บทที่ 5

การจำลองการควบคุมอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์เคมีแบบกะที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนด้วยระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ

ในบทนี้เป็นการรวบรวมผลการจำลอง (simulation) ที่ศึกษาการควบคุมอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์เคมีแบบกะที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนด้วยระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ การจำลองในการศึกษานี้ประกอบด้วยการแสดงถึงพฤติกรรมเชิงพลวัตของกระบวนการโดยการจำลองถังปฏิกรณ์เคมีแบบกะที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนในหัวข้อ 5.1 ทั้งแบบวงเปิด (ไม่มีระบบควบคุม) และแบบวงปิด (มีระบบควบคุม) ในหัวข้อ 5.2 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของการประมาณค่าโดยทำการจำลองการประมาณค่าความร้อนภายในถังปฏิกรณ์เคมีแบบกะที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนโดยใช้อัลกอริธึมของคาลมานเปรียบเทียบกับการประมาณค่าเอ็กซ์โปเนนเชี่ยลที่ Cott and Macchato (1989) ใช้ประมาณค่าความร้อนที่เกิดในถังปฏิกิริยา ในหัวข้อที่ 5.3 แสดงผลการจำลองการใช้ระบบควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟร่วมกับตัวแปรมาณค่าความร้อนโดยใช้ตัวกรองคาลมาน และในหัวข้อที่ 5.4 จะเป็นการทดสอบการใช้งานระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟภายใต้สภาวะที่แบบจำลองผิดพลาดจากกระบวนการจริง (plant mismatch) โดยเขียนโปรแกรมจำลองบนโปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB

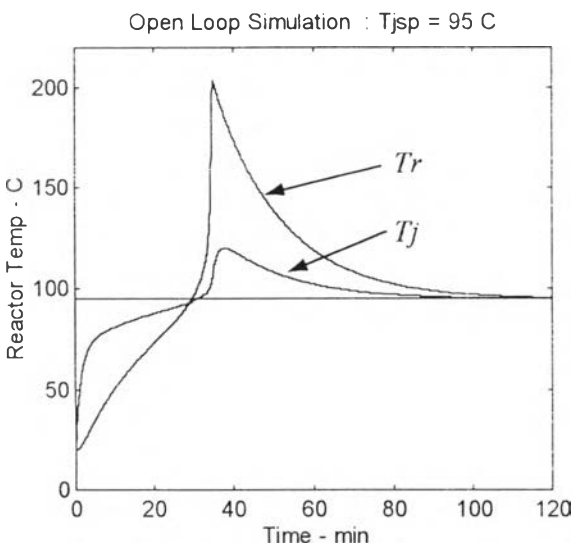
5.1 การจำลองถังปฏิกรณ์เคมีแบบกะที่มีปฏิกิริยาคายความร้อน

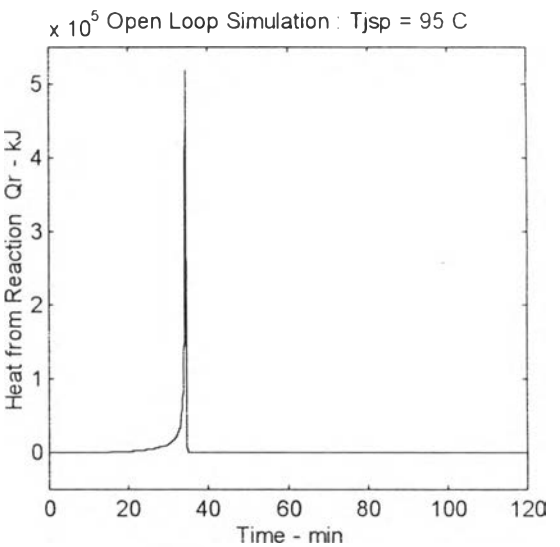
5.1.1 การจำลองในระบบวงเปิด (ไม่มีระบบควบคุม)

การจำลองถังปฏิกรณ์เคมีแบบกะที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบวงเปิด(Open Loop) เป็นการจำลองถังปฏิกรณ์เคมีในบทที่ 3 โดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์และกำหนดให้อุณหภูมิอ้างอิงในถังแจ็คเก็ตมีค่าคงที่เท่ากับ 95 C ตลอดการเกิดปฏิกิริยา การจำลองดังกล่าวเป็นการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตที่เกิดจากเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนในถังปฏิกิริยา โดยใช้แบบจำลองที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 และจากการทำการจำลองเพื่อหาเวลาระยะห่างของเวลาที่ใช้ในการ

คำนวณ (Δt) เพื่อให้การจำลองแทนกระบวนการจริงได้ พบว่าระยะห่างของเวลาในการคำนวณที่ใช้ควรน้อยกว่า 0.07 นาที ดังนั้นในการศึกษาตลอดงานวิจัยจะคำนวณค่าทุก ๆ 0.03 นาที

การจำลองระบบวงเปิดของกระบวนการ ได้ผลของการจำลองเป็นไปตามรูปกราฟที่ 5.1ก และ 5.1ข พิจารณากราฟที่ 5.1ข จะเห็นได้ว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและความร้อนที่เกิดขึ้นมีค่าสูงโดยเฉพาะที่เวลา 30-40 นาที ความร้อนที่เกิดขึ้นมีผลทำให้อุณหภูมิภายในถังปฏิกิริยามีค่าสูงถึง 200 C ดังรูปที่ 5.1ก ในขณะที่ต้องการอุณหภูมิเพียง 95 C ซึ่งลักษณะไม่เชิงเส้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากสมการของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นความสัมพันธ์เอ็กซ์โปเนเชี่ยลของอุณหภูมิในถังปฏิกิริยาเคมีคูณกับปริมาณสารตั้งต้น และมีผลทำให้อุณหภูมิภายในถังปฏิกิริยาและถังแจ็คเก็ตเปลี่ยนแปลงรุนแรง



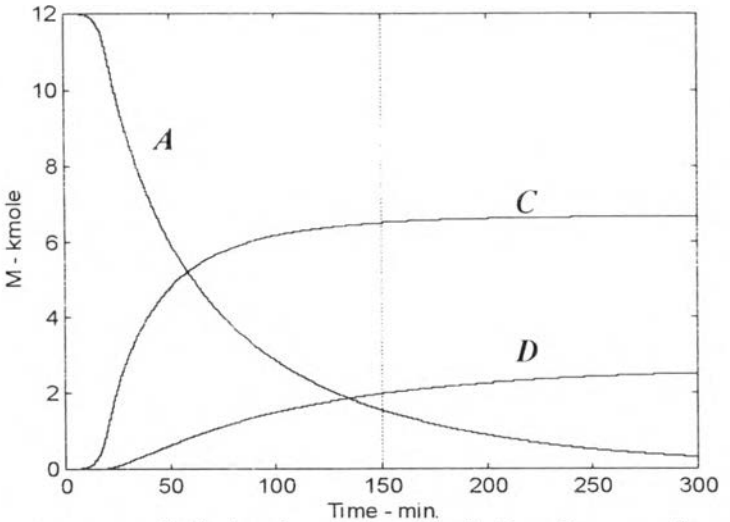


รูปที่ 5.1ก. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในถัง อุณหภูมิน้ำในถังแจ็คเก็ตอุณหภูมิอ้างอิงในถังแจ็คเก็ต(C) กับเวลา(นาที)

