บทที่ 2

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบด้วยแนวคิดของฟัซซีเซต การพัฒนาและประยุกต์ใช้ฟัซซีลอจิกโดยทั่วไป เช่นการประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์เครื่องใช้ต่างๆ ถัดมากล่าวถึงผลงานวิจัยเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองฟัซซีและตัวควบคุมฟัซซีลอจิก ซึ่งเป็นการพัฒนาทางด้านการประยุกต์ใช้เทคนิคต่างๆ ในการออกแบบและช่วยให้ได้แบบจำลองและตัวควบคุมฟัซซีที่มีสมรรถนะและการควบคุมที่ดี

2.1 แนวคิดของฟัซซีเซต

ในทฤษฎีเซตปกตินั้น เราสามารถแยกแยะได้ว่าตัวแปรใดเป็นหรือไม่เป็นสมาชิกของเซตนั้นๆ ได้ ซึ่งเป็นการกำหนดได้อย่างชัดเจนว่าเป็นจริงหรือเท็จ อย่างไรก็ตามปัญหาต่างๆ ที่ปรากฏอยู่ในโลกของความเป็นจริงมีหลายปัญหาที่ไม่สามารถจำแนกหรือกำหนดได้อย่างชัดเจนว่ามีค่าความจริงเป็นจริงหรือเท็จปัญหาเหล่านี้มักจะมีลักษณะที่มีความยุ่งยากหรือมีโครงสร้างที่ไม่ชัดเจนทำให้ยากในการตัดสินใจแก้ปัญหานั้นๆ โดยวิธีการทางคณิตศาสตร์ได้ การแก้ปัญหาจะเป็นไปในลักษณะที่ต้องใช้มนุษย์ในการแก้ไขมากกว่า ลักษณะของแนวคิดดังกล่าว นอกจากจะสามารถแยกแยะได้เช่น ถูก หรือผิดแล้ว ยังอาจเป็นได้ในลักษณะที่คลุมเครือ เช่น ค่อนข้างถูก ค่อนข้างผิด เป็นต้น เหล่านี้จะเรียกว่าเป็นคอนเส็ปท์หรือลักษณะของการตัดสินใจแบบคลุมเครือหรือการตัดสินใจแบบฟัซซี ฟัซซีเซตนั้นยอมให้ค่าดีกรีของความเป็นสมาชิกของตัวแปรใดๆ ในเซตสามารถเป็น

ค่าจำนวนจริงตั้งแต่ 0 ถึง 1 ได้ ซึ่งหลักการนี้จะอนุญาติให้มนุษย์สามารถสังเกตและแสดงข้อสรุป หรือความชำนาญได้เข้าใกล้ความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น

2.2 การพัฒนาและประยุกต์ใช้ฟัซซีลอจิกโดยทั่วไป (Wang, 1997)

ทฤษฎีฟัซซีเริ่มต้นโดย Lofti A. Zadeh ได้เสนอบทความเกี่ยวกับฟัซซีเซตในช่วงท้ายปี ค.ศ.1960 วิธีการทางฟัซซีแนวใหม่ๆ จึงถูกเสนอ เช่นการกระทำการตัดสินใจโดยใช้ฟัซซี (Fuzzy decision making) ต่อมาในช่วงปี 1970 เป็นการประยุกต์ใช้ฟัซซีในกระบวนการจริง ซึ่งในปี 1973 Zadeh ได้เสนอบทความเกี่ยวกับการวิเคราะห์ระบบที่ซับซ้อนและกระบวนการในการตัดสินใจ ในบทความนี้เป็นการอธิบายถึงหลักการใช้ตัวแปรเชิงภาษา (Linguistic variable) ในกฎฟัซซี ต่อมาในปี 1975 Mamdani และ Assilian ได้สร้างตัวควบคุมฟัซซีเพื่อใช้ควบคุมเครื่องจักรไอน้ำ (Stream Engine) พบว่าตัวควบคุมฟัซซีลอจิกออกแบบได้ง่าย และสามารถควบคุมระบบที่มีความซับซ้อนได้เป็นอย่างดี ในท้ายปี 1978 Holmblad และ Ostergard พัฒนาตัวควบคุมฟัซซีสำหรับใช้ในกระบวนอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นการควบคุมกระบวนการเตาเผาซีเมนต์ (Cement kiln) ต่อมา Sugeno ได้ประยุกต์ใช้ฟัซซีในการควบคุมกระบวนการทำน้ำให้บริสุทธิ์ และเป็นผู้บุกเบิกงานทางด้านการควบคุมการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ ตั้งแต่ปี ค.ศ.1980 เป็นต้นมาจึงมีการนำฟัซซีลอจิกมาประยุกต์ใช้ในหลายๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็นในอุตสาหกรรมของกระบวนการทางเคมี เครื่องมือทางอิเลคทรอนิกส์ การปฏิบัติการฝึกอย่างอัตโนมัติ (Automatic train operation) และในสาขาอื่นๆ อีกมากมาย เช่นการควบคุมการทำงานรถไฟฟ้าใต้ดินอัตโนมัติ กล้องถ่ายวีดีโอแบบปรับโฟกัสเอง ฯลฯ

นอกเหนือจากงานวิจัยทางด้านการควบคุมแล้วยังมีการประยุกต์ใช้ฟัซซีในการหาแบบจำลองระบบด้วย ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาพอสรุปได้ดังนี้

2.3 ผลงานวิจัยเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองฟัซซี

แบบจำลองฟัซซีในระบบการควบคุมกระบวนมีการพัฒนามาตั้งแต่ Mamdani (1974) ได้ตีพิมพ์บทความออกเผยแพร่ โดยแบบจำลองฟัซซีในสมัยนั้นเป็นแบบจำลองที่แสดงโดยใช้เซตของประพจน์เชิงภาษาแบบฟัซซี (Fuzzy linguistic propositions) ที่ได้รับการออกแบบจากประสบการณ์และความรู้ของผู้ปฏิบัติการ Tong (1980) ได้เสนอการอธิบายแบบจำลองฟัซซีโดยใช้ความสัมพันธ์แบบฟัซซี ความสัมพันธ์ฟัซซีหาได้จากข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทซึ่งทำการประยุกต์ใช้กับข้อมูลที่วัดได้จากกระบวนการจริง ต่อมาได้มีการพัฒนาวิธีการสร้างแบบจำลองฟัซซีด้วยวิธีการต่างๆ พอสรุปได้ดังนี้

Takagi และ Sugeno (1985) ได้เสนอวิธีการใหม่ในการสร้างแบบจำลองฟัซซี ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่าย แบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้มีลักษณะเป็นกฎเงื่อนไขของการแจงเหตุสู่ผล (Implication) ซึ่งอธิบายปริภูมิ (Space) ของอินพุท และในส่วนผลสรุปเป็นการแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นของตัวแปรอินพุท-เอาท์พุท การระบุหาแบบจำลองจะอาศัยข้อมูลอินพุท-เอาท์พุท การระบุหาแบ่งเป็นสองส่วนคือการระบุหาโครงสร้างและพารามิเตอร์ของแบบจำลอง การระบุหาโครงสร้างประกอบด้วยการเลือกตัวแปรในส่วนเงื่อนไข และการกำหนดฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปร และได้ประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาแบบฮิวริสติค (Heuristic search) เพื่อทำการเลือกตัวแปรในส่วนเงื่อนไข และใช้วิธีการกำลังสองน้อยที่สุดเพื่อระบุหาพารามิเตอร์ในส่วนผลสรุป วิธีการนี้สามารถประยุกต์ใช้เพื่อสร้างแบบจำลองกระบวนการทางอุตสาหกรรมเช่น กระบวนการทำน้ำให้สะอาด และคอนเวอร์เตอร์ (Converter) ของกระบวนการผลิตเหล็กกล้า ได้เป็นอย่างดี วิธีการนี้ประสบความสำเร็จในการประยุกต์ใช้กับกระบวนการ และง่ายต่อการพัฒนาต่อเพื่อสร้างการควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive control) และการควบคุมที่เป็นการเรียนรู้แบบฟัซซี (Fuzzy learning control)

Sugeno และ Yasukawa (1993) ได้เสนอวิธีการสร้างแบบจำลองเชิงคุณภาพซึ่งอยู่บนพื้นฐานของฟัซซีลอจิก วิธีการสร้างแบ่งเป็นสองส่วนคือการสร้างแบบจำลองฟัซซีและการประมาณเชิงภาษา (Linguistic approximtion) โดยใช้วิธีฟัซซีคลัสเตอริงที่เรียกว่า ฟัซซีซีมีน (Fuzzy c-means) เพื่อทำการระบุหาโครงสร้างของแบบจำลองฟัซซี แบบจำลองที่ได้เป็นแบบจำลองเชิงภาษาที่อธิบายด้วยเทอมทางภาษา และได้ใช้เกณฑ์สม่ำเสมอ (Regularity criterion) เพื่อระบุหาตัวแปรในส่วนเงื่อนไขของกฎ นอกจากนี้ยังประยุกต์ใช้วิธีทางออพติไมเซชันในการกำหนดจำนวนกฎที่เหมาะสม อัลกอริธึมที่เสนอนี้ได้ประยุกต์ใช้ในการจำลองกระบวนการที่มีไดนามิก และจำลองระบบการควบคุมของผู้ปฏิบัติการ พบว่าแบบจำลองฟัซซีให้ค่าดัชนีสมรรถนะเป็นที่น่าพอใจ

Zhao, Wertz และ Gorez (1994) ได้ใช้วิธีการฟัซซีคลัสเตอริงในการระบุหาแบบจำลองฟัซซีของระบบที่มีไดนามิก แบบจำลองที่ได้เป็นแบบจำลองแบบ Takagi-Sugeno อัลกอริธึมของฟัซซีคลัสเตอริงที่ใช้เป็นจีเคอัลกอริธึม (Gustafson-Kessel (GK) algorithms) ซึ่งเป็นอัลกอริธึมที่ใช้ในการระบุหากลุ่มในลักษณะเชิงเส้น (Linear cluster) พบว่าเทคนิคที่เสนอสามารถที่จะรวมการระบุโครงสร้างและพารามิเตอร์ในส่วนผลสรุปได้ และได้ทำการทดสอบวิธีการนี้กับการจำลองระบบที่สถิตย์และระบบที่มีไดนามิกแบบไม่เชิงเส้น พบว่าวิธีการนี้สามารถให้แบบจำลองฟัซซีที่เหมาะสมของระบบได้ นอกจากนี้แบบจำลองฟัซซีที่ได้ยังสามารถประยุกต์ใช้ในการสร้างตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดล

Park et al. (1995) ได้เสนอวิธีการวิธีการระบุหาแบบจำลองฟัซซี ซึ่งประกอบด้วยการระบุหาโครงสร้างและพารามิเตอร์ของแบบจำลองจากข้อมูลอินพุท-เอาท์พุท โดยใช้ฮอกซ์ทรานส์ฟอร์ม (Hough transform) และวิธีการคลัสเตอริง เพื่อระบุหาเซตของพารามิเตอร์ของส่วนผลสรุป แล้วใช้อัลกอริธึมเกเดียนต์เดสเซ็นท์ (Gradient descent) เพื่อปรับจูนละเอียดค่าพารามิเตอร์ของแบบ

จำลอง และได้ประยุกต์ใช้วิธีนี้กับการระบุหาแบบจำลองฟัซซีของระบบหนึ่งตัวแปรอินพุท-เอาท์พุท พบว่าวิธีการนี้ให้แบบจำลองฟัซซีที่ถูกต้องมากขึ้น

Emami, Turksen และ Goldenberg (1996) เสนอวิธีการปรับปรุงอัลกอริธึมของการสร้างแบบจำลองและการควบคุมโดยใช้ฟัซซี โดยแนะนำการทำพารามิเตอร์ไรซ์ (Parameterized formulation) สำหรับกระบวนการของการให้เหตุผล กลไกการอนุมาน (Inference mechanism) จำนวนของกฎฟัซซี และอันดับของความเป็นฟัซซีของแบบจำลอง ซึ่งสามารถระบุได้จากข้อมูลอินพุท-เอาท์พุท นอกจากนี้ได้เสนอวิธีการที่ง่ายที่มีประสิทธิภาพในการเลือกตัวแปรอินพุทและฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปรอินพุท การประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริธึมที่เสนอนี้ทำโดยการทดสอบกับตัวอย่างที่เคยระบุหาได้ในบทความของ Sugeno และ Yasukawa (1993) พบว่าให้ประสิทธิภาพที่ดี

Huh และ Kim (1996) ได้ทำการออกแบบแบบจำลองฟัซซีของระบบเทอร์ไบน์ในหม้อต้ม ซึ่งเป็นระบบที่มีความไม่เชิงเส้นสูง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการแปลงระบบให้เป็นระบบเชิงเส้นที่ทุกจุดปฏิบัติการ และเนื่องจากว่าระบบมีความซับซ้อนมากจึงทำให้มีข้อจำกัดในการแปลงเชิงเส้น ดังนั้นจึงได้เสนอวิธีการจำลองระบบด้วยแบบจำลองฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno แบบจำลองฟัซซีนี้ประกอบด้วยกฎฟัซซีจำนวน 3 กฎโดยแบ่งตามจุดปฏิบัติการซึ่งมี 3 จุดปฏิบัติการ และได้มีการประยุกต์ใช้วิธี จีเอ็มดีเอช (GMDH: Group Method of Data Handing) เพื่อใช้ในการระบุหาตัวแปรในส่วนเงื่อนไข (Antecedent variable) และปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไขโดยใช้วิธีการออพติไมซ์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear optimization method) ค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลสรุปของกฎหาได้โดยใช้วิธีการกำลังสองน้อยที่สุด

Castellano และ Fanelli (1997) ได้ศึกษาถึงปัญหาในการระบุหาโครงสร้างของแบบจำลองฟัซซีโดยใช้นิวโร-ฟัซซีเน็ทเวิร์ก (Neuro-fuzzy network) เพื่อใช้ในการเลือกกฎฟัซซี โดยมองปัญหาในการเลือกกฎเป็นเหมือนกระบวนการลดลงของโครงสร้างของนิวโร-ฟัซซีเน็ทเวิร์ก ทำได้โดยแปลงแบบจำลองฟัซซีให้อยู่ในรูปแบบของนิวรัลเน็ทเวิร์ก แล้วจึงทำการลดโครงสร้างของนิวรัลเน็ทเวิร์กลง จนค่าสมรรถนะในระบบฟัซซีไม่เปลี่ยนแปลง โดยใช้อัลกอริธึมของการวนซ้ำ เพื่อเลือกจำนวนกฎที่มีค่าต่ำสุด วิธีการนี้ได้ทดลองใช้กับปัญหาของกระบวนการที่มีไดนามิกแบบไม่เชิงเส้นอันดับสอง พบว่าแบบจำลองที่ได้จากวิธีการนี้สามารถทำนายค่าได้ใกล้เคียงกับค่าเอาท์พุทของกระบวน ซึ่งให้ผลเป็นเป็นที่น่าพอใจ

Mastorocostas และ Theocharis (1997) ได้เสนอเทคนิคการสร้างแบบจำลองฟัซซีโดยใช้วิธีออร์โธโกนัลลีสท์สแควร์ (Orthogonal least squares) ของระบบที่มีไดนามิกแบบไม่เชิงเส้นแบบจำลองฟัซซีที่ได้มีรูปแบบกฎฟัซซีเหมือนแบบจำลองฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno โดยแยกการระบุหาเป็นสองกรณีคือกรณีแรกใช้วิธีออร์โธโกนัลลีสท์สแควร์เพื่อพาร์ทิชัน (Partition) ปริภูมิของตัวแปรอินพุท กำหนดจำนวนกฎฟัซซี และค่าพารามิเตอร์ในส่วนเงื่อนไขของกฎ กรณีที่สองเป็นการใช้วิธีออร์โธโกนัลในการระบุพารามิเตอร์ในส่วนผลสรุป แล้วทำการปรับจูนละเอียดอีกทีโดยใช้วิธีรีเคอร์สีฟลีสท์สแควร์ (Recursive least squares method) โดยทำการทดสอบอัลกอริธึมนี้กับกระบวนการในเตาหลอมที่ใช้ก๊าซเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งมีอินพุทเป็นอัตราการไหลของก๊าซ และเอาท์พุทเป็นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางออก เปรียบเทียบผลการทดสอบกับวิธีการระบุหาแบบจำลองของผู้วิจัยคนอื่นๆ พบว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.051 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าวิธีการอื่น

Wong และ Lin (1997) ได้เสนอวิธีการสกัดกฎฟัซซีแบบอัตโนมัติเพื่อระบุหาแบบจำลองฟัซซีของระบบ โดยใช้ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทร่วมกับอัลกอริธึมทางพันธุ์ศาสตร์ (Genetic algorithms) เพื่อทำการลดจำนวนฟัซซีเซตที่เกินความจำเป็นโดยใช้ฟิตเนสฟังก์ชัน (Fitness function) อัลกอริธึมที่เสนอสามารถให้ระบบฟัซซีที่มีจำนวนกฎที่น้อยและสามารถทำนายกระบวนได้อย่างถูกต้อง

2.4 ผลงานวิจัยเกี่ยวกับการสร้างตัวควบคุมฟัซซี

Shah และ Rajamanu (1988) พัฒนาอัลกอริธึมของการควบคุมระดับน้ำ โดยใช้ทฤษฎีฟัซซีลอจิกที่แสดงด้วยเซตของกฎทางภาษา อัลกอริธึมนี้ออกแบบโดยใช้กลยุทธ์การควบคุมของผู้ปฏิบัติการ กฎฟัซซีของตัวควบคุมเป็นการแสดงการส่ง (Mapping) จากค่าความผิดพลาดและการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาดไปยังการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราการไหลของน้ำขาออก โดยทำการทดสอบกับโฟเตชันเซล (Flotation cell) ในห้องปฏิบัติการ มีลักษณะคล้ายแทงค์สี่เหลี่ยมซึ่งปริมาตรของเซลมีความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นกับระดับความสูง ตัวควบคุมที่สร้างทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ ผลการทดสอบพบว่าตัวควบคุมฟัซซีสามารถใช้งานง่าย และมีประสิทธิภาพในการควบคุมระบบไม่เชิงเส้นได้เป็นอย่างดี

Graham และ Newell (1989) ได้เสนอการควบคุมแบบปรับตัวได้โดยใช้ฟัซซี (Fuzzy adative control) ของกระบวนการอันดับหนึ่งโดยการเปลี่ยนแปลงค่าเกนและค่าคงที่ของเวลา ตัวควบคุมแบบปรับตัวได้นี้อยู่บนพื้นฐานของตัวควบคุมแบบใช้โมเดลที่ใช้แบบจำลองฟัซซี การปรับตัวได้ทำโดยการเพิ่มการระบุหาแบบจำลองแบบออนไลน์ ตัวควบคุมแบบปรับตัวจะทำการปรับจูนให้แบบจำลองฟัซซีแมทช์ (Match) กับกระบวนการเพื่อให้ได้ค่าสมรรถนะที่เหมาะสม แบบจำลองฟัซซีจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนสภาวะปฏิบัติการ นอกจากนี้ยังเสนออัลกอริธึมสำหรับการระบุ

หากระบวนการไว้ 2 แบบ ซึ่งมีความทนทานต่อสัญญาณรบกวนและถูกปรับโดยการเพิ่มค่าแฟกเตอร์การถ่วงน้ำหนัก (Weighting factor) โดยทำการทดสอบตัวควบคุมกับระบบที่มีหนึ่งตัวแปรอินพุทและเอาท์พุท แบบจำลองฟัซซีที่ใช้แสดงในรูปความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดและการกระทำการควบคุมที่เวลาปัจจุบัน เพื่อทำการเปลี่ยนค่าความผิดพลาดที่เวลาถัดไป

Shah และ Rajamani (1990) พัฒนาตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบสามารถปรับตัวได้เอง (Self-organizing fuzzy logic controller) และนำไปใช้แก้ปัญหาการควบคุมระดับพีเอช ซึ่งเป็นปัญหาหนึ่งที่พบมากในอุตสาหกรรมเคมี ลักษณะของโครงสร้างตัวควบคุมจะเป็นการพัฒนารูปแบบของอัลกอริธึมตัวควบคุมฟัซซีเดิมที่มีจำนวนของกฎคงที่ให้สามารถปรับเปลี่ยนหรือเพิ่มเติมกฎการควบคุมได้เองแบบออนไลน์ (On-line) โดยเทคนิคการเรียนรู้และประเมินค่าดัชนีสมรรถนะ วิธีการควบคุมนี้เป็นอัลกอริธึมเพื่อปรับเปลี่ยนกฎการควบคุมโดยอัตโนมัติ ทำให้ตัวควบคุมที่สร้างขึ้นนี้มีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณ์ของกระบวนการที่ถูกควบคุมได้ดีกว่าตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบธรรมดา โดยทำการทดสอบเปรียบเทียบกับการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมพีไอดีและตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบดั้งเดิม ผลการควบคุมแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมฟัซซีลอจิกที่ใช้อัลกอริธึมปรับตัวได้เอง มีสมรรถนะการควบคุมที่เหนือกว่าตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบดั้งเดิมและตัวควบคุมพีไอดีอย่างมากโดยเฉพาะการควบคุมในย่านที่มีความไม่เชิงเส้นของกระบวนการสูง

Postlethwaite (1994) ใช้แบบจำลองฟัซซีในการออกแบบตัวควบคุม ซึ่งเรียกว่าแบบจำลองฟัซซีแบบใช้โมเดล โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้แทนตัวควบคุมฟัซซีลอจิกชนิดฐานกฎ (Rule-based type) ซึ่งกฎการควบคุมออกแบบโดยใช้ความรู้และความชำนาญของการปฏิบัติการของผู้ปฏิบัติการ ดังนั้นตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบใช้โมเดลจึงเป็นการออกแบบเพื่อทำการจำลองกระบวนการตัดสินใจของมนุษย์โดยใช้แบบจำลองฟัซซี โครงสร้างของแบบจำลองนี้มีลักษณะคล้ายกับแบบ

จำลองแบบใช้โมเดลทั่วไป และได้ประยุกต์ใช้ตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดลกับกระบวนการควบคุมระดับน้ำ และการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในห้องปฏิบัติการ พบว่าตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดลให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าทั้งสองกรณีเมื่อเทียบกับการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ แต่วิธีการที่เสนอนี้ยังมีปัญหาบางอย่างในการกำหนดจำนวนของฟัซซีเซตอ้างอิงที่เหมาะสมของแบบจำลอง เพื่อรับประกันค่าสมรรถนะของแบบจำลอง

Johansen (1996) ได้ออกแบบตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้นโดยใช้แบบจำลองฟัซซี และประยุกต์ใช้ตัวควบคุมนี้กับระบบไดนามิกที่มีหลายตัวแปรอินพุท-เอาท์พุท แบบจำลองฟัซซีประกอบด้วยเซตของแบบจำลองแบบ ARX (ARX: AutoRegressive with eXogenous input) นอกจากนี้ได้ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ผลการทดสอบพบว่าลูพปิดของระบบมีเสถียรภาพทั่วทุกจุด (globally stable) และนอกจากนี้ยังมีความทนทานต่อความไม่แน่นอน เช่นความผิดพลาดของแบบจำลอง และตัวรบกวน

Kung และ Li (1997) เสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดล โดยใช้แบบจำลองฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno เสมือนเป็นผู้ระบุหาระบบที่มีไดนามิกแบบไม่เชิงเส้น และประยุกต์ใช้วิธีเกรเดียนต์เดสเซ็นท์ (Gradient descent method) เพื่อทำการปรับหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองฟัซซีที่เหมาะสมและออกแบบตัวควบคุมฟัซซีจากการผกผันแบบจำลองฟัซซี แล้วทำการประยุกต์ใช้วิธีการนี้กับระบบไดนามิกอันดับสอง และ ระบบสองตัวแปรอินพุท-เอาท์พุท

Sing และ Postlethwaite (1997) ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองความสัมพันธ์ฟัซซี (Fuzzy relational model) ซึ่งสามารถระบุหาได้จากข้อมูลเพื่อใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้น กรณีที่ศึกษาเป็นการควบคุมพีเอชของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง(Continuous stirred tank reactor: CSTR) โดยใช้การซิมมูเลทกระบวนการและการทดลองในห้องปฏิบัติการจริง แล้วทำ

การเปรียบเทียบตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้นที่สร้างขึ้นกับตัวควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ (Model predictive controller: MPC) ตัวควบคุมฟัซซีชนิดฐานกฎ (Fuzzy rule based controller) ตัวควบคุมพีไอดี และตัวควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟเชิงเส้น พบว่าการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมแบบใช้โมเดลความสัมพันธ์ฟัซซีให้ผลการควบคุมที่ดีมากในการควบคุมกระบวนการซึ่งมีความไม่เชิงเส้นสูง และเหมาะที่จะประยุกต์ใช้กับกระบวนการจริง

