

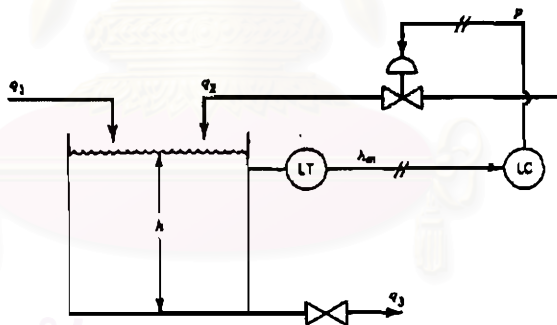
## บทที่ 5 การทดสอบโปรแกรม

ในงานพัฒนาซอฟต์แวร์จำเป็นต้องมีการตรวจสอบการทำงานของโปรแกรมด้วยว่าจะไม่มีการเกิดความผิดพลาดขึ้น เมื่อนำโปรแกรมที่สร้างขึ้นมาใช้งาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการทดสอบการทำงานของโปรแกรมเพื่อให้แน่ใจว่าจะไม่มีข้อผิดพลาดเกิดขึ้น

สำหรับการทดสอบโปรแกรมนั้น ระบบที่ถูกเลือกมาทำการทดสอบมีทั้งหมด 3 ระบบคือ (1) ระบบถังพักของเหลว, (2) เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ และ (3) เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง

### 5.1 ระบบถังพักของเหลว

เราเริ่มต้นการทดสอบโปรแกรมด้วยกระบวนการง่าย ๆ ของระบบถังพักของเหลวดังแสดงในรูปที่ 5.1 ระบบถังพักของเหลวเป็นระบบเปิดอยู่ภายใต้ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิคงที่



รูปที่ 5.1 ระบบถังพักของของเหลว

#### 5.1.1 แบบจำลองกระบวนการ

ระบบควบคุมระดับของของเหลวดังแสดงในรูปที่ 5.1 ระดับของของเหลวถูกวัดแล้วส่งไปยังตัวควบคุมแบบป้อนกลับซึ่งควบคุมระดับของของเหลวโดยการปรับอัตราการไหลเชิงปริมาตร  $q_2$  อัตราการไหลขาเข้า  $q_1$  เป็นตัวแปรควบคุม สมการอนุรักษ์มวลสารคือ

$$\frac{d(V\rho)}{dt} = \rho q_1 + \rho q_2 - \rho q_3 \quad (5.1)$$

สมมติให้ความหนาแน่นของของเหลวมีค่าคงที่ สมการ (5.1) กลายเป็น

$$\frac{dV}{dt} = q_1 + q_2 - q_3 \quad (5.2)$$

สมมติให้อัตราการไหลขาออก  $q_3$  ซึ่งไหลผ่านวาล์วสัมพันธ์กับรากที่สองของปริมาณของเหลว

$$q_3 = C\sqrt{V} \quad (5.3)$$

เมื่อ  $C$  คือสัมประสิทธิ์วาล์วมีค่าคงที่

สมการอนุรักษ์มวลสารสำหรับกระบวนการนี้ หลังจากแทนความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นของวาล์วได้เป็น

$$\frac{dV}{dt} = q_1 + q_2 - C\sqrt{V} \quad (5.4)$$

### 5.1.2 ตัวควบคุมเจเนริกโมเดล

พิจารณากระบวนการที่เขียนอยู่ในรูปสมการต่อไปนี้ :

$$\dot{x} = f(x, u, d, t)$$

$$y = g(x)$$

เมื่อ  $x$  คือเวกเตอร์สเตตมิติ  $n$ ,  $u$  คือเวกเตอร์ของตัวแปรปรับที่มีมิติ  $m$ ,  $d$  คือเวกเตอร์ของตัวแปรรบกวนมิติ  $l$  และ  $y$  คือเวกเตอร์เอาต์พุตมิติ  $p$  โดยทั่วไป  $f$  และ  $g$  เป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้น

ดังนั้นสมการตัวควบคุมเจเนริกโมเดลคือ

$$q_2 = K_1(V^* - V) + K_2 \int_0^t (V^* - V) dt + C\sqrt{V} - q_1 \quad (5.5)$$

เมื่อ  $K_1$  และ  $K_2$  เป็นค่าคงที่ในการปรับ และ  $V^*$  คือจุดปรับตั้ง (set-point) ของ  $V$

แปลงสมการ (5.5) ให้อยู่ในรูปเวลาไม่ต่อเนื่อง ได้เป็น

$$q_2 = K_1(V^* - V) + K_2 \sum_0^k (V^* - V) \Delta t + C\sqrt{V} - q_1 \quad (5.6)$$

จากสมการ (5.6) สัมประสิทธิ์วาล์วเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าแน่นอนและเพื่อให้ตัวควบคุมเจเนริกโมเดลปฏิบัติงานได้สำเร็จจำเป็นต้องมีการประมาณค่านี้

### 5.1.3 การประมาณค่าพารามิเตอร์

พิจารณาสมการ (5.4) สัมประสิทธิ์วาล์วเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าแน่นอน ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของวาล์วที่ระดับตำแหน่งการเปิดค่าหนึ่งและมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

$$C = f(t)$$

ถ้าในกระบวนการของเราทำการเปิดวาล์วด้านขาออก ( $q_2$ ) ไว้ที่ตำแหน่งหนึ่งโดยให้มีตำแหน่งเดิมตลอดช่วงระยะเวลาที่ทำการควบคุม ซึ่งแสดงว่าค่าสัมประสิทธิ์วาล์วของวาล์วด้านขาออกมีค่าคงที่ตลอดช่วงระยะเวลา

ดังนั้นอนุพันธ์ของสัมประสิทธิ์วาล์วเทียบกับเวลา จะได้ว่า

$$\frac{dC}{dt} = 0 \quad (5.7)$$

สมการสเตตสำหรับประมาณค่าสัมประสิทธิ์วาล์วด้วยตัวกรองคาถมานเป็นดังนี้ :

สมการอนุกรมมวลสารรอบระบบ

$$\frac{dV}{dt} = q_1 + q_2 - C\sqrt{V} \quad (5.4)$$

แบบจำลองสัมประสิทธิ์วาล์วโดยประมาณคือ

$$\frac{dC}{dt} = 0 \quad (5.7)$$

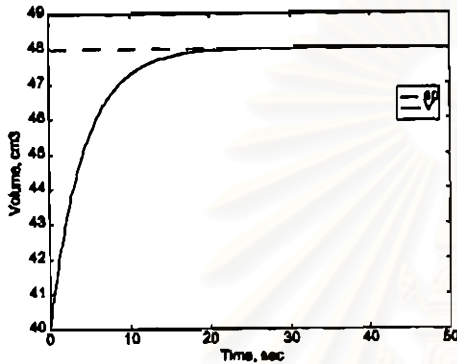
กระบวนการที่พิจารณาข้างต้นเป็นกระบวนการอย่างง่าย ซึ่งมีขนาดของเวกเตอร์สเตตเพียง  $2 \times 1$  เท่านั้น ช่วยทำให้การเขียนโปรแกรมง่ายขึ้น, สะดวกต่อการตรวจสอบข้อผิดพลาดในเบื้องต้น และแก้ไขข้อผิดพลาดได้ง่าย ก่อนที่จะทำการทดสอบกับกระบวนการที่มีขนาดของเวกเตอร์สเตตสูงขึ้น

#### 5.1.4 ผลการทดสอบ

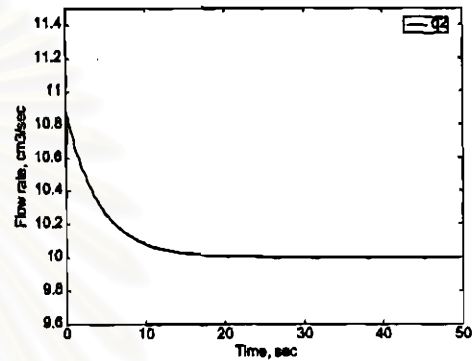
การทดสอบโปรแกรมกับระบบนี้มีด้วยกัน 4 กรณี เพื่อทดสอบการทำงานของโปรแกรม กรณีแรกเป็นการทดสอบกับระบบในสภาวะการทำงานปกติ แต่เนื่องจากตัวควบคุมเจเนริกโมเดลเป็นตัวควบคุมที่อาศัยแบบจำลอง ดังนั้นกรณีที่สองคือกรณีที่แบบจำลองผิดพลาดโดยมีค่าสัมประสิทธิ์วาล์วลดลง 30% จากค่าปกติ กรณีที่สามเป็นกรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์วาล์วในระบบเปลี่ยนแปลงไป โดยมีค่าลดลงจากค่าปกติไป 30% ทั้งสามกรณีเป็นการทดสอบโปรแกรมในกรณีที่ระบบไม่มีสัญญาณรบกวน และกรณีสุดท้ายเป็นการทดสอบกับระบบที่มีสัญญาณรบกวนในการวัด โดยใช้ค่าคงที่การปรับและค่าของพารามิเตอร์ต่าง ๆ เหมือนในกรณีปกติ

การเขียนแบบระบบถึงพักของของเหลวเริ่มต้นจากปริมาตรเริ่มต้น  $V$  เท่ากับ 40 ลบ.ซม. อัตราการไหลขาเข้า  $q_1$  มีค่าเท่ากับ 10 ลบ.ซม.ต่อวินาที และอัตราการไหลเชิงปริมาตร  $q_2$  เป็นศูนย์ ปริมาตรสุดท้ายกำหนดไว้ที่ 48 ลบ.ซม. เริ่มทำการควบคุมระดับของของเหลวภายในถังตั้งแต่ตอนต้นด้วยตัวควบคุมแบบพีไอหรือตัวควบคุมเจเนริกโมเดล

5.1.4.1 กรณีปกติ รูปที่ 5.2 (ก) แสดงผลการเขียนแบบเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอในการควบคุมปริมาตรของของเหลว ค่าคงที่ของตัวควบคุมแบบพีไอที่ใช้ควบคุมปริมาตรของของเหลว คือ  $K_c = 0.11$  และ  $\tau_i = 1000$  ค่า IAE และ ISE ที่ได้จากการควบคุมเท่ากับ 33.395 และ 132.874 ตามลำดับ รูปที่ 5.2 (ข) แสดงอัตราการไหลเชิงปริมาตร  $q_2$



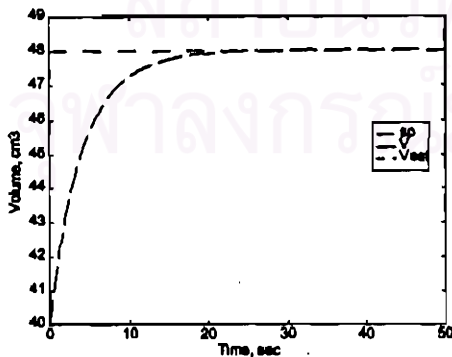
(ก)



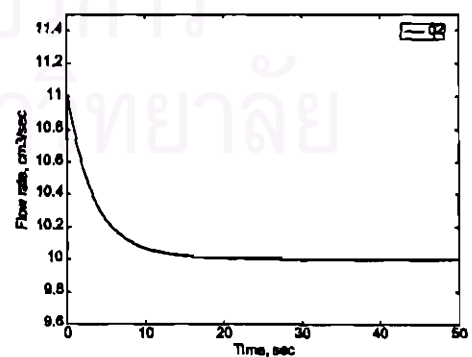
(ข)

รูปที่ 5.2 ผลตอบสนองตัวควบคุมแบบพีไอที่สภาวะการทำงานปกติ—(ก) ผลการควบคุมปริมาตร;  
(ข) ผลการปรับอัตราการไหลเชิงปริมาตร  $q_2$

สมรรถนะของการทำงานร่วมกันระหว่างตัวกรองกาลมานกับตัวควบคุมเจนเนริก โมเดลแสดงได้ดังรูปที่ 5.3 โดยมีค่าคงที่การปรับ  $k_1$  และ  $k_2$  เท่ากับ 0.25 และ  $1.5625 \times 10^{-4}$  ตามลำดับ ผลการควบคุมที่ได้จะให้ค่า IAE และ ISE เท่ากับ 33.435 และ 129.348 ตามลำดับ



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.3 ผลตอบสนองตัวควบคุมเจนเนริก โมเดลในกรณีปกติ—(ก) ผลการควบคุมปริมาตร;  
(ข) ผลการปรับอัตราการไหลเชิงปริมาตร  $q_2$

การทำงานของตัวกรองคาลมานต้องมีการเลือกค่า  $Q$ ,  $R$  และ  $P_0$  เมทริกซ์  $R$  อาจจะแทนได้อย่างถูกต้องด้วยเมทริกซ์เชิงที่มีความแปรปรวนของความผิดพลาดเครื่องมือการวัดหรือที่แจ้งไว้ในแนวเส้นทแยงมุม ซึ่งความผิดพลาดของตัวตรวจรับมีค่าแตกต่างกันไป สำหรับในระบบนี้ สัญญาณรบกวนการวัดเป็นปริมาณ สเกลาร์ (เอาต์พุตตัวเดียวเท่านั้น) ดังนั้นเมทริกซ์ความแปรปรวน  $R$  ก็คือความแปรปรวนสเกลาร์  $r$  ซึ่งค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณรบกวนคือ 10 ลบ.ซม. และความแปรปรวนคือค่ากำลังสองเฉลี่ย ดังนั้นเราใช้

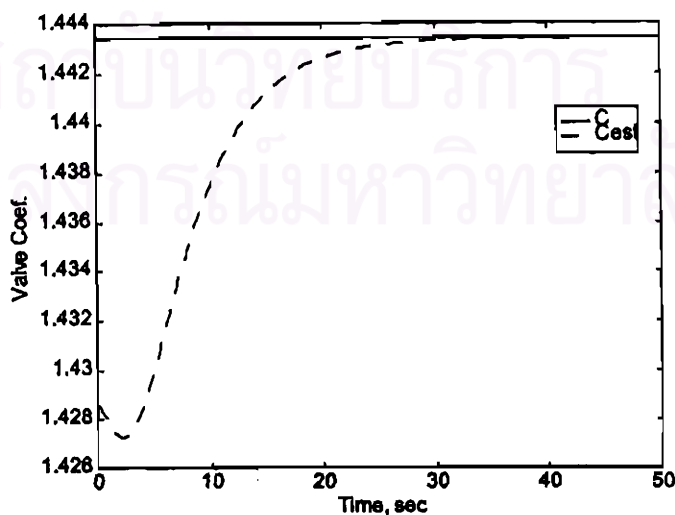
$$R = [100]$$

ค่าประมาณเริ่มต้นของตัวแปรสเตรต เราสามารถหาได้จากสถานะเริ่มต้น และค่าเริ่มต้นของ  $P$  แสดงถึงความไม่เชื่อมั่นในค่าประมาณสเตรตเริ่มต้น (นั่นคือตัวกรองคาลมานจะต้องประมาณค่าให้เข้าสู่ค่าที่ถูกต้อง) ดังนั้นค่าประมาณเริ่มต้นและความแปรปรวนร่วมความผิดพลาดเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ

$$\hat{x}_0 = \begin{bmatrix} 40 \\ 1.4286 \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad P_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

โดยปกติความแปรปรวนของแบบจำลอง  $Q$  เป็นเมทริกซ์เชิงที่มีความแปรปรวนของแบบจำลองในตำแหน่งแนวเส้นทแยงมุม ในกรณีของเรา ค่าสเตรตทั้งสองตัวที่ได้จากแบบจำลองคาดว่ามีความผิดพลาดประมาณ 10 ลบ.ซม. และ 0.45 ลบ.ซม.ต่อวินาที โดยเราเลือกใช้เมทริกซ์ความแปรปรวนของแบบจำลองสเตรตมีค่าเท่ากับ

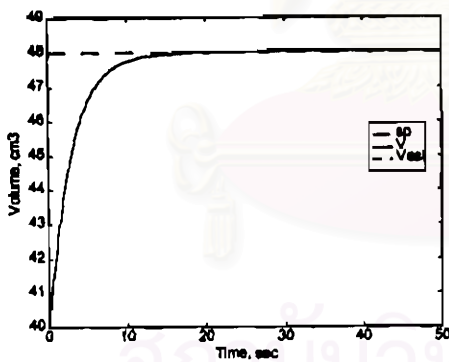
$$Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 0.2 \end{bmatrix}$$



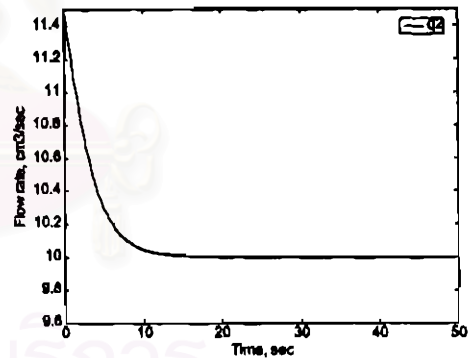
รูปที่ 5.4 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์วาล์วจากการวัดระดับของของเหลวในกรณีปกติ

ผลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์วาล์วด้วยตัวกรองคาถมานโดยมีค่าประมาณเริ่มต้นเท่ากับ 1.4286 แทนที่จะเป็น 1.4434 แสดงได้ดังรูปที่ 5.4 โดยค่าสัมประสิทธิ์วาล์วที่ได้จากการประมาณค่าด้วยตัวกรองคาถมานจะค่อย ๆ มีค่าเข้าสู่ค่าสัมประสิทธิ์วาล์วจริงเมื่อช่วงระยะเวลาผ่านไป แต่ให้ผลการควบคุมที่ดีดังแสดงข้างต้น

5.1.4.2 กรณีแบบจำลองผิดพลาด ผลตอบสนองของการควบคุมระดับของของเหลวในกรณีมีค่าสัมประสิทธิ์วาล์วของแบบจำลองกระบวนการผิดพลาดแสดงดังรูปที่ 5.5 โดยใช้ค่าคงที่การปรับ  $k_1$  และ  $k_2$  เหมือนกับในกรณีปกติ รูปที่ 5.6 เป็นผลของการประมาณค่าสัมประสิทธิ์วาล์วด้วยตัวกรองคาถมาน ค่าประมาณเริ่มต้นของสัมประสิทธิ์วาล์วเท่ากับ 1.5 แทนที่จะเป็น 1.4434 ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์วาล์วผิดพลาดไป  $-30\%$  ของค่าเดิม และให้ค่า IAE และ ISE เท่ากับ 31.986 และ 121.345 ตามลำดับ สมรรถนะของตัวควบคุมเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับในสถานะการทำงานปกติ ค่าสัมประสิทธิ์วาล์วที่ประมาณค่าได้จะเข้าสู่ค่าสัมประสิทธิ์วาล์วจริงเมื่อผ่านเวลาผ่านไปเช่นเดียวกับในกรณีปกติ

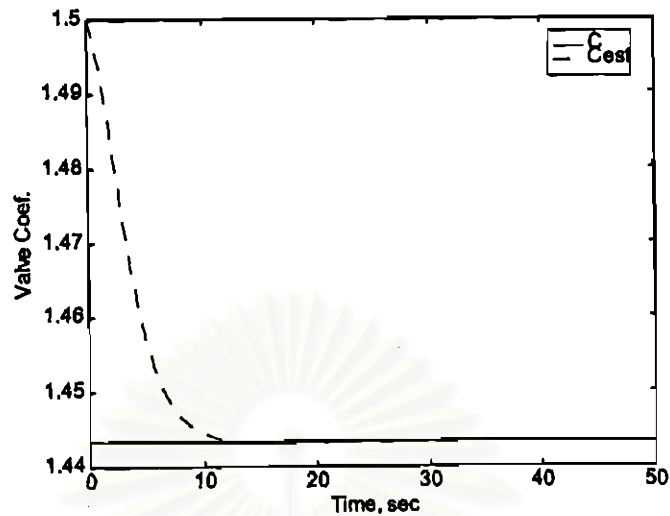


(ก)



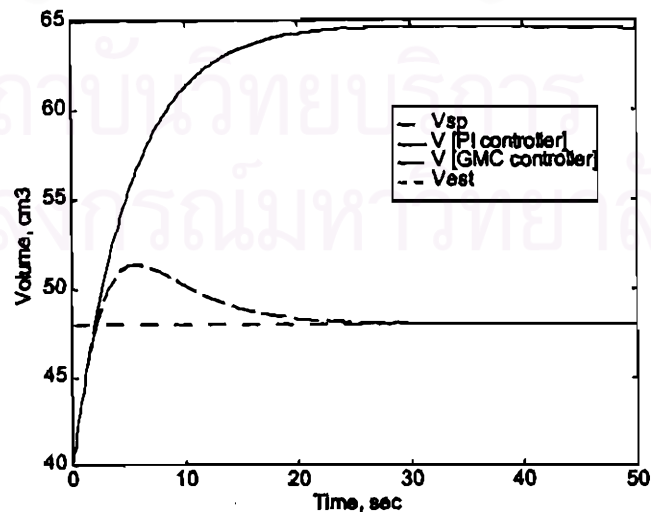
(ข)

รูปที่ 5.5 ผลตอบสนองตัวควบคุมเจเนริก โมเดลในกรณีแบบจำลองผิดพลาด—(ก) ผลการควบคุม ปริมาตร; (ข) ผลการปรับอัตราการใช้ของไหลเชิงปริมาตร  $q_2$



รูปที่ 5.6 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์วาล์วในกรณีแบบจำลองผิดพลาด

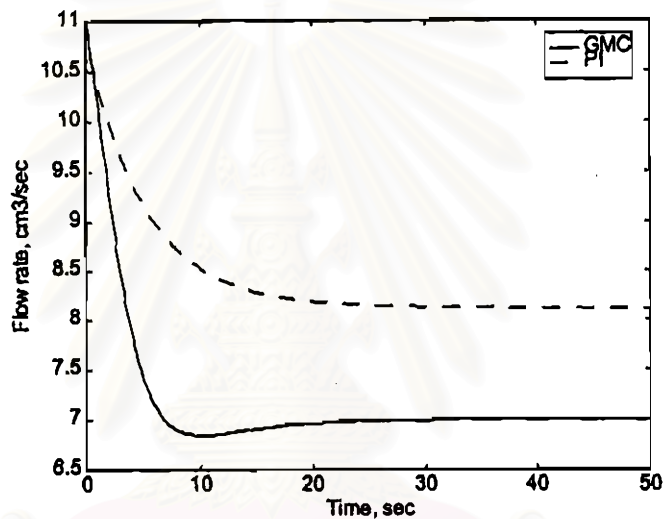
5.1.4.3 กรณีเพรอนท์ผิดพลาด รูปที่ 5.7 แสดงผลตอบสนองของตัวควบคุมทั้งสองแบบในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของสัมประสิทธิ์วาล์ว (C) โดยค่าเปลี่ยนไป  $-30\%$  ของค่าเดิม การเปลี่ยนแปลงนี้เพื่อทดสอบการประมาณค่าของโปรแกรมนี้เมื่อค่าของสัมประสิทธิ์วาล์วเปลี่ยนแปลงไป ในการทดสอบนี้ ค่าประมาณเริ่มต้นของสัมประสิทธิ์วาล์วเท่ากับ 1.4286 โดยมีค่าจริงเท่ากับ 1.0104 สมรรถนะของตัวควบคุมทั้งสองมีค่าเปลี่ยนไปดังรูป



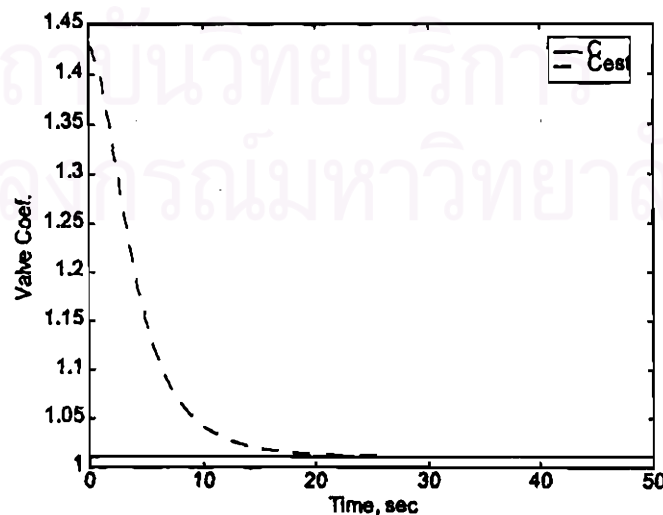
รูปที่ 5.7 ผลตอบสนองตัวควบคุมของระบบถึงพักของเหลวในกรณีเพรอนท์ผิดพลาด



ผลการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอจะให้ค่า IAE และ ISE เท่ากับ 726.52 และ 11332.472 ตามลำดับ ซึ่งตัวควบคุมแบบพีไอไม่สามารถควบคุมปริมาณได้ตามที่กำหนดไว้ได้ โดยใช้ค่าคงที่การปรับค่าเดิม ขณะที่ตัวควบคุมเจเนริกโมเดลสามารถควบคุมระบบนี้ได้ โดยให้ค่า IAE และ ISE เท่ากับ 23.74 และ 79.438 ตามลำดับ รูปที่ 5.8 แสดงการปรับอัตราไหลเชิงปริมาตร  $q_2$  ของตัวควบคุมทั้งสองแบบ และรูปที่ 5.9 เป็นการประมาณค่าสัมประสิทธิ์วาล์วเมื่อกระบวนการมีค่าสัมประสิทธิ์วาล์วผิดพลาดไป  $-30\%$  ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์วาล์วที่ประมาณได้จะมีค่าเข้าสู่ค่าจริงเมื่อเวลาผ่านไปเช่นเดียวกับในสองกรณีข้างต้น



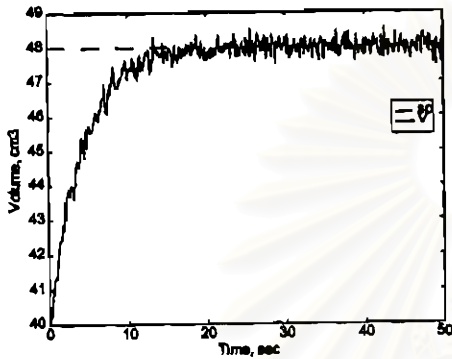
รูปที่ 5.8 การปรับอัตราการไหลเชิงปริมาตร  $q_2$  ในกรณีแพลนท์ผิดพลาด



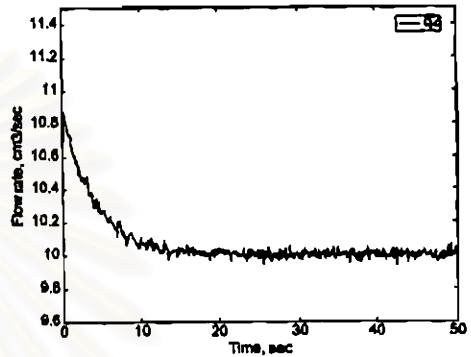
รูปที่ 5.9 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์วาล์วในกรณีแพลนท์ผิดพลาด



5.1.4.4 กรณีมีสัญญาณรบกวน การทดสอบสุดท้ายของกระบวนการนี้เป็นการเลียนแบบระบบถังพักของของเหลวโดยมีสัญญาณรบกวนในการวัด ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาว มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และมีความแปรปรวนเท่ากับ 0.04 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอแสดงได้ดังรูปที่ 5.10 (ก) และ 5.10 (ข) ซึ่งมีค่า IAE และ ISE เท่ากับ 37.957 และ 136.715 ตามลำดับ



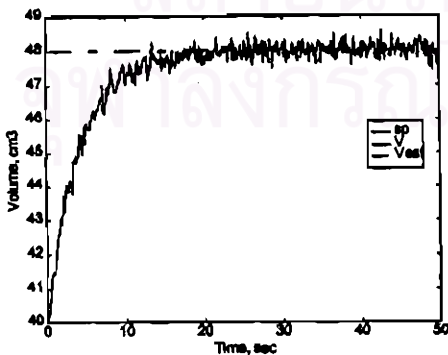
(ก)



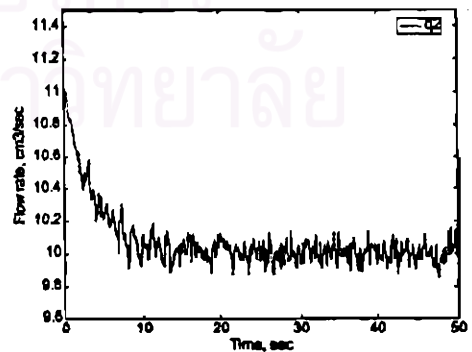
(ข)

รูปที่ 5.10 ผลตอบสนองตัวควบคุมแบบพีไอในกรณีมีสัญญาณรบกวน—(ก) ผลการควบคุม ปริมาตร; (ข) ผลการปรับอัตราการไหลเชิงปริมาตร  $q_2$

สมรรถนะของตัวควบคุมเจเนติก โมเดลมีค่าเปลี่ยนไปเช่นเดียวกับตัวควบคุมแบบพีไอดังแสดงในรูปที่ 5.11 (ก) และ 5.11 (ข) และให้ค่า IAE และ ISE เท่ากับ 37.469 และ 130.229 ตามลำดับ รูปที่ 5.12 เป็นผลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์วาล์วในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนในการวัด ซึ่งค่าประมาณที่ได้มีลักษณะแกว่งเนื่องจากค่าการวัดมีสัญญาณรบกวน โดยค่าประมาณที่ได้จะแกว่งรอบ ๆ ค่าสัมประสิทธิ์วาล์วจริง แต่ยังคงให้ผลการควบคุมเป็นที่น่าพอใจดังรูปที่ 5.11

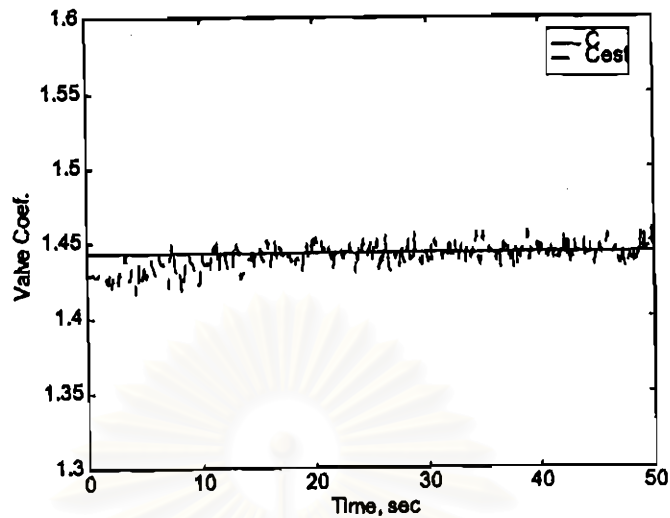


(ก)



(ข)

รูปที่ 5.11 ผลตอบสนองตัวควบคุมเจเนติก โมเดลในกรณีมีสัญญาณรบกวน—(ก) ผลการควบคุม ปริมาตร; (ข) ผลการปรับอัตราการไหลเชิงปริมาตร  $q_2$



รูปที่ 5.12 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์วาลูในกรณีมีสัญญาณรบกวน

## 5.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

ในแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบกะมักจะมีพารามิเตอร์ของตัวที่ทราบค่าโดยประมาณเท่านั้นหรืออาจจะแปรตามเวลา เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้น, อุณหภูมิ, ความหนืด ฯลฯ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องประมาณค่าของพารามิเตอร์เหล่านี้

### 5.2.1 การเขียนแบบเครื่องปฏิกรณ์

การเขียนแบบเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานนี้อาศัยแบบจำลองพลวัต ซึ่งพัฒนาโดยห้องปฏิบัติการ Warren Springs (Pulley, 1986) พิจารณาระบบปฏิกิริยาที่มีสถานะเป็นของเหลวและผสมเข้ากันเป็นอย่างดี ซึ่งเกิดปฏิกิริยา 2 ปฏิกิริยาดังนี้ :

ปฏิกิริยาที่ 1



ปฏิกิริยาที่ 2



สาร C เป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ขณะที่สาร D เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่ไม่ต้องการ และวัตถุประสงค์ในการปฏิบัติการทั่วไปคือต้องการให้เกิดสาร C โดยที่ลดผลผลิตของ D

สมมติให้ อัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายใต้เครื่องปฏิกรณ์สูงเพียงพอ ด้วยเหตุนี้ อัตราการผลิตสาร C และ D ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นเท่านั้น

$$R_1 = k_1 M_A M_B$$

$$R_2 = k_2 M_A M_D$$

เมื่อ  $R_1$  และ  $R_2$  คืออัตราการผลิตสาร C และ D ตามลำดับ และ  $M_A$ ,  $M_B$  และ  $M_C$  คือจำนวนโมลของสารประกอบ A, B และ C ที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ที่เวลานั้น ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา  $k_1$  และ  $k_2$  ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ตามความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียส (Arrhenius)

$$k_1 = \exp(k_1' - k_1''/(T_r + 273.15))$$

$$k_2 = \exp(k_2' - k_2''/(T_r + 273.15))$$

โดยที่  $k_1'$ ,  $k_1''$ ,  $k_2'$  และ  $k_2''$  คือค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาของทั้งสองปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาทั้งสองมีความร้อนปฏิกิริยาสูง ( $\Delta H_1 = -41840$  kJ/kmol,  $\Delta H_2 = -25105$  kJ/kmol) ซึ่งทำให้ระบบปฏิกิริยาทั้งหมดคายความร้อนอย่างรุนแรง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการนี้คือ

สมการอนุรักษ์มวลสารของสาร A

$$\frac{dM_A}{dt} = -R_1 - R_2 \quad (5.8)$$

สมการอนุรักษ์มวลสารของสาร B

$$\frac{dM_B}{dt} = -R_1 \quad (5.9)$$

สมการอนุรักษ์มวลสารของสาร C

$$\frac{dM_C}{dt} = +R_1 - R_2 \quad (5.10)$$

สมการอนุรักษ์มวลสารของสาร D

$$\frac{dM_D}{dt} = +R_2 \quad (5.11)$$

สมการอนุรักษ์พลังงานรอบเครื่องปฏิกรณ์

$$\frac{dT_r}{dt} = \frac{Q_r + Q_j}{M_r C_{pr}} \quad (5.12)$$

สมการอนุรักษ์พลังงานรอบแจ็กเก็ต

$$\frac{dT_j}{dt} = \frac{F_j \rho_j C_{pj} (T_j^* - T_j) + Q_j}{V_j \rho_j C_{pj}} \quad (5.13)$$

โดยที่

$$W = MW_A M_A + MW_B M_B + MW_C M_C + MW_D M_D$$

$$M_r = M_A + M_B + M_C + M_D$$

$$C_{pr} = (C_{pA} M_A + C_{pB} M_B + C_{pC} M_C + C_{pD} M_D) / M_r$$

$$V = W/A$$

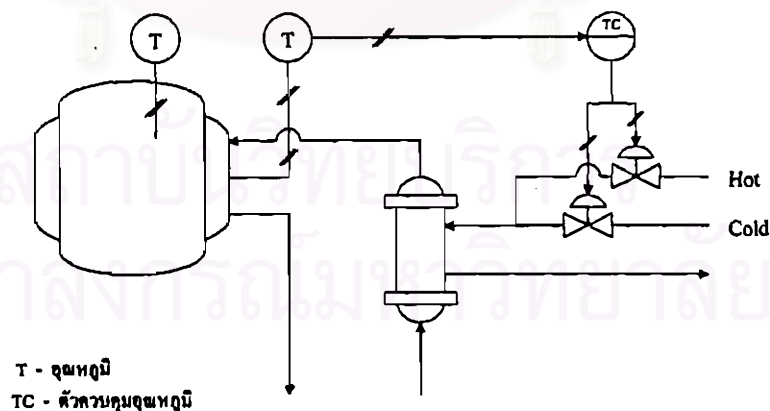
$$A = 2V/r$$

$$Q_j = UA(T_j - T_r)$$

$$Q_r = -\Delta H_1 R_1 - \Delta H_2 R_2$$

ตารางที่ 5.1 และ 5.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการนี้

การให้ความร้อนและความเย็นของส่วนประกอบเครื่องปฏิกรณ์ทำได้โดยการใช้ระบบ แจ็คเก็ตซึ่งไหลทางเดียว ค่าของพารามิเตอร์ทางกายภาพของเครื่องปฏิกรณ์ อย่างเช่น ปริมาตร, สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และพื้นที่ที่อ้างอิงขนาดของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะแสดงโดย Luyben (1977) การควบคุมอุณหภูมิแจ็คเก็ตทำได้โดยตัวควบคุมอุณหภูมิบนกระแส (stream) ทางเข้าแจ็คเก็ต เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิที่ไม่ได้ถูกสร้างแบบจำลอง แต่จัดการได้โดยอาศัยค่าคงที่เวลาของอุณหภูมิแจ็คเก็ตตอบสนองต่อรูปที่เป็นตัวแทนซึ่งให้โดย Liptak (1986) รูปที่ 5.13 แสดงแผนภาพของระบบเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 5.13 แผนภาพของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติทางกายภาพและข้อมูลกระบวนการ

|                   |                |                        |                          |
|-------------------|----------------|------------------------|--------------------------|
| $MW_A = 30$       | kg / kmol      | $k_1^2 = 17,000$       |                          |
| $MW_B = 100$      | kg / kmol      | $\Delta H_1 = -41,840$ | kJ / kmol                |
| $MW_C = 130$      | kg / kmol      | $\Delta H_2 = -25,105$ | kJ / kmol                |
| $MW_D = 160$      | kg / kmol      | $\rho = 1000$          | kg / m <sup>3</sup>      |
| $C_{pA} = 75.31$  | kJ / (kmol °C) | $r = 0.5$              | m                        |
| $C_{pB} = 167.36$ | kJ / (kmol °C) | $U = 0.6807$           | kW / (m <sup>3</sup> °C) |
| $C_{pC} = 217.57$ | kJ / (kmol °C) | $\rho_j = 1000$        | kg / m <sup>3</sup>      |
| $C_{pD} = 334.73$ | kJ / (kmol °C) | $C_{pj} = 1.8828$      | kJ / (kg °C)             |
| $k_1^1 = 20.9057$ |                | $F_j = 0.0058$         | m <sup>3</sup> / s       |
| $k_1^2 = 10,000$  |                | $V_j = 0.6912$         | m <sup>3</sup>           |
| $k_2^1 = 38.9057$ |                |                        |                          |

ตารางที่ 5.2 สภาวะเริ่มต้นที่เวลา  $t = 0$ 

|              |      |              |      |
|--------------|------|--------------|------|
| $M_A^0 = 12$ | kmol | $M_D^0 = 0$  | kmol |
| $M_B^0 = 12$ | kmol | $T_r^0 = 20$ | °C   |
| $M_C^0 = 0$  | kmol | $T_j^0 = 20$ | °C   |

อุณหภูมิของปฏิกิริยาที่มีความร้อนเท่ากัน (isothermal reaction) ที่เหมาะสมที่สุดอยู่ในช่วง 90.0-100.0°C และกำหนดอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์สุดท้ายไว้ที่ 95.0°C สมมติให้อุณหภูมิแฉีกเกิดถูกจำกัดอยู่ในช่วง 20.0-120.0°C เนื่องจากประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และสมมติว่าสารตั้งต้นอยู่ที่ 20.0°C ที่เวลา  $t = 0$

## 5.2.2 การออกแบบตัวควบคุมเจนเนริกโมเดล

5.2.2.1 สูตรขั้นตอนวิธีการควบคุม ตัวควบคุมเจนเนริกโมเดลต้องการแบบจำลองพลวัตของกระบวนการที่เขียนอยู่ในรูปตัวแปรสแตตมาตรฐาน สูตรตัวควบคุมได้มาจากการแก้ไขแบบจำลองกระบวนการพลวัตสำหรับอนุพันธ์ของตัวแปรควบคุม ( $x_i$ ) และให้เท่ากับพจน์แบบสัด

ส่วนกับแบบอินทิกรัล (proportional integral term) กระทบกับผลต่างของค่าปัจจุบันของ  $x$  กับค่าที่ต้องการของจุดปรับตั้ง ( $x^p$ ) เหตุนี้ขั้นตอนวิธีการควบคุมแบบเจนริกโมเดลสามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{dx}{dt} = K_1(x^p - x) + K_2 \int_0^t (x^p - x) dt \quad (5.14)$$

เมื่อ  $K_1$  และ  $K_2$  เป็นค่าคงที่ในการปรับ สำหรับการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะต้องการแบบจำลองกระบวนการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ ( $T_r$ ) กับตัวแปรปรับ (หรืออุณหภูมิแจ็กเก็ต,  $T_j$ ) การสมมติว่าปริมาณความร้อนที่ยังคงอยู่ในผนังของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความร้อนที่ถ่ายเทให้กับระบบ สมดุลพลังงานรอบเครื่องปฏิกรณ์จะให้แบบจำลองที่ต้องการ

$$\frac{dT_r}{dt} = \frac{Q + UA(T_j - T_r)}{WC_p} \quad (5.15)$$

เมื่อ  $W$  คือน้ำหนักของสารภายในเครื่องปฏิกรณ์,  $C_p$  คือความจุความร้อนมวลสารของสารที่อยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์,  $U$  คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน,  $A$  คือพื้นที่การถ่ายเทความร้อน และ  $Q$  คือความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา สมมติให้  $W$  และ  $C_p$  เป็นค่าคงที่ แทนที่  $x$  ด้วย  $T_r$  และ  $x^p$  ด้วย  $T_r^p$  ในสมการ (5.14) แล้วสมการ (5.14) และ (5.15) และหาคำตอบของตัวแปรปรับ ( $T_j$ ) เราจะได้ตัวควบคุมเจนริกโมเดล

$$T_j = T_r + \frac{WC_p}{UA} \left[ K_1(T_r^p - T_r) + K_2 \int_0^t (T_r^p - T_r) dt \right] - \frac{Q}{UA} \quad (5.16)$$

สมการ (5.16) อยู่ในรูปเวลาต่อเนื่องของขั้นตอนวิธีเจนริกโมเดล แต่ต้องการใช้ตัวควบคุมเจนริกโมเดลในระบบไม่ต่อเนื่องจึงต้องคำนวณอินทิกรัลในเชิงตัวเลขโดยประมาณ

$$\int_0^t (T_r^p - T_r) dt = \sum_0^k (T_r^p - T_r^{(k)}) \Delta t \quad (5.17)$$

เมื่อ  $\Delta t$  คือความถี่การสุ่มของตัวควบคุม

ดังนั้นสมการตัวควบคุมที่มีเวลาไม่ต่อเนื่องคือ

$$T_j = T_r + \frac{WC_p}{UA} \left[ K_1(T_r^p - T_r) + K_2 \sum_0^k (T_r^p - T_r^{(k)}) \Delta t \right] - \frac{Q}{UA} \quad (5.18)$$

สมการ (5.18) ไม่ได้ให้จุดปรับตั้งของอุณหภูมิแจ็กเก็ต ( $T_j^{p(k)}$ ) แต่อุณหภูมิแจ็กเก็ตจริง ( $T_j^{(k)}$ ) จำเป็นสำหรับช่วงระยะเวลาถัดไปเพื่อเปลี่ยนอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ไปสู่จุดปรับตั้ง ( $T_j^p$ ) ถ้าใช้  $T_j^{(k)}$  เป็นจุดปรับตั้ง แล้วการควบคุมที่ได้เป็นไปอย่างเชื่องช้าเพราะว่าพลศาสตร์ของแจ็กเก็ตไม่ได้สัมพันธ์กับสมการ (5.18) ดังนั้นจึงต้องใช้ในการชดเชยพลวัตของ  $T_j^{(k)}$  ถ้าสมมติให้พลศาสตร์

ของแจ็กเก็ตเป็นอันดับหนึ่ง (สมมติฐานนี้มีเหตุผลซึ่งอธิบายโดย Liptak (1986)) แล้วสมการเชิงอนุพันธ์ที่ใช้คือ

$$T_j^{(k)} = T_j^{(k-1)} + \frac{\Delta t (T_j^{(k)} - T_j^{(k-1)})}{\tau_j} \quad (5.19)$$

เมื่อ  $\tau_j$  คือค่าคงที่เวลาโดยประมาณของแจ็กเก็ต จุดปรับตั้งของอุณหภูมิแจ็กเก็ต ( $T_j^{(k)}$ ) สามารถหาได้โดยการจัดการสมการ (5.19) ใหม่ ดังนั้นตัวชดเชยพลวัตเป็น

$$T_j^{(k)} = T_j^{(k-1)} + \frac{\tau_j (T_j^{(k)} - T_j^{(k-1)})}{\Delta t} \quad (5.20)$$

ผลเฉลยของสมการ (5.18) และ (5.20) ให้ค่าจุดปรับตั้งจริงสำหรับตัวควบคุมอุณหภูมิแจ็กเก็ตเพื่อนำไปใช้ในช่วงระยะเวลาระหว่างการควบคุมถัดไป

**5.2.2.2 การประมาณค่าความร้อนที่เกิดขึ้นสำหรับตัวควบคุมเจเนริกโมเดล** ความสำเร็จของตัวควบคุมอุณหภูมิสำหรับตัวควบคุมเจเนริกโมเดลขึ้นอยู่กับความสามารถของเราที่จะวัด, ประมาณค่า, หรือทำนายค่าความร้อนที่คายออกมา ( $Q$ ) ในช่วงระยะเวลาที่ให้เป็นอย่างมาก เทคนิคที่ใช้สำหรับประมาณค่าความร้อนที่เกิดขึ้นคือขั้นตอนวิธีตัวกรองคาลมาน

แบบจำลองของการประมาณค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเสนอโดย Kittisupakorn and Kershenbaum (1994) สมมติให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาแปรผันกับมวลสารทั้งหมด ( $M_r$ ) และอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบเชิงคู่ (bilinear) ดังนี้ :

$$\frac{dM_r}{dt} = -R = -bM_r T_r \quad (5.21)$$

โดยที่  $b$  คือค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา

ความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาโดยประมาณ ( $Q_{re}$ ) คือ

$$Q_{re} = R(-\Delta H) = -bM_r T_r (\Delta H) \quad (5.22)$$

โดยที่  $\Delta H$  คือความร้อนปฏิกิริยา (heat reaction)

กำหนดให้

$$N = -bM_r \Delta H \quad (5.23)$$

หาอนุพันธ์ของสมการ (5.22) และ (5.23) จะได้

$$\frac{dN}{dt} = -b\Delta H \frac{dM_r}{dt} \quad (5.24)$$

และ



$$\frac{dQ_{re}}{dt} = -b\Delta H \left( T_r \frac{dM_r}{dt} + M_r \frac{dT_r}{dt} \right) \quad (5.25)$$

จัดรูปสมการ (5.25) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{dQ_{re}}{dt} = T_r \frac{dN}{dt} + N \frac{dT_r}{dt} \quad (5.26)$$

ดังนั้นสมการสแตตสำหรับใช้ประมาณค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา โดยใช้ขั้นตอนวิธีตัวกรองคาลมานคือ

จากสมการอนุรักษ์พลังงานรอบแจ็กเก็ตและเครื่องปฏิกรณ์

$$\frac{dT_j}{dt} = \frac{-UA(T_j - T_r)}{V_j \rho_j C_{pj}} + \frac{F_j}{V_j} (T_{j,sp} - T_r) \quad (5.27)$$

$$\frac{dT_r}{dt} = \frac{Q_{re}}{W_r C_{pr}} + \frac{U_r A_r}{W_r C_{pr}} (T_j - T_r) \quad (5.28)$$

จากแบบจำลองความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาโดยประมาณ

$$\frac{dN}{dt} = -b \times N \times T_r \quad (5.29)$$

$$\frac{dQ_{re}}{dt} = N \times \frac{dT_r}{dt} + T_r \times \frac{dN}{dt} \quad (5.30)$$

$$\frac{db}{dt} = 0 \quad (5.31)$$

นำค่าการวัด 2 ค่าที่วัดได้ คืออุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ ( $T_r$ ) และอุณหภูมิแจ็กเก็ต ( $T_j$ ) มาใช้หาค่าประมาณของสแตตทั้งหมด

### 5.2.3 ผลการทดสอบ

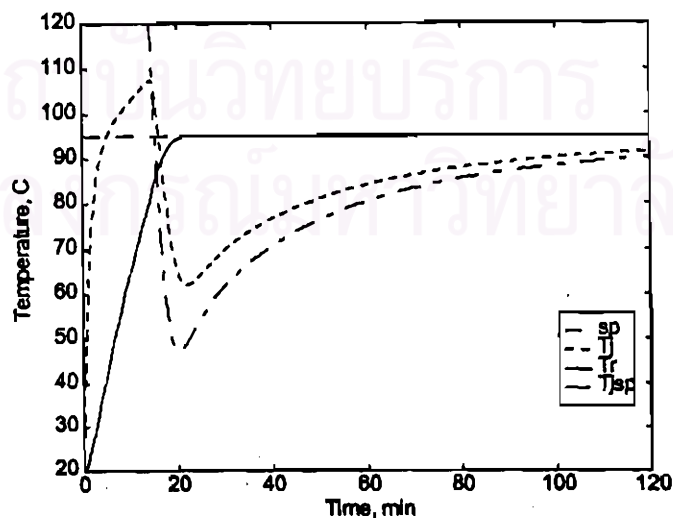
สำหรับกระบวนการนี้ถูกนำมาทดสอบในลักษณะเดียวกับกระบวนการแรก ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 4 กรณี กรณีแรกเป็นการทดสอบการประมาณค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา ซึ่งจะนำไปใช้ในตัวควบคุมเจเนริกโมเดลในสภาวะการทำงานปกติ กรณีที่สองเมื่อค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ( $U$ ) ในแบบจำลองของตัวควบคุมผิดพลาดไป -30% จากค่าปกติ กรณีที่สามคือกรณีแพลนท์ผิดพลาด ซึ่งค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในกระบวนการมีค่าลดลงจากค่าปกติไป 30% และกรณีสุดท้ายเป็นการทดสอบกับระบบที่มีสัญญาณรบกวนในการวัด นอกจากผลการ

ควบคุมของตัวควบคุมเจเนริกโมเดลแล้ว ยังได้แสดงผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอดีในกรณีต่าง ๆ ไว้ด้วย

5.2.3.1 กรณีปกติ รูปที่ 5.14 แสดงผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอดีในกรณีปกติ โดยใช้ค่าคงที่การปรับ  $K_c = 60$ ,  $\tau_i = 3.5$  และ  $\tau_D = 1.1$  ซึ่งให้ค่า IAE และ ISE เท่ากับ 653.563 และ 32427.488 ตามลำดับ รูปที่ 5.15 แสดงสมรรถนะการควบคุมของตัวควบคุมเจเนริกโมเดลในกรณีปกติ โดยใช้ค่าคงที่การปรับและค่าอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.3 ผลการควบคุมของตัวควบคุมเจเนริกโมเดลให้ค่า IAE และ ISE เท่ากับ 650.784 และ 32396.571 ตามลำดับ ในส่วนของตัวกรองคาถมา ค่าประมาณเริ่มต้นของความร้อนที่คายออกมาเท่ากับ 0 และค่าของเมทริกซ์ต่าง ๆ ที่เลือกใช้เป็นดังนี้ :

$$\hat{x}_0 = \begin{bmatrix} 20 \\ 20 \\ 0.4 \\ 0 \\ 0.05 \end{bmatrix}, \quad P_0 = \begin{bmatrix} 0.01 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.01 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 60 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

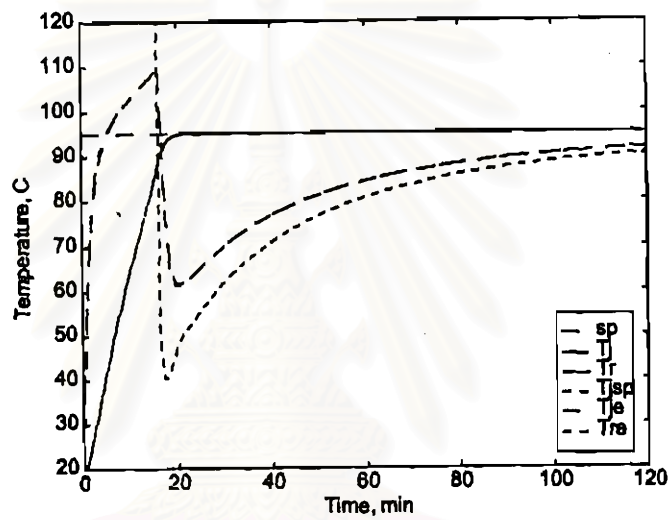
$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1e4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad R = \begin{bmatrix} 1e4 & 0 \\ 0 & 1e4 \end{bmatrix}$$



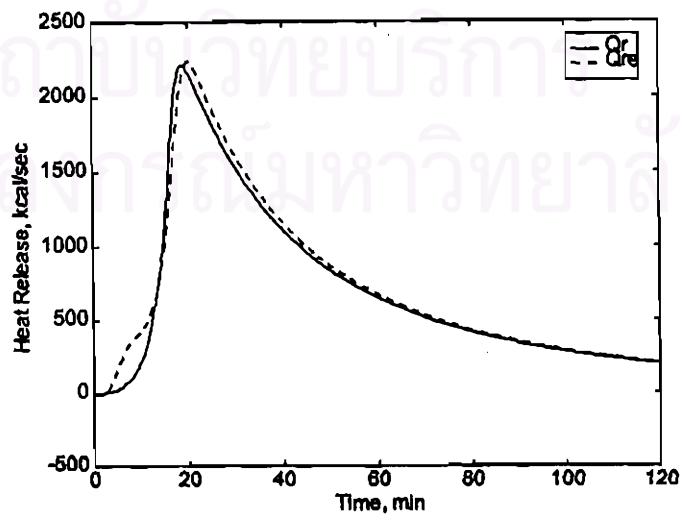
รูปที่ 5.14 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอดีของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะในกรณีปกติ

ตารางที่ 5.3 ค่าคงที่ที่ใช้ในตัวควบคุมเจเนริกโมเดลของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

|  |                              |
|--|------------------------------|
| $K_1 = 5$                                    | $r = 0.5 \text{ m}$          |
| $K_2 = 1e-6$                                 | $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ |
| $C_p = 1.8828 \text{ kJ/(kg}^\circ\text{C)}$ | $\tau_r = 1.5 \text{ min}$   |
| $U = 0.6807 \text{ kW/(m}^3\text{C)}$        | $\Delta t = 0.1 \text{ min}$ |



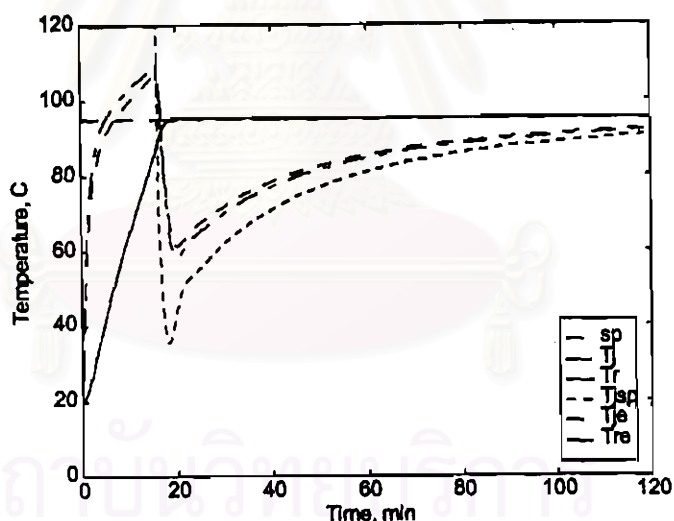
รูปที่ 5.15 ผลตอบสนองของตัวควบคุมเจเนริกโมเดลของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะในกรณีปกติ



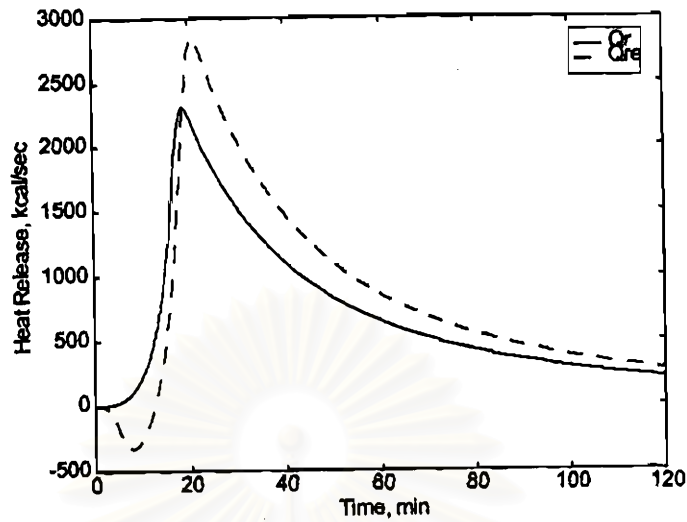
รูปที่ 5.16 การประมาณค่าความร้อนที่คายออกมาในกรณีปกติ

ผลของการประมาณค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาแสดงได้ดังรูปที่ 5.16 โดยค่าประมาณของความร้อนที่คายออกมาในช่วงระยะเวลาแรกมีค่าไม่ถูกต้อง แต่เมื่อเวลาผ่านไป ค่าประมาณของความร้อนที่คายออกมามีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงมากขึ้น ซึ่งทำให้ตัวควบคุมเจเนริกโมเดลสามารถปฏิบัติงานได้

5.2.3.2 กรณีแบบจำลองผิดพลาด รูปที่ 5.17 แสดงผลตอบสนองของตัวควบคุมเจเนริกโมเดลที่ทำงานร่วมกับตัวประมาณค่า เมื่อค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแบบจำลองผิดพลาดไป +30% จากค่าเดิม ดังจะเห็นว่าสมรรถนะของตัวควบคุมเจเนริกโมเดลมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมโดยให้ค่า IAE และ ISE เท่ากับ 656.973 และ 32396.016 ตามลำดับ และผลการประมาณค่าความร้อนที่คายออกมาแสดงดังรูปที่ 5.18

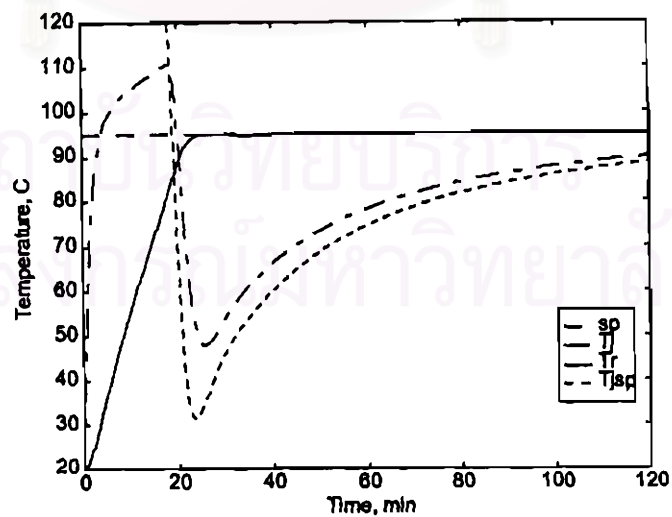


รูปที่ 5.17 ผลตอบสนองของตัวควบคุมเจเนริกโมเดลของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะในกรณีแบบจำลองผิดพลาด

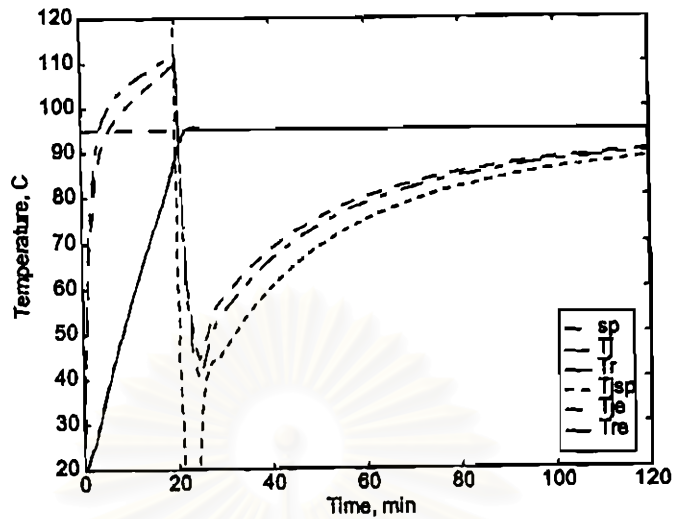


รูปที่ 5.18 การประมาณค่าความร้อนที่คายออกมาในกรณีแบบจำลองผิดพลาด

5.2.3.3 กรณีแพลงก์ผิดพลาด ผลการควบคุมของตัวควบคุมแบบพีไอดีแสดงดังรูปที่ 5.19 เมื่อค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U) มีค่าลดลง 30% จากค่าปกติ ซึ่งให้ค่า IAE และ ISE เท่ากับ 810.376 และ 40435.412 ตามลำดับ

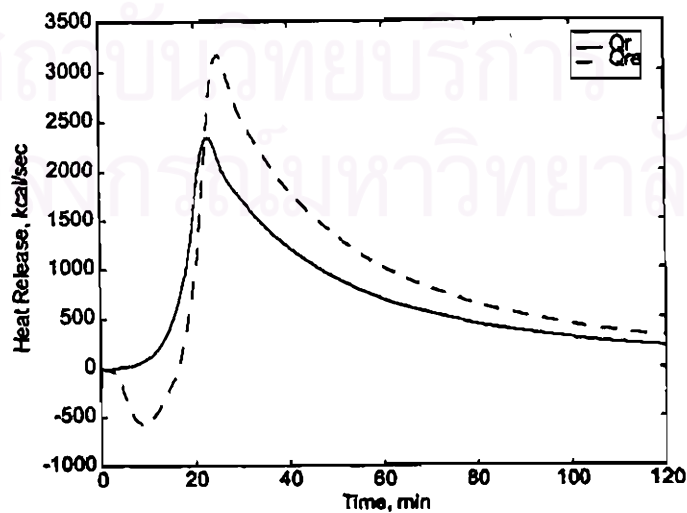


รูปที่ 5.19 ผลตอบสนองของตัวควบคุมพีไอดีของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะในกรณีแพลงก์ผิดพลาด



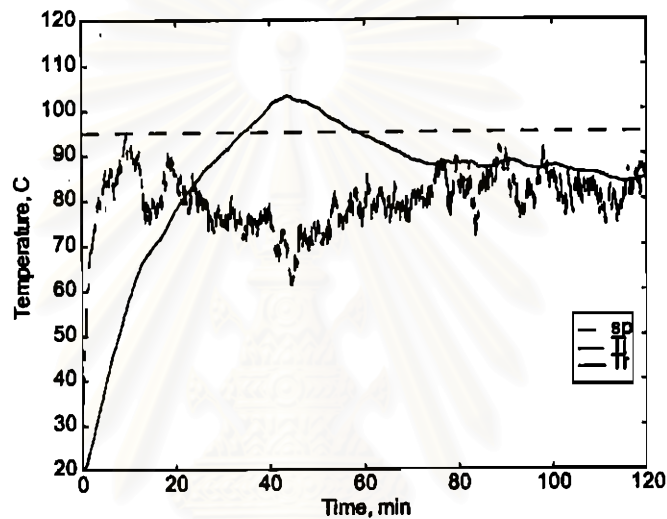
รูปที่ 5.20 ผลตอบสนองตัวควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะในกรณีเพลิงไหม้ผิดพลาด

สำหรับผลตอบสนองตัวควบคุมอุณหภูมิเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในกระบวนการผิดพลาดไป  $-30\%$  จากค่าปกติแสดงดังรูปที่ 5.20 ซึ่งให้ค่า IAE และ ISE เท่ากับ 813.33 และ 40413.35 ตามลำดับ รูปที่ 5.21 แสดงผลการประมาณค่าความร้อนที่คายออกมาเมื่อเพลิงไหม้ผิดพลาด จากรูปจะเห็นว่าค่าประมาณที่ได้ในตอนต้นจะยังมีค่าไม่ถูกต้อง แต่เมื่อเวลาผ่านไป ค่าประมาณที่ได้จะมีค่าสูงกว่าค่าความร้อนที่คายออกมาจริง เนื่องจากค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของกระบวนการมีค่าผิดพลาด

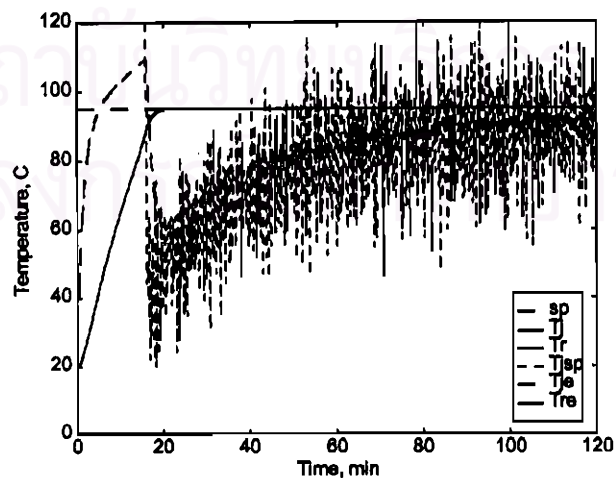


รูปที่ 5.21 การประมาณค่าความร้อนที่คายออกมาในกรณีเพลิงไหม้ผิดพลาด

5.2.3.4 กรณีมีสัญญาณรบกวน เมื่อสัญญาณการวัดที่ได้มีสัญญาณรบกวนแบบสุ่ม ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.07 ผลตอบสนองตัวควบคุมแบบพีไอดีแสดงได้ดังรูปที่ 5.22 และให้ค่า IAE และ ISE เท่ากับ 1472.535 และ 45084.495 ตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีไม่สามารถทำการควบคุม อุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์ได้ โดยที่ตัวแปรปรับ (คืออุณหภูมิแจ็กเก็ต) จะแกว่งอยู่ในช่วง 20-120°C ตั้งแต่เริ่มต้น ทั้งนี้เนื่องมาจากอิทธิพลของสัญญาณรบกวนการวัด

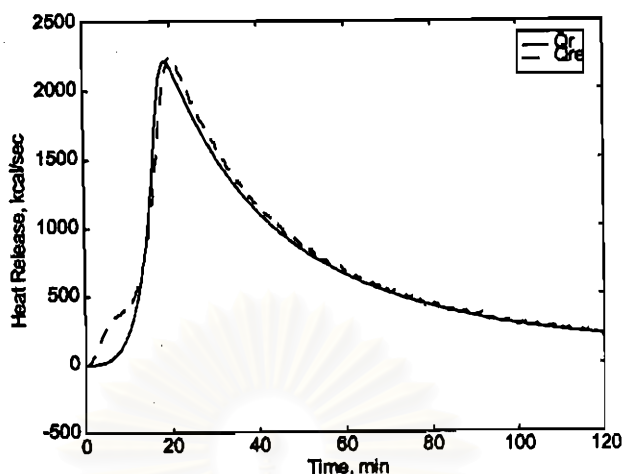


รูปที่ 5.22 ผลตอบสนองตัวควบคุมพีไอดีของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะในกรณีมีสัญญาณรบกวน



รูปที่ 5.23 ผลตอบสนองตัวควบคุมเจนเนริกโมเดลของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะกรณีมีสัญญาณรบกวน



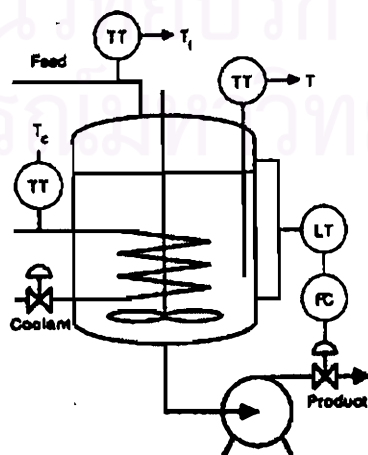


รูปที่ 5.24 การประมาณค่าความร้อนที่คายออกมาในกรณีมีสัญญาณรบกวน

สำหรับผลตอบสนองชั่วคราวของตัวควบคุมเจเนอริกโมเดลเมื่อค่าการวัดมีสัญญาณรบกวนแสดงได้ดังรูปที่ 5.23 ซึ่งให้ค่า IAE และ ISE เท่ากับ 653.134 และ 32401.79 ตามลำดับ ผลการประมาณค่าความร้อนที่คายออกมาเป็นดังรูปที่ 5.24 โดยค่าประมาณที่ได้มีลักษณะคล้ายกับในกรณีปกติ แต่ค่าประมาณของความร้อนที่คายออกจะมีลักษณะสั้นเพียงเล็กน้อยรอบ ๆ ค่าจริง เนื่องจากค่าการวัดมีสัญญาณรบกวนเล็กน้อย

### 5.3 เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนชนิดคายความร้อน

เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนอันดับหนึ่ง เป็นระบบสุดท้ายที่ถูกนำมาทดสอบ โปรแกรม



รูปที่ 5.25 ระบบเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง

### 5.3.1 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าว

แบบจำลองสำหรับปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับไม่ได้อันดับหนึ่งในเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวแสดงในรูปที่ 5.25 เป็นดังนี้ :

$$\frac{dC}{dt} = -k_0 C \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) + \frac{Q}{V}(C_r - C) \quad (5.32)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{(-\Delta H)}{\rho C_p} k_0 C \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) + \frac{Q}{V}(C_r - C) + \frac{UA}{\rho C_p V}(T_c - T) \quad (5.33)$$

เมื่อ  $C$  และ  $T$  คือความเข้มข้นของสารตั้งต้นและอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ตามลำดับ สมมติว่าทราบความเข้มข้นสายป้อน ( $C_r$ ) ซึ่งมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง และสมมติว่าสามารถวัดอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ได้เท่านั้น

จากการคำนวณของ Uppal, Ray และ Poore (1974) สามารถสร้างแบบจำลองให้อยู่ในรูปไร้มิติได้โดยนิยามพารามิเตอร์ใหม่

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{(-\Delta H)C_r}{\rho C_p T_{f_0}} \gamma & \delta &= \frac{UA}{\rho C_p Q_0} & \gamma &= \frac{E}{R T_{f_0}} \\ \phi &= \frac{V}{Q_0} k_0 e^{-\gamma} & q &= \frac{Q}{Q_0} \end{aligned} \quad (5.34)$$

เมื่อ  $Q_0$  และ  $T_{f_0}$  คือค่าปกติ (nominal value) ของอัตราการไหลเชิงปริมาตรและอุณหภูมิสายป้อน

นิยามของตัวแปรในรูปไร้มิติที่สอดคล้องกันคือ

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{Q_0}{V} t & u &= \frac{\gamma \delta}{T_{f_0}} (T_c - T_{f_0}) & v &= \frac{\gamma q}{T_{f_0}} (T_r - T_{f_0}) \\ x_1 &= \frac{C}{C_r} & x_2 &= \frac{T - T_{f_0}}{T_{f_0}} \gamma \end{aligned} \quad (5.35)$$

เมื่อ  $u$  คือค่าด้านขาเข้าของกระบวนการที่ถูกวัด,  $x_1$  คือความเข้มข้นของสารตั้งต้นในรูปไร้มิติ และ  $x_2$  คืออุณหภูมิในรูปไร้มิติ

จัดสมการให้อยู่ในรูปไร้มิติได้เป็น

$$\frac{dx_1}{d\tau} = -\phi x_1 \kappa(x_2) + q(1 - x_1) \quad (5.36)$$

$$\frac{dx_2}{d\tau} = \beta \phi x_1 \kappa(x_2) - (q + \delta)x_2 + u + v \quad (5.37)$$

เมื่อ  $\kappa(x_2)$  เป็นฟังก์ชันในรูปไร้มิติ

$$k(x_2) = \exp\left(\frac{x_2}{1 + x_2/\gamma}\right) \quad (5.38)$$

ระบบปฏิบัติการแบบง่ายนี้แสดงถึงความไวต่อพารามิเตอร์อย่างรุนแรงที่สภาวะปฏิบัติการ (Ray, 1981) โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดไว้ ยกเว้นอุณหภูมิสายป้อน ( $T_1$ ) การปรับค่า  $T_1$  เพียงเล็กน้อย ทำให้อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์มีการเปลี่ยนแปลงที่น่ากลัว ดังนั้นวิธีการออกแบบระบบควบคุมสำหรับสมการแบบจำลองที่ถูกต้องทำให้เป็นเชิงเส้นจะใช้งานได้ไม่ดีในกรณีนี้

### 5.3.2 ตัวควบคุม

ตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมระบบนี้คือตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล เป็นตัวควบคุมที่อาศัยแบบจำลองชนิดหนึ่งที่เราเข้าใจได้ง่ายและให้ผลการควบคุมที่มีประสิทธิภาพ การควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ถึงความต้องการใช้แบบจำลองกระบวนการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ ( $T$ ) กับตัวแปรปรับ แต่เนื่องจากตัวแปร  $u$  ในสมการ (5.37) เป็นตัวแปรปรับ ดังนั้นสมการตัวควบคุมเจนเนริกโมเดลคือ

$$u = K_1(x_2^{sp} - x_2) + K_2 \int_0^t (x_2^{sp} - x_2) dt - \beta \phi x_1 k(x_2) + (q + \delta)x_2 - v \quad (5.39)$$

เมื่อ  $x_2^{sp}$  คือจุดปรับตั้งของ  $x_2$

สมการ (5.39) เป็นสมการตัวควบคุมในรูปต่อเนื่อง สามารถแปลงไปเป็นสมการสำหรับระบบไม่ต่อเนื่องได้

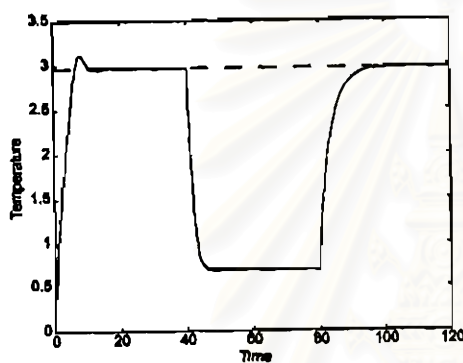
$$u^{(k)} = K_1(x_2^{sp} - x_2^{(k)}) + K_2 \sum_0^k (x_2^{sp} - x_2^{(k)}) \Delta t - \beta \phi x_1^{(k)} k(x_2^{(k)}) + (q + \delta)x_2^{(k)} - v^{(k)} \quad (5.40)$$

สำหรับกระบวนการนี้ ตัวควบคุมเจนเนริกโมเดลสามารถนำไปประยุกต์กับการควบคุม  $x_2$  ได้เท่านั้น เนื่องจากตัวแปรปรับ  $u$  ปรากฏอยู่ในสมการแบบจำลองเพียงสมการเดียวคือสมการอนุรักษ์พลังงานรอบเครื่องปฏิกรณ์ และในระบบนี้สามารถวัดอุณหภูมิได้เพียงค่าเดียว

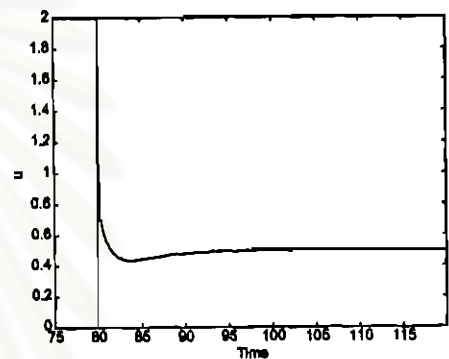
### 5.3.3 ตัวกรองคาบมานสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่อง

ในเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่อง ปฏิริยาอันดับหนึ่งผันกลับไม่ได้  $A \rightarrow B$  เกิดขึ้นสามารถวัดค่าอุณหภูมิได้เพียงค่าเดียว แต่ประมาณค่าอุณหภูมิ, ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปแบบไร้มิติ ค่าประมาณของความเข้มข้นถูกนำไปใช้เพื่อให้ตัวควบคุมเจนเนริกโมเดลปฏิบัติการได้

เริ่มต้นเครื่องปฏิกรณ์ด้วยความเข้มข้นเริ่มต้น  $x = 1$  และอุณหภูมิ  $T = T_r$  อุณหภูมิสายป้อนเริ่มต้น ( $T_r$ ) และอุณหภูมิสายป้อนปกติ ( $T_{no}$ ) อุณหภูมิทั้งสองค่าเท่ากับ 300 K พารามิเตอร์ทั้งหมดถูกกำหนดค่าไว้ ยกเว้นอุณหภูมิสายป้อน ( $T_r$ ) ค่าพารามิเตอร์, เงื่อนไขเริ่มต้นและการรบกวนสายป้อนแสดงได้ดังตารางที่ 5.4 ทำการเขียนแบบระบบปฏิกิริยาวงเปิดที่มีการรบกวนอุณหภูมิสายป้อนตั้งแต่เริ่มต้นและที่เวลา  $t = 40$  จนกระทั่งที่เวลา  $t = 80$  ตัวควบคุมจึงเริ่มทำงาน กำหนดให้การปฏิบัติการควบคุม (control action) มีขีดจำกัดต่างเป็น -1 และขีดจำกัดบนเป็น 2



(ก)



(ข)

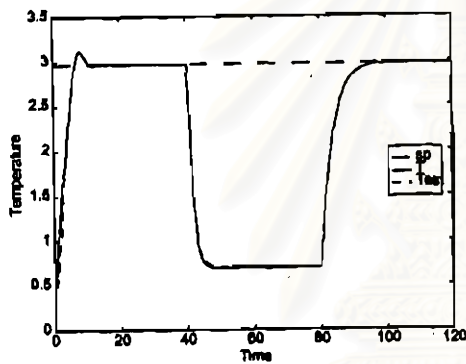
รูปที่ 5.26 ผลตอบสนองตัวควบคุมแบบพีไอดีของเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนในกรณีปกติ  
(ก) อุณหภูมิด้านขาออกเครื่องปฏิกรณ์; (ข) ตัวแปรปรับ

รูปที่ 5.26 แสดงผลการเขียนแบบโดยปราศจากสัญญาณรบกวนในการวัดและเมื่อระบบปฏิกิริยาไม่มีสภาวะคงที่หรือการสั่นหลายแห่ง แต่แสดงความไวในการเข้าสู่สภาวะคงที่ เมื่ออุณหภูมิ  $T_r$  เพิ่มขึ้น 4.5 K และลดลง 3 K ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรงของอุณหภูมิและความเข้มข้นของระบบวงเปิด ผลของการรบกวนนี้ถูกจัดการเมื่อตัวควบคุมพีไอดีเริ่มทำงานที่เวลา  $t = 80$  มีค่าคงที่การปรับ  $K_c$ ,  $\tau_i$  และ  $\tau_D$  เท่ากับ 3, 3.5 และ 0.01 ตามลำดับ ซึ่งให้ค่า IAE และ ISE เท่ากับ 7.251 และ 7.512 ตามลำดับ

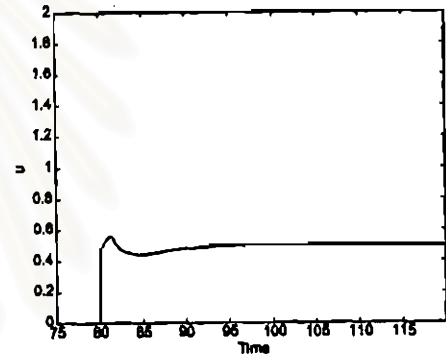
สำหรับผลตอบสนองตัวควบคุมเจเนริกโมเดลซึ่งเริ่มทำงานที่เวลา  $t = 80$  เช่นเดียวกัน โดยมีค่าคงที่การปรับ  $K_1$  และ  $K_2$  เท่ากับ 0.2 และ  $2.5e-5$  ตามลำดับ ดังรูปที่ 5.27 ซึ่งให้ค่า IAE และ ISE เท่ากับ 8.398 และ 10.077 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.4 ค่าพารามิเตอร์, สภาวะเริ่มต้นและสัญญาณรบกวน

|                     |  |
|---------------------|--|
| $\phi = 0.11$       | $\Delta T_r = \begin{cases} 4.5 \text{ K}, & 0 \leq t < 40 \\ -3 \text{ K}, & t \geq 40 \end{cases}$ |
| $\beta = 7$         |  |
| $\delta = 0.5$      | $\gamma = 20$  |
| $T = 300 \text{ K}$ | $x_1 = 1$  |
| $x_2 = 0$           | $T_{n0} = 300 \text{ K}$   |
| $q = 1$             | $T_r = 300 \text{ K}$  |



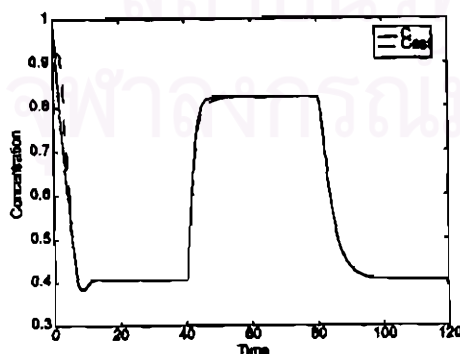
(ก)



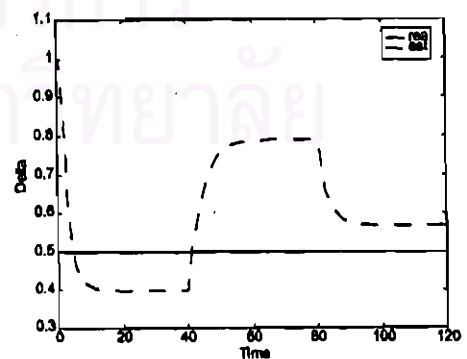
(ข)

รูปที่ 5.27 ผลตอบสนองชั่วคราวของตัวควบคุมเจเนติกโมเดลของเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวในกรณีปกติ

(ก) อุณหภูมิด้านขาออกเครื่องปฏิกรณ์; (ข) ตัวแปรปรับ



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.28 การประมาณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในกรณีปกติ—(ก) ความเข้มข้นของสารตั้งต้น;

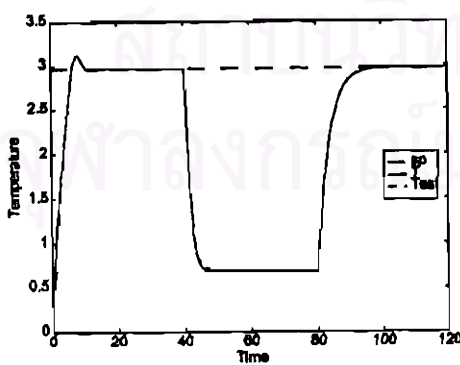
(ข) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปแบบไร้มิติ

ในการประมาณค่าของระบบนี้ เพื่อคำนวณหาค่าประมาณที่เหมาะสมที่สุดของความเข้มข้นของสารในเครื่องปฏิกรณ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปไร้มิติ ค่าประมาณเริ่มต้นของความเข้มข้นของสารตั้งต้นและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปไร้มิตินี้มีค่าเท่ากับ 0.1 และ 1 ตามลำดับ และค่าของเมทริกซ์ต่าง ๆ ที่เลือกใช้เป็นดังนี้ :

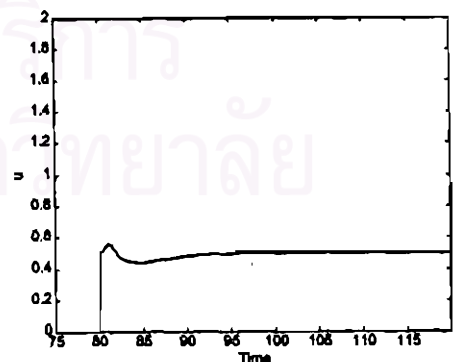
$$\hat{x}_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad P_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad R = [100]$$

ผลการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์ด้วยตัวกรองกาลมานเป็นดังรูปที่ 5.28 ซึ่งค่าประมาณของความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริง ขณะที่ค่าประมาณของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปไร้มิตินี้มีค่าเปลี่ยนแปลงไปโดยมีค่าเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง ก่อนที่จะมีการเปลี่ยนแปลงแล้วเข้าสู่ค่าคงที่ค่าใหม่เมื่อระบบถูกรบกวน และสุดท้ายเมื่อระบบถูกจัดการโดยตัวควบคุมเจเนริกโมเดล ค่าประมาณของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะเข้าสู่ค่าคงที่ค่าใหม่อีกค่าหนึ่ง

5.3.3.1 กรณีแบบจำลองผิดพลาด เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปไร้มิติ (δ) ของตัวควบคุมเจเนริกโมเดลผิดพลาดไป -30% ผลตอบสนองของตัวควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 5.29 (ก) และ 5.29 (ข) ซึ่งให้ค่า IAE และ ISE เท่ากับ 8.398 และ 10.077 ตามลำดับ ส่วนผลการประมาณค่าเป็นดังรูปที่ 5.30 (ก) และ 5.30 (ข) ซึ่งค่าประมาณที่ได้ของความเข้มข้นของสารตั้งต้นและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปไร้มิตินี้จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับการประมาณค่าในกรณีปกติ ดังแสดงในตอนต้น

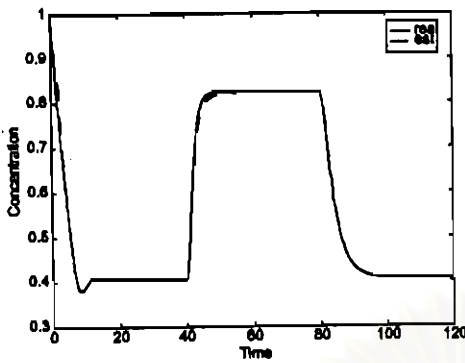


(ก)

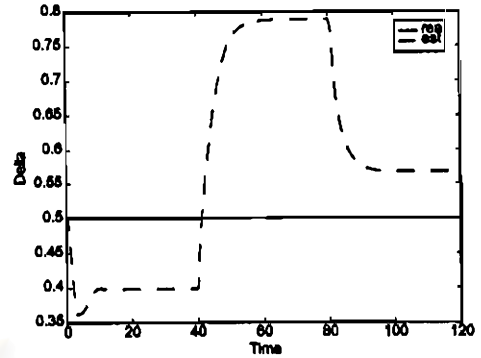


(ข)

รูปที่ 5.29 ผลตอบสนองของตัวควบคุมเจเนริกโมเดลของเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวกรณีแบบจำลองผิดพลาด—(ก) อุณหภูมิด้านขาออกเครื่องปฏิกรณ์; (ข) ตัวแปรปรับ



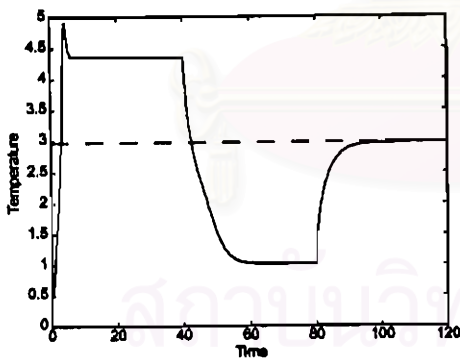
(ก)



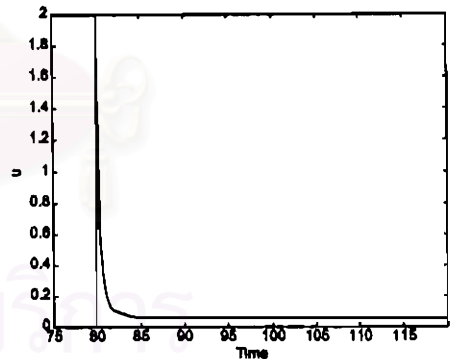
(ข)

รูปที่ 5.30 การประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในกรณีแบบจำลองผิดพลาด—(ก) ความเข้มข้นของสารตั้งต้น; (ข) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปไร้มิติ

5.3.3.2 กรณีแพลงก์ผิดพลาด รูปที่ 5.31 เป็นผลตอบสนองตัวควบคุมแบบพีไอดี เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปไร้มิติในกระบวนการมีค่าผิดพลาดไป -30% จากค่าปกติ ซึ่งให้ค่า IAE และ ISE เท่ากับ 5.463 และ 4.540 ตามลำดับ



(ก)



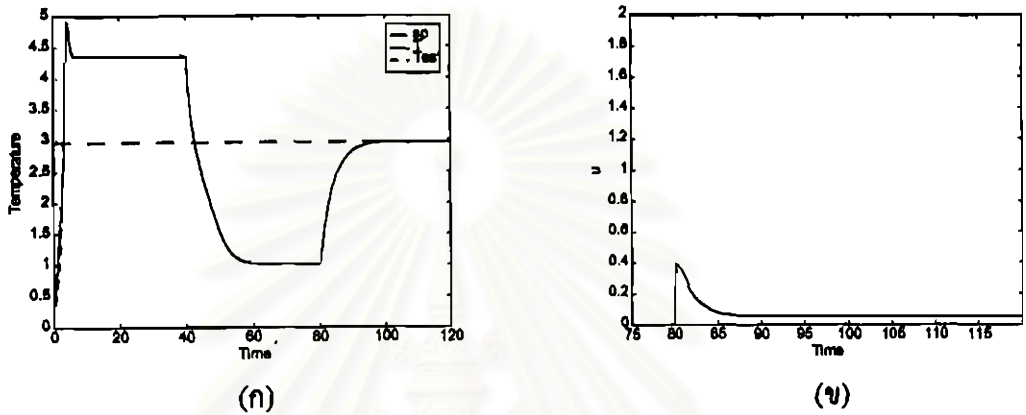
(ข)

รูปที่ 5.31 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอดีของเครื่องปฏิกรณ์ดังกวนในกรณีแพลงก์ผิดพลาด—(ก) อุณหภูมิด้านขาออกเครื่องปฏิกรณ์; (ข) ตัวแปรปรับ

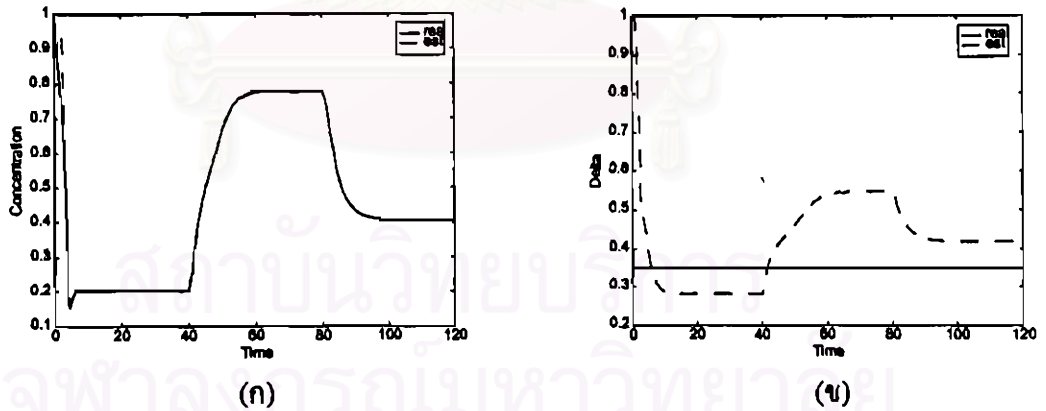
สำหรับผลตอบสนองของตัวควบคุมเจนริกโมเดลเป็นดังรูปที่ 5.32 (ก) และ 5.32 (ข) ซึ่งให้ค่า IAE และ ISE เท่ากับ 7.570 และ 7.743 ตามลำดับ และรูปที่ 5.33 (ก) และ 5.33 (ข) แสดงผลการประมาณค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปไร้มิติ จากรูปจะเห็นว่าค่าประมาณของความเข้มข้นของสารตั้งต้นและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูป



ไร้มิติจะมีลักษณะคล้ายกับในกรณีปกติ โดยที่ค่าประมาณของความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริง ส่วนค่าประมาณของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะมีค่าเข้าค่าคงที่ค่าใดค่าหนึ่งเหมือนกับในกรณีปกติ

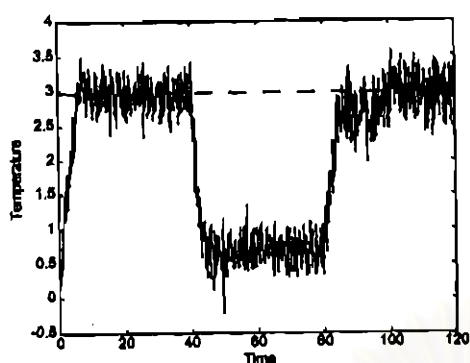


รูปที่ 5.32 ผลตอบสนองตัวควบคุมเจเนริก โมเดลของเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวในกรณีแพลนท์ ผิดพลาด—(ก) อุณหภูมิด้านขาออกเครื่องปฏิกรณ์; (ข) ตัวแปรปรับ

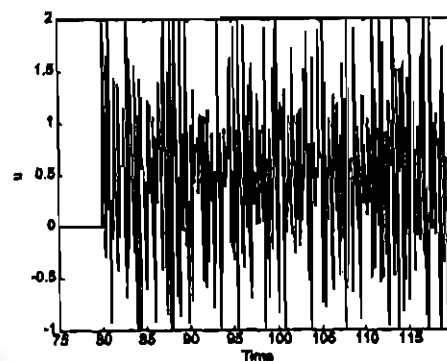


รูปที่ 5.33 การประมาณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในกรณีแพลนท์ผิดพลาด—(ก) ความเข้มข้นของสารตั้งต้น; (ข) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปไร้มิติ

5.3.3.3 กรณีมีสัญญาณรบกวน เมื่อค่าการวัดถูกรบกวนโดยสัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ และมีความแปรปรวนเท่ากับ 0.04 ผลตอบสนองตัวควบคุมแบบพีไอดีเป็นดังรูปที่ 5.34 ซึ่งให้ค่า IAE และ ISE เท่ากับ 14.235 และ 11.747 ตามลำดับ



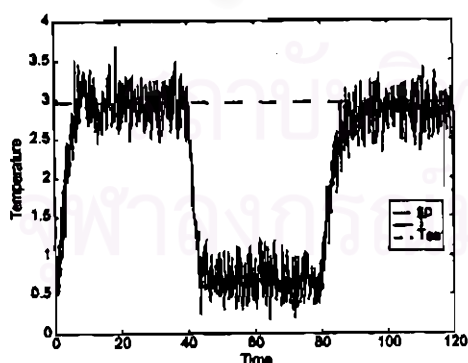
(ก)



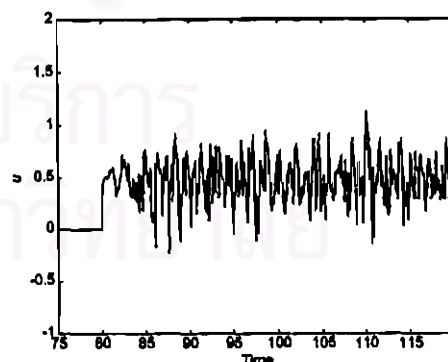
(ข)

รูปที่ 5.34 ผลตอบสนองตัวควบคุมแบบพีไอดีของเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวในกรณีมีสัญญาณรบกวน—(ก) อุณหภูมิด้านขาออกเครื่องปฏิกรณ์; (ข) ตัวแปรปรับ

ผลตอบสนองของตัวควบคุมเจเนริกโมเดลแสดงได้ดังรูปที่ 5.35 (ก) และ 5.35 (ข) ซึ่งให้ค่า IAE และ ISE เท่ากับ 14.007 และ 12.451 ตามลำดับ รูปที่ 5.36 (ก) และ 5.36 (ข) แสดงผลการประมาณค่าของความเข้มข้นของสารตั้งต้นและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปไร้มิติ ผลของการประมาณค่าที่ได้พบว่าจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับผลการประมาณค่าในกรณีปกติ แต่ค่าประมาณที่ได้จะมีลักษณะแกว่งเล็กน้อยเนื่องมาจากสัญญาณการวัดที่ได้ถูกรบกวนโดยสัญญาณรบกวนแบบเกาส์

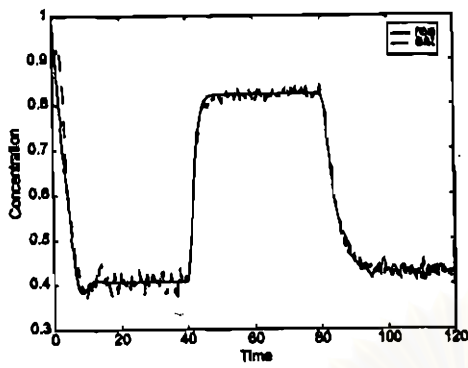


(ก)

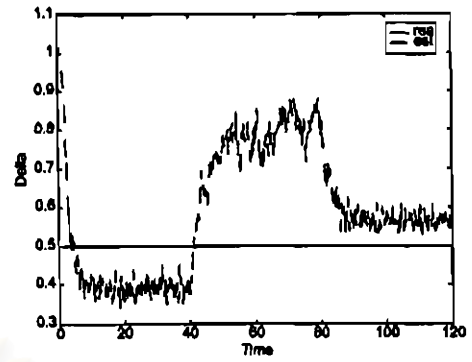


(ข)

รูปที่ 5.35 ผลตอบสนองตัวควบคุมเจเนริกโมเดลของเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวในกรณีมีสัญญาณรบกวน—(ก) อุณหภูมิด้านขาออกเครื่องปฏิกรณ์; (ข) ตัวแปรปรับ



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.36 การประมาณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในกรณีมีสัญญาณรบกวน—(ก) ความเข้มข้นของสารตั้งต้น; (ข) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปไร้มิติ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย