บทที่ 2

ผลงานวิจัยที่ผ่านมา

บทนี้กล่าวถึงผลงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งแบ่งเป็นผลงานทางด้านการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟในกระบวนการอุตสาหกรรมโดยทั่วไป ผลงานทางด้านการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบต่าง ๆ ในการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่อง และผลงานทางด้านการประยุกต์ใช้ระบบการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟในการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่อง

2.1 ผลงานการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟในอุตสาหกรรมเคมีโดยทั่วไป

การกล่าวถึงการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟสำหรับการควบคุมกระบวนการต่างๆ ครั้งแรกนำเสนอโดย Richalet ในการประชุมทางวิชาการในปี 1976 (Richalet, Rault, Testud and Papon, 1976) ซึ่งต่อมาได้นำมาสรุปไว้เป็นบทความในวารสาร Automatica (Garcia, Prett and Morari et al., 1989) Richalet (1976) ได้พัฒนาอัลกอริธึมของการควบคุมแบบโมเดลฮิว-ริสติก (Model Predictive Heuristic Control, MPHC) หรือโมเดลอัลกอริธึม (Model Algorithm Control, MAC) โดยซอฟแวร์ที่พัฒนาคือ IDCOM ซึ่งเป็นอักษรย่อตัวแรกของ Identification และ Command โดย นำไปประยุกต์ใช้ในเชิงการค้า รูปแบบที่โดดเด่นของ IDCOM คือ การใช้แบบจำลองการตอบสนองแบบอิมพัลส์ (impulse response model) ของกระบวนการซึ่งเป็นเชิงเส้นในตัวแปรเข้า (input variables) และตัวแปรภายใน (internal variables) ต่าง ๆ , สมรรถนะที่ต้องการสามารถกำหนดผ่านออฟเจ็กทีฟฟังก์ชั่นผ่านแกนการทำนายที่จำกัด (finite prediction horizon), พฤติกรรมของเอาท์พุทของกระบวนการในอนาคตถูกกำหนดโดยค่าอ้างอิง (reference trajectory),

ขอบเขตจำกัดต่าง ๆ ของอินพุทและเอาท์พุท (input and output constraints) สามารถรวมเข้าไว้ในแบบจำลองสำหรับการควบคุมสำหรับการคำนวณค่าตัวแปรอินพุทที่เหมาะสมโดยใช้อัลกอริธึมแบบฮิวริสติกอิเทอเรชั่น (heuristic iteration) Richalet ได้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอินพุทและเอาท์พุทต่าง ๆ ของกระบวนการโดยใช้แบบจำลองของการตอบสนองอิมพัลส์แบบดิสครีต (Discrete-time Finite Impulse Response (FIR) model) โดยได้อธิบายถึงการประยุกต์ใช้อัลกอริธึมนี้กับหน่วยของฟลูอิดคะตะไลติกแครกกิ้ง (Fluid Catalytic Cracking Unit, FCCU) ซึ่งเกี่ยวกับการควบคุมอุณหภูมิของเทรย์ที่เป็นกุญแจสำคัญ (key tray) เพื่อที่จะคงเสถียรภาพขององค์ประกอบของสายของผลิตภัณฑ์หนักและเบา เครื่องควบคุมจะปรับอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เพื่อชดเชยสำหรับอุณหภูมิขาเข้าซึ่งเป็นตัวแปรรบกวนระบบ และเพื่อรักษาระดับของสารกุญแจสำคัญในเทรย์, การประยุกต์ใช้กับโรงงานผลิตพลังงานจากไอน้ำซึ่งเกี่ยวกับการควบคุมอุณหภูมิและความดันของไอน้ำที่จะส่งไปยังเทอร์ไบน์ ซึ่งการประยุกต์ใช้ในงานนี้มีความน่าสนใจเนื่องจากเวลาการตอบสนองของกระบวนการแปรเปลี่ยนกลับกับโหลด (load) ในระบบ นอกจากนี้ยังกล่าวถึงการประยุกต์ใช้กับโรงงานผลิตโพลีไวนิลคลอไรด์ (Poly Vinyl Chloride, PVC) ซึ่งกระบวนการดังกล่าวข้างต้นเป็นกระบวนการแบบหลายตัวแปร (multivariable processes) ที่มีขอบเขตจำกัดในการดำเนินงาน

จากจุดเริ่มต้นของ IDCOM ในยุคแรกนั้น ต่อมาวิศวกรจากบริษัท Adersa และ Setpoint ได้พัฒนารูปแบบใหม่ของ IDCOM โดยให้ชื่อว่า IDCOM-M นำเสนอเป็นครั้งแรกโดย Grosdidier and Hammann (1988) มีการใช้อัลกอริธึมของควอดราติกโปรแกรม (Quadratic Program) แทนเทคนิคของการหาคำตอบโดยวิธีอิเทอเรชั่น นอกจากนี้บทความที่นำเสนอเป็นครั้งที่ 2 ในการประชุมของ AIChE ในปี 1990 ได้อธิบายถึงการประยุกต์ใช้กับปัญหาการควบคุมของบริษัทเชลล์และได้ให้รายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการแก้ปัญหาขอบเขตจำกัด ข้อแตกต่างที่สำคัญของ IDCOM-M คือจะใช้ออฟเจ็กทีฟฟังก์ชั่นแยกกันเป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งสำหรับเอาท์พุทและอีกส่วนหนึ่งสำหรับอินพุท Grosdidier ได้แสดงผลของการจำลองปัญหาการควบคุมหน่วยของฟลูอิดคะตะไลติกแครกกิ้งซึ่งเกี่ยวกับการควบคุมสารองค์ประกอบ, อุณหภูมิของก๊าซเชื้อเพลิง, อุณหภูมิของเบด โดยการปรับอัตราการไหลของน้ำมันขาเข้า

ก่อนหน้านี้วิศวกรจากเชลล์ได้พัฒนาเทคโนโลยีของโมเดลพรีดิกทีฟเป็นของตนเองตั้งแต่ต้นปี 1970 และได้เริ่มต้นประยุกต์ใช้ในปี 1973 Cutler and Ramaker (1990) ได้เสนอรายละเอียดของอัลกอริธึมของการควบคุมแบบหลายตัวแปรที่ไม่มีขอบเขตจำกัดซึ่งให้ชื่อว่าการควบคุมแบบ

ไดนามิกส์เมตริกซ์ (Dinamic Matric Control, DMC) ในการประชุมของ AIChE ในปี 1979 และในการประชุมของ Joint Automatic Control ในปี 1980 ซึ่งในปีเดียวกันนี้ Prett and Gillette (1980) ได้อธิบายถึงการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีของไดนามิกส์เมตริกซ์ กับ เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดคะตะไลติกซึ่งอัลกอริธึมได้ถูกปรับปรุงให้สามารถแก้ปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้นและการมีขอบเขตจำกัดต่าง ๆ รูปแบบที่สำคัญของอัลกอริธึมของการควบคุมแบบไดนามิกส์เมตริกซ์ คือการใช้แบบจำลองของการตอบสนองแบบสเต็บแบบเชิงเส้น (linear step response model) สำหรับกระบวนการ, สมรรถนะสามารถกำหนดผ่านออฟเจ็กทีฟฟังก์ชั่นผ่านแกนการทำนายที่จำกัด (finite prediction horizon), พฤติกรรมของเอาท์พุทของกระบวนการในอนาคตถูกกำหนดโดยความพยายามในการติดตามค่าเซ็ทพอยท์ให้ใกล้เคียงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ และค่าของอินพุทที่เหมาะสมสามารถคำนวณโดยการหาคำตอบของปัญหาของการหาค่าที่น้อยที่สุดกำลังสอง (least– squares) ซึ่งแบบจำลองเชิงเส้นของการตอบสนองแบบสเต็บที่ใช้ในอัลกอริธึมของไดนามิกส์เมตริกซ์จะโยงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงเอาท์พุทของกระบวนการกับผลรวมน้ำหนักของการเปลี่ยนแปลงอินพุทในอดีต

วัตถุประสงค์ที่สำคัญของการควบคุมแบบไดนามิกส์เมตริกซ์คือความต้องการที่จะผลักดันให้เอาท์พุทเข้าใกล้เซ็ทพอยท์ให้มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้โดยการปรับออฟเจ็กทีฟฟังก์ชั่นที่กำหนดขึ้น Cutler and Ramaker (1979) ได้แสดงผลของการประยุกต์ใช้ การควบคุมแบบไดนามิกส์เมตริกซ์ในการควบคุมอุณหภูมิของเตาหลอมโลหะ เพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของการควบคุมที่ดีขึ้นเนื่องจากการตอบสนองแบบป้อนไปข้างหน้าของอัลกอริธึมของไดนามิกส์เมตริกซ์ต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขาเข้านั้นดีกว่าการควบคุมแบบพีไอดีธรรมดาที่ใช้ตัวชดเชยแบบลีด/แลก (conventional PID lead/lag compensator) Prett and Gillette (1980) ได้อธิบายการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบไดนามิกส์เมตริกซ์กับหน่วยของ ฟลูอิดคะตะไลติก ซึ่งการประยุกต์ใช้ดังกล่าวได้แบ่งการควบคุมเป็นส่วนของการออฟติไมซ์ขอบเขตจำกัดซึ่งใช้โปรแกรมเชิงเส้น(Linear Programming ; LP) และ ส่วนของการควบคุมไดนามิกส์ (dymamic control) นอกจากนี้ยังได้อธิบายถึงการปรับปรุงอัลกอริธึมของการควบคุมแบบไดนามิกส์เมตริกซ์เพิ่มเติมเพื่อป้องกันการละเมิดค่าสัมบูรณ์ของขอบเขตจำกัดของอินพุท (absolute input constraints) และต่อมาได้มีการศึกษาผลของพารามิเตอร์ที่ออกแบบต่อสมรรถนะของการควบคุมแบบไดนามิกส์เมตริกซ์โดยใช้ตัวอย่างแบบลูพเดียว

ต่อมา Prett and Garcia (1988) ได้นำเสนอวิธีการที่ซึ่งอัลกอริธึมของการควบคุมแบบไดนามิกส์เมตริกซ์ที่อยู่บนพื้นฐานแบบจำลองการตอบสนองแบบสเต็บนั้นสามารถทำให้อยู่ในรูปของ