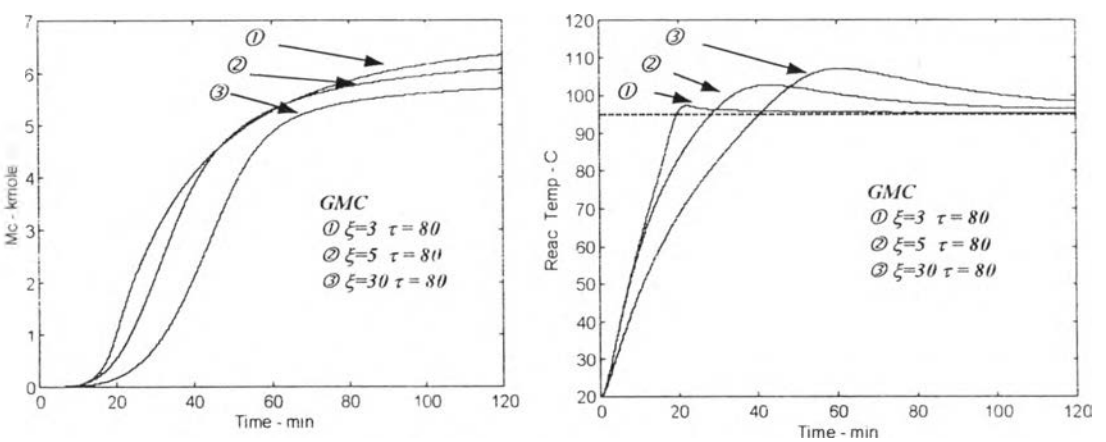
รูปที่ 5.1ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีภายในถังปฏิกิริยา(kJ) กับเวลา(นาที)

5.1.2 การจำลองในระบบวงปิด (มีระบบควบคุม)

การจำลองในระบบวงปิด (มีระบบควบคุม) ในการจำลองในหัวข้อนี้จะศึกษาผลของการควบคุมอุณหภูมิที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการจากถังปฏิกรณ์คือ สาร C จะใช้ระบบควบคุมเจเนริกโมเดลทำการควบคุมถังปฏิกรณ์เป็นเวลา 300 นาที และให้ควบคุมอุณหภูมิในถังที่ 95 C เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยา ได้กราฟดังรูปที่ 5.2 และปรับค่าจูนของระบบควบคุมเจเนริกโมเดลเพื่ออธิบายผลของการควบคุมอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณสาร C ที่ได้ดังผลในกราฟที่ 5.3ก และ 5.3ข



รูปที่ 5.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลของสารในถังปฏิกรณ์ (kmole) กับเวลา(นาที) ในระบบวงปิด



รูปที่ 5.3ก. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลของสาร C (kmole) กับเวลา (นาที) ที่ค่าจูนต่าง ๆ
รูปที่ 5.3ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ (C) กับเวลา(นาที)

พิจารณาจากรูปกราฟ 5.2 พบว่าการเกิดของสาร C ในถังปฏิกรณ์ภายหลังจากเวลา 150 นาที จะเข้าสู่ค่าคงที่เนื่องจากสาร C ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับสาร A ได้เป็นสาร D ดังนั้น ในการการผลิตสาร C จึงควรยุติการเกิดปฏิกริยาในถังปฏิกรณ์ในช่วงเวลา 80-120 นาทีเพื่อให้ได้สาร C ปริมาณมากและสาร D มีปริมาณน้อย ในการจำลองถังปฏิกรณ์เพื่อใช้สำหรับการทดสอบระบบควบคุมจะทำการจำลองการควบคุมเป็นเวลานาน 120 นาที และจากกราฟที่ 5.3 พบว่าการควบคุมอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์เข้าสู่อุณหภูมิที่ตั้งไว้ (95 C) โดยการจูนระบบควบคุมเจเนริกโมเดลที่ ξ=30 และ τ=80 ซึ่งจะมีผลทำให้สาร C ที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากกว่าค่าจูนอื่น แสดงให้เห็นว่าการควบคุมอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์ให้เท่ากับ 95 C มีผลให้ปริมาณสาร C ที่เกิดขึ้นในถังมีค่ามากขึ้น

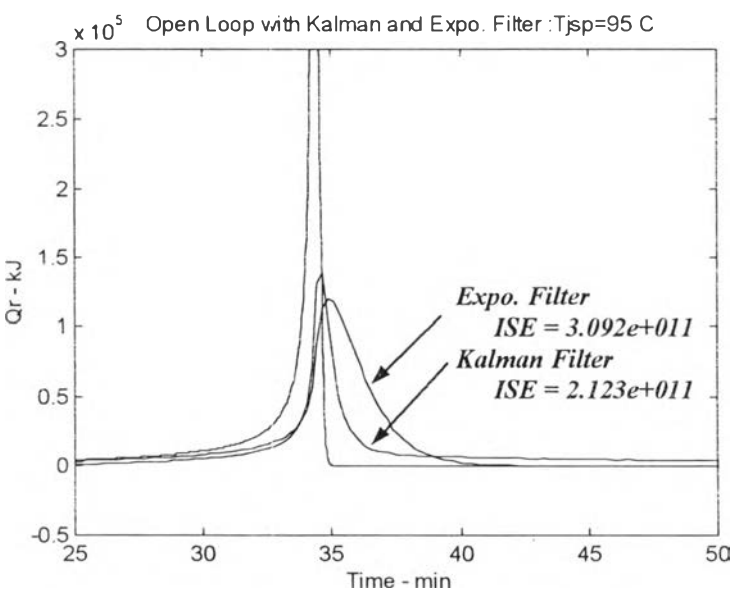
I19307032

5.2 การจำลองการประมาณค่าความร้อนภายในถังปฏิกรณ์เคมีแบบกะที่มีปฏิกิริยาคายความร้อน

การประมาณค่าในงานวิจัยนี้ ทำการประมาณค่าโดยใช้ตัวกรองคาลมาน ซึ่งจะนำการประมาณค่าดังกล่าวเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาโดยใช้หลักการของการประมาณค่าแบบเอ็กซ์โปเนนเชี่ยล โดยเปรียบเทียบกรณีที่ไม่มีระบบควบคุมและมีระบบควบคุม ซึ่งในระบบความคุมเจเนริกโมเดลจะใช้ค่าความร้อนที่ประมาณได้ในการควบคุมอุณหภูมิภายในถังปฏิกิริยา

