

บทที่ 4

ผลการวิจัย และการวิจารณ์ผลการวิจัย

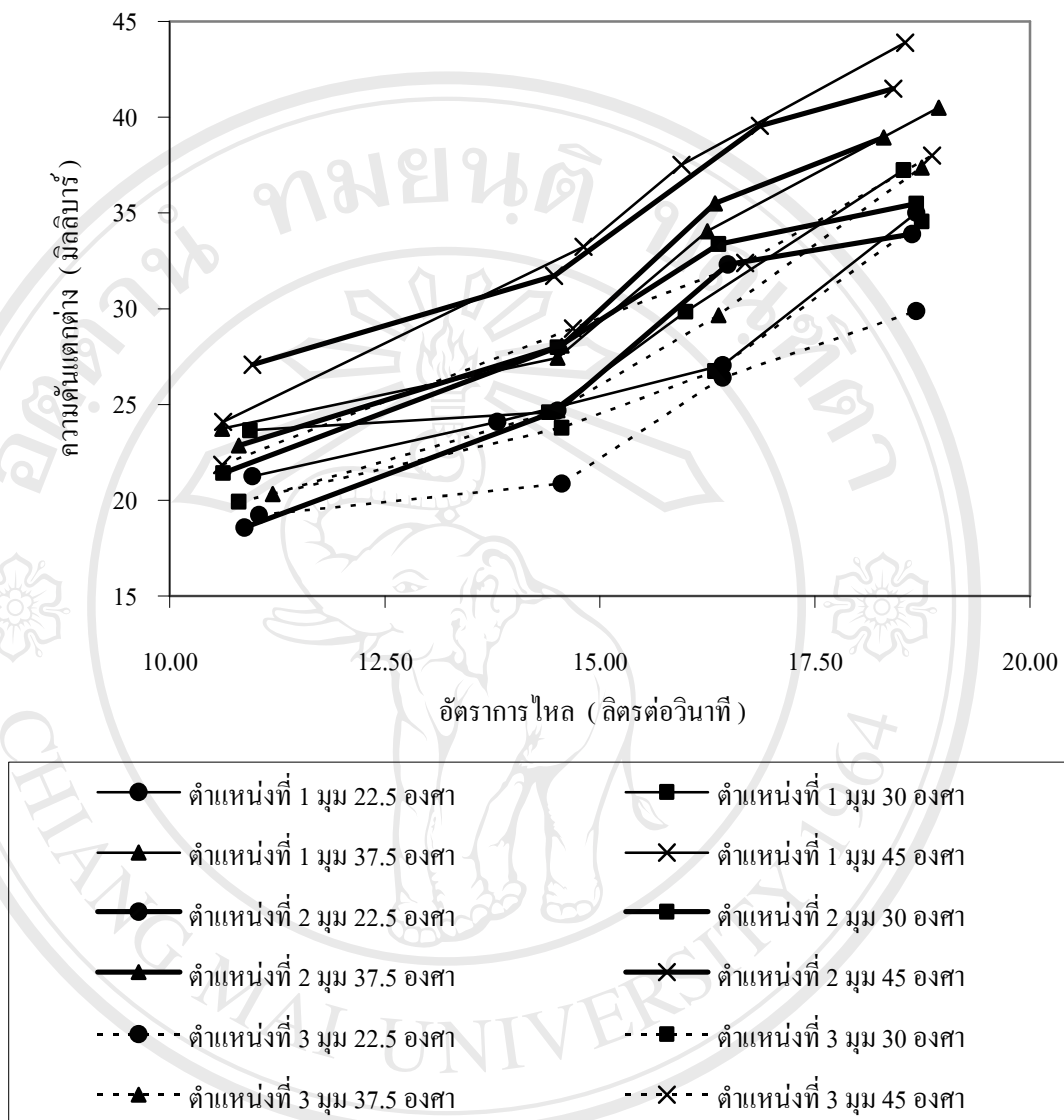
ในบทนี้ นำเสนอผลการวิจัย เครื่องวัดอัตราการไหลแบบช่องอ ซึ่งติดตั้งในระบบท่อทดลอง ใช้น้ำยิปซัมจากระบบกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โรงไฟฟ้าแม่เมาะ หน่วยที่ 9 และน้ำสะอาด เป็นสารทำงาน ทำการทดลองเก็บข้อมูลค่าอัตราการไหล และค่าความดันแตกต่างคร่อมจุดวัดบนช่องอ รวมทั้งหมด 152 สภาวะ เก็บข้อมูลสภาวะละ 3 ครั้ง หาค่าเฉลี่ย, ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, และ ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน เก็บตัวอย่างน้ำยิปซัม ในหน้าตัดจุดวัดความดัน เพื่อวัดการกระจายค่าความหนาแน่น นำข้อมูลมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ติดตั้งช่องอในระบบท่อที่ใช้งานจริง และเก็บข้อมูลค่าอัตราการไหล นำผลการวัดที่ได้มาออกแบบระบบฟิชซ์ลอจิก เพื่อควบคุมค่าอัตราการไหล โดยการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ขับเคลื่อนปั๊มน้ำยิปซัมสุดท้ายเป็นปัญหาและอุปสรรคในการวิจัย

4.1 ค่าความดันแตกต่าง จากผลการทดลอง

ข้อมูลผลการทดลองวัดค่าความดันแตกต่างคร่อมจุดวัดบนช่องอทั้งหมด 152 ชุด แสดงตามตาราง ก.1 ในภาคผนวก ก แบ่งเป็นข้อมูลของน้ำยิปซัมตามสภาวะที่กำหนด 144 ชุด ข้อมูลของน้ำยิปซัมที่สลับตำแหน่งติดตั้งหน้าแปบนบนช่องอ ที่มีจุดวัดความดันที่มุม 45 องศา 4 ชุด และข้อมูลของน้ำสะอาด 4 ชุด ซึ่งข้อมูลในตาราง ก.1 แสดงสภาวะที่กำหนด, ค่าอัตราการไหล, ค่าความดันแตกต่าง, จำนวนข้อมูล, ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน, และค่าสัมประสิทธิ์ช่องอที่คำนวณได้ ของการทดลองแต่ละครั้ง รวมทั้งค่าเฉลี่ยในแต่ละสภาวะ โดยแจกแจงข้อมูลได้ตามสภาวะต่างๆ ดังนี้

4.1.1 ความดันแตกต่าง เมื่อเปลี่ยนมุมของจุดวัดความดัน

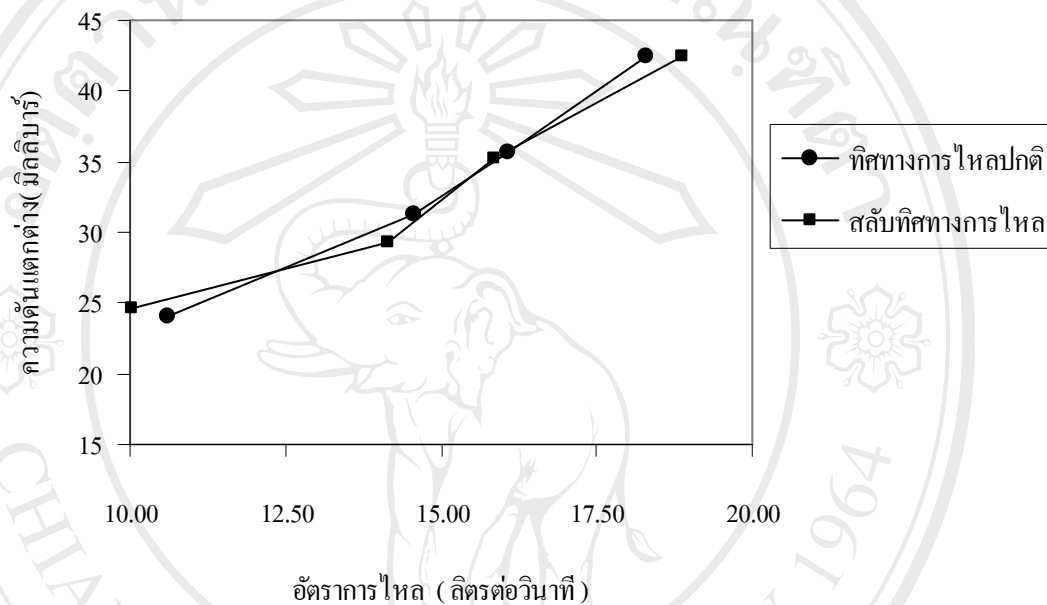
จากข้อมูลค่าความดันแตกต่าง และค่าอัตราการไหล ทั้งหมด 144 ชุด แยกตามตำแหน่งติดตั้งช่องอ ในระบบท่อ และจุดวัดความดัน แสดงความสัมพันธ์ได้ดังกราฟรูปที่ 4.1 พิจารณาจุดวัดความดันที่แกนทำมุม 22.5, 30, 37.5, และ 45 องศา กับระยะห่างจากกับแกนไหลเข้าช่องอ พบว่าความดันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าอัตราการไหล โดยมีอัตราการเพิ่มของความดันในช่วงอัตราการไหลปานกลาง (R_{ed} 2,500–3,000) มากกว่าในช่วงอัตราการไหลต่ำ (R_{ed} ประมาณ 2,000) และสูง



รูป 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความดันแตกต่าง และค่าอัตราการไหล แยกตามตำแหน่ง
ข้ออในระบบท่อ และจุดวัดความดันบนข้ออ

(R_{ed} ประมาณ 3,500) ประมาณ 1.18 ถึง 4.92 เท่า เปรียบเทียบความดันแตกต่าง ที่ค่าอัตราการไหลเดียวกัน เมื่อมุมของจุดวัดความดันเพิ่มขึ้น ค่าความดันแตกต่างมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับข้ออติดตั้งในตำแหน่งที่ 1 และ 2 มีค่าความดันสูงสุดที่มุม 45 องศา และมีค่ามากกว่ามุม 37.5, 30, และ 22.5 องศาตามลำดับ ยกเว้นตำแหน่งที่ 3 ค่าความดันสูงสุดอยู่ที่มุม 45 องศา แต่ที่มุม 30 องศา มีค่าความดันมากกว่ามุม 37.5 และ 22.5 องศา ตามลำดับ สำหรับจุดวัดความดันที่มุม 45 องศา นำข้อมูลของ

ข้ออที่ติดตั้งในตำแหน่งที่ 1 ซึ่งมีการสลับทิศทางการไหลเข้าข้ออ มาเปรียบเทียบกับ ทิศทางการไหลเข้าตามที่กำหนดไว้ แสดงผลตามกราฟรูปที่ 4.2 จากกราฟ พบว่า ที่ค่าอัตราการไหลเดียวกัน ความดันแตกต่างมีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยมีค่าต่างกันมากที่สุดเพียง 3.7 เปอร์เซ็นต์ ที่ค่าอัตราการไหล 10.62 ลิตรต่อวินาที



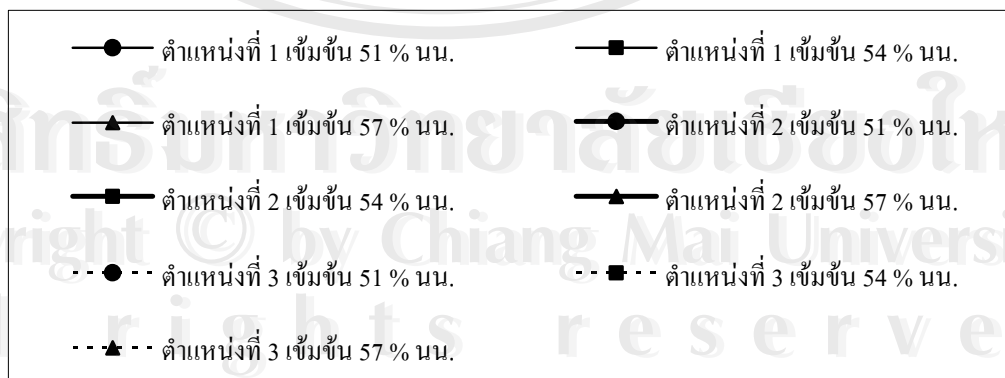
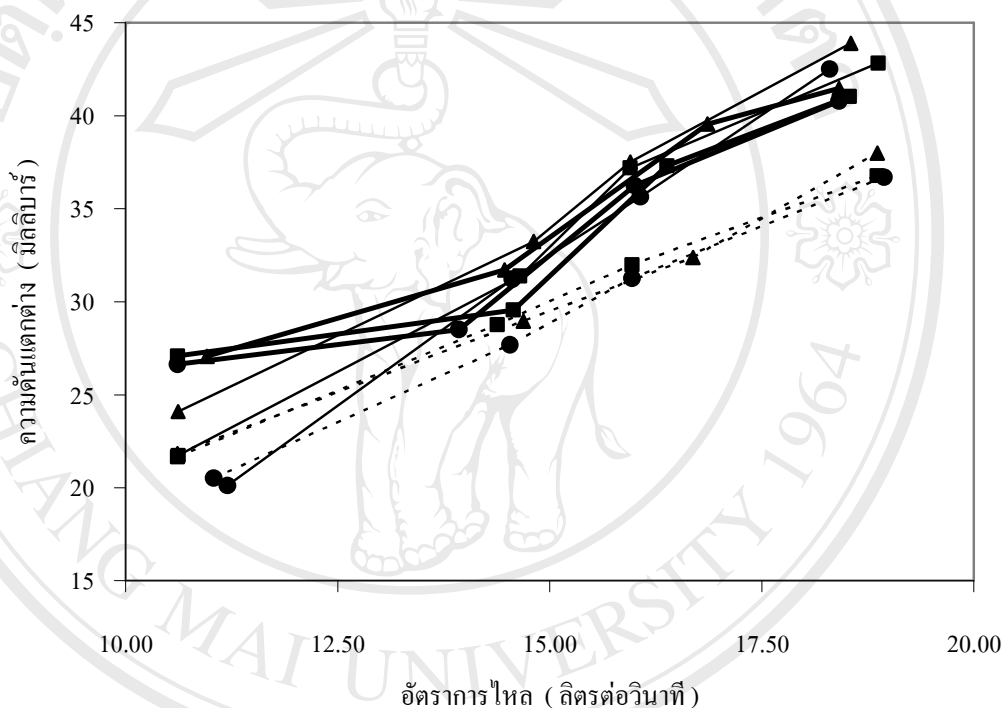
รูป 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความดันแตกต่าง และค่าอัตราการไหล ของข้ออในตำแหน่งที่ 1 มีจุดวัดความดันที่มุม 45 องศา เปรียบเทียบผล เมื่อสลับทิศทางการไหลเข้าข้ออ

4.1.2 ความดันแตกต่าง เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้งข้ออ

จากกราฟรูปที่ 4.1 พิจารณาข้อมูลค่าความดันแตกต่าง และค่าอัตราการไหล ตามตำแหน่งติดตั้งข้ออ เปรียบเทียบจุดวัดความดันที่มุมเดียวกัน สำหรับมุม 22.5, 30, และ 37.5 องศา พบว่า ค่าความดันของข้ออในตำแหน่งที่ 1 มีค่ามากกว่าตำแหน่งที่ 2 ส่วนที่มุม 45 องศา ค่าความดันของตำแหน่งที่ 1 มีค่าน้อยกว่าตำแหน่งที่ 2 ที่ค่าอัตราการไหลต่ำ และค่าความดันต่างกันมากที่สุด 9.09 เปอร์เซ็นต์ ที่ค่าอัตราการไหล 10.96 ลิตรต่อวินาที สำหรับค่าอัตราการไหลสูง ค่าความดันแตกต่างของตำแหน่งที่ 1 มีค่ามากกว่าตำแหน่งที่ 2 ทุกมุมจุดวัดความดัน ในขณะที่ ข้ออในตำแหน่งที่ 3 ที่มุมจุดวัดความดันเดียวกัน จะมีความดันแตกต่างคร่อมจุดวัดน้อยกว่า ตำแหน่งที่ 1 และ 2 ทุกมุมของจุดวัดความดัน โดยสภาวะที่มีค่าความดันต่างกันมากที่สุดระหว่างตำแหน่งที่ 1 กับ 3 ที่ค่าอัตราการไหล 16.86 ลิตรต่อวินาที มีค่าความดันต่างกันถึง 18.75 เปอร์เซ็นต์

4.1.3 ความดันแตกต่าง เมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของน้ำยิปซัม

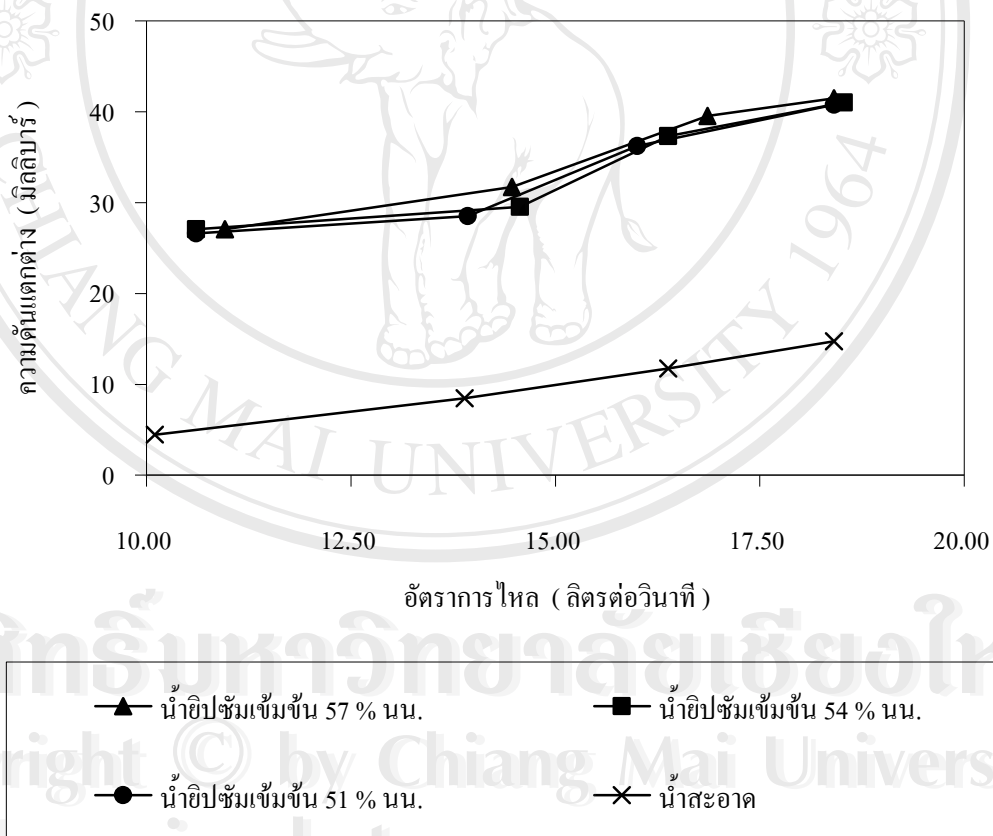
เปรียบเทียบความดันแตกต่าง ที่เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นต่างกัน แสดงผลตามตำแหน่งติดตั้งข้องอ ของจุดวัดความดันที่มุม 45 องศา แสดงในกราฟรูปที่ 4.3 จากกราฟ พบว่า ความดันแตกต่างมีค่าเพิ่มขึ้น ตามเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น สำหรับ ข้องอติดตั้งในตำแหน่งที่ 1 ที่อัตราการไหลปานกลางถึงสูง (R_{ed} 2,500–3,500) ความดันต่างกันไม่เกิน 4.5 เปอร์เซ็นต์ แต่ที่อัตราการไหลต่ำ ความดันต่างกันมากถึง 12.4 เปอร์เซ็นต์ ส่วนข้องอในตำแหน่งที่ 2 และ 3 มีแนวโน้มใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ 1 แต่ความดัน ตลอดช่วงการไหลต่างกันไม่เกิน 8.1 และ 8.7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



