

บทที่ 2

หลักการ และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เครื่องวัดอัตราการไหลแบบดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Flow Meter) เป็นเครื่องวัดการไหล ชนิดที่ก่อให้เกิดความดันตกคร่อมเครื่องวัด ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในทางอุตสาหกรรม ได้แก่ ออร์ฟิซ (Orifice), นोजเซิล (Nozzle), และเวนจูรี (Venturi) แต่สำหรับระบบกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โรงไฟฟ้าแม่เมาะ หน่วยที่ 8-11 มีปัญหาที่สันนิษฐานว่า เกิดจากการใช้งานอุปกรณ์เกินกำลัง (ค่าอัตราการไหลสูง) และรับภาระบางส่วน (ค่าอัตราการไหลต่ำ) การเพิ่มความดันตกคร่อมในระบบท่อ จะมีผลกระทบต่อค่าเสถียรของระบบสูบน้ำ ทำให้ค่าอัตราการไหลลดลง และอุปกรณ์ทำงานนอกช่วงที่ออกแบบมากขึ้น สำหรับ เครื่องวัดอัตราการไหลแบบช่องอ ซึ่งมีหลักการเช่นเดียวกับเครื่องวัดอื่นๆ แต่การใช้ช่องอวัดอัตราการไหล ไม่ได้ทำให้ความดันตกคร่อมเพิ่มมากกว่าช่องอที่ติดตั้งอยู่ในระบบท่อเดิม ซึ่งน่าจะเป็นเครื่องวัดที่เหมาะสม สำหรับการใช้งาน ดังนั้น จากขอบเขตของงานวิจัย จะศึกษาคุณลักษณะของเครื่องวัดชนิดนี้ โดยใช้ระบบท่อทดลอง ที่ออกแบบตามข้อกำหนดของสถาบันมาตรฐาน ใช้ระเบียบวิธีทางสถิติในการวิเคราะห์ข้อมูล เมื่อทราบคุณลักษณะของเครื่องวัดแล้ว จึงนำไปวัดอัตราการไหลในระบบท่อจริง โดยความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณความดัน และค่าอัตราการไหลในช่วงใช้งานที่ได้มา จะนำไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมค่าอัตราการไหลด้วยกระบวนการพีชชีลลจิก

2.1 คุณลักษณะของเครื่องวัดการไหลแบบช่องอ

Richard W. Miller (1996) อธิบาย เครื่องวัดการไหลแบบดิฟเฟอเรนเชียล ว่าเป็นเครื่องวัดที่ใช้หลักการ ของการขัดขวางช่องทางการไหล ก่อให้เกิดความดันตกคร่อมเครื่องวัด โดยการเปลี่ยนรูปของพลังงานจากความดัน (Pressure Energy), พลังงานจลน์ (Kinetic Energy), และพลังงานศักย์ (Potential Energy) จากสมการหลักของเบอร์นูลลี และสมดุลเชิงมวล ในขณะที่เครื่องวัดการไหลแบบช่องอ J. W. Murdock, *et al.* (1963) ระบุว่าใช้หลักการของความดันสถิตแตกต่าง ระหว่างจุดวัดสองตำแหน่งคร่อมช่องอ เมื่อมีการเปลี่ยนทิศทางการไหล แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางจะกระตุ้นของไหลในบริเวณแกนท่อ ให้เคลื่อนที่ไปยังผนังด้านนอก ในขณะที่ ของไหลบริเวณผนัง จะเคลื่อนที่เข้าสู่แกนกลาง ด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ค่าความดัน แตกต่างกัน

ไปตามตำแหน่งรัศมีของข้องอ ความดันสูงสุดอยู่ที่ผนังด้านนอก และความดันต่ำสุดอยู่ที่ผนังด้านใน โดย J. M. Colwell and C. A. Shook (1989) แสดงความสัมพันธ์ ของความดันที่เปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางแนวรัศมีของข้องอ ในรูปของสมการ โมเมนตัม สำหรับ ของผสมที่มีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียว ไม่ยุบตัวในขณะไหล (Incompressible Homogeneous Flow), มีการไหลแบบอยู่ตัว (Steady Flow), และมีสภาวะอยู่ตัว (Steady State) ดังสมการ (2.1)

$$\rho \left[v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \left(\frac{v_\theta}{r} \right) \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \left(\frac{v_\theta}{r \sin \theta} \right) \frac{\partial v_r}{\partial \phi} - \left(\frac{v_\theta^2 + v_\phi^2}{r} \right) \right] = - \frac{\partial P}{\partial r} + f_{rw} \quad (2.1)$$

Masayuki Toda, *et al.* (1972) พบว่า จากการเปลี่ยนแปลงทิศทางกรไหล ของผสม จะเคลื่อนที่ไปตามผนังข้องอ เนื่องจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง มีอิทธิพลต่อของไหล มากกว่าการไหลย้อน (Secondary Flow) และแรงดึงดูดของโลก (Gravity Force) ดังนั้น ในสมการ (2.1) ค่าความเร็วตามแนวเส้นรอบรูป (v_θ) จะมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วเฉลี่ย (V) ส่วนความเร็วตามแนวรัศมี (v_r) และตามแนวแกนท่อ (v_ϕ) มีค่าน้อยมาก และแรงต้านตามแนวรัศมี (f_{rw}) ก็จะมีค่าน้อยด้วย ดังนั้น จากสมการ (2.1) จะลดรูปลงมาเป็นสมการ (2.2) และ (2.3) ตามลำดับ

$$\Delta P C_e^2 = \rho \frac{V^2}{2} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

และ

$$Q = C_e \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

โดยค่า Q คือ ค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตร หน่วย ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

C_e คือ ค่าสัมประสิทธิ์ข้องอ ตัวแปรไร้มิติ

D คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของข้องอ หน่วย เมตร

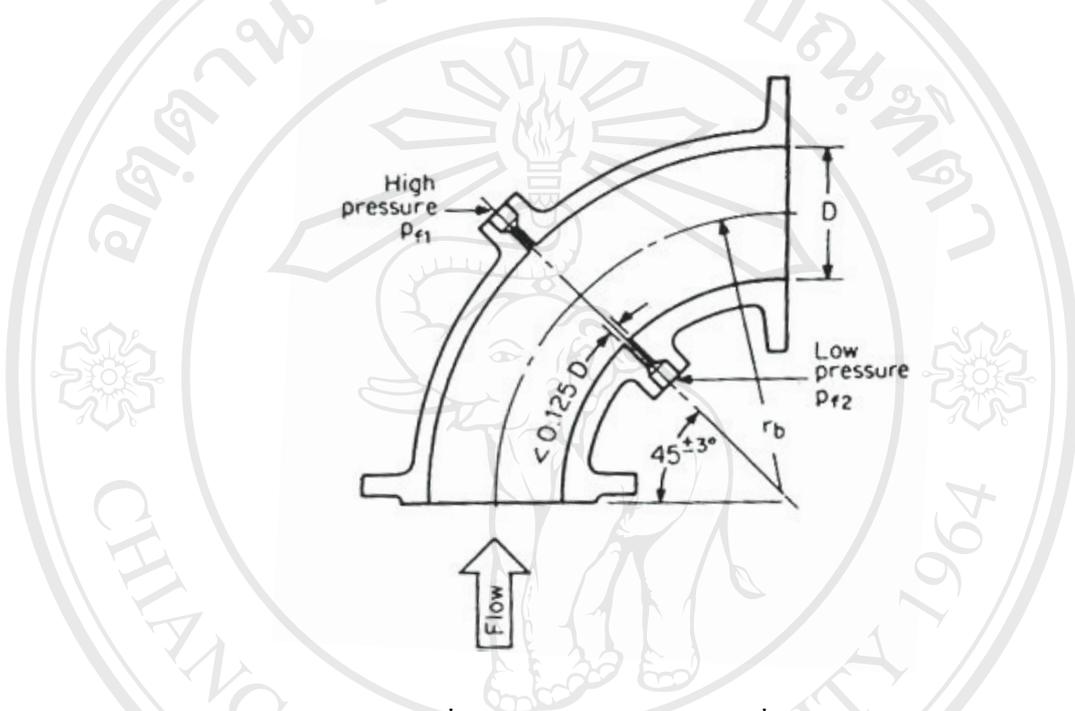
ΔP คือ ค่าความดันแตกต่าง ระหว่างผิวโค้งด้านในและด้านนอกของข้องอ

หน่วย นิวตันต่อตารางเมตร

ρ คือ ความหนาแน่นของ ของไหล หน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

สมการ (2.3) เป็นสมการที่ J. M. Colwell and C. A. Shook (1989) ใช้เป็นสมการหลัก ของการวัดอัตราการไหลด้วยข้องอ ที่ใช้กับของผสมระหว่างของแข็งและของเหลว ซึ่งในทางปฏิบัติ การใช้สมการทางทฤษฎีคำนวณค่าอัตราการไหล จะสามารถคำนวณได้เท่าค่าที่แท้จริง ก็ต่อเมื่อ ข้อสมมติต่างๆเป็นจริง ซึ่งเกิดขึ้นได้ยาก โดยทั่วไปค่าอัตราการไหลที่แท้จริงจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้ เนื่องจาก ลักษณะทางกายภาพของเครื่องมือวัด และความต้านทานระหว่างของไหล

กับผนังภายในเครื่องมือวัด นอกจากนั้น สถานะการไหลวน (Flow Recirculation) และการแยกตัว (Separation) ก็ส่งผลต่อการสูญเสียพลังงานในการไหลด้วย ซึ่งสมการของเบอร์นูลีมีได้นำสถานะดังกล่าวเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้น การใช้สมการทางทฤษฎีคำนวณค่าอัตราการไหล จึงต้องใช้ตัวปรับแก้เนื่องจากผลดังกล่าว เรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์ข้องอ (Elbow Coefficient) โดยเครื่องวัดการไหลแบบช่องอมัลักษณะ แสดงดังรูปที่ 2.1



รูป 2.1 แสดงภาพหน้าตัด ของเครื่องวัดการไหลแบบข้องอ (ที่มา : Richard W. Miller, 1996)

นอกจากค่าสัมประสิทธิ์ข้องอแล้ว ยังมีตัวแปรอื่นๆ ที่มีผลกระทบต่อเครื่องวัดการไหลด้วยเครื่องวัดแบบข้องอ ได้แก่ ตัวเลขเรย์โนลด์, ตำแหน่งติดตั้งข้องอ, และลักษณะทางกายภาพของข้องอ ซึ่งประกอบด้วย ค่าสัดส่วนรัศมีความโค้งต่อขนาดท่อ (r_b/D) และตำแหน่งจุดวัดความดันที่แกนท่อกับระยะห่างจากกับแกนไหลเข้าข้องอ (θ) โดยตัวเลขเรย์โนลด์เป็นตัวแปรที่แสดงถึงสถานะการไหล สำหรับข้องอที่ใช้กับของไหลเฟสเดียว มีการศึกษาอย่างกว้างขวางทั้งสถานะการไหลแบบราบเรียบ และแบบปั่นป่วน เช่น J. W. Murdock, *et al.* (1963), Masayuki Toda, *et al.* (1972) และ F. Sanchez Silva, *et al.* (1997) ในขณะที่ของผสม เน้นการไหลแบบปั่นป่วน โดย J. M. Colwell and C. A. Shook (1989) ระบุว่า การไหลแบบราบเรียบ มีโอกาสที่จะเกิดการตกตะกอนของอนุภาคมากกว่าการไหลแบบปั่นป่วน สำหรับ ตำแหน่งติดตั้งข้องอ ในของไหลเฟสเดียว กำหนดให้ติดตั้งในตำแหน่ง ที่มีการไหลแบบพัฒนาเต็มที่ เพราะค่าสัมประสิทธิ์ข้องอจะมีค่าคงที่ ไม่แปรผันไปตามตัวเลขเรย์โนลด์ ส่วนข้องอที่ใช้กับของผสม J. M. Colwell and C. A.

