บทที่ 5

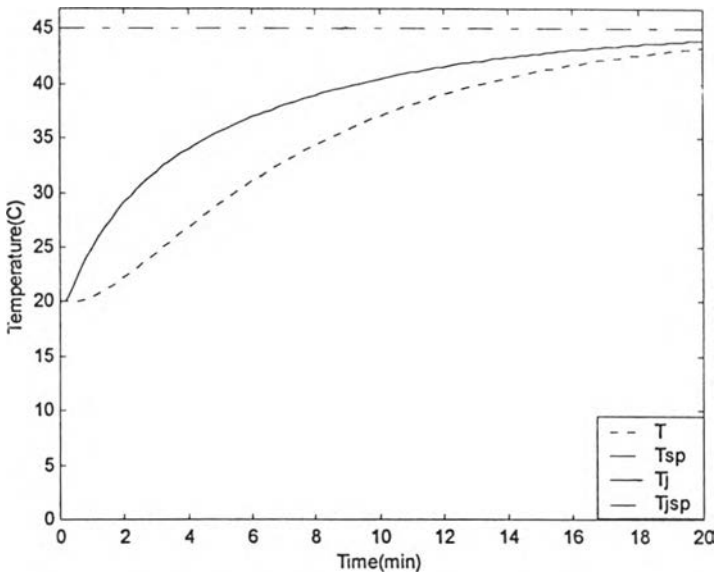
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง
การจำลองการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตซ์

ในบทนี้เป็นการรวบรวมผลการจำลอง ที่ศึกษาการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตซ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อน การศึกษานี้เพื่อแสดงถึงพฤติกรรมเชิงพลวัตของกระบวนการโดยการจำลองเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบแบตซ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนทั้งระบบควบคุมแบบลูปเปิดและแบบลูปปิดในหัวข้อ 5.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ปฏิกิริยาจากบทความของ Crowley และ Choi (1996) และในหัวข้อ 5.2 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์ ตามงานวิจัยของ Kim (1991) ในหัวข้อ 5.3 เป็นการศึกษาการประมาณค่าโดยทำการจำลองการประมาณค่าความร้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบแบตซ์ ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนโดยใช้ตัวกรองคาลมานเปรียบเทียบกับการประมาณค่าเอกซ์โพเนนเชียลที่ Cott และ Macchietto (1989) ใช้ประมาณค่าความร้อนที่เกิดในเครื่องปฏิกรณ์และในหัวข้อที่ 5.4 แสดงผลการจำลองการใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟร่วมกับตัวแปรมาณค่าความร้อนร่วมกับตัวกรองคาลมาน และในหัวข้อที่ 5.5 จะเป็นการทดสอบการใช้งานระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟภายใต้สภาวะที่แบบจำลองผิดพลาดจากกระบวนการจริง โดยเขียนแบบจำลองบนโปรแกรมสำเร็จรูปแมทแลบ

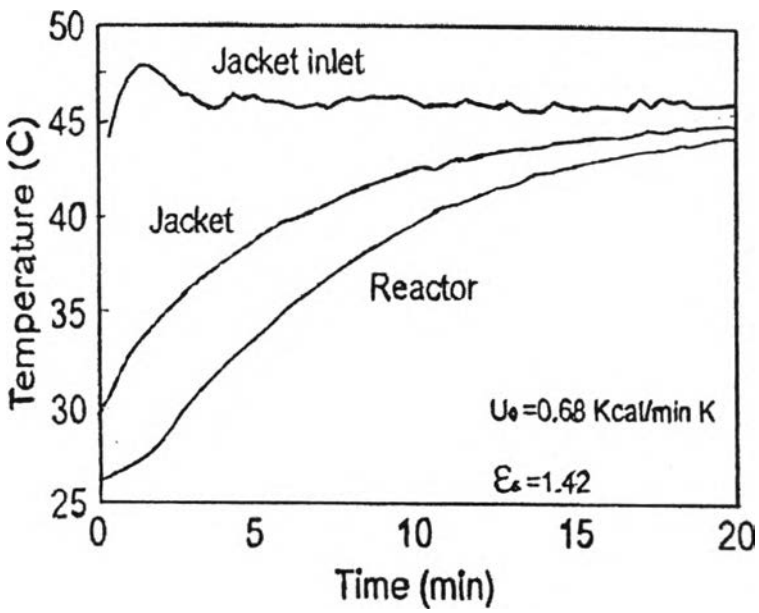
5.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ปฏิกิริยา

ผลการจำลองกระบวนการเกิดปฏิกิริยาฟรี-แรดิคัลพอลิเมอร์ไรเซชัน ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตซ์ จากบทความของ Crowley และ Choi (1996) ลงบนโปรแกรมสำเร็จรูปแมทแลบแล้วใช้เทคนิคการแก้ปัญหาเชิงตัวเลข (Numerical Technique) วิธีรัง-กัตตา อับดับที่ 4 (Rung-kutta 4th order) แก้สมการอนุพันธ์ โดยกำหนดช่วงเวลาสุ่มตัวอย่างที่ใช้ในคำนวณ 0.03 นาที สามารถหาค่าตัวแปรสเตทจากสมการแบบจำลองกระบวนการดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 ค่าพารามิเตอร์จลนพลศาสตร์ โดยค่าเริ่มต้นของสภาวะการดำเนินการ ค่าทางกายภาพที่ใช้ในการจำลอง แสดงไว้ในตารางที่ 4.1-4.3

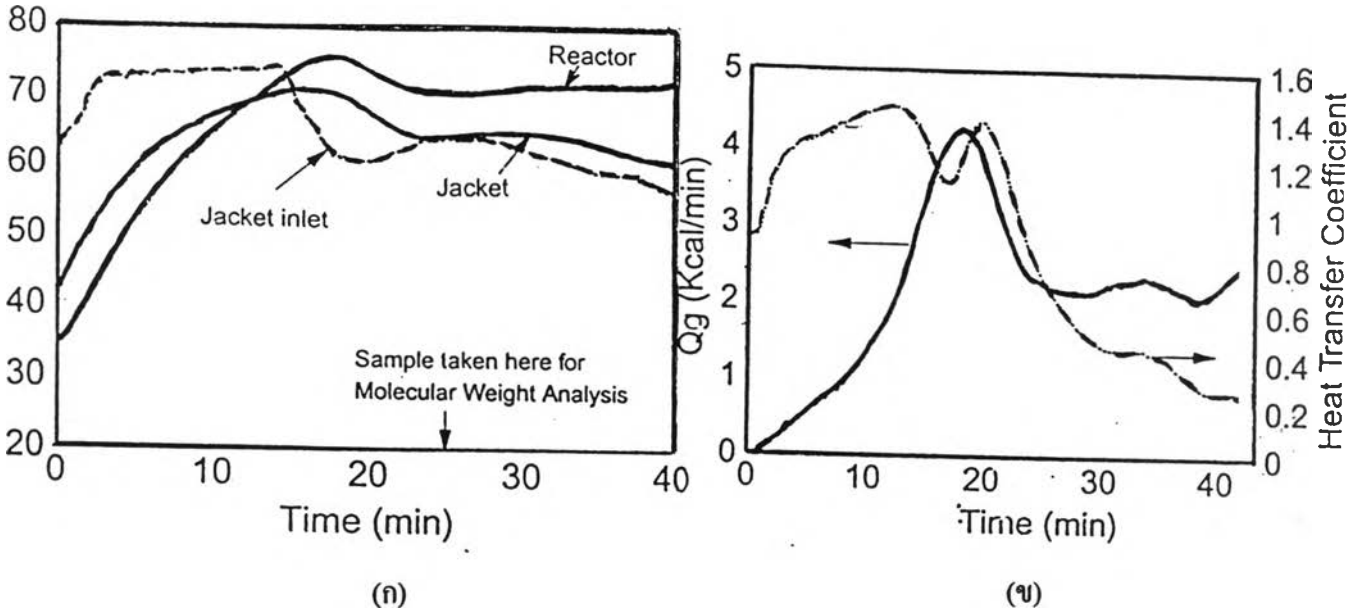
โดยทำการจำลองกระบวนการ 2 กรณีได้แก่ กรณีที่ไม่มีการควบคุม กำหนดให้อุณหภูมิของน้ำแจ็คเก็ตเซ็ตพอยท์มีค่าคงที่เท่ากับ 45 เซลเซียส และกรณีเมื่อทำการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอดี ซึ่งผลการจำลองแสดงกราฟเปรียบเทียบกับในบทความ ดังรูปที่ 5.1 (ก) และ (ข) แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจูน ได้ดังตารางที่ 5.1 ผลดังรูปที่ 5.2 (ก) และ (ข)



รูปที่ 5.1 (ก) ผลตอบสนองอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์ งานวิจัยของ Crowley และ Choi (1996) ในกรณี 1 (ไม่มีการควบคุม) : ผลจากการจำลอง



รูปที่ 5.1 (ข) ผลตอบสนองอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์ งานวิจัยของ Crowley และ Choi (1996) ในกรณี 1 (ไม่มีการควบคุม) : ผลที่เสนอในบทความ (Crowley และ Choi, 1996)

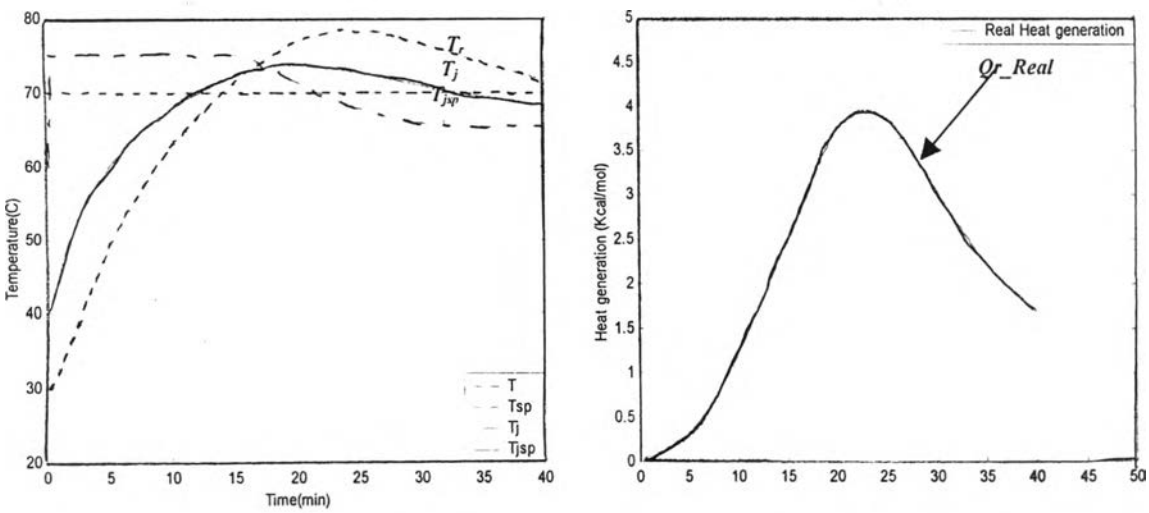


(ก) (ข)

รูปที่ 5.2 ผลการจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์ ที่เสนอในบทความงานวิจัยของ (Crowley และ Choi, 1996) ในกรณี 2 (เมื่อควบคุมด้วยพีไอดี)

(ก) ผลตอบสนองอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์

(ข) ผลตอบสนองความร้อนที่เกิดภายในเครื่องปฏิกรณ์



(ก) (ข)

รูปที่ 5.3 ผลการจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์ งานวิจัยของ Crowley และ Choi ในกรณี 2 (เมื่อควบคุมด้วยพีไอดี) : ในงานวิจัยนี้

(ก) ผลตอบสนองอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์

(ข) ผลตอบสนองความร้อนที่เกิดภายในเครื่องปฏิกรณ์

ตารางที่ 5.1 ค่าคงที่ที่ใช้สำหรับการจูนระบบควบคุมแบบเชิงเส้นพีไอดี

สัญลักษณ์	อธิบาย	ค่า
K_c	เวลาอินทิกรัล	0.5
τ_I	เวลาอนุพันธ์	7
τ_D	ค่าคงที่เกน	10^{-5}

จากผลการจำลองการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ ทั้งสองกรณีตามบทความของ Crowley และ Choi (1996) จะพบว่ากรณีที่ไม่มีการควบคุม อุณหภูมิของแจ๊คเก็ตค่าคงที่ที่ 45 เซลเซียส (รูปที่ 5.1) และกรณีการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอดี (ตามรูปที่ 5.2 และ 5.3) พบว่าการประมาณค่าความร้อนที่คายออกจากปฏิกิริยาให้ค่าสูงสุดประมาณ 4 กิโลแคลอรีต่อนาทีเท่านั้น ซึ่งแสดงว่าระบบจากบทความนี้ค่าความร้อนที่คายออกจากปฏิกิริยามีค่าน้อย ทั้งนี้สาเหตุเนื่องจากระบบที่จำลองนั้นมีขนาดของเครื่องปฏิกรณ์เล็ก สารตั้งต้นที่ใช้ปริมาณน้อยมาก จึงส่งผลให้ค่าความร้อนที่คายออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์จึงมีปริมาณน้อยอยู่ จากกราฟแสดงว่าสภาวะที่ดำเนินการยังสามารถทำการควบคุมได้ด้วยตัวควบคุมพีไอดี ถ้าทำการจูนค่าพารามิเตอร์ที่ดี แต่อย่างไรก็ตาม ระบบไม่มีความรุนแรงเพียงพอที่จะนำมาทำการควบคุมและเปรียบเทียบให้เห็นสมรรถนะและความทนทานของตัวควบคุมที่จะเลือกใช้ ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาระบบที่ทำการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ของพอลิเมอร์แบบแบตช์ที่ที่มีแบบจำลองจลนพลศาสตร์แบบเดียวกันเหมือนในงานวิจัยนี้

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าบทความ Kim (1991) ซึ่งศึกษาการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนของพอลิเมอร์ที่สนใจ ใกล้เคียงกับบทความ Crowleyและ Choi (1996) พารามิเตอร์ที่ใช้ในระดับอุตสาหกรรมโรงงาน โมโนเมอร์สารตั้งต้นที่ใช้ปริมาณมาก เมื่อทำการจำลองกระบวนการเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางพลวัตเบื้องต้น พบว่าความร้อนที่คายออกมาขณะเกิดปฏิกิริยามีค่ามาก ระบบมีความรุนแรงของตัวแปรปรับเมื่อทำการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ให้อยู่ที่อุณหภูมิเป้าหมาย เป็นระบบที่ท้าทายและน่าสนใจเพียงพอและเหมาะสมที่จะนำมาทำการควบคุมและเปรียบเทียบให้เห็นสมรรถนะและความทนทานของตัวควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟและเจเนริกโมเดลที่เลือกทำในงานวิจัยนี้ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของบทความของ Kim (1991) ใช้ค่าเดียวกันกับตารางที่ 4.1ถึง 4.2 และค่าเริ่มต้นใช้ของตารางที่ 4.4 ในการจำลองกระบวนการเพื่อทำการควบคุมต่อไป

5.2 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์

ผลการทดลองการจำลองกระบวนการ Kim (1991) เสนอการทดลองเป็น สองกรณี ดังนี้

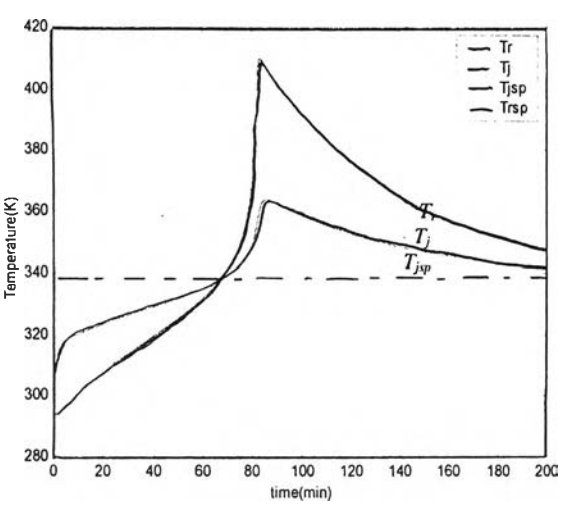
5.2.1 การควบคุมแบบลูปเปิด (ไม่มีระบบควบคุม)

การจำลองนี้ เพื่อศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบแบตช์ ที่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน และปฏิกิริยาการคายความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันเมื่อไม่มีการควบคุมอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ (และกำหนดให้อุณหภูมิแจ็คเก็ตมีค่าคงที่ตลอดเท่ากับ 338.15 เคลวิน (65 เซลเซียส) ผลของการจำลองเป็นไปตามรูปกราฟที่ 5.4 (ก) – (ง)

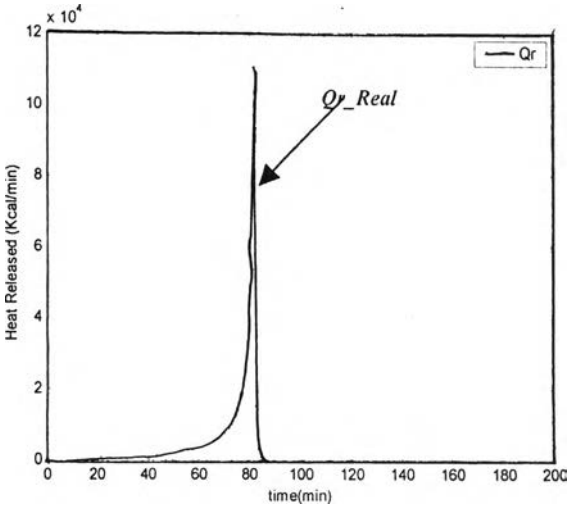
จากกราฟแสดงผลการจำลองกระบวนการ (รูปที่ 5.4) เมื่อเริ่มให้ความร้อนกับเครื่องปฏิกรณ์เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์พอลิเมอร์ จากอุณหภูมิเริ่มต้น 20 เซลเซียส (293.15 เคลวิน) จนกระทั่งถึงค่าอุณหภูมิเป้าหมายคือ 65 เซลเซียส (338.15 เคลวิน) โดยต้องการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ ให้อยู่ที่ค่าที่อุณหภูมิเป้าหมายนี้ๆ ให้เกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงโมโนเมอร์สารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ ทั้งนี้ก็มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์หลังเสร็จสิ้นกระบวนการมีสมบัติตามที่ต้องการ

จะพบว่าในกรณีศึกษาเมื่อไม่มีการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ โดยกำหนดให้อุณหภูมิของแจ็คเก็ตมีค่าคงที่ที่ 65 เซลเซียส (338.15 เคลวิน) ตลอดการจำลองพบว่าเมื่อเริ่มปฏิกิริยาการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ในช่วงแรกๆเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆและเมื่อค่าของอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนเข้าใกล้ค่าอุณหภูมิเป้าหมายจะพบว่าการเกิดปฏิกิริยามีมากเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และค่าของความร้อนที่ปล่อยออกมาจากปฏิกิริยาก็จะมีมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าของความร้อนที่ปล่อยออกมาจากปฏิกิริยา สัมพันธ์กับค่าของอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบเอกซ์โพเนนเชียลและแปรผันกับปริมาณสารโมโนเมอร์ ตามที่ได้เสนอไปแล้วในเรื่องการประมาณค่าความร้อนในบทที่ 4 จากที่ค่าของความร้อนที่คายออกมาจากปฏิกิริยา ส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยามีมากขึ้น (สังเกตจากค่าความชันที่เพิ่มขึ้นของค่าคอนเวอร์ชันหรือความเข้มข้นของโมโนเมอร์ที่ลดลงในเครื่องปฏิกรณ์) การที่ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะให้ความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาก็มีค่าสูง พบว่าอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เกิดการโอเวอร์ชูตถึง 410 เคลวิน ที่เวลา 80 นาที จนเมื่อการเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้นนี้หมดไปแล้ว อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ จึงลดลงจนกระทั่งเท่ากับอุณหภูมิของแจ็คเก็ตในที่สุด

สรุปได้ว่า เมื่อไม่มีการควบคุมอุณหภูมิการเกิดของปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ไม่สามารถทำการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับ



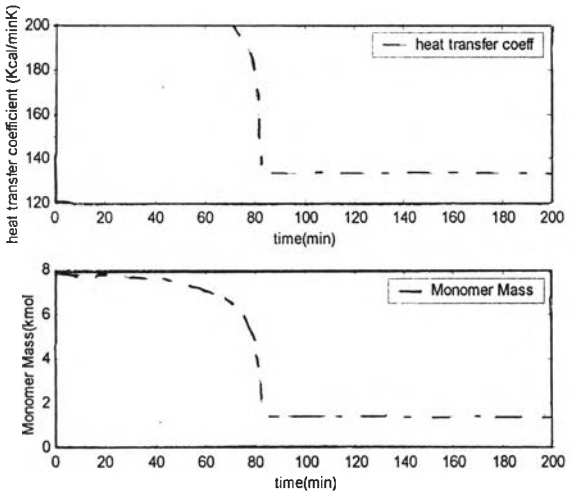
(ก)



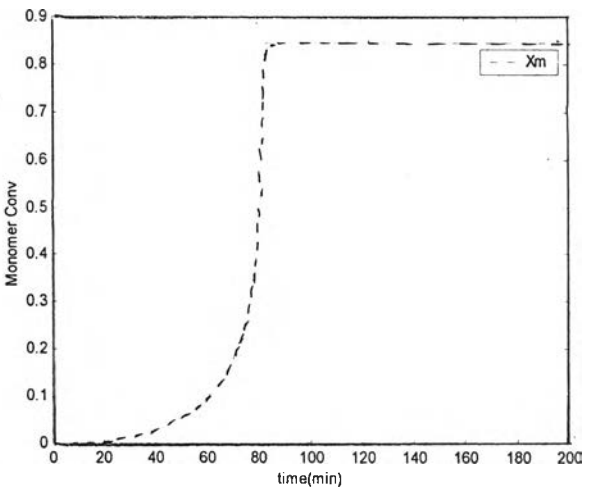
(ข)

รูปที่ 5.4 (ก) ผลตอบสนองอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์ กับเวลาสำหรับการควบคุมแบบลูปเปิด

รูปที่ 5.4 (ข)ผลตอบสนองความร้อนที่เกิดภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์กับเวลาสำหรับการควบคุมแบบลูปเปิด



(ค)



(ง)

รูปที่ 5.4 (ค)บน ผลตอบสนองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์ กับเวลา

รูปที่ 5.4 (ค)ล่าง ผลตอบสนองความเข้มข้นของโมโนเมอร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์กับเวลา

รูปที่ 5.4 (ง) ผลตอบสนองคอนเวอร์ชันของโมโนเมอร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์กับเวลา

ได้แม้ว่าคอนเวอร์ชันของโมโนเมอร์จะมีค่าสูงมากถึง 85 เปอร์เซ็นต์ หลังจากเสร็จสิ้นปฏิกิริยาในแบตช์ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังสิ้นกระบวนการไม่ได้สมบัติตามที่เราต้องการ (out-off-spec)

5.2.2 การควบคุมแบบลูปปิด (ตัวควบคุมพีไอดีและเจเนริกโมเดล)

หัวข้อนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่เกิดปฏิกิริยาคายความร้อน เมื่อมีการควบคุมด้วยตัวควบคุมเชิงเส้นพื้นฐานที่ใช้กันมาในอุตสาหกรรม (พีไอดี)และ เมื่อมีการควบคุมด้วยตัวควบคุมไม่เชิงเส้นแบบอาศัยแบบจำลองแบบง่ายที่สุด (เจเนริกโมเดล)

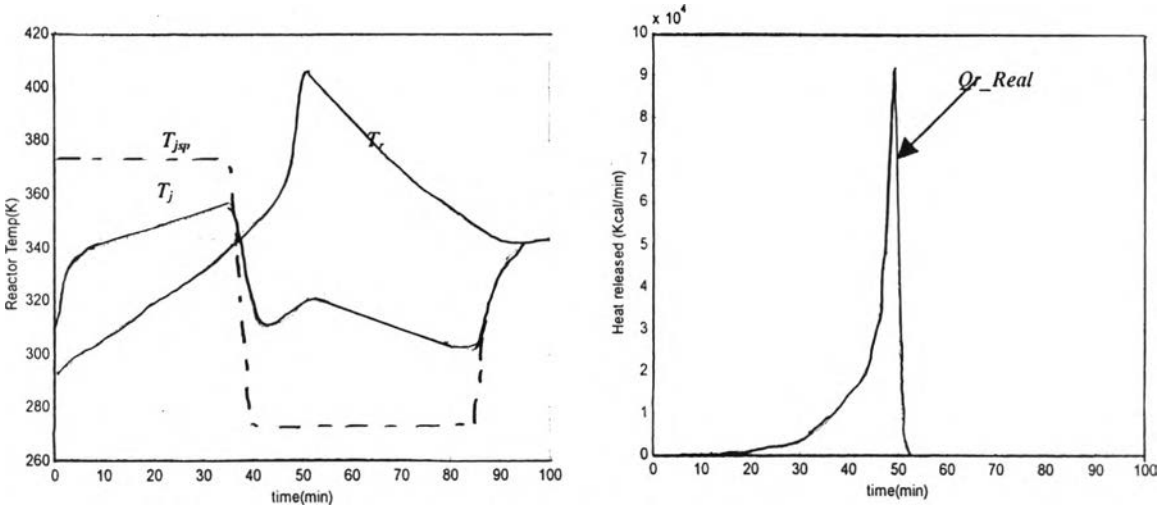
ผลการจำลองเครื่องปฏิกรณ์ที่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน เมื่อมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการควบคุมอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ ให้อยู่ที่ค่าเป้าหมายคือ 338.15 เคลวิน (65 เซลเซียส) ผลการตอบสนองของการจำลองที่ให้โปรไฟล์ที่ดีที่สุด แสดงตามรูปกราฟที่ 5.5 (ก)–(ง) และ 5.7 (ก)–(ง) ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจูนพีไอดีและเจเนริกโมเดลแสดงได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่าคงที่ที่ใช้สำหรับการจูนระบบควบคุมแบบเชิงเส้นพีไอดีและเจเนริกโมเดล

ตัวควบคุม	สัญลักษณ์	คำอธิบาย	ค่า
พีไอดี	K_c	เวลาอินทิกรัล	1.25
	τ_I	เวลาอนุพันธ์	5000
	τ_D	ค่าคงที่เกน	0.00145
เจเนริกโมเดล	ξ	เวลาอนุพันธ์	10
	τ	ค่าคงที่เกน	20

จากผลการจำลองเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์ ที่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน เมื่อควบคุมอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ด้วยตัวควบคุมพีไอดีและเจเนริกโมเดล ค่าพารามิเตอร์ที่ให้โปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์ที่ดีที่สุดของแต่ละกรณี แสดงในตารางที่ 5.2 ในงานวิจัยนี้ดัชนีสมรรถนะของการควบคุมอุณหภูมิวัดจากค่าอินทรีกรัลของกำลังสองของความผิดพลาด หรือค่าไอเอสอี (Integral of the Square of the Error, ISE)

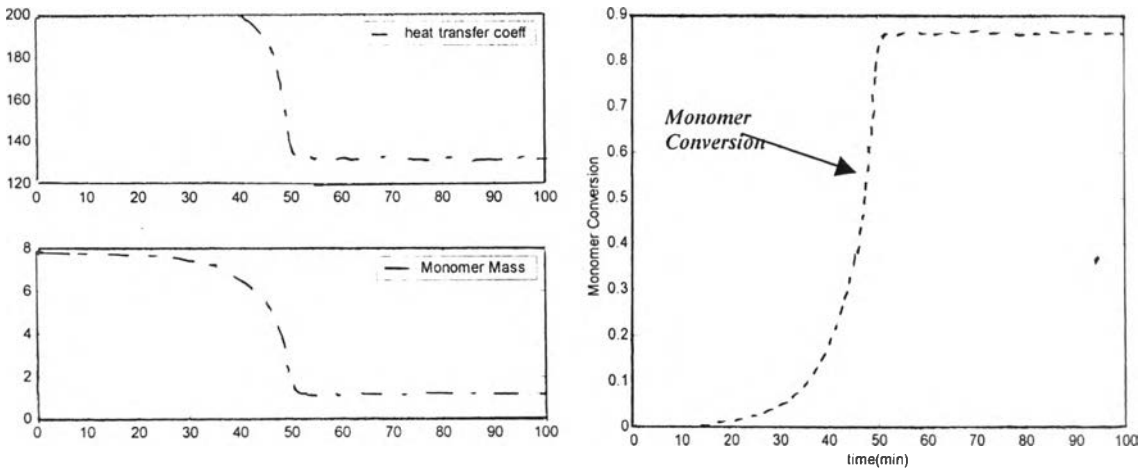
$$ISE = \int_0^\infty e^2(t)dt \tag{5.1}$$



(ก) (ข)

รูปที่ 5.5 (ก) ผลตอบสนองอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์ กับเวลา สำหรับการควบคุมระบบลูปปิดด้วยพีไอดี

รูปที่ 5.5 (ข) ผลตอบสนองความร้อนที่เกิดภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์กับเวลา สำหรับการควบคุมระบบลูปปิดด้วยพีไอดี

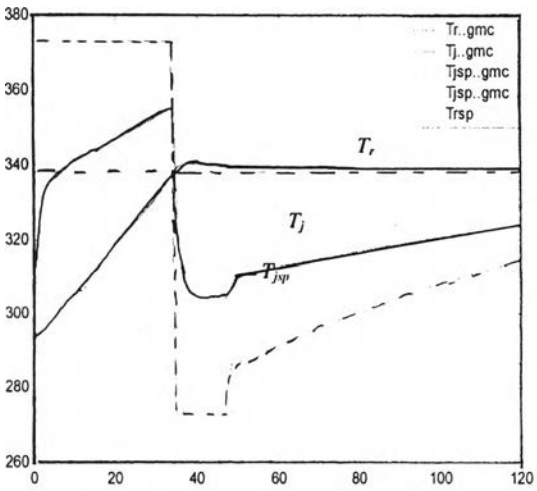


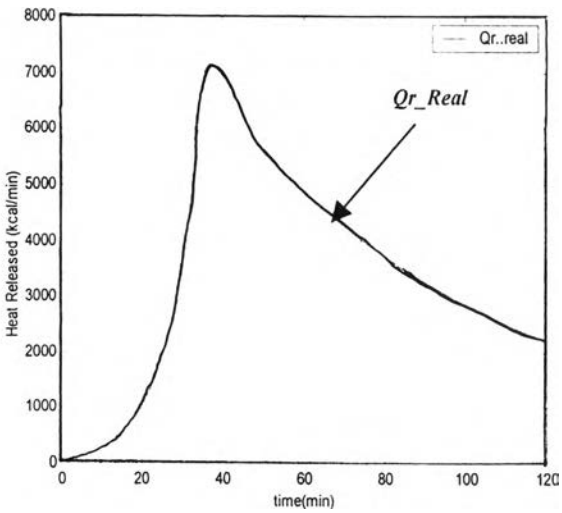
(ค) (ง)

รูปที่ 5.5 (ค)บน ผลตอบสนองค่าสัมประสิทธ์การถ่ายเทความร้อนรวมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์ กับเวลา สำหรับการควบคุมระบบลูปปิดด้วยพีไอดี

รูปที่ 5.5 (ค)ล่าง ผลตอบสนองความเข้มข้นของโมโนเมอร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์กับเวลา สำหรับการควบคุมระบบลูปปิดด้วยพีไอดี

รูปที่ 5.5 (ง) ผลตอบสนองคอนเวอร์ชันของโมโนเมอร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์กับเวลา สำหรับการควบคุมระบบลูปปิดด้วยพีไอดี

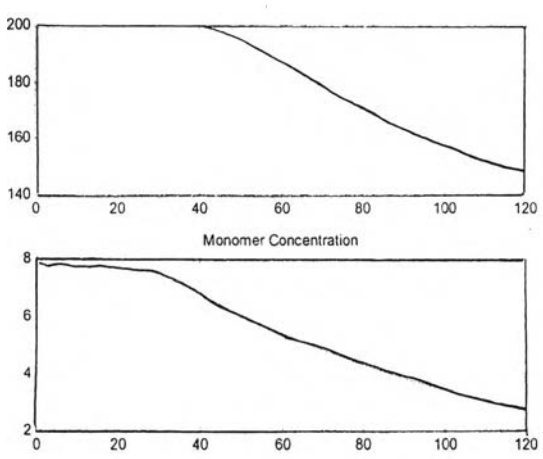


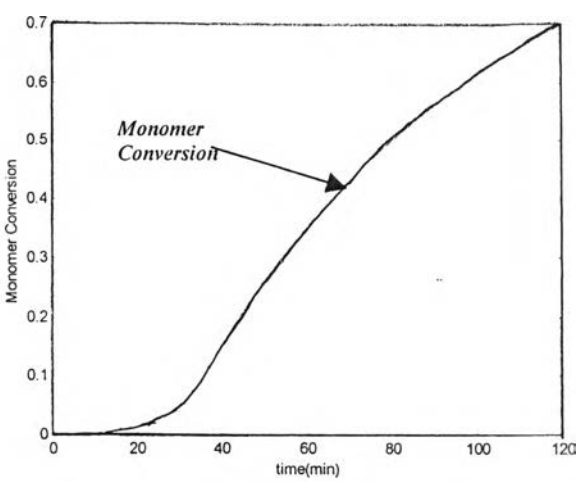


(ก) **(ข)**

รูปที่ 5.6 (ก) ผลตอบสนองอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์ กับเวลา สำหรับการควบคุมระบบลูปปิดด้วยเจเนริกโมเดล

รูปที่ 5.6 (ข) ผลตอบสนองความร้อนที่เกิดภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์กับเวลา สำหรับการควบคุมระบบลูปปิดด้วยเจเนริกโมเดล





(ค) **(ง)**

รูปที่ 5.6 (ค)บน ผลตอบสนองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมกับเวลา สำหรับการควบคุมระบบลูปปิดด้วยเจเนริกโมเดล

รูปที่ 5.6 (ค)ล่าง ผลตอบสนองความเข้มข้นของโมโนเมอร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์กับเวลา สำหรับการควบคุมระบบลูปปิดด้วยเจเนริกโมเดล

รูปที่ 5.6 (ง) ผลตอบสนองคอนเวอร์ชันของโมโนเมอร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์กับเวลา สำหรับการควบคุมระบบลูปปิดด้วยเจเนริกโมเดล

สำหรับงานวิจัยนี้

1. สมรรถนะของการควบคุมอุณหภูมิคำนวณจากสมการ (5.1)

โดย กำหนดให้ e คือ ผลต่างของ T_r กับ T_{rsp}

2. สมรรถนะของการประมาณค่าความร้อนคำนวณจากสมการ (5.1)

โดย กำหนดให้ e คือ ผลต่างของ Q_r จริงที่คำนวณมาจากสมการดุลพลังงานภายในเครื่องปฏิกรณ์ ที่เปลี่ยนกับเวลากับ Q_{rc} จากสมการการประมาณค่าความร้อนของตัวกรอง

ดัชนีสมรรถนะการควบคุมอุณหภูมิที่ดีที่สุดและการประมาณค่าความร้อนของแต่ละกรณีแสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ตารางแสดงค่าดัชนีสมรรถนะของการควบคุมในกรณีปกติ (พีไอดีและเจเนริกโมเดล)

ตัวควบคุม	ดัชนีสมรรถนะ (ISE*10^4) การควบคุมอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์	ดัชนีสมรรถนะ (ISE*10^0) การประมาณค่าความร้อน
PID	8.5910	0.6168
GMC	2.4232	0.0116

จากผลการทดลองการจำลองในกรณีปกติ พบว่าตัวควบคุมพีไอดีไม่สามารถทำการควบคุมอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์กระบวนการเคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์ในงานวิจัยนี้ได้ สังเกตได้จากโปรไฟล์การควบคุมอุณหภูมิ (รูปที่5.5(ก)-(ง)) ของเครื่องปฏิกรณ์ให้ค่าอุณหภูมิสูงเกินค่าของอุณหภูมิเป้าหมายที่ตั้งไว้มาก เนื่องจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันการเกิดปฏิกิริยาจะคายความร้อนออกมาสูง การคำนวณอุณหภูมิแจ็คเก็ตเมื่อทำการควบคุมด้วยพีไอดีไม่สามารถปรับตัวทันกับการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการ เนื่องจากเป็นตัวควบคุมแบบเชิงเส้นและไม่มีแบบจำลอง ซึ่งจะทำการควบคุมเมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้น ซึ่งพีไอดีไม่ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงทางพลวัต ส่งผลให้การควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ไม่ทันเกิดการรันอเว่ย์ของอุณหภูมิ (Thermal Runaway)

สำหรับการควบคุมด้วยเจเนริกโมเดล จากผลการจำลองการควบคุมอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์ จากกราฟภาคผนวก ข.2 แสดงการจูนระบบควบคุมเจเนริกโมเดล พบว่าพารามิเตอร์ $\xi = 10$ $\tau = 20$ สามารถควบคุมโปรไฟล์อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ให้เข้าสู่อุณหภูมิเป้าหมายที่ตั้งไว้ (65 เซลเซียส) ให้ผลการควบคุมอุณหภูมิดีที่สุด ให้อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่มี

โอเวอชู๊ตเล็กน้อย แต่ยังอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ส่งผลทำให้สารพอลิเมอร์ผลิตภัณฑ์ที่ได้ มีสมบัติดีที่สุด พบว่าสามารถทำการควบคุมอุณหภูมิกระบวนการเคมีพอลิเมอร์แบบแบตซ์ได้ดีกว่าพีไอดี ค่าของอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์สามารถควบคุมได้ค่าใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิเป้าหมายเป้าหมายจากโปรไฟล์ของอุณหภูมิ(รูปข้างต้น) รวมทั้งจากค่าดัชนีสมรรถนะการควบคุมอุณหภูมิมีค่าน้อยกว่ากรณีการควบคุมอุณหภูมิด้วยพีไอดี ทั้งนี้เนื่องจากการควบคุมเจเนริกโมเดลเป็นการควบคุมที่อาศัยแบบจำลองจึงสามารถทำการปรับอุณหภูมิของเซ็ตพอยท์แจ็คเก็ตได้ดีกว่า จึงทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการเคมีพอลิเมอร์แบบแบตซ์ได้ดีกว่าพีไอดีซึ่งจากผลการทดลองทำให้เชื่อได้ว่าเหมาะสมที่จะนำไปทดสอบเปรียบเทียบกับโมเดลพรีดิกทีฟ

สรุปได้ว่า การควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบที่อาศัยแบบจำลองให้สมรรถนะในการควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการเคมีพอลิเมอร์แบบแบตซ์ได้ดีกว่าการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบที่ไม่อาศัยแบบจำลอง ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกนำเอาเจเนริกโมเดลมาทำการเปรียบเทียบสมรรถนะกับความทนทานกับโมเดลพรีดิกทีฟในการควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการเคมีพอลิเมอร์แบบแบตซ์ได้จำลองกระบวนการขึ้น เนื่องมาจากเป็นการควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองเหมือนกัน

5.3 การจำลองการประมาณค่าความร้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบแบตซ์

จากผลการจำลองกระบวนการทุกกรณีที่ผ่านมา กรณีไม่มีการควบคุม กรณีที่มีการควบคุมด้วยพีไอดีและเจเนริกโมเดล พบว่าเมื่อให้ความร้อนกับเครื่องปฏิกรณ์พฤติกรรมทางพลวัตของอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าสูงขึ้น ภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบแบตซ์จะเกิดปฏิกิริยา ซึ่งมีการคายความร้อนที่ปล่อยออกมาจากปฏิกิริยามากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าของความร้อนที่เกิดมาจากปฏิกิริยาคายความร้อนสัมพันธ์กับค่าของอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบเอกซ์โพเนนเชียลและแปรผันกับปริมาณสารโมโนเมอร์ตามสมการดุลมวลสารและพลังงานของเครื่องปฏิกรณ์ จากที่ค่าของความร้อนที่คายออกมาส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยามีความรุนแรงมากขึ้น เพราะอัตราการเกิดปฏิกิริยามีความสัมพันธ์กับค่าของอุณหภูมิตามความสัมพันธ์ของสมการอาร์รีเนียส ผลการเกิดปฏิกิริยามีความรุนแรงมาก ก็หมายถึงค่าคอนเวอร์ชันที่มาก ซึ่งค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของแจ็คเก็ตก็ลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิของปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตซ์ จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังสิ้นกระบวนการไม่ได้สมบัติตามที่เราต้องการ

จากงานวิจัยที่ผ่านมา การประมาณค่ามักจะใช้ร่วมกับการควบคุมเสมอในงานวิจัย เนื่องจากความจริงที่ว่า ค่าพารามิเตอร์มีความผิดพลาดอยู่แล้วในตัวเองเนื่องมาการจำลองกระบวนการมักมีข้อสมมุติฐานต่างๆที่ใช้ในการจำลองกระบวนการ และในกรณีที่ค่าสเตทบางตัวไม่สามารถ

ทำการวัดได้ และนอกจากนี้เพื่อให้การควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นในการควบคุม ในงานวิจัยนี้จะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา โดยใช้หลักการของการประมาณค่าตัวกรองแบบเอกซ์โพเนนเชียล เปรียบเทียบกับประมาณค่าด้วยตัวกรองคาลมาน เพื่อให้เห็นสมรรถนะและประสิทธิภาพการประมาณค่า ทั้งกรณีที่ไม่มีการควบคุม(ลูปเปิด) และเมื่อมีการควบคุม(ลูปปิด)

5.3.1 เปรียบเทียบการประมาณค่าแบบลูปเปิด

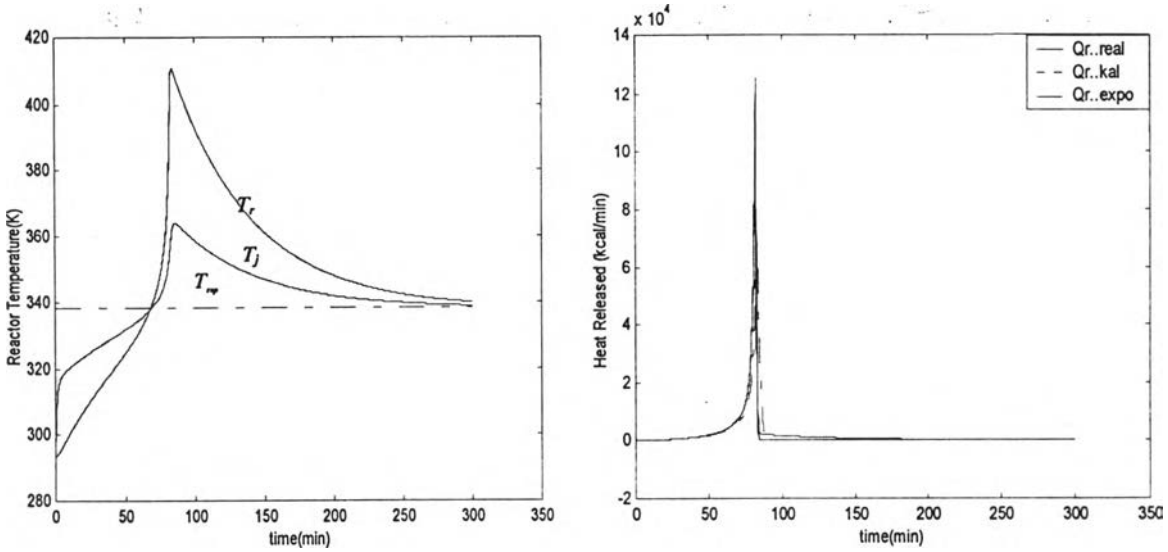
การจำลองระบบลูปเปิดเมื่อมีระบบประมาณค่า ในงานวิจัยนี้จะทำการเปรียบเทียบค่าความร้อนที่ประมาณได้จริงกับค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจริงในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์ ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบกับค่าความร้อนที่ได้จากการประมาณโดยอาศัยหลักการเอกซ์โพเนนเชียล เปรียบเทียบกับการประมาณของตัวกรองคาลมาน ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 5 โดยพารามิเตอร์ที่ใช้จูนระบบประมาณค่าตัวกรองคาลมานแสดงไว้ในตารางที่5.4 ผลการจำลองเปรียบเทียบการประมาณแสดงในรูปที่ 5.7 ในงานวิจัยนี้ใช้ค่าประมาณ (ISE) เป็นดัชนีวัดสมรรถนะของการประมาณค่าความร้อนของปฏิกิริยาสำหรับเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการประมาณโดยคำนวณจากผลรวมกำลังสองของผลต่างระหว่างค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจริงกับค่าที่ได้จากการประมาณที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งได้อธิบายมาแล้ว แสดงค่าในตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.4 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการประมาณค่าความร้อนโดยใช้ตัวกรองคาลมานในระบบลูปเปิด

P11= 0.1	P22 = 0.1	
P33 = 1	P44 = 1	P55= 0.001
Q11= 5	Q22 = 1000	
Q33 = $1x10^5$	Q44 = $5x10^4$	Q55= 0.001
R11 = 10	R22 = 10	

ตารางที่ 5.5 ดัชนีสมรรถนะของการประมาณค่าของตัวประมาณค่าในกรณีการควบคุมลูปเปิด

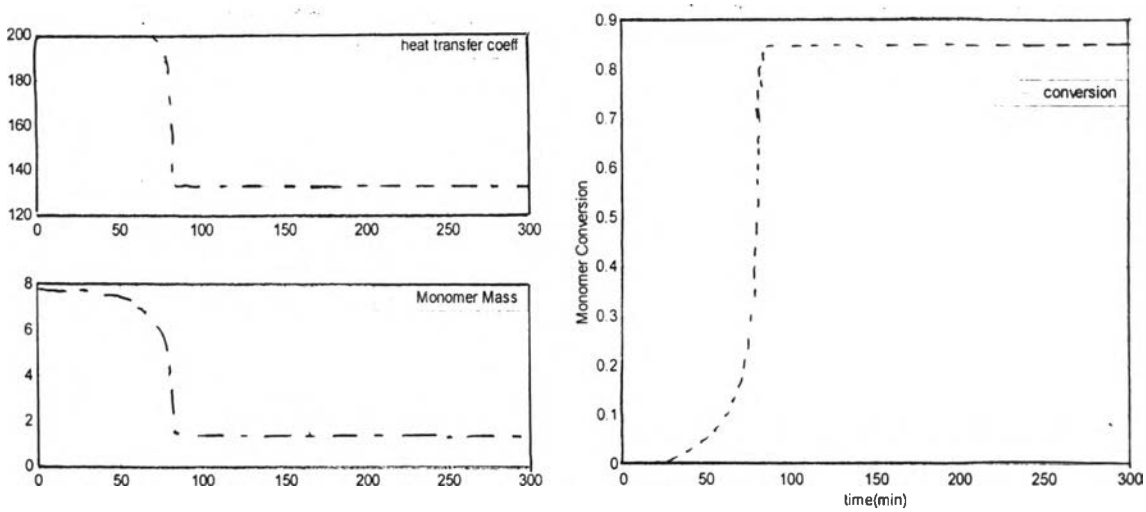
ดัชนีสมรรถนะ การประมาณค่าความร้อน ($ISE*10^9$)	
ตัวกรองเอกซ์โพเนนเชียล	ตัวกรองคาลมาน
15.515	0.96489



(ก) (ข)

รูปที่ 5.7 (ก) ผลตอบสนองอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์กับเวลา เมื่อเปรียบเทียบการประมาณค่าตัวกรองแบบเอกซ์โพเนนเชียล กับตัวกรองคาลมานในการควบคุมแบบลูปเปิด

รูปที่ 5.7 (ข) ผลตอบสนองความร้อนที่เกิดภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีกับเวลา เมื่อเปรียบเทียบการประมาณค่าตัวกรองแบบเอกซ์โพเนนเชียล กับตัวกรองคาลมานในการควบคุมแบบลูปเปิด



(ค) (ง)

รูปที่ 5.7 (ค) บน ผลตอบสนองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมกับเวลา เมื่อเปรียบเทียบการประมาณค่าตัวกรองแบบเอกซ์โพเนนเชียล กับตัวกรองคาลมานในการควบคุมแบบลูปเปิด

รูปที่ 5.7 (ค)ล่าง ผลตอบสนองความเข้มข้นของโมโนเมอร์กับเวลา เมื่อเปรียบเทียบการประมาณค่าตัวกรองแบบเอกซ์โพเนนเชียล กับตัวกรองคาลมานในการควบคุมแบบลูปเปิด

รูปที่ 5.7 (ง) ผลตอบสนองคอนเวอร์ชันของโมโนเมอร์กับเวลา เมื่อเปรียบเทียบการประมาณค่าตัวกรองแบบเอกซ์โพเนนเชียล กับตัวกรองคาลมานในการควบคุมแบบลูปเปิด

จะพบว่าในกรณีศึกษาเมื่อไม่มีการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ โดยกำหนดให้อุณหภูมิของแจ็คเก็ตมีค่าคงที่ที่ 65 เซลเซียส (338.15 เคลวิน) ตลอดการจำลองพบว่าเมื่อเริ่มปฏิกิริยาการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ในช่วงแรกๆเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆและเมื่อค่าของอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนเข้าใกล้ค่าอุณหภูมิเป้าหมายจะพบว่าการเกิดปฏิกิริยามีมากเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และค่าของความร้อนที่ปล่อยออกมาจากปฏิกิริยาก็จะมีมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าของความร้อนที่ปล่อยออกมาจากปฏิกิริยา สัมพันธ์กับค่าของอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบเอกซ์โพเนนเชียลและแปรผันกับปริมาณสารโมโนเมอร์ ตามที่ได้เสนอไปแล้วในเรื่องการประมาณค่าความร้อนในบทที่ 4 จากที่ค่าของความร้อนที่คายออกมาจากปฏิกิริยา ส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยามีมากขึ้น (สังเกตจากค่าความชันที่เพิ่มขึ้นของค่าคอนเวอร์ชันหรือความเข้มข้นของโมโนเมอร์ที่ลดลงในเครื่องปฏิกรณ์) การที่ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วก็ให้ความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาก็มีค่าสูง พบว่าอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เกิดการโอเวอร์ชูตถึง 410 เคลวิน ที่เวลา 80 นาที จนเมื่อการเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้นนี้หมดไปแล้ว อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ จึงลดลงจนกระทั่งเท่ากับอุณหภูมิของแจ็คเก็ตในที่สุด

สรุปผลการทดลอง พบว่าการประมาณค่าด้วยตัวกรองคาลมาน จะประมาณค่าได้ใกล้เคียงกับค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจริงมากกว่าการประมาณค่าจากตัวกรองแบบเอกซ์โพเนนเชียล โดยค่าดัชนีสมรรถนะการประมาณค่าความร้อนของปฏิกิริยาของตัวกรองคาลมานมีค่าน้อยกว่าตัวกรองแบบเอกซ์โพเนนเชียล ที่สภาวะการควบคุมเดียวกันและไม่มีตัวควบคุมเช่นเดียวกัน ทั้งนี้สาเหตุเนื่องจากตัวกรองคาลมานมีแบบจำลองการประมาณค่าเป็นแบบจำลองของกระบวนการ (ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วใน บทที่ 4 เรื่องการประมาณค่า) ดังนั้นเมื่อมีความผิดพลาดของแบบจำลองกระบวนการขึ้น ระบบตัวกรองคาลมานจะรู้และทำการประมาณค่าได้ ระบบประมาณค่าที่ได้จะใกล้เคียงกับกระบวนการจริง จะทำให้ระบบควบคุมทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตัวกรองคาลมานสามารถประมาณค่าความร้อนของระบบลูปเปิดของเครื่องปฏิกิริยาเคมีชนิดคายความร้อนสูงได้ดีกว่าระบบเอกซ์โพเนนเชียล

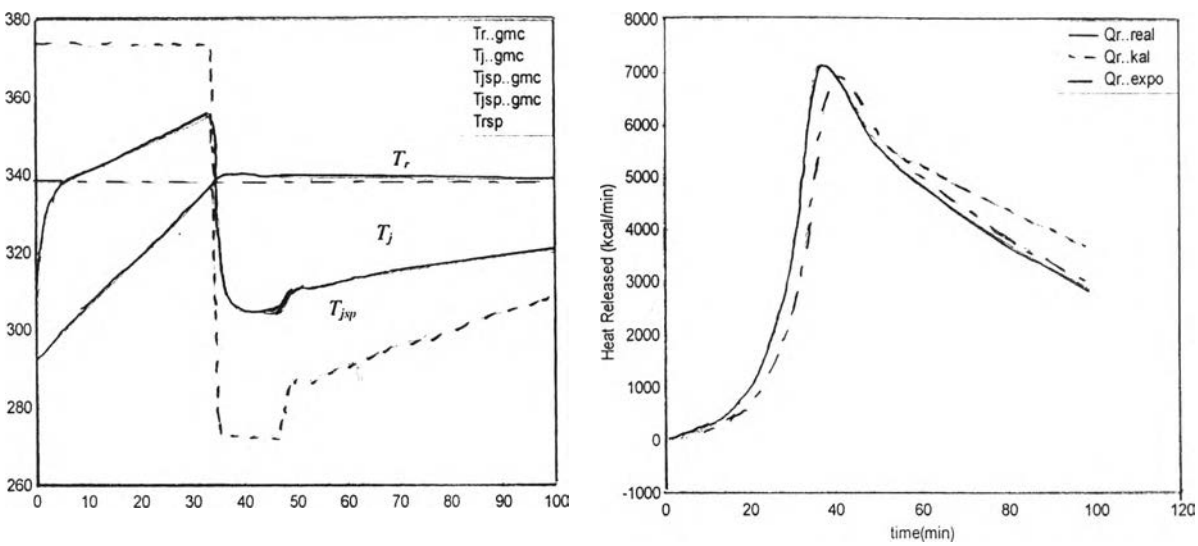
5.3.2 การประมาณค่าในระบบลูปปิด (ระบบควบคุมเจเนริกโมเดล)

การเปรียบเทียบระบบประมาณค่า เมื่อกระบวนการที่กำลังพิจารณามีการควบคุมด้วยตัวควบคุมเจเนริกโมเดล เป็นกรณีการจำลองเพื่อทดสอบความสามารถในการประมาณค่าของตัวประมาณค่าทั้งสองในสภาวะที่มีระบบควบคุม ในงานวิจัยนี้เลือกเจเนริกโมเดลมาทดสอบ โดยวัตถุประสงค์เพื่อรักษาอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ด้วยระบบควบคุมให้อยู่ที่ค่าอุณหภูมิเป้าหมายเท่ากับ 65 เซลเซียส โดยมีพารามิเตอร์การควบคุมของเจเนริกโมเดลเป็น $\xi = 10$ และ

$\tau = 20$ ซึ่งผลของการควบคุมอุณหภูมิและการประมาณค่าของความร้อนแสดงผลดังกราฟที่ 5.8 สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการประมาณค่าความร้อนโดยใช้ตัวกรองคาลมานและเอกซ์โพเนนเชียล แสดงดังรายละเอียดในตาราง 5.6

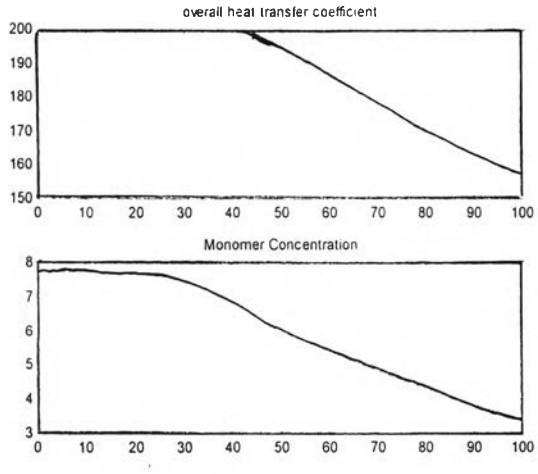
ตารางที่ 5.6 ดัชนีสมรรถนะของการประมาณค่าของตัวประมาณค่าในกรณีการควบคุมลูปปิดด้วยระบบการควบคุมเจเนริกโมเดล

ดัชนีสมรรถนะ การประมาณค่าความร้อน (ISE*10^7)	
ตัวกรองเอกซ์โพเนนเชียล	ตัวกรองคาลมาน
2.1922	1.5722

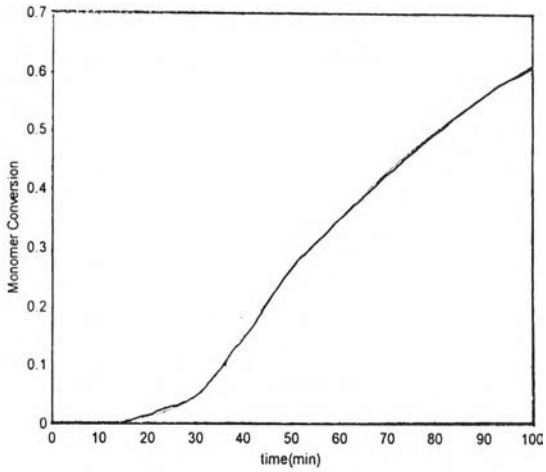


(ก) **(ข)**

รูปที่ 5.8 (ก) ผลตอบสนองอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์กับเวลา เปรียบเทียบตัวประมาณค่าแบบเอกซ์โพเนนเชียล กับตัวกรองคาลมานที่มีการควบคุมเจเนริกโมเดล
รูปที่ 5.8 (ข) การประมาณค่าความร้อนที่เกิดภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีกับเวลา เปรียบเทียบตัวประมาณค่าแบบเอกซ์โพเนนเชียลกับตัวกรองคาลมานที่มีการควบคุมเจเนริกโมเดล



(ค)



(ง)

รูปที่ 5.8 (ค)บน ผลตอบสนองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมกับเวลา เปรียบเทียบตัวประมาณค่าแบบเอกซ์โพเนนเชียล กับตัวกรองคาลมานที่มีระบบควบคุมเจเนริกโมเดล

รูปที่ 5.8 (ค)ล่าง ผลตอบสนองความเข้มข้นของโมโนเมอร์กับเวลา เปรียบเทียบตัวประมาณค่าแบบเอกซ์โพเนนเชียล กับตัวกรองคาลมานที่มีระบบควบคุมเจเนริกโมเดล

รูปที่ 5.8 (ง) ผลตอบสนองคอนเวอร์ชันของโมโนเมอร์กับเวลา เปรียบเทียบตัวประมาณค่าแบบเอกซ์โพเนนเชียล กับตัวกรองคาลมานที่มีระบบควบคุมเจเนริกโมเดล

ตารางที่ 5.7 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการประมาณค่าความร้อนโดยใช้ตัวกรองคาลมานและเอกซ์โพเนนเชียล

P11	=	0.1	P22	=	0.1	P33	=	1	P44	=	0.1
P55	=	0.005	Q11	=	80	Q22	=	10	Q33	=	7000
Q44	=	100	Q55	=	0.001	R11	=	50	R22	=	50
τ_f	=	1.5				τ_j	=	0.4			

โดยที่

τ_f คือค่าคงที่สำหรับตัวกรองเอกซ์โพเนนเชียล

τ_j คือค่าคงที่สำหรับแจ็คเก็ต

จากผลการจำลองการควบคุมเจเนริกโมเดลร่วมกับการประมาณค่าความร้อนโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 5.6

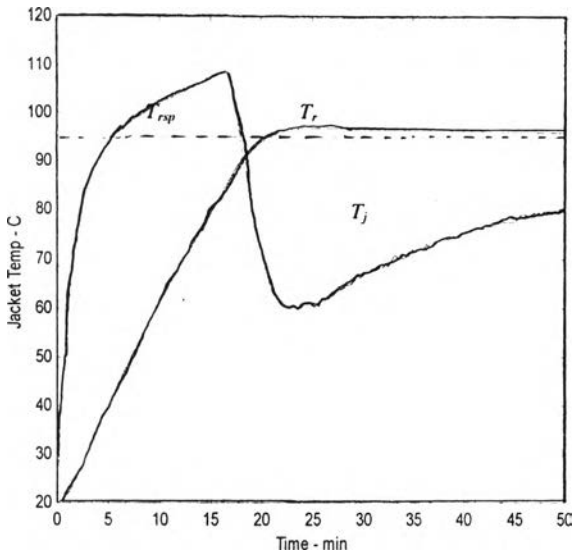
ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าการประมาณค่าของตัวกรองทั้งสองไม่ทับกับเส้นของการประมาณค่าความร้อนจากกระบวนการจริงทั้งนี้สามารถเสนอแนะสาเหตุที่มาได้เป็น 2 กรณี อาจจะเนื่องมาจากการประมาณนั้นมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองการประมาณไม่ถูกต้องจึงทำให้แม้ตัวกรองคาลมานก็ไม่สามารถประมาณได้เส้นเดียวกับกระบวนการ และอีกกรณีคือการจูนที่ไม่ดีพอ การให้ค่าถ่วงน้ำหนักของพารามิเตอร์การจูนไม่ถูกต้อง ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ได้เสนอค่าจูนที่ดีที่สุดที่สามารถจูนได้ของทั้งสองตัวกรองโดยใช้ค่าดัชนีสมรรถนะการประมาณค่าความร้อนเป็นตัวบ่งชี้

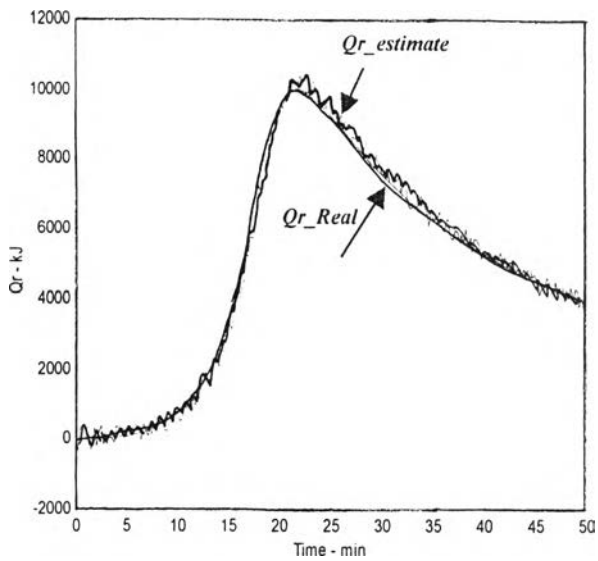
พบว่าการประมาณค่าโดยตัวกรองคาลมาน สามารถประมาณค่าความร้อนได้ใกล้เคียงกับระบบจริงได้ดีกว่าการประมาณค่าของตัวกรองเอกซ์โพเนนเชียล ดังรูปที่ 5.8 ค่าดัชนีสมรรถนะการประมาณค่าความร้อนแสดงไว้ในตารางที่ 5.7 จากกราฟแสดงค่าความร้อนที่คายออกมาจากปฏิกิริยาโดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงการประมาณค่าโดยใช้ตัวกรองคาลมานสามารถประมาณค่าความร้อนได้ใกล้เคียงกับระบบจริงได้ดีกว่าตัวกรองเอกซ์โพเนนเชียล ทั้งนี้เนื่องมาจากตัวกรองคาลมานมีแบบจำลองซึ่งมักจะเป็นแบบจำลองของกระบวนการ และเนื่องมาจากแบบจำลองของตัวกรองคาลมานมีการเปลี่ยนค่าของเกนการประมาณทุกๆ ครั้งของการสุ่มตัวอย่างดังนั้นจึงสามารถทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของพลวัตของเครื่องปฏิกรณ์จึงสามารถทำนายค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาได้ดี ซึ่งส่งผลให้การควบคุมอุณหภูมิจึงดีกว่า

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ตัวกรองคาลมานเป็นระบบประมาณค่าความร้อนเพื่อใช้ในร่วมกับการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกิริยาเคมีพอลิเมอร์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อน และกรณีทดสอบสมรรถนะและความทนทานของตัวควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟและเจเนริกโมเดล

5.4 การทดสอบระบบการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้

เพื่อเป็นการยืนยันว่าการเขียนโปรแกรม ในระบบโมเดลพรีดิกทีฟที่สร้างขึ้นนั้นถูกต้องในงานวิจัยจึงทำการทดสอบระบบโมเดลพรีดิกทีฟที่สร้างขึ้น กับระบบการควบอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบแบตช์ที่มีการคายความร้อนจากบทความงานวิจัยของ Cott และ Macchietto (1989) เป็นการควบคุมด้วยเจเนริกโมเดล แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ จึงจะทำการจำลองกระบวนการโดยแบ่งกรณีศึกษาออกเป็นกรณีโมเดลพรีดิกทีฟแบ่งออกเป็น 2 กรณีที่ใช้เทคนิคขอบเขตของตัวแปรปรับภายนอกออปเจ็คทีฟฟังก์ชันกับเทคนิคการใส่ขอบเขตตัวแปรปรับภายในออปเจ็คทีฟฟังก์ชัน (ในงานวิจัยนี้) โดยผลการจำลองแสดงได้ดังรูปที่ 5.9 (ก)-(ง)

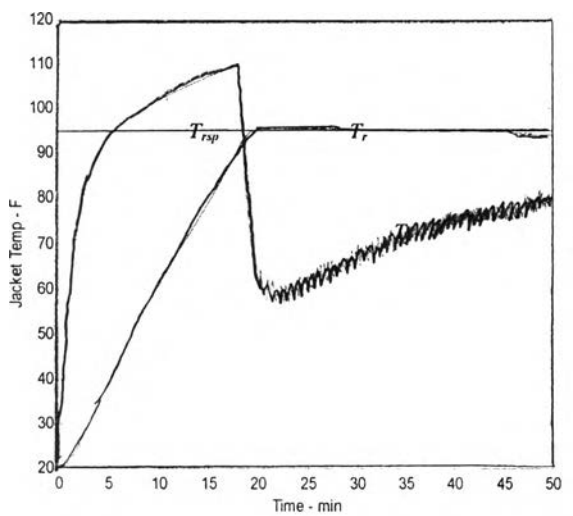


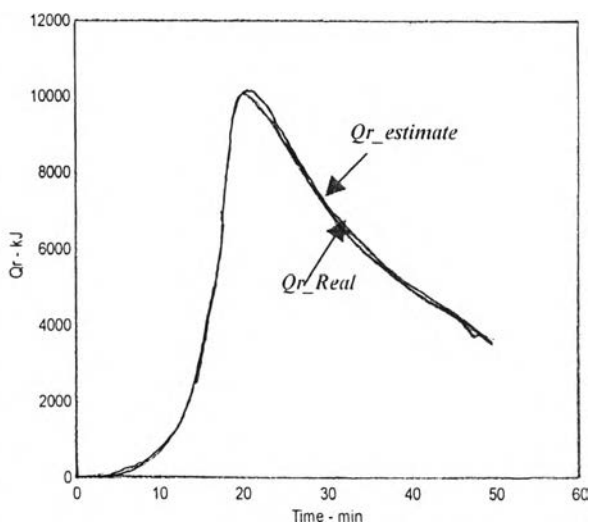


(ก) (ข)

รูปที่ 5.9 (ก) ผลตอบสนองอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์กับเวลา เมื่อควบคุมด้วยโมเดลพรีดิกทีฟ กรณีมีขอบเขตของตัวแปรปรับภายนอกออปเจ็คทีฟฟังก์ชัน

รูปที่ 5.9 (ข) ผลตอบสนองความร้อนที่เกิดภายในเครื่องปฏิกรณ์กับเวลาควบคุมด้วยระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟกรณีมีขอบเขตของตัวแปรปรับภายนอกออปเจ็คทีฟฟังก์ชัน

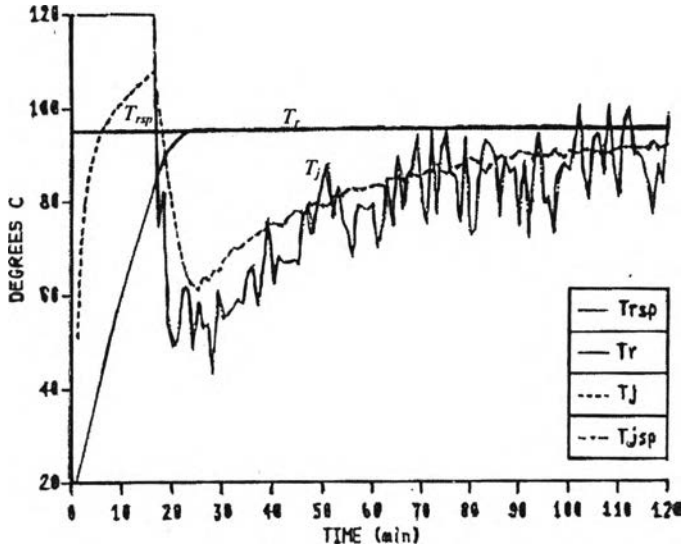




(ก) (ข)

รูปที่ 5.10 (ก) ผลตอบสนองอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์กับเวลาเมื่อควบคุมด้วยโมเดลพรีดิกทีฟ กรณีมีขอบเขตของตัวแปรปรับภายในออปเจ็คทีฟฟังก์ชัน (ในงานวิจัยนี้)

รูปที่ 5.10 (ข) ผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดภายในเครื่องปฏิกรณ์กับเวลาเมื่อควบคุมด้วยโมเดลพรีดิกทีฟกรณีมีขอบเขตของตัวแปรปรับภายในออปเจ็คทีฟฟังก์ชัน (ในงานวิจัยนี้)



รูปที่ 5.11 ผลการควบคุมด้วยเจเนริกโมเดลในงานวิจัยของ Cott และ Macchietto (1989)

จากผลการจำลองการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบแบตช์ที่มีการคายความร้อนจากบทความ Cott และ Macchietto (1989) กับระบบโมเดลพรีดิกทีฟที่สร้างขึ้น เพื่อเป็นการยืนยันว่า การเขียนโปรแกรมในระบบโมเดลพรีดิกทีฟที่สร้างขึ้นนั้นถูกต้อง ผลพบว่าสามารถทำการควบคุมได้ดีเทียบเท่ากับผลการควบคุมในรายงานวิจัย Cott และ Macchietto (1989) ที่เป็นการควบคุมด้วยเจเนริกโมเดล และนอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบกับกรณีเมื่อเป็นระบบโมเดลพรีดิกทีฟที่สร้างขึ้น แต่เป็นเทคนิคแบบมีขอบเขตของตัวแปรปรับภายนอกออปเจ็คทีฟฟังก์ชันกับแบบมีภายในออปเจ็คทีฟฟังก์ชัน (ในงานวิจัยนี้) ก็พบว่าสามารถทำการควบคุมได้ดีเช่นเดียวกัน ดังนั้นผลการจำลองในระบบดังกล่าวข้างต้นนี้ จึงพิสูจน์ทำให้แน่ใจได้ว่าการเขียนโปรแกรมในระบบโมเดลพรีดิกทีฟที่สร้างขึ้นนั้นถูกต้อง จึงนำมาทำการควบคุมระบบในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับระบบควบคุมเจเนริกโมเดลที่มีลักษณะเป็นการควบคุมที่อาศัยแบบจำลอง

5.5 กรณีทดสอบสมรรถนะและความทนทานในการควบคุมอุณหภูมิ

5.5.1 กรณีทดสอบสมรรถนะ

เนื่องจากระบบควบคุมที่จะใช้เป็นระบบควบคุมที่อาศัยแบบจำลองพื้นฐานและมีค่าความร้อนที่เกิดในเครื่องปฏิกิริยาเคมีเป็นตัวแปรที่สำคัญ (จากสมการดุลพลังงานของอุณหภูมิและแจ็คเก็ต) การประมาณค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานี้ถ้าการประมาณมีค่าถูกต้อง จะทำให้ระบบควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองสามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ค่าคงที่ที่ใช้ในการจูนระบบควบคุมและระบบประมาณค่าแสดงในตารางที่ 5.8 และผลการจำลอง

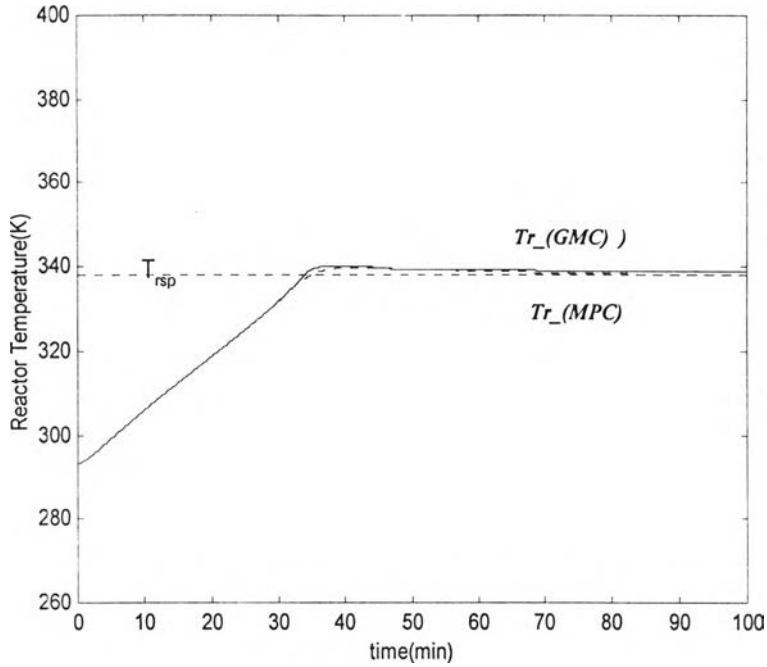
กระบวนการและทำการควบคุมด้วยตัวควบคุมเจเนริกโมเดล และโมเดลพรีดิกทีฟแสดงในรูปที่ 5.12 (ก)-(ง) ซึ่งค่าดัชนีผลการควบคุมเสนอในตารางที่ 5.9 กรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน 100 %

ตารางที่ 5.8 ค่าคงที่ที่ใช้ในการจูนระบบควบคุมและระบบประมาณค่า

GMC	K1 =2	K2 = 1.54×10^{-3}			
Kalman	P11= 0.1	P22 = 0.1	P33 = 1	P44 = 1	P55 = 0.001
Fillter	Q11= 5	Q22 = 1000	Q33= 1×10^{6}	Q44= 5×10^{4}	Q(5,5) = 0.001
	R11= 10	R22 = 10			

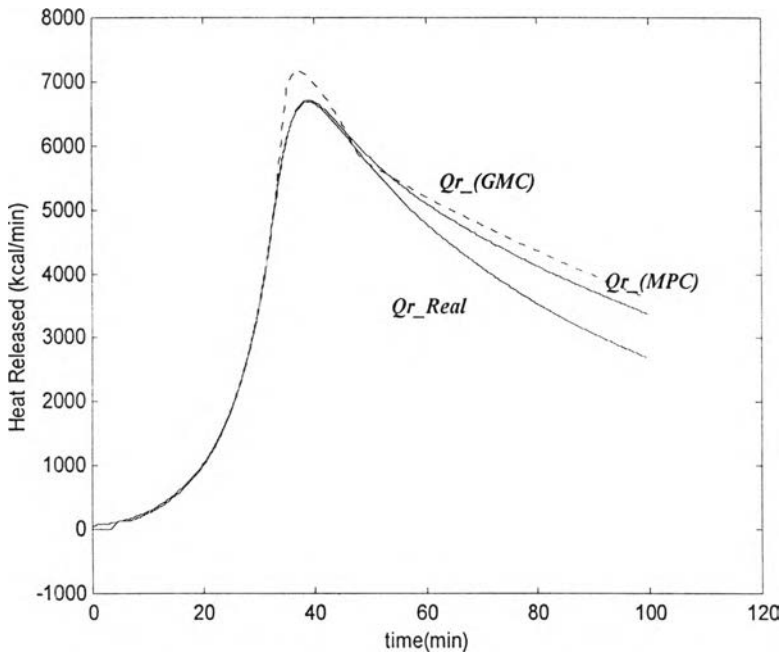
MPC	Qc11= 1E6	Rc11 = 1	M = 3	P = 5	
Kalman	P11= 0.1	P22 = 0.1	P33 = 1	P44 = 1	P55 = 0.001
Fillter	Q11= 5	Q22 = 1000	Q33= 1×10^{6}	Q44= 5×10^{4}	Q(5,5) = 0.001
	R11= 10	R22 = 10			

จากผลการจำลองกระบวนการพบว่า ในกรณีปกติการควบคุมด้วยตัวควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ จะมีการคำนวนชุดของตัวแปรปรับที่เหมาะสมโดยอาศัยการออปติไมซ์ออปเจ็คทีฟ ซึ่งเป็นผลรวมของผลต่างของค่าเอาท์พุทล่วงหน้าและค่าควบคุมที่เซ็ตพอยท์ กับค่าตัวแปรปรับล่วงหน้าและค่าควบคุมที่เซ็ตพอยท์ จึงทำให้สามารถทำการควบคุมค่าของอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่เกิดปฏิกิริยาการคายความร้อนได้ดีกว่าการควบคุมด้วยเจเนริกโมเดล ซึ่งเป็นการควบคุมที่อาศัยผลต่างของค่าเอาท์พุทที่วัดได้กับค่าควบคุมที่เซ็ตพอยท์ที่เวลานั้น ซึ่งเมื่อระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงการคำนวณค่าของตัวแปรปรับจะผิดพลาดมาก ทำให้ไม่สามารถทำการควบคุมกระบวนการได้ทันกับการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการนี้ ซึ่งสาเหตุของความไม่เป็นเชิงเส้นสูงของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์ ในงานวิจัยนี้มีการเปลี่ยนแปลงพลวัต ไม่มีสภาวะคงตัว นอกจากนี้ระบบยังมีอิทธิพลของการเกิดเจล เนื่องมาจากปริมาตรของพอลิเมอร์ผลิตภัณฑ์เกิดมากๆ ทำให้ทับถมและไปกีดขวาง ทำให้การแพร่มีลดลง ค่าสัมประสิทธ์การถ่ายเทความร้อนจะมีการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน จะสังเกตได้จากค่าของความร้อนที่คายออกมาจากปฏิกิริยาจะมีค่าลดลงช้าไปเรื่อยๆ ไม่สามารถลดลงต่ำเท่ากับกระบวนการทั้งนี้เป็นเพราะค่าของคอนเวอร์ชันของโมโนเมอร์กรณีเจเนริกโมเดลมีค่ามากกว่า ส่งผลให้ค่าของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกรณีเจเนริกโมเดลมีค่าลดลงมาก



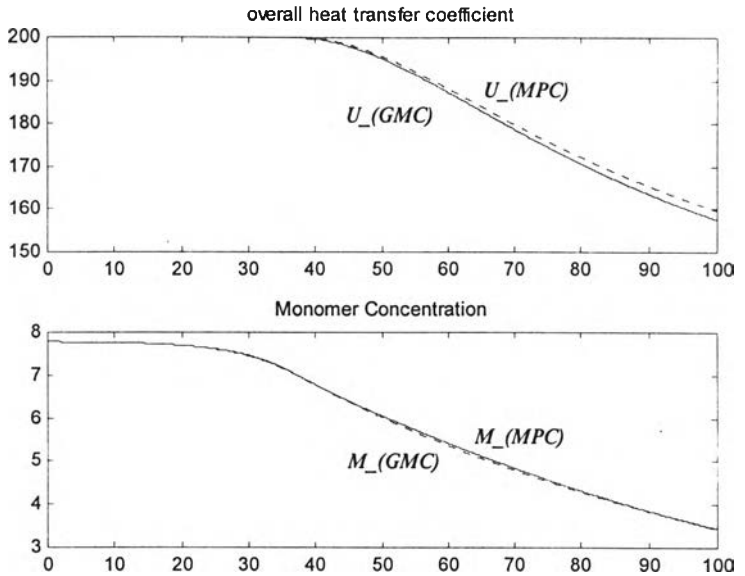
(ก)

รูปที่ 5.12(ก)ผลตอบสนองอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์ กับเวลาเมื่อทำการควบคุมด้วยโมเดลพรีดิกทีฟและการควบคุมแบบเจเนริกโมเดล ในสภาวะปกติ



(ข)

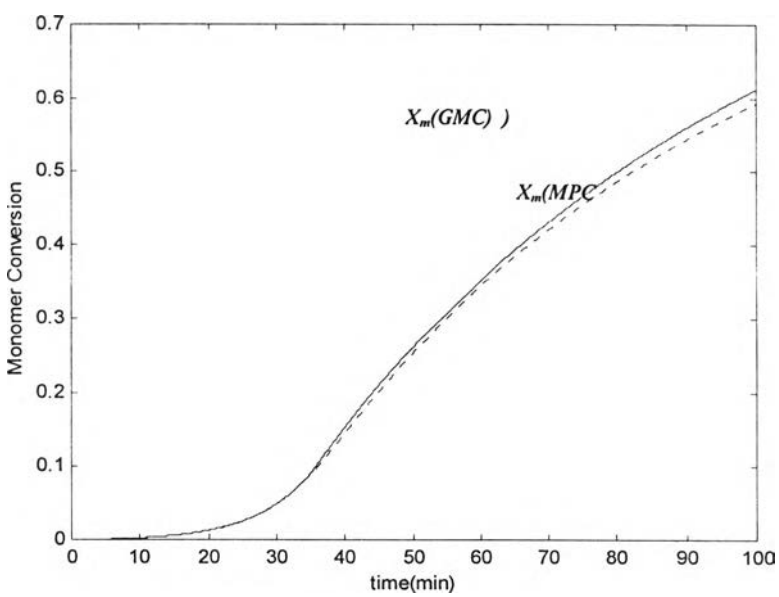
รูปที่ 5.12(ข)การประมาณค่าความร้อนที่เกิดภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์กับเวลา เมื่อทำการควบคุมด้วยโมเดลพรีดิกทีฟและการควบคุมแบบเจเนริกโมเดล ในสภาวะปกติ



(ค)

รูปที่ 5.12(ค) บน ผลตอบสนองค่าสัมประสิทธ์การถ่ายเทความร้อนรวมกับเวลา เมื่อทำการควบคุมด้วยโมเดลพรีดิกทีฟและการควบคุมแบบเจเนริกโมเดล ในสภาวะปกติ

รูปที่ 5.12(ค) ล่าง ผลตอบสนองความเข้มข้นของโมโนเมอร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์กับเวลา เมื่อทำการควบคุมด้วยโมเดลพรีดิกทีฟและการควบคุมแบบเจเนริกโมเดล ในสภาวะปกติ



(ง)

รูปที่ 5.12(ง)ผลตอบสนองคอนเวอร์ชันของโมโนเมอร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์กับเวลา เมื่อทำการควบคุมด้วยโมเดลพรีดิกทีฟและการควบคุมแบบเจเนริกโมเดล ในสภาวะปกติ

ค่าการประมาณค่าความร้อนจึงต้องสูงกว่า ในขณะที่คาลมานใกล้เคียงกับค่าความร้อนจริงของกระบวนการ (จากการคำนวณจากสมการดุลพลังงานทำการประมาณให้ค่าความร้อนสูงกว่าโมเดลพรีดิกทีฟ ส่งผลให้กราฟยังอยู่สูงกว่าจนสิ้นเวลาการจำลอง จากกราฟการประมาณค่าความร้อนและจากค่าของดัชนีสมรรถนะ การประมาณค่าความร้อน พบว่าในตัวกรองคาลมานสำหรับตัวควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ การประมาณค่าความร้อนมีค่าปฏิกรณ์) มากกว่าค่าประมาณค่าความร้อนในตัวกรองคาลมานสำหรับตัวควบคุมด้วยเจเนริกโมเดล เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากการประมาณค่าความร้อนของตัวกรองคาลมานนั้น จะอาศัยค่าของการวัดเอาท์พุทและค่าของตัวแปรปรับกระบวนการเป็นอินพุท ซึ่งถ้าค่าของการวัดเอาท์พุท และค่าของตัวแปรปรับกระบวนการที่คำนวณได้มีค่าผิดพลาด ไม่ถูกต้องจะส่งผลให้การประมาณค่าของความร้อนของตัวกรองคาลมานผิดพลาดด้วย การคำนวณค่าตัวแปรปรับของเจเนริกโมเดลจึงมีดัชนีสมรรถนะของการประมาณความร้อนที่มากกว่ากรณีโมเดลพรีดิกทีฟ เมื่อมีการประมาณค่าด้วยตัวกรองคาลมานเหมือนกัน

5.5.2 กรณีทดสอบความทนทาน

กรณีการทดสอบความทนทานของตัวควบคุมนั้นเป็นการศึกษาเพื่อดูถึงความทนทานของการจำลองและการควบคุมเมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์การจูนของตัวควบคุม เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองกระบวนการ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเสนอกรณีที่แย่ที่สุด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองกระบวนการกระบวนการ ทั้งนี้สามารถทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการควบคุมของตัวควบคุมทั้งหมด 4 กรณีเสนอตามลำดับต่อไปนี้

5.5.2.1 กรณีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผิดพลาด

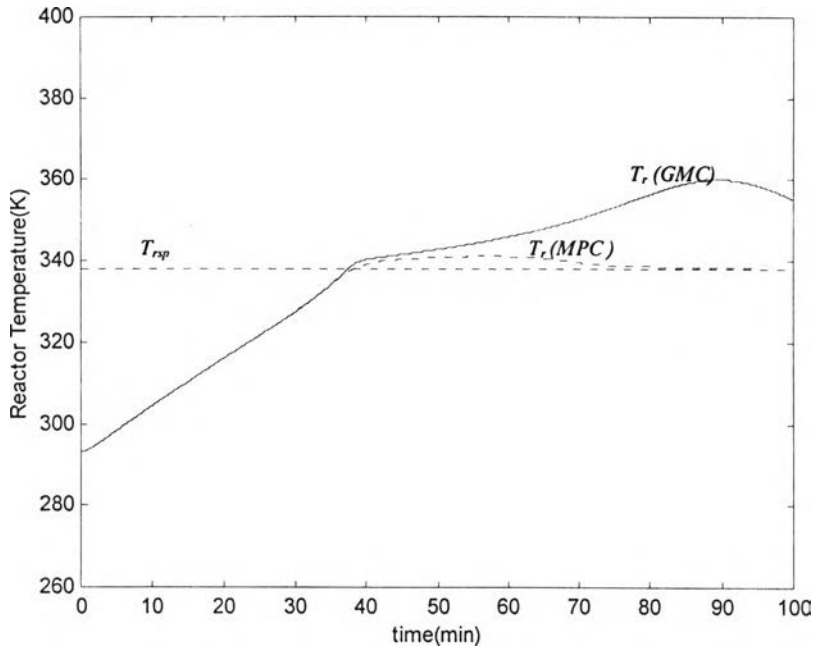
การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์สามารถเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ เช่น ผนังของเครื่องปฏิกรณ์ไม่สะอาด เป็นต้น เนื่องมาจากการทำการสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ จะทำการสังเคราะห์พอลิเมอร์ติดต่อกัน โดยไม่มีการทำความสะอาดเครื่องปฏิกรณ์เลย นานๆครั้งจึงทำความสะอาด ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ที่เวลาเริ่มทำการสังเคราะห์ จะมีค่าลดลงไม่เท่ากับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ใหม่ๆ ซึ่งเมื่อเริ่มทำการสังเคราะห์ เกิดปฏิกิริยาจะทำให้สารผสมภายในเครื่องปฏิกรณ์เองก็มีค่าความหนืด (Viscosity) เพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลงตามเวลา ทำให้อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรของ

เครื่องปฏิกรณ์มีค่าลดลง ทำให้ประสิทธิ์ภาพการถ่ายเทความร้อน จากเครื่องปฏิกรณ์ไปยังแจ็คเก็ตลดน้อยลงมากกว่าในกรณีปกติ มีผลทำให้อุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์มีการเปลี่ยนแปลงที่รุนแรงมากยิ่งขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการทดสอบระบบควบคุมโดยทำการลดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในกระบวนการจริง (ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในระบบควบคุมมีค่าเท่าเดิม) ซึ่งผลการจำลองแสดงได้ดังตารางที่ 5.9 และกราฟรูปที่ 5.13 (ก)-(ง) จากการทดสอบพบว่าระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟและระบบควบคุมเจเนริกโมเดลสามารถควบคุมกระบวนการได้ในขณะที่มีการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงถึง 20%

ตารางที่ 5.9 ค่าดัชนีสมรรถนะของการควบคุมในกรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผิดพลาด

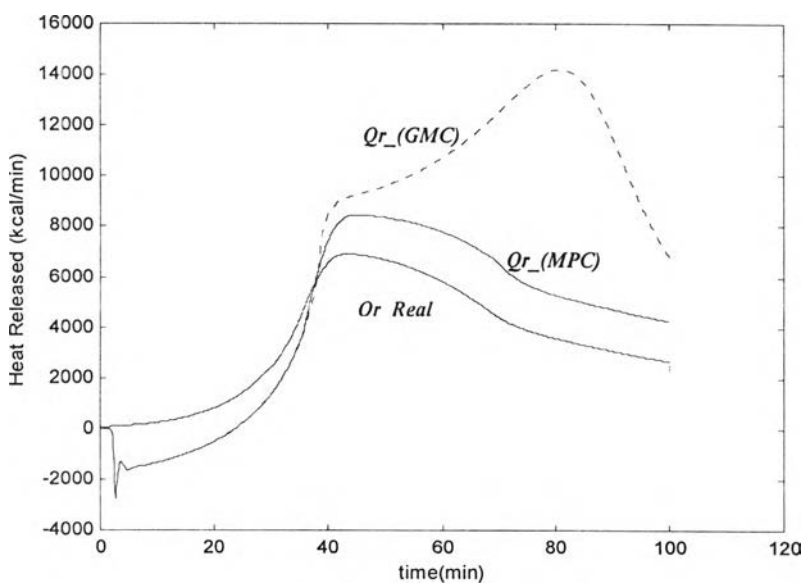
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (%)	ดัชนีสมรรถนะ (ISE*10^4) การควบคุมอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์		ดัชนีสมรรถนะ (ISE*10^9) การประมาณค่าความร้อน	
	GMC	MPC	GMC	MPC
100	2.4232	2.4197	0.0157	0.0123
90	2.5602	2.5496	0.01226	0.0095
80	3.9181	2.7210	0.0095	0.00667
70	8.9378	5.4565	2.8232	1.8417
60	10.966	9.5699	4.5449	3.8447

จากผลการทดลองการจำลองกระบวนการเมื่อมีการลดของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เวลาเริ่มต้นของเครื่องปฏิกรณ์พบว่า กรณีการควบคุมด้วยตัวควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟพิจารณาเมื่อมีการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน จะพบว่าการควบคุมของโมเดลพรีดิกทีฟสามารถทำการควบคุมได้จนถึงการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน 20 % ซึ่งทุกกรณีพบว่าโมเดลพรีดิกทีฟ จะให้ดัชนีสมรรถนะของการควบคุมที่ดีกว่าการควบคุมด้วยเจเนริกโมเดล ทั้งนี้เนื่องมาจาก การประมาณค่าความร้อนในตัวกรองคาลมานมีการปรับตัวให้การประมาณค่าความร้อนมีค่ามากกว่าความเป็นจริงดังรูปที่ 5.13 ทำให้ระบบควบคุมคำนวณค่าตัวแปรปรับโดยปรับให้ลดอุณหภูมิในแจ็คเก็ตลดลงมากกว่าปกติ โดยเฉพาะโมเดลพรีดิกทีฟมีอัลกอริธึมที่สามารถทำนายพฤติกรรมของกระบวนการพลวัตล่วงหน้าได้ ดังนั้นตัวแปรปรับกระบวนการที่คำนวณได้เหมาะสม ทำให้ระบบควบคุมยังสามารถควบคุมอุณหภูมิของสารในเครื่องปฏิกรณ์ได้ ซึ่งเมื่อเริ่มทำการสังเคราะห์ เกิดปฏิกิริยาสารผสมภายในเครื่องปฏิกรณ์เองก็มีค่า



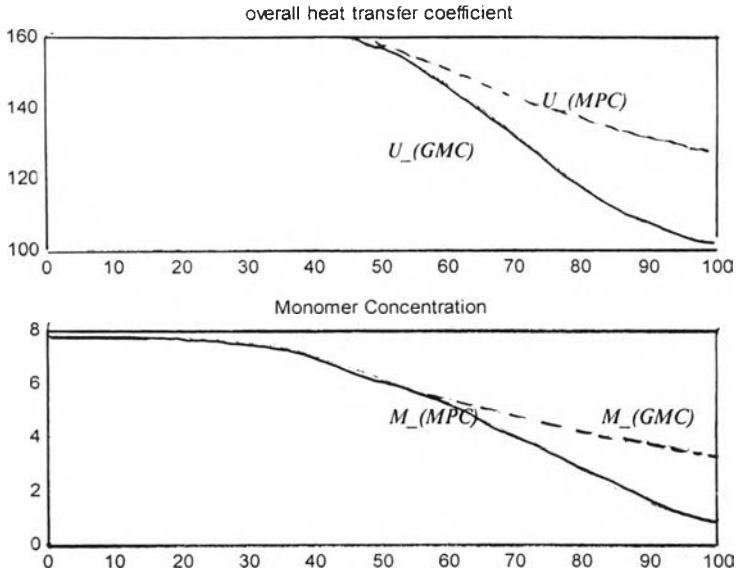
(ก)

รูปที่ 5.13(ก)ผลตอบสนองอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์กับเวลาเมื่อเปรียบเทียบการควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟและเจเนริกโมเดล กรณีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผิดพลาดลดลง 20 %



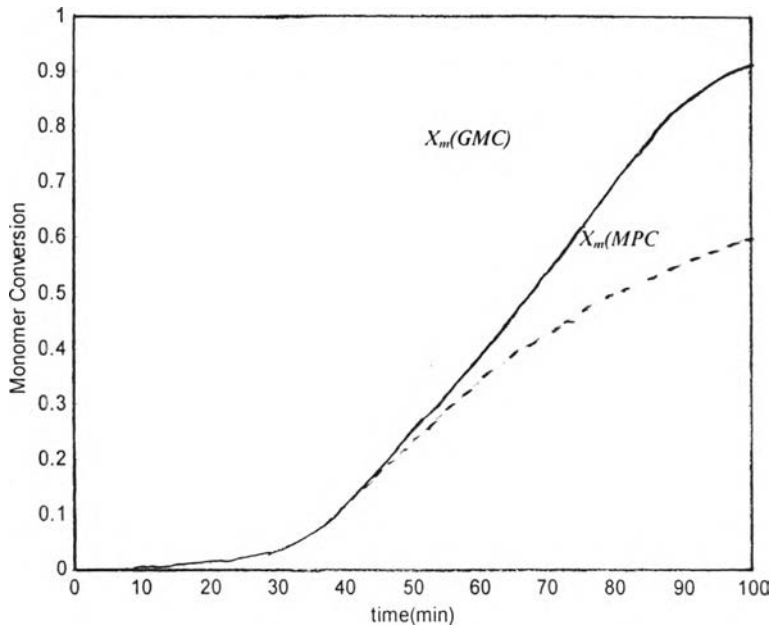
(ข)

รูปที่ 5.13(ข)ผลตอบสนองความร้อนที่เกิดภายในเครื่องปฏิกรณ์กับเวลาเมื่อเปรียบเทียบการควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟและเจเนริกโมเดล กรณีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผิดพลาดลดลง 20 %



(ค)

รูปที่ 5.13 (ค) บน ผลค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับเวลาเมื่อเปรียบเทียบการควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟและเจเนริกโมเดล กรณีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผิดพลาดลดลง 20 %
รูปที่ 5.13 (ค) ล่าง ผลตอบสนองความเข้มข้นของโมโนเมอร์เมื่อเปรียบเทียบการควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟและเจเนริกโมเดล กรณีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผิดพลาดลดลง 20 %



(ง)

รูปที่ 5.13 (ง) ผลตอบสนองคอนเวอร์ชันของโมโนเมอร์กับเวลาเมื่อเปรียบเทียบการควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟและเจเนริกโมเดล กรณีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผิดพลาดลดลง 20 %

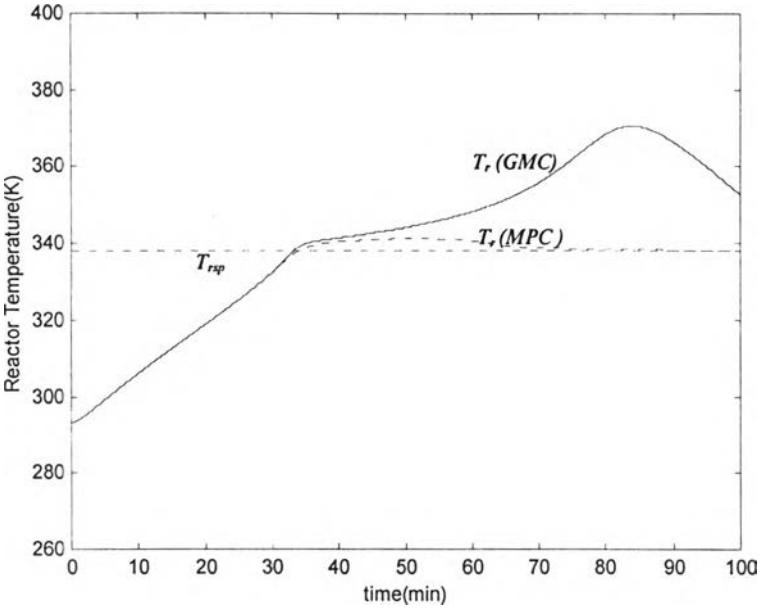
อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าลดลง ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน จากเครื่องปฏิกรณ์ไปยังแจ็คเก็ตลดน้อยลงมากกว่าในกรณีปกติ แต่เนื่องมาจากที่ค่าคอนเวอร์ชันของโมโนเมอร์มีค่าน้อยกว่ากรณีของเจเนริกโมเดล ทำให้ ค่าความร้อนที่คายออกมาจากปฏิกิริยามีไม่สูงเท่ากับกรณีของเจเนริกโมเดล ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลงตามเวลา ก็มีค่าลดลงแต่น้อยกว่าเช่นกัน มีผลทำให้อุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์มีการเปลี่ยนแปลงที่รุนแรงน้อยลงแต่สำหรับเจเนริกโมเดลไม่สามารถทำการควบคุมได้เมื่อการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน 20 % พบทั้งนี้สังเกตได้จากการเจเนริกโมเดลที่มีคาลมานประมาณค่าความหนืด (Viscosity) เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลงตามเวลา ทำให้ร้อนไว้เกินจริงมากกว่า แต่เนื่องจากระบบมีการเปลี่ยนแปลงทางพลวัตมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง และข้อจำกัดของอุปกรณ์จึงทำให้เจเนริกโมเดลลดอุณหภูมิน้ำในแจ็คเก็ตลงได้ไม่เกินค่าจำกัดค่าหนึ่ง ซึ่งพบว่าไม่สามารถทำการควบคุมได้ทัน (ช้ากว่ากรณีโมเดลพรีดิกทีฟ) จึงทำให้ค่าของอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์พุ่งเกินเกินค่าที่ตั้งไว้ยิ่งส่งผลให้ค่าความร้อนที่คายออกมาจากปฏิกิริยามีค่าสูง การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลง ทำให้ให้อุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์มีการเปลี่ยนแปลงที่รุนแรง

5.5.2.2 กรณีค่าความเข้มข้นของโมโนเมอร์ตั้งต้นผิดพลาด

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโมโนเมอร์ตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์ อาจเกิดจากการป้อนสารเข้าสู่ถังปฏิกรณ์อาจมีค่าไม่เท่ากับปริมาณที่กำหนด หรือต้องการผลิตในปริมาณที่มากขึ้นหรือน้อยลง เป็นต้น ซึ่งทำให้ค่าความเข้มข้นของโมโนเมอร์ตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์จริงกับในแบบจำลองของตัวประมาณและระบบควบคุมผิดพลาดไป ในการทดลองจึงทำการทดสอบโดยการป้อนสารเข้าสู่กระบวนการทั้งมากกว่า และน้อยกว่าค่าที่ตั้งไว้ ผลการทดลองเป็นไปดังตารางที่ 5.10 และรูปที่ 5.14

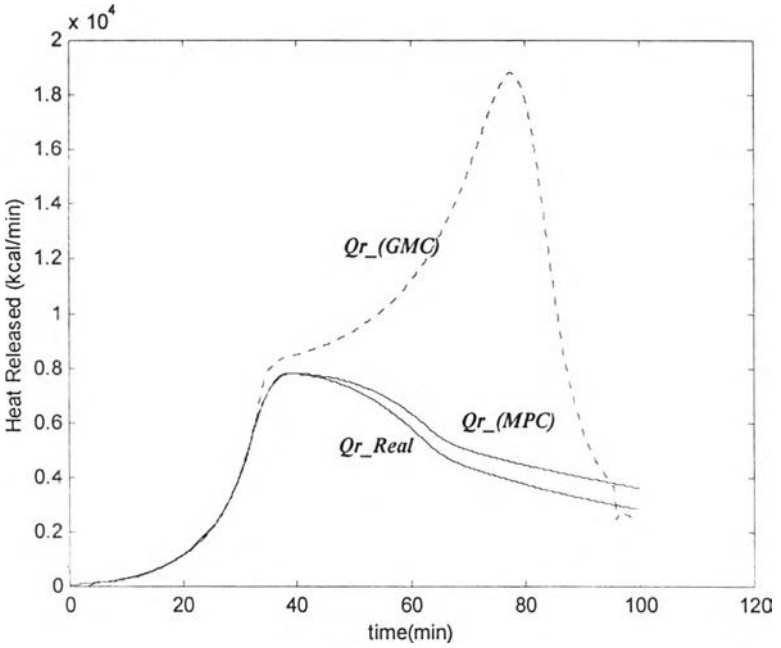
กรณีเมื่อความเข้มข้นของโมโนเมอร์ในเครื่องปฏิกรณ์ของระบบลดลง จากผลการจำลองพบว่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นไม่มีผลต่อการประมาณค่าความร้อน เนื่องจากแบบจำลองของตัวกรองคาลมานไม่มีความเข้มข้นของโมโนเมอร์เป็นตัวแปรสเตท จากผลการทดสอบระบบควบคุมทั้งระบบควบคุมเจเนริกโมเดลและระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟยังสามารถควบคุมให้อุหณภูมิ

อยู่ในขอบเขตของกระบวนการ เนื่องจากการลดลงของสารตั้งต้นและความร้อนที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยกว่าปกติ ทำให้ระบบควบคุมยังสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ได้



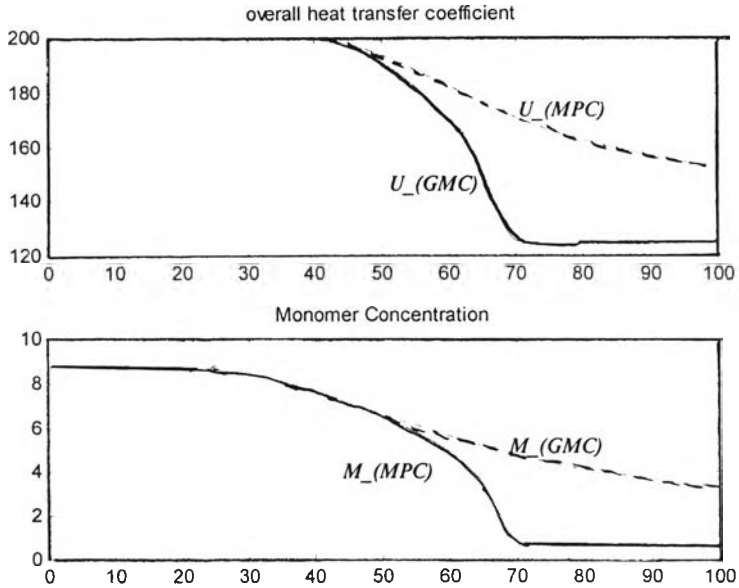
(ก)

รูปที่ 5.14(ก)ผลตอบสนองอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีกับเวลาเมื่อเปรียบเทียบการควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟและเจเนริกโมเดล เมื่อค่าความเข้มข้นของโมโนเมอร์เพิ่มขึ้น 10 %



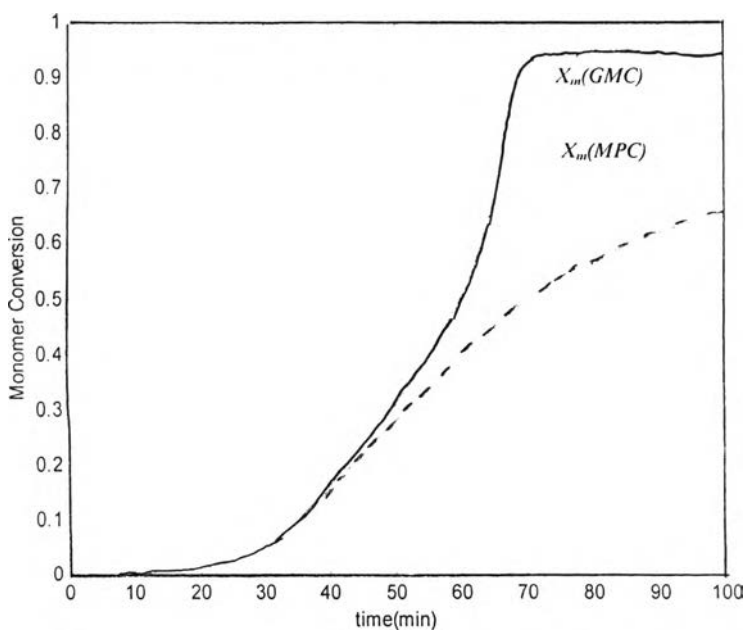
(ข)

รูปที่ 5.14(ข)ผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดภายในเครื่องปฏิกรณ์กับเวลาเมื่อเปรียบเทียบการควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟและเจเนริกโมเดล เมื่อค่าความเข้มข้นของโมโนเมอร์เพิ่มขึ้น 10 %



(ค)

รูปที่ 5.14 (ค) บน ผลตอบสนองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมกับเวลาเมื่อเปรียบเทียบการควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟและเจเนริกโมเดล เมื่อค่าความเข้มข้นของโมโนเมอร์เพิ่มขึ้น 10 %
รูปที่ 5.14 (ค) ล่าง ผลตอบสนองความเข้มข้นของโมโนเมอร์กับเวลาเมื่อเปรียบเทียบการควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟและเจเนริกโมเดล เมื่อค่าความเข้มข้นของโมโนเมอร์เพิ่มขึ้น 10 %



(ง)

รูปที่ 5.14 (ง) ผลตอบสนองคอนเวอร์ชันของโมโนเมอร์เมื่อเปรียบเทียบการควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟและเจเนริกโมเดล เมื่อค่าความเข้มข้นของโมโนเมอร์เพิ่มขึ้น 10 %

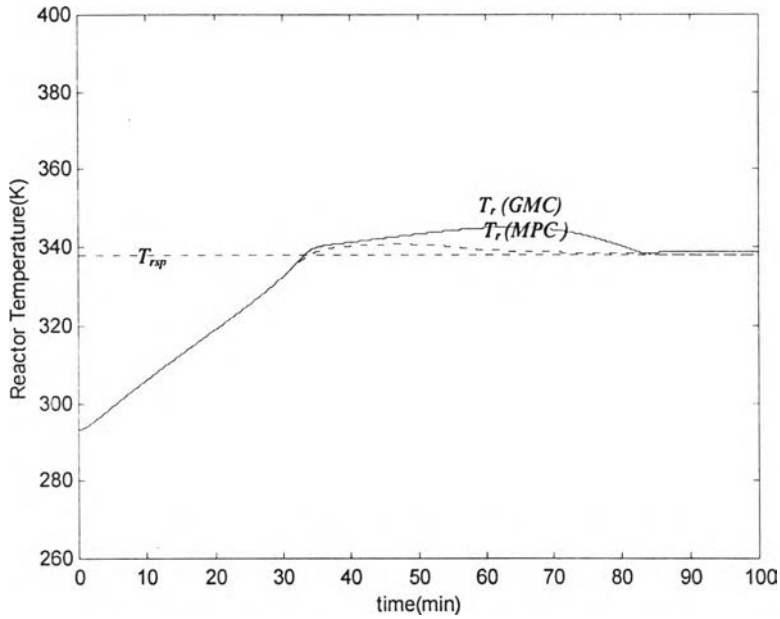
ตารางที่ 5.10 ค่าดัชนีสมรรถนะของการควบคุมในกรณีที่ค่าความเข้มข้นของโมโนเมอร์ตั้งต้นผิดพลาด

ค่าความเข้มข้นของโมโนเมอร์ตั้งต้น (%)	ดัชนีสมรรถนะ (ISE*10^4) การควบคุมอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์		ดัชนีสมรรถนะ (ISE *10^9) การประมาณค่าความร้อน	
	GMC	MPC	GMC	MPC
120	*	9.5732*	*	*
110	4.7014*	2.4210	0.8772	0.03839
90	2.4350	2.4316	0.0119	0.00913
80	2.4490	2.4456	0.0089	0.00913

ในกรณีการป้อนสารตั้งต้นมากกว่าปกติทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีคายความร้อนมากกว่ากรณีเมื่อความเข้มข้นของโมโนเมอร์ในเครื่องปฏิกรณ์ของระบบมากกว่าในแบบจำลองทำให้ตัวกรองคาลมานประมาณค่าความร้อนได้น้อยกว่าค่าจริง ดังนั้นระบบควบคุมจะทำการเพิ่มอุณหภูมิในแจ็คเก็ตมากกว่าปกติ ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นมากขึ้น จากการทดสอบพบว่าระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟสามารถควบคุมอุณหภูมิได้เมื่อค่าความเข้มข้นของโมโนเมอร์ในเครื่องปฏิกรณ์มีค่าสูงกว่าค่าที่ตั้งไว้ในแบบจำลอง 10% แต่สำหรับระบบควบคุมเจเนริกโมเดล จะพบว่าตัวกรองคาลมานประมาณค่าความร้อนไว้สูงมาก แต่เนื่องจากตัวแปรปรับมีขอบเขตการดำเนินการอยู่ จึงทำให้ไม่สามารถทำให้อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ลดลงได้ ดังนั้นระบบควบคุมจะทำการเพิ่มอุณหภูมิในแจ็คเก็ตมากกว่าปกติ ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นมากขึ้น ทำให้การควบคุมของเจเนริกโมเดลทำไม่ได้

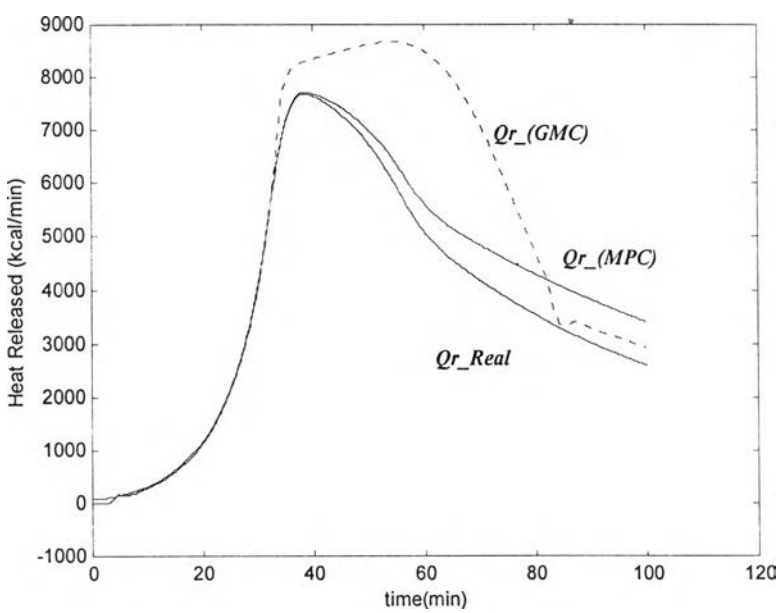
5.5.2.3 กรณีค่าอัตราการสิ้นสุดปฏิกิริยาผิดพลาด

ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของแต่ละปฏิกริยาสามารถเกิดความผิดพลาดเนื่องจากการหาค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาในห้องปฏิบัติการ ความผิดพลาดของค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่มีผลกระทบต่อระบบควบคุมอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อน คือ การลดลงของอัตราการสิ้นสุดปฏิกิริยาที่จะทำให้เกิดความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์มากกว่ากรณีปกติ จึงได้ทำการทดสอบระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟที่อัตราการสิ้นสุดปฏิกิริยาลดลง ได้ผลดังตารางที่ 5.11 และกราฟรูปที่ 5.15(ก)–(ง)



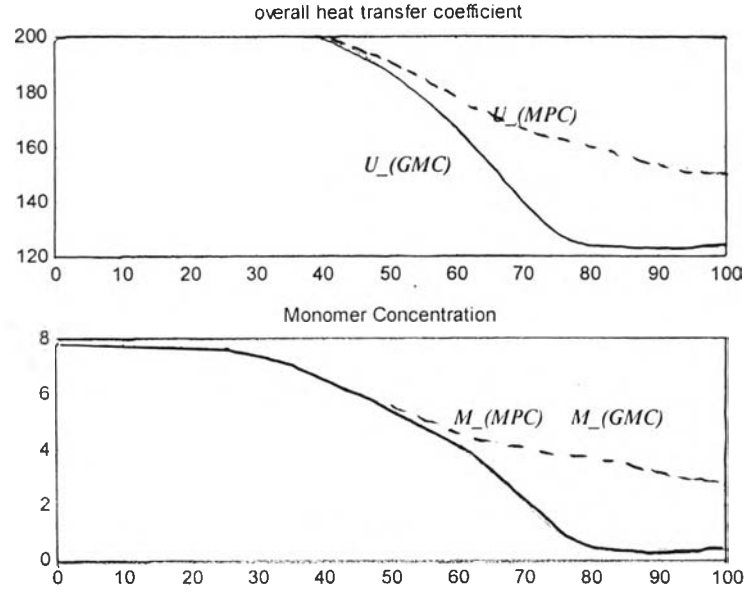
(ก)

รูปที่ 5.15(ก)ผลตอบสนองอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์กับเวลาเมื่อเปรียบเทียบการควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟและเจเนริกโมเดล เมื่ออัตราการสิ้นสุดปฏิกิริยาผิดพลาด ลดลง20 %



(ข)

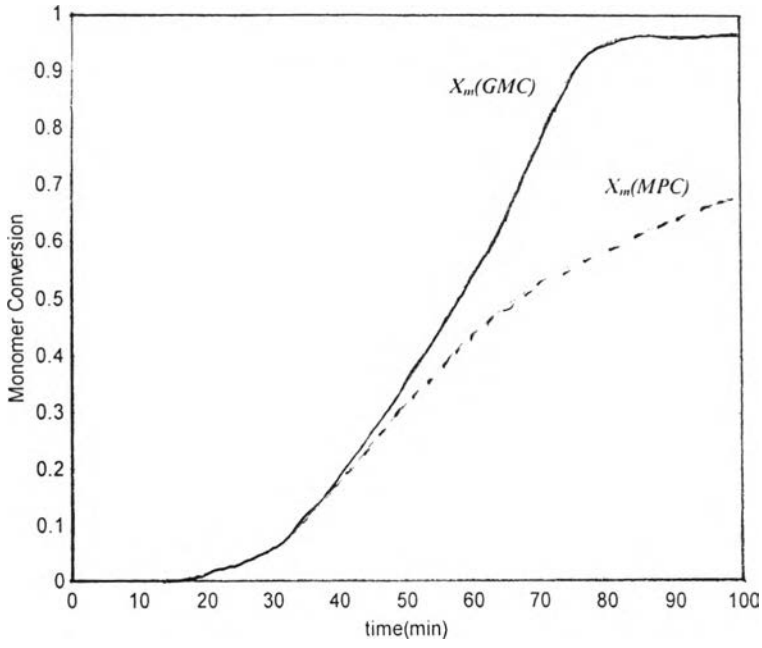
รูปที่ 5.15(ข)ผลตอบสนองความร้อนที่เกิดภายในเครื่องกับเวลาเมื่อเปรียบเทียบการควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟและเจเนริกโมเดล เมื่ออัตราการสิ้นสุดปฏิกิริยาผิดพลาด ลดลง20 %



(ค)

รูปที่ 5.15 (ค) บน ผลตอบสนองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมกับเวลาเมื่อเปรียบเทียบการควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟและเจเนริกโมเดล เมื่ออัตราการสิ้นสุดปฏิกิริยาผิดพลาด ลดลง20 %

รูปที่ 5.15 (ค) ล่าง ผลตอบสนองความเข้มข้นของโมโนเมอร์กับเวลาเมื่อเปรียบเทียบการควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟและเจเนริกโมเดล เมื่ออัตราการสิ้นสุดปฏิกิริยาผิดพลาด ลดลง20 %



(ง)

รูปที่ 5.15 (ง) ผลตอบสนองคอนเวอร์ชันของโมโนเมอร์กับเวลาเมื่อเปรียบเทียบการควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟและเจเนริกโมเดล เมื่ออัตราการสิ้นสุดปฏิกิริยาผิดพลาด ลดลง20 %

ตารางที่ 5.11 ดัชนีสมรรถนะของการควบคุมในกรณีที่ค่าอัตราการสิ้นสุดปฏิกิริยาผิดพลาด

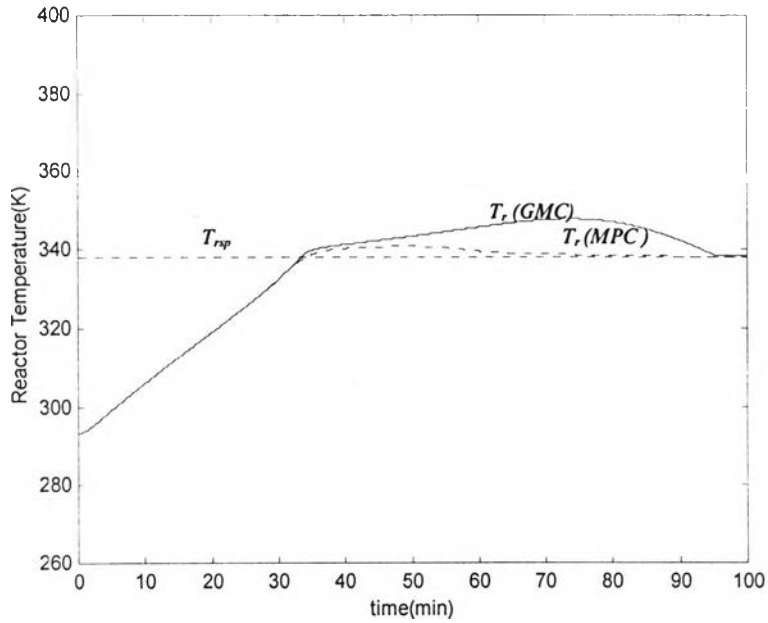
ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยา (%)	ดัชนีสมรรถนะ ($ISE*10^4$) การควบคุมอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์		ดัชนีสมรรถนะ ($ISE*10^9$) การประมาณค่าความร้อน	
	GMC	MPC	GMC	MPC
120	2.4324	2.4291	0.01055	0.0082
110	2.4277	2.4246	0.01277	0.0010
90	2.4222	2.4144	0.02026	0.0166
80	2.5247	2.4129	0.06061	0.0226

จากผลการทดสอบพบว่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นไม่มีผลต่อการประมาณค่าความร้อน เนื่องจากแบบจำลองของตัวกรองคาลมานไม่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นตัวแปรสเตท จากผลการทดสอบพบข้อได้เปรียบของระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟที่มีการปรับเมตริกซ์น้ำหนัก P ทุกครั้งของการควบคุมทำให้ระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟมีความยืดหยุ่นในการปรับแบบจำลองให้เหมาะสมในขณะที่ระบบควบคุมเจเนริกโมเดลที่มีแบบจำลองการควบคุมที่ใช้ถ่วงน้ำหนักเป็นค่าคงที่ทำให้ระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟสามารถควบคุมกระบวนการที่อัตราการสิ้นสุดปฏิกิริยาลดลงถึง 20% ในขณะที่เจเนริกโมเดลไม่สามารถทำการควบคุมได้ สังเกตได้จากรูปที่ 5.15 ก-ข

และสำหรับระบบควบคุมเจเนริกโมเดลจะเหมือนกับในกรณีที่แล้วๆมาคือ จะพบว่าตัวกรองคาลมานประมาณค่าความร้อนไว้สูงมาก แต่เนื่องจากตัวแปรปรับมีขอบเขตการดำเนินการอยู่ จึงทำให้ไม่สามารถทำให้อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ลดลงได้ ดังนั้นระบบควบคุมจะทำการเพิ่มอุณหภูมิในแจ็คเก็ตมากกว่าปกติซึ่งทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นมากขึ้นทำให้การควบคุมของเจเนริกโมเดลทำไม่ได้

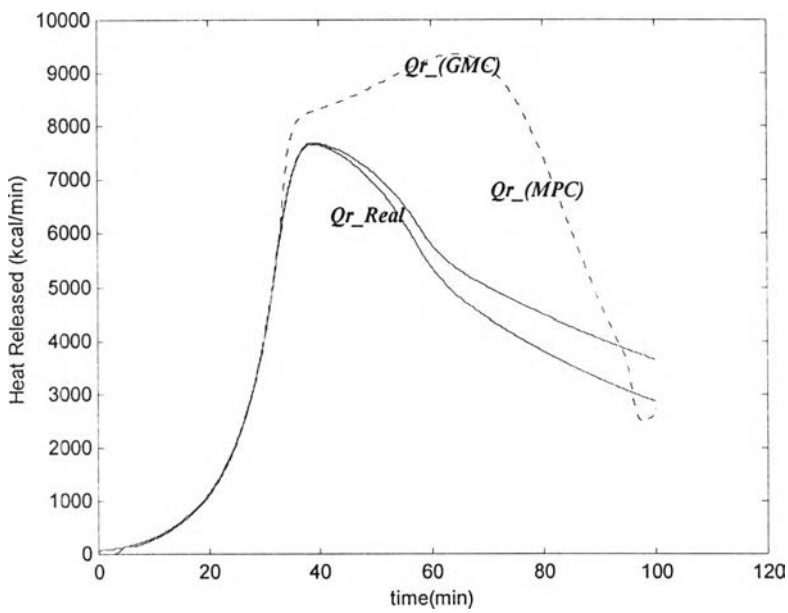
5.5.2.4 กรณีค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาผิดพลาด

ค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาเป็นค่าตัวแปรที่สามารถผิดพลาดจากค่าจริงในกระบวนการ ค่าความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปอาจหมายถึงค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาที่ใช้เบี่ยงเบนไปจากของจริง ในงานวิจัยนี้ค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยา เป็นค่าตัวแปรสเตทที่มีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิของปฏิกิริยาการคายความร้อนสูง เป็นฟังก์ชันของอัตราการเกิดปฏิกิริยา ค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยา และปริมาณสารตั้งต้น ในงานวิจัยนี้จึงทำการทดสอบความทนทานต่อความผิดพลาดของค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยใช้ค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยามีค่าสูงกว่าที่แบบจำลองใช้ได้ผลดังตารางที่ 5.12 และรูปที่ 5.16



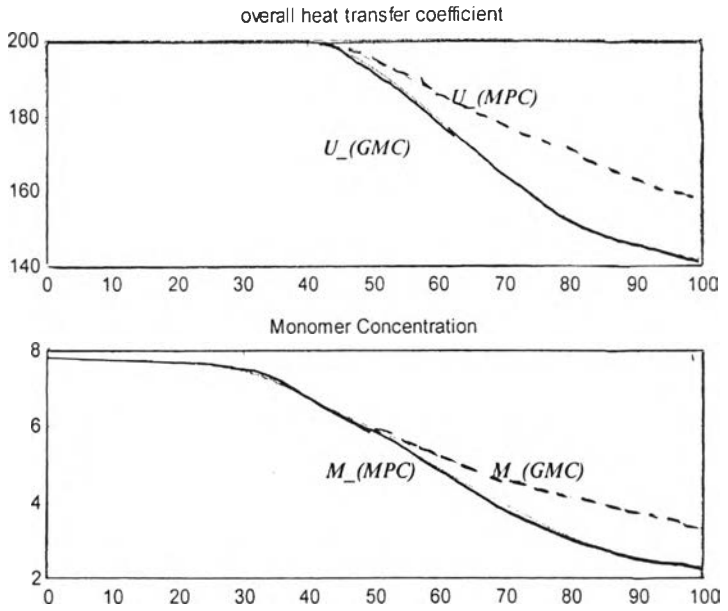
(ก)

รูปที่ 5.16(ก)ผลตอบสนองอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์กับเวลาเมื่อเปรียบเทียบการควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟและเจเนริกโมเดลเมื่อค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 10 %



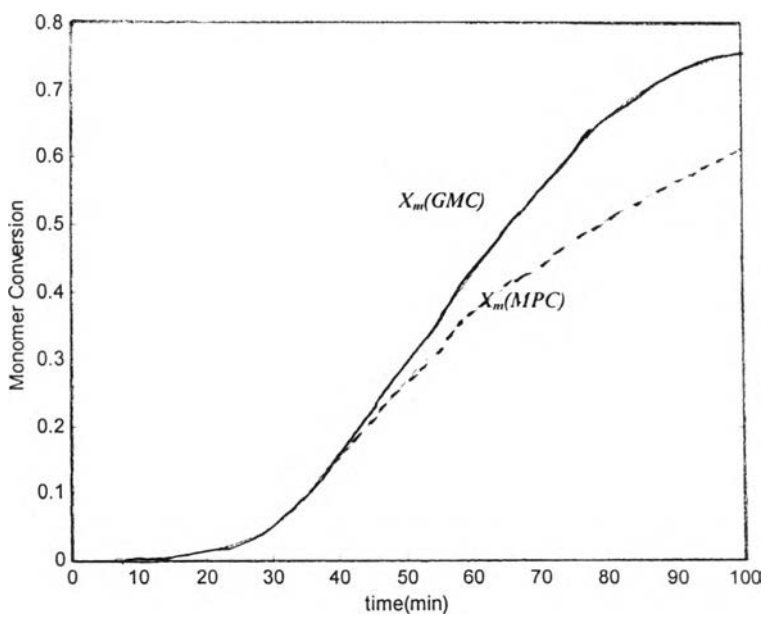
(ข)

รูปที่ 5.16(ข)ผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดภายในเครื่องกับเวลาเมื่อเปรียบเทียบการควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟและเจเนริกโมเดลเมื่อค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 10 %



(ค)

รูปที่ 5.16 (ค) บน ผลตอบสนองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมกับเวลาเมื่อเปรียบเทียบการควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟและเจเนริกโมเดลเมื่อค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 10 %
รูปที่ 5.16 (ค) ล่าง ผลตอบสนองความเข้มข้นของโมโนเมอร์กับเวลาเมื่อเปรียบเทียบการควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟและเจเนริกโมเดลเมื่อค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 10 %



(ง)

รูปที่ 5.16 (ง) ผลตอบสนองคอนเวอร์ชันของโมโนเมอร์ภายในเครื่องกับเวลาเมื่อเปรียบเทียบการควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟและเจเนริกโมเดลเมื่อค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 10 %

ตารางที่ 5.12 ค่าดัชนีสมรรถนะของการควบคุมในกรณีที่ค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาผิดพลาด

ค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยา(%)	ดัชนีสมรรถนะ ($ISE*10^4$) การควบคุมอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์		ดัชนีสมรรถนะ ($ISE*10^0$) การประมาณค่าความร้อน	
	GMC	MPC	GMC	MPC
120	9.6188*	8.8555*	1.7953	0.8572
110	5.3312	2.4297	0.010265	0.01008
90	2.4336	2.4303	0.01226	0.00946
80	2.4461	2.4426	0.00946	0.006673

*ไม่สามารถควบคุมได้

ผลการจำลองของค่าความร้อนที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์จะพบว่าค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยา (Heat of Reaction) จะมีผลทำให้อุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์จะสูงกว่าในกรณีปกติ และเนื่องจากค่าความแปรปรวนของค่าความร้อน ในตัวกรองคาลมานมีค่าสูงมากทำให้ตัวกรองคาลมานสามารถประมาณค่าความร้อนได้ใกล้เคียงค่าจริงถึงแม้แบบจำลองของระบบประมาณค่ามีค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาจะผิดพลาดไปก็ตาม การที่ตัวกรองคาลมานประมาณค่าได้ใกล้เคียงค่าจริง อีกเหตุผลหนึ่งเนื่องมาจากที่ แบบจำลองของตัวกรองมีแบบจำลองเป็นแบบจำลองของกระบวนการ กับค่าที่เป็นสัญญาณอินพุทของตัวกรองมีทั้ง ค่าเอาท์พุทที่ได้จากการวัดและค่าตัวแปรปรับในอดีต จึงทำให้ระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟสามารถควบคุมกระบวนการที่มีค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นได้สูง 10% และในขณะที่ระบบควบคุมเจเนริกโมเดล จะพบว่าตัวกรองคาลมานประมาณค่าความร้อนไว้สูงมากกว่ากรณีของโมเดลพรีดิกทีฟ แต่ระบบควบคุมเจเนริกโมเดลที่มีแบบจำลองการควบคุมที่ใช้ถ่วงน้ำหนักเป็นค่าคงที่ การคำนวณค่าตัวแปรปรับเนื่องจากตัวแปรปรับมีขอบเขตการดำเนินการอยู่ จึงทำให้ไม่สามารถทำให้อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ลดลงได้มากกว่าขอบเขต ดังนั้นระบบควบคุมจะทำการเพิ่มอุณหภูมิในแจ็คเก็ตมากกว่าปกติ ทำไม่ได้ ระบบจึงไม่สามารถควบคุมได้ดังรูป