รูป 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความดันแตกต่าง และค่าอัตราการไหล แยกตามตำแหน่งข้องอ และเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นน้ำยิปซัม ของข้องอที่มีจุดวัดความดัน ที่มุม 45 องศา

ในกรณีของจุดวัดความดันที่แกนทำมุม 22.5, 30, และ 37.5 องศา มีแนวโน้มเช่นเดียวกับมุม 45 องศา แต่มีค่าความดันต่างกัน ระหว่างความเข้มข้น 51 และ 57 เปอร์เซ็นต์ มากที่สุดไม่เกิน 9.37, 12.5, และ 7.4 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และแสดงกราฟความสัมพันธ์ อยู่ในภาคผนวก ข

เมื่อนำข้อมูลความดันแตกต่าง และค่าอัตราการไหล ของข้ออดีตตั้งในตำแหน่งที่ 2 และมีจุดวัดความดันที่แกนทำมุม 45 องศา ของน้ำยิปซัมที่ความเข้มข้นต่างๆ มาเปรียบเทียบกับ ข้อมูลของน้ำสะอาด ที่ทดลองในสภาวะใกล้เคียงกัน ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.4 จากกราฟ พบว่า ความดันแตกต่างมีค่าเพิ่มขึ้น ตามค่าอัตราการไหล เป็นแนวโน้มที่เหมือนกันทั้งน้ำยิปซัม และน้ำสะอาด แต่ค่าความดันแตกต่างของน้ำยิปซัม มีค่ามากกว่าน้ำสะอาด 2.76 ถึง 3.35 เท่า เปรียบเทียบกับ ค่าอัตราการไหลเดียวกัน



รูป 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความดันแตกต่าง และค่าอัตราการไหล ของน้ำยิปซัม ที่เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นต่างๆ เทียบกับน้ำสะอาด ของข้ออที่มีจุดวัดความดัน ที่มุม 45 องศา

4.2 ค่าสัมประสิทธิ์ข้ออง จากผลการทดลอง

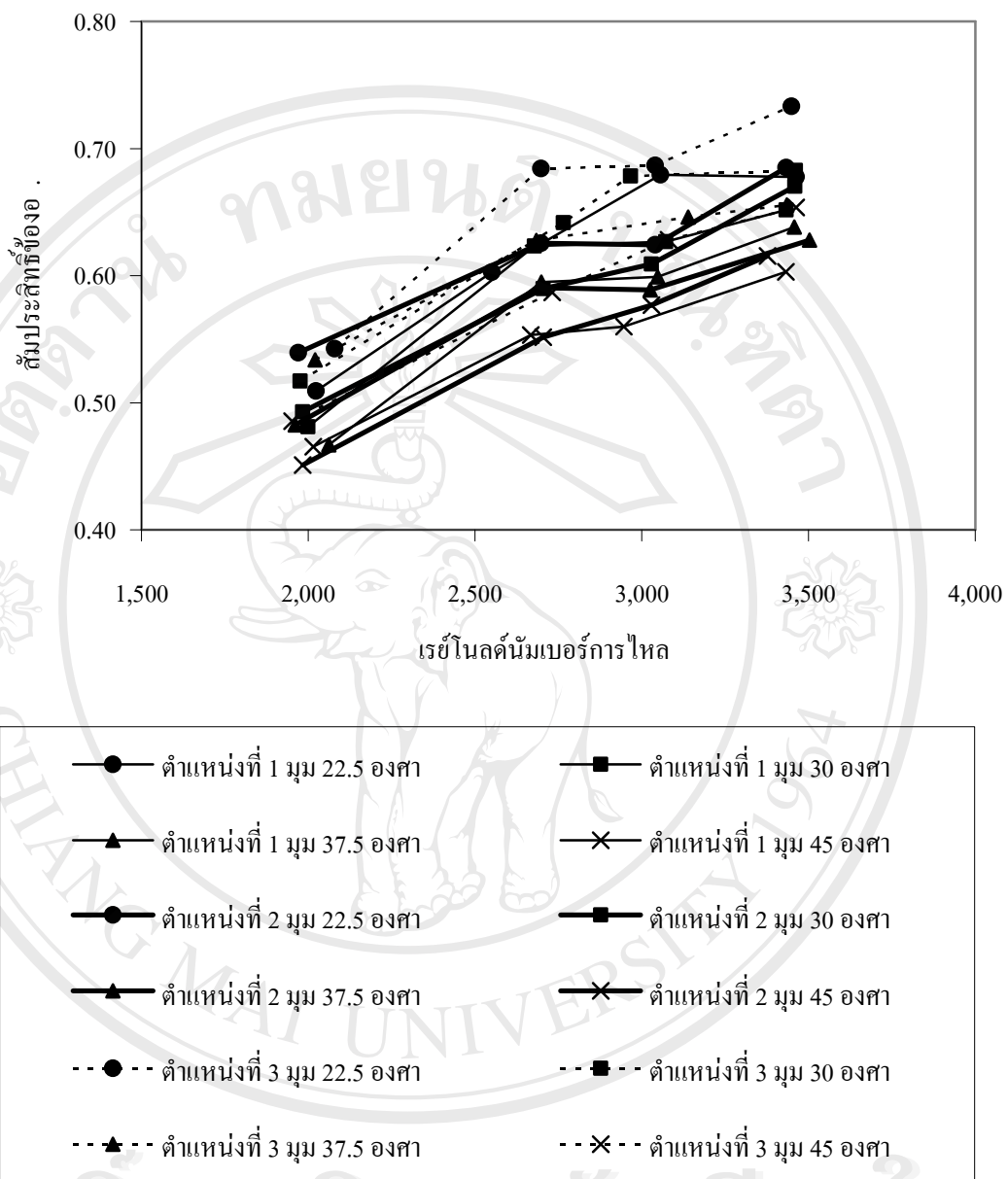
นำค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรจากถังตวงวัด ค่าความดันแตกต่างที่บันทึกในเครื่องบันทึกข้อมูล และค่าความหนาแน่น แทนค่าตามสภาวะต่างๆ ลงในสมการหลักของเครื่องวัดการไหลแบบข้ออง และคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ข้ออง สำหรับข้อมูล 148 ชุด พบว่า มีค่าอยู่ระหว่าง 0.44 ถึง 0.79 และจากการวิเคราะห์ความไม่แน่นอน (Uncertainty) ของค่าสัมประสิทธิ์ข้ออง จากผลการทดลอง มีค่าเท่ากับ ± 2.92 เปอร์เซ็นต์ โดยค่าสัมประสิทธิ์ข้อองที่ได้มีแนวโน้มไม่คงที่ และเปลี่ยนแปลงไปตามตัวแปรต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ข้ออง น้ำสะอาดจำนวน 4 ชุด (ชุดที่ 149 ถึง 152) มีค่าสัมประสิทธิ์ข้อองอยู่ที่ ประมาณ 0.87 แสดงตามตารางที่ ก.1 ในภาคผนวก ก

4.2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ข้ออง กับจุดวัดความดันแตกต่าง และตำแหน่งติดตั้ง

นำข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์ข้ออง และตัวเลขเรย์โนลด์ มาแสดงความสัมพันธ์ แยกตามตำแหน่งติดตั้งข้ออง และจุดวัดความดัน ที่เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น 51 เปอร์เซ็นต์ แสดงได้ดังกราฟรูปที่ 4.5 โดยพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ข้ออง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยกราฟมีความชันมากในช่วงค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำ (Re_d ประมาณ 2,000–2,500) ความชันลดลงในช่วงค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ปานกลาง (Re_d ประมาณ 2,500–3,000) และความชันลดลง หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สูง (Re_d ประมาณ 3,000–3,500) พิจารณา จุดวัดความดันที่มุม 22.5 พบว่า ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำ ข้อองตำแหน่งที่ 2 มีค่าสัมประสิทธิ์ข้อองสูงสุด และมากกว่าตำแหน่งที่ 3 และ 1 ตามลำดับ ส่วนในช่วงค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ปานกลาง ข้อองตำแหน่งที่ 3 มีค่าสัมประสิทธิ์ข้อองสูงสุด และมากกว่าตำแหน่งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ แต่ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สูง ข้อองตำแหน่งที่ 3 มีค่าสัมประสิทธิ์ข้อองสูงสุด และมากกว่าตำแหน่งที่ 2 และ 1 ส่วนจุดวัดความดันที่มุม 30, 37.5, และ 45 องศา ข้อองตำแหน่งที่ 3 มีค่าสัมประสิทธิ์ข้อองสูงสุด แต่จะมีค่ามากกว่าตำแหน่งที่ 1 หรือ 2 ขึ้นอยู่กับช่วงค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ซึ่งไม่แน่นอน สำหรับ กรณีของเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นน้ำยิปซัม 54 และ 57 เปอร์เซ็นต์ มีลักษณะเช่นเดียวกับ ในรูปที่ 4.5 และแสดงกราฟความสัมพันธ์อยู่ในภาคผนวก ข

4.2.2 ค่าสัมประสิทธิ์ข้ออง กับความเข้มข้นน้ำยิปซัม

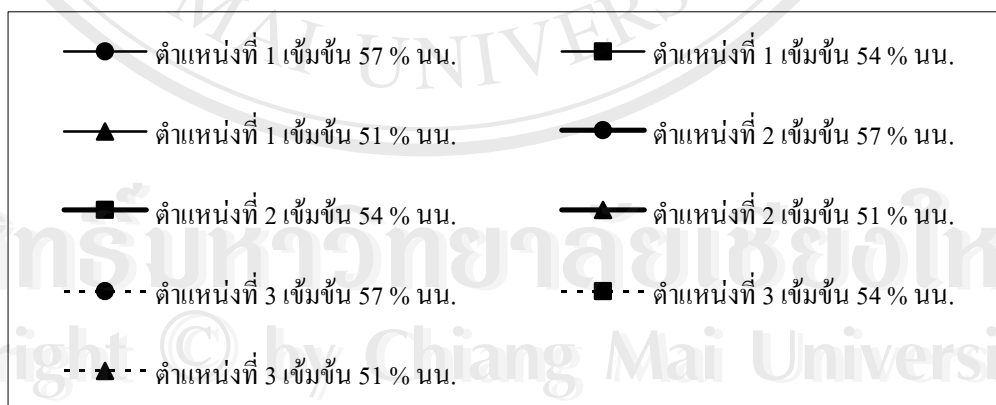
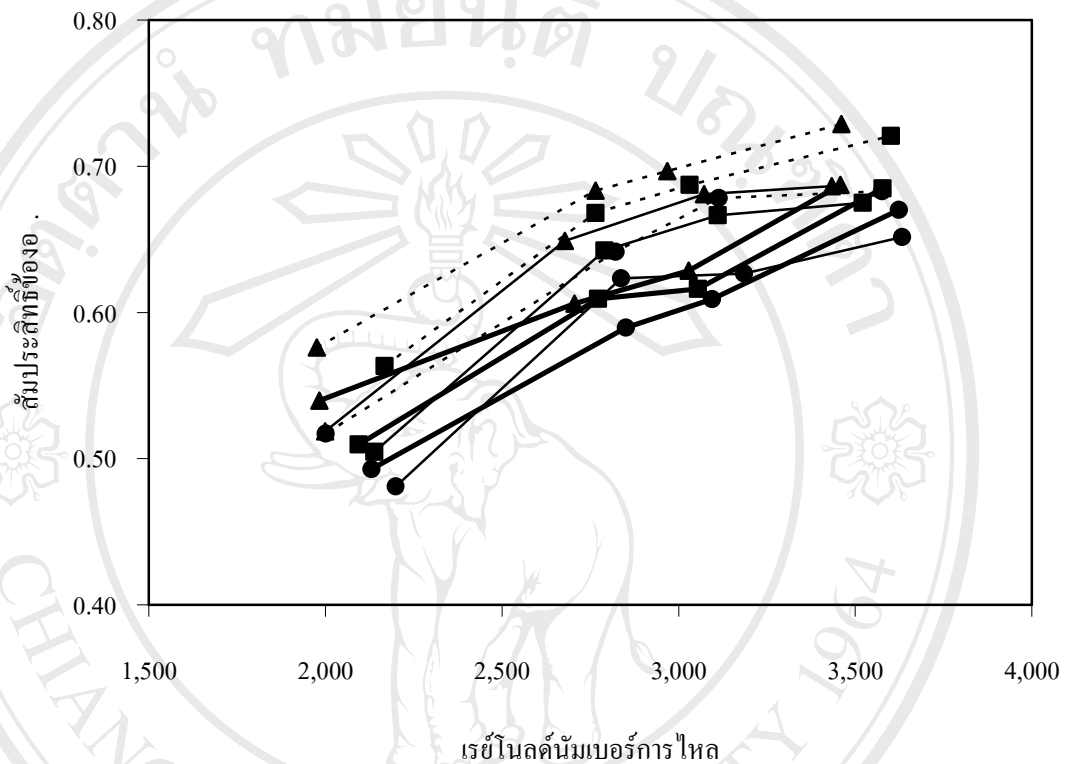
ข้อมูลความสัมพันธ์ ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ข้ออง และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์การไหล สำหรับน้ำยิปซัม ของข้อองที่มีจุดวัดความดันที่มุม 45 องศา แสดงในรูปที่ 4.6 จากกราฟ เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ข้ออง ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เดียวกัน พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ข้อองมีค่าลดลง เมื่อเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ข้อองทั้ง 3 ตำแหน่งมีความสัมพันธ์ดังกล่าว เหมือนกัน



รูป 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์ของ และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์การไหล แยกตามตำแหน่งของ และจุดวัดความดัน ที่ความเข้มข้นน้ำยิปซัม 51 เปอร์เซ็นต์

ข้อสังเกตตำแหน่งที่ 3 มีค่าสัมประสิทธิ์ของสูงที่สุด เทียบค่าสัมประสิทธิ์ของในช่วงความเข้มข้น 57 ถึง 51 เปอร์เซ็นต์ ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 2,001 มีค่าต่างกันไม่เกิน 10.34 เปอร์เซ็นต์ ส่วนข้อสังเกตตำแหน่งที่ 1 และ 2 มีค่าสัมประสิทธิ์ของแตกต่างกันมากกว่า ตำแหน่งที่ 3 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์

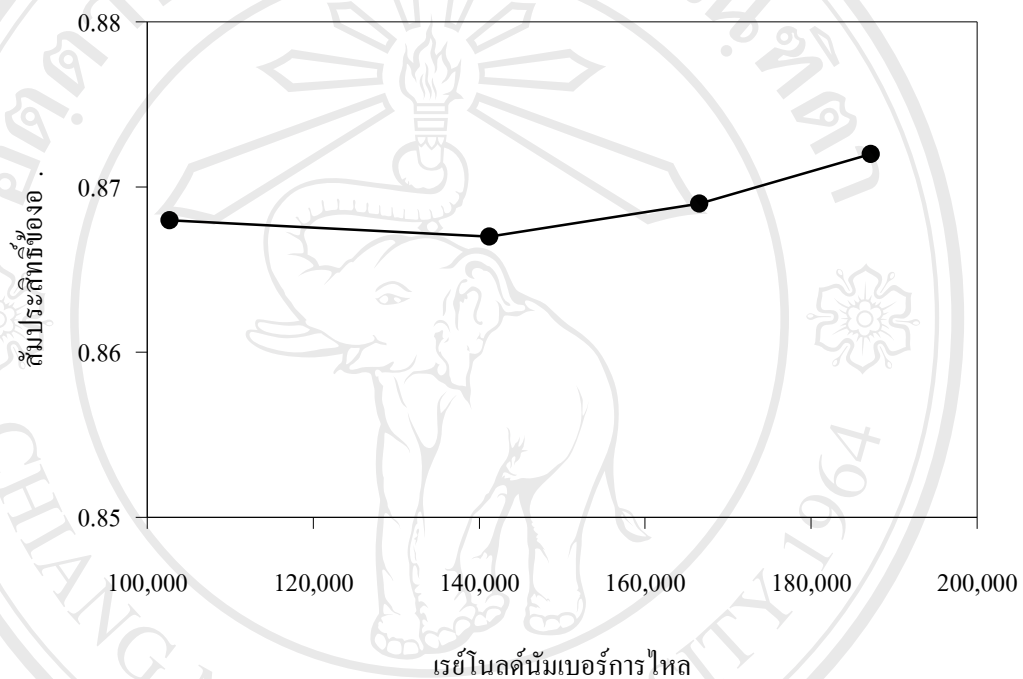
ข้อต่างกันมากที่สุด 14.28 และ 10.91 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับ ในกรณีของจุดวัดความดันที่มุม 22.5, 30, และ 37.5 องศา แสดงกราฟความสัมพันธ์อยู่ในภาคผนวก ข



รูป 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์ของ และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์การไหล แยกตามตำแหน่งของ และเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นน้ำยิปซัม ของช่องที่มีจุดวัดความดันที่มุม 45 องศา

4.2.3 ค่าสัมประสิทธิ์ช่องอ ของน้ำสะอาด

ทำการทดลองและเก็บข้อมูล ของช่องอดัดตั้งในตำแหน่งที่ 2 และมีจุดความดันแตกต่างกัน ที่มุม 45 องศา ด้วยน้ำสะอาดมีอุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส แสดงผลเทียบกับค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์การไหล ดังในรูปที่ 4.7 ซึ่งจากรูป พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ช่องอที่ได้ มีค่าค่อนข้างจะคงที่ ที่ ค่าประมาณ 0.87 ในช่วงค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์การไหล 102,000 ถึง 187,000



