

อภินันทนาการ



สำนักหอสมุด



การควบคุมค่าพีเอชของน้ำด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก
WATER PH CONTROL USING FUZZY LOGIC CONTROLLER



นายกฤษฎา นาค๊ะ รหัส 56362539
นางสาวรัตนาภรณ์ ยาใจ รหัส 56363116

๒๑ CD

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
วันลงทะเบียน 24 ส.ค. 2561
เลขทะเบียน 1922025 ✓
เลขเรียกหนังสือ ๗๕

ก ๒๕๔ ก
๒๕๕๙

CD-STL 74

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
ปีการศึกษา 2559



ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ การควบคุมค่าพีเอชของน้ำด้วยตัวควบคุมแบบพีซีลอคจิก
ผู้ดำเนินโครงการ นากฤษฎา นาดีะ รหัส 56362539
นางสาวรัตนภรณ์ ยาใจ รหัส 56363116
ที่ปรึกษาโครงการ ดร. สราวุฒิ วัฒนวงศ์พิทักษ์
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา 2559

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

.....ที่ปรึกษาโครงการ
(ดร. สราวุฒิ วัฒนวงศ์พิทักษ์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มุขิตา สงฆ์จันทร์)

.....กรรมการ
(ดร. จิรวดี ผลประเสริฐ)

ชื่อหัวข้อโครงการ การควบคุมค่าพีเอชของน้ำด้วยตัวควบคุมแบบพีชซีลอจิก
ผู้ดำเนินโครงการ นากฤษฎา นาดีะ รหัส 56362539
นางสาวรัตนภรณ์ ยาใจ รหัส 56363116
ที่ปรึกษาโครงการ ดร. สราวุฒิ วัฒนวงศ์พิทักษ์
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเครื่องควบคุมค่าพีเอชของน้ำที่มีตัวควบคุมแบบพีชซีลอจิกเป็นตัวกำหนดระยะเวลาที่ใช้ในการหยดสารละลายบัฟเฟอร์ที่เป็นกรดหรือมีค่าพีเอช 4 และสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีความเป็นเบสหรือมีค่าพีเอช 10 เพื่อปรับค่าพีเอชของน้ำให้ได้ค่าพีเอชที่มีความถูกต้องและแม่นยำตรงกับค่าที่ต้องการ โดยเครื่องนี้จะถูกออกแบบให้สามารถปรับค่าพีเอชที่มีช่วงตั้งแต่ 6 ถึง 8 โดยเครื่องควบคุมค่าพีเอชนี้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูโน เป็นตัวประมวลผลเพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมด้วยพีชซีลอจิกและแสดงผลระยะเวลาผ่านหน้าจอแอลซีดี จากผลการทดลองพบว่า การปรับค่าพีเอชน้ำด้วยตัวควบคุมพีชซีลอจิกสามารถปรับค่าพีเอชได้อยู่ภายในช่วงที่ยอมรับได้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 4.33 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ เพื่อให้ผลการทดลองมีความถูกต้องมากขึ้น การปรับอัตราการหยดสารละลายและลักษณะของพีชซีเซตจะต้องมีการปรับจูนให้มีความเหมาะสมและมีความสัมพันธ์กัน

Project title Water pH Control Using Fuzzy Logic Controller
Name Mr. Pattarapong Palungchangsang ID. 56362539
Miss. Rattanaporn Yajai ID. 56363116
Project advisor Mr. Sarawut Wattanawongpitak, D.Eng.
Major Electrical Engineering
Department Electrical and Computer Engineering
Academic year 2016

Abstract

This thesis aims to invent the water's pH control device, controlled by fuzzy logic controller. This controller can determine the dripping period of buffer solution which consist of a buffer solution pH 4 or acid solution and a buffer solution pH 10 or base solution for adjustment of water's pH to the pH requirement with accuracy and precision. The pH adjustment range is designed between 6 and 8. The Arduino microcontroller is used to evaluate the appropriate dripping period by fuzzy logic and display the result on LCD screen. The results showed that the fuzzy controller can adjust the water's pH to the pH requirement in acceptable range with a maximum error of 4.33 percent. In addition, in order to provide more experimental accuracy, the dripping rate and the characteristics of the fuzzy set should be tuned appropriately and relatedly.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมค่าพีเอชของน้ำด้วยตัวควบคุมแบบพีซีลอจิก ซึ่งจะไม่มีการสำเร็จไปได้ถ้าไม่ได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.สรารุณี วัฒนวงศ์พิทักษ์ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ได้ให้ความรู้ให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือแก่คณะผู้จัดทำเป็นอย่างดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณอาจารย์ วรางค์ลักษณ์ ช่อนกลิ่น อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร ผู้ให้ความรู้ด้านสารเคมีและการทำการทดลอง แก่คณะผู้จัดทำเป็นอย่างดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ต่างๆตลอดระยะเวลาของการศึกษาเล่าเรียน ซึ่งเป็นความรู้ที่สามารถนำไปใช้ในการทำโครงการนี้และยังสามารถนำไปใช้ในการประกอบอาชีพในอนาคต

และสิ่งสำคัญที่สุดขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ได้เลี้ยงดูและอบรมสั่งสอนแก่คณะผู้จัดทำจนทำให้คณะผู้จัดทำทุกคนมีวันนี้ได้ ซึ่งเป็นพระคุณอันหาที่เปรียบไม่ได้

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำใคร่ขอขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้ ที่มีส่วนร่วมในการให้ข้อมูล เป็นที่ปรึกษาในการทำปริญญาโทฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์คณะผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นายกฤษฎา นาโต๊ะ
นางสาวรัตนารณ์ ยาใจ

สารบัญ

หน้า

ใบรับรองปริญญาโท..... ก	
บทคัดย่อภาษาไทย..... ข	
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... ค	
กิตติกรรมประกาศ..... ง	
สารบัญ..... จ	
สารบัญตาราง..... ฉ	
สารบัญรูป..... ญ	
บทที่ 1 บทนำ 1	
1.1 ที่มาและความสำคัญ 1	
1.2 วัตถุประสงค์ของ โครงการ..... 1	
1.3 ขอบเขตของโครงการ 2	
1.4 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน..... 2	
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3	
1.6 งบประมาณ 3	
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 4	
2.1 มาตรฐานคุณภาพน้ำ 4	
2.2 ความเป็นกรด-เบสหรือค่าพีเอช 6	
2.3 สารละลายที่ใช้ปรับปรุงค่าพีเอช..... 7	
2.4 ทฤษฎีฟิชซีลอจิก 9	
2.4.1 พื้นฐานแนวคิดแบบฟิชซี 9	
2.4.2 ชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Functions) 11	
2.4.3 ตัวแปรภาษา (linguistic variable) 12	
2.4.4 การดำเนินการทางฟิชซีเซต 13	

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.5 ขั้นตอนการประมวลผลแบบฟิชชีลोजิก.....	14
2.4.6 การอนุมานฟิชชีแบบแมมดานิ (Mamdani).....	16
2.5 บอร์ดอาคูโน.....	23
2.5.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR.....	23
2.5.2 ข้อมูลทั่วไปของบอร์ด.....	24
2.5.3 รูปแบบการเขียนโปรแกรมบนอาคูโน.....	26
2.6 เซนเซอร์วัดค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำ.....	28
2.6.1 ส่วนประกอบของเครื่องวัดค่าพีเอช.....	29
2.6.2 เครื่องวัดพีเอช.....	30
บทที่ 3 ขั้นตอนวิธีดำเนินงาน.....	33
3.1 การออกแบบวงจรควบคุมการทำงาน.....	33
3.2 การออกแบบ โครงสร้างของเครื่องควบคุมค่าพีเอช.....	36
3.2.1 การออกแบบ โครงสร้างภายนอกของเครื่องควบคุม.....	36
3.2.2 การออกแบบฮาร์ดแวร์ของเครื่องควบคุมค่าพีเอช.....	37
3.2.3 การประกอบทุกส่วนเข้าเป็นเครื่องควบคุมค่าพีเอช.....	42
3.3 การหาค่าที่เหมาะสมในการปล่อยสารละลาย.....	42
3.3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องวัดพีเอชเปรียบเทียบกับเครื่องวัดพีเอชของ ห้องปฏิบัติการ.....	43
3.3.2 การหาอัตราการใช้ของสารละลาย.....	45
3.3.3 การทดลองปล่อยสารละลายบัฟเฟอร์.....	46
3.4 การออกแบบการทำงานตัวควบคุมแบบฟิชชีลोजิก.....	48
3.4.1 การออกแบบตัวควบคุมฟิชชีแบบที่ 1.....	49
3.4.2 การออกแบบตัวควบคุมฟิชชีแบบที่ 2.....	54
3.4.3 ตัวอย่างการคำนวณ.....	59

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การทดลองและวิเคราะห์ผล	64
4.1 การทดสอบควบคุมค่าพีเอชของน้ำกรณิปรับให้มีความเป็นเบสมากขึ้น.....	64
4.1.1 การทดลองควบคุมค่าพีเอชของน้ำจากพีเอช 6 ไปเป็นพีเอช 7	64
4.1.2 การทดลองควบคุมค่าพีเอชของน้ำจากพีเอช 7 ไปหาพีเอช 8	66
4.2 การทดสอบควบคุมค่าพีเอชของน้ำกรณิปรับให้มีความเป็นกรดมากขึ้น	68
4.2.1 การทดลองควบคุมค่าพีเอชของน้ำจากพีเอช 7 ไปหาพีเอช 6	68
4.2.2 การทดลองควบคุมค่าพีเอชของน้ำจากพีเอช 8 ไปหาพีเอช 7	70
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	72
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	72
5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข.....	73
5.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนา.....	73
เอกสารอ้างอิง.....	74
ภาคผนวก ก รายละเอียดข้อมูลของสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4.....	75
ภาคผนวก ข รายละเอียดข้อมูลของสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 10.....	77
ภาคผนวก ค รายละเอียดข้อมูลของบอร์คอาดูโน่	79
ภาคผนวก ง รายละเอียดข้อมูลของเซนเซอร์วัดค่าพีเอช	81
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ	90

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภคน้ำ (น้ำประปา).....	5
2.2 บัฟเฟอร์ที่เกิดจากกรดอ่อนกับเกลือของกรดอ่อน	7
2.3 บัฟเฟอร์ที่เกิดจากเบสอ่อนกับเกลือของเบสอ่อน	8
2.4 สารละลายบัฟเฟอร์.....	8
2.5 การดำเนินการทางพีชคณิต.....	14
2.6 ลักษณะค่าที่วัดได้ของพีเอชเซนเซอร์	32
3.1 การเชื่อมต่อบอร์คอาดูโนกับหน้าจอแอลซีดี.....	37
3.2 การเชื่อมต่อบอร์คอาดูโนกับรีเลย์	38
3.3 การเชื่อมต่อบอร์คอาดูโนกับเซนเซอร์วัดค่าพีเอช	39
3.4 การเชื่อมต่อบอร์คอาดูโนกับปั๊มกรดเคีแพด	40
3.5 การเชื่อมต่อบอร์คอาดูโนกับสวิทช์รีเซต	41
3.6 การทดสอบความแม่นยำในการวัดค่าพีเอชของระบบควบคุมค่าพีเอช.....	44
3.7 การทดสอบหาอัตราการผลิตของสารละลาย.....	45
3.8 การทดสอบหาค่าพีเอชที่เปลี่ยนของสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4.....	46
3.9 การทดสอบหาค่าพีเอชที่เปลี่ยนของสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 10.....	47
3.10 กฎการควบคุมค่าพีเอช	51
3.11 ข้อมูลแสดงการปรับค่าพีเอชโดยพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7.06 ปรับเป็น 6	53
3.12 กฎการควบคุมค่าพีเอช	55
3.13 ข้อมูลการพยากรณ์ค่าความเป็นไปได้ของเอาท์พุท.....	58
3.14 ตารางแสดงค่าการคำนวณหา COG.....	62
4.1 ตารางแสดงเวลาที่ใช้ในการปล่อยสารและค่าพีเอชในแต่ละครั้งที่ระบบ ปล่อยสารละลาย.....	65
4.2 แสดงค่าความผิดพลาดและค่าพีเอชในแต่ละครั้งที่ระบบปล่อยสารละลาย	66
4.3 ตารางแสดงเวลาที่ใช้ในการปล่อยสารและค่าพีเอชในแต่ละครั้งที่ระบบ ปล่อยสารละลาย.....	67
4.4 แสดงค่าความผิดพลาดและค่าพีเอชในแต่ละครั้งที่ระบบปล่อยสารละลาย	67
4.5 ตารางแสดงเวลาที่ใช้ในการปล่อยสารและค่าพีเอชในแต่ละครั้งที่ระบบ ปล่อยสารละลาย.....	69

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.6 แสดงค่าความผิดพลาดและค่าพีเอชในแต่ละครั้งที่ระบบปล่อยสารละลาย	69
4.7 ตารางแสดงเวลาที่ใช้ในการปล่อยสารและค่าพีเอชในแต่ละครั้งที่ระบบ ปล่อยสารละลาย	70
4.8 แสดงค่าความผิดพลาดและค่าพีเอชในแต่ละครั้งที่ระบบปล่อยสารละลาย	71



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แถบสีมาตรฐานของค่าพีเอช	6
2.2 สารละลายบัฟเฟอร์กรดพีเอช 4 (ก) และสารละลายบัฟเฟอร์เบสพีเอช 10 (ข).....	8
2.3 ทรรกะแบบจริงเท็จ (บูลีนลอจิก) กับทรรกะแบบพีชชี (พีชชีลอจิก)	9
2.4 ความไม่แน่นอน (certainty)	10
2.5 ตัวอย่างตัวแปรภาษา.....	13
2.6 โครงสร้างตัวควบคุมแบบพีชชี	14
2.7 (ก) ระดับความเป็นสมาชิกของค่าความผิดพลาดที่ -0.67 องศาเซลเซียส (ข) อัตราการเปลี่ยนแปลงของ ค่าความผิดพลาดที่ $+1.67$ องศาเซลเซียส/นาที	16
2.8 การอนุมานแบบเมมดानी	21
2.9 การประเมินค่าฟังก์ชันสมาชิก (ก) วิธีตัดยอด (ข) วิธีปรับขนาด	22
2.10 ผลการรวมกฎของ $Error = -0.67^{\circ}C$ และ $ErrorRate = +1.67^{\circ}C$	22
2.11 การทำดีพีชชีควบคุมอุณหภูมิจ.....	23
2.12 โครงสร้างของบอร์ดอาดูโน่	24
2.13 การเชื่อมต่อเพื่อเขียนโปรแกรมบนอาดูโน่.....	26
2.14 เลือกรุ่นบอร์ดอาดูโน่ที่ต้องการอัป โหลด	26
2.15 เลือกลำดับของบอร์ดอาดูโน่.....	27
2.16 (ก) กดปุ่ม verify เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและคอมไพล์โค้ดโปรแกรม (ข) Upload โค้ด โปรแกรม [10].....	27
2.17 การทำงานของโวลต์มิเตอร์	29
2.18 ส่วนประกอบของหัววัดพีเอชเซนเซอร์	30
2.19 พีเอชเซนเซอร์รุ่น SEN0161	31
3.1 แผนผังขั้นตอนการทำงานของระบบปรับพีเอช	34
3.2 ตัวอย่างแสดงค่าเมื่อพีเอชที่วัดได้มากกว่าค่าที่กำหนด	35
3.3 ตัวอย่างแสดงค่าเมื่อพีเอชที่วัดได้น้อยกว่าค่าที่กำหนด.....	35
3.4 ตัวอย่างแสดงค่าเมื่อพีเอชที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้.....	35
3.5 โครงส่วนการปล่อยสารละลายเพื่อควบคุมค่าพีเอช	36
3.6 ตัวอย่างการแสดงผลบนหน้าจอแอลซีดี	37
3.7 ตัวอย่างค่าพีเอช ที่วัดได้แสดงผลในบอร์ดอาดูโน่.....	39

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 เครื่องควบคุมค่าพีเอช.....	41
3.9 เครื่องควบคุมค่าพีเอชของน้ำ.....	42
3.10 เครื่องวัดพีเอช โปรไลน์ (ProLine).....	43
3.11 การวัดค่าสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 ของเครื่องวัดพีเอช โปรไลน์ (ProLine)	43
3.12 การวัดค่าสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 ของเครื่องควบคุมค่าพีเอช	44
3.13 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชเมื่อหยดสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4	47
3.14 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชเมื่อหยดสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 10	48
3.15 ภาพรวมกระบวนการทำงานของพีชซีลอคจิก	48
3.16 การออกแบบอินพุตและเอาต์พุต	49
3.17 อินพุตของค่าพีเอชซึ่งเป็นค่าฐานพีเอช	50
3.18 อินพุตค่าผลต่างของพีเอชจากเซนเซอร์	50
3.19 กราฟพื้นที่ผิวการควบคุมค่าพีเอชของน้ำ	51
3.20 ประมวลผลแบบกฎการควบคุมค่าพีเอชของน้ำ.....	52
3.21 เอาต์พุตปริมาณสารละลายสำหรับปรับค่าพีเอช.....	53
3.22 การออกแบบอินพุตและเอาต์พุต	54
3.23 อินพุตของค่าพีเอชซึ่งเป็นค่าฐานพีเอช	54
3.24 อินพุตค่าผลต่างของพีเอชจากเซนเซอร์	55
3.25 กราฟพื้นที่ผิวการควบคุมค่าพีเอชของน้ำ	56
3.26 ประมวลผลแบบกฎการควบคุมค่าพีเอชของน้ำ.....	56
3.27 เอาต์พุตปริมาณสารละลายสำหรับปรับค่าพีเอช.....	58
3.28 ระดับความเป็นสมาชิกของค่าพีเอชฐาน จะให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0.3333 และ 0.4.....	59
3.29 ระดับความเป็นสมาชิกของค่าผลต่างพีเอช จะให้ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0.4 และ 0.6	59
3.30 การอนุมานพีชซีแบบแมมดानी (ก).....	60
3.30 การอนุมานพีชซีแบบแมมดानी (ข).....	61
3.31 การประเมินค่าฟังก์ชันสมาชิกด้วยวิธีตัดยอด.....	62
3.32 การทำดีพีชซีด้วยวิธีหาจุดศูนย์ถ่วงของระบบควบคุมพีเอช	63
3.33 ผลการคำนวณจากโปรแกรม	63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องควบคุมค่าพีเอช	65



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

โรงงานอุตสาหกรรมน้ำผลไม้หลายแห่งได้ให้ความสำคัญกับคุณภาพของสินค้าเป็นอย่างมาก ซึ่งหนึ่งในคุณภาพของสินค้าประเภทน้ำผลไม้ก็คือ ค่าพีเอชของน้ำผลไม้ไม่ควรที่จะมากหรือน้อยจนเกินไป ซึ่งจะทำให้รสชาติของน้ำผลไม้ไม่เป็นที่พึงพอใจของลูกค้า เช่นเดียวกับการควบคุมค่าพีเอชในอุตสาหกรรมผลิตนมเปรี้ยว เพื่อให้ได้รสชาติและคุณภาพสินค้าที่ดี จึงต้องมีการควบคุมค่าพีเอชให้เหมาะสม การควบคุมค่าพีเอชจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมาก

ซึ่งการควบคุมค่าพีเอชเป็นที่ทราบกันดีว่าเป็นปัญหาในการควบคุมที่มีความยาก เนื่องจากค่าพีเอชมีความไม่เป็นเชิงเส้น การควบคุมค่าพีเอชด้วยตัวควบคุมแบบดั้งเดิมไม่สามารถให้ผลการควบคุมเป็นที่น่าพอใจ อีกทั้งยังมีราคาที่ยังสูง และมีการใช้งานที่ซับซ้อน ในปัจจุบันตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกเป็นที่นิยม เนื่องจากมีเสถียรภาพสูงและไม่มีข้อจำกัดของจำนวนอินพุตหรือเอาต์พุต ทำให้การออกแบบเครื่องควบคุมค่าพีเอชของน้ำสามารถทำได้หลากหลาย สามารถใช้ตัวตรวจจับที่ไม่มีความแม่นยำมากนัก และมีราคาถูกได้พร้อมๆ กันหลายตัวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องควบคุมที่มีความยุ่งยากแต่ราคารวมของเครื่องควบคุมไม่เพิ่มขึ้น

ดังนั้นเพื่อลดปัญหาด้านทุนและความซับซ้อนของเครื่องควบคุม เราจึงได้เลือกใช้บอร์ดอาดูโน เพราะง่ายต่อการพัฒนา มีรูปแบบคำสั่งพื้นฐานไม่ซับซ้อนเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้น และราคาต้นทุนต่ำ โดยได้ทดลองควบคุมค่าพีเอชของน้ำให้มีค่าพีเอช 6, 7 และ 8 ทำการเก็บข้อมูลจากเซนเซอร์วัดค่าพีเอชเพื่อส่งข้อมูลไปยังบอร์ดอาดูโน โดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกประมวลผลและนำผลลัพธ์ที่ได้มาช่วยในการตัดสินใจเลือกชนิดของสารละลายที่จะควบคุมค่าพีเอชอย่างเหมาะสม และแสดงผลลัพธ์ที่ได้ผ่านทางหน้าจอแอลซีดี

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

สร้างเครื่องควบคุมค่าพีเอชของน้ำ โดยการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกร่วมกับบอร์ดอาดูโน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เครื่องควบคุมค่าพีเอชมีต้นทุนต่ำ
- 2) การควบคุมค่าพีเอชมีขั้นตอนการใช้งานง่าย
- 3) การควบคุมค่าพีเอชมีประสิทธิภาพและมีความเหมาะสม

1.6 งบประมาณ

1) ค่าอุปกรณ์ทางไฟฟ้า	
1.1) บอร์ดอาดูโน่	450 บาท
1.2) เซนเซอร์วัดค่าพีเอช	1,750 บาท
1.3) โซลินอยด์วาล์วพลาสติก ¼ นิ้ว กระแสตรง 24 โวลต์	450 บาท
1.4) หน้าจอแสดงผล แบบแอลซีดี 20X4 ตัวอักษร	220 บาท
1.5) บอร์ดรีเลย์ 5 โวลต์ 2 ช่อง	140 บาท
1.6) อุปกรณ์ไฟฟ้า	340 บาท
1.7) ปุ่มกดคีย์แพด	40 บาท
1.8) สวิตช์รีเซต	35 บาท
2) ค่าอุปกรณ์โครงสร้าง	
2.1) กล่องควบคุม	500 บาท
2.2) แผ่นไม้	100 บาท
2.3) ข้อต่อโซลินอยด์วาล์ว ¼ นิ้ว	50 บาท
3) ค่าอุปกรณ์เคมี	
3.1) สารละลายบัฟเฟอร์เบสพีเอช 10	400 บาท
3.2) สารละลายบัฟเฟอร์เบสพีเอช 4	380 บาท
4) ค่าถ่ายเอกสารและเข้ารูปเล่มปริญญาบัตร	500 บาท
รวมเป็นเงินทั้งสิ้น (ห้าพันสามร้อยห้าสิบบาทถ้วน)	<u>5,355 บาท</u>
หมายเหตุ: ถัวเฉลี่ยทุกรายการ	

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การทำโครงการเรื่องการควบคุมค่าพีเอชของน้ำโดยตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก คือการสร้างเครื่องควบคุมค่าพีเอชของน้ำ โดยนำเทคโนโลยีมาอำนวยความสะดวกในการควบคุมค่าพีเอช ได้แก่บอร์ดอาดูโน้ เช่นเซอร์วัดค่าพีเอช และเนื่องด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชมีความไม่แน่นอนยากต่อการควบคุม ด้วยเหตุนี้ผู้ดำเนินโครงการจึงเลือกใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกเพื่อช่วยในการควบคุมค่าพีเอชให้มีความถูกต้องและเหมาะสมมากที่สุด โดยผู้ดำเนินโครงการได้ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยแบ่งหัวข้อได้ดังนี้

- 1) มาตรฐานคุณภาพน้ำ
- 2) ความเป็นกรด-เบสหรือค่าพีเอช
- 3) สารละลายที่ใช้ปรับปรุงค่าพีเอช
- 4) ทฤษฎีฟัซซี่ลอจิก
- 5) บอร์ดอาดูโน้
- 6) เซนเซอร์วัดค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำ

2.1 มาตรฐานคุณภาพน้ำ

น้ำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างยิ่งในชีวิตมนุษย์ เพราะเราไม่สามารถที่จะขาดน้ำได้ในการดำรงชีวิต และใน โลกนี้ยังมีปริมาณน้ำถึงสามในสี่ส่วนของพื้นที่ทั้งหมด แต่น้ำที่เราสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ก็คือน้ำจืดที่มีอยู่ไม่ถึงร้อยละ 10 ของน้ำทั้งหมดที่มีอยู่ในโลก ซึ่งแหล่งน้ำที่เรานำมาใช้นี้ได้มาจาก 2 ส่วน คือ แหล่งน้ำผิวดิน และแหล่งน้ำใต้ดิน ซึ่งเป็นแหล่งน้ำดิบที่เราสามารถผลิตน้ำประปาได้

เมื่อเราได้แหล่งน้ำดิบแล้ว ถึงแม้ว่าเราจะดูด้วยตาว่าน้ำดิบนี้สะอาดแต่แท้ที่จริงแล้วอาจมีสารปนเปื้อนที่ไม่ปลอดภัยในการนำมาอุปโภคบริโภคจึงควรที่จะมีการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบเสียก่อน เพื่อให้ได้ตามมาตรฐานน้ำบริโภค

คุณภาพน้ำที่เหมาะสมกับการบริโภค ควรเป็นน้ำที่ปราศจากสี กลิ่น รส ความขุ่น สารพิษ เชื้อโรค และมีปริมาณเกลือแร่ที่เหมาะสม ดังนั้นการตรวจคุณภาพน้ำที่ใช้ในการบริโภคต้องตรวจลักษณะทางกายภาพ เคมี สารพิษ และแบคทีเรีย มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อบริโภคซึ่งกำหนดโดยหน่วยงานต่างๆ ที่มีภารกิจเกี่ยวกับน้ำ

- 1) ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (2524) เรื่องน้ำบริโภคในภาชนะที่ปิดสนิท
 - 2) ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (2521) เรื่องกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค (มอก. 257-2521)
 - 3) ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (2542) เรื่องมาตรฐานน้ำบาดาลที่ใช้บริโภคได้
- คุณภาพน้ำมีความสำคัญเท่าๆ กับปริมาณหากมีปริมาณน้ำมากแต่คุณภาพไม่ดี จะไม่เกิดประโยชน์ คุณภาพไม่ดีจะเป็นโทษ เช่น น้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคจะมีผลกระทบต่อสุขภาพโดยตรง ดังนั้นก่อนนำน้ำมาใช้ต้องตรวจวิเคราะห์ก่อน ซึ่งมาตรฐานคุณภาพน้ำจะแตกต่างกันออกไปตามวัตถุประสงค์ ดังนั้นเราคาดกันว่าน้ำที่เราใช้ในปัจจุบันมีคุณภาพตามมาตรฐานหรือไม่ ซึ่งในโครงการนี้ขอข้อมูลมาเพียงคุณภาพทางกายภาพเท่านั้น รายละเอียดตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค (น้ำประปา) [1]

คุณลักษณะ	ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	มาตรฐาน	
			เกณฑ์กำหนดสูงสุด (Maximum Acceptable Concentration)	เกณฑ์อนุโลมสูงสุด (Maximum Allowable Concentration)
ทางกายภาพ	1) สี (Colour)	ปลาตินัม-โคบอลต์ (Platinum-Cobalt)	5	15
	2) รส (Taste)	-	ไม่เป็นที่รังเกียจ	ไม่เป็นที่รังเกียจ
	3) กลิ่น (Odour)	-	ไม่เป็นที่รังเกียจ	ไม่เป็นที่รังเกียจ
	4) ความขุ่น (Turbidity)	ซิลิกา สเกล ยูนิต (Silica scale unit)	5	20
	5) ความเป็นกรด-เบส (pH)	-	6.5-8.5	9.2

หมายเหตุ: เกณฑ์อนุโลมให้สูงสุดเป็นเกณฑ์ที่อนุญาตให้สำหรับน้ำประปาหรือน้ำบาดาลที่มีความจำเป็นต้องใช้บริโภคเป็นการชั่วคราวและน้ำที่มีคุณลักษณะอยู่ในระหว่างเกณฑ์กำหนดสูงสุด กับเกณฑ์อนุโลมสูงสุดนั้นไม่ใช่หน้าที่ให้เครื่องหมายมาตรฐานได้ [1]

2.2 ความเป็นกรด-เบสหรือค่าพีเอช

นักวิทยาศาสตร์ใช้พีเอช (pH) เป็นตัววัดความเป็นกรด-เบสของสารละลาย สเกลของค่าพีเอชมีค่าระหว่าง 0-14 น้ำกลั่นมีค่าพีเอชอยู่ตรงจุดกึ่งกลางของสเกลคือ 7 ซึ่งมีค่าความเป็นกลางถ้าพีเอชมีค่าต่ำกว่า 7 ถือว่าเป็นกรด ถ้าสูงกว่า 7 ถือว่าเป็นเบส

ของเหลวที่อยู่รอบๆ ตัวเรามากมีค่าใกล้เคียง 7 อาจต่ำกว่าหรือสูงกว่าเล็กน้อย ถ้าเข้าไปดูในห้องปฏิบัติการเคมีหรือโรงงานบางแห่ง พบสารที่มีพีเอชต่ำกว่า 7 หรือสูงกว่า 7 มากสารเคมีเหล่านี้มีอันตราย ต้องใช้งานด้วยความระมัดระวัง

การวัดพีเอช คือการตรวจวัดปริมาณของไฮโดรเจนไอออนหรือไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลายนั่นเอง ถ้ามีปริมาณไฮโดรเจนไอออนมากมีค่าพีเอชต่ำสารละลายมีฤทธิ์เป็นกรด แต่ถ้ามีไฮดรอกไซด์ไอออนมากมีค่าพีเอชสูงสารละลายมีฤทธิ์เป็นเบส

เครื่องมือที่ใช้วัดค่าพีเอชเรียกว่า พีเอชมิเตอร์ ถ้าไม่มีพีเอชมิเตอร์อาจใช้กระดาษลิตมัสหรือกระดาษวัดค่าพีเอช เพื่อดูสีของกระดาษที่เปลี่ยนไปภายหลังที่จุ่มกระดาษวัดพีเอชลงในสารละลายที่ต้องการวัด โดยมีแถบสีมาตรฐานให้เทียบว่าสีกระดาษที่เปลี่ยนไปใกล้เคียงกับสีใดในแถบสีมาตรฐาน รูปที่ 2.1 เราจึงรู้ว่าสารละลายนั้นมีค่าพีเอชเท่ากับเท่าไร [2]



รูปที่ 2.1 แถบสีมาตรฐานของค่าพีเอช

ตัวอย่างความสำคัญของค่าความเป็นกรดและเบส

- 1) การทำน้ำให้บริสุทธิ์สำหรับน้ำดื่มขึ้นอยู่กับ การปรับความเป็นกรดและเบสของการตกตะกอนในลำดับต่างๆ ในระบบการจัดสรรน้ำ
- 2) ความเป็นกรดและเบสร่วมกับค่าสภาพความเป็นเบสจะมีความสำคัญมากในการรักษาสภาพของท่อส่งน้ำให้อยู่ในสภาพที่ดี
- 3) ในการผลิตน้ำตาล ถ้ามีค่าความเป็นกรดและเบสไม่เหมาะสมจะทำให้เกิดกรดที่ไม่ต้องการจำนวนมาก และได้น้ำตาลเพียงจำนวนน้อยเท่านั้น

4) ในระบบบำบัดน้ำทิ้ง ต้องมีการปรับค่าความเป็นกรดและเบสให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมเพื่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบ และไม่ทำลายหรือทำให้ระบบบำบัดเกิดการเสียหาย

5) นมจะเปรี้ยวที่ค่าความเป็นกรดและเบส 6.00 ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องควบคุมความเป็นกรดและเบสของน้ำนมในการผลิต [3]

2.3 สารละลายที่ใช้ปรับปรุงค่าพีเอช

สารละลายที่ถูกนำไปใช้ในการปรับปรุงค่าพีเอชในปัจจุบันมีด้วยกันหลายชนิด เช่น โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์หรือโพแทสเซียมคาร์บอเนต โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโซดาไฟ ใช้ในการเพิ่มค่าพีเอช และกรดไนตริกหรือกรดฟอสฟอริก กรดไฮโดรคลอริกหรือกรดเกลือ ใช้ในการลดค่าพีเอช แต่ในโรงงานเล่มนี้เลือกใช้สารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 และพีเอช 10 ในการปรับปรุงค่าพีเอช เนื่องจากมีความสะดวกในการใช้งานและหาได้ตามท้องตลาดทั่วไป

