บทที่ 2

ผลงานวิจัยที่ผ่านมา

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับจีเอ็มซี

Lee และ Sullivan (1988) ได้นำเสนอการควบคุมแบบจีเอ็มซี (Generic Model Control, GMC) ซึ่งเป็นการควบคุมที่นำแบบจำลองของกระบวนการมาใช้ในโครงสร้างของการควบคุมโดยตรง ด้วยวิธีการนี้ถึงแม้แบบจำลองดังกล่าวจะเป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นแต่ก็สามารถประยุกต์ใช้ได้ในทันทีไม่จำเป็นต้องจัดให้อยู่ในรูปแบบของแบบจำลองเชิงเส้นก่อน นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดลักษณะผลตอบสนองจากการควบคุมได้โดยการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ 2 ตัวในโครงสร้างของการควบคุม ข้อได้เปรียบสำคัญของการควบคุมแบบจีเอ็มซีนี้คือเป็นการควบคุมแบบไม่เชิงเส้นจึงเหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการทางเคมีต่างๆซึ่งส่วนใหญ่เป็นกระบวนการที่ไม่เป็นเชิงเส้นอยู่แล้ว อย่างไรก็ตามในกรณีที่แบบจำลองที่ใช้คลาดเคลื่อนไปจากกระบวนการจริงก็จะมีผลทำให้สมรรถนะในการควบคุมลดลง

Lee , Newell และ Sullivan (1989) แสดงผลการศึกษาการควบคุมที่ได้จากการนำตัวควบคุมแบบจีเอ็มซีมาใช้กับระบบของเครื่องทำให้กลายเป็นไอซึ่งเป็นระบบที่มีอินเตอร์แอคชั่นและความไม่เป็นเชิงเส้นสูงอยู่ ซึ่งผลการควบคุมเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมอื่นคือตัวควบคุมแบบพีไอและดีเอ็มซีแล้วนับว่าตัวควบคุมแบบจีเอ็มซีให้สมรรถนะในการควบคุมที่ดีกว่า นอกจากนี้ยังมีการทดสอบความทนทานของตัวควบคุมจีเอ็มซีเมื่อให้มีความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองที่ใช้ในโครงสร้างการควบคุมกับกระบวนการจริง โดยแบ่งเป็น 2 กรณีคือ ความผิดพลาดของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองและความผิดพลาดของลักษณะโครงสร้างที่ใช้ในแบบจำลอง จากผลการศึกษาพบว่ายังสามารถทำให้ตัวแปรควบคุมอยู่ในค่าเป้าหมายที่ต้องการได้ทั้ง 2 กรณี เนื่องจากพจน์อินทิกรัลที่ปรากฏในโครงสร้างการควบคุมเป็นตัวชดเชยความผิดพลาดดังกล่าวไว้ สุดท้ายในงานวิจัยได้สรุปว่าความถูกต้องของลักษณะโครงสร้างของแบบจำลองมีความสำคัญกว่าความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง

Cott และ Macchietto (1989) ได้ทำการศึกษาการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่มีปฏิกิริยาแบบคายความร้อน โดยได้ทำการเปรียบเทียบผลการควบคุมที่ได้จากการใช้ตัวควบคุมแบบคู่ (dual-mode controller) และตัวควบคุมแบบจีเอ็มซี ตัวควบคุมแบบคู่เป็นเทคนิคการควบคุมที่ใช้วิธีการควบคุมแบบออน-ออฟในช่วงการให้ความร้อนเริ่มต้น (initial heat-up) โดยการให้ความร้อนสูงในช่วงต้น เมื่ออุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มมาถึงจุดหนึ่งก็จะหยุดการให้ความร้อนและเปลี่ยนเป็นการหล่อเย็นแทน เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีค่าเท่ากับศูนย์จะทำการเปลี่ยนโหมดของการควบคุมไปใช้การควบคุมแบบพีไอดีแทน และใช้การควบคุมแบบพีไอดีในการควบคุมอุณหภูมิให้มีค่าเข้าสู่ค่าเป้าหมายต่อไป เนื่องจากการควบคุมแบบคู่มีความยุ่งยากในการนำไปใช้งาน Cott และ Macchietto จึงได้นำเสนอการใช้ตัวควบคุมแบบจีเอ็มซีร่วมกับการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาของ Jutan และ Uppal (1984) ซึ่งใช้ตัวกรองเอกซ์โปเนนเชียลในการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนแบบกะ ซึ่งพบว่าสามารถใช้งานได้ง่ายกว่าการใช้งานตัวควบคุมแบบคู่ นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบความทนทานของตัวควบคุมทั้งสองในกรณีต่างๆ ซึ่งพบว่าตัวควบคุมแบบจีเอ็มซีสามารถให้ผลการควบคุมได้ดีกว่าในทุกกรณีที่ทำการทดสอบ

Cott และคณะ (1989) นำการควบคุมแบบจีเอ็มซีมาใช้กับการควบคุมองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ก้นหอและผลิตภัณฑ์ยอดหอในกระบวนการกลั่นแบบ 2 องค์ประกอบ โดยที่ลักษณะของจีเอ็มซีนั้นเป็นตัวควบคุมที่อาศัยแบบจำลองเชิงพลวัต แต่ลักษณะของแบบจำลองที่เกี่ยวกับกระบวนการกลั่นมักจะมีลักษณะเป็นแบบจำลองที่สภาวะคงตัว อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ได้นำแบบจำลองไม่เชิงเส้นที่สภาวะคงตัวมาประมาณให้มีลักษณะเป็นแบบจำลองเชิงพลวัตในรูปค่าคงตัวของเวลา เมื่อเป็นดังนี้แล้วจึงสามารถใช้วิธีการของจีเอ็มซีมาประยุกต์ใช้ได้ โดยจีเอ็มซีที่ใช้แบบจำลองไม่เชิงเส้นที่สภาวะคงตัวนี้ได้ถูกนำไปทดสอบสมรรถนะกับตัวควบคุมเชิงเส้นที่ใช้แบบจำลองเชิงพลวัตซึ่งผลจากการทดสอบสมรรถนะพบว่าตัวควบคุมจีเอ็มซีมีสมรรถนะในการควบคุมที่ดีกว่าในทุกกรณี

Benzanson และคณะ (1989) ได้แสดงให้เห็นว่าถึงแม้พจน์อินทิกรัลที่ปรากฏในสมการของการควบคุมแบบจีเอ็มซีจะเป็นตัวรับประกันความทนทานของตัวควบคุมในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองก็ตาม แต่ความทนทานนั้นจะลดลงเมื่อกำหนดให้ผลตอบสนองของตัวแปรควบคุมเมื่อมีการควบคุมสู่เข้าสู่ค่าเป้าหมายด้วยความเร็ว สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะในกรณีดังกล่าวการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของการควบคุมจะได้ค่า k_2 มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ k_1 โดยที่ k_2 จะเป็นพารามิเตอร์ที่คูณอยู่กับพจน์อินทิกรัลที่เป็นตัวชดเชยความผิดพลาดในกรณีที่มีความผิด