2.5 บทสรุป

การพัฒนาการทางด้านฟัซซีเซตและฟัซซีลอจิกมีการพัฒนามาตั้งแต่ปี 1965 และได้ประยุกต์ใช้ฟัซซีลอจิกในระบบควบคุม ระบบผู้เชี่ยวชาญ การสร้างแบบจำลองกระบวนการ และผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ต่างๆ สำหรับการสร้างแบบจำลองฟัซซีของกระบวนการได้มีผู้ทำการศึกษาและเสนอวิธีการระบุหาแบบจำลองฟัซซีจากข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทไว้หลายๆ วิธีด้วยกัน ผลงานวิจัยที่ผ่านมาทางด้านการระบุหาแบบจำลองฟัซซี มักเป็นการประยุกต์เพื่อการระบุหาแบบจำลองฟัซซีของกระบวนที่ซับซ้อน และไม่เชิงเส้น เช่นการสร้างแบบจำลองของกระบวนหมัก กระบวนการควบคุมพีเอชในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ฯลฯ ผลงานวิจัยที่ผ่านมาของการสร้างแบบจำลองฟัซซีสามารถสรุปได้ในตารางที่ 2.1 และผลงานวิจัยในด้านการควบคุมด้วยฟัซซีลอจิกมีการประยุกต์ในกับอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า เช่นเครื่องซักผ้า เครื่องปรับอากาศ ตลอดจนการควบคุมกระบวนการในอุตสาหกรรม ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาวิธีการสร้างตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดลมากขึ้นเพื่อการประยุกต์ใช้กับกระบวนการจริง ผลงานวิจัยที่ผ่านมาของการสร้างตัวควบคุมฟัซซีสรุปได้ดังในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมาของการสร้างแบบจำลองฟัซซี

ค.ศ.	ชื่อผู้วิจัย	วิธีการ	การประยุกต์ใช้
1985	Takagi และ Sugeno	ระบุหาค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลสรุปด้วยวิธีการกำลังสองน้อยที่สุด	กระบวนในอุตสาหกรรม (การทำน้ำให้บริสุทธิ์ และคอนเวอร์เตอร์ของกระบวนการผลิตเหล็กกล้า)
1993	Sugeno และ Yasukawa	ฟัซซีซี-มีนคลัสเตอริง	กระบวนการไดนามิก และ จำลองการควบคุมของผู้ปฏิบัติการ
1994	Zhao และผู้ร่วมงาน	จี-เคคลัสเตอริง	ระบบที่สถิตย์และมีไดนามิกแบบไม่เชิงเส้น
1995	Park และผู้ร่วมงาน	ฟัซซีคลัสเตอริงและเกเดียนต์เดสเซ็นท์	ระบบหนึ่งตัวแปรอินพุท-เอาท์พุท
1996	Huh และ Kim	วิธีกำลังสองน้อยที่สุดและการออปติไมเซชันแบบไม่เชิงเส้น	ระบบเทอร์ไบน์ในหม้อต้ม
1997	Castellano และ Fanelli	นิวโร-ฟัซซีเน็ทเวิร์ก	ระบบไดนามิกไม่เชิงเส้นอันดับสอง
1997	Mastorocostas และ Theocharis	ออร์โธโกนัลลีสท์สแควร์และ รีเคอร์สีฟลีสท์สแควร์	กระบวนการของเตาหลอม
1997	Wong และ Lin	อัลกอริธึมทางพันธุ์ศาสตร์	กระบวนการไม่เชิงเส้น

ตารางที่ 2.2 สรุปผลงานวิจัยของการสร้างตัวควบคุมฟัซซีลอจิก

ค.ศ.	ชื่อผู้วิจัย	วิธีการ	การประยุกต์ใช้
1988	Shah และ Rajamanu	ออกแบบกฎการควบคุมโดยใช้กลยุทธ์การควบคุมกระบวนการของผู้ปฏิบัติการ	โฟเตชันเซลในห้องปฏิบัติการ
1989	Graham และ Newell	ออกแบบกฎการควบคุมแบบปรับตัวได้โดยใช้แบบจำลอง	กระบวนการควบคุมระดับน้ำในห้องปฏิบัติการ
1990	Shah และ Rajamani	ออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับตัวได้เอง กฎการควบคุมมีการปรับเปลี่ยนแบบออนไลน์	การควบคุมระดับพีเอช
1994	Postlethwaite	ออกแบบตัวควบคุมแบบใช้โมเดลจากแบบจำลอง	การควบคุมอุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
1996	Johansen	ใช้แบบจำลองฟัซซีแบบ ARXเพื่อการออกแบบ	ระบบไดนามิกหลายตัวแปรอินพุทหลายตัวแปรเอาท์พุท
1997	Kung และ Li	ใช้แบบจำลองฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno โดยการผกผันแบบจำลอง	ระบบไดนามิกไม่เชิงเส้นอันดับสอง และ ระบบสองตัวแปรอินพุท-เอาท์พุท