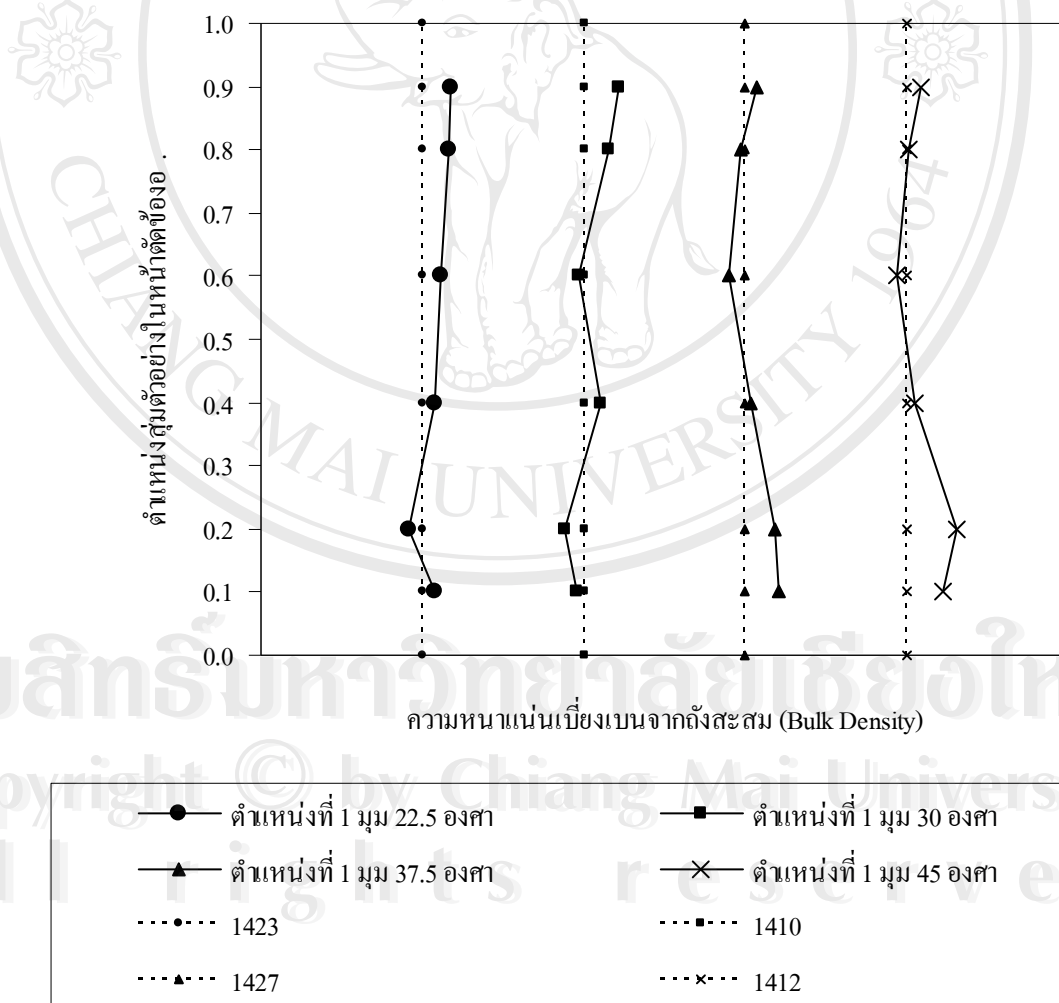
รูป 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์ช่องอ และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์การไหล เมื่อ ทดสอบช่องอดัดตำแหน่งที่ 2 มีจุดความดันที่มุม 45 องศา ด้วยน้ำสะอาด

4.3 การกระจายค่าความหนาแน่นน้ำยิปซัม ในช่องอ

ในการทดลอง มีค่าความหนาแน่นน้ำยิปซัม ที่เกี่ยวข้องกับสองค่า คือ ความหนาแน่นใน ถึงสะสม ซึ่งเก็บข้อมูลทุกสภาวะทดลอง แสดงผลตามตาราง ก.1 ในภาคผนวก ก และความ หนาแน่น ที่ระยะ 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, และ 0.9 เท่าของขนาดช่องอ ในหน้าตัดจุดวัดความดัน ทั้งหมด 12 สภาวะ แสดงผลตามตาราง ก.2 ในภาคผนวก ก เมื่อเทียบค่าความหนาแน่น ในถึงสะสม และในหน้าตัดจุดวัดความดัน ที่สภาวะเดียวกัน พบว่า ความหนาแน่นในหน้าตัดจุดวัดความดัน เบี่ยงเบนจากในถึงสะสม มีค่ามากที่สุดในช่วง - 15.41 ถึง + 9.51 เปอร์เซ็นต์

4.3.1 การกระจายค่าความหนาแน่น ตามมุมของจุดวัดความดัน

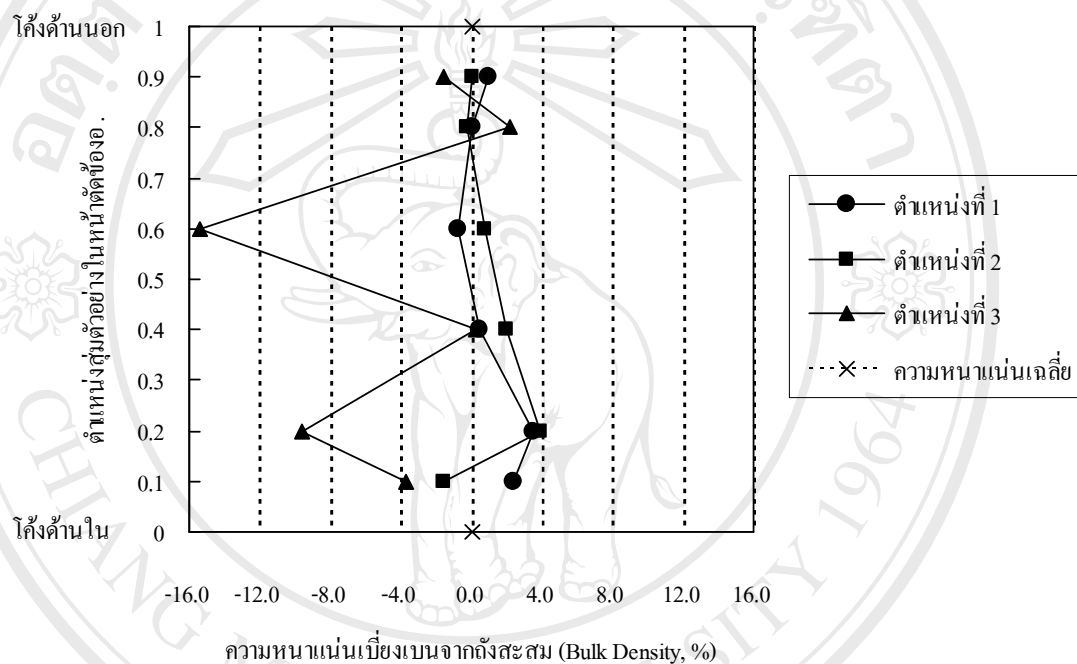
จากข้อมูลค่าความหนาแน่นที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อนำมาเปรียบเทียบ ตามมุมของจุดวัดความดันข้ออ ติดตั้งในตำแหน่งที่ 1 แสดงดังรูปที่ 4.8 จากรูป พบว่า ค่าความหนาแน่น ที่มุม 22.5, 30, 37.5, และ 45 มีค่ากระจายใกล้เคียงกัน โดยมุม 45 องศา มีค่าเบี่ยงเบนจากถึงสะสม มากกว่ามุม 37.5, 30, และ 22.5 องศา ตามลำดับ โดยมีค่าเบี่ยงเบนมากที่สุด + 3.94 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะ 0.2 เทา ข้ออ จะเห็นว่า ที่มุม 22.5 และ 30 ความหนาแน่นมีแนวโน้มเบี่ยงเบน ที่ผนังโค้งด้านนอกข้ออ มากกว่าด้านใน แต่ที่มุม 37.5 และ 45 มีแนวโน้มเบี่ยงเบน ที่ผนังโค้งด้านใน มากกว่าด้านนอก สำหรับข้ออตำแหน่งที่ 2 และ 3 แสดงแนวโน้มเช่นเดียวกับ ข้ออตำแหน่งที่ 1 แต่มีค่าเบี่ยงเบนมากกว่า โดยมีค่าเบี่ยงเบนมากที่สุดในช่วง - 2.53 ถึง + 5.70 และ - 15.41 ถึง + 9.51 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังแสดงผลในภาคผนวก ข



รูป 4.8 แสดงการกระจายความหนาแน่น ในหน้าตัดจุดวัดความดัน ของข้ออตำแหน่งที่ 1

4.3.2 การกระจายค่าความหนาแน่น ตามตำแหน่งติดตั้งข้อ

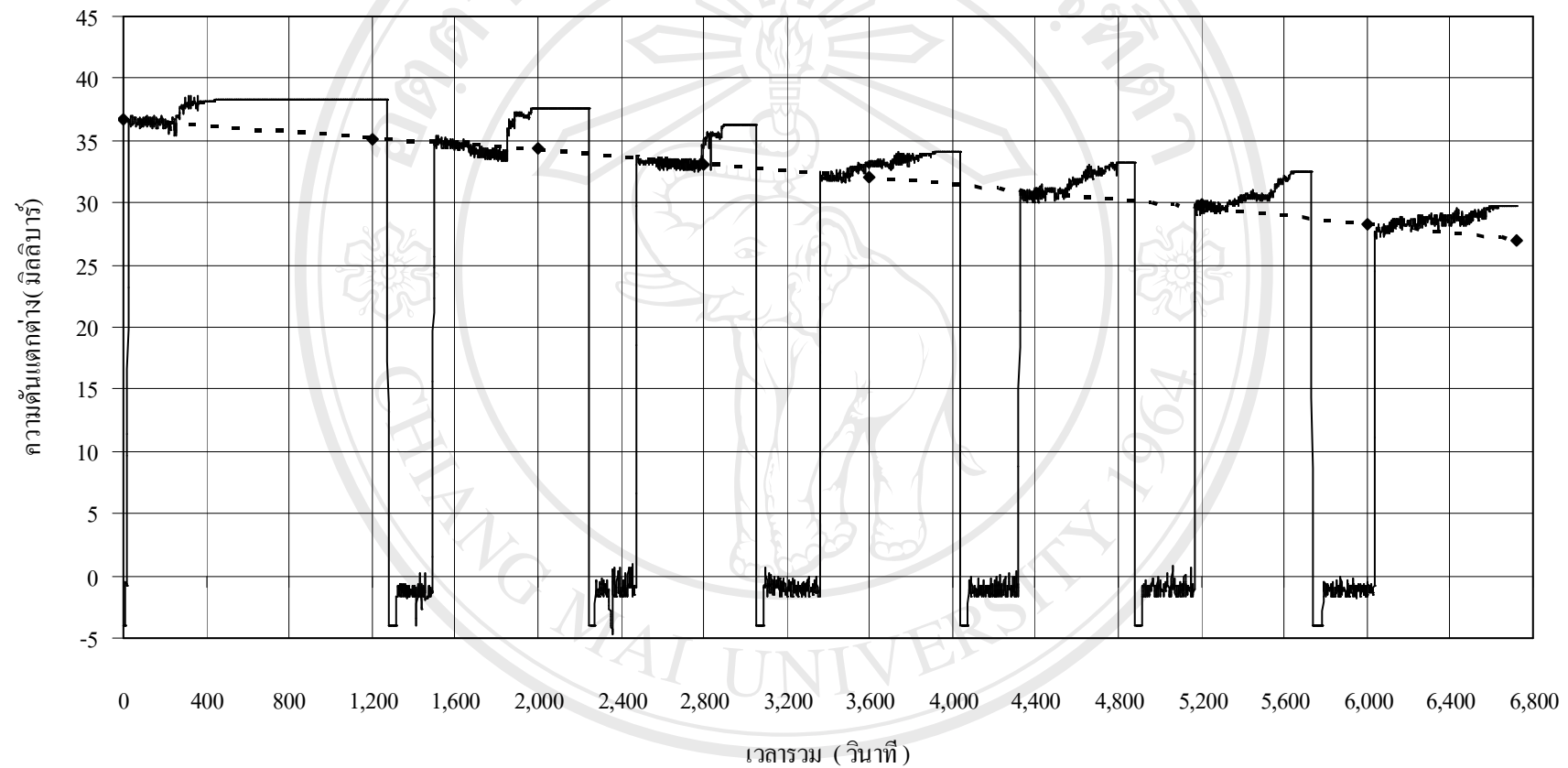
นำข้อมูลการกระจายความหนาแน่น ในหน้าตัดจุดวัดความดันที่มุม 45 องศา เปรียบเทียบ ระหว่างตำแหน่งติดตั้งข้อ 1, 2, และ 3 แสดงดังรูปที่ 4.9 จากรูป ค่าความหนาแน่นของข้อต่อตำแหน่งที่ 3 กระจายมากกว่า ตำแหน่งที่ 2 และ 1 ตามลำดับ ส่วนจุดวัดความดันที่มุม 22.5, 30, และ 37.5 องศา แสดงผลในทำนองเดียวกับรูปที่ 4.9 และแสดงอยู่ในภาคผนวก ข



รูป 4.9 แสดงการกระจายความหนาแน่น ในหน้าตัดจุดวัดความดัน ที่มุม 45 องศา

4.4 ค่าอัตราการไหล ในระบบแยกน้ำออกจากยิปซัม

จากการใช้ข้อต่อ ที่มีจุดวัดความดันที่มุม 45 องศา กับระบบติดตั้งจากกับแกนไหลเข้า ข้อต่อ ติดตั้งต่อกับท่อทางด้านส่งของเครื่องสูบน้ำยิปซัม ในระบบแยกน้ำออกจากยิปซัม ของระบบ กำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ หน่วยที่ 9 เก็บข้อมูลค่าความดันแตกต่าง ที่ได้จากเครื่องมือวัด (Differential Pressure Transmitter) โดยเริ่มตั้งแต่ เดินเครื่องสูบน้ำที่ระดับน้ำ ยิปซัมสูงสุด 5.2 เมตร และสูบน้ำยิปซัม ซึ่งไม่มีการเติมน้ำเพิ่มเข้ามาในถังสะสม จนกระทั่ง ระดับน้ำลดลงต่ำสุดที่ 1.8 เมตร จึงหยุดเดินเครื่องสูบน้ำ ใช้เวลาในการบันทึกข้อมูล ประมาณ 112 นาที (6,720 วินาที) และแสดงผลตามรูปที่ 4.10



- ◆ - ความดันแตกต่างจากผลการทดลอง — ความดันแตกต่างวัดในระบบท่อจริง - - - เส้นแนวโน้ม (ความดันแตกต่างจากผลการทดลอง)

รูป 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันแตกต่างจากเครื่องวัดแบบช่องอ ติดตั้งในระบบแยกน้ำออกจากยิปซัม กับเวลาที่ใช้เดินเครื่องสูบน้ำ 112 นาที

จากรูปที่ 4.10 แสดงผลของค่าความดันแตกต่างที่บันทึกได้ กับ เวลาที่ใช้ทั้งหมด พบว่า ความดันแตกต่างมีค่าลดลง และเริ่มคงที่ หลังจากวินาทีที่ 495 ในขณะที่ระดับน้ำในถังสะสม ยังคงลดลงอย่างต่อเนื่อง หลังจากชะล้างตะกอนออกจากจุดวัดความดัน และเก็บข้อมูลต่อไป พบว่า ยังคงเกิดเหตุการณ์เช่นเดิม ในช่วงเวลา 489 วินาที และเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวซ้ำอีก 5 ครั้ง จนกระทั่งหยุดเดินเครื่องสูบน้ำ (ที่ระดับน้ำยิปซัม 1.8 เมตร) โดยมีช่วงเวลาที่ค่าความดันเปลี่ยนแปลงโดยเฉลี่ย 510 วินาที

4.5 การวิจารณ์ ค่าความดันแตกต่าง จากผลการทดลอง

จากข้อมูลผลการทดลอง ค่าความดันแตกต่างคร่อมจุดวัดบนข้ออ ทั้งหมด 152 ชุด มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ย (Average Standard Deviation of Mean) 0.55 และค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานเฉลี่ย (Average Standard Error of Mean) 0.08 จากผลการทดลอง ความดันแตกต่าง มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าอัตราการไหล ตลอดช่วงอัตราการไหลทดลอง 10.02–19.04 ลิตรต่อวินาที เมื่อเปรียบเทียบความดันแตกต่าง ตามมุมของจุดวัดความดัน พบว่า ความดันแตกต่างมีค่าเพิ่มขึ้น ตามมุมของจุดวัดความดัน โดยมีค่าสูงสุดที่มุม 45 องศา และมีค่ามากกว่าที่มุม 37.5, 30, และ 22.5 องศา ตามลำดับ ถึงแม้ว่าข้ออตำแหน่งที่ 3 ที่มุม 30 องศาจะมีค่าความดันมากกว่ามุม 37.5 องศา ที่ค่าอัตราการไหล 11.20 ลิตรต่อวินาที แต่มีค่าต่างกันเพียง 4.6 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น พิจารณาได้ว่า ความดันแตกต่างมีค่าเพิ่มขึ้นตามมุมของจุดวัดความดัน โดยความดันแตกต่างมีค่ามากที่สุดที่มุม 45 องศา ซึ่งตรงกับรายงานในเอกสารของ Indian Standard Institution (1979) และ A. J. Ward Smith. (1971) ที่ระบุว่า จุดวัดความดันที่มุม 45 องศา ให้ค่าความดันแตกต่างคร่อมจุดวัดสูงที่สุด เนื่องจากมุมดังกล่าว อยู่ในช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลง สภาวะการไหลภายในข้ออ โดยที่ผิวโค้งด้านนอก ความดันสถิตมีค่าเพิ่มขึ้น แล้วกลับลดลง ในขณะที่ผิวโค้งด้านใน ความดันสถิตมีค่าลดลง และกลับเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากความไม่สมดุลระหว่าง แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง และการเปลี่ยนแปลงของความดันสถิตในแนวรัศมี ดังนั้น จุดวัดความดันที่แกนทำมุม 45 องศา กับระนาบตั้งฉากกับแกนไหลเข้าข้ออ เป็นตำแหน่งที่มีความไว (Sensitivity) ต่อการรับสัญญาณความดันแตกต่างที่ดีที่สุดในช่วงสภาวะทดลอง

สำหรับ ข้ออที่มีจุดวัดความดันแตกต่างที่มุม 45 องศา ซึ่งถือว่ามีความสมมาตรทางกายภาพ แต่ในงานวิจัยนี้ ข้ออที่ใช้มีมุมเบี่ยงเบน 45 ± 1 องศา เมื่อสลับตำแหน่งหน้าแป้นติดตั้ง เพื่อให้การไหลเข้าข้ออในทิศทางตรงกันข้าม พบว่า ความดันแตกต่างมีค่าใกล้เคียงกัน โดยต่างกัน

เพียง 3.7 เปอร์เซ็นต์ และคำนวณค่าอัตราการไหลได้ต่างกัน 0.4 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่า ช่องที่มีจุดวัดความดันที่มุม 45 องศา ซึ่งใช้ในการทดลอง สามารถใช้เป็นเครื่องวัดการไหล โดยสลับทิศทางการไหลเข้าได้ทั้งสองทิศทาง

เมื่อเปรียบเทียบความดันแตกต่าง ตามตำแหน่งติดตั้งช่อง พบว่า ที่มุมของจุดวัดความดันเดียวกัน ช่องในตำแหน่งที่ 1 และ 2 ให้ความดันสูงสุดใกล้เคียงกัน และมากกว่าตำแหน่งที่ 3 ตลอดช่วงค่าอัตราการไหลทดลอง พิจารณาจากตำแหน่งติดตั้ง ช่องตำแหน่งที่ 1 อยู่ติดกับท่อด้านส่งของเครื่องสูบน้ำ มีการไหลเข้าแบบปั่นป่วน ในขณะที่ช่องตำแหน่งที่ 2 และ 3 ติดตั้งในท่อทดลองที่มีระยะความยาวท่อตรง เพียงพอที่จะทำให้มีการไหลเข้าแบบพัฒนาเต็มที่ แสดงให้เห็นว่ารูปแบบการไหลเข้าช่องไม่มีผลต่อค่าความดันแตกต่าง แต่ทิศทางการไหลเข้า มีผลต่อค่าความดันแตกต่าง เพราะช่องตำแหน่งที่ 1 และ 2 มีทิศทางการไหลเข้าในแนวตั้ง ส่วนตำแหน่งที่ 3 มีทิศทางการไหลเข้าในแนวนอน ดังนั้น เครื่องวัดการไหลแบบช่องในตำแหน่งที่ 1 และ 2 มีความไวต่อสัญญาณความดันใกล้เคียงกัน และ มากกว่าช่องตำแหน่งที่ 3 ซึ่งสอดคล้องกับ รายงานในเอกสารของ R. M. Turian, *et al.* (1998) และ K. C. Wilson, *et al.* (1997) ที่ระบุว่า ตำแหน่งที่ดีที่สุดในการติดตั้ง เครื่องวัดการไหลของ ของผสมควรอยู่ในแนวตั้ง

เปรียบเทียบความดันแตกต่าง ในช่วงค่าความเข้มข้นทดลอง 51 ถึง 57 % โดยน้ำหนัก (31 ถึง 37 % โดยปริมาตร) พบว่า เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ค่าความดันแตกต่างจะเพิ่มขึ้น ซึ่ง Baha E. Abulnaga, P. E. (2002) อธิบายว่า เมื่อความหนาแน่นเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้น ระยะห่างระหว่างอนุภาคลดลง เกิดการกระทบกันและถ่ายเทโมเมนตัมระหว่างอนุภาคมากขึ้น ทำให้มีความดันตกในท่อเพิ่มขึ้น ตามความหนาแน่นของอนุภาค และตรงกับรายงานผลการวิจัยของ J. M. Colwell and C. A. Shook. (1989) ที่ใช้ช่วงความเข้มข้น 0 ถึง 35 % โดยปริมาตร แต่ติดตั้งช่องเฉพาะตำแหน่ง ต่อกับท่อด้านส่งของเครื่องสูบน้ำ ซึ่งตรงกับช่องตำแหน่งที่ 1 ในงานวิจัยนี้ โดยมีแนวโน้มความดันแตกต่างคร่อมจุดวัดเหมือนกัน และสำหรับช่องตำแหน่งที่ 1 ที่ค่าอัตราการไหลต่ำ ค่าความดันมีค่าต่างกันมากกว่าที่ค่าอัตราการไหลสูง ส่วนตำแหน่งที่ 2 และ 3 ความดันต่างกันน้อยกว่าตำแหน่งที่ 1 ซึ่ง J. M. Colwell and C. A. Shook. (1989) ได้อธิบายว่า ที่อัตราการไหลต่ำ ความเร็วของอนุภาคมีค่าใกล้เคียงความเร็ววิกฤติ ทำให้มีโอกาสตกตะกอน มากกว่าที่อัตราการไหลสูง นอกจากนั้น C. A. Shook and M. C. Roco. (1991) ระบุว่า สำหรับสารทำงานที่มีความเข้มข้นสูง ในสภาวะการไหลแบบราบเรียบ ค่าความดันแตกต่างคร่อมจุดวัด จะไม่ไว (Insensitive) ต่อค่าอัตราการไหล

4.6 การวิจารณ์ ค่าสัมประสิทธิ์ช่องอ จากผลการทดลอง

ค่าสัมประสิทธิ์ช่องอที่คำนวณจากข้อมูลผลการทดลอง ทั้งหมด 148 ชุด มีค่าระหว่าง 0.44 ถึง 0.79 และจากการวิเคราะห์ความไม่แน่นอน ของค่าสัมประสิทธิ์ช่องอ โดยใช้สมการหลักของช่องอ (4.1) จำนวนค่าความไม่แน่นอนได้เท่ากับ ± 2.92 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์ช่องอที่ได้จากผลการทดลอง มีความน่าเชื่อถือค่อนข้างสูง ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ช่องอเพิ่มขึ้น ตามตัวเลขเรย์โนลด์การไหล ตลอดช่วงค่าอัตราการไหลทดลอง โดยค่าสัมประสิทธิ์ช่องอ มีการเพิ่มอย่างรวดเร็ว ในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำ, การเพิ่มของค่าสัมประสิทธิ์ช่องอ ลดลงในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ปานกลาง, และค่อยๆเพิ่มขึ้นหรือคงที่ในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์สูง ซึ่งอัตราการเพิ่มน้อยกว่าที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำ จากลักษณะดังกล่าว เมื่อพิจารณาช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ที่ทดลอง (Re_d 2,000–3,500) ซึ่งอยู่ในสภาวะการไหลช่วงเปลี่ยนแปลง (Transition) จะมีลักษณะเหมือนกับ ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของนอซเซิล (Nozzle) ที่ สมศักดิ์ กิริตวุฒิสเรษฐ (2546) แสดงไว้ แต่ในผลการวิจัยที่ได้จากการทดลองนี้ แตกต่างจากรายงานผลการวิจัยของ J. M. Colwell and C. A. Shook. (1989) ที่ระบุว่า ค่าสัมประสิทธิ์ช่องอที่ใช้กับของผสม มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.76 ทั้งนี้เนื่องจาก ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ในรายงานวิจัย มีค่าประมาณ 26,000 ถึง 40,000 ซึ่งอยู่ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน จึงไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกับผลการวิจัยนี้ได้

พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ช่องอ ตามมุมของจุดวัดความดัน และ ตำแหน่งติดตั้งช่องอ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ช่องอไม่ได้เพิ่มขึ้นหรือลดลง ตามมุมของจุดวัดความดันที่เพิ่มขึ้น และตำแหน่งติดตั้งช่องอ ดังนั้น แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์ช่องอ จึงไม่มีความสัมพันธ์ กับมุมของจุดวัดความดัน และตำแหน่งติดตั้งช่องอ

เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ช่องอ ในช่วงค่าความเข้มข้นทดลอง พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ช่องอลดลง เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น สำหรับช่วงความเข้มข้นทดลอง 31 ถึง 37 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร ค่าสัมประสิทธิ์ช่องอมีค่าต่างกันมากที่สุด 14.28 เปอร์เซ็นต์ ที่ตัวเลขเรย์โนลด์ 2,000 และต่างกัน 5.88 เปอร์เซ็นต์ ที่ตัวเลขเรย์โนลด์ 3,500 ซึ่งคล้ายกับในรายงานผลการวิจัยของ J. M. Colwell and C. A. Shook. (1989) โดยเปรียบเทียบในช่วงความเข้มข้น 10 ถึง 35 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ช่องอต่างกัน 12.98 เปอร์เซ็นต์ ที่ตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำ และค่าต่างกัน 3.95 เปอร์เซ็นต์ ที่ตัวเลขเรย์โนลด์สูง ดังนั้น ความเข้มข้นของน้ำยิปซัม มีความสัมพันธ์ กับค่าสัมประสิทธิ์ช่องอ และมีอิทธิพลมาก ที่ค่าเรย์โนลด์ต่ำ โดยมีความเกี่ยวข้องกับที่อ้างอิง ในการวิจารณ์ค่าความดันแตกต่าง กับความเข้มข้นน้ำยิปซัม

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ของ α ที่ทดสอบในระบบท่อทดลอง ด้วยน้ำสะอาด มีค่าคงที่ประมาณ 0.87 ในช่วงค่าอัตราการไหล 10.10-18.41 ลิตรต่อวินาที (ตัวเลขเรย์โนลด์การไหล 102,000-187,000) เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ พบว่า สอดคล้องกับงานวิจัยหลายงาน อาทิเช่น ในเอกสารของ J. W. Murdock, *et al.* (1963) ที่ระบุว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของ α ใช้กับน้ำสะอาดมีค่ากระจายระหว่าง 0.85-1.08 โดยมีความแม่นยำ ± 10 เปอร์เซ็นต์ และค่าสัมประสิทธิ์ของ α ที่ตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำจะมีค่าน้อยกว่าที่ตัวเลขเรย์โนลด์สูง จากเอกสารของ Indian Standard Institution (1979) ระบุว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของ α ที่มีจุดวัดความดันที่มุม 45 องศา มีค่าสัดส่วนรัศมี ความโค้ง ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของ α 1.5 มีค่าเท่ากับ 0.86 มีความแม่นยำ ± 5 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นระบบท่อทดลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ สามารถใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของ α ของเครื่องวัดการไหลแบบ α ที่ใช้กับของผสมได้ แม้ว่าในงานวิจัยนี้ จะไม่สามารถทดสอบกับน้ำสะอาด ที่ตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำๆ ได้ เพราะขีดจำกัดของเครื่องสูบน้ำ และอุปกรณ์เครื่องมือวัดค่าความดันแตกต่างที่ใช้

จากข้อมูลผลการทดลองทั้งหมด นำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของ α และตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ค่าความดันแตกต่างคร่อมเครื่องวัดแบบ α , ตัวเลขเรย์โนลด์, เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น, จุดวัดความดันที่แกนทำมุม กับระนาบตั้งฉากกับแกนไหลเข้าของ α , และตำแหน่งติดตั้งของ α โดยแปลงให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ ที่ครอบคลุมสภาวะการทดลองทั้งหมด ใช้การวิเคราะห์ทางสถิติ โดยวิเคราะห์ความถดถอย แบบหลายตัวแปร (Multiple Regressions) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.1)

$$Ce = 0.72943 \times (f_p^{-0.50263}) \times (R_{ed}^{-0.00003}) \times (S^{-0.00088}) \times (P_{ac}^{0.00229}) \times (M_p^{-0.00007}) \dots (4.1)$$

โดยค่า Ce คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของ α

R_{ed} คือ ตัวเลขเรย์โนลด์การไหล

S คือ เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของน้ำยิปซัม โดยน้ำหนัก

P_{ac} คือ อัตราส่วนระหว่าง มุมของจุดวัดความดันต่อมุมของของ α ในงานวิจัยนี้ มุมของ α มีค่า 90 องศา

M_p คือ ตำแหน่งติดตั้งของ α ในระบบท่อทดลอง ไม่มีหน่วย

f_p คือ ค่าปัจจัยความดันแตกต่าง

ค่าปัจจัยความดันแตกต่าง (Differential Pressure Factor) เป็นการนิยามค่าความดันแตกต่างคร่อมเครื่องวัดแบบช่องอ ในรูปตัวแปรไร้หน่วย มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.2)

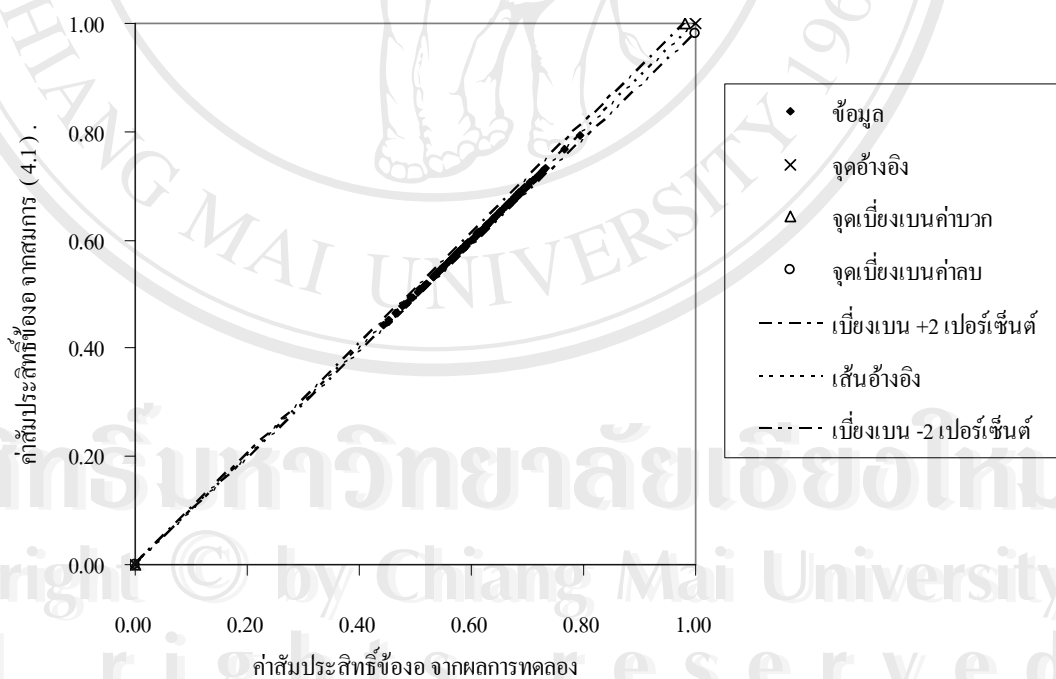
$$f_p = \frac{\rho \times \Delta P}{G_c^2} \quad \dots\dots (4.2)$$

โดยค่า ρ คือ ค่าความหนาแน่นของน้ำปัสัฒ หน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ΔP คือ ค่าความดันแตกต่างคร่อมเครื่องวัดแบบช่องอ หน่วย มิลลิบาร์

G_c คือ อัตราการไหลของมวล บนพื้นที่หน้าตัดการไหล หน่วย กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที

นำข้อมูลผลการทดลองทั้งหมด มาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ (4.1) แสดงผลดังกราฟรูปที่ 4.11 จากกราฟ พบว่า สมการที่ (4.1) สามารถทำนายค่าสัมประสิทธิ์ช่องอครอบคลุมผลการทดลองทั้งหมด ด้วยความเบี่ยงเบน ± 2 เปอร์เซนต์



รูป 4.11 แสดงผลการเปรียบเทียบ ค่าสัมประสิทธิ์ช่องอ จากผลการทดลอง และจากสมการ (4.1)

4.7 การวิจารณ์ การกระจายค่าความหนาแน่นน้ำยิปซัม ในห้องอ

แม้ว่า ช่วงความหนาแน่นของน้ำยิปซัม ที่ทดลองจะมีช่วงค่อนข้างแคบ (เนื่องจาก เป็นช่วงที่ครอบคลุมค่าความเข้มข้นที่ใช้งานจริง ในระบบกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ หน่วยที่ 8-11) แต่จากผลการทดลอง พบว่า ค่าความหนาแน่นน้ำยิปซัม มีอิทธิพลต่อความดันแตกต่างคร่อมจุดวัดความดัน และสัมประสิทธิ์ของห้องค่อนข้างมาก โดยเฉพาะในช่วงค่าอัตราการไหลต่ำ (ตัวเลขเรย์โนลด์ประมาณ 2,000)

จากผลการวัดการกระจายค่าความหนาแน่น ที่หน้าตัดจุดวัดความดันในห้องอ เทียบกับในถังสะสม เมื่อพิจารณาตามมุมของจุดวัดความดัน พบว่า การกระจายความหนาแน่นในห้องอ ที่มุม 22.5 และ 30.0 องศา มีค่าเบี่ยงเบนจากถังสะสม ที่ผนังโค้งด้านนอกห้องอ (ระยะอ้างอิง 0.6, 0.8, และ 0.9 เท่าของขนาดห้องอ) มากกว่าผนังโค้งด้านใน (ระยะอ้างอิง 0.1, 0.2, และ 0.4 เท่าของขนาดห้องอ) ซึ่งตรงกันข้ามกับที่มุม 37.5 และ 45.0 องศา ที่มีค่าความหนาแน่นเบี่ยงเบนจากถังสะสม ที่ผนังโค้งด้านในในห้องอ มากกว่าด้านนอก โดย F. Sanchez Silva, *et al.* (1997) ระบุว่า จากการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลภายในห้องอ แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางจะก่อให้เกิดการไหลซ้อน กระทำต่อของไหล โดยของไหลที่ผนังจะเคลื่อนที่เข้าหากกลางท่อ และของไหลบริเวณกลางท่อจะเคลื่อนที่ไปยังผนัง ในทิศทางสลับกันเป็นวงกลม ความแตกต่างของความดันก่อให้เกิดพื้นที่ไหลซ้อนสองบริเวณ โดยอยู่ใกล้ส่วนเริ่มต้นโค้ง (ทางเข้าห้องอ) ที่ผนังด้านนอก และใกล้ส่วนปลายของโค้ง (ทางออกของห้องอ) ที่ผนังด้านใน ซึ่งผลจากการไหลซ้อนที่เพิ่มขึ้นตามมุม ทำให้อนุภาคกระจายไม่สม่ำเสมอ ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของการไหลซ้อน

พิจารณาดำแหน่งติดตั้งห้องอ พบว่า ห้องอตำแหน่งที่ 3 มีการกระจายความหนาแน่นในหน้าตัดห้องอ เบี่ยงเบนจากถังสะสมมากที่สุดถึง - 15.41 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับห้องอตำแหน่งที่ 1 และ 2 ซึ่งค่าเบี่ยงเบนมากที่สุดเพียง + 3.94 และ + 5.70 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากข้อมูลที่แสดงในรายงานผลการวิจัยของ Jianmin Ding, *et al.* (1993) ระบุว่า เริ่มพบการรวมตัวของตะกอน จากของผสมที่ไหลภายในท่อแนวระดับ เมื่อผลการวัดการกระจายของความหนาแน่นในหน้าตัดท่อ ต่างจากความหนาแน่นเฉลี่ย (Efflux Density) ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นพิจารณาได้ว่าสภาวะการไหล ในหน้าตัดจุดวัดความดันของห้องอตำแหน่งที่ 3 เกิดการแยกชั้นการไหล ส่วนตำแหน่งที่ 1 และ 2 สภาวะการไหลยังเป็นแบบเนื้อเดียว ซึ่งในงานวิจัยนี้ ใช้สมการของเครื่องวัดการไหลแบบห้องอของ J. M. Colwell and C. A. Shook. (1989) โดยมีข้อกำหนดว่า การไหลของ ของผสมภายในห้องอ ต้องเป็นแบบเนื้อเดียว มีการกระจายของอนุภาคของแข็ง

ลุ่มาเสมอ ตลอดหน้าตัดการไหล ดังนั้น ข้องอในตำแหน่งที่ 3 ไม่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้วัดการไหล

จากรายงานผลการวิจัยของ J. M. Colwell and C. A. Shook. (1989) ให้เหตุผลในการเลือกตำแหน่งติดตั้งข้องอ ต่อกับท่อด้านส่งของเครื่องสูบน้ำ เพื่อให้การไหลเป็นแบบเนื้อเดียว ส่วนตำแหน่งติดตั้งข้องอ ที่มีการไหลเข้าและออก แบบพัฒนาเต็มที่อาจเกิดการแยกชั้นการไหล ทำให้ไม่เหมาะสมกับหลักการ ของเครื่องวัดการไหลแบบข้องอ เพราะ อัตราการไหลเข้ามากกว่าอัตราการไหลออก เนื่องจากเกิดการสะสมของตะกอนในระบบ แต่จากผลการวัดการกระจายความหนาแน่นในหน้าตัดข้องอ เทียบกับถึงสะสม ของข้องอตำแหน่งที่ 2 พบว่า การเบี่ยงเบนมีค่าน้อย และไม่ควรถูกเกิดการตกตะกอน แม้ว่าจะมีสภาวะการไหลเข้าและออก แบบพัฒนาเต็มก็ตาม แต่มีข้อมูลการกระจายความหนาแน่นใกล้เคียงกับ ข้องอในตำแหน่งที่ 1 ซึ่งมีสภาวะการไหลเข้าข้องอแบบปั่นป่วน ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ ตำแหน่งติดตั้งข้องอที่มีการไหลเข้าในแนวคิ่ง โดยมีสภาวะการไหลเข้าแบบปั่นป่วน หรือแบบพัฒนาเต็มที่สามารถใช้วัดการไหลสำหรับน้ำยิปซัมได้ ส่วนข้องอที่มีการไหลเข้าในแนวระดับ ได้รับอิทธิพลจากการแยกชั้นการไหล เพราะเกิดการตกตะกอน ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลของ K. C. Wilson, *et al.* (1997) ระบุว่า การไหลในแนวระดับ ได้รับอิทธิพลจากแรงโน้มถ่วง ที่กระทำต่ออนุภาคในทิศทางตั้งฉากกับการไหล ทำให้อนุภาคไหลด้วยความเร็วต่ำกว่าของเหลว และเกิดการรวมตัวของตะกอนบริเวณก้นท่อ ซึ่งเป็นคุณลักษณะของการไหลแบบหลายเนื้อ (Heterogeneous Flow)

4.8 การวิจารณ์ ค่าอัตราการไหลในระบบแยกน้ำออกจากยิปซัม

ข้อมูลค่าความดันแตกต่างที่ได้มาจาก (Differential Pressure Transmitter) ในช่วงเวลาประมาณ 112 นาที (6,720 วินาที) ตามรูปที่ 4.10 พบว่า ค่าความดันแตกต่างลดลงและเริ่มคงที่ในช่วงเวลาประมาณ 500 วินาที ซึ่งเกิดจากการตกตะกอนของยิปซัม ในรูปของจุดวัดความดัน หลังจากการชะล้างตะกอนออก ค่าความดันแตกต่าง จึงลดลงมาใกล้เคียงกับค่าที่แท้จริง ทั้งนี้ ค่าความดันแตกต่างที่แท้จริง ซึ่งแสดงด้วยเส้นประในรูป 4.10 เป็นเส้นแนวโน้มที่ได้มาจากการเก็บข้อมูล ค่าอัตราการไหลและความดันแตกต่าง ที่ระดับน้ำยิปซัมคงที่ ได้แก่ 5.2, 5.0, 4.6, 4.2, 3.8, 3.4, 3.0, 2.6, 2.2, และ 1.8 เมตร ด้วยระบบท่อทดลอง แสดงข้อมูลตามตาราง ก.3 ในภาคผนวก ก จากการเปรียบเทียบเส้นแนวโน้ม กับความดันแตกต่างในระบบท่อ พบว่า ในช่วงที่เริ่มเก็บข้อมูล ค่าความดันแตกต่างในระบบท่อจริง ใกล้เคียงกับข้อมูลท่อทดลอง ที่ค่าอัตราการไหล 16.1 ลิตรต่อวินาที หลังจากเวลาผ่านไปประมาณ 300 วินาที ค่าความดันจะเบี่ยงเบนออกจากผลการทดลอง และ

ต่างกันจนเห็นได้ชัด ในช่วงเวลาประมาณ 400 วินาที จนกระทั่งความดันไม่เปลี่ยนแปลง ที่เวลาประมาณ 500 วินาที เมื่อพิจารณาค่าความดันแตกต่างเบี่ยงเบนจากเส้นแนวโน้ม ± 5 เปอร์เซ็นต์ พบว่า สามารถใช้ข้อมูลของเครื่องวัดการไหล ที่ติดตั้งในระบบท่อจริง ในช่วงเวลาเฉลี่ย 296 วินาที หรือประมาณ 300 วินาที หลังจากนั้น ต้องทำการชะล้างตะกอน ที่อุดตันในรูจุดวัดความดัน และหลังจากผ่านไป 6,720 วินาที เครื่องสูบน้ำยิปซัมหยุดเดินเครื่อง ที่ค่าอัตราการไหลประมาณ 12.2 ลิตรต่อวินาที ดังนั้น จากข้อมูลในช่วงใช้งานระบบแยกฯ ค่าอัตราการไหลอยู่ในช่วง 16.1–12.2 ลิตรต่อวินาที

จากข้อมูลในช่วงการใช้งานจริง ของระบบแยกน้ำออกจากยิปซัม นำมาแทนค่าลงในสมการความสัมพันธ์ (4.1) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของ α และแทนค่าลงในสมการหลักของเครื่องวัดการไหลแบบช่องอ (2.3) โดยใช้ค่าความดันแตกต่างเฉลี่ย (ในรูป 4.10) ที่วัดได้ในเวลา 300 วินาที คำนวณค่าอัตราการไหลในระบบท่อจริง และนำมาเปรียบเทียบกับค่าอัตราการไหล จากข้อมูลที่ระดับน้ำยิปซัมค่าต่างๆ พบว่า ค่าอัตราการไหลต่างกันประมาณ 0.06-0.91 เปอร์เซ็นต์

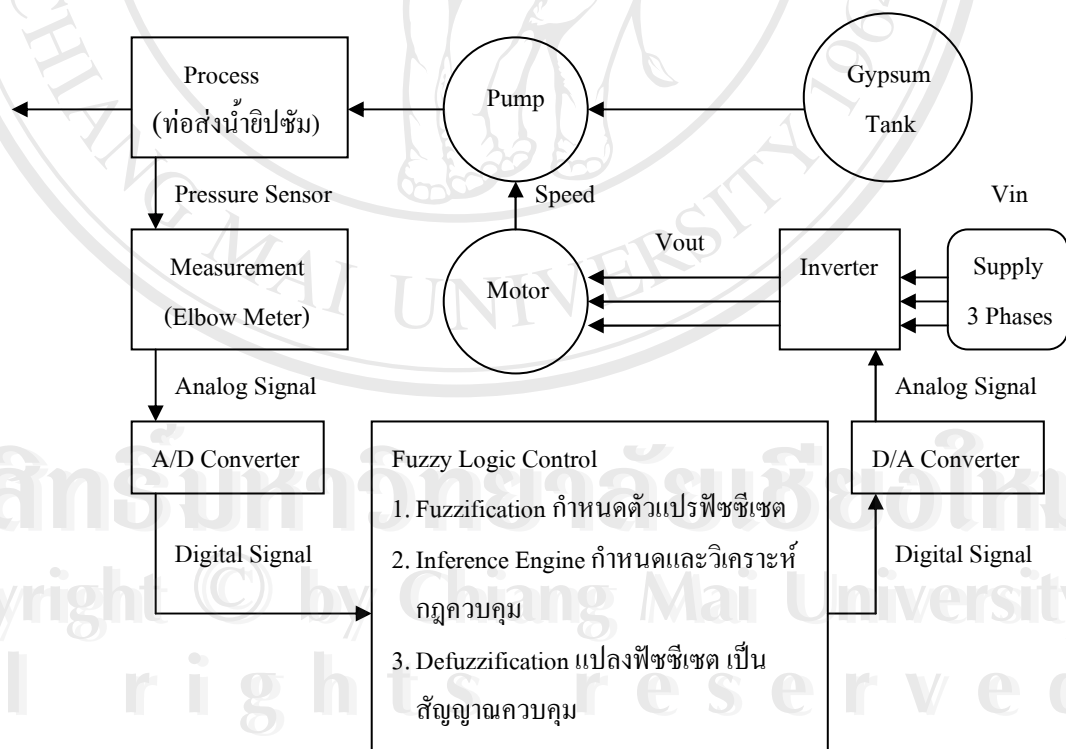
4.9 การออกแบบระบบควบคุม ค่าอัตราการไหล

ค่าอัตราการไหลในระบบแยกน้ำออกจากยิปซัม โรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 9 จากการวัดมีค่าอยู่ระหว่าง 12.2-16.1 ลิตรต่อวินาที ในขณะที่ผู้ผลิตอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบฯ ออกแบบใช้งานที่ค่าอัตราการไหล 13.9 ลิตรต่อวินาที โดยยอมรับค่าอัตราการไหลต่ำสุดและสูงสุด 12.5 และ 15.3 ลิตรต่อวินาที ตามลำดับ ดังนั้น เพื่อยืดอายุการใช้งานอุปกรณ์ จำเป็นต้องออกแบบระบบควบคุมค่าอัตราการไหลให้คงที่ โดยการควบคุมระดับความเร็รรอบ ของมอเตอร์ขับเคลื่อนเครื่องสูบน้ำยิปซัม ผ่านอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์ โดยรับสัญญาณควบคุมการทำงาน จากกระบวนการฟิชชีลอจิก ซึ่งเป็นกระบวนการที่ผู้วิจัยเลือกใช้ เนื่องจาก ใช้ในการควบคุมระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ สามารถสร้างรวมทั้งปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ โดยการนำประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ ในระบบนั้นๆ มาพัฒนา เพื่อเพิ่มความแม่นยำของสัญญาณควบคุมได้ เช่น ตัวควบคุมฟิชชีเเนติกอัลกอริทึม

4.9.1 วงจรควบคุมการทำงานของเครื่องสูบน้ำยิปซัม

วงจรควบคุมค่าอัตราการไหล ถูกออกแบบเป็นวงจรแบบปิด แสดงดังรูปที่ 4.12 เพื่อควบคุมการทำงานของระบบได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งประกอบด้วย เครื่องวัดอัตราการไหลแบบช่องอ ติดตั้งต่อกับท่อทางด้านส่งของเครื่องสูบน้ำ โดยวัดค่าอัตราการไหลและมี Differential Pressure Transmitter ทำหน้าที่รับสัญญาณความดันแตกต่าง จาก Remote Seal และแปลงสัญญาณความดัน เป็นสัญญาณอนาล็อกขนาด 4 - 20 มิลลิแอมป์ ซึ่งความดันแตกต่างสัมพันธ์กับค่าอัตราการไหล

สัญญาณแบบอนาล็อก จะถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล โดยใช้ Analog to Digital Converter เพื่อเข้าสู่การประมวลผล ผ่านกระบวนการควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก ที่ประกอบด้วย การกำหนดค่าตัวแปรขาเข้า ในรูปของความเป็นสมาชิกหรือที่เรียกว่า ฟัซซี่เซต, การกำหนดกฎการตอบสนอง และวิเคราะห์กฎการควบคุม, และการแปลงฟัซซี่เซตที่ได้จากกฎการควบคุม เป็นสัญญาณควบคุม สัญญาณควบคุมที่ได้อยู่ในรูปสัญญาณดิจิทัล จะถูกแปลงกลับไปเป็นสัญญาณอนาล็อกขนาด 4-20 มิลลิแอมป์ โดย Digital to Analog Converter และส่งไปยังอินเวอร์เตอร์ ที่ทำหน้าที่ ปรับความถี่จากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส โดยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ จะผ่านเข้ามาที่ชุดคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งมีไดโอดเรกติฟาย ทำหน้าที่ แปลงรูปคลื่นจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นกระแสตรง และมีคาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่ต่อขนาน ทำหน้าที่กรองรูปคลื่นให้เรียบมากขึ้น ไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกชุดอินเวอร์เตอร์ สวิตซ์ซึ่ง ให้เกิดย่านความถี่ต่างๆ โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดคงที่ ความถี่ที่สวิตซ์ซึ่งจะมีความกว้างหรือแคบ ตามรูปแบบของ PWM แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ จะถูกส่งเข้าไปยังมอเตอร์ในรูปของคลื่นกระแสไฟฟ้าชานแนวที่มีการสั่นเล็กน้อย เพื่อปรับระดับความเร็วรอบของมอเตอร์ขับเคลื่อนสูบน้ำยิปซัม



รูป 4.12 แสดงองค์ประกอบต่างๆ ในวงจรควบคุมอัตราการไหล ของระบบแยกน้ำออกจากยิปซัม

4.9.2 ข้อมูลพื้นฐาน ที่ใช้ในการออกแบบระบบควบคุมค่าอัตราการไหล

จากการวัดอัตราการไหลด้วยเครื่องวัดแบบช่องอ ที่ติดตั้งในตำแหน่งต่อกับท่อด้านส่งของเครื่องสูบน้ำ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง สัญญาณอนาล็อกขนาด 4 -20 มิลลิแอมป์, ความดันแตกต่าง, และค่าอัตราการไหล ในช่วงใช้งานระบบแยกน้ำฯ แสดงข้อมูลในตารางที่ 4.1

ตาราง 4.1 แสดงข้อมูลสัญญาณอนาล็อก, ความดันแตกต่าง, และค่าอัตราการไหล ในช่วงใช้งาน

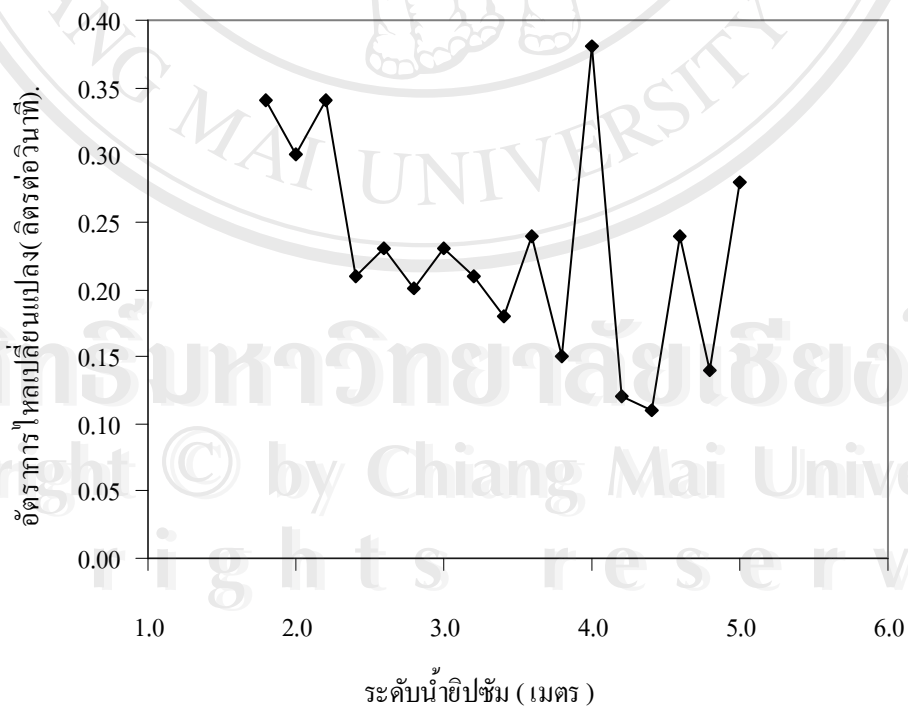
สัญญาณ อนาล็อก (มิลลิแอมป์)	ความดัน แตกต่าง (มิลลิบาร์)	อัตราการ ไหล(ลิตร ต่อวินาที)	สัญญาณ อนาล็อก (มิลลิแอมป์)	ความดัน แตกต่าง (มิลลิบาร์)	อัตราการ ไหล(ลิตร ต่อวินาที)
5.07	26.80	12.20	5.30	32.39	14.39
5.10	27.42	12.44	5.32	33.02	14.64
5.12	28.04	12.69	5.35	33.64	14.88
5.15	28.66	12.93	5.37	34.27	15.13
5.17	29.28	13.18	5.40	34.89	15.37
5.20	29.90	13.42	5.42	35.52	15.61
5.22	30.52	13.66	5.45	36.14	15.86
5.25	31.15	13.91	5.47	36.77	16.10
5.27	31.77	14.15			

จากข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำยิปซัมในถังสะสม, ค่าเสถียรของระบบสูบน้ำ, และค่าอัตราการไหล แสดงผลดังตารางที่ 4.2 เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาพิจารณา พบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหล กับระดับน้ำยิปซัมในถังสะสม ในช่วงเวลาประมาณ 300 วินาที (เป็นช่วงเวลาที่ความดันแตกต่างจะเบี่ยงเบน จากการทดลองไม่เกิน ± 5 เปอร์เซ็นต์) แสดงดังรูปที่ 4.13

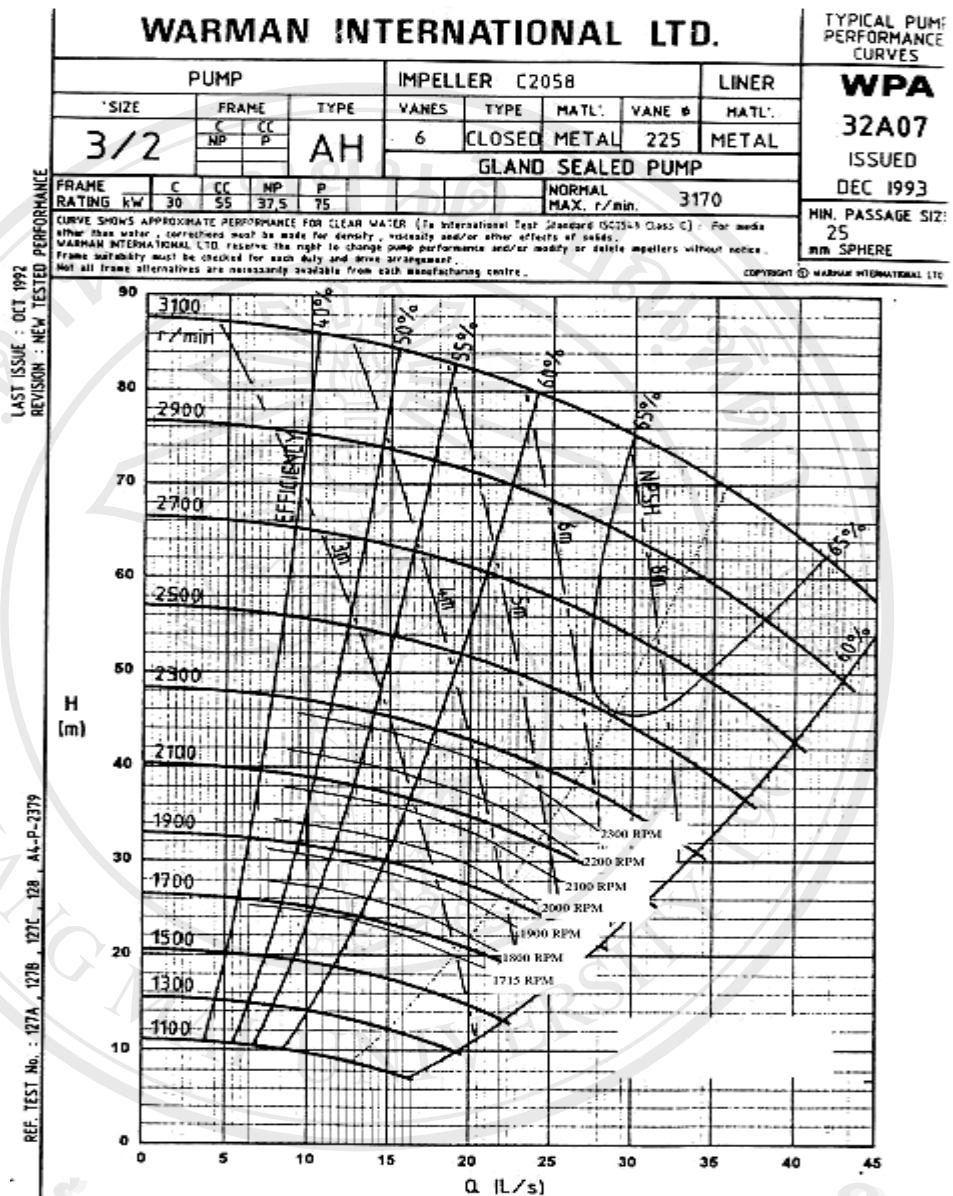
นอกจากนั้น ข้อมูลเส้นโค้งคุณลักษณะ ของเครื่องสูบน้ำแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ที่ทดสอบด้วยน้ำยิปซัม ตามมาตรฐาน JIS B 8301 : 1990 ที่ความเร็วรอบใช้งานคงที่ 1,715 รอบต่อนาที ทดสอบด้วยสายพานและมู่เต้ จากมอเตอร์ที่มีความเร็วรอบ 1,482 รอบต่อนาที แสดงผลเปรียบเทียบกับเส้นโค้งคุณลักษณะ ของบริษัทผู้ผลิตเครื่องสูบน้ำ ที่ทดสอบด้วยน้ำสะอาด แสดงดังรูปที่ 4.14 จากรูป พบว่า เส้นโค้งที่ได้มีลักษณะค่อนข้างแบนราบ เมื่อค่าเสถียรของระบบเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย จะทำให้ค่าอัตราการไหลเปลี่ยนแปลงไปมาก ดังนั้น ระดับน้ำในถังสะสม มี

ตาราง 4.2 แสดงข้อมูลของระดับน้ำยิปซัมในถังสะสม ค่าเสดของระบบ และค่าอัตราการไหล

ระดับ น้ำยิปซัม (เมตร)	เสดรวม ของระบบ (เมตร)	ค่าอัตราการ ไหล(ลิตร ต่อวินาที)	ระดับ น้ำยิปซัม (เมตร)	เสดรวม ของระบบ (เมตร)	ค่าอัตราการ ไหล(ลิตร ต่อวินาที)
1.8	25.1	12.20	3.6	23.3	14.44
2.0	24.9	12.54	3.8	23.1	14.68
2.2	24.7	12.84	4.0	22.9	14.83
2.4	24.5	13.18	4.2	22.7	15.21
2.6	24.3	13.39	4.4	22.5	15.33
2.8	24.1	13.62	4.6	22.3	15.44
3.0	23.9	13.82	4.8	22.1	15.68
3.2	23.7	14.05	5.0	21.9	15.82
3.4	23.5	14.26	5.2	21.7	16.10



รูป 4.13 แสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง ค่าอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลง กับระดับน้ำยิปซัมในถัง



รูป 4.14 แสดงเส้นโค้งคุณลักษณะของเครื่องสูบน้ำจากผู้ผลิต และจากการทดสอบด้วยน้ำยิปซัม รวมทั้งผลการคำนวณด้วย Affinity laws (ที่มา : ตัวแทนจำหน่าย Warman ประจำประเทศไทย, 2548)

อิทธิพลต่อค่าอัตราการไหลมาก จากความเร็วรอบทดสอบ 1,715 รอบต่อนาที สามารถแปลงค่าความเร็วรอบ โดยอาศัยกฎความเกี่ยวเนื่อง (Affinity Laws) ทำนายพฤติกรรมของเครื่องสูบน้ำจากแบบจำลองความเหมือน (Similarity) ดังสมการ (4.3) และ (4.4)

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{..... (4.3)}$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad \text{..... (4.4)}$$

จากกฎความเกี่ยวเนื่อง จะได้ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าเสถียรของระบบสูบน้ำ กับความเร็วรอบเครื่องสูบน้ำ และมอเตอร์ขับ ที่ค่าอัตราการไหลคงที่ 13.9 ลิตรต่อวินาที (50 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง) แสดงในตารางที่ 4.3 จากตาราง พบว่า ต้องปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ ระหว่าง 1,409–1,516 รอบต่อนาที ตลอดช่วงการใช้งาน ตามค่าเสถียรของระบบที่เปลี่ยนแปลง เนื่องจาก มอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องสูบน้ำยี่ห้อปั๊ม เป็นมอเตอร์กระแสสลับ สามเฟสเหนี่ยวนำแบบกรง กระจอก การปรับความเร็วรอบ จะมีตัวแปรสามตัวที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ค่าสลลิป (Slip), จำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ (Pole, p), และความถี่ไฟฟ้า (Frequency, f) ดังสมการ (4.5)

$$N = \frac{(1 - Slip) \times 120 \times f}{p} \quad \text{..... (4.5)}$$

โดยค่า N คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ หน่วย รอบต่อวินาที

$Slip$ คือ ค่าสลลิปของมอเตอร์ ตามทฤษฎีมีค่าเป็นศูนย์ เป็นตัวแปรไร้หน่วย

f คือ ค่าความถี่กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ หน่วย เฮิรตซ์

p คือ จำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ โดยมอเตอร์ที่ใช้มีจำนวน 4 ขั้ว

การปรับค่าสลลิปทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ลดลง และใช้กับมอเตอร์ แบบสลลิปริง เท่านั้น ส่วนการปรับจำนวนขั้ว ไม่นิยมทำเพราะทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ลดลง และมอเตอร์มีราคาสูงขึ้น ดังนั้น การปรับความเร็วรอบ ด้วยการปรับความถี่กระแสไฟฟ้า จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด ในตารางที่ 4.3 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบ ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้งาน กับระดับความเร็วรอบที่คำนวณจากสมการ (4.5) และความถี่ จากการเปรียบเทียบ ความเร็วของมอเตอร์ที่คำนวณได้ กับค่าใช้งานจริง พบว่า มีค่าแตกต่างประมาณ 1–2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเกิดจากค่าสลลิปของมอเตอร์ ดังนั้น ในการวิเคราะห์ จะใช้ค่าความเร็วรอบที่คำนวณได้จากทางทฤษฎีเป็นหลัก

ตาราง 4.3 แสดงข้อมูลค่าเสถียรของระบบฯ ความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำและมอเตอร์ ที่ค่าอัตรา
การไหลคงที่ 13.9 ลิตรต่อวินาที เทียบกับความเร็วมอเตอร์ และความถี่ที่คำนวณได้จาก
สมการ (4.5)

ค่าเสถียร ของระบบฯ (เมตร)	ความเร็วของ เครื่องสูบน้ำ (รอบต่อนาที)	ความเร็วของ มอเตอร์ที่ใช้งาน (รอบต่อนาที)	ความเร็วของ มอเตอร์ที่คำนวณ (รอบต่อนาที)	ความถี่ ไฟฟ้า (เฮิรตซ์)
25.1	1754	1516	1533	51.1
25	1750	1513	1530	51.0
24.8	1743	1506	1524	50.8
24.6	1736	1500	1518	50.6
24.4	1729	1494	1512	50.4
24.2	1722	1488	1506	50.2
24	1715	1482	1500	50.0
23.8	1708	1476	1494	49.8
23.6	1701	1470	1488	49.6
23.4	1693	1463	1482	49.4
23.2	1686	1457	1476	49.2
23	1679	1451	1467	48.9
22.8	1672	1444	1461	48.7
22.6	1664	1438	1455	48.5
22.4	1657	1432	1449	48.3
22.2	1649	1425	1443	48.1
22	1642	1419	1437	47.9
21.8	1635	1412	1431	47.7
21.7	1631	1409	1425	47.5

4.9.3 ระบบควบคุมแบบพีซีลอจิก

4.9.3.1 สัญญาณอินพุตและ สัญญาณเอาต์พุต

เนื่องจาก ใช้กระบวนการประมวลผล ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ ดังนั้น ข้อมูลอินพุต (อัตราการไหล) และข้อมูลเอาต์พุต (ความเร็วรอบมอเตอร์) จะอ้างอิงกับสัญญาณดิจิทัลขนาด 8 บิต (ฐานสิบ) ดังนี้

4.9.3.1.1 สัญญาณอินพุต เป็นสัญญาณอนาล็อก ขนาด 4 – 20 มิลลิแอมป์ ได้จากการวัดค่าอัตราการไหลในช่วงใช้งาน จากหัวข้อ 4.9.2 ถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 8 บิต (0 – 255 ฐานสิบ) แสดงความสัมพันธ์ดังข้อมูลในตารางที่ 4.4 จากข้อมูล พบว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเพิ่มขึ้น 1 ลิตรต่อวินาที สัญญาณดิจิทัลจะเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 64 (ฐานสิบ)

ตาราง 4.4 แสดงข้อมูล ค่าอัตราการไหล กับสัญญาณอนาล็อก และดิจิทัล ของสัญญาณอินพุต

อัตราการไหล (ลิตรต่อ วินาที)	สัญญาณ อนาล็อก (มิลลิแอมป์)	สัญญาณ ดิจิทัล 8 บิต (ฐานสิบ)	อัตราการไหล (ลิตรต่อ วินาที)	สัญญาณ อนาล็อก (มิลลิแอมป์)	สัญญาณ ดิจิทัล 8 บิต (ฐานสิบ)
12.20	5.07	0	14.39	5.30	142
12.44	5.10	16	14.64	5.32	160
12.69	5.12	32	14.88	5.35	176
12.93	5.15	47	15.13	5.37	190
13.18	5.17	63	15.37	5.40	205
13.42	5.20	79	15.61	5.42	221
13.66	5.22	95	15.86	5.45	237
13.91	5.25	112	16.10	5.47	253
14.15	5.27	127			

4.9.3.1.2 สัญญาณเอาต์พุต จากการประมวลผลด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ ได้สัญญาณดิจิทัล ที่แปลงเป็นสัญญาณอนาล็อกขนาด 4-20 มิลลิแอมป์ โดย Digital to Analog Converter เพื่อนำไปใช้ในการควบคุมอินเวอร์เตอร์ โดยปรับระดับความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำปั๊ม ผ่านมอเตอร์ได้ ข้อมูลแสดงในตารางที่ 4.5 จากข้อมูล พบว่า ระดับสัญญาณดิจิทัลเพิ่มขึ้น 10 (ฐานสิบ) การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 4.7 รอบต่อนาที

ตาราง 4.5 แสดงข้อมูล สัญญาณอนาล็อก และดิจิทัล กับความเร็วรอบมอเตอร์ ของเอาต์พุต

สัญญาณ ดิจิทัล 8 บิต (ฐานสิบ)	สัญญาณ อนาล็อก (มิลลิแอมป์)	ความเร็วรอบ มอเตอร์ (รอบต่อวินาที)	สัญญาณ ดิจิทัล 8 บิต (ฐานสิบ)	สัญญาณ อนาล็อก (มิลลิแอมป์)	ความเร็วรอบ มอเตอร์ (รอบต่อวินาที)
0	4.00	1420	130	12.19	1482
10	4.63	1425	140	12.81	1486
20	5.25	1429	150	13.44	1491
30	5.88	1434	160	14.06	1496
40	6.53	1439	170	14.69	1501
50	7.19	1444	180	15.31	1505
60	7.81	1448	190	15.94	1510
70	8.44	1453	200	16.56	1515
80	9.06	1458	210	17.19	1520
90	9.69	1463	220	17.81	1524
100	10.31	1467	230	18.44	1529
110	10.94	1472	240	19.06	1534
120	11.56	1477	250	19.69	1539

4.9.3.2 การกำหนดค่าอัตราการไหลคลาดเคลื่อน ($E(t)$), การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลคลาดเคลื่อน ($\Delta E(t)$), และค่าเอาต์พุตของตัวควบคุม ($S(t)$)

4.9.3.2.1 การกำหนดค่าอัตราการไหลคลาดเคลื่อน ($E(t)$)

การทำงานของระบบแยกน้ำฯ ออกแบบค่าอัตราการไหล 13.9 ลิตรต่อวินาที ในขณะที่เครื่องสูบน้ำยปั๊ม ทำงานที่ค่าอัตราการไหลระหว่าง 16.1–12.2 ลิตรต่อวินาที ตามค่าเสดของระบบ ที่ความเร็วรอบมอเตอร์คงที่ 1,500 รอบต่อวินาที โดยเครื่องสูบน้ำเริ่มเดินเครื่องที่ค่าอัตราการไหล 16.1 ลิตรต่อวินาที จึงต้องมีการปรับค่าอัตราการไหลลดลง (2.2 ลิตรต่อวินาที) จนกระทั่งระดับน้ำในถังสะสมลดลง ที่ ค่าอัตราการไหล 12.2 ลิตรต่อวินาที ซึ่งต่ำกว่าค่าที่ต้องการ จึงต้องปรับค่าอัตราการไหลให้เพิ่มขึ้น (1.7 ลิตรต่อวินาที) ดังนั้น จึงกำหนดให้ค่าอัตราการไหลคลาดเคลื่อน มีค่าตามสมการ (4.6)

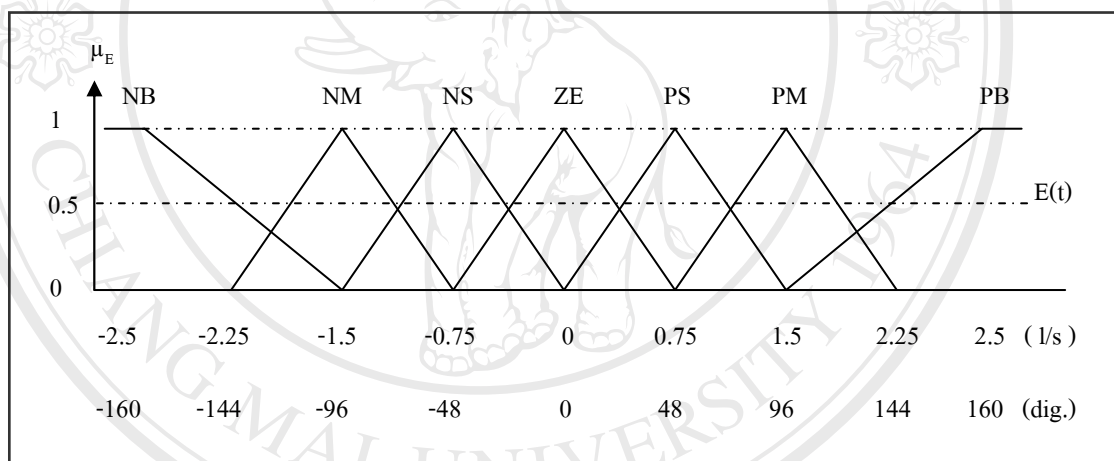
$$E(t) = Q(t) - Q_{sp} \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

โดยค่า $E(t)$ คือ ค่าอัตราการไหลคลาดเคลื่อน ที่เวลาปัจจุบัน หน่วย ลิตรต่อวินาที

$Q(t)$ คือ ค่าอัตราการไหล ที่เวลาปัจจุบัน หน่วย ลิตรต่อวินาที

Q_{sp} คือ ค่าอัตราการไหลที่ต้องการ มีค่าเท่ากับ 13.9 ลิตรต่อวินาที

และกำหนดให้เซตย่อยของค่าอัตราการไหลคลาดเคลื่อน อยู่ ในช่วง -2.5 ถึง $+2.5$ ลิตรต่อวินาที แบ่งช่วงระดับเชิงภาษาออกเป็น 7 ช่วง ประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรกแบ่งเป็น 5 ช่วง คือ NM, NS, ZE, PS และ PM ในแต่ละช่วงจะแบ่งช่วงละ 1.5 เท่าๆกัน มีค่าสูงสุดอยู่ที่จุดกึ่งกลาง และส่วนที่สอง แบ่งเป็น 2 ช่วง คือ NB และ PB มีค่าช่วงละ 1.0 เท่าๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูป 4.15 แสดงการแบ่งระดับเชิงภาษา (Linguistic Level) ของฟัซซี่เซต $E(t)$

4.9.3.2.2 กำหนดค่าการเปลี่ยนแปลง ของค่าอัตราการไหล

คลาดเคลื่อน $\Delta E(t)$

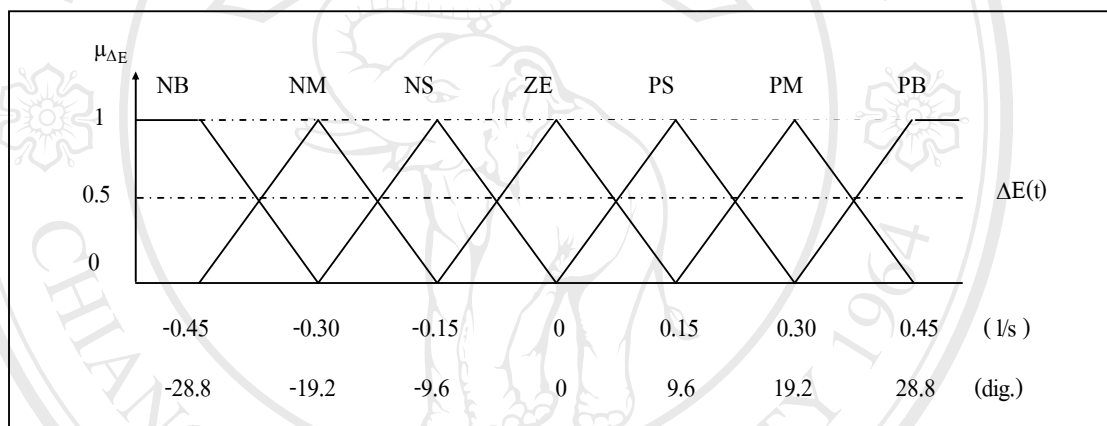
ข้อมูลในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.13 แสดงการเปลี่ยนแปลง ค่า อัตราการไหล ในช่วงเวลาประมาณ 300 วินาที โดยพิจารณาที่ระดับน้ำยิปซัม 5.2 – 1.8 เมตร จะมีการลดลงทุกๆ 0.2 เมตร จากในรูปที่ 4.13 พบว่า อัตราการไหลเปลี่ยนแปลงมากที่สุด เท่ากับ 0.38 ลิตรต่อวินาที ที่ระดับน้ำยิปซัม 4.0 เมตร ค่าการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลคลาดเคลื่อน สามารถหาได้จากสมการ (4.7)

$$\Delta E(t) = E(t) - E(t-1) \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

โดยค่า $\Delta E(t)$ คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้พลังงาน หน่วย ลิตรต่อวินาที

$E(t-1)$ คือ ค่าอัตราการใช้พลังงาน ในเวลาที่ผ่านมา หน่วย ลิตรต่อวินาที

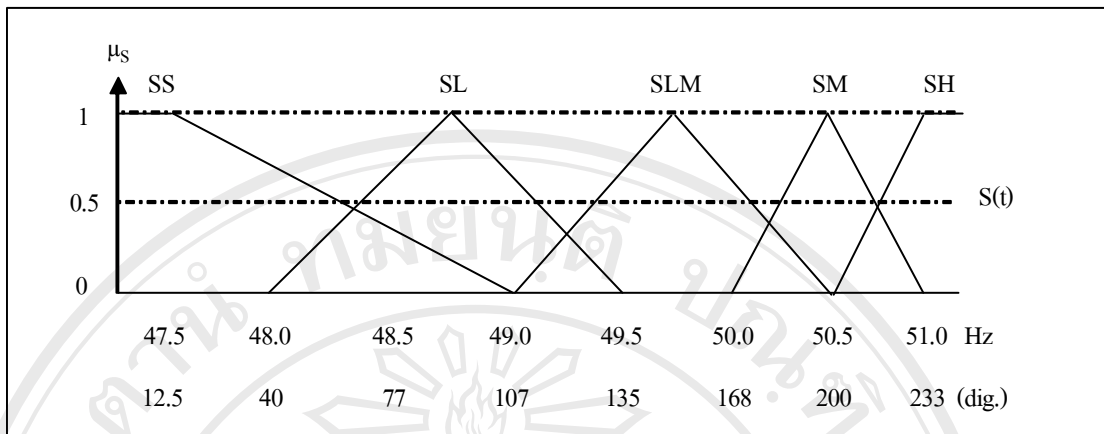
ดังนั้น จึงกำหนดให้ เซตย่อยของฟัซซีเซต ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้พลังงาน อยู่ในช่วง -0.45 ถึง $+0.45$ ลิตรต่อวินาที แบ่งช่วงระดับเชิงภาษาออกเป็น 7 ช่วง ประกอบด้วย 2 ส่วนได้แก่ ส่วนแรกแบ่งเป็น 5 ช่วง คือ NM, NS, ZE, PS และ PM ในแต่ละช่วง จะแบ่งช่วงละ 0.3 เท่าๆกัน มีค่าสูงสุดอยู่ที่จุดกึ่งกลาง และส่วนที่สองแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ NB และ PB มีค่าช่วงละ 0.15 เท่าๆกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูป 4.16 แสดงการแบ่งระดับเชิงภาษา (Linguistic Level) ของฟัซซีเซต $\Delta E(t)$

