บทที่ 2

ผลงานที่เกี่ยวข้อง

2.1 คำนำ

มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องหาวิธีการที่ดีที่สุดสำหรับการปรับระบบควบคุมเพื่อให้เกิดการปรับปรุงกระบวนการทางด้านเทคโนโลยีในด้านอุตสาหกรรมเคมี ระบบการควบคุมที่น่าเชื่อถือ รวดเร็วและยืดหยุ่นได้ ซึ่งจะช่วยให้เกิดประโยชน์ทางด้านเศรษฐกิจอย่างใหญ่หลวงโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับบริษัทต่างๆ ซึ่งต้องการ กระบวนการให้มีมาตรฐานเป็นอย่างดีกับสภาพธุรกิจที่มีแต่การแข่งขันจะบีบบังคับให้บริษัทต่างๆ เปลี่ยนสภาวะการปฏิบัติงานอย่างรวดเร็วสำหรับกระบวนต่างๆ เพื่อให้ทันต่อการเปลี่ยนแปลงสถานภาพทางการตลาด รวมไปถึงสภาพการผลิต และคุณภาพที่ได้มาตรฐานของผลิตภัณฑ์

2.2 ผลงานที่เกี่ยวข้องและที่ผ่านมา

Doyle (1985) ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์สมรรถนะและคุณสมบัติความทนทาน หรือความรอบัสต์ (Robustness) ของระบบการควบคุมลูพปิด ค่าเดี่ยว μ ของเส้นขอบรอบนอกจะเป็นตัวแปรพารามิเตอร์ที่มีความเปลี่ยนแปลงจริง. Doyle, Newlin และYoung (1991) ได้มีความพยายามที่จะหาอัลกอริธึมสำหรับการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบควบคุมแบบเชิงเส้นภายใต้พารามิเตอร์ที่ไม่มีความแน่นอนแต่เป็นจริง มีปัญหาเกิดขึ้นที่ไม่มากไปกว่า 100 ชนิดที่ผันแปรไปตามพารามิเตอร์ได้ถูกค้นพบ Laughlin, Jordan และ Morari (1986) ได้เสนอเทคนิคการออกแบบระบบการควบคุมรอบัสต์ซึ่งพิจารณาถึงความไม่แน่นอนของกระบวนการความผันแปรของพารามิเตอร์ที่แท้

จริง ได้ถูกกำหนดเป็นโมเดลที่ไม่แน่นอนได้ในแผ่นเรียบที่ซับซ้อน (Complex Plane). Doyle, Newline และ Young (1991) ได้พิจารณาถึงความรอบัสต์ในการปรากฏของพารามิเตอร์ที่ไม่มีความแน่นอนแต่เป็นจริง ได้อธิบายการคำนวณ เช่น ความสำเร็จสมบูรณ์ของ NP ความต่อเนื่อง และขอบเขตของ μ ก็ได้ถูกนำมาอภิปรายด้วยเช่นกัน วิธีการเหล่านี้ใช้การจัดลำดับความสำคัญของความถี่ของรูปร่างลักษณะโดเมน (Domain) รายละเอียดหรือคำบรรยายที่ไม่แน่นอน และน้ำหนักซึ่งไม่สามารถแปลงไปเป็นไทม์โดเมน (Time Domain) โดยตรง ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะระบุลงไปหรือคาดคะเนเพื่อที่จะตรวจสอบกระบวนการผลิตที่ไม่แน่นอนแต่เป็นจริง เพื่อจะกำหนดแหล่งที่มีความเหมาะสมชุดของความไม่แน่นอนถูกกำหนดเป็นส่วนโค้งโดยการทำการอนุรักษ์ (Conservativness) ของผลจากการควบคุม ถ้ามีการนำเดดไทม์มาพิจารณาจะถูกประมาณคร่าวๆ เพื่อที่จะให้ความว่างเปล่าของสถานะ (State Space) ได้ถูกนำมาใช้

Morari และ Zafiriou (1989) ได้รวมรูปแบบฟิลเตอร์ของไอเอ็มซีเข้ากับปริมาณของสมรรถนะความรอบัสต์. Doyle, Packard และ Zhou (1991) ได้เสนอผลงานให้ทราบถึงบทบาทของทรานสฟอร์มแบบสัดส่วนของเชิงเส้น (Linear Fractional Transformation), ค่าเดี่ยว μ (Structural Singular, μ) และ Linear matrix inequalities ในทฤษฎีการควบคุม เทคนิคนี้จะได้นำมาใช้กับทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นทั่วๆไป หรือความว่างเปล่าของสถานะ (State Space) เพื่อที่จะรวบรวมความไม่แน่นอนของโมเดล

Laiseca และ Brosilow (1992) ได้แก้ปัญหาการจูน SISO โดยให้ความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์อยู่บนพารามิเตอร์ของกระบวนการ ส่วนอัลกอริธึมการคำนวณการจูนพีคสูงสุด (Maximum peak, Mp) ได้มีการสรุปและขึ้นอยู่กับการตอบสนองของความถี่ที่มากที่สุด ของเซนซิทิลิตีฟังก์ชั่นต่างๆ ที่เข้ากันได้ทั้งหมดบนโอกาสทางเลือกของค่าคงที่เวลาฟิลเตอร์ ก็ได้นำมาศึกษาเช่นกัน

Floudas และ Visweswaran (1993) และ Floudas และ Maranas (1994) ได้เสนอเทคนิคการออพติไมซ์ (Optomization) เพื่อที่จะแก้ปัญหาที่เกิดจาก nonconvex nonlinear ซึ่งอัลกอริธึมจะช่วยส่งเสริมสนับสนุนให้ขอบเขตทั้งด้านบนและด้านล่าง (Upper and lower bounds) มีความสมบูรณ์ เราได้ทำการตรวจสอบอัลกอริธึมการออพติไมซ์ของ $\alpha\beta\beta$ ($\alpha\beta\beta$ global optimization) อัลกอริธึมซึ่งพบ global optimum ของหน้าที่ที่ซึ่ง global optimum นี้จะต้องตั้งอยู่ในระหว่างขั้นตอนของการจูน M_p ส่วนของ $\alpha\beta\beta$ จะไม่มาเชื่อมต่อกับเครื่องมืออุปกรณ์ของสูตรเลขคณิตและเรขาคณิตที่สลับซับซ้อน ซึ่งมีความจำเป็นที่จะต้องถ่ายทอดหน้าที่ และประเมินผลหน้าที่ที่มีความสลับซับซ้อนนั้น

Laiseca (1994) ได้วิจัยและพัฒนาขั้นตอนการจูน M_p เพื่อปรับให้เข้ากับระบบการควบคุม โดยการใช้พาราแมทริกซ์ (Paramatric) หรือเกน (gain) และความไม่แน่นอนของเฟส (Phase uncertainty) ปัญหาของการออพติไมเซชันที่จำกัด (Constrained Optimization) นั่นคือการแก้ปัญหาต่างๆ ได้คล้ายคลึงกัน Laiseca (1994) ได้ศึกษาเปรียบเทียบผลที่ได้จากเทคนิคการจูน M_p ที่นำมาใช้กับการควบคุมรอบัตส์สำหรับระบบ Noncollocated Spring-Mass กับตัวควบคุมของ Braatz และ Morari (1992). Laiseca (1994) ได้ชี้ให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของทางเลือกหรือโอกาสของโมเดลภายในความเร็วของการตอบสนองของระบบ IMC จะสามารถทำให้สูงขึ้นได้โดยการเลือกโมเดลที่ดีกว่า เพื่อการนำมาใช้ในการวางแผน การออกแบบตัวควบคุมไอเอ็มซี และนำไปดำเนินงานที่เป็นส่วนหนึ่งของระบบ IMC

เอกสารอ้างอิงขาดขั้นตอนการออกแบบและการจูนในแต่ละขั้นตอน (ขั้นตอนกล่าวไว้ไม่ละเอียดพอ) เพื่อจะนำไปพิจารณาถึงความไม่แน่นอนของกระบวนการ และสมรรถนะโดยการใช้แนวทางของค่า μ ที่สูงสุด วิศวกรสามารถดัดแปลงใช้เครื่องมือเช่นเดียวกับเครื่องมือการสร้าง

μ ของโปรแกรม Matlab (Balas 1993) แต่ยังไม่มีวิธีการโดยตรงเพื่อให้ได้ผลของการออกแบบและการจูนตัวควบคุมที่ถูกต้องหรือเหมาะสม

Karel Stryczek (1995) ได้ทำการปรับปรุงขั้นตอนการจูน M_p สำหรับระบบ SISO IMC ซึ่งมีดีกรีของความอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับหนึ่ง และได้ขยายการจูน M_p ไปสู่ระบบ SIMI IMC ให้มีดีกรีของความอิสระเท่ากับสอง และระบบ MIMO IMC และเขาได้เสนอพื้นฐานเทคนิคการออกแบบที่เรียกว่า "M_p-Synthesis" เขาได้พยายามค้นหาการควบคุมพร้อม ๆ ไปกับโมเดลที่มีความเหมาะสม ซึ่งจากผลการทดลองเขาพบโมเดลของตัวควบคุม IMC ซึ่งจะช่วยสนับสนุนให้ระบบการควบคุมแบบลูพปิดเร็วขึ้น ในขณะเดียวกันก็ยังมีความเสถียรหรือรักษาความคงตัวได้อย่างสม่ำเสมอ

สำหรับการควบคุมแบบ IMC นั้นได้มีการศึกษาถึงสมรรถนะในการควบคุมในหลายๆ กรณี Lee, J. และ Sung, S.W. (1993) ได้ศึกษาเปรียบเทียบผลการควบคุมของการควบคุมแบบป้อนกลับโดยได้กำหนดรีเลย์ฟังก์ชั่น (Relay feedback control) เปรียบเทียบผลการควบคุมกับวิธีการจูนตัวควบคุม ด้วยวิธีการไอทีเออี (ITAE) และการควบคุมแบบ IMC โดยศึกษาเปรียบเทียบค่าพีไอดีกับกราฟแสดงผลการตอบสนองของเอาท์พุทและอุปกรณ์ควบคุม โดยเสนอว่าการจูนค่าพีไอดีโดยกฎเกณฑ์ของการควบคุมแบบ IMC ควรจะใช้เป็นการจูนกำหนดค่าพีไอดีในขั้นสุดท้าย สำหรับกระบวนการที่เป็นแบบโอเวอร์แดมป์ (Over damp process)

Rivera, etal. (1986) ได้สรุปแปลงค่าความสัมพันธ์ของการควบคุมแบบ IMC และการควบคุมแบบป้อนกลับแบบดั้งเดิมโดยกำหนดค่าพีไอดีของตัวควบคุมไว้ดังนี้

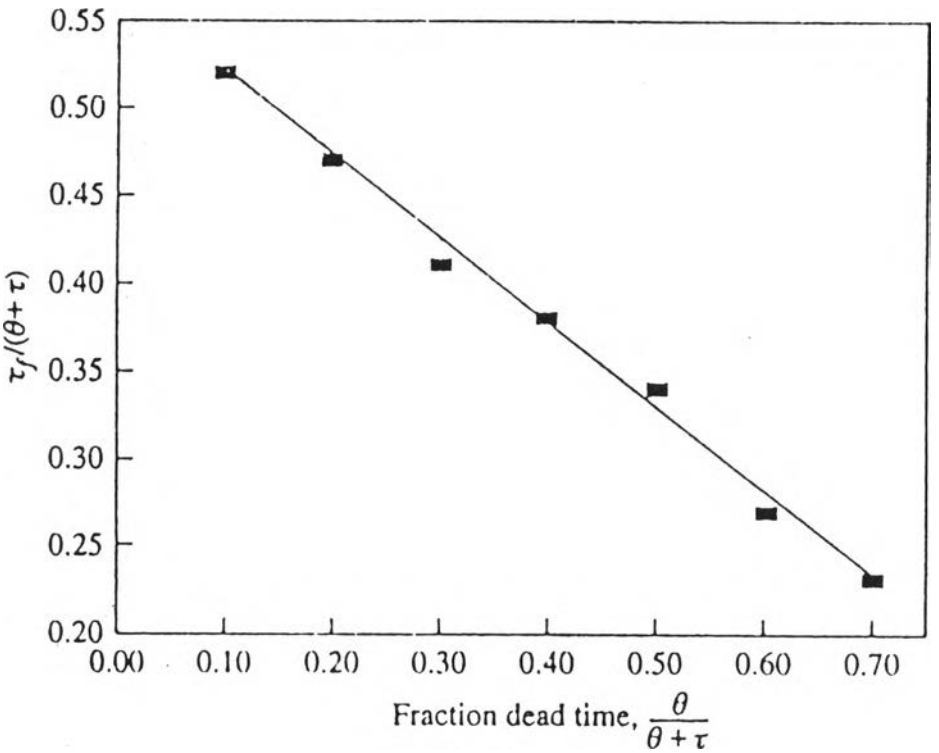
$$KK_c = \frac{2\tau + \theta}{2\tau_c} \qquad , \qquad \tau_I = \frac{\theta}{2}$$

Marin, M. และ E. Zafirion (1989) ได้ใช้ความสัมพันธ์ดังกล่าวเพื่อศึกษาค่า τ_c โดยให้ใช้ค่า τ_c ให้มีค่ามากกว่าค่าสูงสุดระหว่าง 1.7θ และ 0.2τ

Brossilow, C. (1979) ได้แนะนำให้ใช้ตัวแปรการจูน τ_c ซึ่งเป็นตัวแปรอิสระใดๆ ที่เข้ามาเกี่ยวข้องในการควบคุม IMC โดยได้กำหนดค่าความสัมพันธ์ของ τ_c กับค่าความผิดพลาดของโมเดลเนื่องมาจากเดดไทม์ผิดพลาดเป็น $\tau_c = 0.25\delta\theta$ โดยที่ $\delta\theta$ จะเป็นค่าสูดสุดของการประมาณค่าความผิดพลาดของเดดไทม์จากโมเดล

Ciacone et. al. (1993) ได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรการจูนกับเดดไทม์ของกระบวนการอันดับหนึ่งที่มีเดดไทม์ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็พ (step) โดยกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่า τ_c กับสัดส่วนของเดดไทม์ (อัตราส่วนระหว่างเดดไทม์ต่อผลรวมของเดดไทม์กับเวลาของกระบวนการ) ซึ่งเป็นไปตามรูปที่ 2.1 จากกราฟจะพบว่าค่าตัวแปรการจูน τ_c จะมีค่ามากเมื่อสัดส่วนของเดดไทม์มีค่าน้อย และจะมีค่าน้อยลงเมื่อสัดส่วนของเดดไทม์สูงขึ้น การที่ตัวแปรการจูน τ_c มีค่าน้อยลงจะทำให้ระบบมีการเสถียรเพิ่มมากขึ้น แต่ τ_c จะส่งผลต่ออุปกรณ์ควบคุมเป็นอย่างมากและในบางกรณีอาจไม่สามารถยอมรับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นที่อุปกรณ์ควบคุมที่ใช้งานนั้นได้เลย

Merlin, T.E. (1995) ได้ศึกษาเปรียบเทียบค่า τ_c ต่างๆ และได้สรุปว่าค่า τ_c นั้นยังไม่สามารถกำหนดให้สอดคล้องกับทุกกรณี แต่จะสามารถนำไปใช่ได้ในหลายๆ กรณี และบางกรณีค่า τ_c ที่ใช้จะเป็นเพียงค่าเริ่มต้นที่จะใช้ในการจูนต่อไปเท่านั้น

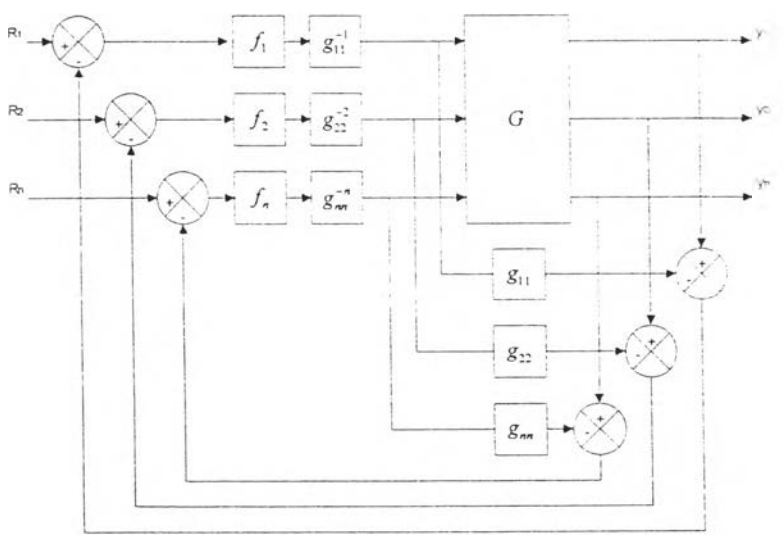


รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของตัวแปรการจูน τ_c สำหรับกระบวนการอันดับหนึ่งที่มีเดดไทม์

Rivera,et.at. (1986) ได้เสนอให้ใช้ค่า τ_c ให้มีค่ามากกว่า 0.8θ และมากกว่า 0.1τ นอกจากนี้ได้เสนอแนวทางในการกำหนดค่าพีไอดีให้แก่กระบวนการที่มีอันดับต่างๆ กัน ที่ไม่มีเดดไทม์โดยใช้วิธีการควบคุมแบบ IMC โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง G_c และ G_c^* และใช้ $n=1$ ส่วนกระบวนการที่ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันที่มีเดดไทม์เข้ามาเกี่ยวข้อง จะต้องประมาณค่าเดดไทม์ดังกล่าว ซึ่งการประมาณค่าเดดไทม์นั้นจะใช้วิธีการประมาณค่าของ Pade' หรือใช้อนุกรมเทเลอร์ (Taylor Series) แทนค่าลงในทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน แล้วจัดเทอมต่าง ๆ ใน G_c^* ให้สอดคล้องกับ

เทอมของพีไอดี ซึ่งตัวแปรอิสระที่สำคัญยังคงเป็นค่า τ_c สำหรับการควบคุมแบบ IMC ที่ใช้ฟังก์ชันแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete function) ตัวแปรการจูนที่ใช้จะได้แก่ค่า α โดย Seborg (1989) เสนอแนะว่า ถ้าใช้ $\alpha = 0$ การตอบสนองของเอาท์พุทของการควบคุมแบบ IMC จะรวดเร็ว และไม่มีการแกว่งของเอาท์พุท ซึ่งเป็นการควบคุมแบบเดดบีท (Deadbeat Control) นั่นเอง

Garcia และ Morari (1982) ได้เสนอการควบคุมแบบ IMC ที่เป็นแบบหนึ่งอินพุท – หนึ่งเอาท์พุท (SISO IMC) ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเขาได้พิจารณาเฉพาะทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน G_{p11}, G_{p22}, ..., G_{pnn} เท่านั้นที่จะนำมาใช้หาตัวควบคุมโดยไม่ได้พิจารณารวมไปถึง G_{p12} หรือ G_{p21} ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวอาจมีข้อเสียอยู่บ้าง คืออาจยังมีอินเตอร์แอกชัน (Interaction) กันได้บ้าง จากผลการวิเคราะห์นี่ยังไม่ได้มีการเปรียบเทียบให้เห็นว่ามีข้อแตกต่างกันอย่างไรบ้างกับระบบการควบคุมแบบมัลติอินพุท-มัลติเอาท์พุทของ IMC (Multi Input – Multi Output IMC, MIMO IMC) เพื่อจะหาตัวควบคุมที่มีสมรรถนะที่ดี ที่เหมาะสมต่อการใช้งาน และเกิดอินเตอร์แอกชันกันน้อยที่สุด



รูปที่ 2.2 โครงสร้างการควบคุมแบบ IMC ลูพหมู่ (Multiloop IMC)

ซึ่งทั้ง Garcia และ Morari ได้เสนอโครงสร้างการควบคุมแบบ IMC สำหรับการออกแบบตัวควบคุมเพื่อรักษาความเป็นรอบัสต์ (Robustness) ในระบบหลายตัวแปรที่เป็นลูพหมู่ ซึ่งเขาได้นำไปใช้กับผลงาน ของ Zames (1981) ต่อมาผลงานดังกล่าวได้ถูกนำมาศึกษาเพิ่มเติมต่อโดย Dosoer และ Lin (1994) และสำหรับผลงานของ Carcia และ Morari ยังได้ศึกษาเปรียบเทียบการควบคุม IMC ที่เป็นลูพหมู่ (Multiloop IMC) กับเทคนิคการออกแบบ หลายตัวแปรอย่างง่าย (Classical multivariable design technique) และตัวควบคุมได้ถูกออกแบบโดยอาศัยวิธีการพื้นฐานของ SISO หลายขั้นตอนก่อนจะเข้าสู่ในข่ายงานของ Direct Nyqnist Arrey (DNA) ของ Rosenbrock (1974) และในวิธีการอื่นที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ Inverse Nyqnist Array (INA) โดยในส่วนของ DNA วิธีการลองผิดลองถูกได้ถูกนำมาใช้ที่เรียกว่า "Diagonal Dominance" ซึ่งจะอาศัยการครอสคัพปลิง (Cross-Coupling) และตัวควบคุม SISO อย่างง่าย เช่นตัวควบคุมแบบพี หรือตัวควบคุมแบบพีไอ และขณะเดียวกันยังสามารถบ่งบอกถึงการกระทบกัน และสมรรถนะของลูพปิดได้ด้วย แต่ในส่วนของการควบคุมแบบ IMC นั้นจะไม่อาศัยการลองผิดลองถูก โดยในขั้นตอนแรกของการกระทบกันนั้นจะไม่มีการครอสคัพปลิง (Cross-Coupling) เนื่องจากโครงสร้างของ IMC จะอาศัยแฟคเตอร์ของ g_{ii}^{-1} และขั้นตอนที่สองตัวควบคุมSISO ถูกจูนใหม่สำหรับการกระทบกัน และรักษาความเสถียรของลูพปิดไว้ โดยอาศัยตัวกรองของ IMC (IMC filter) นั่นคือทำให้เห็นความแตกต่างระหว่างการควบคุม IMC แบบลูพหมู่กับ DNA แต่อย่างไรก็ตามการควบคุมแบบ IMC จะไม่ทำให้เกิดออฟเซ็ท (Offset) ได้อย่างอัตโนมัติ ส่วน DNA นั้นยังคงอาศัยวิธีการลองผิดลองถูก

จากเหตุผลข้างต้น Morari ได้ยกตัวอย่างประกอบสองตังอย่าง เพื่ออธิบายหรือแสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างการควบคุมแบบ IMC ที่เป็นลูพหมู่กับเทคนิคการออกแบบหลายตัวแปรอย่าง

ง่าย ซึ่งเขายังบอกอีกว่าฟิลเตอร์ (Filter) ที่ใช้ใน IMC นั้น จะไม่มีผลกระทบต่อการออกแบบตัวควบคุม IMC แต่อย่างใด เนื่องจากมันจะไม่แอกทีฟในแบนด์วิดท์