บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

การจำลองกระบวนการเป็นการเลียนแบบพฤติกรรมของกระบวนการผลิตซึ่งอาจเป็นกระบวนการทางอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมันดิบ อุตสาหกรรมพลาสติก หรือการเลียนแบบกระบวนการอื่นๆ เป็นต้น โดยการจำลองกระบวนการในภาคอุตสาหกรรมและภาคการศึกษามักใช้โปรแกรมเชิงพานิชย์ Aspen Engineering Suite, HYSYS, Pro II, ANSYS CFX เป็นต้น โปรแกรมเหล่านี้นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองกระบวนการได้อย่างมีความยืดหยุ่นและใช้ได้ในอุตสาหกรรมกระบวนการต่างๆ การจำลองกระบวนการแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การจำลองกระบวนการที่สถานะคงตัวและการจำลองกระบวนการที่สถานะเชิงพลวัต

การจำลองกระบวนการที่สถานะคงตัว (Steady state) เป็นการจำลองกระบวนการเพื่อศึกษาดุลมวลและพลังงาน รวมถึงการกระจาย (Profile) ของอุณหภูมิหรือแม้กระทั่งมวลสารภายในอุปกรณ์การผลิตที่ต้องการศึกษา อย่างเช่น เครื่องปฏิกรณ์ หอกลั่น เป็นต้น ข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกระบวนการที่สถานะคงตัวจะเป็นข้อมูลตั้งต้นสำหรับการจำลองกระบวนการที่สถานะเชิงพลวัต

การจำลองกระบวนการที่สถานะเชิงพลวัต (Dynamic state) เป็นการจำลองกระบวนการเพื่อศึกษาพฤติกรรมของกระบวนการที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา หรือการศึกษาการตอบสนองของกระบวนการต่อการเปลี่ยนแปลงตัวแปรขาเข้ากระบวนการ ทั้งการตอบสนองอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและการตอบสนองอันเนื่องมาจากปัจจัยรบกวนระบบ

2.1.1 กระบวนการ

กระบวนการโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท โดยจำแนกตามลักษณะพฤติกรรมของกระบวนการที่มีการตอบสนองเมื่อตัวแปรขาเข้าเกิดการเปลี่ยนแปลง

1. กระบวนการแบบปรับตัวเองเข้าสู่สมดุลใหม่ได้ (Self-regulating processes) เมื่อตัวแปรขาเข้ามีการเปลี่ยนแปลง กระบวนการจะมีการตอบสนอง โดยการปรับตัวเข้าสู่ค่าสมดุล โดยค่าสมดุลอาจเป็นค่าเดิมหรือค่าใหม่ก็ได้ (Converge)

2. กระบวนการแบบปรับตัวเองเข้าสู่สมดุลใหม่ไม่ได้ (Non self-regulating processes) เมื่อตัวแปรขาเข้ามีการเปลี่ยนแปลง กระบวนการจะมีการเปลี่ยนแปลงแบบลู่ออก (Diverge)

โดยพารามิเตอร์แสดงถึงลักษณะเฉพาะของกระบวนการแบ่งออกเป็น 3 ค่า ได้แก่

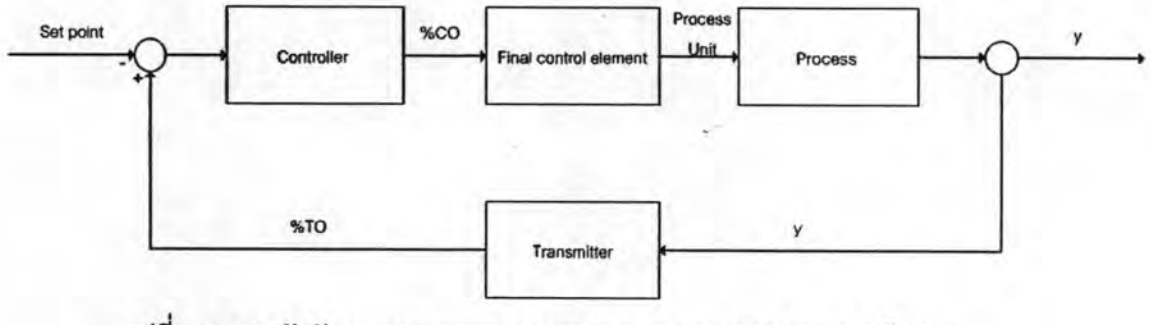
1. Process gain หรือเรียกว่า เกนหรือค่าความไวต่อการตอบสนองของกระบวนการ แสดงถึงสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรขาออกหรือการตอบสนองของตัวแปรขาออกต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรขาเข้า แสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$K = \frac{\Delta Output}{\Delta Input} \qquad (1)$$

2. Process Time Constant หรือเรียกว่า ค่าเวลาคงที่กระบวนการแสดงถึงเวลาที่กระบวนการเกิดการเปลี่ยนแปลงไป 63.2% ของการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดนับจากเวลาที่กระบวนการเริ่มเปลี่ยนแปลง โดยในทางทฤษฎีพบว่า ที่เวลา 4 ถึง 5 เท่าของค่าเวลาคงที่กระบวนการคือ เวลาที่กระบวนการเข้าสู่สมดุลใหม่ที่สถานะคงตัว
3. Process Dead Time (t_0) หรือเวลาหน่วงแสดงถึง เวลาที่กระบวนการไม่ได้ตอบสนองใดๆจนเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงนับจากเวลาที่ตัวแปรขาเข้ามีการเปลี่ยนแปลงเข้าสู่กระบวนการ