พลาดของแบบจำลอง จึงทำให้ผลจากการชดเชยมีค่าน้อยมากไม่สามารถชดเชยความผิดพลาดได้เพียงพอ เป็นผลให้ไม่สามารถที่จะทำให้ตัวแปรควบคุมลู่เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้

Lundberg และ Benzanson (1990) นำเสนอการควบคุมแบบอาร์จีเอ็มซี (Robust Generic Model Control, RGMC) เพื่อเป็นการเพิ่มความทนทานให้กับการควบคุมแบบจีเอ็มซีเมื่อต้องการผลตอบสนองของตัวแปรควบคุมที่เร็ว โดยลักษณะโครงสร้างของอาร์จีเอ็มซีจะมีการป้อนกลับค่าอนุพันธ์ของตัวแปรที่วัดค่าได้เพื่อเปรียบเทียบกับค่าอนุพันธ์ของตัวแปรนั้นที่ได้จากแบบจำลอง ซึ่งผลต่างที่ได้ระหว่างข้อมูล 2 ชุดนี้จะเป็นตัวชดเชยความผิดพลาดระหว่างแบบจำลองกับกระบวนการจริงแทนพจน์อินทิกรัลในโครงสร้างการควบคุมแบบเดิม จากตัวอย่างในงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบอาร์จีเอ็มซีสามารถทำให้ตัวแปรควบคุมลู่เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้แม้จะมีความผิดพลาดของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง

Rani และ Gangiah (1991) นำเสนอการควบคุมแบบจีเอ็มซีที่มีการปรับตัวได้หรือที่เรียกว่าเอจีเอ็มซี (Adaptive Generic Model Control, AGMC) เพื่อเปรียบเทียบผลการควบคุมกับการควบคุมแบบจีเอ็มซีและการควบคุมแบบอาร์จีเอ็มซีในกรณีที่ต้องการผลตอบสนองที่เร็วของตัวแปรควบคุม ซึ่งผลการควบคุมจากตัวอย่างในงานวิจัยพบว่าอาร์จีเอ็มซีนั้นสามารถรับประกันความทนทานให้กับการควบคุมได้ในกรณีที่มีความผิดพลาดของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองเท่านั้น แต่ในกรณีที่มีความผิดพลาดของลักษณะโครงสร้างของแบบจำลองจะทำให้ความทนทานลดลง ในขณะที่การควบคุมแบบเอจีเอ็มซีนั้นสามารถรับประกันความทนทานเมื่อมีความผิดพลาดจากแบบจำลองได้ทั้ง 2 กรณี โดยที่การควบคุมแบบนี้จะมีการประมาณค่าพารามิเตอร์เพื่อปรับใช้ในแบบจำลอง โดยอาศัยความสัมพันธ์ของตัวแปรสเตทและพารามิเตอร์นั้นกับตัวแปรที่วัดค่าได้ นอกจากนี้แล้วยังได้นำการควบคุมแบบเอจีเอ็มซีไปใช้ในการจำลองผลการควบคุมกระบวนการกลั่นแบบ 2 องค์ประกอบ และให้ชื่อตัวควบคุมนั้นว่าดีเอจีเอ็มซี (Distillation Adaptive Generic Model Control, DAGMC) โดยแบบจำลองที่นำมาทดสอบเป็นแบบจำลองกระบวนการกลั่นแยกน้ำและเมธานอลของ Wood และ Berry (1973) และแบบจำลองการกลั่นแยกบิวเทนของ Gani และคณะ(1986) กับ Ruiz และคณะ (1988) ซึ่งพบว่าการใช้แบบจำลองไม่เชิงเส้นกับตัวควบคุมดีเอจีเอ็มซีนี้ให้ผลในการควบคุมดีกว่าแบบจำลองเชิงเส้น

เช่นเดียวกับในงานวิจัยของ Signal และ Lee (1992) และ Xie และคณะ (1999) ที่ทำการศึกษาเทคนิคในการปรับตัวของค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองที่ใช้ในโครงสร้างการควบคุมแบบจีเอ็มซี (เอจีเอ็มซี) เพื่อให้สามารถใช้ตัวควบคุมจีเอ็มซีควบคุมระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้ในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองและในกรณีที่ไม่สามารถวัดค่าตัวแปรรบกวนได้

Riggs และ Rhinehart (1990) ทำการเปรียบเทียบตัวควบคุมที่อาศัยแบบจำลองไม่เชิงเส้น (Nonlinear Process-Model Based Control, PMBC) สองชนิดคือตัวควบคุมไอเอ็มซีแบบไม่เชิงเส้น และตัวควบคุมจีเอ็มซี โดยในการศึกษานำกระบวนการของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนต่อเนื่องอุดมคติที่มีหนึ่งตัวแปรเข้าและหนึ่งตัวแปรออก และกระบวนการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีหนึ่งตัวแปรเข้าและหนึ่งตัวแปรออกมาศึกษา โดยในกรณีของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนต่อเนื่องนั้นเป็นลักษณะของระบบที่ไม่เสถียรแต่ไม่มีไทม์ดีเลย์ ส่วนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นเป็นลักษณะของระบบที่เสถียรแต่มีไทม์ดีเลย์ ซึ่งลักษณะของความไม่เสถียร, การมีไทม์ดีเลย์ และความไม่เป็นเชิงเส้นสูงนี้ล้วนเป็นสาเหตุให้การควบคุมทำได้ยาก โดยตัวควบคุมทั้งสองให้สมรรถนะในการควบคุมที่ดีเหมือนกันและต่างก็มีความทนทานในกรณีที่มีความคลาดเคลื่อนระหว่างแบบจำลองกับกระบวนการจริง

Douglas และคณะ (1994) ศึกษาการควบคุมกระบวนการกลั่นที่ต้องการความบริสุทธิ์สูงของกระบวนการดีไอโซเฮกเซนนิเซอร์(ดีไอเอช) ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง, มีอินเตอร์แอคชั่นและไทม์ดีเลย์ โดยในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมจีเอ็มซีที่อาศัยแบบจำลองของกระบวนการกลั่นของ Jafarey และคณะ (1979) นั้นมีสมรรถนะในการควบคุมระบบดีไอเอชได้ดีกว่าตัวควบคุมเชิงเส้นแบบพีไอ นอกจากนี้ยังได้แสดงให้เห็นว่าในแบบจำลองดังกล่าวเมื่อมีการชดเชยความล่าช้าของระบบลงไปในตัวควบคุมจีเอ็มซีด้วยตามวิธีของ Lee และคณะ (1990) จะให้ผลการควบคุมที่ดียิ่งขึ้น

Farrell และ Tsai (1995) ศึกษาการควบคุมขนาดของอนุภาคที่ได้จากกระบวนการการตกผลึกแบบกะ เนื่องจากขนาดของอนุภาคที่ได้นั้นมีความสำคัญทั้งในแง่ของคุณภาพของผลิตภัณฑ์และปริมาณของผลิตภัณฑ์ โดยการกระจายตัวของอนุภาค (Crystal-Size Distribution, CSD) นั้นขึ้นอยู่กับระดับความอิ่มตัวยิ่งยวดของสารละลายโดยตรง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้ระดับความอิ่มตัวยิ่งยวดของสารละลายเป็นตัวแปรปรับในการควบคุม โดยตัวแปรควบคุมในที่นี้คือรการกระจายตัวของอนุภาคนั้นไม่สามารถวัดได้โดยตรง แต่จะคำนวณผ่านผลการกระจายของแสงเลเซอร์ โดยตัวควบคุมที่นำมาใช้คือตัวควบคุมจีเอ็มซี ซึ่งเป็นตัวควบคุมไม่เชิงเส้นที่อาศัยแบบจำลองของระบบ อย่างไรก็ตามด้วยลักษณะของระบบที่มีความซับซ้อนจึงไม่สามารถหาแบบจำลองที่ถูกต้องได้อีกทั้งการวัดค่าของตัวแปรควบคุมนั้นไม่สามารถวัดได้โดยตรง ต้องอาศัยแบบจำลองในการคำนวณค่าตัวแปรควบคุมออกมา ดังนั้นในระบบนี้จึงมีโอกาสที่แบบจำลองที่ใช้จะมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงอยู่มาก ดังนั้นวิธีการของอาร์จีเอ็มซีโดย Lundberg และ Benzanson (1990) จึงถูกนำมาใช้เพื่อชดเชยความผิดพลาดที่เกิดจากแบบจำลอง ซึ่งระบบการตกผลึกที่ Farrell และ Tsai ทำการควบคุมก็คือการตกผลึกของโปแตสเซียมซัลเฟตออกจากน้ำและอะซิโตน โดยที่

ผลการควบคุมการตกผลึกแบบกะโดยจีเอ็มซี (Batch Generic Model Control, BGMC) พบว่าให้ผลการควบคุมอนุภาคที่ดีในกรณีที่มีตัวแปรรบกวน และเป็นการแสดงให้เห็นด้วยว่าตัวควบคุมที่อาศัยแบบจำลองนั้นไม่จำเป็นต้องใช้แบบจำลองที่ถูกต้องตรงกับความเป็นจริงทุกประการ

Flathouse และ Riggs (1996) ประยุกต์วิธีการจูนแบบอัตโนมัติ (Auto Tune Variation, ATV) กับตัวควบคุมจีเอ็มซี โดยวิธีการจูนแบบเอทีวีนี้ Astrom และ Hagglund (1988) นำมาใช้ในการจูนตัวควบคุมพีไอดีแบบอัตโนมัติ ซึ่งวิธีการจูนตัวควบคุมแบบพีไอดีที่เป็นที่รู้จักกันดีนั้นก็คือวิธีการจูนแบบ Cohen Coon และ Ziegler Nichols โดยในวิธีแรกนั้นใช้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรออกขณะที่ยังไม่มีการควบคุมมากำหนดค่าพารามิเตอร์ซึ่งวิธีการนี้ทำได้ยากเมื่อระบบมีการตอบสนองที่ช้ามาก และในกรณีที่ระบบมีความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากตัวแปรรบกวน ส่วนวิธีที่สองนั้นจูนตัวควบคุมในลูพปิดโดยการหาค่าเกนสุดท้าย(Ultimate Controller Gain) และคาบเวลาสุดท้าย(Ultimate Period)ซึ่งคิดจากเกนที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรปรับแล้วจะทำให้ตัวแปรควบคุมแกว่งในสภาวะคงที่ แต่ในวิธีแบบเอทีวีนั้นจะเริ่มพิจารณาระบบจากที่สภาวะคงตัว จากนั้นทำการเพิ่มค่าตัวแปรปรับแบบสเต็ปสังเกตการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรควบคุมจนมากพอก็ทำการปรับค่าตัวแปรปรับลงต่ำกว่าที่สภาวะคงตัวสังเกตการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรควบคุมว่ามากพอก็ทำการเพิ่มค่าตัวแปรปรับจากที่สภาวะคงตัวใหม่ทำกลับไปกลับมาไปเรื่อยๆ จะได้ลักษณะของตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุมที่สามารถนำไปคำนวณหาค่าค่าเกนสุดท้ายและคาบเวลาสุดท้ายได้

Flathouse และ Riggs เสนอว่าการใช้วิธีปรับจูนตัวควบคุมจีเอ็มซีตามวิธีของ Lee และ Sullivanซึ่งเป็นวิธีการอ็อฟติไมซ์ผลต่างของผลตอบสนองของตัวแปรควบคุมที่ต้องการกับลักษณะการเปลี่ยนแปลงตัวแปรควบคุมที่ได้จริงนั้นอาจให้ผลที่ไม่ดีได้ใน 3 กรณี คือกรณีแรกเมื่อเกิดความคลาดเคลื่อนระหว่างแบบจำลองกับกระบวนการจริง โดยเฉพาะในกรณีที่เป็นระบบหลายตัวแปรคือมีตัวแปรควบคุมมากกว่าหนึ่งตัวและตัวแปรปรับมากกว่าหนึ่งตัว กรณีที่สองคือเมื่อระบบที่ต้องการควบคุมมีความล่าช้าเชิงเวลา (Dead Time) โดยในการจูนตัวควบคุมนั้นจำเป็นต้องลดความรุนแรงของตัวควบคุมลงเพื่อรักษาความเสถียรของระบบ กรณีสุดท้ายเกี่ยวข้องกับพลวัตของระบบเช่นระบบที่มีอินเวอร์สแอคชั่นหรือระบบที่มีอันดับสูง (High-Order) ซึ่งก็จำเป็นที่จะต้องลดความรุนแรงของตัวควบคุมลงไป Flathouse และ Riggs จึงใช้การจูนตัวควบคุมจีเอ็มซีด้วยวิธีเอทีวี โดยทำการเปรียบเทียบตัวควบคุมที่ได้จากการจูนด้วยวิธีเอทีวีกับวิธีการแบบเดิมกับระบบตัวอย่าง 2 ระบบ คือระบบของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาแบบคายความร้อน กับระบบการกลั่นซึ่งต่างก็เป็นระบบที่มีตัวแปรควบคุม 2 ตัวและตัวแปรปรับ 2 ตัว ซึ่งผลการควบคุมพบว่าในกรณีปกติที่ไม่มีความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองนั้นวิธีการเดิมให้ผลการควบคุมในรูปของค่า

ไอเออีที่น้อยกว่าเล็กน้อย ส่วนในกรณีที่มีความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองนั้นจีเอ็มซีที่ทำการจูนด้วยวิธีการเดิมก็ยังให้ค่าไอเออีที่น้อยกว่าแต่จะมีการแกว่งและโอเวอร์ชู้ตมากกว่า

Manzi และ Odloak (1998) ใช้ตัวควบคุมจีเอ็มซีในการควบคุมกระบวนการการทำให้เป็นกลาง (Neutralization) ของกรดแก่-เบสแก่ และกรดอ่อน-เบสแก่ โดยนำไปทดสอบกับระบบจริงในการสะเทินของกรดไฮโดรคลอริกกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ และกรดอะซิติกกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ในรูปกระบวนการขนาดย่อม (Pilot Plant) ซึ่งผลการควบคุมพบว่าสามารถทำให้ระบบมีเสถียรภาพได้แม้ระบบจะมีความไม่แน่นอนหรือตัวแปรขนาดใหญ่ก็ตาม แต่ผลการควบคุมด้วยจีเอ็มซีจะมีสมรรถนะในการควบคุมที่ลดลงเมื่อเจอกับตัวรบกวนขนาดใหญ่

Shen และคณะ (1999) ศึกษาการเปรียบเทียบตัวควบคุมที่อาศัยแบบจำลองในการควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการตกผลึกแบบกะ โดยที่อุณหภูมิมีผลต่อการตกผลึก อย่างไรก็ตามด้วยลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบแบทช์ที่อุณหภูมิที่เหมาะสมจะเปลี่ยนไปเมื่อเวลาผ่านไป อีกทั้งความรุนแรงของความไม่เป็นเชิงเส้นและความไม่เสถียรของระบบทำให้ยากแก่การควบคุมระบบดังกล่าว ในงานวิจัยได้ทำการเปรียบเทียบตัวควบคุมที่อาศัยแบบจำลองสามวิธีด้วยกันคือ จีแอลซี, จีเอ็มซีและเอ็มพีซีแบบมัลติโมเดล ซึ่งผลการจำลองการควบคุมพบว่าตัวควบคุมทั้งสามให้ผลการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในทิศทางที่ต้องได้ดีแม้ในกรณีที่มีตัวแปรรบกวน นอกจากนี้แล้วทั้งสามตัวควบคุมยังมีความทนทานที่ดีในกรณีที่มีความคลาดเคลื่อนระหว่างแบบจำลองกับกระบวนการจริง

เมื่อพิจารณาถึงข้อบังคับ (Constrain) ของตัวควบคุมจีเอ็มซีนั้นพบว่าจีเอ็มซีเป็นตัวควบคุมที่ไม่มีข้อบังคับอยู่ในโครงสร้างการควบคุม โดยข้อบังคับที่เกี่ยวกับจีเอ็มซีนั้นจะมีลักษณะเป็นข้อบังคับที่เกิดจากปัจจัยภายนอกอันได้แก่ขีดจำกัดสูงสุดและต่ำสุดของตัวแปรปรับ เนื่องจากในบางกรณีนั้นเมื่อจีเอ็มซีคำนวณค่าตัวแปรปรับที่เหมาะสมออกมาจากโครงสร้างการควบคุมแล้วโดยค่าที่ได้นั้นเป็นค่าที่สูงมากหรือต่ำมากไป แต่ด้วยลักษณะทางกายภาพของเครื่องมือที่ใช้นั้นไม่อาจทำให้เกิดค่าตัวแปรปรับนั้นได้จริง ดังนั้นในการจำลองผลการควบคุมด้วยจีเอ็มซีหรือตัวควบคุมอื่นจำเป็นต้องพิจารณาถึงข้อจำกัดของตัวแปรปรับนั้นด้วย นอกจากนี้แล้วข้อจำกัดทางอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรปรับก็อาจต้องพิจารณาด้วยถ้าตัวแปรปรับมีการเปลี่ยนแปลงที่ช้า อย่างไรก็ตามในกรณีที่รวมข้อบังคับเข้าไปในโครงสร้างการควบคุมจะทำให้เกิดผลดีขึ้นเช่นผลในแง่เศรษฐศาสตร์, ผลในด้านความปลอดภัยและผลในด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์

Brown และคณะ (1990) นำเสนอการควบคุมที่มีข้อจำกัดในโครงสร้างการควบคุมของจีเอ็มซี โดยในโครงสร้างการควบคุมจีเอ็มซีแบบเดิมนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรปรับนั้นจะ

เป็นไปในทิศทางที่ทำให้ตัวแปรควบคุมเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะผลตอบสนองที่กำหนดไว้เท่านั้น แต่ในกรณีของ Brown และคณะนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรปรับจะเป็นไปในทิศทางที่ทำให้ตัวแปรควบคุมเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะผลตอบสนองที่กำหนดไว้และทำให้ค่าของฟังก์ชั่นที่กำหนดอยู่ภายในขอบเขตของข้อบังคับด้วย ในวิธีการนี้จะมีการกำหนดตัวแปรถ่วง (Slack Variable)ไว้ในสมการที่กำหนดผลตอบสนองของจีเอ็มซีและสมการการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชั่นข้อบังคับ ซึ่งในการคำนวณค่าตัวแปรปรับออกมานั้นจะเป็นการมินิไมซ์ผลรวมของตัวแปรถ่วงให้มีค่าน้อยที่สุดเพื่อผลในการทำให้ตัวแปรควบคุมเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะผลตอบสนองที่กำหนดไว้และทำให้ค่าของฟังก์ชั่นที่กำหนดอยู่ภายในขอบเขตของข้อบังคับ โดยผู้ออกแบบตัวควบคุมสามารถถ่วงน้ำหนักความสำคัญได้ว่าต้องการให้ตัวแปรควบคุมเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะผลตอบสนองที่กำหนดไว้ หรือต้องการทำให้ค่าของฟังก์ชั่นที่กำหนดอยู่ภายในขอบเขตของข้อบังคับมากกว่า โดยในการคำนวณนี้ใช้ นอนลิเนียร์โปรแกรม (Nonlinear Program) เป็นพื้นฐานในการคำนวณ ซึ่งในการคำนวณนี้ไม่มีการทำนายผลในช่วงเวลาในอนาคต

Xie และคณะ (2000) ตั้งข้อสังเกตว่าการควบคุมแบบจีเอ็มซีที่มีข้อบังคับ(Constrain)ภายในโครงสร้างการควบคุมที่ใช้นอนลิเนียร์โปรแกรมนั้นเป็นลักษณะของการออพติไมซ์ข้อบังคับแบบไม่เชิงเส้นซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาเมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการจริงเนื่องจากต้องใช้เวลาในการคำนวณมาก ซึ่งอาจจะไม่สามารถคำนวณค่าการควบคุมออกมาใช้ได้ทันในรอบการควบคุมนั้น จึงนำเสนอการคำนวณโดยควอดราติคโปรแกรมมิ่ง (Quadratic Programming, QP) เหมือนที่ Garcia และ Morshedi (1986) ใช้กับตัวควบคุม QDMC และ Gattu และ Zafiriou (1992) ใช้กับตัวควบคุม NLQDMC ซึ่งผลจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์กับระบบตัวอย่าง 2 ระบบคือระบบของเครื่องทำให้กลายเป็นไอและเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนต่อเนื่อง พบว่าผลการควบคุมของจีเอ็มซีที่มีข้อบังคับในโครงสร้างการควบคุมที่คำนวณตามวิธีควอดราติคโปรแกรมมิ่งนั้นเหมือนกับวิธีนอนลิเนียร์โปรแกรมแต่ช่วงเวลาในการคำนวณของวิธีควอดราติคโปรแกรมมิ่งนั้นน้อยกว่ามาก นอกจากนี้แล้วยังทำการเปรียบเทียบผลการควบคุมระหว่างจีเอ็มซีที่มีข้อจำกัดโดยวิธีควอดราติคโปรแกรมมิ่งกับ NLQDMC ซึ่งพบว่าจีเอ็มซีให้ผลการควบคุมได้ดีกว่า ยิ่งกว่านั้นแล้วจีเอ็มซีที่มีข้อบังคับในโครงสร้างการควบคุมยังให้สมรรถนะในการควบคุมที่ดีแม้ในกรณีที่มีความคลาดเคลื่อนระหว่างแบบจำลองกับกระบวนการจริง

ธนากร (2541) ประยุกต์ใช้ตัวควบคุมจีเอ็มซีเพื่อควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์โพลิเมอร์แบบกึ่งกะกับกระบวนการของ Teymour เนื่องจากปฏิกิริยาอิมัลชันโพลิเมอไรเซชั่น (Emulsion Polymerization) ของการเกิดโพลิเมอไรเซชั่นมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง ทำให้การควบคุมอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ได้ผลไม่ได้ตามต้องการ เป็นเหตุให้เกิดผลิตภัณฑ์โพลิเมอร์ที่ไม่ได้

มาตรฐาน ซึ่งการประยุกต์ใช้จีเอ็มซีร่วมกับตัวประมาณค่าออนไลน์เพื่อประมาณค่าความร้อนของปฏิกิริยาให้ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ได้ดีกว่าตัวควบคุมพีไอดีทั้งในกรณีปกติและกรณีที่มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์/กระบวนการ เช่นเดียวกับ นุศรา (2542) ซึ่งประยุกต์ใช้ตัวควบคุมจีเอ็มซีเพื่อควบคุมอุณหภูมิสำหรับเครื่องปฏิกรณ์การเกิดโพลิไวนิลคลอไรด์ร่วมกับตัวประมาณค่าออนไลน์ซึ่งก็ให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอดี

สุพัตรา (2543) ประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ(Model Predictive Control, MPC) ร่วมกับตัวกรองคาลมานเพื่อเพิ่มสมรรถนะในการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เคมีโพลิเมอร์แบบกะ เนื่องจากปฏิกิริยาฟรี-แรดิคัลโพลิเมอรไรเซชันในเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบกะนั้นมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง ซึ่งการควบคุมเชิงเส้นแบบพีไอดีสามารถควบคุมอุณหภูมิให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ แต่เกิดการโอเว่อร์ชู้ตทำให้สมบัติของโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้นั้นไม่เป็นไปตามต้องการ โดยในการทดสอบตัวควบคุมเอ็มพีซีนั้น ได้นำตัวควบคุมจีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมานมาเปรียบเทียบผลการควบคุมด้วย ซึ่งผลการจำลองการควบคุมพบว่าเอ็มพีซีให้ผลการควบคุมที่ดีกว่า แต่ก็ใช้ช่วงเวลาในการคำนวณตัวแปรปรับที่มากกว่า เนื่องจากจีเอ็มซีสามารถคำนวณตัวแปรปรับจากสมการของแบบจำลองโดยตรง แต่ในกรณีของเอ็มพีซีนั้นคำนวณตัวแปรปรับจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการทำออพติไมซ์เพื่อหาค่าที่เหมาะสม

อนุพัฒน์ (2544) ประยุกต์ใช้ตัวควบคุมจีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมานเพื่อควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาแบบคายความร้อนอันดับหนึ่งแบบผันกลับได้ ซึ่งแสดงพฤติกรรมที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงใน 3 กรณี คือ (1) ระบบแสดงพฤติกรรมที่มีความว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์อย่างมาก (2) ระบบแสดงพฤติกรรมที่มีหลายสภาวะคงตัวและสภาวะคงตัวที่ไม่มีเสถียรภาพ (3) ระบบแสดงพฤติกรรมที่มีการแกว่งเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมาก ซึ่งจากผลการจำลองการควบคุมพบว่าจีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมานให้สมรรถนะและความทนทานที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี ทั้งในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบและกรณีที่การเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายในการควบคุม นอกจากนี้แล้วจีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมานยังให้สมรรถนะในการควบคุมที่ดีในกรณีที่มีความผิดพลาดของระบบและแบบจำลองด้วย

นอกจากนี้แล้วยังมีงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมจีเอ็มซีที่ไม่ได้กล่าวถึงอีกเช่น การควบคุมระดับในเซอร์จแทงค์ (Surge Tank) โดย Lee และคณะ(1991), การวิเคราะห์สมรรถนะและความทนทานของจีเอ็มซีโดย Signal และ Lee (1993) และ การกำจัดรีเซตไวด์อัพ (Reset Windup)ที่เกิดในตัวควบคุมจีเอ็มซีโดย Ou และคณะ (1998) เป็นต้น

ในขณะที่ Lee และ Sullivan นำเสนอการควบคุมแบบจีเอ็มซีนั้น Kravaris และ Chung (1987) ได้นำเสนอการควบคุมแบบไม่เชิงเส้นที่เรียกว่าโกลบอลลี่ลิเนียไรซิ่ง(Globally Linearizing Control, GLC) ซึ่งเป็นการควบคุมที่อาศัยแบบจำลองของกระบวนการเพื่อใช้กับกระบวนการที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องมาจากการควบคุมแบบดั้งเดิมซึ่งเป็นการควบคุมเชิงเส้นไม่สามารถควบคุมระบบดังกล่าวให้ได้ผลดีได้ การควบคุมแบบจีแอลซีนี้จะอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรออกและตัวแปรเข้าหรือตัวแปรควบคุมและตัวแปรปรับที่ได้จากแบบจำลองเช่นเดียวกับการควบคุมแบบจีเอ็มซี เพื่อที่จะทำการคำนวณค่าตัวแปรปรับที่เหมาะสมจากความสัมพันธ์ออกมาให้สามารถควบคุมตัวแปรควบคุมให้อยู่ในสภาวะที่ต้องการได้ โดยในการควบคุมแบบจีแอลซีนี้จะใช้หลักการทางอนุพันธ์เรขาคณิตเพื่อทำให้ตัวแปรเข้าและตัวแปรออกหรือตัวแปรควบคุมและตัวแปรปรับนั้นมีความสัมพันธ์กันในรูปแบบเชิงเส้น จากนั้นจึงใช้ตัวควบคุมเชิงเส้นเช่นตัวควบคุมแบบพีไอเป็นตัวกำหนดความเร็วของผลการควบคุม และในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองกับกระบวนการที่แท้จริงเกิดขึ้นหรือในกรณีที่มีตัวรบกวน ตัวควบคุมคุมเชิงเส้นนี้จะเป็นตัวเพิ่มความทนทานให้กับการควบคุมแบบโกลบอลลี่ลิเนียไรซิ่งในกรณีดังกล่าว ซึ่งการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมจีแอลซีนั้นมีให้เห็นอยู่มากเช่นเดียวกับจีเอ็มซี

Kravaris และ Soroush (1990) ได้พัฒนาวิธีการควบคุมแบบจีแอลซีให้ใช้ได้กับระบบไม่เชิงเส้นที่มีตัวแปรเข้าและตัวแปรออกหลายตัว ซึ่งได้ประยุกต์ใช้ตัวควบคุมจีแอลซีสำหรับควบคุมองค์ประกอบของการเกิดโพลิเมอร์ร่วมและตัวเลขของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย โดยใช้การปรับค่าความร้อนและอัตราของการเติมโมโนเมอร์ชนิดหนึ่งในปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ

Henson และ Seborg (1990) นำตัวควบคุมจีแอลซีมาควบคุมค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นในถังที่สองของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนต่อเนื่องที่ต่ออนุกรมกัน ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดในเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองถังนั้นเป็นปฏิกิริยาชนิดเดียวกัน คือปฏิกิริยาแบบคายความร้อนอันดับหนึ่งแบบผันกลับไม่ได้ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง และนอกจากนี้แล้วเมื่อพิจารณาถึงแบบจำลองของระบบที่ตัวแปรควบคุมคือค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นในถังที่สองและตัวแปรปรับคืออัตราการไหลของสารหล่อเย็น พบว่าเป็นระบบที่มีค่าระดับสัมพัทธ์เป็นสอง โดยผลการจำลองการควบคุมระบบดังกล่าวโดยใช้ตัวควบคุมจีแอลซีให้ผลที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอทั้งกรณีที่มีการเปลี่ยนค่าเป้าหมายของตัวแปรควบคุมและตัวแปรรบกวนระบบ

Soroush และ Kravaris (1992) ประยุกต์ใช้ตัวควบคุมไม่เชิงเส้นจีแอลซีเพื่อควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์การเกิดโพลิเมอร์แบบกะ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการเกิดโพลิเมอร์ของเมทิวเมตราไครเลท (MMA) ที่มี เอโซ-บิส-ไอโซบิวทิโรไนไตรล์ (AIBN) และโทลูอีน(Toluene) เป็นตัว

เริ่มและเป็นตัวทำละลาย โดยที่อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์นี้ถูกควบคุมโดยการปรับตัวแปรเข้าสองตัวที่มีความสำคัญเท่าเทียมกันคือ กำลังไฟฟ้าที่ให้ความร้อน (Electric Heat) และอัตราการไหลของน้ำเย็น โดยใช้ 'รีดิวส์-ออร์เดอร์ ออบเซอร์ฝเวอร์'เป็นตัวประมาณค่าความเข้มข้นของตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา (Initiator) และความเข้มข้นของโมโนเมอร์ ซึ่งพบว่าผลการควบคุมด้วยจีแอลซีร่วมกับตัวสังเกตค่านี้ให้สมรรถนะในการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี

นันทนา (2543) ใช้ตัวควบคุมจีแอลซีร่วมกับตัวกรองคาลมานแบบยืดขยายในการจำลองการควบคุมค่าพีเอชของกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า พบว่าจีแอลซีร่วมกับตัวกรองคาลมานแบบยืดขยายนั้นให้ผลการควบคุมที่ใกล้เคียงกับตัวควบคุมพีไอดีในกรณีปกติและให้สมรรถนะและความทนทานดีกว่าในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองกระบวนการ

Piovoso และคณะ (1992) ศึกษาการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาแบบคายความร้อนอันดับหนึ่ง โดยใช้การควบคุมแบบจีเอ็มซี , จีแอลซี และการควบคุมแบบอินเทอร์นอลโมเดล(ไอเอ็มซี) ในกรณีที่สามารถวัดค่าตัวแปรสเตทได้ทั้งสองตัวคือ อุณหภูมิและความเข้มข้น โดยผลการควบคุมแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบจีเอ็มซีและจีแอลซีนั้นให้ผลการควบคุมที่คล้ายกันซึ่งต่างไปจากผลการควบคุมที่ได้จากไอเอ็มซีทั้งในกรณีที่มีความสมบูรณ์ของแบบจำลองและในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลอง นอกจากนี้แล้วยังมีการทดลองใช้จีเอ็มซีควบคู่ไปกับข่ายนิวรัลในการประมาณค่าฟังก์ชั่นของกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยที่ปรากฏในโครงสร้างของตัวควบคุมในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลอง ซึ่งพบว่าเมื่อใช้ข่ายนิวรัลช่วยแล้วทำให้เกิดการโอเว่อร์ชู้ตของตัวแปรควบคุมลดน้อยลง

Liu และ Macchietto (1994) ได้ศึกษาการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะของกระบวนการสตาร์ชดีเกรดเดชั่นซึ่งใช้แอลฟาอะไมเลสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นกระบวนการที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงและมีความซับซ้อนในการให้ความร้อนและความเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ โดยใช้วิธีการควบคุมแบบลำดับขั้น ในชั้นแรกตัวควบคุมจากลูพนอกจะเป็นตัวคำนวณค่าอุณหภูมิเป้าหมายภายในแจ็กเก็ตให้กับตัวควบคุมในลูพในซึ่งจะทำหน้าที่ควบคุมให้อุณหภูมิในแจ็กเก็ตลู่เข้าสู่ค่าที่ต้องการได้ต่อไป โดย Liu และ Macchietto ได้ทำการศึกษาในสี่กรณีด้วยกัน กรณีแรกใช้ตัวควบคุมแบบพีไอทั้งสองตัว กรณีที่สองใช้ตัวควบคุมตัวแรกเป็นจีเอ็มซีส่วนตัวที่สองเป็นพีไอ กรณีที่สามใช้จีเอ็มซีทั้งสองตัวและกรณีสุดท้ายใช้จีแอลซีเป็นตัวควบคุมตัวแรกส่วนตัวที่สองเป็นตัวควบคุมพีไอ ซึ่งผลปรากฏว่าในสามกรณีหลังนั้นให้ผลการควบคุมที่ใกล้เคียงกันและดีกว่าในกรณีแรก โดย Liu และ Macchietto ได้สรุปว่าเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะ

ทั้งจีเอ็มซีและจีแอลซีอาศัยความสัมพันธ์จากแบบจำลองจึงสามารถคำนวณตัวแปรปรับมาจากความสัมพันธ์ที่ดีระหว่างตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุมนั่นเอง

Barolo (1994) สรุปการทบทวนผลงานวิจัยที่เกี่ยวกับการควบคุมแบบจีเอ็มซีโดย Lee และ Sullivan ในปี ค.ศ. 1988 และการควบคุมแบบจีแอลซี โดย Kravaris และ Chung ในปี ค.ศ. 1987 เช่นเดียวกับ Lee (1991) , Kravaris และ Arkun (1991) และ McLellan และคณะ (1990) ว่า เทคนิคการควบคุมทั้ง 2 แบบนี้มีลักษณะโครงสร้างในการควบคุมเหมือนกัน ในกรณีที่ระบบมีค่าระดับสัมพัทธ์เป็นหนึ่ง(Relative degree one) เนื่องจากเป็นการคำนวณค่าตัวแปรปรับที่เหมาะสมจากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเข้าและตัวแปรออกที่ได้จากแบบจำลองของระบบเพื่อใช้ควบคุมตัวแปรควบคุม โดยที่ทั้งสองเทคนิคถูกออกแบบขึ้นมาคนละแนวทาง โดยจีเอ็มซีใช้หลักการของการกำหนดลักษณะอัตราการเปลี่ยนแปลงตัวแปรออกหรือตัวแปรควบคุมผ่านทางพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมกับแบบจำลองกระบวนการเพื่อใช้ในโครงสร้างของการควบคุมโดยตรง ในขณะที่ตัวควบคุมแบบจีแอลซีใช้หลักการทางอนุพันธ์เรขาคณิตเพื่อทำให้ตัวแปรเข้าและตัวแปรออกหรือตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุมนั้นมีความสัมพันธ์กันในรูปแบบเชิงเส้น จากนั้นจึงใช้วิธีการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเชิงเส้นเพื่อกำหนดความเร็วช้าของผลการควบคุมอีกที ด้วยวิธีการนี้ไม่ว่าระบบที่ต้องการควบคุมจะมีค่าระดับสัมพัทธ์เป็นเท่าไรก็สามารถประยุกต์กับตัวควบคุมชนิดนี้ได้ นอกจากนี้ยังสรุปว่าลักษณะโครงสร้างการควบคุมแบบจีเอ็มซีนั้นเป็นเพียงกรณีพิเศษของการควบคุมแบบจีแอลซีเท่านั้นเมื่อกระบวนการที่ต้องการควบคุมมีค่าระดับสัมพัทธ์เป็นหนึ่ง

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนต่อเนื่อง

Uppal (1974) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมทางพลวัตที่ซับซ้อนและมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงของเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนต่อเนื่อง ซึ่งรวมถึงกระบวนการที่มีความหลากหลายของตัวแปรเข้าและตัวแปรออก , กระบวนการที่มีความไวต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆและกระบวนการที่มีการแกว่งอันเนื่องมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมากเป็นต้น

Hoo และ Kantor (1985) ได้ใช้วิธีการควบคุมป้อนกลับแบบไม่เชิงเส้นในการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับไม่ได้ (Uppal et al. 1974) โดยสมมติให้ทั้งอุณหภูมิและความเข้มข้นเป็นค่าที่สามารถวัดได้ ซึ่งต่อมาได้ประยุกต์ใช้เทคนิค

การควบคุมแบบป้อนกลับเอาท์พุท (Nonlinear output feedback control) กับเครื่องปฏิกรณ์แบบเดียวกันโดยใช้ตัวสังเกตการณ์แบบไม่เชิงเส้นในการประมาณความเข้มข้นเมื่อกำหนดให้อุณหภูมิเป็นค่าที่วัดได้เท่านั้น ซึ่งการประมาณนี้จำกัดเฉพาะปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

Alvarez (1989) ได้ทำการศึกษาเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนต่อเนื่องซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ด้วยตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งเลียนแบบมาจากตัวควบคุมแบบพีไอดี และในปีเดียวกัน Bequette (1989) ได้พัฒนาวิธีการควบคุมซึ่งไม่ต้องอาศัยความรู้เกี่ยวกับจลศาสตร์ของปฏิกิริยา โดยที่พารามิเตอร์ต่างๆที่ไม่ทราบค่าถูกจัดรวมเป็นพารามิเตอร์ตัวเดียวในการประมาณค่าที่แต่ละช่วงเวลา

Calvet และ Arkun (1988) ได้ออกแบบตัวควบคุมแบบพีและพีไอที่มีเสถียรภาพสำหรับการประมาณเชิงเส้นของสมการสเตทที่ประยุกต์ใช้กับเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนต่อเนื่องที่ไม่มีเสถียรภาพเมื่อไม่มีการควบคุมซึ่งมีอุณหภูมิและความเข้มข้นขาเข้าเป็นตัวแปรรบกวนของระบบ

จากผลงานการวิจัยที่ผ่านมาสำหรับการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนต่อเนื่องที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงนั้นพบว่า ตัวควบคุมแบบเชิงเส้นธรรมดาเช่นเทคนิคการควบคุมแบบพีไอดีมักใช้ไม่ได้ผลดีเท่าที่ควร (Chang และ Chen, 1984)

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวกับตัวกรองคาลมาน

R.E. Kalman (1960) ได้อธิบายถึงขั้นตอนการแก้ปัญหาแบบเรียกซ้ำ (recursive solution) เพื่อใช้เป็นตัวกรองสำหรับระบบเชิงเส้น ซึ่งในช่วงนั้นถือเป็นการค้นพบที่เป็นประโยชน์อย่างมากในด้านของการคำนวณทางด้านดิจิตอล ด้วยข้อดีของขั้นตอนการคำนวณแบบเรียกซ้ำซึ่งประหยัดเวลาและหน่วยความจำในการคำนวณ นอกจากนี้วิธีการของตัวกรองคาลมานยังสามารถใช้เป็นตัวประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์ได้อย่างถูกต้อง จึงทำให้การศึกษาค้นคว้าและการประยุกต์ใช้งานของตัวกรองคาลมานได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง

Wells (1971) ได้เสนออัลกอริธึมของตัวกรองคาลมานแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น (Linear Kalman filter และ Extended-Kalman filter) ซึ่งประยุกต์ใช้ในถังกวนที่มีความไม่เป็นเชิง

เส้นสูง โดยการคำนวณค่าสเตทของกระบวนการหรือพารามิเตอร์ของระบบที่ไม่สามารถวัดค่าได้ ซึ่งผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในการควบคุม

Hamilton และคณะ (1973) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของตัวกรองคาลมาน โดยได้ศึกษาการใช้งานตัวกรองคาลมานกับเครื่องระเหย (evaporator) ขนาดจำลอง โดยใช้ตัวกรองคาลมานเพื่อประมาณค่าความเข้มข้นของสารภายในเครื่องระเหย ซึ่งพบว่าตัวกรองคาลมานสามารถให้ผลการประมาณค่าได้อย่างถูกต้องในกรณีที่ไม่มีความผิดพลาดของแบบจำลองและสัญญาณรบกวน อย่างไรก็ตามในกรณีที่ตัวกรองคาลมานไม่รู้ถึงผลการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวน ผลการประมาณที่ได้จะมีความผิดพลาดอยู่

Valliere และ Bonvin (1989) ได้ทำการศึกษาถึงเทคนิคการประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์กับระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ โดยได้แสดงถึงเทคนิคการนำตัวกรองคาลมานแบบยืดขยายมาช่วยในการประมาณค่าพารามิเตอร์ซึ่งโดยทั่วไปจะไม่สามารถทราบค่าที่แน่นอนได้คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ค่าความจุความร้อนของสารและค่าคงที่ทางจลนศาสตร์

Kershenbaum และ Kittisupakorn (1994) ได้ศึกษาถึงการควบคุมอุณหภูมิของระบบเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนแบบกะ โดยกล่าวว่าค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยานั้นเป็นค่าที่ไม่สามารถวัดได้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยานั้นเป็นค่าที่จำเป็นต้องใช้ในอัลกอริธึมของตัวควบคุมฐานแบบจำลอง จึงได้นำตัวกรองคาลมานแบบยืดขยายมาช่วยในการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา โดยในแบบจำลองของตัวกรองคาลมานนั้นกำหนดให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาแปรผันกับมวลรวมของสารทั้งหมดและอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ในลักษณะที่เป็นไบลิเนียร์ (Bilinear) ซึ่งจากการจำลองกระบวนการพบว่า สามารถประมาณค่าความร้อนได้ดีในกรณีที่ไม่มีความผิดพลาดของแบบจำลอง อย่างไรก็ตามในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองเกิดขึ้น ค่าความร้อนที่ประมาณได้ยังคงมีความผิดพลาดไปจากค่าจริงอยู่

วีรยุทธ (2543) นำเสนอแบบจำลองสำหรับประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา 4 แบบเพื่อใช้งานร่วมกับตัวควบคุมจีเอ็มซี ในการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนแบบกะ โดยใช้ตัวกรองคาลมานแบบยืดขยายเป็นตัวประมาณค่า เนื่องจากแบบจำลองเชิงเส้นคู่ (bilinear) ที่นำเสนอโดย Kershenbaum และ Kittisupakorn (1994) ยังให้ผลที่ไม่ดีมากในกรณีที่มีความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองและในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนการวัด โดยแบบจำลองที่หนึ่งใช้แบบจำลองเชิงเส้นคู่ซึ่งค่าความร้อนขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิในลักษณะเชิงเส้น ส่วนแบบจำลองที่สองและสามนั้นค่าความร้อนขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิในรูปเอกซ์โปเนนเชียล ส่วนแบบจำลองสุดท้ายนั้น

ให้ค่าความร้อนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในลักษณะเชิงเส้นและในลักษณะกำลังสองของอุณหภูมิ ซึ่งผลการจำลองผลการควบคุมพบว่าแบบจำลองที่ 1, 2 และ 3 ให้ผลในลักษณะเดียวกันและดีกว่าแบบจำลองที่ 4

ตารางที่ 2.1 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมจีเอ็มซี

ลักษณะงานวิจัย	ผู้วิจัย/ปี
นำเสนอการควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล	-Lee และ Sullivan/1988
นำเสนอการควบคุมแบบอาร์จีเอ็มซี	-Lundberg และBenzanson /1990
จีเอ็มซีที่มีการชดเชยความล้าช้าเชิงเวลา	-Lee และคณะ/1990
จีเอ็มซีที่มีข้อบังคับ	-Brown และ คณะ/1990 -Xie และ คณะ/2000
อะแดพทีฟจีเอ็มซี	-Rani และ Gangiah/1991 -Signal และ Lee/1992 -Xie และ คณะ/1999
เสนอการจูนจีเอ็มซีแบบ ATV	-Flathouse และ Riggs/1996
การกำจัด Reset Windup ในจีเอ็มซี	-Ou และ คณะ/1998
การใช้จีเอ็มซีกับเครื่องทำให้กลายเป็นไอ	-Lee และ คณะ/1989
การใช้จีเอ็มซีกับเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ	-Cott และ Macchietto/1989 -Kershenbaum และ Kittisupakorn/1994 -Liu และ Macchietto/1994 -นุศรา/2542
การใช้จีเอ็มซีกับเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง	-Riggs และ Rhinehart/1990 -Piovoso และ คณะ/1992 -อนุพัฒน์ /2544
การใช้จีเอ็มซีกับเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ	-ธนากร/2541
การใช้จีเอ็มซีกับกระบวนการกลั่น	-Cott และ คณะ/1989 -Rani และGangiah/1991 -Douglas และ คณะ/1994
การใช้จีเอ็มซีกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	-Riggs และ Rhinehart/1990

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลักษณะงานวิจัย	ผู้วิจัย/ปี
การใช้จีเอ็มซีกับการควบคุมระดับ	-Lee และ คณะ/1991
การใช้จีเอ็มซีกับกระบวนการตกผลึก	-Farrell และ Tsai/1995 -Shen และคณะ/1999
การใช้จีเอ็มซีกับกระบวนการควบคุม pH	-Manzi และ Odloak/1998
ความเท่าเทียมกันของจีเอ็มซีและจีแอลซี	-McLellan และ คณะ/1990 -Lee/1991 -Kravaris และ Arkun/1991 -Piovoso และ คณะ/1992 -Liu และ Macchietto/1994 -Barolo/1994

จากงานวิจัยที่ผ่านมานี้จะเห็นได้ว่าการพัฒนาตัวควบคุมจีเอ็มซีมีมาอย่างต่อเนื่อง และสามารถประยุกต์ใช้จีเอ็มซีในการควบคุมกระบวนการทางเคมีได้มากมาย อย่างไรก็ตามจีเอ็มซีนั้นเป็นตัวควบคุมสำหรับระบบที่มีค่าระดับสัมพัทธ์หนึ่งเท่านั้น การพัฒนาจีเอ็มซีเพื่อใช้กับระบบที่มีค่าระดับสัมพัทธ์มากกว่าหนึ่งยังไม่ปรากฏให้เห็น เพราะเมื่อต้องการควบคุมระบบดังกล่าวจะสามารถใช้วิธีการของจีแอลซีแทนได้ แต่การใช้จีแอลซีกับระบบที่มีค่าระดับสัมพัทธ์มากกว่าหนึ่งนี้จะมีความซับซ้อนในการคำนวณค่าการควบคุมเพิ่มขึ้นมาด้วย