Shook (1989) เสนอว่า ควรติดตั้งในตำแหน่งที่การไหลเข้ามีสภาพปั่นป่วน เพราะจะได้การกระจายความเข้มข้นของของแข็งสม่ำเสมอตลอดหน้าตัด ค่ารัศมีความโค้งต่อขนาดท่อ เป็นตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับค่าความดันแตกต่าง โดย F. Sanchez Silva, *et al.* (1997) พบว่า เมื่อรัศมีความโค้งของข้องอมีค่าลดลง ค่าความดันแตกต่างจะมีค่าเพิ่มขึ้น ในกรณีของข้องอที่มีขนาดต่างกัน แต่มีค่าสัดส่วนรัศมีความโค้งต่อขนาดท่อเท่ากัน ค่าความดันแตกต่างจะมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนตำแหน่งของจุดวัดความดัน A. J. Ward Smith (1971) พบว่า ความดันแตกต่างระหว่างผิวโค้งด้านนอกและด้านในมีค่าสูง ที่แกนทำมุมกับระนาบตั้งฉากกับแกนไหลเข้าข้องอ 18-45 องศา นอกจากนี้ การเกิดฟองอากาศ และความต่อเนื่องของพื้นที่หน้าตัดการไหล ก็เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพล ซึ่งสามารถที่จะลดผลกระทบได้ โดยการควบคุมให้ได้ตามข้อกำหนด ในมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับเครื่องวัดอัตราการไหล ชนิดความดันแตกต่าง เช่น ISO 5167-1 : 2003

สำหรับ ข้องอที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ ผลิตจากวัสดุไฟเบอร์กลาส ตามมาตรฐาน DIN 16966 Part 2 มีค่าสัดส่วนรัศมีความโค้งต่อขนาดท่อคงที่ 1.5 ต่อ 1 และความหยาบผิวท่อประมาณ 50 ไมโครเมตร จากประวัติการใช้งานในสภาพปกติ ไม่พบการสึกหรอภายในท่อ ที่มีผลทำให้ความหยาบของผิวภายในท่อเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะกระทบกับสภาวะการไหลในท่อ โดยน้ำ-ยิปซัมไหลด้วยตัวเลขเรย์โนลด์ระหว่าง 2,000-3,500 ข้องอมีจุดวัดความดันที่มุม 22.5, 30.0, 37.5, และ 45.0 องศา เลือกตำแหน่งติดตั้งข้องอต่อกับท่อด้านส่งของเครื่องสูบน้ำ ที่ให้การไหลเข้าแบบปั่นป่วน และในระบบท่อทดลอง ที่มีระยะท่อตรงก่อนเข้าข้องอไม่น้อยกว่า 20 เท่าของขนาดท่อ ซึ่งจะทำให้การไหลเข้าเป็นแบบพัฒนาเต็มที่

2.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของเครื่องวัดการไหลแบบข้องอ

ตามปกติ ค่าสัมประสิทธิ์ของเครื่องวัดการไหล จะหามาได้จากการทดลองเท่านั้น โดย Richard W. Miller (1996) ระบุว่า เป็นค่าสัดส่วน ระหว่างค่าอัตราการไหลที่แท้จริง ต่อค่าอัตราการไหลทางทฤษฎี โดยทั่วไป มักจะแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของเครื่องมือวัดการไหล ในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์ของเครื่องมือวัด และตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number, R_{ed}) หรือในแบบของสมการความสัมพันธ์ นอกจากนี้ ยังมีค่าสัมประสิทธิ์ของเครื่องวัดการไหล อีกชนิดหนึ่งที่น่าเอารูปแบบของความเร็ว เข้ามารวมกับค่าสัมประสิทธิ์ของเครื่องมือวัด เรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การไหล (Flow Coefficient) แต่สำหรับเครื่องมือวัดการไหลที่มีรูปร่างคงที่ (Fixed-Geometry) เช่น ข้องอ ซึ่งมีขีดจำกัดในด้านขนาด ค่าสัมประสิทธิ์การไหล จะมีความหมายเดียวกับ ค่าสัมประสิทธิ์ของเครื่องมือวัด (Flow Meter Coefficient)

ค่าสัมประสิทธิ์ข้องอ ที่ทดสอบด้วยน้ำสะอาด มีผู้นำเสนอมากมาย ได้แก่ Richard W. Miller (1996) แสดงสมการความสัมพันธ์ ของค่าสัมประสิทธิ์ข้องอ ที่มีจุดวัดความดันแตกต่าง ที่แกนทำมุม 45 ± 3 องศา กับระนาบตั้งฉากกับแกนไหลเข้าข้องอ ดังสมการ (2.4)

$$K = \sqrt{\frac{r_b}{2D}} + \frac{6.5\sqrt{r_b/2D}}{\sqrt{Re_d}} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

และสำหรับ ข้องอที่มีจุดวัดความดันที่มุม 22.5 องศา สัมประสิทธิ์ข้องอจะมีค่าตามสมการ (2.5)

$$K = \frac{\left[\left(\frac{2r_b}{D} \right)^2 - 1 \right] \left\{ \ln \left[\frac{2r_b/D + 1}{2r_b/D - 1} \right] \right\}}{4\sqrt{2r_b/D}} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

เมื่อค่า K คือ สัมประสิทธิ์ข้องอ ตัวแปรไร้หน่วย

r_b คือ รัศมีความโค้งของข้องอ เป็นค่าเฉลี่ยระหว่าง รัศมีภายนอกและภายใน หน่วย เมตร

Re_d คือ ตัวเลขเรย์โนลด์การไหล ตัวแปรไร้หน่วย

โดยมีเงื่อนไขการใช้สมการของ Richard W. Miller (1996) สำหรับ ข้องอที่มีค่า สัดส่วนรัศมีความโค้ง ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางข้องอ ไม่น้อยกว่า 1.25 ต่อ 1 และตัวเลขเรย์โนลด์ มากกว่า 10,000 ขึ้นไป ค่าวนค่าอัตราการไหลได้แม่นยำ ± 4 เปอร์เซ็นต์ จากสมการข้างต้น จะเห็นว่า จุดวัดที่มุม 22.5 องศา ค่าสัมประสิทธิ์ข้องอ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบรูปร่างเพียงอย่างเดียว แต่ จุดวัดที่มุม 45 องศา ค่าสัมประสิทธิ์ข้องอ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบรูปร่าง และตัวเลขเรย์โนลด์ด้วย

ส่วน James W. Dally, *et al.* (1993) แสดงค่าสัมประสิทธิ์ข้องอ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.56–0.88 สำหรับ ข้องอมาตรฐาน ที่มีจุดวัดความดันที่มุม 45 องศา โดยมีได้แสดงเงื่อนไขในการ นำค่าสัมประสิทธิ์ข้องอไปใช้งาน ในขณะที่ Indian Standard Institution (1979) ระบุค่า สัมประสิทธิ์ข้องอมาตรฐาน มีค่าขึ้นอยู่กับ ค่าสัดส่วนรัศมีความโค้งต่อขนาดข้องอ ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งมีความคลาดเคลื่อน ± 5 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้เงื่อนไข สภาวะการไหลเข้าข้องอ เป็นแบบพัฒนา เต็มที่ (Fully-developed) และมีความเร็วไม่น้อยกว่า 1 เมตร ต่อวินาที

ตาราง 2.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ข้องอ ของ Indian Standard Institution (ที่มา : Indian Standard IS : 9115–1979)

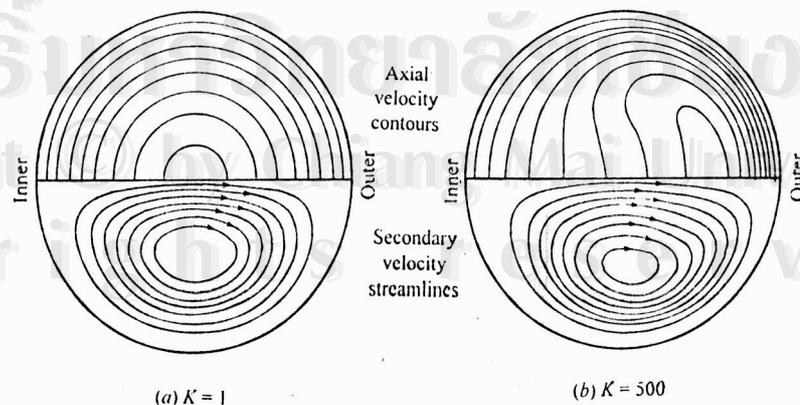
r_b/D	1	1.5	2	2.54	3	4
C_e	0.69	0.86	1	1.12	1.2	1.4

และ J. W. Murdock, *et al.* (1963) สรุปรายงานผลการวิจัย จำนวน 1,500 ชุด พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ช่องอ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.85–1.08 โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามตัวเลขเรย์โนลด์ในช่วง 50,000–300,000 สำหรับ ช่องมาตรฐานที่มีค่าสัดส่วนรัศมีความโค้ง ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ช่องอ มากกว่า 1.5 ต่อ 1 ขึ้นไป ใช้คำนวณค่าอัตราการไหล ด้วยความแม่นยำ ± 4 เปอร์เซ็นต์ และสามารถอ่านค่าอัตราการไหลซ้ำได้ โดยมีค่าคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 0.2 เปอร์เซ็นต์

สำหรับ ค่าสัมประสิทธิ์ช่องอ ที่ใช้กับของผสมระหว่างของแข็งกับของเหลว มีเพียงงานวิจัยของ J. M. Colwell and C. A. Shook (1989) ซึ่งได้ค่าสัมประสิทธิ์ช่องอเฉลี่ย 0.76 สำหรับ ช่องมาตรฐานมีจุดวัดความดันที่มุม 45.0 องศา โดยมีเงื่อนไขว่า สภาวะการไหลเข้าช่องอ เป็นแบบปั่นป่วน มีการกระจายความเข้มข้นของ ของแข็งอย่างสม่ำเสมอ ไม่มีอากาศและตะกอน ตกค้างภายในจุดวัดความดัน ใช้งานได้ในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ประมาณ 26,000–40,000

2.3 สภาวะการไหลภายในช่องอ

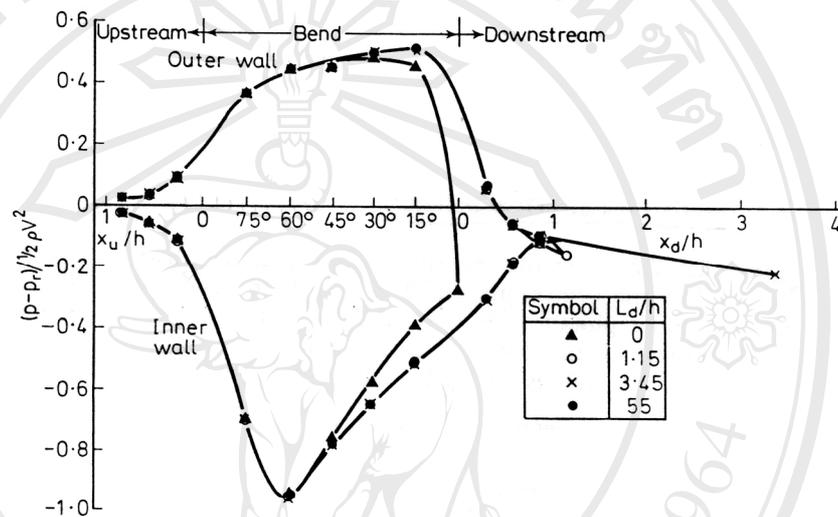
Lynn L. Faulkner and Earl Logan, JR. (2001) อธิบาย ปรากฏการณ์เมื่อมีของไหลเคลื่อนที่เข้าไปในช่องอ ของไหลจะได้รับอิทธิพลจากแรงสองชนิด คือ แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ซึ่งจะผลักดันให้ของไหลเคลื่อนที่ ออกจากแกนกลางของรัศมีความโค้ง และแรงจากการเปลี่ยนแปลงของความดันสถิตในแนวรัศมี ซึ่งจะทำให้ของไหล เคลื่อนที่ไปตามแนวเส้นกลางของรัศมีความโค้ง เมื่อมีความไม่สมดุลระหว่างแรงทั้งสองชนิด จึงเกิดการไหลซ้อน (Secondary Flow) ภายในช่องอ การไหลซ้อนจะเคลื่อนที่จากผนังโค้งด้านใน ไปยังผนังโค้งด้านนอก และย้อนกลับมาที่ผนังโค้งด้านใน เมื่อของไหลเคลื่อนที่เข้าใกล้ทางออกของช่องอ โดยการไหลซ้อนจะแยกออกเป็นสองชุด อยู่ในพื้นที่ครึ่งซ้ายและขวาของช่องอแบบสมมาตร เรียกว่า “Dean Cell” โดย W. R. Dean เป็นผู้ค้นพบ และมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 2.2



รูป 2.2 แสดงเส้นความเร็วตามแนวแกนที่เท่ากัน และการไหลซ้อนในหน้าตัดของช่องอ

(ที่มา : Lynn L. Faulkner and Earl Logan, JR., 2001)

A. J. Ward Smith (1971) รวบรวมรายงานผลการวิจัย ที่ศึกษาภาวะการไหลภายในข้องอ โดยส่วนมากจะอยู่ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ด้วยตัวเลขเรย์โนลด์มากกว่า 10,000 ขึ้นไป โดยมีข้อสมมติว่า เป็นการไหลของของไหลชนิดนิวโตเนียน (Newtonian) ภาวะการไหลแบบไม่ยุบตัว (Incompressible) และไหลเข้าข้องอแบบพัฒนาเต็มที่ แสดงการเปลี่ยนแปลงของความดันสถิตภายในข้องอ ดังรูปที่ 2.3



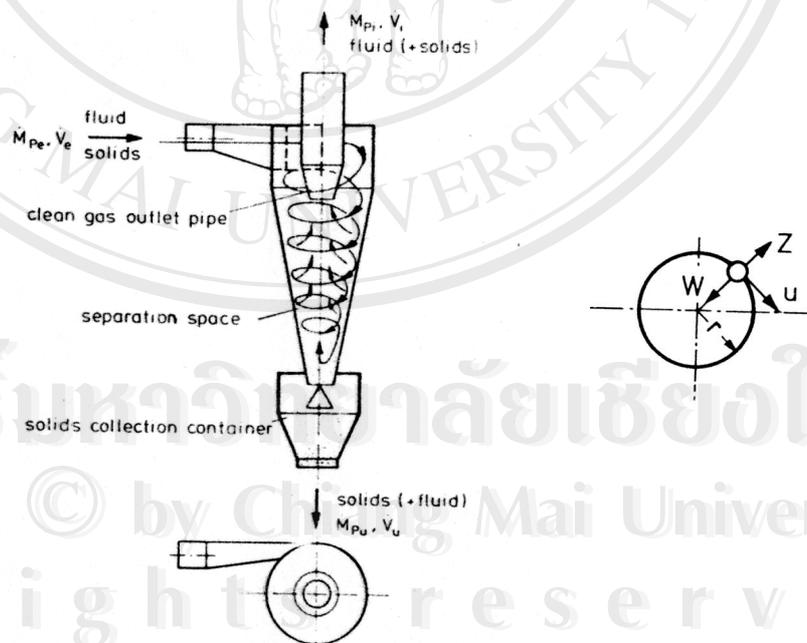
รูป 2.3 แสดงการกระจายของความดันสถิตบนผนังโค้ง ที่อยู่ในระนาบเส้นผ่านศูนย์กลางของข้องอ เปรียบเทียบระหว่างผนังโค้งด้านนอกและด้านใน ที่มุมต่างๆ ของข้องอมาตรฐาน 90 องศา (ที่มา : A. J. Ward Smith, 1971)

จากรูป A. J. Ward Smith (1971) อธิบายว่า เมื่อมีของไหลเข้าข้องอ การแปรผันของความดันสถิตเพิ่มขึ้นบนผิวโค้งด้านนอก และลดลงบนผิวโค้งด้านใน จากการพิจารณามุมบนข้องอที่ตำแหน่งเดียวกัน เมื่อมุมค่อยๆ เพิ่มขึ้น การกระจายของความดันสถิตบนผิวโค้งด้านนอกกลับลดลง ที่มุม 75 องศา (จากด้านเข้าของข้องอ) ในขณะที่มีการเพิ่มของความดันสถิต บนผิวโค้งด้านใน ที่มุม 30 องศา (จากด้านเข้าของข้องอ) โดยค่าความดันสถิตแตกต่าง ระหว่างผิวโค้งด้านนอกและด้านใน มีค่าสูงที่มุมระหว่าง 18 ถึง 45 องศา และจากการสังเกต การกระจายของความเร็วตามแนวแกน พบว่า มีการเพิ่มของความเร็วบนผิวโค้งด้านใน ที่บริเวณทางเข้าของข้องอ ซึ่งสัมพันธ์กับความดันที่ลดลง และความเร็วลดลงบริเวณใกล้ทางออกของข้องอ สอดคล้องกับความดันที่เพิ่มขึ้น

สำหรับ การไหลย้อนที่เกิดขึ้นในข้องอ จะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามมุม โดย K. Sudo, *et al.* (1998) พบว่า ในระหว่างมุม 0-30 องศา มีการลดลงของความดันสถิต บริเวณใกล้ผนังโค้งด้านใน

ทำให้ของไหลถูกร่วง (เล็กน้อย) ในขณะที่การเพิ่มของความดันสถิต ที่บริเวณผนังโค้งด้านนอก ทำให้ของไหลถูกหน่วง เริ่มพบการไหลย้อน ที่มุมมากกว่า 30 องศา โดยในระหว่างมุม 45-60 องศา พบว่ามีการไหลย้อน ด้วยความหนาแน่นต่ำๆ ที่บริเวณผนังโค้งด้านใน ส่วนที่ผนังโค้งด้านนอกจะมีความหนาแน่นที่สูงกว่า เนื่องจาก มีการเพิ่มขึ้นของความดันสถิตที่ผนังด้านใน และความดันสถิตลดลงที่ผนังโค้งด้านนอก (ตรงกันข้ามกับมุมน้อยกว่า 30 องศา) และความหนาแน่นของการไหลย้อนสูงสุดที่มุม 75 องศา

จากผลของการไหลย้อน ที่เกิดขึ้นในหน้าตัดของข้ออ ตามรูปที่ 2.2 ทำให้ความเร็วของไหลตามแนวแกน ย้ายจากแนวกลางท่อเบนไปทางผนังโค้งด้านนอก ซึ่งเป็นผลจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ที่กระทำต่อของไหล สำหรับของผสม ระหว่างของแข็งและของเหลว แรงเหวี่ยงๆ ที่กระทำต่อของผสม จะมีผลกระทบต่ออนุภาคของแข็ง ซึ่งอาจจะแยกตัวออกมาจากของเหลวได้ คล้ายกับหลักการของไฮโดรไซโคลอน ที่อาศัยผลของแรงเหวี่ยง ในการคัดแยกอนุภาคออกจากของผสม โดย สมรัตน์ มโนรส (2538) อธิบายหลักการของไฮโดรไซโคลอน ว่าเป็นเครื่องคัดแยกแบบแรงหมุนวน เมื่อของผสมถูกป้อนเข้าสู่เครื่องๆ ด้วยความดันสูง ของไหลจะเข้าไปในแนวเส้นสัมผัส และหมุนวนเป็นวงกลม เกิดแรงสองแรงกระทำต่ออนุภาค คือ แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force, Z) และแรงต้านการไหล (Drag Force, W) แสดงดังรูปที่ 2.4



รูป 2.4 แสดงหลักการของไฮโดรไซโคลอน และแรงกระทำต่ออนุภาคทรงกลม บนหน้าตัดของไฮโดรไซโคลอน (ที่มา : G. Q. Dai, *et al.*, 1999, และสมรัตน์ มโนรส, 2538)

จากรูปที่ 2.4 เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ภายในไฮโดรไซโคลอน จะเกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Z) กระทำต่ออนุภาค ในขณะที่มีแรงต้านทานการไหล (W) กระทำต่ออนุภาค ในทิศทางตรงกันข้าม โดย สมรัตน์ มโนรส (2538) แสดงสมการแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ที่กระทำต่ออนุภาค และสมการแรงต้านทานการไหล ที่กระทำต่ออนุภาคทรงกลม ดังสมการที่ (2.6) และ (2.7) ตามลำดับ

$$Z = \frac{\Pi}{6} d_p^3 (\rho_p - \rho_l) \frac{V_c^2}{r} \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

$$W = \frac{\Pi}{4} C_D d_p^2 \frac{\rho_l \bar{V}^2}{2} \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

โดยค่า d_p คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค หน่วย เมตร

ρ_p คือ ความหนาแน่นของของแข็ง หน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ρ_l คือ ความหนาแน่นของของเหลว หน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

V_c คือ ความเร็วการไหลวิกฤติ จากผลของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง หน่วย เมตรต่อวินาที

\bar{V} คือ ความเร็วการไหลเฉลี่ยของของผสม หน่วย เมตรต่อวินาที

r คือ ระยะตามแนวรัศมีมีความโค้งของข้องอ หน่วย เมตร

C_D คือ ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการเคลื่อนที่ (Drag Coefficient) ตัวแปรไร้มิติ

เมื่อแรงทั้งสองมีขนาดเท่ากัน อนุภาคจะเคลื่อนที่ไปตามเส้นรอบรูป โดยไม่แยกตัวออกจากของผสม จะได้สมการคำนวณความเร็วการไหลวิกฤติ จากแรงเหวี่ยงฯ ดังสมการ (2.8)

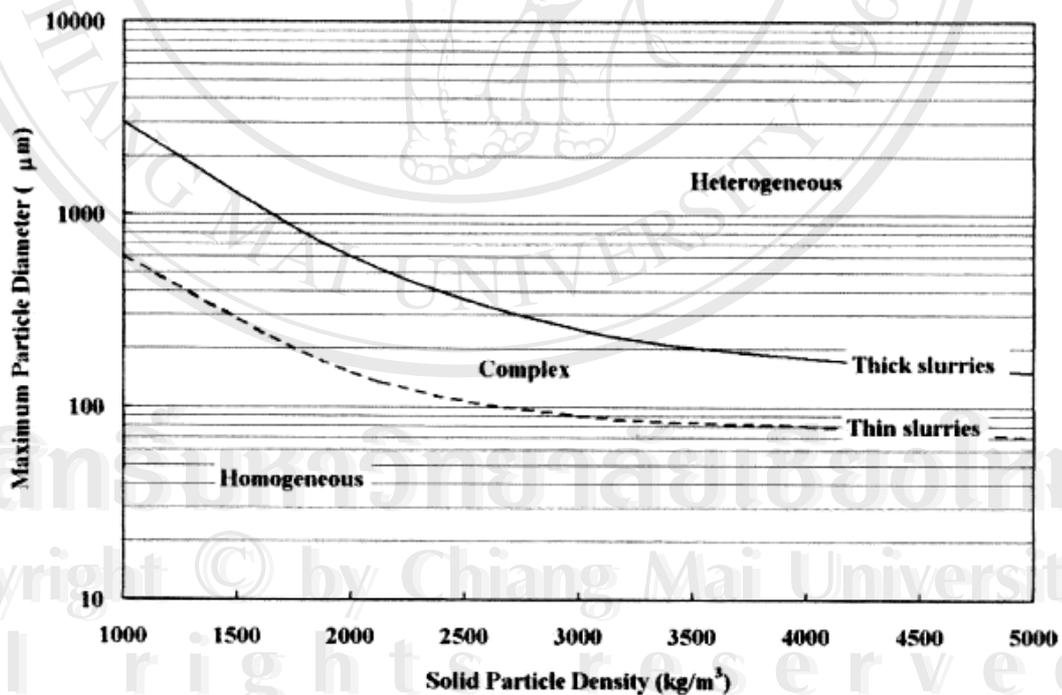
$$V_c^2 = \frac{3 C_D r}{4 d_p} \left(\frac{\rho_l}{\rho_p - \rho_l} \right) \bar{V}^2 \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงใช้สมการ (2.8) คำนวณความเร็วการไหลวิกฤติ จากผลของแรงเหวี่ยงฯ แสดงในภาคผนวก ฅ โดยพบว่า ช่วงความเร็วการไหลของน้ำยิปซัมที่ใช้ในการวิจัย มีค่าน้อยกว่าความเร็วการไหลวิกฤติ จึงพิจารณาได้ว่า อนุภาคยิปซัมในของผสมที่ใช้ในการวิจัย ไม่ได้รับผลจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ที่จะทำให้เกิดการแยกตัวของอนุภาค ออกจากของไหล

2.4 การตกตะกอน และแยกชั้นการไหลของอนุภาค

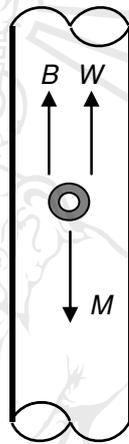
การไหลของของผสม ระหว่างของแข็งและของเหลว ใน Slurry System Handbook แบ่งลักษณะการไหลหลักๆ ออกเป็นสองชนิด คือ การไหลแบบเนื้อเดียว (Homogeneous Flow)

และการไหลแบบหลายเนื้อ (Heterogeneous Flow) โดย Baha E. Abulnaga, P.E. (2002) ระบุว่า ของผสมที่มีคุณสมบัติการไหลแบบเนื้อเดียว จะมีอนุภาคของแข็งขนาดเล็กกว่า 40–70 ไมโครเมตร ผสมในของเหลวที่ความเข้มข้นสูงกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก และอนุภาคกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดการไหล ทำให้ความหนาแน่นเท่ากันทุกตำแหน่ง ของผสมที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 50-60 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก จะมีความหนืดสูงมาก และมีคุณสมบัติเป็นของไหลแบบนอน-นิวโตเนียน (Non-Newtonian) ถ้าอนุภาคของแข็งกระจายในของผสมไม่สม่ำเสมอ จะมีคุณสมบัติการไหลแบบหลายเนื้อ มีการแยกชั้นการไหล โดยความเข้มข้นของของไหลในท่อจะกระจายตามแนวตั้งไม่เท่ากัน และมีโอกาสเกิดการตกตะกอนง่ายกว่า ของผสมที่มีคุณสมบัติการไหลแบบเนื้อเดียว โดยการตกตะกอนของการไหลแบบเนื้อเดียว จะเกิดขึ้นเมื่อ ของผสมมีความเร็วต่ำกว่าความเร็วการไหลวิกฤติ (Critical Flow Velocity, V_c) ซึ่งสัมพันธ์กับความเร็วสุดท้ายของอนุภาค (Terminal Flow Velocity of Particle, w_m) นอกจากนี้ Gary Oddie and J. R. Anthony Pearson (2004) ระบุว่า สภาวะการไหลของ ของของแข็งผสมของเหลว จะมีคุณสมบัติตามแผนภาพ ที่แสดงในรูปที่ 2.5 โดยพิจารณาจากขนาดอนุภาค และความหนาแน่นของ ของแข็ง



รูป 2.5 แสดงแผนภาพสภาวะการไหลของ ของผสมตามขนาด และความหนาแน่นของ ของแข็ง (ที่มา : Gary Oddie and J. R. Anthony Pearson, 2004)

ความเร็วสุดท้ายของอนุภาค เป็นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับของผสม ระหว่างของแข็ง และของเหลว การหาค่าความเร็วสุดท้าย ทำได้โดยให้อนุภาคตกลงอย่างอิสระภายในท่อ จากความ สมดุลของแรงสามแรง ได้แก่ น้ำหนักของอนุภาค (Weight, M), แรงลอยตัว (Buoyancy force, B) และแรงต้านทานการไหล (Drag force, W) กระทำต่ออนุภาค ดังรูปที่ 2.6 (ความเร็วสุดท้าย ไม่ได้พิจารณา แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง, แรงจากไฟฟ้าสถิต, และแรงดึงดูดจากสนามแม่เหล็ก) โดย มีความสัมพันธ์ดังสมการ (2.9)



รูป 2.6 แสดงแรงที่กระทำต่ออนุภาค ซึ่งเคลื่อนที่ลงอย่างอิสระ ภายในของเหลว (ที่มา : Baha E. Abulnaga, P.E., 2002)

$$\text{Weight} = \text{Buoyancy force} + \text{Drag force} \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

ตามปกติ ค่าความเร็วสุดท้ายของอนุภาค จะได้มาจากการทดลองวัดค่า และทำเป็น สมการความสัมพันธ์จากผลการทดลอง (Empirical Formula) โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับ ความเร็วสุดท้ายหลายปัจจัย ได้แก่ ขนาดของอนุภาค, รูปร่างของอนุภาค, ความหนาแน่นของ ของแข็ง, ความหนาแน่นของของเหลว, และความหนืดของของผสม โดยมีรายงานผลการวิจัยหลาย ชุด เช่น Sha, Y. Q. (1956), Ibad-zade, Y. A. (1992), Zhang, R. J. (1989), Van Rijn, L. C. (1989), Zhu, L. J. and Cheng, N. S. (1993), และ Nian-Sheng Cheng (1997a and 1997b) ซึ่งสมการแต่ละชุด จะครอบคลุมช่วงการใช้งานแตกต่างกัน โดยขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ข้างต้น

ความเร็วการไหลวิกฤติ จะมีลักษณะเดียวกับความเร็วสุดท้ายของอนุภาค แต่เป็นการ พิจารณาความเร็วของ ของไหลทั้งก้อน โดยจะมีความเข้มข้นเชิงปริมาตรของ ของผสมเข้ามา

เกี่ยวข้องกับ โดย F. J. Pugh and K. C. Wilson (1999) จำลองการไหลของ ของผสมแบบแยกชั้น ใช้วิธี Two-layer approach โดยระบุว่า การไหลภายในท่อแนวนอน จะถูกแบ่งออกเป็นสองพื้นที่ พื้นที่ส่วนบนความเข้มข้นของ ของแข็งจะเบาบางและจะมีการไหลแบบปั่นป่วน ช่วยพองอนุภาค ให้ลอยตัว ในขณะที่พื้นที่ส่วนล่าง ซึ่งมีความเข้มข้นของ ของแข็งสูงกว่า จะเกิดการสะสมของ อนุภาค จากแรงโน้มถ่วงที่มีทิศทางตั้งฉากกับการไหล จากการพิจารณาที่ช่วงรอยต่อระหว่างสอง พื้นที่ โดยอยู่บนพื้นฐานที่ว่า อนุภาคจะยังคงเคลื่อนที่ เมื่อแรงผลักดันให้เกิดการไหล มีค่ามากกว่า แรงต้านจากกลไกความฝืดระหว่างตะกอนและพื้นที่ท่อ โดยแรงขับประกอบด้วย แรง สองแรง คือ แรงขับที่เกิดจากความดันแตกต่างในท่อ และความเค้นเฉือนที่บริเวณรอยต่อ ส่วนแรงด้าน F. J. Pugh and K. C. Wilson (1999) นำเสนอในรูปแบบของการกระจายความเข้มข้น ดังนั้น ความเร็วการไหลวิกฤติ จะหามาได้จากการทดลองวัดค่าเช่นเดียวกับ ความเร็วสุดท้ายของอนุภาค

จากการเปรียบเทียบ คุณสมบัติของน้ำยิปซัมที่ใช้ในการวิจัย กับเอกสารของ Baha E. Abulnaga, P.E. (2002) และแผนภาพของ Gary Oddie and J. R. Anthony Pearson (2004) พบว่า น้ำยิปซัมมีคุณสมบัติการไหลแบบเนื้อเดียว และสำหรับการพิจารณาการตกตะกอน จะใช้ สมการคำนวณค่าความเร็วสุดท้าย และความเร็วการไหลวิกฤติ ของ Nian-Sheng Cheng (1997a and 1997b) เนื่องจาก ช่วงการใช้งานของสมการครอบคลุม คุณสมบัติของน้ำยิปซัม และแสดงผล การคำนวณในภาคผนวก ๗ โดยพบว่า ค่าความเร็วการไหลวิกฤติ มีค่าต่ำกว่าความเร็วเฉลี่ยของน้ำ ยิปซัมที่ใช้ในการวิจัย พิจารณาได้ว่าสภาวะการไหลในงานวิจัย ไม่เกิดการตกตะกอนภายในระบบ ท่อ แต่ไม่สามารถวัดค่าความเร็วการไหลภายในช่องอ เพื่อยืนยันผลการคำนวณได้ ดังนั้น จึง พิจารณาการกระจายค่าความหนาแน่น ภายในหน้าตัดจุดวัดความดันแทน เนื่องจาก Jianmin Ding, *et al.* (1993) ระบุว่า เริ่มพบการรวมตัวของตะกอน จากของผสมที่ไหลภายในท่อ เมื่อผล การวัดการกระจายของความหนาแน่นในหน้าตัดท่อ เบี่ยงเบนจากความหนาแน่นเฉลี่ย (Efflux Density) ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์

2.5 การควบคุมค่าอัตราการไหล

S. K. Singh (2003) แสดงการควบคุมอัตราการไหลแบบพื้นฐาน ต้องประกอบด้วย ส่วนต่างๆ ที่ต้องทำงานร่วมกันในทางกายภาพ ได้แก่ มอเตอร์, เครื่องสูบน้ำ, เครื่องมือวัดอัตราการไหล เป็นต้น ต้องทำงานตอบสนองต่อระบบควบคุม โดยมีเป้าหมาย คือ การรักษาค่าอัตราการไหล ให้ได้ตามค่าที่ต้องการ ซึ่งจะเรียกว่า ค่าเป้าหมาย (Set Point, SP) และมีการวัดค่าอัตราการไหล หรือสัญญาณควบคุมที่ได้รับเข้ามา จากเครื่องมือวัด เรียกว่า ตัวแปรของกระบวนการ (Process

Variable, PV) ในการควบคุมจะทำการปรับ ค่าตัวแปรของกระบวนการ ให้มีค่าเข้าสู่ค่าเป้าหมาย โดยใช้การควบคุมตัวแปรขาออก เรียกว่า สัญญาณควบคุมเอาต์พุต (Control Output, CO) เพื่อควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ ได้แก่ วาล์วควบคุมมอเตอร์ และเครื่องสูบน้ำ เป็นต้น จนกว่าจะได้ค่าอัตราการไหลตามต้องการ ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี (Igor J. Karassik and Terry McGuire., 1998) ดังนี้

2.5.1 การขัดขวางการไหล (Throttling) โดยปรับวาล์วในท่อด้านเข้า หรือด้านออก เพื่อเพิ่มความต้านทานในระบบท่อ เป็นวิธีที่ใช้เปลี่ยนค่าอัตราการไหลแบบชั่วคราว แต่ที่ค่าอัตราการไหลต่ำๆ เครื่องสูบน้ำจะถูกใช้งานนอกช่วงที่ออกแบบ ถ้าเส้นโค้งคุณลักษณะของเครื่องสูบน้ำ เป็นแบบแบนราบ จะใช้วิธีการนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบชัน แต่ก็ทำให้เกิดการสึกหรอในระบบท่อและวาล์ว เมื่อใช้กับของผสม

2.5.2 การต่อพ่วงเครื่องสูบน้ำ (Parallel or Series) ใช้สำหรับระบบที่มีค่าอัตราการไหลผันแปรแบบกว้างๆ บ่อยครั้ง จะใช้การต่อเครื่องสูบน้ำแบบขนาน โดยเมื่อต้องการลดค่าอัตราการไหลลง จะใช้วิธีการหยุดเดินเครื่องสูบน้ำที่ต่อพ่วง ให้เหลือเท่าที่จำเป็น เครื่องสูบน้ำก็จะทำงานในสภาวะที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ส่วนการต่อพ่วงแบบอนุกรม ไม่นิยมใช้ เพราะจะเป็นการเปลี่ยนแปลงเส้นโค้งคุณลักษณะของเครื่องสูบน้ำ และเพิ่มความเค้นต่อเครื่องสูบน้ำ

2.5.3 การใช้ระบบท่อทางลัด (Bypass) ใช้วิธีการแบ่งของไหลส่วนเกิน ให้ย้อนกลับไปไปที่ท่อทางด้านดูด ของเครื่องสูบน้ำ แต่เนื่องจาก การสูญเสียเฮดในท่อทางลัด จะทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องสูบน้ำลดลง ซึ่งไม่เหมาะสมสำหรับ ควบคุมอัตราการไหล ของเครื่องสูบน้ำที่มีค่าอัตราการไหลสูงๆ ในทางปฏิบัติ มักจะใช้กับเครื่องสูบน้ำชนิดไหลตามแกน เพราะเส้นโค้งคุณลักษณะมีความชันมาก ที่ค่าอัตราการไหลค่าต่ำๆ และกำลังขับเครื่องสูบน้ำจะลดลง เมื่อเพิ่มค่าอัตราการไหล

2.5.4 การควบคุมความเร็วของเครื่องสูบน้ำ เป็นวิธีการที่นิยมมากที่สุด เพราะได้ความต่อเนื่องของค่าอัตราการไหลค่อนข้างนิ่ง เหมาะสำหรับ ระบบที่มีการสูญเสียเฮดความถี่มากๆ เมื่อเทียบกับวิธีการขัดขวางการไหล จะทำให้เส้นโค้งของระบบเปลี่ยน แต่การควบคุมความเร็ว จะเปลี่ยนเส้นโค้งคุณลักษณะของเครื่องสูบน้ำไปตามค่าความเร็วรอบ โดยให้ประสิทธิภาพคงที่ตลอดช่วงความเร็วที่เปลี่ยน และทำให้อายุการใช้งานของระบบยาวนาน

สำหรับ กระบวนการควบคุมตัวแปร หรือสัญญาณ ให้เป็นไปตามค่าที่ต้องการ สามารถทำได้ สองวิธี คือ การควบคุมแบบเปิด (Open-Loop Control) เป็นกระบวนการควบคุมระบบที่

ค่าตัวแปรเอาต์พุตจะไม่ถูกวัดหรือถูกปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าตัวแปรอินพุต ส่วนการควบคุมแบบปิด, แบบต่อเนื่อง, หรือแบบป้อนกลับ (Close-Loop or Feedback Control) เป็นกระบวนการควบคุมระบบที่ ค่าตัวแปรเอาต์พุต มีผลโดยตรงต่อระบบ ซึ่งอาจจะนำเอาสัญญาณเอาต์พุตมาใช้โดยตรง หรือใช้สัญญาณที่เกี่ยวข้องแทนก็ได้ โดยทั่วไปในกระบวนการควบคุมแบบต่อเนื่อง จะใช้ค่าตัวแปรของกระบวนการ จากการวัดมาเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมาย และสร้างเป็นสัญญาณค่าผิดพลาด (Error Signal) ดังสมการ (2.10)

$$Error = Set_Point, SP - Process_Variable, PV \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

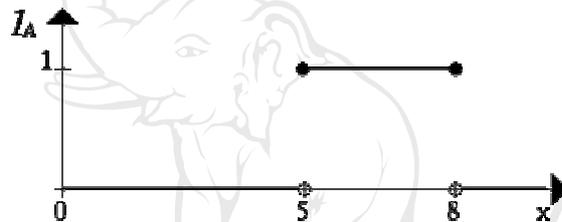
โดย ค่าความผิดพลาดที่เป็นลบ หมายถึง ตัวแปรของกระบวนการ มีค่าเกินค่าเป้าหมาย ต้องปรับให้ค่ากระบวนการลดลง ส่วนค่าความผิดพลาดที่เป็นบวก หมายถึง ตัวแปรของกระบวนการ มีค่าน้อยกว่าค่าเป้าหมาย ต้องปรับให้ค่ากระบวนการเพิ่มขึ้น เนื่องจาก ข้อมูลตัวแปรของกระบวนการ ที่ถูกป้อนกลับมาจากกระบวนการที่ถูกควบคุมแล้ว มักจะเรียกกระบวนการควบคุมนี้ว่า กระบวนการควบคุมแบบป้อนกลับ ที่อาศัยค่าสัญญาณความผิดพลาด (Error Feedback Control) ในกระบวนการทางอุตสาหกรรม ตัวควบคุมแบบต่อเนื่องที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ ตัวควบคุมแบบ PID ซึ่ง ให้ผลตอบสนองต่อความผิดพลาด ในกระบวนการทั้งขนาด ระยะเวลา และอัตราการเปลี่ยนแปลง ซึ่งใช้ได้ผลดีกับกระบวนการที่มีสิ่งรบกวนอย่างรวดเร็ว และมีขนาดใหญ่

2.6 ระบบฟัซซี่ลอจิก

ระบบฟัซซี่ลอจิก เป็นระบบที่ใช้ข้อมูลจากประสบการณ์ของมนุษย์ โดยอยู่ในรูปของภาษาพูด เรียกว่า Linguistic Information ในทางวิศวกรรม มักใช้ข้อมูลในทางตัวเลข มากกว่าภาษาพูด เพราะเป็นการยากที่จะเปลี่ยนให้ข้อมูลมาอยู่ในรูปแบบที่ ระบบทางวิศวกรรมนำมาใช้ได้ ดังนั้น จำเป็นต้องเปลี่ยนข้อมูลเชิงภาษา ให้อยู่ในรูปแบบของฟัซซี่ ฟัซซี่ลอจิกแตกต่างจากลอจิกและเซตแบบสองค่า (ถูกและผิด) โดยใช้ตัวแปรทางภาษาที่นุ่มนวล และมีช่วงความต่อเนื่องอยู่ในระหว่าง [0, 1] โดยความหมาย ฟัซซี่ลอจิก หมายถึงลอจิกที่คลุมเครือไม่ชัดเจน อยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีฟัซซี่เซต ถูกคิดขึ้นโดยนายลือตฟี ซาเดห์ (Lotfi A. Zadeh) ในปี ค.ศ. 1965 ซึ่งได้ให้ข้อสังเกตไว้ว่า “ระบบควบคุมที่มีความซับซ้อนมากขึ้น ความต้องการค่าที่แน่นอน แทบจะไม่มีจำเป็น” เพราะการใช้ระบบควบคุมที่มีความแม่นยำสูง จะมีค่าใช้จ่ายสูงตามไปด้วย แบบเกินความจำเป็น ส่วนระบบฟัซซี่ลอจิก นอกจากจะมีค่าใช้จ่ายน้อย ยังให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับความรู้สึกของมนุษย์ เช่น ความรู้สึกใกล้ไกล ซึ่งมนุษย์มักจะใช้ความรู้สึกเป็นตัววัด มากกว่าค่าทางตัวเลขทศนิยมตามปกติ ฟัซซี่ลอจิกมีโครงสร้างแบบจำลองอิสระ ผ่านความสัมพันธ์ในเชิงภาษา ของตัวแปรขาเข้า

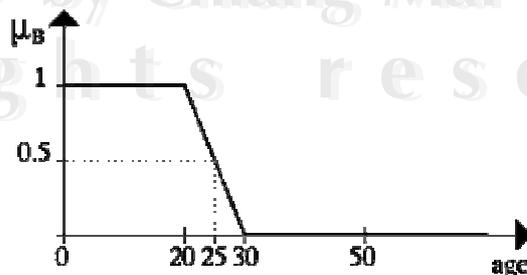
และขาออก โดยระบบฟัซซี่ลอจิก ซึ่งประกอบด้วย ฟังก์ชันสมาชิก (Membership Functions) กฎเกณฑ์พื้นฐาน (Rule Base) และกระบวนการวินิจฉัย (Inference Procedure) เพื่อทำหน้าที่สร้างความสัมพันธ์ ระหว่างตัวแปรขาเข้าและตัวแปรขาออก

2.6.1 คริสป์เซต (Crisp Set) เป็นการแบ่งแยกกลุ่มของค่าตัวแปร โดยแบ่งด้วยความ เป็นสมาชิกของ คริสป์เซต ในตัวแปรนั้นๆ เช่น จากตัวอย่างในรูปที่ 2.7 ในเซตของตัวแปร X ที่มี ค่าอยู่ระหว่าง 0 – 10 (Universe of Discourse, U) ถ้ามีเซตย่อย A ที่อยู่ในเซตของ X โดยมีค่า อยู่ในช่วงระหว่าง 5 – 8 จะมีค่าความเป็นสมาชิก ของเซต A เท่ากับ 1 หากตัวแปรมีค่าอยู่นอกช่วง เช่น มีค่าเท่ากับ 9 จะมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0 และเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็น สมาชิกจาก 0 เป็น 1 ในทันที จึงเรียกว่าเซตแบบนี้ว่า คริสป์เซต ซึ่งไม่ตรงกับความรู้สึกของมนุษย์ ที่จะไม่เปลี่ยนค่าความเป็นสมาชิกอย่างทันทีทันใด



รูป 2.7 แสดงตัวอย่าง ประกอบการอธิบาย คริสป์เซต (ที่มา : Allen Bonde., 1996)

2.6.2 ฟัซซี่เซต (Fuzzy Set) เป็นการแบ่งกลุ่มค่าของตัวแปรอย่างคลุมเครือ โดยรวม สมาชิกของหลายๆ คริสป์เซต ที่พอจะมีลักษณะที่รวมกลุ่มกันได้ โดยยอมรับการเป็นสมาชิก ที่มี ลักษณะตามเซตเพียงบางส่วน และมีการเปลี่ยนแปลงระหว่าง การมีคุณสมบัติครบถ้วน และไม่มี คุณสมบัติที่ละน้อยๆ โดยค่าความเป็นสมาชิกจะเปลี่ยนไปในระหว่าง $[0, 1]$ โดยค่า 0 คือไม่เป็น สมาชิกเลย จนถึงค่า 1 คือ เป็นสมาชิกอย่างสมบูรณ์ จากรูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่าง เซตของ “คนอายุน้อย” ที่มีค่าสูงสุดของช่วงที่ 20 ปี ในกรณีที่มียาอายุมากกว่า 20 ปี ก็จะถือว่ามีความ เป็นสมาชิกของ “คนอายุน้อย” ลดลงไปเรื่อยๆ เมื่ออายุ 25 ปี ความเป็นสมาชิกจะเหลือเพียง 50 % และถ้ามีอายุ มากกว่า 30 ปี จะไม่มีความเป็นสมาชิกเหลืออยู่เลย



รูป 2.8 แสดงตัวอย่าง ประกอบการอธิบาย ฟัซซี่เซต (ที่มา : Allen Bonde., 1996)

เมื่อ กำหนดให้ U เป็นยูนิเวอร์แซลเซต (Universal Set) และ μ_A คือ ค่าความเป็นสมาชิกของเซต A (Membership Function) สามารถแสดงรูปแบบของฟังก์ชันเซต A ในเซต U ได้ ทั้งลักษณะของสมาชิก และความเป็นสมาชิก ดังนี้

$$A = \{x, \mu_A(x) \mid x \in U\} \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

ในกรณีที่ A ไม่ต่อเนื่อง มีขอบเขต รูปแบบของฟังก์ชันเซต สามารถแสดงได้ดังนี้

$$B = \frac{\mu_A(x_1)}{x_1} + \dots + \frac{\mu_A(x_n)}{x_n} \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

จากรูป 2.8 จะได้ $B = \frac{1}{0} + \frac{1}{1} + \dots + \frac{1}{20} + \frac{0.9}{21} + \frac{0.8}{22} + \dots + \frac{0.1}{29} + \frac{0}{30} + \frac{0}{31} + \dots + \frac{0}{100}$

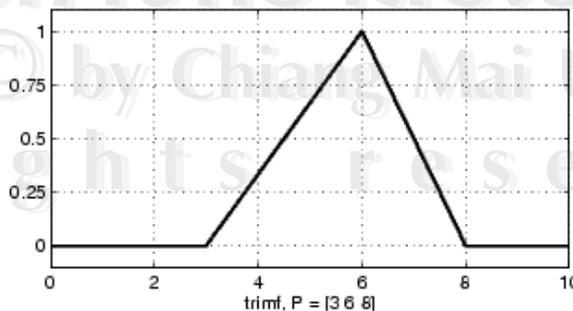
แต่ในกรณีที่ A มีค่าแบบต่อเนื่อง รูปแบบของฟังก์ชันเซต จะแสดงได้ดังนี้

$$A = \frac{\int \mu_A(x)}{A} \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

ดังนั้น ค่าความเป็นสมาชิกของ ฟังก์ชันเซต A สามารถเขียนในรูปของฟังก์ชันได้ โดยรูปแบบการแบ่งกลุ่ม ของตัวแปรฟังก์ชันเซต ซึ่งสามารถแบ่งได้หลายลักษณะ หลายกลุ่ม โดยลักษณะและขอบเขตในการแบ่งค่าความเป็นสมาชิก สำหรับค่าตัวแปรแต่ละค่า ขึ้นอยู่กับการสังเกตและประสบการณ์ ในเหตุการณ์จริง ของระบบควบคุมแต่ละระบบ โดยมีการแบ่งสมาชิกหลายแบบ ที่นิยมใช้กันมากได้แก่

2.6.2.1 ฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยม (Triangular-shaped

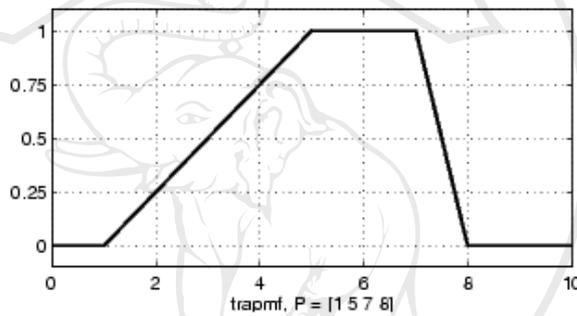
Membership Function) มีลักษณะแสดง ดังรูปที่ 2.9 และมีสมการความสัมพันธ์ ของความเป็นสมาชิกดังสมการที่ 2.14



รูป 2.9 แสดงตัวอย่างของ ฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยม (ที่มา : Mark Beale and Howard Demnth., 1994)

$$\Lambda(x;a,b,c) = \begin{cases} 0, & \text{when } x \leq a \\ \frac{(x-a)}{(b-a)}, & \text{when } a \leq x \leq b \\ \frac{(c-x)}{(c-b)}, & \text{when } b \leq x \leq c \\ 0, & \text{when } x \geq c \end{cases} \dots\dots\dots (2.14)$$

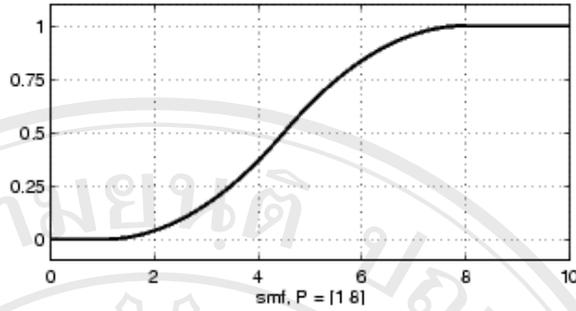
2.6.2.2 ฟังก์ชันสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal-shaped Membership Function) มีลักษณะแสดง ดังรูปที่ 2.10 และมีสมการความสัมพันธ์ ของความเป็นสมาชิกดังสมการที่ 2.15



รูป 2.10 แสดงตัวอย่างของ ฟังก์ชันสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (ที่มา : Mark Beale and Howard Demnth., 1994)

$$T(x;a,b,c,d) = \begin{cases} 0, & \text{when } x \leq a \\ \frac{(x-a)}{(b-a)} & \text{when } a \leq x \leq b \\ 1 & \text{when } b \leq x \leq c \\ \frac{(d-x)}{(d-c)} & \text{when } c \leq x \leq d \\ 0 & \text{when } x \geq d \end{cases} \dots\dots\dots (2.15)$$

2.6.2.3 ฟังก์ชันสมาชิกรูปตัวเอส (S-shaped Membership Function) มีลักษณะแสดง ดังรูปที่ 2.11 และมีสมการความสัมพันธ์ ของความเป็นสมาชิกดังสมการที่ 2.16

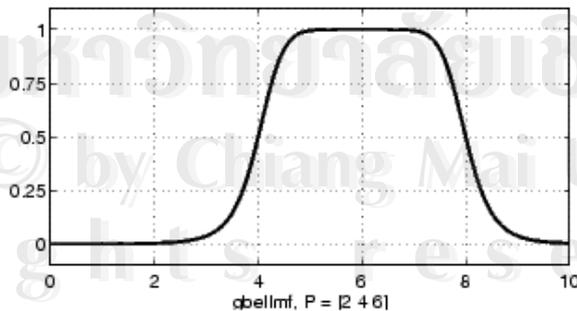


รูป 2.11 แสดงตัวอย่างของ ฟังก์ชันสมาชิกรูปตัวเอส (ที่มา : Mark Beale and Howard Demnth., 1994)

$$S(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & \text{when } x \leq 0 \\ 2 \left[\frac{(x-a)}{(c-a)} \right]^2 & \text{when } a \leq x \leq b \\ 1 - \left[\frac{(x-a)}{(c-a)} \right]^2 & \text{when } b \leq x \leq c \\ 1 & \text{when } x \geq c \end{cases} \dots\dots\dots (2.16)$$

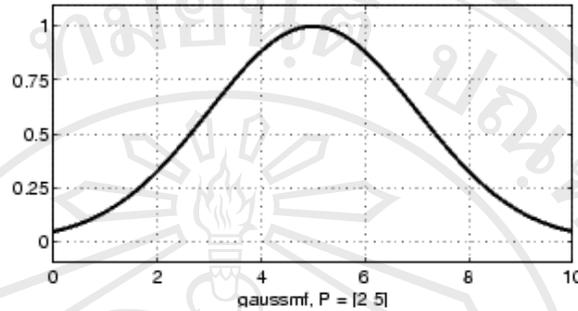
2.6.2.4 ฟังก์ชันสมาชิกรูประฆังคว่ำ (Bell-shaped Membership Function) มีลักษณะแสดง ดังรูปที่ 2.12 และสมการความสัมพันธ์ ของความเป็นสมาชิก ดังสมการ ที่ 2.17

$$B(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}} \dots\dots\dots (2.17)$$



รูป 2.12 แสดงตัวอย่างของ ฟังก์ชันสมาชิกรูประฆังคว่ำ (ที่มา : Mark Beale and Howard Demnth., 1994)

2.6.2.5 ฟังก์ชันสมาชิกรูปเกาส์เซียน (Gaussian-Shaped Membership Function) มีลักษณะแสดง ดังรูปที่ 2.13 และมีสมการความสัมพันธ์ ของความเป็นสมาชิกดังสมการที่ 2.18



รูป 2.13 แสดงตัวอย่างของ ฟังก์ชันสมาชิกรูปเกาส์เซียน (ที่มา : Mark Beale and Howard Demnht., 1994)

$$G(x; \sigma, c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \dots\dots\dots (2.18)$$

2.6.3 ตัวแปรภาษามนุษย์ (Linguistic Variable) พิจารณาจากการแบ่งกลุ่ม ตัวแปรต่างๆ จะเห็นว่า นอกจากการที่มนุษย์แบ่งค่าตัวแปร ออกเป็นฟัซซี่เซตแล้ว ยังกำหนดค่าให้ตัวแปรแต่ละกลุ่ม ในลักษณะภาษามนุษย์ด้วย เช่น ความเร็วในการเคลื่อนที่ จะมีฟัซซี่เซตเป็น เร็วมาก เร็วปานกลาง เร็วน้อย เร็วน้อยมาก เป็นต้น โดยขึ้นอยู่กับความเหมาะสม ของแต่ละเรื่อง ดังนั้น การแบ่งตัวแปรแบบฟัซซี่ โดยทั่วไป มักจะประกอบด้วย Very Big, Big, Medium, Small, Very Small และในกรณีที่ตัวแปรมีค่าเป็นบวก ก็จะเพิ่มคำว่า Positive เข้าไปอีก หรือ ถ้าตัวแปรมีค่าเป็นลบ ก็เพิ่ม Negative เข้าไปในลักษณะเดียวกัน ส่วนค่ากลางระหว่างค่าบวก และค่าลบ จะกำหนดให้เป็น ศูนย์ (Zero)

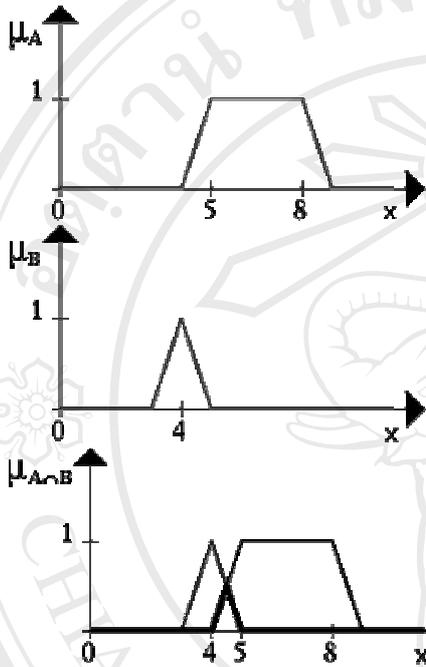
2.6.4 การทำงานของฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic Operation) เป็นการคำนวณทางตรรกะ ที่สามารถใช้ได้กับฟัซซี่เซต โดยทั่วไปที่นิยมใช้ ได้แก่ อินเตอร์เซกชัน (Intersection), ยูเนียน (Union) และ คอมพลีเมนต์ (Complement) โดยมีการเชื่อมโยง ดังนี้

2.6.4.1 อินเตอร์เซกชัน หรือลอจิกแอนด์ (And) ใช้สัญลักษณ์ตัวโอเปอเรชัน \cap ในกรณีที่นำฟัซซี่เซต A และ B มาโอเปอเรชันกัน จะแทนด้วย $A \cap B$ โดยมีนิยามของค่าความเป็นสมาชิกดังนี้

$$\mu_{(A \cap B)}(x) = \mu_A(x) _t _ \mu_B(x) \leq \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

โดย t คือ Triangular Norm

ดังตัวอย่าง



ฟังก์ชันเซต A ประกอบด้วยสมาชิก ดังนี้

$$\frac{0}{1} + \frac{0}{2} + \frac{0}{3} + \frac{0}{4} + \frac{1}{5} + \frac{1}{6} + \frac{1}{7} + \frac{1}{8} + \frac{0}{9}$$

ฟังก์ชันเซต B ประกอบด้วยสมาชิก ดังนี้

$$\frac{0}{1} + \frac{0}{2} + \frac{0}{3} + \frac{1}{4} + \frac{0}{5} + \frac{0}{6} + \frac{0}{7} + \frac{0}{8} + \frac{0}{9}$$

อินเตอร์เซกชัน ของ ฟังก์ชันเซต A และ B คือ

$$\begin{aligned} \mu_{(A \cap B)}(x) &= \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \\ &= \frac{0}{1} + \frac{0}{2} + \frac{0}{3} + \frac{0}{4} + \frac{0.5}{4.5} + \frac{0}{5} + \dots + \frac{0}{9} \end{aligned}$$

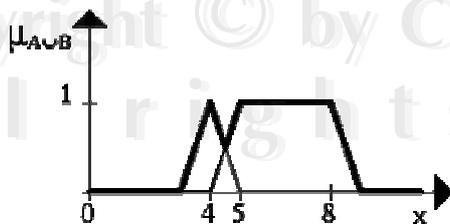
2.6.4.2 ยูเนียนหรือลอจิกออร์ (Or) ใช้สัญลักษณ์ตัวโอเปอเรชั่น \cup ใน

กรณีที่น่าฟังก์ชันเซต A และ B มาโอเปอเรชั่นกัน จะแทนด้วย $A \cup B$ โดยมีนิยามของค่าความเป็นสมาชิกดังนี้

$$\mu_{(A \cup B)}(x) = \mu_A(x) _s _ \mu_B(x) \geq \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad \dots\dots (2.20)$$

โดย s คือ Triangular Co-Norm

จากตัวอย่าง ฟังก์ชันเซตในข้อ 2.6.4.1 จะได้ค่าความเป็นสมาชิก ดังนี้



ยูเนียน ของ ฟังก์ชันเซต A และ B คือ

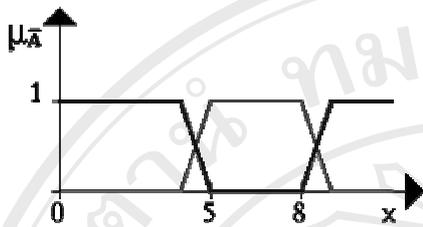
$$\begin{aligned} \mu_{(A \cup B)}(x) &= \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \\ &= \frac{0}{1} + \frac{0}{2} + \frac{0}{3} + \frac{1}{4} + \frac{0.5}{4.5} + \frac{1}{5} + \frac{1}{6} + \frac{1}{7} + \frac{1}{8} + \frac{0}{9} \end{aligned}$$

2.6.4.3 คอมพลีเมนต์หรือลอจิกนอต (Not) การคอมพลีเมนต์ค่าความเป็น

สมาชิก ของฟังก์ชันเซต A จะมีนิยาม ดังนี้

$$\mu_{(A)} - (x) = 1 - \mu_A (x) \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

จากตัวอย่าง ฟัซซีเซต A ในข้อ 2.6.4.1 จะได้ค่าความเป็น



สมาชิก ดังนี้

Not A ประกอบด้วยสมาชิก ดังนี้

$$\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{0}{5} + \frac{0}{6} + \frac{0}{7} + \frac{0}{8} + \frac{1}{9}$$

2.6.5 กระบวนการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

ระบบควบคุมแบบฟัซซีลอจิก เป็นระบบควบคุมที่เลียนแบบมาจากการตัดสินใจของมนุษย์ โดยมนุษย์มีการกำหนดค่าของตัวแปรภาษามนุษย์ โดยขนาดของตัวแปรในทางความคิดอาศัยความรู้สึก เช่น ร้อนมาก ร้อนพอยอมรับได้ หรือ ร้อนน้อยมาก จึงเป็นตัวแปรแบบคลุมเครือ ไม่ได้แสดงออกมาเป็นค่าตัวเลขที่แน่นอน แต่อาศัยการแบ่งค่าเป็นช่วงๆ การแบ่งแต่ละช่วง จะขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของแต่ละบุคคล ขั้นตอนในการหาขนาดของปริมาณนี้ เรียกว่า ฟัซซีฟิเคชัน (Fuzzification) หลังจากที่ได้อ่านค่าของตัวแปรที่ต้องการควบคุมแล้ว มนุษย์ก็จะนำค่าตัวแปรที่วัดได้มาประกอบการตัดสินใจ โดยใช้กฎที่มนุษย์มีอยู่แล้วมาใช้งาน ซึ่งถูกเรียกว่ากฎแบบฟัซซี (Fuzzy Rules) สำหรับขั้นตอนในการใช้กฎประกอบการตัดสินใจ เรียกว่า ฟัซซีอินเฟอร์เรนซ์ (Fuzzy Inference) ในกรณี ที่มีการนำหลายๆ กฎ มาใช้งานพร้อมๆ กัน มนุษย์จะต้องใช้ขั้นตอนในการหาผลลัพธ์สุดท้าย ซึ่งจะเป็นสิ่งที่จะนำไปใช้ในการสั่งการ ให้เหมาะสมกับสถานการณ์ ขั้นตอนนี้เรียกว่า ดีฟัซซีฟิเคชัน (Defuzzification) โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียด ดังนี้

2.6.5.1 ฟัซซีฟิเคชัน (Fuzzification) เป็นส่วนที่นำข้อมูลอินพุต ที่เป็น

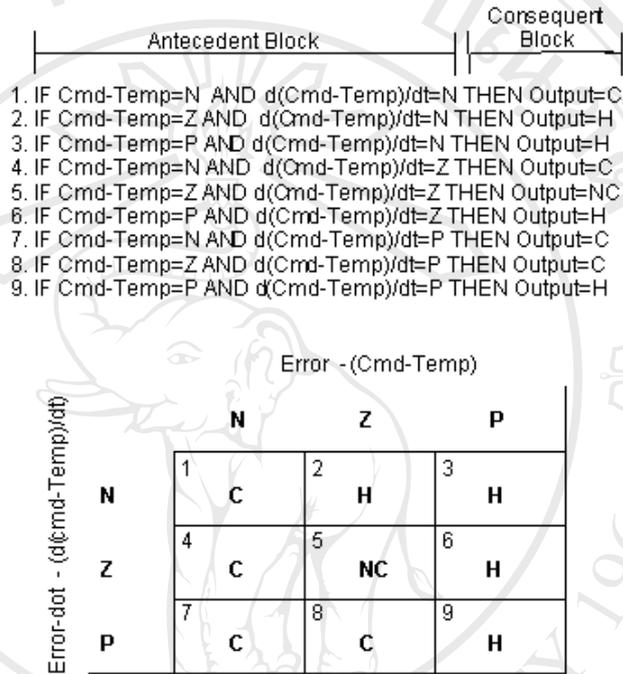
ค่าเชิงตัวเลข มาทำการเปลี่ยนให้เป็น ตัวแปรฟัซซี โดยต้องทำการเลือกจำนวนสมาชิกที่จะแบ่ง และแบ่งค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปร โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 1 ซึ่งอาจใช้วิธีการสังเกตการทำงาน ของระบบจริง หรือใช้ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ช่วยในการสรุป เมื่อระบบได้รับค่าอินพุตเข้ามา ขั้นตอนนี้จะทำการแจกแจงว่าเป็นสมาชิกกลุ่มใด และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่าไร จึงจะส่งต่อไปยังหน่วยตัดสินใจ

2.6.5.2 ฟัซซีอินเฟอร์เรนซ์ (Fuzzy Inference) เป็นส่วนที่มีฐานกฎฟัซซี

(Fuzzy Rule Base) และหน่วยวินิจฉัย (Inference Engine) ซึ่งมีหน้าที่ดังนี้ หน่วยฐานกฎฟัซซี มีหน้าที่จัดเก็บกฎไว้ใช้ในการตัดสินใจ โดยจำเป็นต้องสร้างกฎเหล่านี้ขึ้นมา ให้เหมาะสมกับการ

ทำงานของแต่ละระบบ โดยจำนวนกฎและรายละเอียดที่ใช้งาน จะเก็บอยู่ในรูปแบบ If – Then เมื่อนำข้อมูลอินพุตมาเปรียบเทียบกับเงื่อนไขหลัง If ถ้าเป็นจริง จะให้ผลลัพธ์ หรือเอาท์พุท ตามเงื่อนไขหลัง Then ฐานกฎอาจแสดงในรูปแบบตารางก็ได้ ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.14

RULE STRUCTURE & RULE MATRIX



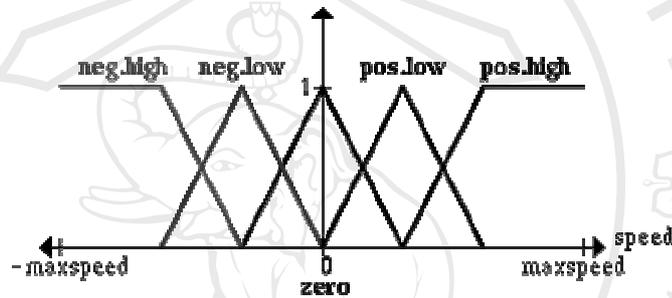
รูป 2.14 แสดงตัวอย่าง กฎที่ใช้ในการควบคุม ทั้งในรูปแบบความสัมพันธ์ และในรูปตาราง (ที่มา : Allen Bonde., 1996)

ในขณะที่หน่วยวินิจฉัย จะทำหน้าที่ในการตัดสินใจ โดยนำเอาปริมาณอินพุตที่อยู่ในรูปของฟัซซี่ มาเปรียบเทียบกับเงื่อนไขหลัง If ของกฎต่างๆ ที่อยู่ในหน่วยฐานกฎฟัซซี่ เมื่อตรงกับกฎใด ก็จะใช้กฎนั้นทำงาน โดยในการตัดสินใจให้ได้ขนาดของเอาท์พุท ออกมาจากส่วนที่เป็นเงื่อนไข ในหน่วยฐานกฎฟัซซี่ เรียกว่า การแสดงนัยจากกฎ (Rule Implications) ในกรณีที่ระบบควบคุมมีอินพุทหลายตัว ต้องเลือกรูปวิธีการทำงาน (Operations) กับค่าอินพุทเหล่านี้ก่อน เพื่อให้ได้ค่าความเป็นสมาชิกเพียงค่าเดียว ซึ่งจะนำไปใช้แสดงนัยของกฎ โดยปกติ มักจะต้องใช้หลายๆ กฎ ซึ่งแต่ละกฎ ก็จะได้ค่าเอาท์พุท 1 ค่า และต้องใช้วิธีการรวม (Aggregation) ค่าเอาท์พุทหลายๆ ค่า ออกมาเป็นค่าเดียว

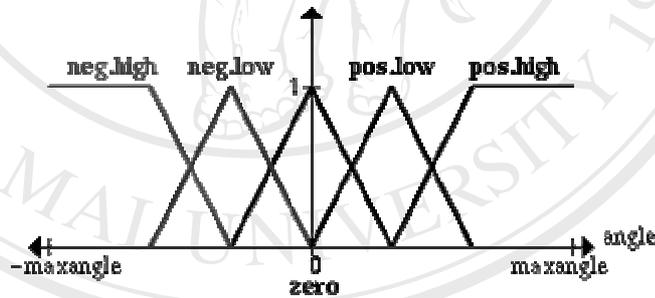
การแสดงนัยจากกฎ เป็นวิธีการหาปริมาณเอาท์พุท ออกมาจากกฎที่ถูกอิงวิธีการที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ วิธีการของ Mamdani และ Sugeno โดยในงานวิจัยนี้ เลือกใช้

วิธีการของ Mamdani หรือ Mamdani's Fuzzy Inference Method โดยมีวิธีการทำงาน แสดงตามตัวอย่างของ Inverted pendulum

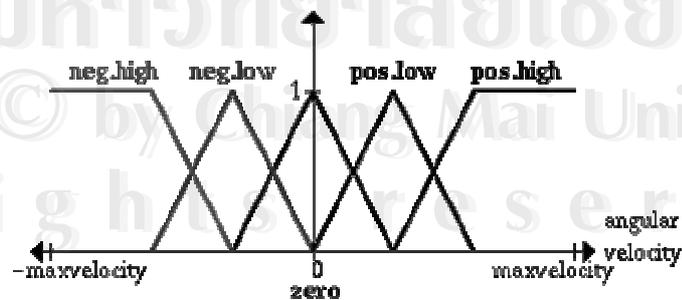
Inverted pendulum เป็นปัญหาในการสมดุล ของลูกตุ้มแกว่งบนพาดหะที่ถูกทำให้เคลื่อนที่ได้เพียง 2 ทิศทาง คือ ซ้ายหรือขวา ในเบื้องต้นกำหนด ความเร็วของพาดหะเป็นตัวแปรเอาต์พุตของระบบ และกำหนดให้ มุมระหว่างพาดหะและลูกตุ้มแกว่ง รวมทั้ง ความเร็วเชิงมุมของมุดดังกล่าว เป็นตัวแปรอินพุตของระบบ ทำการฟัซซิไฟเคชั่นตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต โดยใช้ฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยม แบ่งได้ 5 กลุ่ม ได้แก่ neg. high, neg. low, zero, pos. low, และ pos. high ดังรูปที่ 2.15, 2.16 และ 2.17 ตามลำดับ



รูป 2.15 แสดงฟังก์ชันสมาชิกฟัซซีเซต ความเร็วของพาดหะ (ที่มา : Allen Bonde., 1996)



รูป 2.16 แสดงฟังก์ชันสมาชิกฟัซซีเซต มุมของลูกตุ้มแกว่ง เทียบกับพาดหะ (ที่มา : Allen Bonde., 1996)



รูป 2.17 แสดงฟังก์ชันสมาชิกฟัซซีเซต ความเร็วเชิงมุมของลูกตุ้มแกว่ง เทียบกับพาดหะ ที่มุดนั้น (ที่มา : Allen Bonde., 1996)

เมื่อแบ่งค่าตัวแปรขาเข้า ขาออก และกำหนดค่าความเป็นสมาชิกแล้ว ต้องสร้างกฎ สำหรับหน่วยวินิจฉัยใช้ในการตัดสินใจ ซึ่งได้มาจากสถานการณ์ที่แน่นอน โดยตัวอย่างสถานการณ์ที่แน่นอน เช่น พิจารณาจากตำแหน่งของลูกตุ้มแกว่ง ที่อยู่ในแนวตั้ง (มุมมีค่าเป็นศูนย์) และไม่มีการเคลื่อนที่ (ความเร็วเชิงมุมเป็นศูนย์) ซึ่งในตัวอย่างนี้ เป็นสถานะที่ต้องการ ดังนั้น จึงไม่มีความจำเป็นต้องสั่งการควบคุมอะไร (ความเร็วพาหนะเป็นศูนย์) ในอีกกรณีหนึ่ง พิจารณาตำแหน่งของลูกตุ้มแกว่ง ที่อยู่ในแนวตั้ง แต่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ ในทิศทางเป็นบวกตามปกติ จะต้องทำการชดเชยการเคลื่อนที่ของลูกตุ้มแกว่ง โดยการกำหนดให้ยานพาหนะเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันด้วยความเร็วต่ำ ดังนั้น จะได้ฐานกฎ ดังนี้

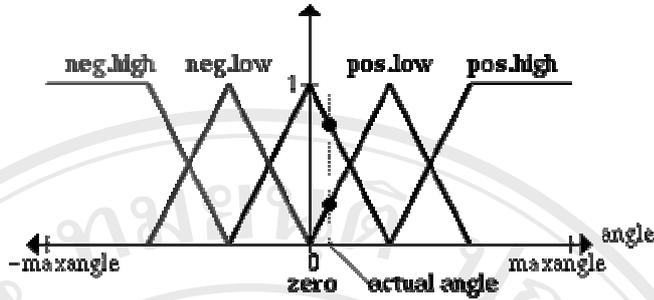
- If angle is zero and angular velocity is zero then speed shall be zero.
- If angle is zero and angular velocity is pos. low then speed shall be pos. low.

จากแนวทางดังกล่าว สามารถแสดงฐานกฎ ที่เกี่ยวข้องทั้งหมด แสดงดังตารางที่ 2.2

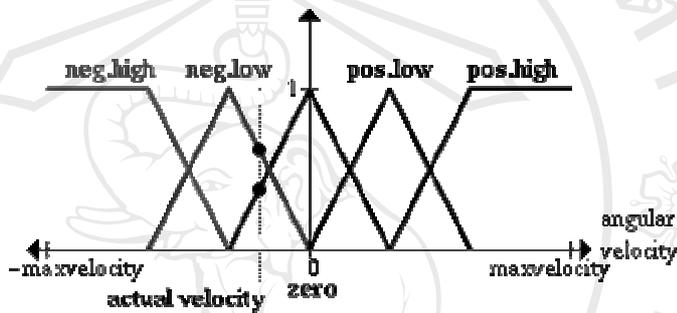
ตาราง 2.2 แสดงฐานกฎที่ใช้ในการสั่งการ ควบคุมความเร็วของพาหนะ ของตัวอย่างปัญหา (ที่มา : Allen Bonde., 1996)

		<u>Angle</u>				
		Negative high	Negative low	zero	Positive low	Positive high
<u>Speed</u>	Negative high			Negative high		
	Negative low			Negative low	zero	
	zero	Negative high	Negative low	zero	Positive low	Positive high
	Positive low		zero	Positive low		
	Positive high			Positive high		

หน่วยวินิจฉัย จะใช้ฐานกฎเพื่อหาค่าเอาต์พุต จากตัวอย่าง เมื่อลูกตุ้มแกว่งเบนออกไปจากแนวตั้ง ไปอยู่ที่มุม actual angle ตามรูปที่ 2.18 และมีความเร็วเชิงมุมในการแกว่ง actual velocity ตามรูปที่ 2.19 ถูกนำไปใช้ในการหาค่า ความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุต

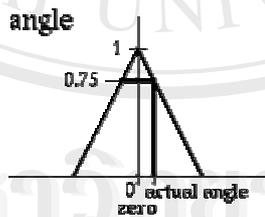


รูป 2.18 แสดงการหาค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุต มุมของลูกตุ้มแกว่ง เทียบกับพาดนะ (ที่มา : Allen Bonde., 1996)

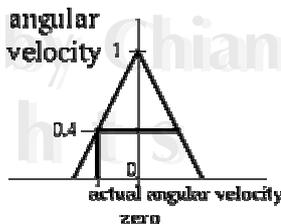


รูป 2.19 แสดงการหาค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุต ความเร็วเชิงมุมของลูกตุ้มแกว่ง เทียบกับพาดนะ (ที่มา : Allen Bonde., 1996)

จากรูปที่ 2.18 และ 2.19 จะพบว่า ตัวแปรอินพุต actual angle เป็นสมาชิกของฟัซซี่เซต zero และมีค่าความเป็นสมาชิก 0.75 ในขณะที่ตัวแปรอินพุต actual velocity เป็นสมาชิกของฟัซซี่เซต zero มีค่าความเป็นสมาชิก 0.4 ดังแสดงในรูปที่ 2.20



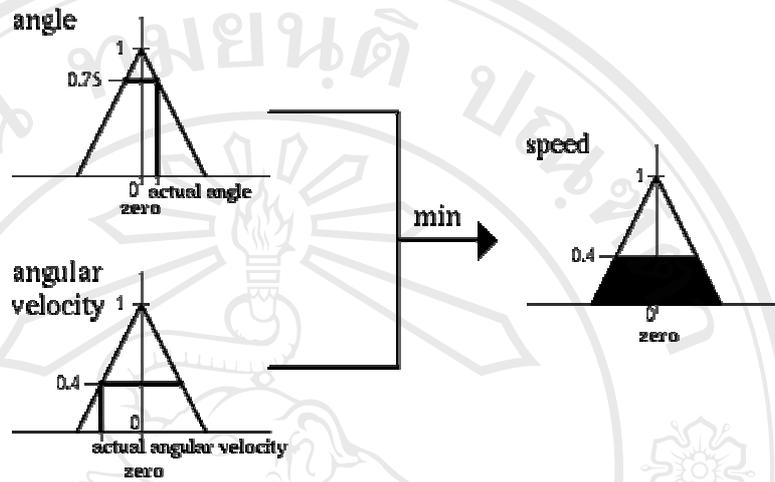
We realize that our actual value belongs to the fuzzy set "zero" to a degree of 0.75.



We realize that our actual value belongs to the fuzzy set "zero" to a degree of 0.4.

รูป 2.20 แสดงค่าความเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซต zero สำหรับ ตัวแปรอินพุต actual angle และ actual velocity (ที่มา : Allen Bonde., 1996)

จากฐานกฎ If angle is zero and angular velocity is zero then speed shall be zero. เมื่อนำตัวแปรอินพุตทั้งสองค่า มา Operate กัน จะได้ผลลัพธ์เป็นตัวแปรเอาต์พุตค่าความเร็วพาหนะ ของฟัซซี่เซต zero และมีค่าความเป็นสมาชิก ดังแสดงในรูปที่ 2.21



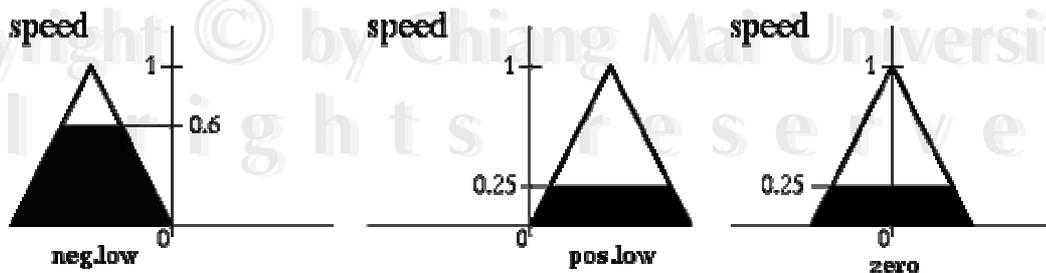
Since the two parts of the condition of our rule are connected by an AND we calculate $\min(0.75, 0.4) = 0.4$ and cut the fuzzy set "zero" of the variable "speed" at this level (according to our rule).

รูป 2.21 แสดงผลการหาค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุต speed สำหรับ ฟัซซี่เซต zero (ที่มา : Allen Bonde., 1996)

นอกจากนั้น ตัวแปรอินพุต actual angle ยังเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซต pos. low มีค่าความเป็นสมาชิก 0.25 และตัวแปรอินพุต actual velocity เป็นสมาชิกของฟัซซี่เซต neg. low มีค่าความเป็นสมาชิก 0.6 ดังนั้น เมื่อพิจารณาจากฐานกฎ ในตารางที่ 2.2 จะได้อีก 3 กฎ คือ

- If angle is zero and angular velocity is negative low then speed is negative low
- If angle is positive low and angular velocity is zero then speed is positive low
- If angle is positive low and angular velocity is negative low then speed is zero

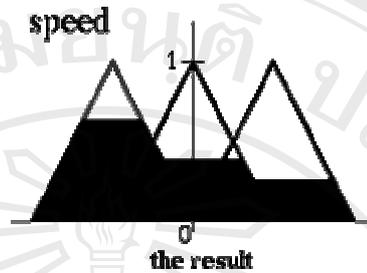
และได้ผลลัพธ์ของแต่ละกฎ ดังแสดงในรูปที่ 2.22, 2.23 และ 2.24 ตามลำดับ



รูป 2.22 ผลลัพธ์ของ Neg. low รูปที่ 2.23 ผลลัพธ์ของ Pos. low รูปที่ 2.24 ผลลัพธ์ของ Zero

(ที่มา : Allen Bonde., 1996)

จากผลลัพธ์ของฟัซซี่เซตเอาต์พุต speed ที่ได้จากฐานกฎทั้งสี่ต้องนำมา รวมกัน (Aggregate) เพราะระบบควบคุม ต้องการฟัซซี่เซตเอาต์พุตเพียงค่าเดียว ดังแสดงในรูปที่ 2.25



รูป 2.25 แสดงการรวมผลลัพธ์ ฟัซซี่เซตเอาต์พุต (ที่มา : Allen Bonde., 1996)

2.6.5.3 ดีฟัซซิฟิเคชัน (Defuzzification) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่แปลง ผลลัพธ์ที่ได้จากระบบควบคุม ซึ่งอยู่ในรูปของตัวแปรฟัซซี่ ให้เป็นคริสป์เซต หรือสัญญาณไฟฟ้า เพื่อส่งไปใช้ในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ ได้แก่ อินเวอร์เตอร์ โซลินอยด์วาล์ว หรือ มอเตอร์ต้นกำลังขับเคลื่อน เป็นต้น โดยสิ่งที่ได้ออกมาจะอยู่ในรูปของค่าตัวเลข วิธีการที่ใช้ในการดีฟัซซิฟิเคชัน มีหลายวิธี ได้แก่ Center-of-area /gravity, Center-of-largest-area, Mean of Maxima และ Middle-of-maxima โดยมีรายละเอียด ดังนี้

Center-of- area /gravity เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุด ในกรณี ที่มี ค่าสัญญาณของตัวแปรเอาต์พุตหลายค่า ใช้วิธีหาค่าความเป็นสมาชิกที่ จุดศูนย์กลางของพื้นที่แต่ละ อัน และนำทุกอันมาหาค่าภายใต้ฟังก์ชันรวม ซึ่งคำนวณได้จากสมการ 2.22

$$u^* = \frac{\int \mu_c(u) \cdot u \, du}{\int \mu_c(u) \, du} \dots\dots\dots (2.22)$$

และแสดงตัวอย่าง ดังรูป 2.26

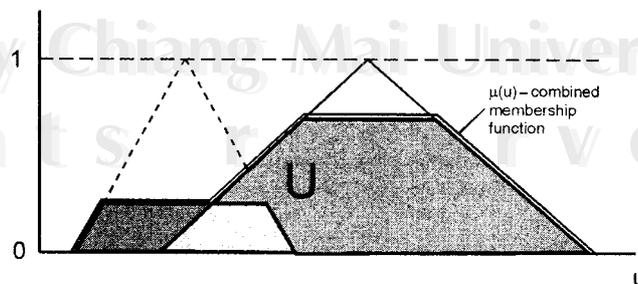


Fig. 4.29 Centre-of-area defuzzification method

รูป 2.26 แสดงการหาสัญญาณเอาต์พุต ด้วยวิธี Center-of- area /gravity (ที่มา : Leonid Reznik., 1997)

Center-of-largest-area ใช้วิธีหาค่าความเป็นสมาชิกที่ จุดแบ่งครึ่งพื้นที่ ที่มีขนาดใหญ่ที่สุด ภายใต้กราฟของฟัซซี่เซตรวม มักใช้ในกรณีที่มี ฟัซซี่เซตอย่างน้อยสองเซต ที่มีพื้นที่ไม่คาบเกี่ยวกัน หรือมีค่าความเป็นสมาชิกน้อยมากๆ จะทำให้ค่าที่คำนวณได้ เกิดความ เบี่ยงเบน ซึ่งใช้คำนวณจากสมการ 2.23

$$u^* = \frac{\int \mu_{cm}(u) \cdot u \, du}{\int \mu_{cm}(u) \, du} \dots\dots\dots (2.23)$$

และแสดงตัวอย่าง ดังรูป 2.27

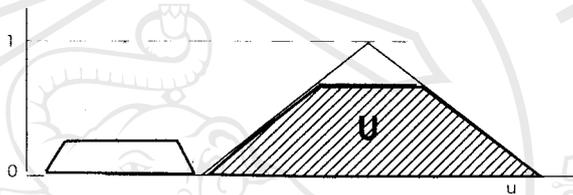


Fig. 4.30 Centre-of-largest area defuzzification procedure

รูป 2.27 แสดงการหาสัญญาณเอาต์พุต ด้วยวิธี Center-of-largest-area (ที่มา : Leonid Reznik., 1997)

Mean of Maxima เป็นวิธีการที่ง่ายที่สุด โดยใช้ค่าสูงสุดของระดับความเป็นสมาชิกจากแต่ละพื้นที่ แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยของพื้นที่ทั้งหมด n ชุด จากสมการ 2.24

$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^n \{u \in U \mid \mu_u(u) = hgt(u)\}}{n} \dots\dots\dots (2.24)$$

โดย hgt คือ ระดับความเป็นสมาชิกที่มีค่าสูงสุด

และแสดงตัวอย่าง ดังรูป 2.28

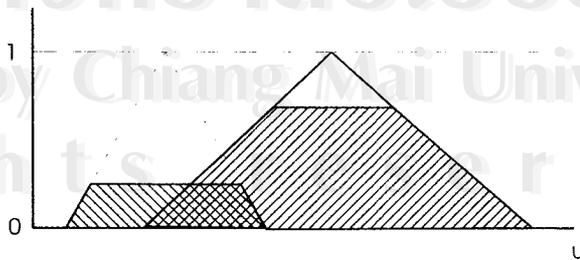


Fig. 4.33 Mean-of-maxima defuzzification procedure

รูป 2.28 แสดงการหาสัญญาณเอาต์พุต ด้วยวิธี Mean of Maxima (ที่มา : Leonid Reznik., 1997)

Middle-of-maxima เป็นวิธีหาค่าความเป็นสมาชิก โดยหาค่าเฉลี่ยของค่ามากที่สุด ของค่าความเป็นสมาชิก ในฟัซซี่เซตรวม จากสมการ 2.25

$$u^* = \frac{\inf\{\mu \in U \mid \mu_u(u) = hgt(u)\} + \sup\{\mu \in U \mid \mu_u(u) = hgt(u)\}}{2} \dots(2.25)$$

และแสดงตัวอย่างดังรูป 2.29

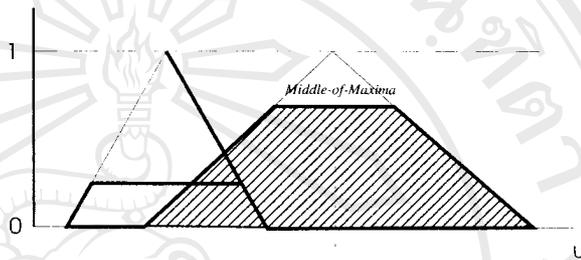


Fig. 4.32 Middle-of-maxima defuzzification procedure

รูป 2.29 แสดงการหาสัญญาณเอาต์พุต ด้วยวิธี Middle-of-maxima (ที่มา : Leonid Reznik., 1997)

Leonid Reznik (1997) ได้แสดงผลการเปรียบเทียบคุณลักษณะ ของวิธีดีฟัซซี่ฟิเคชันต่างๆ โดยในการพิจารณา ใช้เกณฑ์ดังนี้ มีความต่อเนื่อง (Continuity) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงตัวแปรอินพุต เพียงเล็กน้อย ระบบควบคุมไม่ควรให้ผลลัพธ์ ตัวแปรเอาต์พุตที่มีการเปลี่ยนแปลงมาก ไม่กำกวม (Disambiguity) หมายถึง ควรเป็นวิธีการที่สามารถใช้ได้ในทุกสภาวะ ซึ่งอาจจะไม่ใช่ทุกกรณี เช่น วิธีการ Center-of-largest-area ไม่สามารถใช้ในกรณีที่มีพื้นที่เท่ากัน สองอัน สามารถเชื่อถือได้ (Plausibility) หมายถึง กระบวนการแปลงผลลัพธ์ อยู่ที่มีการประมาณค่ากลางซัพพอร์ตของฟังก์ชันสมาชิก ที่มีระดับความเป็นสมาชิกสูง ความซับซ้อนในการคำนวณ (Computational complexity) เป็นคุณสมบัติที่สำคัญ ในการนำไปประยุกต์ใช้ในกรณีของระบบ ที่ต้องการการตอบสนองที่เร็ว โดยปกติ จะขึ้นอยู่กับรูปร่างฟังก์ชันสมาชิก ของตัวแปรขาออก โดยวิธีที่เกี่ยวข้องกับค่ามากที่สุด เป็นวิธีที่มีความเร็วสูง ในขณะที่วิธี Center-of-area จะมีความเร็วต่ำกว่า ซึ่งแสดงผลการเปรียบเทียบ ตามตารางที่ 2.3

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้การดีฟัซซี่ฟิเคชันสองวิธี คือ วิธี Center-of-area /gravity และ Mean of Maxima เพื่อเปรียบเทียบผลของสัญญาณควบคุมที่ได้

ตาราง 2.3 แสดงผล การเปรียบเทียบคุณลักษณะ ของวิธีการตีฟuzzyเฟ้น (ที่มา : Leonid Reznik., 1997)

	CoA	MoM	FoM	HM	CLA
Continuity	Yes	No	No	Yes	No
Disambiguity	Yes	Yes	Yes	Yes	No
Plausibility	Yes	No*	No	Yes	Yes
Computational complexity	Bad	Good	Good	Good	Bad

โดย CoA คือ วิธี Center-of- area /gravity

MoM คือ วิธี Middle-of-maxima

FoM คือ วิธี First-of-maxima

HM คือ วิธี Mean of Maxima

CLA คือ วิธี Center-of-largest-area

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved