

โปรแกรมตรวจสอบความเสียหายเครื่องจักรด้วยข้อมูลผสมโดยใช้ระบบนิวโรฟuzzy

Machine Health Condition using Multi data based on Neuro-Fuzzy system

วรกันต์ สัมฤทธิ์เดชขจร¹, หทัยเทพ วงศ์สุวรรณ²

Worakan Sumriddetkhajorn¹, Hataitep Wongsuwarn²

Received: 12 July 2019; Revised: 13 August 2019; Accepted: 10 September 2019

บทคัดย่อ

บทความวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาการประยุกต์ใช้และสร้างโปรแกรมตรวจสอบเครื่องจักร จากข้อมูลผสมที่ผู้ใช้สนใจ อาทิเช่น กระแสไฟมอเตอร์, การสั่นสะเทือน และ อุณหภูมิในน้ำมัน นั้นสามารถบ่งบอกถึงลักษณะความเสียหาย เพื่อทำนายสถานะภาพของเครื่องจักร เพื่อให้วิศวกรสามารถนำไปตรวจสอบและวางแผนซ่อมบำรุงอย่างถูกต้อง โดยการดูค่าความเร็วรอบและขนาดตามมาตรฐานสากล (ISO) ในแต่ละรูปแบบซึ่งจะเป็นประโยชน์แก่อุตสาหกรรมหลากหลายประเภท อาทิเช่น เครื่องบิน โรงไฟฟ้า เป็นต้น โดยการทดลองนั้นใช้วิธีการเก็บค่าจากการที่นำไปโปรแกรมและเครื่องมือรวมถึงตัวตรวจรู้ นำไปทดสอบกับเครื่องจักรจำลองซึ่งในการทดลอง มีการปรับรอบการเดินเครื่องของมอเตอร์ของเครื่องจักรและมีการเพิ่มมวลบนแกนของมอเตอร์เพื่อสังเกตและเปรียบเทียบค่าที่แตกต่างระหว่างรอบการหมุนของมอเตอร์และสังเกตการแสดงผลผ่านหน้าต่างของโปรแกรม ในบทความนี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์ประสิทธิภาพโดยพิจารณาจากค่าความผิดพลาดในการตรวจสอบในการตรวจสอบความเสียหายเครื่องจักรระหว่าง ระบบฟuzzyลอจิก และ ระบบนิวโรฟuzzyลอจิก บนโปรแกรม MATLAB ผลลัพธ์ของข้อผิดพลาดจาก ระบบฟuzzyลอจิก พบว่ามีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 70% ถึง 140% ซึ่งพบว่ามีค่าความผิดพลาดที่สูง เมื่อเปรียบเทียบกับระบบนิวโรฟuzzyลอจิก ค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 3% ถึง 37% เนื่องจากระบบนิวโรฟuzzyลอจิก ได้เรียนรู้จากข้อมูลจริงแต่ในทางกลับกันระบบฟuzzyลอจิก เรียนรู้จากการออกแบบและถูกอ้างอิงตามข้อมูลจากค่ามาตรฐานสากล (ISO)

คำสำคัญ: ระบบนิวโรฟuzzy, ข้อมูลผสม, ซ่อมบำรุงเครื่องจักร.

Abstract

This paper reports the development of hybrid monitoring and analysis software for those who are interested in hybrid analysis. When the machines were operating, the situations that made motor current, vibration and oil could demonstrate the characteristics of machinery status. Somehow, to provide engineers could detect and make maintenance plans by observing and collecting the data as speed and magnitude to compare with ISO standards. This may be of benefit in many industries such as aerospace and industrial power plant etc.

In the experiment, the software may collect the data from a sensor through NI hardware. To experiment the project for testing by using the virtual machine, the experiment has gone through the motor rotation and add the mass on shaft to compare the data and distinguish the status that shows upon interface the program. In this paper, the performance was analysed based on the RMSE between fuzzy logic and Neuro-fuzzy systems on MATLAB. The result errors obtained from fuzzy logic of 70% to 140% were relatively higher if compared to Neuro-fuzzy systems of 3% to 37% due to Neuro-fuzzy training from real hybrid data but fuzzy systems designed reference follow ISO standard.

Keywords: Neuro-fuzzy system, Hybrid data, Machine Health.

¹ นิสิตปริญญาโท, ²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

¹ Master degree student, ²Assist. Prof., Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Kamphaeng Saen District, Nakhon Pathom 73140, Thailand

* Corresponding author; Hataitep Wongsuwarn, Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Kamphaeng Saen District, Nakhon Pathom 73140, Thailand. fenghtw@ku.ac.th

บทนำ

เนื่องจากการวิเคราะห์แบบข้อมูลผสมถูกนำมาใช้ในการวินิจฉัยความผิดปกติของเครื่องจักรหมุนด้วยระบบนิวโรฟัซซีลอจิก เมื่อเครื่องจักรทำงานจะเกิดกระแสไฟมอเตอร์, อนุภาคในน้ำมัน และการสั่นสะเทือน นั้นสามารถบ่งบอกลักษณะความเสียหายเพื่อทำนายสถานะภาพของเครื่องจักรโดยการวัดและวิเคราะห์ข้อมูลผสมของเครื่องจักรที่เป็นไปได้ในลักษณะและความรุนแรงของสิ่งผิดปกติ ด้วยเหตุนี้การทำนายอายุการใช้งานก่อนเครื่องจักรจะเสียหาย^{1,2} อย่างไรก็ตามเพื่อให้วิศวกรสามารถตรวจสอบและวางแผนการซ่อมบำรุงโดยจากการสังเกตและรวบรวมข้อมูลเป็นความเร็วยวและขนาดมาตรฐาน ISO จากการพัฒนาแปลงฟูเรียร์ (FFT) ในปี 1965³ ทำให้พัฒนาเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแบบเรียลไทม์ในเชิงพาณิชย์ เมื่อการใช้เครื่องมือวิเคราะห์เหล่านี้แพร่หลายมากขึ้นจึงเป็นที่มาของผู้เขียนอธิบายถึงผลกระทบความผิดปกติของเครื่องจักรต่างๆ จากข้อมูลผสมและแสดงวิธีการวินิจฉัยเหล่านี้โดยการใช้การวิเคราะห์จากข้อมูลผสม^{4,6}

จากปัญหาที่ขาดแคลนผู้เชี่ยวชาญจึงเป็นที่มาของการวิเคราะห์โดยใช้ปัญญาประดิษฐ์หรือ AI อย่างฟัซซีลอจิก และนิวโรฟัซซีลอจิก เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ให้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงผู้เชี่ยวชาญวิเคราะห์ โดยนำข้อมูลการสั่นสะเทือน, กระแสไฟฟ้ามอเตอร์ และ อนุภาคในน้ำมัน มาใช้กับระบบนิวโรฟัซซีลอจิก เนื่องจากเทคนิคอย่างนิวโรฟัซซีลอจิก สามารถให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า จากการใช้โครงสร้าง Feed-Forward Neural Network⁷

จึงมีการปรับแต่งสมาชิกให้เหมาะสมและถูกต้องที่สุด โดยจำลองการทดสอบบนโปรแกรม MATLAB จึงเป็นที่มาของบทความฉบับนี้ไปพัฒนาในการออกแบบโปรแกรมตรวจสอบความเสียหายเครื่องจักรด้วยข้อมูลผสมโดยใช้ระบบนิวโรฟัซซีลอจิก และถ้ามีระบบโปรแกรมตรวจสอบอัจฉริยะนี้ สามารถเข้ามาแทนที่คนและช่วยเหลือโรงงานที่ขาดแคลนผู้เชี่ยวชาญต่อไปได้

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาประสิทธิภาพจากค่าความผิดพลาดจากการตัดสินใจระหว่าง ระบบฟัซซีลอจิก และ ระบบนิวโรฟัซซีลอจิก ด้วยข้อมูลผสมเพื่อนำการศึกษานี้ไปพัฒนาในการออกแบบโปรแกรมตรวจสอบความเสียหายเครื่องจักรด้วยข้อมูลผสมโดยใช้ระบบนิวโรฟัซซีลอจิก และสามารถเข้ามาแทนที่คนและช่วยเหลือโรงงานที่ขาดแคลนผู้เชี่ยวชาญต่อไปได้

วิธีการวิจัย

Fuzzy Logic

เริ่มต้นแนวคิดของชุดฟัซซีลอจิกคือชุดที่ไม่มีขอบเขตและขอบเขตชัดเจนมีองค์ประกอบอย่างชุดสมาชิกฟัซซี นิยามเป็นสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมคางหมู เนื่องจากความชันมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1 (ซึ่งมีความยาว 0 หรือมากกว่า) และความชันที่ต่ำลงและสามารถกำหนดฟังก์ชัน sigmoid⁸ กรณีทั่วไปหนึ่งกรณีคือฟังก์ชัน logistic ตามที่กำหนดไว้

$$S(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \tag{1}$$

ซึ่งมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

$$S(x) + S(-x) = 1 \tag{2}$$

สมการดังกล่าว

$$(S(x) + S(-x)) \cdot (S(y) + S(-y)) \cdot (S(z) + S(-z)) = 1 \tag{3}$$

กฎ IF-THEN อินพุตหรือคำนวณค่าความเป็นจริงถึงค่าเอาต์พุตที่เป็นจริง

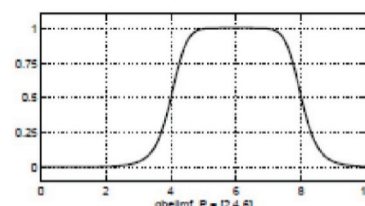
If x is A then y is B.

ฟัซซีเซตฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Fuzzy Set Membership Function) เป็นฟังก์ชันที่มีการกำหนดระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรที่ต้องการใช้งานโดยเริ่มจากการแทนที่กับตัวแทนที่มีความ ไม่ชัดเจน ไม่แน่นอน และคลุมเครือ ดังนั้นส่วนที่สำคัญต่อคุณสมบัติหรือการดำเนินการของฟัซซีเพราะรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมีความสำคัญต่อกระบวนการคิดและแก้ไขปัญหาโดยฟังก์ชัน ความเป็นสมาชิกจะไม่สมมาตรกันหรือสมมาตรกันทุกประการก็ได้ ชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ที่ใช้งานในบทความฉบับนี้คือ

ฟังก์ชันระฆังคว่ำ (Bell-shaped Membership Function)

ฟังก์ชันระฆังคว่ำมีพารามิเตอร์ทั้งหมด 3 ค่าคือ {a, b, c}

$$gbellmf(x : a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c}{a} \right|^{2b}}$$



gbellmf

Figures 1. Bell-shaped Membership Function.

ANFIS Structure

พิจารณาจากชนิด Sugeno ของระบบ fuzzy มีพื้นฐานจากกฎ

1. if x is A_1 and y is B_1 , then $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$.
2. if x is A_2 and y is B_2 , then $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$.

ให้ฟังก์ชันสมาชิกของชุดฟuzzy $A_i, B_i, i=1,2$, be m_{A_i}, m_{B_i}

ในการคำนวณค่าของกฎ เลือกผล T-norm⁹

1. ผลของกฎ

$$W_i = m_{A_i}(x)m_{B_i}(y), i=1,2. \tag{4}$$

2. ผลที่ตามมาของกฎ

$$f(x,y) = \frac{w_1(x,y)f_1(x,y) + w_2(x,y)f_2(x,y)}{w_1(x,y) + w_2(x,y)} \tag{5}$$

หรือจากการพิสูจน์

$$f = \frac{w_1f_1 + w_2f_2}{w_1 + w_2} \tag{6}$$

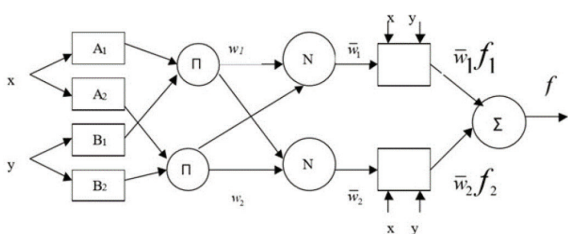
สามารถแยกจากสมการหลักได้คือ

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \tag{7}$$

และ f สามารถเขียนในรูปสมการ

$$f = \bar{w}_1f_1 + \bar{w}_2f_2 \tag{8}$$

การคำนวณสามารถเขียนในรูปไดอะแกรม⁹



Figures 2. Neuro-fuzzy diagram form.

Root Mean Square Error

สมมติว่ามี n ตัวอย่างของแบบจำลองที่คำนวณผิดพลาด (ei, i = 1,2,...,n)¹⁰ ความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากความผิดพลาดหรือวิธีการใช้เพื่อเปรียบเทียบแบบจำลองและข้อมูลที่ไม่ถูกพิจารณา นอกจากนี้ค่ายังไม่เบี่ยงเบน จึงสามารถสมมติชุดตัวอย่างค่าความผิดพลาด RMSE ถูกคำนวณในชุด

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2} \tag{9}$$

วิธีการออกแบบสมาชิกฟuzzyลอจิกบน MATLAB

การแก้ไขสมาชิกเป็นเครื่องมือที่แสดงและแก้ไขฟังก์ชันสมาชิกทั้งหมดที่เกี่ยวข้องจากข้อมูลอินพุตและข้อมูลเอาต์พุตของระบบฟuzzyลอจิก การแก้ไขสมาชิกขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบแสดงในตารางและหัวข้อดังต่อไปนี้

การออกแบบสมาชิกฟuzzyลอจิกสำหรับค่าการสั่นสะเทือนและอุณหภูมิ

การออกแบบอินพุต 2 อินพุตแบบ “gbellmf” แต่ละอินพุตสร้าง 3 สมาชิก ของฟuzzyลอจิกโดยนำช่วงอินพุตจากค่ามาตรฐานจาก Table 1-2. การสั่นสะเทือนที่เป็นค่าความเร็ว มีหน่วยเป็น mm/sec ตามเกณฑ์มาตรฐานสากลอย่าง ISO10816-3 และอุณหภูมิในหน่วย °C ซึ่งผลลัพธ์ของเอาต์พุตแสดงเป็นสีเขียว, สีส้ม และสีแดงตามลำดับความรุนแรงจากน้อยไปมาก

Table 1. Vibration (RMS) ISO10816-3 for design membership Fuzzy Logic.

Input 1 Vibration (mm/sec)	Output
0-4.5	Good
4.5-11.2	Caution
> 11.2	Waring

Table 2. Temp for design membership Fuzzy Logic.

Input 2 Temp (°C)	Output
0-80	Good
80-90	Caution
> 90	Waring

การออกแบบสมาชิกฟuzzyลอจิกสำหรับจำนวนอนุภาคในน้ำมันและความหนืดของน้ำมัน

การออกแบบอินพุต 4 อินพุตแบบ “gbellmf” แต่ละอินพุตสร้าง 3 สมาชิก ของฟuzzyลอจิกโดยนำช่วงอินพุตจากค่ามาตรฐานจาก Table 3-6. จำนวนอนุภาคในน้ำมันโดยแบ่งเป็น 4 ไมครอน, 6 ไมครอนและ 14 ไมครอนมีหน่วยเป็น จำนวนอนุภาค/100มล. ตามเกณฑ์มาตรฐานสากลอย่าง ISO4406 และค่าความหนืดของน้ำมันในหน่วย mm²/s ซึ่งผลลัพธ์ของเอาต์พุตแสดงเป็นสีเขียว, สีส้ม และสีแดงตามลำดับความรุนแรงจากน้อยไปมาก

Table 3. Oil 4 microns ISO4406 for design membership Fuzzy Logic.

Number of Particles 4 Microns	Input 1 Scale number	Output
0-5000	0-19	Good
5000-20000	20-21	Caution
20000-160000	22-24	Waring

Table 4. Oil 6 microns ISO4406 for design membership Fuzzy Logic.

Number of Particles 6 Microns	Input 2 Scale number	Output
0-1300	0-17	Good
1300-5000	18-19	Caution
5000-160000	20-24	Waring

Table 5. Oil 14 microns ISO4406 for design membership Fuzzy Logic.

Number of Particles 14 Microns	Input 3 Scale number	Output
0-160	0-14	Good
160-640	15-16	Caution
640-160000	17-24	Waring

Table 6. Oil Viscosity for design membership Fuzzy Logic.

Range Viscosity (mm ² /s)	Input 4 Viscosity Class	Output
1.98-7.48	VG2-VG7	Good
9-11	VG10	Caution
> 11	> VG10	Waring

การออกแบบสมาชิกฟัซซีลอจิกสำหรับค่าไฟฟ้า การออกแบบอินพุต 7 อินพุตแบบ "gbellmf" แต่ละ อินพุตสร้าง 3 สมาชิก ของฟัซซีลอจิกโดยนำช่วงอินพุตจาก ค่ามาตรฐานจากตารางที่ 7-13. อย่าง Current Imbalance, Current Imp. Imbalance โดยค่าเป็น % และ Fp Amplitude, Peak One, Peak Two, Peak Three และ Peak Four โดยค่า เป็น dB ซึ่งผลลัพธ์ของเอาต์พุตแสดงเป็นสถานะสีเขียว, สีส้ม และสีแดงตามลำดับความรุนแรงจากน้อยไปมาก

Table 7. Current Imbalance (%) for design membership Fuzzy Logic.

Input 1 Imbalance (%)	Output
0-6	Good
6-10	Caution
10-20	Waring

Table 8. Current Imp. Imbalance (%) for design membership Fuzzy Logic.

Input 2 Imp. Imbalance (%)	Output
0-7	Good
7-12	Caution
>12	Waring

Table 9. Current F_p Amplitude (dB) for design membership Fuzzy Logic.

Input 3 Fp Amplitude (Delta dB)	Output
>48	Good
36-48	Caution
<36	Waring

Table 10. Current Peak One (dB) for design membership Fuzzy Logic.

Input 4 Peak One (Delta dB)	Output
0-10	Good
10-20	Caution
> 20	Waring

Table 11. Current Peak Two (dB) for design membership Fuzzy Logic.

Input 5 Peak Two (Delta dB)	Output
0-10	Good
10-20	Caution
> 20	Waring

Table 12. Current Peak Three (dB) for design membership Fuzzy Logic.

Input 6 Peak Three (Delta dB)	Output
0-10	Good
10-20	Caution
> 20	Warning

Table 13. Current Peak Four (dB) for design membership Fuzzy Logic.

Input 7 Peak Four (Delta dB)	Output
0-10	Good
10-20	Caution
> 20	Warning

การนำไปใช้

เพื่อสร้างโปรแกรมตรวจสอบความเสียหายเครื่องจักรด้วยข้อมูลผสมโดยใช้ระบบนิวโรฟuzzyลอจิกให้ถูกต้องและแม่นยำขึ้น จากหน้าต่างโปรแกรมดังแสดง Figure 3. ในส่วนด้านขวาของโปรแกรม แสดงถึงสถานะเครื่องจักรด้วยหลอดไฟทั้งหมด 3 สถานะ คือ เขียว, ส้ม และ แดง ตามลำดับ ความรุนแรงจากน้อยไปมาก เพื่อสำหรับผู้ใช้ในการวางแผนการซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) และทราบถึงปัญหาจากขนาดการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร ที่ใช้ในอุตสาหกรรมตามมาตรฐานสากล ISO ส่วนหน้าต่างโปรแกรมด้านซ้ายแสดงกราฟเชิงความถี่ สำหรับผู้เชี่ยวชาญในการวิเคราะห์อุปกรณ์ในเครื่องจักรที่เสียหาย

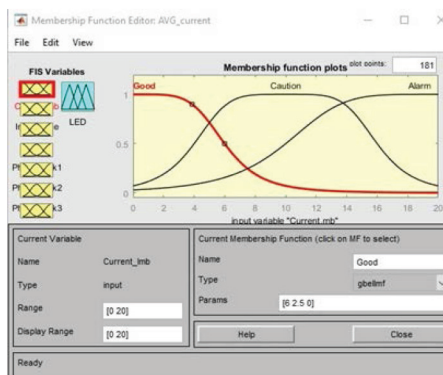


Figures 3. Vibration diagnostic systems based on Fuzzy logic Follow ISO 10816-3 Type G2/4 Rigid Speed 1500 RPM.

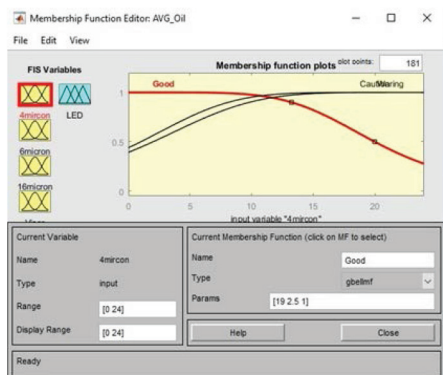
การทดลอง

การออกแบบระบบ Fuzzy Logic ด้วยข้อมูลผสม

ในส่วนนี้ได้ถูกกล่าวไว้ตอนต้นสำหรับการออกแบบสมาชิกฟuzzyลอจิก เพื่อสร้างฟังก์ชันสมาชิกของมาตรฐาน ISO ของข้อมูลอินพุตอย่างกระแสไฟมอเตอร์, อนุภาคในน้ำมัน และการสั่นสะเทือน จาก 0 ถึง 200 , 0 ถึง 24 และ 0 ถึง 20 ในการกำหนดช่วงข้อมูลเอาต์พุต กำหนดช่วงที่ 1 ถึง 3 กำหนดฟังก์ชันสมาชิกแบบ “gbellmf” ดังแสดงใน Figure 4-6



Figures 4. Membership of Input for Current Analysis.



Figures 5. Membership of Input for Oil Analysis.



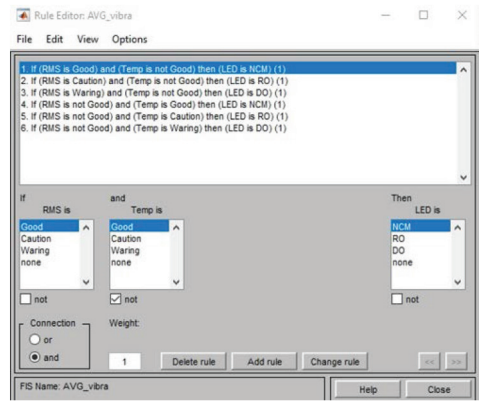
Figures 6. Membership of Input for Vibration Analysis.

การสร้างกฎโดยใช้กราฟิกในการแก้ไขกฎเพื่อให้ชัดเจน ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตขึ้นอยู่กับการกำหนดด้วยตนเองจากการออกแบบแบบฟัชซีลอจิก ทำให้สร้างกฎได้โดยอัตโนมัติ

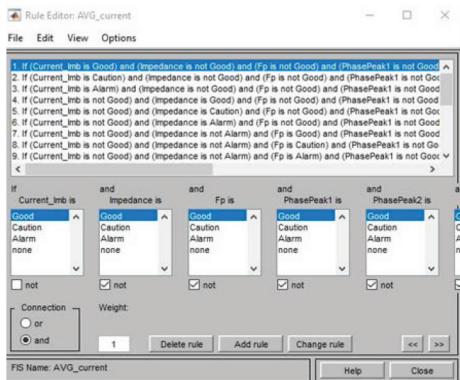
ตัวอย่างสร้างกฎข้อมูลของการวิเคราะห์หอนุภาคในน้ำมัน :

1.If (4 microns is good) and (6 microns is not good) and (14 microns is not good) then (LED is NCM) (1)

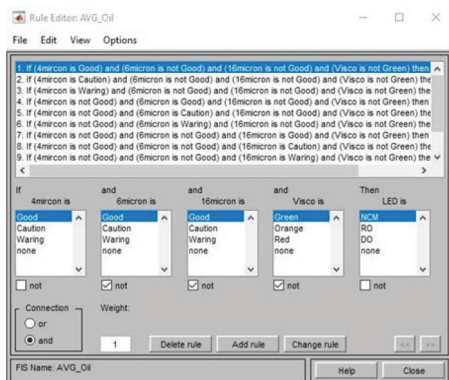
ตัวเลขในวงเล็บหมายถึงน้ำหนักที่สามารถใช้กับกฎแต่ละข้อและกำหนดได้โดยใส่ตัวเลขที่ต้องการระหว่าง 0 ถึง 1: การตั้งค่า ถ้าไม่ได้รับถือว่าค่าคือ 1 ดังแสดงใน Figure 7-9



Figures 9. Total 6 rules of Vibration Analysis.



Figures 7. Total 21 rules of Current Analysis.



Figures 8. Total 12 rules of Oil Analysis.

การออกแบบระบบ Neuro-Fuzzy Logic ด้วย

ข้อมูลผสม

ในส่วนนี้แสดงวิธีการใช้งานของ ANFIS ทั้งหมด 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ 1.นำข้อมูลอินพุต 2.ตั้งค่า FIS 3. เรียนรู้ข้อมูล FIS 4.ทดสอบข้อมูล FIS¹¹. ดัง Figure 10. เป็นตัวอย่างจากข้อมูลผสมอย่างข้อมูลอย่างกระแสไฟมอเตอร์, อุณหภูมิในน้ำมัน และ การสั่นสะเทือน ผลจากการเรียนรู้ข้อมูลแต่ละชนิดอยู่ที่ 150 ข้อมูลและสุ่มข้อมูลจากแต่ละชนิด 10% ดังแสดงใน Table 14-16

Table 14. Motor Current Data for Test.

Input 1	Input 2	Input 3	Input 4	Input 5	Input 6	Input 7	Output
0.3	0.4	62	4.5	-9.8	-8.3	-4.4	1
0.6	2.2	63	26	43	30	10	1

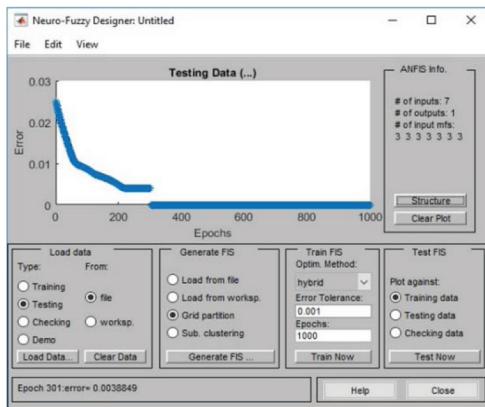
Table 15. Oil Data for Test.

Input 1	Input 2	Input 3	Input 4	Output
65.68	21227.8	6724.7	412.9	3
65.5	10751.7	3131.1	203.7	2

Table 16. Vibration Data for Test.

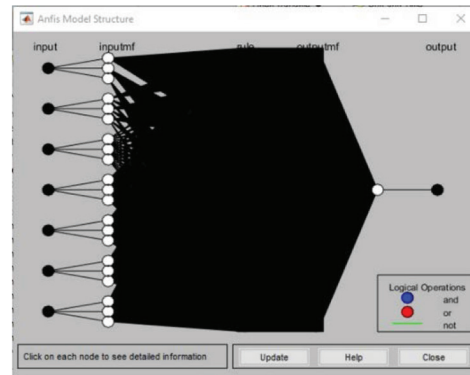
Input 1	Input 2	Output
30	0.64	1
50	2.03	2

เพื่อนำมาทดสอบและออกแบบสมาชิกแต่ละต้นแบบๆ ละ 3 สมาชิก กำหนดชนิดสมาชิกแบบ “gbellmf” การคำนวณค่าความผิดพลาดเกิดหลังจากการทดสอบข้อมูลข้อมูลผสมซึ่งค่าที่ยอมรับได้คือ 0 แต่ในทางปฏิบัติจริงไม่สามารถทำเช่นนั้นได้ ดังนั้นจึงกำหนดอยู่ที่ 0.001 และ Epochs บอกถึงจำนวนรอบของการเรียนรู้ข้อมูลผสม ตั้งนั้รอบที่ตั้งไว้ 1000 รอบ



Figures 10. The testing data appears in the slope down plot in the y-axis of the GUI.

หลังจากสร้าง FIS สามารถดูโครงสร้างหลังจากนำข้อมูลการวิเคราะห์ค่ากระแสไฟเข้าทดสอบตาม Figure 11



Figures 11. The model structure ANFIS of Current Analysis.

วิจารณ์และสรุปผลการทดลอง

Table 17. RMSE estimation performances compared among different Fuzzy Logic models and Neuro-Fuzzy Logic models.

Type Data	RMSE Test Fuzzy	RMSE Test Neuro-Fuzzy
Current Average	0.9487	0.003885
Current Maximum	0.8367	0.032672
Oil Average	1.4142	0.37357
Oil Maximum	0.7746	0.37688
Vibration Average	0.5477	0.31682
Vibration Maximum	0.7071	0.32356

ในบทความวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์ประสิทธิภาพจากค่าความผิดพลาดระหว่าง ระบบฟัซซีลอจิก และ ระบบนิวโรฟัซซีลอจิก จากการประเมินความสามารถเพื่อประยุกต์ใช้เทคนิคอย่างนิวโรฟัซซีลอจิก และ ฟัซซีลอจิก ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าเทคนิคอย่างนิวโรฟัซซีลอจิก สามารถให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า โดยทดสอบบนโปรแกรม MATLAB จากการทดสอบพบว่าผลของค่าความผิดพลาดที่ได้ของฟัซซีลอจิกอยู่ที่ 70% ถึง 140% ซึ่งมีค่าความผิดพลาดที่สูงถ้าเทียบกับระบบนิวโรฟัซซีลอจิก

ดังแสดง Figure 17. เนื่องจากค่าความผิดพลาดนิวโรฟัซซีลอจิกอยู่ที่ 3% ถึง 37% เนื่องจากเรียนรู้จากข้อมูลผสมจริง แต่ฟัซซีลอจิกถูกออกแบบโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน (ISO) จากตารางดังกล่าว สามารถอธิบายถึงค่าที่ผิดพลาดของฟัซซีลอจิกที่เกิน 0.5 ตัวอย่างเช่น ค่าเอาท์พุทที่ได้จากการตัดสินใจของฟัซซีลอจิกคือ 1.55 ค่าเอาท์พุทจะถูกทำให้เป็น 2 หรือสถานะแจ้งจากปลอดภัยจะถูกเปลี่ยนเป็นสถานะเริ่มแสดงอาการความเสียหายของเครื่องจักรแต่ในทางกลับกัน จากค่าที่

ผิดพลาดของนิวโรฟัซซีลอจิกที่ไม่เกิน 0.5 จะทำให้ค่าเอาท์พุทที่ได้คือ 1.37 ค่าเอาท์พุทจะถูกทำให้เป็น 1 ซึ่งมีความแม่นยำใกล้เคียงกับผู้เชี่ยวชาญจึงเป็นที่มาของบทความวิจัยฉบับนี้เพื่อนำบทความวิจัยฉบับนี้ไปพัฒนาในการออกแบบโปรแกรมตรวจสอบความเสียหายเครื่องจักรด้วยข้อมูลผสมโดยใช้ระบบนิวโรฟัซซีลอจิก และถ้ามีระบบโปรแกรมตรวจสอบอัจฉริยะนี้สามารถเข้ามาแทนที่คนและช่วยเหลือโรงงานที่ขาดแคลนผู้เชี่ยวชาญต่อไปได้

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ผศ.ดร.หทัยเทพ วงศ์สุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ซึ่งกรุณาให้คำปรึกษาความรู้ความเข้าใจ แนวทางการทำงาน และ อุปกรณ์ต่างๆ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์เครื่องกล และศูนย์พัฒนานวัตกรรมแมคคาทรอนิกส์และหุ่นยนต์(IMERs) คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต กำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ประเทศไทย และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง

เอกสารอ้างอิง

1. R. F. M. Marcal, M. Negreiros, A. A. Susin, J.L.Kovaleski. Detecting faults in rotating machines. *Instrumentation&Measurement*. 2000; 3(4):24-26.
2. P. A. Laggan. Vibration monitoring. *IEE Colloquium on Understanding your Condition Monitoring*. 1999;1-11.
3. J. W. Cooley, J. W. Tukey. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Mathematics of Computing*. 1965;19:297-301.
4. H. Minns, R. M. Stewart. An introduction to condition monitoring with special reference to rotating machinery. *Workshop In On-Condition Maintenance, Section 8, Institute of Sound And Vibration Research, University of South Ampton*, 1972.
5. N. S. Swansson, Application of vibration signal analysis techniques to signal monitoring. *Conference on Friction and Wear In Engineering, Institution of Engineers, Australia*. 1980;262-267.
6. S. Farokhzad, H. Ahmadi, A. Jaefari, M.R.AsadiAsad Abad, M. Ranjbar Kohan. Artificial neural network based classification of faults in centrifugal water pump. *Vibroengineering*. 2012;14(4):1734-1734.
7. S. M. Yang, Y. J. Tung, Y. C. Liu. A NEURO-FUZZY SYSTEM DESIGN METHODOLOGY FOR VIBRATION CONTROL. *Asian Journal of Control*, 2005 Dec ;7(4):393-400.
8. Wierman, Mark J. *An Introduction to the Mathematics of Uncertainty: including Set Theory, Logic, Probability, Fuzzy Sets, Rough Sets, Evidence Theory*. Creighton University. 2012 July 30.
9. Li-Xin Wang. *A Course in Fuzzy Systems and Control*. The Hong Kong University of Science and Technology.
10. T. Chai^{1,2}, R. R. Draxler¹. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? –Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geosci* 2014;7:1247–1250.
11. Lotfi A. Zadeh, Berkeley. *Fuzzy Logic Toolbox For Use with MATLAB*. CA; January 10. P. 112-123 (vol. 2).