แบบจำลองสเตตสเปซในเวลาดิสครีต (discrete-time state space model) ซึ่งเรียกว่าสเตตสเปซไดนามิกส์เมตริกซ์ (State Space Dinamic Matrix Control, DMCss) ไดนามิกส์เมตริกซ์และสเตตสเปซไดนามิกส์เมตริกซ์แตกต่างกันเพียงการนำเสนอแบบจำลองภายใน (internal model) เท่านั้น

สำหรับการพัฒนาการควบคุมแบบไดนามิกส์เมตริกซ์ในขั้นต่อมานั้นมีจุดประสงค์เพื่อลดความไม่เป็นเชิงเส้นที่ปรากฏในกระบวนการและเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องควบคุมแบบไดนามิกส์เมตริกซ์ เริ่มจาก Georgiou (1988) ได้นำเสนอวิธีการแปลงค่าตัวแปร (variable transformation) ซึ่งเป็นไดนามิกส์เมตริกซ์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Dinamic Matrix Control, NLDMC) ที่ใช้แบบจำลองการตอบสนองแบบสเต็บในรูพเปิดของทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นเพื่อสร้างแบบจำลองคอนโวลูชั่น (convolution model) โดยประยุกต์ใช้กับหอกลั่นที่มีความบริสุทธิ์สูง ต่อมา Chang and Wang (1992) ได้ใช้วิธีการเดียวกันนี้โดยทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของไดนามิกส์เมตริกซ์แบบไม่เชิงเส้นกับไดนามิกส์เมตริกซ์แบบมาตรฐานในการควบคุมหอกลั่นที่มีความบริสุทธิ์สูงซึ่งเป็นแบบจำลองที่จำลองโดย Chiang (1985) นอกจากนี้ Lundstrom, Lee and Morari (1995) ได้ศึกษาข้อจำกัดต่าง ๆ ของไดนามิกส์เมตริกซ์ต่อสมรรถนะของการควบคุม ข้อจำกัดดังกล่าวคือ สมรรถนะที่ดีในการควบคุมนั้นต้องการจำนวนของสัมประสิทธิ์การตอบสนองแบบสเต็บที่มากเกินพอ, สมรรถนะที่ไม่ดีอาจพบได้ในกรณีที่มีค่าตัวแปรรบกวนระบบต่าง ๆ ที่ส่งผลต่ออินพุทของกระบวนการและ สมรรถนะความทนทานของระบบนี้อาจลดลงในกรณีของกระบวนการแบบหลายตัวแปรที่มีปฏิกิริยารุนแรง

จากข้อจำกัดเหล่านี้ Lee (1992) ได้นำเสนออัลกอริธึมของโมเดลพรีดิกทีฟบนพื้นฐานของตัวสังเกตการณ์ (Observer based MPC, OBMPC) ซึ่งสามารถกำจัดข้อจำกัดต่าง ๆ ของการควบคุมแบบไดนามิกส์เมตริกซ์ และยังรักษาคุณสมบัติที่ดีต่าง ๆ ไว้ทั้งหมด หากมองโดยรวมอัลกอริธึมของโมเดลฮิวริสติกและไดนามิกส์เมตริกซ์นี้มีรูปแบบที่คล้ายกันคือการใช้แบบจำลองไดนามิกส์ของกระบวนการในการทำนายผลของแอคชั่นของตัวแปรปรับในอนาคตต่อเอาท์พุทของกระบวนการ, การเคลื่อนที่ของตัวแปรปรับในอนาคต (future control moves) คำนวณจากการออฟติไมซ์ด้วยออฟเจ็กทีฟฟังชั่นด้วยการทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ทำนายน้อยที่สุดภายใต้ขอบเขตจำกัด (constrains) ของการดำเนินการต่าง ๆ โดยอาจกล่าวได้ว่าอัลกอริธึมแรกเริ่มของโมเดลฮิวริสติกและไดนามิกส์เมตริกซ์เป็นตัวแทนของเทคโนโลยีของการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟรุ่นแรกซึ่งมีผลอย่างมากต่อการควบคุมกระบวนการอุตสาหกรรมและได้กลายมาเป็นมาตรฐานในการออกแบบการควบคุมในอุตสาหกรรม

ถึงแม้ว่าอัลกอริธึมของการควบคุมแบบโมเดลฮิวริสติก และ ไดนามิกส์ ในยุคแรก ๆ นั้นจะให้การควบคุมที่ดีสำหรับกระบวนการแบบหลายตัวแปรที่ไม่มีขอบเขตจำกัดต่างๆ แต่ยังไม่สามารถที่จะใช้กับปัญหาการมีขอบเขตจำกัดอย่างมาก (hard constraints) ในการควบคุมได้ จากจุดอ่อนนี้ วิศวกรของบริษัทเชลล์จึงได้พัฒนาอัลกอริธึมของการควบคุมแบบไดนามิกส์เมตริกซ์ ซึ่งกำหนดเป็นควอดราติกโปรแกรม (Quadratic Program, QP) โดยให้ชื่อว่าการควบคุมแบบควอดราติกไดนามิกส์เมตริกซ์ (Quadratic Dinamic Matric Control, QDMC) โดยขอบเขตจำกัดต่าง ๆ จะปรากฏอย่างชัดเจนในอัลกอริธึมสำหรับการควบคุม รูปแบบที่สำคัญของอัลกอริธึมของการควบคุมแบบควอดราติกไดนามิกส์เมตริกซ์นั้นจะเหมือนกับการควบคุมแบบไดนามิกส์เมตริกซ์แต่การคำนวณค่าอินพุทที่เหมาะสมนั้นเป็นการหาคำตอบของควอดราติกโปรแกรมเท่านั้น

Cutler, Morshedi and Haydel (1983) ได้อธิบายอัลกอริธึมของควอดราติกไดนามิกส์เมตริกซ์ครั้งแรกในบทความในการประชุมของ AIChE ซึ่ง Garcia and Moshedi (1986) ได้รวบรวมรายละเอียดเพิ่มขึ้นในหลายปีต่อมา เริ่มต้นด้วยการนำเสนออัลกอริธึมของไดนามิกส์เมตริกซ์แบบไม่มีขอบเขตจำกัดรวมทั้งการอธิบายที่น่าสนใจเกี่ยวกับการปรับจูนเครื่องควบคุมซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัลกอริธึมของไดนามิกส์เมตริกซ์จะมีเสถียรภาพในลูพปิดเมื่อแกนการทำนาย (prediction horizon) ถูกกำหนดให้ยาวพอ นอกจากนี้ยังแสดงวิธีการเขียนออฟเจ็กทีฟฟังก์ชั่นของการควบคุมแบบไดนามิกส์เมตริกซ์ใหม่ในรูปของควอดราติกโปรแกรมแบบมาตรฐาน ซึ่งโปรเจ็กเอาท์พุทในอนาคต (future projected outputs) สามารถถูกเชื่อมโยงโดยตรงกลับไปยังเวกเตอร์ของการเคลื่อนที่ของอินพุทผ่านไดนามิกส์เมตริกซ์ซึ่งทำให้ขอบเขตจำกัดต่าง ๆ ทั้งหมดของอินพุทและเอาท์พุทถูกเก็บในเมตริกซ์ซึ่งเกี่ยวกับเวกเตอร์ของการเคลื่อนที่ของอินพุท นอกจากนี้ยังได้เสนอผลของการประยุกต์ใช้กับเตาไพโรไลซีส (pyrolysis furnace) โดยเครื่องควบคุมแบบควอดราติกไดนามิกส์เมตริกซ์จะทำการปรับความดันของก๊าซเชื้อเพลิงในเตาเผา (burners) 3 เตาเพื่อที่จะควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำที่ 3 ตำแหน่งในเตาไพโรไลซีส และยังได้รายงานผลในการประยุกต์ใช้กับปัญหาต่าง ๆ ในการควบคุมของเชลล์ซึ่งรวมถึงกระบวนการที่มีจำนวนอินพุทและเอาท์พุทมากถึง 12×12 ตัว ได้เป็นอย่างดี

การพัฒนาของการควบคุมแบบควอดราติกไดนามิกส์เมตริกซ์ในช่วงแรกนั้นเป็นการพัฒนาสำหรับกระบวนการที่เป็นเชิงเส้นซึ่งต่อมาได้ประสบความสำเร็จในการขยายไปสู่กระบวนการที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยนักวิจัยจำนวนมาก (Garcia, 1984; Eaton and lawlings, 1989; Sistu and Bequette, 1992) ข้อดีของการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เป็นเชิงเส้นคือสามารถควบคุมกระบวนการที่มีความหน่วงเวลา (time-delays), กระบวนการที่มีขอบเขตจำกัด (constraints) ต่าง ๆ กระบวนการ

ที่ไม่มีเฟสต่ำสุด (non-minimum phase) และรวมถึงการกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์ในอนาคตด้วย

ดังนั้นต่อมา Garcia (1984) ได้อาศัยพื้นฐานของการควบคุมแบบควอดราติกไดนามิกส์เมตริกซ์ในการควบคุมกระบวนการต่าง ๆ ที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยการปรับปรุงเบื้องต้นในการคำนวณสำหรับความไม่เป็นเชิงเส้นต่าง ๆ เป็นวิธีซึ่งผลของการเคลื่อนที่ของการควบคุมในอดีต (past control move) ถูกคำนวณในเฟสของการทำนาย (prediction phase) ซึ่งโปรเจ็กชั่นนั้นทำได้โดยการอินทีเกรทสมการอนุพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear ODEs) จากค่าสเตตในปัจจุบันผ่านแกนการทำนายโดยให้ตัวแปรปรับคงที่ การสมมติที่สำคัญในการควบคุมแบบควอดราติกไดนามิกส์เมตริกซ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น(Nonlinear Quadratic Dynamic Matrix Control, NLQDMC) คือสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง (model coefficients) ยังคงคงที่สำหรับแต่ละการเคลื่อนที่ของการควบคุมในอนาคตที่ถูกคำนวณ และมีการใช้ไดนามิกส์เมตริกซ์ (dinamic matrix) ในการคำนวณผลของแอคชั่นของตัวแปรปรับในอนาคตบนเอาท์พุทที่ทำนาย โดยแบบจำลองเชิงเส้นที่ใช้ ได้มาจากการทำการประมาณเชิงเส้น (linearization) ของแบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นที่แต่ละช่วงเวลา ในการคำนวณสัมประสิทธิ์ของการตอบสนองแบบสเต็บ ซึ่งจะใช้ในการทำนายที่สเต็บถัดไป

ต่อมาได้มีการพัฒนาอัลกอริธึมสำหรับการควบคุมร่วมกับเทคนิคการประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์โดย Gattu and Zafiriou (1992) ได้นำเสนอผลการค้นคว้าในการประยุกต์ใช้ควอดราติกไดนามิกส์เมตริกซ์แบบไม่เชิงเส้นและได้ใช้คาลมานฟิลเตอร์ (Kalman filter) เป็นพื้นฐานในการทำนายค่าสเตต โดยได้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการควบคุมในกรณีที่มีการรบกวนระบบที่จุดการดำเนินการที่ไม่มีเสถียรภาพของลูพเปิด สำหรับการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์โพลิเมอร์ไรเซชั่น ในขณะที่ควอดราติกไดนามิกส์เมตริกซ์แบบเชิงเส้นไม่สามารถใช้สำหรับกระบวนการที่ไม่มีเสถียรภาพของลูพเปิดได้

นอกจากการพัฒนาจากการควบคุมแบบไดนามิกส์เมตริกซ์มาเป็นควอดราติกไดนามิกส์เมตริกซ์แล้ว Lee and Park (1992) ได้เสนอวิธีการควบคุมแบบไดนามิกส์เมตริกซ์ที่ใช้ร่วมกับข่ายงานนิวรัล (Neural Network) โดยเชื่อมต่อข่ายงานนิวรัลในแนวขนานกับตัวควบคุมแบบไดนามิกส์เมตริกซ์ โดยมีสมมติฐานว่า ตัวรบกวนหลัก ๆ สามารถวัดได้ ซึ่งได้ประยุกต์ใช้ในการควบคุมหอกลั่น และการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์แบบไม่เชิงเส้น จากผลการทดลองพบว่าตัวควบคุมแบบไดนามิกส์เมตริกซ์ที่ใช้ข่ายงานนิวรัลเป็นตัวควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้ามีสมรรถนะที่ดีกว่าการใช้ตัวควบคุมแบบไดนามิกส์เมตริกซ์เพียงอย่างเดียว

สำหรับการศึกษาค้นคว้าอีกด้านหนึ่ง Garcia and Morari (1982) ได้นำเสนออัลกอริธึมที่เรียกว่า การควบคุมแบบอินเทอนัลโมเดล (Internal Model Control, IMC) ซึ่งกล่าวกันว่าการควบคุมแบบอิน-เทอนัลโมเดลเป็นตัวแทนของการเริ่มต้นที่ดีสำหรับการออกแบบและวิเคราะห์เครื่องควบคุมสำหรับกระบวนการแบบเชิงเส้นที่มีตัวแปรอินพุทและเอาท์พุทเดียว (Single Input Single Output, SISO) หรือมีตัวแปรอินพุทเอาท์พุทหลายตัวแปร (Multi Input Multi Output, MIMO) ในเบื้องต้นการควบคุมแบบอินเทอนัลโมเดลถูกใช้ในการควบคุมระบบต่าง ๆ ที่มีเวลาหน่วง (dead-time) (Smith, 1985)

การควบคุมแบบอินเทอนัลโมเดล เป็นการควบคุมที่มีประสิทธิภาพสำหรับระบบที่เป็นเชิงเส้นซึ่งอธิบายโดยแบบจำลองของทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่น (transfer function models) วิธีการออกแบบเครื่องควบคุมอยู่บนพื้นฐานของแบบจำลองของกระบวนการแบบเชิงเส้นที่สมมติขึ้นทั้งเวลาต่อเนื่องและดิสครีตและมีการเชื่อมโยงการตั้งเครื่องควบคุมกับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกระบวนการโดยทางตรง อีกทั้งสามารถให้ผู้ออกแบบทดสอบสมรรถนะและความทนทานของการควบคุมต่อการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ของกระบวนการและความผิดพลาดต่าง ๆ ของแบบจำลอง ค่าการตอบสนองที่ทำนายโดยแบบจำลองจะถูกหักออกจากค่าการตอบสนองจริง ค่าความแตกต่าง(เนื่องจากความผิดพลาดของแบบจำลองหรือตัวรบกวนระบบที่ไม่ทราบค่า)จะถูกส่งผ่านทิศทางการป้อนกลับ โดยได้มีผู้แสดงให้เห็นถึงความคล้ายคลึงกันของการควบคุมแบบอินเทอนัลโมเดลกับการควบคุมแบบป้อนกลับธรรมดา นอกจากนี้อินทีกรัลแอคชั่น (integral action) ยังสามารถรวมเข้าไว้ในโครงสร้างของเครื่องควบคุม

ต่อมาได้มีการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบอินเทอนัลโมเดล ร่วมกับเทคนิคการประมาณค่าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุม โดยจะช่วยให้เครื่องควบคุมมีความทนทานมากขึ้น Wellsons and Edgar (1987) ได้แสดงให้เห็นวิธีการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบอินเทอนัลโมเดลร่วมกับตัวทำนายค่าแบบ GPA (Generalized Analyticcal Predictor) เพื่อปรับปรุงการควบคุมในกรณีที่มีค่าตัวแปรรบกวนระบบให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

นอกจากนี้ยังได้มีผู้นำเสนอการแปลงวิธีการของการควบคุมแบบไดนามิกส์เมตริกซ์ไปเป็นการควบคุมแบบอินเทอนัลโมเดล ที่สอดคล้องกัน (Xi, 1984) ได้มีการนำใช้เครื่องควบคุมแบบอินเทอนัลโมเดล/ไดนามิกส์เมตริกซ์ ในการควบคุมเครื่องบดกระดาษ (paper mill) นำเสนอโดย Matsko (1985) Matsko ได้กล่าวถึงสมรรถนะที่ดีของเครื่องควบคุมแบบอินเทอนัลโมเดลในการควบคุมหน่วยปฏิบัติการต่าง ๆ ในช่วงกว้าง Levien (1985) ได้สรุปถึงการควบคุมโดยอาศัยเครื่อง

ควบคุมแบบอินเทอนัลโมเดลสำหรับคอลัมม์ที่ใช้แยกองค์ประกอบของสารผสม 3 อย่าง (ternary mixture) ซึ่งให้ผลดีกว่าเครื่องควบคุมแบบตัวแปรอินพุทเอาท์พุทตัวแปรเดียว 3 ตัว

จากการที่ตัวควบคุมแบบอินเทอนัลโมเดลแบบเชิงเส้นนั้น จำกัดสำหรับกระบวนการแบบไม่เชิงเส้นต่าง ๆ เนื่องจากการควบคุมแบบอินเทอนัลโมเดลแบบเชิงเส้นอยู่บนพื้นฐานของแบบจำลองทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่น ในขณะที่ระบบต่าง ๆ ที่ไม่เป็นเชิงเส้นมักอธิบายด้วยแบบจำลองสเตต-สเปซที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาการควบคุมแบบอินเทอนัลโมเดลแบบไม่เป็นเชิงเส้นขึ้นมา (Nonlinear Internal Model Control, NIMC) โดยเริ่มจาก Economou (1986) ได้นำเสนอวิธีการของการควบคุมแบบอินเทอนัลโมเดลสำหรับระบบต่าง ๆ ที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่มีเสถียรภาพในลูพเปิด (openloop stable) และมีการผกผันที่คงตัว (stable inverses) โดยใช้ตัวดำเนินการอินพุทเอาท์พุทต่าง ๆ (input -output operators) เพื่อแสดงให้เห็นว่าเทคนิคของการควบคุมแบบอินเทอนัลโมเดลแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่พัฒนาขึ้นมานี้ให้ผลการควบคุมที่ดี ไม่มีออฟเซ็ท (offset) และมีเสถียรภาพเช่นเดียวกับแบบเชิงเส้น เครื่องควบคุมอยู่บนพื้นฐานของอินเวอร์สของแบบจำลองแบบไม่เชิงเส้น และฟิลเตอร์ถูกเพิ่มเข้าไปเพื่อคำนวณเกี่ยวกับขอบเขตจำกัดของอินพุท และความผิดพลาดต่าง ๆ ของแบบจำลอง อย่างไรก็ตามวิธีการของ Economou นั้นจำกัดต่อระบบที่มีเสถียรภาพในลูพเปิดและมีการผกผันที่คงตัวเท่านั้น

ต่อมา Calvet and Arkun (1988) ได้ใช้วิธีการของการควบคุมแบบอินเทอนัลโมเดลโดยการนำใช้การประมาณเชิงเส้นสเตตสเปซ (state space linearization) สำหรับกระบวนการที่ไม่เป็นเชิงเส้นต่าง ๆ ที่มีตัวรบกวนระบบ ซึ่งข้อเสียของการใช้วิธีการประมาณเชิงเส้นสเตตสเปซคือจะมีเอาท์พุทที่ถูกควบคุมที่ไม่แท้จริง (artificial controlled output) เกิดขึ้นในการออกแบบเครื่องควบคุม ข้อเสียอีกอย่างหนึ่งของวิธีนี้คือเครื่องควบคุมแบบไม่เชิงเส้นนั้นต้องการการป้อนกลับสเตต (state - feedback)

ทางเลือกอีกทางหนึ่งสำหรับวิธีการของการควบคุมแบบอินเทอนัลโมเดลสำหรับระบบต่าง ๆ ที่ไม่เป็นเชิงเส้นนำเสนอโดย Alvarez and Alvarez (1989) การติดตามค่าและการกำหนดพฤติกรรมของระบบลูพปิดสามารถกำหนดได้โดยอิสระผ่านแบบจำลองอ้างอิง 2 แบบจำลอง ซึ่งพัฒนาสำหรับการควบคุมแบบอินเทอนัลโมเดลแบบเชิงเส้นนอกจากนี้วิธีการดังกล่าวยังไม่ต้องการการป้อนกลับสเตต เนื่องจากแบบจำลองของกระบวนการทำหน้าที่เป็นตัวสังเกตการณ์ลูพเปิด (open-loop observal) แต่อย่างไรก็ตามการออกแบบแบบจำลองอ้างอิงเพื่อให้ได้สมรรถนะที่กำหนดนั้นทำได้ยาก

ต่อมา Isidori (1989) ได้นำเสนอการควบคุมแบบอินเทอนัลโมเดลแบบใหม่ ในรูปแบบของสมการสเตตสเปซซึ่งง่ายต่อการนำใช้มากกว่าของ Economou (1986) การใช้แบบจำลองผกผันของเครื่องควบคุม กับตัวกรองแบบไม่เชิงเส้น ช่วยทำให้เครื่องควบคุมมีเสถียรภาพและมีความสามารถในการนำใช้เพิ่มขึ้น ในการประยุกต์ใช้ Henson and Seborg (1991) ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้สำหรับระบบต่าง ๆ ที่มีตัวแปรอินพุทเอาท์พุทตัวเดียวแบบไม่เชิงเส้น เครื่องควบคุมได้ถูกออกแบบเพื่อให้ได้สมรรถนะที่ดีขึ้นและมีการใช้ตัวกรองแบบไม่เชิงเส้นเพื่อคำนวณสำหรับกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองและกระบวนการ ผลการจำลองสำหรับถังหมักแบบต่อเนื่อง (continuous fermmentor) แสดงให้เห็นประสิทธิภาพที่เหนือกว่าการควบคุมแบบพีไอธรรมดา

Nahas, Henson and Seborg (1992) ได้เสนอกลวิธีการควบคุมแบบอินเทอนัลโมเดลแบบไม่เชิงเส้น สำหรับแบบจำลองแบบนิวรัล โดยข่ายงานถูกฝึกให้เรียนรู้ไดนามิกส์แบบผกผันของกระบวนการโดยใช้ข่ายงานนิวรัลแบบ 3 ชั้นเพื่อระบุแบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นจากข้อมูลอินพุทและเอาท์พุท ตัวควบคุมประกอบด้วยตัวควบคุมแบบผกผันและตัวกรอง โครงสร้างของการควบคุมนี้รับประกันว่าจะไม่เกิดออฟเซ็ท แต่ใช้ได้กับกระบวนการที่มีการผกผันที่คงตัวเท่านั้น ได้ทำการทดสอบตัวควบคุมกับกระบวนการแบบไม่เชิงเส้นสองกระบวนการคือ การควบคุมเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องและกระบวนการปรับพีเอชให้เป็นกลาง (pH neutralization process) การทดสอบแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะที่ดีกว่าการควบคุมแบบพีไอดี ทั้งในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบและมีการเปลี่ยนแปลงค่าเซ็ทพอยท์แบบสเต็บ ต่อมา Ishida and Zhan (1995) ได้ประยุกต์ใช้อัลกอริธึมนี้ซึ่งเป็นข่ายงานนิวรัลแบบหลายชั้นในกระบวนการการตกผลึกแบบกะ (batch crystallization) ซึ่งเป็นกระบวนการแบบกระจายค่าพารามิเตอร์ (distributed parameter) ซึ่งให้ผลการควบคุมที่ดีทั้งกรณีที่ใช้ข่ายงานนิวรัลแบบ 2 ชั้นและแบบ 3 ชั้น ข้อดีของวิธีนี้คือสำหรับกระบวนการเคมีต่าง ๆ ที่หาแบบจำลองได้ยากนั้นข่ายงานนิวรัลสามารถเรียนรู้ไดนามิกส์ต่าง ๆ ของกระบวนการจากข้อมูลของอินพุทและเอาท์พุทของกระบวนการนั่นคือสามารถฝึกข่ายงานนิวรัลเป็นแบบจำลองของกระบวนการได้

นอกจากอัลกอริธึมต่าง ๆ ของโมเดลพรีดิกทีฟที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว Clark ยังได้พัฒนาอัลกอริธึมที่เรียกว่าโมเดลเบสพรีดิกทีฟ (Model Based Predictive Control, MBPC) ซึ่งอัลกอริธึมที่ได้รับการยอมรับอย่างมากคือการควบคุมแบบเจเนอไรซ์พรีดิกทีฟ (Generized Predictive Control, GPC) (Clark et al., 1987) ซึ่งสามารถนำได้ใช้ง่าย, การควบคุมมีความทนทาน และลดการคำนวณแอคชั่นของการควบคุม สามารถใช้กับปัญหาการควบคุมเป็นต้นว่า การควบคุมกระบวนการต่าง ๆ

ที่เป็นกระบวนการที่ไม่มีเฟสต่ำสุด, การควบคุมกระบวนการที่ไม่มีเสถียรภาพในลูพเปิด, การควบคุมกระบวนการที่มีเวลาหน่วงที่ไม่รู้ค่าหรือมีการแปรเปลี่ยน, การควบคุมกระบวนการที่ไม่ทราบอันดับ และกระบวนการที่มีขอบเขตจำกัดต่าง ๆ เป็นต้น

วิธีการของการควบคุมแบบเจเนอไรซ์พรีดิกทีฟ จะใช้แบบจำลองของกระบวนการแบบอะนาไลติก (analytic process model) ในการทำนายการตอบสนองของเอาท์พุทเพื่อตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับแอคชั่นของการควบคุม, การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของออฟเจ็กทีฟฟังก์ชั่น และยืนยันสัญญาณการควบคุมที่ดีที่สุดครั้งแรกที่ส่งไปควบคุมกระบวนการ ด้วยพารามิเตอร์ควบคุมต่าง ๆ สามารถรวมวิธีการควบคุมหลาย ๆ แบบที่มีอยู่เข้าไว้ในอัลกอริธึม นอกจากนี้ยังได้รวมอินทีกรัลแอคชั่นเข้าไว้ในลูพปิดเพื่อลดออฟเซ็ทของการควบคุมในกรณีที่มีการรบกวนระบบ สำหรับระบบต่าง ๆ ส่วนใหญ่ที่มีตัวแปรอินพุทเอาท์พุทตัวแปรเดียว (SISO) สามารถอธิบายโดยแบบจำลอง CARIMA (Controller Auto Regressive Integrated Moving-Average) (Clarke et al. 1987) ซึ่งเป็นแบบจำลองเชิงเส้น

Kuznetsov and Clarke (1994) ได้อธิบายถึงการประยุกต์ใช้อัลกอริธึมที่มีขอบเขตจำกัด (constrained GPC) เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของกระบวนการที่ถูกควบคุมโดยการกำหนดให้มีขอบเขตจำกัดที่แตกต่างกันถึง 4 แบบในการควบคุมกระบวนการที่ไม่มีเฟสต่ำสุด, กระบวนการที่มีการแกว่ง (oscillatory system) โดยการคำนวณแอคชั่นของการควบคุมลดรูปไปเป็นปัญหาของควอดราติกโปรแกรมมิ่ง (quadratic programming, QPGPC)

เนื่องจากรูปแบบเดิมของการควบคุมแบบเจเนอไรซ์พรีดิกทีฟนั้นไม่รับประกันเสถียรภาพของการควบคุมต่อมาจึงได้มีการพัฒนาอัลกอริธึมซึ่งสามารถรับประกันเสถียรภาพของการควบคุม (Stable Generalized Predictive Control, SGPC) นอกจากนี้ Narendra and Parthasarathy (1990) ยังได้พัฒนาแบบจำลองที่อยู่บนพื้นฐานของข่ายงานนิวรัล (Generalized neural network models) สำหรับการควบคุมกระบวนการแบบไม่เชิงเส้นต่าง ๆ

สำหรับการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบเจเนอไรซ์พรีดิกทีฟ นั้น Montague and Morris (1985) ได้ศึกษาการควบคุมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีค่าเวลาหน่วงที่แปรเปลี่ยนได้และการควบคุมมวลชีวภาพของกระบวนการหมักเพนนิซิลิน (penicillin fermentation process) โดยเขียนโปรแกรมภาษาฟอร์แทรน/โปรปาสคาลบนเครื่อง IBM PC ซึ่งได้แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะดีของการควบคุม Lu and Hogg (1994) ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้กับ 200 MW oil-fired power plant เพื่อปรับปรุงการตอบสนองทางไดนามิกส์โดยการควบคุมความดันของไอน้ำ เครื่องควบคุมได้ออก

แบบขึ้นเพื่อทดสอบการจำลองในเวลาจริงกับโรงงานแบบไม่เป็นเชิงเส้นในตอนเหนือของไอร์แลนด์ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการควบคุมมีเสถียรภาพมากกว่าการควบคุมแบบพีไอดีธรรมดาในช่วงสภาวะในการดำเนินการที่กว้าง

จากการพัฒนาอัลกอริธึมต่าง ๆ ที่ผ่านมาเช่นไดนามิกส์เมตริกซ์ (Cutler, 1983), โมเดลอัลกอริธึม (Richalet et al., 1976) และ อินเทอนัลโมเดล (Garcia and Morari, 1982) นั้นแบบจำลองสำหรับการทำนายพฤติกรรมของกระบวนการและคำนวณค่าการควบคุมนั้นมักมาจากการประมาณเชิงเส้นของกระบวนการของข้อมูลการตอบสนองแบบสเต็บที่ได้จากการทดลอง ซึ่งยังมีข้อเสียเนื่องจากในกระบวนการทางเคมีจริงมักแสดงพฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้นและกระบวนการทางเคมีหรือชีวเคมีบางกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมผ่านช่วงของเวลา สำหรับกระบวนการเหล่านี้ทำให้มีความต้องการที่จะพัฒนาเครื่องควบคุมที่มีแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยตัวของมันเอง ดังนั้น Lee and Sullivan (1988) จึงได้นำเสนอเครื่องควบคุมที่ชื่อว่าเจเนอริกโมเดล (Generic Model Control, GMC) ในบทความซึ่งได้อธิบายถึงโครงสร้างของการควบคุมว่าเป็นการควบคุมที่ต้องอาศัยแบบจำลองของกระบวนการโดยแบบจำลองที่ใช้ในการควบคุมจะเป็นแบบจำลองเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นก็ได้เนื่องจากสามารถใช้แบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นในตัวควบคุมแบบเจเนอริกโมเดลได้โดยตรง เพื่อที่จะกำหนดผลการตอบสนองที่ต้องการได้ ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้จึงไม่จำเป็นต้องทำให้เป็นเชิงเส้นก่อน แต่การประยุกต์ใช้งานของตัวควบคุมจะจำกัดแค่เพียงระบบซึ่งมีความเป็นเชิงเส้นในตัวแปรปรับ (linear in control) หรือระดับกำลังหนึ่ง (relative degree one) เท่านั้น สำหรับการปรับเครื่องควบคุมนั้นทำได้โดยการปรับจูนค่าพารามิเตอร์เพียง 2 ค่าเพื่อให้ได้ค่าการตอบสนองของระบบที่ต้องการ

ต่อมา Cott and Macchietto (1989) ได้ประยุกต์ใช้อัลกอริธึมแบบเจเนอริกโมเดล ของ Lee และ Sullivan ในการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบกะที่มีปฏิกิริยาคายความร้อน และอาศัยหลักการของการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา ของ Jutan and Uppal (1984) ซึ่งการควบคุมนี้สามารถควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการนี้ได้อย่างดีแต่การประมาณค่าความร้อนยังไม่ดีนัก ต่อมาได้มีผู้นำเสนอการประมาณค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาโดยอาศัยตัวกรองคาลมาน (Kalman filter) ตามเอกสารงานวิจัยของ Kittisupakorn (1994) จากงานวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการประมาณค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานั้นดีมาก สามารถประมาณได้ใกล้เคียงกับความร้อนที่เกิดขึ้นจริง. ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบเจเนอริกโมเดล ที่ใช้ร่วมกับการประมาณค่าความร้อนสามารถควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เคมีได้เป็นอย่างดี มีความทนทานสูงสามารถ

ประยุกต์ใช้กับกระบวนการจริงได้ดีกว่าการควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เคมีให้อยู่ที่ค่าเซ็ทพอยท์ที่ต้องการได้

การควบคุมแบบเจเนอริกโมเดลได้ประสบความสำเร็จในการประยุกต์ใช้ทั้งในระดับของโรงงานต้นแบบ (pilot-plant) และในระดับอุตสาหกรรมจำนวนมาก ให้ผลเปรียบเทียบดีกว่าหลายเทคนิคที่เป็นแบบตัวแปรอินพุทเอาท์พุทหลายตัวแปรที่อาศัยการประมาณเชิงเส้น Riggs and Rhinehart (1988) ได้ใช้อัลกอริธึมนี้ในการควบคุมระบบเตาหลอมทองเหลือง ซึ่งให้ผลที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการควบคุมแบบพีไอดี และได้มีการค้นพบว่าแบบจำลองสภาวะคงตัว (steady-state models) เหมาะสำหรับการลดความไม่เป็นเชิงเส้นในตัวควบคุมแบบเจเนอริกโมเดล

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการพัฒนาของการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ ยังคงมีอย่างต่อเนื่อง เทคโนโลยีของการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟรุ่นต่อมาได้พัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองต่อความต้องการในการใช้งานมากยิ่งขึ้น โดยสามารถควบคุมโดยใช้ออฟเจ็กทีฟฟังก์ชั่นได้มากกว่าหนึ่งฟังก์ชั่น แบบจำลองที่ใช้เป็นแบบจำลองแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear model) ซึ่งก็คือการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Model Predictive Control, NMPC) จากมุมมองในทางทฤษฎี การใช้แบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะเปลี่ยนปัญหาการควบคุมไปเป็นปัญหาซึ่งคำตอบหาได้ยากกว่ามาก การคำนวณแอคชั่นของการควบคุมทำได้โดยการแก้ปัญหาออฟติไมเซชั่นออนไลน์ โดยใช้แบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นในการทำนายแบบออนไลน์

Bequette (1991) ได้อธิบายหัวข้อต่าง ๆ ในการแก้ปัญหาของโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เชิงเส้นในบทความที่ได้รวบรวมการควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับกระบวนการเคมีต่าง ๆ ซึ่งได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากประสบความสำเร็จในการทดสอบและประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมจำนวนมาก แต่อย่างไรก็ตามสมรรถนะในการควบคุมอาจลดลงได้ในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลอง/กระบวนการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการต่าง ๆ ที่ไม่มีเสถียรภาพในลูพเปิดและมีไดนามิกส์ที่ช้า (slow dynamics) จึงได้มีการนำอัลกอริธึมของการประมาณค่ามาใช้ร่วมกับการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เชิงเส้นเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องควบคุมให้ดีขึ้น (Jang et. al. , 1987) ซึ่งเครื่องควบคุมสามารถติดตามค่าปัจจุบันของพารามิเตอร์ของแบบจำลองและประมาณค่าสภาวะเริ่มต้นของตัวแปรสเตตได้

สำหรับการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เชิงเส้นในอุตสาหกรรมนั้น Balchen(1989a)ได้กล่าวถึงการประยุกต์ใช้ในกระบวนการผสมโลหะด้วยวิธีการทางไฟฟ้า (electrometallurgical process) บริษัทอีสแมนโกดัก (Eastman Kodak) ได้ประยุกต์ใช้กับเครื่อง

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปฏิกรณ์เคมีแบบกะในการผลิตสารเคมีพิเศษ (Rawling et al., 1989) Sistu and Bequette (1990) ได้ใช้วิธีการประมาณค่าแบบเดียวกันนี้กับการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เชิงเส้นที่พัฒนาขึ้นเพื่อควบคุมระบบที่ไม่มีเสถียรภาพในลูพเปิด Wright et. al., (1991); Li and Biegler, (1990); Eaton and Rawlings, (1990) ได้ใช้อัลกอริธึมของการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เชิงเส้นที่ได้พัฒนาขึ้นร่วมกับวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์บนพื้นฐานของการออฟติไมเซชั่นเพื่อลดผลกระทบของความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่ไม่ทราบค่าและค่าตัวแปรรบกวนระบบที่วัดไม่ได้ ซึ่งทั้งพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่ไม่ทราบค่าและค่าตัวแปรรบกวนระบบที่วัดไม่ได้จะถูกประมาณออนไลน์โดยการลดความผิดพลาดระหว่างค่าวัดในอดีตและค่าการทำนายของเอาท์พุทของกระบวนการโดยใช้ซอฟท์แวร์ที่มีความสามารถในการออฟติไมซ์ Ali and Zafiriou (1993) ได้ประยุกต์ใช้อัลกอริธึมที่พัฒนาขึ้นร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์แบบยืดขยาย (Extended Kalman filter) โดยใช้ซอฟแวร์ CONSOLE วัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของการควบคุมกระบวนการที่มีไดนามิกส์ที่ช้าและไม่มีเสถียรภาพในลูพเปิดและมีค่าตัวแปรรบกวนระบบที่วัดไม่ได้ซึ่งให้ผลการควบคุมที่ดี

ถึงแม้ว่าการแก้ปัญหาของการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เชิงเส้นที่แต่ละสเต็บเวลารวมทั้งการปรับตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เชิงเส้นนั้นทำได้ยากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลอง Rawlings (1994) ได้แสดงให้เห็นว่าเสถียรภาพของ Lyapunov (Lyapunov stability) ซึ่งใช้สำหรับแบบจำลองเชิงเส้นนั้นสามารถใช้กับแบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นได้โดยมีการปรับเปลี่ยนเพียงเล็กน้อย การปรับเปลี่ยนที่สำคัญคือขอบเขตจำกัดต่าง ๆ ได้ถูกรวมเข้าไว้เพื่อทำให้ค่าสเตตต่าง ๆ เป็นศูนย์เมื่อสิ้นสุดแกนของอินพุท Wright and Edgar (1994) ได้ทำการเปรียบเทียบวิธีการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เชิงเส้น กับเครื่องควบคุมแบบอะแดฟทีฟแบบเชิงเส้น (adaptive linear controller) ในการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ (fixed-bed water-gas shift reactor) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เชิงเส้นมีประสิทธิภาพดีกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออยู่ในช่วงความไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงกว้าง

Proll and Karim (1994) ได้นำเสนอวิธีการควบคุมแบบอะแดฟทีฟโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เชิงเส้น (Adaptive Nonlinear Model Predictive Control, ANMPC) ซึ่งอาศัยแบบจำลอง NARX (onlinear autoregressive exogeneous input) (Leontaritis and Billings, 1985) ในการทำนายค่าเอาท์พุทในอนาคตของกระบวนการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียให้เป็นกลางซึ่งแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะที่ดีกว่าแบบจำลองเชิงเส้น

ต่อมา Ricker and Lee (1995) ได้ประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เชิงเส้นกับกระบวนการ (Tennessee eastman challenge process) ซึ่งแบบจำลองที่ใช้เป็นแบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นซึ่งประกอบด้วย 26 ตัวแปรสเตต, 10 ตัวแปรปรับ, 23 เอาท์พุทและ 15 ตัวแปรรบกวนระบบที่วัดไม่ได้ มีการประมาณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แบบออนไลน์เพื่อกำจัดออฟเซ็ทในเอาท์พุท จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการควบคุมนี้มีประสิทธิภาพเหนือกว่าการควบคุมแบบตัวแปรอินพุทเอาท์พุทตัวแปรเดียวแบบหลายลูพ (SISO multiloop)

ต่อมา Ali (1997) ได้ประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งเป็นเวอร์ชั่นที่พัฒนาโดย Ali และ Zafiriou ในปี 1993 ร่วมกับเทคนิคการออฟติไมซ์เพื่อประมาณความผิดพลาดของแบบจำลองออนไลน์โดยเป้าหมายของงานวิจัยนี้เพื่อที่จะนำใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เชิงเส้นในการแก้ปัญหาซึ่งเป็นรากฐานของการควบคุมหน่วยของฟลูอิดคะตะไลติกแครกกิ้ง (Industrial Type IV Fluid Catalytic Cracking, FCC) เพื่อให้ได้ผลผลิตของแก๊สโซลีนสูงที่สุดมากกว่าที่จะทดสอบสมรรถนะผ่านการซิมมูเลชั่น และจากการเปรียบเทียบผลการควบคุมกับเครื่องควบคุมแบบพีไอแบบดั้งเดิมพบว่าการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เชิงเส้นให้สมรรถนะที่ดีกว่าและสามารถนำใช้ได้ง่ายกว่าแต่ต้องอาศัยการปรับจูนเครื่องควบคุมอย่างระมัดระวัง

โดยสรุปแล้วจากผลงานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำให้ระบบการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟเป็นที่รู้จักเพิ่มมากขึ้นในอุตสาหกรรมเคมีต่าง ๆ Mehra (1982) ได้ตรวจสอบจำนวนของการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ ซึ่งรวมถึงการประยุกต์ใช้ในการควบคุม ซูเปอร์ฮีตเตอร์, เครื่องกำเนิดไอน้ำ, อุโมงค์ลม, หม้อต้มที่เชื่อมต่อกับหอกลั่น, เตาหลอมแก้ว บริษัทเชลล์ได้ประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟกับระบบต่างๆจำนวนมาก เช่น ฟลูอิดคะตะไลติกแครกเกอร์ (fluid catalytic cracker) (Prett and Gillette et al., 1980) เครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบกะ (batch reactor) ที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง (Garcia, 1984) Matsko (1985) ได้สรุปถึงความสำเร็จในการนำใช้หลาย ๆ อย่างในอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษ มีหลายบริษัทได้เสนอซอฟแวร์ของการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ (Bailey, DMC, Profimatics, Setpoint) เพื่อความสะดวกในการนำไปประยุกต์ใช้ได้ง่ายขึ้น Cutler and Hawkins (1987) ได้รายงานถึงการประยุกต์ใช้กับเครื่องปฏิกรณ์แบบไฮโดรแครกเกอร์ (hydrocracker reactor) ที่มีหลายตัวแปรและมีขอบเขตจำกัดของการดำเนินงาน Martin (1986) ได้กล่าวถึงการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์เคมีที่มีความรุนแรงและการควบคุมความดันที่แตกต่าง, การควบคุมอุณหภูมิขาออกของเบดและโพรไฟล์ของอุณหภูมิของเบดของ

เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรแครกเกอร์ บริษัทเซ็ทพอยท์ได้ประยุกต์เทคโนโลยีของการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟกับไฮโดรแครกเกอร์, ฟลูอิดคะตะไลติกแครกเกอร์, หอกลั่น, กระบวนการกลั่นแยกทางปิโตรเคมี (Grosdidier, 1987) ในสถาบันการศึกษาต่าง ๆ ได้มีการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟภายใต้สภาวะการควบคุมแบบต่าง ๆ ในการควบคุมถังกวนผสม (mixing tank) และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger) อย่างง่าย Parish and Brosilow (1988) ได้เปรียบเทียบผลการควบคุมกับการควบคุมแบบธรรมดา ในการควบคุมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและเตาอบในอุตสาหกรรม สำหรับการสำรวจการประยุกต์ใช้ในประเทศญี่ปุ่นนั้น Yamamoto and Hashimoto (1991) ได้รายงานการสำรวจโรงงานต่าง ๆ ในญี่ปุ่นจำนวน 139 โรงงานพบว่า 25.4% ของโรงงานที่สำรวจนี้ได้ประสบความสำเร็จในการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ และอีก 21.1% กำลังพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้

2.2 ผลงานการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่อง

สำหรับเครื่องปฏิกรณ์เคมีที่มีพฤติกรรมทางไดนามิกส์ที่ยุ่งยากซับซ้อนและมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงนั้นมักก่อให้เกิดปัญหาในการควบคุมซึ่งจะส่งผลให้การควบคุมทำได้ยาก Uppal (1974) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมที่ซับซ้อนของวงควบคุมแบบเปิดของเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่อง ซึ่งรวมถึงกระบวนการที่มีความหลากหลายของตัวแปรอินพุทตัวแปรเอาท์พุท, กระบวนการที่มีความว่องไวต่อค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ , กระบวนการที่มีการแกว่งเนื่องมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมาก เป็นต้น

Liu (1967) ได้ออกแบบเครื่องควบคุมที่ซึ่งค่าการตอบสนองที่ต้องการสำหรับแต่ละเอาท์พุทเป็นฟังก์ชั่นเชิงเส้นกับค่าความคลาดเคลื่อนของเอาท์พุทนั้นโดยได้ประยุกต์ใช้กับเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องซึ่งมีปฏิกิริยาอันดับ 2 ในการควบคุมอุณหภูมิและความเข้มข้น และแก้ปัญหาการมีขอบเขตจำกัดโดยการเปลี่ยนไดนามิกส์ของการตอบสนองของสเตตที่ต้องการ

ต่อมา Luyben (1968) ได้พัฒนาเทคนิคการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Feedforward Control) สำหรับการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่อง

Bruns and Bailey (1975) ได้ประยุกต์ใช้เครื่องควบคุมแบบ " Push-Pull " ในการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องแบบอุณหภูมิคงที่ (isothermal CSTR) ซึ่งเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชั่นและได้ประยุกต์อัลกอริธึมเดียวกันนี้กับเครื่องปฏิกรณ์แบบ 2 สเตต

Hoo and Kantor (1985) ได้ใช้วิธีการควบคุมแบบป้อนกลับแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear static state feedback) ในการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบไม่ผันกลับ (Uppal et al. 1974) โดยสมมติให้ทั้งอุณหภูมิและความเข้มข้นเป็นค่าที่สามารถวัดได้ ซึ่งต่อมาได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการควบคุมแบบป้อนกลับเอาท์พุท (nonlinear output feedback control) กับเครื่องปฏิกรณ์แบบเดียวกันโดยใช้ตัวสังเกตการณ์แบบไม่เชิงเส้นในการประมาณความเข้มข้นเมื่อกำหนดให้อุณหภูมิเป็นค่าที่วัดได้เท่านั้น ซึ่งการประมาณนี้จำกัดเฉพาะปฏิกิริยาอันดับ 1

ต่อมาได้มีการพัฒนาตัวสังเกตการณ์แบบอะแดฟทีฟ (adaptive observer) ขึ้นซึ่งสามารถใช้กับปฏิกิริยาที่มีอันดับมากกว่า 1 ได้ (Limqueco and Kantor, 1990) ต่อมาได้มีการใช้แบบจำลองของเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องของ Economou (1986) ในการทดสอบอัลกอริธึมของการควบคุมแบบ 2-เฟส (Two-phase algorithm) โดยเปรียบเทียบกับเครื่องควบคุมแบบอะแดฟทีฟและเครื่องควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะที่ดีกว่าของอัลกอริธึมแบบ 2-เฟส และยังแสดงให้เห็นถึงความทนทานของการควบคุมในกรณีที่มีความผิดพลาดของกระบวนการ/แบบจำลองและการป้องกันการรบกวนต่าง ๆ ที่วัดได้

ต่อมา Balchen (1988) ได้ประยุกต์ใช้ เทคนิคต่าง ๆ ของ Reference System Synthesis (RSS) กับเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องซึ่งมีปฏิกิริยาคายความร้อนอันดับ 1 และได้ศึกษาความไม่แน่นอนของค่าความจุความร้อน (heat capacity) และค่าพลังงานกระตุ้น (activated energy) ของปฏิกิริยา Bartusiak (1989) ได้ใช้เทคนิคเดียวกันนี้กับเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องซึ่งรวมไดนามิกส์ต่าง ๆ ของการหล่อเย็นและความหน่วงของค่าวัดต่ออุณหภูมิและความเข้มข้นของสาร ซึ่งต่อมา Adebekun and Schork (1991) ได้ใช้เทคนิคนี้ในการศึกษาเสถียรภาพของเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาอันดับ n (nth order kinetics CSTR)

Alvarez (1989) ได้ทำการศึกษาเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ด้วยเครื่องควบคุมแบบไม่เชิงเส้นซึ่งเลียนแบบมาจากเครื่องควบคุมแบบพีไอดี และในปีเดียวกัน Bequette (1989) ได้พัฒนาวิธีการควบคุมซึ่งไม่ต้องอาศัยความรู้เกี่ยวกับจนศาสตร์ของปฏิกิริยา (reaction kinetic) โดยที่พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ไม่ทราบค่าถูกรวมเป็นพารามิเตอร์ตัวเดียวในการประมาณค่าที่แต่ละสเต็บเวลา

Kravaris and Palanki (1988) ได้วิเคราะห์ความทนทาน ของการควบคุมแบบ Globally linearizing control, GLC ซึ่งอาศัยการประมาณเชิงเส้นของพฤติกรรมของอินพุทและเอาท์พุทของกระบวนการโดยประยุกต์ใช้กับเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีอุณหภูมิคงที่และมีปฏิกิริยาเคมีของสารหลายองค์ประกอบ (isothermal, multicomponent chemical reaction)

Sterman and Ydstie (1990) ได้วิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการดำเนินงานของเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องโดยใช้เครื่องควบคุมแบบรีเลย์ (relay controller) ซึ่งจะสามารถลดความผิดพลาดจากการวัดและค่าตัวแปรรบกวนระบบ และวิเคราะห์การควบคุมแบบลูพเปิดของเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องแบบก๊าซ-ของเหลว (gas-liquid CSTR) ที่มีตัวแปรอินพุทจำนวนมาก

Sadd and Bouslimani (1991) ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการควบคุมแบบพีไอดีอะแดฟทีฟ (PID Adaptive Control) ในการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องแบบอุณหภูมิไม่คงที่ (nonisothermal CSTR)

Calvet and Arkun (1988) ได้ออกแบบเครื่องควบคุมแบบพีและพีไอที่มีเสถียรภาพสำหรับการประมาณเชิงเส้นของสมการสเตตที่ประยุกต์ใช้กับเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องซึ่งไม่มีเสถียรภาพในวงควบคุมแบบเปิดซึ่งมีอุณหภูมิและความเข้มข้นขาเข้าเป็นตัวแปรรบกวนระบบ

จากผลงานการวิจัยที่ผ่านมา สำหรับการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงนั้น เครื่องควบคุมแบบเชิงเส้นธรรมดาเช่นเทคนิคการควบคุมแบบพีไอดีมักใช้ไม่ได้ผลดีเท่าที่ควร (Chang and Chen, 1984)

2.3 ผลงานการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟสำหรับเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่อง

จากปัญหาที่น่าสนใจสำหรับการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องที่กล่าวมาข้างต้นนั้นเป็นประเด็นสำคัญในการนำการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมเพื่อทดสอบและพัฒนาการควบคุมให้ดียิ่งขึ้น ผลงานการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟสำหรับเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องเริ่มจากในปี Economou (1986) ได้ประยุกต์ใช้การควบคุมแบบอินเทอนัลโมเดลในการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยา

คายความร้อนแบบผันกลับได้ วัตถุประสงค์เพื่อแสดงให้เห็นถึงตัวอย่างของการนำไปใช้และแสดงให้เห็นข้อดีของเครื่องควบคุมแบบไม่เชิงเส้นซึ่งมีประสิทธิภาพเหนือกว่าเครื่องควบคุมแบบเชิงเส้นในการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ให้อยู่ที่จุดดำเนินการที่เหมาะสมในขณะเดียวกันก็ยังคงความมีเสถียรภาพเมื่อมีตัวรบกวนระบบทั้งที่วัดได้และวัดไม่ได้

ต่อมาในปี Riggs and Rhinehart (1988) ได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างเทคนิคการควบคุมแบบเจเนอริกโมเดล ซึ่งเป็นการควบคุมซึ่งอาศัยแบบจำลองของกระบวนการกับเทคนิคการควบคุมแบบอินเทอนัลโมเดลแบบไม่เชิงเส้นในการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนซึ่งพบว่าการควบคุมแบบเจเนอริกโมเดลมีความทนทานมากกว่า

ต่อมาในปี Patwardhan and Rawlings (1990) ได้เสนอวิธีการควบคุมแบบป้อนกลับแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เชิงเส้น (feedback, nonlinear model predictive, NMPC) ซึ่งอัลกอริธึมนี้ใช้วิธีการออฟติไมซ์ โดยประยุกต์ใช้กับเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องซึ่งเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนอันดับ 1 แบบไม่ผันกลับ โดยการควบคุมให้สมรรถนะที่ดีในการที่จะนำเครื่องปฏิกรณ์จากสภาวะเริ่มต้นต่าง ๆ กันเข้าสู่เซ็ทพอยท์ที่ต้องการได้ ซึ่งข้อดีของอัลกอริธึมนี้ คือสามารถนำตัวแปรควบคุมเข้าสู่เซ็ทพอยท์ได้อย่างรวดเร็วและราบเรียบ และไม่ทำให้การตอบสนองช้าลงเมื่อมีขอบเขตจำกัดต่าง ๆ เหมือนเครื่องควบคุมอื่น ๆ และในกรณีที่มีความผิดพลาดของกระบวนการ/แบบจำลอง ไม่ส่งผลต่อการควบคุมและถึงแม้ว่าเซ็ทพอยท์ของระบบจะสอดคล้องกับสภาวะคงตัวที่ไม่มีเสถียรภาพในลูพเปิด แต่การควบคุมก็ยังสามารถควบคุมได้โดยไม่เกิดออฟเซ็ท และนอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงผลของการปรับเครื่องควบคุมโดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับเครื่องควบคุมนี้มี 2 ตัวคือจำนวนสเต็บของการทำนายและการควบคุม (prediction horizon and control horizon) ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งสองนี้ไม่เพียงแต่จะส่งผลต่อการตอบสนองของระบบเท่านั้นยังส่งผลต่อเวลาในการคำนวณสำหรับแต่ละช่วงเวลาสุ่มเช่นเดียวกับเครื่องควบคุมแบบเชิงเส้น (เช่น DMC) เมื่อค่าของแกนการทำนายเพิ่มขึ้นพบว่าจะส่งผลให้เครื่องควบคุมมีความทนทานต่อความไม่แน่นอนของแบบจำลองและค่าตัวแปรรบกวนที่วัดไม่ได้เพิ่มขึ้นแต่การตอบสนองจะช้าลง และเมื่อค่าของแกนการควบคุมเพิ่มขึ้นจะทำให้การตอบสนองเร็วขึ้นแต่ความทนทานจะลดลง

ต่อมาในปี 1992 Sistu and Bequette (1990) ได้ประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เชิงเส้นกับเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่อง ซึ่งมีความไม่แน่นอนของแบบจำลองและพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยได้พิจารณาถึงผลของทางเลือกต่าง ๆ สำหรับสภาวะเริ่มต้นของระบบซึ่งมีความสำคัญโดยเฉพาะกรณีที่มีความผิดพลาดของกระบวนการ/แบบจำลอง โดยได้ศึกษาผลของ

ความไม่แน่นอนของแบบจำลองโดยใช้โครงสร้างของเครื่องควบคุมแบบคาสเคด (cascade control) บนอุณหภูมิหล่อเย็น และได้แสดงให้เห็นว่าตัวสังเกตการณ์ลูพเปิดสามารถใช้ได้กับกระบวนการที่ไม่มีเสถียรภาพของลูพเปิดได้ดราบเท่าที่แบบจำลองมีเสถียรภาพ

ต่อมา Lee and Park (1992) ได้เสนอวิธีการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (feedforward control) ที่ใช้กับการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ โดยนำมาประยุกต์ใช้กับเครื่องปฏิกรณ์ที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง ซึ่งเป็นวิธีการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าที่ใช้ข่ายงานนิวรัลร่วมกับตัวควบคุมแบบไดนามิกส์เมตริกซ์เพื่อหาค่าน้ำหนักที่ทำให้ข่ายงานสร้างสัญญาณควบคุมเพื่อลดความผิดพลาด โดยมีสมมติฐานว่าตัวรบกวนหลัก ๆ สามารถวัดได้ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบไดนามิกส์เมตริกซ์ที่ใช้ข่ายงานนิวรัลเป็นตัวควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า มีสมรรถนะที่ดีกว่าการใช้ตัวควบคุมแบบไดนามิกส์เมตริกซ์อย่างเดียว

ในปีเดียวกันนี้ Sistu and Bequette (1992) ได้ทำการเปรียบเทียบการควบคุมแบบ Globally linearizing control (GLC) (Kravaris and Chung, 1987) กับการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เชิงเส้น (Eaton and Rawlings, 1990; Sistu and Bequette, 1992) ในการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องแบบ 2 สเตต ซึ่งเป็นระบบเฟสต่ำสุด และมีความหลากหลายของเอาท์พุท โดยการปรับอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น พบว่าการควบคุมทั้งสองแบบนี้สามารถปรับให้มีสมรรถนะที่เหมือนกันได้ทั้งกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์หรือค่าตัวแปรรบกวนระบบที่วัดได้เมื่อไม่มีขอบเขตจำกัดของตัวแปรปรับกระบวนการและเมื่อช่วงเวลาสุ่มเข้าใกล้ศูนย์ แต่อย่างไรก็ตาม การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เชิงเส้นจะให้ผลดีกว่าในกรณีที่มีขอบเขตจำกัดบนตัวแปรปรับ เช่นเดียวกัน Nahas, Henson and Seborg (1992) ได้เสนอวิธีการควบคุมแบบอินเทอ-นัลโมเดลแบบไม่เชิงเส้น สำหรับแบบจำลองแบบนิวรัลเพื่อระบุแบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นจากข้อมูลอินพุทและเอาท์พุทซึ่งรับประกันว่าจะไม่เกิดออฟเซ็ต โดยทดสอบกับเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่อง และกระบวนการปรับพีเอชให้เป็นกลาง เปรียบเทียบกับเครื่องควบคุมแบบพีไอดีพบว่า เครื่องควบคุมแบบอินเทอนัลโมเดลแบบไม่เชิงเส้น มีสมรรถนะที่ดีกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดี

ต่อมาในปี 1994 Peng และ Jang (1994) ได้ประยุกต์ใช้ การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟบนพื้นฐานของกฎต่าง ๆ ที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Rule Based Model Predictive Control) กับแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องของ Economou โดยเปรียบเทียบผลการควบคุมกับเครื่องควบคุมแบบพีไอดี และ อินเทอนัลโมเดล (Economou et al., 1986) ซึ่งผลการควบคุมแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดี และเทียบได้กับเครื่องควบคุมแบบ

อินเทอนัลโมเดล แต่อย่างไรก็ตามยังจำกัดสำหรับกระบวนการอันดับสูง อัลกอริธึมของการควบคุมประกอบด้วย 2 เฟสที่แตกต่างกันกันคือเฟสของการไอเดนติฟิเคชั่น (identification phase) ซึ่งจะหาค่าของการแปรเปลี่ยนอย่างช้า ๆ ของตัวรบกวนระบบโดยการหาค่าความเป็นไปได้สูงสุดของค่าที่วัดได้และเอาท์พุทที่ถูกทำนายในช่วงเวลาถัดไปในอดีต และเฟสของการออฟติไมซ์ซึ่งจะหาค่ากำไรสูงสุดเป็นฟังก์ชั่นของอินพุทและเอาท์พุทที่เวลาถัดไปในอนาคต

ต่อมา Oliveira (1994) ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟที่อาศัยการประมาณเชิงเส้น (linearized MPC) ด้วยการจำลองกระบวนการคายความร้อน ซึ่งออกแบบสำหรับการควบคุมอุณหภูมิและระดับของเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่อง โดยกระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ไม่มีเสถียรภาพในลูพเปิด ตัวแปรต่าง ๆ ไม่สามารถวัดค่าได้อีกทั้งไม่ทราบค่าพารามิเตอร์แน่นอนและสามารถเปลี่ยนแปลงค่าตามเวลา ผลการควบคุมแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอ

2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคาลมานฟิลเตอร์

เนื่องจากปัญหาในการควบคุมกระบวนการ เช่นการที่กระบวนการมีความไม่แน่นอนของแบบจำลองหรือพารามิเตอร์ต่าง ๆ การที่ไม่สามารถวัดค่าสเตตได้ทั้งหมด และความถูกต้องของสเตตที่วัดได้มีค่าต่ำ ทำให้เกิดปัญหาในการควบคุมดังนั้นจึงมีการประยุกต์ใช้การประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์ร่วมกับเครื่องควบคุมในการควบคุมกระบวนการ ซึ่งคาลมานฟิลเตอร์เป็นหนึ่งในตัวประมาณค่าที่ได้รับความนิยมและมีผู้สนใจนำไปประยุกต์ใช้กับตัวควบคุมขั้นสูงเรื่อยมา สำหรับผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคาลมานฟิลเตอร์นั้นเริ่มจาก

Well (1971) ได้เสนออัลกอริธึมของคาลมานฟิลเตอร์แบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น (Linear Kalman filter และ Extened-Kalman filter) ซึ่งประยุกต์ใช้ในถังกวนที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงโดยคำนวณค่าสเตตของกระบวนการหรือพารามิเตอร์ของระบบที่ไม่สามารถวัดได้ถึง 6 ตัว ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในการควบคุม

Hamilton et al. (1973) ได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของคาลมานฟิลเตอร์ในการประมาณค่าสเตตของระบบที่มีสัญญาณรบกวน (noise) โดยทำการจำลองและทดลองกับเครื่องระเหย ซึ่งให้ผลการประมาณที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวกรองแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล นอกจากนั้น

คาลมานฟิลเตอร์ยังสามารถประยุกต์ใช้ได้ในระบบที่มีค่าประมาณเริ่มต้นผิดพลาด หรือค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองผิดพลาด ซึ่งมีความไวต่อกระบวนการที่มีตัวรบกวนที่ไม่สามารถวัดค่าได้

Myer and Luecke (1991) ได้เสนออัลกอริธึมใหม่ที่ใช้ในการแก้สมการแบบเดิม โดยใช้วิธีการแก้ปัญหาเชิงตัวเลขของระบบเวลาต่อเนื่องและดิสครีตซึ่งพบว่าเมตริกซ์ความแปรปรวนของค่าความผิดพลาดจะมีลักษณะสมมาตรตลอด โดยมีกระบวนการที่ได้ทำการศึกษา 3 ตัวอย่างคือ ถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่มีอุณหภูมิคงที่และมีปฏิกิริยาแบบผันกลับไม่ได้จากสาร $A \rightarrow B \rightarrow C$ ซึ่งวัดความเข้มข้นของสาร B และประมาณความเข้มข้นของสาร A และ B , ถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องแบบอะไดอะบาติก (adiabatic) ของปฏิกิริยา $A \rightarrow B$ ซึ่งวัดอุณหภูมิในถังและประมาณค่าความเข้มข้น และได้ศึกษากับกระบวนการของถังหมัก (fermentor) ซึ่งวัดน้ำหนักของมวลชีวภาพ และวัดค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (D.O.) เพื่อนำไปประมาณอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (specific growth rate) รวมทั้งน้ำหนักของมวลชีวภาพและค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ซึ่งผลการควบคุมทั้ง 3 ตัวอย่างพบว่าค่าประมาณที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับของจริงและช่วยส่งเสริมการควบคุมกระบวนการเหล่านี้มีค่าดียิ่งขึ้น

นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้คาลมานฟิลเตอร์สำหรับกระบวนการสังเคราะห์โพลิเมอร์ โดย Jo and Nankoff (1976) ได้ทดลองและศึกษาถึงขั้นตอนการเกิดโพลิเมอร์ต่าง ๆ โดยสารที่ใช้ในการทดลองคือ ไวนิลอะซีเตตซึ่งบรรจุในถังแก้วที่มีการติดตั้งเครื่องวัดดัชนีการหักเหของแสง และเครื่องวัดความหนืด ซึ่งตัวแปรวัดคือค่าดัชนีการหักเหของแสงและความหนืด โดยคาลมานฟิลเตอร์มีสมรรถนะที่ดี สามารถประมาณค่าคอนเวอร์ชั่น และค่าโมเลกุลแบบเฉลี่ยของโพลิเมอร์ได้

Guttu & Zafirious (1992) ได้ประยุกต์ใช้คาลมานฟิลเตอร์ร่วมกับการควบคุมแบบควอดราติกไดนามิกส์เมตริกซ์แบบไม่เชิงเส้น โดยใช้คาลมานฟิลเตอร์เป็นพื้นฐานในการทำนายค่าสเตตในการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์โพลิเมอไรเซชั่นโดยได้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการควบคุมในกรณีที่มีการรบกวนระบบที่จุดการดำเนินการที่ไม่มีเสถียรภาพของลูพเปิด

Kittisupakorn and Kershenbaum (1994) ได้ทดสอบอัลกอริธึมของคาลมานฟิลเตอร์ซึ่งใช้ร่วมกับตัวควบคุมแบบเจเนอริกโมเดล (Generic Model Control) ในการควบคุมอุณหภูมิของถังปฏิกรณ์แบบกะ (batch reactor) โดยตัวแปรที่วัดคือ อัตราการไหล ระดับน้ำในถัง และอุณหภูมิ เพื่อใช้ประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา ผลการควบคุมพบว่าคาลมานฟิลเตอร์สามารถประมาณค่าได้ถูกต้องใกล้เคียงกับของจริง และช่วยให้ตัวควบคุมมีความทนทานมากขึ้น

2.5 บทสรุป

การพัฒนาระบบการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟได้เริ่มมีการพัฒนาตั้งแต่ปี 1970 และมีการพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อตอบสนองความต้องการในการใช้งานมากยิ่งขึ้น โดยในช่วงแรก ๆ แบบจำลองที่ใช้เป็นแบบจำลองแบบเชิงเส้นและไม่สามารถใช้กับปัญหาการมีขอบเขตจำกัดอย่างมากได้ ต่อมาจึงได้พัฒนาอัลกอริธึมแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อให้สามารถควบคุมกระบวนการแบบไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมาก สามารถแก้ปัญหาขอบเขตจำกัดต่าง ๆ ได้ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมกระบวนการแบบไม่เชิงเส้นที่มีขอบเขตจำกัดในการควบคุมนอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้ระบบควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟร่วมกับการประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์เพื่อเพิ่มความทนทานของระบบควบคุม รูปแบบต่าง ๆ ของโมเดลพรีดิกทีฟที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมกระบวนการอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี และจากผลการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าการควบคุมแบบเชิงเส้นธรรมดาและกำลังเป็นที่สนใจอย่างมากในวงการควบคุมกระบวนการอุตสาหกรรม

สรุปผลงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟได้ดังตารางที่ 2.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 ผลงานที่เกี่ยวกับการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ

ชื่อตัวควบคุม	ผู้วิจัย/ปี	รูปแบบการควบคุม
MPHC	Richalet / 1976	-ใช้แบบจำลองการตอบสนองแบบสเต็บซึ่งเป็นอัลกอริธึมแบบหลายตัวแปรและรวมขอบเขตจำกัดไว้ในอัลกอริธึม
DMC	Cutler&Ramake /1979	-ใช้แบบจำลองการตอบสนองแบบสเต็บแบบเชิงเส้นซึ่งเป็นอัลกอริธึมแบบหลายตัวแปรที่ไม่มีขอบเขตจำกัด
DMCss	Prett & Garcia /1988	-ใช้แบบจำลองการตอบสนองแบบสเต็บซึ่งสามารถทำให้อยู่ในรูปของแบบจำลองสเตตสเปซในเวลาดิสครีต
NLDMC	Georgiou/1988	-เป็น DMC แบบไม่เชิงเส้นที่ใช้แบบจำลองการตอบสนองแบบสเต็บเพื่อสร้างแบบจำลองคอนโวลูชั่น
OBMPC	Lee/1992	- ใช้อัลกอริธึมของ MPC บนพื้นฐานของตัวสังเกตการณ์
QDMC	Culter/1983	- ใช้อัลกอริธึมของ DMC ซึ่งการหาค่าอินพุทที่เหมาะสมเป็นการหาคำตอบของควอดราติกโปรแกรม
NLQDMC	Garcia/1984 Gattu&Zafirious / 1992 Lee & Park/1992	-ใช้อัลกอริธึมของ QDMC แบบไม่เชิงเส้นซึ่งแบบจำลองเชิงเส้นได้มาจากการประมาณเชิงเส้นที่แต่ละช่วงเวลา -ใช้อัลกอริธึมของ QDMC แบบไม่เชิงเส้นและใช้คาลมานฟิลเตอร์เป็นพื้นฐานในการประมาณค่าสเตต - ใช้ตัวควบคุมแบบไดนามิกส์เมตริกซ์ที่ใช้ข่ายงานนิวรัลเป็นตัวควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า
IMC	Garcia & Morari /1982 Wellsons& Edgar/1987 Xi/1984	-ใช้แบบจำลองของการตอบสนองแบบสเต็บแบบเชิงเส้นซึ่งสามารถรวมอินทีกรัลแอคชั่นไว้ในโครงสร้างของตัวควบคุม -ใช้ IMC ร่วมกับการประมาณค่าแบบ GPA เพื่อปรับปรุงการควบคุมในกรณีที่มีการรบกวนระบบ -มีการแปลงวิธีการควบคุมแบบ DMC ไปเป็นการควบคุมแบบ IMC
NIMC	Economou/1986	-การควบคุมอยู่บนพื้นฐานของอินเวอร์สของแบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นและฟิลเตอร์ถูกเพิ่มเข้าไปเพื่อคำนวณเกี่ยวกับขอบเขตจำกัดของอินพุท

ตารางที่ 2.1 ผลงานที่เกี่ยวกับการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ

ชื่อตัวควบคุม	ผู้วิจัยปี	รูปแบบการควบคุม
	Calvet & Arkun /1988	-ใช้วิธีการของ IMC โดยการนำใช้การประมาณเชิงเส้นสเตตสเปซสำหรับกระบวนการที่ไม่เป็นเชิงเส้น
	Henson & Seborg /1991	-ใช้แบบจำลองอ้างอิง 2 แบบจำลองซึ่งไม่ต้องการการป้อนกลับสเตต และแบบจำลองทำหน้าที่เป็นตัวสังเกตการณ์
	Isidori/1989	-ใช้แบบจำลองในรูปแบบสมการสเตตสเปซ และใช้แบบจำลองผกผันของเครื่องควบคุมกับฟิลเตอร์แบบไม่เชิงเส้น
	Henson & Seborg /1991	- ใช้อัลกอริธึมของ NLIMC ร่วมกับแบบจำลองแบบนิวรัลซึ่งถูกฝึกให้เรียนรู้ไดนามิกส์แบบผกผันของกระบวนการ
GPC	Clark/1987	-ใช้แบบจำลองของกระบวนการแบบอะนาไลติก ซึ่งสามารถรวมวิธีการควบคุมหลาย ๆ แบบไว้ในอัลกอริธึม
	Narendra & Parthasarathy/1990	-ใช้แบบจำลองที่อยู่บนพื้นฐานของข่ายงานนิวรัลสำหรับการควบคุมกระบวนการแบบไม่เชิงเส้น
QPGPC	Clark/1992	-ใช้แบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นซึ่งเป็นอัลกอริธึมที่มีขอบเขตจำกัด การคำนวณแอคชั่นการควบคุมเป็นการแก้ปัญหาควอดราติกโปรแกรม
GMC	Lee & Sullival/1988	-ใช้แบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นในตัวควบคุมได้โดยตรงโดยไม่ต้องทำให้เป็นเชิงเส้นก่อน
	Kittisupakorn/1994	- ประยุกต์ใช้ร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ซึ่งช่วยให้การควบคุมมีประสิทธิภาพสูงขึ้น
NLMPC	Wright & Li/1991	-ใช้อัลกอริธึมของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เชิงเส้นร่วมกับการประมาณค่าบนพื้นฐานของออฟติไมเซชั่น
	Ali & Zafiriou/1993	-ประยุกต์ใช้ร่วมกับตัวประมาณค่าแบบไม่เชิงเส้นโดยใช้ซอฟแวร์ CONSOLE
	Patwardhan & Rawlings/1990	- ใช้วิธีการควบคุมแบบป้อนกลับแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เชิงเส้นซึ่งใช้วิธีออฟติไมเซชั่น

ตารางที่ 2.1 ผลงานที่เกี่ยวกับการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ

ชื่อตัวควบคุม	ผู้วิจัยปี	รูปแบบการควบคุม
ANMPC	Proll & Karim/1994	- ใช้วิธีการควบคุมแบบอะแดฟทีฟโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เชิงเส้นซึ่งอาศัยแบบจำลอง NARX
NBMPC	Peng & Jang/1994	- ใช้การควบคุมแบบ MPC บนพื้นฐานของกฎต่าง ๆ ที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยไม่ต้องอาศัยความรู้เกี่ยวกับกระบวนการที่ควบคุม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย