

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การนำฟuzzy logic มาใช้ในการขยายย่านการวัดความเข้มข้นของสารละลาย

FUZZY LOGIC-BASED INFERENCE APPROACH OF RANGE EXTENSION
CONCENTRATION MEASUREMENT OF SOLUTION



T123056



ฉพ.

๑/๒๑๓

๒๕๕๕

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 123056
วัน,เดือน,ปี 1.8.๓๓. 2555

b..... ๑๒๔๖๙๐๑๒
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FUZZY LOGIC-BASED INFERENCE APPROACH OF RANGE EXTENSION
CONCENTRATION MEASUREMENT OF SOLUTION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่โครงการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
KMUTL-2012-EN-M-010-002



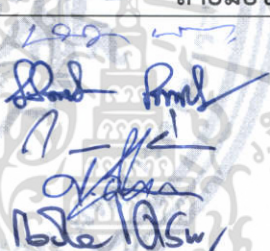
COPYRIGHT 2012

FACULTY OF ENGINEERING

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

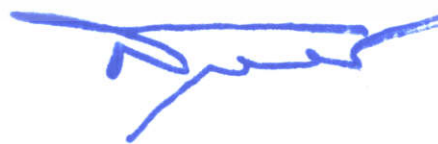
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การนำฟuzzy logic มาใช้ในการขยายย่านการวัดความเข้มข้นของสารละลาย
Thesis Title Fuzzy Logic-Based Inference Approach of Range Extension Concentration Measurement of Solution
นักศึกษา นายวงศกร วงศาโรจน์
รหัสประจำตัว 52611218
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2012-EN-M-010-002

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.พิพัฒน์ พรหมมี		
ดร.มนตรี คำเงิน		
ผศ.ดร.กฤษณ์ อ่างแก้ว		
ผศ.ดร.ศรวิวัฒน์ ชิวปรีชา		
รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ		

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 16 ธันวาคม พ.ศ. 2554 เวลา 16.00-18.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 16 ธันวาคม พ.ศ. 2554

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การนำฟuzzyโลจิกมาใช้ในการขยายย่านการวัดความเข้มข้นของสารละลาย
นักศึกษา	นายวงศ์กร วงศาโรจน์
รหัสประจำตัว	52611218
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2555
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอวิธีการขยายย่านการวัดความเข้มข้นของสารละลายที่มีข้อจำกัดซึ่งมีสาเหตุโดยตรงจากค่าความนำไฟฟ้าที่แปรผันตามความเข้มข้นของสารละลายนั้นทับซ้อนกันบางความเข้มข้น ทฤษฎีของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือการใช้มัลติเพิลเซนเซอร์ (Multiple sensors) ได้แก่ เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าและค่าพีเอชและกำหนดค่าการวัดที่ได้จากเครื่องมือวัดทั้งสองเป็นอินพุต จากนั้นจะทำการประมวลผลการวัดและจัดการข้อมูลโดยใช้ระบบการอนุมานของฟuzzyโลจิกโมเดลของทากาจิ-ซูเกโน (Takagi-Sugeno Model) เอาท์พุตฟังก์ชันสามารถแสดงได้อย่างชัดเจนว่าระบบการประมวลผลการวัดที่นำเสนอนี้ได้แก้ไขข้อจำกัดที่มีอยู่ซึ่งสามารถขยายย่านการวัดความเข้มข้นของสารละลายได้จริงและความผิดพลาดในการวัดอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ โดยทำการจำลองโครงสร้างของระบบการประมวลผลและทดสอบระบบการวัดในโปรแกรม MATLAB โดยทั้งหมดและใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นกรณีศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Fuzzy Logic-Based Inference Approach Of Range Extension Concentration Measurement of Solution
Student	Mr. Wongsakorn Wongsaroj
Student ID.	52611218
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2012
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Kobchai Dejhan

ABSTRACT

This thesis proposes a methodology for improving the limited measurement range of concentration measurement which caused directly from conductivity value which relates with concentration value. The principle of this thesis uses multiple sensors that are conductivity and pH instrument to obtain the input data, processed measurement signal and solving the solution by using the fuzzy inference system of Takagi-Sugeno model. The surface output obviously shows that proposed inference system and it is able to extend the concentration measurement range and reading error is acceptable. This thesis is done by using the simulation structure of processing system and tested measurement system in MATLAB software and use NaOH solution as a case study.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือสนับสนุนที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยและทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดการศึกษา ขอขอบพระคุณ รศ.จิรัชศักดิ์ ชาญวุฒิธรรมและ อ.นที ทองอุ่น ที่ให้การช่วยเหลือให้คำปรึกษาต่างๆที่เกี่ยวกับการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดาซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่งตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
สมมติฐานของการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีการวัดที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 หน่วยต่างๆในการวัดความเข้มข้นเคมี.....	4
2.3 หน่วยเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	4
2.4 การวัดค่าความนำไฟฟ้า.....	5
2.4.1 ทฤษฎีการวัดค่าความนำไฟฟ้า.....	5
2.4.2 เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า.....	8
2.5 การวัดความเข้มข้นของสารละลายโดยใช้เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า.....	10
2.6 การวัดค่าพีเอช.....	11
2.6.1 การวัดพีเอชแบบพื้นฐาน.....	13
2.6.2 อิเล็กโทรดแบบหลอดแก้ว.....	13
2.6.3 เอ้าท์พุทของเซนเซอร์.....	14
บทที่ 3 ทฤษฎีฟิสิกส์โลจิกแบบวิธีการของทาคาจิ-ซูจิโน.....	16
3.1 บทนำ.....	16
3.2 วิธีการของทาคาจิ-ซูจิโน.....	16
3.2.1 รูปแบบของเงื่อนไข.....	16
3.2.2 อัลกอริทึมของการหาผลลัพธ์.....	17
3.3 คุณสมบัติของผลลัพธ์ที่ได้.....	19
3.4 การประยุกต์ใช้ฟิสิกส์โมเดล.....	19
3.4.1 ที่มาของเงื่อนไขการควบคุม.....	22
3.4.2 ผลลัพธ์ของการควบคุมโดยฟิสิกส์โลจิก.....	24
บทที่ 4 หลักการวัดความเข้มข้นของสารละลายที่นำเสนอและการออกแบบ.....	26
4.1 บทนำ.....	26
4.2 การวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การนำฟuzzy logic มาใช้ในการขยายย่านการวัดความเข้มข้นของสารละลาย.....	28
4.3.1 เครื่องมือวัดและเซนเซอร์ที่เลือกใช้.....	29
4.3.1.1 ผลการทดสอบค่าความนำไฟฟ้าในแต่ละความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	29
4.3.1.2 ผลการทดสอบค่าพีเอชในแต่ละความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	30
4.3.2 ภาคการประมวลผล.....	32
4.3.2.1 การสร้างเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันของอินพุต.....	32
4.3.2.2 กลไกการอนุมาน.....	39
4.3.2.3 การกำหนดเงื่อนไข.....	40
4.3.2.4 การกำหนดสมการเอาท์พุต.....	41
4.3.2.5 การดีฟัซซิเคชัน.....	47
4.3.2.6 ตัวอย่างการคำนวณการอนุมานค่าของระบบที่ออกแบบ.....	48
บทที่ 5 ผลการทดสอบคุณสมบัติของหลักการที่นำเสนอ.....	53
5.1 บทนำ.....	53
5.2 ผลการทดสอบการนำฟuzzy logic มาใช้ในการขยายย่านการวัดของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งอ้างอิงความเข้มข้นที่ตรวจรู้จากเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าและเครื่องวัดค่าพีเอชในหัวข้อที่ 4.3.1.1 และ 4.3.1.2.....	53
5.3 ผลการทดสอบการวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยหลักการวัดที่นำเสนอร่วมกับเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าและเครื่องวัดพีเอช.....	58
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย.....	63
6.1 การออกแบบและผลการทดสอบ.....	63
6.2 แนวทางการพัฒนาในอนาคต.....	63
บรรณานุกรม.....	65
ภาคผนวก.....	66
ภาคผนวก ก. โปรแกรม MATLAB (Fuzzy Logic Toolbox).....	67
ที่ใช้ในการวิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์	
ภาคผนวก ข. รายละเอียดของเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ.....	69
ภาคผนวก ค. สมการในการคำนวณเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดและค่าความเที่ยงตรง.....	80
ภาคผนวก ง. ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	81
ประวัติผู้เขียน.....	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 หน่วยทางเคมี.....	4
ตารางที่ 2.2 สารละลายอ้างอิงสำหรับสอบเทียบค่าคงที่เซลล์ (Cell constant).....	7
ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของค่าคงที่เซลล์, ค่าความต้านทานและค่าความนำไฟฟ้า.....	8
ตารางที่ 2.4 ค่าคงที่เซลล์ที่แนะนำในแต่ละย่านการวัด.....	8
ตารางที่ 2.5 สเกลของพีเอช.....	12
ตารางที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามิลลิโวลต์ที่หนึ่งพีเอชเทียบกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง.....	14
ตารางที่ 2.7 ค่ามิลลิโวลต์ที่ 0 pH, 7pH และ 14 pH at 25 °C.....	15
ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลของตัวอย่างที่ 3.1.....	18
ตารางที่ 3.2 แสดงข้อมูลของแต่ละตัวแปรระหว่างปฏิบัติการ.....	21
ตารางที่ 3.3 ผลการทดสอบการควบคุมกระบวนการทั้งสามวิธี.....	24
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวัดค่าความนำไฟฟ้าในแต่ละความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	29
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวัดค่าพีเอชในแต่ละความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	31
ตารางที่ 4.3 เงื่อนไขสำหรับการเลือกสมการเชิงเส้นให้เป็นเอาร์ทพูด.....	42
ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบการขยายย่านการวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ หลังจากการปรับแต่งเมมเบอร์ชิพฟังก์ชันโดยอ้างอิงจากความสัมพันธ์ของค่าความนำ ไฟฟ้าและค่าพีเอชกับค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ดังหัวข้อที่ 4.3.1.1 และ 4.3.1.2 เป็นดั่งข้อมูลสำหรับการทดสอบ.....	54
ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบการวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยหลักการ ที่นำเสนอ (ครั้งที่หนึ่ง).....	57
ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบการวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยหลักการ ที่นำเสนอ (ครั้งที่สอง).....	58
ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบการวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยหลักการ ที่นำเสนอ (ครั้งที่สาม).....	58
ตารางที่ 5.5 แสดงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสมบูรณ์ของการทดสอบทั้งสามครั้ง.....	60
ตารางที่ 5.6 แสดงค่าความเที่ยงตรงของการทดสอบทั้งสามครั้งในแต่ละความเข้มข้นจาก ตารางที่ 5.2, 5.3 และ 5.4.....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายต่างๆเทียบกับค่าความนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	3
รูปที่ 2.1 การนำไฟฟ้าของน้ำหรือของเหลว.....	6
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของคู่อิเล็กโทรดแบบขนาน.....	7
รูปที่ 2.3 เซนเซอร์สำหรับวัดค่าความนำไฟฟ้าแบบสืออิเล็กโทรด.....	9
รูปที่ 2.4 ระบบการวัดของเซนเซอร์วัดค่าความนำไฟฟ้าแบบสืออิเล็กโทรด.....	10
รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าที่มีฟังก์ชันความเข้มข้นสารเคมี.....	10
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับค่าความเข้มข้นของสารละลาย.....	11
รูปที่ 2.7 ระบบการวัดค่าพีเอชแบบพื้นฐาน	13
รูปที่ 2.8 ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในคู่อิเล็กโทรด.....	14
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างผลลัพธ์ของการอนุมานโดยฟuzzy logic.....	19
รูปที่ 3.2 กระบวนการทำความสะอาดน้ำ.....	20
รูปที่ 3.3 ไดอะแกรมของการควบคุมกระบวนการ.....	21
รูปที่ 3.4 แสดงเมมเบอร์ชิพฟังก์ชันของแต่ละตัวแปร.....	22
รูปที่ 3.5 เงื่อนไขการควบคุมทั้งหมด.....	23
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความเข้มข้นของสารละลาย.....	27
รูปที่ 4.2 สารละลายมาตรฐาน (Standard solution) สำหรับสอบเทียบเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าและเครื่องวัดค่าพีเอช.....	27
รูปที่ 4.3 การวัดความเข้มข้นของกรดและด่างในกระบวนการ Regeneration resin ใน Cation Exchanger และ Anion Exchanger	28
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และค่าความนำไฟฟ้าในแต่ละความเข้มข้น.....	30
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และค่าพีเอชในแต่ละความเข้มข้น.....	31
รูปที่ 4.6 ภาพแสดงขณะทำการวัดค่าความนำไฟฟ้าและค่าพีเอช.....	32
รูปที่ 4.7 เมมเบอร์ชิพฟังก์ชันของ u_1 "Conductivity".....	33
รูปที่ 4.8 การสร้าง Linguistic value C1 บนเมมเบอร์ชิพฟังก์ชันของ u_1 "Conductivity".....	33
รูปที่ 4.9 การสร้าง Linguistic value C2 บนเมมเบอร์ชิพฟังก์ชันของ u_1 "Conductivity".....	34
รูปที่ 4.10 การสร้าง Linguistic value C3 บนเมมเบอร์ชิพฟังก์ชันของ u_1 "Conductivity".....	34
รูปที่ 4.11 การสร้าง Linguistic value C4 บนเมมเบอร์ชิพฟังก์ชันของ u_1 "Conductivity".....	35
รูปที่ 4.12 เมมเบอร์ชิพฟังก์ชันของ u_2 "pH".....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางธุรกิจ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.13 การสร้าง Linguistic value pH1 บนเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันของ u_2 “pH”.....	36
รูปที่ 4.14 การสร้าง Linguistic value pH2 บนเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันของ u_2 “pH”.....	36
รูปที่ 4.15 การสร้าง Linguistic value pH3 บนเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันของ u_2 “pH”.....	37
รูปที่ 4.16 การสร้าง Linguistic value pH4 บนเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันของ u_2 “pH”.....	37
รูปที่ 4.17 การสร้าง Linguistic value pH5 บนเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันของ u_2 “pH”.....	38
รูปที่ 4.18 การสร้าง Linguistic value pH6 บนเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันของ u_2 “pH”.....	38
รูปที่ 4.19 กลไกการอนุมานที่นำเสนอ.....	39
รูปที่ 4.20 สมการเชิงเส้น (tangent line) ที่สัมผัสบนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และค่าความนำไฟฟ้า.....	40
รูปที่ 4.21 การกำหนดแต่ละเงื่อนไขลงในโปรแกรม MATLAB.....	41
รูปที่ 4.22 การกำหนดสมการเอาต์พุตที่หนึ่ง (Output 1) ลงบนโปรแกรม MATLAB.....	42
รูปที่ 4.23 การกำหนดสมการเอาต์พุตที่สอง (Output 2) ลงบนโปรแกรม MATLAB.....	43
รูปที่ 4.24 การกำหนดสมการเอาต์พุตที่สาม (Output 3) ลงบนโปรแกรม MATLAB.....	43
รูปที่ 4.25 การกำหนดสมการเอาต์พุตที่สี่ (Output 4) ลงบนโปรแกรม MATLAB.....	44
รูปที่ 4.26 การกำหนดสมการเอาต์พุตที่ห้า (Output 5) ลงบนโปรแกรม MATLAB.....	44
รูปที่ 4.27 การกำหนดสมการเอาต์พุตที่หก (Output 6) ลงบนโปรแกรม MATLAB.....	45
รูปที่ 4.28 การกำหนดสมการเอาต์พุตที่เจ็ด (Output 7) ลงบนโปรแกรม MATLAB.....	45
รูปที่ 4.29 การกำหนดสมการเอาต์พุตที่แปด (Output 8) ลงบนโปรแกรม MATLAB.....	46
รูปที่ 4.30 การกำหนดสมการเอาต์พุตที่เก้า (Output 9) ลงบนโปรแกรม MATLAB.....	46
รูปที่ 4.31 การกำหนดสมการเอาต์พุตที่สิบ (Output 10) ลงบนโปรแกรม MATLAB.....	47
รูปที่ 4.32 การกำหนดวิธีการหาค่าความจริง (Rule weight) และเลือกวิธีการดีฟัซซิเคชันบนโปรแกรม MATLAB.....	48
รูปที่ 5.1 หน้าต่าง Rule Viewer ในโปรแกรม MATLAB.....	53
รูปที่ 5.2 ผลการวัดแบบกราฟสามมิติ.....	54
รูปที่ 5.3 ผลการทดสอบการวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หลังจากการปรับแต่งเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันโดยอ้างอิงจากความสัมพันธ์ของค่าความนำไฟฟ้าและค่าพีเอชกับค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ดังหัวข้อที่ 4.3.1.1 และ 4.3.1.2.....	56
รูปที่ 5.4 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของการวัด (% of reading) จากตารางที่ 5.1.....	57
รูปที่ 5.5 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของการวัดทั้งสามครั้ง (% of Reading) ในแต่ละความเข้มข้นของสารละลายจากข้อมูลในตารางที่ 5.2, 5.3 และ 5.4.....	60
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงค่าความเที่ยงตรงของการวัดทั้งสามครั้ง (Precision value) จากตารางที่ 5.6.....	61
รูปที่ 5.7 กราฟแสดงค่าความเที่ยงตรงเฉลี่ยของการวัดในแต่ละความเข้มข้นจากตารางที่ 5.6.....	62
รูปที่ 6.1 ไดอะแกรมของเครื่องวัดความเข้มข้นจากหลักการที่นำเสนอ (แนวทางพัฒนาในอนาคต).....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้เครื่องมือวัดนั้นมีบทบาทเป็นอย่างมากในหลายๆหน่วยงานและอุตสาหกรรมต่างๆ เพราะเป็นเครื่องมือที่สามารถบอกคุณลักษณะของสิ่งที่เกิดขึ้นในระบบหรือในกระบวนการต่างๆได้แม้กระทั่งสามารถเป็นตัวชี้บ่งการควบคุมกระบวนการ เครื่องมือวัดถูกแบ่งเป็นสองประเภทหลักๆได้แก่เครื่องมือวัดพารามิเตอร์ทางฟิสิกส์และเครื่องมือวัดพารามิเตอร์ทางเคมีซึ่งเครื่องมือวัดทางฟิสิกส์จะได้แก่ เครื่องวัดอัตราการไหล, เครื่องวัดความดัน, เครื่องวัดพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ฯลฯ ส่วนเครื่องมือวัดทางเคมีได้แก่ เครื่องวัดค่าพีเอช, เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า, เครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะแก๊ส ฯลฯ

ในส่วน of เครื่องมือวัดทางเคมีเป็นเครื่องมือที่สำคัญอย่างยิ่งเพราะเป็นตัวตรวจวัดปริมาณทางเคมีและยังนำค่าที่ตรวจวัดได้นั้นส่งออกเป็นสัญญาณมาตรฐานไปควบคุมกระบวนการได้อีกทางหนึ่งด้วยเครื่องมือวัดทางเคมีจะแบ่งเป็นสองประเภทหลักๆตามลักษณะการใช้งานคือเครื่องมือวัดแบบพกพา (Portable meter) แบบนี้นิยมใช้ในท้องตลาดของทางเคมีหรือใช้วัดตามจุดต่างๆแบบชั่วคราวและแบบที่สองคือเครื่องมือวัดแบบออนไลน์ (Online meter) แบบนี้จะใช้วัดที่หน้างานของกระบวนการนั้นๆอย่างถาวรและยังส่งค่าการวัดไปแสดงผลหรือควบคุมกระบวนการได้แบบทันทีทันใดและต่อเนื่องด้วย

ค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity) [1-2] คือคุณลักษณะที่แสดงถึงความสามารถของการนำกระแสไฟฟ้าของของไหลและยังเป็นที่ใช้กันในหลายอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับกระบวนการบำบัดน้ำ (Water treatment), กระบวนการต้มน้ำ (Boiler), กระบวนการเกี่ยวกับความเข้มข้นของเคมี (Concentration chemical) เพื่อบอกถึงคุณภาพน้ำหรือความเข้มข้นของสารละลายทางเคมีต่างๆในกระบวนการซึ่งในส่วนการวัดความเข้มข้นของสารละลายเป็นสิ่งที่ผู้วิจัยทำการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

การวัดความเข้มข้นของสารละลายนั้นมีเครื่องมือวัดหลายรูปแบบที่สามารถนำมาวัดได้เช่น เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า, เครื่องวัดแบบไอออนซีเล็กทีฟเซนเซอร์, ไตรเตรซันมิเตอร์ ฯลฯ เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวัดความเข้มข้นของสารละลายได้ โดยเครื่องมือมีราคาค่อนข้างถูกและความถูกต้องในการวัดก็ค่อนข้างดีแต่ข้อจำกัดคือไม่สามารถวัดหรือแยกแยะสารละลายที่มีสารเคมีผสมหลายๆสารได้หรือเป็นการวัดแบบองค์รวมนั่นเองและมียานการวัดที่ค่อนข้างสั้น ทางด้านเครื่องวัดสารเคมีชนิดอื่นเช่นเครื่องวัดโซเดียม (Sodium analyzer) ที่เป็นหนึ่งในเครื่องวัดแบบไอออนซีเล็กทีฟเซนเซอร์มันสามารถทำการวัดและแยกแยะเฉพาะความเข้มข้นของโซเดียมที่ประกอบในสารละลายได้เช่นถ้าสารละลายคือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เครื่องวัดชนิดนี้สามารถบ่งบอกเฉพาะความเข้มข้นของโซเดียม (Na^+) ได้และมีความถูกต้องค่อนข้างสูงและทำการวัดที่ความเข้มข้นสูงๆได้แต่มีข้อจำกัดคือราคาเครื่องมือวัดค่อนข้างสูงมาก ฉะนั้นถ้าสารละลายที่ทำการวัดนั้นเป็นสารละลายที่ผสมกันระหว่างสารเคมีที่แน่นอนกับน้ำและทำการวัดที่ความเข้มข้นไม่สูงมากนักเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าก็ถือว่าเหมาะสม แต่ถ้าเราต้องการวัดความเข้มข้นเฉพาะบางพารามิเตอร์ในสารละลายที่เป็นสารผสมหลายๆสารและที่ความเข้มข้นสูงก็จำเป็นต้องใช้เครื่องวัดชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อื่นๆ ในการทำการวัด แต่ถ้าเราสามารถนำเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้ามาวัดค่าความเข้มข้นของสารละลายที่ย่านการวัดสูงๆ ได้ก็จะเป็นการลดต้นทุนได้ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอการนำฟuzzy logic มาใช้ในการขยายย่านการวัดความเข้มข้นของสารละลายโดยเลือกสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นกรณีศึกษา

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

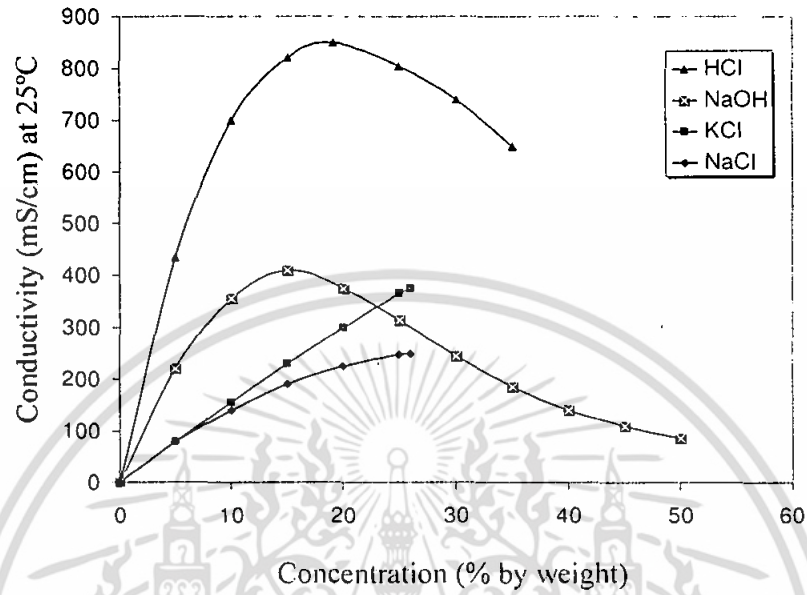
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการนำฟuzzy logic มาใช้ในการขยายย่านการวัดความเข้มข้นของสารละลายและสารละลายที่เป็นกรณีศึกษาคือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพื่อต้องการให้เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าสามารถทำการวัดความเข้มข้นของสารละลายได้ในย่านการวัดที่สูงขึ้นกว่าเดิมรวมถึงมีความผิดพลาดในการวัดให้น้อยที่สุด หายที่สุดนั้นสามารถนำหลักการที่นำเสนอขึ้นไปประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมได้จริงในอนาคต

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ในการนำเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ในการวัดค่าความเข้มข้นของสารละลายนั้น จะเห็นว่าข้อจำกัดในเรื่องของย่านการวัดที่ค่อนข้างสั้นซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นกรณีศึกษา ซึ่งมีย่านการวัดเพียง 0-15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (% by weight) ดังนั้นจึงไม่สามารถทำการวัดที่ความเข้มข้นสูงกว่า 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักได้เนื่องจากการลดต่ำลงของค่าความนำไฟฟ้า ณ ค่าความเข้มข้นของสารละลายที่สูงกว่าสิบห้าเปอร์เซ็นต์จึงทำให้ค่าความนำไฟฟ้าที่ได้จากค่าความเข้มข้นที่มากกว่าสิบห้าเปอร์เซ็นต์นั้นมีค่าเท่ากับค่าความนำไฟฟ้าที่ความเข้มข้นต่ำกว่าสิบห้าเปอร์เซ็นต์ได้ ดังนั้นจึงไม่สามารถแยกแยะค่าความเข้มข้นได้นั่นเองซึ่งเหตุผลในเชิงเคมีคือการดึงดูระหว่างไอออนิกสปีซีภายในสารละลายเป็นผลให้ลดการแตกตัวของไอออนในสารละลาย ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้ค่าความนำไฟฟ้าลดลงเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นมากๆ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายและค่าความนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้ ดังรูปที่ 1.1 จุดอ่อนของค่าความนำไฟฟ้าจุดนี้คือสิ่งที่ผู้วิจัยต้องการแก้ไขดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสงค์ที่จะขยายย่านการวัดความเข้มข้นของสารละลายนั่นเอง ผู้วิจัยได้เลือกสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH solution) มาเป็นกรณีศึกษาเพื่อทดลองแก้ไขข้อจำกัดของย่านการวัดโดยผู้วิจัยได้นำเครื่องวัดพีเอชมาตรวจวัดค่าความเข้มข้นร่วมกับเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายหรือที่เรียกว่าหลักการ “มัลติเปิลเซนเซอร์” และป้อนค่าอินพุตทั้งสองเข้าสู่ระบบการประมวลผลการวัดที่มีประสิทธิภาพเพื่อประสานงานระหว่างสองอินพุตและประมวลผลเพื่อแสดงค่าการวัดที่ถูกต้องโดยระบบการประมวลผลที่ใช้ก็คือระบบการอนุมานโดยฟuzzy logic นั่นเอง

ระบบฟuzzy logic (Fuzzy logic system) ซึ่งเสนอโดยบทความวิจัยหลายบทความ [5-6] เป็นหลักการที่เกี่ยวข้องกับการจัดการสัญญาณเพื่อแก้ไขปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกใช้หลักการนี้เพื่อจัดการอินพุตที่ได้รับจากค่าความนำไฟฟ้าและค่าพีเอช และจัดการสัญญาณค่าการวัดจากอินพุตทั้งสองให้กลายเป็นค่าความเข้มข้นของสารละลายได้อย่างถูกต้อง โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ฟuzzy logic ในวิธีการของทากาจิ-ซูเกโน (Takagi-Sugeno Model) [6] เป็นระบบการอนุมานทางฟuzzy (Fuzzy inference system) และการทดสอบคุณสมบัติของหลักการ

ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะปฏิบัติการบนโปรแกรม MATLAB Versions 7.4 [9] โดยทั้งหมดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายต่างๆเทียบกับค่าความนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีการวัดที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงส่วนที่เกี่ยวข้องกับการวัดความเข้มข้นสารละลายตั้งแต่หน่วยการวัดต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง, ทฤษฎีของเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าและเครื่องวัดค่าพีเอชทั้งในส่วนของหลักการทำงาน ชนิดของเครื่องมือและการประยุกต์ใช้กับการวัดค่าความเข้มข้นของสารละลาย

2.2 หน่วยต่างๆในการวัดความเข้มข้นเคมี

หน่วยทางเคมีเป็นดัชนีที่บ่งบอกถึงน้ำหนักและความเข้มข้นรวมถึงปริมาตร ฯลฯ โดยหน่วยทางเคมีต่าง ๆ นั้นจะใช้ในการอ้างอิงและใช้เป็นหน่วยในการวัดพารามิเตอร์ต่างๆทางเคมีนั่นเองซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 หน่วยทางเคมี

	หน่วยที่ 1	หน่วยที่ 2	หน่วยที่ 3	หน่วยที่ 4	หน่วยที่ 5
%	= Percent	= V/V	= W/V	= W/W	
0.1 %	= 1 ppt	= 1 g/l	= 1 g l ⁻¹	= 1 %	
0.001 g l ⁻¹	= 1 ppm	= 1 mg/l	= 1 mg l ⁻¹	= 1 mg/kg	= 1 mg. kg ⁻¹
0.001 mg l ⁻¹	= 1 ppb	= 1 µg/l	= 1 µg l ⁻¹	= 1 µg/kg	= 1 µg. kg ⁻¹

จากตารางข้างต้นเป็นหน่วยพื้นฐานทางเคมีโดยจะไม่มีหน่วยการวัดที่เฉพาะไปแต่ละพารามิเตอร์ทางเคมี ซึ่งจะอยู่นอกเหนือขอบเขตของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

2.3 หน่วยเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Percent by weight)

วิธีนี้ระบุน้ำหนักของตัวถูกละลายเป็นเศษส่วนของน้ำหนักของสารละลาย ตัวอย่างเช่น สารละลายชนิดหนึ่งประกอบด้วย น้ำ 25.0 กรัม และเอทานอล 75.0 กรัม เศษส่วนโดยน้ำหนักของน้ำเป็นดังนี้

$$W_{H_2O} = 25.0 \text{ กรัมของน้ำ} / 25.0 \text{ กรัมของน้ำ} + 75.0 \text{ กรัมของเอทานอล}$$
$$= 25.0 \text{ กรัม} / 100.0 \text{ กรัม}$$

$$W_{H_2O} = 0.250 \text{ (ให้ } W_{EtOH} = \text{ เศษส่วนโดยน้ำหนักของน้ำ)}$$

ในทำนองเดียวกัน เศษส่วนโดยน้ำหนักของเอทานอล

$$= 1 - 0.250$$

$$= 0.750$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในบางกรณีอาจจะระบุความเข้มข้นเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Percent by weight) ซึ่งเท่ากับเศษส่วนโดยน้ำหนัก $\times 100$ ดังนั้นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำในสารละลายเอทานอลที่กล่าวมาแล้วข้างต้นคือ

$$\begin{aligned}\text{เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำ} &= 0.250 \times 100 \\ &= 25 \text{ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Percent by weight)}\end{aligned}$$

และในทำนองเดียวกันเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเอทานอลในสารละลายคือ

$$\begin{aligned}\text{เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเอทานอล} &= 0.750 \times 100 \\ &= 75 \text{ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Percent by weight)}\end{aligned}$$

2.4. การวัดค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity Measurement)

ค่าความนำไฟฟ้า [1-2] คือความสามารถของของไหลที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าผ่านได้ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่นิยมทำการตรวจวัดกันมากในหลายอุตสาหกรรม

ในบทนี้จะกล่าวถึงเทคนิคการวัดค่าความนำไฟฟ้าหรืออีกนัยหนึ่งก็คือการบอกผลรวมของไอออนิกส์ของสารละลายหรือน้ำนั่นเอง การวัดค่าความนำไฟฟ้าไม่สามารถตรวจรู้ถึงพารามิเตอร์ใดๆ แบบเจาะจงได้ซึ่งจุดนี้คือจุดอ่อนของมัน แต่มันสามารถบ่งบอกคุณลักษณะของของไหลหรือน้ำในเชิงขององค์รวมได้และสามารถทำการตรวจรู้พารามิเตอร์เฉพาะบางพารามิเตอร์ได้ถ้ามีการแทรกขั้นตอนอื่นๆในการวัดเข้าไป (Indirect method)

การประยุกต์ใช้ที่เห็นได้ชัดเจนคือการตรวจรู้คุณภาพของน้ำดื่ม การบ่งบอกประสิทธิภาพของน้ำปราศจากแร่ธาตุหรือแม้กระทั่งสามารถนำมาวัดความเข้มข้นของสารละลายได้เช่นกันซึ่งกรณีนี้คือกรณีศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

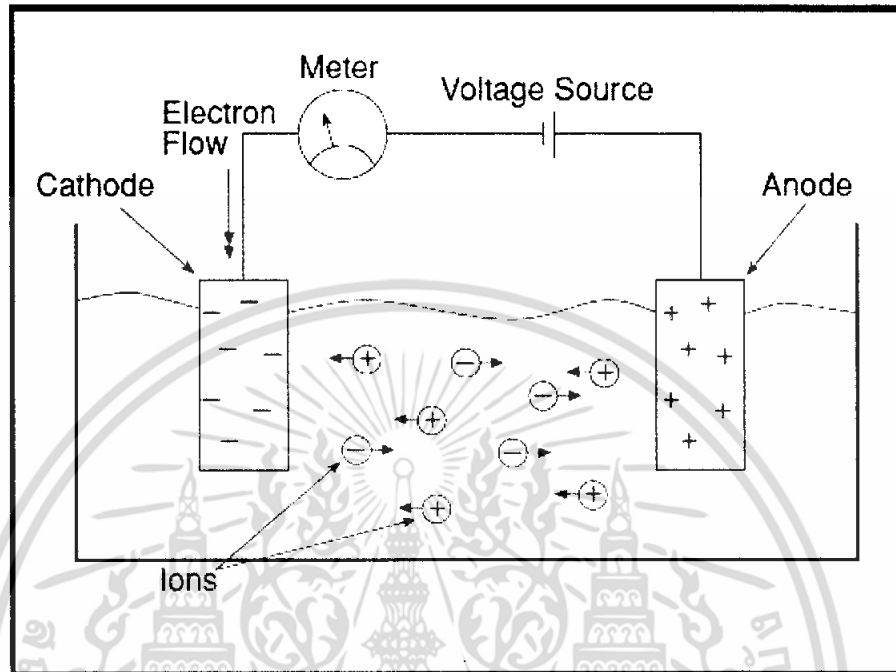
2.4.1 ทฤษฎีของการวัดค่าความนำไฟฟ้า

ค่าความต้านทานของวัสดุสามารถบ่งบอกโดยสัญลักษณ์ R และมีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω) ส่วนทางด้านค่าความนำไฟฟ้าก็คือส่วนกลับของค่าความต้านทานนั่นเองมีสัญลักษณ์คือ G และมีหน่วยเป็นซีเมนต (S) หรือส่วนกลับของ Ω^{-1} โอห์ม (Ω^{-1}) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้าและค่าความต้านทานคือ

$$G = \frac{1}{R} \quad (2.1)$$

ความต้านทานของวัสดุตัวอย่างที่ทำการวัดเป็นคุณสมบัติจากรูปร่างของมันเองก็คือพื้นที่หน้าตัด A และความยาวของมัน l ในกรณีที่ตัวอย่างที่ทำการวัดเป็นของไหล (กรณีที่น่าสนใจในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้) พื้นที่ A จะเป็นพื้นที่ของคู่อิเล็กโทรดแบบขนานและความยาว l นั้นถูกแทนด้วยสัญลักษณ์ d นั่นก็คือระยะห่างของคู่อิเล็กโทรดนั่นเอง ค่าความต้านทานเฉพาะ (Specific

resistivity) เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ ρ และมีหน่วยเป็น ($\Omega - cm$) (Ohm-centimeter) จะมีนิยามดังสมการที่ 2.2.