5.2.1 เปรียบเทียบการประมาณค่าแบบวงเปิด

ในการจำลองระบบวงเปิดที่มีระบบประมาณค่า ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบค่าความร้อนที่ประมาณกับค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจริงในถังปฏิกิริยา ซึ่งค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาสามารถหาได้จากการจำลองปฏิกิริยาในหัวข้อ 5.1 นำมาเปรียบเทียบกับค่าความร้อนที่ได้จากการประมาณโดยอาศัยหลักการเอ็กซ์โปเนนเชี่ยล เปรียบเทียบกับการประมาณของตัวกรองคาลมานดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 โดยจูนระบบประมาณค่าคาลมานไว้ดังตารางที่ 5.1 จะได้กราฟเปรียบเทียบการประมาณดังกราฟที่ 5.2 และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการประมาณโดยใช้ผลรวมกำลังสองของผลต่างระหว่างค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจริงกับค่าประมาณ (ISE) เป็นดัชนีวัดสมรรถนะของการประมาณ



รูปที่ 5.4 กราฟเปรียบเทียบการประมาณค่าแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล กับตัวกรองคาลมาน

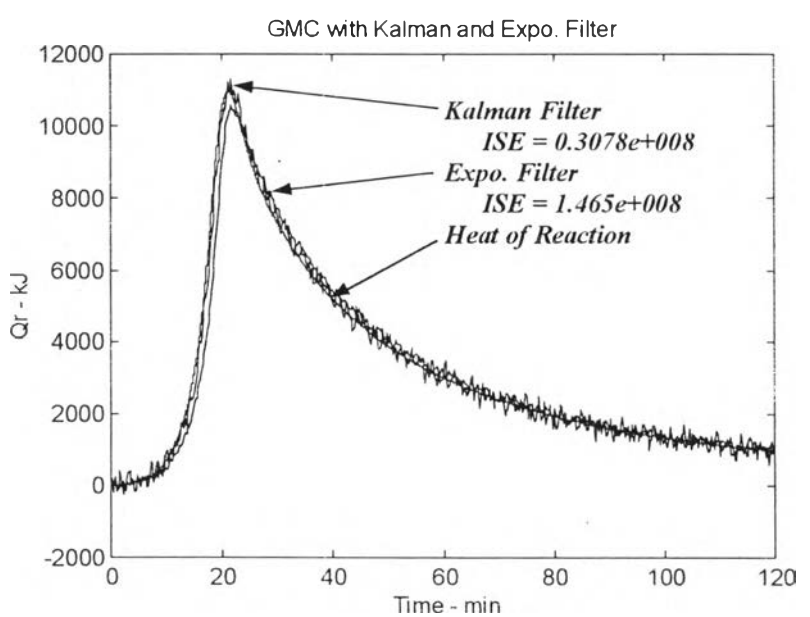
ตารางที่ 5.1 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในการประมาณค่าความร้อนโดยใช้ตัวกรองคาลมาน

$Q11 = 4$	$Q22 = 16$
$Q33 = 1x10^{9}$	$Q44 = 1x10^{4}$
$R11 = 50$	$R22 = 20$

พิจารณากราฟการประมาณค่าจะพบว่าตัวกรองคาลมานจะประมาณค่าได้ใกล้เคียงกับค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจริงมากกว่าโดยสังเกตจากดัชนีสมรรถนะของตัวกรองคาลมานมีค่าน้อยกว่าระบบประมาณแบบเอ็กซ์โปเนนเชี่ยล เนื่องจากระบบประมาณคาลมานจะปรับเปลี่ยนค่าเกนในการประมาณทุกครั้งที่ทำการประมาณค่าตลอดการจำลองทำให้ตัวกรองคาลมานมีค่าเกิดที่เปลี่ยนตามเวลาในขณะที่การประมาณแบบเอ็กซ์โปเนนเชี่ยลมีค่าสัมประสิทธิ์และกำลังของฟังก์ชั่นประมาณเป็นค่าคงที่

5.2.2 เปรียบเทียบการประมาณค่าในระบบวงปิดโดยใช้ระบบควบคุมเจเนริกโมเดล

จากการทดสอบระบบประมาณค่าความร้อนระบบวงเปิด(ไม่มีระบบควบคุม) ในหัวข้อที่ 5.2.1 พบว่าตัวกรองคาลมานประมาณค่าได้ดีกว่าระบบประมาณแบบเอ็กซ์โปเนนเชี่ยล ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงทำการเปรียบเทียบระบบประมาณค่าในระบบวงปิด โดยใช้ระบบควบคุมแบบเจเนริกโมเดล เพื่อทดสอบความสามารถในการประมาณของตัวประมาณค่าทั้งสองในสภาวะที่มีระบบควบคุม โดยอุณหภูมิภายในถังปฏิกิริยาที่ระบบควบคุมใช้อ้างอิงจะมีค่าเท่ากับ 95 C ทำการควบคุมบนค่าคงที่ K1 = 0.75 และค่า K2 = $1.56x10^{-4}$ ได้ผลดังกราฟที่ 5.3



