การพัฒนาระบบเฝ้าสังเกตการแทรกตัวของน้ำเค็มสำหรับพื้นที่ปลูกทุเรียน จังหวัดนนทบุรี

Development of Salinity Intrusion Monitoring System for Durian Growing areas in Nonthaburi Province

ศิริชัย สาระมนัส[1*] วรินธร บุญยะโรจน์[2]
[1]สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพฯ 10800
[2]สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพฯ 10800
Sirichai Saramanus[1*] Varinthorn Booyaroj[2]
[1]Department of Computer Science, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok 10800
[2]Department of Environmental Science and Technology, Faculty of Science and Technology Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok 10800
*Corresponding author Email: sirichai.s@rmutp.ac.th
(Received: June 30, 2022; Revised: December 28, 2022; Accepted: March 16, 2023)

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อพัฒนาต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตการแทรกตัวของน้ำเค็มโดยใช้ตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือในการคัดแยกค่าความเค็มของน้ำ ระบบดังกล่าวทำการพัฒนาโมเดลตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือโดยใช้ข้อมูลคุณภาพน้ำที่เหมาะสมต่อการเกษตรจาก FAO พิจารณาค่าการนำไฟฟ้า และค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดที่เป็นปัจจัยส่งผลต่อค่าความเค็ม โดยใช้เครื่องมือฟัซซีลอจิกทูลบ็อกซ์ ทำการสร้างและทดสอบโมเดลที่สร้างขึ้น และทำการแปลงโมเดลที่สร้างขึ้นให้อยู่ในรูปแบบเอ็มเบ็ดเด็ด ซี โดยใช้เครื่องมือซิมมูลลิงค์โค๊ด ติดตั้งลงไมโครคอนโทรลเลอร์ Arm Cortex-M4 และใช้การทดสอบแบบ 10-Fold Cross Validation เพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการคัดแยกข้อมูล ผลการทดสอบค่า Root Mean Square Error (RMSE) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.58175 แสดงว่าโมเดลที่สร้างขึ้นสามารถคัดแยกข้อมูลได้ใกล้เคียงกับข้อมูลคัดแยกที่กำหนด

คำสำคัญ: การแทรกตัวของน้ำเค็ม ระบบเฝ้าสังเกต ตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือ พื้นที่ปลูกทุเรียนจังหวัดนนทบุรี

ABSTRACT

This research is to develop a prototype of a salinity intrusion monitoring system using fuzzy logic to extract salinity values. A system is developed according to a fuzzy logic model using FAO's for appropriate agricultural water quality data, considering the Electrical Conductivity (EC) and total dissolved solids (TDS) as indicators of the salinity value by using the Fuzzy Logic Toolbox to produce and test the generated model. Transformation of the generated models to Embedded C format using

the Simulink Coder tool installed in the Arm Cortex-M4 microcontroller and a 10-fold cross-validation test was used to validate the data extraction. The Root Mean Square Error (RMSE) for the test results was 0.58175 on average. This research result indicates that the generated model is able to extract data that very closely matches the specified data.

Keyword: Salinity Intrusion, Monitoring System, Fuzzy logic, Nonthaburi Durian Growers.

1. บทนำ

ปัญหาการแทรกตัวของน้ำเค็มเข้าสู่แม่น้ำเจ้าพระยาส่งผลกระทบต่อเขตพื้นที่ทำการเกษตรของจังหวัดนนทบุรีและพื้นที่ภาคกลางตอนล่างหลายจังหวัด ปัญหาดังกล่าวทำให้พืชผลทางการเกษตรมีอัตราการเจริญเติบโตลดลงและเกิดความเสียหายต่อการทำการเกษตร เกษตรกรสวนทุเรียน จังหวัดนนทบุรี ต้องทำการตรวจวัดคุณภาพน้ำก่อนนำไปใช้เพื่อหลีกเลี่ยงน้ำที่มีค่าความเค็มเกินค่ามาตรฐาน [1] รวมถึงต้องลงทุนวางระบบน้ำประปาเพื่อเจือจางค่าความเค็มของน้ำ จนกว่าค่าความเค็มของน้ำจะกลับเข้าสู่สภาวะปกติ ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการปลูกทุเรียนที่สูงขึ้น [2] ต่อการเจริญเติบโตและคุณภาพของทุเรียนและพันธุ์พืชอื่น ๆ

จากข้อมูลคุณภาพน้ำที่เหมาะสมต่อการการเกษตรของ Food and Agriculture Organization (FAO) [3] และการจำแนกประเภทและการใช้น้ำชลประทานของ United States Department of Agriculture (USDA) [4] กล่าวถึงค่าคุณลักษณะทางด้านเคมีและกายภาพ ใช้เป็นปัจจัยในการพิจารณาคุณภาพของน้ำ

มีการศึกษาการจำแนกประเภทคุณภาพน้ำที่เหมาะต่อการนำไปใช้งานอย่างหลากหลาย [5] – [7] ซึ่งงานดังกล่าวนั้นใช้ขั้นตอนกระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลคุณลักษณะทางด้านเคมีและกายภาพ จำแนกประเภทคุณภาพน้ำ ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์มีความซับซ้อน และความไม่แน่นอนของข้อมูล เป็นการยากต่อการนำเสนอข้อมูลให้คนทั่วไปเข้าใจได้ การเสนอแนวทางการนำตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือมาใช้เพื่อประเมินคุณภาพน้ำชลประทานโดยพิจารณาค่าพารามิเตอร์ SAR และ EC ว่าสอดคล้องกับการจำแนกประเภทคุณภาพน้ำของ United States Salinity Laboratory (USSL) [8] การประเมินคุณภาพน้ำใต้ดินด้วยวิธีตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือเป็นการศึกษาข้อมูลคุณภาพน้ำชลประทานของ Food and Agriculture Organization (FAO) เพื่อสร้าง FIS โดยใช้ค่า Salinity และค่า Sodicity Hazard ใช้ในการประเมินคุณภาพน้ำ [9] การนำตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือมาใช้ในการประเมินคุณภาพน้ำบาดาล [10]

จะเห็นได้ว่าตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือ (Fuzzy Logic) [11] เป็นเครื่องมือช่วยในการจัดการกับข้อมูลที่มีความซับซ้อนและความไม่แน่นอนให้ผลลัพธ์ที่เข้าใจง่าย

งานวิจัยนี้ศึกษาคุณภาพน้ำที่เหมาะสมต่อการการเกษตรโดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้า Electrical Conductivity (EC) และค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด Total Dissolved Solids (TDS) ใช้ข้อกำหนดคุณภาพน้ำที่เหมาะสมต่อการการเกษตรของ Food and Agriculture Organization (FAO) [3] ทำการสร้างโมเดล Fuzzy Inference System (FIS) ใช้ในการจำแนกประเภทและตัดสินใจคุณภาพน้ำให้ผลลัพธ์ที่เข้าใจง่าย

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปัญหาการแทรกตัวของน้ำเค็ม

การแทรกตัวของน้ำเค็มเข้าสู่เขตน้ำจืด เกิดจากน้ำทะเลที่หนุนจากทะเลเข้ามาสู่แม่น้ำเจ้าพระยา เนื่องจากปริมาณน้ำจืดที่ปล่อยจากเขื่อนมีน้อย ทำให้น้ำทะเลหนุนเข้ามามากกว่าปกติ ส่งผลให้เขตพื้นที่การเกษตรของจังหวัดนนทบุรีและพื้นที่ภาคกลางตอนล่างหลายจังหวัดที่

ใช้น้ำจากระบบชลประทานจากแม่น้ำเจ้าพระยาได้รับผลกระทบ [12] ค่าความเค็มที่เจือปนอยู่ในน้ำชลประทานหรือมาจากน้ำใต้ดินเค็มที่อยู่ตื้นใกล้ผิวดินทำให้เกิดความเค็มซึ่ง สำหรับการเกษตรเพาะปลูกพืชนั้นมีค่าความเค็มของน้ำที่เหมาะสมไม่ควรเกิน 2.0 กรัมต่อลิตร ค่าการนำไฟฟ้า ไม่ควรเกิน 4,000 ไมโครโมล์ต่อเซนติเมตร ส่วนการนำมาผลิตประปา ค่าความเค็มของน้ำที่เหมาะสมไม่ควรเกิน 0.25 กรัมต่อลิตร ค่าการนำไฟฟ้า ไม่ควรเกิน 500 ไมโครโมล์ต่อเซนติเมตร [13] ซึ่งจะส่งผลกระทบของความเค็มต่อพืชสะสมในดินบริเวณรากพืช เมื่อมีปริมาณมากขึ้นทำให้พืชไม่สามารถดึงน้ำจากดินได้ตามปกติ เมื่อน้ำที่จะนำไปใช้ได้ลดลง ทำให้พืชนั้นมีอัตราการเจริญเติบโตลดลงและมีลักษณะคล้ายกับพืชขาดน้ำ เช่น ใบเหี่ยว ใบเหลือง เป็นต้น [14]

2.2 คุณภาพน้ำเพื่อการเกษตร

น้ำที่มีคุณภาพดีสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการเกษตรได้มาก แต่บางพื้นที่นั้นมีข้อจำกัดด้านคุณภาพของน้ำที่นำมาใช้เพื่อการเกษตร จึงจำเป็นต้องมีการจัดการคุณภาพน้ำเพื่อการเกษตรอย่างต่อเนื่อง เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่อดินและพืช สำหรับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพน้ำเพื่อการเกษตร คือ ค่าความเค็ม (Salinity) ซึ่งค่าความเค็มที่เจือปนอยู่ในน้ำชลประทานเพื่อการเกษตรนั้นทำให้เกิดการสะสมของเกลือในดินบริเวณรากพืชได้ ซึ่งหากค่าความเค็มมีปริมาณมากจะทำให้พืชไม่สามารถดึงน้ำจากดินได้ตามปกติและทำให้เกิดปัญหาดินเค็ม เนื่องจากพืชนำน้ำไปใช้ได้ลดลง ส่งผลให้พืชมีอัตราการเจริญเติบโตที่ลดลงด้วย โดยองค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ [3] ได้แบ่งชั้นคุณภาพของน้ำเพื่อการชลประทาน จากผลของค่าการนำไฟฟ้า (Electro Conductivity, EC) และปริมาณเกลือที่ละลายน้ำได้ต่อผลผลิตพืช ได้แก่ น้ำที่มีคุณภาพดี มีค่าการนำไฟฟ้าน้อยกว่า 0.7 dS/m หรือมีสารที่ละลายได้ทั้งหมด (Total Dissolve Substance, TDS) น้อยกว่า 450 mg/L เป็นน้ำชลประทานที่ใช้ได้โดยไม่มีข้อจำกัด สำหรับน้ำที่มีคุณภาพปานกลาง มีค่าการนำ ไฟฟ้าระหว่าง 0.7-3.0 dS/m หรือมีสารที่ละลายได้ทั้งหมด (TDS) 450-2,000 mg/L เป็นน้ำชลประทานที่มีข้อจำกัดเล็กน้อยถึงปานกลางในการนำไปใช้ โดยจะต้องปลูกพืชทนเค็ม และมีระบบระบายเกลือ และน้ำที่มีคุณภาพไม่ดี คือ มีค่าการนำไฟฟ้ามากกว่า 3.0 dS/m หรือมีสารที่ละลายได้ทั้งหมด (Total dissolve substance, TDS) มากกว่า 2,000 mg/L เป็นน้ำชลประทานที่มีข้อจำกัดรุนแรงในการใช้เพื่อการเกษตร ซึ่งจะต้องแก้ไขโดยปลูกพืชทนเค็มมาก

2.4 ตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือ (Fuzzy Logic)

ตรรกศาสตร์คลุมเครือ หรือ ตรรกะแบบฟัซซี (Fuzzy Logic) ถูกคิดค้นโดย L.A. Zade ใช้ในการประมาณการเหตุผล [15] พยุง มีสัจ ได้ให้ความหมายไว้ว่า เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการตัดสินใจภายใต้ความไม่แน่นอนของข้อมูลโดยยอมให้มีความยืดหยุ่นได้ ใช้หลักเหตุผลที่คล้ายการเลียนแบบวิธีความคิดซับซ้อนของมนุษย์ ฟัซซีลอจิกมีลักษณะที่พิเศษกว่าตรรกะแบบจริงเท็จ (Boolean Logic) เป็นแนวคิดที่มีการต่อขยายในส่วนของความจริง (Partial Ture) โดยค่าความจริงจะอยู่ในช่วงระหว่างจริงกับเท็จ (Completely True) (Completely False) ตรรกศาสตร์เดิมจะมีค่าเป็นจริงกับเท็จเท่านั้น [16]

2.4.1 ฟัซซีเซ็ต (Fuzzy Set)

ฟัซซีเซ็ต (Fuzzy Set) เป็นเซตที่มีค่าความเป็นสมาชิกของเซตอยู่ระหว่าง 0 และ 1 นิยามของฟัซซีกำหนดให้ x เป็นเซตที่ไม่ว่าง ฟัซซีเซต $\mathbf{A}$ สามารถแสดงลักษณะเฉพาะได้จากฟังก์ชันความเป็นสมาชิกดังสมการที่ (1)

$$\mu_A(x)X: \rightarrow [0,1] \qquad (1)$$

2.4.2 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function)

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function) เป็นฟังก์ชันที่มีการกำหนดระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรที่ต้องการใช้งาน โดยเริ่มจากการแทนที่กับตัวแทนที่มีความไม่ชัดเจน ไม่แน่นอน และคลุมเครือ ดังนั้นส่วนที่สำคัญต่อคุณสมบัติหรือการดำเนินการของ ฟัซซีเพราะ

รูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมีความสำคัญต่อกระบวนการคิดและการแก้ไขปัญหา [16] ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่มีการนำไปใช้ประยุกต์ใช้งานในการแก้ปัญหาต่างๆ มีจำนวนหลากหลายฟังก์ชันในงานวิจัยนี้จะกล่าวเพียง 2 ฟังก์ชันที่นำมาใช้งาน

ฟังก์ชันสามเหลี่ยม (Triangular Membership Function) สมการที่ (2)

$$triangle(x;a,b,c)=\begin{cases}0 & x\le a\\ (x-a)/(b-a) & a\le x\le b\\ (c-x)/(c-b) & b\le x\le c\\ 0 & c\le x\end{cases} \quad (2)$$

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

ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Membership Function) สมการที่ (3)

$$trapezoidal(x;a,b,c,d)=\begin{cases}0 & x\le a\\ (x-a)/(b-a) & a\le x\le b\\ 1 & b\le x\le c\\ (d-x)/(d-c) & c\le x\le d\\ 0 & d\le x\end{cases} \quad (3)$$

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

2.4.3 กฎฟัซซี (Fuzzy Rules)

กฎฟัซซี (Fuzzy Rules) องค์ความรู้ในระบบฟัซซีสามารถแสดงในรูปประโยค [16, 17]

ถ้า ข้อตั้ง (ข้อนำ) ดังนั้น ข้อยุติ (ข้อตาม)

If ... Then ... Unless

2.4.4 โครงสร้างพื้นฐานของการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก (Fuzzy Inference System)

โครงสร้างพื้นฐานของการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก (Fuzzy Inference System) สามารถแสดงดังรูปที่ 1 ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วนดังนี้ [16, 18]

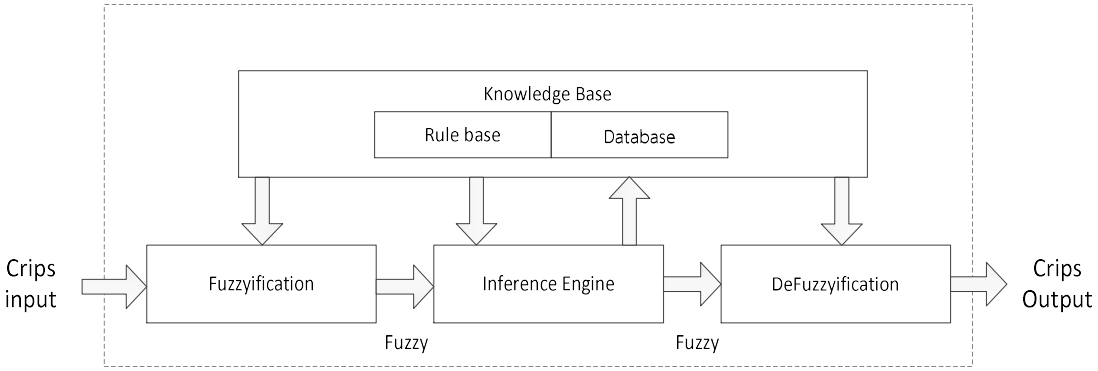
1) ส่วนแปลงอินพุตทั่วไปเปลี่ยนเป็นอินพุตแบบตัวแปรฟัซซี (Fuzzification) 2) ฐานความรู้ (Knowledge Base) เป็นส่วนที่จัดเก็บรวบรวมข้อมูลในการควบคุมประกอบด้วยฐานกฎ (Rule Base) และฐานข้อมูล (Database) ฐานกฎ (Rule Base) ทำหน้าที่กำหนดวิธีการควบคุม ได้จากผู้เชี่ยวชาญจัดให้อยู่ในรูปแบบของชุดข้อมูลแบบกฎของภาษา (Liguistic Rule) ฐานข้อมูล (Database) เป็นส่วนการจัดเตรียมข้อมูลที่จำเป็น 3) เครื่องอนุมานหรือการตีความ (Inference Engine) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ตรวจสอบข้อเท็จจริงและกฎ เพื่อตีความหาเหตุผล 4) ส่วนการแปลงข้อมูลเอาต์พุตให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม (Defuzzification) ทำหน้าที่แปลงข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบฟัซซีให้เป็นค่าผลลัพธ์ที่สามารถนำไปใช้งานได้

วิธีการทำค่าฟัซซีให้เป็นค่าทั่วไปที่นำไปใช้งานได้ (Defuzzification) มีหลายวิธีด้วยกัน [19] ในที่นี้นำเสนอวิธีเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (Weighted Average Method) หรือวิธีค่าพื้นที่กลาง (Centroid of Area) วิธีการหาค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของพื้นที่ใต้กราฟฟัซซีซึ่งเป็นผลที่ได้จากการตีความ ค่าที่ได้จะประมาณเทียบเคียงค่าจุดศูนย์ถ่วงโดยรวม (Central of Gravity: COG) จะหาได้จากการประมาณค่าจากสมการที่ (4) [16]

$$z^*=\frac{\sum_{i=1}^{N}\mu_{\underset{\sim}{C}}(Z_i)\cdot Z_i}{\sum_{i=1}^{N}\mu_{\underset{\sim}{C}}(Z_i)} \quad (4)$$

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย A.F. Rusydi [20] ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของค่าการนำไฟฟ้า Electrical Conductivity (EC) และค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด Total Dissolved Solids (TDS) ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการบ่งบอกถึงคุณภาพของน้ำ รวมถึงการระบุค่าความเค็ม การศึกษานี้แสดงค่าอัตราส่วนของค่าการนำไฟฟ้า Electrical Conductivity (EC) และค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด Total Dissolved Solids (TDS) ที่พิจารณาโดยหาค่าจากค่าอัตราส่วนจากน้ำประเภทต่างๆ



รูปที่ 1 โครงสร้างพื้นฐานของการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก (Fuzzy Inference System)

งานวิจัย K.L. Priya [8] ศึกษาแนวทางการนำตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือมาใช้เพื่อประเมินคุณภาพน้ำชลประทาน กรณีศึกษา ลุ่มน้ำคารุรันยาประเทศอินเดีย โดยพิจารณาค่าพารามิเตอร์ Sodium Absorption Ratio (SAR) และ Electrical Conductivity (EC) ว่าสอดคล้องกับการจำแนกคุณภาพน้ำของ United States Salinity Laboratory (USSL) ผลการศึกษาพบว่าตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือที่นำมาใช้นั้นสอดคล้องกับการจำแนกคุณภาพน้ำของ United States Salinity Laboratory (USSL)

งานวิจัย S. Abdi [9] ได้ศึกษาการประเมินคุณภาพน้ำใต้ดินของที่ราบ ราฟแชนจา ประเทศอิหร่าน ด้วยวิธีตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือ โดยการศึกษาข้อมูลคุณภาพน้ำชลประทานของ FAO เพื่อสร้าง Fuzzy Inference System (FIS) โดยใช้ค่า Salinity และค่า Sodicity Hazard เพื่อใช้ในการประเมินคุณภาพน้ำ ผลการศึกษาพบว่าคุณภาพน้ำที่ราบดังกล่าวคุณภาพไม่ดี ถึง ปานกลาง ส่วนของค่า salinity และค่า Sodicity Hazard

งานวิจัย A. Saberi Nasr [10] ได้ศึกษาแนวทางการนำตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือมาใช้ในการประเมินคุณภาพน้ำบาดาลในจังหวัด ยาซด์ ประเทศอิหร่าน ผู้วิจัยได้นำค่าพารามิเตอร์ทางเคมีที่วัดได้ในตัวอย่างของน้ำบาดาล 60 ตัวอย่าง ผลการวิจัยพบว่าคุณภาพน้ำบาดาล 20 กลุ่มตัวอย่าง อยู่ในระดับน่าพอใจ และ 20 กลุ่มตัวอย่าง อยู่ในระดับยอมรับได้ และอีก 20 กลุ่มตัวอย่าง อยู่ในระดับยอมรับไม่ได้ สำหรับวัตถุประสงค์ในการดื่ม

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ศึกษาข้อมูลการคัดแยกคุณภาพน้ำที่เหมาะสมต่อการทำการเกษตร

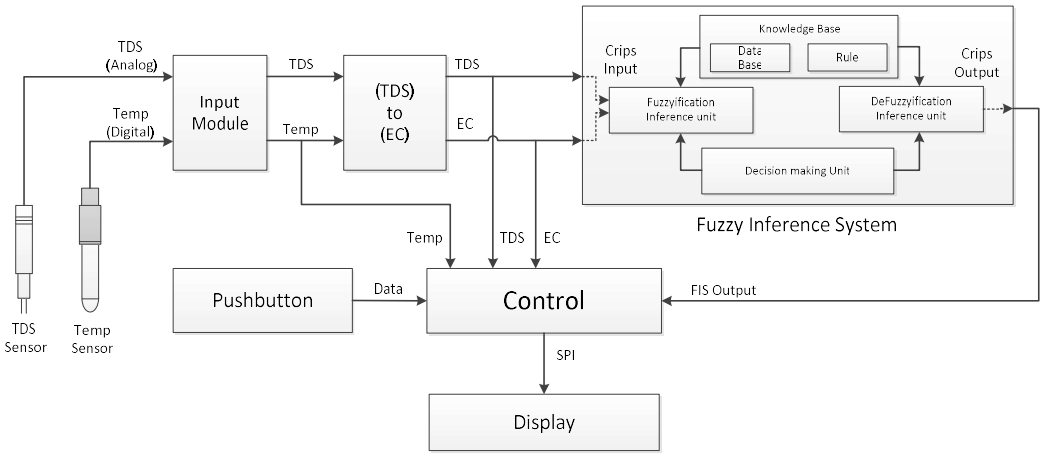
จากข้อกำหนดคุณภาพน้ำที่เหมาะสมต่อการการเกษตรของ Food and Agriculture Organization (FAO) [3] ที่แสดงในตารางที่ 1 และการศึกษาข้อมูลการคัดแยกคุณภาพน้ำ [20, 8, 9, 10] กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้า EC (Electrical Conductivity) และค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด TDS (Total Dissolved Solids) เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความเค็ม (Salinity) ใช้ข้อมูลเป็นแนวทางการกำหนดคุณลักษณะในการคัดแยกคุณภาพน้ำ ระดับค่าความเค็มต่อการนำไปใช้งานมีเพียง 3 ระดับ คือ ระดับไม่มีผลกระทบ (None), ระดับเล็กน้อยถึงปานกลาง (Slight to Moderate) และ ระดับรุนแรง (Severe)

ตารางที่ 1 FAO Guideline for Interpretations of Water Quality of Irrigation

Potential Irrigation Problem		Units	Degree of Restriction on Use		
			None	Slight to Moderate	Severe
Salinity *(Affects Crop Water Availability)*					
	EC_w (or)	dS/m	< 0.7	0.7 – 3.0	> 3.0
	TDS	mg/l	< 450	450 – 2,000	> 2,000
Infiltration *(Affects Infiltration Rate of Water into the Soil. Evaluate Using EC_w and SAR Together)*					
SAR	0 – 3 and EC_w		>0.7	0.7 – 0.2	< 0.2
	3 - 6		>1.2	1.2 – 0.3	< 0.3
	6 - 12		>1.9	1.9 – 0.5	< 0.5
	12 - 20		>2.9	2.9 – 1.3	< 1.3
	20 – 40		>5.0	5.0 – 2.9	< 2.9
Specific Ion Toxicity *(Affects Sensitive Crops)*					
	Sodium (Na)	SAR	< 3	3 – 9	> 9
	Surface Irrigation	me/l	< 3	>3	
	Sprinkler Irrigation				
	Chloride (Cl)				
	Surface Irrigation	me/l	< 4	4 - 10	> 10
	Sprinkler Irrigation	me/l	< 3	> 3	
	Boron (B)	mg/l	< 0.7	0.7 – 3.0	> 3.0
	Trace Elements				
Miscellaneous Effects (Affects Susceptible Crops)					
	Nitrogen (NO^3 - N)	mg/l	< 5	5 – 30	> 30
	Bicarbonate (HCO^3) (Overhead Sprinkling Only)	mg/l	< 1.5	1.5 – 8.5	> 8.5
	pH		**Normal Range 6.5 – 8.4**		

ตารางที่ 3.2 การแบ่งค่าระดับความเค็มต่อการนำไปใช้งานจากข้อมูลพื้นฐาน FAO Guideline for Interpretations of Water Quality of Irrigation

Potential Irrigation Problem	Units	Degree of Restriction on Use				
		LOW	MIDLOW	MID	MIDHIGH	HIGH
Salinity *(Affects Crop Water Vailability)*						
EC_w (or)	dS/m	<0.7	0.71 – 1.44	1.47 – 2.220	2.230 – 2.990	>3.0
TDS	ppm	<450	458 – 966	967 – 1,483	1,484 – 1,999	> 2,000



รูปที่ 2 ระบบการเฝ้าสังเกตการแทรกตัวของน้ำเค็ม

ค่าระดับดังกล่าว หากนำไปใช้ในการเผ้าระวังจะส่งผลให้การเฝ้าระวังจะไม่สามารถเตือนให้ทันเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้ ทางคณะผู้จัดทำ ทำการแบ่งค่าระดับความเค็มออกเป็น 5 ระดับ โดยยึดข้อมูลค่าระดับความเค็มต่อการนำไปใช้งานจาก ตารางที่ 1 และการทำความเข้าใจหน่วยการวัด [21] เป็นแนวทาง ดังตารางที่ 2

3.2 ภาพรวมของระบบ

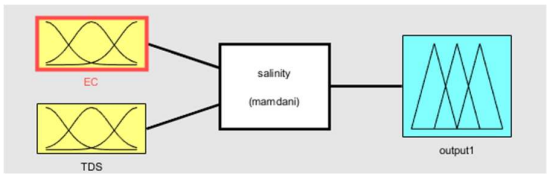
ภาพรวมของระบบจะแสดงดังรูปที่ 2 ภาพระบบการเฝ้าสังเกตการแทรกตัวของน้ำเค็มคณะผู้วิจัยทำการแบ่งการออกแบบเป็น 2 ส่วนคือ การนำข้อมูลเข้าก่อนการตัดสินใจ และการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก

3.2.1 การนำข้อมูลเข้าก่อนการตัดสินใจ

การทำงานส่วนที่ 1 ประกอบไปด้วยอุปกรณ์อ่านค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด TDS Sensor อุปกรณ์อ่านค่าอุณหภูมิ Temperature Sensor ทำหน้าที่อ่านค่าอุณหภูมิทำงานร่วมกับ Input Module ข้อมูลที่อ่านได้เป็นแบบดิจิทัลทำการแปลงค่าจาก Total Dissolved solids (TDS) เป็นค่า Electrical Conductivity (EC) [22]

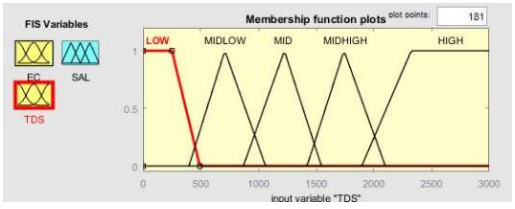
3.2.2 การประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก (Fuzzy Inference System)

ส่วนการตัดสินใจ Fuzzy Inference System การออกแบบสร้าง Model โดยใช้ Fuzzy Logic Toolbox [23] เป็นเครื่องมือที่อยู่ในชุดซอฟต์แวร์ MATLAB [24] Version R2015B โดย Model ดังกล่าวจะมี 2 อินพุต เป็นค่าการนำไฟฟ้า EC (Electrical Conductivity) และค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด TDS (Total Dissolved Solids) และมี 1 เอาต์พุตเป็นค่าระดับความเค็ม SAL (Salinity) แสดงดังรูปที่ 3

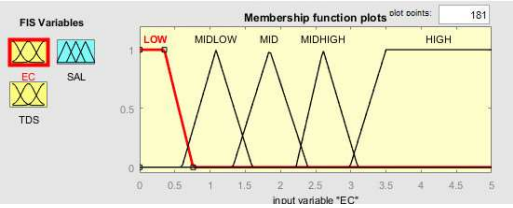


รูปที่ 3 Fuzzy Inference System Model

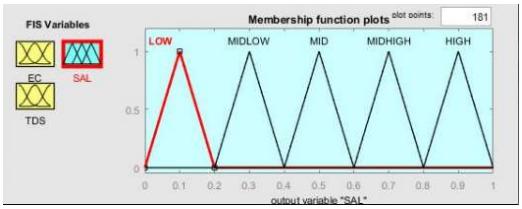
ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Member Ship Function) ของอินพุตค่า EC (Electrical Conductivity) และ TDS (Total Dissolved Solids) มีการแบ่งระดับข้อมูลออกเป็น 5 ระดับคือ LOW, MIDLOW, MID, MIDHIGH และ HIGH แสดงดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5



รูปที่ 4 EC Member Ship Function



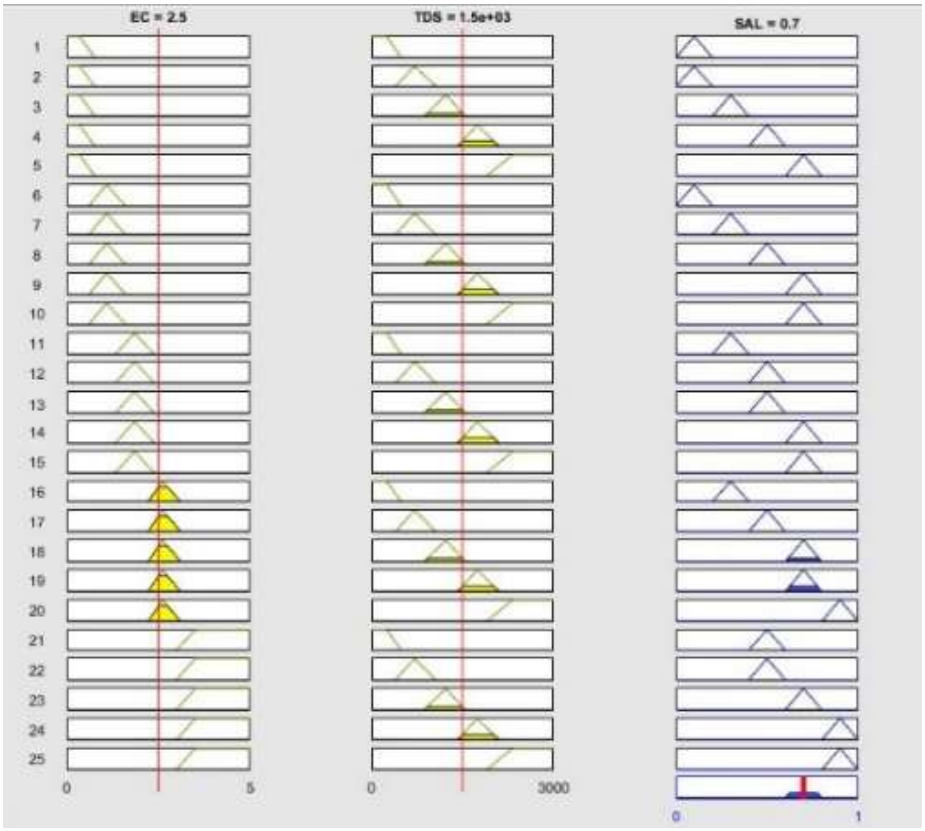
รูปที่ 5 TDS Member Ship Function



รูปที่ 6 SAL Member Ship Function

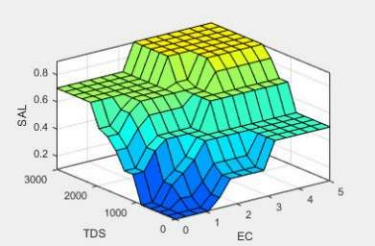
เอาต์พุตค่า SAL (Salinity) มีการแบ่งระดับข้อมูลออกเป็น 5 ระดับคือ LOW, MIDLOW, MID, MIDHIGH และ HIGH แสดงดังรูปที่ 6

การสร้างกฎฟัซซี (Fuzzy Rule) ใช้กฎ (Fuzzy if-then Rules) เพื่อใช้ในการตัดสินใจคัดแยกระดับค่าความเค็มทั้งหมด 25 กฎ แสดงได้ดังรูปที่ 7 การแสดงผลความสัมพันธ์ระหว่าง อินพุต ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก กับเอาต์พุตฟังก์ชันความเป็นสมาชิก



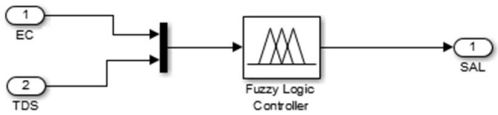
รูปที่ 7 ข้อมูลของกฎจำนวน 25 กฎ

ข้อมูลของกฎทั้งหมดแสดงแบบ Surface Viewer ระหว่าง TDS EC และ SAL ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 Surface Viewer ระหว่าง TDS EC และ SAL

เมื่อทำการทดสอบ Fuzzy Inference System Model (FIS) เสร็จสิ้น ทำการแปลง Fuzzy Logic Model ที่สร้างขึ้นด้วย Simulink Coder [25] ให้อยู่ในรูปแบบ Embedded C เพื่อให้สามารถนำไปติดตั้งในไมโครคอนโทรลเลอร์ Arm Cortex-M4 [26] โดยให้มีอินพุตจำนวน 2 อินพุตประกอบด้วย EC และ TDS ส่วนเอาต์พุทมี 1 เอาต์พุตกำหนดให้เป็น SAL ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 Simulink model

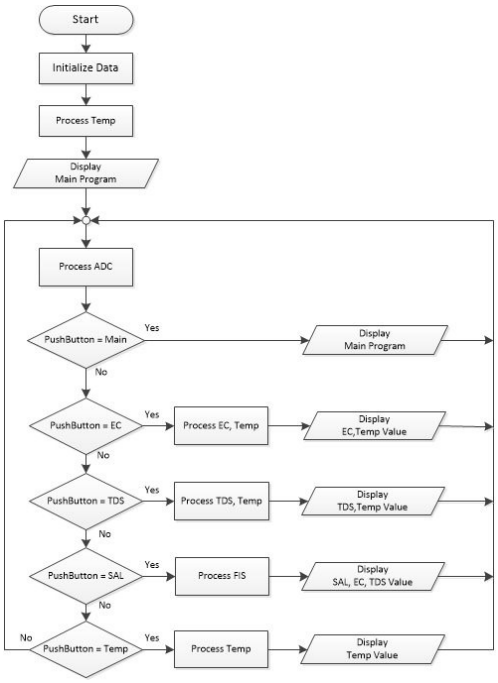
3.3 การทำงานของระบบ

ส่วนการควบคุมการทำงาน Control ทำหน้าที่รับข้อมูลอินพุทจากอุปกรณ์อ่านค่า และอุปกรณ์นำเข้าข้อมูล ทำการประมวลผลการทำงานตาม Flowchart ในรูปที่ 10 นำผลลัพธ์ที่ได้แสดงบนส่วนแสดงผลของระบบ

4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการทดสอบของส่วนการตัดสินใจ

การทดสอบส่วนการตัดสินใจ Fuzzy Inference System Model (FIS) คณะผู้วิจัยทำการทดสอบโดยกำหนดข้อมูลให้ครอบคลุมค่าการนำไฟฟ้า EC (Electrical Conductivity) และค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด TDS (Total Dissolved solids) เพื่อแสดงการคัดแยกค่าระดับความเค็ม (Salinity) ระหว่าง FAO Guideline กับส่วนการตัดสินใจ Fuzzy Inference System Model (FIS) แสดงดังตารางที่ 3



รูปที่ 10 ภาพรวมการทำงานของระบบ

4.2 ผลการทดสอบความถูกต้องของโมเดลที่สร้างขึ้น

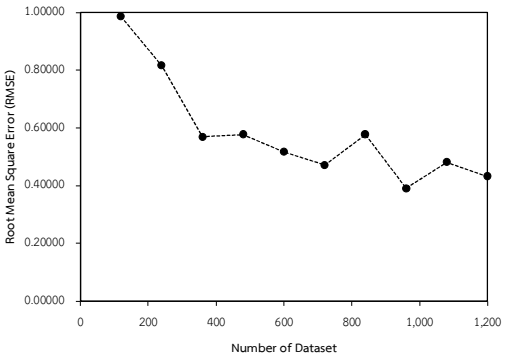
การทดสอบความถูกต้องของ Fuzzy Inference System Model (FIS) ที่สร้างขึ้นใช้ข้อมูลจาก โครงการระบบเฝ้าระวังคุณภาพน้ำแบบ Real Time ของการประปานครหลวง [27] เป็นข้อมูล ณ สถานีวัดมะขาม ระหว่างวันที่ 22 ถึง 31 มกราคม 2563, 1 ถึง 20 กุมภาพันธ์ 2563, 25 ถึง 31 มีนาคม 2563 และ 15 ถึง 24 เมษายน 2563 ข้อมูลที่ใช้ทดสอบมีจำนวน 1,200 ข้อมูล โดยทำการทดสอบแบบ 10-Fold Cross Validation [28] เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องในการคัดแยกข้อมูลค่าระดับความเค็ม ข้อมูลผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 11 และตารางที่ 4 แสดงค่าจากการทดสอบ Root Mean Square Error (RMSE) มีค่าค่อนข้างต่ำ ค่าเฉลี่ย RMSE อยู่ที่ 0.58175

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบการตัดสินใจค่าระดับความเค็มระหว่าง FAO Guideline และส่วนการตัดสินใจ FIS

Salinity							
EC	TDS	FAO Guide line	Salinity FIS Result	EC	TDS	FAO Guide line	Salinity FIS Result
0.1	150	None	0.100 LOW	1.6	1,300	Slight to moderate	0.500 MID
0.2	250	None	0.100 LOW	1.8	1,500	Slight to moderate	0.623 MIDHIGH
0.4	350	None	0.100 LOW	2.1	1,700	Slight to moderate	0.700 MIDHIGH
0.6	450	None	0.100 LOW	2.2	1,900	Slight to moderate	0.700 MIDHIGH
0.8	500	Slight to moderate	0.300 MIDLOW	2.4	2,100	Severe	0.900 HIGH
1.1	700	Slight to moderate	0.300 MIDLOW	2.6	2,300	Severe	0.900 HIGH
1.2	900	Slight to moderate	0.337 MIDLOW	2.8	2,500	Severe	0.900 HIGH
1.4	1,100	Slight to moderate	0.500 MID	3.1	2,700	Severe	0.900 HIGH

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบ 10-Fold Cross Validation

Index	Number of Dataset	RMSE
1	120	0.98560
2	240	0.81650
3	360	0.56900
4	480	0.57740
5	600	0.51640
6	720	0.47140
7	840	0.57740
8	960	0.39070
9	1,080	0.48110
10	1,200	0.43200
	$\bar{X}$	0.58175



รูปที่ 11 กราฟแสดงการทดสอบ RMSE

5. สรุป

โครงการวิจัยระบบเฝ้าสังเกตการแทรกตัวของน้ำเค็มสำหรับพื้นที่ปลูกทุเรียนจังหวัดนนทบุรีเป็นระบบที่สร้างขึ้นจากหลักการตรรกศาสตร์คลุมเครือ (Fuzzy Logic) โดยใช้ข้อมูลคุณภาพน้ำที่เหมาะสมต่อการเกษตรจาก Food and Agriculture Organization (FAO) พิจารณาค่าการนำไฟฟ้า EC (Electrical Conductivity) และค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด TDS (Total Dissolved Solids) ที่เป็นปัจจัยส่งผลต่อค่าความเค็ม (Salinity) ผลจากการทดสอบการคัดแยกค่าความเค็มโดยพิจารณาจากค่า Root Mean Square Error (RMSE) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.58175 แสดงว่า Fuzzy Inference System Model (FIS) ที่สร้างขึ้นสามารถคัดแยกข้อมูลค่าความเค็มได้ใกล้เคียงกับข้อมูลการคัดแยกค่าความเค็มที่กำหนด

ระบบดังกล่าวนอกจากจะวัดค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด TDS (Total Dissolved Solids) และค่าการนำไฟฟ้า EC (Electrical Conductivity) ได้แล้วนั้น ยังช่วยในการตัดสินใจเกี่ยวกับค่าความเค็ม สำหรับบุคคลทั่วไปให้สามารถเข้าใจได้ง่ายมากยิ่งขึ้น โดยมีการแบ่งระดับค่าความเค็ม (Salinity) ออกเป็น 5 ระดับ ได้แก่ LOW, MIDLOW, MID, MIDHIGH และ HIGH หากพัฒนาในส่วนการจัดเก็บข้อมูลเป็นหน่วยความจำแบบ Flash Memory และส่วนการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายจะเป็นประโยชน์ในการจัดเก็บและการโอนถ่ายข้อมูลเพื่อไปใช้ในอนาคตได้

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ตลอดจนสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยงบประมาณรายได้คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ประจำปี พ.ศ.2563 รวมถึงสาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ สถานที่ อุปกรณ์ และห้องปฏิบัติการฯ ในการดำเนินการวิจัย

ท้ายสุดนี้ คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ผลงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่เกี่ยวข้องที่จะนำผลงานวิจัยนี้ไปใช้ประโยชน์

7. เอกสารอ้างอิง

[1] S. Damrongsiri, “Drink Water How saliy?,” *Environmental*. vol. 25, no. 1, pp. 1-4, 2021.

[2] ThaiPBS NEWS (2015, June 21). Seawater supports the duriannon orchard [Online]. Available: https://news.thaipbs.or.th/content/2901.

[3] R.S. Ayers and D.W. Westcott, “Water quality for agricul-ture,” F.A.O. Irrigation and Drainage Paper No. 29 Rev. 1 FAO Rome, 1985.

[4] L.E. Allison et al., “Diagnosis Improvement of Saline and Alkali Soils,” Agriculture Handbook No. 60, United States Department of Agriculture, Feb 1954.

[5] B.C. Sarker and M.W. Zaman, “Extent of Pollution Assessment in Drinking Water Supplies of Narayanganj District in Bangladesh,” *Journal of Biological Sciences*, vol. 3, no. 10, pp. 854-863, 2003.

[6] K.L. Priya, and G.P. Arulraj, “A correlation-regression model for the physiochemical parameters of the groundwater in Coimbatore city, India,” *Environmental Technology,* vol 32, no. 8, pp. 731-738, 2011.

[7] C.M. Laluraj, and G. Gopinath, “Assessment on seasonal variation of groundwater quality of Phreatic aquifers – A river basin system,” *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 117, pp. 45-57, 2006.

[8] K.L. Priya, “A Fuzzy Logic Approach for Irrigation Water Quality Assessment: A Case Study of Karunya Watershed, India,” *J Hydrogeol Hydrol Eng*, vol. 2, no. 1, Feb 2013.

[9] S. Abdi, A.T. Pour, H. Shirani, M. Hamidpour and H. Shekofteh, “Assessing salinity and sodicity hazards of ground water for irrigation purposes using fuzzy logic,” *Desalination Water Treatment*, vol. 57, no. 33, pp. 15547-15558, Jul. 2016.

[10] A.S. Nasr, M. Rezaei, and M.D. Barmaki, “Analysis of Groundwater Quality using Mamdani Fuzzy Inference System (MFIS) in Yazd Province, Iran,” *International Journal of Computer Applications,* vol.59, no. 7, pp. 45-53, Dec 2012.

[11] F.M McNeill and E. Thro, *Fuzzy Logic: A Practical Approach.* Morgan Kaufmann Pub, 1994.

[12] A. Chimnoi, (2015, Dec). Lessons from the saltwater crisis [Online]. Available: https://www.duriannon.com/15559269

[13] Water Quality Management Division, “Weekly water quality situation report,” Pollution control department, Mar. 25, 2013.

[14] K. Kaewkamol, W. Chearboon, O. Thepsilpwisuit, D. Athinuwat, and B. Cherdhirunkorn, “Effect of Salinity Stress on Changing of Soil Properties and Falling Leaves of Durian cv. Kan Yao,” *Thai Journal of Science and Technology*, vol. 9, no. 1, Jan - Feb., pp. 68-67, 2020.

[15] L. Zadeh, “Fuzzy algorithms,” *Information and Control*, vol. 12, no. 2, pp. 94–102, Feb 1968.

[16] P. Meesad, *Fuzzy Systems and Neural Network*. 1th ed., KMUTNB Textbook Publishing Center, 2012.

[17] D. Dubois and H. Prade, “What Are Fuzzy Rules and How to Use Them,” *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 84, no. 2, pp. 169-185, Dec 1996.

[18] M. F. Azeem (Ed.) *Fuzzy Inference System - Theory and Applications*. London, United Kingdom, IntechOpen, 2012 [Online]. Available:https://www.intechopen.com/books/1918

[19] Yigang Shi and P. C. Sen, “A new defuzzification method for fuzzy control of power converters,” *in Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No.00CH37129),* 2000, pp. 1202-1209.

[20] A.F. Rusydi, “Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A review”, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 118, Feb, 2018.

[21] Terrie K. Boguski, P.E., “Understanding Units of Measurement,” Center for Hazadous Substance Reseach, no. 2, Oct, 2006.

[22] C. Chavez (2021, Feb. 25). Salt Concentration in the Soil,” United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service. Nd. [Online]. Available: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs144p2_066452.pdf

[23] USA: The MathWorks, Inc. (1994-2021). Fuzzy Logic Toolbox [Online]. Available: https://www.mathworks.com/products/fuzzy-logic.html

[24] USA: The MathWorks, Inc. (1994-2021). MATLAB [Online]. Available: https://www.mathworks.com

[25] USA: The MathWorks, Inc. (1994-2021). Simulink coder [Online]. Available: https://www.mathworks.com/products/simulink-coder.html

[26] STMicroelectronics, “Arm® Cortex®-M4 32-bit MCU+FPU,” STM34F401 datasheet, Jan. 2015 [Revised 3].

[27] Thailand: Metropolitan Waterworks Authority (2014). Real Time Water Quality Surveillance System Project of the Metropolitan Waterworks Authority [Online]. Available: http://rwc.mwa.co.th/page/home.

[28] T. Gunasegaran and Y. Cheah, “Evolutionary cross validation,” *in 8th International Conference on Information Technology (ICIT)*, 2017, pp. 89-95.