4.9.3.2.3 การกำหนดค่าเอาต์พุตของตัวควบคุม (S(t))

จากข้อมูลการปรับระดับความเร็วรอบ ของมอเตอร์ ด้วยการปรับความถี่ไฟฟ้า ตามตารางที่ 4.3 และ 4.5 ซึ่งจะใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดช่วงการทำงาน ของตัวควบคุมเอาต์พุต โดยแบ่งช่วงความถี่ ตั้งแต่ 47.5 ถึง 51.1 เฮิรตซ์ หรือที่ระดับความเร็วรอบ 1,425 ถึง 1,533 รอบต่อนาที เป็นช่วงระดับเชิงภาษา 5 ช่วง ประกอบด้วย 4 ส่วนได้แก่ ส่วนแรกอยู่ที่ปลายด้านหนึ่ง คือ SS มีค่าในช่วง 1.5, ส่วนที่สอง แบ่งเป็น 2 ช่วงอยู่ตรงกลาง คือ SL และ SLM มีค่าช่วงละ 1.5 เท่าๆกัน มีค่าสูงสุดอยู่ที่จุดกึ่งกลาง, ส่วนที่สาม อยู่ตรงกลาง คือ SM มีค่าในช่วง 1.0, และส่วนสุดท้ายอยู่ที่ปลายอีกด้านหนึ่ง คือ SH มีค่าในช่วง 0.5 ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูป 4.17 แสดงการแบ่งระดับเชิงภาษา (Linguistic Level) ของฟัซซี่เซต $S(t)$

4.9.3.3 การกำหนดค่าความเป็นสมาชิก หรือ ฟัซซี่เซต

การออกแบบค่าความเป็นสมาชิก คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้ที่สอดคล้องกับฟังก์ชันสมาชิก โดยสามารถปรับระดับตัวแปรด้านเอาต์พุต (ความเร็วรอบมอเตอร์) เพื่อควบคุมให้ค่าอัตราการใช้ เข้าสู่ค่าที่ต้องการได้เร็วและต่อเนื่อง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความไวในการตอบสนองต่อสัญญาณ หรือคือ ค่าความชันสามเหลี่ยม ของฟัซซี่เซต

4.9.3.3.1 ฟัซซี่เซต $E(t)$

ประกอบด้วย 7 เซตย่อย ได้แก่ NB = Negative Big, NM = Negative Medium, NS = Negative Small, ZE = Zero, PS = Positive Big, PM = Positive Medium และ PB = Positive Big ดังรูปที่ 4.15 และนำมาสร้างสมการของเซตย่อย ที่สัมพันธ์กับสัญญาณดิจิทัล ดังนี้

ก. สมาชิกของเซตย่อย NB

$$E(t) < -160 \quad : \mu_{E(NB)} = 1.0 \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

$$-160 \leq E(t) \leq -96 \quad : \mu_{E(NB)} = -0.015 (E(t) + 96) \quad \dots\dots\dots (4.9)$$

ข. สมาชิกของเซตย่อย NM

$$-144 \leq E(t) \leq -96 \quad : \mu_{E(NM)} = 0.021 (E(t) + 144) \quad \dots\dots\dots (4.10)$$

$$96 \leq E(t) \leq -48 \quad : \mu_{E(NM)} = -0.021 (E(t) + 48) \quad \dots\dots\dots (4.11)$$

ค. สมาชิกของเซตย่อย NS

$$-96 \leq E(t) \leq -48 \quad : \mu_{E(NS)} = 0.021 (E(t) + 96) \quad \dots\dots\dots (4.12)$$

$$-48 \leq E(t) \leq 0 \quad : \mu_{E(NS)} = -0.021 (E(t)) \quad \dots\dots\dots (4.13)$$

ง. สมาชิกของเซตย่อย ZE

$$-48 \leq E(t) \leq 0 \quad : \mu_{E(ZE)} = 0.021 (E(t) + 48) \quad \dots (4.14)$$

$$0 \leq E(t) \leq 48 \quad : \mu_{E(ZE)} = -0.021 (E(t) - 48) \quad \dots (4.15)$$

จ. สมาชิกของเซตย่อย PS

$$0 \leq E(t) \leq 48 \quad : \mu_{E(PS)} = 0.021 (E(t)) \quad \dots (4.16)$$

$$48 \leq E(t) \leq 96 \quad : \mu_{E(PS)} = -0.021 (E(t) - 96) \quad \dots (4.17)$$

ฉ. สมาชิกของเซตย่อย PM

$$48 \leq E(t) \leq 96 \quad : \mu_{E(PM)} = 0.021 (E(t) - 48) \quad \dots (4.18)$$

$$96 \leq E(t) \leq 144 \quad : \mu_{E(PM)} = -0.021 (E(t) - 144) \quad \dots (4.19)$$

ช. สมาชิกของเซตย่อย PB

$$96 \leq E(t) \leq 160 \quad : \mu_{E(PB)} = 0.015 (E(t) - 96) \quad \dots (4.20)$$

$$E(t) > 160 \quad : \mu_{E(PB)} = 1.0 \quad \dots (4.21)$$

4.9.3.3.2 ฟัซซี่เซต $\Delta E(t)$

ประกอบด้วย 7 เซตย่อย เช่นเดียวกับ ฟัซซี่เซต $E(t)$ ดังรูปที่ 4.16 และนำมาสร้างสมการความสัมพันธ์ของเซตย่อย ที่สัมพันธ์กับสัญญาณดิจิทัล ดังนี้

ช. สมาชิกของเซตย่อย NB

$$\Delta E(t) < -28.8 \quad : \mu_{\Delta E(NB)} = 1.0 \quad \dots (4.22)$$

$$-28.8 \leq \Delta E(t) \leq -19.2 \quad : \mu_{\Delta E(NB)} = -0.104 (\Delta E(t) + 19.2) \quad \dots (4.23)$$

ฉ. สมาชิกของเซตย่อย NM

$$-28.8 \leq \Delta E(t) \leq -19.2 \quad : \mu_{\Delta E(NM)} = 0.104 (\Delta E(t) + 28.8) \quad \dots (4.24)$$

$$-19.2 \leq \Delta E(t) \leq -9.6 \quad : \mu_{\Delta E(NM)} = -0.104 (\Delta E(t) + 9.6) \quad \dots (4.25)$$

ญ. สมาชิกของเซตย่อย NS

$$-19.2 \leq \Delta E(t) \leq -9.6 \quad : \mu_{\Delta E(NS)} = 0.104 (\Delta E(t) + 19.2) \quad \dots (4.26)$$

$$-9.6 \leq \Delta E(t) \leq 0 \quad : \mu_{\Delta E(NS)} = -0.104 (\Delta E(t)) \quad \dots (4.27)$$

ฎ. สมาชิกของเซตย่อย ZE

$$-9.6 \leq \Delta E(t) \leq 0 \quad : \mu_{\Delta E(ZE)} = 0.104 (\Delta E(t) + 9.6) \quad \dots (4.28)$$

$$0 \leq \Delta E(t) \leq 9.6 \quad : \mu_{\Delta E(ZE)} = -0.104 (\Delta E(t) - 9.6) \quad \dots (4.29)$$

ฎ. สมาชิกของเซตย่อย PS

$$0 \leq \Delta E(t) \leq 9.6 \quad : \mu_{\Delta E(PS)} = 0.104 (\Delta E(t)) \quad \dots\dots (4.30)$$

$$9.6 \leq \Delta E(t) \leq 19.2 \quad : \mu_{\Delta E(PS)} = -0.104 (\Delta E(t) - 19.2) \dots\dots (4.31)$$

ฐ. สมาชิกของเซตย่อย PM

$$9.6 \leq \Delta E(t) \leq 19.2 \quad : \mu_{\Delta E(PM)} = 0.104 (\Delta E(t) - 9.6) \quad \dots\dots (4.32)$$

$$19.2 \leq \Delta E(t) \leq 28.8 \quad : \mu_{\Delta E(PM)} = -0.104 (\Delta E(t) - 28.8) \dots\dots (4.33)$$

ท. สมาชิกของเซตย่อย PB

$$19.2 \leq \Delta E(t) \leq 28.8 \quad : \mu_{\Delta E(PB)} = 0.104 (\Delta E(t) - 19.2) \dots\dots (4.34)$$

$$\Delta E(t) > 28.8 \quad : \mu_{\Delta E(PB)} = 1.0 \quad \dots\dots (4.35)$$

4.9.3.3 ฟัซซี่เซต S(t)

การแบ่งฟัซซี่เซต S(t) แบ่งออกเป็น 5 เซตย่อย ได้แก่ SS = Speed Slow, SL = Speed Low, SLM = Speed medium Low, SM = Speed Medium และ SH = Speed High อ้างอิงการแบ่งช่วง ดังรูปที่ 4.17 และสร้างสมการความสัมพันธ์กับสัญญาณดิจิทัล ได้ดังนี้

ฒ. สมาชิกของเซตย่อย SS

$$S(t) < 12.5 \quad : \mu_{S(SS)} = 1.0 \quad \dots\dots (4.36)$$

$$12.5 \leq S(t) \leq 107 \quad : \mu_{S(SS)} = -0.011 (S(t) - 107) \quad \dots\dots (4.37)$$

ณ. สมาชิกของเซตย่อย SL

$$40 \leq S(t) \leq 92 \quad : \mu_{S(SL)} = 0.019 (S(t) - 40) \quad \dots\dots (4.38)$$

$$92 \leq S(t) \leq 135 \quad : \mu_{S(SL)} = -0.019 (S(t) - 135) \quad \dots\dots (4.39)$$

ด. สมาชิกของเซตย่อย SLM

$$107 \leq S(t) \leq 153.5 \quad : \mu_{S(SM)} = 0.022 (S(t) - 107) \quad \dots\dots (4.40)$$

$$153.5 \leq S(t) \leq 200 \quad : \mu_{S(SM)} = -0.022 (S(t) - 200) \quad \dots\dots (4.41)$$

ต. สมาชิกของเซตย่อย SM

$$168 \leq S(t) \leq 200 \quad : \mu_{S(SM)} = 0.031 (S(t) - 168) \quad \dots\dots (4.42)$$

$$200 \leq S(t) \leq 232 \quad : \mu_{S(SM)} = -0.031 (S(t) - 232) \quad \dots\dots (4.43)$$

ถ. สมาชิกของเซตย่อย SH

$$200 \leq S(t) \leq 232 \quad : \mu_{S(SH)} = 0.031 (S(t) - 200) \quad \dots\dots (4.44)$$

$$S(t) > 232 \quad : \mu_{S(SH)} = 1.0 \quad \dots\dots (4.45)$$

4.9.3.4 การกำหนดกฎการตอบสนอง และการวิเคราะห์กฎการควบคุม

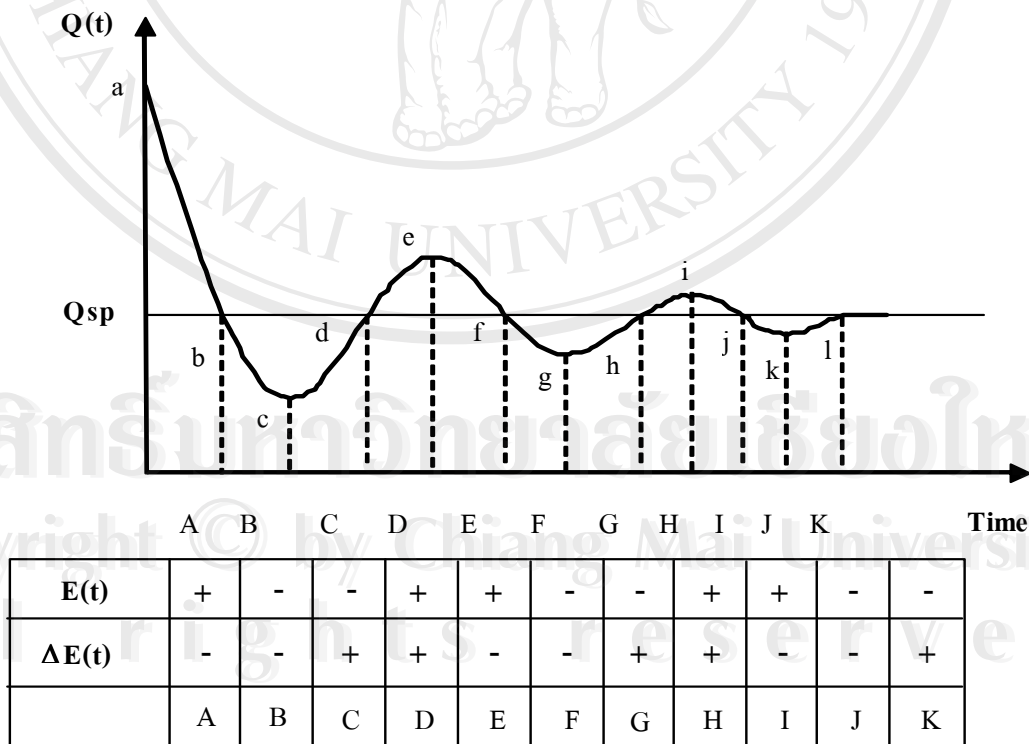
การตอบสนองของระบบควบคุม โดยทั่วไปจะอยู่ในรูปขั้นบันได และเกิดในลักษณะชั่วคราว (Transient) ดังแสดงในรูปที่ 4.18 การตอบสนองแบบขั้นบันได ของระบบควบคุมอัตราการไหล ได้จากการระบุค่าอัตราการไหลคลาดเคลื่อน และค่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลคลาดเคลื่อน โดยต้องการออกแบบระบบควบคุมเพื่อลดค่าอัตราการไหล จากเครื่องสูบน้ำ ที่เกินความต้องการ (Overshoot) และลดเวลาใช้ในการตอบสนองไปสู่ค่าอัตราการไหลที่ต้องการ (Rise Time) โดยกำหนดให้ เซตย่อยของฟังก์ชัน $E(t)$, $\Delta E(t)$, และ $S(t)$ มีดังนี้

N คือ ค่าเป็นลบ, Z คือ ค่าเป็นศูนย์, และ P คือ ค่าเป็นบวก

โดยมีกฎการควบคุมแบบฟังก์ชันอีก 3 ส่วน ดังนี้

- ส่วนของกฎที่ทำหน้าที่ ลดเวลาขาลง (Shorten Rise Time)
- ส่วนของกฎที่ทำหน้าที่ ลดค่าอัตราการไหลที่มากเกินความต้องการ (Reduce Overshoot)
- ส่วนของกฎที่ทำหน้าที่ ลดการแกว่ง (Reduce Oscillation)

จากรูปที่ 4.18 นำความสัมพันธ์ของการตอบสนองแบบขั้นบันได มาสร้างเป็นกฎการควบคุม ในแบบเซตย่อยของฟังก์ชัน จะได้กฎการควบคุมอย่างง่าย ดังตารางที่ 4.6



รูป 4.18 แสดงการตอบสนองแบบขั้นบันไดของระบบควบคุม (System Step Response)

ตาราง 4.6 แสดงกฎการควบคุมเชิงภาษาอย่างง่าย P, N และ Z

กฎ	E(t)	$\Delta E(t)$	S(t)	ตำแหน่ง	หน้าที่กฎ
1	P	Z	P	จุด a, e, i	ลดเวลาขาลง
2	Z	N	N	จุด b, f, j	ลดเอาต์พุต
3	N	Z	N	จุด c, g, k	ลดเอาต์พุต
4	Z	P	P	จุด d, h, l	ลดการแกว่ง
5	Z	Z	Z	จุดที่ต้องการ	หยุดระบบ
6	P	N	P	ช่วง A, E	ลดเวลาขาลง

กฎ	E(t)	$\Delta E(t)$	S(t)	ตำแหน่ง	หน้าที่กฎ
7	P	N	Z	ช่วง I	หยุดระบบ
8	N	N	N	ช่วง B, F, J	ลดเอาต์พุต
9	N	P	N	ช่วง C, G	ลดเอาต์พุต
10	N	P	Z	ช่วง K	หยุดระบบ
11	P	P	P	ช่วง D, H	ลดการแกว่ง

จากกฎควบคุมอย่างง่ายในตาราง 4.6 นำมาจัดทำเป็นกฎควบคุม แบบพีชชีลอจิก สำหรับ การควบคุมค่าอัตราการไหลของเครื่องสูบน้ำ โดยเพิ่มระดับความละเอียดให้มากขึ้น เป็นค่ามาก, ปานกลาง, และน้อย จะได้กฎควบคุมที่แสดง ในตารางที่ 4.7

ตาราง 4.7 แสดงกฎการควบคุมเชิงภาษาแบบพีชชีลอจิก PB, PM, PS, NB, NM, NS และ ZE

กฎ	E(t)	$\Delta E(t)$	S(t)	ตำแหน่ง	หน้าที่กฎ
1	PB	ZE	PB	จุด a	ลดเวลาขาลง
2	PM	ZE	PM	จุด e	ลดเวลาขาลง
3	PS	ZE	PS	จุด i	ลดเวลาขาลง
4	ZE	NB	NB	จุด b	ลดเอาต์พุต
5	ZE	NM	NM	จุด f	ลดเอาต์พุต
6	ZE	NS	NS	จุด j	ลดเอาต์พุต
7	NB	ZE	NB	จุด c	ลดเอาต์พุต
8	NM	ZE	NM	จุด g	ลดเอาต์พุต
9	NS	ZE	NS	จุด k	ลดเอาต์พุต
10	ZE	PB	PB	จุด d	ลดการแกว่ง
11	ZE	PM	PM	จุด h	ลดการแกว่ง
12	ZE	PS	PS	จุด l	ลดการแกว่ง

กฎ	E(t)	$\Delta E(t)$	S(t)	ตำแหน่ง	หน้าที่กฎ
13	ZE	ZE	ZE	จุดที่ต้องการ	หยุดระบบ
14	PB	NS	PM	ช่วง A	ลดเวลาขาลง
15	PM	NS	PS	ช่วง E	ลดเวลาขาลง
16	PS	NS	ZE	ช่วง I	หยุดระบบ
17	NB	NS	NB	ช่วง B	ลดเอาต์พุต
18	NM	NS	NM	ช่วง F	ลดเอาต์พุต
19	NS	NS	NS	ช่วง J	ลดเอาต์พุต
20	NB	PS	NM	ช่วง C	ลดเอาต์พุต
21	NM	PS	NS	ช่วง G	ลดเอาต์พุต
22	NS	PS	ZE	ช่วง K	หยุดระบบ
23	PB	PS	PB	ช่วง D	ลดการแกว่ง
24	PM	PS	PB	ช่วง H	ลดการแกว่ง

เปรียบเทียบกฎการควบคุมเชิงภาษา จากการตอบสนองแบบขั้นบันไดของระบบควบคุม ในตารางที่ 4.7 กับ ฟังก์ชันเซตเอาต์พุต $S(t)$ โดยกำหนดให้

PB (Positive Big) คือ SH (Speed High),
 PM (Positive Medium) คือ SM (Speed Medium),
 PS (Positive Small) คือ SLM (Speed medium Low),
 ZE (Zero) คือ SL (Speed Low),
 NS (Negative Small), NM (Negative Medium) และ NB (Negative Big) คือ SS (Speed Slow)

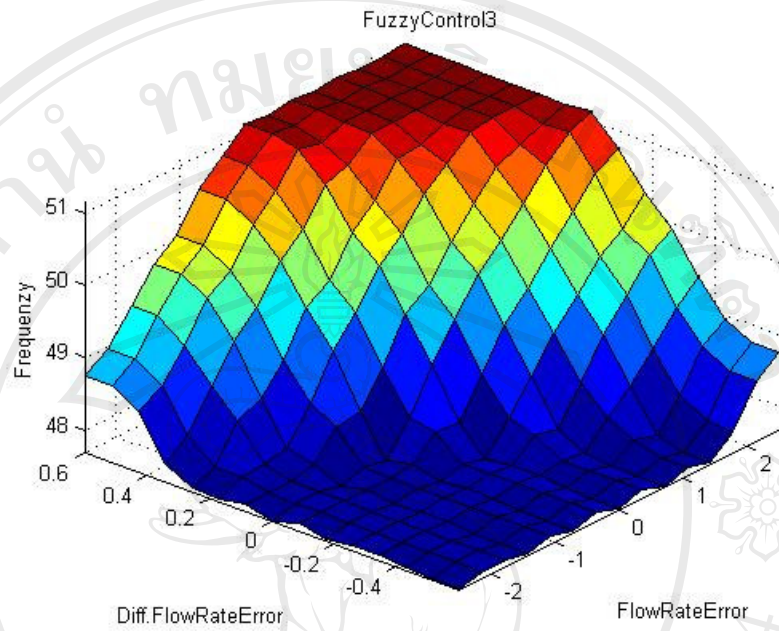
ตาราง 4.8 แสดงกฎการควบคุมที่จะใช้ในระบบควบคุมอัตราการไหล ของเครื่องสูบน้ำยิปซัม

$E(t) / \Delta E(t)$	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
PB	SH	SH	SH	SH	SM	SLM	SL
PM	SH	SH	SH	SM	SLM	SL	SS
PS	SH	SH	SM	SLM	SL	SS	SS
ZE	SH	SM	SLM	SL	SS	SS	SS
NS	SM	SLM	SL	SS	SS	SS	SS
NM	SLM	SL	SS	SS	SS	SS	SS
NB	SL	SS	SS	SS	SS	SS	SS

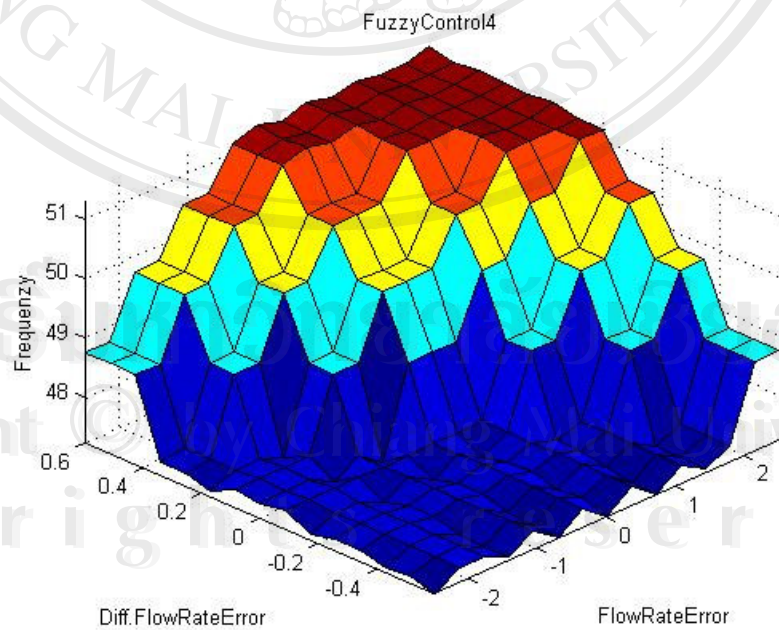
4.9.3.5 การแปลงกฎควบคุม เป็นสัญญาณควบคุม

จากกฎการควบคุมในตารางที่ 4.8 เป็นกฎในเชิงภาษา การเปลี่ยนกฎในเชิงภาษาเป็นสัญญาณควบคุมใช้การดีฟัซซิฟิเคชัน โดยในงานวิจัยนี้ใช้การประมวลผลด้วย Fuzzy Logic Tool Box ในซอฟต์แวร์สำเร็จรูป MATLAB ด้วยวิธีค่ากลางของพื้นที่ (Center of Area Method, COA) และวิธีเฉลี่ยค่าสูงสุด (Mean of Maxima, HM) จากการประมวลผล (แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์สัญญาณควบคุม ด้วยซอฟต์แวร์ ในภาคผนวก ข) ได้สัญญาณควบคุมที่แสดงในรูปแบบกราฟิก สำหรับวิธีค่ากลางของพื้นที่ และวิธีเฉลี่ยค่าสูงสุด แสดงดังรูปที่ 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ จากรูปใช้ระดับสี่แทนค่าสัญญาณควบคุม, ความเรียบของพื้นผิวแทนความต่อเนื่องของสัญญาณควบคุม, ค่าในแกนแนวนอนทางด้านขวา แทนค่าอัตราการไหลคลาดเคลื่อน, ค่าในแกน

แนวอนทางด้านซ้าย แทนค่าการเปลี่ยนแปลงอัตราไหลคลาดเคลื่อน, และ ค่าในแกนแนวดิ่ง แทนค่าความถี่ไฟฟ้า



รูป 4.19 แสดงสัญญาณควบคุม ที่ได้จากการดีฟัซซิฟิเคชัน ด้วยวิธีค่ากลางของพื้นที่ (COA)



รูป 4.20 แสดงสัญญาณควบคุม ที่ได้จากการดีฟัซซิฟิเคชัน ด้วยวิธีเฉลี่ยค่าสูงสุด (HM)

4.10 การวิจารณ์ การออกแบบระบบควบคุม ค่าอัตราการไหล

สัญญาณควบคุมที่ได้จากการออกแบบระบบควบคุมค่าอัตราการไหล ผ่านกระบวนการฟัซซี่ลอจิก ที่ประมวลผลด้วย Fuzzy Logic Tool Box ในซอฟต์แวร์สำเร็จรูป MATLAB ด้วยการดีฟัซซี่ฟิเคชันสองวิธีแสดงผลดังรูปที่ 4.19 และ 4.20 เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ พบว่า วิธีค่ากลางของพื้นที่ ให้พื้นที่ที่มีความต่อเนื่องมากกว่าวิธีเฉลี่ยค่าสูงสุด แสดงให้เห็นว่า วิธีค่ากลางของพื้นที่ให้สัญญาณควบคุมที่มีความต่อเนื่อง การเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรอินพุตเพียงเล็กน้อย ระบบควบคุมจะให้ผลลัพธ์ตัวแปรเอาต์พุตเพียงเล็กน้อย ถึงแม้ว่า จากผลการเปรียบเทียบ ของ Leonid Reznik (1997) จะสรุปว่า วิธีเฉลี่ยค่าสูงสุดมีคุณลักษณะที่ดีกว่าวิธีค่ากลางของพื้นที่ โดยเฉพาะสามารถใช้ในการคำนวณระบบที่ซับซ้อน แต่จากการพิจารณาสัญญาณควบคุมที่ได้ บ่งบอกว่าวิธีค่ากลางของพื้นที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า และเหมาะสมสำหรับที่จะนำมาใช้ ในการจัดทำระบบควบคุมอัตราการไหลของเครื่องสูบน้ำยิปซัม เนื่องจากเส้นโค้งคุณลักษณะของเครื่องสูบน้ำค่อนข้างแบนราบ เมื่อค่าเซดรวมของระบบสูบน้ำ เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย จะทำให้ค่าอัตราการไหลเปลี่ยนแปลงไปมาก ดังนั้น ความต่อเนื่องของสัญญาณควบคุมมีความสำคัญมาก

เมื่อคำนวณเวลาตอบสนอง ของอุปกรณ์ต่อระบบควบคุมอัตราการไหล โดยการปรับค่าความถี่ไฟฟ้าของมอเตอร์ขับเคลื่อนเครื่องสูบน้ำ ผ่านอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์ โดยรักษาค่าสัดส่วน แรงดันไฟฟ้าต่อค่าความถี่ให้คงที่ ในที่นี้จะใช้ค่าแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ และค่าความถี่ของอินเวอร์เตอร์ 50 เฮิร์ต ค่าสัดส่วนแรงดันต่อความถี่ จึงมีค่าเท่ากับ 4.4 โวลต์ต่อเฮิร์ต พิจารณาการปรับความเร็วรอบมอเตอร์ ระหว่าง 1,425–1,533 รอบต่อนาที เพื่อให้ได้ค่าอัตราการไหลคงที่ 13.9 ลิตรต่อวินาที เมื่อใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ กับความเร็วรอบมอเตอร์ ที่คำนวณได้ตามตารางที่ 4.3 แปลงผลลัพธ์ให้อยู่ในรูปค่าแรงดันไฟฟ้า ใช้ค่าสัดส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่ แสดงขั้นตอนการคำนวณในภาคผนวก ญ จากผลการคำนวณที่ได้ พบว่า เวลาที่สายพานแยกน้ำออกจากยิปซัม ตอบสนองต่อการปรับความเร็วรอบมอเตอร์ อยู่ระหว่าง 313 ถึง 255 วินาที

4.11 ปัญหา, อุปสรรค, และข้อควรระวังในการวิจัย

4.11.1 ปัญหาและอุปสรรคในการวิจัย

เนื่องจาก สถาบันมาตรฐานต่างๆ ยังไม่ได้จัดทำมาตรฐาน สำหรับเครื่องวัดการไหลแบบช่องอ เหมือนกับ เครื่องวัดชนิดอื่น เช่น Orifice, Nozzle, และ Venturi ที่ถูกจัดให้อยู่ใน

ประเภทเดียวกัน ดังนั้น จึงจำเป็น ต้องนำมาตรฐานของเครื่องวัดที่มีหลักการเดียวกัน มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบห้อง และระบบท่อทดลอง ได้แก่ มาตรฐาน ISO 5167 – 1 : 2003, ISO 2186 – 1973 (E), ISO/TR 3313 : 1998 (E), และ ISO 8316 : 1987 (E) โดยพบปัญหาหลายอย่างที่ เป็นข้อจำกัดในงานวิจัย ได้แก่

4.11.1.1 ห้องที่ใช้ ทำจากวัสดุชนิดไฟเบอร์กลาส ซึ่งเป็นชนิดเดียวกับ ระบบท่อที่ใช้งานอยู่ เพื่อให้มีขนาดภายในห้องต่อเนื่องกับท่อมากที่สุด และทนทานต่อสภาพการกัดกร่อนจากน้ำยิปซัมได้ จากกระบวนการขึ้นรูป ทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ของรูจุดวัดความดันใหญ่กว่ามาตรฐานกำหนด (ไม่เกิน 13 มม.) ซึ่งทำรูได้เล็กที่สุด 15 มม. โดยผู้วิจัยต้องการขนาด 12.5 มม. นอกจากนั้น ข้อจำกัดเรื่องการติดตั้ง และความแข็งแรงในการติดตั้ง ชุดระบายอากาศและ ชะล้างตะกอน เข้ากับหน้าแปลนรับสัญญาณความดัน รวมทั้งติดตั้งแล้วเข้ากับรูจุดวัดความดันทำให้ จำเป็น ต้องขยายระยะของรูจุดวัดความดัน ซึ่งตามมาตรฐานกำหนดให้มีระยะสั้นที่สุด จึงแก้ไขโดยการตั้งค่า ศูนย์ (Zero) ที่ Diff. Pressure Transmitter ทุกครั้ง หลังติดตั้งเข้ากับ เครื่องวัดการไหลแบบห้อง เพราะระดับที่แตกต่างกัน ระหว่างหน้าแปลนทั้ง 2 ด้าน มีผลต่อค่าความดันที่อ่านได้

4.11.1.2 ห้องติดตั้งในตำแหน่งที่ 3 อยู่ในท่อแนวราบลงสู่ท่อปลายเปิดในแนวดิ่ง ซึ่งอาจทำให้ น้ำยิปซัมไหลไม่เต็มหน้าตัดห้อง จึงจำเป็นต้องลดขนาดท่อตรงปลายเปิดลง และติดตั้งประตุน้ำเพื่อเบี่ยงทิศทางการไหล เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐาน แต่เป็นการเพิ่มความยุ่งยากในการดำเนินการทดลอง เพราะต้องเปิด / ปิดประตุน้ำให้พร้อมกัน และใช้เวลาน้อยที่สุด

4.11.1.3 เนื่องจากระบบท่อทดลองที่ออกแบบ ติดตั้งอยู่ในระบบท่อที่มีการใช้งาน โดยใช้อุปกรณ์บางส่วนในระบบท่อจริง ได้แก่ ถึงสะสมและเครื่องสูบน้ำยิปซัม ซึ่งต้องทำการทดลองกับห้องที่มีขนาดเท่ากับขนาดท่อที่ใช้งานในระบบจริง จึงมีผลกระทบต่อ การดำเนินการทดลอง เก็บข้อมูล เพราะถูกจำกัดด้วยเวลา สภาพการใช้งาน และการหยุดอุปกรณ์เพื่อบำรุงรักษา นอกจากนั้น ในระหว่างการดำเนินการทดลอง เกิดการอุดตันในรูของจุดวัดความดัน โดยอาการที่เกิดการอุดตัน จะอยู่ที่ในรูจุดวัดความดัน ด้านความดันต่ำ สังเกตได้ชัดเจน ในกรณีที่ เกิดการอุดตันสัญญาณความดันจะมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ และหยุดนิ่งในที่สุด สันนิษฐานว่า เมื่อเกิดการอุดตันในรูด้านความดันต่ำ ในขณะที่รูด้านความดันสูงยังไม่อุดตัน สัญญาณความดันจึงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนอุดตันทั้ง 2 ด้าน ค่าจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลง ก็จำเป็นต้องทำการทดลองเก็บข้อมูลสภาวะนั้นๆ ซ้ำใหม่อีกครั้ง

4.11.1.4 ก่อนเริ่มการทดลองทุกครั้ง จะต้องตรวจวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นน้ำยิปซัม ให้ได้ตามที่กำหนดไว้ แต่เนื่องจาก ถึงสะสมติดตั้งอยู่ในระบบจริง จึงต้องรอให้

ระบบสมดุลก่อน จึงจะเริ่มดำเนินการทดลอง โดยการปิดวาล์วที่เติมน้ำยิปซัมเข้าสู่ถังสะสม และต้องมีการเติมยิปซัมแห้งลงไปในถัง เพื่อเพิ่มความเข้มข้น และเติมน้ำลงไปเรื่อยๆ เพื่อลดความเข้มข้น และจำเป็นต้องรออย่างน้อย 15 นาที เพื่อให้ความเข้มข้นน้ำยิปซัมในถังสะสม ใกล้เคียงกัน

4.11.2 ข้อควรระวังในการทดลอง

4.11.2.1 อุปกรณ์วัดค่าความดันแตกต่าง (Diff. Pressure Transmitter) จะมีหน้าแปนรับสัญญาณความดัน (Remote Seal) 2 ด้าน ที่ได้รับการออกแบบให้ทำงานแตกต่างกัน การติดตั้งสลับตำแหน่ง ทำให้การอ่านค่าไม่ถูกต้อง หน้าแปนรับสัญญาณความดันค่าสูง ต้องติดตั้งอยู่ทางด้านโค้งนอกของข้ออเสมอ ส่วนหน้าแปนรับสัญญาณความดันค่าต่ำ ต้องติดตั้งอยู่ทางด้านโค้งในของข้ออ และในการประกอบหน้าแปนรับสัญญาณความดัน พื้นที่บริเวณหน้าแปน ต้องไม่ถูกกดทับ สังเกตได้จากค่าความดันจะขยับไปมา ในระหว่างการประกอบ โดยที่ยังไม่มีของเหลวไหลภายในระบบท่อ ซึ่งแก้ไขโดยการติดตั้งหน้าแปนให้ลอยออกจากจุดยึด

4.11.2.2 ก่อนเริ่มบันทึกผลการทดลอง ต้องทำการชะล้างตะกอนภายในรูของจุดวัดความดัน และบริเวณหน้าแปนรับสัญญาณความดัน ออกก่อนทุกครั้ง เพราะจะทำให้หน้าแปนรับสัญญาณความดันไม่ทำงาน สังเกตได้จากค่าความดันแตกต่าง จะมีค่าค้างอยู่ที่ค่าใดค่าหนึ่ง รวมทั้งต้องระบายอากาศที่ตกค้าง ภายในช่องรับสัญญาณความดันด้วย หากมีอากาศตกค้าง ค่าความดันแตกต่างจะแกว่งมาก บางครั้งค่าความดันแกว่งมากถึง ± 5 มิลลิบาร์ โดยปกติ ในช่วงที่หน้าแปนรับสัญญาณความดัน จะมีค่าเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยไม่เกิน ± 1.6 มิลลิบาร์

4.11.2.3 การเปิด และปิดวาล์วที่แยกหน้าสัญญาณความดัน กับหน้าแปนรับสัญญาณความดันแตกต่าง ต้องทำอย่างช้าๆ เพื่อป้องกันแรงกระแทก จากน้ำยิปซัมพุ่งปะทะแผ่นไดอะแฟรม สังเกตได้จากค่าความดันแตกต่างที่หน้าจอ ของอุปกรณ์บันทึกค่า (Data Recorder) มีค่าสูงจนถึงค่าพิคคบนของ อุปกรณ์รับสัญญาณความดัน รวมถึงการเปิดวาล์วด้านโค้งนอกของข้ออ ก่อนด้านโค้งในก็จะทำให้เกิดอาการเดียวกัน ดังนั้น ควรเปิดวาล์วให้พร้อมกัน และเปิดช้าๆ

4.11.2.4 หลังจากติดตั้งหน้าแปนรับสัญญาณความดัน เข้ากับหน้าแปนที่ปลายรูจุดวัดความดัน ของเครื่องวัดการไหลแบบข้ออ จะพบว่า มีค่าความดันแตกต่าง เนื่องจากระดับที่แตกต่างกัน ระหว่างหน้าแปนทั้ง 2 ด้าน ทำการแก้ไขโดยการเปิดน้ำสะอาด เข้าไปในชุดระบายอากาศของหน้าแปนทั้ง 2 ด้าน จนอากาศไหลออกจากจุดวัดทั้งหมด ปิดวาล์วรอจนกระทั่งค่าความดันลดลง แล้วจึงทำการตั้งค่า ศูนย์ (Zero) ที่ตัวเครื่อง (Diff. Pressure Transmitter)