บทที่ 6

วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

ในงานนี้ตัวควบคุมจีเอ็มซีถูกใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์การเกิดพอลิเมอร์แบบเซมิแบทช์ ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงทำให้อาจเกิดโอเวอร์ชูตได้ ตัวควบคุมจีเอ็มซีที่ได้ถูกออกแบบขึ้นเพื่อใช้ในการควบคุม โดยตัวควบคุมจีเอ็มซีนี้จะถูกเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุมกับการควบคุมป้อนกลับแบบพีไอดี ด้วยการดูการโอเวอร์ชูตและวัด**ค่าอินทริกรัลของกำลังสองของค่าความผิดพลาด** (Integral of The Square of the Error **(ISE)**) หรือ **ค่าไอเอสอี** ซึ่งค่าไอเอสอีนี้เหมาะกับระบบที่มีค่าความผิดพลาดมากๆ และสามารถหาได้จากสมการข้างล่างนี้

$$ISE = \int_0^\infty e^2(t)dt \qquad 6.1$$

เมื่อ $e(t)$ เป็นสัญญาณความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเซ็ทพอยท์และค่าอุณหภูมิที่วัดได้

โดยค่าไอเอสอีจะถูกวัดเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมทั้งในกรณีที่การดำเนินการปกติ และกรณีที่มีความผิดพลาดในพารามิเตอร์ทั้ง 4 กรณีที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 5.

จากการทดลองที่ได้ทำการจำลองระบบในคอมพิวเตอร์บนโปรแกรมแมทแลบ โดยที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆรวมถึงแบบจำลองของกระบวนการ และแบบจำลองของตัวควบคุมได้แสดงไว้แล้วในบทที่ 5.แล้ว ดังนั้น ในบทนี้จะเป็นการวิเคราะห์ผลการทดลอง และสรุปผลการทดลองที่ได้จากการจำลองระบบต่อไป

6.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการทดลองจะแบ่งเป็นสองกรณีคือ

6.1-1. กรณีที่สภาวะการดำเนินการปกติ (Nominal Operation Case)

6.1-2. กรณีที่มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ (Parameter Mismatch Case)

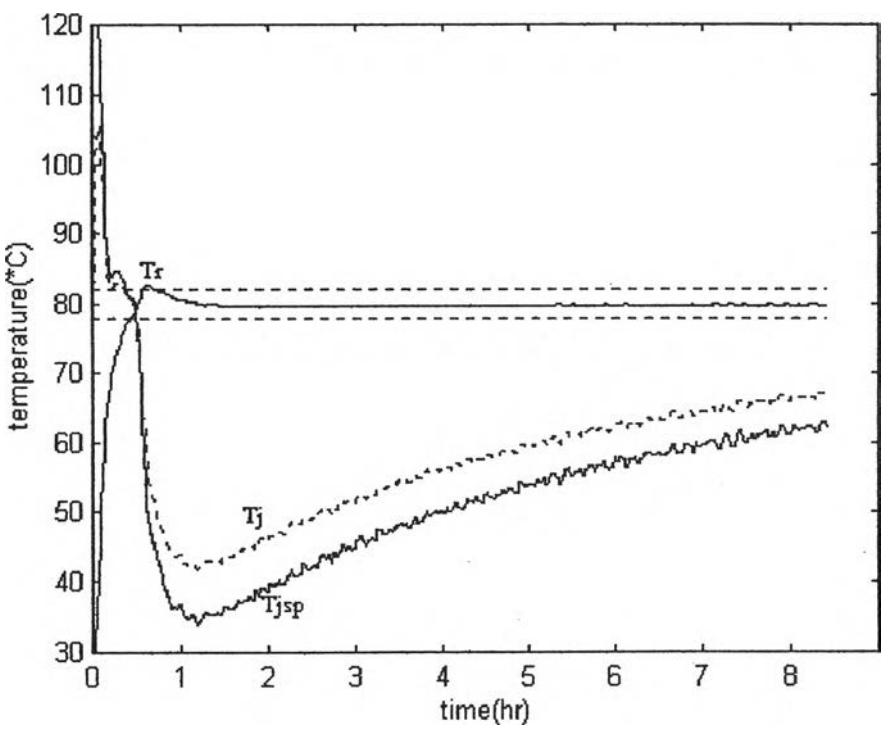
6.1-3.กรณีที่ระบบมีผลของการเจลในปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเซมิแบทช์

6.1-1. กรณีที่สภาวะการดำเนินการปกติ

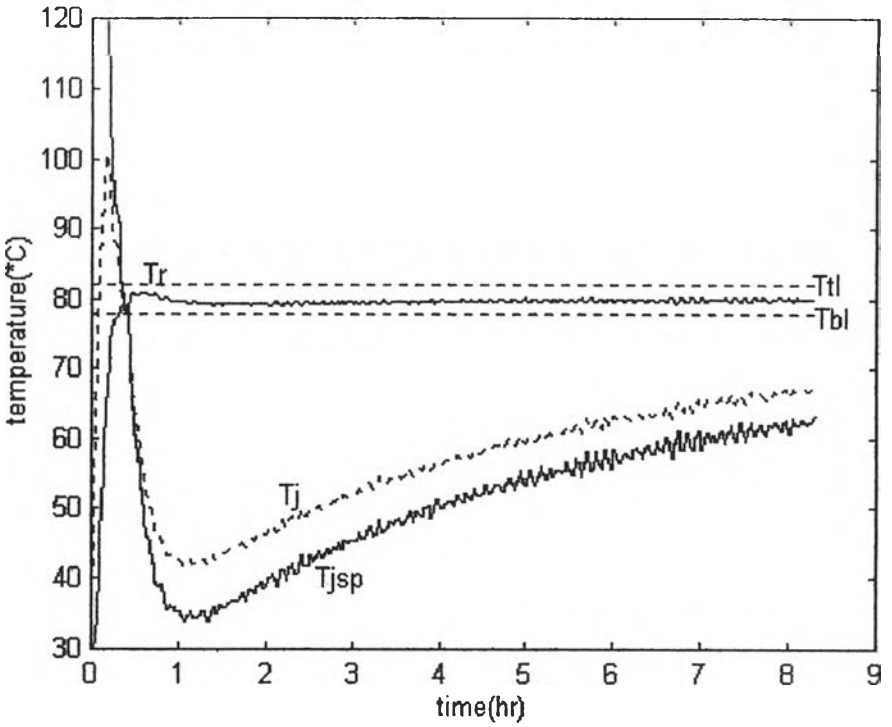
กรณีที่สภาวะการดำเนินการปกติจะได้ผลการตอบสนองของตัวควบคุมพีไอดีดังรูปที่ 6.1 และผลการตอบสนองของตัวควบคุมจีเอ็มซีดังรูปที่ 6.2 รวมถึงค่าความร้อนที่ประมาณได้ดังรูปที่ 6.3 ซึ่งค่าไอเอสอีที่วัดได้สามารถดูได้จากตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ค่าไอเอสอีที่วัดได้จากการทดลองที่สภาวะการดำเนินการปกติ

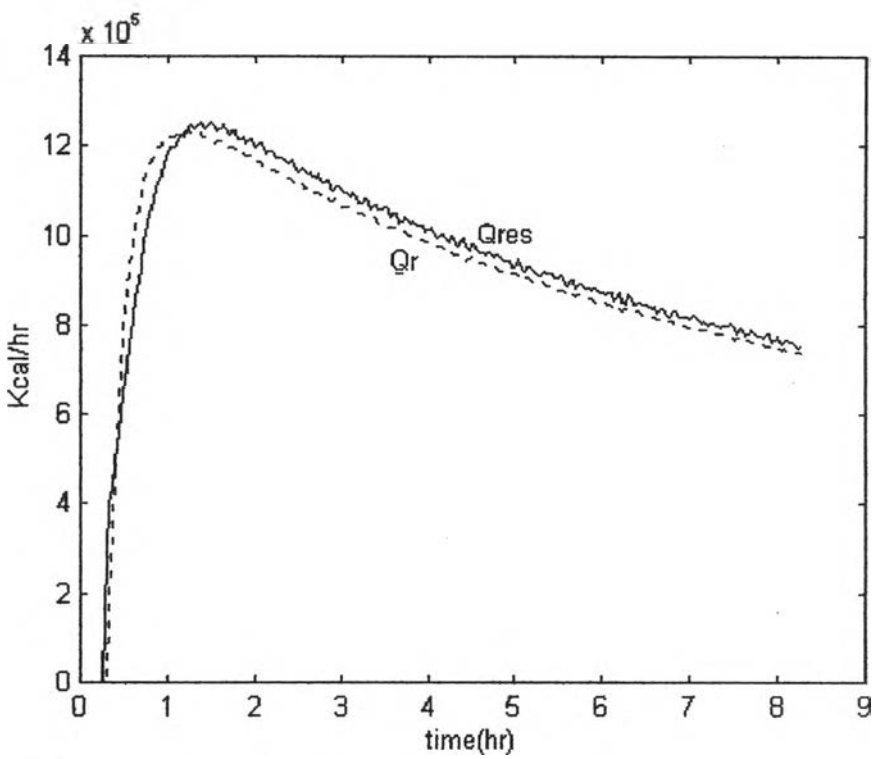
อธิบาย	สัญลักษณ์	ค่า
ค่าไอเอสอีของตัวควบคุมพีไอดี	$ISE - P$	151.5081
ค่าไอเอสอีของตัวควบคุมจีเอ็มซี	$ISE - G$	137.2900



รูปที่ 6.1 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมพีไอดีที่สภาวะการดำเนินการปกติ



รูปที่ 6.2 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมจีเอ็มซีที่สภาวะการดำเนินการปกติ



รูปที่ 6.3 ค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาจริง (Q_r) และค่าความร้อนที่ที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ถูกประมาณค่าได้ (Q_{res})

จากผลการตอบสนองของตัวควบคุมทั้งสองที่ได้จากการจำลองในกรณีที่สภาวะการดำเนินการปกติ และค่าไอเอสอีที่วัดได้ จะเห็นว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมจีเอ็มซีจะดีกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมป้อนกลับแบบพีไอดี ซึ่งเมื่อดูจากผลการตอบสนองที่ได้จากตัวควบคุมจีเอ็มซีจะเห็นว่ามันค่อยๆเข้าสู่อุณหภูมิเซ็ทพอยท์โดยที่มีการโอเวอร์ชูตเพียงเล็กน้อย ตรงกันข้ามกับผลการตอบสนองที่ได้จากการควบคุมแบบพีไอดีจะเกิดการโอเวอร์ชูตมากกว่าเล็กน้อย และในขั้นตอนการดำเนินการให้ความร้อนกับเครื่องปฏิกรณ์เพื่อทำให้ถึงเซ็ทพอยท์นั้น จะเห็นว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมจีเอ็มซีเร็วและราบเรียบกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมพีไอดี

ส่วนสมรรถนะของตัวประมาณค่าออนไลท์ที่นำมาใช้ประมาณค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานั้น จะเห็นว่าจะให้ค่าความร้อนที่ประมาณได้ใกล้เคียงกับค่าจริงมาก โดยที่ค่าความร้อนที่ประมาณได้มีค่ามากกว่าและช้ากว่าค่าความร้อนที่เกิดเพียงเล็กน้อยจริงเล็กน้อย ซึ่งอาจมีผลทำให้ตัวควบคุมจีเอ็มซีไม่สามารถกำจัดการเกิดโอเวอร์ชูตให้หายไปได้ทั้งหมด

นอกจากนี้ จากค่าไอเอสอีที่วัดได้จะเห็นว่าค่าไอเอสอีที่วัดได้จากผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอดีมีค่ามากกว่าค่าไอเอสอีที่วัดได้จากผลการตอบสนองของตัวควบคุมจีเอ็มซี แสดงว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอดีเบี่ยงเบนจากเซ็ทพอยท์มากกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมจีเอ็มซี

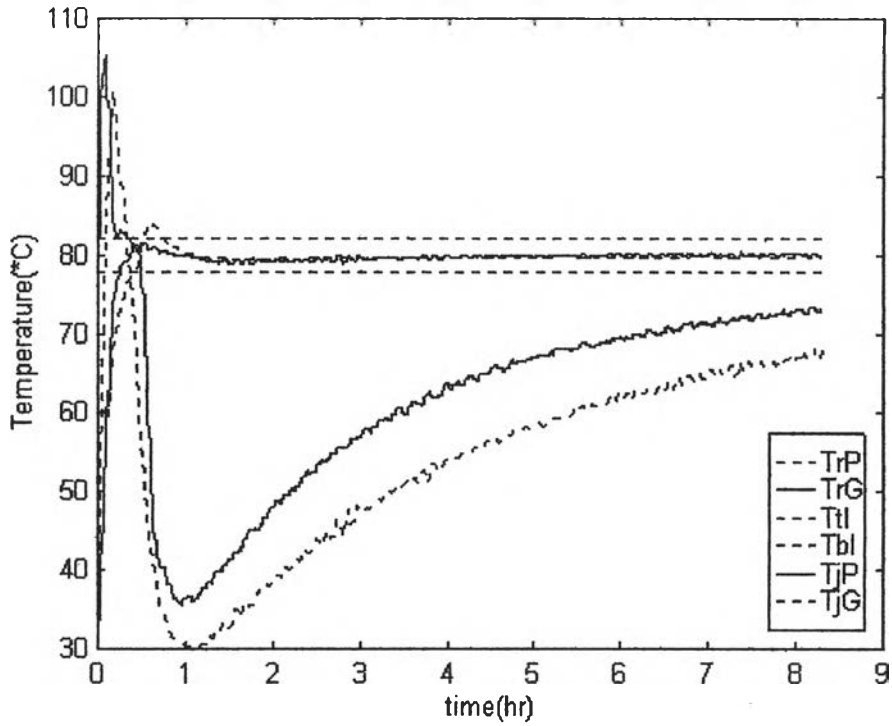
ดังนั้น ในกรณีที่สภาวะการดำเนินการปกติ ตัวควบคุมจีเอ็มซีสามารถกำหนดผลการตอบสนองของอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์การเกิดพอลิเมอร์ได้ดีกว่าตัวควบคุมป้อนกลับแบบพีไอดี

6.1-2. ในกรณีที่มีความผิดพลาดในพารามิเตอร์

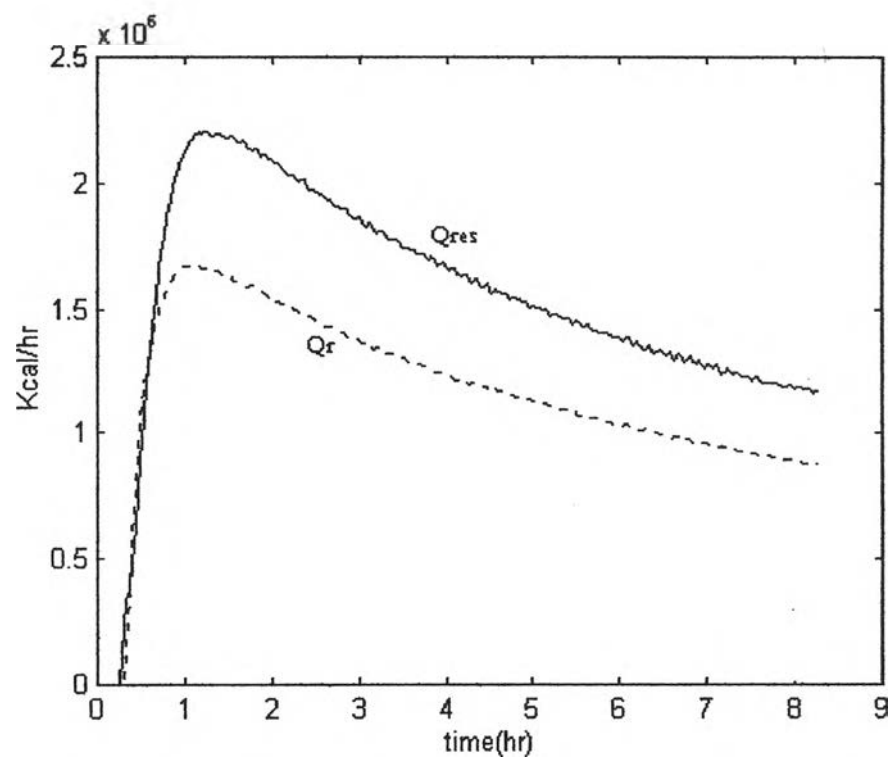
ผลการตอบสนองของตัวควบคุมทั้งสองในกรณีที่มีความผิดพลาดในพารามิเตอร์ทั้ง 4 กรณี สามารถดูได้จากรูปที่ 6.4, 6.6, 6.8, และ6.10 ส่วนสมรรถนะของตัวประมาณค่าความร้อนที่ปล่อยออกมาจากปฏิกิริยาสามารถดูได้จากรูปที่ 6.5, 6.7, 6.9 และ 6.11 ส่วนค่าไอเอสอีที่วัดได้ในกรณีที่มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ต่างๆสามารถดูได้จากตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ค่าไอเอสอีที่วัดได้ในกรณีที่มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ต่างๆ

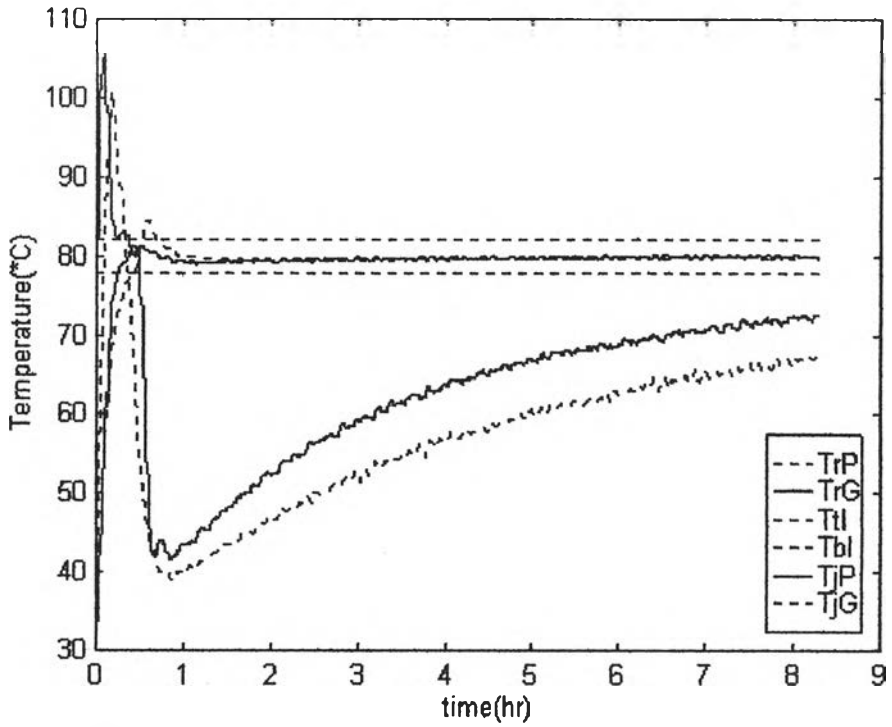
กรณีที่มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์	ค่าไอเอสอีของพีไอดี	ค่าไอเอสอีของจีเอ็มซี
1. อัตราการป้อนเพิ่มขึ้น 40 %	155.2867	137.6714
2. อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 50 %	154.9245	134.4778
3. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมลดลง 20 %	176.4660	166.9777
4. รวมกรณีที่ 2 และกรณีที่ 3	178.9224	167.236



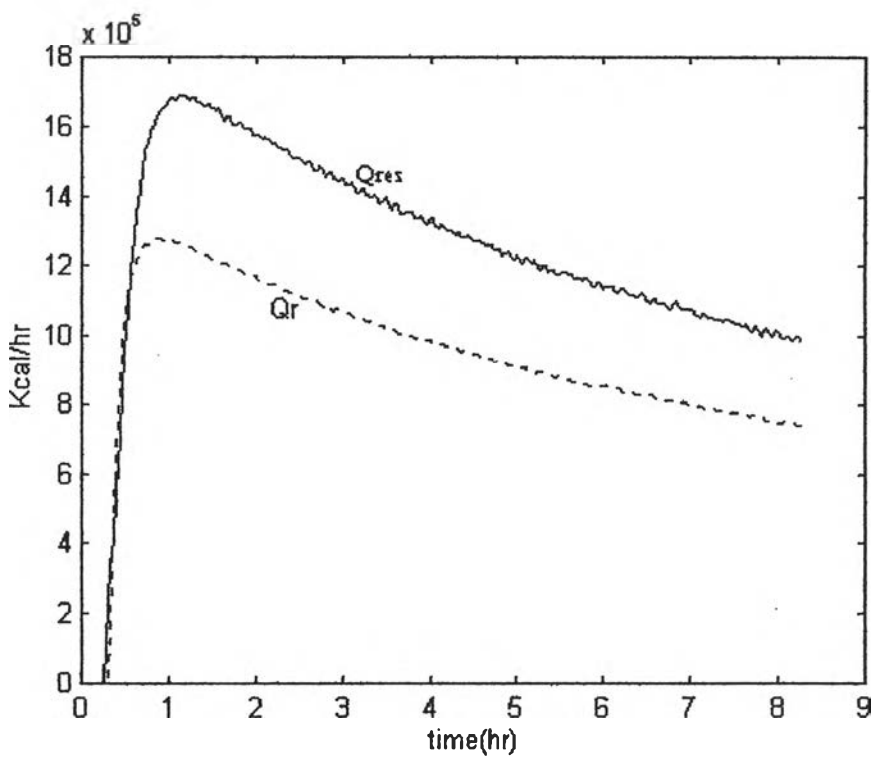
รูปที่ 6.4 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมจีเอ็มซีเมื่ออัตราการป้อนโมโนเมอร์เพิ่มขึ้น 40 %



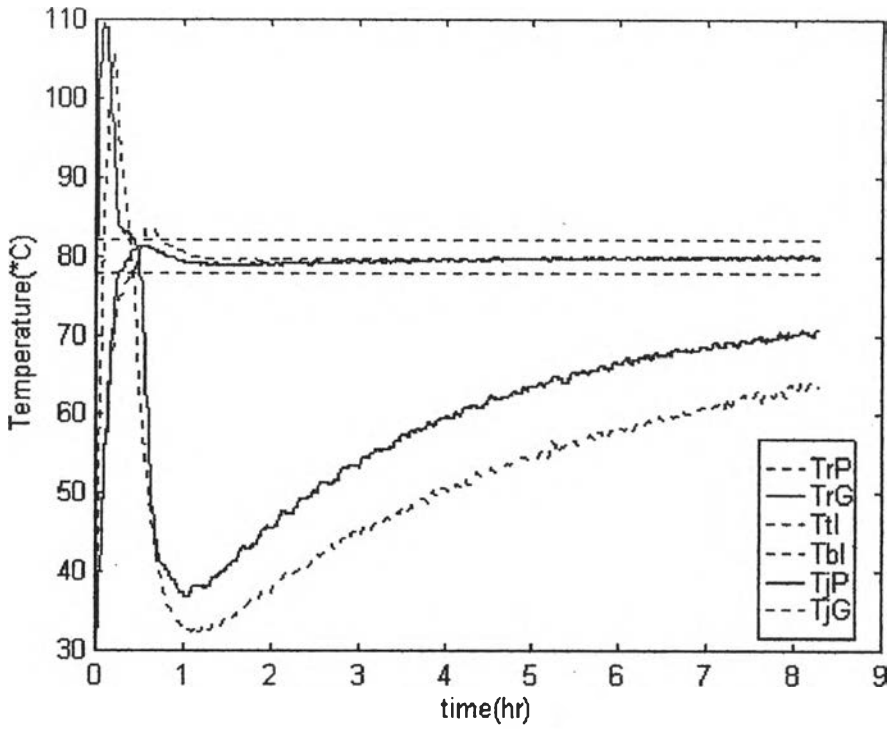
รูปที่ 6.5 ค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาจริง (Q_r) และค่าความร้อนที่ที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ถูกประมาณค่าได้ (Q_{res}) เมื่ออัตราการป้อนโมโนเมอร์เพิ่มขึ้น 40 %



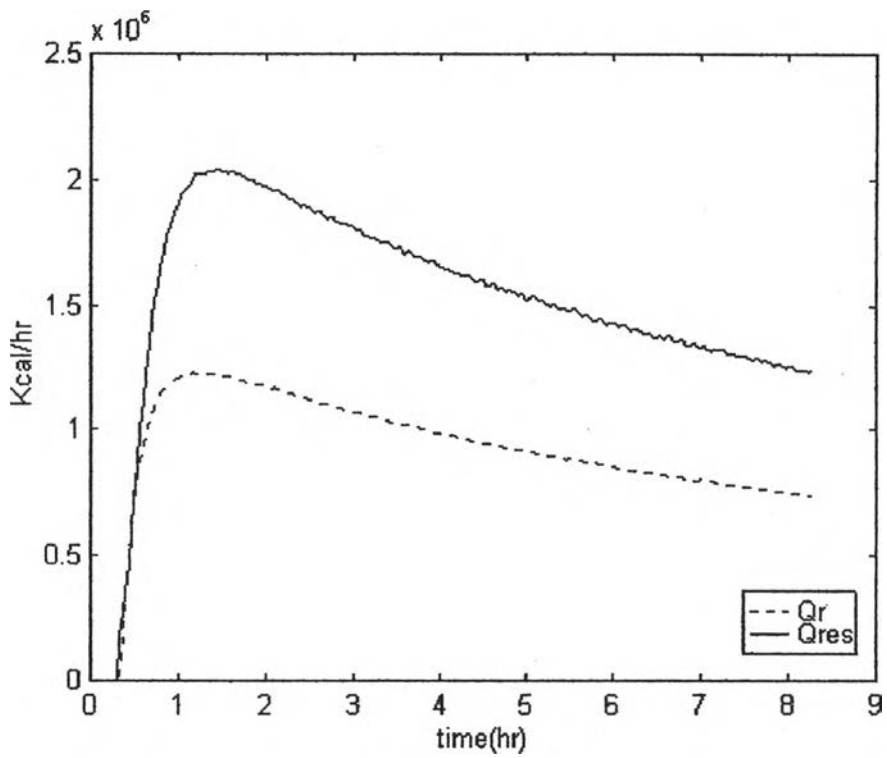
รูปที่ 6.6 เปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ได้จาก 2 ตัวควบคุมที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 50 %



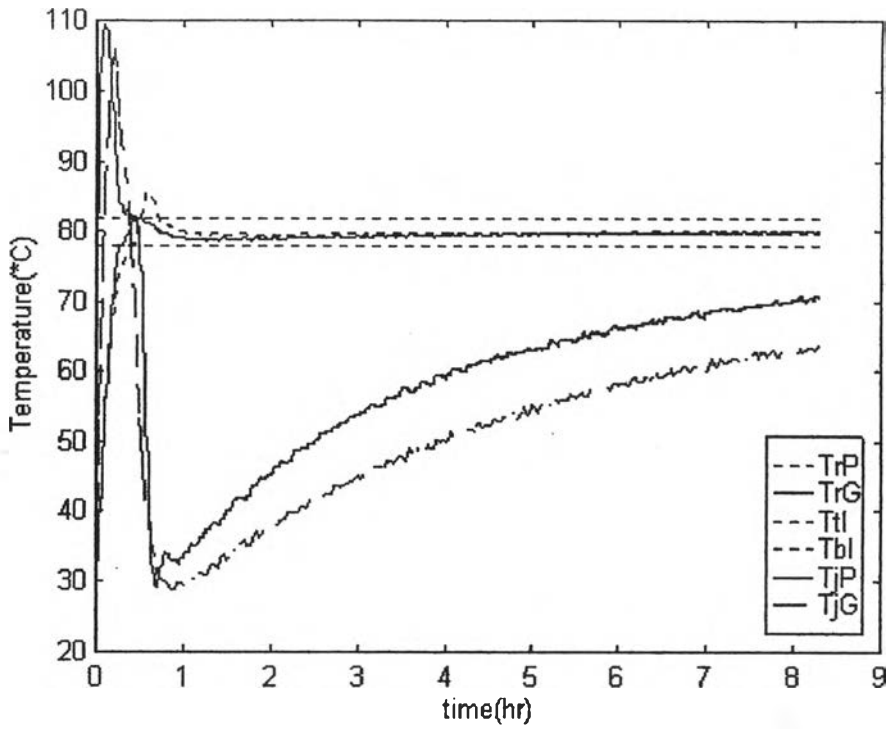
รูปที่ 6.7 ค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาจริง (Q_r) และค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ถูกประมาณค่าได้ (Q_{res}) เมื่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 50 %



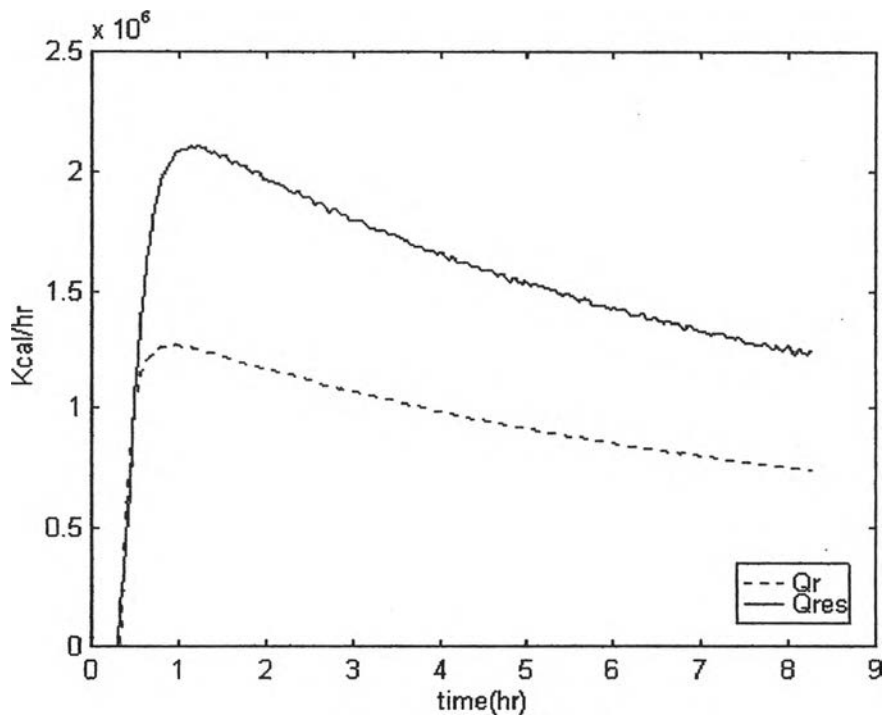
รูปที่ 6.8 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมเมื่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลง 20 %



รูปที่ 6.9 ค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาจริง (Q_r) และค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ถูกประมาณค่าได้ (Q_{res}) เมื่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลง 20 %



รูปที่ 6.10 เปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ได้จาก 2 ตัวควบคุมเมื่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลง 20 % และอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 50 %



รูปที่ 6.11 ค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาจริง (Q_r) และค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ถูกประมาณค่าได้ (Q_{res}) เมื่อมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ในกรณีที่ 4

จากรูปที่ 6.5, 6.7, 6.9และ6.11 จะเห็นว่าค่าความร้อนที่ถูกประมาณค่าได้จากตัวประมาณค่าออนไลน์ในกรณีที่มีความผิดพลาดทั้งสี่กรณีนั้นจะมีค่ามากกว่าค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจริง และมีค่าที่ได้ค่อนข้างต่างกันมาก แต่จากรูปที่ 6.4, 6.6, 6.8และ6.10 จะเห็นว่าตัวควบคุมจีเอ็มซียังสามารถกำหนดผลการตอบสนองให้อยู่ในช่วงที่เราต้องการ และไม่เกิดการโอเวอร์ชูตจนเกินช่วงขอบเขตที่สามารถยอมรับได้ ถึงแม้ว่าค่าความร้อนที่ประมาณค่ามาได้ไม่ตรงกับค่าจริงก็ตาม

นอกจากนี้ จากค่าไอเอสอีที่วัดได้จะเห็นว่าค่าไอเอสอีที่วัดได้จากผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอดีมีค่ามากกว่าค่าไอเอสอีที่วัดได้จากตัวควบคุมจีเอ็มซี แสดงว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอดีเบี่ยงเบนจากเซ็ทพอยท์มากกว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมจีเอ็มซี

6.1-3. ทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมกับระบบที่มีผลของการเจลของปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเซมิแบทช์

เป็นที่รู้กันดีแล้วว่าจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์มีผลของการเกิดเจล เนื่องจากมีข้อจำกัดของการแพร่ของโมโนเมอร์เมื่อส่วนผสมของปฏิกิริยามีความหนืด และคอนเวอร์ชันสูงๆ ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อคอนเวอร์ชันเพิ่มขึ้น ดังที่กล่าวถึงไปแล้วในบทที่ 5 นอกจากนี้ยังได้ให้ความสัมพันธ์ของค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาขั้นสิ้นสุดกับคอนเวอร์ชัน และความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับคอนเวอร์ชัน เมื่อเวลาของปฏิกิริยาดำเนินไปในบทที่ 5 ตามสมการที่ 5.22 และ 5.23

ดังนั้น เพื่อเป็นการยืนยันว่าตัวควบคุมที่ออกแบบขึ้นสามารถใช้ควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบเซมิแบทช์ที่มีปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ในโรงงานจริงได้ จึงเพิ่มความรุนแรงของระบบให้มากขึ้นบนระบบของปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ที่มีการพิจารณาถึงผลของเกิดเจลนี้ เพราะในระบบจริงมีความรุนแรงมากกว่า ดังรูปในภาคผนวก ค. ที่นำมาแสดงประกอบ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองที่ออกมามีความรุนแรงไม่เท่ากับระบบจริงนี้อาจเกิดจากเหตุผลดังต่อไปนี้ คือ

1. ความร้อนที่คายออกมาจากปฏิกิริยาของระบบจริงมีค่ามากกว่าความร้อนของปฏิกิริยาที่นำมาใช้ในการจำลองในคอมพิวเตอร์

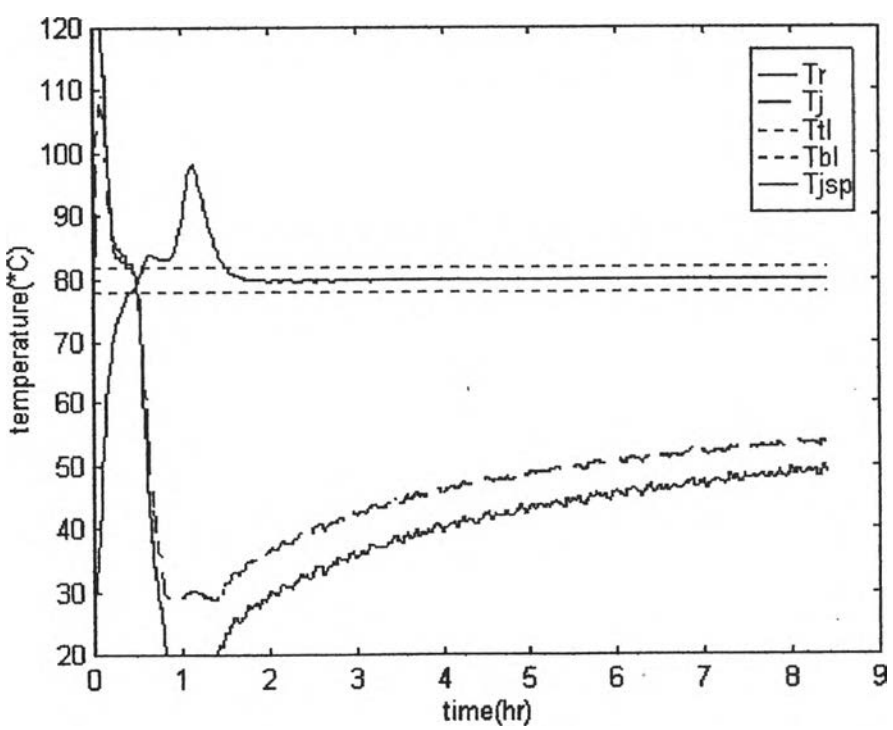
2. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของระบบจริงมีค่าน้อยกว่าค่าที่นำมาใช้ในการจำลอง หรืออาจเกิดจากการที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าน้อยลงเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไป

3. อัตราการเกิดปฏิกิริยาของระบบที่ใช้จำลองมีค่าลดลงเมื่อดาบของการป้อนสารตั้งต้นมากขึ้นแต่ระบบจริงมีค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยามากขึ้น ทำให้ความร้อนที่คายออกมามีค่ามากกว่าความจุของน้ำหล่อเย็น ดังนั้นในระบบจริงควรเพิ่มความสามารถในการปรับของตัวแปรปรับ (อุณหภูมิของน้ำหล่เย็นในแจ็กเก็ต) ให้มากขึ้น

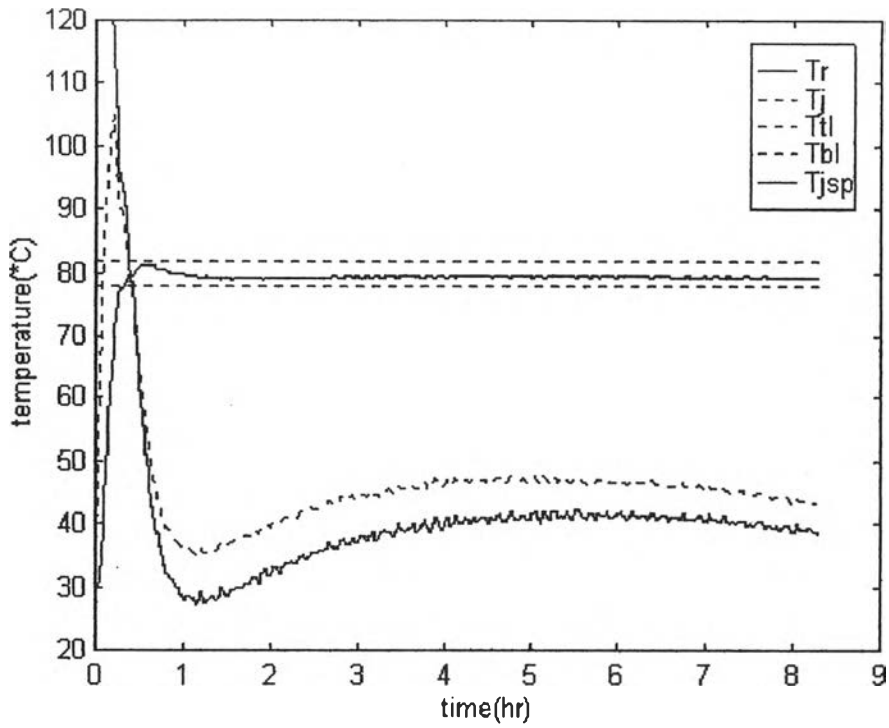
นอกจากนี้ ยังกำหนดให้มีความผิดพลาดของค่าพารามิเตอร์บางตัว ซึ่งสามารถถูกกำหนดให้มีค่าดังต่อไปคือ

1. ค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยามีค่ามากกว่าเดิม 50 เปอร์เซ็นต์
2. อัตราการป้อนเพิ่มขึ้น 40 เปอร์เซ็นต์
3. อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 50 เปอร์เซ็นต์
4. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเริ่มต้นลดลง 20 เปอร์เซ็นต์
5. กรณีที่ 3 และกรณีที่ 4 เกิดขึ้นพร้อมกัน

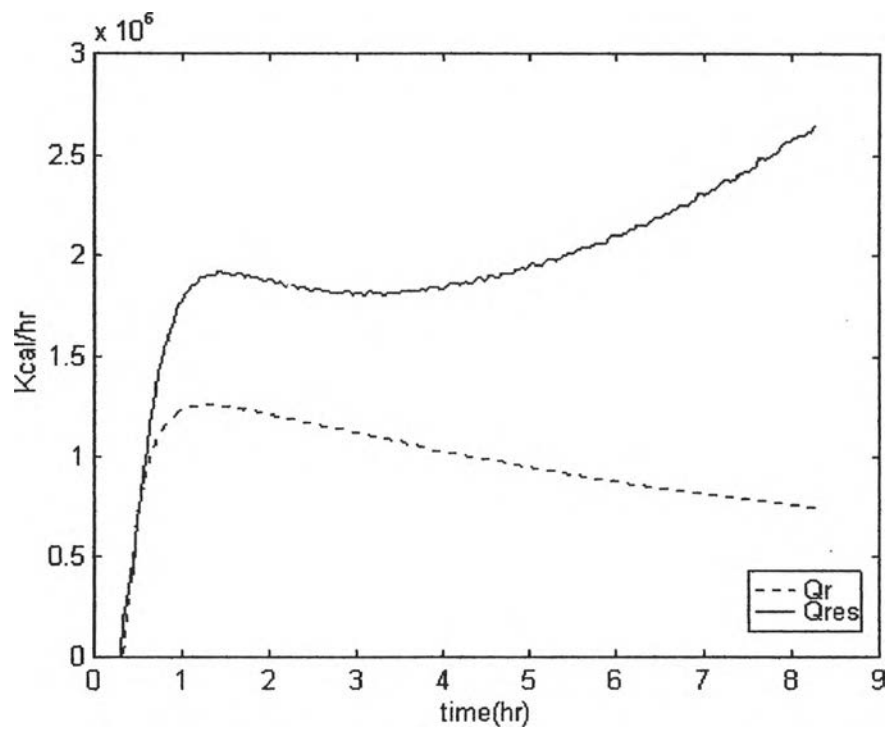
โดยค่าเหล่านี้มีความผิดพลาดอยู่บนผลของการเจลของปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ซึ่งผลการจำลองระบบดูได้จากรูปที่ 6.15 ถึง 6.16



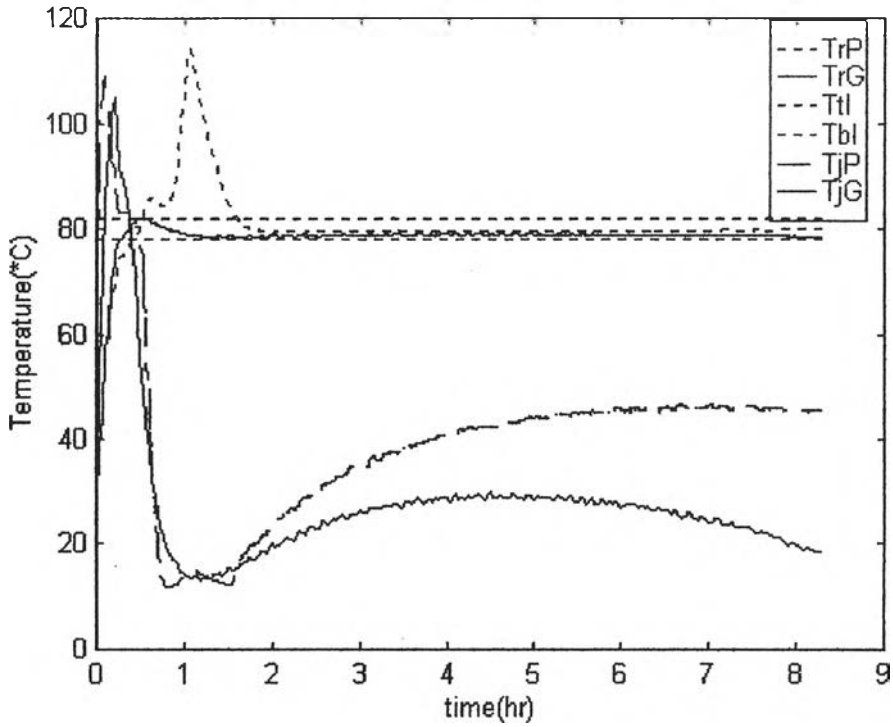
รูปที่ 6.12 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมพีไอดีเมื่อเป็นระบบการเกิดพอลิเมอร์ที่คำนึงถึงผลของการเกิดเจลเมื่อความร้อนของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 50 % (ISE_PID =241.9148)



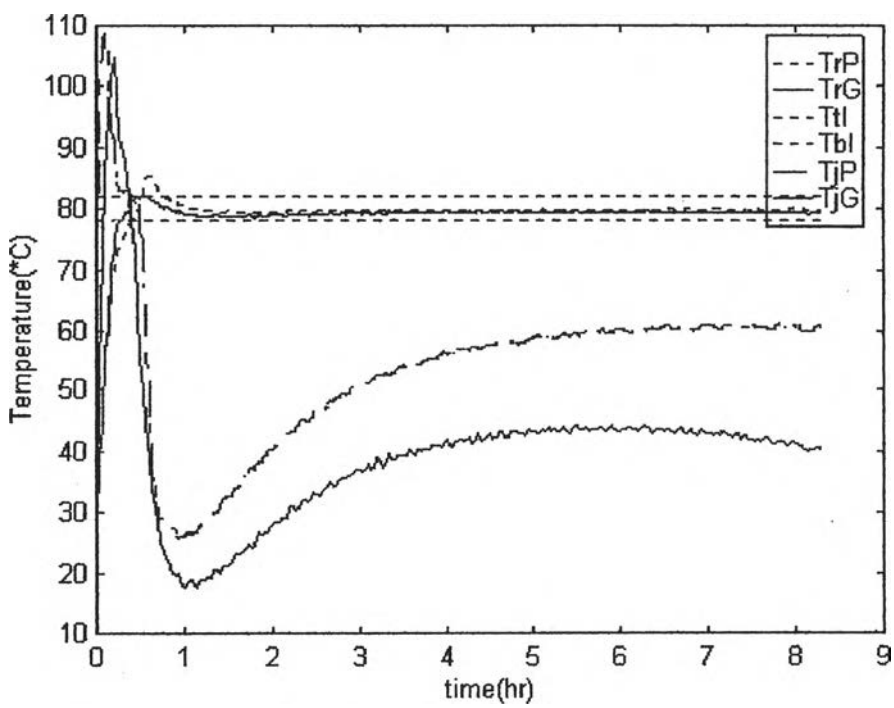
รูปที่ 6.13 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมจีเอ็มซีเมื่อเป็นระบบการเกิดพอลิเมอร์ที่คำนึงถึงผลของการเกิดเจลเมื่อความร้อนของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 50 % (ISE_GMC=156.5434)



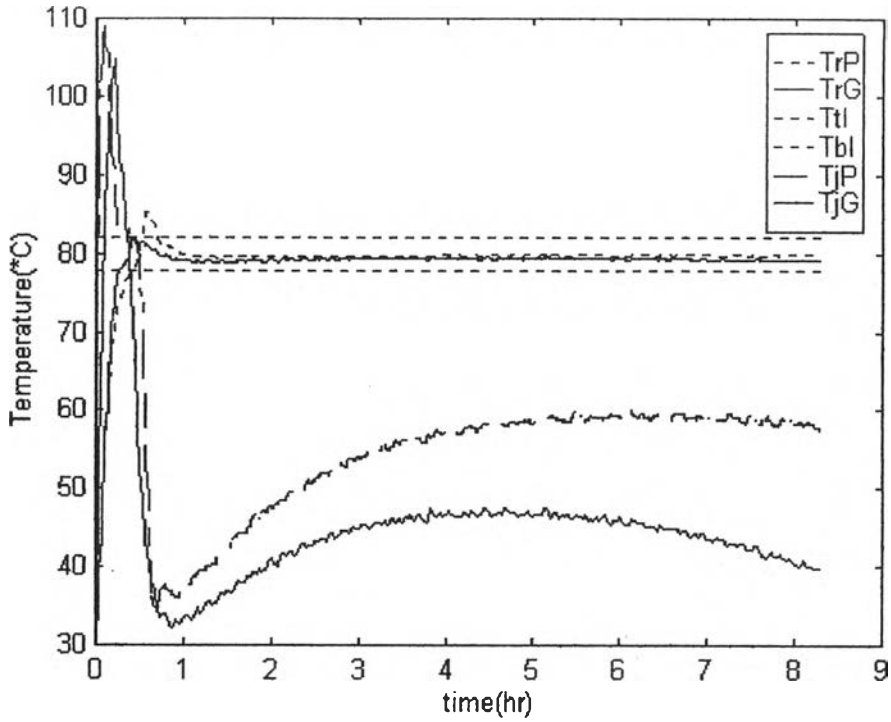
รูปที่6.14 ค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาจริง (Q_r) และค่าความร้อนที่ที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ถูกประมาณค่าได้ (Q_{res})



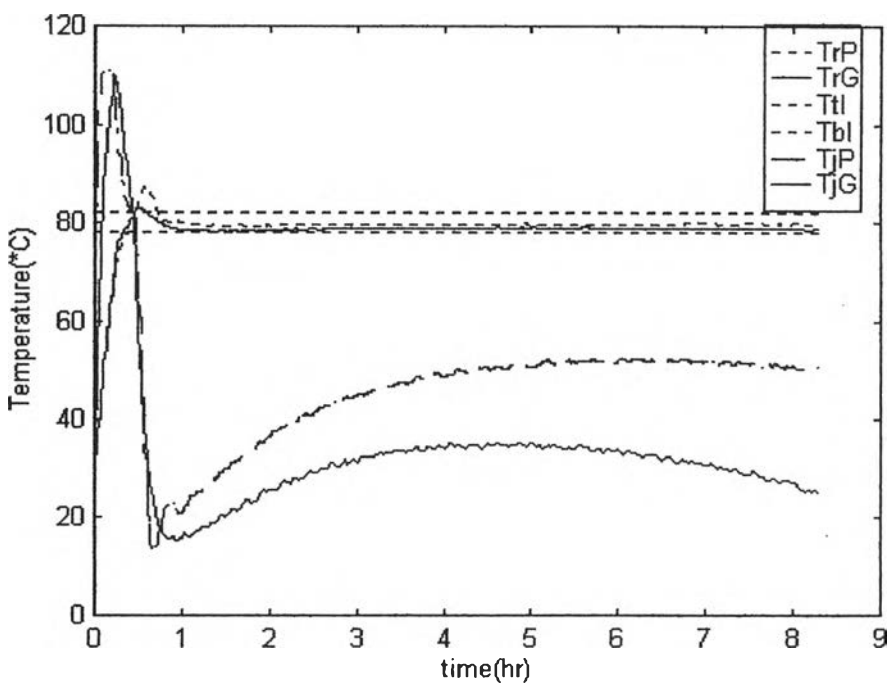
รูปที่6.15 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมเมื่อกำหนดให้ค่าความร้อนของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 50% (ISE_PID =445.8955 และISE_GMC = 161.7703)



รูปที่6.16 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมเมื่อกำหนดให้อัตราการป้อนสารตั้งต้นเพิ่มขึ้น 50% (ISE_PID =170.1120 และ ISE_GMC =157.3890)



รูปที่6.17 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมเมื่อกำหนดให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 50% (ISE_PID =168.9091และISE_GMC =156.6934)



รูปที่ 6.18 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมเมื่อกำหนดให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 50% และค่าสัมประสิทธิ์การถ่าเทความร้อนลดลง 20 % (ISE_PID =212.4778และISE_GMC =209.3640)

จากผลการจำลองระบบทุกๆกรณี ดังที่แสดงในรูปที่ 6.12 ถึง 6.18 จะเห็นว่าตัวควบคุมจีเอ็มซีที่ถูกออกแบบขึ้นสามารถควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบเซมิแบทช์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนอย่างรุนแรง ให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ทุกกรณีที่ถูกเพิ่มความรุนแรงให้มากขึ้นกว่าเดิม โดยเฉพาะในรูปที่ 6.12 ซึ่งเป็นผลการตอบสนองของตัวควบคุมพีไอดีเมื่อกำหนดให้ ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา ($-\Delta H$) เพิ่มขึ้น 50 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่า ตัวควบคุมพีไอดีเกิดโอเวอร์ชูตอย่างมาก และผลการตอบสนองจะคล้ายกับระบบจริงมาก แต่จากรูปที่ 6.13 จะเห็นว่า ตัวควบคุมจีเอ็มซีสามารถกำหนดผลการตอบสนองของอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ให้อยู่ในช่วงที่ต้องการได้ การที่ผลการตอบสนองของตัวควบคุมพีไอดีเกิดโอเวอร์ชูตอย่างมากนี้ คาดว่าเกิดจากการที่ตัวควบคุมพีไอดีไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงได้ ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ทำให้ความร้อนที่คายออกมามีมากจึงเกิดการโอเวอร์ชูตอย่างมากอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งผลแบบเดียวกันนี้ไม่เกิดขึ้นในกรณีที่ใช้ตัวควบคุมจีเอ็มซีเนื่องจากมันสามารถควบคุมการโอเวอร์ชูต ได้ดีกว่า