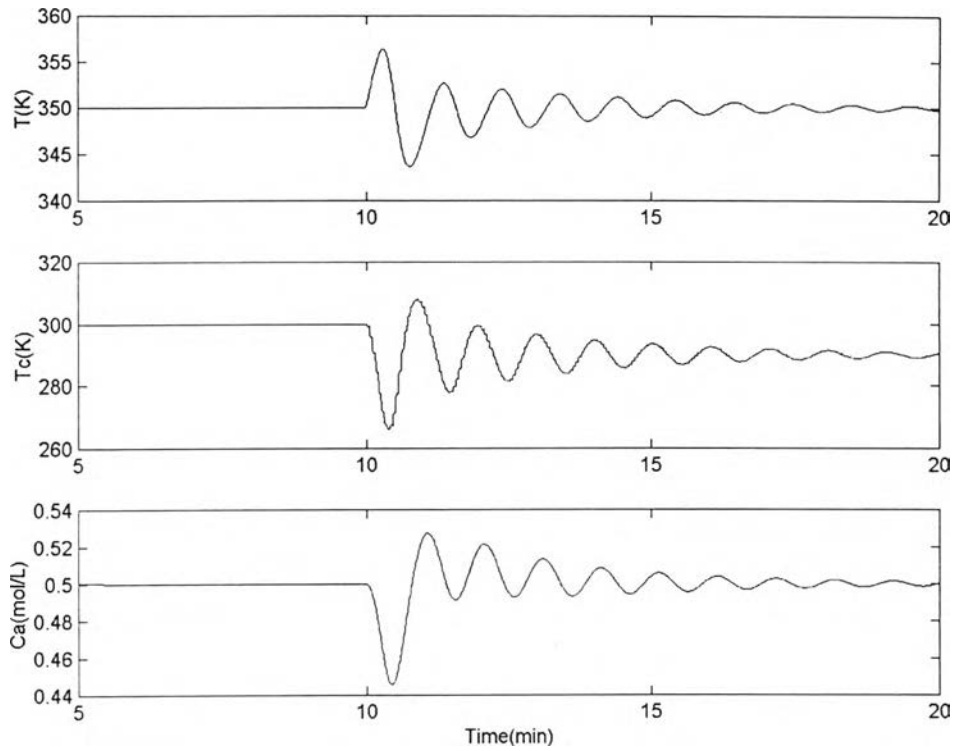
จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ (4.23), (4.24), (4.25) และ (4.31) จะเห็นได้ว่า กรณีที่มีการเพิ่มขึ้นของค่า k_0 และ ΔH พร้อมกันนั้น จะทำให้เกิดการคายความร้อนขึ้นอย่างรุนแรงเป็นผลให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยที่ตัวควบคุมทั้งสามแบบไม่สามารถทำการควบคุมให้อุณหภูมิและความเข้มข้นเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เลย ส่วนกรณีที่มีการเพิ่มขึ้นของค่า k_0 , ΔH และ UA พร้อมกันนั้นตัวควบคุมจีเอ็มซีและจีแอลซีสามารถควบคุมให้ค่าอุณหภูมิและความเข้มข้นเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะที่ดีกว่าของตัวควบคุมทั้งสอง



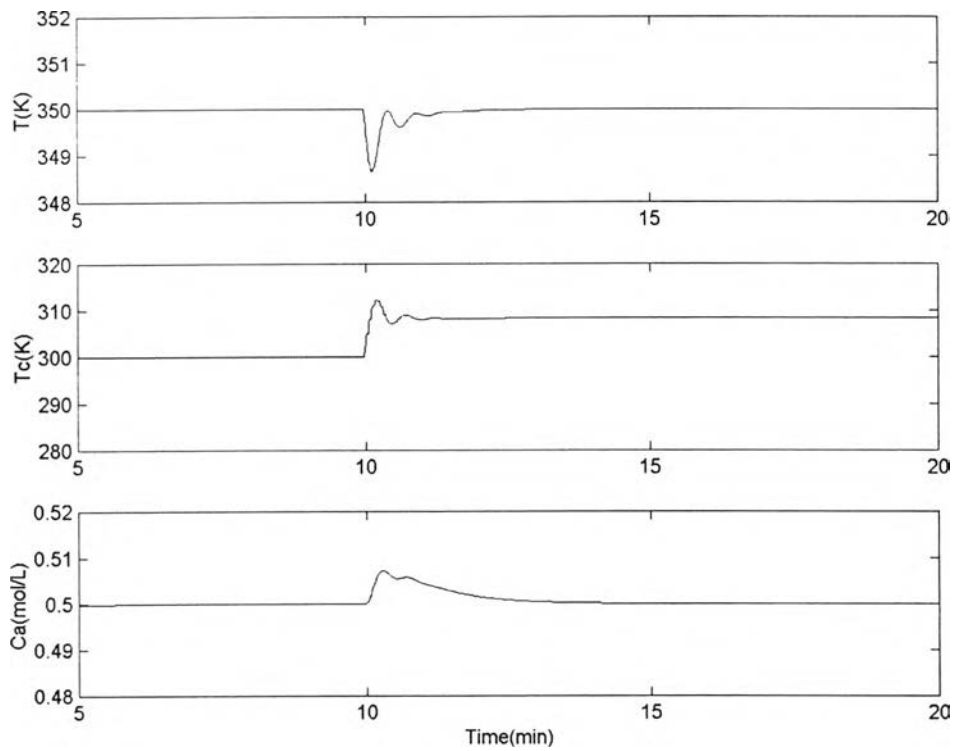
รูปที่ 4.14 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยฟัซซี่เมื่อ ΔH มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์



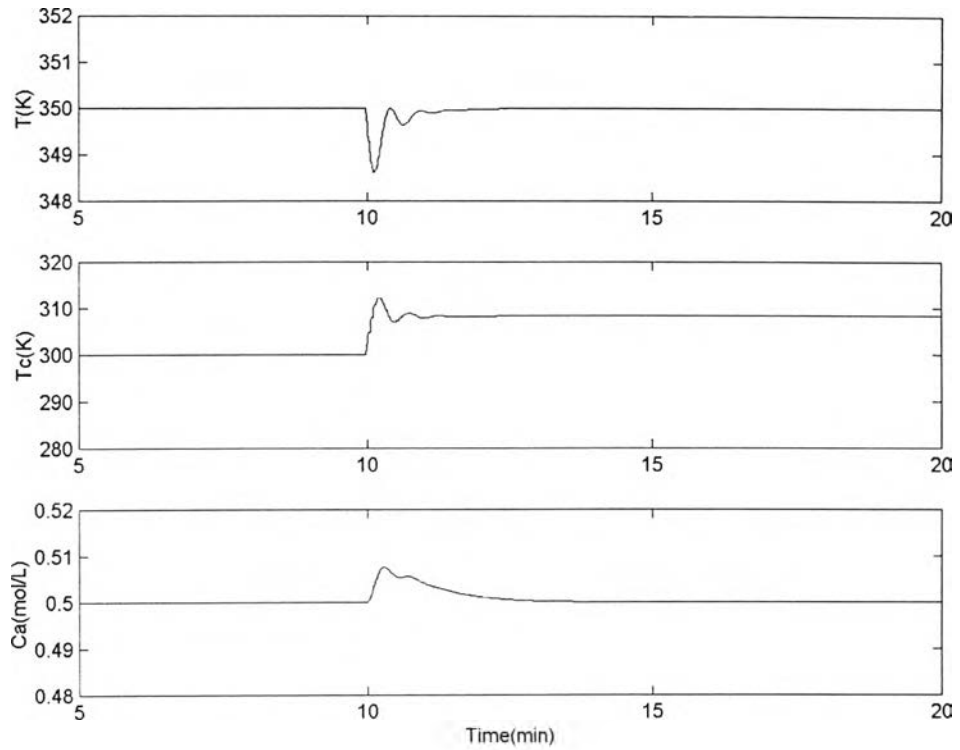
รูปที่ 4.15 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยฟัซซี่เมื่อ ΔH มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์



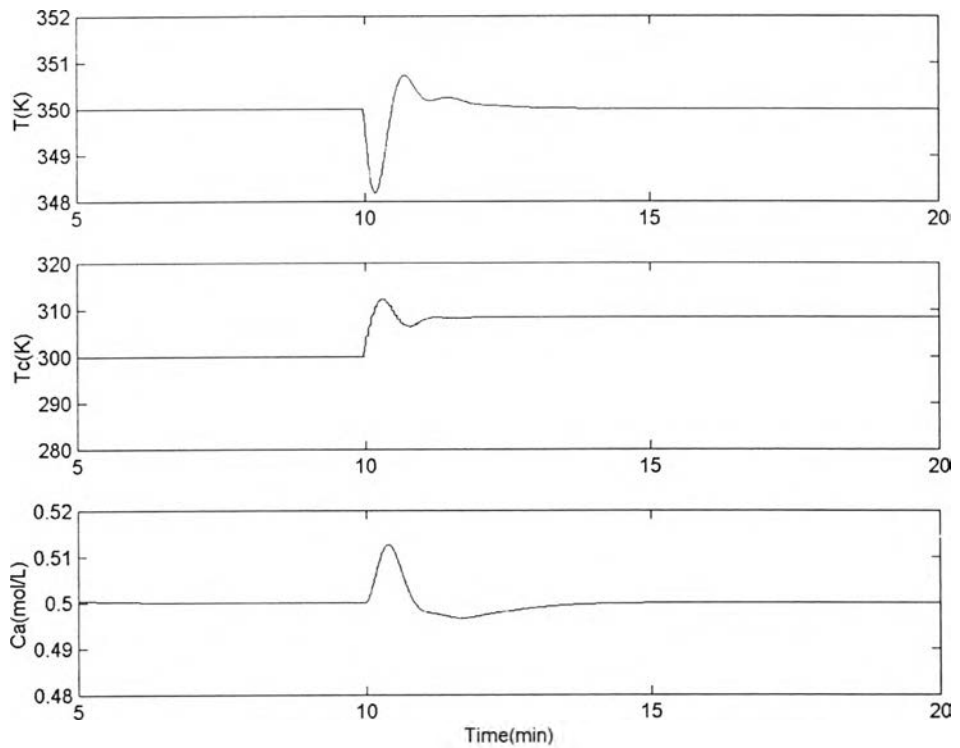
รูปที่ 4.16 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยพีไอ/จีเอ็มซีเมื่อ ΔH มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์



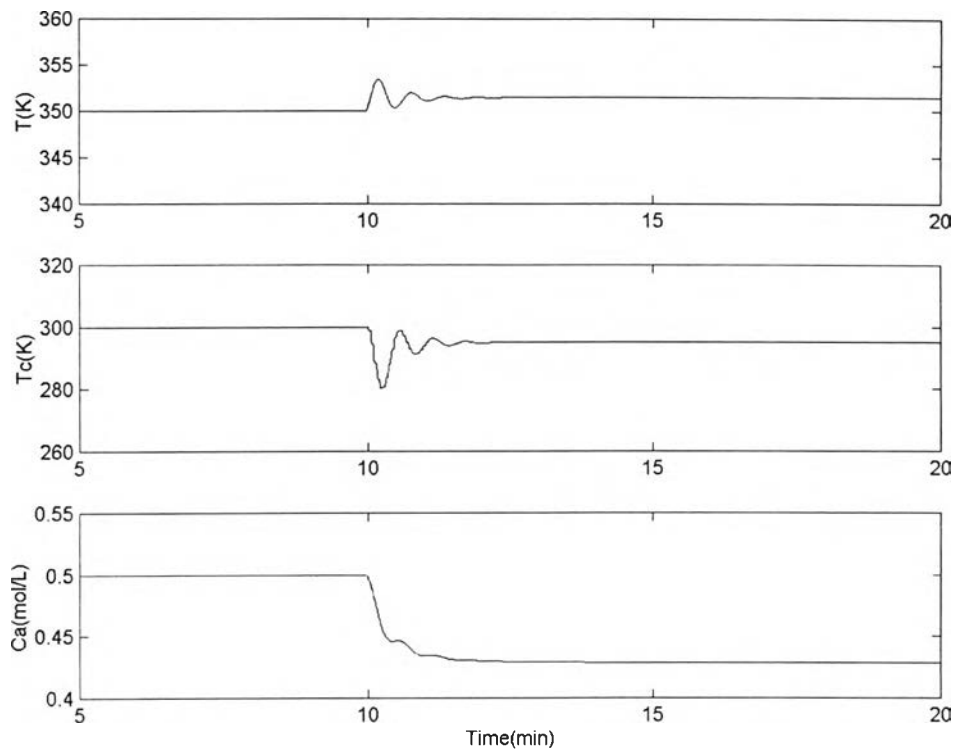
รูปที่ 4.17 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีเมื่อ UA มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์



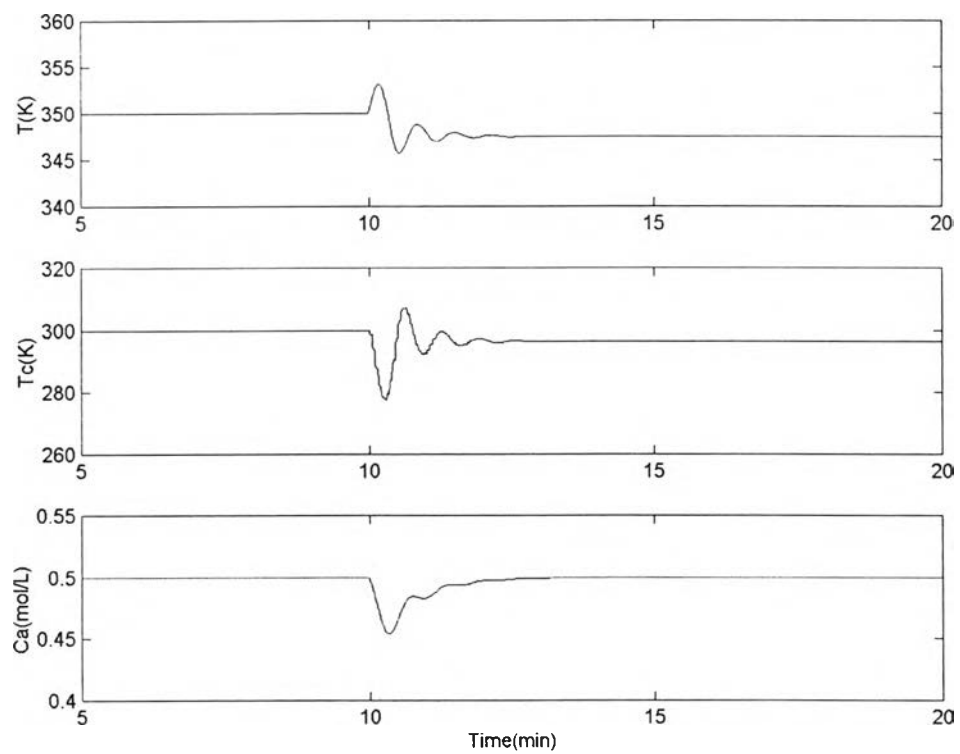
รูปที่ 4.18 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีแอลซีเมื่อ UA มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์



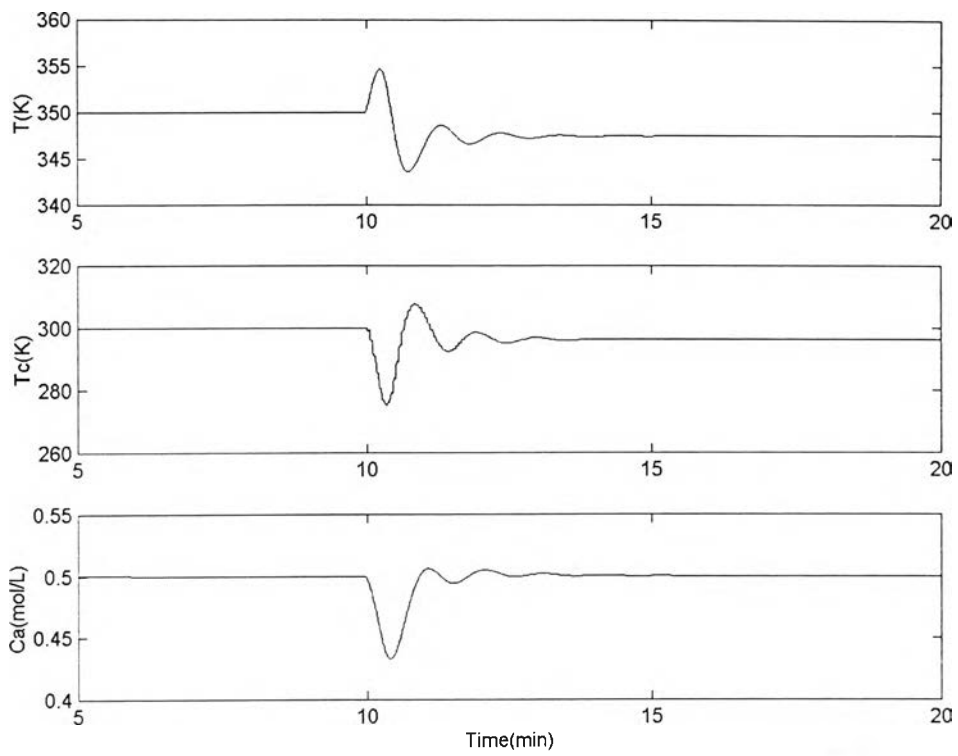
รูปที่ 4.19 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยพีไอ/จีเอ็มซีเมื่อ UA มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์



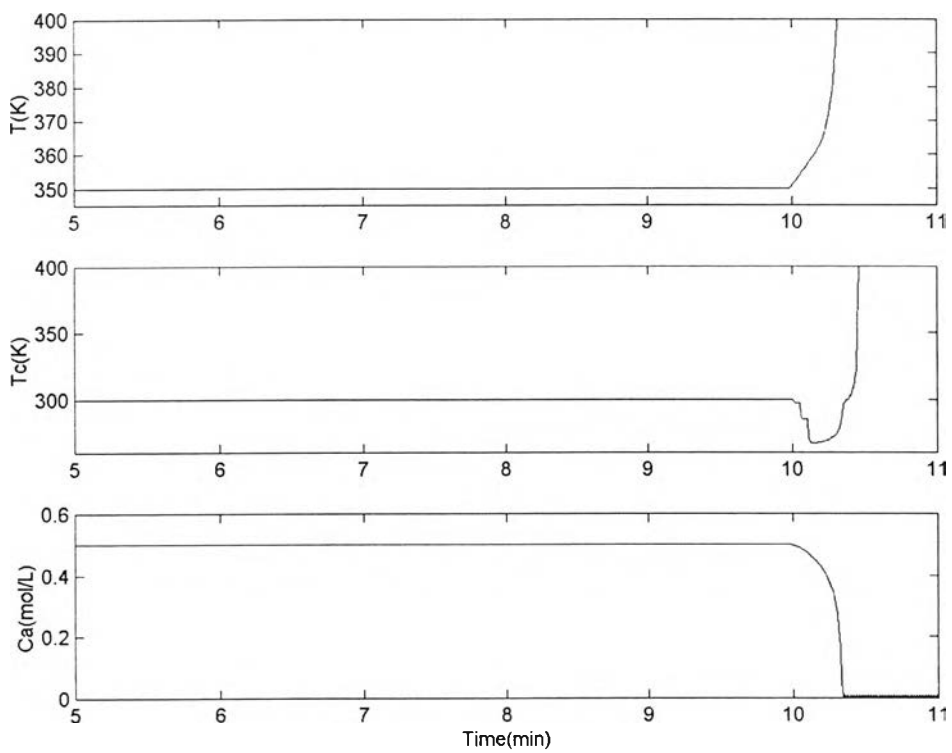
รูปที่ 4.20 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีเมื่อ k_0 มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์



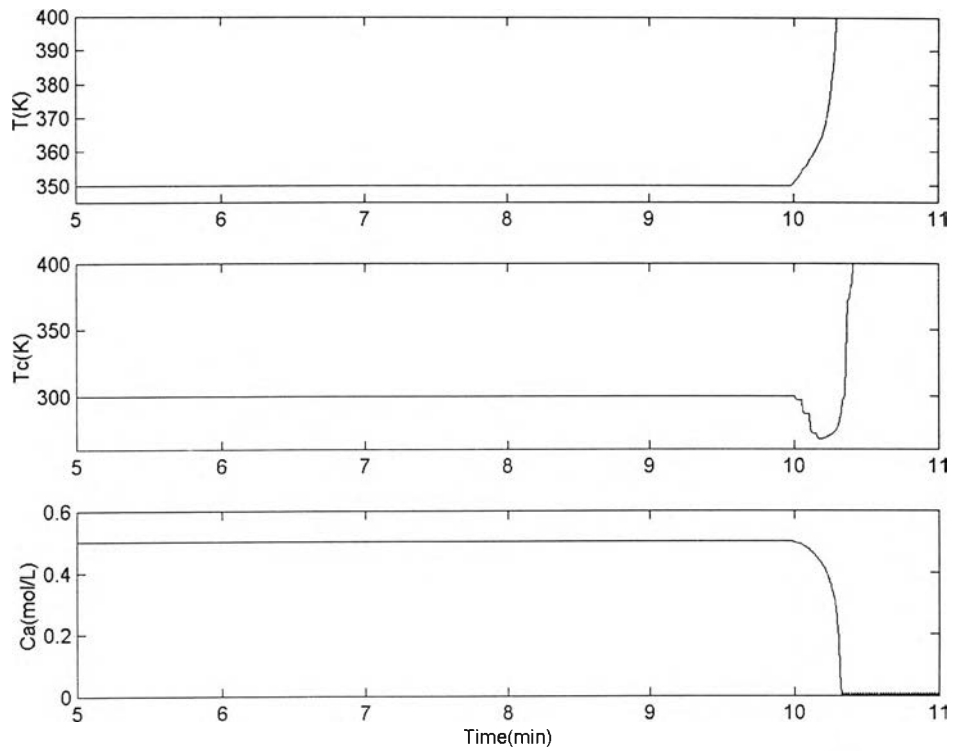
รูปที่ 4.21 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีแอลซีเมื่อ k_0 มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์



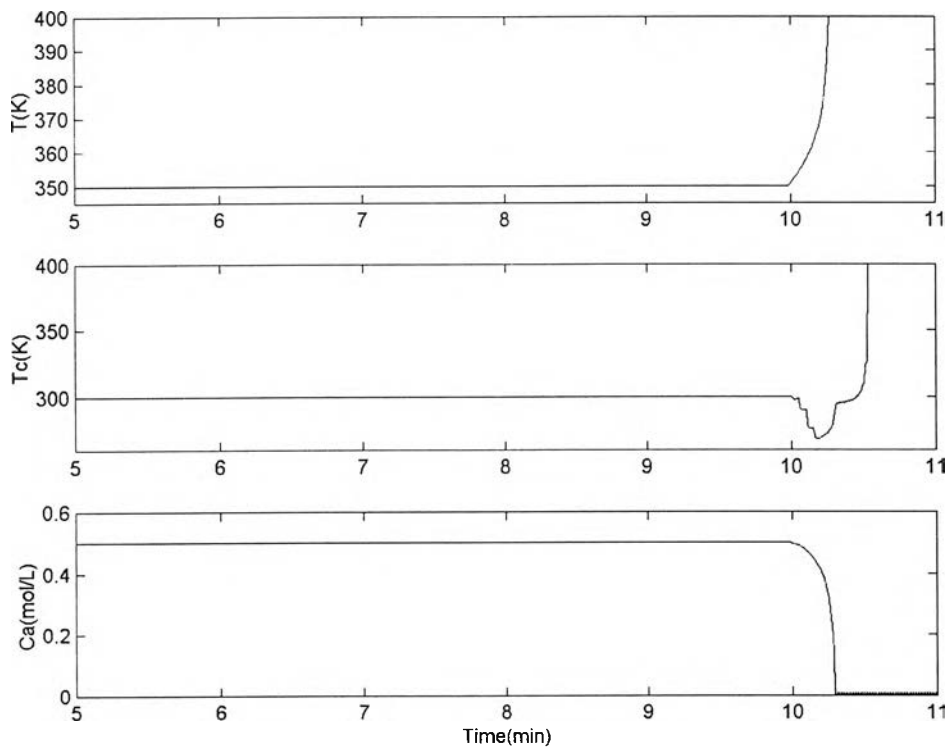
รูปที่ 4.22 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยพีไอ/จีเอ็มซีเมื่อ k_0 มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์



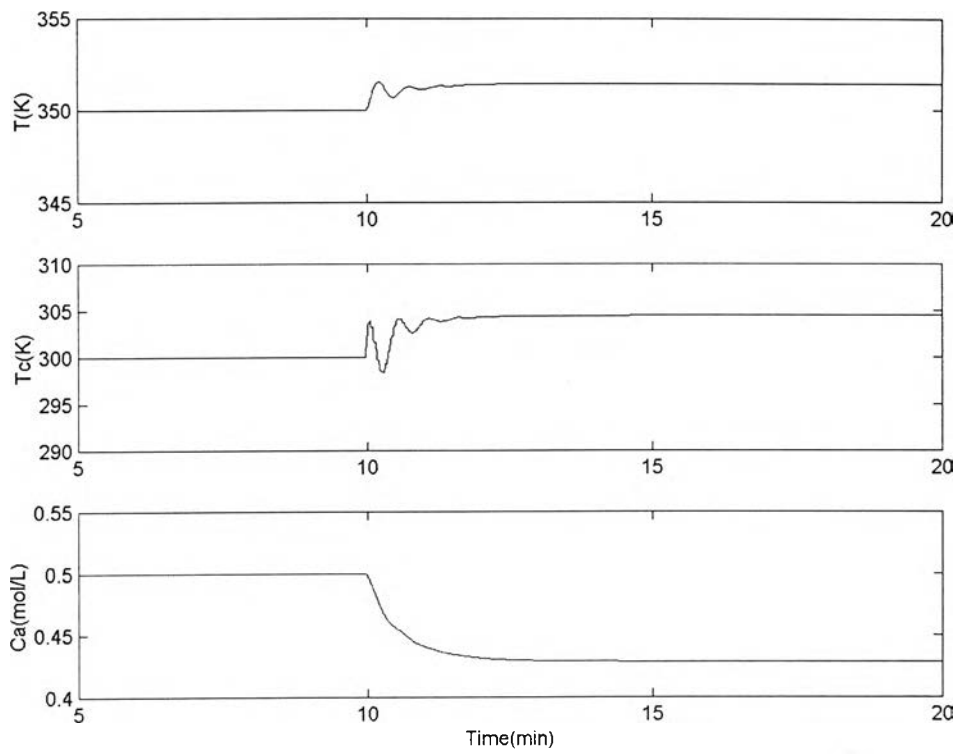
รูปที่ 4.23 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีเมื่อ k_0 และ ΔH มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์



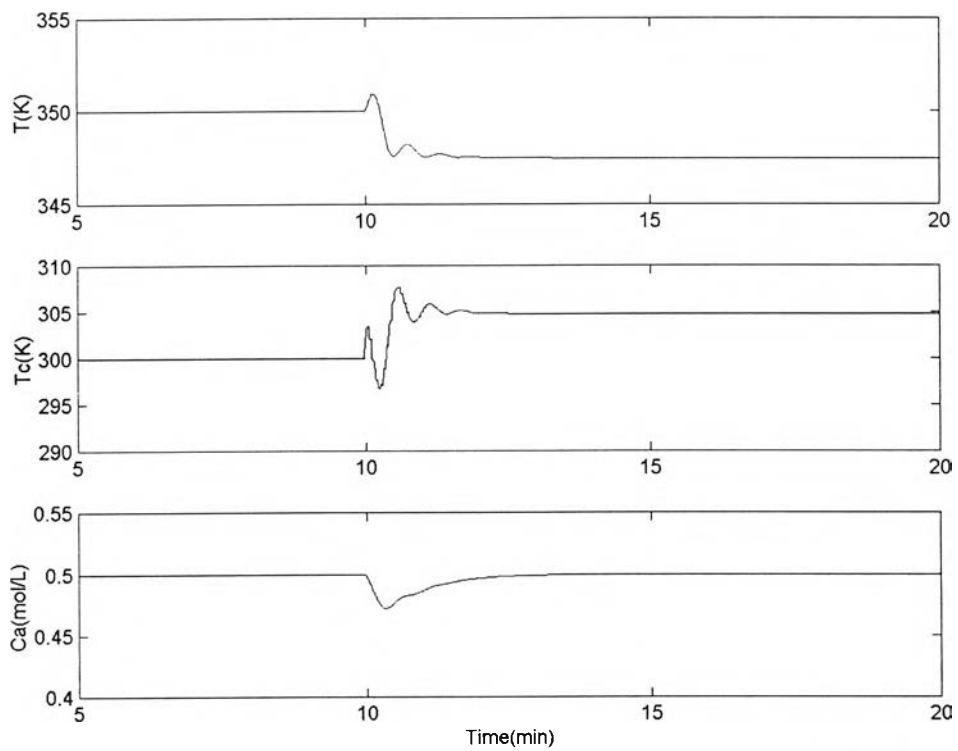
รูปที่ 4.24 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีแอลซีเมื่อ k_0 และ ΔH มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์



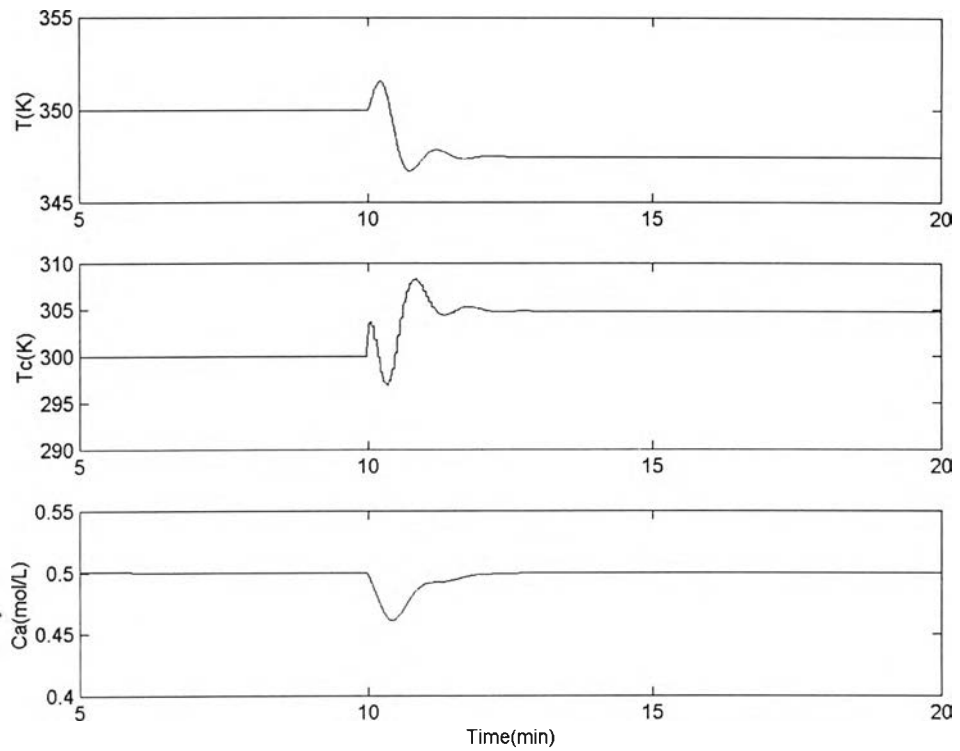
รูปที่ 4.25 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยฟัไอ/จีเอ็มซีเมื่อ k_0 และ ΔH มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์



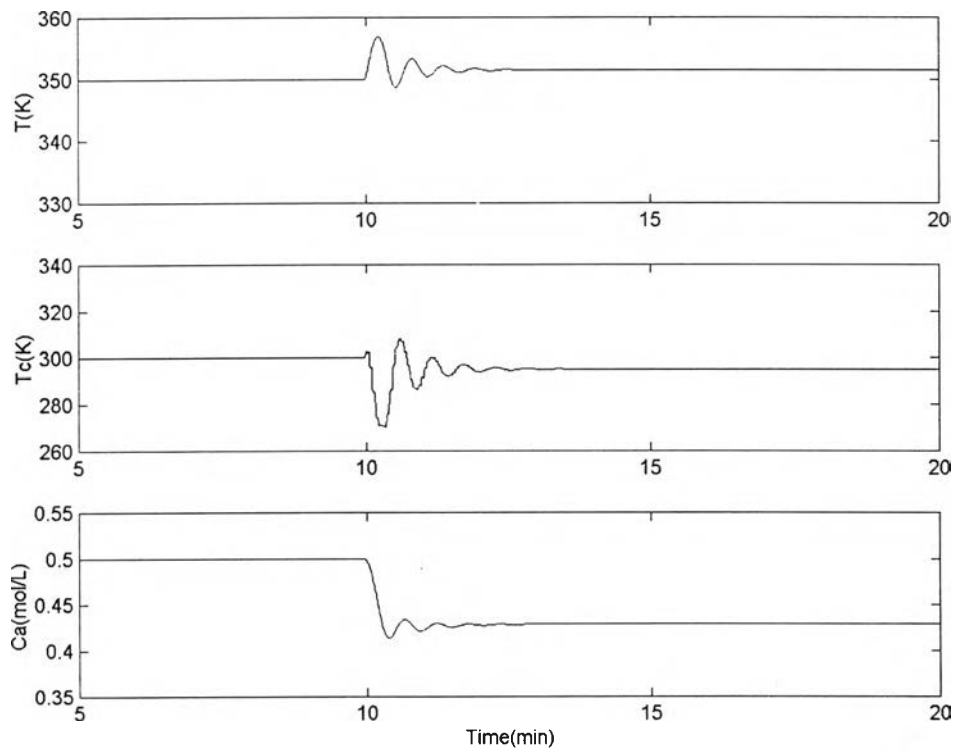
รูปที่ 4.26 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีเมื่อ k_0 และ UA มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์



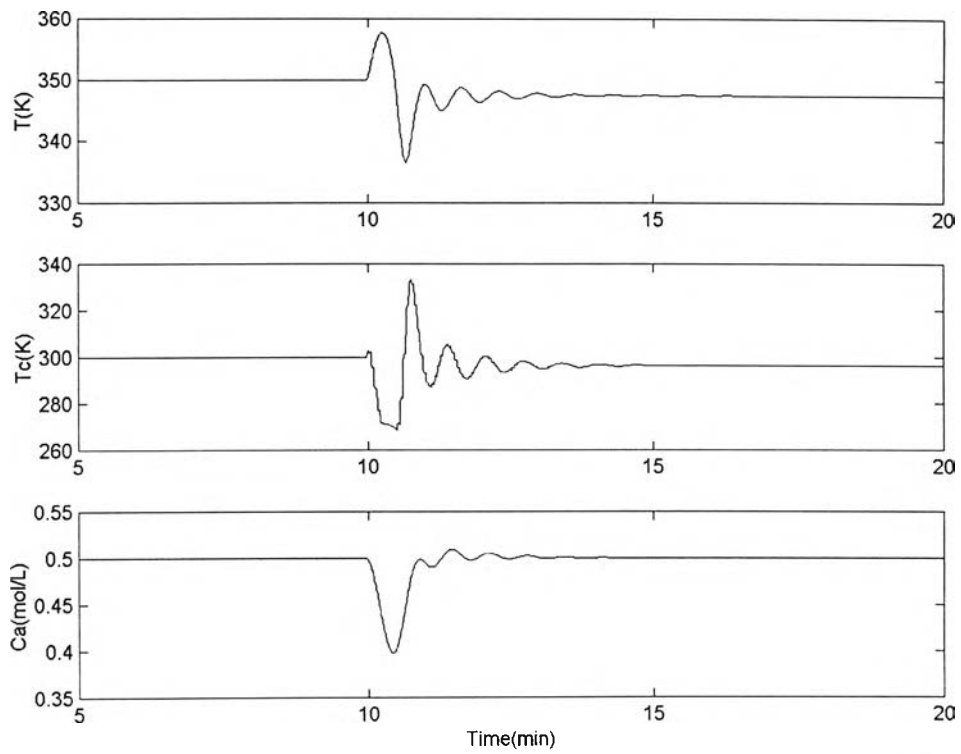
รูปที่ 4.27 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีแอลซีเมื่อ k_0 และ UA มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์



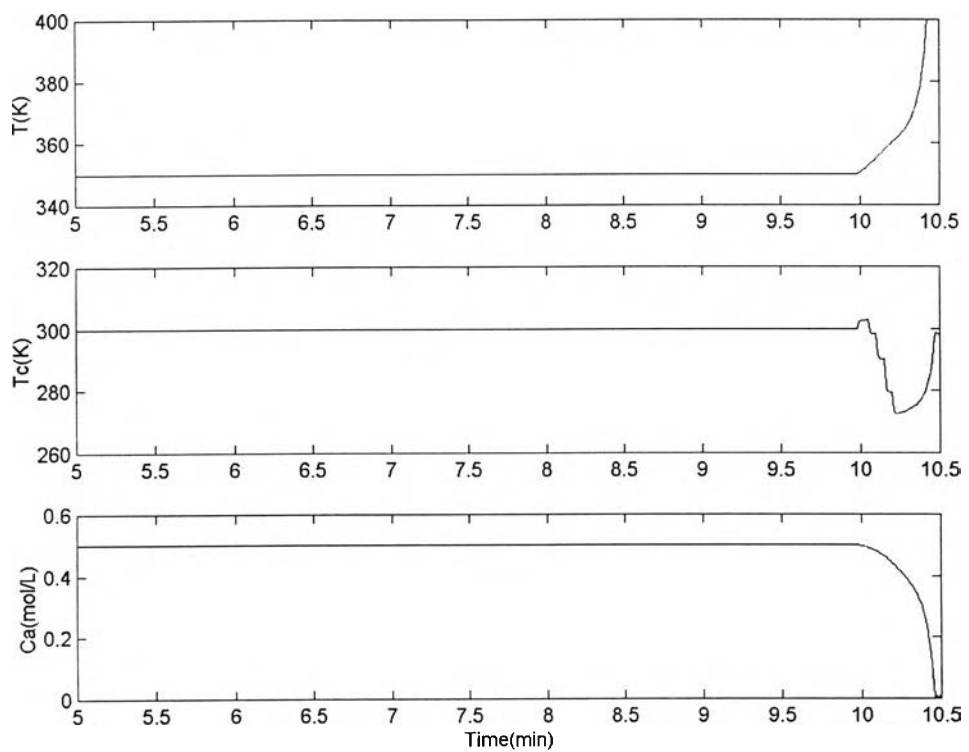
รูปที่ 4.28 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยพีไอ/จีเอ็มซีเมื่อ k_0 และ UA มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.29 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีเมื่อ k_0 , ΔH และ UA มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.30 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีแอลซีเมื่อ k_0 , ΔH และ UA มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.31 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยพีไอ/จีเอ็มซีเมื่อ k_0 , ΔH และ UA มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์

4.6.1 การทดสอบผลการควบคุมความเข้มข้นของอาร์จีเอ็มซีและจีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองกาลมานในกรณีที่มีความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองกับกระบวนการจริง

อาร์จีเอ็มซีและจีเอ็มซีร่วมกับตัวประมาณค่าพารามิเตอร์นั้นเป็นเทคนิคการควบคุมแบบจีเอ็มซีที่ให้สมรรถนะในการควบคุมที่ดีแม้ในกรณีที่มีความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองกับกระบวนการจริงดังที่ Lundberg และ Benzanson (1990) และ Rani และ Gangiah (1991) กล่าวไว้ ดังนั้นวิธีการดังกล่าวจึงถูกนำมาใช้ร่วมกับวิธีการควบคุมตัวแปรควบคุมภายในในการควบคุมความเข้มข้นของสาร A ในกรณีที่มีความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองกับกระบวนการจริง ซึ่งในการทดสอบนี้จะทดสอบเฉพาะในกรณีที่มีความคลาดเคลื่อนของค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเข้ามาเกี่ยวข้องเท่านั้น เพราะในการศึกษาจีเอ็มซีเพื่อควบคุมความเข้มข้นในกรณีดังกล่าวให้ผลการควบคุมได้ไม่ดี โดยตัวประมาณค่าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ก็คือตัวกรองกาลมาน ซึ่งอาร์จีเอ็มซีและจีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองกาลมานนี้จะนำมาเปรียบเทียบกับจีแอลซีร่วมกับตัวกรองกาลมานเพื่อศึกษาว่าวิธีการควบคุมดังกล่าวให้ผลการควบคุมได้ดีเพียงไร

ในส่วนของค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในสมการการคำนวณของตัวกรองกาลมานได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 โดยกำหนดตัวแปรที่ให้ตัวกรองกาลมานทำการประมาณ (X) มี 6 ตัวดังนี้

$$x = [C_A \ T \ T_c \ \Delta H \ UA \ k_0]^T$$

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในตัวกรองกาลมาน

| P | Q | R |
|---------------|------------------------------|---------------|
| P(1,1) = 100 | Q(1,1) = 0.01 | R(1,1) = 0.01 |
| P(2,2) = 100 | Q(2,2) = 0.01 | R(2,2) = 0.01 |
| P(3,3) = 100 | Q(3,3) = 0.11 | R(3,3) = 0.01 |
| P(4,4) = 0.01 | Q(4,4) = 10^9 | |
| P(5,5) = 0.01 | Q(5,5) = 10^5 | |
| P(6,6) = 0.01 | Q(6,6) = 21×10^{21} | |

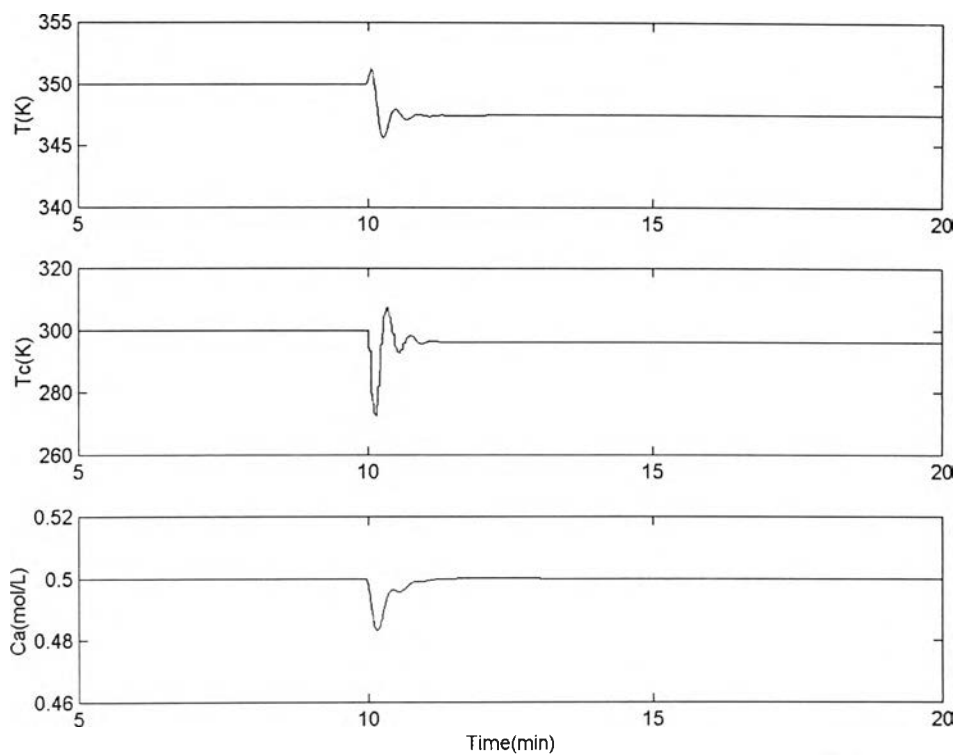
โดยผลการควบคุมความเข้มข้นในกรณีที่มีความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองกับกระบวนการจริงของตัวควบคุมอาร์จีเอ็มซี , จีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมานและจีแอลซีร่วมกับตัวกรองคาลมานแสดงไว้ในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการควบคุมความเข้มข้นขณะมีความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองเมื่อใช้ อาร์จีเอ็มซี , จีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมานและจีแอลซีร่วมกับตัวกรองคาลมาน

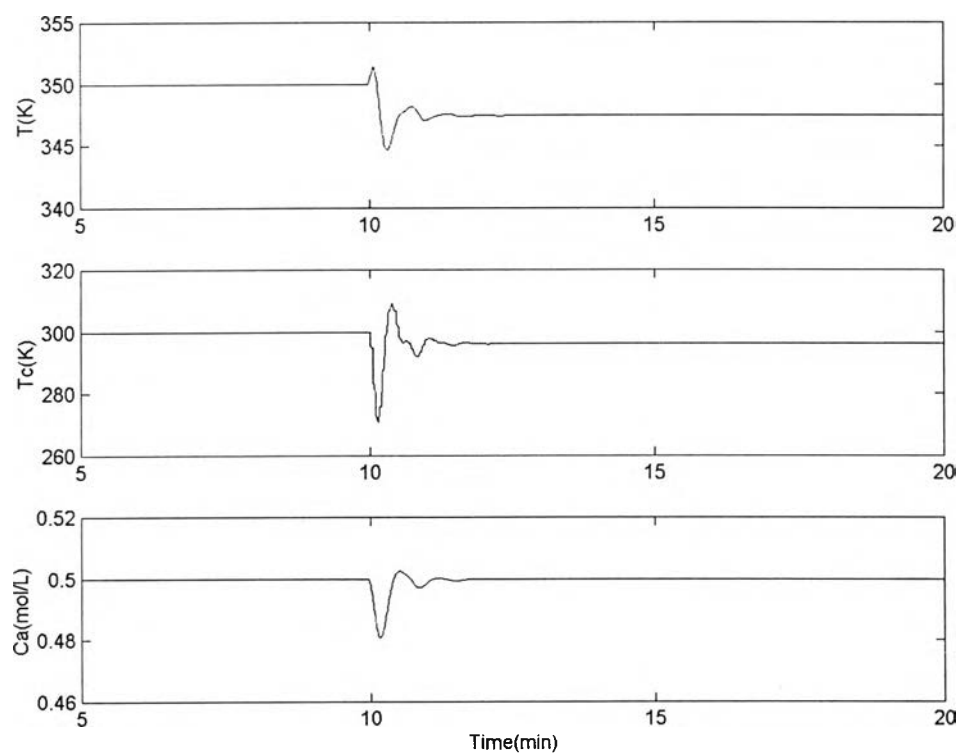
| ค่าพารามิเตอร์ที่มีความผิดพลาด | ผลการควบคุมในรูปของค่าไอเออี | | |
|--------------------------------|------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| | อาร์จีเอ็มซี | จีเอ็มซีร่วมกับ ตัวกรองคาลมาน | จีแอลซีร่วมกับ ตัวกรองคาลมาน |
| k_0 เพิ่ม 20 % | 0.006 | 0.006 | 0.0082 |
| $k_0, \Delta H$ เพิ่ม 20 % | 0.029 | 0.0294 | 0.1119 |
| k_0, UA เพิ่ม 20 % | 0.0049 | 0.0225 | 0.013 |
| $k_0, \Delta H, UA$ เพิ่ม 20 % | 0.016 | 0.0195 | 0.0264 |

จากตารางที่ 4.5 และ 4.7 พบว่าอาร์จีเอ็มซี, จีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมาน และจีแอลซีร่วมกับตัวกรองคาลมานสามารถควบคุมให้ค่าความเข้มข้นเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการได้ด้วยผลการควบคุมที่ดีโดยทั้งสามวิธีนี้ให้ผลการควบคุมในรูปค่าไอเออีที่น้อยกว่าตัวควบคุมพีไอร่วมกับจีเอ็มซีในทุกกรณีที่ทำทดสอบ ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบจีเอ็มซีและจีแอลซีถ้าใช้ร่วมกับตัวประมาณค่าอย่างตัวกรองคาลมานจะสามารถให้ผลการควบคุมระบบที่มีค่าระดับสัมพัทธ์สองที่ดีได้แม้ในกรณีที่มีความคลาดเคลื่อนระหว่างแบบจำลองกับกระบวนการจริง ส่วนในกรณีที่มีการชดเชยความคลาดเคลื่อนระหว่างแบบจำลองกับกระบวนการจริงไว้ในสมการที่กำหนดผลตอบสนองของตัวแปรควบคุมที่ต้องการของจีเอ็มซี (อาร์จีเอ็มซี) ก็ให้ผลการควบคุมที่ดีเยี่ยมเช่นกัน

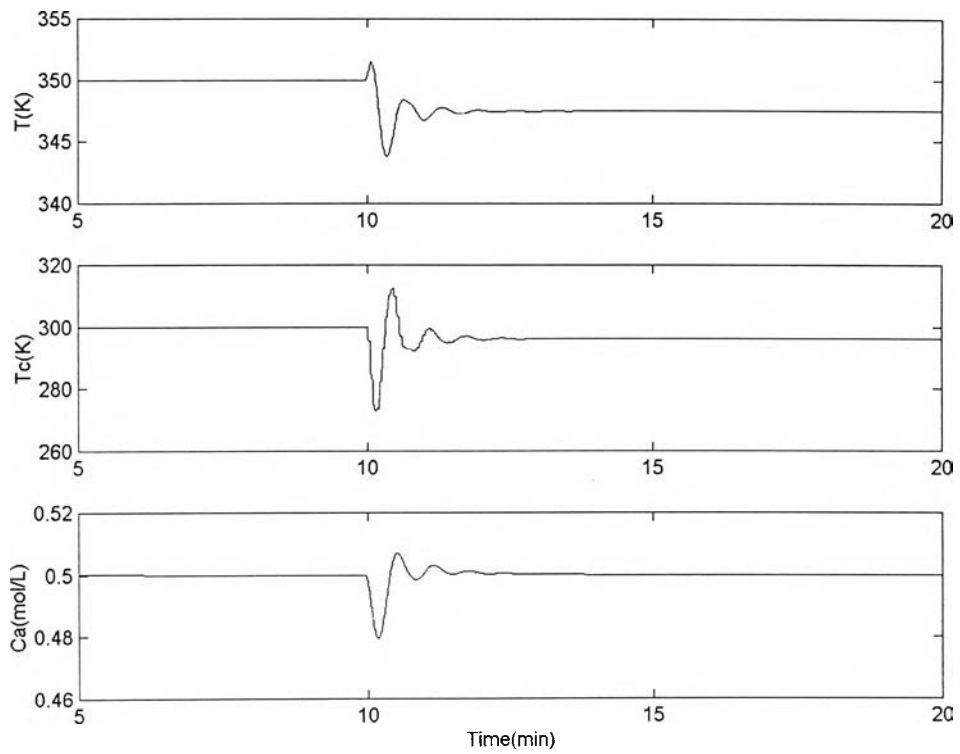
จากผลการควบคุมความเข้มข้นที่ได้จากตารางที่ 4.7 พบว่าอาร์จีเอ็มซีและจีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมานนั้นให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าจีแอลซีร่วมกับตัวกรองคาลมาน ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่าวิธีการควบคุมตัวแปรควบคุมภายในนี้ใช้ได้ดีกับอาร์จีเอ็มซีและจีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมานด้วยในกรณีที่มีความคลาดเคลื่อนระหว่างแบบจำลองและกระบวนการจริง โดยรูปแสดงผลการควบคุมความเข้มข้นที่ได้ตามตารางที่ 4.7 นั้นแสดงไว้ในรูปที่ (4.32) ถึง (4.43)



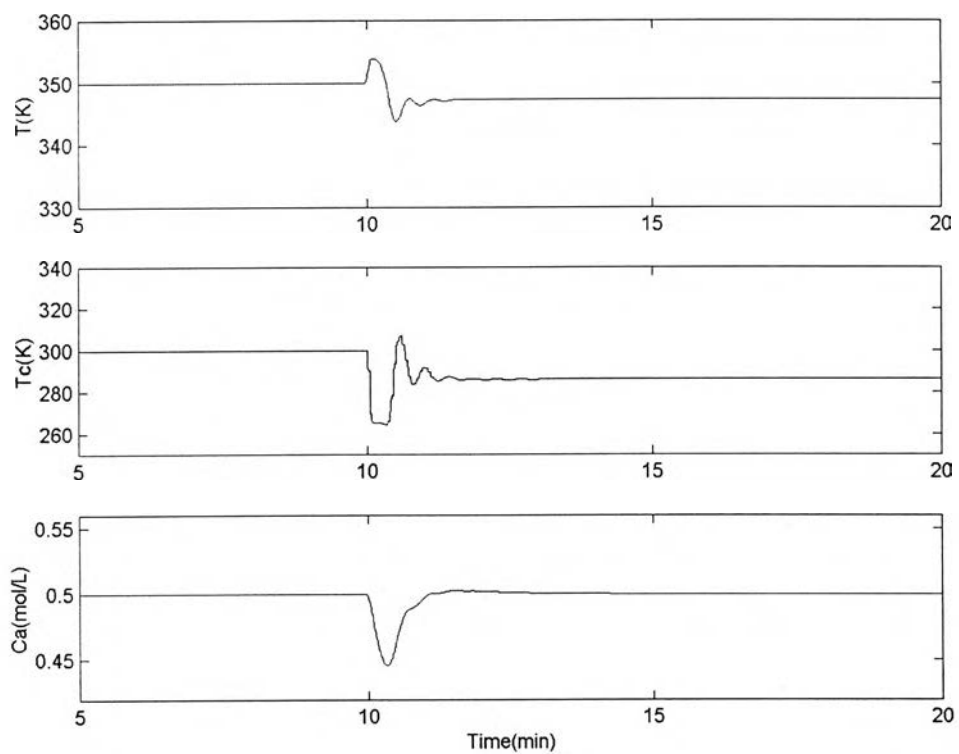
รูปที่ 4.32 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยอาร์จีเอ็มซีเมื่อ k_0 มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์



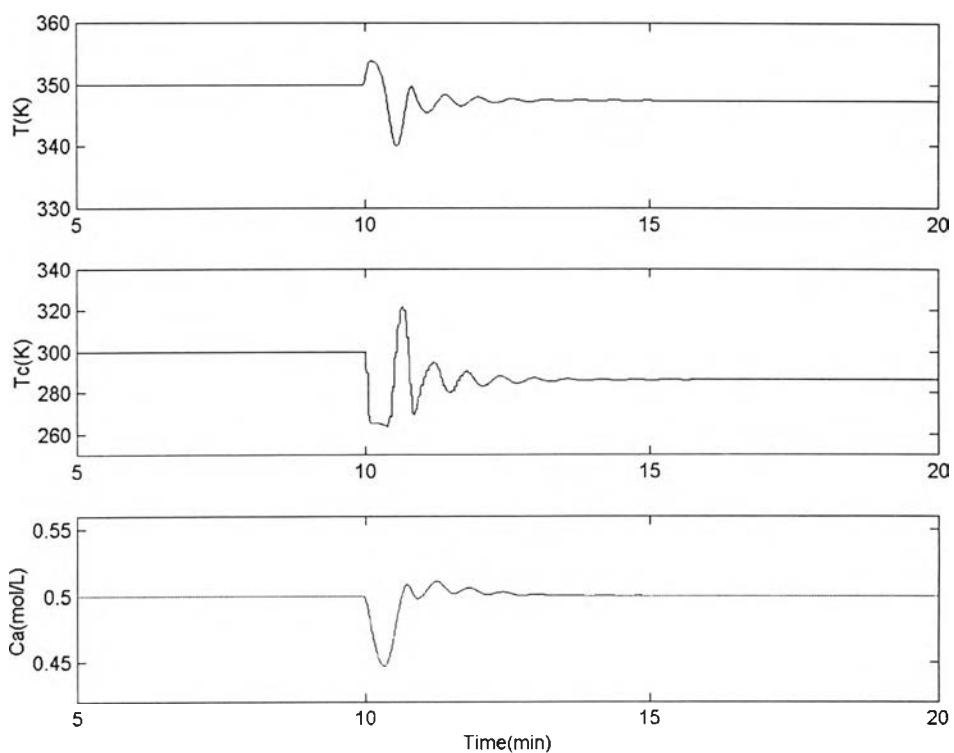
รูปที่ 4.33 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองกาลมานเมื่อ k_0 มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์



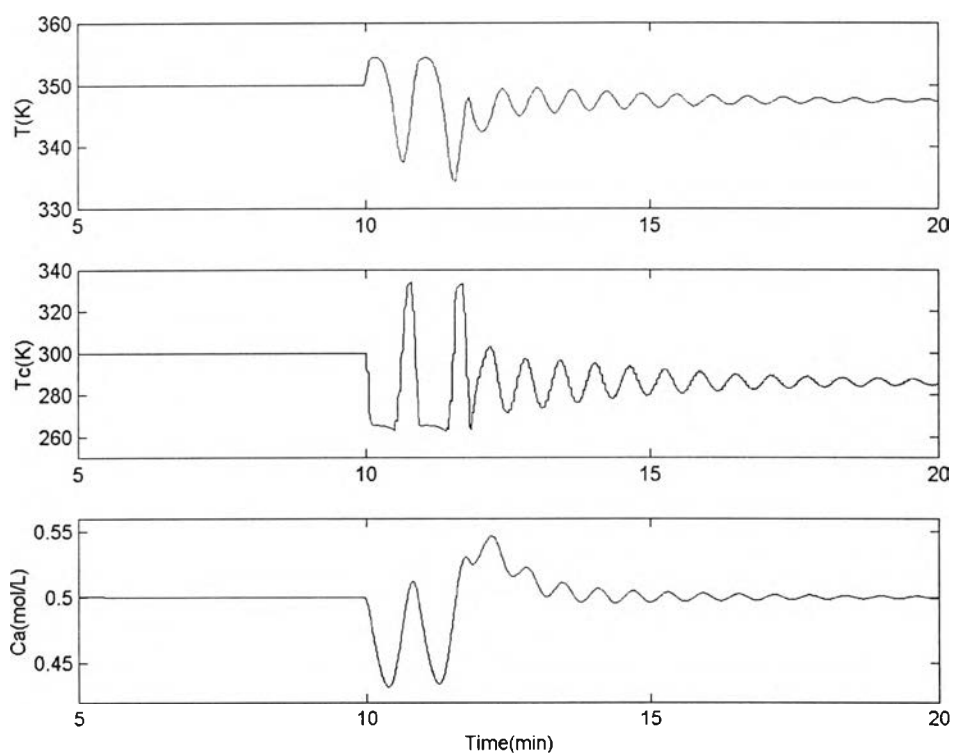
รูปที่ 4.34 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีแอลซีร่วมกับตัวรอกกาลมานเมื่อ k_0 มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์



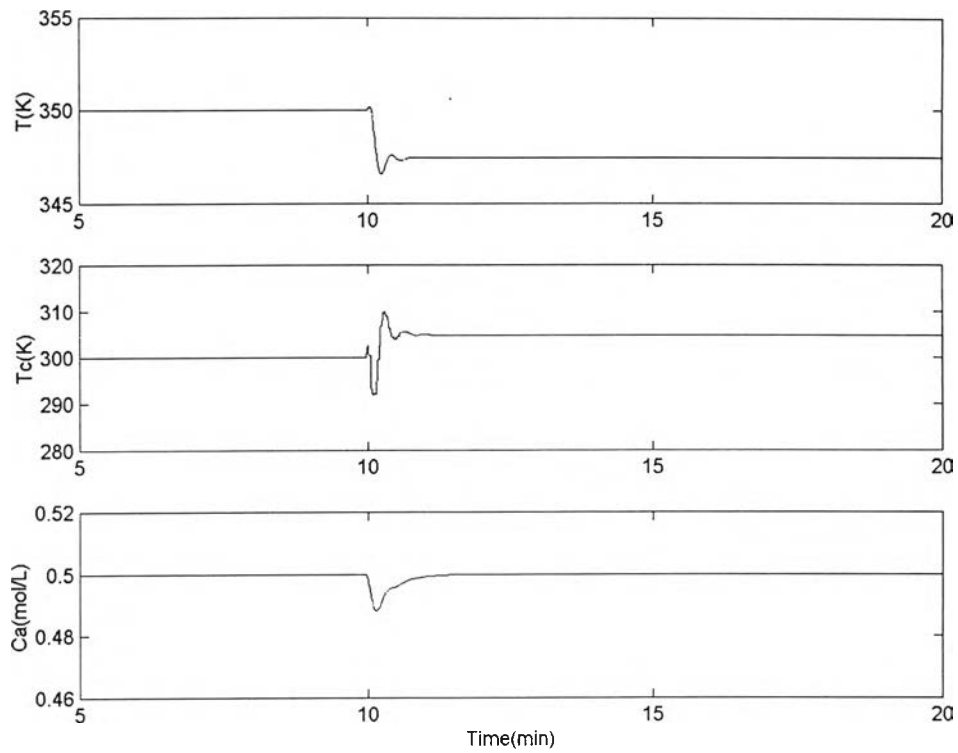
รูปที่ 4.35 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยอาร์จีเอ็มซีเมื่อ k_0 และ ΔH มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์



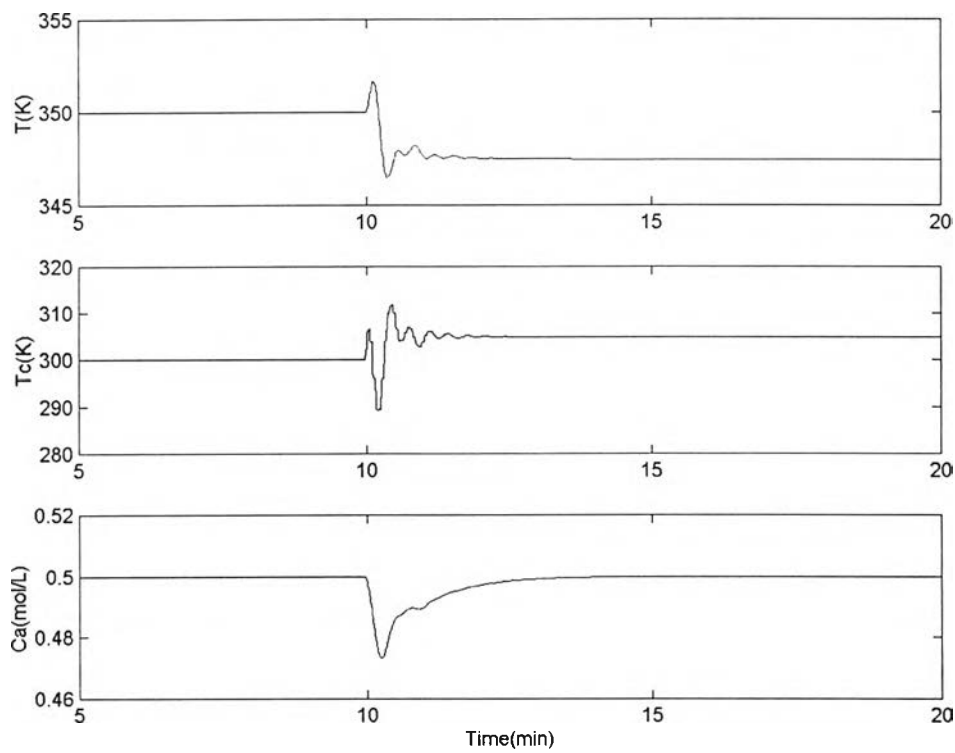
รูปที่ 4.36 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองกาลมานเมื่อ k_0 และ ΔH มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์



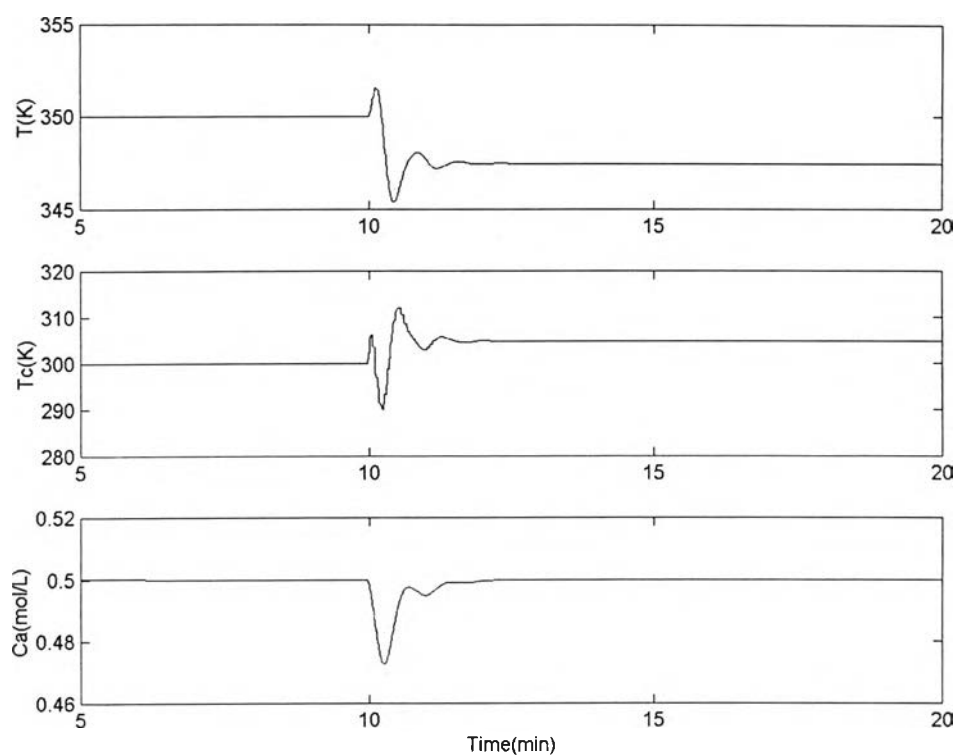
รูปที่ 4.37 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีแอลซีร่วมกับตัวกรองกาลมานเมื่อ k_0 และ ΔH มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์



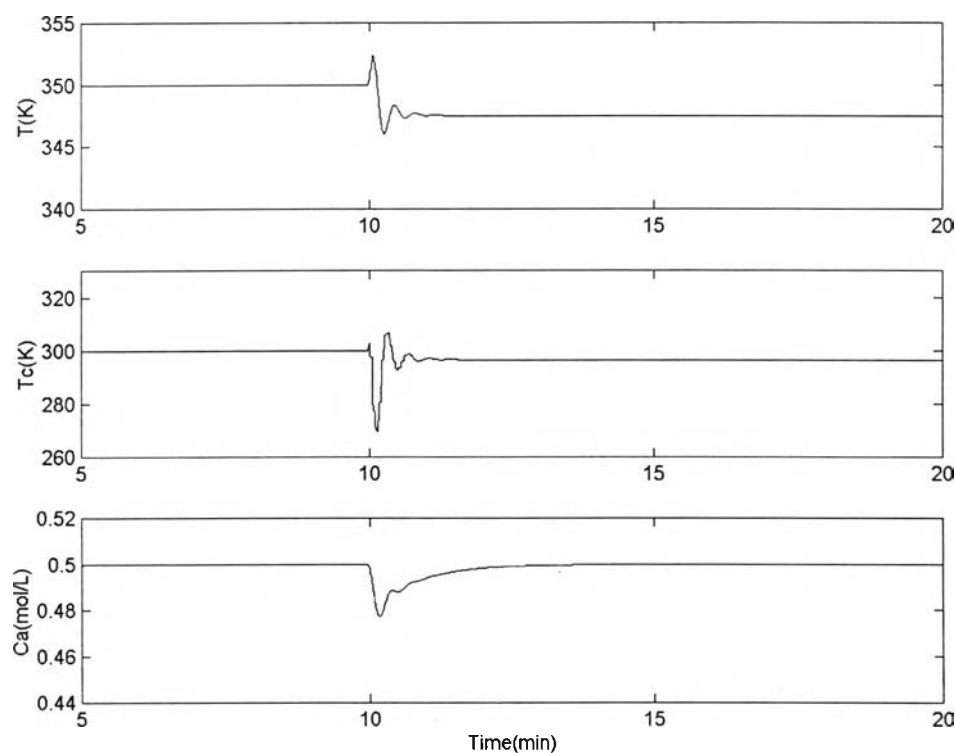
รูปที่ 4.38 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยอาร์จีเอ็มซีเมื่อ k_0 และ UA มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์



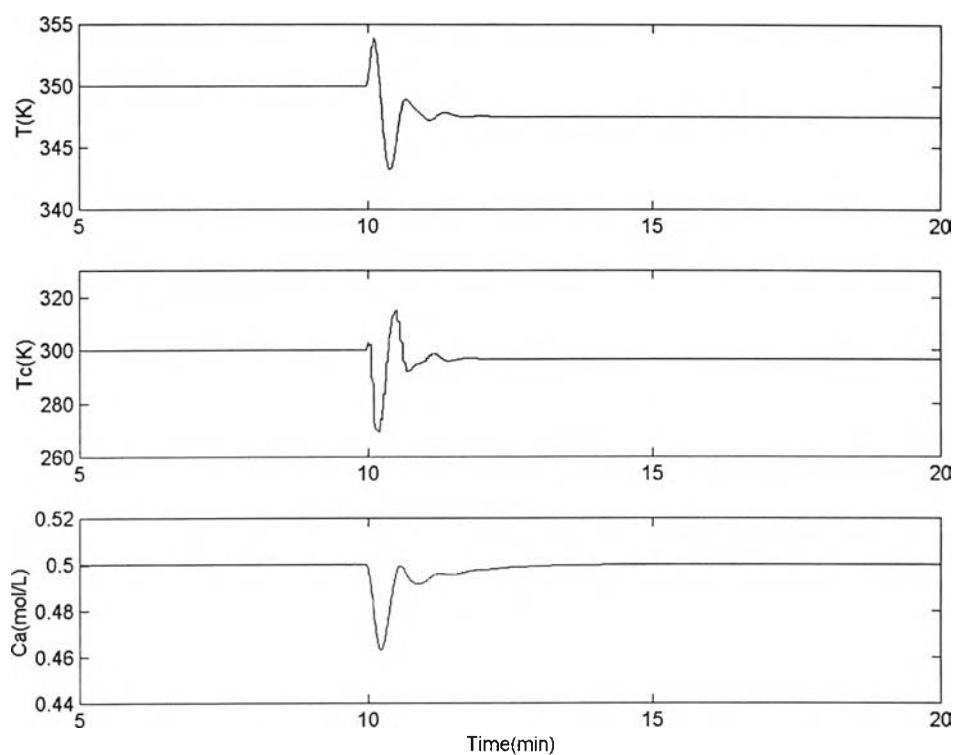
รูปที่ 4.39 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองกาลมานเมื่อ k_0 และ UA มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์



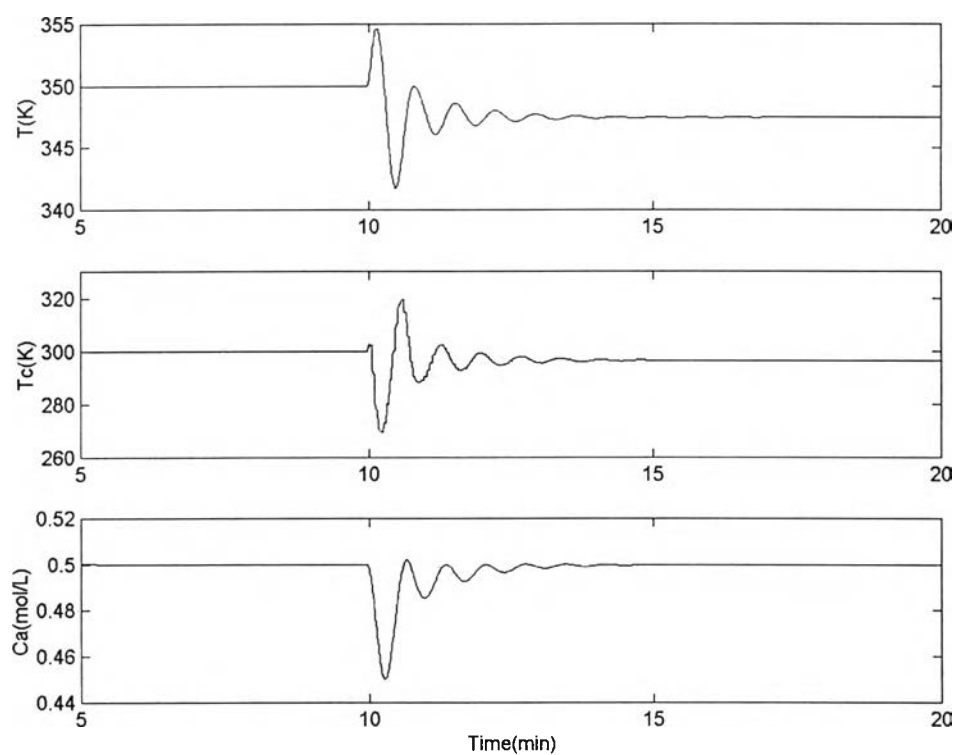
รูปที่ 4.40 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีสี่ร่วมกับตัวกรองคาถมานเมื่อ k_0 และ UA มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.41 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยอาร์จีเอ็มซีเมื่อ k_0 , ΔH และ UA มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.42 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองกาลมานเมื่อ k_0 , ΔH และ UA มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.43 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีแอลซีร่วมกับตัวกรองกาลมานเมื่อ k_0 , ΔH และ UA มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์