บทที่ 3

ตัวควบคุมฟัซซีแบบฐานแบบจำลอง

Fuzzy Model-based Control

เทคนิคการควบคุมแบบใช้แบบจำลอง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ตัวควบคุมแบบทำนายผล (Predictive Control) เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายมากในอุตสาหกรรมเคมีของปัจจุบัน การควบคุมกระบวนการแบบทำนายผลโดยใช้แบบจำลองมีแนวโน้มที่จะถูกจะมาใช้แทนการควบคุมแบบดั่งเดิมที่มีอยู่ การพัฒนาตัวควบคุมแบบใช้แบบจำลองเริ่มต้นพัฒนามาจากการใช้แบบจำลองเชิงเส้นมาก่อนอย่างไรก็ตาม ในทางด้านตัวควบคุมนั้นในแบบจำลองเชิงเส้นเป็นหลัก ดังนั้นเมื่อต้องการควบคุมกระบวนการที่ไม่เป็นเชิงเส้นนั้น ก็จะทำให้สมรรถนะในการควบคุมต่ำลง ด้วยเหตุผลดังกล่าว ต่อมาจึงขยายเป็นการใช้แบบจำลองแบบไม่เป็นเชิงเส้น ในปัจจุบันกระแสความสนใจของงานในด้านนี้จึงมุ่งเน้นไปที่ การควบคุมแบบฐานแบบจำลอง (Model-based Control) ซึ่งสมรรถนะของการควบคุมจะขึ้นอยู่กับความแม่นยำและความทนทานของแบบจำลองที่ใช้ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อยู่ในรูปไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear) ในบางครั้งไม่สามารถทำได้ การใช้แบบจำลองแบบกล่องดำจึงเข้ามามีบทบาทที่สำคัญในการระบุหาแบบจำลอง แบบจำลองความสัมพันธ์ฟัซซีเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถทำได้และจะได้กล่าวต่อไปในบทนี้ และการใช้แบบจำลองความสัมพันธ์ฟัซซีมาใส่ไว้ในโครงสร้างการควบคุมแบบใช้แบบจำลองภายในที่เรียกว่า ไอเอ็มซี (Internal Model Control (IMC)) เพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการต่างๆแทนการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งบางครั้งมีความยุ่งยากซับซ้อนในการแก้สมการพารามิเตอร์บางตัวไม่สามารถหาได้ สมมติฐานบางอย่างที่ตั้งไว้ไม่ถูกต้องตามสภาพความเป็นจริง ทำให้แบบจำลองที่ได้มีประสิทธิภาพลดลงหรือผิดเพี้ยนไปจากการความเป็นจริง

3.1 แบบจำลองฟัซซีความสัมพันธ์ฟัซซี (Fuzzy Relational Model)

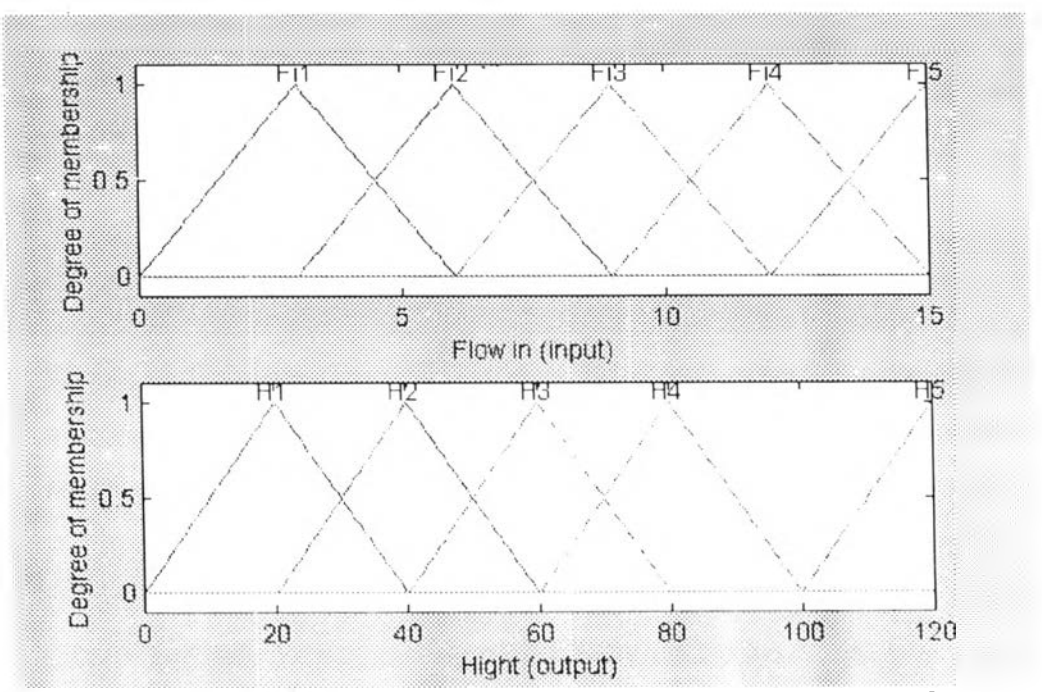
การสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ฟัซซีในงานวิจัยนี้เป็นการระบุหาและการทำนายพลศาสตร์ของกระบวนการ MIMO ที่ออกแบบโดย Ridley, Shaw และ Kruger เป็นแบบจำลองกระบวนการที่สร้างขึ้นโดยตรงจากข้อมูลอินพุท-เอาท์พุท (i/o Data) ของกระบวนการ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรอินพุทไป และสังเกตดูผลกระทบจากการเปลี่ยนค่าอินพุทนั้นๆที่เกิดขึ้นกับตัวแปรตัวอื่นๆ หรือเอาท์พุทของระบบนั้นว่าเป็นอย่างไร

การสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ฟัซซีที่แม่นยำนั้น มีส่วนที่ต้องพิจารณาหลายส่วนด้วยกัน ได้แก่ การหาโครงสร้างของแบบจำลองที่เหมาะสม จำนวนและลักษณะของฟัซซีเซ็ตอ้างอิง และอัลกอริธึมที่ใช้สร้างอาร์เรย์ของความสัมพันธ์ ซึ่งมีข้อเสนอแนะต่างๆดังต่อไปนี้

ฟัซซีเซ็ตอ้างอิง (Fuzzy Reference Sets)

ฟัซซีเซ็ตอ้างอิงนั้นเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายตัวแปรของระบบในลักษณะของตัวแปรเชิงภาษา โดยจะกำหนดฟัซซีเซ็ตอ้างอิงในช่วงที่ตัวแปรของระบบมีค่าอยู่ระหว่าง ฟัซซีเซ็ตอ้างอิงประกอบไปด้วยฟัซซีเซ็ตหลายๆ เซ็ตโดยที่ฟัซซีเซ็ตของแต่ละตัวแปรจะถูกนิยามให้ครอบคลุมในช่วงที่สนใจ และกำหนดให้ฟัซซีเซ็ตอ้างอิงเหล่านี้อยู่ในลักษณะที่คาบเกี่ยวกันอยู่ (Overlap) ความสัมพันธ์ฟัซซีที่กำหนดบนฟัซซีเซ็ตอ้างอิงใดๆ เป็นการกำหนดว่าค่าจริงนั้นๆมีค่าความเป็นสมาชิกเป็นเท่าไร ในแต่ละฟัซซีเซ็ตอ้างอิงแต่ละเซ็ต นำค่าตัวแปรที่ต้องการจะแปลงเป็นค่าฟัซซีมาแจกแจงลงในฟัซซีเซ็ตอ้างอิง รูปที่ 3.1-1 เป็นรูปแสดงฟัซซีเซ็ตอ้างอิงสามเหลี่ยมของตัวแปรอินพุทและเอาท์พุทของกระบวนการของถังที่มีการไหลแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งอินพุทคืออัตราการไหลขาเข้าของน้ำมีย่านการไหลอยู่ในช่วงระหว่าง 0-15 ลิตรต่อนาที และเอาท์พุทของกระบวนการเป็นความสูงของระดับน้ำภายในถังอยู่ในช่วง 0-120 เซนติเมตร

โดยที่แต่ละอินพุทเอาท์พุทประกอบด้วยฟัซซีเซ็ตอ้างอิง 5 เซ็ตที่คาบเกี่ยวกันอยู่ ด้วยกัน เมื่ออินพุทมีค่าเป็น 6 ลิตรต่อนาที แปลงให้อยู่ในฟัซซีโดเมนได้เป็น $F_1 = \{0, 1, 0, 0, 0\}$ หรือเอาท์พุที่เป็นความสูงของถังมีค่าเป็น 50 เซนติเมตรเมื่อแปลงเป็นฟัซซีโดเมนก็จะเป็น $H = \{0, 0.5, 0.5, 0, 0\}$



รูปที่ 3.1-1 แสดงฟัซซีเซ็ตอ้างอิงของแบบจำลองฟัซซีของกระบวนการไหลของถังแรงโน้มถ่วง

โครงสร้างของแบบจำลองความสัมพันธ์ฟัซซี

โครงสร้างของแบบจำลองความสัมพันธ์ฟัซซีประกอบไปด้วยอินพุทและเอาท์พุทของกระบวนการในปัจจุบัน และอินพุทของกระบวนการในอดีต โครงสร้างแบบจำลองจะเป็นอย่างไรหาได้โดยการทดลองเท่านั้น โดยการกำหนดโครงสร้างของแบบจำลองฟัซซี ได้แล้วของแบบจำลองต้องทำการเลือกโครงสร้างแบบจำลองฟัซซีที่ โดยใช้ค่าความผิดพลาดทำนายเอาท์พุทค่าอินทิกรัลของกำลังสองของความผิดพลาดเป็นเกณฑ์ ในการพิจารณา แบบจำลองดังกล่าวสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$y'(k) = R \circ y(k-1) \circ u_1(k-\tau_1) \circ \cdots \circ u_n(k-\tau_n) \qquad (3.1)$$

โดยที่

y' คือ อาร์เรย์ ของความเป็นสมาชิกของเซ็ตอ้างอิงของ เอาท์พุท ที่ทำนายได้ที่เวลา k ต่างๆ

y คือ อาร์เรย์ ของความเป็นสมาชิกของเซ็ตอ้างอิงของ เอาท์พุท ที่ออกจากระบบที่เวลา k

R คือ ความสัมพันธ์อาร์เรย์ (Relational Array) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรอินพุทและเอาท์พุท

u_i คือ อาร์เรย์ของความเป็นสมาชิกของเซ็ตอ้างอิงของตัวแปรอินพุท ซึ่งก็คือตัวแปรปรับในกระบวนการ

τ_i คือ ค่าเดทไทม์ (Deadtime) ของตัวแปรปรับ i ซึ่งแสดงถึงเวลาที่หน่วงไปเมื่อทำการเปลี่ยนอินพุทจนถึงเวลาที่การเปลี่ยนแปลงนั้นมีผลต่อเอาท์พุทของกระบวนการ

$\circ$ คือ การดำเนินการประกอบฟัซซี (Fuzzy Composition Operation)

อาร์เรย์ของความสัมพันธ์

อาร์เรย์ของความสัมพันธ์เป็นอาร์เรย์หลายมิติที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุทและเอาท์พุทของกระบวนการ โดยสมมติว่า อินพุททุกตัวมีความสัมพันธ์กันในลักษณะของความสัมพันธ์ฟัซซี กับเอาท์พุททุกตัว ความสัมพันธ์นี้อยู่ในรูปแบบของอาร์เรย์ เป็นอาร์เรย์ที่ประกอบไปด้วยเซลล์ต่างๆที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอินพุทและเอาท์พุทที่อาจเกิดขึ้นได้ โดยที่แต่ละเซลล์จะเป็นตัวเลขใดๆ ที่อยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งแสดงค่าความเป็นจริงของแต่ละความสัมพันธ์ กล่าวคือ ถ้าความสัมพันธ์นั้นๆ มีค่าเป็น 1 แสดงว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างมาก และ ถ้าความสัมพันธ์นั้นๆ มีค่าเป็น 0 แสดงความอินพุทและเอาท์พุทนั้นๆ ไม่มีความสัมพันธ์กันเลย โดยความสัมพันธ์นี้เรียกว่า ความสัมพันธ์อาร์เรย์ที่คำนวณได้จากการข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทดังกล่าวข้างต้น เป็นข้อมูลที่ได้จากการทดลองปรับตัวแปรปรับแล้วดูว่าการปรับนั้นมีผลอย่างไรกับระบบหรือตัวแปรที่กำลังสนใจอยู่

จากสมการความสัมพันธ์นี้ R เป็นอาร์เรย์หลายมิติ ได้มีนักวิจัยหลายคนคิดค้นหาเทคนิคการหาไว้หลายคน อาจเรียกได้ว่า R นี้ก็คือแบบจำลองความสัมพันธ์ฟัซซีของกระบวนการนั่นเอง โดยที่แบบจำลองความสัมพันธ์ที่ดี ควรมีคุณสมบัติที่สามารถให้เอาท์พุทที่ถูกต้องแม่นยำ และสามารถทนทานต่อสัญญาณรบกวนต่างๆได้ดี ในที่นี้ได้เลือกเอาวิธีการหาความสัมพันธ์อาร์เรย์โดยวิธีการของ RSK (Ridley, Shaw and Kruger, 1988) ซึ่งหาความสัมพันธ์อาเรย์ที่เวลา k ได้ดังสมการ

$$R(S_1,\ldots,S_n,S) = \frac{\sum fs_1,\ldots,s_n(k)\,p_s(k)}{\sum fs_1,\ldots,s_n(k)} \qquad (3.2)$$

เมื่อ $fs_1,\ldots,s_n(k)$ เป็นผลคูณโปรดัก (Product) ของ $p_{1s1}(k),\ldots,p_{nsn}(k)$ ซึ่งก็คือความเป็นสมาชิกของอินพุทแต่ละตัวที่อยู่ในเซ็ตอ้างอิงแต่ละตัว

ในทางปฏิบัติเมื่อต้องการหาอาร์เรย์ของความสัมพันธ์ R เมื่อเวลาผ่านไป สามารถคิดได้จากความสัมพันธ์ที่เวลาก่อนหน้านั้นได้ สมการก็จะอยู่ในรูปของ

$$R_m(S_1,\ldots,S_n) = \frac{f_{S1,\ldots,Sn}(m)\,p_s(m)}{\sum_{k=1}^{m} f_{S1,\ldots,Sn}(k)} + \frac{R_{m-1}(S_1,\ldots,S_n)\sum_{k=1}^{m-1} f_{S1,\ldots,Sn}(k)}{\sum_{k=1}^{m} f_{S1,\ldots,Sn}(k)} \qquad (3.3)$$

เมื่อ R_m และ R_{m-1} คือ ความสัมพันธ์อาเรย์ที่ได้จากข้อมูลอินพุท-เอาท์พุท ชุดที่ m และ $(m-1)$ สมการในรูปแบบนี้สามารถใช้ในการระบุหาแบบจำลองในลักษณะออนไลน์

หลังจากกำหนดฟัซซีเซ็ตอ้างอิงและหาโครงสร้างของแบบจำลองได้เรียบร้อยแล้วก็จะทำได้แบบจำลองฟัซซี หลักการโดยทั่วไปในการของการนำเอาระบบฟัซซีมาใช้อาจแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนหลักๆด้วยกัน ซึ่งประกอบด้วย

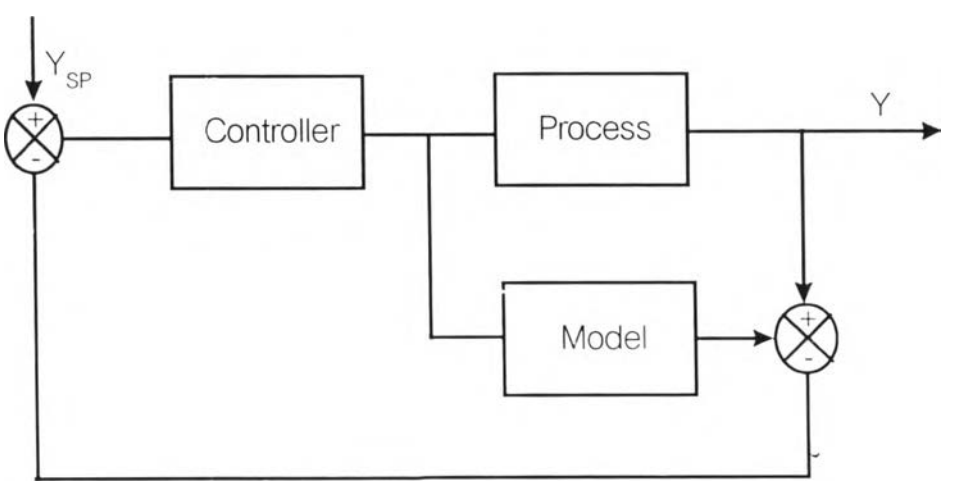
1. การฟัซซิฟิเคชั่น (Fuzzify, Fuzzification) เป็นการเปลี่ยนค่าอินพุทและเอาท์พุทต่างๆ ของระบบที่ต้องการใช้ในการสร้างแบบจำลอง ซึ่งเป็นค่า คริสพ์เซ็ต หรือค่าจริง มาให้อยู่ในฟัซซีโดเมน ซึ่งเป็นเซ็ตของจำนวนฟัซซี

2. การหาความสัมพันธ์ฟัซซี หรือหากฎฟัซซี ซึ่งสามารถหาได้ด้วยวิธีการและรูปแบบที่แตกต่างกัน เมื่อได้ความสัมพันธ์ที่สามารถใส่ค่าอินพุทของแบบจำลองลงไป แล้วให้ค่าเอาท์พุทของแบบจำลองออกมาซึ่งเอาท์พุท ที่ออกมานั้นจะอยู่ในรูปแบบของฟัซซีโดเมน (Fuzzy Domain)
3. ดีฟัซซิฟิเคชั่น (Defuzzify, Defuzzification) เป็นการนำค่าค่าเอาท์พุทที่ได้จากแบบจำลองฟัซซีมาแปลงจากค่าฟัซซีกลับมาให้อยู่ใน ค่าจริง เพื่อนำค่านั้นไปใช้เป็นเอาท์พุทของระบบ

การทำฟัซซิฟิเคชั้น และดีฟัซซิฟิเคชั่นนั้นได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 ว่าสามารถทำได้หลายวิธีเช่นเดียวกัน แต่ละวิธีการมีความซับซ้อนและความเหมาะสมแตกต่างกันไป ตามลักษณะการนำไปประยุกต์ใช้งาน

3.2 การควบคุมฟัซซีแบบฐานแบบจำลอง (Fuzzy Model-Based Control)

โครงสร้างของการควบคุมแบบฐานแบบจำลองที่ใช้ในกรณีนี้เป็นในลักษณะของ การควบคุมแบบใช้แบบจำลองภายใน (Internal Model Control (IMC)) ซึ่ง Gracia และคณะ เป็นผู้เสนอไว้ ในปี ค.ศ. 1989 เพียงแต่แบบจำลองที่ใช้ในการควบคุมถูกเปลี่ยนเป็นแบบจำลองฟัซซี เพื่อให้สามารถใช้ได้กับกระบวนการที่ไม่สามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ หรือยุ่งยากซับซ้อน โดยโครงสร้างของการควบคุมแบบใช้แบบจำลองภายในนี้จะมีส่วนที่ทำหน้าที่ หาค่าของตัวแปรปรับที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองกระบวนการที่จำลองขึ้นเป็นค่าตัวแปรปรับที่ทำให้ได้ค่าของฟังก์ชั่นเป้าหมาย (Objective Function) ที่ตั้งขึ้น



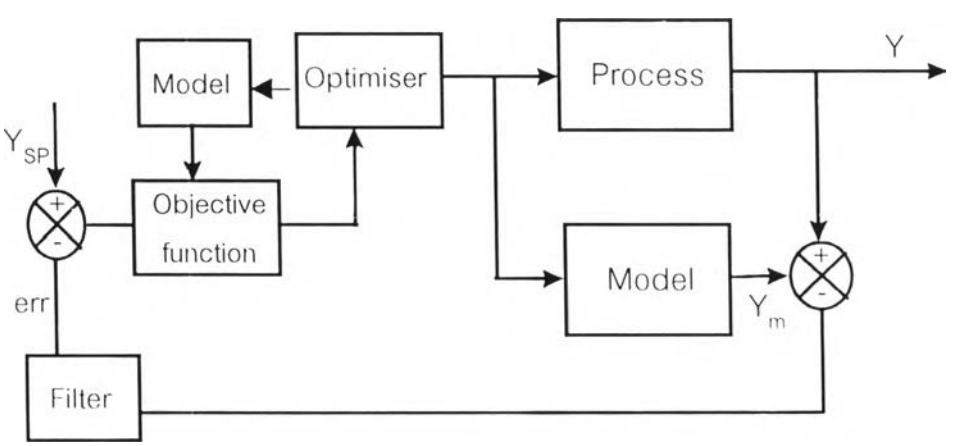
รูปที่ 3.2-1 ลักษณะของโครงสร้างการควบคุมแบบใช้แบบจำลองภายในโดยทั่วไป

ลักษณะที่สำคัญของการควบคุมแบบใช้แบบจำลองภายในนี้ ยังสามารถจัดการกับความแตกต่างระหว่างเอาท์พุทที่ได้จากแบบจำลอง และเอาท์พุทที่ได้จากกระบวนการจริงได้ โดยที่ค่าเอาท์พุทจากตัวควบคุมที่

จะส่งไปใช้ในการควบคุมกระบวนการจะถูกส่งไปที่แบบจำลองกระบวนการอีกตัวที่อยู่ขนานกับกระบวนการ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่เหมือนกันกับแบบจำลองที่อยู่ในตัวควบคุมด้วย ค่าความแตกต่างของเอาท์พุทของกระบวนการจริงและเอาท์พุทของแบบจำลองที่ออกมานั้น แสดงถึงความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง (Modeling Error) และตัวรบกวนกระบวนการ (Process Disturbance) ค่าความแตกต่างนี้ถูกส่งกลับเข้าไปที่ตัวควบคุมเพื่อใช้ในการชดเชย ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองและตัวรบกวนที่เกิดขึ้นในกระบวนการจริงซึ่งไม่มีในแบบจำลอง

หลักการของตัวควบคุมแบบใช้แบบจำลองภายในนี้ที่ต่างไปจากลักษณะทั่วไปตรงที่ แบบจำลองที่ใช้ในการควบคุมนี้เป็นแบบจำลองความสัมพันธ์ฟัซซี ซึ่งทำให้เกิดปัญหาตรงที่เป็นการยุ่งยากที่จะปรับแบบจำลองฟัซซีเพื่อให้เป็นไปสมการการควบคุม และแม้ว่ามีงานวิจัยหลายชิ้นที่ผ่านมาในอดีต ที่พยายามสร้างอินเวอร์สของแบบจำลอง (Inversion of Relational Model) เพื่อให้ได้คำตอบเป็นค่าตัวแปรรับเพื่อควบคุมได้โดยตรงทันที แต่ก็ปรากฏว่า การสร้างแบบจำลองอินเวอร์สนั้น ทำให้ได้คำตอบของออกมาหลายคำตอบ แทนที่จะได้คำตอบเดียวที่ทำให้การควบคุมไปสู่เป้าหมายได้

ส่วนที่ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมของการควบคุมแบบที่ว่านี้ แบ่งการปฏิบัติการออกเป็น 3 ส่วนคือ ออพติไมเซอร์ (Optimizer) แบบจำลอง (Model) และ ฟังก์ชั่นเป้าหมาย (Objective Function) ซึ่งรวมกันอยู่ในส่วนของตัวควบคุม ตัวออพติไมเซอร์ จะทำหน้าที่หาอินพุทของกระบวนการที่เหมาะสม ตามวิธีการค้นหาที่เรียกว่า ฟิโบแนคชี (Fibonacci Search) เป็นวิธีการหาค่าที่ออพติไมส์ของสมการเชิงเส้นใดๆ โดยมีข้อจำกัดของกระบวนการเป็นไปตามสมการฟังก์ชั่นเป้าหมาย จนกว่าจะได้ค่าตัวแปรปรับที่เหมาะสมดังรูปที่ 3.2-2



รูปที่ 3.2-2 โครงสร้างของการควบคุมแบบใช้แบบจำลองภายในของตัวควบคุมฟัซซี

สำหรับค่าฟังก์ชันเป้าหมายที่เวลา k ใช้ในงานวิจัยนี้

$$\text{Objective} = \frac{(m(k) - m(k-1))^2}{\text{gain}} + \sum_{i=k+\tau_1}^{k+\tau_1+p} (y'(i) - y_{sp}(i))^2 \qquad (3.4)$$

เมื่อ τ_1 คือ ค่าความหน่วงเวลาของตัวแปรปรับ

p คือ Prediction horizon ของตัวควบคุม

y' คือ ค่าเอาท์พุทท่านายของกระบวนการ

y_{sp} คือ ค่าเป้าหมายของเอาท์พุทของกระบวนการ

m คือ ค่าของตัวแปรปรับ

gain คือ เกนที่มีไว้ปรับน้ำหนักของเทอมตัวแปรปรับ

ในการหาแบบจำลองความสัมพันธ์สำหรับใช้ในการควบคุมกระบวนการนั้น ข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ต้องเป็นข้อมูลที่ครอบคลุมการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการในลักษณะต่างๆ อย่างครบถ้วนเพียงพอ คือ ต้องเป็นของข้อมูลของกระบวนการในสภาวะต่างซึ่งตัวแปรอินพุทและเอาท์พุทที่เปลี่ยนแปลงไป ประกอบกับการกำหนดฟัซซีเซ็ตอ้างอิงก็ต้องกำหนดให้ครอบคลุมช่วงปฏิบัติการของตัวแปรนั้นๆ ยิ่งถ้าฟัซซีเซ็ตอ้างอิงมีจำนวนมากก็จะทำให้ได้อาร์เรย์ของความสัมพันธ์ฟัซซีที่ได้มีขนาดใหญ่ ทำให้ต้องใช้เวลาในการคำนวณหาค่าเอาท์พุทของกระบวนการนานมากเท่านั้น