รูปที่ 2.1 การนำไฟฟ้าของน้ำหรือของเหลว

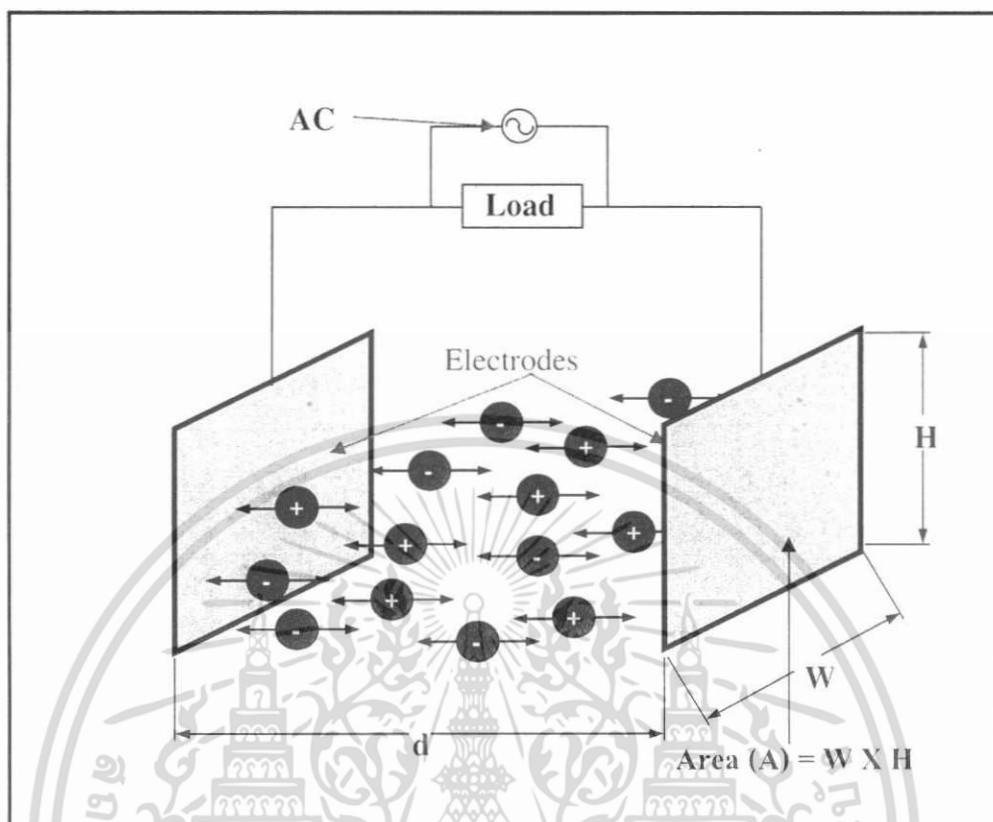
$$\rho = R \frac{A}{d} \quad (2.2)$$

ในทำนองเดียวกันนั้นค่าความนำไฟฟ้าเฉพาะ (Specific conductivity) เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ σ และมีหน่วยเป็นซีเมนต์ต่อเซนติเมตร (S/cm) สามารถแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.3

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \left(\frac{1}{R}\right) \left(\frac{d}{A}\right) = G \left(\frac{d}{A}\right) = G\theta \quad (2.3)$$

โดยที่ θ มีค่าเท่ากับ $\frac{d}{A}$ ในหน่วย cm^{-1} โดยที่ θ เป็นฟังก์ชันของรูปทรงอิเล็กโทรดที่ใช้ในการวัด มันใช้สำหรับบ่งบอกคุณลักษณะของอิเล็กโทรดหรือที่เรียกว่าค่าคงที่เซลล์ (Cell constant) ถ้า อิเล็กโทรดมีรูปร่างที่นอกเหนือจากแผ่นระนาบที่ขนานกันค่าคงที่เซลล์สามารถหาได้โดยการทำการวัด สารละลายที่เรารู้ค่าความนำไฟฟ้าเฉพาะและใช้สมการที่ 2.3 ในการหาค่าคงที่เซลล์ (Cell-constant) นั้นเอง สารละลายที่ใช้ในการอ้างอิงเพื่อทำการหาค่าคงที่เซลล์แสดงได้ดังตารางที่ 2.2 และสามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่เซลล์, ค่าความต้านทานและย่านการวัดค่าความนำไฟฟ้า ในตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของคู่อิเล็กโทรดแบบขนาน

ตารางที่ 2.2 สารละลายอ้างอิงสำหรับสอบเทียบค่าคงที่เซลล์ (Cell constant)

โมลาริตี Molarity	วิธีการเตรียมสาร Method of Preparation	อุณหภูมิ (°C) Temperature	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu S/cm$) Conductivity value
1.0	74.2460 g KCl per liter of solution at 20°C	0	65,176
		18	97,838
		25	111,342
0.1	7.4365 g KCl per liter of solution at 20°C	0	7,138
		18	11,167
		25	12,856
0.01	0.7440 g KCl per liter of solution at 20°C	0	773.6
		18	1,220.5
		25	1,408.8
0.001	Dilute 100 mL of 0.01M to 1 liter at 20°C	25	146.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของค่าคงที่เซลล์, ค่าความต้านทานและค่าความนำไฟฟ้า

K	Conductivity*	0.05	0.1	1.0	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶
0.05		1MΩ	500kΩ	50kΩ	5kΩ	500Ω	50Ω	5Ω		
0.1		2MΩ	1MΩ	100kΩ	10kΩ	1kΩ	100Ω	10Ω	1Ω	
1.0		20MΩ	10MΩ	1MΩ	100kΩ	10kΩ	1kΩ	100Ω	10Ω	1Ω
10				10MΩ	1MΩ	100kΩ	10kΩ	1kΩ	100Ω	10Ω

2.4.2 เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity instrument)

โดยทั่วไปเครื่องมือวัดสำหรับวัดค่าความนำไฟฟ้าจะมีด้วยกัน 2 ประเภท ประเภทแรกคือ เครื่องวัดที่เซนเซอร์สัมผัสกับของไหลโดยตรงซึ่งเป็นแบบที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปและแบบที่สองคือ เครื่องวัดที่เซนเซอร์ไม่สัมผัสกับของไหลโดยตรงโดยใช้หลักการของสนามแม่เหล็กมาตรวจจับค่าความนำไฟฟ้าซึ่งแบบที่สองนี้เราจะไม่ขอกล่าวในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ดังนั้นผู้วิจัยจะขอกล่าวถึงรายละเอียดของเครื่องวัดในแบบที่หนึ่งเพียงอย่างเดียวก็คือเครื่องมือวัดที่เซนเซอร์สัมผัสกับของไหล

เครื่องมือวัดค่าความนำไฟฟ้าแบบนี้แบ่งย่อยเป็นสองชนิดด้วยกันตามชนิดของเซนเซอร์คือ แบบสองอิเล็กโทรด (Two-electrode cells) และแบบสี่อิเล็กโทรด (Four-electrode cells) โดยมีรายละเอียดของแต่ละชนิดดังต่อไปนี้

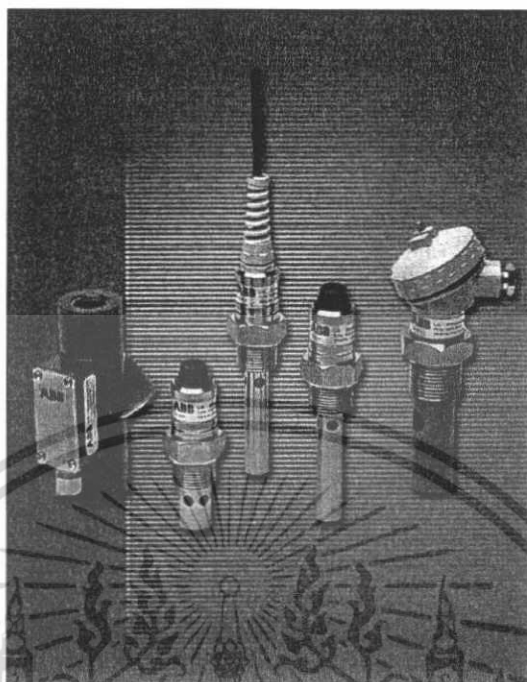
แบบสองอิเล็กโทรด (Two electrode cells) จากรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงเซนเซอร์วัดค่าความนำไฟฟ้าชนิดนี้ในหลายๆแบบ โดยทั่วไปแล้วเซนเซอร์ชนิดนี้จะทำมาจากแพลทินัม, กราไฟท์, ไททานเนียมและทังสเตนในบางครั้ง แต่เซนเซอร์ที่ทำจากแพลทินัมถือว่าเป็นเซนเซอร์ที่ดีที่สุด

ซึ่งหลักการทำงานของอิเล็กโทรดชนิดนี้สามารถอ้างอิงจากหัวข้อ 2.4.1 และสมการที่ 2.1 ถึงสมการที่ 2.3 ได้เนื่องจากหลักการทำงานของอิเล็กโทรดชนิดนี้เป็นหลักการพื้นฐานของการวัดค่าความนำไฟฟ้านั่นเอง

เพื่อการวัดค่าที่เที่ยงตรงขณะนั้นอุณหภูมิของตัวอย่างที่จะทำการวัด (Sample) และอุณหภูมิรอบข้าง (Ambient) นั้นควรจะมีค่าคงที่ซึ่งโดยทั่วไปนั้นอุณหภูมิหนึ่งเคลวิน (°K) ที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงไปจากจุดอุณหภูมิอ้างอิงจะมีผลต่อค่าความผิดพลาดในการวัด 2% ของค่าที่วัด (โดยทั่วไปอุณหภูมิอ้างอิงจะเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส) ดังนั้นเครื่องมือวัดควรจะมีการชดเชยอุณหภูมิด้วย (Temperature Compensate) ส่วนทางด้านค่าคงที่เซลล์ก็ควรเลือกให้เหมาะสมกับย่านการวัดที่จะทำการวัดโดยแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าคงที่เซลล์ที่แนะนำในแต่ละย่านการวัด

ย่านของค่าความนำไฟฟ้า (μS/cm) Conductivity Range	ค่าคงที่ของเซลล์ (cm ⁻¹) Cell Constant
0.05 - 20	0.01
1 - 200	0.1
10 - 2,000	1.0
100 - 20,000	10.0
1,000 - 200,000	50.0



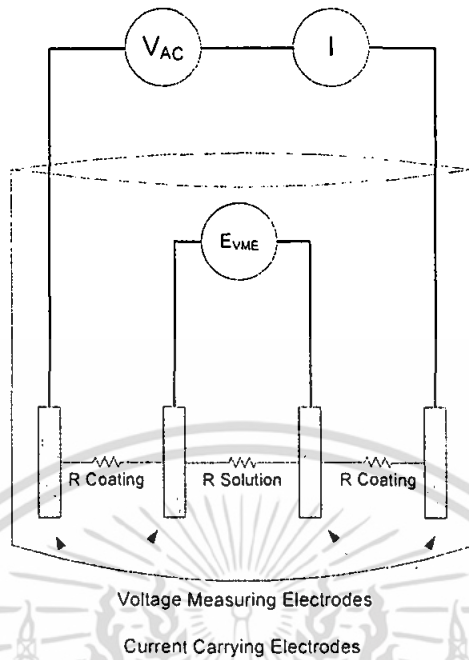
รูปที่ 2.3 เซลล์สำหรับวัดค่าความนำไฟฟ้าแบบ Two-electrode

แบบสี่อิเล็กโทรด (Four-electrode cell) เป็นเทคโนโลยีที่เกิดขึ้นไม่นานมานี้และเป็นอิเล็กโทรดที่สัมผัสโดยตรงกับของไหลตัวอย่าง (Sample) ที่ใช้วัดเหมือนกับแบบสองอิเล็กโทรด (Two-electrode cell) แต่มีโครงสร้างที่แตกต่างกัน โดยรูปแบบของโครงสร้างภายในตัวมันแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 จุดเด่นหลักๆของเซนเซอร์ชนิดนี้คือการลดผลกระทบของค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นจากการเปราะเปื้อน (Coating) ของสารตัวอย่างที่มีต่อเซนเซอร์และสามารถใช้วัดในย่านที่ค่าความนำไฟฟ้าสูงๆได้ดี จากรูปที่ 2.4 คือหลักการทำงานเบื้องต้นของเซนเซอร์วัดค่าความนำไฟฟ้าแบบสี่อิเล็กโทรดซึ่งแหล่งจ่ายภายนอก (V_{AC}) จะป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับเซนเซอร์จากนั้นก็เกิดแรงดันตกคร่อมขึ้นที่ความต้านทานที่เกิดจากสารตัวอย่างและค่าความต้านทานจากการเปราะเปื้อน (Coating) ของสารตัวอย่างซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการได้ดังสมการที่ 2.4 โดยที่ E คือ

$$V_{AC} = I(R_{Solution} + R_{Coating}) \quad (2.4)$$

แรงดันตกคร่อมและ I คือกระแสไฟฟ้าที่วิ่งผ่านอิเล็กโทรด ค่าความต้านทานที่วัดได้เป็นผลรวมของความต้านทานที่เกิดจากสารตัวอย่าง ($R_{Solution}$) และจากการเปราะเปื้อน (Coating) ของสารตัวอย่าง ($R_{Coating}$) อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานจากการเปราะเปื้อน ($R_{Coating}$) นั้นไม่มีผลกระทบกับ E_{VME} (แรงดันตกคร่อมที่เกิดจาก ($R_{Solution}$)) ค่าความต้านทานของสารละลายสามารถหาได้จากสมการที่ 2.5. และแรงดันตกคร่อมที่เกิดจากความต้านทานของสารตัวอย่าง ($R_{Solution}$) หาได้จากสมการที่ 2.5. เช่นกัน การชดเชยอุณหภูมิมักถือว่ามีค่าเป็นเช่นกันเหมือนกับเครื่องวัดแบบสองอิเล็กโทรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



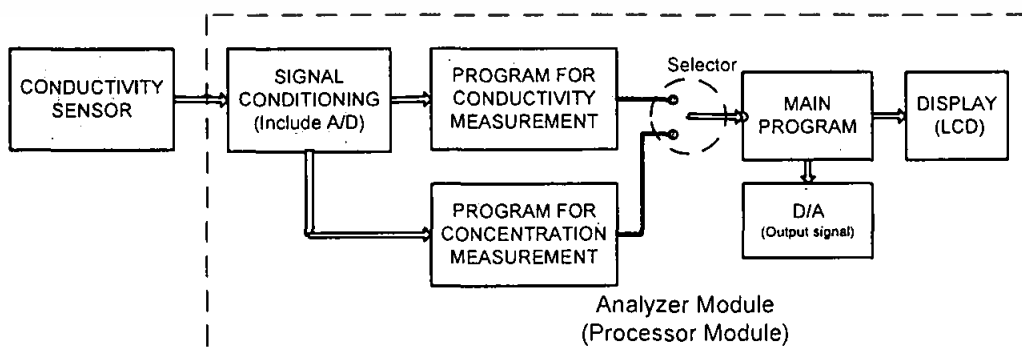
รูปที่ 2.4 ระบบการวัดของเซนเซอร์วัดค่าความนำไฟฟ้าแบบสี่อิเล็กโทรด (Four-electrode)

$$R_{\text{Solution}} = \frac{E_{VME}}{I} \tag{2.5}$$

ข้อที่จำเป็นสำหรับเซนเซอร์แบบสองอิเล็กโทรด (Two-electrode) และเซนเซอร์แบบสี่อิเล็กโทรด (Four-electrode cell) คือแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่จ่ายให้เซนเซอร์ควรเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพราะไฟฟ้ากระแสตรงไม่สามารถกระตุ้นการทำปฏิกิริยาของอิเล็กโทรเคมีคอล (Electro-chemical) ที่เกิดบนอิเล็กโทรดได้

2.5. การวัดความเข้มข้นของสารละลายโดยใช้เครื่องมือวัดความนำไฟฟ้า

การวิเคราะห์ในเชิงปริมาณหรือการวัดค่าความเข้มข้นของสารละลายไม่ว่าจะเป็นกรด (Acid) หรือด่าง (Base) นั้นสามารถตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายได้โดยการวัดค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายนั่นเอง

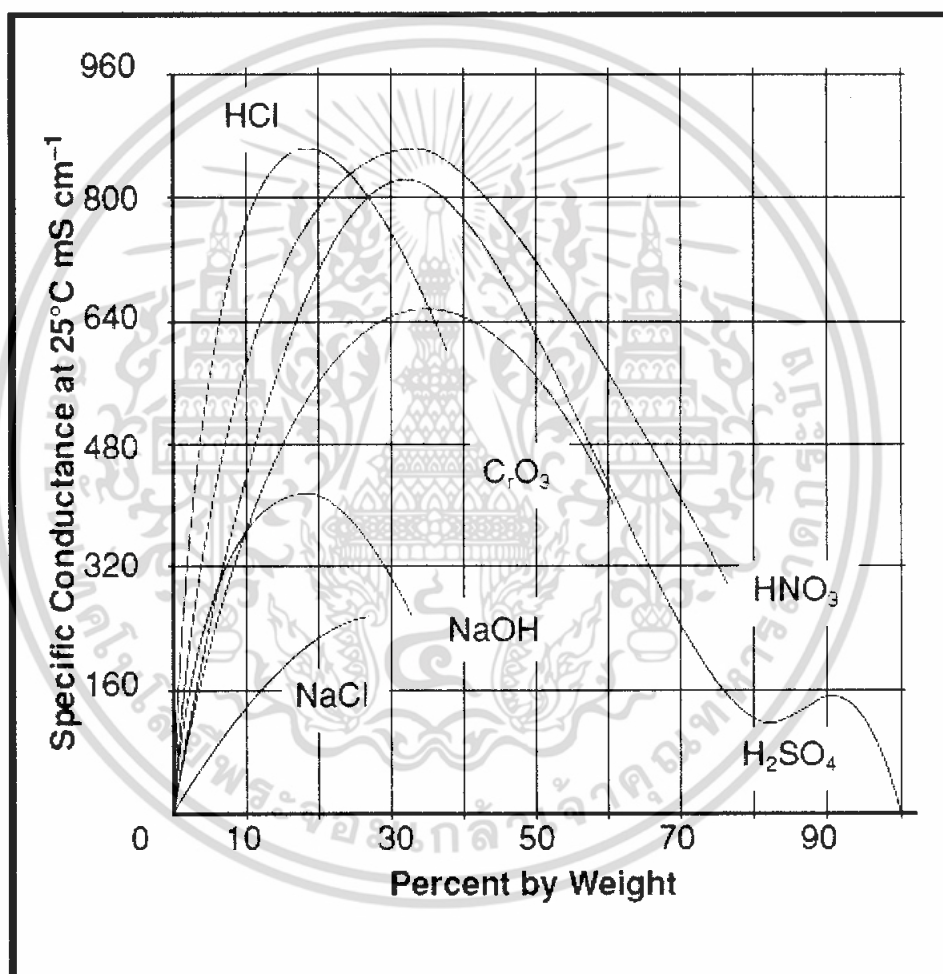


รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าที่มีฟังก์ชันความเข้มข้นสารเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่ผู้ให้เพิ่มไปยังเว็บไซต์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสารละลายนั้นจะมีค่าความนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นพร้อมกับความเข้มข้นของไอออนิกสปีซีของสารละลาย ด้วยเหตุนี้ค่าความนำไฟฟ้าที่วัดได้ก็คล้ายกับการวัดความเข้มข้นของไอออนิกสปีซีนั่นเอง อย่างไรก็ตามถ้าสารละลายมีค่าความเข้มข้นสูงขึ้นมาเกินไปจะทำให้เกิดการดึงดูดระหว่างไอออนิกสปีซีในสารละลายนั่นเองซึ่งเป็นผลให้ลดการแตกตัวภายในสารละลายด้วยเหตุผลนี้จึงเป็นสาเหตุให้ค่าความนำไฟฟ้าลดลงซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.6

จากรูปที่ 2.6 นั้นถ้าเรานำกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกับค่าความนำไฟฟ้าไปบรรจุในหน่วยประมวลผลของเครื่องวัดความนำไฟฟ้าเราก็สามารถทราบค่าความเข้มข้นของสารละลายที่เราต้องการได้



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับค่าความเข้มข้นของสารละลาย

2.6 การวัดค่าพีเอช (pH Measurement)

การวัดค่าพีเอชเป็นการบ่งบอกความเป็นกรดหรือความเป็นด่างของสารละลายที่ประกอบด้วยน้ำ อัตราของประจุบวกที่เป็นไฮโดรเจนไอออน (H^+) จนถึงอัตราของประจุลบที่เป็นไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) จะเป็นตัวบ่งบอกถึงค่าพีเอชในสารละลายในย่าน 0-14pH ถ้าความเข้มข้นของแต่ละไอออนนั้นมีค่าเท่ากันจะเป็นผลให้ค่าพีเอชนั้นเป็นกลาง (ค่าพีเอช เท่ากับ 7pH) ซึ่งไม่เป็นทั้งกรดหรือเบสสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่างแต่ถ้ามีปริมาณไฮโดรเจนไอออนมากนั้นหมายความว่ามีความเป็นกรดสูงดังนั้นค่าพีเอชก็จะตายน้อยกว่า 7pH และในทางกลับกันถ้ามีปริมาณไฮโดรเจนไอออนน้อยก็แสดงว่าสารละลายนั้นมีค่าความเป็นด่างสูง หรือค่าพีเอชต้องมากกว่า 7pH โดยอ้างอิงสเกลในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สเกลของพีเอช

	Concentration of H ⁺ ions moles/l (1 mole = 1g)		pH	Concentration of OH ⁻ ions moles/l (1 mole = 17g)		pOH
Strong Acid	1.0	10 ⁰	0	0.000000000000001	10 ⁻¹⁴	14
	0.1	10 ⁻¹	1	0.00000000000001	10 ⁻¹³	13
	0.01	10 ⁻²	2	0.0000000000001	10 ⁻¹²	12
	0.001	10 ⁻³	3	0.000000000001	10 ⁻¹¹	11
	0.0001	10 ⁻⁴	4	0.0000000001	10 ⁻¹⁰	10
Dilute Acid	0.00001	10 ⁻⁵	5	0.00000001	10 ⁻⁹	9
	0.000001	10 ⁻⁶	6	0.0000001	10 ⁻⁸	8
Neutral	0.0000001	10 ⁻⁷	7	0.0000001	10 ⁻⁷	7
Dilute Alkaline	0.00000001	10 ⁻⁸	8	0.000001	10 ⁻⁶	6
	0.000000001	10 ⁻⁹	9	0.00001	10 ⁻⁵	5
	0.0000000001	10 ⁻¹⁰	10	0.0001	10 ⁻⁴	4
	0.00000000001	10 ⁻¹¹	11	0.001	10 ⁻³	3
	0.000000000001	10 ⁻¹²	12	0.01	10 ⁻²	2
Strong Alkaline	0.0000000000001	10 ⁻¹³	13	0.1	10 ⁻¹	1
	0.00000000000001	10 ⁻¹⁴	14	1.0	10 ⁰	0

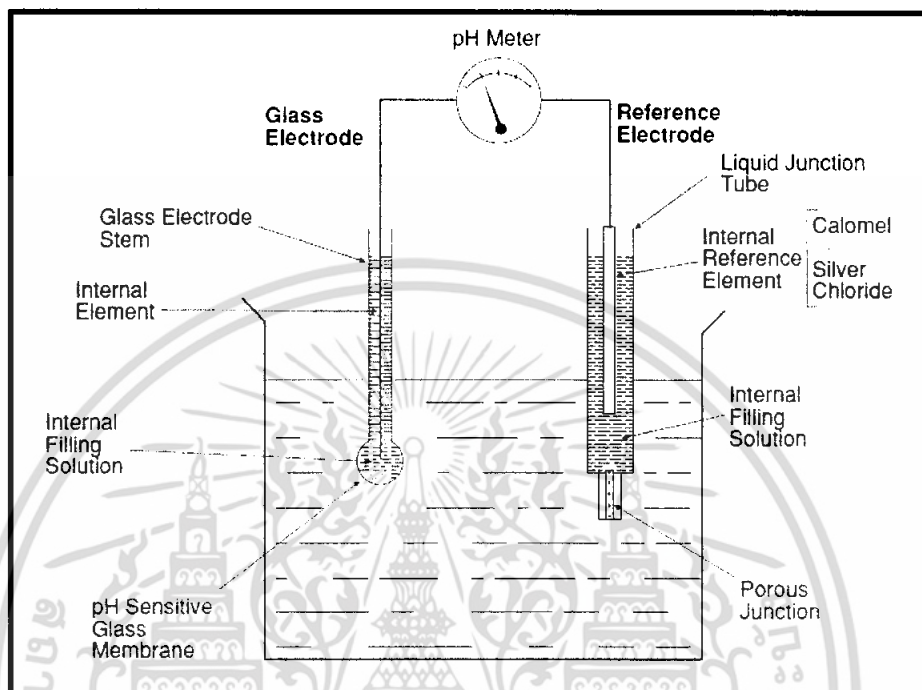
พีเอชนั้นกลายเป็นพารามิเตอร์ที่นิยมทำการวัดกันทั่วไปในอุตสาหกรรมทุกแห่งทั้งการวัดในห้องทดลองและการวัดแบบออนไลน์ หลายๆกระบวนการผลิตและอุตสาหกรรมทางเคมีก็ต่างใช้น้ำเป็นส่วนประกอบของกระบวนการผลิตหรือในบ่อยครั้งกระบวนการผลิตเหล่านี้ก็มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหรือระบบนิเวศทางน้ำ ดังนั้นด้วยเหตุผลนี้จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่เราจะต้องตรวจสอบค่าพีเอชทั้งในกระบวนการผลิตและในการบำบัดน้ำเสียเพื่อควบคุมการผลิตและรักษาสิ่งแวดล้อมนั่นเอง

2.6.1 การวัดพีเอชแบบพื้นฐาน (Basic of pH Measurement)

การตรวจรู้ค่าพีเอชแบบคร่าวๆนั้นสามารถทำได้โดยการใช้กระดาษลิตมัส ซึ่งการเปลี่ยนสีของกระดาษลิตมัสนั้นหมายความว่าพีเอชของตัวอย่าง (Sample) ที่ทำการตรวจสอบอยู่นั้นมีการเปลี่ยนแปลงนั่นเองและสีของกระดาษลิตมัสที่เกิดจากการจุ่มกับตัวอย่างนั้นจะบ่งบอกถึงค่าพีเอชนั่นเอง การวัดค่าพีเอชโดยกระดาษลิตมัสจะมีข้อจำกัดในเรื่องของค่าความถูกต้องเพราะว่าการแบ่งแยกหรือการตีความสีที่เกิดขึ้นนั้นอาจจะมีคลุมเครือทำให้มีการบ่งบอกถึงค่าพีเอชที่คลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นการวัดพีเอชแบบนี้จึงไม่เหมาะสมสำหรับการวัดและควบคุมในอุตสาหกรรมแต่เหมาะกับการประมาณการค่าพีเอชเท่านั้น

หลักการทางไฟฟ้าเคมีนั้นได้นำมาใช้กับการวัดค่าพีเอช ซึ่งหลักการนี้เป็นที่ยอมรับและนิยมใช้กันมากกว่า 50 ปีแล้วโดยอยู่บนพื้นฐานของเซนเซอร์ที่เรารู้จักกันในนามของอิเล็กโทรดแบบหลอดแก้ว (Glass pH Electrode) อิเล็กโทรดชนิดนี้จะต้องใช้งานร่วมกับอีกหนึ่งอิเล็กโทรดก็คือเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference Electrode) [1, 4] เพื่อให้ครบวงจรไฟฟ้า ส่วนประกอบของพีเอชเซนเซอร์แสดงได้ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งผู้วิจัยจะกล่าวถึงรายละเอียดของอิเล็กโทรดแบบหลอดแก้วในหัวข้อถัดไปแต่จะไม่กล่าวถึงรายละเอียดของอิเล็กโทรดอ้างอิงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้



รูปที่ 2.7 ระบบการวัดค่าพีเอชแบบพื้นฐาน

2.6.2. อิเล็กโทรดแบบหลอดแก้ว (The Glass Electrode)

อิเล็กโทรดแบบหลอดแก้วประกอบด้วยกระบอกแก้วรูปทรงยาว ด้านปลายถูกปิดผนึกด้วยกระเปาะแก้วหรือเมมเบรน (Membrane) ที่ทำจากแก้วชนิดพิเศษที่มีการตอบสนองเฉพาะไฮโดรเจนไอออนเท่านั้น ปฏิกิริยาทางเคมีจะเกิดขึ้น ณ ตรงตำแหน่งระหว่างสารละลายที่ทำการวัด พื้นผิวของเมมเบรนและสารละลายที่อยู่ภายในกระเปาะแก้วที่สัมผัสกันและจะกำเนิดศักย์ไฟฟ้าขึ้นมาโดยจะสัมพันธ์กับค่าพีเอชในสารละลายที่ทำการวัดนั่นเอง กลไกที่เกี่ยวข้องหรือหลักการเชิงลึกของพีเอชเซนเซอร์นั้นค่อนข้างยุ่งยากและซับซ้อนและอยู่นอกเหนือขอบเขต ฉะนั้นเราจะไม่ขอกกล่าวถึง แต่ก็สามารถกล่าวอย่างเบื้องต้นได้ว่ากระบวนการการแลกเปลี่ยนไอออนจะเกิดขึ้นระหว่างไฮโดรเจนไอออนของสารละลายที่ทำการวัดและไฮโดรเจนไอออนที่อยู่ด้านในกระเปาะแก้วของเมมเบรน

ภายในพีเอชอิเล็กโทรดนั้นบรรจุสารละลายตัวหนึ่งไว้ (Internal Filling Solution) โดยสารละลายตัวนี้เราจะทราบค่าพีเอชของมันและมีคลอไรด์ไอออนอยู่ในนั้นด้วย สารที่นิยมใช้กันก็คือโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ลวดตัวนำภายในอิเล็กโทรด (Internal element) ที่ใช้ในอิเล็กโทรดนี้ทำมาจากแร่เงิน (Silver) และเคลือบกับซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) โดยที่ลวดตัวนำจะจมอยู่ใน Internal Filling Solution ซึ่ง Internal Filling Solution มีหน้าที่ทำให้กระแสไฟฟ้าเดินทางผ่านระหว่างพื้นผิวด้านในของเมมเบรนสู่ลวดตัวนำและจากนั้นสัญญาณไฟฟ้าก็จะถูกส่งออกทางจุดต่อทางไฟฟ้า หรือเรียก อีกอย่างว่าเซนเซอร์เอาต์พุต (Sensor Output) เพื่อเข้าสู่ส่วนวิเคราะห์ค่าพีเอช (pH

analyzer) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3 เอาท์พุทของเซนเซอร์ (pH Sensor Output)

เอาท์พุทจากอิเล็กโทรดหลอดแก้วและอิเล็กโทรดอ้างอิงนั้นควบคุมโดยความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าพีเอชที่ทราบซึ่งอ้างอิงจาก Nernst Equation [1] ดังสมการต่อไปนี้

$$mV = 0.1985(^{\circ}C + 273) \times pH \quad (2.6)$$

จากสมการที่ 2.6. ป่งบอกได้ว่าเมื่อค่าพีเอชในสารละลายเปลี่ยนแปลงไปและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงนั้นมีความสัมพันธ์กับเอาท์พุทของเซนเซอร์ทั้งนั้นและการเปลี่ยนแปลงพีเอชหนึ่งพีเอชของสารละลายกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามิลลิโวลต์ที่หนึ่งพีเอชเทียบกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

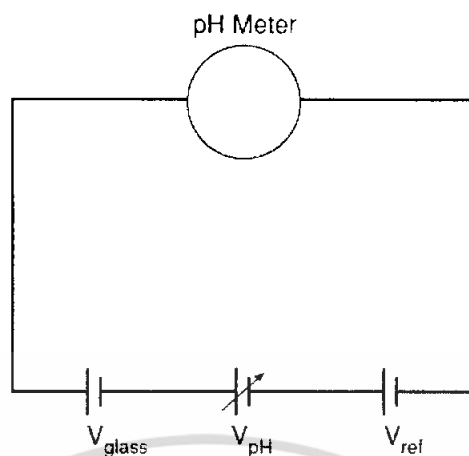
°C	0	25	50	75	100
mV	54.20	59.15	64.12	69.08	74.04

ตามทีพีเอชสเกลนั้นครอบคลุมตั้งแต่ 0-14pH ที่ 25 °C ดังนั้นค่ามิลลิโวลต์ของฟูลสเกลจึงมีค่าเท่ากับ $14 \times 59.15 = 818.1$ mV ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากพีเอชของสารละลายตัวอย่าง V_{pH} และ ศักย์ไฟฟ้าที่นอกเหนือจากนี้เป็นศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่เกิดขึ้นจากทั้งภายในอิเล็กโทรดแก้ว V_{glass} และ อิเล็กโทรดอ้างอิง V_{ref} ซึ่งศักย์ไฟฟ้าทั้งสามแหล่งนั้นต่อกันในรูปของวงจรรอนุกรมและแสดงดังรูปที่ 2.8 ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากคู่อิเล็กโทรดนั้นเกิดขึ้นจากสามแหล่งด้วยกันดังต่อไปนี้ จุดแรกคือจุดสัมผัสระหว่างลวดตัวนำ (Internal Element) และสารละลายภายในอิเล็กโทรดหลอดแก้ว (Internal Filling Solution) คือ V_{glass} จุดที่สองคือจุดสัมผัสระหว่างเมมเบรนของอิเล็กโทรดหลอดแก้วกับสารละลายที่ทำการตรวจวัดคือ V_{pH} จุดที่สามคือจุดสัมผัสระหว่างลวดตัวนำภายในอิเล็กโทรดอ้างอิง (Internal Reference Element) กับสารละลายภายในอิเล็กโทรดอ้างอิง (Internal filling Solution) คือ V_{ref} ซึ่งศักย์ไฟฟ้าเหล่านี้สามารถปรับแต่งให้เหมาะสมได้โดยการปรับแต่งสารละลายภายในอิเล็กโทรดแก้วและอิเล็กโทรดอ้างอิง (ทั่วไปเลือกใช้ KCL 3.5 M) จนทำให้เอาท์พุทของคู่อิเล็กโทรดนั้นมีค่าศูนย์มิลลิโวลต์ที่ 7pH เพราะฉะนั้นค่ามิลลิโวลต์ของคู่อิเล็กโทรดที่ 0pH, 7pH และ 14pH อ้างอิงที่ 25 °C จะมีค่าดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ค่ามิลลิโวลต์ที่ 0pH, 7pH และ 14pH at 25 °C

0 pH	7 pH	14 pH
+414.05 mV	0 mV	-414.05 mV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในคูฟิเออซีเล็กโทรด

จุดที่เอาต์พุตของคูฟิเออซีเล็กโทรดมีค่าเท่ากับศูนย์จะเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Check Reading โดยที่ Check reading สามารถหาได้ในระหว่างการสอบเทียบ (Calibrate) พารามิเตอร์นี้จะใช้เป็นดัชนีที่บ่งบอกการเลื่อนลอยของจุดซีโร่ (Zero) ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของ V_{ref} นั้นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีฟuzzy โลกิแบบวิธีการของทากากิจ-ซูเกโน

3.1 บทนำ

วิธีการอนุมานของฟuzzy (Fuzzy Inference method) [5] ที่นิยมเลือกใช้กันส่วนมากมีด้วยกันสองวิธีการคือวิธีการของมัมดานี (Mamdani's fuzzy inference method) ซึ่งเป็นวิธีการอนุมานที่ใช้กันเป็นจำนวนมากซึ่งวิธีการนี้ได้คิดค้นในปี 1975 โดยมัมดานี (Mamdani) ส่วนอีกวิธีการหนึ่งที่เป็นที่รู้จักกันคือวิธีการของทากากิจ-ซูเกโน (Takagi-Sugeno fuzzy inference method) [5-6] วิธีการนี้ถูกคิดค้นโดยทากากิจและซูจินในปี 1985 หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า TS method ความแตกต่างระหว่างสองวิธีการนี้ก็คือรูปแบบของหลักเกณฑ์และลำดับขั้นตอนในการประมวลผลซึ่งวิธีการของมัมดานีจะใช้ฟuzzy เซ็ตเป็นดังหลักเกณฑ์ในการอนุมาน แต่ในทางตรงกันข้ามวิธีการของ ทากากิจ-ซูเกโนจะใช้ลิเนียร์ฟังก์ชันหรือสมการเชิงเส้นที่มีอนุพันธ์เป็นตัวแทนของสมการเป็นดังหลักเกณฑ์ในการอนุมานซึ่งในหัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงเฉพาะรายละเอียดของวิธีการของทากากิจ-ซูเกโนเท่านั้นเพราะเป็นวิธีการที่ผู้วิจัยเลือกใช้ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

3.2 วิธีการของทากากิจ-ซูเกโน (Takagi-Sugeno Fuzzy method)

จุดเริ่มต้นของวิธีการนี้คือแทนเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชัน (Membership Function) ของฟuzzy เซ็ต A ด้วย $A(u)$, $u \in U$ ฟuzzy เซ็ตจะทำงานร่วมกับเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันโดยตลอด เราสามารถอธิบายคุณลักษณะของเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันได้โดยสองพารามิเตอร์คือค่าจากอินพุตเช่น u_1 หรือ u_2 และค่าความจริงของอินพุตนั่นเอง สัญลักษณ์ของค่าความจริง u_1 คือ A และ u_2 คือ B และกำหนดให้มีระดับคะแนนที่บ่งบอกถึงค่าความจริงมากที่สุดไม่เกิน "1" และน้อยสุดไม่ต่ำกว่า "0" แสดงความสัมพันธ์ของอินพุตและค่าความจริงได้ดังสมการที่ 3.1

$$|u_1 \text{ is } A \text{ and } u_2 \text{ is } B| = A(u_1) \wedge B(u_2) \quad (3.1)$$

3.2.1 รูปแบบของเงื่อนไข (Format of Implication)

เงื่อนไข (Implication) ของฟuzzy ที่เสนอในวิธีการนี้แทนด้วยสัญลักษณ์ R มีรูปแบบเป็นดังสมการที่ 3.2

$$R : \text{If } f(u_1 \text{ is } A_1, \dots, u_k \text{ is } A_k) \text{ then } y = g(u_1, \dots, u_k) \quad (3.2)$$

โดยที่แต่ละตัวแปรมีความหมายดังนี้

y ผลลัพธ์ของการอนุมาน

$u_1 - u_k$ อินพุตของเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชัน

$A_1 - A_k$ ฟuzzy เซ็ตที่เกิดขึ้นบนเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันซึ่งเป็นตัวระบุเงื่อนไข R ด้วย

f ฟังก์ชันของอินพุตในสมมติฐานของแต่ละเงื่อนไข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

g ฟังก์ชันของสมการเชิงเส้นเอาร์ทพุต (Linear equation) เพื่อบ่งบอกผลลัพธ์ของ y

เช่น R: If $f(u_1 \text{ is small and } u_2 \text{ is big})$ then $y = u_1 + u_2 + 2u_3$

จากเงื่อนไขนี้ได้บอกไว้ว่าถ้า u_1 คือ “small” และ u_2 คือ “big” จึงทำให้ค่าของ y จะเท่ากับผลรวมของ u_1 , u_2 และ $2u_3$ โดยที่ u_3 ไม่ได้มีส่วนร่วมในสมมติฐานเลย จากนั้นเราควรจะใช้ “and” เป็นตัวเชื่อมระหว่างสมมติฐานและก็นำค่าอินพุตของแต่ละสมมติฐานมาเป็นตัวแปรให้กับสมการเอาร์ทพุตด้วย จากนั้นสามารถเขียนเป็นสมการอีกรูปแบบหนึ่งได้ดังนี้

$$R: \text{If } u_1 \text{ is } A_1 \text{ and } \dots \text{and } u_k \text{ is } A_k \text{ then } y = p_0 + p_1 u_1 + \dots + p_k u_k \quad (3.3)$$

3.2.2 อัลกอริทึมของการหาผลลัพธ์ (Algorithm of Reasoning)

ถ้าหากเรามีเงื่อนไขหลายเงื่อนไข $R' (i = 1 \dots n)$ ซึ่งอ้างอิงจากสมการที่ 3.3 และกำหนดให้ $(u_1 = u_1^0, \dots, u_k = u_k^0)$ โดยที่ $u_1^0 - u_k^0$ เป็นค่าอินพุตของเมมเบอร์ชิพฟังก์ชันในแต่ละเงื่อนไข ผลลัพธ์ของเอาร์ทพุต y สามารถหาได้จากขั้นตอนต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1. ในแต่ละเงื่อนไข R' สามารถหา y' ได้จากการคำนวณฟังก์ชัน g' ดังสมการที่ 3.4

$$\begin{aligned} y' &= g'(u_1^0, \dots, u_k^0) \\ &= p_0' + p_1' u_1^0 + \dots + p_k' u_k^0 \end{aligned} \quad (3.4)$$

ขั้นตอนที่ 2. ค่าความจริงของแต่ละเงื่อนไข $|y = y'|$ (Truth value) สามารถหาได้โดยสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} |y = y'| &= |u_1^0 \text{ is } A_1' \text{ and } \dots \text{and } u_k^0 \text{ is } A_k'| \\ &= (A_1' (u_1^0) \wedge \dots \wedge A_k' (u_k^0)) \end{aligned} \quad (3.5)$$

โดยที่เครื่องหมาย \wedge คือ And operation แบบ Min term นั้นเองและ $|u^0 \text{ is } A| = A(u^0)$

ขั้นตอนที่ 3. หาเอาร์ทพุตสุดท้าย (Final Output) ของ y ซึ่งเป็นการอนุมานจาก n เงื่อนไขโดยการหาค่าเฉลี่ยของ y' กับค่าความจริง $|y = y'|$ (Rule weight) ทั้งหมดหรือที่เรียกว่า “Weight average” นั้นเองโดยคำนวณได้จากสมการที่ 3.6

$$y = \frac{\sum |y = y'| \times y'}{\sum |y = y'|} \quad (3.6)$$

ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลของตัวอย่างที่ 3.1

	Implication	Premise	Consequence	Tv
R^1			$y = 12 - 5$ $= 7$	$0.25 \wedge 0.375$ $= 0.25$
R^2			$y = 2 \times 12$ $= 24$	0.20
R^3			$y = 3 \times 5$ $= 15$	0.357

ตัวอย่างที่ 3.1 สมมุติว่ามีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

เปรียบให้ $u_k = x_k$

R^1 : If x_1 is small₁ and x_2 is small₂ then $y = x_1 + x_2$

R^2 : If x_1 is big₁ then $y = 2x_1$

R^3 : If x_2 is big₂ then $y = 3x_2$

จากตารางที่ 3.1 ได้แสดงกระบวนการที่มาของผลลัพธ์ต่างๆที่เกี่ยวข้องโดยกำหนดให้ $x_1 = 12$ และ $x_2 = 5$ และวางลงในคอลัมน์ของสมมุติฐาน (Premise) ในแต่ละเงื่อนไขซึ่งในตารางที่ 3.1 แสดงเมมเบอร์ชิพฟังก์ชันของฟัซซีเซต "small" และ "big" ในหลายๆสมมุติฐาน ส่วนทางด้านคอลัมน์ของผลลัพธ์ (Consequence) ได้แสดงผลลัพธ์ y' ซึ่งคำนวณโดยฟังก์ชัน g' ของแต่ละเงื่อนไขและ "Tv" คือค่าความจริงที่ผ่านการ And operation แบบ Min term หรือ Rule weight ที่แทนโดยสัญลักษณ์ $|y = y'|$ นั่นเองโดยมีตัวอย่างดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 |y = y'| &= |x_1^0 = \text{small}^1| \wedge |x_2^0 = \text{small}^2| \\
 &= \text{small}_1(x_1^0) \wedge \text{small}_2(x_2^0) \\
 &= 0.25
 \end{aligned}$$

เราสามารถอนุมานผลลัพธ์จากหลายๆเงื่อนไขโดยนำค่า y' และ $|y = y'|$ ที่อ้างอิงจากตารางที่ 3.1 มาคำนวณในสมการที่ 3.6

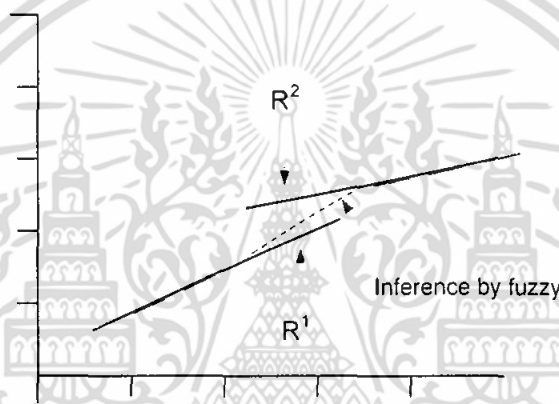
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y = \frac{(0.25 \times 17) + (0.2 \times 24) + (0.375 \times 15)}{0.25 + 0.2 + 0.375}$$

$$\cong 17.8$$

3.3 คุณสมบัติของผลลัพธ์ที่ได้ (Properties of Reasoning)

จากสองตัวอย่างข้างต้นเราได้แสดงกระบวนการหาผลลัพธ์จากอัลกอริทึมที่ได้นำเสนอไปแต่ในหัวข้อนี้จะเป็นการกล่าวถึงคุณสมบัติและคุณลักษณะของการอนุมานผลลัพธ์ซึ่งจากรูปที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ของ x และ y ซึ่งแทนด้วยเส้นปะที่มีสัญลักษณ์ “+” และเส้นตรง R^1 และ R^2 เป็นฟังก์ชันที่ได้จากเงื่อนไข R^1 และ R^2 ตามลำดับ



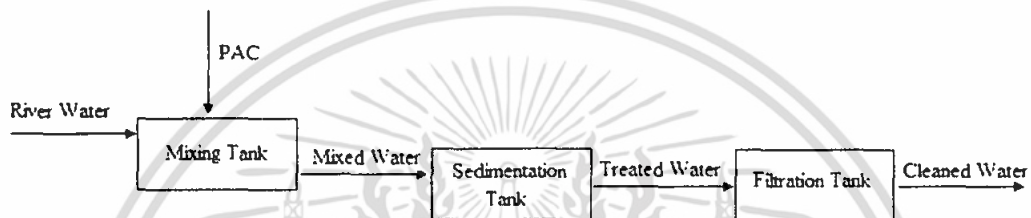
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างผลลัพธ์ของการอนุมานโดยฟuzzyโลจิก

เราขอเริ่มจากการพิจารณาความแตกต่างระหว่างวิธีการประมาณค่าเชิงเส้นแบบวิธีที่ใช้กันทั่วไปและวิธีการที่นำเสนอ (ฟuzzyโลจิก) ถ้าเราเลือกการประมาณค่าแบบวิธีแรกก็จะเริ่มจากการแบ่งพื้นที่หรือกำหนดขอบเขตของอินพุตในแต่ละช่วงและก็ทำการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาท์พุตแบบเชิงเส้นหรือสมการเชิงเส้นในแต่ละช่วงอินพุตที่กำหนดไว้ ถ้าเรายกตัวอย่างจากกรณีที่เกิดขึ้นในรูปที่ 3.1 เราจะต้องเพิ่มสมการเชิงเส้นขึ้นมาอีกหนึ่งความสัมพันธ์เพื่อเชื่อมต่อระหว่าง R_1 และ R_2 ซึ่งทำให้มีสมการเชิงเส้นประกอบกันถึงสามสมการและมีการเชื่อมต่อที่ไม่ราบเรียบ (Not smoothly) ในทางกลับกันนั้นสำหรับวิธีที่นำเสนอในบทนี้ (ฟuzzyโลจิก) จะช่วยลดจำนวนของสมการเชิงเส้นและทำให้การเชื่อมต่อระหว่างสมการเชิงเส้นนั้นราบเรียบขึ้น (Smoothly) ซึ่งการลดจำนวนของสมการเชิงเส้นเป็นสิ่งที่สำคัญมากในกรณีของความสัมพันธ์แบบหลายมิติ

3.4 การประยุกต์ใช้ฟuzzyโมเดล (Fuzzy Model Application)

ในหัวข้อนี้จะแสดงการประยุกต์ใช้งานของฟuzzyโมเดลที่นำเสนอเกี่ยวกับกระบวนการในอุตสาหกรรมจริงโดยจะยกตัวอย่างการนำโมเดลทางฟuzzyที่นำเสนอไปใช้ควบคุมกระบวนการทำความสะอาดน้ำ (Water Cleaning Process) โดยนำเอาฟuzzyโมเดลไปทำหน้าที่แทนผู้ปฏิบัติการ (Operator) เพื่อควบคุมกระบวนการและให้ชื่อโมเดลนี้ว่า “Fuzzy modeling of human operator’s control actions for Water Cleaning Process” [6] กระบวนการที่เราจะควบคุมก็คือกระบวนการทำ

ความสะอาดน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติ (River water) ซึ่งแสดงขั้นตอนของกระบวนการ ดังรูปที่ 3.2 โดยที่กระบวนการจะเริ่มจากการนำน้ำจากแหล่งน้ำเข้ามาที่ถังผสม (Mixing tank) และนำเคมีภัณฑ์ที่มีชื่อว่า PAC และคลอรีนมาผสมกับน้ำในถังผสม จากนั้นน้ำที่ผสมกับเคมี (PAC) จะเดินทางต่อไปที่ถังตกตะกอน (Sedimentation tank) โดยที่ส่วนสร้างความขุ่นให้กับน้ำจะจับตัวกับ PAC และตกตะกอนอยู่ที่ด้านล่างของถัง การตกตะกอนจะใช้เวลาประมาณสามถึงห้าชั่วโมงขึ้นอยู่กับความจุของถัง โดยน้ำที่ออกจากกระบวนการนี้คือ Treated Water และจะเดินทางต่อไปยังถังกรอง (Filtration) เพื่อทำการกรองให้น้ำสะอาด ส่วนทางด้านคลอรีนที่เติมไปในกระบวนการเพื่อทำการฆ่าเชื้อโรคให้กับน้ำนั่นเอง



รูปที่ 3.2 กระบวนการทำความสะอาดน้ำ

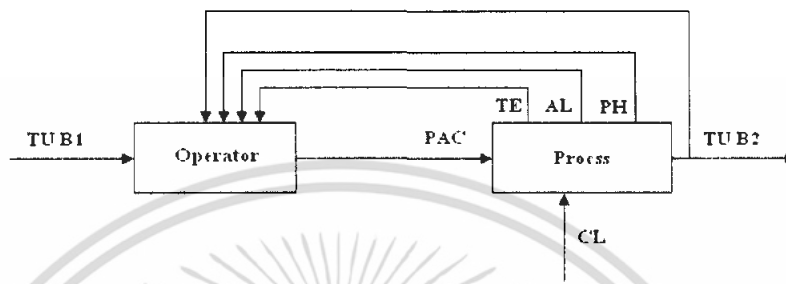
ปัญหาหลักของการควบคุมโดยผู้ปฏิบัติการ (Operator) ในกระบวนการนี้คือการหาปริมาณที่เหมาะสมของ PAC ที่เติมลงไปเพื่อทำให้ความขุ่นของน้ำนั้นอยู่ในระดับที่ควบคุม ปริมาณที่เหมาะสมที่ไม่น้อยหรือไม่มากเกินไปของ PAC ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะหรือระดับความขุ่นของน้ำและที่สำคัญปริมาณของ PAC นั้นจำเป็นต้องควบคุมเพื่อการลดต้นทุนนั่นเอง การกำหนดคุณลักษณะของกระบวนการที่ผ่านมานั้นปราศจากการใช้โมเดลทางฟิสิกส์โดยสิ้นเชิงซึ่งหมายความว่าไม่สามารถบ่งบอกคุณลักษณะของการเปลี่ยนแปลงของค่าความขุ่นอย่างเป็นหลักการได้โดยจะใช้ประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติการเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมกระบวนการ อย่างไรก็ตามตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการนั้นเราสามารถรู้ค่าของแต่ละตัวแปรได้โดยทำการวัดค่านั่นเอง รายชื่อของตัวแปรที่เกี่ยวข้องทั้งหมดแสดงได้ดังต่อไปนี้

- TB1 ความขุ่นของน้ำจากแหล่งน้ำ (Resource water) ในหน่วยหนึ่งส่วนต่อล้านส่วน (ppm)
- TB2 ความขุ่นของน้ำที่บำบัด ในหน่วยหนึ่งส่วนต่อล้านส่วน (ppm)
- PAC ปริมาณของ PAC ในหน่วยหนึ่งส่วนต่อล้านส่วน (ppm)
- TE อุณหภูมิของน้ำในหน่วยองศาเซลเซียส (°C)
- PH ค่าพีเอช (pH)
- AL ค่าแสดงภาวะที่เป็นด่าง
- CL ปริมาณของคลอรีนในหน่วยหนึ่งส่วนต่อล้านส่วน (ppm)

ตัวอย่าง: ถ้า TE มีค่าต่ำดังนั้นก็เสี่ยงไม่ได้ว่า PAC จำเป็นต้องมีปริมาณมากและทั้ง PH และ AL จะมีผลกระทบแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) กับปริมาณของ PAC ซึ่งปริมาณของ PAC ที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับตัวแปรที่กล่าวข้างต้น แต่ยังคงมีบางตัวแปรที่มีอิทธิพลกับกระบวนการเช่น แพลงก์ตอน (Plankton) ในน้ำซึ่งจะเพิ่ม springtime แต่ไม่สามารถทำการตรวจวัดได้ส่วนใหญ่ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เฉพาะในวิชาการเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการทำความสะอาดน้ำจะนิยมสร้างโมเดลทางสถิติสำหรับควบคุมกระบวนการแต่โมเดลแบบนี้ไม่ค่อยจะแม่นยำสักเท่าไร จากตัวอย่างกว่าร้อยครั้ง TB1 จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อฝนตกดังนั้นการควบคุม PAC จะหยิบเอา TB1, TE, PH, AL และ TB2 มาเป็นอินพุตในการควบคุมกระบวนการของเราซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



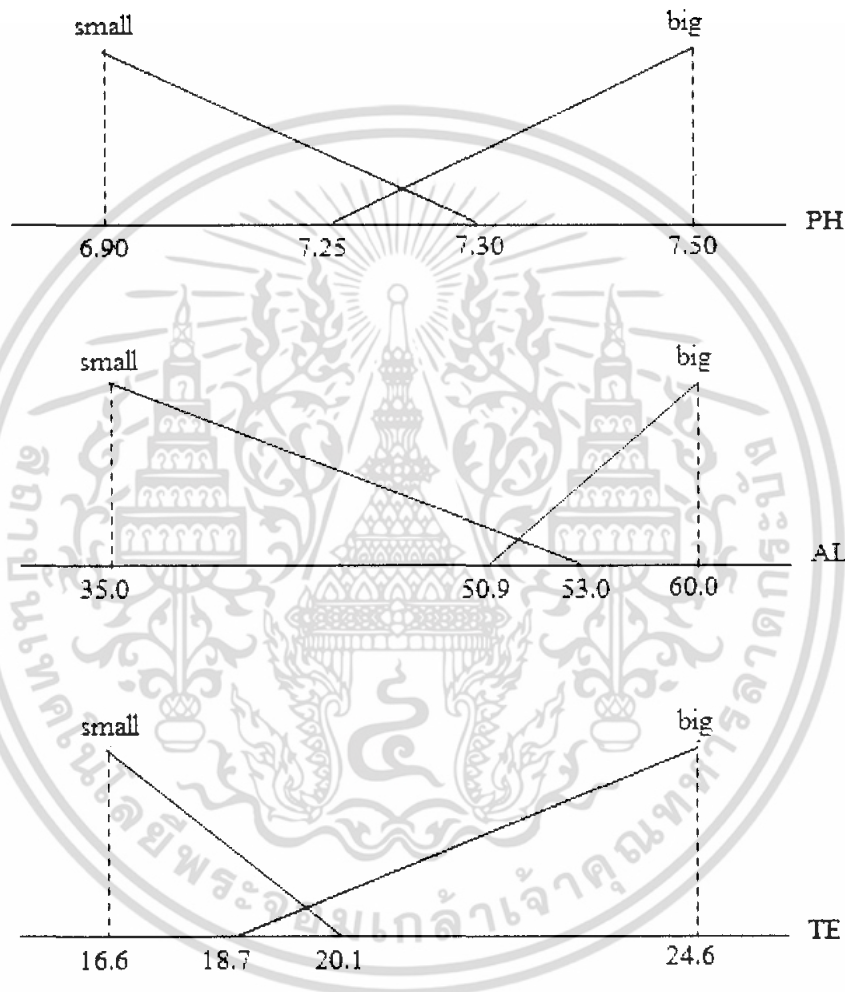
รูปที่ 3.3 โค้ดแกรมของการควบคุมกระบวนการ

ตารางที่ 3.2 แสดงข้อมูลของแต่ละตัวแปรระหว่างปฏิบัติการ

TB1 (ppm)	PH (ppm)	TE (Degree C)	AL	PAC (ppm)	TB2 (ppm)
10.0	7.1	18.8	53.0	1300	1.0
17.0	7.0	18.6	50.0	1300	1.0
22.0	7.3	19.4	46.0	1400	2.0
50.0	7.1	19.5	40.0	1400	1.0
9.0	7.3	23.3	48.0	900	4.0
11.0	7.1	20.7	50.0	900	1.0
12.0	7.2	21.3	50.0	900	3.0
14.0	7.2	23.6	53.0	900	4.0
35.0	7.0	17.8	35.0	1200	1.0
20.0	7.0	16.6	40.0	1100	1.0
20.0	6.9	17.8	42.0	1100	1.0
18.0	7.1	17.3	40.0	1100	1.0
12.0	7.2	18.8	55.0	900	3.0
8.0	7.2	18.0	50.0	1000	1.5
11.0	7.1	19.2	49.0	1000	2.0
50.0	7.0	18.0	37.0	1200	1.5
35.0	7.0	17.7	42.0	1200	1.5
30.0	7.0	17.2	41.0	1100	1.5
16.0	7.1	19.3	42.0	1100	2.0

3.4.1 ที่มาของเงื่อนไขการควบคุม (Derivation of Control Rules)

ผู้เขียนบทความมีข้อมูลการปฏิบัติการเป็นจำนวนมากโดยที่ทำการตรวจวัดตัวแปรที่เกี่ยวข้องทั้งหมดทุกๆ ชั่วโมงเป็นเวลาสี่เดือน จำนวนของข้อมูลทั้งหมดจะเท่ากับ 24 ชั่วโมง × 30 วัน × 4 เดือน = 2880 ข้อมูลซึ่งตารางที่ 3.2 แสดงเพียงส่วนหนึ่งของข้อมูลเหล่านี้ จำนวนข้อมูลที่เรานำมาใช้มีประมาณหกร้อยข้อมูลในเฉพาะช่วงเดือนมิถุนายนและเดือนกรกฎาคมซึ่งเดือนมิถุนายนในประเทศไทย (ทดลองที่ประเทศไทย) เป็นฤดูฝนและเดือนกรกฎาคมเป็นฤดูร้อน

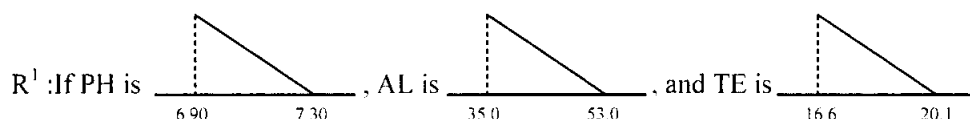


รูปที่ 3.4 แสดงเมมเบอร์ชิพฟังก์ชันของแต่ละตัวแปร

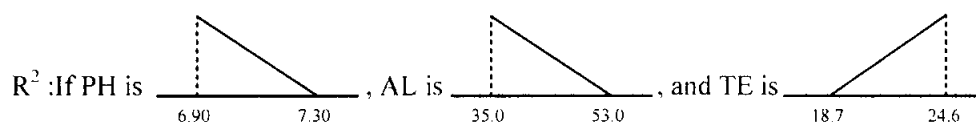
ตามอัลกอริทึมที่นำเสนอก่อนหน้านี้ ผู้เขียนบทความได้กำหนดเงื่อนไขไว้แปดเงื่อนไขสำหรับการควบคุม (Control rule) และเงื่อนไขการควบคุมมีรูปแบบดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} & \text{If } (PH \text{ is } *) , (AL \text{ is } *) , \text{ and } (TE \text{ is } *) \\ & \text{then } PAC = p_0 + p_1 \cdot TB1 + p_2 \cdot TB2 + p_3 \cdot PH + p_4 \cdot AL + p_5 \cdot TE \end{aligned} \quad (3.7)$$

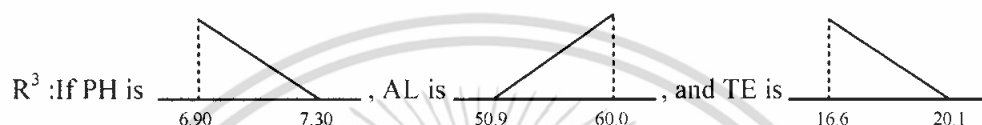
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



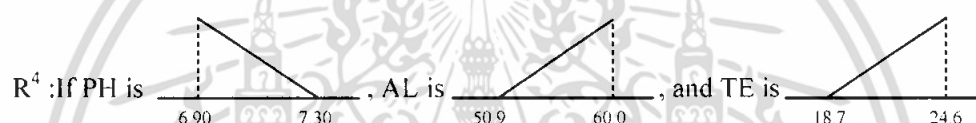
$$\text{Then PAC} = 2664\text{TB}_1 - 8093\text{TB}_2 + 11230\text{PH} - 1147\text{AL} - 2218\text{TE} + 8858$$



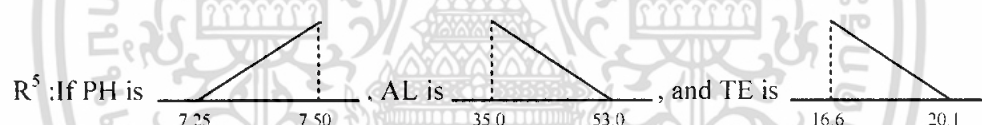
$$\text{Then PAC} = 124\text{TB}_1 - 427\text{TB}_2 + 761\text{PH} + 52\text{AL} - 17\text{TE} - 7484$$



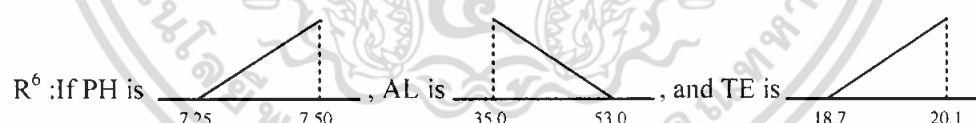
$$\text{Then PAC} = 42\text{TB}_1 - 54\text{TB}_2 - 1368\text{PH} + 10\text{AL} + 158\text{TE} + 7270$$



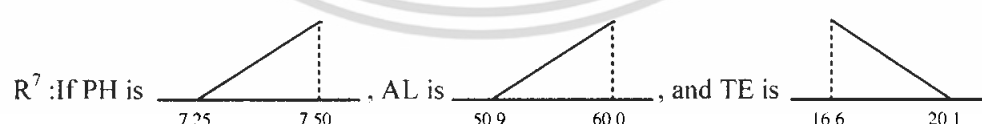
$$\text{Then PAC} = 5\text{TB}_1 - 34\text{TB}_2 - 221\text{PH} - 8\text{AL} + 40\text{TE} + 2202$$



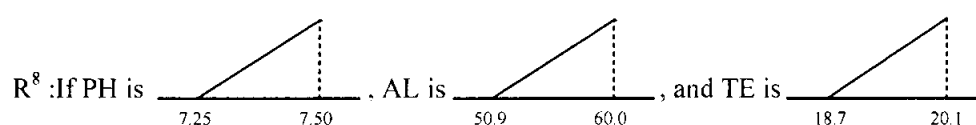
$$\text{Then PAC} = 3\text{TB}_1 - 6\text{TB}_2 + 2110\text{PH} - 13\text{AL} + 2\text{TE} - 13918$$



$$\text{Then PAC} = 22\text{TB}_1 + 11\text{TB}_2 + 64\text{PH} - 8\text{AL} - 9\text{TE} + 770$$



$$\text{Then PAC} = 159\text{TB}_1 - 14\text{TB}_2 + 2337\text{PH} - 25\text{AL} - 69\text{TE} - 14819$$



$$\text{Then PAC} = -13\text{TB}_1 - 16\text{TB}_2 + 29\text{PH} - 6\text{AL} - 41\text{TE} - 317$$

รูปที่ 3.5 เงื่อนไขการควบคุมทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PH, AL และ TE ถูกหยิบขึ้นมาเป็นตัวแปรในเงื่อนไขและแต่ละตัวแปรจะประกอบไปด้วยสอง Linguistic ดังแสดงในรูปที่ 3.4 จำนวนของเงื่อนไขของการควบคุมจะเท่ากับ $2^3 = 8$ เงื่อนไขซึ่งสามารถแสดงเงื่อนไขทั้งหมดได้ดังรูปที่ 3.5

ตารางที่ 3.3 ผลการทดสอบการควบคุมกระบวนการทั้งสามวิธี

Operator (ppm)	Statistical Model (ppm)	Fuzzy Model (ppm)
1300	994.7	1308.6
1300	995.9	1027.4
1300	1119.6	1063.0
1400	1151.1	1386.2
1400	1409.4	1551.1
900	1066.4	923.9
900	1068.9	965.5
900	1012.3	875.4
1200	1286.8	1236.7
1200	1246.8	1172.6
1100	1151.4	1075.9
1100	1199.5	1115.1
1100	1159.4	1130.5
1000	985.7	934.1
1000	1009.3	973.8
1000	1038.2	984.6
1200	1398.3	1285.3
1200	1290.6	1160.8

3.4.2 ผลลัพธ์ของการควบคุมโดยฟัซซีโลจิก

ความสามารถของเงื่อนไขที่สร้างขึ้นนั้นถูกทดสอบโดยการใช้ Testing data ซึ่งผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 3.3 และในตารางเดียวกันก็แสดงผลของการควบคุมโดยผู้ปฏิบัติการ (Operator control) และผลการทดสอบการควบคุมโดยโมเดลทางสถิติด้วย โดยที่ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบมี 38 ข้อมูลด้วยกัน โมเดลทางสถิติที่แสดงดังสมการที่ 3.8 เป็นสมการที่ใช้ใน water cleaning process

$$PAC = 9.11\sqrt{TB1} - 79.8PH + 12.7CL + 1255.6 \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าการควบคุมโดยฟัซซีโมเดลนั้นเป็นโมเดลที่สามารถทำหน้าที่แทนผู้ปฏิบัติการได้อย่างดี ค่าเฉลี่ยของผลต่างสมบูรณ์ระหว่างผลการทดสอบจากฟัซซีโมเดลกับผู้ปฏิบัติการและผลต่างสมบูรณ์ระหว่างผลการทดสอบจากโมเดลทางสถิติกับผู้ปฏิบัติการแสดงได้ดังต่อไปนี้ตามลำดับ

Fuzzy model 48.5 ppm

Statistical model 128.0 ppm

จากผลลัพธ์นั้นแสดงให้เห็นถึงความยอดเยี่ยมของฟัซซีโมเดล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

หลักการวัดความเข้มข้นของสารละลายที่นำเสนอและการออกแบบ

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะเสนอหลักการการวัดความเข้มข้นของสารละลายโดยเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าซึ่งเป็นหลักการที่มีใช้กันมานานแล้ว จากนั้นในหัวข้อถัดไปจะนำฟิสิกส์โวลติมาใช้ในการขยายย่านการวัดความเข้มข้นของสารละลายของเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า ซึ่งได้นำฟิสิกส์โวลติวิธีการของ ทากากิ-ซูเกโนโมเดล (Takagi-Sugeno model) มาอนุมานค่าการวัดและทำให้สามารถขยายย่านการวัดความเข้มข้นของสารละลายได้กว้างกว่าหลักการแบบเดิมหรือวัดความเข้มข้นได้สูงซึ่งนั่นเองซึ่งในการออกแบบและทดสอบผู้วิจัยได้เลือกใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นกรณีศึกษา

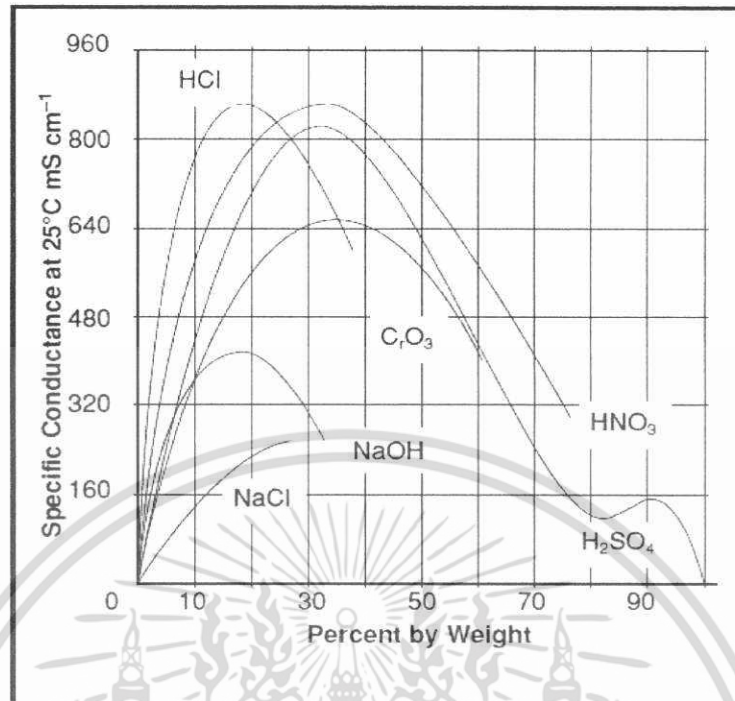
4.2 การวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า

หลักการวัดแบบนี้จะใช้เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity analyzer) มาประยุกต์ใช้ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารละลายจะให้ค่าความนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละความเข้มข้นซึ่งความสัมพันธ์ในส่วนนี้สามารถแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.1 ในสารละลายจะมีค่าความนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นพร้อมกับความเข้มข้นของสารละลาย ซึ่งด้วยเหตุนี้ค่าความนำไฟฟ้าที่วัดได้ก็คล้ายกับการวัดความเข้มข้นไอออนิกสปีชีส์ในสารละลายนั่นเอง อย่างไรก็ตามถ้าสารละลายมีความเข้มข้นสูงขึ้นไปก็จะทำให้เกิดการดึงดูดระหว่างไอออนิกสปีชีส์ซึ่งเป็นผลให้การแตกตัวของไอออนิกภายในสารละลายนั่นเอง ด้วยเหตุผลนี้จึงเป็นสาเหตุให้ค่าความนำไฟฟ้าลดลงด้วยซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.1 ในส่วนนี้คือข้อจำกัดของหลักการนี้และควรปรับปรุง

การประยุกต์ใช้งานโดยทั่วไปก็สามารถนำไปวัดความเข้มข้นได้แต่ต้องมีการกำหนดช่วงในการวัด ซึ่งแน่นอนว่าช่วงการวัดที่สามารถทำการวัดได้ก็คือเริ่มตั้งแต่ความเข้มข้นศูนย์เปอร์เซ็นต์จนถึงด้านปลายสุดของย่านการวัดส่วนมากก็เป็นจุดสูงสุดของกราฟความสัมพันธ์ซึ่งเป็นจุดก่อนที่จะเกิดการทับซ้อนของค่าความนำไฟฟ้าที่ค่าความเข้มข้นมากขึ้น ตัวอย่างเช่น 0 -15 % NaOH เพราะถ้าเกินสิบห้าเปอร์เซ็นต์ขึ้นไปก็จะเกิดการทับซ้อนของค่าความนำไฟฟ้านั่นเอง ในส่วนของการสอบเทียบนั้นจะนิยมสอบเทียบกับสารละลายมาตรฐานที่มีค่าความนำไฟฟ้าที่เสถียรภาพ (Conductivity standard solution) แสดงดังรูปที่ 4.2 ระดับค่าของสารละลายมาตรฐานที่เลือกใช้นั้นควรเลือกให้ครอบคลุมย่านการวัดทั้งหมดเช่นถ้าย่านการวัดความเข้มข้นอยู่ที่ 0-5 % NaOH ก็จะตรงกับย่านของค่าความนำไฟฟ้าตั้งแต่ 0-210 mS/cm ก็ให้เลือกใช้สารละลายมาตรฐานที่ใกล้เคียงกับสเปก (Span) ของย่านการวัดคือที่ 210 mS/cm หรือสูงกว่าได้บ้าง

การประยุกต์ใช้ของหลักการวัดแบบนี้จะวัดในงานที่มีความเข้มข้นไม่สูงมากเช่น การวัดความเข้มข้นของกรดและด่างที่ใช้ในการ Regeneration resin ของกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุลบ (Cation exchanger process) และกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Anion exchanger process) ในโรงทำน้ำปราศจากแร่ธาตุ (Water treatment plant) แสดงดังรูปที่ 4.3 ที่ใช้สารเคมีที่เป็นกรดและด่างที่ความเข้มข้นไม่เกินสองถึงสามเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (% by weight) ซึ่งการวัดความเข้มข้นในจุดนี้จะทำให้เราสามารถตรวจรู้ความเข้มข้นของกรดและด่างได้และทำให้ควบคุมอัตราของปริมาณกรดและด่างที่เข้าไปสู่กระบวนการ Regeneration resin ได้อย่างเสถียรภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



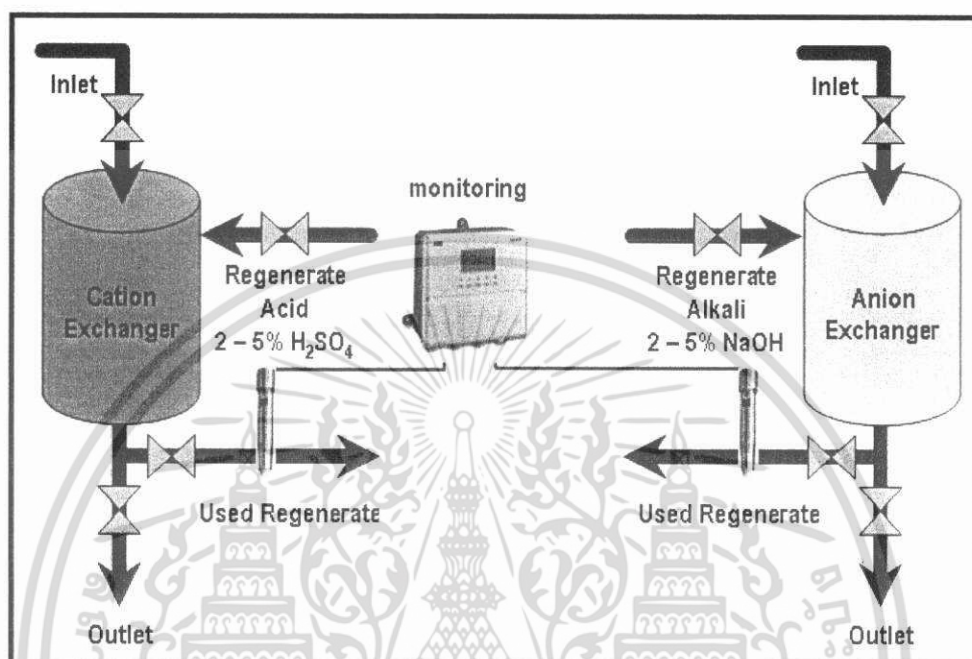
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความเข้มข้นของสารละลาย



รูปที่ 4.2 สารละลายมาตรฐาน (Standard solution) สำหรับสอบเทียบเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า และเครื่องวัดค่าพีเอช

แต่ในกระบวนการที่มีความเข้มข้นของสารเคมีมากๆ เช่น โรงผลิต H_2SO_4 หรือ NaOH ซึ่งใช้เครื่องวัดค่าความเข้มข้นในการควบคุมการผลิตหรือตรวจวัดความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ซึ่งไม่สามารถใช้หลักเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดแบบข้างต้นวัดได้เพราะว่าผลิตภัณฑ์ที่ทำการวัดนั้นมีความเข้มข้นที่สูงมากซึ่งต้องใช้หลักการอื่นๆ ในการวัดซึ่งมีราคาแพงกว่าและการทำงานที่ยุ่ยากกว่า ดังนั้นด้วยข้อจำกัดของหลักการวัดแบบแรกจึงเป็นสิ่งที่เราต้องพัฒนาต่อเพื่อขยายย่านการวัดของมัน



รูปที่ 4.3 การวัดความเข้มข้นของกรดและด่างในกระบวนการ Regeneration resin ใน Cation Exchanger และ Anion Exchanger

ถ้าเราใช้หลักการจากข้างต้นมาทำการวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH Solution) โดยใช้เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าก็สามารถทำได้เช่นกันโดยอ้างอิงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายและค่าความนำไฟฟ้าดังรูปที่ 4.1 ซึ่งความสัมพันธ์นี้จะบรรจุไว้ในส่วนประมวลผลของไมโครลิวเคราะห้ค่าการวัดหรือถ้าในอุตสาหกรรมจะเรียกว่า “Transmitter” หรือ “Analyzer” นั่นเองโดยไมโครลิวเคราะห้จะรับค่าความนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากเซนเซอร์และนำค่าที่วัดได้มาประมวลผลกับความสัมพันธ์ที่กำหนดไว้และแปลงผันเป็นค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่งขึ้นแสดงผลบนหน้าจอและส่งออกเป็นสัญญาณมาตรฐาน (4-20 mA) อีกทางหนึ่งด้วย

4.3 การนำฟuzzy logic มาใช้ในการขยายย่านการวัดความเข้มข้นของสารละลาย

วิธีการวัดความเข้มข้นที่นำเสนอนี้จะมีการเปลี่ยนรูปแบบการวัดและการประมวลผลจากหัวข้อที่ 4.1 โดยในส่วนแรกคือการใช้เครื่องวัดค่าพีเอช (pH Sensor) มาร่วมทำการวัดเพื่อร่วมกันตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ผู้ใช้ต้องรับผิดชอบต่อการใช้งานที่ผิดพลาดไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยพีซีโลจิกมาใช้งานก็เพื่อแก้ข้อจำกัดของย่านการวัดของหลักการในหัวข้อ 4.1 นั่นเองซึ่งจะทำให้เราสามารถวัดค่าความเข้มข้นของสารละลายในย่านการวัดที่กว้างขึ้นแม้ว่าค่าความนำไฟฟ้าจะมีค่าเดียวกัน ณ ค่าความเข้มข้นที่ต่างกันและความถูกต้องของการวัดก็อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้เช่นกันโดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เรานำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มาเป็นกรณีศึกษาโดยอ้างอิงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับค่าความนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 4.1 เพื่อนำไปเป็นส่วนหนึ่งในการออกแบบด้วย ส่วนรายละเอียดการออกแบบและการทำงานของวิธีการวัดที่น่าเสนอจะแสดงในหัวข้อถัดไป

4.3.1 เครื่องมือวัดและเซนเซอร์ที่เลือกใช้

เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้แก่ เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าและเครื่องวัดค่าพีเอช เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นแบบสี่อิเล็กโทรด (four-electrode) ยี่ห้อ ABB เนื่องจากสามารถวัดค่าความนำไฟฟ้าได้สูงถึง 2,000 mS/cm หรือ 2,000,000 $\mu\text{S/cm}$ ซึ่งครอบคลุมย่านการวัดค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (อ้างอิงจากรูปที่ 4.1.) เครื่องวัดค่าพีเอชที่ใช้ในการทดสอบเป็นแบบอิเล็กโทรดแก้ว (Glass electrode) ย่านการวัดครอบคลุมตั้งแต่ 0-14pH ยี่ห้อ WTW โดยรายละเอียดเชิงเทคนิคของเครื่องมือทั้งสองจะอยู่ในภาคผนวก ข. การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้าและค่าพีเอชเทียบกับค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทดสอบทั้งหมดสิบเอ็ดความเข้มข้นได้แก่ 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, และ 50% และทดสอบสามครั้งต่อหนึ่งความเข้มข้นจากนั้นก็จะนำไปหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ถ้าความเข้มข้นนั้นมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ก็จะทำให้ค่าเฉลี่ยของการวัดที่ความเข้มข้นนั้นๆ เชื่อถือได้และมีผลการทดสอบดังหัวข้อ 4.3.1.1 และ 4.3.1.2

4.3.1.1 ผลการทดสอบค่าความนำไฟฟ้าในแต่ละความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ผลการทดสอบนี้จะทดสอบโดยเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าแบบสี่อิเล็กโทรด (Four-electrode) ยี่ห้อ ABB รุ่น TB468 ทำการทดสอบความเข้มข้นละสามครั้งและหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 4.1 และนำไปพร้อมเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้าและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในรูปที่ 4.4

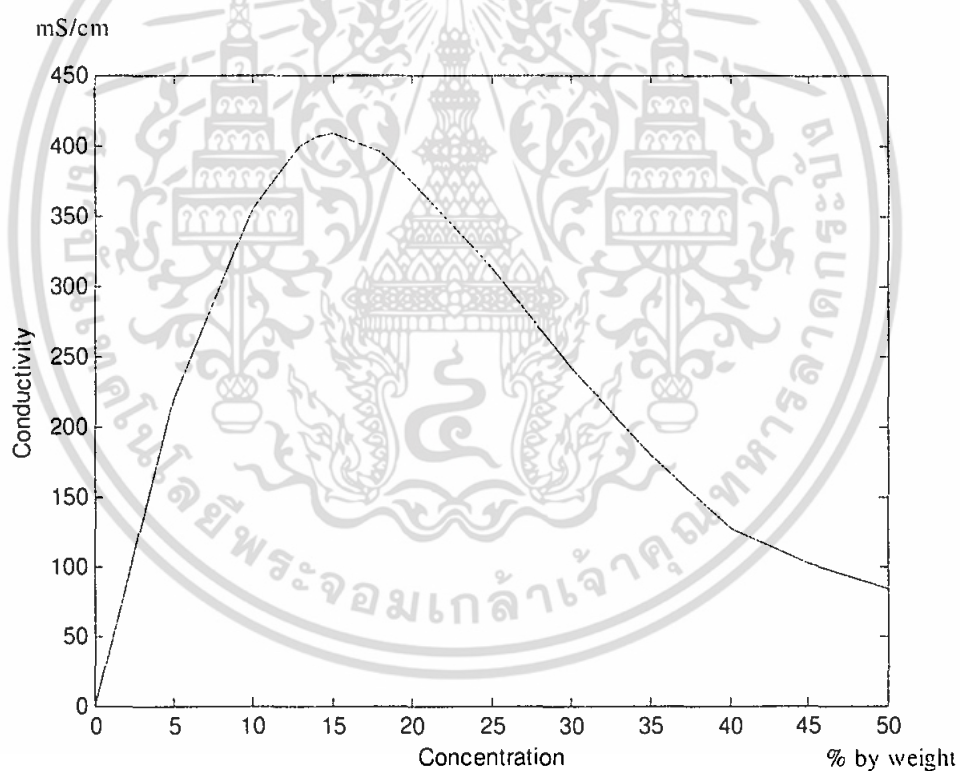
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวัดค่าความนำไฟฟ้าในแต่ละความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ค่าความเข้มข้น (% weight)	ค่าเฉลี่ยของค่าความนำไฟฟ้า (mS/cm)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mS/cm)
0	0	0
5	224	2
10	359	3
15	410	2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

ค่าความเข้มข้น (% weight)	ค่าเฉลี่ยของค่าความนำไฟฟ้า (mS/cm)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mS/cm)
20	375	3
25	315	3
30	248	3
35	185	2
40	140	1
45	109	2
50	84	2



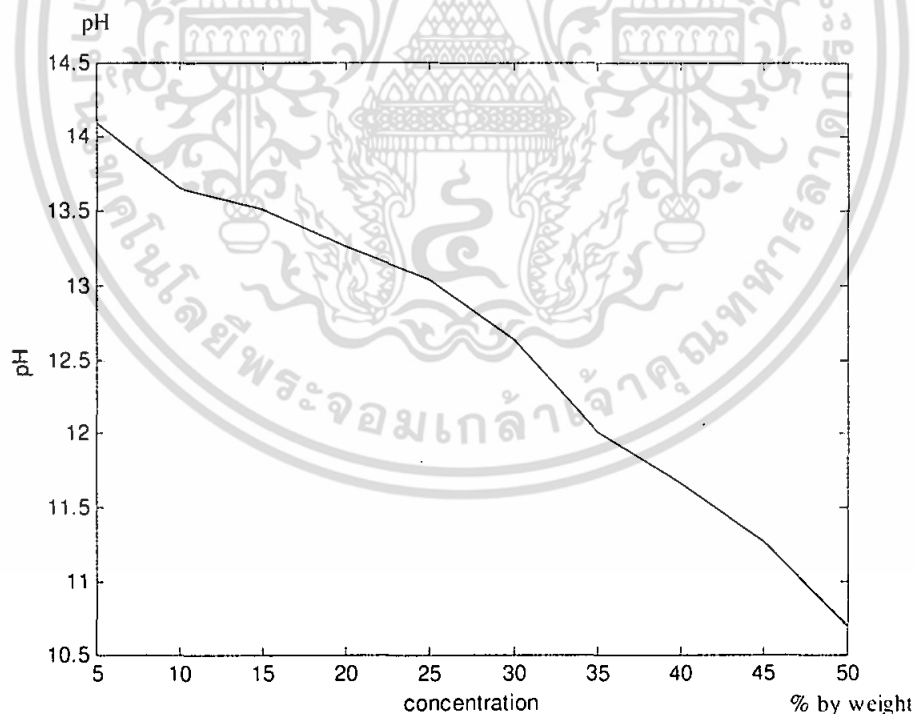
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และค่าความนำไฟฟ้าในแต่ละความเข้มข้น

4.3.1.2 ผลการทดสอบค่าพีเอชในแต่ละความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ผลการทดสอบนี้ทดสอบโดยเครื่องวัดพีเอชยี่ห้อ WTW การทดสอบจะทดสอบความเข้มข้นละสามครั้งและหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเช่นเดียวกับการวัดค่าความนำไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ 4.2 และนำไปพร้อมเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้าและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในรูปที่ 4.4 เท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวัดค่าพีเอชในแต่ละความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ค่าความเข้มข้น (% by weight)	ค่าเฉลี่ย (pH)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
<5	Nonstable *	-
5	14.10	0.07
10	13.65	0.01
15	13.50	0.02
20	13.23	0.02
25	13.02	0.01
30	12.65	0.02
35	11.95	0.01
40	11.60	0.01
45	11.20	0.02
50	10.70	0.02



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และค่าพีเอช
ในแต่ละความเข้มข้น

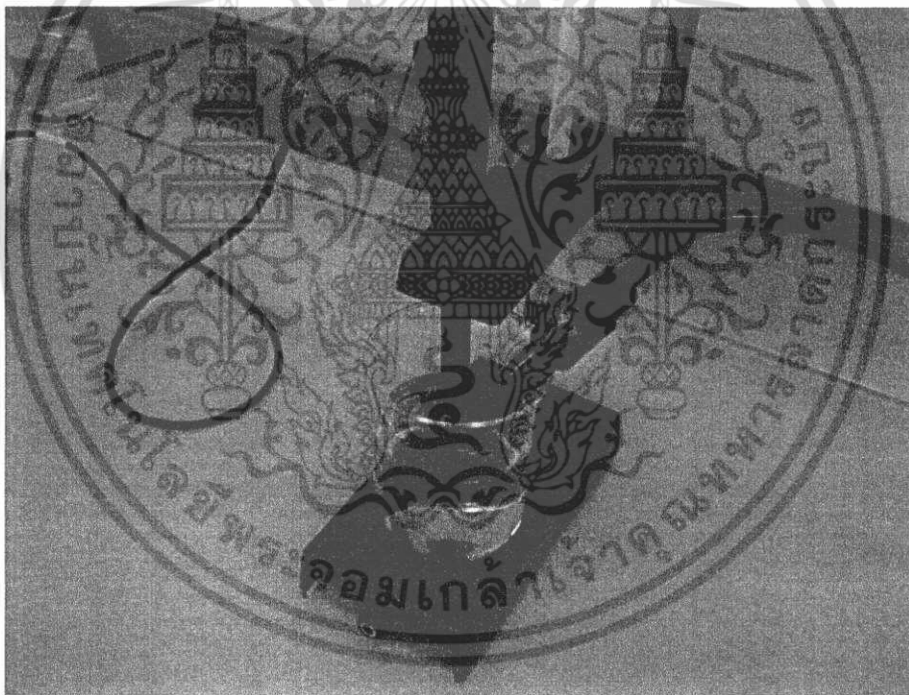
* Nonstable: ค่าการทดสอบ ณ ช่วงดังกล่าวไม่เสถียรภาพเนื่องจากค่าพีเอชที่เกิดขึ้นมีปัจจัยมาจาก
เอกสารเป็นเอกสารที่ส่งมอบให้ โดยมีการแจ้งในเอกสารที่แนบมา เช่น เมื่อผู้ขาดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
น้ำปราศจากแร่ธาตุมากกว่าปริมาณของสารเคมีที่เป็นตัวถูกละลาย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ภาคการประมวลผล

ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อแรกว่าฟัซซีโลจิกคือทฤษฎีการประมวลผลของการวัดที่ผู้วิจัยนำเสนอ และวิธีการของทากากิ-ซูเกโน (Takagi-Sugeno model) เป็นวิธีที่ผู้วิจัยเลือกใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยจะใช้การจำลองการประมวลผลของการวัดความเข้มข้นผ่านทางโปรแกรม MATLAB เวอร์ชัน 7.4 ซึ่งการสร้างเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชัน (Membership Function), รูปแบบของกลไกการอนุมาน (Inference mechanism), การกำหนดเงื่อนไข (Implication), และการดีฟัซซิเคชัน (Defuzzification) จนเป็นข้อมูลผลการวัดในรูปของตัวเลขหรือในรูปของกราฟซึ่งจะจำลองบนโปรแกรม MATLAB โดยทั้งหมด

4.3.2.1 การสร้างเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันของอินพุต

จากที่กล่าวในหัวข้อก่อนหน้านี้ว่าหลักการวัดที่ผู้วิจัยนำเสนอ นั้นเป็นแบบมัลติเพิลเซนเซอร์ ซึ่งได้นำค่าจากเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าและเครื่องวัดพีเอชเป็นดังอินพุตฉะนั้นจำนวนอินพุตของระบบการอนุมานของฟัซซี (Fuzzy inference system) ก็จะมีสองอินพุตด้วยกัน อินพุตแรก (u_1)



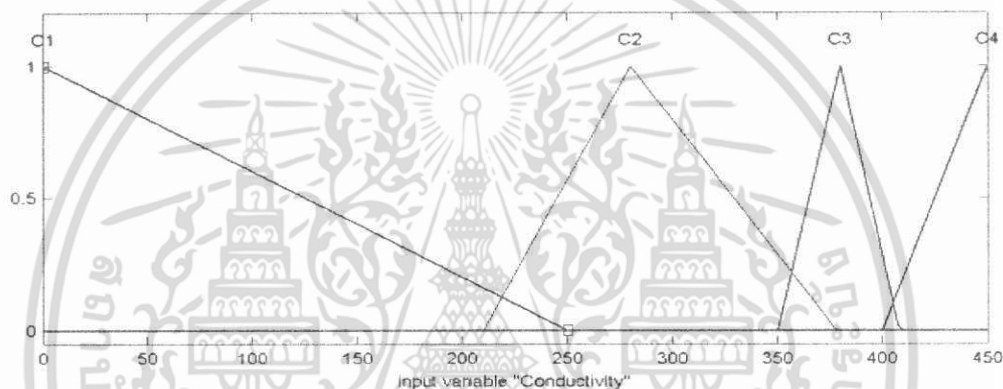
รูปที่ 4.6 ภาพแสดงขณะทำการวัดค่าความนำไฟฟ้าและค่าพีเอช

คือค่าความนำไฟฟ้าให้ชื่อว่า "Conductivity" และอินพุตที่สอง (u_2) คือค่าพีเอชให้ชื่อว่า "pH" ดังนั้นสามารถเขียนอินพุตเป็นดัง u_1 : "Conductivity" และ u_2 : "pH" ส่วนทางด้าน Linguistic values ก็จะแยกกำหนดสร้างในแต่ละอินพุต Linguistic value ของ u_1 "Conductivity" จะมีด้วยกันสี่ค่าคือ $u_1^1, u_1^2, u_1^3, u_1^4$ และ Linguistic value ของ u_2 "pH" จะมีด้วยกันหกค่าคือ $u_2^1, u_2^2, u_2^3, u_2^4, u_2^5, u_2^6$ จากสัญลักษณ์ที่แสดงนี้ผู้อ่านอาจจะเข้าใจยาก ฉะนั้นผู้วิจัยจึงปรับเปลี่ยน

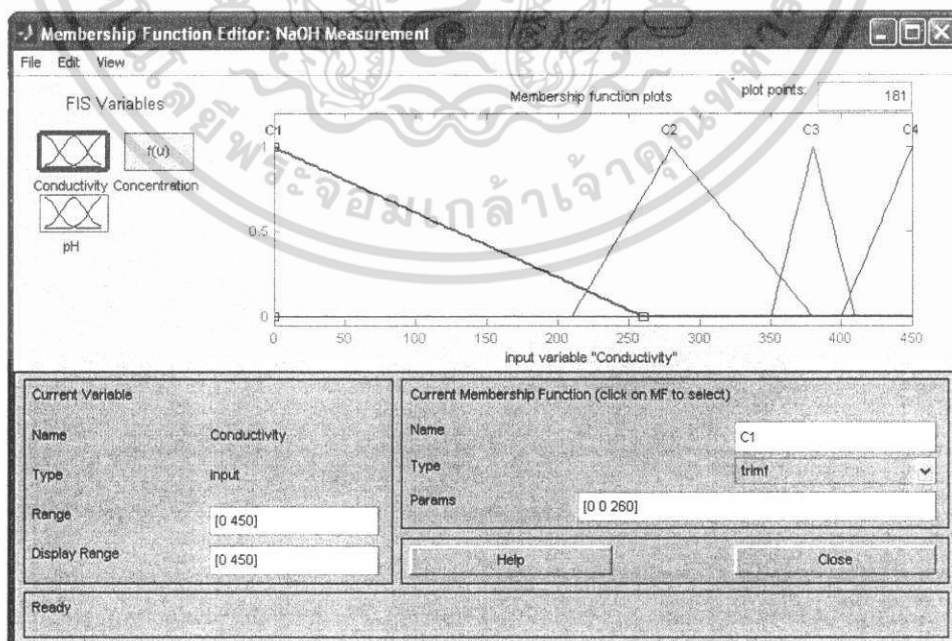
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ของ Linguistic value ให้เป็น C1, C2, C3, C4 ในส่วนของ u_1 และ pH1, pH2, pH3, pH4, pH5 , pH6 ในส่วนของ u_2

การออกแบบเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันของ u_1 “Conductivity” หรืออินพุตจากค่าความนำไฟฟ้า จะเริ่มจากการเลือกรูปร่างของเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันโดยผู้วิจัยเลือกใช้แบบฟังก์ชันสามเหลี่ยม (Triangular Membership Function) จากนั้นก็จะทำการนำค่าความนำไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.4 มาทำการสร้างเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันโดยกำหนดขอบเขตของแต่ละ Linguistic value ให้เหมาะสมและปรับแต่งตามความชำนาญของผู้วิจัยภายในช่วงของขอบเขต [0,450] ในหน่วย mS/cm ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.7 และแสดงการสร้างและกำหนดขอบเขตของแต่ละ Linguistic value บนโปรแกรม MATLAB ดังรูปที่ 4.8 ถึง 4.11 ตามลำดับต่อไปนี้

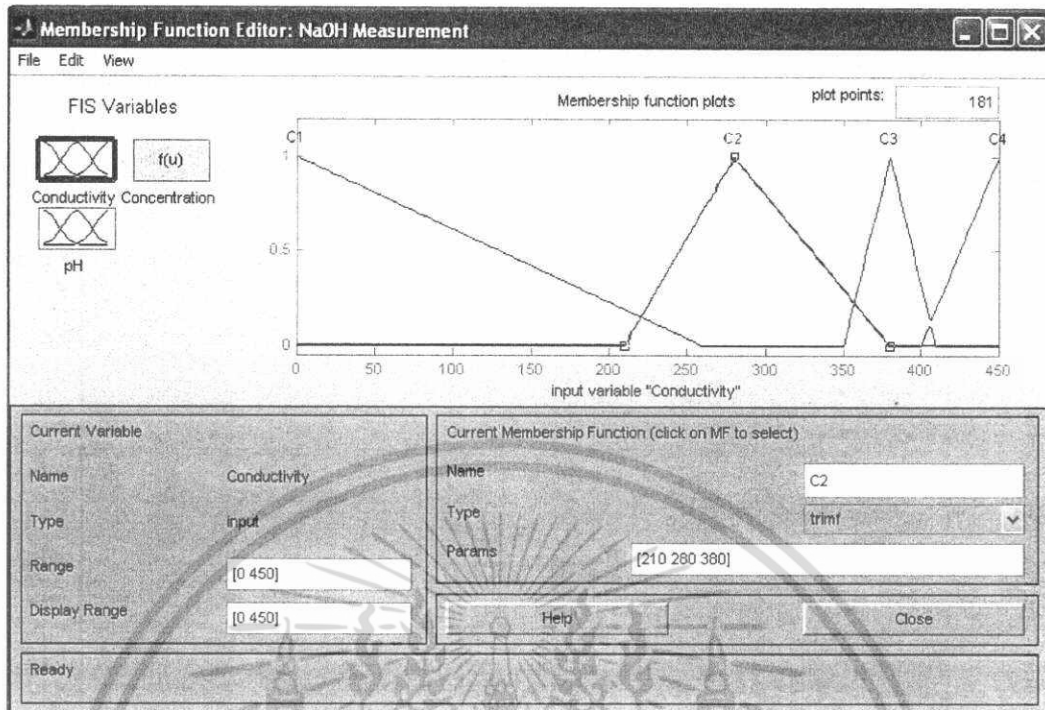


รูปที่ 4.7 เมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันของ u_1 “Conductivity”

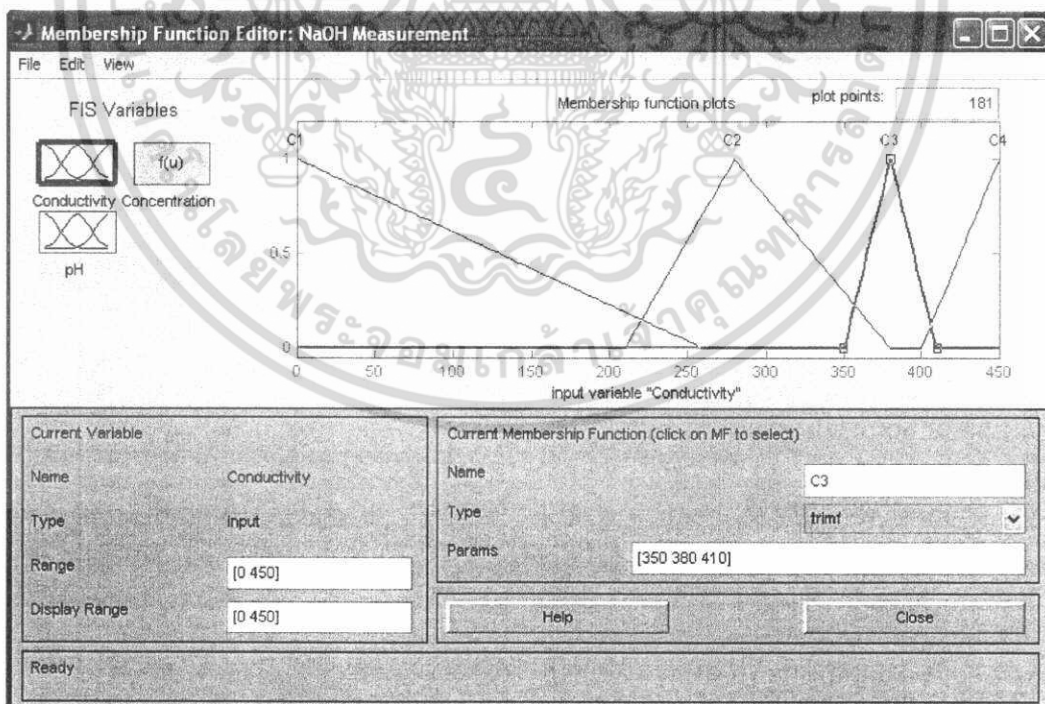


รูปที่ 4.8 การสร้าง Linguistic value C1 บนเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันของ u_1 “Conductivity”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

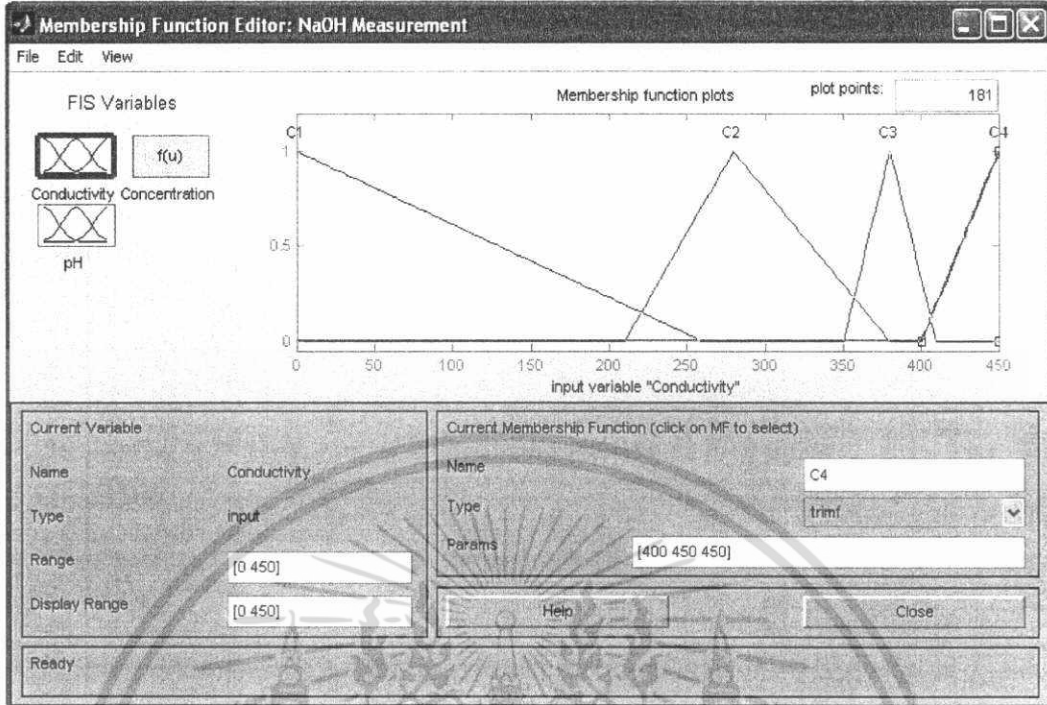


รูปที่ 4.9 การสร้าง Linguistic value C2 บนเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันของ u_1 “Conductivity”



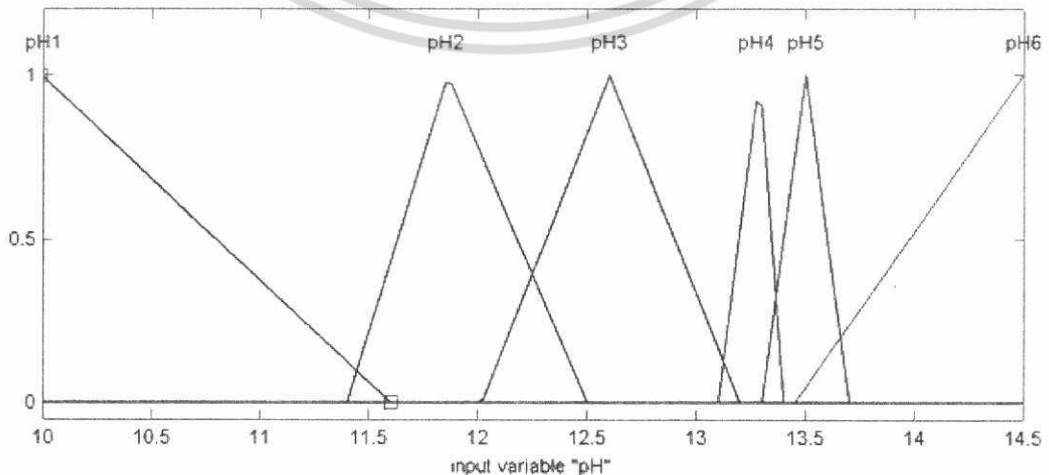
รูปที่ 4.10 การสร้าง Linguistic value C3 บนเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันของ u_1 “Conductivity”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



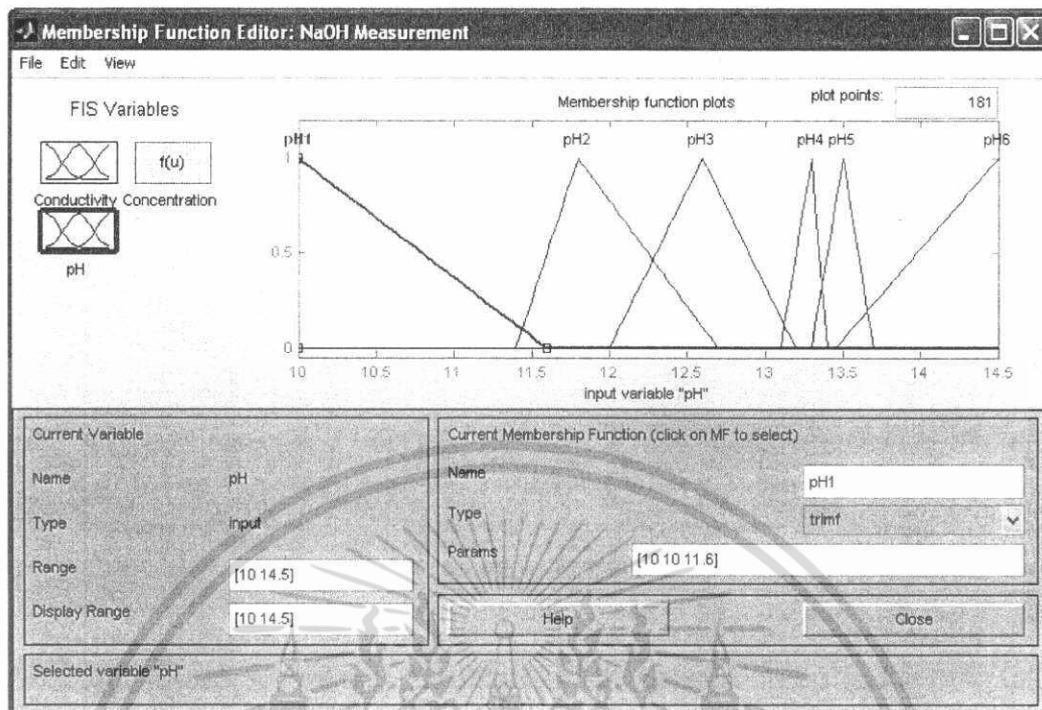
รูปที่ 4.11 การสร้าง Linguistic value C4 บนเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันของ u_1 “Conductivity”

ส่วนทางการออกแบบเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันของ u_2 “pH” หรืออินพุตจากค่าพีเอชก็จะมีขั้นตอนการออกแบบเหมือนกับของ u_1 ก็เริ่มจากการเลือกรูปร่างของเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันซึ่งใช้แบบฟังก์ชันสามเหลี่ยม (Triangular Membership Function) เช่นกัน จากนั้นก็จะทำการนำค่าพีเอชที่สัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากรูปที่ 4.5. มาทำการสร้างเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันโดยกำหนดขอบเขตของแต่ละ Linguistic value ให้เหมาะสมและปรับแต่งตามความชำนาญของผู้วิจัยภายในช่วงขอบเขตเริ่มจาก [10, 14.5] ในหน่วย pH ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.12 และแสดงการสร้างและกำหนดขอบเขตของแต่ละ Linguistic value บนโปรแกรม MATLAB ดังรูปที่ 4.13 ถึง 4.18

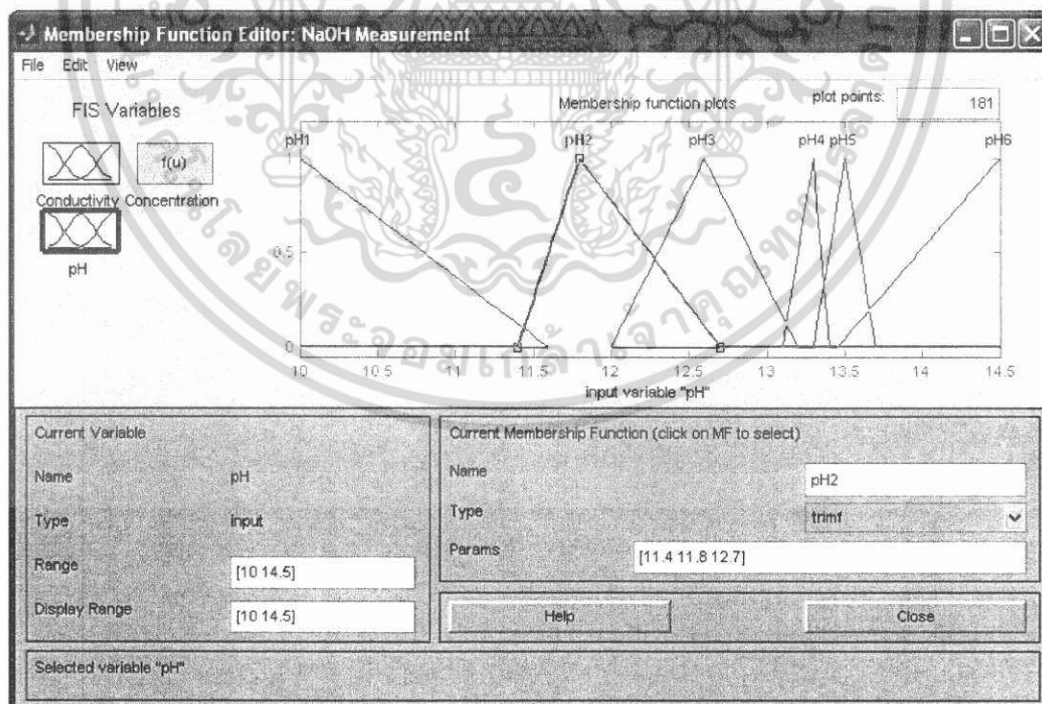


รูปที่ 4.12 เมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันของ u_2 “pH”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

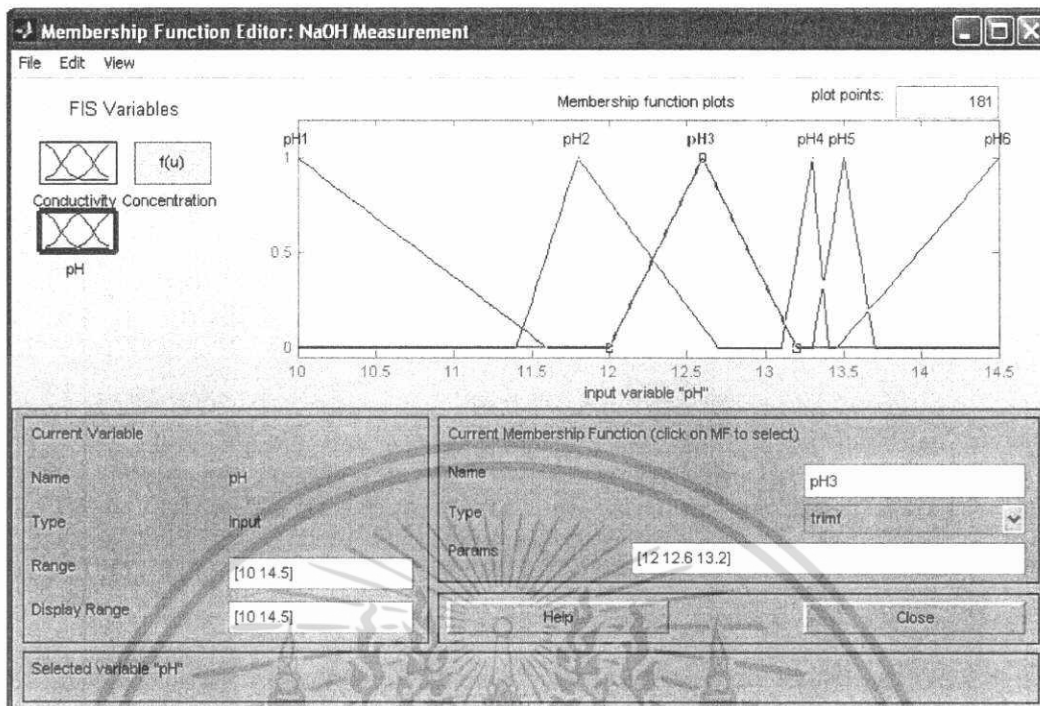


รูปที่ 4.13 การสร้าง Linguistic value pH1 บนเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันของ u_2 "pH"

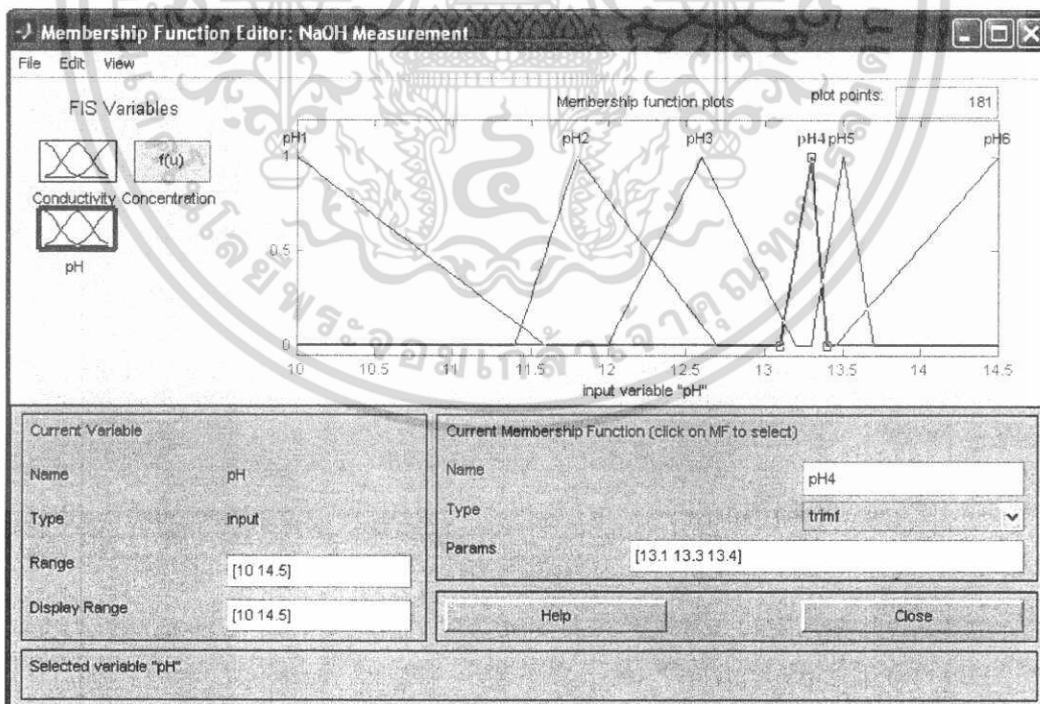


รูปที่ 4.14 การสร้าง Linguistic value pH2 บนเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันของ u_2 "pH"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

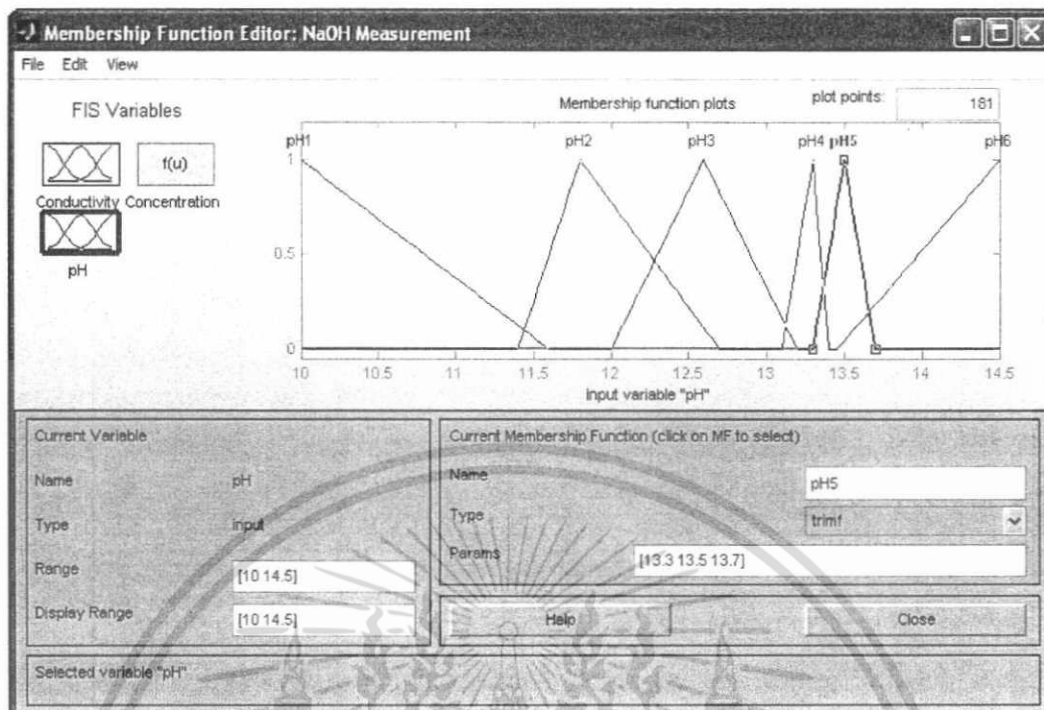


รูปที่ 4.15 การสร้าง Linguistic value pH3 บนเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันของ u_2 "pH"

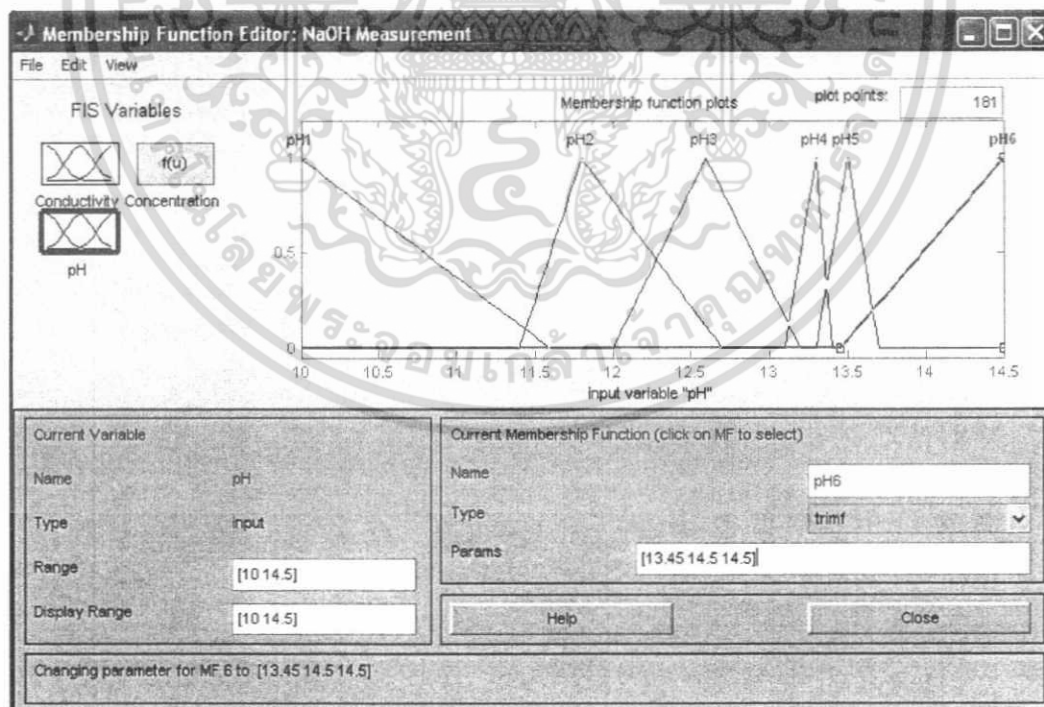


รูปที่ 4.16 การสร้าง Linguistic value pH4 บนเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันของ u_2 "pH"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 การสร้าง Linguistic value pH5 บนเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันของ u_2 "pH"



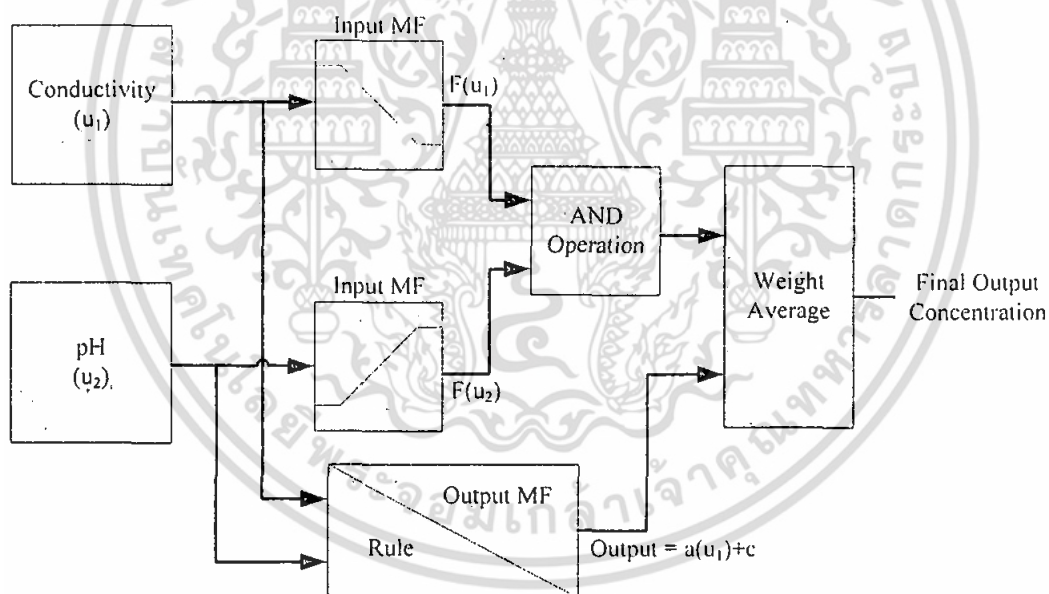
รูปที่ 4.18 การสร้าง Linguistic value pH6 บนเมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันของ u_2 "pH"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2.2 กลไกการอนุมาน (Inference mechanism)

รูปแบบหรือภาพรวมการประมวลผลก็คือกลไกการอนุมานนั่นเองซึ่งกลไกการอนุมานจะเป็นตัวกำหนดขั้นตอนของการประมวลผลตั้งแต่การฟัซซิเคชัน, การหา Rule weight และการดีฟัซซิเคชัน, กลไกการอนุมานของการวัดค่าความเข้มข้นของสารละลายไฮดรอกไซด์ที่นำเสนอแสดงได้ดังรูปที่ 4.19 และอธิบายหลักการทำงานได้ดังต่อไปนี้

หลักการทำงานของกลไกนี้จะเริ่มจากการป้อนค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity value) และค่าพีเอช (pH value) เป็นอินพุตให้กับเมมเบอร์ชิพฟังก์ชันโดยเมมเบอร์ชิพฟังก์ชันจะแยกเฉพาะแต่ละอินพุต เมมเบอร์ชิพฟังก์ชันทั้งสองจะแปลงค่าความนำไฟฟ้าและค่าพีเอชให้อยู่ในรูปของฟัซซิเซต $F(u_1)$ และ $F(u_2)$ และส่งออกมาทางเอาต์พุตของเมมเบอร์ชิพฟังก์ชันหรือที่เรียกว่าการฟัซซิเคชัน (Fuzzication) นั่นเอง จากนั้นจะนำค่าความจริงของ $F(u_1)$ และ $F(u_2)$ มาเข้าฟังก์ชัน AND แบบ min term เพื่อหา Rule weight ในขณะเดียวกันนั้นค่าความนำไฟฟ้าและค่าพีเอชก็จะเป็นตัวกำหนดสมการเอาต์พุตด้วยเช่นกันโดยอ้างอิงตามเงื่อนไขในตารางที่ 4.3 ซึ่งเอาต์พุตของแต่ละเงื่อนไขหาได้จากสมการ $Output = a(u_1) + c$ และถ้าค่าความนำไฟฟ้าและค่าพีเอชไปตกอยู่ใน



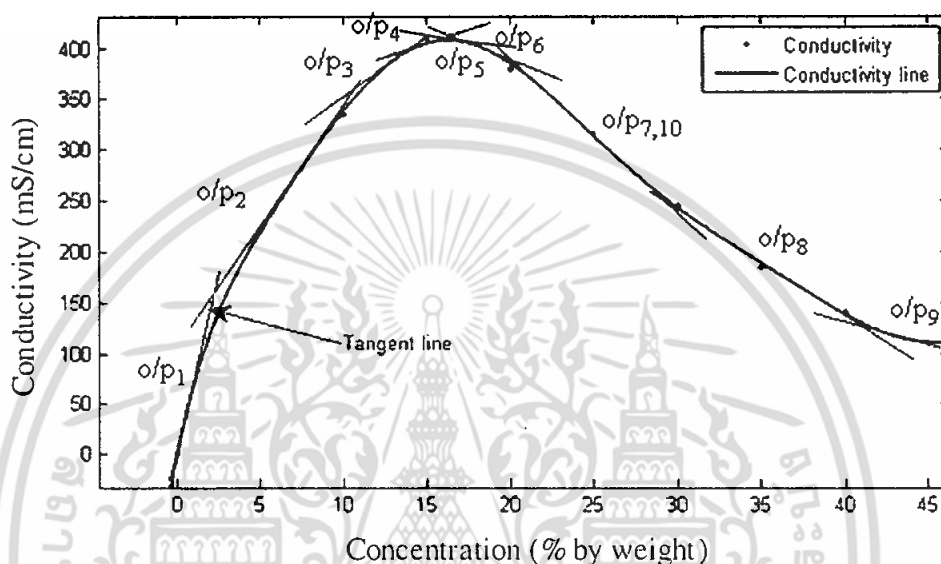
รูปที่ 4.19 กลไกการอนุมานที่นำเสนอ

ช่วงคลุมเครือหรือช่วงที่ทับซ้อนกันระหว่างสอง Linguistics ที่มีกำหนดอยู่ในเงื่อนไขในตารางที่ 4.3 ก็จะทำให้เกิดหลายเงื่อนไขในการวัดครั้งนั้นและมีสมการเอาต์พุตหลายสมการเช่นกัน จากนั้นผลลัพธ์ที่ได้จากสมการเอาต์พุตและ Rule weight ของแต่ละเงื่อนไขจะถูกนำไปหาเอาต์พุตสุดท้าย (Final Output) หรือที่เรียกว่าการดีฟัซซิเคชัน (Defuzzication) ซึ่งก็คือค่าความเข้มข้นของสารละลายไฮดรอกไซด์นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2.3 การกำหนดเงื่อนไข (Implication)

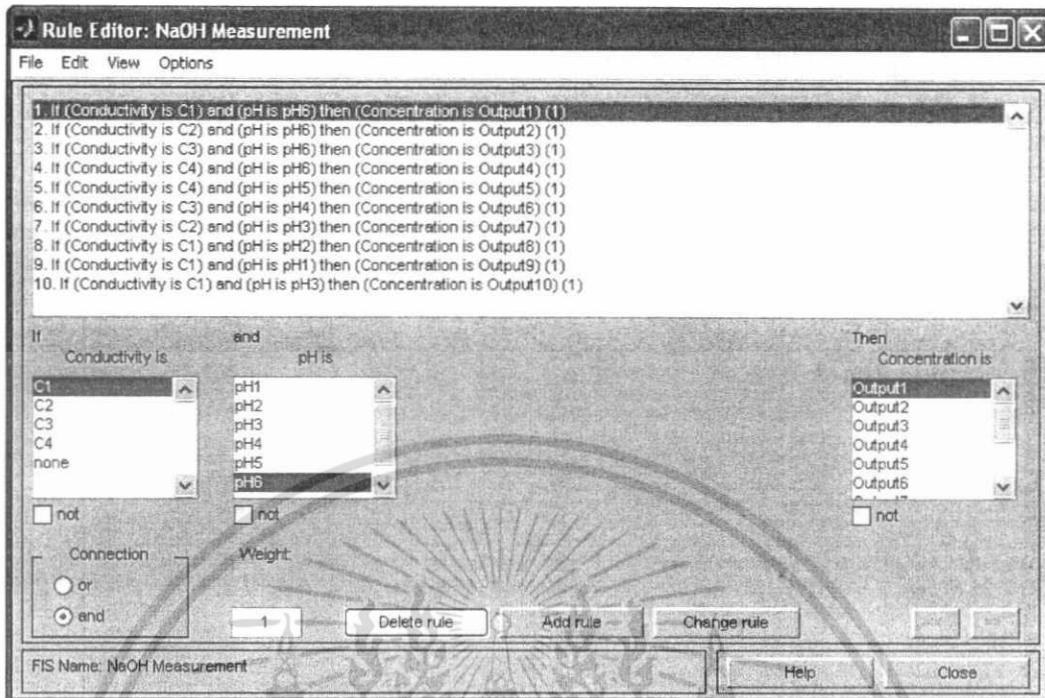
เมื่อทำการสร้างเมมเบอร์ชิพฟังก์ชันของอินพุตเสร็จเรียบร้อยแล้วก็หมายถึงว่าอินพุตจากค่าความนำไฟฟ้าและค่าพีเอชได้ถูกแปลงเป็นฟัซซีเซ็ทเรียบร้อยแล้วได้แก่ $F(u_1)$ และ $F(u_2)$ จากนั้นค่าความจริงที่ได้จากฟัซซีเซ็ททั้งสองจะนำไปหา Rule weight และอีกทางหนึ่งอินพุตจากค่าความนำไฟฟ้าและค่าพีเอชจะเป็นตัวกำหนดเงื่อนไข (Implication) นั้นเอง เงื่อนไข (Implication) ที่สร้างขึ้นมา



รูปที่ 4.20 สมการเชิงเส้น (tangent line) ที่สัมผัสบนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และค่าความนำไฟฟ้า

สำหรับการทดลองนี้สามารถวิเคราะห์ทุกๆความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับค่าความนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยแสดงดังรูปที่ 4.20 โดยการกำหนดสมการเชิงเส้น (Linear Equation) ในแต่ละเส้นสัมผัส (tangent line) ที่สัมผัสกับกราฟความสัมพันธ์ซึ่งการกำหนดหรือสร้างสมการเชิงเส้นนั้นต้องมีความเหมาะสมและอยู่ในจุดที่ทำให้ค่าการวัดแม่นยำที่สุด เอาท์พุทของแต่ละเงื่อนไขคำนวณได้จากสมการเชิงเส้นที่กำหนดไว้ในแต่ละเงื่อนไขดังนั้นสามารถแสดงเงื่อนไขที่กำหนดความสอดคล้องของแต่ละอินพุตกับเอาท์พุทได้ดังต่อไปนี้

- If conductivity is C1 and pH is pH6 then, output 1;
- If conductivity is C2 and pH is pH6 then, output 2;
- If conductivity is C3 and pH is pH6 then, output 3;
- If conductivity is C4 and pH is pH6 then, output 4;
- If conductivity is C4 and pH is pH5 then, output 5;
- If conductivity is C3 and pH is pH4 then, output 6;
- If conductivity is C2 and pH is pH3 then, output 7;
- If conductivity is C1 and pH is pH2 then, output 8;
- If conductivity is C1 and pH is pH1 then, output 9;
- If conductivity is C1 and pH is pH3 then, output 10;



รูปที่ 4.21 การกำหนดแต่ละเงื่อนไขลงในโปรแกรม MATLAB

4.3.2.4 การกำหนดสมการเอาต์พุต

สมการเอาต์พุตเป็นสมการที่บอกผลลัพธ์ในแต่ละเงื่อนไขซึ่งแปรผันตามค่าความนำไฟฟ้าโดยมีรูปแบบดังสมการที่ 4.1 เนื่องจากวิธีการที่นำเสนอประกอบไปด้วยสิบเงื่อนไขดังนั้นสมการเอาต์พุต

$$Output_n(o/p_n) = aX + bY + c \quad (4.1)$$

ก็จะมีสิบสมการเช่นกันและมีรายละเอียดแต่ละตัวแปรของสมการที่ 4.1 ดังต่อไปนี้ “o/p_n” คือสัญลักษณ์แทนผลลัพธ์ของสมการตั้งแต่สมการที่ 1 จนถึง n, “a” คือค่าความชันของสมการ (Gain), “X” คือค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity value) และ “C” คือค่าคงที่ของสมการ (Equation constant) ส่วน “b” คือค่าความชันของอินพุตที่สองซึ่งอินพุตที่สองก็คือ “Y” นั้นเองแต่มันถูกตัดออกไปจากสมการเนื่องจากการป้อนอินพุตที่สองเข้าสู่สมการหรือมีค่าเท่ากับศูนย์นั่นเองจึงทำให้ผลคูณระหว่าง “b” และ Y มีค่าเท่ากับศูนย์และสามารถตัดออกไปจากสมการได้จึงทำให้รูปของสมการเอาต์พุตเปลี่ยนเป็นดังสมการที่ 4.2 นั้นเอง สมการเอาต์พุตทั้งหมดที่สร้างขึ้นมาตามแต่ละเงื่อนไขสามารถแสดงดังตารางที่ 4.3 เช่นกัน จากนั้นแต่ละสมการจะถูกกำหนดลงในโปรแกรม

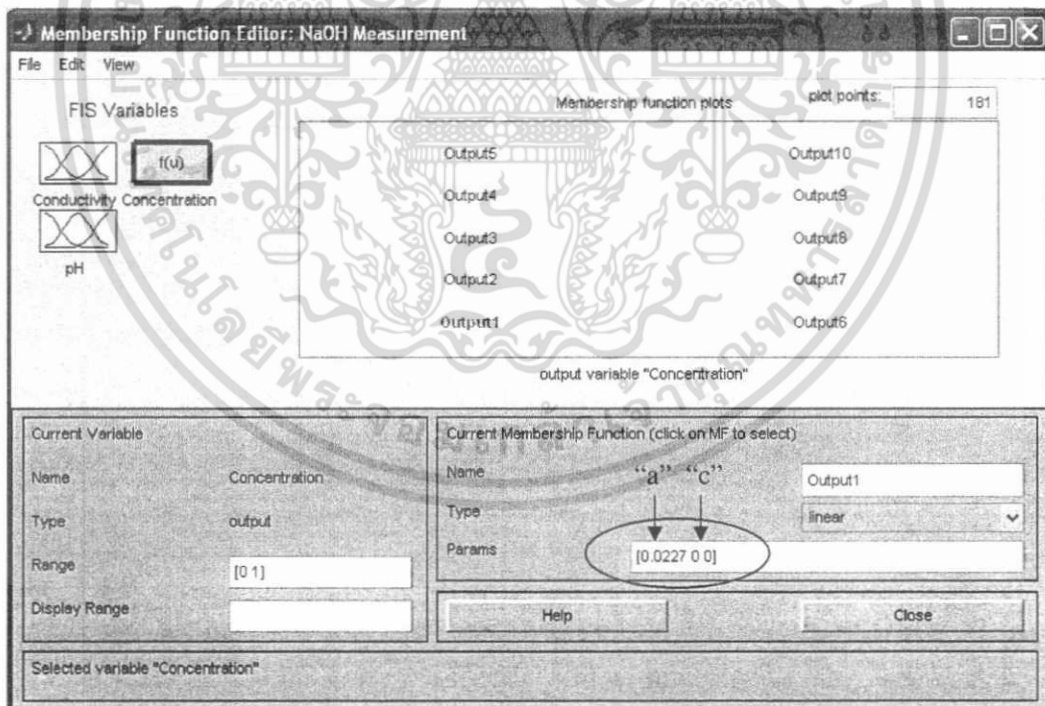
$$Output_n(o/p_n) = aX + c \quad (4.2)$$

MATLAB เพื่อทำการทดลองซึ่งสามารถแสดงการกำหนดสมการเอาต์พุตทั้งหมดบนโปรแกรม MATLAB ได้ดังรูปที่ 4.22 ถึง 4.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

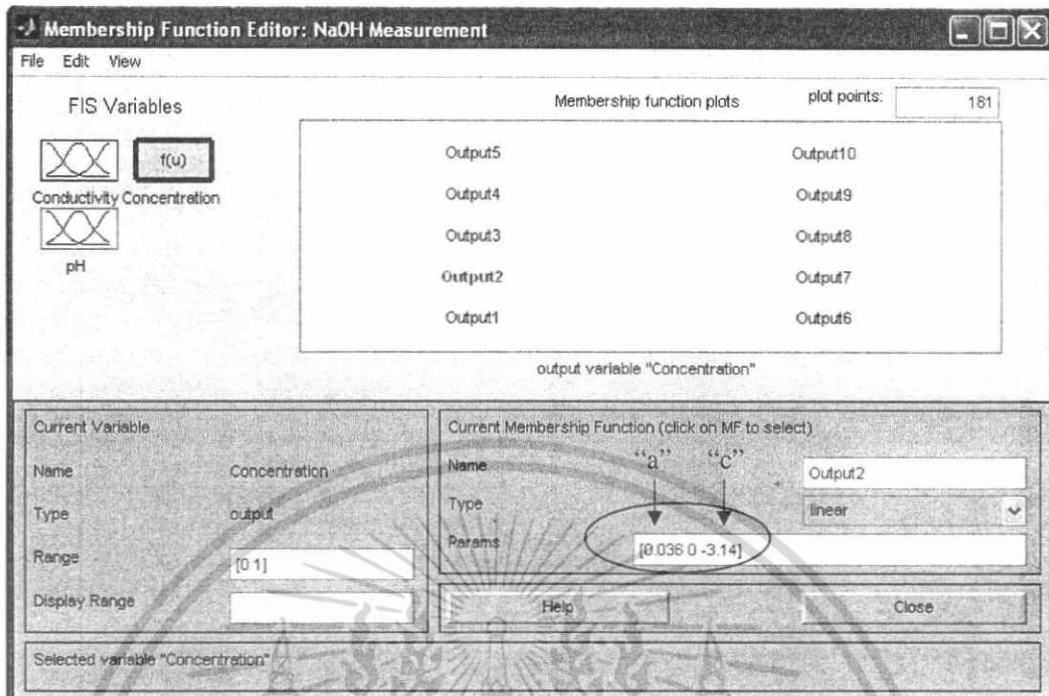
ตารางที่ 4.3 เงื่อนไขสำหรับการเลือกสมการเชิงเส้นให้เป็นเอาต์พุต

linguistic values (Conductivity)	linguistic values (pH)	Output Equation
C1	pH6	$o/p1 = 0.0227X$
C2	pH6	$o/p2 = 0.036X - 3.14$
C3	pH6	$o/p3 = 0.0667X - 13.668$
C4	pH6	$o/p4 = 0.2X - 67$
C4	pH5	$o/p5 = -0.3X + 138$
C3	pH4	$o/p6 = -0.1X + 57.5$
C2	pH3	$o/p7 = -0.0769X + 49.22$
C1	pH2	$o/p8 = -0.111X + 55.55$
C1	pH1	$o/p9 = -0.201X + 67$
C1	pH3	$o/p10 = -0.0769X + 49.22$

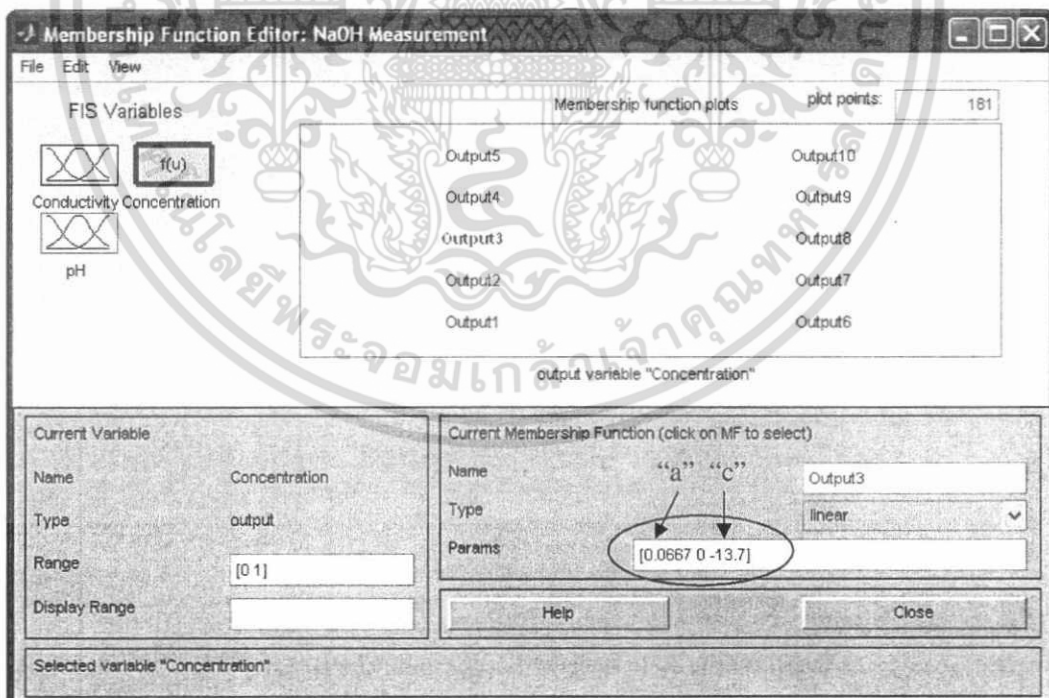


รูปที่ 4.22 การกำหนดสมการเอาต์พุตที่หนึ่ง (Output 1) ลงบนโปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

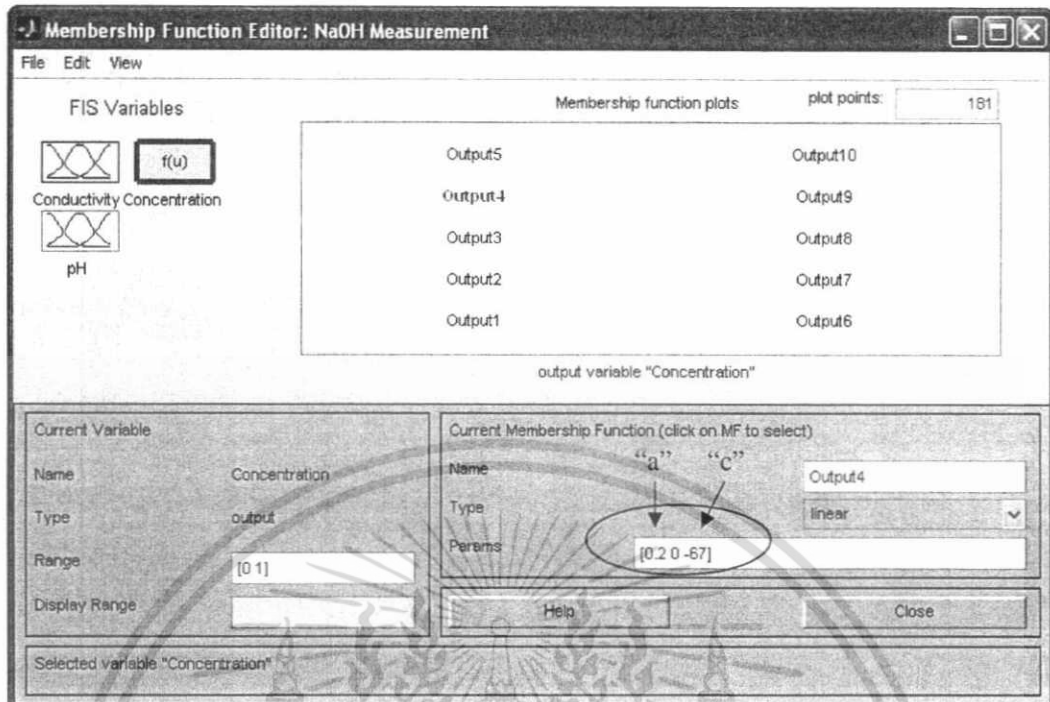


รูปที่ 4.23 การกำหนดสมการเอาร์ทพุทที่สอง (Output 2) ลงบนโปรแกรม MATLAB

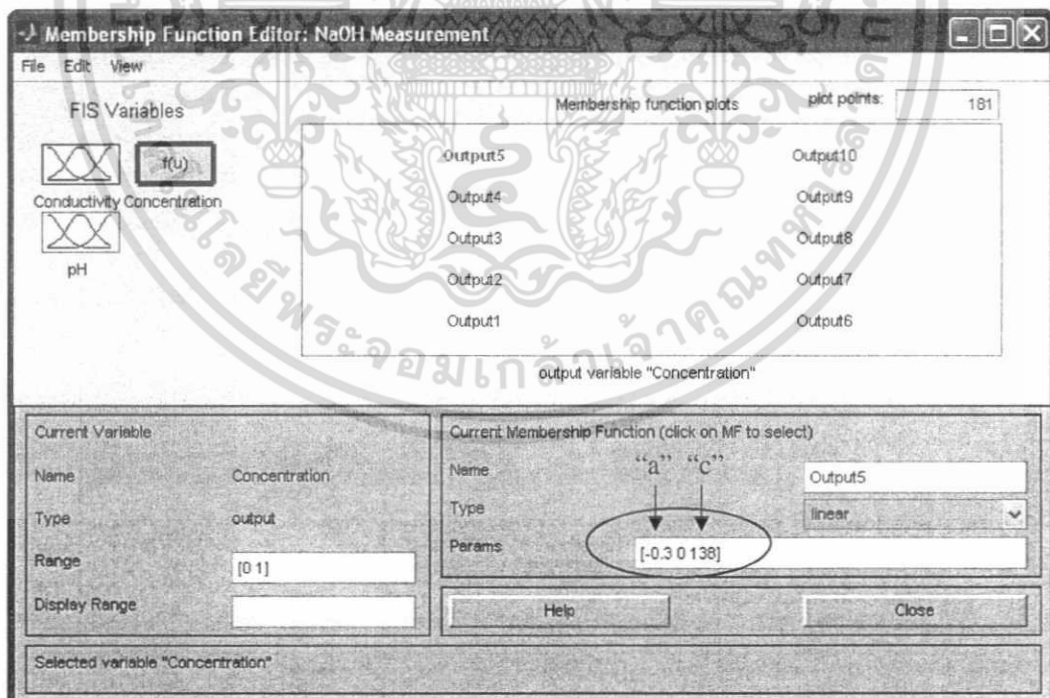


รูปที่ 4.25 การกำหนดสมการเอาร์ทพุทที่สาม (Output 3) ลงบนโปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

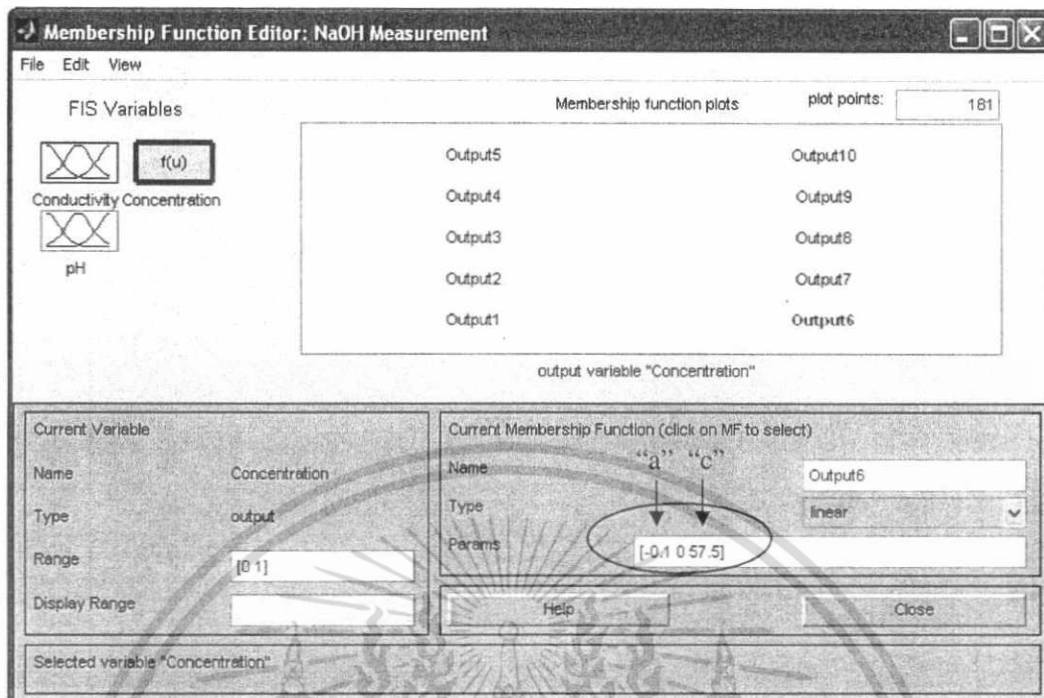


รูปที่ 4.25 การกำหนดสมการเอ๊าท์พุทที่สี่ (Output 4) ลงบนโปรแกรม MATLAB

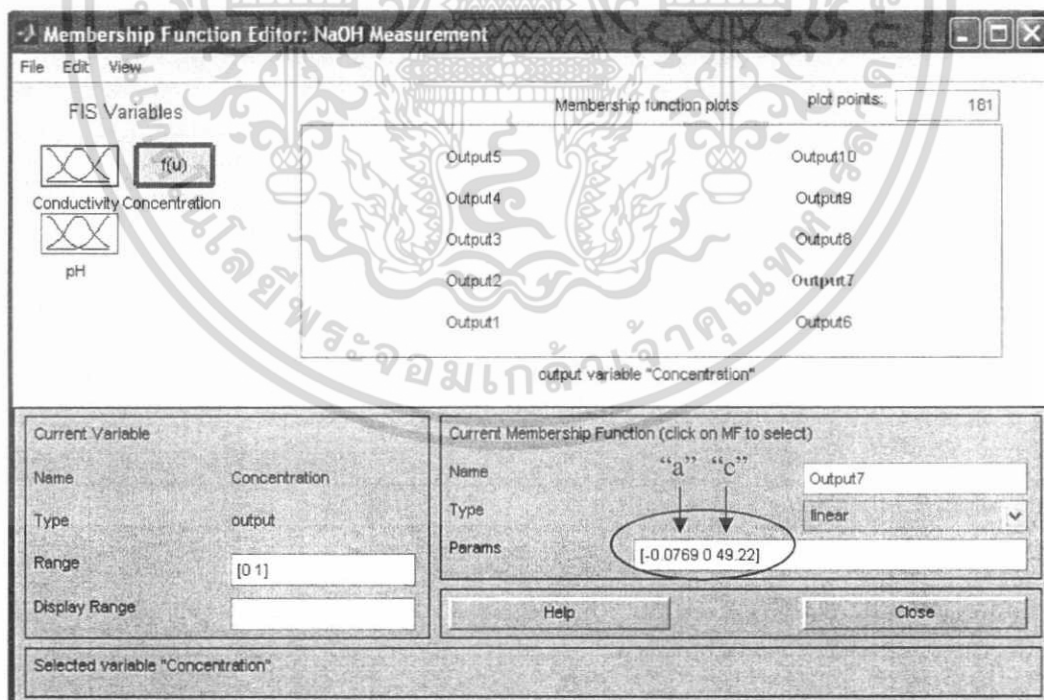


รูปที่ 4.26 การกำหนดสมการเอ๊าท์พุทที่ห้า (Output 5) ลงบนโปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

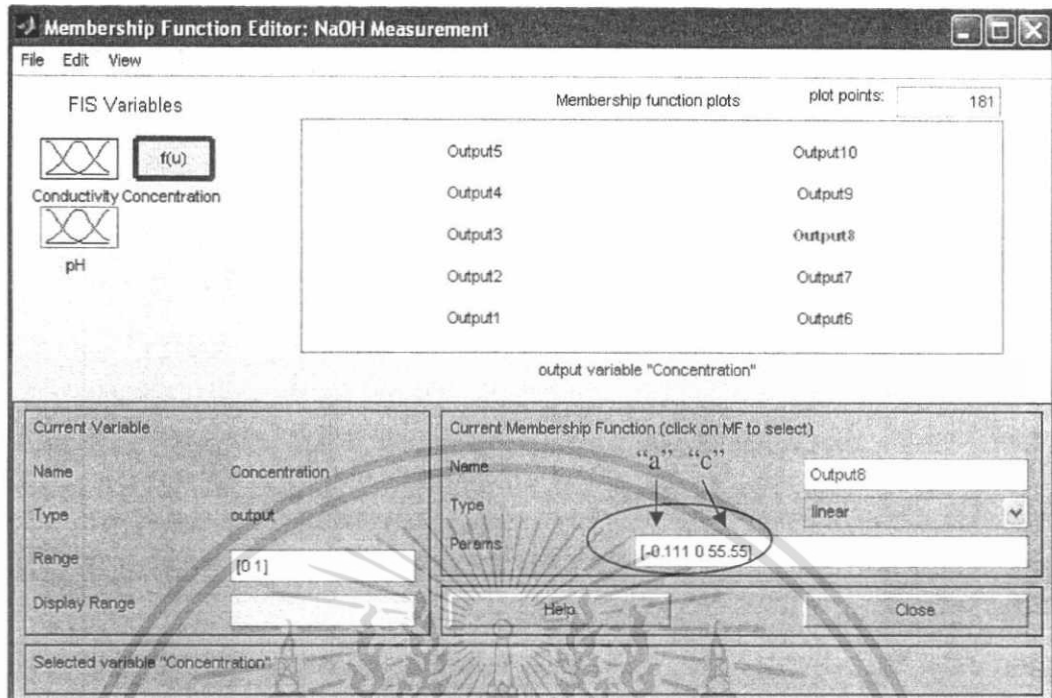


รูปที่ 4.27 การกำหนดสมการเอาต์พุตที่หก (Output 6) ลงบนโปรแกรม MATLAB

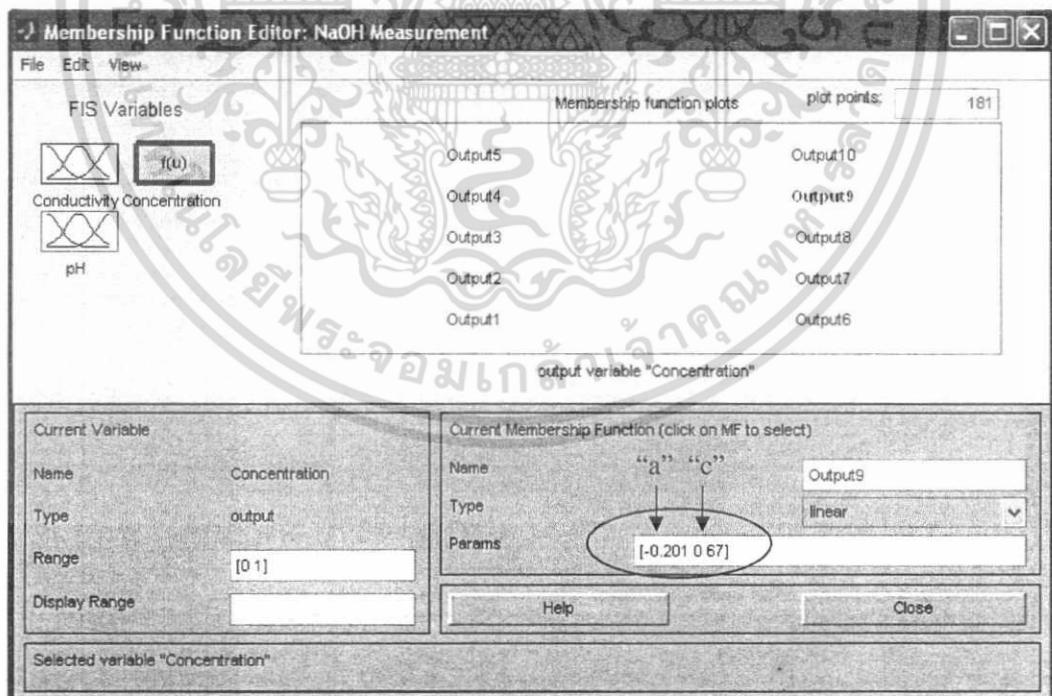


รูปที่ 4.28 การกำหนดสมการเอาต์พุตที่เจ็ด (Output 7) ลงบนโปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

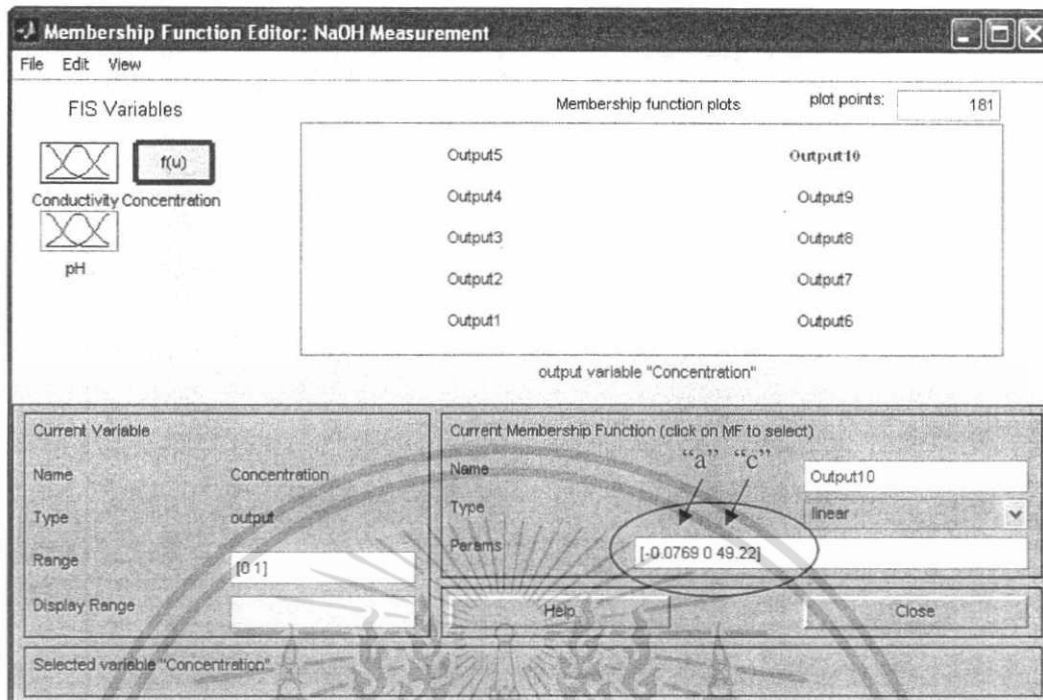


รูปที่ 4.29 การกำหนดสมการเอาท์พุทที่แปด (Output 8) ลงบนโปรแกรม MATLAB



รูปที่ 4.30 การกำหนดสมการเอาท์พุทที่เก้า (Output 9) ลงบนโปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 การกำหนดสมการเอาต์พุตที่สิบ (Output 10) ลงบนโปรแกรม MATLAB

4.2.2.5. การดีฟัซซิเคชัน (Defuzzication)

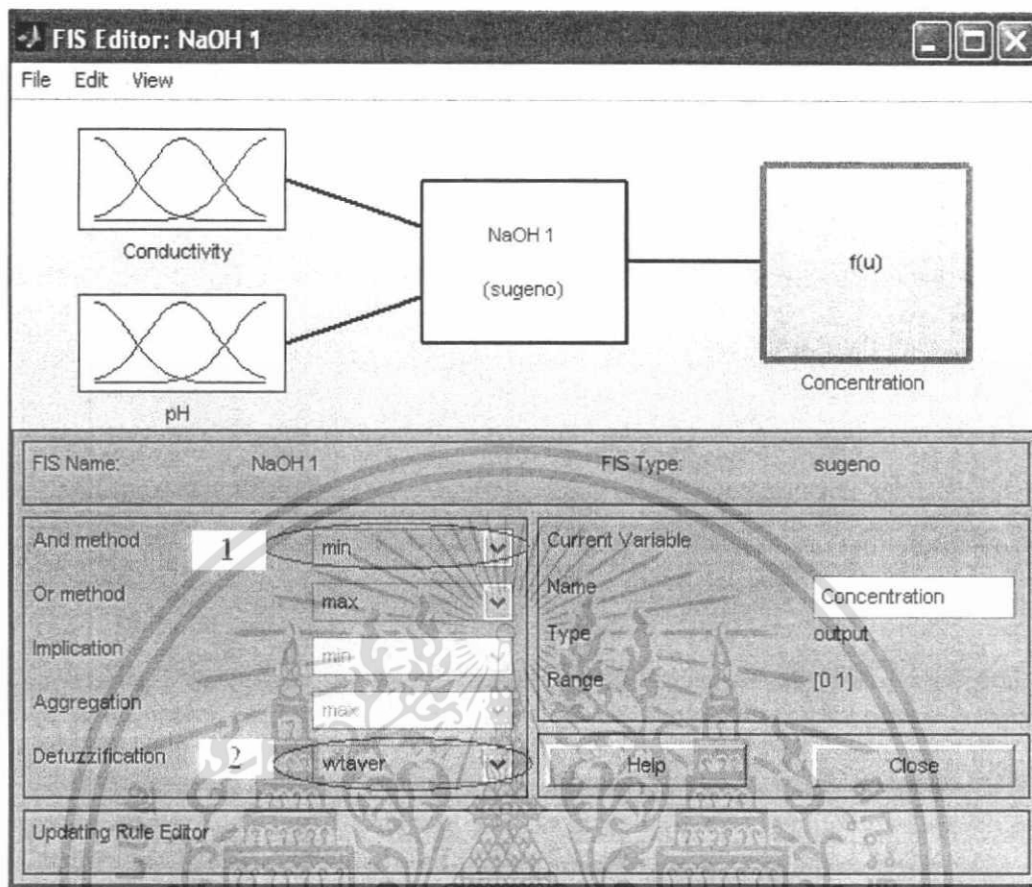
เป็นการแปลงเอาต์พุตที่อยู่ในรูปของฟัซซีเซตให้กลายเป็นเอาต์พุตที่แสดงค่าการวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยวิธีการดีฟัซซิเคชันแบบ weight average อันดับแรกต้องทราบค่าความจริง (Rule weight) ที่เกิดจากทั้งสองอินพุตเสียก่อนซึ่งหาได้จากวิธีการ AND operation แบบ min term กับค่าความจริงของแต่ละอินพุตแสดงดังสมการที่ 4.3. โดยที่ค่าความจริง (Rule weight) อาจจะมีมากกว่าหนึ่งตัวก็ได้ถ้าค่าการวัดอินพุตใดอินพุตหนึ่งนั้นตกอยู่ในช่วงของการทับซ้อนกันระหว่างสอง Linguistic และตรงกับเงื่อนไขที่กำหนด (Implication)

$$Rule\ weight = \min\{F(u_1), F(u_2)\} \tag{4.3}$$

จากนั้นให้นำค่าความจริงที่ได้จากสมการ 4.3 ของแต่ละเงื่อนไขและเอาต์พุตที่ได้จากแต่ละเงื่อนไขมาหาเอาต์พุตสุดท้าย (Final Output) ที่เป็นค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสมการที่ 4.4.

$$Concentration = \frac{\sum_{i=1}^n Rule\ weight_i \times Output_i}{\sum_{i=1}^n Rule\ weight_i} \tag{4.4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 การกำหนดวิธีการหาค่าความจริง (Rule weight) แบบ AND Method เป็น min term (1) และเลือกวิธีการดีฟัซซิเคชันเป็นแบบ weight average (2) บนโปรแกรม MATLAB

4.2.2.6 ตัวอย่างการคำนวณการประมวลผลของระบบที่ออกแบบ

ตัวอย่างการคำนวณหาผลการวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ตัวอย่างที่ 1. ถ้าค่าความนำไฟฟ้าและค่าพีเอชที่เกิดจากการวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 150 mS/cm และ 11.70 pH ตามลำดับ
วิธีทำ

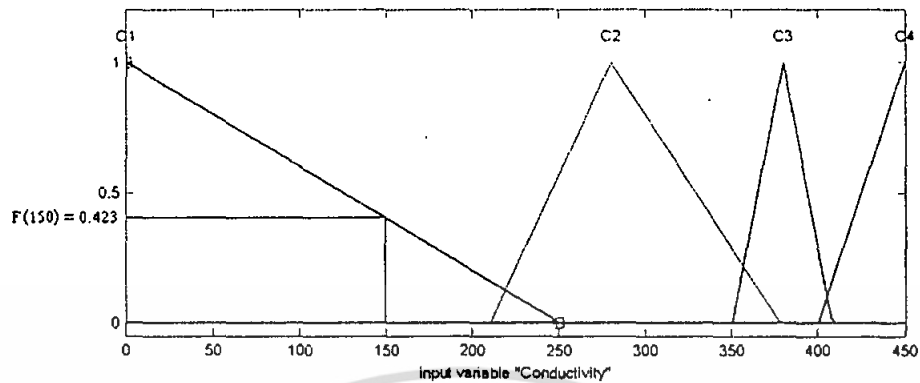
ขั้นตอนที่ 1. เตรียมค่าความนำไฟฟ้าและค่าพีเอชสำหรับพิจารณา

ค่าความนำไฟฟ้า u_1 เท่ากับ 150 mS/cm

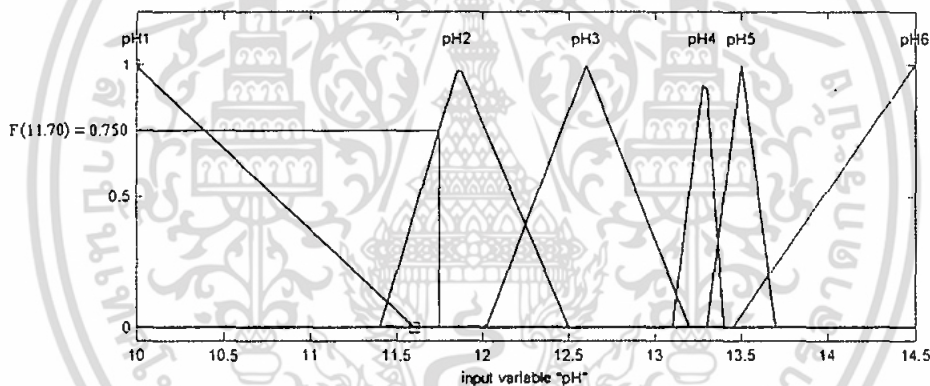
ค่าพีเอช u_2 เท่ากับ 11.70 pH

ขั้นตอนที่ 2. แปลงค่าความนำไฟฟ้าและค่าพีเอชให้เป็นฟัซซีเซ็ทจากเมมเบอร์ชิพฟังก์ชันของค่าความนำไฟฟ้าและค่าพีเอชตามลำดับจากนั้นให้หาช่วงของ Linguistic และค่าความจริงของแต่ละอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ฟังก์ชันเชิงทของค่าความนำไฟฟ้า (u_1) คือ $F(u_1) = F(150)$ โดยตกอยู่บนช่วงของ Linguistic “C1” และมีค่าความจริง (A_1') เท่ากับ 0.423



ฟังก์ชันเชิงทของค่าพีเอช (u_2) คือ $F(u_2) = F(11.70)$ โดยตกอยู่บนช่วงของ Linguistic “pH2” และมี ค่าความจริง (A_2') เท่ากับ 0.750

ขั้นตอนที่ 3. หาผลลัพธ์จากสมการเอาต์พุตที่ตรงตามเงื่อนไข

เนื่องจากค่าความนำไฟฟ้าและค่าพีเอชนั้นตกอยู่บนในช่วงของ Linguistic “C1” และ “pH2” ตามลำดับ ดังนั้นจึงตรงกับเงื่อนไขของเอาต์พุตที่ 8 จากตารางที่ 4.3 ซึ่งจะได้ $o/p_8 = -0.111X + 55.55$ และหาผลลัพธ์ของเอาต์พุตได้ดังนี้; โดยที่ u_1 เท่ากับค่าความนำไฟฟ้า

$$\begin{aligned} \text{Output}_1 &= -0.111X + 55.55 \\ &= -0.111(150) + 55.55; \quad u_1 \text{ เท่ากับ } 150 \text{ mS/cm} \\ &= 38.9 \end{aligned}$$

เอาต์พุตที่หนึ่ง (Output_1) เท่ากับ 38.9

ขั้นตอนที่ 4. หา Rule weight

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ทางปัญญาที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
อ้างอิงจากสมการที่ 4.3 $\text{Rule weight} = \min\{F(u_1), F(u_2)\}$
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{Rule weight}_1 &= \min \{F(150), F(11.70)\} \\ &= \min \{0.423, 0.750\} \\ &= 0.423 \end{aligned}$$

Rule weight₁ เท่ากับ 0.423

ขั้นตอนที่ 5. หาเอาต์พุตสุดท้ายหรือค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์อ้างอิงจากสมการที่ 4.4

$$\text{Concentration} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Rule weight}_i \times \text{Output}_i}{\sum_{i=1}^n \text{Rule weight}_i}$$

$$\text{Concentration} = \frac{\text{Rule weight}_1 \times \text{Output}_1}{\text{Rule weight}_1}$$

$$\text{Concentration} = \frac{0.423 \times 38.9}{0.423} = 38.9$$

ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 38.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (% by weight)

ตัวอย่างที่ 2. ถ้าค่าความนำไฟฟ้าและค่าพีเอชที่เกิดจากการวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 365 mS/cm และ 13.80 pH ตามลำดับ

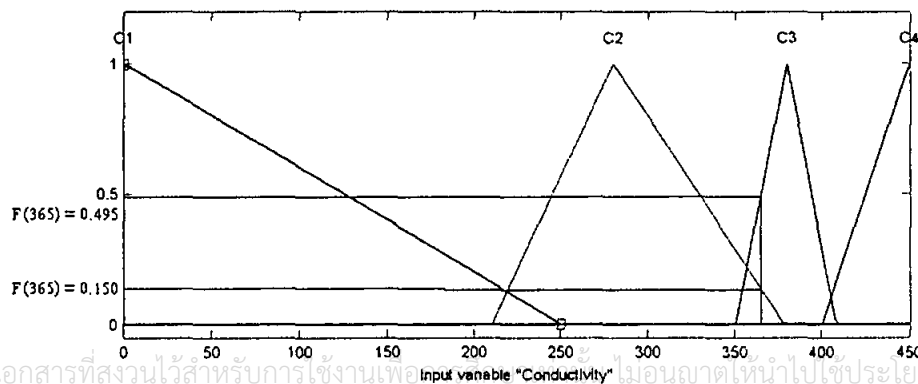
ขั้นตอนที่ 1. เตรียมค่าความนำไฟฟ้าและค่าพีเอชสำหรับพิจารณา

ค่าความนำไฟฟ้า (u_1) เท่ากับ 365 mS/cm

ค่าพีเอช (u_2) เท่ากับ 13.80 pH

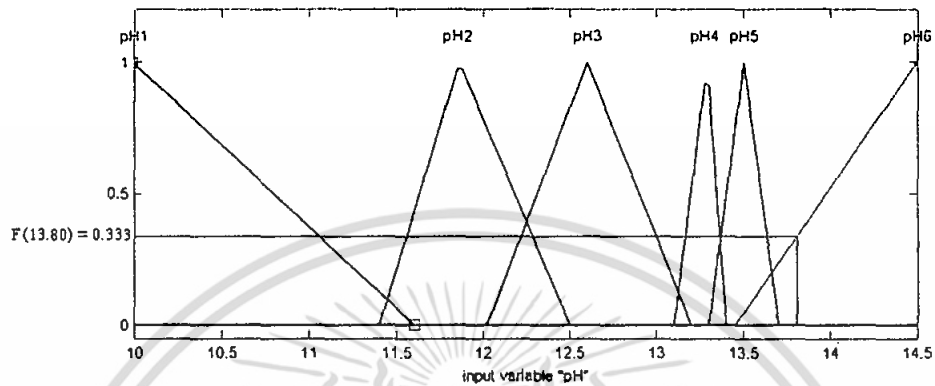
ขั้นตอนที่ 2.

แปลงค่าความนำไฟฟ้าและค่าพีเอชให้เป็นฟังก์ชันเชิงตรรกศาสตร์จากเมมเบอร์ชิพฟังก์ชันของค่าความนำไฟฟ้าและค่าพีเอชตามลำดับจากนั้นให้หาช่วงของ linguistic และค่าความจริงของแต่ละอินพุต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ Input variable "Conductivity" ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันของค่าความนำไฟฟ้า (u_1) คือ $F(u_1) = F(365)$ โดยตกอยู่บนช่วงของ Linguistic "C2" มีค่าความจริง (A_1') เท่ากับ 0.150 และก็ตกอยู่บนช่วงของ Linguistic "C3" มีค่าความจริง (A_1^2) เท่ากับ 0.495



ฟังก์ชันของค่าพีเอช (u_2) คือ $F(u_2) = F(13.80)$ โดยตกอยู่บนช่วงของ Linguistic "pH6" และมีค่าความจริงเท่ากับ 0.333

ขั้นตอนที่ 3 หาผลลัพธ์จากสมการเอาต์พุตที่ตรงตามเงื่อนไข

เนื่องจากค่าความนำไฟฟ้าตกอยู่ในช่วง Linguistic "C2" และ "C3" และค่าพีเอชนั้นตกอยู่บนในช่วงของ "pH6" จึงทำให้ตรงกับสองเงื่อนไขคือ o/p_2 และ o/p_3 จากตารางที่ 4.3 ดังนั้นจึงทำให้มีสองเอาต์พุตเกิดขึ้นในระบบดังต่อไปนี้

$$\text{Output}_1 = 0.037X - 3.14$$

$$\text{Output}_2 = 0.0667X - 13.668$$

สามารถหาผลลัพธ์ของแต่ละเอาต์พุตได้ดังนี้; โดยที่ X เท่ากับค่าความนำไฟฟ้า

$$\begin{aligned} \text{Output}_1 &= 0.036X - 3.14 \\ &= 0.036(365) - 3.14; \quad u_1 \text{ เท่ากับ } 365 \text{ mS/cm} \\ &= 10.000 \end{aligned}$$

เอาต์พุตที่หนึ่ง (Output_1) เท่ากับ 10.365

$$\begin{aligned} \text{Output}_2 &= 0.0667X - 13.668 \\ &= 0.0667X - 13.668; \quad u_1 \text{ เท่ากับ } 365 \text{ mS/cm} \\ &= 10.677 \end{aligned}$$

เอาต์พุตที่สอง (Output_2) เท่ากับ 10.677

ขั้นตอนที่ 4 หา Rule weight

เนื่องจากในข้อนี้มีสองเงื่อนไขเกิดขึ้นจึงทำให้มีสอง Rule weight เช่นกัน

อ้างอิงจากสมการที่ 4.3 $\text{Rule weight} = \min\{F(u_1), F(u_2)\}$

$$\text{Rule weight}_1 = \min\{F(365), F(13.80)\}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 &= \min \{0.150, 0.333\} \\
 &= 0.150 \\
 \text{Rule weight}_2 &= \min \{F(365), F(13.80)\} \\
 &= \min \{0.495, 0.333\} \\
 &= 0.333
 \end{aligned}$$

Rule weight₁ เท่ากับ 0.150 และ Rule weight₂ เท่ากับ 0.333

ขั้นตอนที่ 5. หาเอาท์พุทสุดท้ายหรือค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อ้างอิงจากสมการที่ 4.4

$$\begin{aligned}
 \text{Concentration} &= \frac{\sum_{i=1}^n \text{Rule weight}_i \times \text{Output}_i}{\sum_{i=1}^n \text{Rule weight}_i} \\
 \text{Concentration} &= \frac{(\text{Rule weight}_1 \times \text{Output}_1) + (\text{Rule weight}_2 \times \text{Output}_2)}{\text{Rule weight}_1 + \text{Rule weight}_2} \\
 \text{Concentration} &= \frac{(0.150 \times 10.000) + (0.333 \times 10.677)}{0.150 + 0.333} = 10.46
 \end{aligned}$$

ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10.46 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (% by weight)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

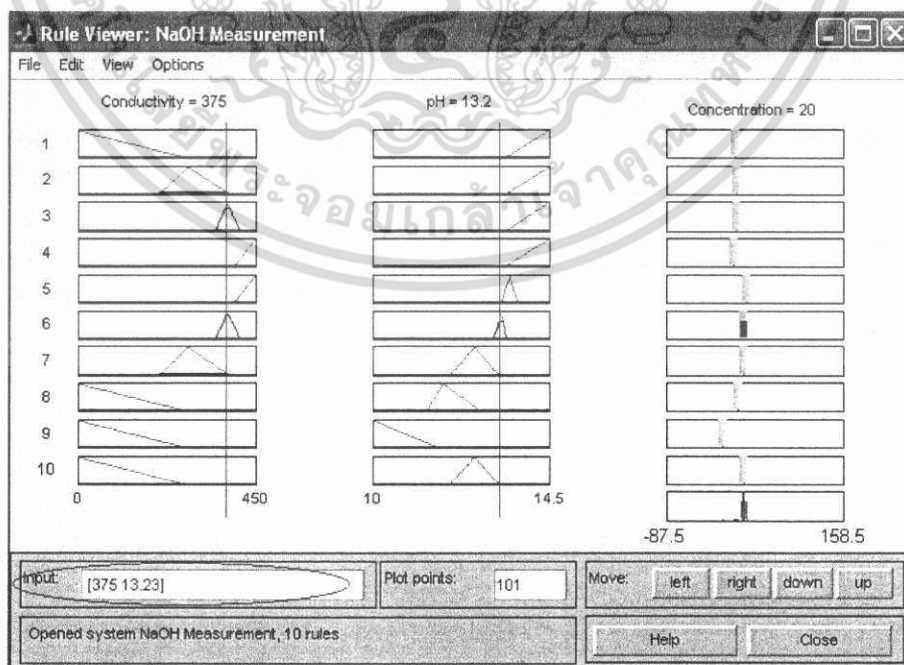
ผลการทดสอบคุณสมบัติของหลักการที่นำเสนอ

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบการขยายย่านการวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากหลักการที่นำเสนอ โดยส่วนแรกของบทนี้คือผลการทดสอบการนำฟิสิกส์โวลติจมาใช้ในการวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งอ้างอิงความเข้มข้นที่ตรวจวัดจากเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าและเครื่องวัดค่าพีเอชในหัวข้อที่ 4.3.1.1 และ 4.3.1.2 และหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (% Error of Reading) ของการประมวลผลการวัดด้วย ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉพาะภาคการประมวลผลและในส่วนที่สองจะเป็นผลการทดสอบการวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยหลักการที่นำเสนอซึ่งรับค่าจากเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าและเครื่องวัด ค่าพีเอชโดยทำการทดสอบถึงสามครั้งและหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (% Error of Reading) ซึ่งครอบคลุมทั้งส่วนการตรวจวัดและส่วนการประมวลผล ส่วนสุดท้ายในบทนี้คือการแสดงค่าความเที่ยงตรงของการวัดทั้งสามครั้ง

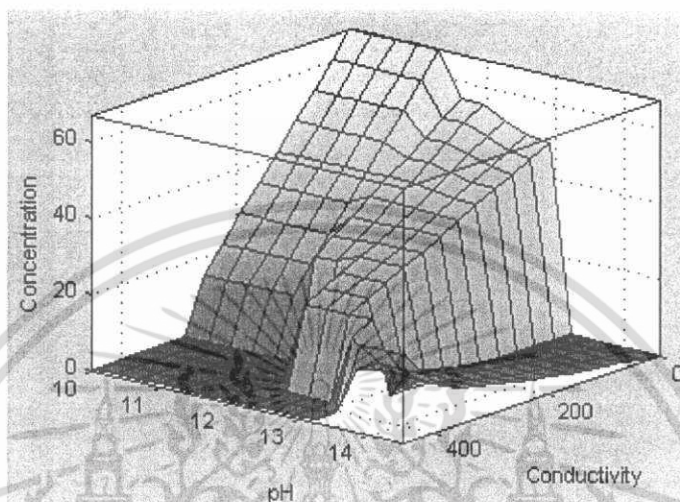
5.2 ผลการทดสอบการนำฟิสิกส์โวลติจมาใช้ในการขยายย่านการวัดของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งอ้างอิงความเข้มข้นที่ตรวจวัดจากเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าและเครื่องวัดค่าพีเอชในหัวข้อที่ 4.3.1.1 และ 4.3.1.2

ผลการทดสอบที่จะแสดงต่อไปนี้ได้มาจากการป้อนค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity) และค่าพีเอช (pH) ที่สัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อ้างอิงจากหัวข้อที่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ผู้ใช้ประโยชน์จากการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1.1 และ 4.3.1.2 ลงไปที่อินพุต u_1 “Conductivity” และอินพุต u_2 “pH” ตามลำดับที่ในกรอบวงรีทางด้านล่างซ้ายมือของหน้าต่าง Rule viewer ใน Toolbox FIS Editor ของโปรแกรม MATLAB ดังรูปที่ 5.1 ส่วนทางด้านผลการทดสอบของการวัดจะแสดงในตารางที่ 5.1. และแสดงเป็นกราฟสามมิติดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ผลการวัดแบบกราฟสามมิติ

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบการขยายย่านการวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หลังจากการปรับแต่งเมมเบอริฟฟังก์ชันโดยอ้างอิงจากความสัมพันธ์ของค่าความนำไฟฟ้าและค่าพีเอชกับค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ตั้งหัวข้อที่ 4.3.1.1 และ 4.3.1.2 เป็นดังข้อมูลสำหรับการทดสอบ

ค่าความเข้มข้นที่กำหนด % by weight	ค่าความนำไฟฟ้า (u_1) $\mu\text{S}/\text{cm}$	ค่าพีเอช (u_2) pH	ค่าความเข้มข้นที่วัดได้ (y) % by weight	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด % of reading
0.0	0	14.10 *	0.0	0.0
1.0	45	14.10 *	1.0	0.0
2.0	90	14.10 *	2.0	0.0
3.0	135	14.10 *	3.1	3.3
4.0	180	14.10 *	4.1	2.5
5.0	224	14.10 *	5.0	0.0
6.0	255	14.00	6.0	0.0
7.0	285	13.90	7.1	1.4
8.0	310	13.80	8.0	0.0
9.0	335	13.70	8.9	1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

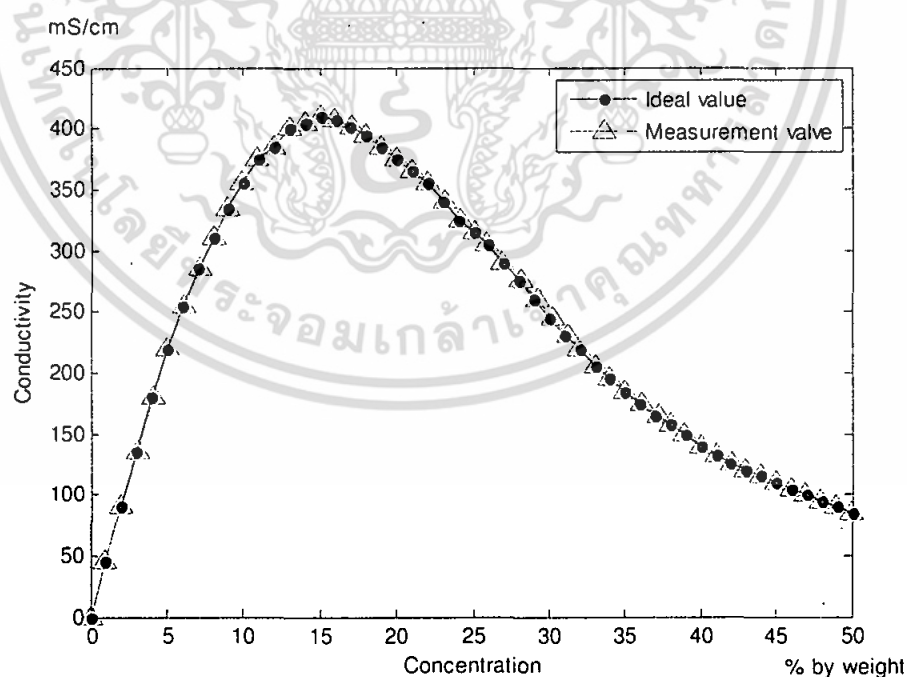
ตารางที่ 5.1 (ต่อ)

ค่าความเข้มข้น ที่กำหนด % by weight	ค่าความนำไฟฟ้า (u_1) $\mu\text{S/cm}$	ค่าพีเอช (u_2) pH	ค่าความเข้มข้นที่วัดได้ (y) % by weight	เปอร์เซ็นต์ความ ผิดพลาด % of reading
10.0	359	13.65	10.0	0.0
11.0	375	13.60	11.1	0.9
12.0	385	13.57	12.0	0.0
13.0	400	13.54	13.0	0.0
14.0	403	13.52	14.4	2.8
15.0	410	13.50	15.0	0.0
16.0	407	13.45	15.9	0.6
17.0	403	13.40	17.1	0.6
18.0	395	13.30	18.0	0.0
19.0	385	13.27	19.0	0.0
20.0	375	13.23	20.0	0.0
21.0	365	13.20	21.0	0.0
22.0	355	13.15	22.0	0.0
23.0	340	13.10	23.1	0.4
24.0	325	13.07	24.2	0.8
25.0	315	13.02	25.0	0.0
26.0	305	12.98	25.8	0.8
27.0	290	12.85	26.9	0.4
28.0	275	12.80	28.1	0.3
29.0	260	12.75	29.2	0.7
30.0	248	12.65	30.0	0.0
31.0	230	12.50	31.2	0.6
32.0	220	12.40	31.9	0.3
33.0	205	12.25	33.1	0.3
34.0	195	12.10	34.0	0.0
35.0	185	11.95	35.0	0.0
36.0	175	11.90	36.1	0.3
37.0	165	11.80	37.2	0.5
38.0	158	11.75	38.0	0.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

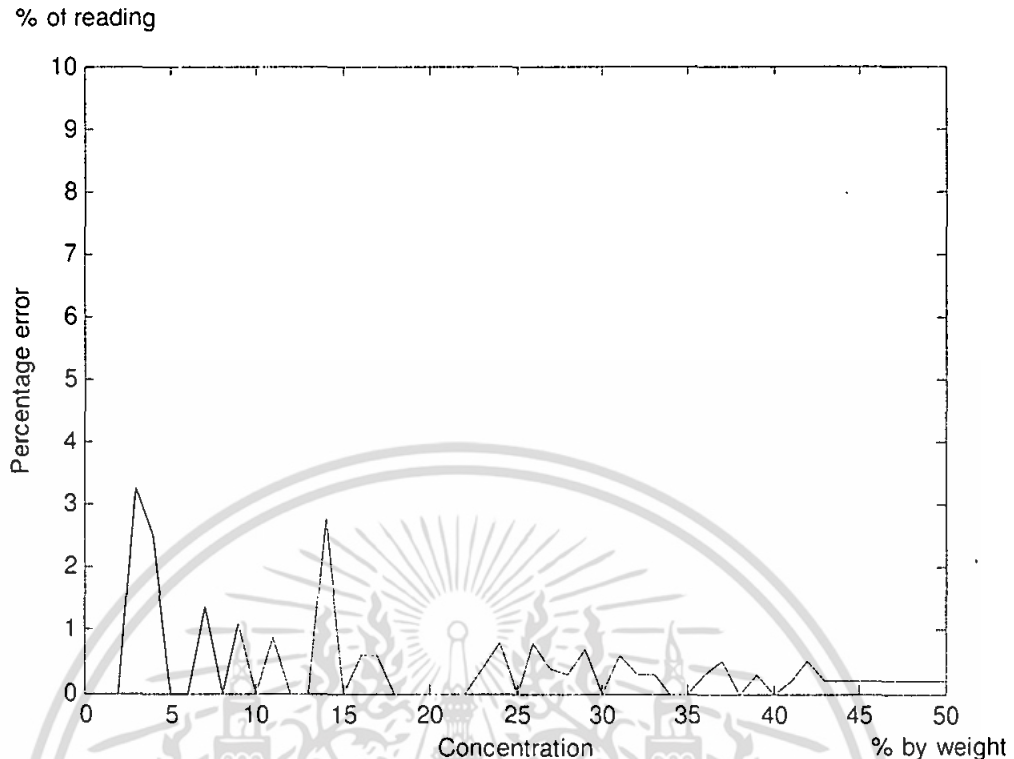
ค่าความเข้มข้นที่กำหนด % by weight	ค่าความนำไฟฟ้า (u_1) $\mu\text{S/cm}$	ค่าพีเอช (u_2) pH	ค่าความเข้มข้นที่วัดได้ (y) % by weight	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด % of reading
39.0	150	11.65	38.9	0.3
40.0	140	11.60	40.0	0.0
41.0	130	11.55	40.9	0.2
42.0	125	11.45	41.8	0.5
43.0	120	11.40	42.9	0.2
44.0	115	11.30	43.9	0.2
45.0	109	11.20	45.1	0.2
46.0	105	11.10	45.9	0.2
47.0	100	11.00	46.9	0.2
48.0	95	10.90	47.9	0.2
49.0	90	10.80	48.9	0.2
50.0	84	10.70	49.9	0.2

* Nonstable: ค่าการทดสอบ ณ ช่วงดังกล่าวไม่เสถียรภาพเนื่องจากค่าพีเอชที่เกิดขึ้นมีปัจจัยมาจากน้ำปราศจากแร่ธาตุมากกว่าปริมาณของสารเคมีที่เป็นตัวถูกละลาย



รูปที่ 5.3 ผลการทดสอบการวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หลังจากการปรับแต่งเมมเบรนซีฟฟิงก์ชั้นโดยอ้างอิงจากความสัมพันธ์ของค่าความนำไฟฟ้าและค่าพีเอชกับค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ดังหัวข้อที่ 4.3.1.1 และ 4.3.1.2 โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าที่กำหนดและค่าที่วัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของการวัด (% of reading) จากตารางที่ 5.1.

จากผลการทดสอบในตารางที่ 5.1 โดยการป้อนค่าค่าความนำไฟฟ้าและค่าพีเอชที่สัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากหัวข้อที่ 4.3.1.1 และ 4.3.1.2 ลงไปในหน้าต่าง Rule Viewer ในโปรแกรม MATLAB จะเห็นว่าค่าการวัดความเข้มข้นที่ได้จากการประมวลผลโดยหลักการที่นำเสนอ นั้นมีความใกล้เคียงกับค่าความเข้มข้นที่กำหนดมากหรือผิดพลาดก็เล็กน้อยมาก ส่วนทางด้านค่าความเข้มข้นของสารละลายที่มีค่าความนำไฟฟ้าและค่าพีเอชที่ตกอยู่ในช่วงคลุมเครือของแมมเบอร์ชิฟฟังก์ชันหรือช่วงที่อินพุตทั้งสองตกอยู่ในเขตทับซ้อนกันระหว่างสอง Linguistic นั้นก็ มีผลลัพธ์ของการประมวลผลโดยการอนุมานที่ใกล้เคียงกับความเข้มข้นที่กำหนดเช่นกัน (ระบบฟuzzy ที่นำเสนอสามารถอนุมานค่าได้ใกล้เคียงกับความเข้มข้นที่กำหนด) เช่น ช่วงที่ความเข้มข้นที่กำหนดเท่ากับ 10.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (% by weight) มีค่าความนำไฟฟ้าและค่าพีเอชเท่ากับ 359 $\mu\text{S}/\text{cm}$ มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตรและ 13.65 pH ตามลำดับ ซึ่งมีค่าอินพุตที่เป็นค่าความนำไฟฟ้านั้นตกอยู่ในช่วงการทับซ้อนของ Linguistics C2 และ C3 ผลลัพธ์ที่ได้คือความเข้มข้นเท่ากับ 10.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (% by weight) ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าความเข้มข้นของสารที่นำมาทดสอบ ส่วนอีกหนึ่งตัวอย่างคือช่วงที่ค่าความเข้มข้นที่กำหนดเท่ากับ 22.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (% by weight) จะเห็นว่าทั้งอินพุตที่เป็นค่าความนำไฟฟ้าและค่าพีเอชนั้นต่างก็ตกอยู่ในช่วงที่ทับซ้อนกันระหว่างสอง Linguistics คือ Linguistics C2 และ C3 สำหรับค่าความนำไฟฟ้าและ Linguistics PH3 และ PH4 สำหรับค่าพีเอช ซึ่งผลลัพธ์ที่ประมวลผลได้ที่เป็นค่าความเข้มข้นนั้นมีค่าเท่ากับ 22.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (% by weight) ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าความเข้มข้นที่กำหนดไว้ จากสองตัวอย่างที่ผ่านมานั้นบ่งบอกว่าการอนุมานของฟuzzyโดยวิธีการของทากาจิ-ซูเกโนนั้นมีประสิทธิภาพในการแก้ไขจุดรอยต่อที่เกิดจากการทับซ้อนกันระหว่างสอง Linguistic หรือจุดรอยต่อระหว่างสองสมการเอาท์พุทโดยทำให้

ค่าเอาต์พุตสุดท้าย (Final Output) นั้นมีการแปรผันตามค่าอินพุตทั้งสองอินพุตอย่างราบเรียบ (Smoothly) ซึ่งทั้งนี้ทั้งนั้นก็คือผลการวัดความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ถูกต้องและเที่ยงตรงนั่นเอง ฉะนั้นจึงบอกได้ว่าการขยายย่านการวัดความเข้มข้นของสารละลายด้วยวิธีที่นำเสนอ นั้นมีประสิทธิภาพและเชื่อถือได้

5.3 ผลการทดสอบการวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยหลักการวัดที่นำเสนอร่วมกับเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าและเครื่องวัดพีเอช

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หลังจากการขยายย่านการวัดด้วยกันอีกสามครั้งซึ่งจะทำการวัดโดยเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าและเครื่องวัดพีเอช และนำข้อมูลที่ได้้นั้นมาเข้าสู่ระบบการประมวลผลที่นำเสนอและหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (% of Reading) ซึ่งครอบคลุมทั้งส่วนการตรวจวัด, ส่วนการประมวลผลและแสดงผล รวมไปถึงค่าความเที่ยงตรงของการวัดทั้งสามครั้งซึ่งมีผลการทดสอบจากทั้งหมดที่กล่าวมาดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบการวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยหลักการที่นำเสนอ (ครั้งที่หนึ่ง)

ค่าความเข้มข้น % by weight	ค่าความนำไฟฟ้า μS/cm	ค่าพีเอช pH	ผลการวัดครั้งที่หนึ่ง % by weight	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด % of reading
0.0	0	-	0.0	0.0
5.0	218	14.12	4.8	-4.0
10.0	359	13.68	10.0	0.0
15.0	405	13.55	14.6	-2.6
20.0	375	13.26	20.0	0.0
25.0	319	13.04	24.7	-1.2
30.0	245	12.62	30.2	0.7
35.0	180	12.01	35.6	1.7
40.0	144	11.69	39.6	-1.0
45.0	104	11.25	46.1	2.4
50.0	85	10.69	49.9	-0.2

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบการวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยหลักการที่นำเสนอ (ครั้งที่สอง)

ค่าความเข้มข้น % by weight	ค่าความนำไฟฟ้า μS/cm	ค่าพีเอช pH	ผลการวัดครั้งที่สอง % by weight	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด % of reading
0.0	0	-	0.0	0.0
5.0	222	14.06	4.9	-2.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

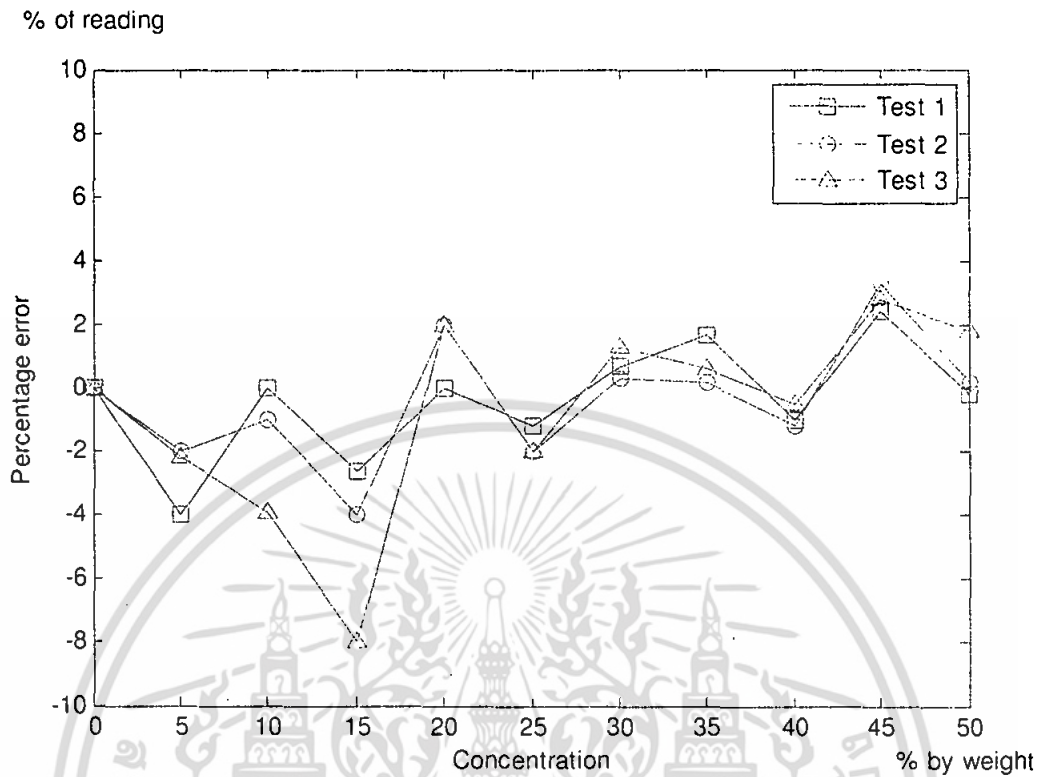
ตารางที่ 5.3 ต่อ

ค่าความเข้มข้น % by weight	ค่าความนำไฟฟ้า $\mu\text{S}/\text{cm}$	ค่าพีเอช pH	ผลการวัดครั้งที่สอง % by weight	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด % of reading
10.0	357	13.63	9.9	-1.0
15.0	412	13.45	14.4	-4.0
20.0	371	13.24	20.4	2.0
25.0	322	13.00	24.5	-2.0
30.0	247	12.66	30.1	0.3
35.0	184	12.03	35.1	0.2
40.0	143	11.69	39.7	-1.2
45.0	102	11.25	46.5	3.3
50.0	84	10.64	50.1	0.2

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบการวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยหลักการที่นำเสนอ (ครั้งที่สาม)

ค่าความเข้มข้น % by weight	ค่าความนำไฟฟ้า $\mu\text{S}/\text{cm}$	ค่าพีเอช pH	ผลการวัดครั้งที่สอง % by weight	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด % of reading
0.0	0	-	0.0	0.0
5.0	220	14.08	4.9	-2.2
10.0	352	13.60	9.6	-3.9
15.0	414	13.44	13.8	-8.0
20.0	371	13.26	20.4	2.0
25.0	322	13.07	24.5	-2.0
30.0	243	12.67	30.4	1.3
35.0	183	11.96	35.2	0.6
40.0	142	11.62	39.8	-0.5
45.0	103	11.28	46.3	2.8
50.0	80	10.61	50.9	1.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



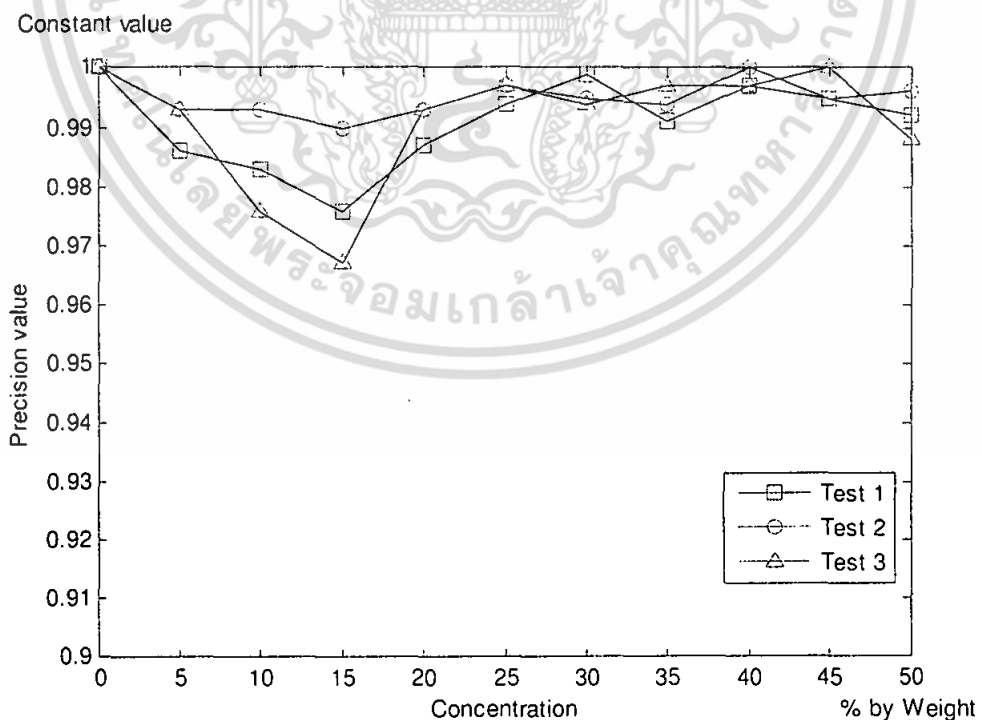
รูปที่ 5.5 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (% of Reading) ของการวัดทั้งสามครั้งในแต่ละความเข้มข้นของสารละลายจากข้อมูลในตารางที่ 5.2, 5.3 และ 5.4

ตารางที่ 5.5 แสดงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสมบูรณ์ของการทดสอบทั้งสามครั้ง

ค่าความเข้มข้น % by weight	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของการวัดทั้งสามครั้ง % of reading
0.0	±0.0
5.0	±4.0
10.0	±3.9
15.0	±8.0
20.0	±2.0
25.0	±2.0
30.0	±1.3
35.0	±1.8
40.0	±1.2
45.0	±3.3
50.0	±1.8

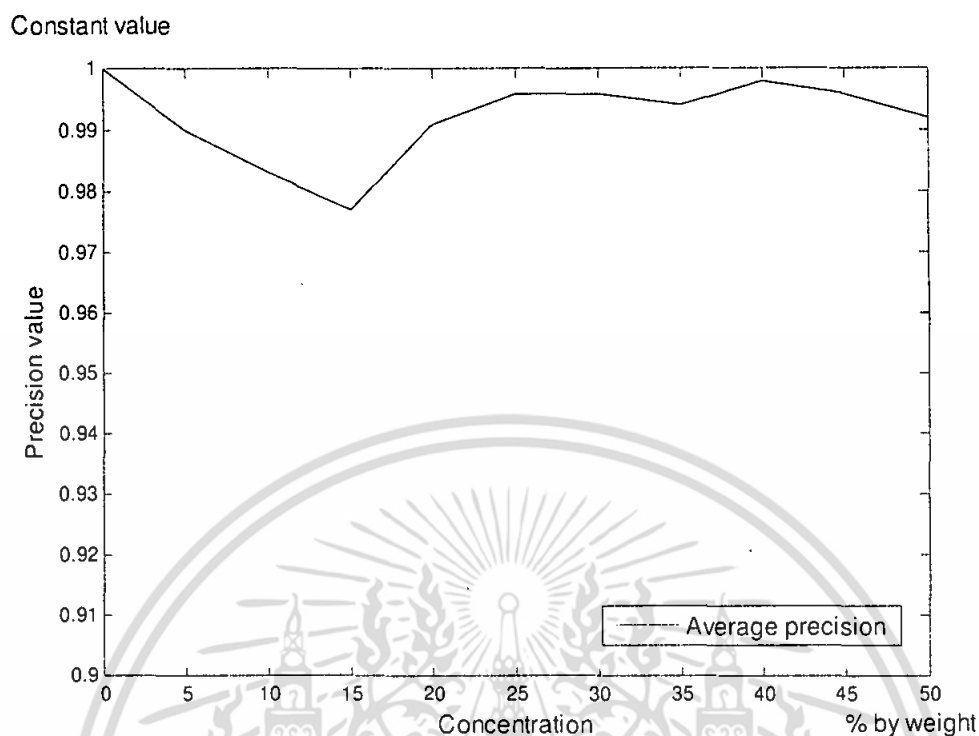
ตารางที่ 5.6 แสดงค่าความเที่ยงตรงของการทดสอบทั้งสามครั้งในแต่ละความเข้มข้นจากตารางที่ 5.2, 5.3 และ 5.4

ค่าความเข้มข้น % by weight	ค่าความเที่ยงตรง ครั้งที่หนึ่ง	ค่าความเที่ยงตรง ครั้งที่สอง	ค่าความเที่ยงตรง ครั้งที่สาม	ค่าความเที่ยง ตรงเฉลี่ย
0.0	1.000	1.000	1.000	1.000
5.0	0.986	0.993	0.993	0.990
10.0	0.982	0.992	0.976	0.983
15.0	0.976	0.990	0.967	0.977
20.0	0.987	0.993	0.993	0.991
25.0	0.994	0.997	0.997	0.996
30.0	0.999	0.995	0.994	0.996
35.0	0.991	0.994	0.997	0.994
40.0	0.997	1.000	0.997	0.998
45.0	0.995	0.995	1.000	0.996
50.0	0.992	0.996	0.988	0.992



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงค่าความเที่ยงตรงของการวัดทั้งสามครั้ง (Precision value) จากตารางที่ 5.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงค่าความเที่ยงตรงเฉลี่ยของการวัดในแต่ละความเข้มข้น (Average Precision Value) จากตารางที่ 5.6

ผลการทดสอบในหัวข้อนี้ได้ทำการทดสอบทั้งหมดสามครั้งครั้งละสิบเอ็ดความเข้มข้นซึ่งเป็นการนำค่าความนำไฟฟ้าและค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แต่ละความเข้มข้นมาทดสอบค่าการวัดโดยโปรแกรม MATLAB ผลการทดสอบจากตารางที่ 5.2, 5.3 และ 5.4 ปรากฏว่าค่าที่วัดได้นั้นมีความผิดพลาดมากขึ้นซึ่งมากกว่าผลการทดสอบในหัวข้อที่ 5.2 เนื่องจากเกิดความผิดพลาดจากสองแหล่งคือ 1) จากการวัดโดยเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าและเครื่องวัดค่าพีเอช 2) จากภาควิชาการประมวลผล (โดยระบบพีซีโลจิกที่นำเสนอ) ซึ่งจากรูปที่ 5.5 จะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่สูงที่สุดคือ 8 เปอร์เซ็นต์ (% of reading) เกิดในการวัดครั้งที่สามที่ความเข้มข้นสิบห้าเปอร์เซ็นต์ ซึ่งเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดโดยรวมนั้นยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ความเที่ยงตรง (Precision) ของการวัดถือว่าเป็นอีกหนึ่งพารามิเตอร์ที่เป็นตัวบ่งบอกคุณภาพของการวัด จากตารางที่ 5.6 คือค่าความเที่ยงตรงที่ได้จากการวัดทั้งสามครั้งจากตารางที่ 5.2, 5.3 และ 5.4 ในแต่ละความเข้มข้น ซึ่งจะเห็นว่าค่าความเที่ยงตรงของการวัดแต่ละครั้งนั้นอยู่ในเกณฑ์ที่ดีหมด โดยค่าความเที่ยงตรงที่ต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.967 ซึ่งได้จากการวัดที่ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (% by weight) ในการทดสอบครั้งที่สาม ซึ่งสรุปได้ว่าค่าความเที่ยงตรงโดยรวมของการวัดอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างดีและยอมรับได้

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัยการนำฟuzzy logic มาใช้ในการขยายย่านการวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยหลักการที่นำเสนอสามารถทำการวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ในย่านการวัดที่สูงขึ้นกว่าหลักการเดิมโดยในส่วนของการออกแบบและผลการทดสอบต่างๆ จากบทที่ 4 และบทที่ 5 สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้ พร้อมกันนี้ยังได้กล่าวถึงแนวทางการพัฒนาต่อในอนาคตด้วย

6.1 การออกแบบและผลการทดสอบ

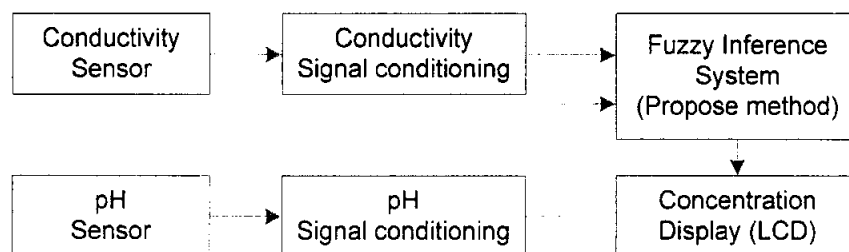
จะเห็นว่าวิธีที่เราได้นำเสนอนี้สามารถขยายย่านการวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยเครื่องวัดค่าความไฟฟ้าได้จริง จากการใช้ฟuzzy logic ในวิธีการของ Takagi-Sugeno (Takagi-sugeno) มาทำการอนุมานค่าเพื่อประมวลการวัดนั้นจะเห็นได้ว่าสามารถทำได้จริงและการอนุมานผลลัพธ์จากอินพุตที่ตกอยู่ในเขตทับซ้อนระหว่างสอง linguistic ก็ทำได้ดีเช่นกัน ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองบนโปรแกรม MATLAB ที่แสดงในหน้าต่าง Rule viewer ก็สามารถพิสูจน์ได้จากการคำนวณจากสมการที่นำเสนอได้เช่นกันโดยแสดงตัวอย่างวิธีการคำนวณดังหัวข้อที่ 4.2.2.6 ในบทที่ 4

จากการทดสอบในบทที่ 5 จะเห็นได้ว่าความแม่นยำของการประมวลผลนั้นก็อยู่ในเกณฑ์ที่ดีมีค่าความผิดพลาดค่อนข้างต่ำ จากการทดสอบจะเห็นว่ามีความผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่ 3.3 % of reading โดยมีผลการทดสอบในหัวข้อ 5.2 ของบทที่ 5 แต่เมื่อนำมาทดสอบการวัดร่วมกับเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าและเครื่องวัดค่าพีเอชจะเห็นได้ว่ามีความผิดพลาดในการวัดมากขึ้นและมีค่าความผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่ 8% of reading จึงเป็นผลให้ความเที่ยงตรงของการวัดในบางจุดนั้นค่อนข้างต่ำโดยมีผลการทดสอบอยู่ในหัวข้อที่ 5.3 ของบทที่ 5

จากการออกแบบและการทดสอบที่ผ่านมาในบทก่อนหน้านี้อีกบ่งบอกได้ว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถขยายย่านการวัดของการวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้แต่ก็ยังมีค่าความผิดพลาดในการวัดอยู่ในระดับหนึ่งซึ่งเป็นจุดที่ต้องพัฒนาต่อในอนาคตเพื่อลดความผิดพลาดของการวัด

6.2 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอหลักการของการขยายย่านการวัดความเข้มข้นของสารละลายโดยมีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นกรณีศึกษาซึ่งได้เริ่มจากการหาความสัมพันธ์ระหว่าง



รูปที่ 6.1 ไตอะแกรมของเครื่องวัดความเข้มข้นจากหลักการที่นำเสนอ (แนวทางการพัฒนาในอนาคต)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ห้ามการเชิงพาณิชย์เท่านั้น มิฉะนั้นผู้ใดที่นำเอกสารไปใช้โดยไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับค่าความนำไฟฟ้าโดยทำการตรวจวัดโดยเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าและความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับค่าพีเอชเช่นกันจากนั้นก็นำค่าที่ได้นั้นป้อนสู่ระบบการอนุมานของฟuzzy logic ที่ออกแบบไว้โดยเป็นการทดสอบแบบการจำลองค่าโดยกระทำการทดลองทุกขั้นตอนบนโปรแกรม MATLAB การทดลองก็จะแสดงบนหน้าต่าง Rule viewer ซึ่งอยู่ในโปรแกรม MATLAB นั้นเอง แนวทางในการพัฒนาต่อของผู้วิจัยคือการนำวิธีการที่นำเสนอขึ้นไปสร้างเป็นเครื่องมือวัดแบบพกพาโดยใช้เซนเซอร์วัดค่าความนำไฟฟ้าและพีเอชเป็นตัววัดความเข้มข้นจากนั้นจะส่งสัญญาณของค่าการวัดทั้งสองพารามิเตอร์เข้าสู่ภาคปรับแต่งสัญญาณเพื่อทำให้ค่าการวัดความนำไฟฟ้าและพีเอชอยู่ในรูปของสัญญาณ 0-5 โวลต์ จากนั้นก็จะส่งต่อไปยังภาคประมวลผลที่มีวิธีการประมวลผลแบบที่เสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้โดยโปรแกรมที่กำหนดการทำงานทั้งหมดจะถูกเขียนลงไมโครคอนโทรลเลอร์และจะแสดงค่าการวัดบนจอแอลซีดี (LCD) ซึ่งแสดงไดอะแกรมการทำงานดังรูปที่ 6.1 และอีกส่วนหนึ่งที่ต้องพัฒนาต่อคือการลดค่าความผิดพลาดในการวัดให้น้อยลงเพื่อให้การวัดนั้นมีความถูกต้อง แม่นยำและเชื่อถือได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] G. W. Ewing and T. S. Light, Analytical Instrumentation Handbook. 2nd ed., Marcel Dekker , 1990.
- [2] C. Westlake, Electrolytic Conductivity Measurement, Analytical Instrumentation, ABB Company Limited, 1997.
- [3] R. Rosenthal, Process Instrument and Control Handbook. McGraw-Hill, New York, 1957.
- [4] C. Westlake, Electrolytic pH Measurement, Analytical Instrumentation, ABB Company Limited, 1996.
- [5] K. M. Passino, S. Yurkovich , Fuzzy Control, Addison Wesley Longman, Inc, California, 1997
- [6] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to Modeling and control," IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 15, pp.116-132, 1985.
- [7] S.N. Sivanandam, S. Sumathi, and S.N. Deepa, "Introduction to Fuzzy logic using MATLAB" Springer-Verlag, Berlin, 2007.
- [8] Ö. Kisi, "Evolutionary fuzzy models for river suspended sediment Concentration estimation," Journal of Hydrology, Vol. 372, Issues 1-4, 15 June 2009.
- [9] Fuzzy Logic Toolbox User's Guide, MATLAB 7.4, The Math Works. Inc, 1995-2011.
- [10] Advantage Series™ Two-Wire, Four-Electrode Conductivity Transmitter Manual, ABB Instrumentation, ABB Limited, 2004.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.
โปรแกรม MATLAB (Fuzzy Logic Toolbox) ที่ใช้ในการวิเคราะห์
ในวิทยานิพนธ์

```
[System]
Name='NaOH Measurement'
Type='sugeno'
Version=2.0
NumInputs=2
NumOutputs=1
NumRules=10
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='prod'
AggMethod='sum'
DefuzzMethod='wtaver'

[Input1]
Name='Conductivity'
Range=[0 450]
NumMFs=4
MF1='C1':'trimf',[0 0 260]
MF2='C2':'trimf',[210 280 380]
MF3='C3':'trimf',[350 380 410]
MF4='C4':'trimf',[400 450 450]

[Input2]
Name='pH'
Range=[10 14.5]
NumMFs=6
MF1='pH1':'trimf',[10 10 11.6]
MF2='pH2':'trimf',[11.4 11.8 12.7]
MF3='pH3':'trimf',[12 12.6 13.2]
MF4='pH4':'trimf',[13.1 13.3 13.4]
MF5='pH5':'trimf',[13.3 13.5 13.7]
MF6='pH6':'trimf',[13.45 14.5 14.5]
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[Output1]

Name='Concentration'

Range=[0 1]

NumMFs=10

MF1='Output1':'linear',[0.0227 0 0]

MF2='Output2':'linear',[0.036 0 -3.14]

MF3='Output3':'linear',[0.0667 0 -13.7]

MF4='Output4':'linear',[0.2 0 -67]

MF5='Output5':'linear',[-0.3 0 138]

MF6='Output6':'linear',[-0.1 0 57.5]

MF7='Output7':'linear',[-0.0769 0 49.22]

MF8='Output8':'linear',[-0.111 0 55.55]

MF9='Output9':'linear',[-0.201 0 67]

MF10='Output10':'linear',[-0.0769 0 49.22]

[Rules]

1 6, 1 (1) : 1

2 6, 2 (1) : 1

3 6, 3 (1) : 1

4 6, 4 (1) : 1

4 5, 5 (1) : 1

3 4, 6 (1) : 1

2 3, 7 (1) : 1

1 2, 8 (1) : 1

1 1, 9 (1) : 1

1 3, 10 (1) : 1

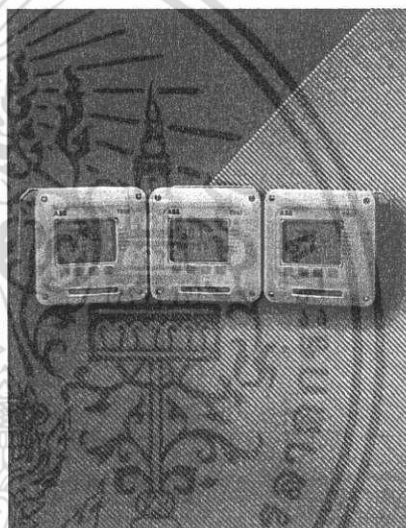
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.
รายละเอียดของเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ

Data Sheet
D-NCA-TB82_4

Analytical Instruments
Two-Wire Conductivity Transmitters
Model TB82 Series

- **Designed With the Real World in Mind**
Easy to use menus guide the operator through set-up, calibration and maintenance
- **Two-Electrode (Model TB82TE), Four-Electrode (Model TB82EC) or Toroidal (Model TB82TC)**
Make measurements in ultra-pure or high conductivity applications
- **Advanced Digital Communications**
Available with PROFIBUS[®] PA, FOUNDATION[™] Fieldbus or HART communications
- **Industrially Hardened Design**
Transmitters that withstands the harshest environments
- **Resilient**
Conductivity sensors with designs capable of withstanding the toughest chemical processes at extreme temperatures and pressures
- **Large, Easy-to-Read Display**
Shows primary measurement along with user-selectable secondary display (temperature, output current or sensor input)
- **Industrial[™] Level 1 Conformance**
Seamlessly integrates onto existing ABB control systems. Also certified for use on Delta V[®] control platform and may be used on nearly every available control platform.
- **Programmable Security Codes**
Prevents unauthorized modifications to transmitter configuration and calibration
- **Intrinsically Safe, Non-incendive Design**
Permits use in hazardous areas



Series TB82
Two Wire Conductivity Transmitters



ABB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

General Description

The ABB TB82 Series of two-wire conductivity transmitters are available in three base configurations to utilize ABB's two-electrode, four-electrode or toroidal (electrodeless) sensors, allowing for installations ranging from ultra-pure water to the most difficult chemical applications.

The TB82 Series is available with traditional programmable outputs or with advanced digital communications utilizing FOUNDATION Fieldbus (FF), PROFIBUS PA (PA) or HART.

Setup, maintenance and operation in the field is simple. Easy to follow instructions appear above each Smart Key. The user-friendly interface provides for straightforward transmitter configuration and calibration.

A unique secondary display clearly defines each menu option when programming the transmitters. During normal operation, the secondary display may be configured to show process temperature, current output, concentration type, raw conductivity or software revision depending upon configuration.

The TB82 series transmitters meet current CE, NEMA 4X, IP65, CSA, FM, ATEX and FISCO requirements.

Sensor Compatibility and Ranges

Sensor compatibility is determined by the TB82 model number. The TB82 Series is available in three base configurations. The TB82TE connects to ABB 2-electrode sensors, TB82EC to ABB 4-electrode sensors, and TB82TC to ABB toroidal sensors. A menu choice during programming makes changing from one cell constant or sensor group simple; no jumpers or manual adjustments required.

Temperature Compensation

The TB82 is compatible with a variety of automatic temperature compensation elements. See Specification section.

Programmable Security Code

The transmitter has a three-digit security code to prevent unauthorized modifications that may be applied to any combination of the following menus: Calibration, Output/ Hold, Security, and Configure.

Basic or Advanced Programming Modes

(FOUNDATION Fieldbus, PROFIBUS PA models and HART available in Advanced mode only)

Available with either Basic or Advanced programming modes at time of purchase, the Advanced mode offers an expanded feature set for more complex operations, such as:

- **Nonlinear and concentration analyzer modes**

Available Mode	TB82TE	TB82EC	TB82TC
0 to 15% NaOH	*	*	*
0 to 20% NaCl	*	*	*
0 to 18% HCl	*	*	*
0 to 20% H ₂ SO ₄	*	*	*
User-defined	*	*	*

- **Advance temperature compensation modes**

Available Mode	TB82TE	TB82EC	TB82TC
0 to 15% NaOH	*	*	*
0 to 20% NaCl	*	*	*
0 to 18% HCl	*	*	*
0 to 20% H ₂ SO ₄	*	*	*
User-defined	*	*	*
Pure water neutral salt	*	*	*
Pure water trace base	*	*	*
Pure water trace acid	*	*	*

- **Analog pulse diagnostic output**

Impresses a user-defined 0.16 to 16 mA pulse on the 4 to 20 mA output to alert operator of a fault condition. (Not available on transmitters with digital communication.)

Diagnostics

The transmitter constantly monitors both itself and the sensor to ensure reliability and accuracy. Upon detection of a diagnostic condition, the transmitter provides diagnostic notification by flashing FAULT on the display and supplying a pulse on the analog output (if activated on non-HART devices).

Transmitters equipped with Foundation Fieldbus or PROFIBUS PA send a complete diagnostic description over the network to the controller. This allows for easy, immediate troubleshooting. Pressing FAULT info on the transmitter provides a short description and fault codes on the secondary display. The FAULT icon remains active until problem has been resolved.

Adjustable Damping

Damping is helpful in process environments where noise is present. It is a capacitive type lag where reaction to any signal change is slowed according to the entered time constant. For example, the response to a step input change reaches approximately 63 percent of its final value in five seconds for five seconds of damping.

Communications

FOUNDATION Fieldbus (FF) addresses modern instrument users' needs for flexibility and cost savings, while providing a whole host of additional features.

- Measurement variable quality and diagnostic conditions transmitted during each scheduled data transfer
- Easily configured remotely or locally
- Transmission of multiple process variables utilizes two Analog Input Blocks (AI)
- Transmitter characteristics such as device name, manufacturer and serial number via a Standard Resource Block
- Configuration and calibration capability via custom Enhanced Transducer Block
- Provides calibration Methods on supported host tools and systems

PROFIBUS PA (PA) is a standardized, open, digital communications system for process automation.

- Configuration, calibration and trending available via a Device Type Manager (DTM) when used on compatible host tools and systems
- Measurement variable quality and diagnostic conditions transmitted during each scheduled data transfer
- Remote and local configuration capability
- Choice of Standard Analyzer Profile or Manufacturer Specific Profile – conforms to PROFIBUS PA Profile requirements v. 3.0
- GSD files available on all product variations
- Utilizes one Physical, one Transducer, and two Analog Input Blocks

HART communications protocol provide remote programming via any HART compatible primary or secondary communications device.

- Digital communications through a low-level modulation superimposed on the standard 4-to-20 mA current loop
- Accommodates Universal, Common Practice and Device Specific Command Sets for functionality within HART networks and for use with HART hand-held terminals
- Driver files for various host systems and tools available

Calibration

The TB82 features a simple and straightforward one-point or two-point calibration of the primary process variable and temperature. Calibration data may be manually edited.

Specifications**Type**

2-wire Conductivity Transmitter	
2-Electrode	Model TB82TE
4-Electrode	Model TB82EC
Toroidal	Model TB82TC

Input Sensor Types

TB82TE:	ABB 2-electrode sensors
TB82EC:	ABB 4-electrode sensors
TB82TC:	ABB toroidal sensors

Input Temperature Compensation Types

Temperature Element	TB82TE	TB82EC	TB82TC
Pt 100	*	*	*
Pt 1000	*	*	*
3 k Ω RTD	*	*	*
4.75 k Ω RTD	*	*	*

Temperature Display Range

-20° to 300°C (-4° to 572°F)

Advance Temperature Compensation Modes

Mode	TB82TE	TB82EC	TB82TC
0 to 15% NaOH	*	*	*
0 to 20% NaCl	*	*	*
0 to 18% HCl	*	*	*
0 to 20% H ₂ SO ₄	*	*	*
User defined	*	*	*
Pure water neutral salt	*	*	*
Pure water trace base	*	*	*
Pure water trace acid	*	*	*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Measurement Ranges

2-Electrode Conductivity - Model TB82TE

Cell Constant	Measurement Range	Display Resolution	Auto-range
0.01	0 to 199.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$	0.001 $\mu\text{S}/\text{cm}$	1.999 to 19.99 to 199.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$
0.10	0 to 1999 $\mu\text{S}/\text{cm}$	0.01 $\mu\text{S}/\text{cm}$	19.99 to 199.9 to 1999 $\mu\text{S}/\text{cm}$
1.00	0 to 19.99 mS/cm	0.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$	199.9 to 1999 $\mu\text{S}/\text{cm}$ to 19.99 mS/cm

Output Minimum Span

Sensor	TB82TE	TB82EC	TB82TC
Cell Constant 0.01	1 $\mu\text{S}/\text{cm}$		
Cell Constant 0.10	10 $\mu\text{S}/\text{cm}$		
Cell Constant 1.00	100 $\mu\text{S}/\text{cm}$		
Group A		100 $\mu\text{S}/\text{cm}$	
Group B		10 $\mu\text{S}/\text{cm}$	
Toroidal			100 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Concentration: 5% of maximum configured concentration

Output Maximum Span (Full scale settings)

Sensor	TB82TE	TB82EC	TB82TC
Cell Constant 0.01	199.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$		
Cell Constant 0.10	1999 $\mu\text{S}/\text{cm}$		
Cell Constant 1.00	19.99 mS/cm		
Group A		1999 $\mu\text{S}/\text{cm}$	
Group B		199.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$	
Toroidal			1999 mS/cm

Concentration: 1999 digits

4-Electrode Conductivity - Model TB82EC

Sensor Group	Measurement Range	Display Resolution	Auto-range
A	0 to 1999 mS/cm	0.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$	199.9 to 1999 $\mu\text{S}/\text{cm}$ to 19.99 to 199.9 to 1999 mS/cm
B	0 to 1999 $\mu\text{S}/\text{cm}$	0.01 $\mu\text{S}/\text{cm}$	19.99 to 199.9 to 1999 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Toroidal Conductivity - Model TB82TC

Sensor	Measurement Range	Display Resolution	Auto-range
Toroidal	0 to 1999 mS/cm	0.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$	199.9 to 1999 $\mu\text{S}/\text{cm}$ to 19.99 to 199.9 to 1999 mS/cm

Accuracy

Display: $\pm 0.5\%$ of measurement range per decade (TB82EC, TC)
 $\pm 1.0\%$ of measurement range per decade (TB82TE)
 Output: $\pm 0.02\text{ mA}$
 Temperature: 1°C or 1°F

Repeatability

Display: $\pm 0.5\%$ of measurement range per decade (TB82EC & TC)
 $\pm 1.0\%$ of measurement range per decade (TB82TE)
 Output: $\pm 0.02\text{ mA}$
 Temperature: 1°C to 1°F

Stability

Display: ± 2 LSD typical, ± 5 LSD max
 Output: $\pm 0.01\text{ mA}$
 Temperature: 1°C or 1°F

Output

Isolated 4-20 mA, Linear and Non-linear (non-fieldbus models)

Damping

Adjustable: 0.0 to 99.9 seconds

Environmental (Temperature)

Operating: -20° to 60°C (-4° to 140°F)
 LCD: -20° to 60°C (-4° to 140°F)
 Storage: -40° to 70°C (-40° to 156°F)
 Humidity: up to 95% RH

Enclosure

NEMA 4X and IP65, anodized aluminum alloy with polyester powder coating

Size (1/2 DIN)

H x W x D: 144.0 x 144.0 x 171.0 mm
 (5.67 x 5.67 x 6.73 in.)
 Min. panel depth: 144.8 mm (5.70 in.)
 Max. panel thickness: 9.5 mm (0.38 in.)
 Panel cutout:
 135.4 [+1.3, -0.8] by 135.4 [+1.3, -0.8] mm
 (5.33 [+0.05, -0.03] by 5.33 [+0.05, -0.03] in.)
 Weight:
 1.9 kg (4.2 lb)
 3.4 kg (7.5 lb) with pipe mounting hardware

Conduit Connections

Two (2) each: 22.2 mm (0.875 in.) holes in enclosure that accepts 1/2 inch hubs

Lightning Suppressor

Installed integral to the transmitter to suppress lightning induced transients. Tested to suppress 10 successive 8 by 20- μsec pulses with a peak value of 20 kA (reference IEEE C62.41)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Power Requirements

Standard:	14.0 to 53 VDC (14.0-42 VDC for certified applications)
HART	14 to 53 VDC (14-42 VDC for certified applications). For HART communication, a 250 Ω resistor is required. 19 VDC minimum voltage required. 14 VDC required for lift-off.
Foundation Fieldbus & PROFIBUS PA bus powered:	9-32 VDC (non-I.S. model) 9-24 VDC (I.S. model) 15 mA quiescent current consumption

Agency Certifications ¹

ATEX 100A

ATEX Category II 1G; EEX ia, Zone 1; Group IIC, T4 when used with appropriate barriers.

Canadian Standards Association (CSA)

Intrinsic safety: Class I, II, III, Division 1, applicable Groups A, B, C, D, E, F and G; when used with appropriate barriers. T3C.

Non-incendive: Class I, Division 2, Groups A, B, C, and D; Class II, Division 2, Groups E, F and G; Class III, Division 2.

Factory Mutual (FM)

Intrinsic Safety: Class I, II, III; Division 1; applicable Groups A, B, C, D, E, F and G; when used with appropriate barriers. T3C (Max ambient Temperature: 60° C).

Non-incendive: Class I, Division 2, Groups A, B, C, and D; Class II, Division 2, Groups F and G; Class III, Division 2. T5.

Fieldbus Intrinsically Safe Concept (FISCO)

Fieldbus products (FF and PA) meet the requirements for the FISCO model.

EMC Requirements

CE Certified – complies with all applicable European Community product requirements, specifically those required to display the CE markings on the product nameplate.

Note 1 - Contact factory on availability.

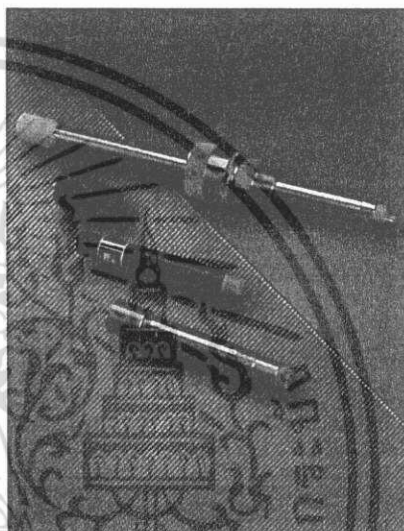
Data Sheet
D-NCC-TB4_D

Analytical Instruments

Endura™ 4-Electrode Conductivity Sensors for Process Monitoring

Endura TB4

- **4-electrode measurement:** Increases accuracy, stability, flexibility, and security
- **Highest temperature and pressure ratings in the industry**
- **Corrosion resistant stainless steel electrodes:** For all conductivity ranges without polarization
- **Smaller measurement electrodes:** High current densities are permissible due to feedback circuitry and polarization compensation.
- **Wide rangeability with excellent linearity:** Compensates for polarization effects
- **Overcome and compensate for fouling effects:** Reduces frequency of cleaning
- **Extent of fouling notification and fouled sensor relay:** Makes it possible for conductivity instrument to notify of dirty sensor condition
- **Integral automatic temperature compensators**
- **Rugged construction and materials**
- **Installation flexibility:** Inline, Twist-lock, Immersion, Tri-Clamp, Flow-cell, TB18 Safe-T-Clean Valve & Retractable Hot-Tap
- **Interchangeable measurement tips**
- **Suitable for all measurements:** From low to high solution concentrations



Endura 4-Electrode Conductivity Sensors for Process Monitoring

ABB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Endura 4-Electrode Conductivity Sensors for Process Monitoring

ABB is the industry leader in advancements resulting in the increased accuracy, dependability, and environmental limits of on-stream conductivity sensors. The conductivity sensor line permits resolutions of 0.001 microsiemens per centimeter, full-scale ranges of one siemen per centimeter, pressure ratings to 2,068 kilopascals (300 psig), and temperature ratings of 200-degrees Celsius (392-degrees Fahrenheit). Group A sensors have a measurement range spanning five decades of conductivity or TDS concentration.

The ABB 4-electrode conductivity system is a patented concept unique in the process industry. It provides ultimate sampling flexibility, sensor reliability, rangeability, and helpful operating and maintenance information. Smart circuitry detects and compensates for the buildup of deposits, and scale and corrosion products on the sensor. It also provides an alarm before the interference becomes so serious as to affect the conductivity signal. The dirty sensor alarm output is a contact closure, a digital signal, or any other easily observed format.

Feedback from the high impedance amplifier causes the oscillator to vary its amplitude output to maintain a constant excitation field, created by the current electrodes in the solution, as sensed by the potential electrodes. The current required to create the excitation field passes through the load resistor and is sensed as a voltage drop by the conductivity sensing circuit. The amount of excitation current required to maintain a constant excitation field in a solution is directly proportional to conductivity. If fouling of the electrodes occurs, the AC potential at the electrodes increases to drive the excitation through the deposits to maintain the constant excitation field. The increase in potential at the current electrodes compensates for the increase in interface resistance at them. The high impedance amplifier draws no current; therefore, the voltage drop across deposits on the potential electrodes is negligible and contributes no significant error.

The dirty sensor alarm circuit measures the oscillator amplitude. The amplitude stays below a predefined threshold during normal operation. If the amplitude exceeds that threshold, the conductivity measuring instrument notifies, via an alarm, readout, or other method, that the sensor needs cleaning.

Anti-Fouling 4-Electrode Circuit

Figure 1 shows the 4-electrode conductivity system which consists of two current electrodes and two potential electrodes, a high impedance amplifier providing feedback to an amplitude-controlled oscillator, a conductivity sensing circuit with associated load resistor and display, and a dirty sensor alarm circuit.

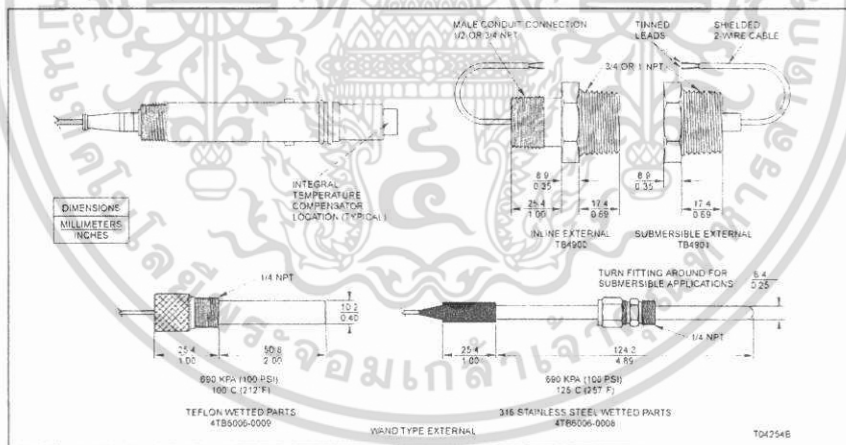


Figure 1. 4-Electrode Conductivity System

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sensor Groups and Ranges

There are two groups of 4-electrode conductivity sensors. The rangeability of any sensor is defined by the physical structure of the electrodes and the electronic circuitry of the associated instrument. The physical structure of the electrodes determines the sensor cell constant; however, the concept of sensor cell constants is more applicable to two-electrode sensors. Unlike 4-electrode sensors, as manufactured by ABB, the rangeability of two-electrode sensors is restricted by current density and polarization. 4-electrode sensors are not limited by these factors. The result is a virtual dimensionless sensor constant with wide rangeability.

The actual measurement range is determined by the sensor group and the instrument range or range factor in use. All ABB conductivity instruments are multirange types. This provides numerous application options for any sensor and instrument combination.

ABB 4-electrode conductivity sensors are arranged in two groups, loosely adhering to the sensor cell constant structure in the following manner:

- **Group A:** General purpose for zero to 100 to zero to 2,000,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- **Group B:** Low to medium range for zero to 10,00 to zero to 2,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Table 1 provides a list of sensor and ranges.

Table 1. Ranges for conductivity instruments

Sensor Groups and Sensors		Measurement Range
		TB82EC, TB84EC
A	TB451, TB454, TB457, TB461, TB464A, TB468, TB471	0.00-2,000,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (autoranging)
B	TB452, TB458, TB464B, TB465, TB475	0.00-2,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (autoranging)

Table 2. Ratings and Mounting Arrangements for Conductivity Sensors

Sensor	Max. Temp.		Max. Pressure ¹		Mounting Arrangement
	°C	°F	KPag	psig	
TB451, TB452	140	284	68.9	100	Sterilizable
TB454	100	212	68.9	100	Twist Lock insertion, submersion
TB457, TB458	175	347	86.1	125	Sterilizable
TB461, TB465	200	392	1.550	225	Direct insertion, submersion, separate flow cell
			68.9	100	Ball valve insertion
TB464	200	392	1.378	200	Sterilizable, submersion, separate flow cell, TB18 Safe-T-Clean valve
					100
TB468	140	284	27.5	40	Hot tap, ball valve insertion
	200	392	2.068	300	High pressure retractable hot tap, ball valve insertion

Note 1. Temperature effects maximum allowable pressure. Refer to individual sensor specifications for details.

Temperature Compensation

ABB conductivity sensors are available with temperature compensators either integral to or separate from them. The type of temperature compensator must be supported by the instrument. AX4 series microprocessor-based instruments accept 3k Ω , Pt 100 and Pt 1000 temperature compensation. Type TB82EC and TB84EC microprocessor-based instruments have the option of using a 3k Ω or Pt 100 RTD.

Figure 2 shows the temperature compensators. The effect of temperature on conductivity is significant; therefore, for measurements to be accurate, conductivity must be compensated to a reference temperature (typically 25°C).

Flow Cells

The flow cell (Fig. 3) is available for both conductivity and pH sensors. It is designed for use with the Endura TB264 Two-Electrode Conductivity Sensors, Endura TB464 4-Electrode Conductivity Sensors, and Endura TB(X)561 pH/ORP Sensors. Multiple inlet and outlet ports provide flexibility with installation, calibration, and mounting configurations. The sensor can be inserted and removed from the flow cell quickly and easily without disconnecting the sensor from the instrument or junction box.

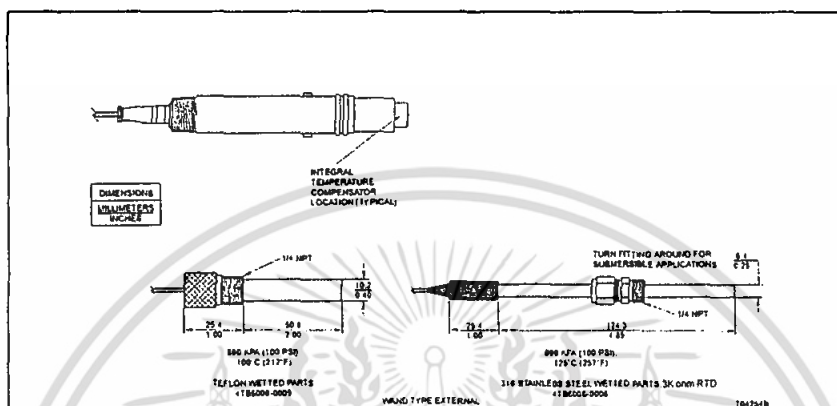


Figure 2. Temperature Compensators

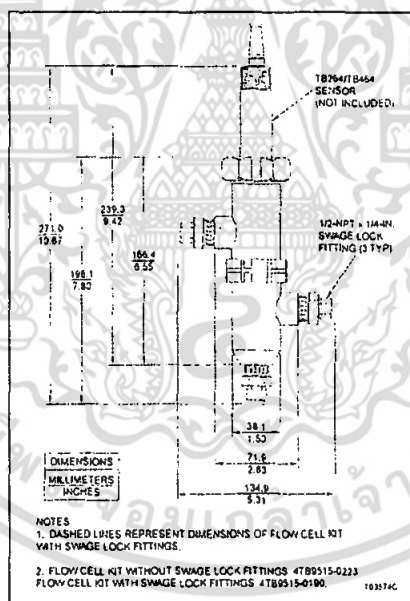


Figure 3. Flow Cell Kits

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Laboratory pH Meters

Along with weight and temperature measurements, pH is the most commonly measured parameter in the laboratory. With inoLab®, WTW offers a family of laboratory instruments that meet all application requirements from routine measurements to research applications.

inoLab® pH 720/7200*

- Routine meter for precise measurement values (0.001 pH)
- Large display
- Easy-to-clean membrane keypad

Simple and reliable

Easy-to-use routine laboratory pH/mV meter with large multi-functional display for pH and temperature, automatic temperature compensation, and MultiCal® calibration system. For battery or line power operation.



inoLab® pH 730/7300*

- Supports all GLP needs
- Optional built-in printer
- Data logger with memory for 800 data sets

Compact and precise

Precision pH/mV meter with large multifunctional display for pH and temperature, automatic temperature compensation, MultiCal® calibration system, built-in measurement storage with GLP-conforming documentation and digital interface. Shown with optional built-in printer.



* North American version

For information visit www.WTW.com for a customer care center near you or inside US: call WTW 800 645 5999.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



VARIO® & pH Electrodes

SenTix® pH electrodes for every application

SenTix® quality electrodes by WTW – convenient measurement and precision.

- Low-resistance glass membranes guarantee stable measuring signals even at low temperatures.
- Silver ion-free reference electrolyte, together with the proven platinum wire diaphragm, prevent measurement problems by precipitating silver compounds.
- Functional slide for accessing the refill opening for electrodes with liquid electrolyte.
- Typical connections: Waterproof DIN connector, BNC connector, fixed cable (1 or 3 m, 3 ft. or 9 ft.) or connector head (S7 or SMEK).

IDS pH/ORP electrodes, see page 14



Low-maintenance pH electrodes with gel electrolyte

Ideal for portable measurements, as well as for routine measurements in-the-laboratory. With or without built-in temperature probe all electrodes have robust plastic shafts and a low-maintenance gel reference system.

New: The SenTix® F with temperature-stable iodine/iodide system, specifically for measurements at changing temperature conditions.



SenTix® pH Electrodes

Model	SenTix® 20 103 630	SenTix® 21 103 631	SenTix® 21-3 103 632	SenTix® 22 103 633	SenTix® 41 103 635	SenTix® 41-3 103 636	SenTix® 42 103 637	SenTix® F 103 676	SenTix® F-3 103 677
Measuring range pH		0 ... 14 pH				0 ... 14 pH		0 ... 14 pH	
Operating range °C (°F)		0 ... 80 °C (32 ... 176 °F)				0 ... 80 °C (32 ... 176 °F)		0 ... 80 °C (32 ... 176 °F)	
Reference electrolyte		Cu				Gel		Gel	
Membrane shape		Cylindrical				Cylindrical		Cylindrical	
Membrane resistance at 25 °C (77 °F)		<1 GΩ				<1 GΩ		<1 GΩ	
Diaphragm		Fiber				Fiber		Fiber	
Shaft material		Plastic				Plastic		Plastic	
Shaft length**		120 mm (4.72 in.)				120 mm (4.72 in.)		120 mm (4.72 in.)	
Shaft Ø***		12 mm (0.47 in.)				12 mm (0.47 in.)		12 mm (0.47 in.)	
Temperature probe						Built-in NTC (30 KΩ)		Built-in NTC (30 KΩ)	
Connection	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
Electrode cable	①*	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
Electrode plug	①/⑦	②	③	④	⑤/⑩	⑥/⑩	⑦/⑩	⑧/⑩	⑨/⑩

* not included

** ±2 mm/±0.08 in.

*** ±0.5 mm/±0.02 in.

①: Plug head, ②: Fixed cable, ③: AS/DIN, AS/DIN-3 or AS/BNC, ④: Cable length 1 m (3 ft.), ⑤: Cable length 3 m (9 ft.), ⑥: DIN plug, ⑦: BNC plug, ⑧: Banana plug

For information visit www.WTW.com for a customer care center near you or inside US: call WTW 800 645 5999.

Parameter

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

pH

ORP

ภาคผนวก ค.

สมการในการคำนวณเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดและค่าความเที่ยงตรง

$$S.D. = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{N}}$$

$$PRECISION = 1 - \left| \frac{X_n - \bar{X}_n}{X_n} \right|$$

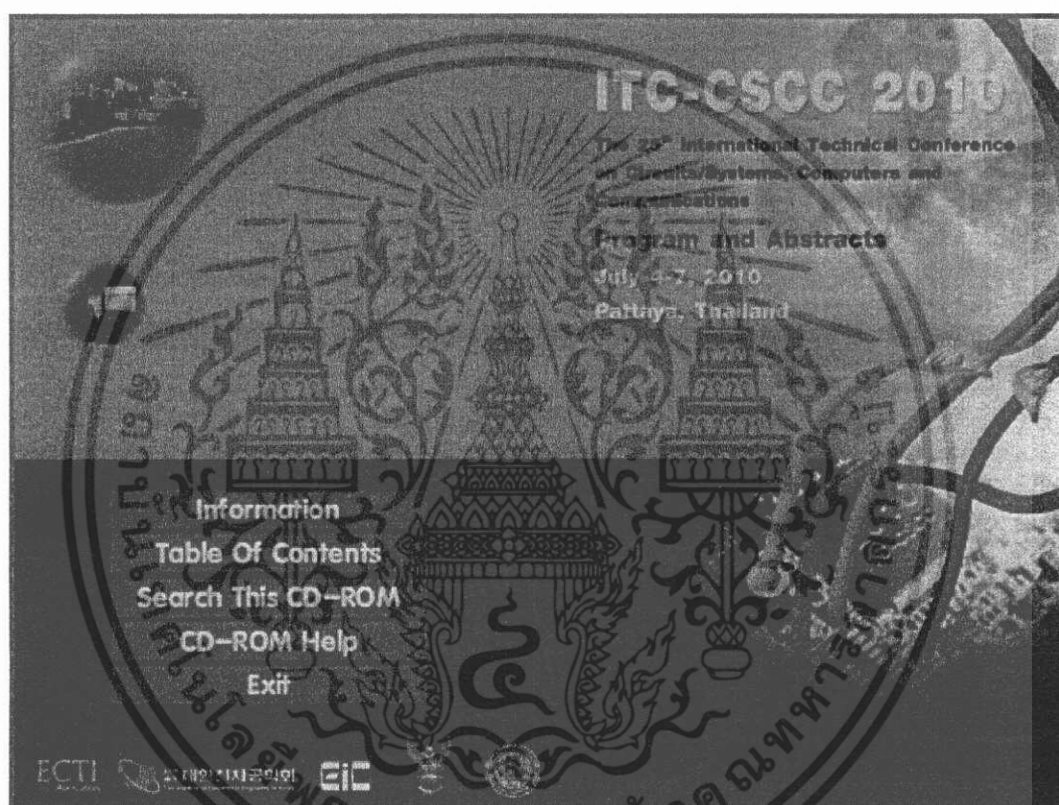
$$PERCENTAGE ERROR = \left| \frac{Y_n - X_n}{Y_n} \right| \times 100$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.
ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

W. Wongsaraj, K. Dejhan, and N. Thong-un, "Range Extension of NaOH Solution for Concentration Measurement Using Fuzzy Logic Inference Approach," The 25th International Technical Conference on Circuit/System, Computer and Communications, July 4-7, 2010, Pattaya, Thailand



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Range Extension of NaOH Solution for Concentration Measurement Using Fuzzy Logic Inference Approach

Wongsakorn Wongsaroj¹, Kobchai Dejhan¹, Natee Thong-un²

¹Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520 Thailand

²Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok 10800 Thailand

Email: wongsakon_@hotmail.com, kobchai@telecom.kmitl.ac.th, thnatee@yahoo.co.th

ABSTRACT

This paper proposes a methodology for improving the limited measurement range of NaOH solution caused directly from conductivity probes. The principle of this paper uses multiple sensors that are conductivity and pH probes to obtain the input data and solving the solution by using the fuzzy inference system or Takagi-Sugeno model. The surface output can obviously show that this proposed inference system is able to measure the concentration of NaOH solution with full scale of measurement range.

Index Terms— Fuzzy inference system, Takagi-Sugeno model, conductivity, pH, NaOH solution.

1. INTRODUCTION

Conductivity is a characteristic to show the ability of the electric current. It is used in many different industries, particularly for water treatment, boilers, cooling towers, leak detection in heat exchanger, and concentration inorganic chemical, as a means of measuring water quality or the concentration of a chemical solution.

Although, the conductivity may be very useful and necessary for using in industries, yet this quantity also has a few disadvantages that are electrodes easily fouled accuracy across narrow range of conductivity, and the saturation problem of concentration. In dilute solutions the electrolytic conductivity will increase as the ionic species higher. However, if solution becomes more concentrate, the interionic attraction between ionic species may result in an effective decrease in dissociation. This phenomenon has the effect in concentrated solution of causing a decrease of the conductance and conductivity will saturate at a concentration level then it becomes same value again (i.e. HCl and NaOH) as in Fig. 1. This conflict extremely effects with using applications for wide ranges.

The weak point of conductivity was discussed, thus, this paper wishes to extend the measurement range. Therefore, the researchers select NaOH solution to create a case study

for solving this limited measurement range. Practically, not only conductivity sensors but also pH sensors can used to measure the concentration of many identically solutions. Nevertheless, they are useless in the industrial section because of its nonlinearity, narrow range and high uncertainty during 0-5 % of NaOH as shown in Fig. 2. Thereby, it is needed to implement the efficient reasonable inference system in order to combine two inputs and displaying the output correctly.

The fuzzy logic system has been proposed by much research paper such as the references [2-4], concerns about the signal processing to solve the nonlinear problem. Consequently, this paper selects to use this mapping technique to manage the obtained input of both conductivity and pH values, then inferring them into the exactly values. This experiment, the instruments are used to collect the data of conductivity and pH values of NaOH solution are conductivity instrument model ABB TB468 series and pH instrument model WTW Inolab TH level 1, which they are popular and convince in several applications.

2. FUZZY INFERENCE SYSTEM OF CONCENTRATION

Fuzzy inference system is a mapping calculation method based on fuzzy logic theory. The basic structure of fuzzy inference system consists of three mainly significant parts: a fuzzification that individually identifies each membership function which fuzzy rules obtain, a rule based on the containing series of fuzzy rules which are match between input and output, and finally is the defuzzification that provides the reasonably inferable output or conclusion according to the fuzzy rules and give the fact. This paper uses Takagi-Sugeno model [5-6] as the inference mechanism which can be easily defined: if x is A and y is B , then $z = f(x,y)$, where A and B are the premises of the fuzzy set and $z = f(x,y)$ is the functional output of the conclusion part formed from the polynomial of x and y inputs. The membership functions of two input variables, conductivity and pH parameters, proposed in this inference system

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

similarly with the triangle membership function for the fuzzification part.

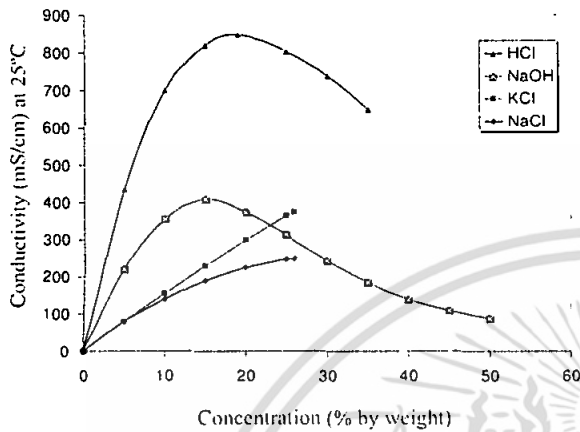


Fig. 1 The relationship of the concentration (% by weight) versus the conductivity at 25°C

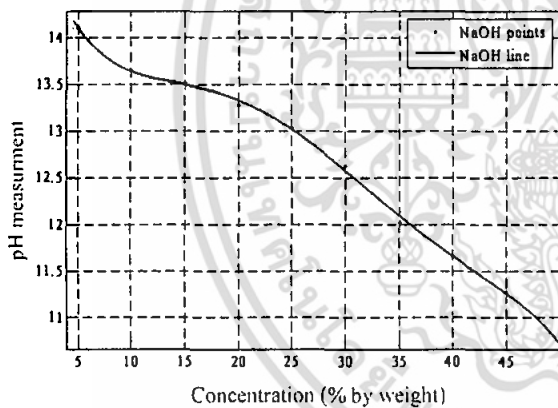


Fig. 2 The relationship of the concentration (% by weight) versus the measured pH for NaOH at 25°C

In the case of the conductivity input that the researchers assign to divide the membership function to be the four linguistic values which are composed of C_1 , C_2 , C_3 , and C_4 positions. Moreover, the input range starts at the original value (0 mS/cm) to the end value (410 mS/cm) according to Fig. 3(a). The another input variable, the number of the membership function will be more than the previous parameter in order to make the effectively reasonable rules and designing as pH_1 , pH_2 , pH_3 , pH_4 , pH_5 , and pH_6 respectively, which the boundary value of pH values is under 10 – 14.5 as shown in Fig. 3(b).

After selecting and creating the membership function of each input variable, it is able to make the appropriate rule

based on this fuzzy inference system. To start the rule based on the creation it is able to analyze all rules from the relationship

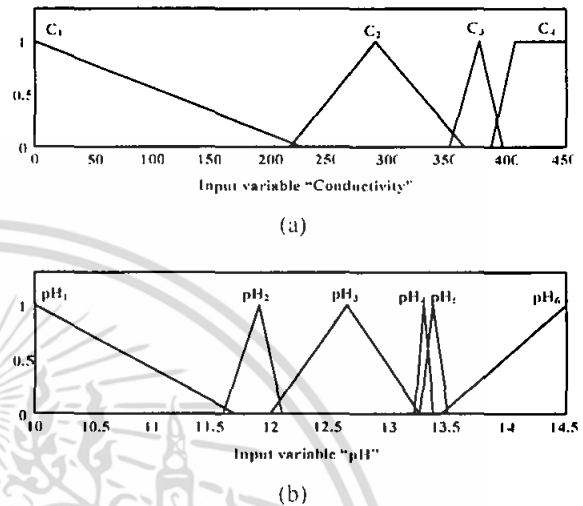


Fig.3 Membership function of both conductivity and pH input variables

line between the concentration and conductivity only by using the tangent equations (as shown in Fig. 4) the such line for synthesizing the reasonable rule-based. The desired output of each rule is calculated on the linear equation patterns until it is able to cover all possible cases. Therefore, all rules which have the polynomial function as the consequences which can show the matching extent method of input variables as following:

- If conductivity is C_1 and pH is pH_6 then output = $0.0227X$;
- If conductivity is C_2 and pH is pH_6 then, output = $0.037X - 3.14$;
- If conductivity is C_3 and pH is pH_6 then, output = $0.0667X - 13.668$;
- If conductivity is C_4 and pH is pH_6 then, output = $0.2X - 67$;
- If conductivity is C_4 and pH is pH_5 then, output = $- 0.3X + 138$;
- If conductivity is C_3 and pH is pH_4 then, output = $- 0.1X + 58$;
- If conductivity is C_2 and pH is pH_3 then, output = $- 0.0769X + 49.22$;
- If conductivity is C_1 and pH is pH_2 then, output = $- 0.111X + 55.55$;
- If conductivity is C_1 and pH is pH_1 then, output = $- 0.2X + 68$;
- If conductivity is C_1 and pH is pH_3 then, output = $- 0.0769X + 49.22$;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

linguistic values (Conductivity)	linguistic values (pH)	Output Equation
C ₁	pH ₆	o/p ₁ = 0.0227X
C ₂	pH ₆	o/p ₂ = 0.037X - 3.14
C ₃	pH ₆	o/p ₃ = 0.0667X - 13.668
C ₄	pH ₆	o/p ₄ = 0.2X - 67
C ₄	pH ₅	o/p ₅ = - 0.3X + 138
C ₃	pH ₄	o/p ₆ = - 0.1X + 58
C ₂	pH ₃	o/p ₇ = - 0.0769X + 49.22
C ₁	pH ₂	o/p ₈ = - 0.111X + 55.55
C ₁	pH ₁	o/p ₉ = - 0.2X + 68
C ₁	pH ₃	o/p ₁₀ = - 0.0769X + 49.22

Table 1 Condition for selecting the linear equation is the output

Where X is the input variable of the conductivity values.

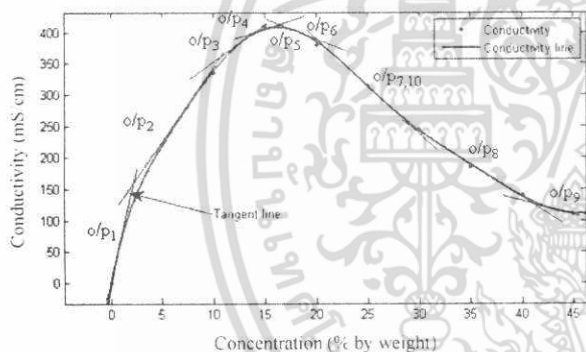


Fig. 4 The relationship of the concentration (% by weight) versus the conductivity

The final procedure of assembly the inference mechanism is useful from Takagi–Sugeno inference model as shown in Fig. 5. Consider two input values which are separated as the input and output membership functions (MF). The input membership function converts real inputs of both conductivity and pH values to the degree of function (F(X) and F(Y)) of each linguistic value and then produce the rule weight by AND operation expressed as min term:

$$ruleweight = \min\{F(X), F(Y)\} \tag{1}$$

On the contrary, the output membership function uses only the conductivity values to compute the needed output that is the polynomial equation, where “a” letter is the coefficient values and “c” letter is the constant values. In the summary, the final output of this system is weighted average

of all rule outputs and computing as concentration (% by weight) for NaOH solution, as the following equation below.

$$Concentration = \frac{\sum_{i=1}^N ruleweight_i output_i}{\sum_{i=1}^N ruleweight_i} \tag{2}$$

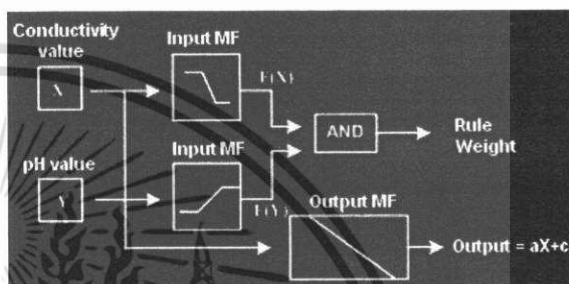


Fig. 5 The mechanism of NaOH concentration measurement.

3. EXPERIMENTAL DATA ANALYSIS

The accuracy of interesting concentration measurement is important to solve the restricted point of conductivity sensors under the nonlinearity which is the bell shape characteristic. The experimental data are realized with mapping the sample of two inputs to the output function, the result is simulated on surface which depends on the input variables in the three “dimension” form.

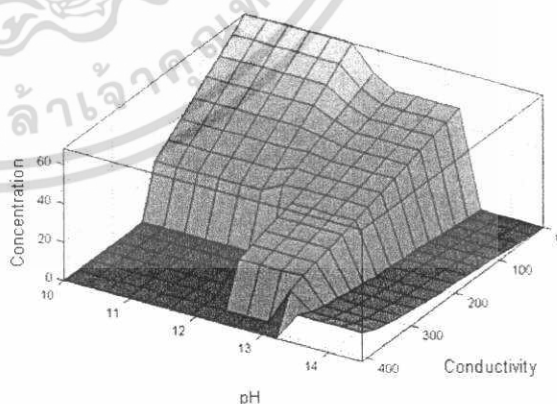


Fig. 6 The complete surface output of NaOH concentration.

Fig. 6 can notice brightly that the concentration is able to be measured over than 15 % by weight and possibly

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

responding with the maximum range of conductivity sensors. For the concentration of NaOH solution during 15 – 50 % by weight has two different levels, since they are mostly affected from pH parameter to modify disadvantage of the conductivity characteristic. Furthermore, Takagi-Sugeno model applied as the inference mechanism of this designed system is highly efficient to result the concentration output more linear and smooth.

4. CONCLUSION

This proposed paper attempts to demonstrate another solution for improving the NaOH nonlinear curve of conductivity sensors that have a significantly limited issue, in this case can extend the measurement range higher by supporting from pH sensors. The proposed method directly develop the relationship between the conductivity and pH signals by fuzzy logic system, the popular nonlinear mapping approaches to build the reasonable inference system for creating the optimum concentration data. The result of the implemented inference system is effective with NaOH concentration measurement.

This case study is highly possible to apply for the recently industrial instrument aspect, since nowadays the transmitters are designed to be able to receive both conductivity and pH signals together and will be capable to adapt this proposed method usefully by adding the working function with more efficient. Moreover, it may be the new idea to modify with the other matters which suffer on the same problem.

REFERENCES

- [1] Chris Westlake "Electrolytic Conductivity Measurement". Analytical Instrumentation, ABB Company Limited, March 1997.
- [2] Byeongdeok Yea, Tomoyuki Osaki, Kazunori Sugahara, Ryosuke Konishi, "Improvement of concentration-estimation algorithm for inflammable gases utilizing fuzzy rule-based neural network." Sensors and Actuators B: Chemical, Vol. 56, Issues 1-2, 1 July 1999.
- [3] Stefan Menzl, Michael Stühler, Roland Benz. "A self adaptive computer-based pH measurement and fuzzy-control system." Water Research, Vol. 30, Issue 4, April 1996.
- [4] Özgür Kişi. "Evolutionary fuzzy models for river suspended sediment concentration estimation." Journal of Hydrology, Vol. 372, Issues 1-4, 15 June 2009.
- [5] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control." IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 15, pp.116-132, 1985
- [6] S.N. Sivanandam, S. Sumathi, and S.N. Deepa. "Introduction to Fuzzy logic using MATLAB" Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007

ประวัติผู้เขียน

นายวงศกร วงศาโรจน์ เกิดเมื่อวันที่ 21 ธันวาคม พ.ศ.2528 ที่จังหวัดสมุทรสงคราม สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมระบบเครื่องมือวัด จากภาควิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือในปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2552 ปัจจุบันทำงานกับบริษัท อัลสตอม (ประเทศไทย) จำกัด ในตำแหน่งวิศวกรระบบควบคุมและเครื่องมือวัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้