โดยทั่วไป กระบวนการที่ต้องดำเนินการให้ได้ตามค่าเป้าหมายจำเป็นต้องติดตั้งระบบควบคุมเพื่อช่วยในการควบคุมกระบวนการให้สามารถดำเนินการได้อย่างมีเสถียรภาพและตรงตามความมุ่งหมายในการผลิต

ระบบควบคุมกระบวนการประกอบด้วยเครื่องมือวัดที่ทำหน้าที่ในการวัดค่าตัวแปรที่ต้องการควบคุม จากนั้นจึงส่งค่าสัญญาณที่วัดได้ไปยังเครื่องควบคุมเพื่อทำการประมวลผล สัญญาณขาออกจากเครื่องควบคุมจะถูกส่งไปยังอุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายซึ่งหากใช้วาล์วในการควบคุม สัญญาณจากเครื่องควบคุมจำเป็นต้องได้รับการแปลงสัญญาณให้เป็นสัญญาณลมเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนก้านวาล์ว เนื่องจากโรงงานอุตสาหกรรมเคมีส่วนมากสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตมีความว่องไวต่อการติดไฟจึงจำเป็นต้องใช้วาล์วที่ควบคุมด้วยสัญญาณลม วงควบคุมเช่นนี้เรียกว่า **วงควบคุมแบบปิด**ซึ่งแสดงเป็นแผนผังสัญญาณการควบคุมดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนผังสัญญาณการควบคุมกระบวนการ (วงควบคุมแบบปิด)

โดยอธิบายแต่ละส่วนของวงควบคุมแบบปิดได้ดังต่อไปนี้

1. เครื่องมือวัด (Transmitter) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าตัวแปรในกระบวนการ เช่น เซ็นเซอร์ควบคุมอุณหภูมิ เซ็นเซอร์ควบคุมความดัน เป็นต้น สัญญาณที่ได้จากเครื่องมือวัดเป็นสัญญาณไฟฟ้าซึ่งเป็นได้ทั้งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและสัญญาณกระแสไฟฟ้า เครื่องมือวัดจะทำการส่งค่าสัญญาณไปยังเครื่องควบคุม
2. กระบวนการ (Process) เป็นหน่วยหลักที่แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการตอบสนองเมื่อมีการปรับเปลี่ยนตัวแปรขาเข้าที่ส่งผลต่อตัวแปรขาออก ซึ่งในบางครั้งจำเป็นต้องทำการควบคุมกระบวนการให้มีเสถียรภาพหรือให้มีค่าตรงตามเป้าหมายที่กำหนดไว้ อาทิเช่น อัตราการไหลของสารเคมีควบคุมโดยการปรับเปลี่ยนวาล์วควบคุม เป็นต้น
3. อุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย (Final control element) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการให้ได้ตามค่าเป้าหมาย เช่น วาล์วควบคุม ซึ่งวาล์วอาจทำการควบคุมได้โดยตรงจากผู้ควบคุมด้วยการหมุนปรับวาล์ว แต่กระบวนการเช่นนี้อาจก่อให้เกิดความผิดพลาดอันเนื่องมาจากผู้ปรับวาล์ว หรืออาจเกิดความล่าช้าในการดำเนินการ จึงมีการใช้วาล์วควบคุมแบบอัตโนมัติแทนซึ่งการทำงานของวาล์วเป็นการรับสัญญาณจากเครื่องควบคุมที่อาจเป็นได้ทั้งสัญญาณไฟฟ้าและสัญญาณลม โดยภายในวาล์วมีแกนขับเคลื่อนปลั๊กวาล์วที่มีรูปแบบต่างๆซึ่งส่งผลให้พฤติกรรมการตอบสนองของอัตราการไหลกับการเคลื่อนที่ของก้านวาล์วแตกต่างกัน เช่น ปลั๊กวาล์วแบบเปิดเร็ว ปลั๊กวาล์วแบบเปอร์เซ็นต์เท่า ปลั๊กวาล์วแบบเส้นตรง หรือปลั๊กวาล์วแบบพาราโบลา เป็นต้น
4. เครื่องควบคุมกระบวนการ (Controller) รับค่าสัญญาณจากเครื่องมือวัดมาเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมายที่ต้องการ ก่อนทำการประเมินผลและส่งสัญญาณออกไปยังอุปกรณ์ควบคุมเพื่อควบคุมกระบวนการ

โดยทั่วไปเครื่องควบคุมแบ่งออกเป็นหลายประเภท เช่น เครื่องควบคุมแบบพี (P) พีไอ (PI) พีดี (PD) และพีไอดี (PID) ซึ่งเครื่องควบคุมแต่ละประเภทมีสมการทางคณิตศาสตร์ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับแนวคิดการควบคุม

แต่เนื่องจากในกระบวนการผลิตจริงตัวแปรควบคุมและตัวแปรปรับในกระบวนการมีมากกว่า 1 ตัวแปรจึงต้องทำการควบคุมแบบแพลนท์ไวด์ (Plantwide control) ซึ่งเป็นการควบคุมทั้งกระบวนการและมองถึงอันตรกิริยาระหว่างตัวแปร โดยมีการนำเทคนิคการควบคุมแบบต่างๆ เข้ามาประยุกต์ใช้ เช่น การควบคุมแบบสัดส่วน (Ratio control) การควบคุมแบบลำดับขั้น (Cascade control) และการควบคุมแบบโอเวอร์ไรด์ (Overide control) เป็นต้น และนอกจากนี้

เครื่องควบคุมบางชนิดยังมีความสามารถในการควบคุมกระบวนการแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear process) เช่น การควบคุมแบบคาดการณ์โดยแบบจำลอง MPC (Model Predictive Control)

2.1.2 กระบวนการควบคุมแบบหลายตัวแปร

(Multivariable process control) (C.A. Smith, 2002)

โดยปกติ วิศวกรมักต้องตอบคำถาม 4 ข้อ ที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมแบบหลายตัวแปร (Multivariable control) เพื่อทำความเข้าใจและแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นต่อกระบวนการ ดังนี้

1. ตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุมคู่ไหนที่ดีที่สุดในการควบคุมตัวแปรกระบวนการ
2. อันตรกิริยาของวงควบคุมมีผลต่อเสถียรภาพของระบบควบคุมอย่างไร
3. การปรับแต่งเครื่องควบคุมแบบป้อนกลับของระบบควบคุมแบบหลายตัวแปรอย่างไร
4. การยุติหรือลดผลกระทบอันเนื่องมาจากอันตรกิริยาจากวงควบคุมทำได้โดยวิธีการใด

โดยปกติ การควบคุมแบบหลายตัวแปร วงควบคุมอาจมีอันตรกิริยาระหว่างกัน ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงในวงควบคุมหนึ่งๆ สามารถส่งผลกระทบให้อีกวงควบคุมได้ ในการศึกษาว่าวงควบคุมใดมีอันตรกิริยาต่อกันหรือไม่ สามารถทำได้โดยประยุกต์ทฤษฎีของเมทริกซ์สัมพัทธ์ของเกน (Relative Gain Array: RGA) ซึ่งสามารถหาได้จากค่าเกนของกระบวนการที่สถานะคงตัว ดังแสดงเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

สำหรับ ระบบ 2X2; ค่าเกนของแต่ละชุดตัวแปรเขียนได้ดังนี้

$$K_{11} = \left.\frac{\Delta c_1}{\Delta m_1}\right|_{m2} \qquad K_{12} = \left.\frac{\Delta c_1}{\Delta m_2}\right|_{m1}$$

$$K_{21} = \left.\frac{\Delta c_2}{\Delta m_1}\right|_{m2} \qquad K_{22} = \left.\frac{\Delta c_2}{\Delta m_2}\right|_{m1} \tag{2}$$

โดยที่ K_{ij} คือ เกนของตัวแปรปรับ j ที่มีผลต่อตัวแปรควบคุม i

เมื่อพิจารณาสมการที่ 2 คู่ตัวแปรปรับกับตัวแปรควบคุมที่ดีที่สุด คือ คู่ที่มีค่าสัมบูรณ์ของค่าเกนในแต่ละแถวสูงที่สุด อย่างไรก็ตาม การหาคู่ตัวแปรปรับกับตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมโดยอาศัยการพิจารณาจากค่าเกนโดยตรง แต่ทั่งนี้ค่าเกนมักมีข้อด้อยอยู่ 3 ประเด็น ดังนี้

1. ค่าเกนที่ได้จากสมการที่ 2 อาจส่งผลให้เลือกชุดตัวแปรปรับที่ซ้ำกัน
2. ค่าเกนมักเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญภายใต้การดำเนินการแบบวงปิด

3. ค่าเกนมีหลายหน่วยทำให้เกิดความยากลำบากในการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากหน่วยที่ต่างกัน

2.1.3 เมทริกซ์สัมพัทธ์ของเกน (Relative Gain Array)

เอด บริสตอล (Ed Bristol) (C.A. Smith, 2002) ได้พัฒนาวิธีการทำให้ระบบเมทริกซ์ของเกนกลายเป็นเมทริกซ์ที่เป็นอิสระจากหน่วย สามารถใช้ได้ภายใต้วงควบคุมแบบปิด และป้องกันปัญหาอันเนื่องมาจากตัวแปรปรับที่ถูกเลือกซ้ำซ้อนกัน

เทคนิคนี้เรียกว่า เกนสัมพัทธ์หรือการวิเคราะห์อันตรกิริยา ผลได้อยู่ในรูปเมทริกซ์เรียกว่า เมทริกซ์สัมพัทธ์ของเกน (Relative Gain Array: RGA) โดยหาได้จากสมการที่ (3)

$$\mu_{ij} = \frac{\left.\frac{\partial C_i}{\partial m_j}\right|_m}{\left.\frac{\partial C_i}{\partial m_j}\right|_c} = \frac{K_{ij}}{K_{ij}^{'}} \tag{3}$$

คำจำกัดความของ μ มีความสำคัญต่อคู่ตัวแปรปรับ-ตัวแปรควบคุมสำหรับพิจารณาผลกระทบของระบบเมื่อวงควบคุมอื่นๆทั้งหมดเป็นวงควบคุมแบบปิด นั่นคือ

ถ้า μ_{12} = 0.8 แสดงว่า เมื่อวงควบคุมอื่นๆเป็นวงปิด ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรปรับ 2 ต่อการควบคุมตัวแปรควบคุม 1 มีค่ามากกว่าเมื่อวงควบคุมอื่นๆเป็นวงควบคุมแบบเปิด

ถ้า μ_{ij} = 1 แสดงว่า ค่าเกนของกระบวนการเท่ากันไม่ว่าวงควบคุมอื่นๆจะเป็นวงควบคุมแบบปิดหรือแบบเปิด โดยสามารถบ่งชี้ได้ว่า ไม่มีผลของอันตรกิริยาระหว่างวงควบคุม

ถ้า μ_{ij} = 0 แสดงว่า อาจเกิดเหตุการณ์ขึ้นได้ 2 กรณี ไม่ทางใดก็ทางหนึ่ง โดยที่ทางแรก ค่าเกนที่วงควบคุมแบบเปิดมีค่าเป็นศูนย์หรือไม่ก็มีค่าน้อยมาก ในกรณีเช่นนี้ แสดงให้เห็นว่า ตัวแปรปรับไม่มีความสามารถในการควบคุมตัวแปรควบคุมเมื่อวงควบคุมอื่นๆเป็นวงปิด ทางที่สอง คือ ค่าเกนของวงปิดมีค่ามากซึ่งส่งผลให้ μ_{ij} มีค่าประมาณศูนย์ ซึ่งทั้งสองกรณีบ่งชี้ว่าไม่ควรเลือกตัวแปรปรับ j ให้ควบคุมตัวแปรควบคุม i

ถ้า $\mu_{ij} = \infty$ มีความเป็นไปได้ 2 กรณีเช่นกัน นั่นคือ กรณีแรก ค่าเกนที่วงปิดเป็นศูนย์หรือน้อยมาก หมายความว่า ในวงควบคุมแบบปิดและเครื่องควบคุมอยู่ในโหมดอัตโนมัติ วงควบคุมไม่สามารถควบคุมได้ เพราะว่าตัวแปรปรับ j ไม่สามารถควบคุมตัวแปรควบคุม i ในอีกกรณีหนึ่ง ค่าเกนวงเปิดมีค่ามาก หมายความว่า เมื่อวงควบคุมอื่นๆอยู่ในโหมดแบบมือปรับ ผลของการปรับตัวแปรปรับ j มีผลต่อตัวแปร i อย่างมาก

ดังนั้น ในการเลือกคู่ตัวแปรปรับ-ตัวแปรควบคุมควบเลือกคู่ตัวแปรที่ให้ผลของ μ_{ij} ใกล้เคียงหรือเข้าใกล้ 1 มากที่สุด

การพิจารณาผลของอันตรกิริยาจากค่าเมทริกซ์สัมพัทธ์ของเกน สังเกตจากแต่ละแถวของเมทริกซ์สัมพัทธ์ของเกนที่มีค่าเกนสัมพัทธ์ตั้งแต่ 2 ค่าขึ้นไปเบี่ยงเบนไปจากหนึ่ง ซึ่งตามกฎของเมทริกซ์เกนสัมพัทธ์กล่าวไว้ว่า เกนสัมพัทธ์ของแต่ละแถวแต่ละหลักต้องรวมกันได้เท่ากับ 1 ตัวอย่างเช่น เมทริกซ์เกนสัมพัทธ์ที่มีอันตรกิริยา คือ [0.75,0.25;0.25,0.75] จะเห็นได้ว่า ในแต่ละแถวค่าเกนสัมพัทธ์เบี่ยงเบนไปจากหนึ่ง แต่กระนั้นผลรวมของเกนสัมพัทธ์ในแถวนั้นๆก็ต้องเท่ากับ 1 ในขณะเดียวกันผลรวมของค่าเกนสัมพัทธ์ในแต่ละหลักก็ต้องเท่ากับ 1 เช่นกัน ลักษณะเมทริกซ์ดังตัวอย่างแสดงให้เห็นว่า ตรงตามหลักการของเมทริกซ์เกนสัมพัทธ์และมีอันตรกิริยา ดังนั้น วิธีการกำจัดหรือลดอันตรกิริยา คือ การทำให้ค่าของเกนสัมพัทธ์ในแนวแทยงเป็น 1 หรือใกล้เคียง 1 ทั้งหมด เช่น [1,0;0,1] ลักษณะเช่นนี้แสดงให้เห็นว่า ไม่มีอันตรกิริยาเกิดขึ้นระหว่างวงควบคุมของคู่ตัวแปรปรับกับตัวแปรควบคุมนั้นๆ

2.1.4 การขจัดความเชื่อมโยงของวงควบคุม (Decouple)

หนึ่งในวิธีการศึกษาการลดผลกระทบของอันตรกิริยาระหว่างวงควบคุม คือ การประยุกต์ระบบ Decoupling เข้าไประหว่างสัญญาณขาออกของเครื่องควบคุมและสัญญาณที่ส่งไปยังตัวแปรปรับ โดยแสดงในรูปเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (4)

$$\begin{bmatrix} c_1(s) \\ c_2(s) \\ c_3(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{P11}(s) & G_{P12}(s) & \cdots & G_{P1n}(s) \\ G_{P21}(s) & G_{P22}(s) & \cdots & G_{P2n}(s) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ G_{Pn1}(s) & G_{Pn2}(s) & \cdots & G_{Pnn}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & D_{12}(s) & \cdots & D_{1n}(s) \\ D_{21}(s) & 1 & \cdots & D_{2n}(s) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ D_{n1}(s) & D_{n2}(s) & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_1(s) \\ M_2(s) \\ \vdots \\ M_n(s) \end{bmatrix} \quad (4)$$

หรือในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ (5)

$$C(s) = G_p(s)D(s)m(s) \quad (5)$$

ลดรูปสมการที่ (5) ได้เป็น $C(s) = G'_p(s)m(s)$ (6)

กล่าวได้ว่า $G_p(s)D(s) = G'_p(s)$ โดยที่

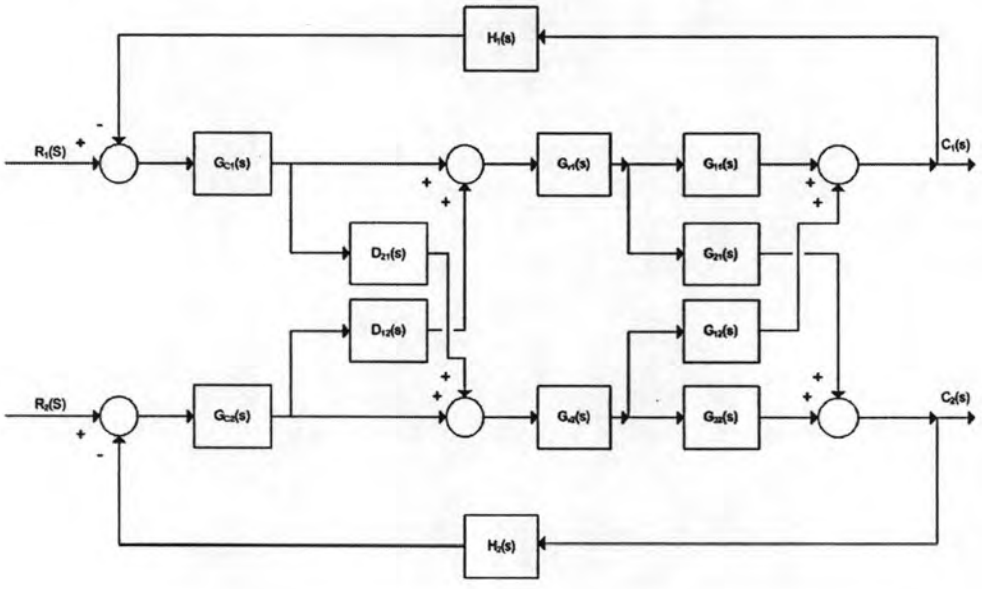
$$G_p'(S) = \begin{bmatrix} G'_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & G'_{22} & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & G'_{33} & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & G'_{nn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

จัดรูปสมการที่ (7) ได้เป็น $D(s) = G^{-1}_{p}(s)G'_{p}(s)$ (8)

ถ้า $B(s) = G^{-1}_{p}(S)$ (9)

ดังนั้น กล่าวได้ว่า $$D_{ij} = \frac{B_{ij}(s)}{B_{jj}(s)}$$ (10)

แผนผังการประยุกต์ระบบ Decoupling ในวงควบคุมแบบปิด แสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ระบบ Decoupling ของวงควบคุมแบบปิด (C.A. Smith, 2002)

2.1.5 การปรับแต่งเครื่องควบคุม (Controller Tuning)

การปรับแต่งเครื่องควบคุมแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบตามวงควบคุม ได้แก่

2.1.5.1 การปรับแต่งพารามิเตอร์การควบคุมแบบวงเปิด (Open loop หรือ Off line tuning)

ซิกเลอร์-นิโคล (Ziegler-Nichols) (B. Bequette, 1998) ได้เสนอการปรับแต่งเครื่องควบคุมโดยใช้ค่าลักษณะเฉพาะของแต่ละกระบวนการในการปรับแต่ง ได้แก่ ค่าเกนของกระบวนการ ค่าเวลาคงที่ของกระบวนการ และค่าเวลาหน่วงต่อการตอบสนองของกระบวนการ โดยทำการปรับเครื่องควบคุมให้อยู่ในโหมดควบคุมเอง (Manual mode) จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณขาออกของเครื่องควบคุมแบบขั้นบันได ทำการเก็บรวบรวมผลที่ได้จากการทดลองก่อนนำมาคำนวณโดยใช้สมการการปรับแต่งเครื่องควบคุมดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมด้วยวิธีการของซิกเลอร์-นิโคล (แบบวงเปิดหรือแบบออฟไลน์)

ชนิดของเครื่องควบคุม	K_C	τ_I	τ_D
พี	$\tau/(K.t_o)$	-	-
พีไอ	$0.9\tau/(K.t_o)$	$3.33t_o$	-
พีไอดี	$1.2\tau/(K.t_o)$	$2t_o$	$0.5t_o$

สำหรับ กระบวนการที่ไม่สามารถปรับตัวเองเข้าสู่สมดุลใหม่ได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรขาเข้าทำให้ไม่สามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นจากการคำนวณตามหลักวิธีการของซิกเลอร์-นิโคล ได้หรือไม่สามารถทำการปรับแต่งวงควบคุมแบบวงเปิดได้

2.1.5.2 การปรับแต่งพารามิเตอร์การควบคุมแบบวงปิด (Closed loop หรือ On line tuning)

เป็นการปรับแต่งเครื่องควบคุมแบบวงปิดเป็นการปรับแต่งโดยการตั้งโหมดการควบคุมเป็นแบบอัตโนมัติ จากนั้นโดยเลือกชนิดของเครื่องควบคุมแบบพีเท่านั้น ทำการเพิ่มค่า K_C เรื่อยๆ อย่างช้าๆจนกระทั่งได้พฤติกรรมการตอบสนองของกระบวนการที่เป็นการแกว่งซึ่งมีแอมพลิจูดคงที่ ค่า K_C ขณะนั้น คือ ค่าเกนสูงสุด (K_{CU}) ที่ยังคงทำให้กระบวนการยังคงมีเสถียรภาพ และค่าคาบในขณะนั้นเรียกว่า คาบสูงสุด (T_{CU}) นำค่าทั้งสองนี้ใช้ในการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุม

ในที่นี้ได้แสดงการปรับแต่งเครื่องควบคุมแบบสัดส่วนลดทอนเศษหนึ่งส่วนสี่ของซิกเลอร์-นิโคลและไทเรียส-ลูเบน

ในปัจจุบันการปรับแต่งด้วยวิธีการของซิกเลอร์-นิโคล ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ไม่ได้มีการใช้อย่างแพร่หลายเนื่องมาจาก พฤติกรรมของกระบวนการแบบวงปิดก่อให้เกิดการแกว่ง นอกจากนี้ ระบบยังไวต่อการตอบสนองกับความไม่แน่นอนที่มากับตัวแปรกระบวนการอย่างมาก

ตารางที่ 2.2 การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมด้วยวิธีการของซิกเลอร์-นิโคล (แบบวงปิดหรือแบบออนไลน์) (B. Bequette, 1998)

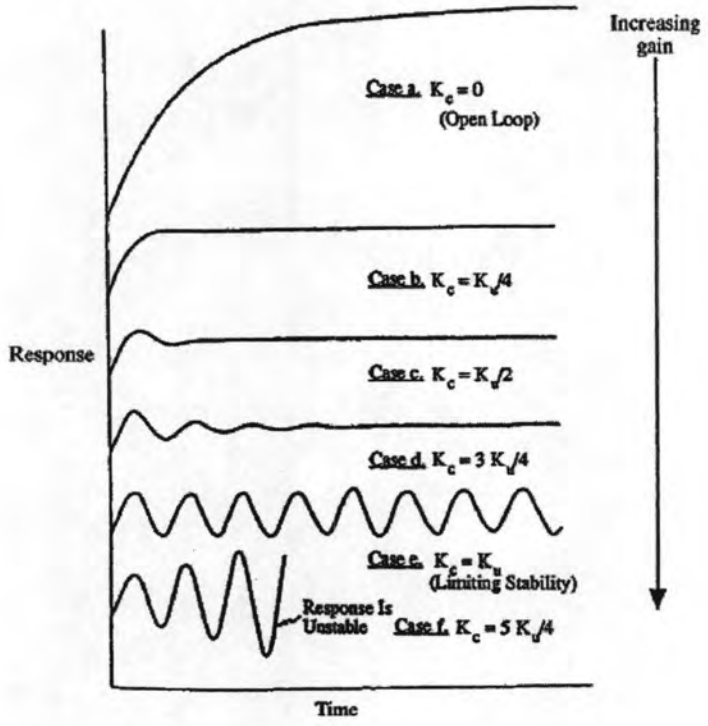
ชนิดของเครื่องควบคุม	K_C	τ_I	τ_D
พี	$0.50K_{CU}$	-	-
พีไอ	$0.45K_{CU}$	$P_U/1.2$	-
พีไอดี	$0.60K_{CU}$	$P_U/2.0$	$P_U/8.0$

ไทเรียส-ลูเบน (Tyreus-Luyben) (B. Bequette, 1998) ได้ทำการแนะนำการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมที่มีผลให้เกิดการแกว่งน้อยลงและมีความไวต่อการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงน้อยลง แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมด้วยวิธีการของไทเรียส-ลูเบน

ชนิดของเครื่องควบคุม	Kc	τ_I	τ_D
พีไอ	Kcu/3.2	2.2Pu	-
พีไอดี	Kcu/2.2	2.2 Pu	Pu/6.3

ผลของการเพิ่มค่า Kc ของเครื่องควบคุมก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของกระบวนการ โดยค่า Kc ที่ป้อนเข้าเครื่องควบคุมจะต้องไม่เกินกว่าค่า Kcu ที่หาได้จากการทดสอบวิธีการแบบวงปิด ทั้งนี้ เนื่องมาจากค่าเกนสูงสุดเป็นค่าเกนค่าสุดท้ายที่กระบวนการยังคงรักษาเสถียรภาพไว้ได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 พฤติกรรมของกระบวนการเมื่อทำการเพิ่มค่า Kc (Perry & Green, 1998)

2.1.6 การวิเคราะห์สมรรถนะของกระบวนการควบคุมด้วยค่าไอเออี

การวิเคราะห์สมรรถนะของกระบวนการควบคุมด้วยค่าไอเออี (Integral of Absolute value of Error: IAE) เป็นการวิเคราะห์ค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนตลอดระยะเวลาของการดำเนินการเพื่อประเมินสมรรถนะของการควบคุม โดยหาได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ดังสมการที่ (11)

$$IAE = \int_0^\infty |e(t)|dt \tag{11}$$

กระบวนการควบคุมที่มีค่าไอเออีที่ต่ำกว่าอีกกระบวนการหนึ่ง สะท้อนให้เห็นถึงสมรรถนะของการควบคุมกระบวนการที่ดีกว่า เนื่องจากมีค่าผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนตลอดทั้งกระบวนการตั้งแต่กระบวนการเริ่มเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งกลับสู่สภาพปกติมีค่าน้อย

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

P. Guedes และคณะ (2007) ได้ศึกษาถึงผลของการดำเนินการกลั่นสารอะซีโอโทรป (1,2 ไดคลอโรอีเทนและน้ำ) โดยโปรแกรม Aspen Plus™ และ Aspen Dynamics™ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของพลังงานที่ใช้ในหม้อต้มซ้ำ (Reboiler) ที่น้อยที่สุดที่กระบวนการผลิตยังสามารถดำเนินการได้อย่างมีเสถียรภาพ และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการผลิตได้ค่าตามมาตรฐาน โดยได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนสำคัญ คือ ส่วนของการจำลองการผลิตที่สถานะคงตัวและส่วนของการศึกษาพฤติกรรมกระบวนการเชิงพลวัต ในกรณีศึกษาที่สถานะคงตัว พบว่าที่อุณหภูมิป้อนเข้าหอกลั่นคงที่ที่ 38 องศาเซลเซียส ในโรงงานผลิตมีการใช้พลังงานในหม้อต้มซ้ำถึง 1.52 x 10^6 กิโลแคลอรี่ต่อชั่วโมง เพื่อกลั่นให้ได้ผลิตภัณฑ์ 1,2 ไดคลอโรอีเทนที่บริสุทธิ์ แต่เมื่อทำการศึกษาผลของการใช้พลังงานในหม้อต้มซ้ำโดยโปรแกรม Aspen Plus™ พบว่าหากใช้พลังงานในหม้อต้มซ้ำเพียง 1.20 x 10^6 กิโลแคลอรี่ต่อชั่วโมง ผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็ยังคงได้ค่าตามมาตรฐาน ซึ่งทำให้สามารถประหยัดพลังงานได้ถึง 21% จากนั้นจึงทำการศึกษากระบวนการผลิตเชิงพลวัตโดยการรบกวนพลังงานที่ใช้ที่หม้อต้มซ้ำให้ลดลงจาก 1.52 เป็น 1.00 (x 10^6 กิโลแคลอรี่ต่อชั่วโมง) ที่เวลา 2 ชั่วโมงของการดำเนินการ จากผลการศึกษาพบว่า ที่เวลาผ่านไป 1.5 ชั่วโมง กระบวนการไม่สามารถรักษาเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์ให้ได้ตามค่ามาตรฐานที่วางไว้

L. I-Kuan และคณะ (2006) ได้ศึกษาผลของการควบคุมกระบวนการผลิตแอซีเทตโดยใช้หอกลั่นแบบปฏิกิริยา สารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการ คือ กรดและแอลกอฮอล์โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ที่หม้อต้มซ้ำ ในการดำเนินการพบว่า สารตั้งต้นทั้งสอง ผลิตภัณฑ์แอซีเทต และน้ำที่เกิดขึ้นสามารถเกิดพฤติกรรมไม่อุดมคติแบบอะซีโอโทรปได้ ดังนั้น จึงต้องทำการกลั่นสารที่ได้จากหอกลั่นแบบปฏิกิริยาโดยใช้หอ Stripper ผลิตภัณฑ์แอซีเทตที่ได้ออกทางก้นหอ Stripper ซึ่ง

ต้องการความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ที่ 99% โดยให้มีกรดปนเปื้อนได้ไม่เกิน 0.01% จากการศึกษาที่สถานะคงตัวโดยโปรแกรม Aspen Plus™ พบว่า หากใช้สารป้อนเป็นสารบริสุทธิ์จะสามารถลดค่าใช้จ่ายทั้งหมดต่อปีได้ถึง 5% ของการผลิตเอทิลแอซีเทต และ 8% สำหรับการผลิตไอโซโพรพิล-แอซีเทตเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้สารป้อนเป็นสารอะซีโอโทรป ต่อมาได้ทำการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตโดยโปรแกรม Aspen Dynamics™ โดยทำการศึกษาโครงสร้างการควบคุม 2 รูปแบบ นั่นคือ รูปแบบที่ 1 เป็นการควบคุมแบบ Dual temperature control เป็นการหาตัวแปรปรับเพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในหอกลั่นปฏิกิริยาและหอ Stripper ผลที่ได้คือ ผลิตภัณฑ์แอซีเทตไม่ได้ค่าความบริสุทธิ์ตามที่ต้องการโดยมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น จากนั้นผู้วิจัยจึงทำการศึกษาโครงสร้างการควบคุมแบบใหม่ที่เรียกว่า One-temperature-one-composition control เป็นการควบคุมอุณหภูมิที่หอกลั่นปฏิกิริยา และควบคุมความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ก้นหอ Stripper ผลที่ได้พบว่า การควบคุมกรณีนี้สามารถได้ผลิตภัณฑ์แอซีเทตตามความคาดหมาย

F. Bezzo และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาการใช้เครื่องควบคุมแบบแบบ MPC (Model predictive control) เพื่อควบคุมหอกลั่นที่มีถังลำเลียงสารป้อน โดยแบ่งออกเป็น 4 กรณีศึกษา นั่นคือ กรณีที่ 1 มีถังลำเลียงสารป้อนขนาดความจุ 40 กิโลโมลและใช้เครื่องควบคุมแบบพีไอ กรณีที่ 2 ไม่มีถังลำเลียงสารป้อนและใช้เครื่องควบคุมแบบ MPC กรณีที่ 3 มีถังลำเลียงสารป้อนขนาดความจุ 2.5 กิโลโมล และใช้เครื่องควบคุมแบบ MPC กรณีที่ 4 มีถังลำเลียงสารป้อนขนาดความจุ 40 กิโลโมล และใช้เครื่องควบคุมแบบ MPC จากผลการศึกษาพบว่า เครื่องควบคุมแบบ MPC สามารถควบคุมองค์ประกอบของสารที่ยอดหอกลั่นและก้นหอกลั่น รวมถึงระดับของสารป้อนในถังลำเลียงและอัตราการป้อนของสารป้อนเข้าหอกลั่นได้ดีกว่ากรณีใช้เครื่องควบคุมแบบพีไอ ดังกรณีที่ 1 แต่ในบางกรณี อย่างเช่น เมื่อปัจจัยรบกวนอัตราการป้อนของสารป้อนไม่สามารถวัดค่าได้ กรณีศึกษาที่ 2 ที่ใช้เครื่องควบคุมแบบ MPC ให้การควบคุมองค์ประกอบของสารที่ยอดหอและก้นหอได้ไม่ดีเท่าเครื่องควบคุมแบบพีไอ และในกรณีที่ปัจจัยรบกวนอันเนื่องมาจากองค์ประกอบของสารป้อนไม่สามารถวัดค่าได้ กรณีศึกษาที่ 1 จะให้ผลการควบคุมกระบวนการได้ดีที่สุด นอกจากนี้ ความแตกต่างของขนาดของถังลำเลียงสารป้อนก็ให้พฤติกรรมการควบคุมกระบวนการได้แตกต่างกันอย่างชัดเจนในแง่ของการควบคุมระดับของเหลวในถังลำเลียงและอัตราการป้อนของสารป้อนจากถังลำเลียงเข้าสู่หอกลั่น

S. Hurowitz และคณะ (2003) ได้ศึกษาการเลือกโครงสร้างการควบคุมของกระบวนการกลั่นสาร โดยศึกษาจากกระบวนการกลั่นโพรพีลีนและโพรเพน (C_3 splitter) หอการกลั่นสุญญากาศไซลีนและโทลูอีน และหอกลั่น Depropanizer โดยการศึกษาถึงผลของคู่ตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุม ผู้วิจัยได้เลือกคู่ตัวแปรปรับที่ยอดหอและก้นหอทั้งสิ้น 9 คู่ ก่อนทำการ

พิจารณาสมรรถนะการควบคุมซึ่งพิจารณาได้จากค่าไอเออีที่ต่ำที่สุดของคู่ตัวแปรปรับนั้นๆ หอกลั่นที่เลือกมาศึกษาทั้งสามหอเมื่อทำการควบคุมโดยตัวแปรปรับทั้ง 9 คู่ ผลที่ได้คือ คู่ตัวแปรปรับบางคู่ให้ผลการควบคุมที่ไม่ดี ในขณะที่บางคู่ตัวแปรปรับให้ผลการทดลองที่ดีและเหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในกระบวนการควบคุมการผลิต

E. Gagnon **และคณะ** (1998) ทำการศึกษาเสถียรภาพความคงทนและสมรรถนะของความคงทนของระบบ decoupling โดยทำการปรับแต่งค่าเครื่องควบคุมเพื่อให้สมรรถนะของวงควบคุมแบบปิดเท่ากัน ระบบ decoupling ที่ทำการศึกษาแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ Ideal decoupling, Simplified decoupling และ Inverted decoupling โดยใช้วิธีการที่เรียกว่า Structured singular value (SSV) ในการหาข้อเปรียบเทียบของระบบ decoupling ทั้ง 3 รูปแบบ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้สรุปข้อดี-ข้อเสีย และข้อจำกัดของการนำระบบ decoupling ไปใช้ โดยสามารถใช้เป็นแนวทางในการศึกษา และหากทำการปรับแต่งค่าเครื่องคุมให้ได้สมรรถนะที่เหมือนกัน จากผลการศึกษาพบว่า ในระบบวงควบคุมแบบปิดที่เสถียรภาพจะมีความคงทนทั้งด้านสมรรถนะการควบคุมและเสถียรภาพของการควบคุมที่เท่ากันของระบบ decoupling ทั้ง 3 กรณี

เมื่อพิจารณางานวิจัยข้างต้นทำให้ได้ทราบถึงทฤษฎีและวิธีการในการศึกษางานวิจัยด้านการควบคุมกระบวนการ โดยงานวิจัยแรกได้นำแนวทางการวิเคราะห์พฤติกรรมของสารไม่อุดมคติภายในหอกลั่นระเหยน้ำมาประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นของหอกลั่น ในงานวิจัยที่สองได้แนะนำการเลือกคู่ตัวแปรปรับ-ตัวแปรควบคุมกระบวนการด้วยวิธีการวิเคราะห์เมทริกซ์เกนสัมพัทธ์สำหรับระบบควบคุมที่มีตัวแปรหลายตัวแปรและเหมาะเป็นอย่างยิ่งในการนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย งานวิจัยที่สามทำให้ทราบถึงความแตกต่างของกระบวนการควบคุมขั้นสูง (Advance process control) กับกระบวนการควบคุมดั้งเดิม อีกทั้งยังเป็นงานวิจัยที่อธิบายถึงการลดการกระชากของสารป้อนเข้าสู่หอกลั่นโดยการติดตั้งถังสะสมก่อนป้อนสารเข้าสู่หอกลั่น ซึ่งคล้ายคลึงกับหน่วยปฏิบัติการกลั่นระเหยน้ำออกจากเฮกเซนของงานวิจัยนี้ งานวิจัยที่สี่ได้แสดงวิธีการวิเคราะห์สมรรถนะเชิงปริมาณด้วยค่าสัมบูรณ์ของความคลาดเคลื่อน (Integral of Absolute value of Error) และการควบคุมหอกลั่นขั้นต้นซึ่งเป็นแนวทางในการวิเคราะห์วงควบคุมของงานวิจัยที่ได้ศึกษา และงานวิจัยที่ห้าได้อธิบายถึงวิธีการหยุดหรือขจัดอันตรกิริยาระหว่างวงควบคุมที่เป็นหนึ่งในปัญหาสำคัญยิ่งของกระบวนการควบคุมที่มีวงควบคุมหลายวง ทำให้ทราบถึงวิธีการวิเคราะห์และชนิดของการลดผลกระทบของอันตรกิริยาระหว่างวงควบคุม จากแนวคิดที่ได้จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในข้างต้นถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยในหลายภา
ดังจะได้กล่าวต่อไป