สารละลายบัฟเฟอร์ หมายถึงสารละลายที่ได้จากการผสมของกรดอ่อนกับคู่เบสของกรดนั้นหรือเบสอ่อนกับคู่กรดของเบสนั้น จะได้สารละลายที่มีไอออนร่วม เช่น CH_3COOH กับ CH_3COO^- หรือ NH_3 กับ NH_4^+ หน้าที่สำคัญของสารละลายบัฟเฟอร์ ใช้ควบคุมความเป็นกรดและเบสของสารละลายไม่ให้เปลี่ยนแปลงมากเมื่อเติมกรดหรือเบสลงไปเล็กน้อย นั่นคือเพื่อให้สารละลายสามารถรักษาระดับพีเอชไว้ได้เกือบคงที่เสมอแม้ว่าจะเติมน้ำหรือกรดหรือเบสลงไปเล็กน้อยก็ไม่ทำให้พีเอชของสารละลายเปลี่ยนแปลงไปมากนัก เราเรียกความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงพีเอชนี้ว่า ความจุบัฟเฟอร์ (buffer capacity)

ดังนั้นจึงสามารถอาจเรียกได้ว่าสารละลายบัฟเฟอร์ คือสารละลายที่สามารถต่อต้านการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-เบสเมื่อเติมกรดหรือเบสปริมาณเล็กน้อยลงไป ซึ่งสารละลายบัฟเฟอร์ได้จากการผสมของกรดอ่อนกับคู่เบสของกรดนั้นหรือเบสอ่อนกับคู่กรดของเบสนั้น จะได้สารละลายที่มีไอออนร่วม ชนิดของบัฟเฟอร์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด [4]

1) บัฟเฟอร์กรด คือบัฟเฟอร์ที่เกิดจากกรดอ่อนกับเกลือของกรดอ่อน ที่มีพีเอชน้อยกว่า 7 ตัวอย่างบัฟเฟอร์ตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 บัฟเฟอร์ที่เกิดจากกรดอ่อนกับเกลือของกรดอ่อน

กรดอ่อน	เกลือของกรดอ่อน	สารละลายบัฟเฟอร์
CH_3COOH	CH_3COONa	$\text{CH}_3\text{COOH} + \text{CH}_3\text{COONa}$
HCOOH	HCOONa	$\text{HCOOH} + \text{HCOONa}$
HF	KF	$\text{HF} + \text{KF}$
HCN	KCN	$\text{HCN} + \text{KCN}$

2) บัฟเฟอร์เบส คือบัฟเฟอร์ที่เกิดจากเบสอ่อนกับเกลือของเบสอ่อน ที่มีพีเอชมากกว่า 7 ตัวอย่างบัฟเฟอร์ตามตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 บัฟเฟอร์ที่เกิดจากเบสอ่อนกับเกลือของเบสอ่อน

เบสอ่อน	เกลือของเบสอ่อน	สารละลายบัฟเฟอร์
$\text{NH}_3(\text{aq})$	NH_4Cl	$\text{NH}_3(\text{aq}) + \text{NH}_4\text{Cl}$
NH_4OH	NH_4NO_3	$\text{NH}_4\text{OH} + \text{NH}_4\text{NO}_3$
$\text{Fe}(\text{HO})_2$	FeCl_2	$\text{Fe}(\text{HO})_2 + \text{FeCl}_2$
$\text{N}_2\text{H}_4(\text{aq})$	$\text{N}_2\text{H}_5^+(\text{aq})$	$\text{N}_2\text{H}_4(\text{aq}) + \text{N}_2\text{H}_5^+(\text{aq})$

หมายเหตุ กรดแก่ เบสแก่ เป็นบัฟเฟอร์ไม่ได้ เพราะสารพวกนี้แตกตัว 100% ไม่มีโอกาสเกิดคู่กรดคู่เบส

ตัวอย่าง สารละลายบัฟเฟอร์ ตามตารางที่ 2.4

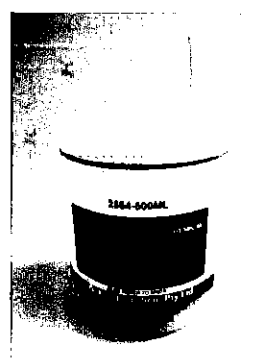
ตารางที่ 2.4 สารละลายบัฟเฟอร์

สารละลายบัฟเฟอร์	สารละลายบัฟเฟอร์
CH_3COOH	CH_3COONa
H_3PO_4	NaH_2PO_4
H_2CO_3	NaHCO_3

สารที่ใช้ในการปรับค่าพีเอชของน้ำให้เป็นกรด คือสารละลายบัฟเฟอร์กรดพีเอช 4 ตามรูปที่ 2.2(ก) สามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก ก [5] ส่วนสารที่ใช้ปรับค่าพีเอชของน้ำให้เป็นเบสคือสารละลายบัฟเฟอร์เบสพีเอช 10 ตามรูปที่ 2.2(ข) สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก ข [6]



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.2 สารละลายบัฟเฟอร์กรดพีเอช 4 (ก) และสารละลายบัฟเฟอร์เบสพีเอช 10 (ข)

2.4 ทฤษฎีฟัซซีลอจิก

ฟัซซีลอจิก (fuzzy logic) ศาสตร์ด้านการคำนวณที่เข้ามามีบทบาทมากขึ้นในวงการวิจัยด้านคอมพิวเตอร์ และยังได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับงานต่างๆ อีกมากมาย เช่น ด้านการแพทย์ ด้านการทหาร ด้านธุรกิจ ด้านอุตสาหกรรม เป็นต้น มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่นักศึกษาด้านวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิทยาการคอมพิวเตอร์ และเทคโนโลยีสารสนเทศ ควรจะได้ศึกษาเพื่อทำความเข้าใจในศาสตร์ฟัซซีลอจิกและโครงข่ายประสาทเทียมให้ลึกซึ้ง ทั้งนี้เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ ซึ่งนับวันจะยังมีความต้องการระบบคอมพิวเตอร์ที่มีความสามารถในการปรับเปลี่ยนระบบได้โดยอัตโนมัติตามสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนไป มีการตัดสินใจแบบชาญฉลาดเยี่ยงมนุษย์ได้มากขึ้น ซึ่งมนุษย์สามารถแก้ปัญหาต่างๆ ที่ยังไม่เคยพบได้โดยอาศัยความรู้เก่าที่ได้เรียนรู้มาประยุกต์ในการแก้ปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.4.1 พื้นฐานแนวคิดแบบฟัซซี

ตรรกะแบบฟัซซีเป็นเครื่องมือที่ช่วยในการตัดสินใจภายใต้ความไม่แน่นอนของข้อมูล โดยยอมให้มีความยืดหยุ่นได้ ใช้หลักเหตุผลที่คล้ายการเลียนแบบวิธีความคิดที่ซับซ้อนของมนุษย์ ฟัซซีลอจิกมีลักษณะที่พิเศษกว่าตรรกะแบบจริงเท็จ (Boolean logic) เป็นแนวคิดที่มีการต่อขยายในส่วนของความจริง (partial true) โดยค่าความจริงจะอยู่ในช่วงระหว่างจริง (completely true) กับเท็จ (completely false) ส่วนตรรกศาสตร์เดิมจะมีค่าเป็นจริงกับเท็จเท่านั้น แสดงในรูปที่ 2.3

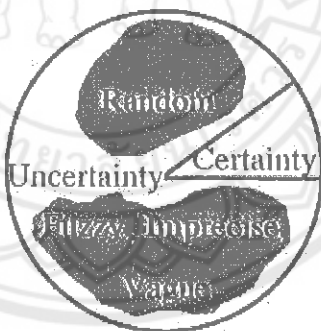


รูปที่ 2.3 ตรรกะแบบจริงเท็จ (บูลีนลอจิก) กับตรรกะแบบฟัซซี (ฟัซซีลอจิก) [7]

ความเป็นฟัซซี (fuzziness) มีชื่อเรียกว่า มัลติวาแลนซ์ (multivalance) ซึ่งมีค่าที่ความเป็นสมาชิกมากกว่า 2 ค่าขึ้นไป และแตกต่างกับไบวาแลนซ์ (bivalence) ที่มีความเป็นสมาชิกเพียง 2 ค่า ฟัซซีเซต (Fuzzy set) เป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่สื่อถึง “ความไม่แน่นอน (uncertainty)” ที่ไม่ใช่เพียง 2 กรณี ซึ่งหากกำหนดว่าคนที่อ้วนคือคนที่มีน้ำหนักมากกว่า 75 กิโลกรัม คอมพิวเตอร์จะให้ผลว่าคนที่มีน้ำหนัก 74.50 กิโลกรัม ไม่จัดเป็นคนที่อ้วน จะสร้างและกำหนดรูปแบบ (modeling) ของลักษณะความไม่แน่นอนที่เป็นความคลุมเครือ ความไม่ตายตัว รวมถึงความขาด

ข้อมูลบางส่วน โดยทฤษฎีของฟัชซีเซตจะใช้ลักษณะความหมายตัวแปร (linguistic) มากกว่า ปริมาณ (quantitative) ของตัวแปร เช่น การหาความหมายของ “คนที่อ้วน” เราไม่สามารถนิยามค่า ความอ้วนที่ตรงกันและระบุเป็นหนึ่งเดียว (identical) สำหรับคนที่อ้วน นาย ก. จะให้ความหมาย ของ “คนอ้วน” หมายถึงคนที่มีน้ำหนักมากเกินกว่า 70 กิโลกรัม นาย ข. ให้ความหมายว่าเป็นคนที่มี น้ำหนักมากเกินกว่า 75 กิโลกรัม ซึ่งทั้งสองคนต่างแสดงความหมายของคำว่าคนที่อ้วน โดย เปรียบเทียบและในมุมมองของตัวเองตามน้ำหนักของตน ในการทำงานในมุมมองแบบฐานสอง (Binary sense) จะได้ผลเป็น ใช่ แต่จะเห็นว่าบุคคลนี้เป็นคนอ้วนน้ำหนักเกือบจะ 75 กิโลกรัม และ ถึงแม้ว่าบุคคลนี้จะมีน้ำหนัก 75 กิโลกรัม แต่หากพิจารณาจากกลุ่มคนที่มีน้ำหนักเฉลี่ย 90 กิโลกรัม บุคคลนี้ก็จะไม่จัดอยู่ในกลุ่มคนที่อ้วน แสดงให้เห็นว่าความอ้วนไม่ได้มีลักษณะความไม่แน่นอน แบบสุ่ม จากการศึกษาปัญหาต่างๆ ไปจะแสดงถึงรูปแบบลักษณะการกระจายของปัญหา

รูปที่ 2.4 เป็นการแสดงให้เห็นว่าแนวทางในการตัดสินใจของปัญหาทั้งหมดมีเพียงส่วน น้อยที่เป็นสิ่งที่แน่นอน (certainty) ที่เหลือคือสิ่งที่ไม่แน่นอนซึ่งประกอบด้วยความไม่แน่นอนที่มี ลักษณะแบบสุ่ม และความไม่แน่นอนที่มีลักษณะเป็นฟัชซีหรือคลุมเครือ ซึ่งมีมากกว่าร้อยละ 40 เพราะปัญหาส่วนมากเกี่ยวข้องกับการตัดสินใจของมนุษย์ซึ่งจะตัดสินใจตามพื้นฐานความคิดของ ตนเป็นหลัก



รูปที่ 2.4 ความไม่แน่นอน (certainty) [7]

ฟัชซีจะสร้างวิธีทางคณิตศาสตร์ที่แสดงถึงความคลุมเครือ ความไม่แน่นอนของระบบที่ เกี่ยวข้องกับความคิดความรู้สึกของมนุษย์ เมื่อพิจารณาส่วนประกอบต่างๆ ในความไม่แน่นอนเพื่อ กำหนดเงื่อนไขในการตัดสินใจ (Decision making) โดยอาศัยเซตของความไม่เป็นสมาชิก (Set membership)

2.4.2 ชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Functions)

ชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ใช้งานทั่วไปมีหลายชนิด แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเพียง 6 ชนิดดังนี้

1) ฟังก์ชันสามเหลี่ยม (triangular membership function)

ฟังก์ชันสามเหลี่ยมมีทั้งหมด 3 พารามิเตอร์คือ $\{a, b, c\}$ สมการที่ 2.1

$$\text{triangular}(x: a, b, c) = \begin{cases} 0 & x < a \\ (x-a)/(b-a) & a \leq x \leq b \\ (c-x)/(c-b) & b \leq x \leq c \\ 0 & x > c \end{cases} \quad (2.1)$$

2) ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal membership function)

ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมูมีทั้งหมด 4 พารามิเตอร์คือ $\{a, b, c, d\}$ สมการที่ 2.2

$$\text{trapezoidal}(x: a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & x < a \\ (x-a)/(b-a) & a \leq x < b \\ 1 & b \leq x < c \\ (d-x)/(d-c) & c \leq x < d \\ 0 & x \geq d \end{cases} \quad (2.2)$$

3) ฟังก์ชันเกาส์เซียน (Gaussian membership function)

ฟังก์ชันเกาส์เซียนมีทั้งหมด 2 พารามิเตอร์ด้วยกันคือ $\{m, \sigma\}$ ซึ่ง m หมายถึงค่าเฉลี่ย และ σ หมายถึง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน สมการที่ 2.3

$$\text{gaussian}(x: m, \sigma) = \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{\sigma^2}\right) \quad (2.3)$$

4) ฟังก์ชันระฆังคว่ำ (Bell-shaped membership function)

ฟังก์ชันรูประฆังคว่ำมีพารามิเตอร์ทั้งหมด 3 ค่าคือ $\{a, b, c\}$ สมการที่ 2.4

$$\text{bell-shaped}(x: a, b, c) = \frac{1}{1 + \left|\frac{x-c}{a}\right|^{2b}} \quad (2.4)$$

5) ฟังก์ชันตัวเอส (Smooth Membership Function)

ฟังก์ชันรูปตัวเอสมีพารามิเตอร์ทั้งหมด 2 ค่าคือ $\{a, b\}$ สมการที่ 2.5

$$S(x: a, b) = \begin{cases} 0 & x < a \\ 2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2 & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 1-2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2 & \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 1 & x \geq b \end{cases} \quad (2.5)$$

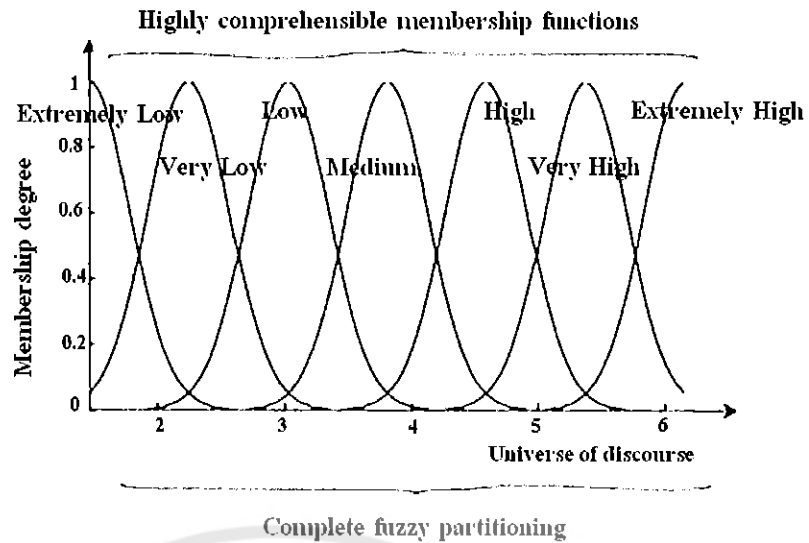
6) ฟังก์ชันตัวแซด (Z-membership function)

ฟังก์ชันรูปตัวเอสมีพารามิเตอร์ทั้งหมด 2 ค่าคือ $\{a, b\}$ สมการที่ 2.6

$$Z(x: a, b) = \begin{cases} 1 & x < a \\ 1-2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2 & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2 & \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 0 & x \geq b \end{cases} \quad (2.6)$$

2.4.3 ตัวแปรภาษา (linguistic variable)

เซตแบบฟัซซีสามารถประยุกต์ใช้ในการอธิบายค่าของตัวแปรเช่นเดียวกับเซตแบบดั้งเดิม เช่น ประโยค “อุณหภูมิในห้องเย็น” คำว่า “เย็น” เป็นค่าที่ใช้ในการแสดงปริมาณอุณหภูมิในทางรูปนัย สามารถเขียนได้เป็นปริมาณอุณหภูมิในห้องเย็น หรือ TemperatureQuantity is Cold ตัวแปร TemperatureQuantity เป็นตัวแปรภาษา (linguistic variable) ซึ่งเป็นแนวคิดที่สำคัญมากในตรรกะแบบฟัซซี ตัวแปรภาษาช่วยกำหนดค่าของสิ่งที่จะอธิบายทั้งในรูปคุณภาพ โดยใช้พจน์ภาษา (linguistic term) และในรูปปริมาณ โดยการใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (membership function) ซึ่งแสดงความเป็นสมาชิกของเซตแบบฟัซซี พจน์ภาษาใช้สำหรับการแสดงแนวคิดและองค์ความรู้ในการสื่อสารของมนุษย์ ส่วนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมีประโยชน์ในการจัดการกับอินพุตที่เป็นข้อมูลเชิงตัวเลข



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างตัวแปรภาษา [7]

ตัวแปรภาษาเป็นการประกอบกัน (composition) ของตัวแปรสัญลักษณ์ (symbolic variable) และตัวแปรเชิงเลข (numerical variable) ตัวอย่างตัวแปรสัญลักษณ์ เช่น “รูปร่างเป็นทรงกระบอก” (Shape = Cylinder) คำว่า “รูปร่าง” เป็นตัวแปรที่บอกถึงรูปร่างของวัตถุ ตัวอย่างตัวแปรเชิงเลข เช่น “ความสูงเท่ากับ 4 ฟุต” (Height = 4') ตัวแปรเชิงเลขจะมีใช้กันในสาขาทางด้านวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ คณิตศาสตร์ การแพทย์ และอื่นๆ ส่วนตัวแปรสัญลักษณ์มีความสำคัญในวิทยาการเกี่ยวกับปัญญาประดิษฐ์และการตัดสินใจ การใช้ตัวแปรภาษาเป็นการรวมตัวแปรเชิงเลขกับตัวแปรสัญลักษณ์เข้าด้วยกัน ภาพที่ 2.5 แสดงตัวอย่างเซตตัวแปรภาษาของเซตฟัซซี ได้แก่ Extremely Low, Very Low, Low, Medium, High, Very High และ Extremely High

2.4.4 การดำเนินการทางฟัซซีเซต

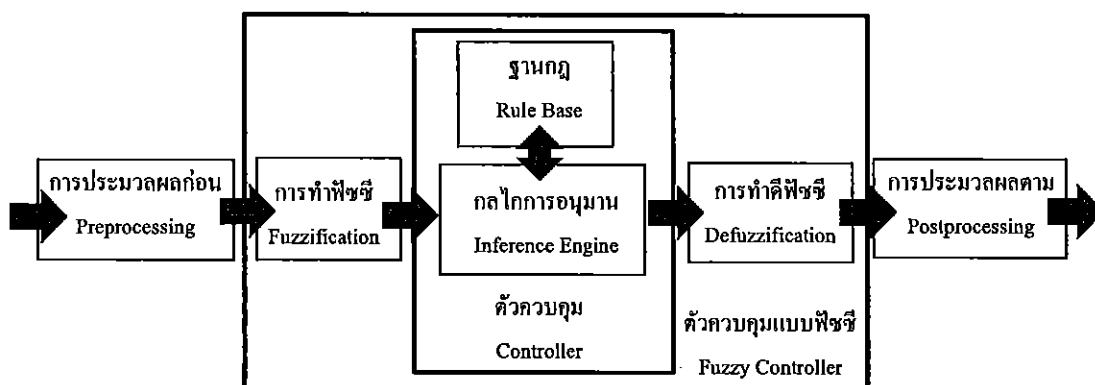
การดำเนินการของฟัซซีเซตมีคุณสมบัติเหมือนกับเซตโดยทั่วไป มีการดำเนินการ (operation) ก็ยูเนียน (Union), อินเตอร์เซกชัน (Intersection) และ คอมพลีเมนต์ (Complement) รายละเอียดตามตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 การดำเนินการทางพีชชีเซต

คุณสมบัติ การดำเนินการ	Opera- -tion	สมการ	รูปแบบ
ยูเนียน (Union)	OR	$\mu_{A \cup B}(X) = \mu_A(X) \cup \mu_B(X)$ $= \max(\mu_A(X), \mu_B(X))$	
อินเตอร์เซกชัน (Intersection)	AND	$\mu_{A \cap B}(X) = \mu_A(X) \cap \mu_B(X)$ $= \min(\mu_A(X), \mu_B(X))$	
คอมพลิเมนต์ (Complement)	Sub set	$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(X)$	

2.4.5 ขั้นตอนการประมวลผลแบบพีชชีลอจิก

รายละเอียดต่อไปนี้จะกล่าวถึงองค์ประกอบต่างๆ ของตัวควบคุมแบบพีชชี ตามแนวทางสำหรับการออกแบบในเชิงวิศวกรรมตามรูปที่ 2.6 แสดง โครงสร้างของตัวควบคุมแบบพีชชี องค์ประกอบในการประมวลผลก่อนและหลัง เป็นการปรับสภาพอินพุตและเอาต์พุตที่จะใช้กับตัวควบคุมแบบพีชชีให้มีความเหมาะสมรายละเอียดของแต่ละองค์ประกอบสรุปได้ดังนี้



รูปที่ 2.6 โครงสร้างตัวควบคุมแบบพีชชี

การประมวลผลก่อน (Preprocessing) เป็นขั้นตอนที่ใช้ในการเตรียมอินพุตจากโลกจริง ให้มีความเหมาะสมที่จะใช้กับตัวควบคุมในโลกของฟัซซี (ไม่รวมขั้นตอนการทำให้เป็นฟัซซี) โดยปกติแล้วอินพุตของระบบจะเป็นค่าเชิงตัวเลขที่วัดหรือออกมาจากเครื่องมือต่างๆ และไม่ได้มีค่าในรูปภาษา จึงจำเป็นจะต้องมีการประมวลผลก่อนเพื่อปรับค่าอินพุตเหล่านี้ให้มีความเหมาะสม ตัวอย่างของการประมวลผลก่อนเช่น

- แปลงค่าจากสัญญาณแอนะล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล
- ปิดค่าตัวเลขให้อยู่ในรูปที่ระบบรองรับ (เช่นปิดเป็นจำนวนเต็ม)

การทำฟัซซี (Fuzzification) ค่าอินพุตที่ได้จากการประมวลผลก่อนจะถูกแปลงให้เป็นค่าความเป็นสมาชิกจากฟังก์ชันสมาชิกต่างๆ ที่มีอยู่ในระบบ แล้วทำการรวมผลลัพธ์ของอินพุตนั้นตามเงื่อนไข (ตัวแปรภาษา) ที่ถูกออกแบบไว้

ฐานกฎ (Rule Base) กฎในระบบฟัซซีถือเป็นหัวใจในการดำเนินการควบคุม กฎดังกล่าวสามารถมาจากเงื่อนไขที่หลากหลาย รวมไปถึงสามารถให้ผลลัพธ์ที่มีได้มากกว่า 1 ผลลัพธ์ได้ ซึ่งตัวควบคุมที่มีอินพุตและเอาต์พุตมากกว่าหนึ่งจะเรียกว่า MIMO (Multi-Input Multi-Output) ในขณะที่ตัวควบคุมที่มีเพียงหนึ่งอินพุตและเอาต์พุตจะเรียกว่า SISO (Single-Input Single-Output) โดยปกติแล้ว ระบบที่เป็น SISO จะทำการควบคุมสัญญาณค่าความผิดพลาดเพียงอย่างเดียว ในบางกรณีอาจจะมีการใช้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงหรือค่าสะสมของค่าความผิดพลาดร่วมด้วย แต่จะยังคงเรียกว่าเป็นอินพุตเดียว เนื่องจากทั้งอัตราการเปลี่ยนแปลงหรือค่าสะสมดังกล่าวนั้นมาจากอินพุตค่าความผิดพลาดเพียงค่าเดียว แนวคิดของการใช้ฐานกฎในฟัซซีลอจิกทำให้ระบบที่ได้มีความใกล้เคียงกับการทำงานจริงของมนุษย์ หรือกล่าวได้ว่าเป็นผู้เชี่ยวชาญนั่นเอง

กลไกการอนุมาน (Inference Engine) กฎต่างๆ ที่กำหนดไว้จะถูกอนุมานเป็นผลลัพธ์ในการตัดสินใจของระบบ เมื่อระบบตัดสินใจได้แล้ว การดำเนินการที่สอดคล้องกับการตัดสินใจนั้นก็จะดำเนินต่อไป ยกตัวอย่างเช่น ระบบตรวจจับได้ว่าอุณหภูมิจากตัวตรวจจับที่ 1 กำลัง 'ร้อนขึ้น' อย่าง 'รวดเร็ว' ระบบจะทำการพิจารณาค่าอินพุตพร้อมกับตรวจสอบกับกฎการทำงานที่สอดคล้องกับเงื่อนไขดังกล่าว แล้วทำการอนุมานหรือตัดสินใจว่าจะทำการเปิดเครื่องทำความเย็น 'แรงที่สุด' เป็นต้น ผลลัพธ์การตัดสินใจที่ได้ยังคงอยู่ในเทอมของค่าเชิงภาษา ที่ซึ่งจะถูกแปลงเป็นค่าที่ใช้งานจริงด้วยขั้นตอนต่อไป

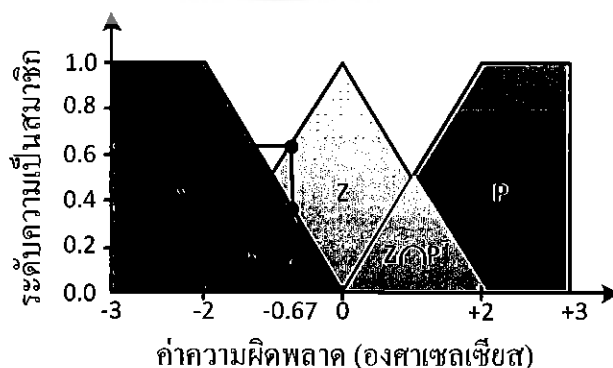
การทำดีฟัซซี (Defuzzification) ผลลัพธ์เชิงภาษาที่ได้จากกลไกการอนุมานจะอยู่ในรูป เช่น เปิดเครื่องทำความเย็น 'แรงที่สุด' หรือลดเครื่องทำความร้อน 'ลงพอประมาณ' ผลลัพธ์ดังกล่าว จะถูกแปลงให้เป็นค่าที่สอดคล้องกับการทำงานจริงของระบบ เช่นเปิดเครื่องทำความเย็นเพิ่มขึ้น 25 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น

การประมวลผลตาม (Postprocessing) เอาท์พุทที่ได้จากระบบอาจจะต้องถูกปรับให้ เหมาะสมกับการนำไปใช้งานไม่ว่าจะเป็นการทำให้เป็นบรรทัดฐาน (Normalization) ในย่านที่ใช้ งานจริง เช่นแปลงค่า 0-100 เปอร์เซ็นต์ เป็นแรงดันขนาด -5 ถึง +5 โวลต์สำหรับควบคุมให้เครื่อง ทำความเย็นเปิด-ปิดตามปริมาณที่ต้องการ [8]

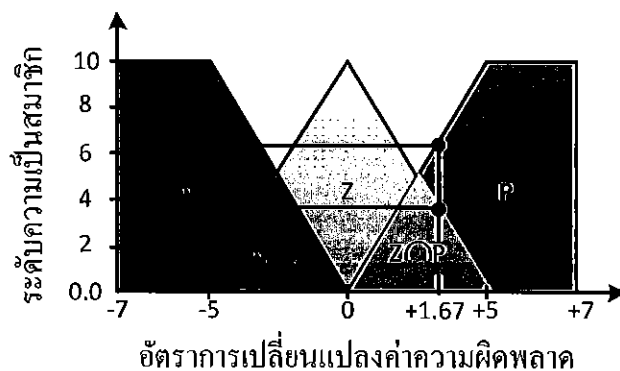
2.4.6 การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานี (Mamdani)

การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานีเป็นวิธีที่นิยมมากวิธีหนึ่ง วิธีการอนุมานนี้นำเสนอเป็น ครั้งแรกในปี 1975 โดยศาสตราจารย์มอดานี (Ebrahim Mamdani) แห่งมหาวิทยาลัยลอนดอน ซึ่ง ในครั้งแรกที่นำเสนอได้นำใช้ในการควบคุมเครื่องจักรไอน้ำและหม้อต้มไอน้ำ (boiler) ในงานที่ นำเสนอนั้นมีการประยุกต์ใช้กฎของฟัซซีที่สร้างจากผู้เชี่ยวชาญ ขบวนการอนุมานฟัซซีแบบแมมดา นีประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอน คือการทำฟัซซี, การประเมินกฎของฟัซซี, การรวมกฎ และการทำดี ฟัซซีดังรายละเอียดต่อไปนี้ (พิจารณาระบบควบคุมอุณหภูมิเป็นตัวอย่างในการอธิบาย)

1) การทำฟัซซี (fuzzification) คือการคำนวณหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของเซตค่าตัว แปรเชิงภาษาของตัวแปรในระบบ ในขั้นตอนแรกของการอนุมานฟัซซีจะต้องทำการหาค่าระดับ ความเป็นสมาชิกของเซตดังกล่าวของตัวแปรอินพุต ที่ซึ่งค่าของตัวแปรอินพุตที่เข้ามาสู่ในระบบ จะอยู่ในรูปของค่าเชิงตัวเลข หลังจากนั้นแล้วค่าของระดับความเป็นสมาชิกของอินพุตค่านั้นๆ จะ สามารถหาได้จากฟังก์ชันสมาชิกการทำฟัซซี



(ก)



(องศาเซตซ้ายต่ออนาที่)

(ก)

รูปที่ 2.7 (ก) ระดับความเป็นสมาชิกของค่าความผิดพลาดที่ -0.67 องศาเซลเซียส ให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของ 'ลบ' เท่ากับ 0.36 และระดับความเป็นสมาชิกของ 'ศูนย์' เท่ากับ 0.62 (ข) อัตราการเปลี่ยนแปลงของ ค่าความผิดพลาดที่ $+1.67$ องศาเซลเซียส/นาที่ ให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของ 'ศูนย์' เท่ากับ 0.35 และระดับ ความเป็นสมาชิกของ 'บวก' เท่ากับ 0.64

ของตัวแปรอินพุตจะขึ้นอยู่กับกฎของฟัซซีด้วยเช่นกัน เนื่องจากสำหรับอินพุตค่าหนึ่งๆ จะมีผลต่อกฎของฟัซซีบางข้อเท่านั้น พิจารณาการคำนวณหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของอินพุตจากรูปที่ 2.7 จากค่าความผิดพลาดที่ -0.67 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ทั้งเซต N (เซต 'ลบ') และเซต Z (เซต 'ศูนย์') นั่นคือสำหรับฟังก์ชันสมาชิกของค่าความผิดพลาดที่กำหนดค่า -0.67 องศาเซลเซียส มีทั้งความเป็นลบและความเป็นศูนย์ โดยที่มีระดับความเป็นสมาชิกของเซต N (หรือความเป็นลบ) เท่ากับ 0.36 และมีระดับความเป็นสมาชิกของเซต Z (หรือความเป็นศูนย์) เท่ากับ 0.62 ตัวอย่างนี้แสดงความเป็นฟัซซีของค่าความผิดพลาด -0.67 องศาเซลเซียส นี้อย่างชัดเจน นั่นคือค่าความผิดพลาดเป็นสมาชิกของทั้งความเป็นลบและความเป็นศูนย์ แต่มีระดับความเป็นศูนย์มากกว่าความเป็นลบ (จากค่าระดับความเป็นสมาชิก 0.36 และ 0.62) เช่นเดียวกันกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดที่ $+1.67$ องศาเซลเซียส/นาที่ ซึ่งจากฟังก์ชันสมาชิกที่กำหนด ค่านี้มีทั้งความเป็นศูนย์และความเป็นบวก คือเป็นค่าที่อยู่ทั้งในเซต Z ('ศูนย์') และเซต P ('บวก') ด้วยค่าระดับความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0.35 และ 0.64 ตามลำดับ (ค่าระดับของความเป็นสมาชิกบ่งบอกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด $+1.67$ องศาเซลเซียส/นาที่ มีความเป็นบวกมากกว่าความเป็นศูนย์) สังเกตว่าตัวแปรค่าความผิดพลาดมีระดับความเป็นสมาชิกของ 'บวก' เท่ากับ 0.0 ซึ่งหมายความว่าไม่ได้มีความเป็นบวกเลยเนื่องจากมีค่าเป็นลบ ในทำนองเดียวกัน ตัวแปรอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดมีระดับความเป็นสมาชิกของ 'ลบ' เท่ากับ 0.0 ซึ่งหมายความว่า

ไม่ได้มีความเป็นลบเลยเนื่องจากมีค่าเป็นบวก สรุปค่าระดับความเป็นสมาชิกของทั้งสองอินพุตในรูปฟังก์ชันสมาชิกได้ดังนี้

$$\mu(\text{Error} = N)(-0.67) = 0.36$$

$$\mu(\text{Error} = Z)(-0.67) = 0.62$$

$$\mu(\text{Error} = P)(-0.67) = 0.00$$

$$\mu(\text{ErrorRate} = N)(1.67) = 0.00$$

$$\mu(\text{ErrorRate} = Z)(1.67) = 0.35$$

$$\mu(\text{ErrorRate} = P)(1.67) = 0.64$$

2) การประเมินค่ากฎของฟัซซี (fuzzy rule evaluation) หลังจากคำนวณหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของอินพุตทั้งหมดได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการประเมินค่าของตัวแปรที่ได้ในกฎของฟัซซี การประเมินค่ากฎดังกล่าวจะเป็นส่วน IF จุดประสงค์เพื่อทำการประเมินว่าค่าเงื่อนไขจากอินพุตนั้นจะทำให้กฎใดต้องกระทำในส่วน THEN ต่อไป ซึ่งอาจจะมีกฎในเงื่อนไขดังกล่าวมากกว่าหนึ่งกฎพร้อมๆกัน เนื่องมาจากระบบมีอินพุตมากกว่าหนึ่ง (นั่นคือค่าความผิดพลาดและอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด) เงื่อนไขของแต่ละอินพุตจะถูกประเมินค่าด้วยตัวกระทำของฟัซซีเซต เช่น AND หรือ OR เพื่อให้ได้ผลลัพธ์สุดท้ายเป็นค่าตัวเลขที่สามารถนำไปประเมินค่าส่วน THEN ที่ซึ่งภายหลังจะถูกนำไปประเมินเพื่อหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุตในขั้นตอนต่อไป พิจารณาตัวกระทำ OR จากทฤษฎีเซตจะได้ดังสมการที่ 2.7

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (2.7)$$

อย่างไรก็ดี ตัวกระทำ OR สามารถมีนิยามได้หลายอย่าง ยกตัวอย่างเช่น ตัวกระทำ OR ในกล่องเครื่องมือของแมทแล็บฟัซซีลอจิก (MATLAB Fuzzy Logic Toolbox) จะมีทั้งการใช้ฟังก์ชัน max ข้างต้น และฟังก์ชันทางสถิติเรียกว่า probor หรือผลรวมเชิงพีชคณิต (algebraic sum) ดังสมการที่ 2.8 และ 2.9

$$\mu_{A \cup B}(x) = \text{probor}[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (2.8)$$

$$= \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \times \mu_B(x) \quad (2.9)$$

เช่นเดียวกันกับตัวกระทำ AND ซึ่งในกล่องเครื่องมือของแมทแล็บฟัซซีลอจิก (MATLAB Fuzzy Logic Toolbox) มีทั้งการใช้ฟังก์ชัน min และ ฟังก์ชันผลคูณ (prod) ดังสมการที่ 2.10, 2.11 และ 2.12

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (2.10)$$

หรือ

$$\mu_{A \cap B}(x) = \text{prod}[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (2.11)$$

$$= \mu_A(x) \times \mu_B(x) \quad (2.12)$$

ในบางกรณีการใช้ฟังก์ชันของตัวกระทำของเซตที่แตกต่างกัน อาจจะทำให้ผลเชิงตัวเลขที่แตกต่างกันได้ หลังจากประเมินค่าของแต่ละเงื่อนไขและรวมเงื่อนไขในกรณีที่มีมากกว่า 1 เงื่อนไขในส่วนของ IF แล้วผลที่ได้จะถูกนำไปประเมินผลว่าถูกข้อใดที่ต้องถูกพิจารณาในส่วน THEN ต่อไป พิจารณาตัวอย่างระบบ ควบคุมอุณหภูมิซึ่งมีกฎของฟิชชีทั้งหมด 9 ข้อ เงื่อนไขของอินพุตตัวที่หนึ่งได้แก่ Error = -0.67 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของ N และ Z ที่ไม่เท่ากับศูนย์ เงื่อนไขดังกล่าวมีค่ามากกว่าศูนย์และอยู่ในส่วน IF ของกฎข้อ 1, 2, 4, 5, 7 และ 8 ในขณะที่เงื่อนไขของอินพุตตัวที่สองได้แก่ ErrorRate = +1.67 องศาเซลเซียส/นาที่ ซึ่งให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของ Z และ P ที่ไม่เท่ากับศูนย์และอยู่ในส่วน IF ของกฎข้อที่ 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 เมื่อทำการ AND (ใช้ฟังก์ชัน min) เงื่อนไขทั้งสองแล้วจะได้ว่าเงื่อนไขทั้งสองที่มีค่าไม่เป็นศูนย์ก็คือเงื่อนไขในข้อ 4, 5, 7 และ 8 โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

- (1) IF (Error = N) AND (ErrorRate = N) THEN Output = C
IF (0.36 AND 0.00) = 0.00 THEN Output = C
- (2) IF (Error = Z) AND (ErrorRate = N) THEN Output = H
IF (0.62 AND 0.00) = 0.00 THEN Output = H
- (3) IF (Error = P) AND (ErrorRate = N) THEN Output = H
IF (0.00 AND 0.00) = 0.00 THEN Output = H
- (4) IF (Error = N) AND (ErrorRate = Z) THEN Output = C
IF (0.36 AND 0.35) = 0.35 THEN Output = C
- (5) IF (Error = Z) AND (ErrorRate = Z) THEN Output = NC
IF (0.62 AND 0.35) = 0.35 THEN Output = NC
- (6) IF (Error = P) AND (ErrorRate = Z) THEN Output = H
IF (0.00 AND 0.35) = 0.00 THEN Output = H
- (7) IF (Error = N) AND (ErrorRate = P) THEN Output = C
IF (0.36 AND 0.64) = 0.36 THEN Output = C

(8) IF ($Error = Z$) AND ($ErrorRate = P$) THEN $Output = C$

IF (0.62 AND 0.64) = 0.62 THEN $Output = C$

(9) IF ($Error = P$) AND ($ErrorRate = P$) THEN $Output = H$

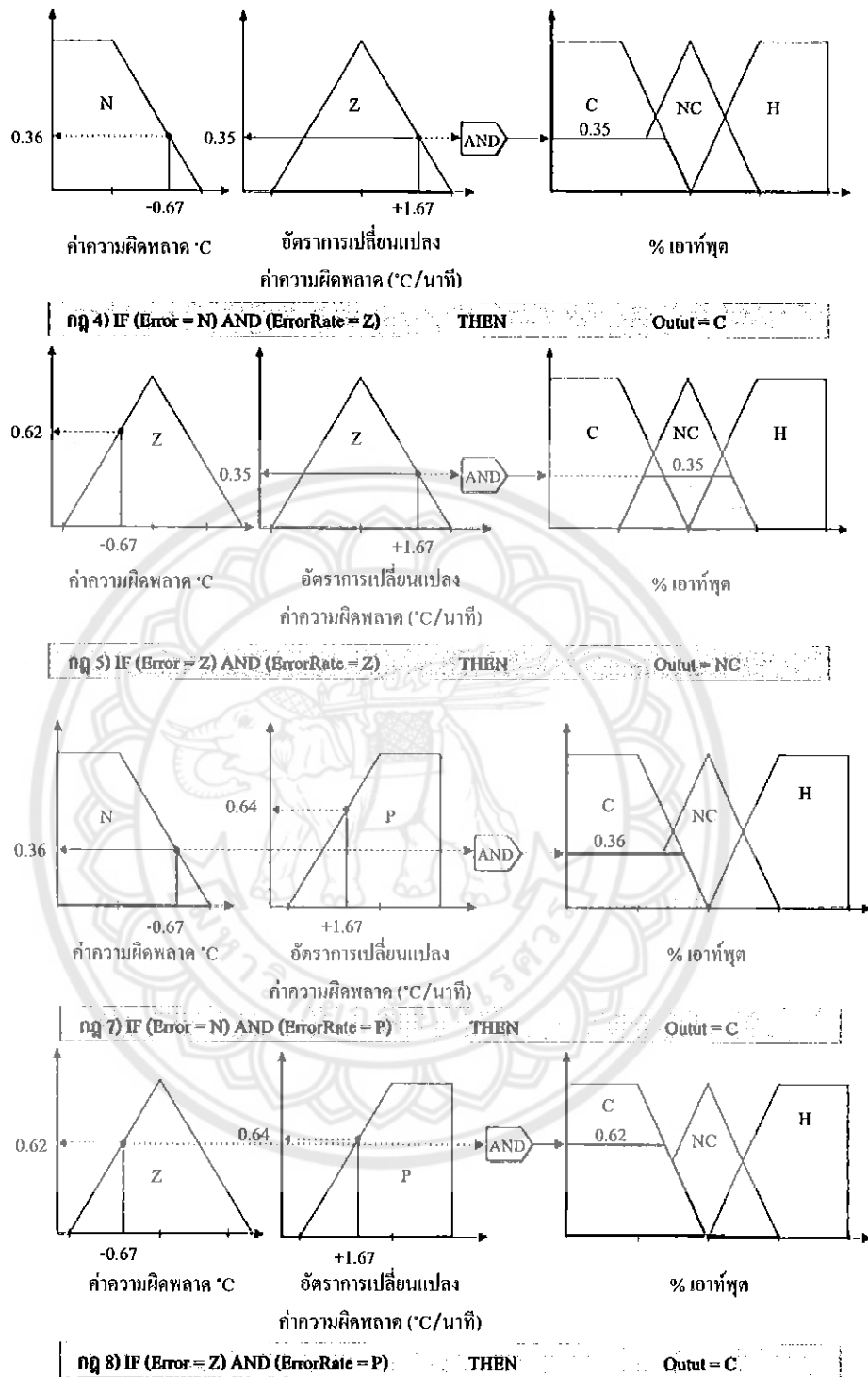
IF (0.00 AND 0.64) = 0.00 THEN $Output = H$

จากค่า $Error = -0.67$ องศาเซลเซียส และ $ErrorRate = 1.67$ องศาเซลเซียส/นาทึ่ มีผลให้ส่วน THEN ซึ่งก็คือตัวแปรเอาต์พุตของกฎข้อ 4, 5, 7 และ 8 ถูกประเมินค่าในขั้นตอนต่อไป ค่าระดับความเป็นสมาชิกจากเงื่อนไขอินพุตในส่วน IF จะเป็นตัวบอกว่าตัวแปรเอาต์พุตจะมีรูปร่างของระดับความเป็นสมาชิกอย่างไร โดยฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุตจะถูกตัดยอด (clipped) หรือถูกปรับขนาด (scaled) ตามผลค่าระดับความเป็นสมาชิกของส่วนเงื่อนไขอินพุต IF นั้นเอง ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ถึงแม้ว่าการตัดยอดฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุตจะทำให้เกิดการสูญเสียข้อมูลบางส่วน แต่วิธีการดังกล่าวเป็นวิธีที่เร็วและง่ายสำหรับการคำนวณ รวมไปถึงการนำไปใช้ประมวลผลในขั้นตอนต่อไปอีกด้วย รูปที่ 2.9 เปรียบเทียบระหว่างวิธีการตัดยอดและวิธีการปรับขนาด

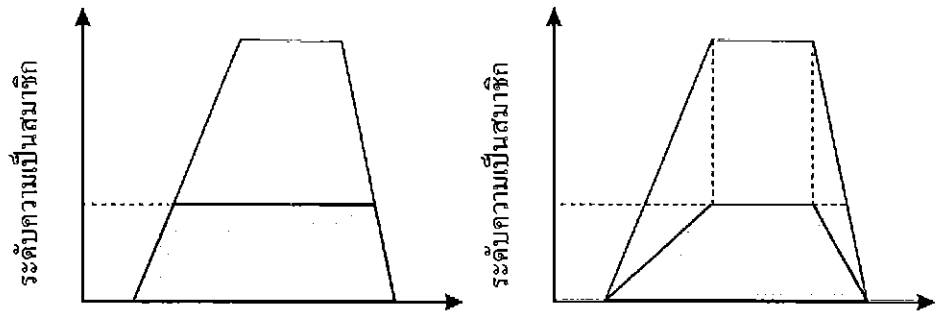
3) การรวมกฎ (aggregation) หลังจากกฎต่างๆ ถูกประเมินค่าแล้ว กฎที่มีผลไม่เท่ากับศูนย์จะถูกรวมเข้าด้วยกัน โดยการรวมผลลัพธ์ของฟังก์ชันสมาชิกที่ผ่านการประเมินค่า (ถูกตัดยอดหรือปรับขนาด) ทั้งหมดเข้าด้วยกันเป็นเซตเดียวสำหรับแต่ละตัวแปรเอาต์พุต การรวมกฎจะใช้ตัวกระทำยูเนียน รูปที่ 2.10 แสดงการรวมกฎดังกล่าวจากระบบควบคุมอุณหภูมิที่ค่าความผิดพลาดเท่ากับ -0.67 องศาเซลเซียส และอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดเท่ากับ $+1.67$ องศาเซลเซียส ในขั้นตอนต่อไปจะนำผลการรวมกฎนี้ไปแปลงเป็นค่าตัวเลขเพื่อนำเอาไปใช้ในการประมวลผลต่อไป

4) การทำดีฟัซซี (defuzzification) จากขั้นตอนแรกมาจนถึงขั้นตอนนี้ ค่าต่างๆ ในระบบเป็นค่าฟัซซีไม่ว่าจะเป็นอินพุต กฎต่างๆ หรือเอาต์พุต แต่ว่าสำหรับทุกระบบค่าของเอาต์พุตจะต้องถูกแปลงให้อยู่ในรูปที่สามารถใช้งานได้จริงเช่น ค่าสัญญาณแรงดัน ค่าสัญญาณควบคุม ฯลฯ ซึ่งค่าเหล่านี้ไม่สามารถเป็นค่าฟัซซีได้ เพราะค่าฟัซซีจะเป็นที่เข้าใจภายในระบบฟัซซีเท่านั้น ดังนั้นค่าสุดท้ายจากเอาต์พุตของระบบจะต้องเป็นค่าชัดเจน (crisp value) การทำดีฟัซซีคือขั้นตอนในการแปลงค่าจากผลการรวมกฎให้อยู่ในรูปของค่าชัดเจน วิธีการทำดีฟัซซีนี้นั้นมีหลายแบบ วิธีหนึ่งที่เป็นที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายคือวิธีหาจุดศูนย์กลางถ่วง (centroid or center of gravity, COG) ค่า COG ของฟัซซีเซต A ในช่วง $[a, b]$ สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.13

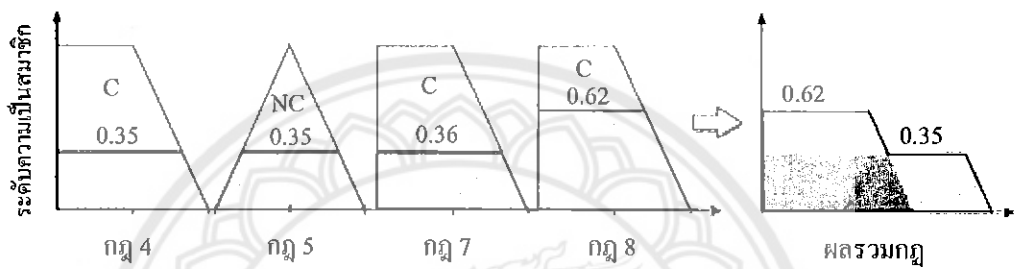
$$COG = \frac{\int_a^b \mu_A(x) x dx}{\int_a^b \mu_A(x) dx} \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.8 การอนุมานแบบเมมดानी



รูปที่ 2.9 การประเมินค่าฟังก์ชันสมาชิก (ก) วิธีตัดยอด (ข) วิธีปรับขนาด



รูปที่ 2.10 ผลการรวมกฎของ Error = -0.67°C และ ErrorRate = +1.67°C

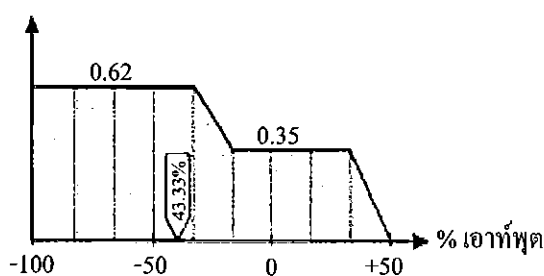
ในทางปฏิบัติ การคำนวณ COG สามารถหาได้จากข้อมูลการชักตัวอย่างดังสมการที่ 2.14

$$COG = \frac{\sum_{x=a}^b \mu_A(x) x}{\sum_{x=a}^b \mu_A(x)} \tag{2.14}$$

พิจารณาเอาต์พุตของระบบควบคุมอุณหภูมิในรูปที่ 2.11 ค่า COG สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$COG = \frac{(-100 - 83.33 - 66.67 - 50 - 33.33) \times 0.62 + (-16.67 + 0 + 16.67 + 33.33) \times 0.35}{0.62 + 0.62 + 0.62 + 0.62 + 0.62 + 0.35 + 0.35 + 0.35 + 0.35} = -43.33$$

ค่าเอาต์พุตที่ได้จากการทำดีฟัซซี่เท่ากับ -43.33 เปรอร์เซ็นต์ ให้ความหมายว่าระบบต้องเปิดเครื่องทำความเย็นที่ระดับ 43.33 เปรอร์เซ็นต์ [8]



รูปที่ 2.11 การทำดีฟิซซีควบคุมอุณหภูมิ

2.5 บอร์ดอาดูโน่

อาดูโน่ (Arduino) เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่มีการพัฒนาแบบโอเพนซอร์ส คือมีการเปิดเผยข้อมูลทั้งด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ ตัวบอร์ดอาดูโน่ถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้นศึกษา ทั้งนี้ผู้ใช้งานยังสามารถดัดแปลง เพิ่มเติมพัฒนาต่อยอดทั้งตัวบอร์ดหรือโปรแกรมต่อได้อีกด้วย สำหรับโครงการนี้เลือกใช้บอร์ดอาดูโน่ Mega 2560 R3 เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ทำงานบนพื้นฐานของ ATmega2560 เป็นบอร์ดที่ออกแบบมาสำหรับงานที่ต้องใช้พอร์ตอินพุตกับเอาต์พุตมากกว่าบอร์ดอาดูโน่ Uno R3 เช่น งานที่ต้องการรับสัญญาณจากเซนเซอร์หรือควบคุมมอเตอร์เซอร์โวหลายๆตัว ทำให้พอร์ตอินพุตกับเอาต์พุตของบอร์ดอาดูโน่ Uno R3 ไม่สามารถรองรับได้ ทั้งนี้บอร์ดอาดูโน่ Mega 2560 R3 ยังมีหน่วยความจำแบบแฟลชมากกว่าบอร์ดอาดูโน่ Uno R3 ทำให้สามารถเขียนโค้ดโปรแกรมเข้าไปได้มากกว่าในความเร็วของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เท่ากัน [9]

2.5.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR

ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR เป็นไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์ของบริษัท Atmel มีสถาปัตยกรรมภายในเป็นแบบ RISC (reduced instruction set computer) โดยใช้สัญญาณนาฬิกาเพียง 1 ลูกในการปฏิบัติงานใน 1 คำสั่ง โดยจะประกอบด้วยหน่วยความจำโปรแกรมภายในที่เป็นแบบแฟลช โปรแกรมข้อมูลได้ในวงจรโดยไม่ต้องถอดชิพไมโครคอนโทรลเลอร์ และในบางเบอร์ยังสามารถมีการกำหนดตำแหน่งของหน่วยความจำที่สร้างเป็นบูตโพลเดอร์ (เขียนโปรแกรมเพื่อติดต่อกับคอมพิวเตอร์หรือไอซีตัวอื่นๆ และยังสามารถโปรแกรมให้กับตัวเองได้) มีขนาดของหน่วยความจำตามเบอร์ของไอซีแต่ละตัว

RISC คือการให้ชิพทำงานที่มีไซเคิลแน่นอน โดยลดจำนวนคำสั่งลงให้เหลือคำสั่งพื้นฐานมากที่สุด แล้วใช้หลักการไปป์ไลน์ (pipeline) คือการนำเอาคำสั่งมาเรียงการทำงานให้เป็นแบบขนานเหลื่อมกันหรือเข้าทำงานในแต่ละตำแหน่งตามลำดับเรียงกันไป ทุกตำแหน่งงานจะมี

การทำงานตลอดเวลาจึงเป็นการลดจำนวนคำสั่งลงนั่นเอง ซึ่งเรียกการทำงานของซีพียูแบบนี้ เป็นประเภท RISC ซึ่งเป็นสถาปัตยกรรมที่มีโครงสร้างเป็นแบบ RISC จึงทำงานได้เร็วและเป็น กลไกที่สามารถเพิ่มขีดความสามารถโดยรวมได้หนึ่งคำสั่งใช้เวลาหนึ่งลูกของสัญญาณ นั่นคือถ้า เป็น 10 เมกะเฮิร์ตซ์ ก็ทำได้ 10 ล้านคำสั่งในเวลา 1 วินาที ทำให้สามารถใช้คำสั่งง่ายขึ้น ไม่ยุ่งยาก ซับซ้อน

เครื่องโปรแกรมแบบ ISP (In-System Programming) สามารถโปรแกรมข้อมูลลงใน หน่วยความจำโปรแกรมได้โดยตรงโดยไม่ต้องถอดไอซีออกจากบอร์ด มีวงจรที่ไม่ซับซ้อน การ แก้ไขข้อมูลทำได้สะดวกและรวดเร็ว ดังนั้นการปรับปรุงข้อมูลในหน่วยความจำโปรแกรมที่อยู่ ภายในตัวไอซี จึงทำได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว [10]

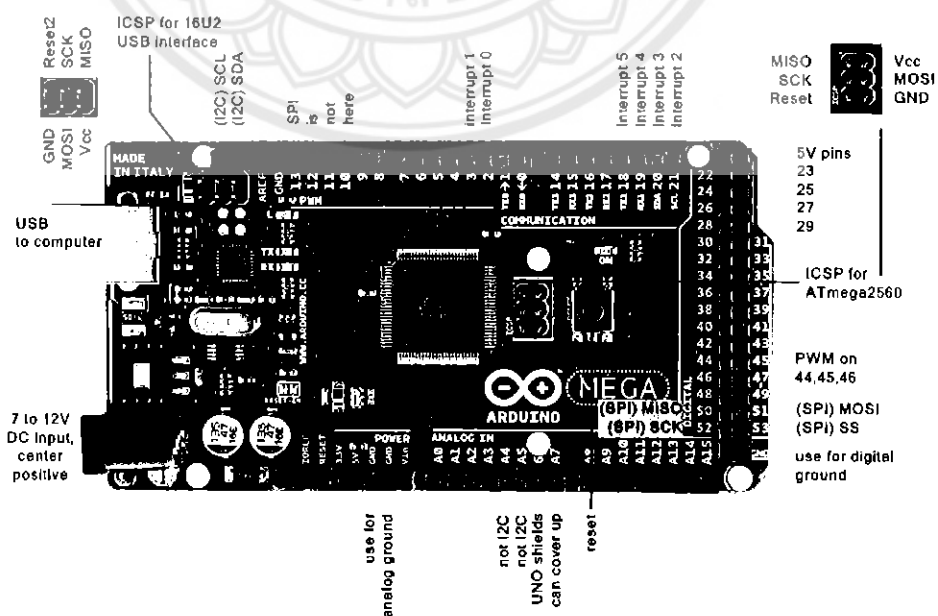
2.5.2 ข้อมูลทั่วไปของบอร์ด

บอร์ดอาดูโน่ Mega 2560 ที่เราใช้เป็นรุ่นปรับปรุงที่ 3 (Revition 3) หรือ R3 มีคุณสมบัติ เพิ่มเติมจากรุ่นปรับปรุงที่ 2 ดังนี้

- พอร์ตเอาต์พุต 1.0 : เพิ่ม SDA และ SCL (อยู่ใกล้กับพอร์ต AREF) และอีกสองพอร์ต ใหม่คือ IOREF เป็นพอร์ตที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับชิคด์เพื่อแปลงเป็นแรงดันที่ได้จากบอร์ด ส่วนอีก 1 พอร์ต ที่เหลือมีไว้สำหรับใช้ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ในอนาคต

- วงจรรีเซตที่ดัดขึ้น

- ใช้ ATmega 16U2 แทน 8U2 ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของบอร์ดอาดูโน่ [11]

1922025X



สำนักงานเขต

24 ส.ค. 2561

- VIN เป็นพอร์ตแรงดันของบอร์ดอาดูโน โดยใช้แหล่งจ่ายจากภายนอก
- 5V เป็นพอร์ตเอาต์พุตที่ควบคุม 5 โวลต์จากบอร์ด
- 3V3 เป็นแหล่งพลังงาน 3.3 โวลต์ ที่สร้างขึ้นจากรีจูลเตอร์บนบอร์ดและให้กระแสได้สูงสุด 50 มิลลิแอมป์

- GND เป็นพอร์ตกราวด์

- IOREF เป็นพอร์ตที่ให้แรงดันอ้างอิงกับไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อเลือกค่าแรงดันให้กับชิปส์ที่มาเชื่อมต่อกับบอร์ด

- แหล่งพลังงาน

สามารถเชื่อมรับพลังงานโดยการเชื่อมต่อสายไมโครยูเอสบีหรือจากพาวเวอร์ซัพพลายจากภายนอกได้ โดยแหล่งพลังงานจะถูกเลือกโดยอัตโนมัติ แหล่งจ่ายจากภายนอกสามารถมาได้จากตัวแปลงไฟกระแสสลับเป็นกระแสตรงหรือจากแบตเตอรี่ โดยต่อเข้าปลั๊กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2.1 มิลลิเมตร ไปยังช่องเสียบแหล่งจ่ายและการต่อเข้ากับแบตเตอรี่สามารถทำได้โดยการต่อกับกราวด์และพอร์ตตัวนำของจุดเชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟ

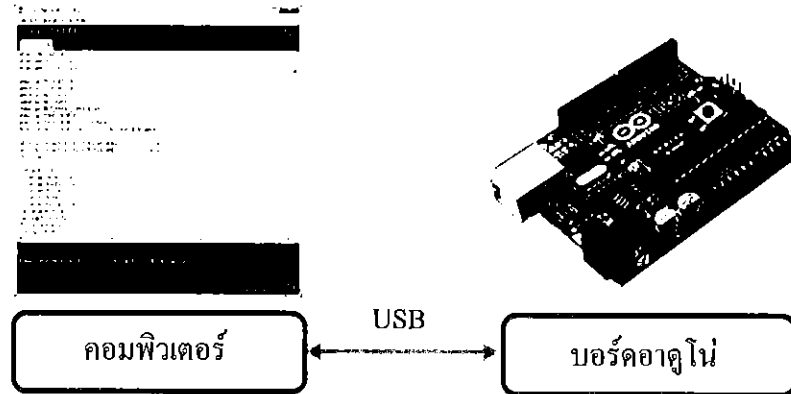
- หน่วยความจำ

มีหน่วยความจำ 256 กิโลไบต์ (8 กิโลไบต์ ใช้สำหรับฮาร์ดไดรฟ์โปรแกรม) นอกจากนี้ยังมีอีก 8 กิโลไบต์ สำหรับหน่วยความจำแบบสแตติกแรม (SRAM) และ 4 กิโลไบต์ สำหรับหน่วยความจำแบบอีพีรอม (EEPROM) ในแต่ละดิจิทัลพอร์ตทั้ง 54 พอร์ต บนบอร์ดอาดูโนสามารถเป็นได้ทั้งอินพุตและเอาต์พุต โดยจะสามารถทำงานที่แรงดัน 5 โวลต์ และให้กระแสสูงสุด 40 มิลลิแอมป์

- การติดต่อสื่อสาร

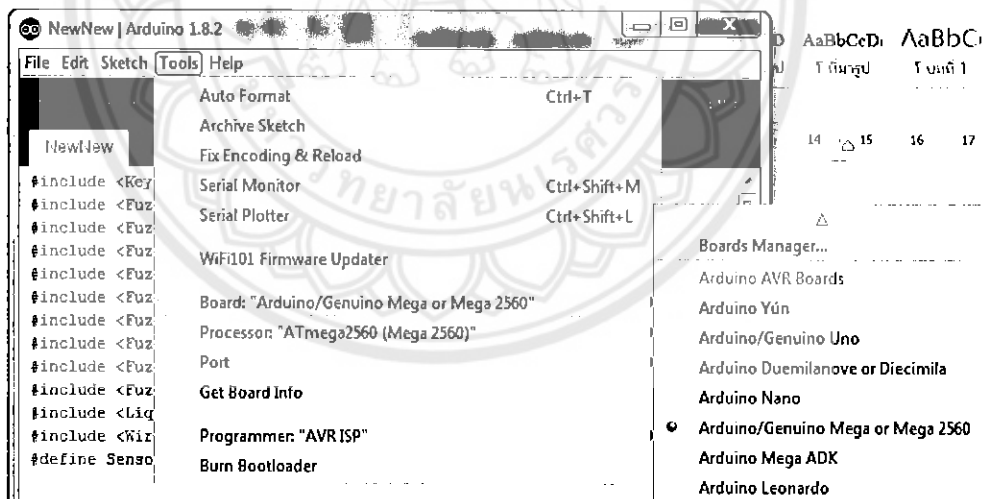
ไมโครคอนโทรลเลอร์บนบอร์ดคือ ATmega32U4 จะให้การสื่อสารแบบอนุกรม UART TTL (5 โวลต์) ซึ่งมีอยู่ในพอร์ต 0 (Rx) และ 1 (Tx) นอกจากนี้ 32U4 สามารถใช้การสื่อสารแบบอนุกรมผ่านสายเชื่อมต่อยูเอสบีและจะปรากฏเป็นพอร์ตคอมเสมือนไปยังซอฟต์แวร์ แต่อย่างไรก็ตามต้องใช้ไฟล์ .inf บนระบบปฏิบัติการวินโดวส์แต่ แมคโอเอส และลินุกซ์ สามารถรับรู้ได้โดยอัตโนมัติ [12]

2.5.3 รูปแบบการเขียนโปรแกรมบนอาดูโน่

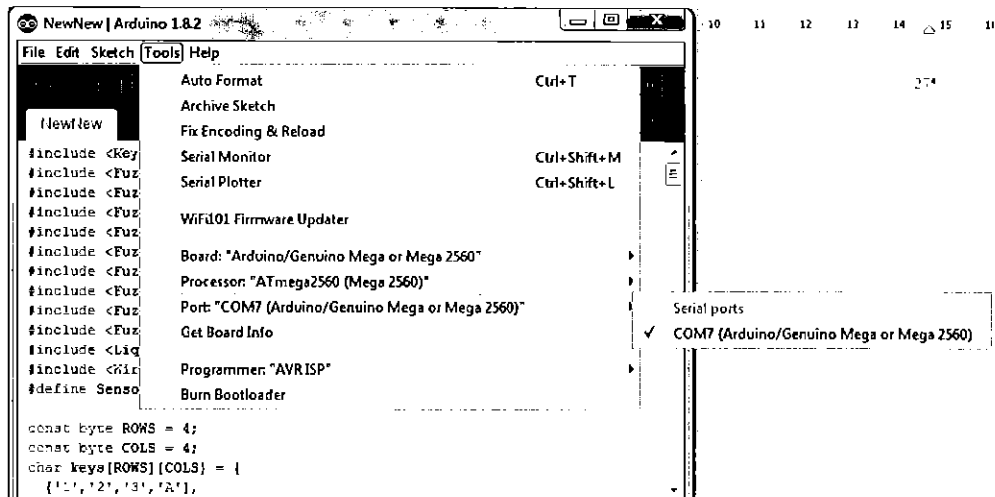


รูปที่ 2.13 การเชื่อมต่อเพื่อเขียนโปรแกรมบนอาดูโน่ [9]

- 1) เขียนโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ผ่านทางโปรแกรมอาดูโน่ไอดีอีซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้จาก Arduino.cc/en/main/software สำหรับการเชื่อมต่อได้ตามรูปที่ 2.13
- 2) หลังจากที่เขียนโค้ดโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว ให้ผู้ใช้งานเลือกรุ่นบอร์ดอาดูโน่ที่ใช้ตามรูปที่ 2.14 และเลือกหมายเลขบอร์ดอาดูโน่ตามรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.14 เลือกุ่นบอร์ดอาดูโน่ที่ต้องการอัปโหลด

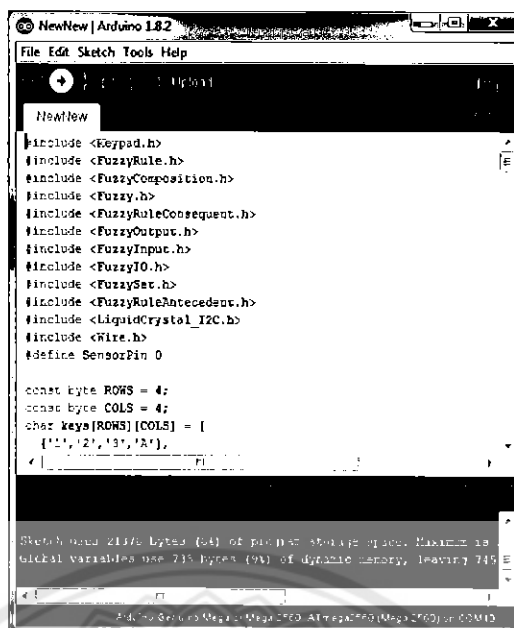


รูปที่ 2.15 เลือกหมายเลขพอร์ตของบอร์ดอาดูโน่

3) กดปุ่ม Verify เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและคอมไพล์โค้ดโปรแกรม จากนั้นกดปุ่มอัปโหลด โค้ดโปรแกรมไปยังบอร์ดอาดูโน่ผ่านทางสายเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ เมื่ออัปโหลดเรียบร้อยแล้วจะแสดงข้อความแถบข้างล่าง "Done uploading" และบอร์ดจะเริ่มทำงานตามที่เขียนโปรแกรมไว้ได้ทันที ตามรูปที่ 2.16(ก) และ 2.16(ข)



(ก)



```

NewNew | Arduino 1.8.2
File Edit Sketch Tools Help

NewNew
#include <Keypad.h>
#include <FuzzyRule.h>
#include <FuzzyComposition.h>
#include <Fuzzy.h>
#include <FuzzyRuleConsequent.h>
#include <FuzzyOutput.h>
#include <FuzzyInput.h>
#include <FuzzyIO.h>
#include <FuzzySet.h>
#include <FuzzyRuleAntecedent.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Wire.h>
#define SensorPin 0

const byte ROWS = 4;
const byte COLS = 4;
char keys[ROWS][COLS] = {
  {'1', '2', '3', 'A'},
  ...
};

Sketch uses 21376 bytes (64% of program storage space. Maximum is 32768 bytes.)
Global variables use 713 bytes (9% of dynamic memory, leaving 749 bytes free.)
Arduino Boards (Mega, Mega Pro, ATmega1280 (Mega 2560) or COM10

```

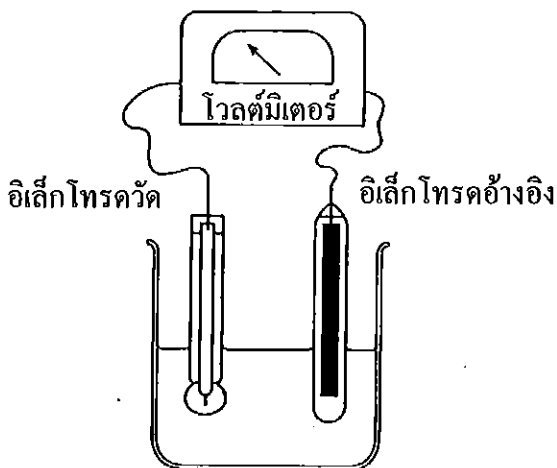
(ก)

รูปที่ 2.16 (ก) กดปุ่ม Verify เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและคอมไพล์โค้ดโปรแกรม

(ข) อัปโหลดโค้ดโปรแกรม

2.6 เซนเซอร์วัดค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำ

การวัดพีเอช คือการวัดสภาพความเป็นกรดหรือเป็นเบสของสารละลาย ที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย (Aqueous Solution) โดยใช้หลักการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกี่ยวกับอิเล็กตรอนและกระแสไฟฟ้า โดยการวัดความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference Electrode) กับอิเล็กโทรดตรวจวัด (Sensing Electrode) ความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นได้จากจำนวนของไฮโดรเจนไอออน (H⁺) ความต่างศักย์ที่เกิดจากไอออน (Ionic Potential) จะถูกเปลี่ยนให้เป็นความต่างศักย์ทางไฟฟ้า (Electronic Potential) แล้วขยายให้มีความต่างศักย์สูงขึ้นด้วยเครื่องพีเอชมิเตอร์ (Potentiometer) ดังรูปที่ 2.17 [13]



รูปที่ 2.17 การทำงานของโวลต์มิเตอร์

2.6.1 ส่วนประกอบของเครื่องวัดค่าพีเอช

พีเอชมิเตอร์ คือเครื่องมือทางไฟฟ้าที่ใช้วัดค่าพีเอชของสารละลาย โดยหลักการวัดความต่างศักย์ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน ที่ทำให้เครื่องสามารถทำงานได้ครบวงจรส่วนประกอบทั้ง 2 คือ อิเล็กโทรดและตัวเครื่อง

1) อิเล็กโทรด ทำหน้าที่เป็นภาคตรวจรับความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในสารละลายที่พีเอช 7 (Standard pH Buffer) ความต่างศักย์ระหว่างอิเล็กโทรดทั้ง 2 คือ อิเล็กโทรดอ้างอิงกับอิเล็กโทรดตรวจวัด จะมีค่าความต่างศักย์เท่ากับศูนย์มิลลิโวลต์ ถ้าหากความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้นหรือลดลง ความต่างศักย์ก็จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในสารละลายนั้น โดยมีอิเล็กโทรดเป็นตัวทำหน้าที่รับสัญญาณ

2) ตัวเครื่องพีเอชมิเตอร์ ก็คือ โวลต์มิเตอร์ทำหน้าที่สำคัญ 3 ประการ คือ

- 2.1) ปรับความต่างศักย์ให้กับอิเล็กโทรดอ้างอิง ให้มีค่าความต่างศักย์เป็นศูนย์และคงที่
- 2.2) แปลงสัญญาณจากความต่างศักย์ของไอออนของอิเล็กโทรดให้เป็นความต่างศักย์ทางไฟฟ้า
- 2.3) ขยายสัญญาณค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้า ให้เพิ่มมากขึ้นอย่างเพียงพอให้แสดงผลที่มิเตอร์แบบเข็มหรือตัวเลข

อิเล็กโทรดปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นแบบอิเล็กโทรดรวม ซึ่งออกแบบไว้ให้สะดวกในการใช้งาน โดยรวมส่วนของอิเล็กโทรดอ้างอิงและอิเล็กโทรดตรวจวัดมาอยู่ด้วยกัน ตามรูปที่ 2.18

อิเล็กโทรดตรวจวัด ทำด้วยแก้วชนิดพิเศษที่ยอมให้เฉพาะไฮโดรเจนไอออนผ่าน ส่วนใหญ่ออกแบบเป็นรูปกระเปาะ ภายในบรรจุบัฟเฟอร์เอาไว้แต่มีบางประเภทเป็นรูปอื่น เช่น รูปเข็ม ทุกชนิดจะเหมือนกันตรงบริเวณที่ไฮโดรเจนไอออนผ่านผิวแก้วจะบางมาก

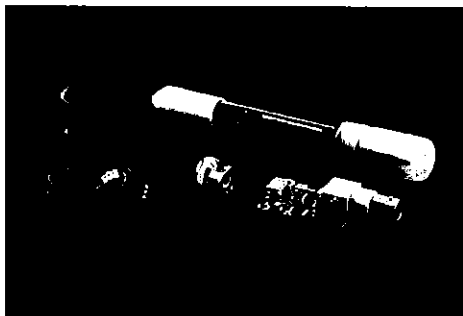
อิเล็กโทรดอ้างอิง ทำหน้าที่ให้ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ขั้วตรวจวัดเดินครบวงจร โดยโพแทสเซียมคลอไรด์ชนิดอิ่มตัวที่อยู่ในอิเล็กโทรดอ้างอิงซึมผ่านออกมาเป็นสะพานไอออนหรือสะพานเกลือเชื่อมอิเล็กโทรดตรวจวัด



รูปที่ 2.18 ส่วนประกอบของหัววัดพีเอชเซนเซอร์ [14]

2.6.2 เครื่องวัดพีเอช

พีเอชเซนเซอร์รุ่น SKU: SEN0161 นี้ออกแบบมาเพื่อใช้งานร่วมกับบอร์ดอาดูโน เนื่องจากไม่มีเครื่องวัดที่มีราคาถูกและมีเอาต์พุตเป็นแบบแอนะล็อกสำหรับใช้กับบอร์ดอาดูโน มีสายเคเบิลแอนะล็อกสำหรับใช้งานเชื่อมต่อกับบอร์ดอาดูโน เพื่ออ่านค่าพีเอชได้ง่ายขึ้นอีกด้วย ลักษณะของเซนเซอร์แสดงได้ดังรูปที่ 2.19 [15]



รูปที่ 2.19 พีเอสเซนเซอร์รุ่น SEN0161 [15]

1) ข้อมูลทั่วไปของพีเอสเซนเซอร์

- 1) แรงดันไฟฟ้า: 5 ± 0.2 โวลต์
- 2) กระแสไฟฟ้า: 5-10 มิลลิแอมป์
- 3) ความเข้มข้นที่ตรวจพบช่วง: 0-14 พีเอส
- 4) อุณหภูมิในการทำงาน: 0-60 องศาเซลเซียส
- 5) เวลาตอบสนอง: ≤ 1 วินาที
- 6) ความแม่นยำ: ± 0.1 พีเอส (ที่ 25 องศาเซลเซียส)
- 7) ความชื้น: 95 เปอร์เซ็นต์ ความชื้นสัมพัทธ์
- 8) อายุการใช้งาน: 3 ปี [15]

2) ลักษณะค่าที่วัดได้ของหัวโพรบพีเอสเซนเซอร์

เอาที่พุดที่วัดได้มีค่าเป็นมิลลิโวลต์และเปรียบเทียบกับเป็นค่าพีเอส แสดงค่าดังตารางที่ 2.6 โดยทำการวัดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 2.6 ลักษณะค่าที่วัดได้ของพีเอชเซนเซอร์

แรงดัน (มิลลิโวลต์)	ค่าพีเอช	แรงดัน (มิลลิโวลต์)	ค่าพีเอช
414.12	0.00*	-414.12	14.00
354.96	1.00	-354.96	13.00
295.80	2.00	-295.80	12.00
236.64	3.00	-236.64	11.00
177.48	4.00	-177.48	10.00
118.32	5.00	-118.32	9.00
59.16	6.00	-59.16	8.00
0.00	7.00	0.00	7.00

หมายเหตุ ค่าพีเอชศูนย์ คือ ค่าพีเอชที่ใช้อ้างอิงของพีเอชเซนเซอร์เท่านั้น



บทที่ 3

ขั้นตอนวิธีดำเนินงาน

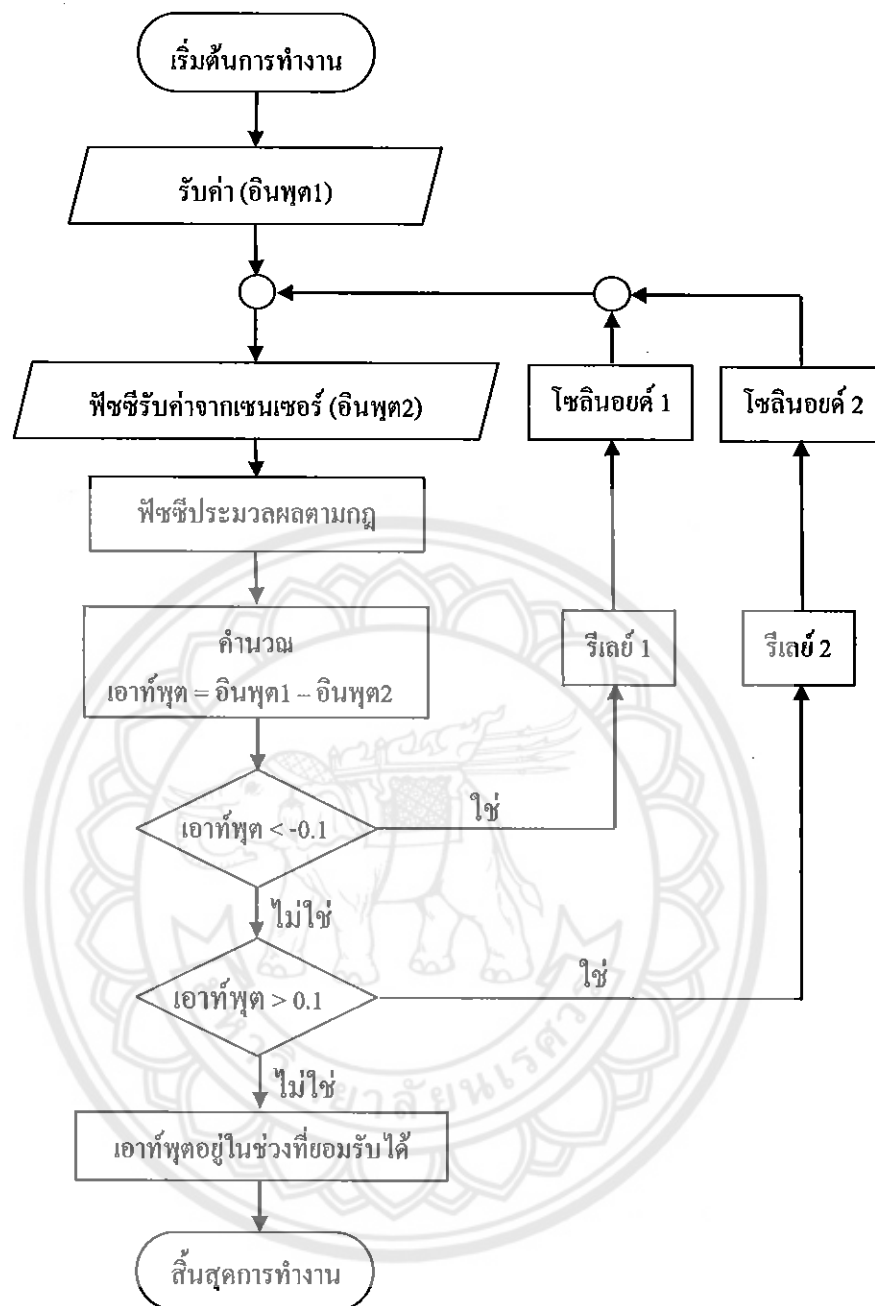
หลังจากศึกษาเกี่ยวกับหลักการต่างๆ และรายละเอียดเกี่ยวกับส่วนประกอบหลักของการควบคุมค่าพีเอชของน้ำโดยตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกแล้ว เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึง การออกแบบโครงสร้างและระบบของเครื่องควบคุมค่าพีเอชของน้ำ การทำงานของระบบ และการหาปริมาณสารละลายที่จะใช้ควบคุมค่าพีเอช ในการออกแบบและสร้างเครื่องควบคุมค่าพีเอชของน้ำได้แบ่งออกเป็น 4 ส่วนดังนี้

- 1) การออกแบบวงจรควบคุมการทำงาน
- 2) การออกแบบ โครงสร้างของเครื่องควบคุมค่าพีเอช
- 3) การหาค่าที่เหมาะสมในการปล่อยสารละลาย
- 4) การออกแบบการทำงานตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก

3.1 การออกแบบวงจรควบคุมการทำงาน

ในส่วนของขั้นตอนการทำงานของระบบควบคุมพีเอชสามารถอธิบายได้จากรูปที่ 3.1 นั้นจะแบ่งการทำงานได้เป็นสามส่วนใหญ่ๆด้วยกัน ซึ่งจะแบ่งได้ดังนี้

- 1) เริ่มต้นการทำงานตั้งค่าพีเอชที่ต้องการ โดยค่าที่ตั้งไว้ใช้แทนด้วยตัวแปร อินพุต1 และค่าจากเซนเซอร์ตรวจวัดค่าพีเอชแทนด้วยตัวแปร อินพุต2
- 2) เมื่อบอร์ดอาดูโน้รับค่าตัวแปร อินพุต1 และ อินพุต2 ที่ได้จากการตั้งค่าและจากเซนเซอร์ตามลำดับแล้ว นำไปใช้ในการทำงานแบบฟัซซี่ที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งมีบอร์ดอาดูโน้เป็นตัวควบคุมและประมวลผลข้อมูล
- 3) เมื่อบอร์ดอาดูโน้ประมวลผลเสร็จแล้วจะส่งผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลด้วยฟัซซี่ โดยค่าที่ได้คือระยะเวลาที่โซลินอยด์ทำงาน นำไปแสดงผลยังหน้าจอแสดงผลซึ่งจะประกอบด้วยค่าพีเอชที่วัดได้ในปัจจุบัน สารละลายที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช เวลาที่โซลินอยด์ทำงาน และค่าพีเอชที่ตั้งค่าไว้



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการทำงานของระบบควบคุมฟัซซี่

ซึ่งการแสดงผลจะมีการทำงานด้วยกัน 3 กรณีด้วยกัน ดังนี้

กรณีที่ 1 ตัวแปรอินพุต2 ที่บอร์ดอาดูโนรับข้อมูลจากเซนเซอร์มีค่าฟัซซี่มากกว่าค่าที่เราต้องการคือ อินพุต1 จึงกำหนดตัวแปรเพิ่มคือ เอาท์พุต โดยออกแบบให้เอาท์พุตมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่าง อินพุต1 และ อินพุต2 บอร์ดอาดูโนจะสั่งให้ รีเลย์ 1 ทำงานเนื่องจากค่าตัวแปรเอาท์พุตมีค่าน้อยกว่า -0.1 บอร์ดอาดูโนจึงแสดงผลให้เพิ่มสารละลายเพื่อลดความเป็นเบสในน้ำ ซึ่งจะแสดงตามระยะเวลาที่ฟัซซี่ที่ได้คำนวณไว้ แสดงดังตัวอย่างในรูปแบบจำลอง รูปที่ 3.2

```

FH sensor : 6.53
Drop : BUFFER FH 4
Time Drop :17.19 s
FH setting : 6.00

```

รูปที่ 3.2 ตัวอย่างแสดงค่าเมื่อพีเอชที่วัดได้มากกว่าค่าที่กำหนด

กรณีที่ 2 ตัวแปรที่บอร์ดอาดูโนรับข้อมูลจากเซนเซอร์มีค่าพีเอชน้อยกว่าค่าที่เราต้องการ บอร์ดอาดูโนจะสั่งให้ รีเลย์ 2 ทำงานเนื่องจากค่าตัวแปรเอาท์พุทมีค่ามากกว่า 0.1 บอร์ดอาดูโนจึงแสดงผลให้เพิ่มสารละลายเพื่อเพิ่มความเป็นเบสในน้ำ ซึ่งจะแสดงตามระยะเวลาที่พีชซีที่ได้คำนวณไว้แสดงดังตัวอย่างในรูปแบบจำลอง รูปที่ 3.3

```

FH sensor : 6.53
Drop : BUFFER FH 10
Time Drop :5.74 s
FH setting : 7.00

```

รูปที่ 3.3 ตัวอย่างแสดงค่าเมื่อพีเอชที่วัดได้น้อยกว่าค่าที่กำหนด

กรณีที่ 3 ตัวแปรที่บอร์ดอาดูโนรับข้อมูลจากเซนเซอร์วัดพีเอชมีค่าอยู่ในช่วงที่สามารถรับได้นั้นคือ เอาท์พุท มีค่าอยู่ระหว่าง -0.1 และ 0.1 บอร์ดอาดูโนจะแสดงผลค่าพีเอชที่เซนเซอร์วัดค่าได้ และแสดงผลว่าไม่มีการปรับปรุงค่าพีเอชหรือเติมสารละลายใดๆเพื่อเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชอีก แสดงดังตัวอย่างในรูปแบบจำลอง รูปที่ 3.4

```

FH sensor : 6.53
Drop : No Drop

FH setting : 6.50

```

รูปที่ 3.4 ตัวอย่างแสดงค่าเมื่อพีเอชที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้

3.2 การออกแบบโครงสร้างของเครื่องควบคุมค่าพีเอช

การออกแบบโครงสร้างของเครื่องควบคุมค่าพีเอช แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

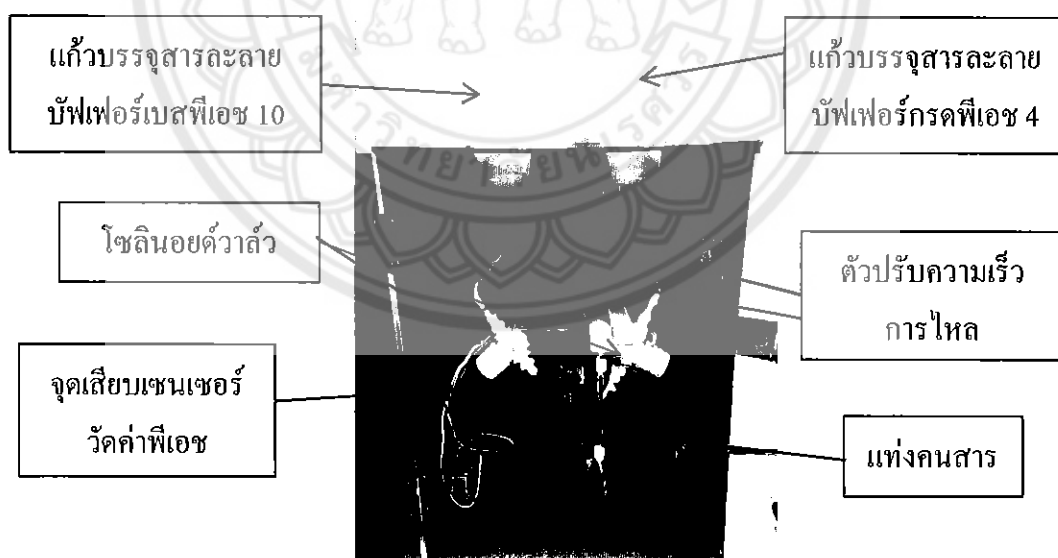
3.2.1 การออกแบบโครงสร้างภายนอกของเครื่องควบคุม

เราจะแบ่งงานออกเป็น 3 ส่วน รายละเอียดมีดังนี้

1) การต่อแก้วบรรจุสารกับโซลินอยด์ เราใช้แก้วพลาสติกนำมาทำความสะอาดแล้วพ่นสีขาว เพื่อให้งานมีความเรียบร้อยน่าใช้งาน ซึ่งการพ่นสีนอกจากเราจะพ่นสีแก้วบรรจุสารแล้ว เรายังพ่นสีขาว่าที่โซลินอยด์ด้วย รอจนแห้ง

2) โครงบอร์คติดตั้งแก้วบรรจุสาร เราใช้ไม้้อครองกระดาษวาครูปขนาดกว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 40 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ขนาดกว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 40 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น และขนาดกว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ทุกแผ่นมีความหนา 2.5 มิลลิเมตร เมื่อตัดไม้ไม่ได้ตามขนาดที่ต้องการ แล้วนำมาประกอบกับแก้วบรรจุสารกับโซลินอยด์ ดังรูปที่ 3.5

3) การประกอบแท่งคนสารละลาย เราใช้มอเตอร์ไฟกระแสตรงขนาด 5 โวลต์ ความเร็วรอบ 150 รอบ ส่วนแท่งคนสารเราไม่กำหนดขนาดที่แน่นอน แล้วแต่การใช้งาน



รูปที่ 3.5 โครงสร้างการปล่อยสารละลายเพื่อควบคุมค่าพีเอช

3.2.2 การออกแบบฮาร์ดแวร์ของเครื่องควบคุมค่าพีเอช

การออกแบบฮาร์ดแวร์ของเครื่องควบคุมค่าพีเอชประกอบด้วย การเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ 6 ข้อหลัก ดังนี้

1) การเชื่อมต่อหน้าจอลiquid crystal display กับบอร์ดอาดูโน

ในการเชื่อมต่อหน้าจอลiquid crystal display กับบอร์ดอาดูโน โดยทั่วไปจอลiquid crystal display จะมีส่วนควบคุม (Controller) อยู่ในตัวแล้วสามารถส่งรหัสคำสั่งสำหรับควบคุมการทำงานของจอลiquid crystal display เช่นเดียวกันกับจอลiquid crystal display แบบธรรมดา คือรหัสคำสั่งที่ใช้ในการควบคุมนั้นเหมือนกัน แต่ต่างกันตรงที่รูปแบบในการรับส่งข้อมูล ซึ่งเราจะใช้หน้าจอลiquid crystal display ที่มีการส่งข้อมูลรูปแบบการสื่อสารอนุกรมแบบซิงโครนัส (I2C) ที่ใช้ขาเพียง 4 ขาที่ใช้ในการเชื่อมต่อดังนี้

- 1) GND เป็นกราวด์ ใช้ต่อระหว่างกราวด์ของบอร์ดอาดูโนกับหน้าจอลiquid crystal display
- 2) VCC เป็นไฟเลี้ยงรับจากบอร์ดอาดูโนป้อนให้กับหน้าจอลiquid crystal display มีขนาด +5 โวลต์
- 3) SDA (Serial Data) เป็นขาที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลเชื่อมกับพอร์ต 20 ของบอร์ดอาดูโน
- 4) SCL (Serial Clock) เป็นขาสัญญาณนาฬิกาในการรับส่งข้อมูลเชื่อมกับพอร์ต 21

ของบอร์ดอาดูโน

ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.1 และตัวอย่างหน้าจอแสดงผลตามรูปที่ 3.6

ตารางที่ 3.1 การเชื่อมต่อบอร์ดอาดูโนกับหน้าจอลiquid crystal display

บอร์ดอาดูโน	หน้าจอลiquid crystal display
GND	GND (พอร์ต 1)
+5VDC	VCC (พอร์ต 2)
SDA (พอร์ต 20)	SDA (พอร์ต 3)
SCL (พอร์ต 21)	SCL (พอร์ต 4)



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างการแสดงผลบนหน้าจอลiquid crystal display

2) การเชื่อมต่อรีเลย์กับบอร์ดอาดูโน่

การเชื่อมต่อรีเลย์กับบอร์ดอาดูโน่เพื่อควบคุมการเปิด-ปิดรีเลย์ได้ 2 ช่อง ใช้ไฟเลี้ยง 5 โวลต์ ส่งสัญญาณควบคุมแบบแอกทีฟต่ำ ถ้าต้องการให้รีเลย์ติดส่งสัญญาณ 0 ถ้าต้องการให้ดับส่งสัญญาณ 1 วงจรเป็นแบบแยกกราวด์ เพื่อความปลอดภัยของบอร์ดอาดูโน่โดยจะใช้ขาในการเชื่อมต่อทั้งหมด 4 ขา ดังนี้

- 1) GND เป็นกราวด์ ใช้ต่อระหว่างกราวด์ของบอร์ดอาดูโน่กับรีเลย์
- 2) IN1 เป็นขารับสัญญาณดิจิทัล (0 หรือ 1) อินพุต 1 เชื่อมกับพอร์ต 2 ของบอร์ดอาดูโน่
- 3) IN2 เป็นขารับสัญญาณดิจิทัล (0 หรือ 1) อินพุต 2 เชื่อมกับพอร์ต 3 ของบอร์ดอาดูโน่
- 4) VCC เป็นไฟเลี้ยงรับจากบอร์ดอาดูโน่ป้อนให้กับรีเลย์ มีขนาด +5 โวลต์

ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตาราง 3.2

ตารางที่ 3.2 การเชื่อมต่อบอร์ดอาดูโน่กับรีเลย์

บอร์ดอาดูโน่	รีเลย์
GND	GND (พอร์ต 1)
พอร์ต 2	IN1 (พอร์ต 2)
พอร์ต 3	IN2 (พอร์ต 3)
+5VDC	VCC (พอร์ต 4)

3) การเชื่อมต่อพีเอชเซนเซอร์กับบอร์ดอาดูโน่

การต่อวงจรเซนเซอร์วัดค่าพีเอชกับบอร์ดอาดูโน่ในการวัดค่าพีเอชของน้ำด้วยพีเอชเซนเซอร์ โดยบอร์ดอาดูโน่จะต่อเข้ากับตัวพีเอชเซนเซอร์โมดูลผ่านทาง การสื่อสารแบบอนุกรมของบอร์ดส่วนการต่ออุปกรณ์เข้ากับพีเอชเซนเซอร์โมดูล ให้ต่ออย่างระมัดระวังเพราะถ้าสลับสายอาจทำให้บอร์ดพังได้ เพราะตัวพีเอชเซนเซอร์โมดูลออกแบบไว้ให้ใช้กับไฟ 3.3 โวลต์ แต่ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ของบอร์ดสามารถรับไฟได้ถึง 5 โวลต์ ดังนั้นจึงสามารถใช้กับบอร์ดอาดูโน่ได้ แต่ต้องต่ออุปกรณ์ตามที่แนะนำเท่านั้น โดยจะประกอบด้วยขาการเชื่อมต่อ 3 ขา ดังนี้

- 1) GND เป็นกราวด์ ใช้ต่อระหว่างกราวด์ของบอร์ดอาดูโน่กับพีเอชเซนเซอร์โมดูล
- 2) VCC เป็นไฟเลี้ยงจากบอร์ดอาดูโน่ป้อนให้กับพีเอชเซนเซอร์โมดูล มีขนาด +5 โวลต์
- 3) A ซึ่งเป็นขาส่งข้อมูล โดยจะส่งข้อมูลแอนะล็อก (0-1023) โดยเชื่อมต่อกับพอร์ต A0 ของบอร์ดอาดูโน่ซึ่งเป็นพอร์ตที่ใช้ในการรับข้อมูลแบบแอนะล็อกของบอร์ดอาดูโน่

ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตาราง 3.3 และตัวอย่างการแสดงผลตามรูปที่ 3.7

ตารางที่ 3.3 การเชื่อมต่อบอร์ดอาดูโน้กับเซนเซอร์วัดค่าพีเอช

บอร์ดอาดูโน่	เซนเซอร์
GND	GND (พอร์ต 1)
+5VDC	VCC (พอร์ต 2)
A0 (พอร์ตแอนะล็อก A0)	A (พอร์ต 3)



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างค่าพีเอช ที่วัดได้แสดงผลในบอร์ดอาดูโน่

4) การเชื่อมต่อปุ่มกดคีย์แพด

ปุ่มกดคีย์แพดมีลักษณะเป็นปุ่มกดหลายปุ่มจัดเรียงกันในลักษณะเป็นอาร์เรย์ แบ่งเป็นแถวแนวนอน (Rows) และแถวแนวตั้ง (Columns) โดยจะใช้เป็น 4X4 (16 ปุ่ม) มีสายเชื่อมต่อและคอนเนกเตอร์จำนวน 8 ขา แบบตัวเมีย นับจากซ้ายไปขวาจะเป็นหมายเลข 1-8 ตามลำดับ โดยที่ขา 1-4 จะเป็นขาสำหรับแถว และขา 5-8 จะเป็นขาแนวตั้งใน โดยจะทำการเชื่อมต่อเป็น

- 1) D2 เป็นขาแนวนอน (ขา 1) เชื่อมต่อกับพอร์ต 5 ของบอร์ดอาดูโน่
- 2) D3 เป็นขาแนวนอน (ขา 2) เชื่อมต่อกับพอร์ต 6 ของบอร์ดอาดูโน่
- 3) D4 เป็นขาแนวนอน (ขา 3) เชื่อมต่อกับพอร์ต 7 ของบอร์ดอาดูโน่
- 4) D5 เป็นขาแนวนอน (ขา 4) เชื่อมต่อกับพอร์ต 8 ของบอร์ดอาดูโน่
- 5) D8 เป็นขาแนวตั้ง (ขา 5) เชื่อมต่อกับพอร์ต 9 ของบอร์ดอาดูโน่

- 6) D9 เป็นขาแนวตั้ง (ขา 6) เชื่อมต่อกับพอร์ต 10 ของบอร์ดอาดูโน่
- 7) D10 เป็นขาแนวตั้ง (ขา 7) เชื่อมต่อกับพอร์ต 11 ของบอร์ดอาดูโน่
- 8) D11 เป็นขาแนวตั้ง (ขา 8) เชื่อมต่อกับพอร์ต 12 ของบอร์ดอาดูโน่

ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตาราง 3.4

ตารางที่ 3.4 การเชื่อมต่อบอร์ดอาดูโน่กับปุ่มกดคีย์แพด

บอร์ดอาดูโน่	ปุ่มกดคีย์แพด
พอร์ต 5	D2 (ขา 1)
พอร์ต 6	D3 (ขา 2)
พอร์ต 7	D4 (ขา 3)
พอร์ต 8	D5 (ขา 4)
พอร์ต 9	D8 (ขา 5)
พอร์ต 10	D9 (ขา 6)
พอร์ต 11	D10 (ขา 7)
พอร์ต 12	D11 (ขา 8)

5) การเชื่อมสวิทช์รีเซตกับบอร์ดอาดูโน่

เราใช้สวิทช์รีเซตเพื่อช่วยให้สามารถรีเซตระบบได้สะดวกสบายมากขึ้นและเพื่อความปลอดภัยของวงจรจากการปรับตั้งค่าพีเอชหลายๆครั้ง ซึ่งเราได้ใช้โมดูลสวิทช์ปุ่มกดพร้อมตัวต้านเข้ากับแหล่งจ่ายไฟ 5 โวลต์ ซึ่งสามารถต่อกับบอร์ดอาดูโน่ได้ทันทีโดยมีขาเชื่อมต่อ 3 ขา สามารถเชื่อมต่อได้ดังนี้

- 1) GND เป็นกราวด์ ใช้ต่อระหว่างกราวด์ของบอร์ดอาดูโน่กับ โมดูลสวิทช์ปุ่มกด
- 2) VCC ซึ่งเป็นไฟเลี้ยงเพื่อให้โมดูลสวิทช์โดยให้เชื่อมกับพอร์ตรีเซตของบอร์ดอาดูโน่
- 3) OUT ซึ่งเป็นเอาต์พุตของโมดูลสวิทช์โดยให้เชื่อมต่อกับกราวด์ของบอร์ดอาดูโน่

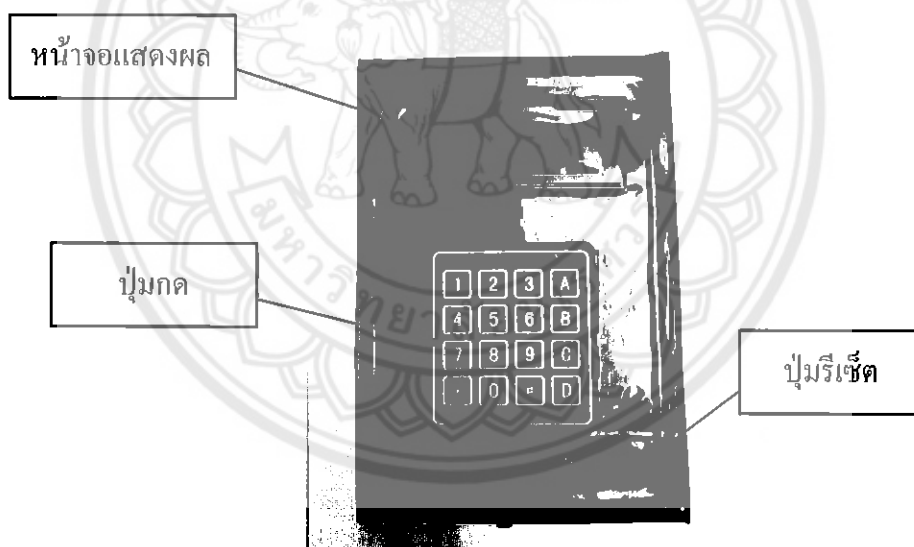
ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 การเชื่อมต่อบอร์ดอาดูโน่กับสวิตช์รีเซต

บอร์ดอาดูโน่	สวิตช์รีเซต
GND	GND (พอร์ต 1)
Reset	VCC (พอร์ต 2)
GND	OUT (พอร์ต 3)

6) การประกอบเครื่องควบคุมค่าพีเอช

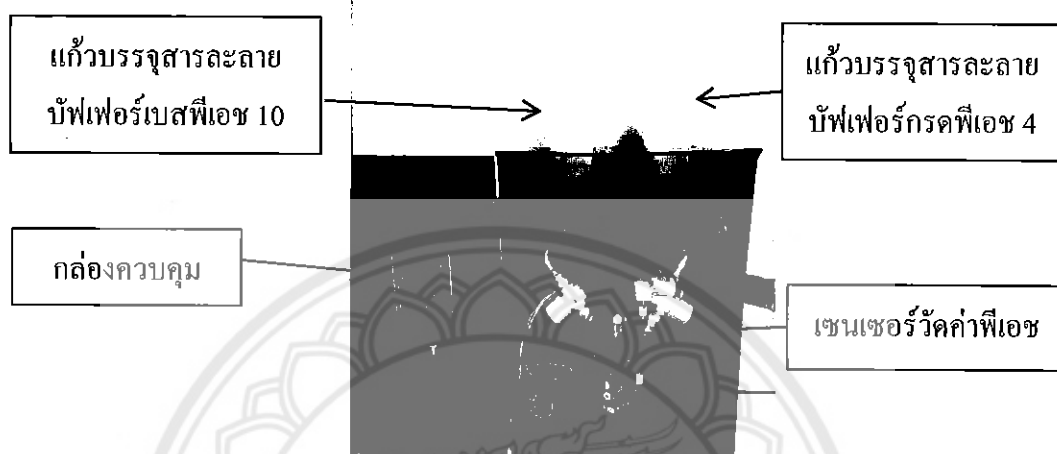
เราใช้กล่องใส่ของจากร้านสะดวกซื้อขนาดกว้าง 13 เซนติเมตร ยาว 18 เซนติเมตร ลึก 6 เซนติเมตร นำมาเจาะฝาเพื่อติดตั้งหน้าจอแอลซีดี ขนาดรูเจาะกว้าง 4 เซนติเมตร ยาว 9 เซนติเมตร และเจาะรูสำหรับสอดสายไฟของปุ่มกดคีย์แพดด้วยขนาดพอดีกับสายไฟใช้งานสะดวก จากนั้น เจาะรูของหัวโพรบเซนเซอร์ เจาะรูของสายรีเลย์ และสุดท้ายรูสำหรับจ่ายไฟให้บอร์ดกับสายต่อคอมพิวเตอร์ เพื่อเพิ่มโปรแกรมในอนาคต เมื่อเจาะรูเสร็จแล้วนำมาประกอบกัน จะได้ตามรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 เครื่องควบคุมค่าพีเอช

3.2.3 การประกอบทุกส่วนเข้าเป็นเครื่องควบคุมค่าพีเอช

หลังจากประกอบส่วนย่อยของเครื่องควบคุมค่าพีเอชไปเรียบร้อยแล้ว เราจะทำการประกอบส่วนต่างๆเข้าด้วยกัน เป็นเครื่องควบคุมตามรูปที่ 3.9 และทำการเขียน โปรแกรมเพื่อทดสอบเครื่องควบคุมค่าพีเอชและปรับปรุงจนสมบูรณ์



รูปที่ 3.9 เครื่องควบคุมค่าพีเอชของน้ำ

3.3 การหาค่าที่เหมาะสมในการปล่อยสารละลาย

การควบคุมค่าพีเอชนั้นจะให้ประสิทธิภาพที่ดี ปริมาณของสารละลายที่ใช้ควบคุมกับปริมาณสารละลายที่ใช้ทดสอบจะต้องมีความเหมาะสมด้วย ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองหาปริมาณของสารละลายที่ใช้ควบคุมค่าพีเอชเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งการทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 การทดลอง โดยการทดลองที่ 1 การวัดค่าพีเอชของสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 10 และพีเอช 4 เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องวัดพีเอชเทียบกับเครื่องวัดพีเอชของห้องปฏิบัติการ การทดลองที่ 2 การหาอัตราการไหลของสารละลาย เพื่อเลือกใช้อัตราการไหลที่ทำให้การควบคุมค่าพีเอชมีประสิทธิภาพที่สุด และการทดลองที่ 3 การทดลองปล่อยสารละลายบัฟเฟอร์ตามเวลาที่กำหนดเพื่อใช้ควบคุมการปล่อยสารละลายบัฟเฟอร์ทั้ง 2 ชนิด

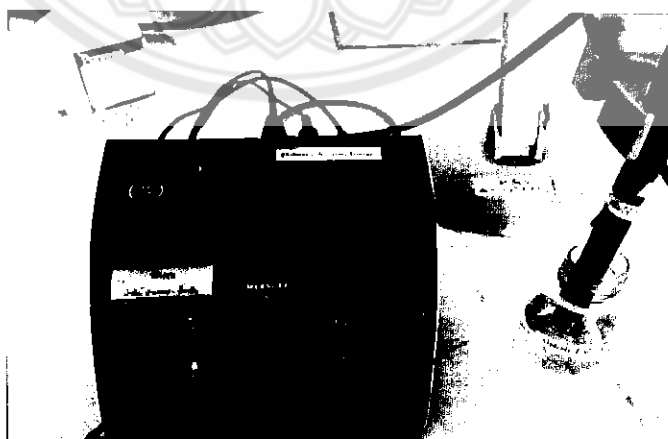
3.3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องวัดพีเอชเปรียบเทียบกับเครื่องวัดพีเอชของห้องปฏิบัติการ

การทดลองนี้ ทดลองเพื่อตั้งค่าเครื่องควบคุมค่าพีเอชของเราให้ตรงกับเครื่องวัดค่าพีเอชทั่วไป โดยเราอาศัยการอ้างอิงค่าจากเครื่องวัดค่าพีเอชจากห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม ภาควิชา โยธา เครื่องวัดค่าพีเอช โปรไลน์ (ProLine) ตามรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เครื่องวัดพีเอชโปรไลน์ (ProLine)

โดยการทดลองจะวัดค่าสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่าพีเอชแน่นอน คือ พีเอช 4 และพีเอช 7 ซึ่งสารละลายบัฟเฟอร์ทั้ง 2 นี้เป็นของห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สำหรับผลการทดลองได้บันทึกลงในตารางที่ 3.6 และภาพตัวอย่างการทดลองสามารถดูได้จากรูปที่ 3.11 และ 3.12 ตามลำดับ



รูปที่ 3.11 การวัดค่าสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 ของเครื่องวัดพีเอชโปรไลน์ (ProLine)



รูปที่ 3.12 การวัดค่าสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 ของเครื่องควบคุมค่าพีเอช

ตารางที่ 3.6 การทดสอบความแม่นยำในการวัดค่าพีเอชของเครื่องควบคุมค่าพีเอช

ค่าพีเอช สารละลายบัฟเฟอร์	เครื่องควบคุม ค่าพีเอช	เครื่องวัดค่าพีเอชที่ ห้องปฏิบัติการ	ความคลาดเคลื่อน (เปอร์เซ็นต์)
4	4.06	4.03	0.74
7	6.99	7.00	0.14

การหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน

ถ้ากำหนดให้ S เป็นค่าปริมาณฟิสิกส์มาตรฐาน และ E เป็นค่าปริมาณฟิสิกส์เดียวกับ S แต่ได้จากการทดลอง เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนหาได้ตามสมการที่ 3.1

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน} = \frac{|E - S|}{S} \times 100\% \quad (3.1)$$

จากตารางที่ 3.6 พบว่าการวัดสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 จากเครื่องในห้องปฏิบัติการการได้ค่า 4.03 แต่เครื่องวัดพีเอชของเครื่องควบคุมค่าพีเอชวัดได้ 4.06 เกิดความคลาดเคลื่อนคิดเป็น 0.74 เปอร์เซ็นต์ และจากการวัดสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 10 จากเครื่องในห้องปฏิบัติการการได้ค่า 7.00 แต่เครื่องวัดพีเอชของเครื่องควบคุมค่าพีเอชวัดได้ 6.99 เกิดความคลาดเคลื่อนคิดเป็น 0.14 เปอร์เซ็นต์ ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเนื่องจากค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดแต่ละเครื่องก็มีความละเอียดแตกต่างกันและขึ้นอยู่กับอุณหภูมิขณะที่วัดด้วย

3.3.2 การหาอัตราการใช้ของสารละลาย

การทดลองหาอัตราการใช้ของสารละลายเพื่อเลือกใช้อัตราการใช้ที่ทำให้การควบคุมค่าพีเอชมีประสิทธิภาพที่สุด โดยจะทดลองปล่อยสารละลายบัฟเฟอร์ทั้ง 2 ชนิด ในเวลา 1 นาที เพื่อสังเกตจำนวนหยดที่ทำให้พีเอชเปลี่ยนแปลง ผลการทดลองแสดงตามตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 การทดสอบหาอัตราการใช้ของสารละลาย

ชนิดสารละลายบัฟเฟอร์	ครั้งที่	จำนวนหยดต่อนาที	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสุดท้าย	จำนวนครั้งที่ปล่อยสาร
พีเอช 4	1	40	7.13	6.20	-
	2	40	8.01	6.98	3
	3	60	7.13	6.07	-
	4	60	8.02	6.96	6
พีเอช 10	1	41	7.17	8.06	-
	2	41	6.07	6.98	7
	3	63	7.17	8.11	-
	4	63	6.08	7.01	2

จากตารางที่ 3.7 จะพบว่าถึงแม้จำนวนหยดของสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 จำนวน 60 หยด จะเปลี่ยนค่าพีเอชได้มากกว่า ซึ่งหากเราใช้จำนวนหยดนี้อาจจะใช้เวลาในการปรับค่าพีเอชได้เร็ว แต่ในความเป็นจริงแล้วหากใช้จำนวนหยด 60 หยด ปรับค่าพีเอช จะทำให้ค่าพีเอชที่ได้เปลี่ยนแปลงเร็วเกินค่าพีเอชที่ต้องการ ทำให้เราต้องควบคุมการปล่อยสารละลายเพื่อปรับลดค่าพีเอชให้ได้ตามต้องการ ทำให้เสียเวลาเป็นอย่างมาก ดังนั้นเราจึงเลือกจำนวนหยด 40 หยด คิดเป็นอัตราการใช้ต่อวินาทีได้ 0.67 หยดต่อวินาที

สำหรับสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 10 นั้น ตรงข้ามกับสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 เราไม่เลือกใช้จำนวนหยด 41 หยด เพราะถึงแม้จะปรับค่าพีเอชจาก 7 ไป 8 ได้เร็ว แต่ปรับค่าพีเอชจาก 6 ไป 7 จะใช้เวลานานกว่าในขณะที่จำนวนหยด 63 หยด ใช้ระยะเวลาที่น้อยกว่า ซึ่งคิดเป็นอัตราการใช้ต่อวินาทีได้ 1.05 หยดต่อวินาที

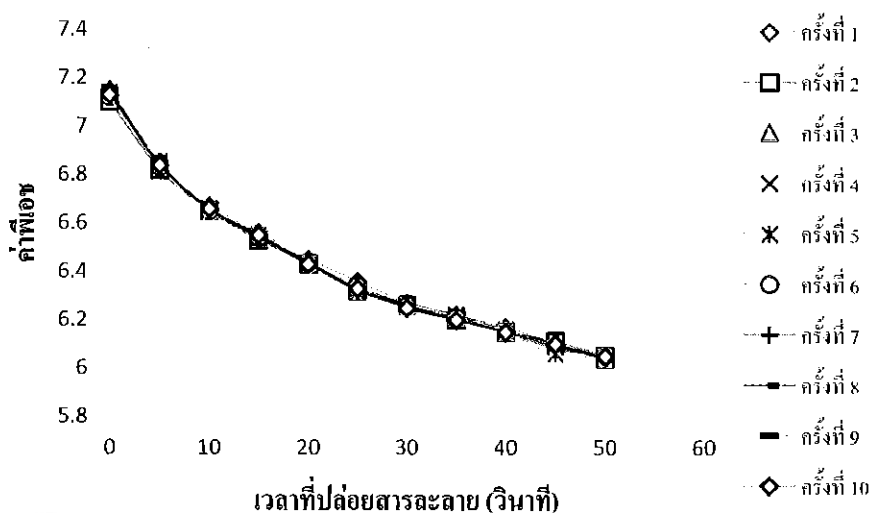
3.3.3 การทดลองปล่อยสารละลายบัฟเฟอร์

การทดสอบหาระยะเวลาที่ทำให้ค่าพีเอชเปลี่ยนแปลงไป 1 พีเอช โดยปล่อยสารเป็นช่วงเวลาระยะ 5 วินาที ของสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของน้ำ โดยทดลองกับน้ำปริมาตร 400 มิลลิลิตร จำนวนครั้งที่ทดลองคือ 10 ครั้ง ผลการทดลองเป็นไปตามตารางที่ 3.8 และการทดสอบหาระยะเวลาที่พีเอชเปลี่ยนแปลงไป 1 พีเอช โดยปล่อยสารเป็นช่วงเวลาระยะ 5 วินาที ของสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 10 เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของน้ำ ปริมาตร 400 มิลลิลิตร จำนวนครั้งที่ทดลองคือ 10 ครั้ง ผลการทดลองเป็นไปตามตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.8 การทดสอบค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงของสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4

เวลา (วินาที)	ค่าพีเอชจากการทดสอบ (ครั้งที่)										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	7.15	7.1	7.14	7.14	7.13	7.12	7.15	7.14	7.14	7.13	7.134
5	6.85	6.82	6.84	6.84	6.85	6.83	6.85	6.84	6.84	6.84	6.840
10	6.67	6.65	6.65	6.66	6.65	6.65	6.66	6.66	6.67	6.66	6.658
15	6.56	6.53	6.54	6.54	6.55	6.54	6.55	6.54	6.55	6.55	6.545
20	6.45	6.43	6.44	6.44	6.44	6.43	6.44	6.43	6.43	6.43	6.436
25	6.36	6.32	6.32	6.32	6.33	6.34	6.32	6.32	6.33	6.33	6.329
30	6.27	6.26	6.26	6.27	6.27	6.26	6.25	6.26	6.26	6.25	6.261
35	6.22	6.2	6.21	6.22	6.21	6.21	6.2	6.2	6.2	6.2	6.207
40	6.17	6.15	6.16	6.16	6.15	6.15	6.15	6.15	6.15	6.15	6.154
45	6.1	6.11	6.1	6.09	6.06	6.1	6.08	6.1	6.09	6.1	6.093
50	6.05	6.05	6.04	6.05	6.05	6.05	6.05	6.04	6.05	6.05	6.048

จากตารางที่ 3.8 สามารถแสดงเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 3.13 พบว่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงจะสังเกตได้ว่าในช่วง 5-10 วินาทีแรกมีการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชมากพอสมควร และหลังจาก 10 วินาที อัตราในการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชจะเปลี่ยนแปลงน้อยลง เนื่องจากอาจจะเกิดการอิ่มตัวของสารละลายบัฟเฟอร์ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยลง การทดลองนี้จึงออกแบบให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชถึง 6 เนื่องจากหลังจากพีเอช 6 ลงไปจะทำให้ต้องใช้สารละลายบัฟเฟอร์มากจนเกินไปเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชค่อนข้างน้อยหรือไม่เปลี่ยนแปลงเลย

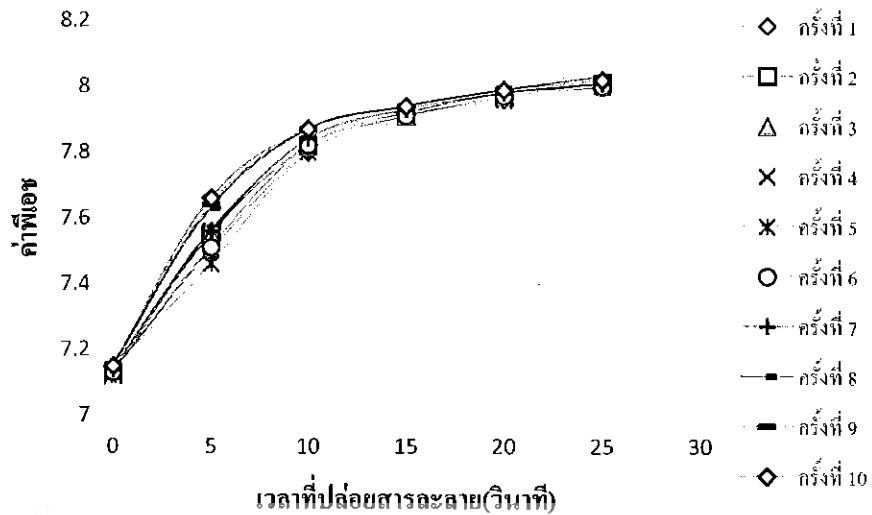


รูปที่ 3.13 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชเมื่อหยดสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4

ตารางที่ 3.9 การทดสอบหาค่าพีเอชที่เปลี่ยนของสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 10

เวลา (วินาที)	ค่าพีเอชจากการทดสอบ (ครั้งที่)										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	7.13	7.13	7.12	7.13	7.14	7.13	7.14	7.15	7.15	7.15	7.137
5	7.5	7.55	7.55	7.56	7.46	7.51	7.56	7.63	7.64	7.66	7.562
10	7.8	7.82	7.84	7.82	7.8	7.82	7.84	7.87	7.87	7.87	7.835
15	7.91	7.91	7.92	7.92	7.91	7.91	7.93	7.94	7.94	7.94	7.923
20	7.96	7.97	7.98	7.98	7.96	7.97	7.98	7.99	7.99	7.99	7.977
25	8	8.01	8.01	8.01	8.00	8.00	8.01	8.03	8.02	8.02	8.011

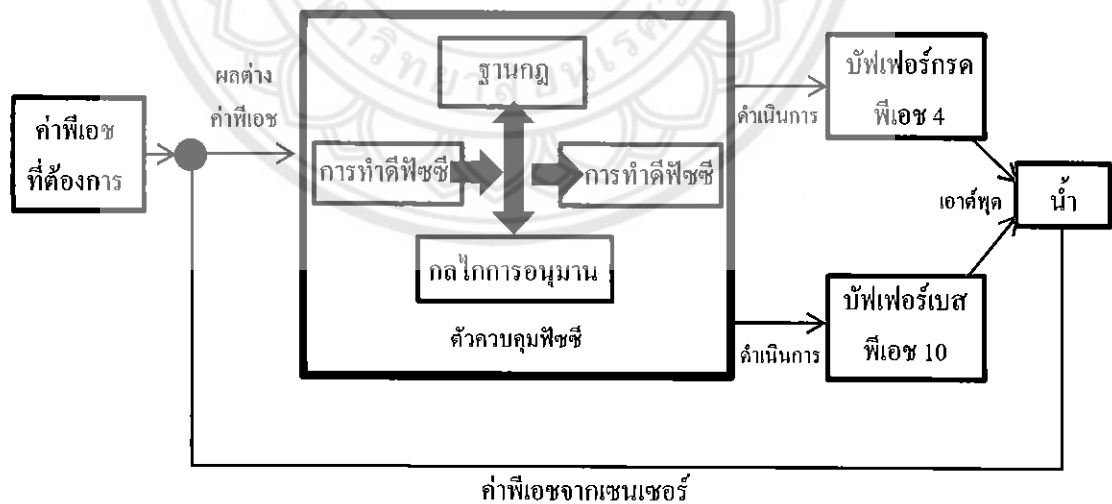
จากตารางที่ 3.9 พบว่าพีเอชที่เปลี่ยนไปในช่วงเวลา 5-25 วินาทีสามารถแสดงให้เห็นเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 3.14 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าในช่วง 5-10 วินาทีแรกมีการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชมากพอสมควร และหลังจาก 10 วินาที อัตราในการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชน้อยลง เนื่องจากอาจจะเกิดการอิ่มตัวของสารละลายบัฟเฟอร์ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยลง การทดลองนี้จึงออกแบบให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชถึง 8 เนื่องจากหลังจากพีเอช 8 ขึ้นไปจะทำให้ต้องใช้สารละลายบัฟเฟอร์จนเกินไปเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชค่อนข้างน้อยหรือไม่เปลี่ยนแปลงเลย



รูปที่ 3.14 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชเมื่อหยดสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 10

3.4 การออกแบบการทำงานตัวควบคุมแบบพีชชีลจิก

ในส่วนของการออกแบบพีชชีลจิก เราจะใช้พีชชีลจิกในการควบคุมค่าพีเอชผ่านบอร์ดอาดูโน เพื่อตัดสินใจว่าจะปล่อยสารละลายเป็นระยะเวลาเท่าใดเพื่อควบคุมค่าพีเอชให้ได้ค่าตามที่เราต้องการ ซึ่งภาพรวมกระบวนการทำงานของพีชชีลจิกดูได้จากรูปที่ 3.15



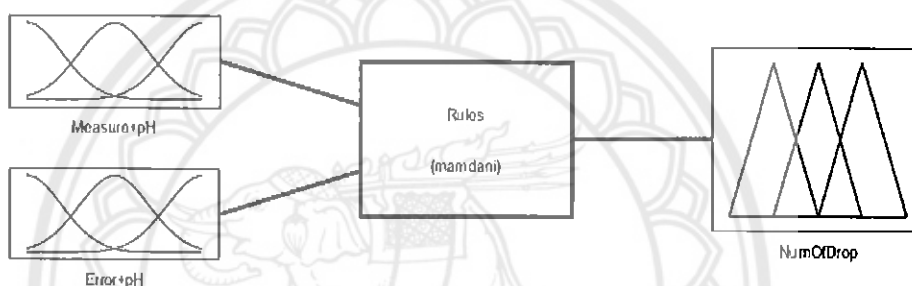
รูปที่ 3.15 ภาพรวมกระบวนการทำงานของพีชชีลจิก

จากรูปภาพที่ 3.15 เมื่อเซนเซอร์วัดค่าพีเอชได้จะย้อนกลับมาตรวจสอบกับค่าที่เราต้องการ จะได้ค่าผลต่างของพีเอชออกมา ค่าผลต่างนี้เราจะใช้ในการดำเนินการตัดสินใจของเครื่องควบคุมค่าพีเอชเพื่อตัดสินใจว่าควรเพิ่มสารชนิดใด และปล่อยสารเป็นระยะเวลาเท่าใด สำหรับการออกแบบระบบภายในเครื่องควบคุมค่าพีเอชจะแบ่งเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

3.4.1 การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบที่ 1

1) การทำฟัซซี

ทำการออกแบบอินพุตและเอาต์พุตของระบบ โดยใช้โปรแกรมแมทแล็บ (MATLAB) เพื่อช่วยในการคำนวณแบบฟัซซี ซึ่งได้ทำการออกแบบอินพุตของระบบมี 2 ตัว และเอาต์พุต 1 ตัว ตามรูปที่ 3.16

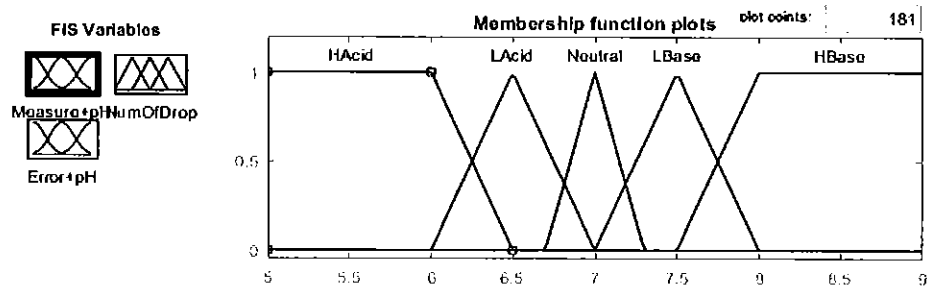


รูปที่ 3.16 การออกแบบอินพุตและเอาต์พุต

ซึ่งในหัวข้อนี้อธิบายเพียงค่าอินพุตเท่านั้น ซึ่งมีอินพุต 2 ตัว ได้แก่ อินพุตของค่าพีเอชฐานแบ่งฟัซซีเซตออกเป็น HAcid (High Acid), LAcid (Low Acid), Neutral, Base (Low Base) และ HBase (High Base) มีขอบเขตอยู่ในช่วง 5 พีเอช ถึง 9 พีเอช โดยได้ออกแบบค่าพีเอชฐานเป็นดังนี้

HAcid	กำหนดพารามิเตอร์	[5	5	6	6.5]
LAcid	กำหนดพารามิเตอร์	[6	6.5	6.5	7]
Neutral	กำหนดพารามิเตอร์	[6.7	7	7	7.3]
LBase	กำหนดพารามิเตอร์	[7	7.5	7.5	8]
HBase	กำหนดพารามิเตอร์	[7.5	8	9	9]

ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.17

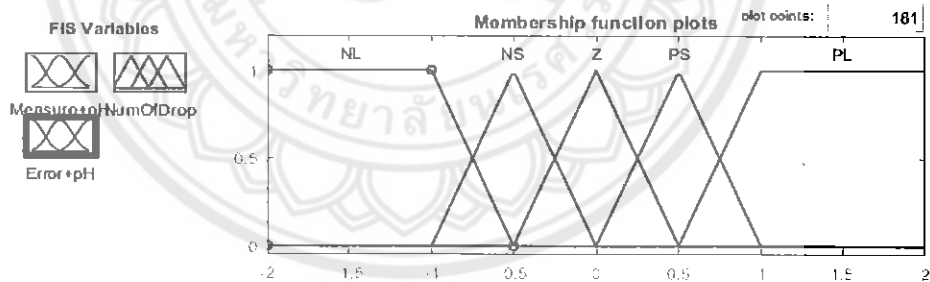


รูปที่ 3.17 อินพุตของค่าพีเอชซึ่งเป็นค่าฐานพีเอช

ในส่วนของอินพุตค่าผลต่างของพีเอชจากเซนเซอร์แบ่งพีชชีเซตออกเป็น NL (Negative Low), NS (Negative Small), Z (Zero), PS (Positive Small) และ PL (Positive Low) มีขอบเขตในช่วง -2 พีเอช ถึง 2 พีเอช โดยได้ออกแบบค่าอินพุตผลต่างดังนี้

NL	กำหนดพารามิเตอร์	[-2	-2	-1	-0.5]
NS	กำหนดพารามิเตอร์	[-1	-0.5	-0.5	0]
Z	กำหนดพารามิเตอร์	[-0.5	0	0	0.5]
PS	กำหนดพารามิเตอร์	[0	0.5	0.5	1]
PL	กำหนดพารามิเตอร์	[0.5	1	2	2]

ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 อินพุตค่าผลต่างของพีเอชจากเซนเซอร์

2) การสร้างฐานกฎ

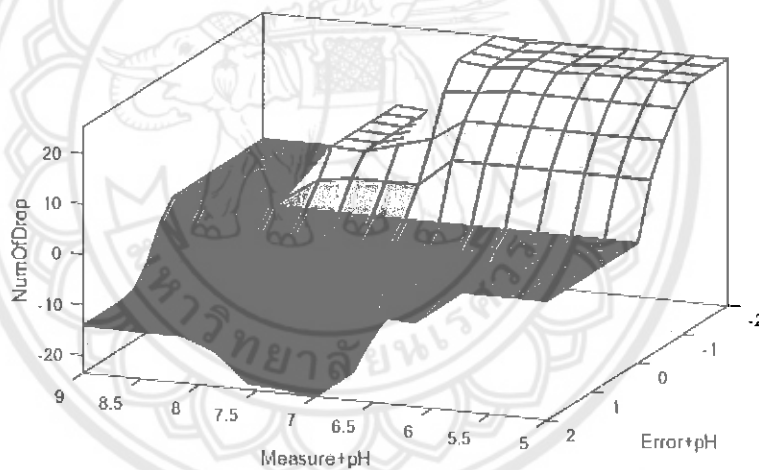
เมื่อทราบปริมาณอินพุตแล้ว ต้องมีกฎพีชชีเพื่อที่จะสามารถเชื่อมโยงจากปริมาณอินพุต ไปยังปริมาณเอาต์พุตได้ เขียนอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ดังนี้ “IF x is A THEN y is B” ซึ่งได้ออกแบบเอาต์พุตที่มีความเป็นไปได้แสดงตามตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 กฎการควบคุมค่าพีเอช

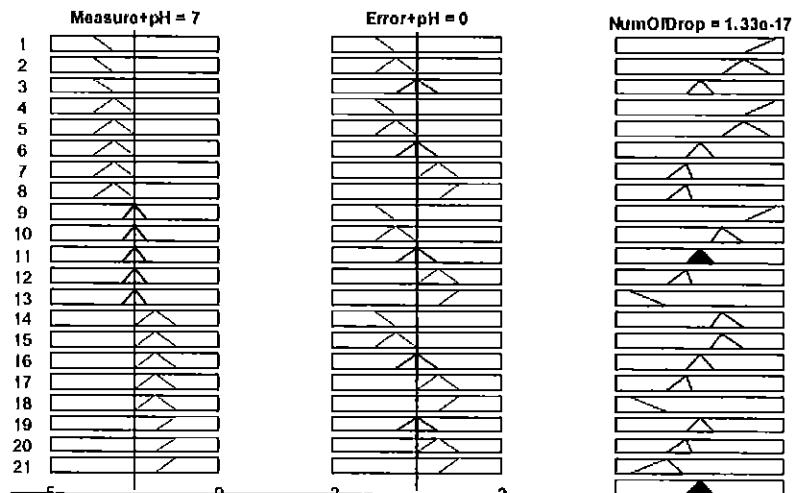
	NL	NS	Z	PS	PL
HAcid	LDAcid	MDAcid	NoDrop		
LAcid	LDAcid	MDAcid	NoDrop	SDBase	SDBase
Neutral	LDAcid	SDAcid	NoDrop	SDBase	LDBase
LBase	SDAcid	SDAcid	NoDrop	SDBase	LDBase
HBase			NoDrop	SDBase	MDBase

3) กลไกการอนุมาน

จากกฎการควบคุมค่าพีเอชของน้ำ เราสามารถเรียกดูกราฟพื้นที่ผิวได้ดังรูป 3.19 และการประมวลผลแบบกฎได้ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.19 กราฟพื้นที่ผิวการควบคุมค่าพีเอชของน้ำ



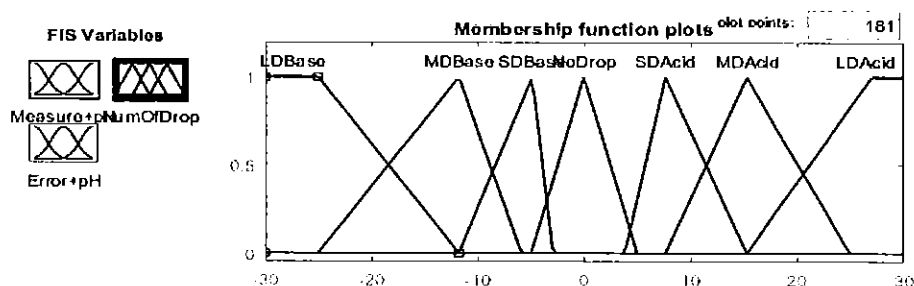
รูปที่ 3.20 ประมวลผลแบบกฎการควบคุมค่าพีเอชของน้ำ

4) การทำดีฟิซซี

เอาที่พูดของระบบ ก็ระยะเวลาปล่อยสารละลายบัฟเฟอร์เพื่อปรับค่าพีเอช แบ่งพีซซี เซตออกเป็น LDBase (Large Drop Base), MDBase (Mideam Drop Base), SDBase (Small Drop Base), NoDrop, SDAcid (Small Drop Acid), MDAcid (Mideam Drop Acid) และ LDAcid (Large Drop Acid) มีขอบเขตในช่วง -30 วินาที ถึง 30 วินาที โดยออกแบบไว้ดังนี้

LDBase	กำหนดพารามิเตอร์	[-30	-30	-25	-11.76]
MDBase	กำหนดพารามิเตอร์	[-25	-11.76	-11.76	-5.882]
SDBase	กำหนดพารามิเตอร์	[-11.76	-4.882	-4.882	-2.941]
NoDrop	กำหนดพารามิเตอร์	[-5	0	0	5]
SDAcid	กำหนดพารามิเตอร์	[3.83	7.66	7.66	15.32]
MDAcid	กำหนดพารามิเตอร์	[7.66	15.32	15.32	27]
LDAcid	กำหนดพารามิเตอร์	[15.32	27	27	30]

แสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 เอ้าท์พุตปริมาณสารละลายสำหรับปรับค่าพีเอช

ตารางที่ 3.11 ข้อมูลแสดงการปรับค่าพีเอชโดยพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7.06 ปรับเป็น 6

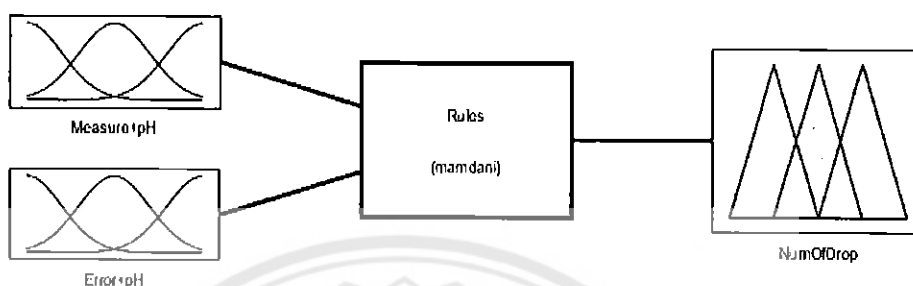
ครั้งที่	ค่าพีเอชที่ต้องการ (อินพุต1)	ค่าพีเอชจากเซนเซอร์ (อินพุต2)	ค่าเอ้าท์พุตของระยะเวลาปล่อยสาร (วินาที)	ค่าพีเอชจากเซนเซอร์หลังจากปล่อยสารละลาย	ค่าความผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)
1	6	7.06	25.1	6.67	11.67
2	6	6.67	18.6	6.33	5.5
3	6	6.33	11.7	6.21	3.5
4	6	6.21	9.41	6.16	2.67
5	6	6.16	8.24	6.11	1.833
6	6	6.11	6.75	6.06	1.0

จากการทดลองปรับค่าพีเอชจาก 7.06 ให้เป็นพีเอช 6 แสดงได้ดังตารางที่ 3.11 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าระบบสามารถปรับค่าพีเอชให้มีค่าเข้าใกล้พีเอช 6 ได้จริง โดยจะเห็นว่าค่าความผิดพลาดมีการลู่อเข้าใกล้ 0 มากขึ้นทุกครั้งที่ระบบทำงาน โดยได้ออกแบบให้ค่าความผิดพลาดสูงสุดระหว่าง อินพุต1 และ อินพุต 2 มีค่าเท่ากับ 0.1 พีเอช หรือ 1.67 เปอร์เซ็นต์ แต่การออกแบบนี้ยังคงมีปัญหาคือระบบทำงานถึง 6 ครั้ง ซึ่งเป็นจำนวนครั้งในการปรับค่าพีเอชที่มากจนเกินไป เนื่องมาจากการออกแบบเอ้าท์พุตยังไม่สอดคล้องกับค่าที่วัดได้จริง จึงทำให้ระบบทำงานบ่อยครั้งเกินไป

3.4.2 การออกแบบตัวควบคุมฟuzzyแบบที่ 2

1) การทำฟuzzy

ทำการออกแบบอินพุตและเอาต์พุตของระบบโดยใช้โปรแกรมแมทแล็บเพื่อช่วยในการคำนวณแบบฟuzzy ซึ่งได้ออกอินพุตของระบบมี 2 ตัว และเอาต์พุต 1 ตัว ตามรูปที่ 3.22

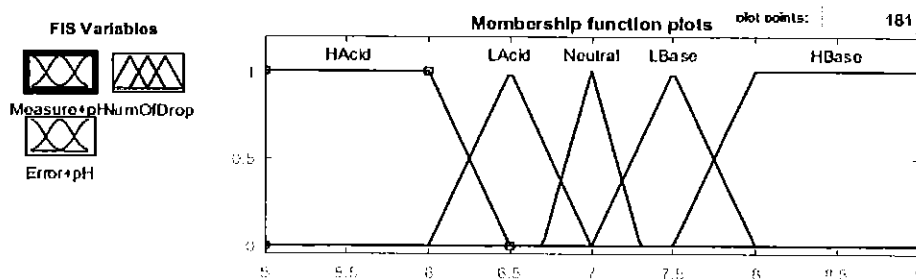


รูปที่ 3.22 การออกแบบอินพุตและเอาต์พุต

ซึ่งในหัวข้อนี้อธิบายเพียงค่าอินพุตเท่านั้น ซึ่งมีอินพุต 2 ตัว ได้แก่ อินพุตของค่าพีเอชฐานแบ่งฟuzzyเซตออกเป็น HAcid (High Acid), LAcid (Low Acid), Neutral, LBase (Low Base), และ HBase (High Acid) มีขอบเขตอยู่ในช่วง 5 พีเอช ถึง 9 พีเอช โดยได้ออกแบบค่าพีเอชฐานเป็นดังนี้

HAcid	กำหนดพารามิเตอร์	[5	5	6	6.5]
LAcid	กำหนดพารามิเตอร์	[6	6.5	6.5	7]
Neutral	กำหนดพารามิเตอร์	[6.7	7	7	7.3]
LBase	กำหนดพารามิเตอร์	[7	7.5	7.5	8]
HBase	กำหนดพารามิเตอร์	[7.5	8	9	9]

ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.23

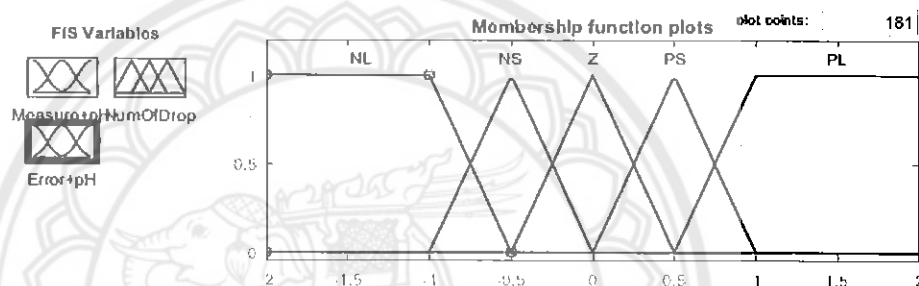


รูปที่ 3.23 อินพุตของค่าพีเอชซึ่งเป็นค่าฐานพีเอช

ในส่วนของอินพุตค่าผลต่างของพีเอชจากเซนเซอร์แบ่งพีชชีเซตออกเป็น NL (Nagetive Low), NS (Negative Small), ZE (Zero), PS (Positive Small) และ PL (Positive Low) มีขอบเขตในช่วง -2 พีเอช ถึง 2 พีเอช โดยได้ออกแบบค่าอินพุตผลต่างดังนี้

NL	กำหนดพารามิเตอร์	[-2	-2	-1	-0.5]
NS	กำหนดพารามิเตอร์	[-1	-0.5	-0.5	0]
Z	กำหนดพารามิเตอร์	[-0.5	0	0	0.5]
PS	กำหนดพารามิเตอร์	[0	0.5	0.5	1]
PL	กำหนดพารามิเตอร์	[0.5	1	2	2]

ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 อินพุตค่าผลต่างของพีเอชจากเซนเซอร์

2) การสร้างฐานกฎ

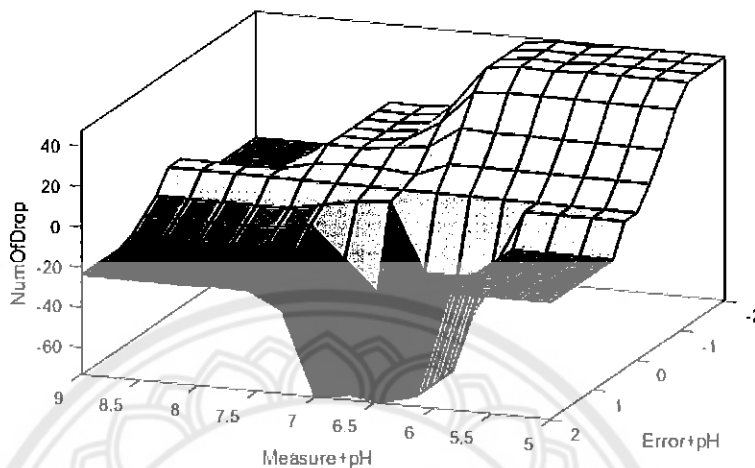
เมื่อทราบปริมาณอินพุตแล้ว ต้องมีกฎพีชชีเพื่อที่จะสามารถเชื่อมโยงจากปริมาณอินพุตไปยังปริมาณเอาต์พุตได้ เขียนอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ดังนี้ "IF x is A THEN y is B" ซึ่งได้ออกแบบเอาต์พุตที่มีความเป็นไปได้แสดงตามตารางที่ 3.12

ตารางที่ 3.12 กฎการควบคุมค่าพีเอช

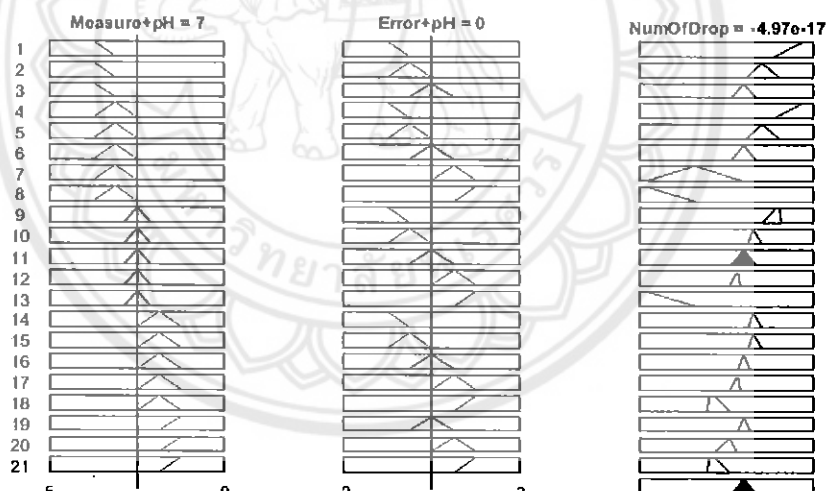
	NL	NS	Z	PS	PL
HAcid	LDAcid1	SDAcid1	NoDrop1		
LAcid	LDAcid1	SDAcid1	NoDrop1	SDBaseq	LDBase1
Neutral	LDAcid	SDAcid	NoDrop1	SDBase	LDBase1
LBase	SDAcid	SDAcid	NoDrop	MDBase	LDBase
HBase			NoDrop	MDBase	LDBase

3) กลไกการอนุมาน

จากกฎการควบคุมค่าพีเอชของน้ำ เราสามารถเรียกดูกราฟพื้นที่ผิวได้ดังรูป 3.25 และการประมวลผลแบบกฎได้ ดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.25 กราฟพื้นที่ผิวการควบคุมค่าพีเอชของน้ำ



รูปที่ 3.26 ประมวลผลแบบกฎการควบคุมค่าพีเอชของน้ำ

4) การทำคีย์พีชชี

เอาท์พุทของระบบ คือระยะเวลาปล่อยสารละลายบัฟเฟอร์เพื่อปรับค่าพีเอช แบ่งพีชชีเซต ออกเป็น LDBase (Large Drop Base), MDBase (Mideam Drop Base), SDBase (Small Drop Base), NoDrop, SDAcid (Small Drop Acid), MDAcid (Mideam Drop Acid), LDAcid (Large Drop Acid), LDAcid1 (Large Drop Acid 1), SDAcid1 (Small Drop Acid 1), NoDrop1, SDBase1 (Small Drop Base1) และ LDBase1 (Large Drop Base1) มีขอบเขตอยู่ในช่วง -90 วินาที ถึง 60 วินาที เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสารละลายจากกลางไปเป็นกรด และกลางไปเป็นเบส จึงต้องออกแบบเอาท์พุทสองชุดดังนี้

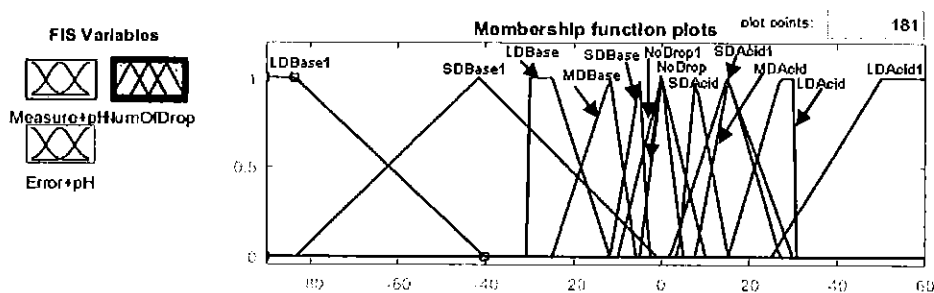
ส่วนแรกจะเป็นการออกแบบเอาท์พุทเพื่อเพิ่มและลดค่าพีเอชช่วง 7 ถึง 8 เนื่องจากอัตราการอิมตัวของสารละลายที่ใช้ในช่วงความเป็นกรดและเบสไม่เท่ากัน โดยออกแบบไว้ดังนี้

LDBase	กำหนดพารามิเตอร์	[-30	-30	-25	-11.76]
MDBase	กำหนดพารามิเตอร์	[-25	-11.76	-11.76	-5.882]
SDBase	กำหนดพารามิเตอร์	[-11.76	-4.882	-4.882	-2.941]
NoDrop	กำหนดพารามิเตอร์	[-5	0	0	5]
SDAcid	กำหนดพารามิเตอร์	[3.83	7.66	7.66	15.32]
MDAcid	กำหนดพารามิเตอร์	[7.66	15.32	15.32	27]
LDAcid	กำหนดพารามิเตอร์	[15.32	27	27	30]

ส่วนที่สองจะเป็นการออกแบบเอาท์พุทเพื่อเพิ่มและลดค่าพีเอชค่าพีเอช 7 ถึง 6 ดังนี้

LDAcid1	กำหนดพารามิเตอร์	[-90	-90	-83.33	-40]
SDAcid1	กำหนดพารามิเตอร์	[-83.33	-41.67	-41.67	-1]
NoDrop1	กำหนดพารามิเตอร์	[-10	0	0	10]
SDBase1	กำหนดพารามิเตอร์	[2	15	15	30]
LDBase1	กำหนดพารามิเตอร์	[25	50	60	60]

แสดงในรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 เอ้าท์พุทปริมาณสารละลายสำหรับปรับค่าพีเอช

ตารางที่ 3.13 ข้อมูลการพยากรณ์ค่าความเป็นไปได้ของเอ้าท์พุท

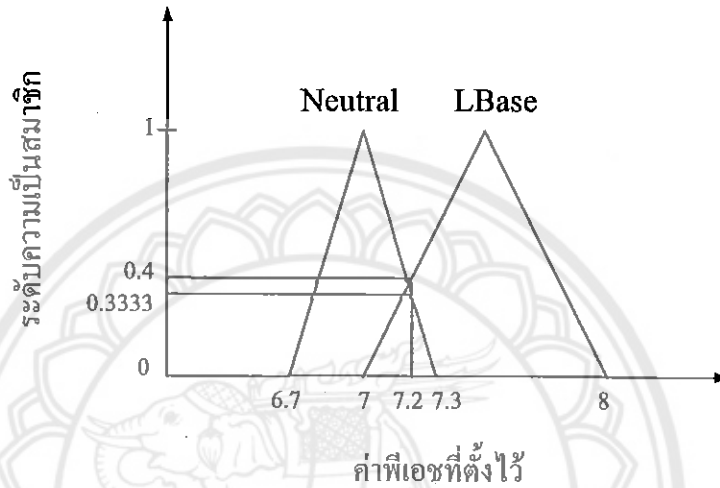
ครั้งที่	ค่าพีเอชที่ต้องการ (อินพุต1)	ค่าพีเอชจากเซนเซอร์ (อินพุต2)	ค่าเอ้าท์พุทของระยะเวลาปล่อยสาร (วินาที)	ค่าพีเอชจากเซนเซอร์หลังจากปล่อยสารละลาย	ค่าความผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)
1	6	7.08	47.59	6.22	3.667
2	6	6.22	15.88	6.13	2.167
3	6	6.13	15.86	6.07	1.167

จากการทดลองปรับค่าพีเอชจาก 7.08 ให้เป็นพีเอช 6 แสดงได้ดังตารางที่ 3.13 ซึ่งจะสังเกตได้ว่าระบบสามารถปรับค่าพีเอชให้มีค่าเข้าใกล้พีเอช 6 ได้จริง โดยจะเห็นว่าค่าความผิดพลาดมีการลู่เข้า 0 มากทุกครั้งที่ระบบทำงาน โดยได้ออกแบบให้ค่าความผิดพลาดสูงสุดระหว่างอินพุต1 และ อินพุต2 มีค่าเท่ากับ 0.1 พีเอช หรือ 1.67 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการออกแบบนี้ระบบมีการทำงานลดลงจากการออกแบบฟัซซีแบบแรก โดยสามารถทำงานเพียง 3 ครั้ง แล้วมีค่าความผิดพลาดน้อยกว่า 1.67 เปอร์เซ็นต์ จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานได้จริง

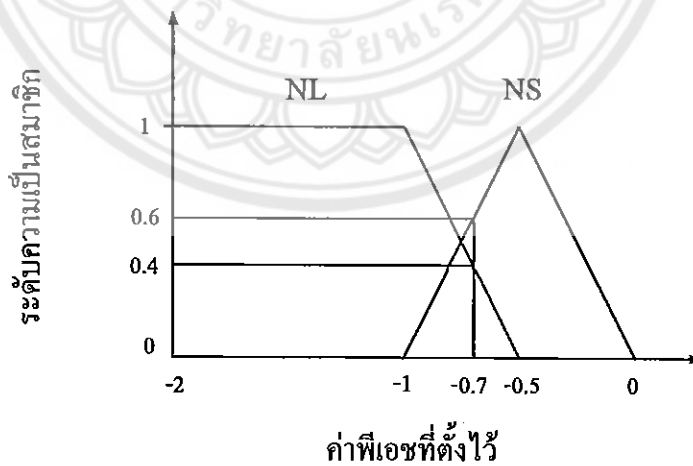
3.4.3 ตัวอย่างการคำนวณ

เมื่อตั้งค่าพีเอชฐานเท่ากับ 7.2 แล้วค่าที่พีเอชเซนเซอร์วัดได้คือ 7.9 โดยจะได้ค่าผลต่างของพีเอชคือ -0.7

1) การทำฟัซซี่ (Fuzzification) คือการปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 7.2 ซึ่งจะประกอบด้วย อินพุตสองค่าคือค่าพีเอชฐานดังรูปที่ 3.28 และค่าผลต่างของพีเอชดังรูปที่ 3.29



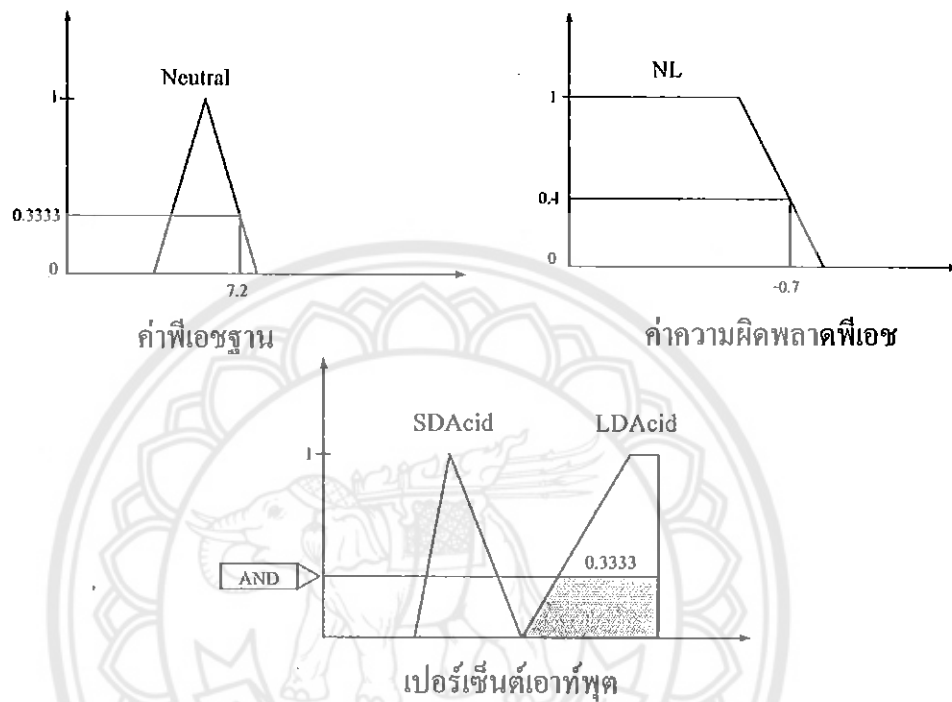
รูปที่ 3.28 ระดับความเป็นสมาชิกของค่าพีเอชฐานจะให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0.3333 และ 0.4



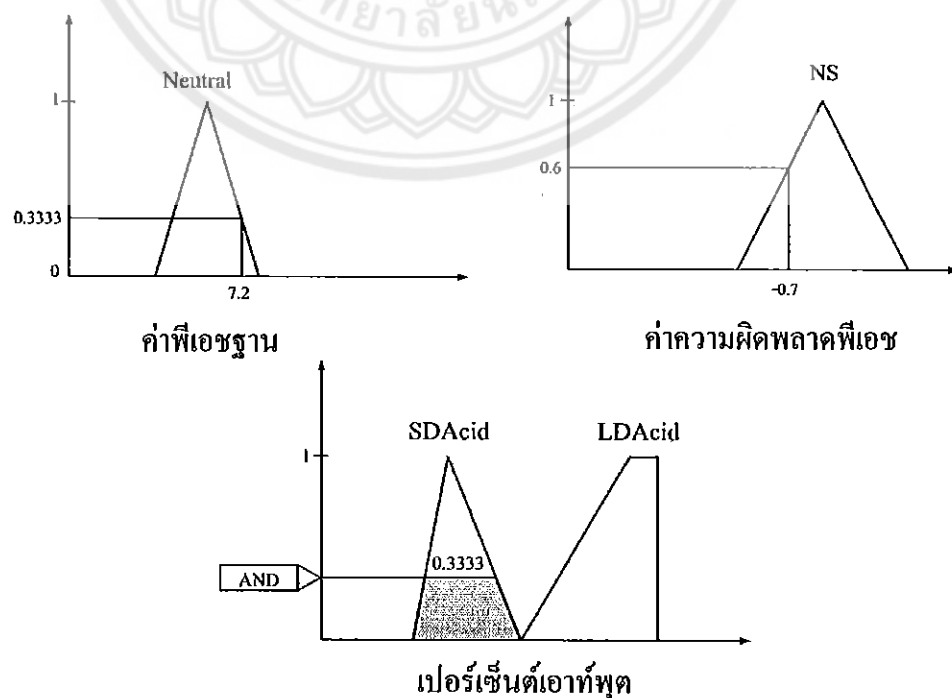
รูปที่ 3.29 ระดับความเป็นสมาชิกของค่าผลต่างพีเอชจะให้ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0.4 และ 0.6

2) การประเมินค่ากฎของฟัซซี (Fuzzy rule evaluation) โดยฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุตจะตัดยอด (clipped) หรือถูกปรับขนาด (scaled) ตามผลค่าระดับความเป็นสมาชิกของส่วนเงื่อนไขอินพุตใน “ถ้า” ดังแสดงในรูปที่ 3.30(ก) และ 3.30(ข)

กฎ 9) IF (Measure+pH is Neutral) and (Error+pH is NL) then (NumOfDorp is LDAcid)

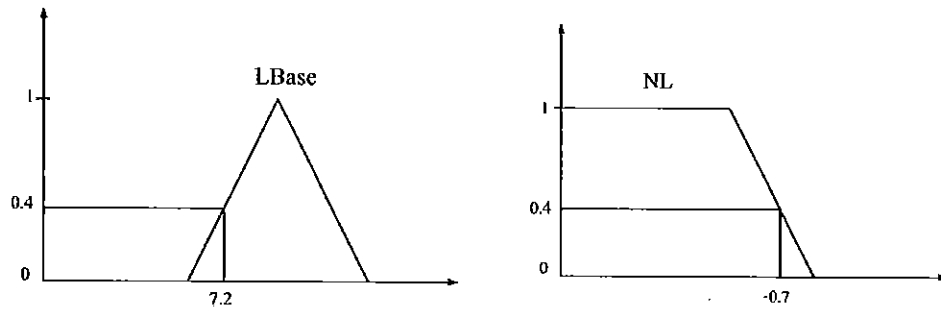


กฎ 10) IF (Measure+pH is Neutral) and (Error+pH is NS) then (NumOfDorp is SDAcid)



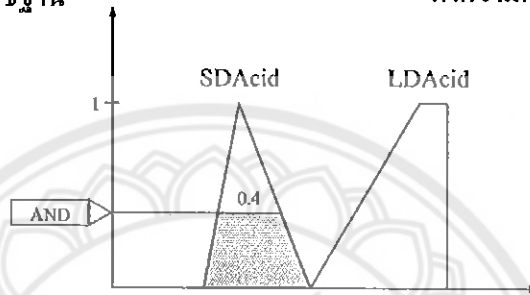
รูปที่ 3.30 การอนุมานฟัซซีแบบเมมดानी (ก)

กฎ 14) IF (Measure+pH is Neutral) and (Error+pH is NS) then (NumOfDorp is SDAcid)



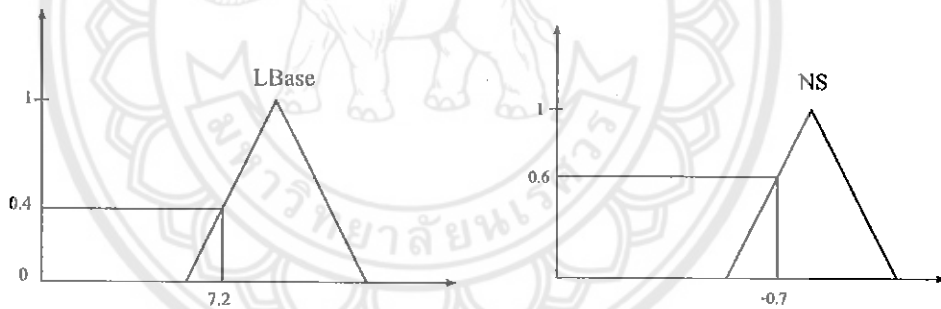
ค่าพีเอชฐาน

ค่าความผิดพลาดพีเอช



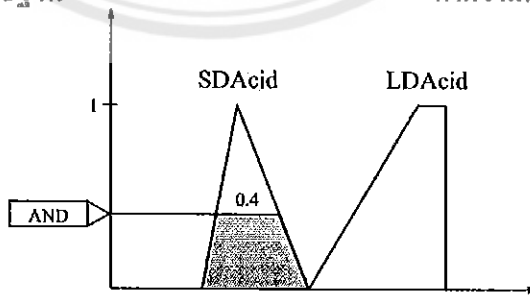
เปอร์เซ็นต์เอาต์พุต

กฎ 15) IF (Measure+pH is Neutral) and (Error+pH is NS) then (NumOfDorp is SDAcid)



ค่าพีเอชฐาน

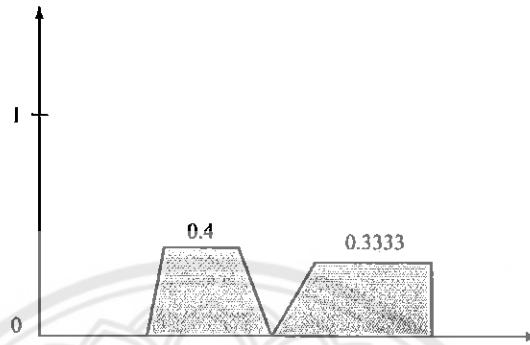
ค่าความผิดพลาดพีเอช



เปอร์เซ็นต์เอาต์พุต

รูปที่ 3.30 การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานี (ข)

3) การรวมกฎ (aggregation) หลังจากกฎต่างๆ ถูกประเมินค่าแล้ว กฎที่มีผลไม่เท่ากับ ศูนย์จะถูกรวมเข้าด้วยกัน โดยการรวมผลลัพธ์ของฟังก์ชันสมาชิกที่ผ่านการประเมินค่า (โดยวิธีการตัดยอดหรือการปรับขนาด) ทั้งหมดเข้าด้วยกันเป็นเซตเดียวสำหรับแต่ละตัวแปรเอาต์พุต โดยการรวมกฎจะใช้ตัวกระทำยูเนียนคู่ได้ดังรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 การประเมินค่าฟังก์ชันสมาชิกด้วยวิธีตัดยอด

4) การทำดีฟัซซี่ (defuzzification) ซึ่งใช้วิธีหาจุดศูนย์กลางถ่วง (centroid หรือ center of gravity, COG) สามารถหาได้จากสมการที่ 3.1

$$COG = \frac{\sum_{x=a}^b \mu_A(x)x}{\sum_{x=a}^b \mu_A(x)} \quad (3.1)$$

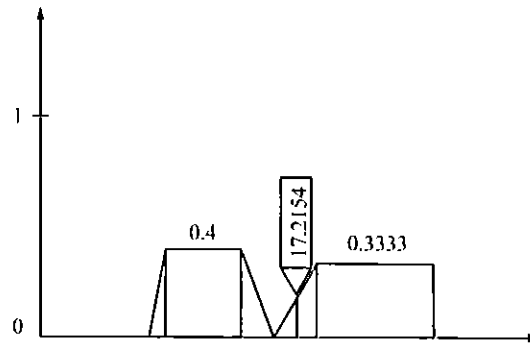
พิจารณาเอาต์พุตของระบบปรับค่าพีเอชในรูปที่ 3.32 สามารถดูข้อมูลได้จากตารางที่ 3.14 และคำนวณได้ดังนี้

ตารางที่ 3.14 ตารางแสดงค่าการคำนวณหา COG

X	5.362	7.66	10.958	13.256	19.212	22.91	24.606	27.304	30
Y	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3333	0.3333	0.3333	0.3333	0.3333

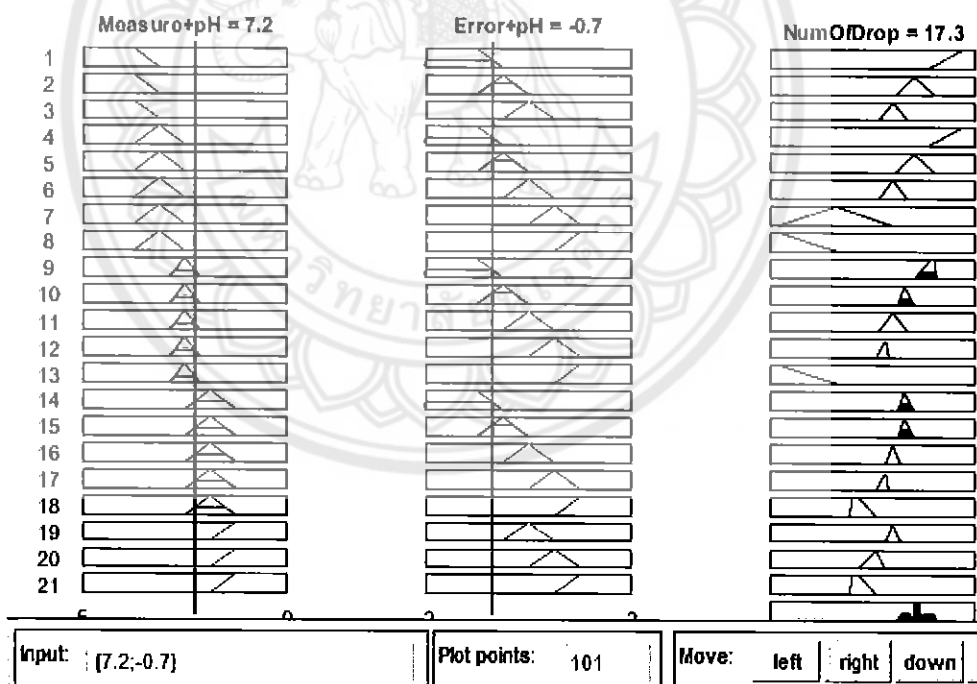
$$COG = \frac{((5.362+7.66+10.958+13.256) \times 0.4) + ((19.212+22.91+24.606+27.304+30) \times 0.3333)}{0.4+0.4+0.4+0.4+0.3333+0.3333+0.3333+0.3333+0.3333}$$

$$COG = 17.2154$$



รูปที่ 3.32 การหาค่าพีชชีด้วยวิธีหาจุดศูนย์ถ่วงของระบบควบคุมพีเอช

ค่าเอาต์พุตที่ได้จากการหาค่าพีชชีเท่ากับ 17.2154 ซึ่งหมายความว่าระบบจะทำการเปิดโซลินอยด์เป็นระยะเวลาเท่ากับค่าเอาต์พุตที่ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าจากการใช้โปรแกรมแมทแล็บในการคำนวณจะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ยังมีผลผิดพลาดเนื่องจากการนำจุดจากการตัดยอดมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยจากโปรแกรมจึงทำให้เกิดความผิดพลาด เปรียบเทียบค่าจากโปรแกรมคำนวณจากรูปที่ 3.33



รูปที่ 3.33 ผลการคำนวณจากโปรแกรมแมทแล็บ

บทที่ 4

การทดลองและวิเคราะห์ผล

การทดสอบการทำงานของเครื่องควบคุมค่าพีเอชของน้ำ โดยตัวควบคุมแบบพีชซีลอจิก เนื่องจากคุณสมบัติของสารละลายบัฟเฟอร์ที่รักษาระดับความเป็นกรดและเบสของสารละลายให้คงที่ ทำให้การควบคุมค่าพีเอชของน้ำให้มีค่าพีเอช 6, 7 และ 8 มีค่าแตกต่างกันด้วย ซึ่งคุณสมบัติของสารละลายบัฟเฟอร์สามารถดูข้อมูลเพิ่มเติมได้จากบทที่ 3 ดังนั้นเราจึงทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องควบคุมค่าพีเอช โดยแบ่งการทดลอง ออกเป็น 2 การทดลองหลักดังนี้

การทดลองที่ 1 ทดสอบควบคุมค่าพีเอชของน้ำกรณีปรับให้มีความเป็นเบสมากขึ้น

การทดลองที่ 2 ทดสอบควบคุมค่าพีเอชของน้ำกรณีปรับให้มีความเป็นกรดมากขึ้น

4.1 การทดสอบควบคุมค่าพีเอชของน้ำกรณีปรับให้มีความเป็นเบสมากขึ้น

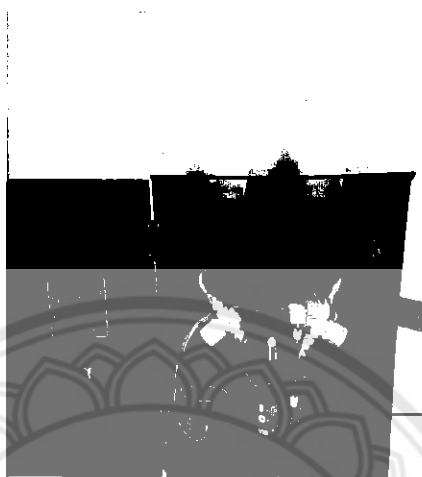
สำหรับการทดสอบควบคุมค่าพีเอชของน้ำกรณีปรับให้มีความเป็นเบสมากขึ้น เราจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลอง โดยการทดลองที่ 1 เราจะปรับค่าพีเอช 6 ไปเป็นค่าพีเอช 7 และการทดลองที่ 2 เราจะปรับค่าพีเอช 7 ไปเป็นค่าพีเอช 8 เพื่อดูระยะเวลาในการควบคุม และจำนวนครั้งที่ระบบทำงานของทั้ง 2 การทดลองว่าเท่ากันหรือไม่ และการทดลองไหนมีประสิทธิภาพมากกว่า เพราะเหตุใด

4.1.1 การทดลองควบคุมค่าพีเอชของน้ำจากพีเอช 6 ไปเป็นพีเอช 7

เนื่องจากน้ำที่เราใช้มีค่าพีเอชอยู่ในช่วงกลาง คือพีเอช 7 ดังนั้นในการทดลองนี้เราจึงต้องปรับค่าพีเอชของน้ำให้มีค่าพีเอช 6 ก่อน แล้วจึงเริ่มทำการทดลองเพื่อความแม่นยำในการควบคุม เราจึงทดลองซ้ำทั้งหมด 5 ครั้ง มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

- 1) เตรียมน้ำสำหรับการทดลองปริมาตร 400 มิลลิลิตรในบีกเกอร์ตามรูปที่ 4.1
- 2) เปิดเครื่องควบคุมค่าพีเอช แล้วทำการวัดค่าพีเอชของน้ำที่จะทดลองก่อน 1 ครั้ง
- 3) เมื่อได้ค่าพีเอชก่อนการทดลองแล้วจดบันทึกไว้ จากนั้นเรากดปุ่ม A แล้วใส่ค่าพีเอช 6 ลงไป เสร็จแล้วกดปุ่ม # เพื่อเริ่มการควบคุม
- 4) เมื่อได้ค่าพีเอช 6 ตามที่ต้องการ ทำการจดบันทึกค่าเริ่มต้น จากนั้นเริ่มกดปุ่ม A แล้วใส่ค่าพีเอช 7 ลงไป เสร็จแล้วกดปุ่ม # เพื่อเริ่มการควบคุม

- 5) สังเกตการทดลองแล้วบันทึกผลลงในตารางที่ 4.1 ทำซ้ำข้อ 1-5 ทั้งหมด 5 ครั้ง
- 6) คำนวณค่าความผิดพลาดของการวัดแล้วบันทึกผลลงในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.1 การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องควบคุมค่าพีเอช

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงเวลาที่ใช้ในการปล่อยสารและค่าพีเอชในแต่ละครั้งที่ระบบปล่อยสารละลาย

การทดลอง ครั้งที่	พีเอช เริ่มต้น	ค่าพีเอช ที่ตั้งไว้	ระบบทำการปล่อยสารละลาย					
			ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
			เวลา (วินาที)	ค่า พีเอช	เวลา (วินาที)	ค่า พีเอช	เวลา (วินาที)	ค่า พีเอช
1	6.07	7.00	69.94	6.89	7.10	6.98	-	-
2	6.08	7.00	69.14	6.83	6.96	6.91	-	-
3	6.07	7.00	69.94	6.81	6.91	6.89	7.10	7.00
4	6.08	7.00	69.14	6.85	6.99	6.93	-	-
5	6.08	7.00	69.67	6.85	6.99	6.92	-	-

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความผิดพลาดและค่าพีเอชในแต่ละครั้งที่ระบบปล่อยสารละลาย

การทดลองครั้งที่	ค่าพีเอชที่ตั้งไว้	ระบบทำการปล่อยสารละลาย					
		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
		ค่าพีเอช	ความผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)	ค่าพีเอช	ความผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)	ค่าพีเอช	ความผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)
1	7.00	6.89	1.57	6.98	0.29	-	-
2	7.00	6.83	2.43	6.91	1.29	-	-
3	7.00	6.81	2.71	6.89	1.57	7.00	0.00
4	7.00	6.85	2.14	6.93	1.00	-	-
5	7.00	6.85	2.14	6.92	1.14	-	-

จากผลการทดลองพบว่า การควบคุมค่าพีเอชจากค่าพีเอช 6 ไปค่าพีเอช 7 ใช้การปล่อยสารละลายเพื่อปรับค่าพีเอชโดยเฉลี่ย 2 ครั้ง มีการทดลองครั้งที่ 3 เท่านั้นที่ใช้การปล่อยสารละลายถึง 3 ครั้ง และมีค่าผิดพลาดจากการทดลองสูงสุดอยู่ที่ 2.71 เปอร์เซ็นต์ เหตุผลที่ใช้การปล่อยสารละลายมากกว่า 1 ครั้งเพราะน้ำที่เราใช้มีค่าพีเอชเป็นกลางทำให้เราต้องปรับน้ำให้มีค่าพีเอชเป็นกรดขึ้น คือพีเอช 6 นั่นคือเราต้องเติมสารละลายบัฟเฟอร์กรดลงไปในน้ำก่อน และเมื่อเราจะปรับจากพีเอช 6 มาเป็นค่าพีเอช เราจึงต้องปล่อยสารละลายบัฟเฟอร์เบสลงไปเข้ากับสารละลายบัฟเฟอร์กรดในบีกเกอร์เดียวกัน จากคุณสมบัติของสารละลายบัฟเฟอร์ที่พยายามรักษาค่าพีเอชให้คงที่ ทำให้น้ำเกิดการต้านการเปลี่ยนค่าพีเอชนั่นเอง น้ำจึงเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชได้น้อยจึงใช้เวลาในการควบคุมมาก ปล่อยสารหลายครั้ง และมีค่าผิดพลาดสูง

4.1.2 การทดลองควบคุมค่าพีเอชของน้ำจากพีเอช 7 ไปหาพีเอช 8

เนื่องจากน้ำที่เราใช้มีค่าพีเอชอยู่ในช่วงกลาง คือพีเอช 7 ดังนั้นในการทดลองนี้เราจึงไม่ต้องปรับค่าพีเอชก่อนการทดลองเหมือนการทดลองที่ 1 มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

- 1) เตรียมน้ำสำหรับการทดลองปริมาตร 400 มิลลิลิตรในบีกเกอร์ตามรูปที่ 4.1
- 2) เปิดเครื่องควบคุมค่าพีเอช แล้วทำการวัดค่าพีเอชของน้ำที่จะทดลองก่อน 1 ครั้งและจดบันทึกค่าเริ่มต้น
- 3) เมื่อวัดค่าพีเอชเริ่มต้นเสร็จ กดปุ่ม A แล้วใส่ค่าพีเอช 8 ลงไป เสร็จแล้วกดปุ่ม # เพื่อเริ่มการควบคุม

- 4) สังเกตการทดลองแล้วบันทึกผลลงในตารางที่ 4.3 ทำซ้ำข้อ 1-5 ทั้งหมด 5 ครั้ง
- 5) คำนวณค่าความผิดพลาดของการวัดแล้วบันทึกผลลงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงเวลาที่ใช้ในการปล่อยสารและค่าพีเอชในแต่ละครั้งที่ระบบปล่อยสารละลาย

การทดลอง ครั้งที่	พีเอช เริ่มต้น	ค่าพีเอช ที่ตั้งไว้	ระบบทำการปล่อยสารละลาย					
			ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
			เวลา (วินาที)	ค่า พีเอช	เวลา (วินาที)	ค่า พีเอช	เวลา (วินาที)	ค่า พีเอช
1	7.03	8.00	22.66	8.03	-	-	-	-
2	7.00	8.00	23.56	8.03	-	-	-	-
3	7.01	8.00	23.45	8.01	-	-	-	-
4	7.00	8.00	23.56	8.01	-	-	-	-
5	7.03	8.00	22.73	8.01	-	-	-	-

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความผิดพลาดและค่าพีเอชในแต่ละครั้งที่ระบบปล่อยสารละลาย

การทดลอง ครั้งที่	ค่าพีเอช ที่ตั้งไว้	ระบบทำการปล่อยสารละลาย					
		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
		ค่า พีเอช	ความ ผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)	ค่า พีเอช	ความ ผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)	ค่า พีเอช	ความ ผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)
1	8.00	8.03	0.38	-	-	-	-
2	8.00	8.03	0.38	-	-	-	-
3	8.00	8.01	0.13	-	-	-	-
4	8.00	8.01	0.13	-	-	-	-
5	8.00	8.01	0.13	-	-	-	-

จากผลการทดลองพบว่า การควบคุมค่าพีเอชจากค่าพีเอช 7 ไปค่าพีเอช 8 ใช้การปล่อยสารละลายเพื่อปรับค่าพีเอชเพียง 1 ครั้ง และมีค่าผิดพลาดจากการทดลองสูงสุดอยู่ที่ 0.38 เปอร์เซ็นต์ เหตุผลที่ใช้การปล่อยสารละลายเพียง 1 ครั้ง เพราะน้ำที่เราใช้มีค่าใกล้เคียงกับค่าพีเอช 7 ที่เราต้องการ ดังนั้นก่อนการทดลองเราจึงไม่ต้องเติมสารละลายบัฟเฟอร์เพื่อปรับค่าพีเอช ทำให้น้ำไม่ผ่านการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช จึงทำให้การควบคุมค่าพีเอชใช้เวลาน้อยและมีค่าผิดพลาดต่ำในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการทดลอง

4.2 การทดสอบควบคุมค่าพีเอชของน้ำกรณิปรับให้มีความเป็นกรดมากขึ้น

สำหรับการทดสอบควบคุมค่าพีเอชของน้ำกรณิปรับให้มีความเป็นกรดมากขึ้น เราจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลอง การทดลองที่ 1 เราจะปรับค่าพีเอชจากพีเอช 7 ไปค่าพีเอช 6 และการทดลองที่ 2 เราจะปรับค่าพีเอชจากพีเอช 8 ไปค่าพีเอช 7 เพื่อดูระยะเวลาในการควบคุม และจำนวนครั้งที่ควบคุมของทั้ง 2 การทดลองว่าเท่ากันหรือไม่ และการทดลองไหนมีประสิทธิภาพมากกว่า เพราะเหตุใด

4.2.1 การทดลองควบคุมค่าพีเอชของน้ำจากพีเอช 7 ไปค่าพีเอช 6

เนื่องจากน้ำที่เราใช้มีค่าพีเอชอยู่ในช่วงกลาง คือพีเอช 7 ดังนั้นในการทดลองนี้เราจึงไม่ต้องปรับค่าพีเอชก่อนการทดลอง มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

- 1) เตรียมน้ำสำหรับการทดลองปริมาตร 400 มิลลิลิตรในบีกเกอร์ตามรูปที่ 4.1
- 2) เปิดเครื่องควบคุมค่าพีเอช แล้วทำการวัดค่าพีเอชของน้ำที่จะทดลองก่อน 1 ครั้งและจดบันทึกค่าเริ่มต้น
- 3) เมื่อวัดค่าพีเอชเริ่มต้นเสร็จ กดปุ่ม A แล้วใส่ค่าพีเอช 6 ลงไป เสร็จแล้วกดปุ่ม # เพื่อเริ่มการควบคุม
- 4) สังเกตการทดลองแล้วบันทึกผลลงในตารางที่ 4.5 ทำซ้ำข้อ 1-5 ทั้งหมด 5 ครั้ง
- 5) คำนวณค่าความผิดพลาดของการวัดแล้วบันทึกผลลงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงเวลาที่ใช้ในการปล่อยสารและค่าพีเอชในแต่ละครั้งที่ระบบปล่อยสารละลาย

การทดลอง ครั้งที่	พีเอช เริ่มต้น	ค่าพีเอช ที่ตั้งไว้	ระบบทำการปล่อยสารละลาย					
			ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
			เวลา (วินาที)	ค่า พีเอช	เวลา (วินาที)	ค่า พีเอช	เวลา (วินาที)	ค่า พีเอช
1	7.01	6.00	47.59	6.22	15.80	6.12	15.89	6.07
2	6.89	6.00	44.25	6.26	15.78	6.15	15.86	6.08
3	7.00	6.00	47.59	6.22	15.88	6.13	15.80	6.07
4	6.89	6.00	44.25	6.26	15.77	6.14	15.86	6.08
5	6.96	6.00	43.4	6.26	15.78	6.14	15.87	6.08

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความผิดพลาดและค่าพีเอชในแต่ละครั้งที่ระบบปล่อยสารละลาย

การทดลอง ครั้งที่	ค่าพีเอช ที่ตั้งไว้	ระบบทำการปล่อยสารละลาย					
		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
		ค่า พีเอช	ความ ผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)	ค่า พีเอช	ความ ผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)	ค่า พีเอช	ความ ผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)
1	6.00	6.22	3.67	6.12	2.00	6.07	1.16
2	6.00	6.26	4.33	6.15	2.50	6.08	1.33
3	6.00	6.22	3.67	6.13	2.17	6.07	1.16
4	6.00	6.26	4.33	6.14	2.33	6.08	1.33
5	6.00	6.26	4.33	6.14	2.33	6.08	1.33

จากผลการทดลองพบว่า การควบคุมค่าพีเอชจากค่าพีเอช 7 ไปค่าพีเอช 6 ใช้การปล่อยสารละลายเพื่อปรับค่าพีเอชทั้งหมด 3 ครั้ง และมีค่าผิดพลาดจากการทดลองสูงสุดอยู่ที่ 4.33 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งหากเปรียบเทียบกับ การควบคุมค่าพีเอชจากค่า 7 ไปค่าพีเอช 8 จะสังเกตว่าการทดลองนี้ใช้จำนวนครั้งที่มากกว่า ทั้งที่เริ่มจากค่าพีเอช 7 เหมือนกันและ ไม่มีการดำเนินการเปลี่ยนค่าพีเอชของน้ำ จากการเติมสารละลายบัฟเฟอร์ก่อนการทดลอง เกิดจากการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างน้ำกับสารละลายบัฟเฟอร์กรด ซึ่งอาจมีตัวขัดขวางการทำปฏิกิริยาทำให้การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชเกิดขึ้นน้อย ดังนั้นจึงใช้เวลาและจำนวนครั้งในการควบคุมมากกว่า

4.2.2 การทดลองควบคุมค่าพีเอชของน้ำจากพีเอช 8 ไปหาพีเอช 7

เนื่องจากน้ำที่เราใช้มีค่าพีเอชอยู่ในช่วงกลาง คือพีเอช 7 ดังนั้นในการทดลองนี้เราจึงต้องปรับค่าพีเอชของน้ำให้มีค่าพีเอช 8 ก่อน แล้วจึงปรับค่าพีเอชจากพีเอช 8 ไปพีเอช 7 อีก มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

- 1) เตรียมน้ำสำหรับการทดลองปริมาตร 400 มิลลิลิตรในบีกเกอร์ตามรูปที่ 4.1
- 2) เปิดเครื่องควบคุมค่าพีเอช แล้วทำการวัดค่าพีเอชของน้ำที่จะทดลองก่อน 1 ครั้ง
- 3) เมื่อได้ค่าพีเอชก่อนการทดลองแล้วจดบันทึกไว้ จากนั้นเรากดปุ่ม A แล้วใส่ค่าพีเอช 8 ลงไป เสร็จแล้วกดปุ่ม # เพื่อเริ่มการควบคุม
- 4) เมื่อได้ค่าพีเอช 8 ตามที่ต้องการ ทำการจดบันทึกค่าเริ่มต้น จากนั้นเริ่มกดปุ่ม A แล้วใส่ค่าพีเอช 7 ลงไป เสร็จแล้วกดปุ่ม # เพื่อเริ่มการควบคุม
- 5) สังเกตการทดลองแล้วบันทึกผลลงในตารางที่ 4.7 ทำซ้ำข้อ 1-5 ทั้งหมด 5 ครั้ง
- 6) คำนวณค่าความผิดพลาดของการวัดแล้วบันทึกผลลงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงเวลาที่ใช้ในการปล่อยสารและค่าพีเอชในแต่ละครั้งที่ระบบปล่อยสารละลาย

การทดลอง ครั้งที่	พีเอช เริ่มต้น	ค่าพีเอช ที่ตั้งไว้	ระบบทำการปล่อยสารละลาย					
			ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
			เวลา (วินาที)	ค่า พีเอช	เวลา (วินาที)	ค่า พีเอช	เวลา (วินาที)	ค่า พีเอช
1	8.03	7.00	24.94	7.12	9.36	6.79	6.88	6.94
2	8.03	7.00	24.94	7.13	9.33	6.81	6.91	6.96
3	8.01	7.00	24.94	7.17	9.28	6.82	6.95	6.96
4	8.01	7.00	24.94	7.20	9.23	6.83	6.95	6.98
5	8.01	7.00	24.94	7.22	9.2	6.84	6.98	6.94

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความผิดพลาดและค่าพีเอชในแต่ละครั้งที่ระบบปล่อยสารละลาย

การทดลอง ครั้งที่	ค่าพีเอช ที่ตั้งไว้	ระบบทำการปล่อยสารละลาย					
		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
		ค่า พี เอช	ความ ผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)	ค่า พีเอช	ความ ผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)	ค่า พีเอช	ความ ผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)
1	7.00	7.12	1.71	6.79	3.00	6.94	0.86
2	7.00	7.13	1.86	6.81	2.71	6.96	0.57
3	7.00	7.17	2.43	6.82	2.57	6.96	0.57
4	7.00	7.20	2.86	6.83	2.43	6.98	0.26
5	7.00	7.22	3.14	6.84	2.29	6.94	0.86

จากผลการทดลองพบว่า การควบคุมค่าพีเอชจากค่าพีเอช 8 ไปค่าพีเอช 7 ใช้การปล่อยสารละลายเพื่อปรับค่าพีเอชทั้งหมด 3 ครั้ง และมีค่าผิดพลาดจากการทดลองสูงสุดอยู่ที่ 3.14 เปอร์เซ็นต์ เหตุผลมาจากคุณสมบัติของสารละลายบัฟเฟอร์ที่พยายามรักษาค่าพีเอชให้คงที่ ทำให้น้ำเกิดการต้านการเปลี่ยนค่าพีเอชนั่นเอง และเกิดจากการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างน้ำกับสารละลายบัฟเฟอร์กรด ซึ่งอาจมีตัวขัดขวางการทำปฏิกิริยาทำให้การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชเกิดขึ้นน้อย ดังนั้นจึงใช้เวลาและจำนวนครั้งในการควบคุมมากกว่า จึงทำให้ใช้เวลาและจำนวนครั้งในการควบคุมมากกว่า

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

โครงการนี้ได้ออกแบบและสร้างเครื่องควบคุมค่าพีเอชของน้ำ โดยต้องการให้ได้ค่าพีเอช 6, 7 และ 8 โดยการออกแบบให้บอร์ดควบคุมรับค่าพีเอชจากเซนเซอร์วัดค่าพีเอชและอาศัยตัวควบคุมแบบพีซีลอจิกในการประมวลผลการสั่งการปล่อยสารละลายบัฟเฟอร์กรดและเบสในการปรับค่าพีเอช

จากผลการทดสอบเครื่องวัดค่าพีเอชของเรา สามารถวัดค่าพีเอชได้ใกล้เคียงกับเครื่องวัดที่ได้มาตรฐาน มีค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดสูงสุด 0.74 เปอร์เซ็นต์ เหตุที่มีความคลาดเคลื่อนเพราะเครื่องวัดที่ห้องปฏิบัติการมีการชดเชยเรื่องของอุณหภูมิภายในหัวโพรบด้วย ซึ่งเครื่องวัดของเราไม่มีตัวชดเชยอุณหภูมินี้ ในการหาอัตราการใช้สารละลายบัฟเฟอร์กรดพีเอช 4 คือ 40 หยดต่อนาที และสารละลายบัฟเฟอร์เบสพีเอช 10 ใช้ 63 หยดต่อนาที อัตราไหลที่แตกต่างกันมาจากการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของสารละลายทั้ง 2 ไม่เท่ากัน สำหรับการทดลองปล่อยสารเพื่อดูการเปลี่ยนของค่าพีเอช เพื่อนำไปสร้างกฎของพีซีลอจิกนั้น ผลการทดลองคือเมื่อเราปล่อยสารละลายเกิน ไปตั้งแต่วันที่ 10 สารละลายทั้ง 2 ชนิดจะเริ่มอึดตัวและหากเรายังเติมสาร ไปเรื่อยๆค่าพีเอชก็จะ ไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองสาร โดยเปล่าประโยชน์

ผลการทดสอบเครื่องควบคุมค่าพีเอช สามารถควบคุมค่าพีเอชให้ได้ใกล้เคียงตามค่าที่ต้องการ ซึ่งจะมีค่าความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยตามที่เราได้ออกแบบไว้ คือ 0.1 พีเอช ผลการทดลองที่ออกมาคือการควบคุมค่าพีเอชที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดคือ การควบคุมค่าพีเอชจากพีเอช 7 ไปพีเอช 8 สามารถควบคุมการปล่อยสารเพียงครั้งเดียว และรองลงมา คือการทดสอบการควบคุมค่าพีเอชของน้ำจากพีเอช 6 ไปหาพีเอช 7 ที่ใช้การควบคุมเฉลี่ยเพียง 2 ครั้ง การทดสอบการควบคุมค่าพีเอชของน้ำจากพีเอช 7 ไปหาพีเอช 6 ต้องใช้การควบคุมการปล่อยสารถึง 3 ครั้ง และยังทำให้เกิดความผิดพลาดสูงสุด 4.33 เปอร์เซ็นต์และการทดสอบการควบคุมค่าพีเอชของน้ำจากพีเอช 8 ไปหาพีเอช 7 ต้องใช้การควบคุมการปล่อยสารถึง 3 ครั้งเพื่อให้ได้พีเอชตามที่ต้องการ เนื่องจากคุณสมบัติของสารละลายบัฟเฟอร์ที่พยายามรักษาค่าพีเอชให้คงที่ ทำให้น้ำเกิดการผันแปรค่าพีเอชนั่นเอง ยิ่งน้ำได้รับสารละลายบัฟเฟอร์มากจะทำให้การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชน้อยลง และอาจเกิดจากการทำปฏิกิริยาเคมีของสารละลายบัฟเฟอร์กับน้ำ ส่งผลให้การควบคุมค่าพีเอชใช้

เวลานานและจำนวนครั้งในการควบคุมมาก ทั้งนี้ข้อสรุปนี้ได้รับข้อมูลเพิ่มเติมจากอาจารย์ วรศักดิ์ ลักขณ์ ช่อนกลิ่น อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

1) การทดสอบเครื่องวัดค่าพีเอชของน้ำที่ห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม เกิดความคลาดเคลื่อนเนื่องจากอุณหภูมิบริเวณห้องมากกว่าค่าที่ห้องทดลองระบุในการทดสอบหัวโพรบของบริษัทที่ผลิตเซนเซอร์ ซึ่งหัวโพรบของเราไม่มีการชดเชยอุณหภูมิเนื่องจากมีราคาถูก ขณะที่วัดจึงส่งผลต่อค่าพีเอช

2) การปรับอัตราการไหล เนื่องจากเป็นสายพลาสติกทำให้เมื่อเราปรับค่าอัตราการไหล ค้างไว้จะทำให้สายยางโดนรัด ส่งผลให้อัตราการไหลที่ได้คลาดเคลื่อนไป

3) สารละลายที่ใช้ในการควบคุมค่าพีเอช มีคุณสมบัติรักษาการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในสารละลาย ทำให้การควบคุมค่าพีเอชใช้เวลานานและจำนวนครั้งในการปล่อยสารมาก

5.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนา

1) ต้องพัฒนาเครื่องวัดเซนเซอร์ โดยออกแบบให้มีการชดเชยอุณหภูมิที่หัวโพรบด้วย จะทำให้เราสามารถใช้เครื่องวัดค่าพีเอชได้สะดวกมากขึ้น

2) การปรับอัตราการไหล หากไม่ต้องการปรับบ่อยควรเปลี่ยนไปใช้ระบบวาล์วเปิด-ปิด

3) สารละลายที่ใช้ควบคุมค่าพีเอชควรเป็นสารละลายชนิดอื่นที่ไม่ใช่สารละลายบัฟเฟอร์ และมีค่าพีเอชคงที่ จะช่วยลดระยะเวลาในการควบคุมและจำนวนครั้งในการปล่อยสารได้มากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] <http://202.129.59.73/nana/standard/st1.htm>, มาตรฐานคุณภาพน้ำ สืบค้นเมื่อ 11 มกราคม 2560.
- [2] http://www1a.biotec.or.th/SiRs/index.php?option=com_content&view=article&id=51:2009-11-02-04-47-58&catid=35:2009-08-27-09-28-17&Itemid=72, ความเป็นกรด-ด่าง สืบค้นเมื่อ 14 มกราคม 2560.
- [3] <http://www2.diw.go.th/Research/เอกสารเผยแพร่/3-Temp-pH-w.pdf>, ประโยชน์ของกรด-ด่าง สืบค้น เมื่อ 14 มกราคม 2560.
- [4] นพเก้า เอกอุ่น. (มกราคม 2557). สารละลายบัฟเฟอร์. BLPD Newsletter สืบค้นเมื่อ 16 มกราคม 2560.
- [5] <http://www.rcilabscan.com/files/download/9de41a17d42603c>, สารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 สืบค้นเมื่อ 16 มกราคม 2560.
- [6] <https://www.thermofisher.com.au/godirect/TechInfo/msds/AUS-001007.pdf>, สารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 10 สืบค้นเมื่อ 16 มกราคม 2560.
- [7] นางสาววิลาวัณย์ ประสมทรัพย์. การพัฒนาแบบจำลองตำแหน่งเสี่ยงต่อการพังทลายตลิ่งโดยวิธีฟัซซี่. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2554.
- [8] http://www.academia.edu/บทที่_18_ฟัซซี่_ลอจิก_Fuzzy_Logic, fuzzylogic สืบค้นเมื่อ 27 มกราคม 2560.
- [9] <https://www.arduinoall.com/product/507/arduino-mega-2560-r3>, บอร์ดอาดูโน่ สืบค้นเมื่อ 13 มีนาคม 2560.
- [10] <http://www.adisak51.com/avr2.html>, ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR สืบค้นเมื่อ 13 มีนาคม 2560.
- [11] <https://forum.arduino.cc/index.php?topic=125908.0>, Arduino Mega2560 สืบค้นเมื่อ 13 มีนาคม 2560.
- [12] <http://www.sa.sciencetech.co.th/pdf/Micro.pdf>, Arduino Mega2560 สืบค้นเมื่อ 11 พฤษภาคม 2560.
- [13] <https://home.kku.ac.th/chuare/12/pHmeter.pdf>, พีเอชเซนเซอร์ สืบค้นเมื่อ 11 พฤษภาคม 2560.
- [14] [https://www.dfrobot.com/wiki/index.php/PH_meter\(SKU:_SEN0161\)#Introduction](https://www.dfrobot.com/wiki/index.php/PH_meter(SKU:_SEN0161)#Introduction), พีเอชเซนเซอร์ สืบค้นเมื่อ 11 พฤษภาคม 2560.



รายละเอียดข้อมูลของสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4

RCI Labscan

RCI Labscan Limited

Buffer Solution pH 4.0 (Red)

Code GN1017

Specifications

Appearance	Clear, red solution
pH at 25°C	pH 4.00 ± 0.02

Traceable to NIST

Deviations of pH (Δ pH) at various temperatures :

	Δ pH
5°C	-0.01
10°C	-0.01
15°C	-0.01
20°C	-0.01
25°C	± 0
30°C	+0.01
35°C	+0.02
40°C	+0.02
50°C	+0.03





Buffer pH 10.0 colour coded blue

SAFETY DATA SHEET

H360 - May damage fertility or the unborn child

Precautionary Statements

P201 - Obtain special instructions before use
 P202 - Do not handle until all safety precautions have been read and understood
 P264 - Wash face, hands and any exposed skin thoroughly after handling
 P280 - Wear eye protection/ face protection
 P302 + P352 - IF ON SKIN: Wash with plenty of soap and water
 P305 + P351 + P338 - IF IN EYES: Rinse cautiously with water for several minutes. Remove contact lenses, if present and easy to do. Continue rinsing
 P308 + P313 - IF exposed or concerned: Get medical advice/ attention
 P332 + P313 - If skin irritation occurs: Get medical advice/ attention
 P362 - Take off contaminated clothing and wash before reuse
 P403 - Store in a well-ventilated place
 P501 - Dispose of contents/ container to an approved waste disposal plant

Other Information

No information available

Section 3 - Composition and Information on Ingredients

Component	CAS No.	Weight %
Water	7732-18-5	>60
Borates, tetra, sodium salts, decahydrate	1303-98-4	<10
Sodium hydroxide	1310-73-2	<1
C.I. Acid blue 9, disodium salt	3844-45-9	<0.0005

Section 4 - First Aid Measures

Inhalation	Move to fresh air. Get medical attention immediately if symptoms occur.
Ingestion	Clean mouth with water and drink afterwards plenty of water. Get medical attention if symptoms occur.
Skin Contact	Wash off immediately with plenty of water for at least 15 minutes. Get medical attention immediately if symptoms occur.
Eye Contact	Rinse immediately with plenty of water, also under the eyelids, for at least 15 minutes. Obtain medical attention.
Protection of First-aiders	No special precautions required.
First Aid Facilities	Eyewash, safety shower and washroom.
Most important symptoms/effects	None reasonably foreseeable.
Notes to Physician	Treat symptomatically.

Section 5 - Fire Fighting Measures**Suitable Extinguishing Media**

Use extinguishing measures that are appropriate to local circumstances and the surrounding environment.

Extinguishing media which must not be used for safety reasons

No information available.

Specific Hazards Arising from the Chemical

Thermal decomposition can lead to release of irritating gases and vapors.

Special protective equipment and precautions for fire fighters



Technical Specification

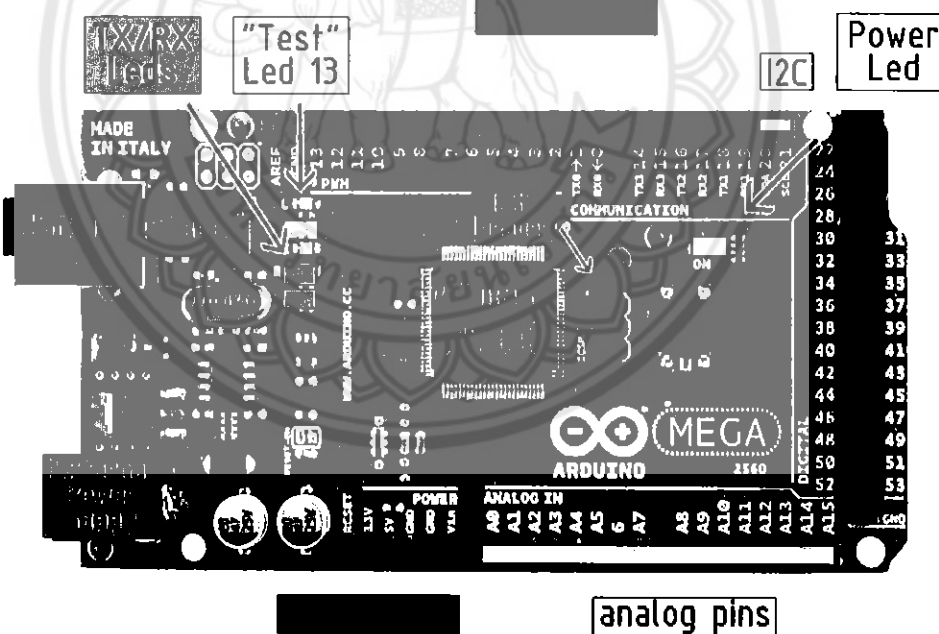


EAGLE files: [arduino-mega2560-reference-design.zip](#) Schematic: [arduino-mega2560-schematic.pdf](#)

Summary

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 14 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz

the board





ภาคผนวก ง

รายละเอียดข้อมูลของเซนเซอร์วัดค่าพีเอช

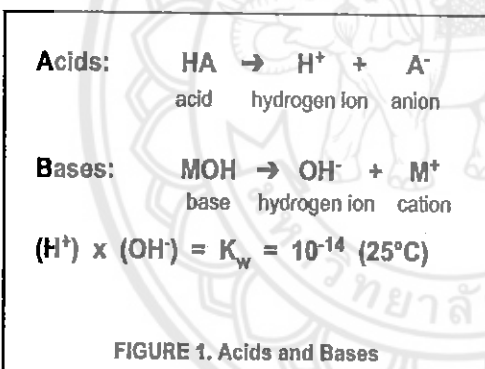
The Theory of pH Measurement

pH measurement has a wide variety of industrial applications in virtually every industry. These range from water conditioning to specific process related measurements to waste treatment.

WHAT IS pH?

pH is a measure of the acidity or alkalinity of a water solution. The acidity or alkalinity of a water solution is determined by the relative number of hydrogen ions (H^+) or hydroxyl ions (OH^-) present. Acidic solutions have a higher relative number of hydrogen ions, while alkaline (also called basic) solutions have a higher relative number of hydroxyl ions. Acids are substances which either dissociate (split apart) to release hydrogen ions or react with water to form hydrogen ions. Bases are substances that dissociate to release hydroxyl ions or react with water to form hydroxyl ions.

In water solutions, the product of the molar concentrations¹ of hydrogen and hydroxyl ions is equal to a dissociation constant (K_w). Knowing the value of the constant and the concentration of hydrogen ions makes it possible to calculate the concentration of hydroxyl ions, and vice versa. At 25°C, the value of K_w is 10^{-14} (see Figure 1).



The concentration of hydrogen and hydroxyl ions can

¹ Molar concentration is a measurement of the number of atoms, molecules or ions in a solution.

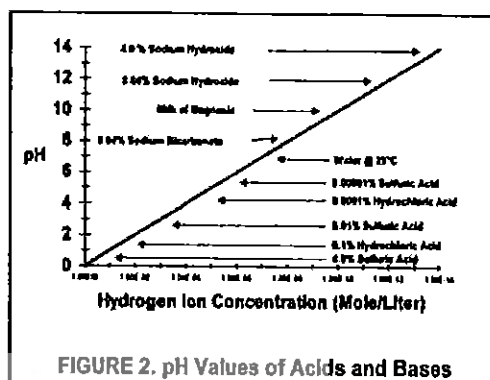


FIGURE 2. pH Values of Acids and Bases

vary over 15 orders of magnitude in water solutions. Even common household items can reflect this wide variation (Figure 2).

pH is strictly defined as the negative logarithm of the hydrogen ion activity (a_H):

$$pH = -\log_{10} a_H$$

The hydrogen ion activity is defined as the molar concentration of hydrogen ions multiplied by an activity coefficient, which takes into account the interaction of hydrogen ions with other chemical species in the solution.

In practice, pH is often assumed to be the negative logarithm of the hydrogen ion concentration:

$$pH = -\log_{10} [H^+]$$

In this form, the usefulness of pH as a convenient shorthand for expressing hydrogen ion concentration can be seen on page 2, Figure 3:

At 25°C, a neutral solution has a pH of 7.0, while solutions with $pH < 7$ are acidic and solutions with $pH > 7$

	pH	[H ⁺]	[OH ⁻]
	0	1.0	.00000000000001
	1	0.1	.0000000000001
	2	0.01	.000000000001
↑	3	0.001	.00000000001
ACIDIC	4	0.0001	.0000000001
	5	0.00001	.000000001
	6	0.000001	.00000001
Neutral	7	0.0000001	.0000001
	8	0.00000001	.00000001
	9	0.000000001	.00000001
	10	0.0000000001	.0001
BASIC	11	0.00000000001	.001
	12	0.000000000001	.01
	13	0.0000000000001	0.1
↓	14	0.00000000000001	1.0

ION CONCENTRATION, MOL/L

FIGURE 3. Ion Concentration, MOL/L

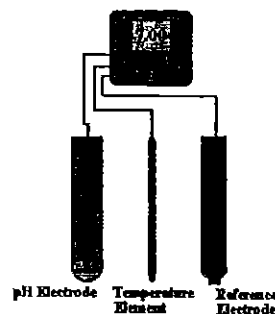
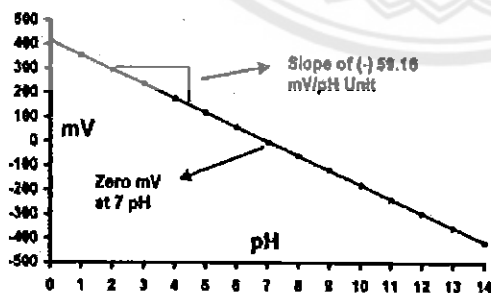
are alkaline. The normal overall pH range is 0 to 14 pH, although solutions containing non-water solvents can have pH values outside this range.

THE MEASUREMENT OF pH

pH measurement is based on the use of a pH sensitive electrode (usually glass), a reference electrode, and a temperature element to provide a temperature signal to the pH analyzer.

The pH electrode uses a specially formulated, pH sensitive glass in contact with the solution, which develops a potential (voltage) proportional to the pH of the solution. The reference electrode is designed to maintain a constant potential at any given temperature, and serves to complete the pH measuring circuit within the solution. It provides a known reference potential for the pH electrode. The difference in the potentials of the pH and reference electrodes provides a millivolt signal proportional to pH.

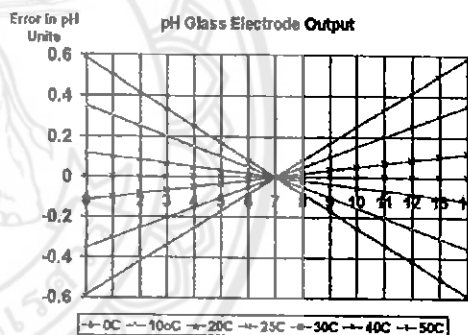
Most pH sensors are designed to produce a 0 mV signal at 7.0 pH, with a (theoretically ideal) slope (sensitivity) of -59.16 mV / pH at 25°C.



pH and reference electrode combination exhibits an isopotential point, which is a pH and millivolt potential at which the potential is constant with temperature changes. The isopotential point is most frequently designed to be at 7.0 pH and 0 mV. Using the isopotential point with a theoretical knowledge of electrode behavior makes it possible to compensate (correct) the pH measurement at any temperature to a reference temperature (usually 25°C), using a temperature signal from the temperature element. This makes the pH measurement independent of changes in the electrodes' output with temperature.

pH MEASUREMENT IN PROCESS SOLUTIONS

The potential effects of process solutions on pH sensors



will require a more detailed look at the construction of pH and reference electrodes. But first, some basic properties of the pH of water solutions need to be examined.

pH IN AQUEOUS SOLUTIONS

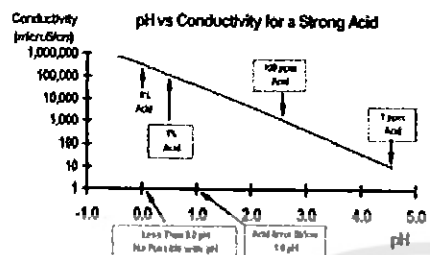
Practical pH Measurement Range

Although the range of pH measurements is defined to be 0 to 14 pH, solutions with pH values near the extremes of this range are often better measured using conductivity.

At pH values below 1.0 pH, the glass pH electrode can be subject to acid errors, and the sensor can be

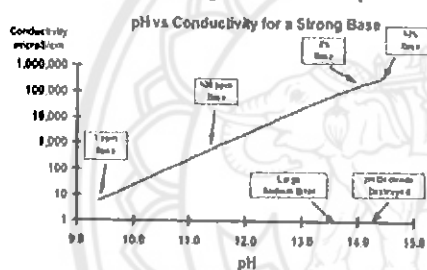
subject to chemical attack. Solutions with a pH in this range have an acid concentration at, or approaching the percent by weight range, which will have conductivity likely to be large in comparison to other electrolytes in the solution. A total conductivity measurement, with a read-out in percent acid, can often be successfully applied in these cases and will be a far more accurate measurement of acid concentration than pH.

In the case of high pH, the reason for switching to a



conductivity measurement is more compelling: highly alkaline solutions quickly destroy glass pH electrodes. If the nominal pH is expected to be above 13 pH, a conductivity measurement should be considered.

Solution pH Changes with Temperature



The pH of a solution can change with temperature, due to the effect of temperature on the dissociation of weak acids and bases, and the dissociation of water itself. In fact, any solution with a pH of 7 or above will have some degree of temperature dependence. How much this will affect the measurement will depend upon the composition of the solution and how high the nominal process temperature is above 25°C. This behavior is frequently the explanation for discrepancies between laboratory and on-line pH measurements.

Modern pH analyzers allow their temperature compensation routines to be modified to take into account solution pH changes with temperature as well as changes in the millivolt output of the electrodes. Simply entering the temperature coefficient of the solution (pH change per degree C) into the analyzer does this. While the temperature coefficient can be calculated for simple cases, it is often necessary to measure it in the laboratory by noting the pH at various temperatures. If the composition of a process changes, the temperature coefficient can also change;

therefore, the final product composition should be used for determining the solution coefficient.

Processes with Mixed Solvents

The conventional pH analyzer and sensor are designed to measure the pH in water solutions. When a non-water solvent is present in appreciable quantities, the pH reading will be shifted from the expected value by effects of the non-water solvent on the pH and reference electrodes, and effects on the activity of hydrogen ion itself. Since pH sensor components are designed for use in water, the non-water solvent may attack seals and O-rings.

There are a few mixed solvent cases that can be considered:

(1) A solvent that is miscible with (mixes with) water may cause a shift in the pH reading, but if the solvent's concentration is above 15% by weight, it may dry the pH electrode, requiring periodic rewetting of the sensor by water.

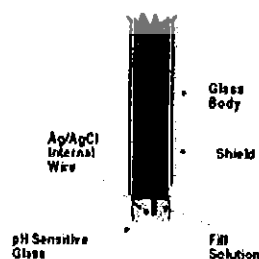
(2) A solvent that is non-miscible with water will likely not have an appreciable concentration of hydrogen ions; most will be in the water phase. It is better to make the measurement in a place in the process where the water and solvent phases separate and keep the pH sensor in the water phase.

(3) Completely non-water process measurements may only be possible with periodic rewetting of the pH sensor with water, and may also require a specially designed reference electrode.

In all of the above cases, pH measurement of the mixed solvent solution should be studied in the laboratory before going on-line, and the study should include prolonged exposure of the pH sensor to the process sample.

PROCESS EFFECTS ON THE GLASS pH ELECTRODE

A glass pH electrode consists of an inert glass tube with a pH sensitive glass tip, either hemispherical (bulb) or flat in shape, blown onto it. The tip contains a fill solution with a known pH, and it is the influence of this solution on the inside of the glass tip versus the influence of the process solution on the outside that gives rise to its millivolt potential. Ideally, the pH electrode will have a slope (response) of -59.16 mV/pH, but in practice, a new electrode may only have a slope



of -57 to -58 mV/pH. As the electrode ages, its slope decreases.

Temperature Effects

In addition to changing millivolt output of the pH electrode, elevated temperatures accelerate the aging of the electrode. Extremely high or low temperatures can alternatively boil the fill solution or freeze it, causing the electrode tip to break or crack. Elevated temperatures can also affect the interior and exterior of the pH electrode differently, giving rise to asymmetry potential, which shifts the zero point of the pH electrode and changes its temperature behavior, which leads to temperature compensation errors.

Sodium Error

More correctly called alkali ion error, sodium ion error occurs at high pH, where hydrogen ion concentration is very low in comparison to sodium ion concentration. The sodium ion concentration can be so high relative to hydrogen ion concentration that the electrode begins to respond to the sodium ion. This results in a reading that is lower than the actual pH. Depending on the pH glass formulation, this can occur as low as 10 pH. Where accurate high pH readings are required, the upper pH limit of the pH electrode should be checked and a specially formulated, high pH electrode used if necessary. Compared to sodium, lithium ions will produce a larger error, while the effect of potassium ions is negligible.

Components Attacking pH Electrodes Caustic

As noted earlier, high concentrations of hydroxyl ions shorten the life of pH electrodes. Solutions, that reach a pH in excess of 14 pH (equivalent to 4% caustic soda) can destroy a pH electrode in a matter of hours. There is nothing that can be done to prevent this, short of simply avoiding pH measurements in these solutions and using conductivity instead.

Hydrofluoric Acid

Hydrofluoric acid (HF) also dissolves pH glass, but there are pH glass formulations designed to resist destruction by HF, which when used within their limits can give satisfactory electrode life.

It is important to note that, while only hydrofluoric acid (HF) attacks glass and not fluoride ion (F⁻), hydrofluoric acid is a weak acid. Therefore, a solution can contain a relatively high concentration of fluoride ion at a high pH and do no damage to the electrode. But if the pH of the solution decreases, the fluoride ion will combine with hydrogen ion to form HF, which will damage the electrode. So, it is important to look at the extremes of the pH measurement (even in process upset conditions) and the total concentration of

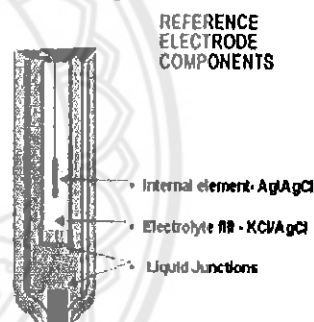
fluoride in the solution to determine what the maximum concentration of HF will be.

PROCESS EFFECTS ON REFERENCE ELECTRODES

The common reference electrode used in pH measurements consists of a silver wire coated with silver chloride in a fill solution of potassium chloride. The purpose of the potassium chloride is to maintain a reproducible concentration of silver ions in the fill solution, which in turn, results in a reproducible potential (voltage) on the silver-silver chloride wire. For the reference electrode to maintain a reproducible potential, the fill solution must remain relatively uncontaminated by certain components in the process solution.

At the same time, the reference electrode must be in electrical contact with the pH electrode through the process solution. A porous liquid junction of ceramic, wood, or plastic, which allows ions to pass between the fill solution and the process, typically does this. This passage of ions between the reference electrode and the process is necessary to maintain electrical contact, but also creates the potential for contamination of the reference fill solution by components in the process solution.

Reference Poisoning



The mechanism of reference poisoning is a conversion of the reference from a silver-silver chloride based electrode to an electrode based on a different silver compound. The ions, which typically cause this form less soluble salt with silver than does chloride. These ions include bromide, iodide, and sulfide ions. When these ions enter the fill solution, they form insoluble precipitates with the silver ions in the fill solution. But there is no initial effect on the potential of the reference, because the silver ions lost to precipitation are replenished by silver ions dissolving off the silver chloride coating of the silver wire. It is not until the silver chloride coating is completely lost that a large change in the potential (and temperature behavior) of the reference occurs. At this point, the reference electrode must be replaced.

Poisoning can also occur by reducing agent (bisulfite) or complexing agents (ammonia), which reduce the concentration of silver ion in the fill solution by reducing it to silver metal or complexing it.

To counter this effect, multiple junction reference electrodes are used, which consist of two or more liquid junctions and fill solutions to slow the progress of the poisoning ions. Gelling of the reference fill solution is also used to prevent the transport of poisoning ions by convection.



Liquid Junctions

A new approach is the use of a reference with a long tortuous path to the silver-silver chloride wire, along with gelling of the fill solution.

Plugging of the Liquid Junction

To maintain electrical contact between the reference electrode and the pH electrode, there must be a relatively free diffusion of ions between the reference fill solution and the process solution. In some cases, large concentrations of an ion that forms an insoluble precipitate with silver ion (most notably sulfide ion) will precipitate within the liquid junction and plug it. Metal ions that form insoluble salts with chloride ion (typically the heavy metals: silver, lead, and mercury) will also precipitate in the liquid junction.

When the liquid junction is closed to migration, the pH reading will drift aimlessly.

To counter these effects, multiple junction reference electrodes have been used with the outermost fill solution containing potassium nitrate, rather than potassium chloride. This lowers the concentration of chloride available for precipitation by heavy metals, as well as lowers the concentration of free silver ion, which can precipitate with sulfide.

Liquid Junction Potential

Potassium chloride is chosen for the fill solution not only for its ability to solubilize silver ion, but also because it is equitransferent. Equitransferent means that the positive potassium ion and the negative chloride ion diffuse through a water solution at nearly the same rate. When diffusing through the liquid junction of a reference electrode, both the positive and negative

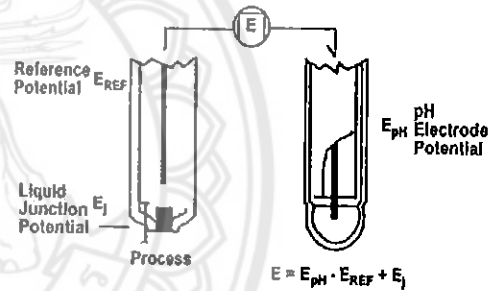
ions tend to move together and maintain a net zero charge at all points within the liquid junction.

However, not all solutions are equitransferent, and when the process solution is not, a liquid junction potential can result. When a positive ion diffuses through the liquid junction faster than a negative ion, or vice versa, a charge imbalance will result. This gives rise to an opposing potential, which is liquid junction potential. The magnitude of this potential depends upon the composition and concentrations in the process solution and the design of the liquid junction.

This potential gets added to the potentials of the pH and reference electrodes and causes an offset to the pH measurement of typically a few tenths of a pH. This phenomenon normally takes 15 to 20 minutes to develop after the pH sensor is put on line. pH buffer solutions, used to calibrate pH measurements, are by and large equitransferent, so returning a freshly buffer-calibrated pH sensor to a buffer solution from the process will show an offset in the buffer until the liquid junction potential subsides.

The remedy for liquid junction potential is to standardize the pH measurement after the sensor has been put on-line and has stabilized.

LIQUID JUNCTION POTENTIAL



pH SENSOR COATING AND CLEANING

Undissolved solids and liquids in a process can coat a pH sensor, drastically increasing its response time or even plugging the liquid junction of the reference electrode. Depending upon rate of fouling, the sensor can either be cleaned manually or on-line.

Manually cleaning the sensor should be done with the mildest effective cleaning solution possible. Alkaline deposits can be removed with weak acid solutions (5% HCl or vinegar), while acid deposits may be removed with mild caustic (1% caustic soda). Organic deposits (oil and grease) can often be removed with a detergent solution, but a more tenacious coating may require the use of a solvent. The solvent used should be carefully chosen to avoid attack on the sensor's O-rings and seals.

In all cases, the exposure to the cleaning solution should be minimized to limit the amount of cleaning

solution entering the liquid junction. Cleaning solution that enters the liquid junction can create a liquid junction potential, which will persist until the cleaning solution components diffuse out of the liquid junction.

On-line cleaning reduces maintenance in processes that quickly foul the sensor. Ultrasonic cleaning was the first approach to on-line cleaning, but was ineffective on soft or gelatinous coating, and only marginally effective with hard crystalline coatings, which it was designed to address. It has, for the most part, been abandoned as a cleaning method.

One of the most fruitful methods for on-line cleaning has been the jet spray cleaner. This method directs a spray of water or cleaning solution at the face of the pH sensor at timed intervals or based on a high reference impedance alarm (see Reference Electrode Impedance [next page]).

A new liquid junction design, the hydrolysis reference junction (TUPH™), has proved effective in avoiding the effects of severe coating. The TUPH junction uses extremely small pores, difficult to penetrate by most particulates and suspensions, over a relatively wide area. Use of this junction can drastically reduce the required frequency of manual cleaning and, in most cases, eliminates the need for on-line cleaning.

CALIBRATION

Buffer Calibration

Buffers are standard solutions formulated to maintain a known pH in spite of small amounts of contamination. Buffer calibrations use two buffer solutions, usually at least 3 pH units apart, which allows the pH analyzer to calculate a new slope and zero value to be used for deriving pH from the millivolt and temperature signals.

The slope and zero value derived from a buffer calibration provide an indication of the condition of the glass electrode from the magnitude of its slope, while the zero value gives an indication of reference poisoning or asymmetry potential. Overall, the buffer calibration can demonstrate how well the pH sensor responds to pH.

Buffer Calibration Errors

Buffer solutions have a stated pH value at 25°C, but when that value is 7 pH or above, the actual pH of the buffer will change with temperature. The values of the buffer solution at temperatures other than 25°C are usually listed on the bottle. The pH value at the calibration temperature should be used or errors in the slope and zero values, calculated by the calibration, will result. An alternative is to use the "buffer recognition" feature on modern pH analyzers, which automatically corrects the buffer value used by the analyzer for the temperature.

Another type of calibration error can be caused by buffer calibrations done in haste, which may not allow the pH sensor to fully respond to the buffer solution. This will cause errors, especially in the case of a warm pH sensor not being given enough time to cool down to the temperature of the buffer solution. Current pH analyzers have a "buffer stabilization" feature, which prevents the analyzer from accepting a buffer pH reading that has not reached a prescribed level of stabilization.

Grab Sample Standardization of pH

Standardization is a simple zero adjustment of a pH analyzer to match the reading of a sample of the process solution made using a laboratory or portable pH analyzer. It is most useful for zeroing out a liquid junction potential, but some caution should be used when using the zero adjustment. A simple standardization does not demonstrate that the pH sensor is responding to pH, as does a buffer calibration. In some cases, a broken pH electrode can result in a believable pH reading, which can then be standardized to a grab sample value.

A sample can be prone to contamination from the sample container or even exposure to air; high purity water is a prime example. A reaction occurring in the sample may not have reached completion when the sample was taken, but will have completed by the time it reaches the lab. Discrepancies between the laboratory measurement and an on-line measurement at an elevated temperature may be due to the solution pH being temperature dependent; adjusting the analyzer's temperature compensation (not a zero adjustment) is the proper course of action. Finally, it must be remembered that the laboratory or portable analyzer used to adjust the on-line measurement is not a primary pH standard, as is a buffer solution, and while it is almost always assumed that the laboratory is right, this is not always the case.

pH Diagnostics

The most straightforward way to validate the accuracy of a pH analyzer and sensor is by a buffer calibration. This is not possible during on-line operation, and, in general, the only clue to an on-line problem is a pH reading that is clearly impossible, given what is known about the process.

Over the years, on-line pH diagnostics came into use with the advent of the microprocessor driven analyzers. But these early diagnostics were restricted to the pH analyzer only. They provided self-checking of the analyzer and detection of electrode and temperature sensor inputs that were out of range due to shorts or open circuits.

™ TUPH is a trademark of Rosemount Analytical.

pH Sensor Impedance Diagnostics

The pH sensor is the most maintenance intensive part of the pH measurement, and with the widespread use of disposable pH sensors, it is likely to fail after 6 to 12 months of use, or even sooner in severe applications. Failures can occur slowly, such as the gradual loss of pH electrode slope or poisoning of the reference electrode. Or they can occur suddenly or catastrophically, as in the case of pH electrode breakage or coating and plugging of a reference electrode. In either case, failure might go undetected until the next routine buffer calibration. The purpose of impedance diagnostics is to detect these problems in real time.

Glass pH Electrode Impedance

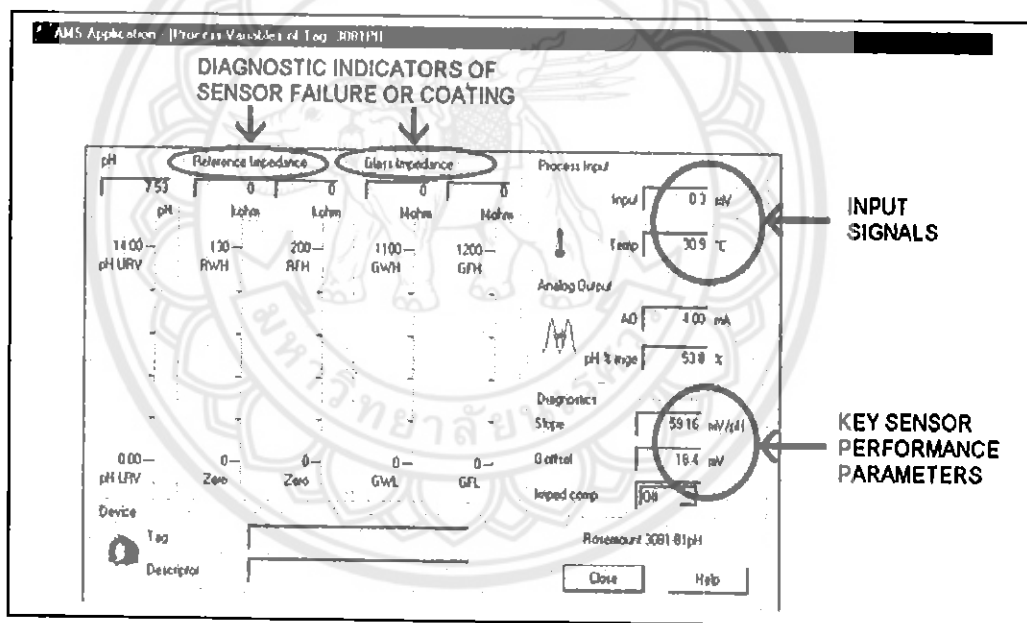
Glass pH electrode impedance is in the range of 10's to 100's of megOhms and is strongly temperature dependent. A crack or break in the glass electrode creates a short, which results in an impedance of 1 megOhm or less. Detecting broken or cracked pH electrodes requires impedance measurement circuitry with temperature compensation and the simple setting of a low impedance alarm.

Reference Electrode Impedance

The overall impedance of a reference electrode is a sum of the resistances of its components with the largest being the liquid junction. This is due to the limited volume of current carrying electrolyte within the liquid junction. Coating or blockage of the liquid junction further increases the impedance of the liquid junction. Detection of coating or blockage involves setting a high reference impedance alarm.

SUMMARY

pH measurements are based on the response of a pH sensor to the logarithmic concentration of hydrogen ions in solution and are a measure of the acidity or alkalinity of a solution. There are a number of factors that should be considered for on-line pH measurements. These involve the temperature behavior of the solution pH, the composition of the process solution, and the potential for fouling of the sensor by undissolved material in the process. Contemporary pH analyzers offer the user calibration routines to improve the accuracy of calibrations, as well as diagnostics to detect pH sensor failure on-line.



Emerson's Asset Management Solutions software is an excellent tool for tracking changes in the condition of the pH sensor. The Windows-based software can continuously display live values of sensor diagnostic variables when used with a compatible HART device. For more information, see Application Data Sheet 43-017.

INSTRUMENTATION

Model 54e pH Microprocessor Analyzer

- NEMA 4X (IP65) weatherproof, corrosion-resistant enclosure.
- Comprehensive pH glass and reference diagnostics.
- Fully descriptive diagnostic messages.
- Two independent outputs.
- Back-lit dot-matrix display.
- HART and AMS aware.
- Optional TPC relays and PID current outputs.



Model 396P pH/ORP TUPH Sensor

- Polypropylene reference junction and helical pathway mean longer sensor life in process solutions containing heavy solids.
- Disposable, one-piece construction is convenient and economical where minimal troubleshooting and maintenance downtime are of prime importance.
- Versatile. Can be used in numerous loop configurations with all Rosemount Analytical and other manufacturers' instruments.



Model 5081 pH/ORP Smart Two-Wire Transmitter

- Hand-held infrared remote control link to activate all the transmitter functions.
- Large custom LCD display.
- NEMA 4X (IP65) weatherproof, corrosion-resistant enclosure.
- Comprehensive pH glass and reference diagnostics.
- Non-volatile EEPROM memory to hold data in event of power failure.
- Compatible with FOUNDATION fieldbus and HART communication protocol and AMS software.



Model 396R Retractable pH/ORP TUPH Sensor

- Rugged titanium and polypropylene construction for maximum chemical resistance.
- Longer sensor life and reduced maintenance.
- Retractable version for greater insertion depths.



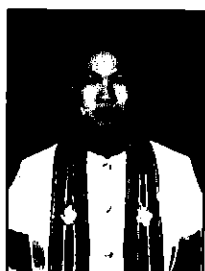
Emerson Process Management

2400 Barranca Parkway
Irvine, CA 92606 USA
Tel: (949) 757-8500
Fax: (949) 474-7250
<http://www.raihome.com>

© Rosemount Analytical Inc. 2010


EMERSON.
Process Management

ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นายกฤษฎา นาค๊ะ
 ภูมิลำเนา 26 หมู่ 5 ต. มหาวัน อ. แม่สอด จ. ตาก
 ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนสรรพวิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: Kritsadana56@email.nu.ac.th



ชื่อ นางสาวรัตนภรณ์ ยาใจ
 ภูมิลำเนา 72 หมู่ 7 ต. ศรีคอนไชย อ. เทิง จ. เชียงราย
 ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนเทิงวิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: Rattnaporny56@email.nu.ac.th