บทที่ 4

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Literature Surveys

4.1 กำเนิดฟัซซี (Fuzzy Initiation)

แนวความคิดที่เกี่ยวกับตรรรกศาสตร์หลายค่าเป็นแนวคิดที่มีผู้สนใจศึกษาอยู่หลายคนในช่วงเวลาที่ผ่านมา จนกระทั่งปี ค.ศ. 1965 ศาสตราจารย์ ดร. Lotfi A. Zadeh แห่งมหาวิทยาลัยเบิรคเลย์ แคลิฟอร์เนีย ได้คิดค้นและนำเสนอแนวคิดตรรกศาสาตร์รูปแบบใหม่ที่มีลักษณะที่สอดคล้องกับการให้เหตุผลของมนุษย์ที่มักจะมีลักษณะคลุมเครือในเชิงปริมาณ ในหลายๆกรณีที่มนุษย์เรามีลักษณะการใช้ตรรกศาสตร์แบบมีน้ำหนัก คือมีการให้ระดับความเป็นไปได้ของตรรก ว่ามีลักษณะเช่นนั้นมาก,ปานกลาง หรือน้อย ซึ่งยากแก่การกำหนดให้ชัดเจนได้ว่ามีกี่ระดับ แนวคิดดังกล่าวนี้ถูกเสนอเป็นทฤษฎีที่เรียกว่า ทฤษฎีฟัซซีเซ็ต

1973 Zadeh เสนองานวิจัยเกี่ยวกับวิธีการวิเคราะห์ระบบที่ซับซ้อน และกระบวนการตัดสินใจ จากแนวความคิดที่ว่า ตรรกศาสตร์ (Logic) ที่อยู่เบื้องหลังกระบวนการคิด การตัดสินใจ และการให้เหตุผลของมนุษย์นั้นไม่ได้เป็นตรรกแบบ 2 ค่า แต่เป็นตรรกหลายค่า (Multivalued logic) และได้นิยาม คำว่า "ฟัซซีเซ็ต" คือเซ็ตที่มีความเป็นสมาชิกที่สามารถเพิ่มความเป็นสมาชิกจากไม่เป็นสมาชิกไปจนถึงเป็นสมาชิก "การเชื่อมต่อฟัซซี", "การอนุมานกฎฟัซซี" ซึ่งการอนุมานกฎฟัซซีนี้เปรียบได้กับความสามารถในการสรุปข้อมูลต่างๆของมนุษย์ และนำเสนอการใช้ตัวแปรเชิงภาษา (Linguistic variables) หรือที่เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเป็นตัวแปรฟัซซี (Fuzzy variables) มาใช้แทนหรือใช้ร่วมกับตัวแปรเชิงตัวเลข และให้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรฟัซซีเป็นไปในลักษณะของประโยคที่บอกเงื่อนไข (Conditional statement) และคิดค้นอัลกอริธึมฟัซซี (Fuzzy algorithm) ไว้สำหรับคิดคำนวณฟังก์ชั่นความสัมพันธ์ที่ซับซ้อน

แนวคิดที่ Lotfi A. Zadeh เสนอสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ระบบที่ซับซ้อน และกระบวนการตัดสินใจ เช่น นำไปประยุกต์ใช้ได้กับงานด้านเศรษฐศาสตร์, วิทยาศาสตร์การจัดการ (Management science), ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence), จิตวิทยา, นิรุกติศาสาตร์ (Linguistics), การแก้ไขซ่อมแซมข้อมูล, เภสัชกรรม, ชีววิทยา และอื่นๆอีกมากมาย เป็นต้น

หลังจากการนำเสนอผลงานวิจัยในปี ค.ศ.1973 ของศาสตราจารย์ ดร. Lotfi A. Zadeh หลักการของตรรกศาสตร์คลุมเคลือ (Fuzzy logic) ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรมควบคุมอย่างมากมาย เช่นกัน งานวิจัยทางด้านฟัซซีในช่วงบุกเบิกได้เริ่มต้นโดย แมมดานี และ แอสสิเลียน (Mamdani E.H. and Assilian S.) แห่งมหาวิทยาลัยลอนดอน (Mamdani,.E.H. and Assilian,S.,1975) โดยนำหลักการและแนวความคิดเกี่ยวกับทฤษฎีฟัซซีที่ Zadeh ได้เสนอเอาไว้ (Zadeh,1973) ไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมกลจักรไอน้ำ (Steam engine) และหม้อต้ม (Boiler) ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยมีเป้าหมายของการควบคุมอยู่ที่การปรับความเร็วของเครื่องยนต์และระดับความดันภายในหม้อต้ม ซึ่งเป็นการจัดการกับความไม่เป็นเชิงเส้น สัญญาณรบกวนกระบวนการที่ส่งผลกระทบต่อกันและกันมากในกระบวนการ ผลการควบคุมแสดงว่า ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกสามารถจัดการกับกระบวนการได้

ต่อมา ในปี ค.ศ.1976 คิคเคิร์ท และคณะ (Kickert and Lemke, 1976) ได้นำตรรกศาสตร์คลุมเครือไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการทำน้ำอุ่น (Warm water plant) ในระดับห้องปฏิบัติการ กระบวนการเป็นถังน้ำถูกแบ่งออกเป็นช่องหลายๆ ช่อง ทำการควบคุมอุณหภูมิของน้ำอุ่นขาออกโดยการปรับอัตราไหลขาเข้าของน้ำผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อยู่ภายในถัง นอกจากนี้ยังควบคุมให้สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายแบบเสเต็พ เพื่อทำให้อุณหภูมิของน้ำขาออกเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้อย่างรวดเร็ว

และในปี ค.ศ.1976 ได้มีการทดลองนำเอาตัวควบคุมฟัซซีลอจิกไปใช้ในระดับโรงงานอุตสาหกรรมเป็นครั้งแรก โดย รัทเทอร์ดอร์ทและคณะ (Rutherford D.A. and Carter,G.A.,1976) ซึ่งเป็นการใช้ตัวควบคุมในการควบคุมความสามารถในการซึมผ่าน (Permeability) ในกระบวนการแยกสินแร่ Cleveland sinter plant แต่ในครั้งนั้นปรากฏว่าการควบคุมด้วยฟัซซีลอจิกเพียงแต่ทำงานได้ดีกว่าการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

จากนั้น การวิจัยและพัฒนาได้ขยายออกไปเป็นวงกว้าง มีการนำแนวความคิดทางด้านฟัซซีไปประยุกต์ใช้ในสาขาต่างๆ มากมาย บ้างก็เป็นการพัฒนาเทคนิคการสร้างแบบจำลองฟัซซีให้ได้แบบจำลองที่แม่นยำ มีความทนทานต่อสัญญาณรบกวน สะดวกในการใช้งาน บ้างก็นำเอาแบบจำลองฟัซซีไปใช้เป็นแบบจำลองที่ใช้สำหรับวิธีการควบคุมแบบฐานแบบจำลองต่างๆ บ้างก็คิดค้นพัฒนาดัดแปลงทฤษฎีฟัซซีไปใช้ผสมร่วมกับแนวความคิดอื่น เช่น เครือข่ายนิวรอน (Neural Network (NN)) และอัลกอริธึมพันธุศาสตร์ (Genetic Algorithm (GA)) เพื่อให้ได้การควบคุมที่ดีขึ้น การควบคุมที่สามารถจัดการกับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นสูง การควบคุมระบบที่ไม่สามารถหาแบบจำลองได้ ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงงานวิจัยและพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองฟัซซีและการควบคุมฟัซซี ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทางเคมีเท่านั้น

4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาแบบจำลองฟัซซี (Fuzzy Modeling Development)

ในช่วงแรกของการศึกษาเกี่ยวกับหลักการฟัซซี เป็นการศึกษาในเรื่องของการให้เหตุผล การอนุมานฟัซซี การสร้างแบบจำลองฟัซซี ซึ่งการสร้างแบบจำลองฟัซซีมีการเสนอเอาไว้หลายวิธีการ แต่ละวิธีการมีพัฒนาการที่แตกต่างกันออกไป การสร้างแบบจำลองเป็นการประยุกต์ใช้หลักการฟัซซีอย่างหนึ่งซึ่งมีผู้ให้ความสนใจในการพัฒนาเพื่อให้ได้แบบจำลองที่มีประสิทธิภาพในการจำลองกระบวนได้ถูกต้องแม่นยำในสถานการณ์ต่างๆ ได้ดีขึ้น หลังจากนั้นต่อมาการสร้างแบบจำลองฟัซซี จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรมการควบคุม สำหรับกระบวนการผลิต การควบคุมอัตโนมัติแบบต่างๆ

1980, R.M. TONG

(The evaluation of fuzzy models derived from experimental data)

เสนอการหาแบบจำลองฟัซซีโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง แบบจำลองฟัซซีนี้ประกอบด้วยส่วนของเซ็ตของความสัมพันธ์เชิงภาษา (Linguistic relations), $\{r_i : i = 1,\ldots,n\}$ เป็นเซ็ตที่บอกความสัมพันธ์ระหว่างอินพุทกับเอาท์พุทของแบบจำลอง เรียกว่าเป็นเทอมความสัมพันธ์, กับฟัซซีอัลกอริธึมหนึ่งซึ่งเป็นการดำเนินการฟัซซีเพื่อให้ได้มาซึ่งเอาท์พุทตามความสัมพันธ์ฟัซซีที่ตั้งขึ้น โดยที่จะสามารถหาเอาท์พุทของกระบวนการได้จากข้อมูลของอิทพุท-เอาท์พุทในอดีต เพื่อให้ได้แบบจำลองที่อธิบายความสัมพันธ์ของสมบัติของการบวนการที่มีลักษณะเป็นไดนามิกส์ โดยแบบจำลองนี้มีคุณสมบัติที่ให้ผลกับระบบที่มีความซับซ้อน ความแม่นยำ และความไม่แน่นอน

ข้อดีของแบบจำลองฟัซซีคือ เป็นแบบจำลองที่มีโครงสร้างที่ง่าย และสามารถสร้างได้ง่าย ไม่จำเป็นต้องมีความเข้าใจทางด้านคณิตศาสตร์อย่างลึกซึ้ง แต่ใช้ประสบการณ์และการรู้ที่เกิดขึ้นเองในใจที่มีเกี่ยวกับกระบวนการนั้นๆ แบบจำลองลักษณะนี้ต่อมาเรียกว่าแบบจำลองความสัมพันธ์ฟัซซี

1981 Ernest Czogala and Witold Pedrycz (Czogala E., 1981) เสนอวิธีการแก้ปัญหาการระบุหาแบบจำลองระบบฟัซซีโดยใช้ สมการฟัซซี เพื่อใช้ในการระบุหาและการควบคุมในเวลาเดียวกัน พร้อมระบุว่าอัลกอริธึมที่เสนอเอาไว้นี้ มีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้ในการควบคุมทีสามารถปรับตัวได้

1984 Witold Pedrycz (Pedrycz W ,1984) พัฒนาวิธีการระบุหาแบบจำลองฟัซซีจากข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทด้วยการใช้สมการความสัมพันธ์ฟัซซี แบ่งขั้นตอนการระบุหาออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ การเลือกโครงสร้างของสมการความสัมพันธ์ฟัซซีที่เหมาะสม การหาค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้าง กล่าวคือพารามิเตอร์ต่างๆ ในสมการความสัมพันธ์ และการนำแบบจำลองที่สร้างขึ้นไปใช้งาน โดยทำการทดลองโดยใช้ข้อมูลจากแบบจำลองของ

สมการเชิงเส้น เปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างของสมการความสัมพันธ์ฟัซซี 3 แบบคือ Sup-min, Sup-prod และ inf-max เพื่อดูประสิทธิภาพในการทำนายผลเอาท์พุทของแบบจำลองฟัซซี ใช้ผลรวมกำลังสองของค่าความผิดพลาดของการทำนาย (Sum square error) เป็นเกณฑ์ในการวัดประสิทธิภาพของแบบจำลอง พบว่าโครงสร้าง Sup-min และการดำเนินการฟัซซี max-min เป็นโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุด และเสนอให้แปลงฟัซซีโปรไฟล์ของเอาท์พุท (Fuzzy profile of output) ด้วยวิธีจุดศูนย์ถ่วงของฟัซซีเซ็ต (Center of gravity of fuzzy set) Pedrycz เสนอไว้ว่าวิธีการระบุหาแบบจำลองวิธีนี้เป็นประโยชน์ในการสร้างตัวควบคุมฟัซซี

1985 Tomohiro Takagi และ Michio Sugeno (Takagi,T. and Sugeno,.M, 1985) เสนอวิธีการสร้างแบบจำลองจากข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทของระบบ โดยใช้การแจกแจงเหตุสู่ผลแบบฟัซซี (Fuzzy implication) และ การให้เหตุผลแบบฟัซซี (Fuzzy reasoning) มาใช้ในการสร้างแบบจำลอง เรียกแบบจำลองที่ได้ว่าเป็นแบบจำลองฟัซซีของทากากิ-ซูจิโน แบบจำลองฟัซซีของทากากิ-ซูจิโนนี้เกิดขึ้นเนื่องจากว่าจากเดิมนั้นตัวควบคุมฟัซซีเป็นการจำลองการตัดสินใจของผู้ปฏิบัติการในการควบคุม แต่ในบางสถานการณ์ผู้ควบคุมไม่สามารถอธิบายการควบคุมในลักษณะเชิงภาษาได้ การจำลองการตัดสินใจของผู้ควบคุมโดยใช้ข้อมูลที่เป็นตัวเลขจึงเป็นประโยชน์กว่า ดังนั้นจึงออกแบบระบบฟัซซีที่ส่วนที่เป็นข้อสรุปของกฎฟัซซีเป็นฟังก์ชั่นความสัมพันธ์เชิงเส้นของอินพุทและเอาท์พุท หรืออาจมองอีกแง่หนึ่งได้ว่าระบบฟัซซีแบบนี้เป็นการจำลองระบบด้วยฟังก์ชั่นเชิงเส้นหลายๆฟังก์ชั่น

1988 J.N. Ridley (Ridley,J.N., 1988) นำเสนอวิธีการหาความสัมพันธ์ฟัซซีสำหรับแบบจำลองความสัมพันธ์ฟัซซีโดยตั้งฟัซซีเซ็ตอ้างอิงของอินพุท-เอาท์พุท โดยที่แบบจำลองที่นำเสนอเป็นแบบจำลองที่มีความสามารถเรียนรู้จากประสบการณ์ Ridley นำวิธีการสร้างแบบจำลองฟัซซีที่เสนอนี้ไปทดสอบกับข้อมูลจากเตาเผาของบ๊อกซ์-เจนกิ้งส์ (Box-Jenkins gas furnace data) เปรียบเทียบกับวิธีการของซูลู (Xu Lu, 1987) โดยใช้ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดเป็นเกณฑ์ในการคิดสมรรถนะของแบบจำลอง พบว่าสามารถทำนายได้ดีและคำนวณหาแบบจำลองได้รวดเร็ว ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะนำแบบจำลองนี้ไปประยุกต์ใช้กับระบบที่ต้องการสร้างแบบจำลองแบบออนไลน์ได้

1989 Chen-Wei Xu ได้เสนอการระบุหาแบบจำลองฟัซซีที่มีลักษณะเป็น มัลติอินพุทซิงเกิลเอาท์พุท (MISO) ที่มีการระบุหาโครงสร้างของระบบหรือแบบจำลอง การประมาณค่าพารามิเตอร์หรือการหาความสัมพันธ์ฟัซซี และส่วนอัลกอรธึมที่เกี่ยวกับความสามารถในการเรียนรู้ได้เอง ทำการทดสอบแบบจำลองที่ได้โดยใช้ข้อมูลจากเตาเผาก๊าซของบ๊อกส์-เจนกิ้นส์ (Box-Jenkins gas furnace data) ทำการเปรียบเทียบกันระหว่างแบบจำลองที่เสนอไว้นี้กับแบบจำลองที่เสนอไว้ก่อนหน้านี้ และแบบจำลองของ Pedrycz (Pedrycz,W.,1984) พบว่าแบบจำลองที่เสนอนี้เป็นแบบจำลองที่ให้ความแม่นยำสูงกว่าแบบจำลองที่นำมาเปรียบเทียบทั้งหมด เมื่อนำแบบจำลองที่เสนอนี้ไปประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลองฟัซซีของหน่วยฟลูอิดไดซ์คะตะไลติกส์แครกกิ้ง

(Fluidized catalytics cracking unit (FCCU)) ในโรงกลั่นน้ำมันขนาดใหญ่ กำหนดให้เอาท์พุทของระบบเป็นอัตราการไหลของแก๊สโซลีน และ น้ำมันดีเซล และ ให้อินพุทของระบบเป็นอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และอัตราการไหลขาเข้าของน้ำมันที่สายป้อน ใช้ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุท 74 ชุดที่ได้จากการผ่านน้ำมันดิบ 5 ล้านตันในเวลา 1 ปีเข้าสู่กระบวนการ เมื่อเปรียบเทียบกับการสร้างแบบจำลองกระบวนการนี้จากหลักสมดุลมวลสารและสมดุลพลังงานเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความยุ่งยากซับซ้อนกว่าและไม่มีความแม่นยำ นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบกับการเทคนิคการระบุหาระบบ แบบจำลองฟัซซีที่เสนอนี้มีความแม่นยำพอสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้

1991 B.Postlethwaite (Postlethwaite,B., 1991) ทำการเปรียบเทียบวิธีการระบุหาความสัมพันธ์ฟัซซีหลายๆแบบ เนื่องจากว่าการสร้างแบบจำลองฟัซซีแบบฐานกฎนั้นต้องใช้ฐานความรู้จากผู้ปฏิบัติการที่มีความชำนาญพัฒนากฎขึ้นมาด้วยวิธีการลองผิดลองผูก แม้แบบจำลองแบบฐานกฎจะให้ความแม่นยำเป็นที่น่าพอใจในช่วงปฏิบัติการที่กว้าง แต่ว่าต้องใช้เวลาและความพยายามมากในการพัฒนากฎขึ้นมา จึงมีความคิดที่จะใช้แบบจำลองความสัมพันธ์ฟัซซีขึ้นมาแทนแบบจำลองฟัซซีแบบฐานกฎเพราะว่า แบบจำลองความสัมพันธ์ฟัซซีมีข้อดีตรงที่ว่าสามารถระบุหาแบบจำลองความสัมพันธ์ของระบบได้โดยตรงจากข้อมูลอินพุท เอาท์พุท การเปรียบเทียบวิธีการระบุหาใช้ข้อมูลจากการเลียนแบบกระบวนการหมักในการทดลอง โดยพิจารณาในแง่ของความทนทานต่อสัญญาณบกวนและการเลือกสภาวะเริ่มต้นสำหรับระบบฟัซซี ผลการทดลองสรุปได้ว่า การระบุหาด้วยแบบจำลองความสัมพันธ์สามารถให้ผลดีพอๆกับแบบจำลองแบบฐานกฎ นอกจากนี้การระบุหาด้วยแบบจำลองความสัมพันธ์ยังสามารถทนทานต่อสัญญาณรบกวนที่อยู่ในข้อมูลสำหรับการระบุหาอีกด้วย

1997 Euntai Kim และคณะ ได้เสนอแบบจำลองฟัซซีแบบใหม่ ที่เป็นการผสมกันระหว่างแบบจำลองที่เสนอโดย Takagi and Sugeno ในปี ค.ศ.1985 และแบบจำลองที่เสนอโดย Sugeno และ Yasukawa Euntai Kim กล่าวว่า เนื่องจากแบบจำลองของ Takagi และ Sugeno นี้เป็นแบบจำลองที่สร้างบนฐานของการโปรแกรมระบบ (Based on system programming method) ซึ่งมีความสามารถที่ดีเยี่ยมในการพรรณนาระบบที่ไม่ทราบใดๆ เหมาะสมอย่างยิ่งในการนำไปใช้สำหรับการควบคุมแบบฐานแบบจำลอง แต่มีอัลกอริธึมของการระบุหาที่ซับซ้อนในการนำไปใช้กับดิจิตอลคอมพิวเตอร์ และใช้เวลามาก ซึ่งทำให้ไม่เป็นที่นิยมในการนำไปประยุกต์ใช้ ส่วนแบบจำลองของ Sugeno และ Yasukawa เป็นแบบจำลองที่สร้างบนฐานของเทคนิคการจดจำรูปแบบ (Based on the pattern recognition technique) ซึ่งสามารถนำมาใช้กับดิจิตอลคอมพิวเตอร์ได้ง่าย และสามารถเข้าใจได้ง่ายเพราะว่ามีส่วนของเอาท์พุทหรือผลลัพธ์ (Consequence part) เป็นตัวแปรภาษา ไม่ใช่สมการเชิงเส้นแบบของ Tagaki และ Sugeno แต่เนื่องจากวิธีการอนุมานกฎฟัซซีนี้ให้ส่วนของผลลัพธ์นี้เป็นแบบซิงเกลตัน ทำให้แบบจำลองที่ได้มีสมรรถนะในการพรรณนาระบบที่แย่ลงและต้องใช้กฎฟัซซีมากกว่าแบบจำลองของ Takagi และ Sugeno

อัลกอริธึมที่ Euntai Kim เสนอนี้มีขั้นตอนหลักๆ 2 ขั้นตอน คือการปรับแบบหยาบ (Coarse tuning) และการปรับแบบละเอียด (Fine tuning) การปรับแบบหยาบใช้การคลัสเตอร์ลิ่ง และการปรับแบบละเอียดใช้อัลกอริธึมที่เรียกว่าเกรเดียนท์ เดสเซ็นท์ อัลกอริธึม (Gradient Descent Algorithm) ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง ได้แก่ พรีมิส พารามิเตอร์ (Premise parameter) และ คอนซีเควนท์ พารามิเตอร์ (Consequent parameter) ทำการทดสอบแบบจำลองที่เสนอกับข้อมูลของบ๊อกซ์และเจนกิ้นส์ (Box-Jenkins data) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองแบบใหม่นี้ให้ความแม่นยำมากกว่า แบบจำลองของ Sugeno และ Yasukawa เล็กน้อย เมื่อกำหนดอินพุทของแบบจำลอง 6 ตัว และใช้กฎจำนวน 2 กฎ เท่ากัน

4.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมฟัซซีในกระบวนการเคมี (Fuzzy Control in Chemical Process)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาตัวควบคุมฟัซซีเพื่อใช้ในการควบคุมในด้านต่างๆ มีมากมายดังที่ได้กล่าวไว้ในบทนำ และในด้านการควบคุมที่เกี่ยวข้องกับงานด้านวิศวกรรมได้แก่ การใช้ตัวควบคุมฟัซซีในการควบคุมการเดินรถไฟฟ้าใต้ดิน การควบคุมการทำงานของไมโครโปรเซสเซอร์ ส่วนของการควบคุมที่เกี่ยวของกับกระบวนการเคมี มีการใช้หลักการฟัซซีในการสร้างแบบจำลองเป็นแบบจำลองแบบฐานกฎ(Rule-based type) แบบจำลองแบบความสัมพันธ์(Relational model) การนำหลักการฟัซซีมาใช้ในการออกแบบเป็นกฎของการควบคุม ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการ และการนำเอาแบบจำลองฟัซซีที่ได้มาใช้เป็นแบบจำลองสำหรับการควบคุมแบบฐานแบบจำลอง ซึ่งมีทั้งตัวควบคุมที่สามารถปรับตัวเองได้ ทนทานต่อสัญญาณรบกวน สำหรับกระบวนการที่ควบคุมก็ได้แก่ กระบวนการของหน่วยปฏิบัติการต่างๆที่มักเป็นกระบวนการที่ไม่ต้องการการคำนวณที่ละเอียด กระบวนการที่ไม่สามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ หรือที่มีความยุ่งยากมากในการหา กระบวนการที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง เป็นต้น ซึ่งสามารถรวบรวมได้ดังตารางที่ 4.1 เป็นการพัฒนาจากการควบคุมกระบวนการง่ายเปรียบเทียบกับการควบคุมแบบดั้งเดิม และการควบคุมในกรณีที่การควบคุมแบบดั่งเดิมไม่สามารถใช้ควบคุมได้ หรือได้ผลไม่ดีสำหรับการควบคุมแบบดั้งเดิม

ตารางที่ 4.1 ตารางสรุปการประยุกต์ใช้หลักการฟัซซีในการควบคุมกระบวนการเคมี

ปี ค.ศ.	ผู้ทำการวิจัย	กระบวนการที่ควบคุม
1976	Ostergaard	Heat exchanger
1988	Yamashita and Matsumoto	Pack-bed catalytics reactor
1988	Shah and Rajamani	Level control in paper industry
1989	Kofman et,.al	Fluidizebed combuster
1990	Shah and Rajamani	pH control
1990	Karr et,.al	Level control in cylinder tank

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ตารางสรุปการประยุกต์ใช้หลักการฟัซซีในการควบคุมกระบวนการเคมี

1990	Walter et,.al	Oil industry
1994	Hanakurna et.,al	Demethanizer
1992	Couilard	การควบคุมการบำบัดน้ำเสีย
1994	Postlethwaite	Level control
1996	Igor Skrjanc	Temperature plant
1997	Katarina Kavsak-Biasizzo	pH control

1976 R.M.Tong ศึกษาและประเมินผลของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกสำหรับกระบวนการไม่เป็นเชิงเส้นแบบเอ็มไอเอ็มโอ โดยกระบวนการตัวอย่างเป็นการควบคุมความดันรวมและระดับของของเหลวภายในถังปิดด้วยอัตราการไหลของของเหลวเข้าสู่ถังและการเพิ่มความดันอากาศ ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งในอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษ ส่วนสำคัญของตัวควบคุมคือกฎฟัซซี จะเป็นการออกแบบโดยพิจารณาจากผลการกระทบที่มีต่อกันของตัวแปรควบคุมทั้งสองคือ ความดันรวม และระดับของเหลว ซึ่งมีค่าคงที่เวลาที่แตกต่างกัน กฎการควบคุมจะให้ความสำคัญของการนำระดับของเหลวให้เข้าสู่เซ็ทพอยท์ก่อนที่จะทำการควบคุมความดันรวม การทดสอบทำโดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างตัวควบคุมฟัซซีลอจิกกับตัวควบคุมต่างๆ ที่พัฒนาขึ้น โดยเทคนิคการประมาณสมการคณิตศาสตร์ของกระบวนการแบบเชิงเส้น ปรากฏว่าสามารถควบคุมได้ดี แต่อย่างไรก็ตามการควบคุมด้วยเทคนิคดั้งเดิมยังคงให้ผลการควบคุมที่ดีกว่า

1980 R.M. Tong ทำการทดลองสำรวจ การควบคุมฟัซซีลอจิก โดยให้ควบคุมแอคติเวดเต็ดสลัด ในการบำบัดน้ำเสีย (Activated sludge waste water treatment process (ASP)) การทดลองสรุปว่า อัลกอริธึมการควบคุมฟัซซีที่ใช้ข้อมูลจากประสบการณ์ สามารถนำมาใช้ในการควบคุมกระบวนการที่มีความยากนี้ได้

1988 Yamashita และ Matsumoto ได้นำตัวควบคุมฟัซซีลอจิกเข้าไปใช้ในระบบควบคุมอุณหภูมิในช่วงการเริ่มเดินเครื่อง (Start-up) ของเครื่องปฏิกรณ์แบบคะตะไลติกแพคเบ็ก (Packed-bad catalytic reactor) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) แทนที่ระบบควบคุมโดยใช้แบบจำลองอ้างอิง (Model reference adaptive control (MRAC)) ซึ่งไม่สามารถแก้ปัญหาการโอเวอร์ชูทของอุณหภูมิได้ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของระบบในช่วงเริ่มเดินเครื่องนั้นรวดเร็วเกินกว่าที่จะปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมได้อย่างถูกต้อง ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกได้ถูกนำมาใช้โดยวิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกพื้นฐาน ลักษณะของเอกภพเป็นแบบดีสครีต ใช้อินพุท 2 ตัวคือ ค่าความผิดพลาด และค่าการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาด กำหนดกฎการควบคุมที่ใช้ทั้งหมด 49 กฎ พบว่าการควบคุมสามารถเป็นไปได้ดี โดยไม่มีปัญหาของการโอเวอร์ชูทของอุณหภูมิ และได้ทำการปรับปรุงอัลกอริธึมฟัซซีลอจิกแบบเดิม โดยใช้เทคนิคของการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ปรับจูนแบบอัตโนมัติมาช่วย โดยอาศัยข้อมูลการปรับจูนจากความผิดพลาดในอดีต ผลการ

ทดสอบพบว่าการควบคุมเป็นไปได้ดี โดยเฉพาะสามารถลดความผิดพลาดในการควบคุมที่สภาวะคงตัวได้ดีมากกว่าเดิม

1988 Shah และ Rajamani พัฒนาตัวควบคุมฟัซซีลอจิกสำหรับการควบคุมระดับของเหลวในอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ ซึ่งเป็นปัญหาของการควบคุมกระบวนการแบบไม่เชิงเส้น และมีปัญหาในการวัดระดับเนื่องจากความไม่ชัดเจนของตัวแปรควบคุมคือ ความสูงของผิวหน้าเยื่อกระดาษ การออกแบบตัวควบคุมใช้หลักการของฟัซซีลอจิก ใช้ข้อมูลของฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิกแบบดีสครีต แบ่งระดับควอนไทซ์ (Quantize) ของอินพุทเป็น 4 ระดับและเอาท์พุทเป็น 5 ระดับใช้กฎการควบคุมทั้งหมด 5 กฎ ผลการควบคุมแสดงให้เห็นว่า ระบบยังสามารถทำงานได้ดีโดยมีระดับการแกว่งของของเหลว และออฟเซ็ตอยู่บ้าง และเมื่อทำการปรับปรุงตัวควบคุมแบบเดิมโดยเพิ่มอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดเป็นอินพุทตัวที่ 2 และใช้กฎการควบคุมทั้งหมด 16 กฎ พบว่าได้ผลเป็นที่น่าพอใจมากขึ้น ทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงเซ็ตพอยท์ และการเปลี่ยนแปลงโหลด ระบบก็ยังคงสามารถทำงานได้ดีโดยปราศจากออฟเซ็ตและการแกว่งของระบบควบคุม

1989 Bruce P. Graham and Robert B. Newell (Bruce P. Graham and Newell, 1989) เสนอการควบคุมฟัซซีปรับตัวได้ ที่เป็นตัวควบคุมแบบฐานแบบจำลอง การปรับตัวของตัวควบคุมทำได้โดยการระบุหาแบบจำลองที่อยู่ภายในตัวควบคุมแบบออนไลน์ โดยแบบจำลองที่ใช้ในตอนเริ่มต้นนั้นจะเป็นแบบจำลองแบบหยาบเมื่อเริ่มต้นควบคุมตัวควบคุมจะทำการปรับแบบจำลองให้สอดคล้องกับกระบวนการไปด้วย และถ้ากระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงจุดปฏิบัติการไปสู่สภาวะใหม่แบบจำลองนี้ก็จะเปลี่ยนตามไปด้วย นอกจากนี้ยังปรับปรุงการควบคุมโดยให้มีการถ่วงน้ำหนักเพื่อให้ได้อัลกอริธึมของการควบคุมที่สามารถทนทานต่อสัญญาณรบกวนกระบวนการได้

1989 Koffman et.,al ได้ประยุกต์ฟัซซีลอจิกในการควบคุมเครื่องเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized bed combuster) ในการจำลองการควบคุมทำโดยใช้แบบจำลองของกระบวนการโดยอิงทฤษฎีฟลูอิดไดซ์เซชั่น พบว่าได้ผลการควบคุมที่ดีซึ่งคล้ายคลึงกับการควบคุมด้วยมนุษย์เป็นอย่างมาก

1990 Shah และ Rajamani พัฒนาตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบสามารถปรับองค์กรได้เอง (Self-organizing fuzzy logic controller) และนำไปใช้ในการแก้ปัญหาการควบคุมระดับพีเอช ซึ่งเป็นปัญหาหนึ่งที่พบมากในอุตสาหกรรมเคมี ลักษณะโครงสร้างของตัวควบคุมจะเป็นการพัฒนารูปแบบของอัลกอริธึมของตัวควบคุมฟัซซีแบบเดิมที่มีจำนวนของกฎคงที่ให้สามารถปรับเปลี่ยนหรือเพิ่มเติมกฎการควบคุมได้เองแบบออนไลน์ (On-line) โดยที่เทคนิคการเรียนรู้และประเมินค่าประสิทธิผลจากการควบคุมไปใช้เป็นอัลกอริธึมเพื่อปรับเปลี่ยนกฎการควบคุมโดยอัตโนมัติ ทำให้ตัวควบคุมที่สร้างขึ้นนี้มีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณ์ของกระบวนการที่จะถูกควบคุมได้ดีกว่าตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบธรรมดา ทำการทดสอบโดยการ

เปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมพีไอดี และตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบมาตรฐาน ผลการควบคุมแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมฟัซซีลอจิกที่ใช้อัลกอริธึมแบบปรับองค์กรได้นั้นมีประสิทธิภาพในการควบคุมที่เหนือกว่าตัวควบคุมฟัซซีธรรมดาและตัวควบคุมพีไอดีอย่างมาก โดยเฉพาะการควบคุมในย่านที่มีความไม่เชิงเส้นของกระบวนการสูง

1990 Karr et.,al พัฒนาตัวควบคุมฟัซซีลอจิกโดยผสมผสานเข้ากับอัลกอริธึมพันธุศาสตร์ (Genetic algorithm) ทำให้ตัวควบคุมฟัซซีสามารถปรับเปลี่ยนตำแหน่งของฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิกได้เองโดยอัตโนมัติแบบออนไลน์ โดยเทคนิคการเรียนรู้เพื่อปรับเปลี่ยนตำแหน่งที่เหมาะสมด้วยอัลกอริธึมแบบพันธุศาสตร์ทำให้ฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิกที่ได้จากการเรียนรู้และปรับเปลี่ยน สามารถช่วยให้ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าตัวควบคุมที่ใช้อัลกอริธึมแบบเดิมที่มีตำแหน่งของฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิกคงที่ และนำตัวควบคุมดังกล่าวมาใช้ในการควบคุมระดับของของเหลวในถังทรงกระบอก ประเมินผลการควบคุมโดยทดสอบเปรียบเทียบกับการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกธรรมดา ผลการควบคุมแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกที่ใช้อัลกอริธึมแบบพันธุ์ศาสตร์ ให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกธรรมดา

1990 Walter et.,al ออกแบบตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบปรับจูนได้เองอัตโนมัติ (Self-tuning fuzzy logic controller) สำหรับการควบคุมกระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยคะตะลิสต์ในอุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมัน การควบคุมประกอบด้วยตัวควบคุมฟัซซี 2 ชุด โดยใช้เป็นตัวควบคุมซุปเปอร์ไวเซอรี (Supervisory control) และใช้การออพติไมซ์ระบบ (System optimization) กลไกการปรับจูนอัตโนมัติของตัวควบคุมเป็นไปโดยค่าพารามิเตอร์ปรับจูนอัตโนมัติ ซึ่งอาศัยข้อมูลความผิดพลาดของการควบคุม ไปเป็นอัลกอริธึมในการปรับเปลี่ยนแฟคเตอร์ของการสเกลของตัวแปรฟัซซีอินพุท-เอาท์พุทของตัวควบคุมให้มีค่าที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการควบคุมที่สูงสุด การทดสอบทำโดยการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการควบคุมที่ดีขึ้นของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกที่สามารถปรับจูนได้อัตโนมัติ

1992 Couilard และ Zhu ประยุกต์ใช้ฟัซซีลอจิกในการควบคุมกระบวนการบำบัดน้ำเสีย โดยการผสมผสานระหว่างการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก และการควบคุมพีไอดี การควบคุมแบ่งเป็น 2 ระดับ ในส่วนแรกเป็นการควบคุมระดับสูง (Super level control) ควบคุมการทำงานโดยตัวควบคุมฟัซซีลอจิกเพื่อนำระบบให้เข้าสู่สภาวะการทำงานที่ดีที่สุด และในส่วนของการควบคุมระดับล่างจะทำโดยตัวควบคุมตัวควบคุมพีไอดี 2 ตัว เพื่อที่จะรักษาปริมาณของออกซิเจนที่ละลายในน้ำ และความสูงของตะกอนในส่วนล่างของถังตกตะกอน จากการทำแบบจำลองพบว่า ระบบสามารถทำงานได้ดีแม้กระทั่งกรณีของการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างกระทันหัน

1992 Stoll et.,al เสนอวิธีการสร้างตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกโดยหลีกเลี่ยงวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ยุ่งยากของทฤษฎีฟัซซี แต่ใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์เบื้องต้นแทน หัวใจสำคัญของตัวควบคุมคือกฎฟัซซีจะถูกแทนที่ด้วยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น ระหว่างตัวแปรอินพุท คือค่าความผิดพลาด และตัวแปรเอาท์พุทคือตัวแปรปรับ เรียกความสัมพันธ์นี้ว่า Break point function ซึ่งเป็นวิธีการที่ทำความเข้าใจได้โดยง่าย และนำมาสร้างได้โดยไม่ยาก การทดสอบตัวควบคุมที่สร้างขึ้น ทำโดยการควบคุมระดับของน้ำภายในถังทรงกลมซึ่งเป็นกระบวนการไม่เชิงเส้น เปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอดี พบว่า ตัวควบคุมฟัซซีสามารถทำการควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการควบคุมโดยตัวควบคุมพีไอดี

1994 Kuiper และ Astrom ได้เสนอแนวทางพัฒนาตัวควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้นโดยวิธีการประกอบเข้าด้วยกันของกฎเฉพาะที่แบบวิวิทพันธ์ (Composition of heterogeneous local control law) ที่เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุม สำหรับแต่ละย่านปฏิบัติการที่นิยามด้วยฟัซซีเซ็ต เพื่อให้ได้เป็นกฎรวม ที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นด้วยเทคนิคการเฉลี่ยค่าน้ำหนัก (Weight average) ของแต่ละกฎเฉพาะที่เข้าด้วยกันโดยฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิกที่นิยามไว้ในแต่ละย่านปฏิบัติการ และทำการทดสอบตัวควบคุมที่ได้โดยการควบคุมระดับของน้ำในถัง และควบคุมอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์เคมีที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น

1994 Hunakuma et,.al ออกแบบตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบปรับจูนได้เองเพื่อใช้ในระบบการควบคุมหอกลั่นซึ่งเป็นการควบคุมในหลายรูปแบบ คือการควบคุมแบบป้อนหน้า (Feed forward control) ป้อนกลับ (Feed back) การปรับจูนอัตโนมัติทำได้โดยปรับเกน (Gain) ของตัวควบคุมแบบป้อนกลับ ด้วยกฎการเรียนรู้ซึ่งทำการเปรียบเทียบแนวโน้มของตัวแปรปรับจากตัวควบคุมแบบป้อนหน้าและจากตัวควบคุมป้อนกลับ และทำการทดสอบการทำงานโดยการควบคุมหอแยกมีเธน (Demethanizer) ในกระบวนการผลิตเอทธิลีนในส่วนของลูพการควบคุมอุณหภูมิบริเวณส่วนล่างของหอ พบว่ากระบวนการสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพทำให้สามารถประหยัดพลังงานในการผลิตได้อย่างมาก

1996 Igor Skrjanc เสนอวิธีการควบคุมแบบใช้แบบจำลองทำนายผลล่วงหน้า เป็นการทำนายสัญญาณเอาท์พุทของกระบวนการด้วยแบบจำลองกระบวนการฟัซซี โดยการใช้แบบจำลองกระบวนการฟัซซีคำนวณหาเอาท์พุทของกระบวนการล่วงหน้าไปในอนาคตในขอบเขตที่กำหนดไว้ และได้นำเอาแนวความคิดนี้ไปใช้จริงในระดับอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับโรงงานความร้อน (Temperature plant) ให้สมรรถนะในการควบคุมที่ดี และการควบคุมในลักษณะนี้มีข้อได้เปรียบการควบคุมแบบดั้งเดิมตรงที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้

1997 Katarina Kavsak-Biasizzo และคณะ เสนอวิธีการควบคุมแบบทำนายผลล่วงหน้าสำหรับกระบวนการที่ไม่เป็นเชิงเส้นสูง โดยการทำนายผลด้วยแบบจำลองฟัซซีในรูปแบบของทากากิ-ซูจิโน (Takagi-Sugeno) เนื่องจากว่าการควบคุมแบบฐานแบบจำลองแบบทำนายผลล่วงหน้ามาตรฐาน (Standard Model Based Predictive Control (MBPC)) ใช้แบบจำลองกระบวนการเชิงเส้น ดังนั้นจึงไม่สามารถจัดการกับกระบวนการที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงมากได้ แต่การควบคุมแบบทำนายผลล่วงหน้าแบบเชิงเส้นมีข้อดีตรงที่สามารถทำการออพติไมซ์ได้เร็ว และให้คำตอบได้ในเวลาที่แน่นอน จึงใช้แบบจำลองฟัซซีแบบไม่เชิงเส้นแบบออนไลน์ ซึ่งมีการปรับเปลี่ยนแบบจำลองให้ถูกต้องอยู่ตลอดเวลามาใช้ในการทำนายผลของการตอบสนองแบบสเต็พที่จุดปฏิบัติการต่างๆ เพื่อปรับใช้กับการควบคุมแบบดีเอ็มซี (DMC) เชิงเส้น โดยวิธีการนี้ เป็นการนำเอาคุณสมบัติที่ดีของการใช้แบบจำลองฟัซซีในการจำลองกระบวนการที่ไม่เป็นเชิงเส้น มาใช้รวมกับวิธีการควบคุมแบบดีเอ็มซี ทำให้ได้การควบคุมที่มีประสิทธิภาพขึ้น ทำทดสอบการควบคุมในลักษณะนี้โดยประยุกต์กับกระบวนการควบคุมพีเอชที่เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์