รูปที่ 5.5 กราฟเปรียบเทียบตัวประมาณค่าในระบบวงปิดที่มีระบบควบคุมเจเนริกโมเดล

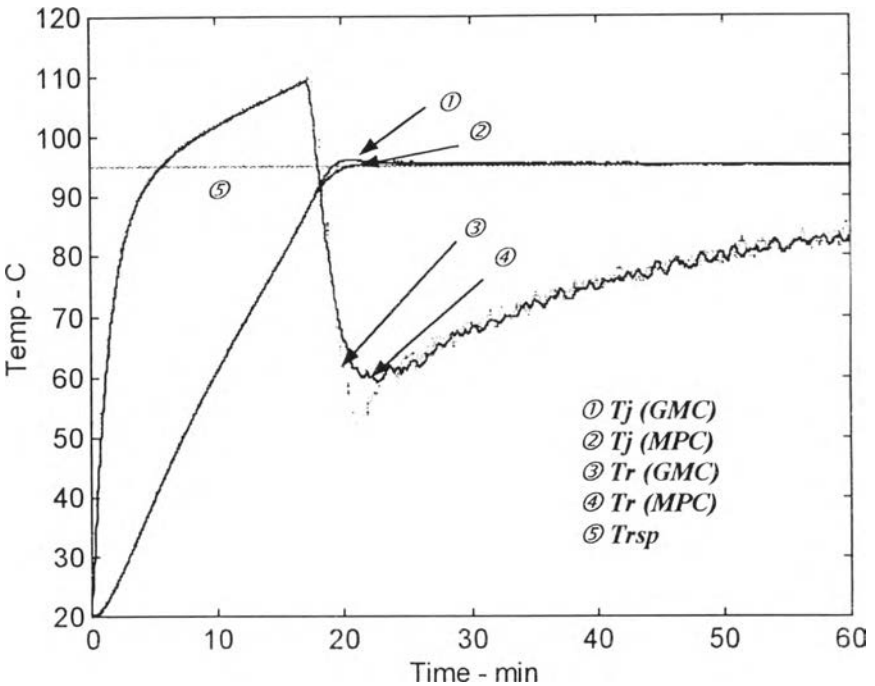
จากการจำลองการประมาณค่าความร้อนที่ได้พบว่า การประมาณค่าโดยใช้ตัวกรองคาลมานสามารถประมาณค่าความร้อนได้ดีกว่าระบบประมาณแบบเอ็กซ์โปเนนเชี่ยล โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง (15-25 นาที) ดังนั้นในการศึกษาจะใช้ตัวกรองคาลมานเป็นระบบประมาณค่าความร้อนเพื่อใช้ในการควบคุมอุณหภูมิภายในถังปฏิกิริยาเคมีที่มีปฏิกิริยาคายความร้อน เนื่องจากระบบควบคุมที่จะใช้เป็นระบบควบคุมที่อาศัยแบบจำลองพื้นฐานและมีค่าความร้อนที่เกิดในถังปฏิกิริยาเคมีเป็นตัวแปรหนึ่งในแบบจำลองดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ดังนั้นการประมาณค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจะต้องมีค่าถูกต้อง จึงจะทำให้ระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟสามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.3 ทดสอบระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟร่วมกับการประมาณค่าคาลมาน (เปรียบเทียบกับระบบควบคุม เจเนริกโมเดล)

การควบคุมอุณหภูมิในถังปฏิกิริยาที่มีความไม่เชิงเส้นสูงนี้ไม่สามารถใช้ระบบควบคุมทั่วไปอย่างระบบควบคุมพีไอดี (PID) ได้ เพราะระบบควบคุมดังกล่าวไม่ทราบถึงพฤติกรรมของกระบวนการ ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ระบบควบคุมที่ใช้จะเป็นระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ และเปรียบเทียบกับระบบควบคุมเจนเนริกโมเดลที่ Cott และ Machatto (1986) เคยใช้ควบคุมอุณหภูมิในถังปฏิกิริยา ซึ่งระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟและระบบควบคุมเจนเนริกโมเดลเป็นระบบควบคุมที่ใช้แบบจำลองกระบวนการช่วยในการหาค่าตัวแปรปรับ โดยจะใช้ควบคุมร่วมกับการประมาณค่าความร้อนของตัวกรองคาลมาน จูนค่าในระบบควบคุมและตัวกรองคาลมานตามตารางที่ 5.2 ได้ผลการจำลองการควบคุมและนำผลมาสร้างกราฟจะได้ดังรูปกราฟที่ 5.4

ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงค่าคงที่ที่ใช้ในการจูนระบบควบคุมและระบบประมาณค่า

GMC	*K1 = 30*	*K2 = 80*	
MPC	*Qc(1,1) = 2000*	*Qc(2,2) = 50*	*Qc(3,3) = 0.1*
	Rc(1,1) = 1.2	*M = 10*	*P = 20*
Kalman Fillter	*Q(1,1) = 4*	*Q(2,2) = 16*	
	Q(3,3) = 1x10^{9}	*Q(4,4) = 1x10^{4}*	
	R(1,1) = 50	*R(2,2) = 30*	



รูปที่ 5.6 กราฟเปรียบเทียบระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ (MPC) และระบบควบคุมเจเนริกโมเดล (GMC)

ในการทดสอบทำการหาผลรวมของกำลังสองค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์เทียบกับอุณหภูมิอ้างอิงเพื่อใช้เป็นดัชนีสมรรถนะ จากการจำลองพบว่าค่าดัชนีสมรรถนะของระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟและระบบควบคุมเจเนริกโมเดล มีค่าเท่ากับ 1.193×10^6 และ 1.201×10^6 ตามลำดับ พิจารณากราฟที่ 5.4 พบว่าระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟและระบบควบคุมเจเนริกโมเดลจะลดอุณหภูมิในถังแจ็คเก็ตก่อนที่อุณหภูมิภายในถังปฏิกิริยาจะถึง 95 C ซึ่งเป็นผลมาจากระบบควบคุมทั้งสองใช้ค่าความร้อนที่ประมาณได้ และแบบจำลองของกระบวนการที่มีค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเป็นตัวแปรสเตท ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมเชิงพลวัตอันเนื่องจากความร้อนที่จะเกิดขึ้นในช่วงที่เกิดความร้อนสูงและสามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ 95 C และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการควบคุมอุณหภูมิในถังปฏิกิริยาในกรณีที่แบบจำลองไม่ผิดพลาดพบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในถังแจ็คเก็ตในระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟจะมีการสั่นน้อยกว่าในระบบควบคุมเจเนริกโมเดล เนื่องจากระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟทำการคำนวณตัวแปรปรับล่วงหน้าจำนวน M ค่า และทำการออพติไมซ์ค่าตัวแปรปรับและตัวแปรสเตทให้ได้ตัวแปรปรับที่เหมาะสมตลอดการควบคุม M ครั้ง เมื่อพิจารณาค่า M และค่า P สำหรับกระบวนการนี้พบว่าค่า P ที่ใช้ควรใช้จะอยู่ในช่วง 10-30 ครั้ง เนื่องจากถ้าค่า P ต่ำกว่า 10 จะไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิในถัง และถ้าค่า P มากกว่า 30 ครั้งระบบควบคุมจะให้ดัชนีสมรรถนะเท่ากับที่ P=30 ค่า M ที่ใช้ควรจะอยู่ในช่วง 2-10 ครั้ง จากการทดสอบระบบควบคุมทำการจับเวลาในการประมาณค่าและการคำนวณตัวแปรปรับพบว่าใช้เวลา 5-11 วินาที ซึ่งเพียงพอสำหรับการควบคุมทุก ๆ 0.20 นาที (12 วินาที)

5.4 ทดสอบระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลอง

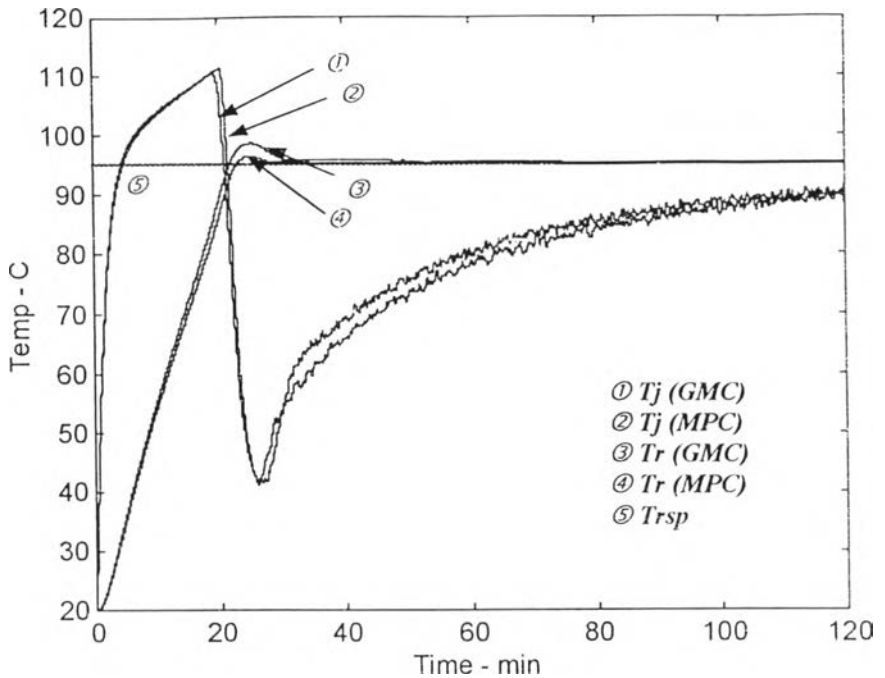
ความผิดพลาดของแบบจำลองของถังปJฏิกิริยาเคมีที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนโดยการปรับค่าตัวแปรในกระบวนการจริงให้มีค่าไม่เท่ากับในแบบจำลองของระบบควบคุม ดังนั้นระบบควบคุมที่ใช้แบบจำลองช่วยในการควบคุมจะยังสามารถควบคุมกระบวนการตราบเท่าที่แบบจำลองกระบวนจะยังแทนกระบวนการจริงได้ การศึกษาครั้งนี้ทำการศึกษาระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟในกรณีที่แบบจำลองผิดพลาดเพื่อเปรียบเทียบกับการทดสอบระบบควบคุมเจเนริกโมเดลที่ใช้ควบคุมถังปฏิกิริยาเคมีแบบกะที่มีปฏิกิริยาเคมีชนิดคายความร้อนในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองไว้ 4 กรณี คือ

5.4.1 การทดสอบผลจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผิดพลาด

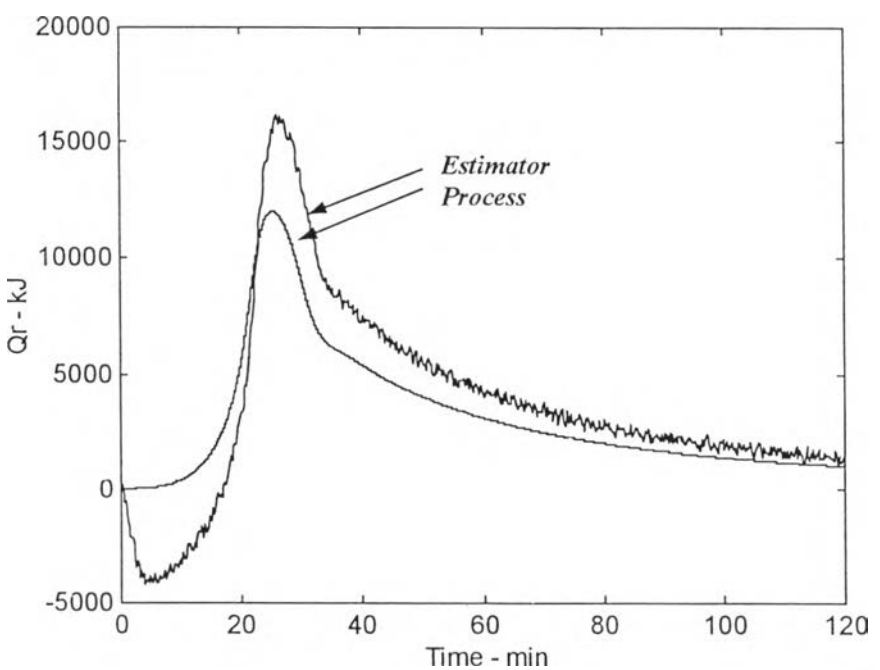
การเปลี่ยนแปลงของของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของถังปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ เช่น ผนังของถังไม่สะอาด เป็นต้น การที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลงทำให้การถ่ายเทความร้อนจากถังปฏิกิริยาไปยังน้ำในถังแจ็คเก็ตลดน้อยลง และมีผลให้อุณหภูมิในถังปฏิกรณ์มีการเปลี่ยนแปลงที่รุนแรงมากขึ้น ดังนั้นจึงทำการทดสอบระบบควบคุมโดยทำการลดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในกระบวนการจริง (ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในระบบควบคุมมีค่าเท่าเดิม) ได้ผลดังตารางที่ 5.3 และกราฟรูปที่ 5.5 และ 5.6 จากการทดสอบพบว่าระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟและระบบควบคุมเจเนริกโมเดลสามารถควบคุมกระบวนการได้ในขณะที่มีการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงถึง 30%

ตารางที่ 5.3 ตารางแสดงค่าดัชนีสมรรถนะของการควบคุมในกรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผิดพลาด

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (%)	ดัชนีสมรรถนะ (ISE x 10^6) การควบคุมอุณหภูมิในถังปฏิกิริยา		ดัชนีสมรรถนะ (ISE x 10^6) การประมาณค่าความร้อน	
	GMC	MPC	GMC	MPC
100	1.201	1.200	0.278	0.297
90	1.278	1.276	3.125	3.002
80	1.375	1.371	12.917	12.337
70	1.514	1.493	37.829	33.345



รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ (MPC) และระบบควบคุมเจเนริกโมเดล (GMC) เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลง 25 %



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงการประมาณค่าความร้อนในกระบวนการที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลง 25% ควบคุมด้วยระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ

การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทำให้การประมาณค่าความร้อนในตัวกรองคาลมานมีค่ามากกว่าความเป็นจริงดังกราฟที่ 5.8 ทำให้ระบบควบคุมคำนวณค่าตัวแปรปรับผิดพลาดจากค่าที่ควรจะเป็นโดยปรับให้ลดอุณหภูมิในถังแจ็คเก็ตมากกว่าปกติ ทำให้ระบบควบคุมยังสามารถควบคุมอุณหภูมิของสารในถังปฏิกรณ์ได้

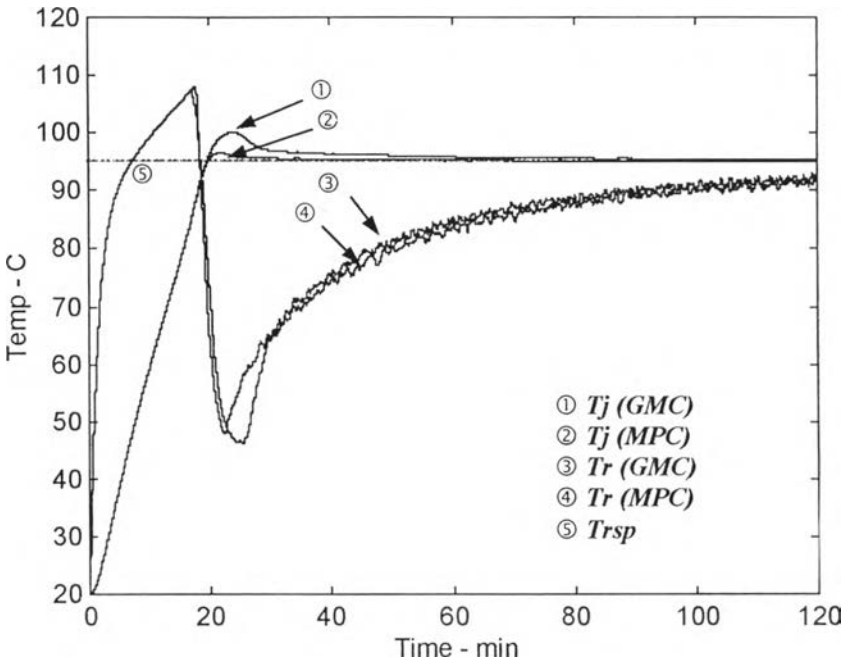
5.4.2 การทดสอบผลจากค่ามวลรวมของสารภายในถังผิดพลาด

การเปลี่ยนแปลงมวลรวมในถังปฏิกรณ์ อาจเกิดจากการป้อนสารเข้าสู่ถังปฏิกรณ์อาจมีค่าไม่เท่ากับปริมาณที่กำหนด หรือต้องการผลิตในปริมาณที่มากขึ้นหรือน้อยลง เป็นต้น ซึ่งทำให้ค่ามวลรวมของสารภายในถังปฏิกิริยาจริงกับในแบบจำลองของตัวประมาณและระบบควบคุมผิดพลาดไป ในการทดลองจึงทำการทดสอบโดยการป้อนสารเข้าสู่กระบวนการทั้งมากกว่าและน้อยกว่าค่าที่ตั้งไว้ ผลการทดลองเป็นไปดังตารางที่ 5.4 และกราฟ 5.6 และ 5.7

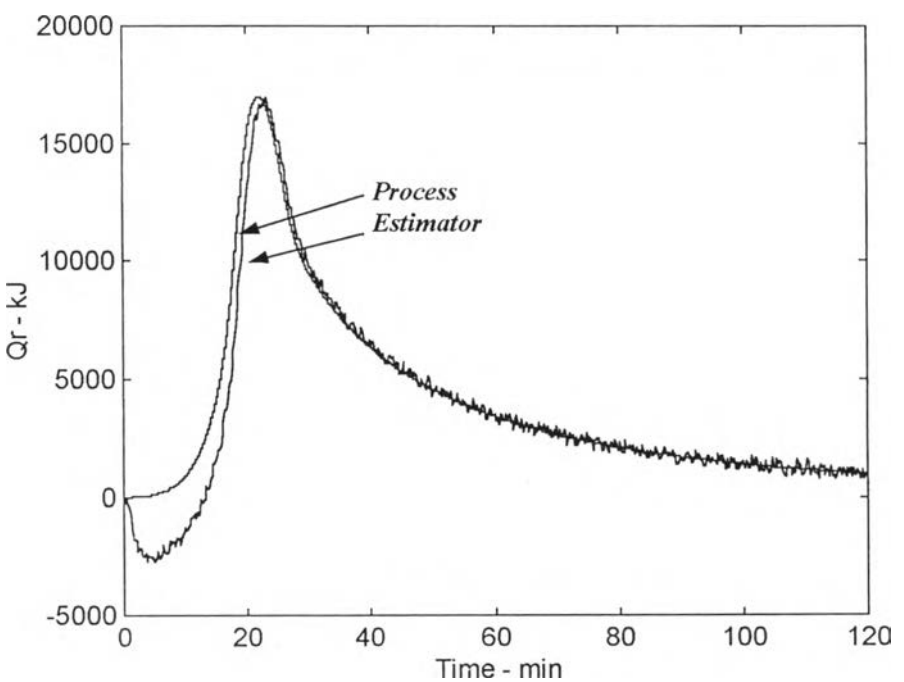
ตารางที่ 5.4 ตารางแสดงค่าดัชนีสมรรถนะของการควบคุมในกรณีที่ค่ามวลรวมผิดพลาด

ค่ามวลรวม (%)	ดัชนีสมรรถนะ (ISE x 10^6) การควบคุมอุณหภูมิในถังปฏิกิริยา		ดัชนีสมรรถนะ (ISE x 10^6) การประมาณค่าความร้อน	
	GMC	MPC	GMC	MPC
120	1.242	1.236	6.348	6.054
110	1.221	1.217	1.944	1.845
90	1.182	1.181	1.273	1.310
80	1.163	1.163	4.887	4.481
70	1.448	1.145	11.096	10.958
60	1.126	1.127	19.990	19.721

เมื่อทำการทดสอบระบบควบคุม พบว่าเมื่อมวลรวมของระบบลดลงทั้งระบบควบคุมเจนเนริกโมเดลและระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟยังสามารถควบคุมให้อุหณภูมิอยู่ในขอบเขตของกระบวนการ เนื่องจากการลดลงของสารตั้งต้นและความร้อนที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยกว่าปกติ ทำให้ระบบควบคุมยังสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ได้ ในทางตรงกันข้ามการป้อนสารตั้งต้นมากกว่าปกติทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีคายความร้อนมากกว่า การที่ค่ามวลรวมในถังปฏิกรณ์มีค่ามากกว่าในแบบจำลองทำให้ตัวกรองคาลมานประมาณค่าความร้อนได้น้อยกว่าค่าจริง ดังนั้นระบบควบคุมจะทำการเพิ่มอุณหภูมิในถังแจ็คเก็ตมากกว่าปกติ ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นมากขึ้น จากการทดสอบพบว่าระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟและระบบควบคุมเจนเนริกสามารถควบคุมอุณหภูมิได้เมื่อค่ามวลรวมมีค่าสูงกว่าค่าที่ตั้งไว้ในแบบจำลอง 20%



รูปที่ 5.9 กราฟเปรียบเทียบระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ (MPC) และระบบควบคุมเจเนริกโมเดล (GMC) เมื่อค่ามวลรวมเพิ่มขึ้น 20 %



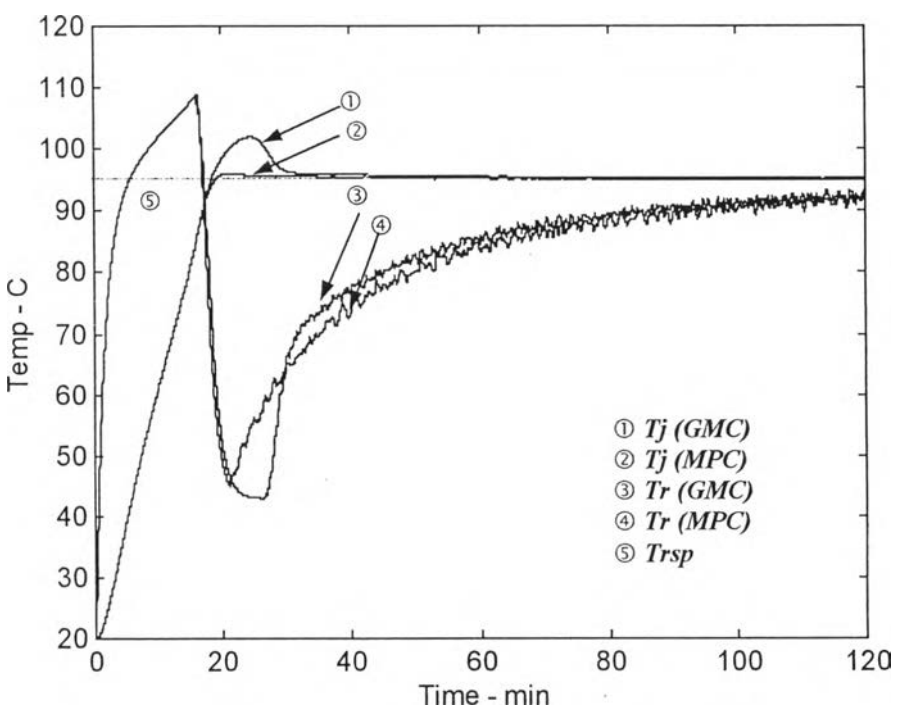
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงการประมาณค่าความร้อนในกระบวนการที่มีค่ามวลรวมเพิ่มขึ้น 20% ควบคุมด้วยระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ

5.4.3 การทดสอบผลจากการผิดพลาดของอัตราการเกิดปฏิกิริยา

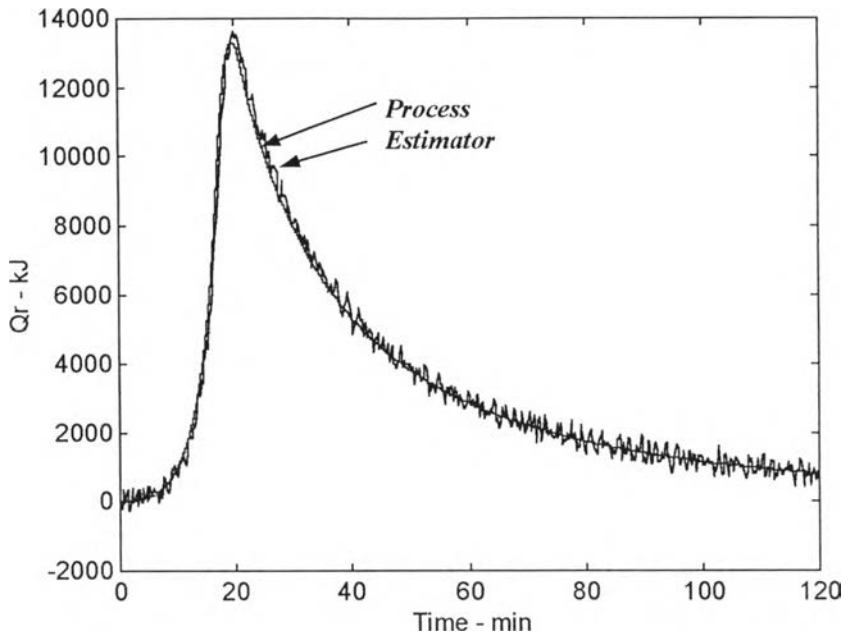
ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของแต่ละปฏิกริยาสามารถเกิดความผิดพลาดเนื่องจากการหาค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาในห้องปฏิบัติการ ความผิดพลาดของค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่มีผลกระทบต่อระบบควบคุมอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อน คือ การเพิ่มขึ้นของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่จะทำให้เกิดความร้อนในถังปฏิกิริยามากกว่ากรณีปกติ จึงได้ทำการทดสอบระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ได้ผลดังตารางที่ 5.5 และกราฟรูปที่ 5.8 และ 5.9

ตารางที่ 5.5 ตารางแสดงค่าดัชนีสมรรถนะของการควบคุมในกรณีที่ค่าอัตราการเกิดปฏิกริยาผิดพลาด

ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยา (%)	ดัชนีสมรรถนะ (ISE x 10^6) การควบคุมอุณหภูมิในถังปฏิกิริยา		ดัชนีสมรรถนะ (ISE x 10^8) การประมาณค่าความร้อน	
	GMC	MPC	GMC	MPC
110	1.198	1.196	0.335	0.296
120	1.196	1.194	0.348	0.345
130	1.194	1.191	0.398	0.371
140	1.197	1.188	0.498	0.431



รูปที่ 5.11 กราฟเปรียบเทียบระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ (MPC) และระบบควบคุมเจเนริกโมเดล (GMC) เมื่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 40 %



รูปที่ 5.12 กราฟแสดงการประมาณค่าความร้อนในกระบวนการที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 40% ควบคุมด้วยระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ

จากผลการทดสอบพบว่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นไม่มีผลต่อการประมาณค่าความร้อน เนื่องจากแบบจำลองของตัวกรองคาลมานไม่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นตัวแปรสเตท จากผลการทดสอบพบข้อได้เปรียบของระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟที่มีการปรับเมตริกซ์น้ำหนัก P ทุกครั้งของการควบคุมทำให้ระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟมีความยืดหยุ่นในการปรับแบบจำลองให้เหมาะสมในขณะที่ระบบควบคุมเจเนริกโมเดลที่มีแบบจำลองที่ตายตัว ทำให้ระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟสามารถควบคุมกระบวนการที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น 40% โดยอุณหภูมิของสารภายในถังปฏิกรณ์ไม่สูงกว่า 95 C

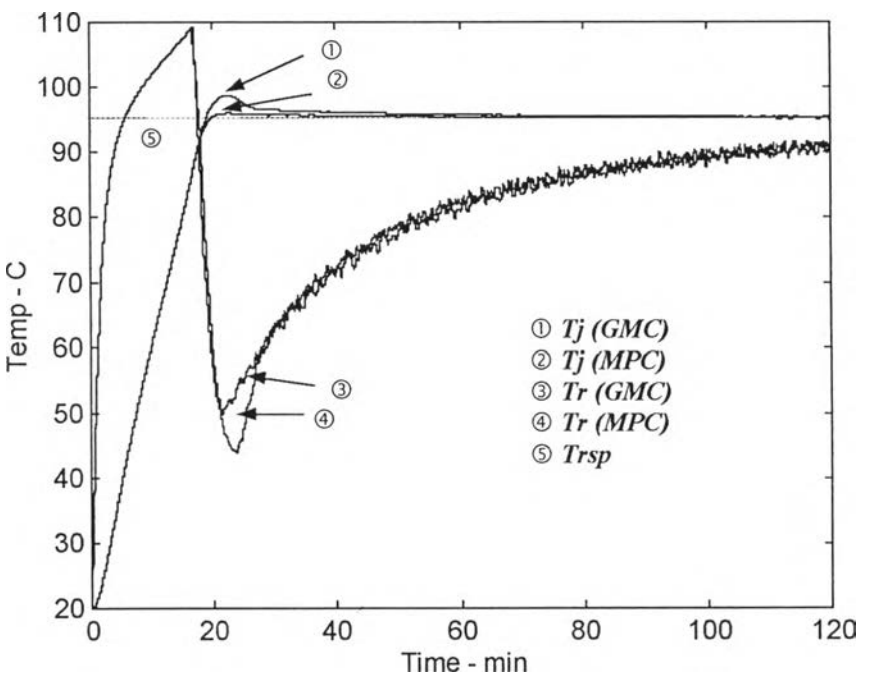
5.4.4 การทดสอบผลจากการผิดพลาดของค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยา

ค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาเป็นค่าตัวแปรที่สามารถผิดพลาดจากค่าจริงในกระบวนการเป็นค่าทางเทอร์โมไดนามิก ค่าความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปอาจหมายถึงค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาที่ใช้ไม่ตรงกับความเป็นจริง หรือเกิดปฏิกิริยาอื่นในถังปฏิกรณ์ เป็นต้น ค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาเป็นค่าตัวแปรที่มีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิของปฏิกิริยาสูง เนื่องจากค่าความร้อนที่เกิดขึ้นในถังปฏิกิริยาเป็นฟังก์ชั่นของอัตราการเกิดปฏิกิริยา ค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยา และปริมาณสารตั้งต้น ในงานวิจัยนี้จึงทำการทดสอบความทนทานต่อความผิดพลาดของค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยใช้ค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยามีค่าสูงกว่าที่แบบจำลองใช้ได้ผลดังตารางที่ 5.6 และกราฟที่ 5.11 และ 5.12

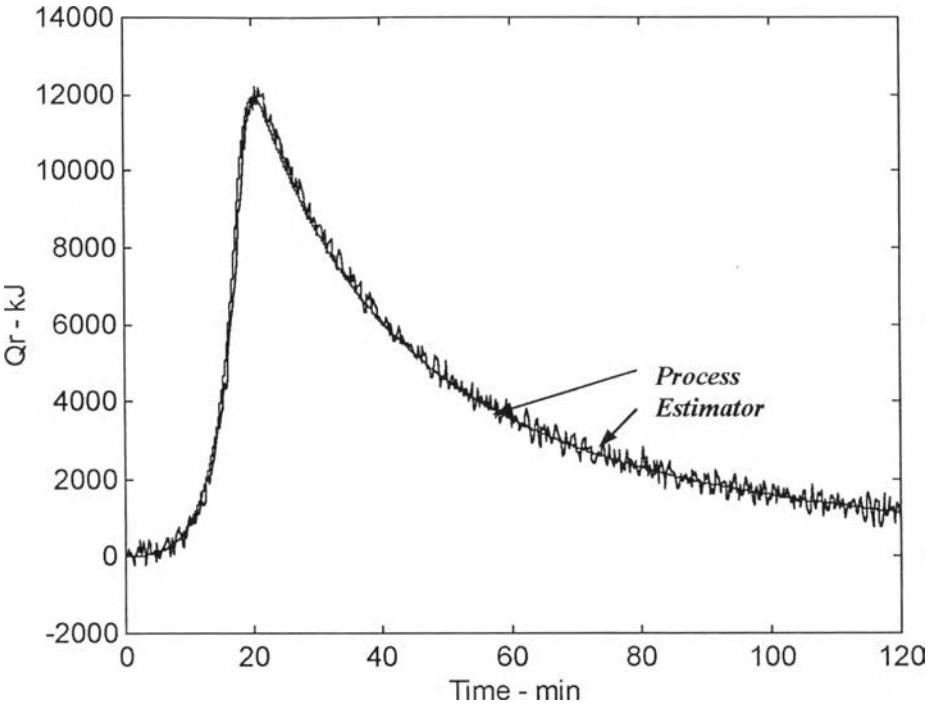
ตารางที่ 5.6 ตารางแสดงค่าดัชนีสมรรถนะของการควบคุมในกรณีที่ค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาผิดพลาด

ค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยา(%)	ดัชนีสมรรถนะ (ISE x 10^6) การควบคุมอุณหภูมิในถังปฏิกิริยา		ดัชนีสมรรถนะ (ISE x 10^8) การประมาณค่าความร้อน	
	GMC	MPC	GMC	MPC
110	1.198	1.197	0.342	0.317
120	1.197	1.194	0.401	0.382
130	1.218	1.191	0.624	0.433
140	*	1.191	*	0.468

* ไม่สามารถควบคุมได้



รูปที่ 5.13 กราฟเปรียบเทียบระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ (MPC) และระบบควบคุมเจเนริกโมเดล (GMC) เมื่อค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 20 %



รูปที่ 5.14 กราฟแสดงการประมาณค่าความร้อนในกระบวนการที่ค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 20% ควบคุมด้วยระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ

พิจารณาถึงแบบจำลองของความร้อนที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์จะพบว่าค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยา (Heat of Reaction) จะมีผลทำให้อุณหภูมิในถังปฏิกรณ์จะสูงกว่าในกรณีปกติ และเนื่องจากค่าความแปรปรวนของค่าความร้อนที่เกิดในถังปฏิกรณ์ในตัวกรองคาลมานมีค่าสูงมากทำให้ตัวกรองคาลมานสามารถประมาณค่าความร้อนได้ใกล้เคียงค่าจริงถึงแม้แบบจำลองของระบบประมาณค่ามีค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาเป็นค่าคงที่ก็ตาม การที่ตัวกรองคาลมานประมาณค่าได้ใกล้เคียงค่าจริงจึงทำให้ระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟและระบบควบคุมเจเนริกโมเดลสามารถควบคุมกระบวนการที่มีค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นได้สูง 30-40%