

บทที่ 4 วิธีการทดลองและผลการทดลอง

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการทดลองและผลการทดลอง การทดลองมีสองส่วนคือ การทดลองโดยใช้เครื่องทดสอบความล้าบน โลหะผสมจำรูป และการทดลองทดสอบความล้าของวาล์วควบคุม เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์และพัฒนาอัลกอริธึมการตรวจจับปริมาณความล้าที่เกิดขึ้นบนแอคชูเอเตอร์ที่ขับเคลื่อนด้วยโลหะผสมจำรูปสำหรับวาล์วควบคุม

4.2 การสร้างและวัดความล้าเชิงใช้งานของโลหะผสมจำรูปที่ใช้ขับเคลื่อนแอคชูเอเตอร์ในวาล์วควบคุม

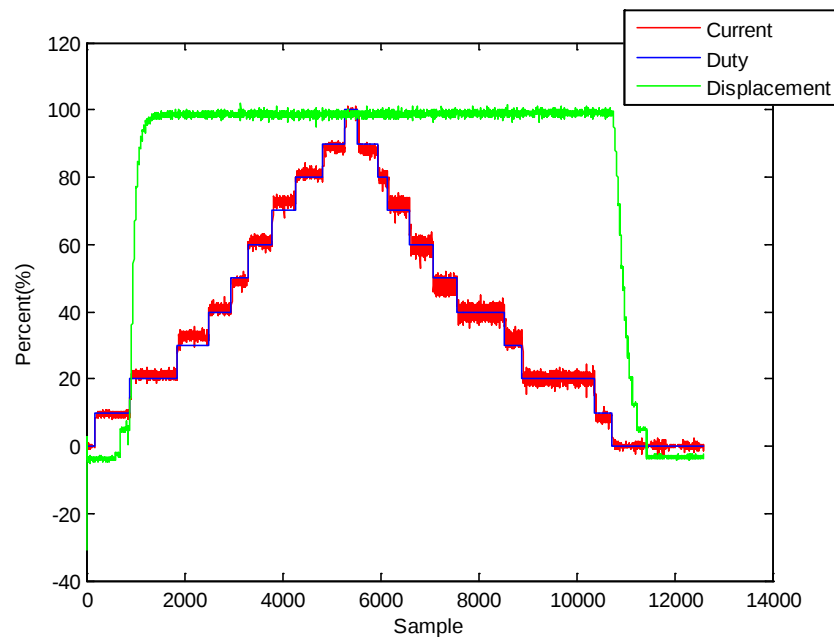
4.2.1 การหาสัญญาณอินพุตที่เหมาะสมในการสร้างปริมาณความล้า

จุดมุ่งหมายของการทดลองในส่วนที่ 4.2.1 นี้มีเพื่อศึกษาหาสัญญาณอินพุตที่เหมาะสมในการสร้างปริมาณความล้าจากการใช้งานภายใต้ภาระทางกลและความร้อนที่เกิดขึ้นบนเส้นลวดโลหะผสมจำรูป โดยพิจารณาจากแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการตอบสนองทางไดนามิกและเสถียรภาพเมื่อความล้าเกิดขึ้นบนโลหะผสมจำรูป ซึ่งสัญญาณอินพุตที่เหมาะสมกับระบบควรนำมาใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของฮิสเทอรีซิสและระยะขจัดเคลื่อนที่ของโลหะผสมจำรูปได้ การทดลองมีทั้งหมด 3 ขั้นตอน ขั้นตอนที่ 1 ทำขึ้นเพื่อกำหนดความถี่ของอัตราการสุ่มข้อมูล (sampling rate) ซึ่งกำหนดได้จากค่าคงที่เวลา (time constant) ที่เร็วที่สุดของวาล์วควบคุม จากนั้นในขั้นตอนที่ 2 จึงเลือกประเภทของสัญญาณอินพุตที่เหมาะสมในการทดสอบความล้าของโลหะผสมจำรูป และขั้นตอนที่ 3 นำสัญญาณอินพุตที่เลือกจากขั้นตอนที่ 2 มาสร้างความล้าให้เกิดขึ้นบนโลหะผสมจำรูปเพื่อศึกษาแนวโน้มผลการตอบสนองของฮิสเทอรีซิสที่เปลี่ยนแปลงเพื่อเป็นแนวทางในการหาตัวบ่งชี้สถานะความล้าในวาล์วควบคุมต่อไป

4.2.1.1 การทดสอบหาความเร็วในการตอบสนองและอัตราการขยายของวาล์วควบคุม

อัตราการสุ่มข้อมูลมีความสำคัญในการเก็บผลข้อมูลของการทดสอบมาก เพราะเป็นตัวกำหนดความละเอียดของข้อมูลที่ได้รับและสามารถเก็บข้อมูลการตอบสนองให้เหมาะสมกับระบบ การหาค่าอัตราการสุ่มข้อมูลทดลองโดยทดสอบวาล์วควบคุมแบบระบบเปิดเมื่อไม่ใช้พัลสมระบายความร้อนด้วยสัญญาณอินพุตแบบ PWM ที่เพิ่ม %Duty cycle ตั้งแต่ 0 ถึง 100 และลดค่า %Duty cycle ลงมาจาก 100% ถึง 0% โดยเพิ่มและลดทีละ 10% และเก็บระยะเคลื่อนที่ของวาล์วด้วยอัตราการสุ่มข้อมูล 10

ข้อมูลต่อวินาที จากนั้นคำนวณค่าคงที่เวลาในแต่ละช่วงของ step input ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.1



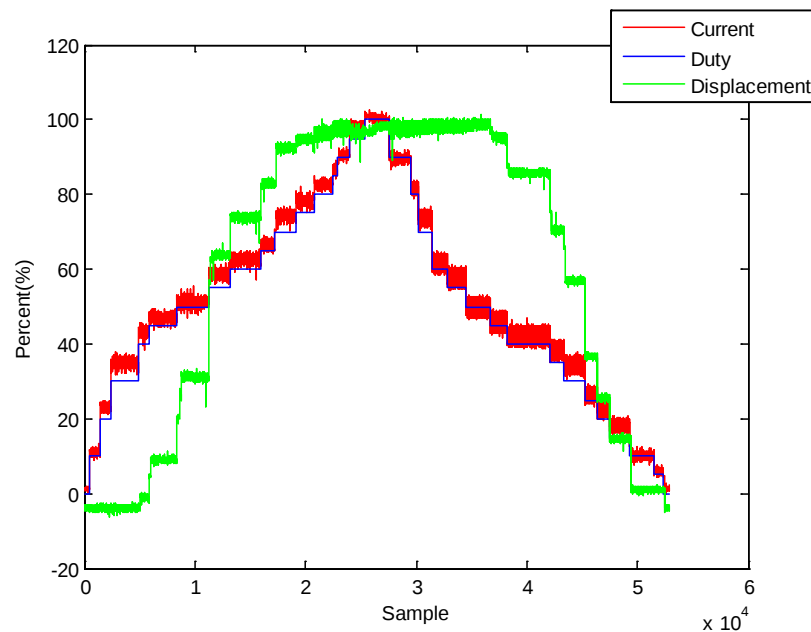
รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบวาล์วควบคุมแบบระบบเปิดโดยไม่ใช้ระบบระบายความร้อน

ตารางที่ 4.1 ความเร็วในการตอบสนองของวาล์วควบคุมแบบระบบเปิดโดยไม่ใช้ระบบระบายความร้อน

%Duty	Gain	Time constant (วินาที)
0	0	0
10	0.8797	11.13
20	9.3682	9.392
‘	‘	‘
‘	‘	‘
10	-	-
0	10.2479	28.8

จากตารางที่ 4.1 พบว่าการควบคุมแบบระบบเปิดเมื่อไม่ใช้ระบบระบายความร้อนจะมีช่วงการตอบสนองได้เพียง 3 ช่วง คือช่วงขาขึ้นที่ 10% และ 20% ช่วงขาลงที่ 0% เนื่องจากในช่วงความร้อนสูงๆ ลวดไม่สามารถคายความร้อนได้ทัน ดังนั้นการไม่ใช้ระบบระบายความร้อนจะทำให้มีช่วงที่ใช้งานลวดได้จำกัด

ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองหาค่าคงที่เวลาของแบบระบบเปิดโดยใช้ระบบระบายความร้อนด้วยพัดลม จากนั้นหาความเร็วการตอบสนอง (time constant) ในแต่ละช่วงการทำงานของวาล์วควบคุม ด้วยการทดสอบวาล์วควบคุมแบบระบบเปิดเมื่อใช้ระบบระบายความร้อนตลอดเวลาด้วยสัญญาณอินพุตแบบ PWM ที่เพิ่ม %Duty cycle ตั้งแต่ 0 ถึง 40 ทีละ 10% และช่วงที่เหลือทีละ 5% ด้วยอัตราการเก็บข้อมูล 10 ข้อมูลต่อวินาที เนื่องจากช่วงที่สามารถกระตุ้นในก้านวาล์วเคลื่อนที่ได้นั้นจำเป็นต้องใช้ %Duty cycle ที่ 40 ถึง 100 ในช่วงขาขึ้นและ 100 ถึง 20 ในช่วงขาลง ช่วงดังกล่าวจึงใช้ขนาดของการ step ที่ 5% ซึ่งละเอียดกว่าในช่วงที่ก้านวาล์วยังไม่ถูกกระตุ้น



รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบวาล์วควบคุมแบบระบบเปิดโดยใช้พัดลมระบายความร้อน

ตารางที่ 4.2 ความเร็วในการตอบสนองขาขึ้น (ตารางด้านซ้าย) และขาลง (ตารางด้านขวา) ของวาล์วควบคุมแบบระบบเปิดโดยไม่ใช้พัลลภระบายความร้อน

Duty (%)	Gain	Time constant (วินาที)	Duty (%)	Gain	Time constant (วินาที)
0	-	-	100	-	-
10	-	-	90	-	-
20	-	-	80	-	-
30	-	-	70	-	-
40	0.4801	15.66	60	-	-
45	2.02	12.603	50	-	-
50	4.424	21.068	45	0.72	11.7
55	6.53	7.5	40	1.874	8.6
60	2.006	2.2	35	3.048	9.2
65	2.5802	2.1	30	2.722	7.3
70	1.884	3.7	25	4.632	11.86
75	0.464	2.4	20	2.232	4.3
80	0.37	2.4	15	2.18	3.6
85	0.284	3.3	10	2.952	4.4
90	-	-	5	0	0
100	-	-	0	0.97	2.5

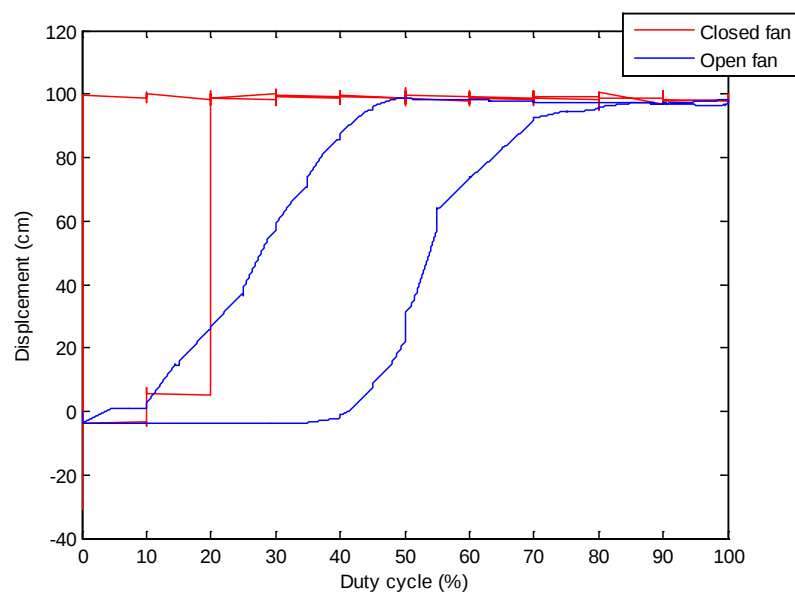
จากรูปที่ 4.2 นำมาหาความเร็วในการตอบสนองได้ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งพบว่าค่าคงที่เวลาที่น้อยที่สุดคือ 2.1 วินาที แสดงถึงเวลาตอบสนองที่เร็วที่สุดของวาล์วควบคุม จึงนำค่าที่ได้มาประมาณหาค่า bandwidth ของการทำงานได้ดังนี้

$$\text{Min time constant} = 2.1 \text{ sec}$$

$$\text{Rise time} = 2.2 * \text{Min time constant} = 4.62 \text{ sec}$$

$$\text{Bandwidth} = 0.35 / \text{Rise time} = 0.075 \text{ Hz} \quad (4.1)$$

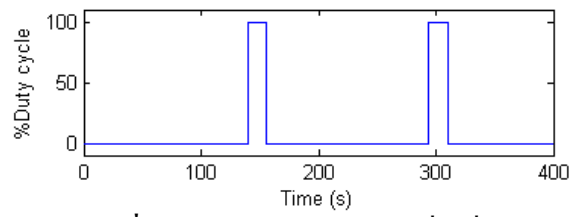
จากผลการทดลอง พบว่าวาล์วควบคุมแบบระบบเปิดเมื่อใช้พัดลมช่วยระบายความร้อนตลอดเวลา ทำให้โลหะผสมจำรูปสามารถตอบสนองในช่วงขาขึ้นที่ 40% - 85% และช่วงขาลง 45% - 0% แนวโน้มที่เห็นได้ชัดจากตารางที่ 4.2 คือความเร็วในการตอบสนองในช่วงขาขึ้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อ %Duty cycle มากขึ้น นำค่าระยะเคลื่อนที่ของวาล์วจากการทดสอบแบบใช้และไม่ใช้พัดลมช่วยระบายความร้อนมาพล็อตเทียบกับปริมาณความร้อนที่ป้อนดังรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า ระบบแบบใช้พัดลมช่วยระบายความร้อนสำหรับระบบเปิดจะมีช่วงการทำงานมากกว่า ในขณะที่ระบบแบบไม่ใช้พัดลมช่วยระบายความร้อนมีการทำงานเพียงแค่เปิดและปิดเท่านั้น ดังนั้นการทดสอบวาล์วควบคุมแบบระบบเปิดจึงควรเปิดพัดลมระบายความร้อนตลอดเวลาเพื่อเพิ่มช่วงการใช้งานวาล์วควบคุมให้มากขึ้น



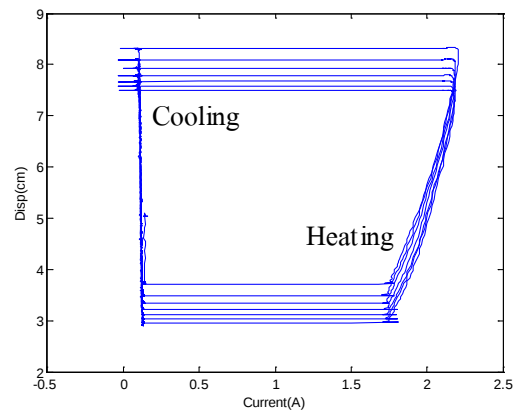
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบฮิสเทอรีซิสของการทดสอบแบบปิดและเปิดระบบระบายความร้อน

4.2.1.2 การทดสอบสัญญาณอินพุตชนิดต่างๆ กับโลหะผสมจำรูป

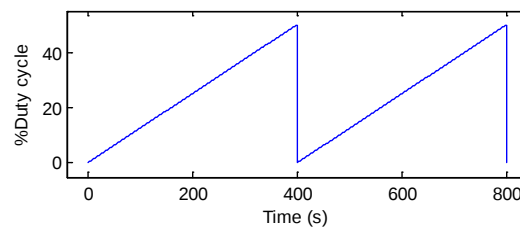
งานวิจัยนี้พิจารณาความล่าช้าในลักษณะของความล่าช้าจากการใช้งานเส้นลวดโลหะผสมจำรูป ดังนั้นเพื่อให้สามารถพิจารณาความล่าช้าที่เกิดขึ้นได้ จึงได้ใช้เครื่องทดสอบโลหะผสมจำรูปมาทดสอบด้วยสัญญาณอินพุตลักษณะต่างๆ โดยใช้โหลดที่กระทำแก่เส้นลวดโลหะจำรูปให้ปริมาณเดียวกันกับเส้นลวดในวาล์วควบคุม ซึ่งเลือกใช้โหลดที่จะนำมาใช้ทดสอบโลหะผสมจำรูปผ่านเครื่องทดสอบขนาด 5 กิโลกรัม (โหลดสูงสุดที่ระยะเคลื่อนที่ก้านวาล์วเป็น 1.5×10^{-2} เมตร) จากนั้นทดลองป้อนสัญญาณอินพุตที่มีลักษณะเป็น PWM ทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ สัญญาณอินพุตแบบสี่เหลี่ยม (square wave), คลื่นฟันปลา (saw tooth) และสามเหลี่ยม (triangle) แก่เครื่องทดสอบดังรูปที่ 4.4, 4.6 และ 4.8 ตามลำดับ เพื่อนำผลการตอบสนองมาวิเคราะห์หาสัญญาณอินพุตที่เหมาะสมแก่การทดสอบความล่าช้าบนโลหะผสมจำรูป โดยนำผลที่ได้มาพล็อตระหว่างกระแสหรือสัญญาณอินพุตกับระยะเคลื่อนที่หรือเอาต์พุต ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.5, 4.7 และ 4.9



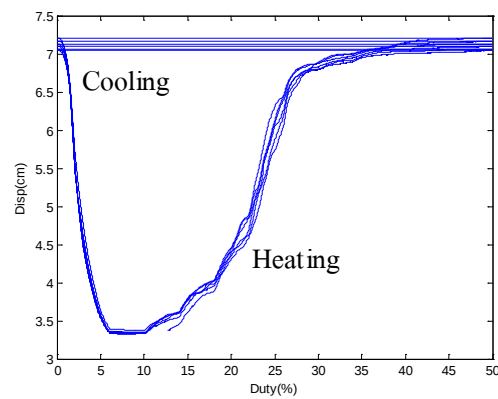
รูปที่ 4.4 สัญญาณอินพุตแบบสี่เหลี่ยม



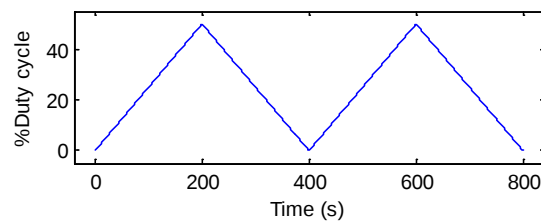
รูปที่ 4.5 ผลการตอบสนองของสัญญาณอินพุตแบบสี่เหลี่ยม



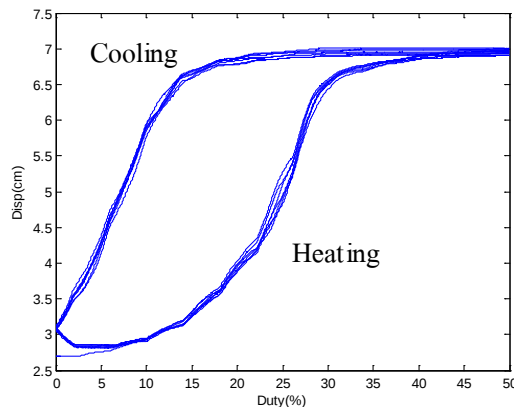
รูปที่ 4.6 สัญญาณอินพุตแบบคลื่นฟันปลา



รูปที่ 4.7 ผลการตอบสนองของสัญญาณอินพุตแบบคลื่นฟันปลา



รูปที่ 4.8 สัญญาณอินพุตแบบสามเหลี่ยม



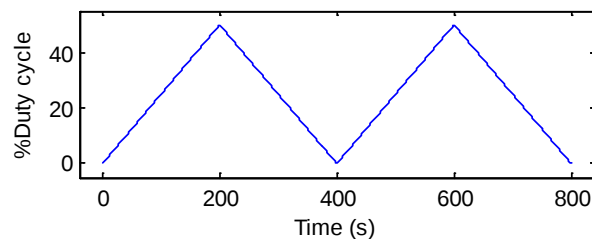
รูปที่ 4.9 ผลการตอบสนองของสัญญาณอินพุตแบบ triangle Wave

จากผลการตอบสนองของอินพุตทั้ง 3 ลักษณะ จึงสรุปได้ว่าควรเลือกใช้สัญญาณอินพุตแบบสามเหลี่ยมในการทดสอบความล้าในโลหะผสมจำรูป เนื่องจากอินพุตลักษณะนี้ให้ผลการตอบสนองที่สามารถบ่งชี้ถึงความกว้างของฮิสเทอรีซิสและระยะจัดการเคลื่อนที่ของเส้นลวดที่มีผลต่อความล้าบนโลหะผสมจำรูป ซึ่งแตกต่างจากผลการตอบสนองที่ได้จากสัญญาณแบบสี่เหลี่ยมและคลื่นฟันปลา ซึ่งไม่สามารถบอกความกว้างของฮิสเทอรีซิสที่มีผลต่อความล้าบนโลหะผสมจำรูปได้

4.2.1.3 การทดสอบผลกระทบจากความล้าที่เกิดขึ้นบนโลหะผสมจำรูป

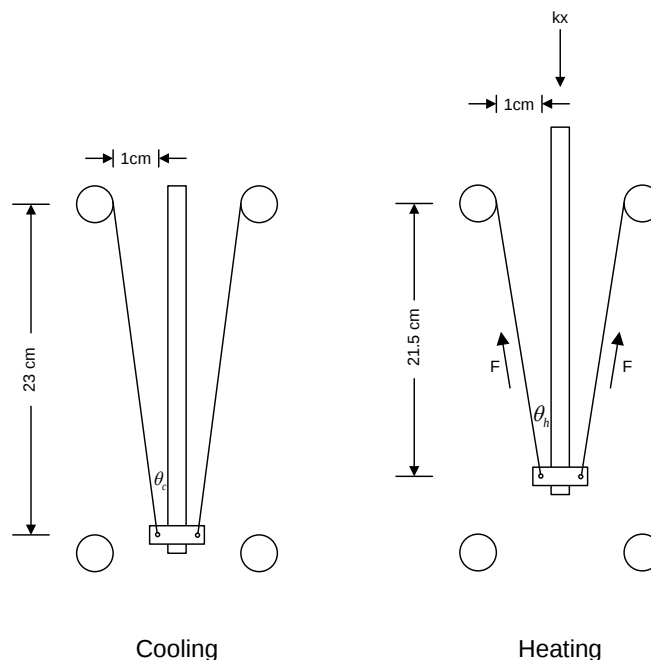
ในงานวิจัยนี้สนใจความล้าการจากใช้งานซึ่งจำต้องป้อนสัญญาณอินพุตเพื่อสร้างโหลดทางความร้อนให้แก่ระบบ จึงได้ทดสอบแนวโน้มของความล้าที่จะเกิดขึ้น โดยใช้เครื่องทดสอบโลหะผสมจำรูป และจะทำการพิจารณาความล้าที่เกิดขึ้นบนเส้นลวดโลหะผสมจำรูป จึงได้ทดลองป้อนสัญญาณอินพุตแบบสามเหลี่ยม ดังรูปที่ 4.8 ที่ความถี่ PWM ประมาณ 4 เฮิร์ตซ์ ให้แก่เครื่องทดสอบโลหะผสมจำรูป ในช่วง duty 0-50% มีคาบของสัญญาณเป็น 400 วินาที เนื่องจากช่วงดังกล่าวทำให้มีฮิสเทอรีซิสที่เหมาะสม สามารถวัดความกว้างฮิสเทอรีซิสได้และยังสัมพันธ์กับการเปลี่ยนเฟสสมบูรณ์ เนื่องจากการเปลี่ยนเฟสแบบนี้ทำให้อายุการใช้งานของโลหะผสมจำรูปสั้นกว่าการเปลี่ยนเฟสแบบไม่สมบูรณ์ เนื่องจากขนาดของ %duty cycle มีผลต่อรูปร่างของฮิสเทอรีซิสที่แสดงถึง และทำการเก็บข้อมูลทุกๆ 5 ข้อมูลต่อวินาที หรือ 0.2 เฮิร์ตซ์ แก่โลหะผสมจำรูป 3 เส้น ได้แก่

- SMA4 และ SMA5 เป็นตัวอย่างโลหะผสมจำรูปที่นำมาทดสอบภายใต้ความล้าของโหลดทางกลและโหลดทางความร้อน 1000 รอบทั้งสองเส้น ทดสอบโลหะผสมจำรูปจำนวน 1000 รอบ ที่โหลดทางกล 5 กิโลกรัม
- SMA6 เป็นตัวอย่างโลหะผสมจำรูปที่นำมาทดสอบภายใต้ความล้าของโหลดทางกลและโหลดทางความร้อนจนโลหะผสมจำรูปเส้นแตกหัก (failure) โดยใช้โหลดทางกล 8 กิโลกรัมเพื่อลดเวลาการทดสอบและต้องการให้โลหะผสมจำรูปเสียสภาพให้เร็วที่สุด และปล่อยทดสอบจนโลหะผสมจำรูปขาดได้จำนวนรอบทั้งหมดประมาณ 1885 รอบ



รูปที่ 4.10 สัญญาณอินพุตสำหรับตัวอย่างเส้นลวดโลหะผสมจำรูป 3 เส้น

เนื่องจากการกำหนดโหลดทางกลที่ 5 กิโลกรัมมีที่มาจากหาคำนวณหาโหลดทางกลที่กระทำต่อโลหะผสมจำรูปบนวาล์วควบคุม



รูปที่ 4.11 แรงที่เส้นลวดโลหะผสมจำรูปกระทำต่อก้านวาล์ว

ในช่วง cooling เส้นลวดทำมุมกับก้านวาล์ว θ_c และในช่วง heating เส้นลวดทำมุมกับก้านวาล์ว θ_h ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\theta_c = \tan^{-1}\left(\frac{1}{23}\right) = 2.489^\circ \quad (4.2)$$

$$\theta_h = \tan^{-1}\left(\frac{1}{21.5}\right) = 2.663^\circ \quad (4.3)$$

ดังนั้นในช่วง heating เส้นลวดต้องออกแรง F เพื่อดึงก้อน วาล์วให้เคลื่อนที่ขึ้นเป็นระยะ 15 mm ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$2F_{\max} \cos(2.663) = kx \quad (4.4)$$

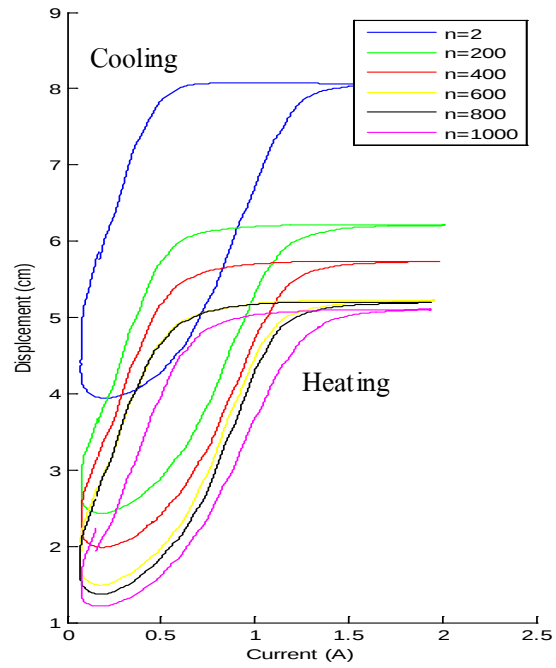
$$2F_{\max} (\text{N}) \cos(2.663) = 55.8985 \left(\frac{\text{N}}{\text{m}}\right) (1.5 \times 10^{-2} (\text{m})) \quad (4.5)$$

$$F_{\max} (\text{N}) = \frac{83.847}{2 \cos(2.663)} (\text{N}) = 41.9688 (\text{N}) \quad (4.6)$$

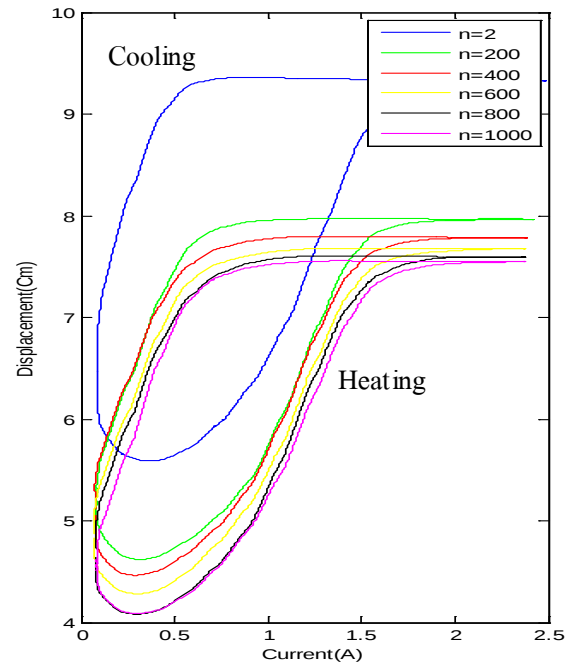
ซึ่งแรงที่คำนวณได้เป็นแรงที่กระทำต่อโลหะผสมจำรูปจำนวนสองเส้น ดังนั้นแรงที่สปริงกระทำต่อโลหะผสมจำรูปเพียงเส้นเดียวคือ 41.9235 นิวตัน หรือ 4.2735 กิโลกรัม ได้นำค่านี้นำหนักนี้มาใช้ในการทดสอบเส้นลวดด้วยเครื่องทดสอบโลหะผสมจำรูปเพื่อให้เส้นลวดอยู่ภายใต้สภาวะ โหลดทางกล ใกล้เคียงกัน

โลหะผสมจำรูปทั้งหมดถูกทดสอบในสภาวะที่ไม่มีการเปิดใช้ระบบระบายความร้อนช่วยในการคลายตัว และได้ผลการทดลองซึ่งพล็อตให้เห็นลักษณะของฮิสเทอรีซิสของโลหะผสมจำรูปแต่ละเส้นในจำนวนรอบต่างๆกัน ได้ผลดังรูปที่ 4.12

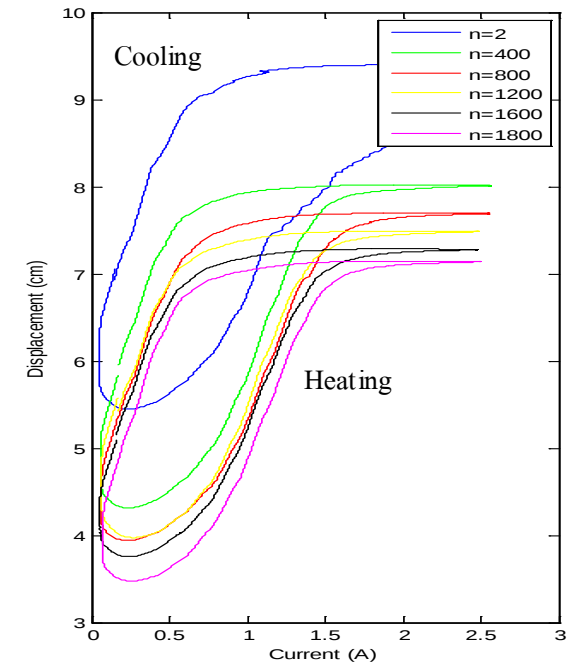
จากรูปที่ 4.12 จะเห็นชัดเจนว่ามีการเปลี่ยนแปลงของฮิสเทอรีซิสเมื่อเกิดความล้าการจากใช้งานที่จำนวนรอบต่างๆกัน ลักษณะของฮิสเทอรีซิสนั้นเลื่อนมาด้านล่าง ซึ่งเกิดจากเส้นลวดโลหะผสมจำรูปยึดตัวจากการได้รับโหลดทางกลและยับยั้งด้านซ้ายเมื่อมีจำนวนรอบมากขึ้น จากนั้นจึงได้นำข้อมูลที่ได้มาหาความกว้างและระยะจัดการเคลื่อนที่ของเส้นลวดโลหะจำรูปในแต่ละเส้นและแต่ละจำนวนรอบได้ผลดังตารางที่ 4.3



ก) SMA4



ข) SMA5

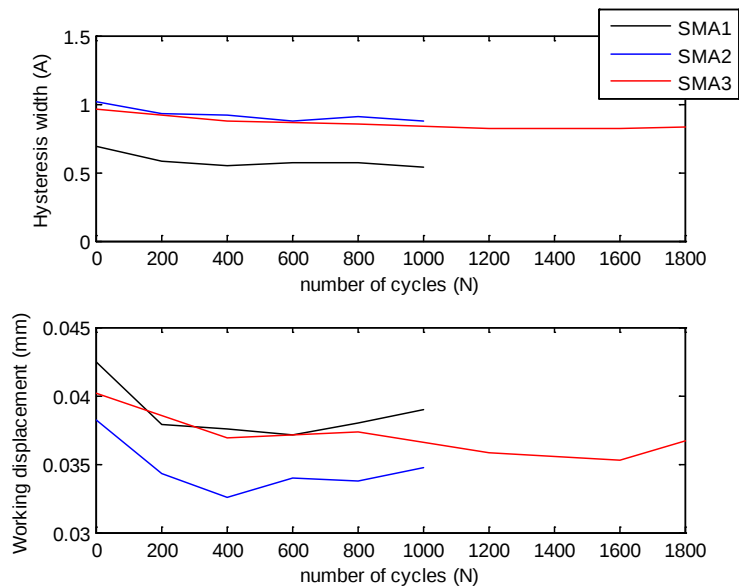


ค) SMA6

รูปที่ 4.12 ฮิสเทอรีซิสของโลหะผสมจำรูปที่จำนวนรอบต่างๆ

ตารางที่ 4.3 ความกว้างฮิสเทอรีซิสและระยะการเคลื่อนที่ของโลหะผสมจำรูปที่จำนวนรอบต่างๆของ SMA4, SMA5 และ SMA6

จำนวนรอบ	SMA4		SMA5		SMA6	
	ความกว้างฮิสเทอรีซิส (A)	ระยะขจัด การเคลื่อนที่ (cm)	ความกว้างฮิสเทอรีซิส (A)	ระยะขจัด การเคลื่อนที่ (cm)	ความกว้างฮิสเทอรีซิส (A)	ระยะขจัด การเคลื่อนที่ (cm)
2	0.6864	4.24	1.0206	0.0382	0.9627	0.0402
200	0.5857	3.79	0.9319	0.0343	0.8699	0.0369
400	0.5535	3.76	0.9195	0.0326	0.8545	0.0373
600	0.5688	3.71	0.8773	0.034	0.8222	0.0358
800	0.5713	3.8	0.9055	0.0337	0.8245	0.0353
1000	0.5404	3.9	0.8706	0.0347	0.8364	0.0367



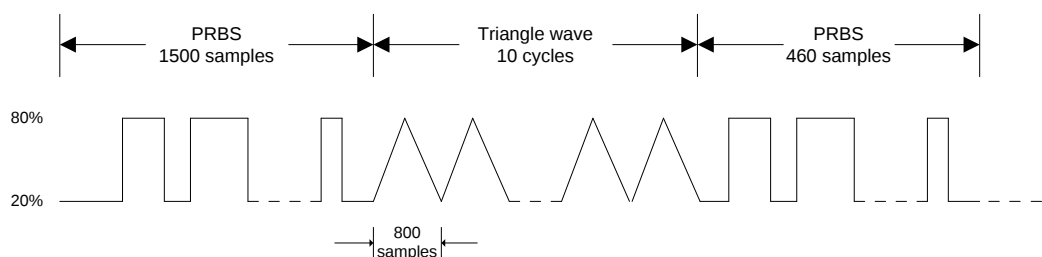
รูปที่ 4.13 ความกว้างของฮิสเทอรีซิสและระยะขจัดการเคลื่อนที่ต่อจำนวนรอบของ SMA4, SMA5 และ SMA6

นำผลที่ได้จากตารางที่ 4.3 มาพล็อตกราฟเพื่อสังเกตแนวโน้มที่เกิดขึ้นได้ดังรูปที่ 4.13 โดยแนวโน้มความกว้างของฮิสเทอรีซิสเมื่อได้รับความล้าทางกลและความร้อนแบบเดียวกันสำหรับโลหะผสมจำรูปทั้งสามเส้น ซึ่งจากกราฟในรูปที่ 4.13 พบแนวโน้มความกว้างของฮิสเทอรีซิสและระยะขจัดของก้านวาล์วลดลงเมื่อจำนวนรอบที่มากขึ้น นั่นคือลวดมีแนวโน้มที่จะล้ามากขึ้นเมื่อผ่านการใช้งานด้วย

จำนวนรอบของโหลดที่มากขึ้น สัญญาณอินพุตแบบสามเหลี่ยมนี้ถูกนำไปสร้างปริมาณความล่าช้าจากการงานให้กับวาล์วควบคุมดันแบบต่อไป

4.3 การสร้างปริมาณความล่าช้าให้แก่โหลดผสมจำรูปในวาล์วควบคุม

จากข้อสันนิษฐานว่าเมื่อโหลดผสมจำรูปถูกใช้งานโดยผ่านโหลดทางกลและโหลดทางความร้อนในปริมาณและระยะเวลาหนึ่งจะทำให้เกิดความล่าช้าขึ้นบนเส้นลวด จึงได้นำสัญญาณดังรูปที่ 4.14 มาทำการทดสอบวาล์วควบคุม



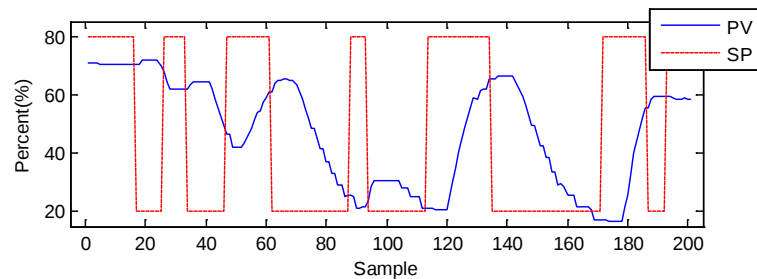
รูปที่ 4.14 รูปแบบสัญญาณอินพุตที่ใช้สร้างความล่าช้าให้แก่ระบบวาล์วควบคุม

รูปแบบสัญญาณอินพุตที่ใช้สร้างความล่าช้าให้แก่ระบบวาล์วควบคุมประกอบด้วยช่วงสัญญาณ PRBS ที่ใช้เพื่อทดสอบผลการตอบสนองของโหลดผสมจำรูป สำหรับนำไปสร้างโมเดลและวิเคราะห์สัญญาณตกค้างที่เกิดขึ้น และช่วงสัญญาณแบบสามเหลี่ยมที่ถูกนำมาใช้เพื่อสร้างภาระทางกลและความร้อนให้แก่โหลดผสมจำรูป ทำให้เกิดปริมาณความล่าช้าหรือการสูญเสียความสามารถในการกินตัวให้แก่โหลดผสมจำรูป

โดยในครั้งแรกช่วงสัญญาณ PRBS ชุดแรกจำนวน 1500 ข้อมูล นั้นถูกนำมาใช้หาโมเดลของวาล์ว ในขณะที่เริ่มต้นหรือขณะยัง ไม่มีความล่า ส่วนสัญญาณ PRBS ในช่วงถัดไปใช้หาโมเดลของวาล์วภายหลังจากผ่านโหลดความร้อนและมีความล่าเกิดขึ้น โดยใช้ขนาดข้อมูลที่สั้นเพียง 460 ข้อมูล เนื่องจากต้องการให้ระหว่างขับลวดด้วยสัญญาณ PRBS นี้เกิดผลกระทบต่อปริมาณความล้าที่น้อยที่สุด ความล่าในวาล์วสร้างจากสัญญาณสามเหลี่ยมชุดละ 10 รอบ รอบละ 800 samples ที่สร้างระหว่างสัญญาณ PRBS แต่ละชุด สัญญาณทั้งหมดสร้างโดยใช้ความถี่ PWM ประมาณ 10 เฮิร์ตซ์และอัตราการสุ่มข้อมูลที่ 2 ข้อมูลต่อวินาที จากนั้นทำงานทดสอบโหลดผสมจำรูปด้วยสัญญาณอินพุตลักษณะดังกล่าว จนกระทั่งเส้นลวดโหลดผสมจำรูปหมดสภาพใช้งาน ซึ่งได้จำนวนรอบทางความล่าจากสัญญาณสามเหลี่ยมทั้งหมดประมาณ 1690 รอบในการสร้างความล่า

4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบวาล์วควบคุมในสถานะปกติ

การตรวจจับความล้มเหลววิธีด้วยกัน เนื่องจากงานวิธีนี้มุ่งเป้าหมายไปที่การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการตรวจจับความล้มเหลวที่เกิดขึ้น ดังนั้นการได้มาซึ่งแบบจำลองที่ถูกต้องแม่นยำจึงมีความสำคัญมาก ดังนั้นจึงได้ทดสอบระบบด้วยสัญญาณแบบ pseudorandom binary sequence (PRBS) เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวาล์วควบคุมแบบไม่เชิงเส้น เนื่องจากโลหะผสมจำรูปมีความไม่เชิงเส้นสูง ซึ่งจะนำผลที่ได้มาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ Nonlinear Autoregressive eXogenous (NARX)

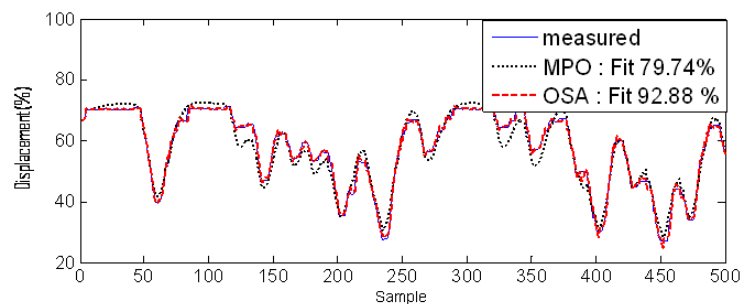


รูปที่ 4.15 ผลการตอบสนองของวาล์วควบคุมด้วยสัญญาณ PRBS

จากรูปที่ 4.15 เป็นตัวอย่างผลการตอบสนองของวาล์วควบคุมที่เกิดจากสัญญาณอินพุตแบบ PRBS นำผลตอบสนองของข้อมูล 1500 samples แรกมาสร้าง โมเดลแบบ NARX ในช่วงที่โลหะจำรูปอยู่ในสถานะปกติซึ่งเป็นสถานะที่ยังไม่ได้รับผลกระทบจากโหลดทางกลและโหลดทางความร้อน โดยคาดหวังว่าสามารถนำโมเดลในขณะทำงานปกติมาเปรียบเทียบกับวาล์วควบคุมเพื่อหาตัวแปรที่สามารถบ่งชี้เมื่อวาล์วควบคุมเกิดความล้มเหลว เพื่อนำตัวบ่งชี้มาพิจารณาความล้มเหลวของโลหะผสมจำรูปในวาล์วควบคุม ซึ่งได้โมเดลแบบไม่เชิงเส้นดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ NARX

Parameter	Regressors	Parameters	STD
p1	$u(t-3)u(t-3)$	+6.6208E-004	6.7150E-005
p2	$y(t-2)$	+1.1092E+000	2.4633E-002
p3	$y(t-2) u(t-3)$	-1.5799E-002	6.4622E-004
p4	$u(t-8) u(t-8)$	+1.1043E-003	1.9952E-004
p5	$y(t-4)$	-1.5999E-001	2.3281E-002
p6	$u(t-8)$	-3.8492E-002	2.0076E-002
p7	$u(t-3) u(t-8)$	-8.5339E-004	8.0858E-005
p8	$y(t-1) u(t-3)$	+1.5954E-002	6.7283E-004



รูปที่ 4.16 ผลการจำลอง วาล์วควบคุมด้วยโมเดลแบบ NARX เทียบกับข้อมูลวัด

ผลการจำลองวาล์วควบคุมด้วยโมเดลแบบ NARX เทียบกับข้อมูลวัดแสดงในรูปที่ 4.16 โดยประสิทธิภาพของการจำลองสามารถพิจารณาเปอร์เซ็นต์การผิดพลาด ซึ่งมีผลการผิดพลาดที่ต่ำทั้งสองรูปแบบได้แก่ MPO ที่ 79.74% และ OSA ที่ 92.88% ซึ่งบ่งบอกได้ว่าโมเดลนี้สามารถประมาณผลการตอบสนองได้เป็นอย่างดี

4.5 การประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อสร้างสัญญาณตกค้างสำหรับตรวจจับความล้ม

นำ NARX model จากหัวข้อที่ 4.3 มาใช้งานร่วมกับวาล์วควบคุมโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.2 ในรูปแบบของ one step ahead prediction (OSA) ที่นำสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวาล์วควบคุมมาป้อนให้แก่โมเดลเพื่อประมาณเอาต์พุต ($\hat{y}_{OSA}$) และ model predicted error (MPE) ที่นำสัญญาณอินพุตของวาล์วควบคุมเพียงตัวเดียวป้อนให้แก่โมเดลเพื่อประมาณเอาต์พุต ($\hat{y}_{MPE}$)

$$\hat{y}_{OSA}(t) = f(y(t-1), \dots, y(t-n_y), u(t-1), \dots, u(t-n_u)) \quad (4.7)$$

$$\hat{y}_{MPE}(t) = f(\hat{y}_{MPE}(t-1), \dots, \hat{y}_{MPE}(t-n_y), u(t-1), \dots, u(t-n_u)) \quad (4.8)$$

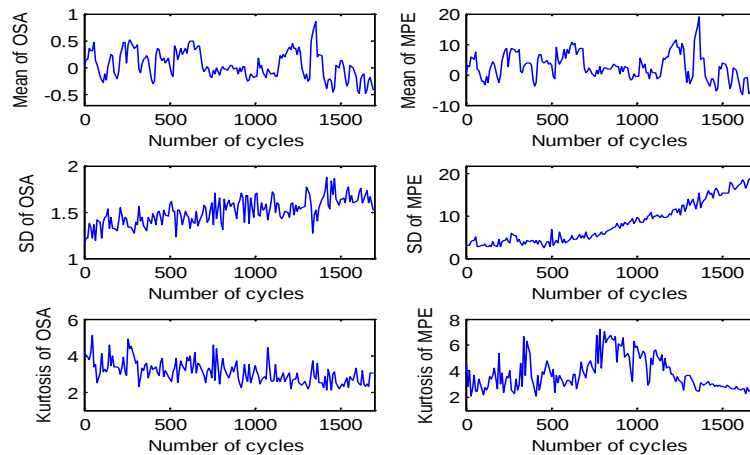
จากนั้นนำค่าความผิดพลาดที่ได้จากโมเดลและระบบ ($e = y - \hat{y}$) ในรูปแบบของ OSA และ MPE มาใช้เป็นสัญญาณตกค้างเพื่อนำไปวิเคราะห์ความล้าที่เกิดขึ้นบนโลหะผสมจำรูป โดยกำหนดสัญญาณตกค้างที่ได้จากวิธี model-based ดำเนินการจากค่าความผิดพลาดทั้งสองชนิดดังนี้

$$r_{OSA}(k) = y(k) - \hat{y}_{OSA}(k) \quad (4.9)$$

$$r_{MPE}(k) = y(k) - \hat{y}_{MPE}(k) \quad (4.10)$$

4.6 การวิเคราะห์สัญญาณตกค้าง

เมื่อได้สัญญาณตกค้างจากสมการ 4.9 และ 4.10 เป็นชนิดแบบ OSA และ MPE ตามลำดับ จากนั้นนำสัญญาณตกค้างทั้งสองชนิดจากการใช้โมเดล NARX ในขณะทำงานพร้อมมวลควบคุม มาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย (mean) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard Deviation) และค่าความโด่ง (kurtosis) ซึ่งตัวแปรทั้ง 3 ตัวเป็นตัวแปรที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์และประเมินผลในเชิงสถิติ จึงได้ทำการวิเคราะห์ตัวแปรดังกล่าวในแต่ละช่วงการทำงานทั้ง 1690 รอบการทำงานของ PRBS ที่ทำการทดสอบระบบได้ผลดังรูปที่ 4.17

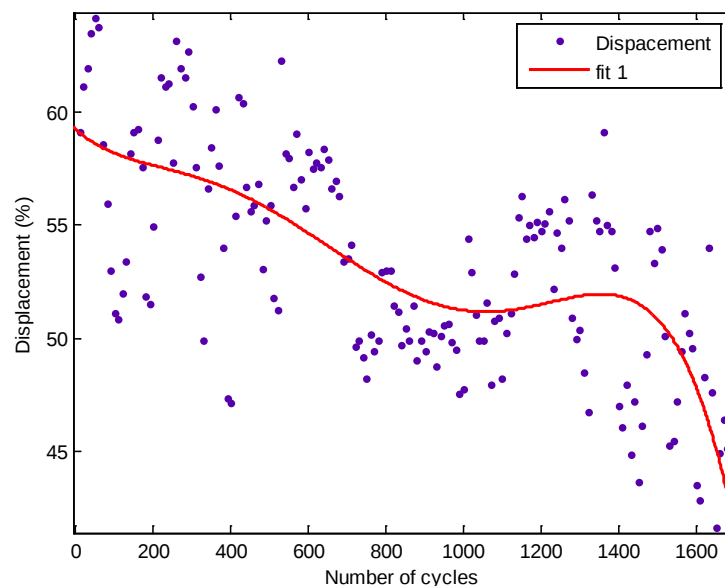


รูปที่ 4.17 ค่าเฉลี่ย ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าความโด่งของสัญญาณตกค้างเมื่อมวลควบคุมผ่านการใช้งานในจำนวนรอบต่างๆ

เมื่อผ่านการใช้งานในจำนวนรอบที่สูงขึ้นจะเห็นได้ชัดว่าในชุดข้อมูลของค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน ทั้งแบบ OSA และ MPE มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ส่วนค่าเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงทั้งแบบ OSA และ MPE และสุดท้ายค่าความโค้งมีแนวโน้มลดลงชัดเจนในแบบ OSA และแบบ MPE มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในช่วงประมาณ 1-800 รอบและลดลงในช่วงประมาณ 800-1690 ซึ่งจากข้อสันนิษฐานที่ว่าความล้าเชิงใช้งานจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบของโหลดทางความร้อนด้วย จึงอาจกล่าวอีกนัยได้ว่า ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานโดยเฉพาะที่คำนวณได้จาก MPE นั้น เหมาะสมที่จะนำมาบ่งชี้สถานะความล้าที่เกิดขึ้นบนวาล์วควบคุมเมื่อผ่านการใช้งาน

4.7 การวิเคราะห์ระดับของความล้า

ในการตรวจจับความผิดปกติบนวาล์วควบคุมที่เกิดจากความล้า นั้น มีจุดมุ่งหมายในการแบ่งระดับของความล้าที่เกิดขึ้นเป็นระดับต่างๆ เมื่อวาล์วควบคุมผ่านการใช้งานจากโหลดทางความร้อน จากการสังเกตพบว่าเมื่อพิจารณาจากระยะทำงานหรือระยะจัดการเคลื่อนที่ของวาล์วควบคุมของช่วงสัญญาณทดสอบแบบสามเหลี่ยมดังรูปที่ 4.16 จะพบแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงค่าระยะทำงานดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงของระยะขจัดก้านวาล์วตามจำนวนรอบของโหลดความร้อน

รูปที่ 4.18 ได้มาจากการฟิตข้อมูลด้วยสมการแบบ polynomial function ลำดับที่ 5 เนื่องจากเป็นลำดับที่น้อยที่สุดที่แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการเกิดความล้าได้ค่อนข้างชัดเจน โดยใช้ nonlinear regression

$$y(N) = a_1 N^5 + a_2 N^4 + a_3 N^3 + a_4 N^2 + a_5 N + a_6 \quad (4.11)$$

ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์และช่วงของค่าสัมประสิทธิ์ที่ค่าความเชื่อมั่น 95% (แสดงในวงเล็บ) ได้แก่ $a_1 = -3.329 \times 10^{-14}$ $(-6.717 \times 10^{-14}, 5.8 \times 10^{-16})$, $a_2 = 1.166 \times 10^{-10}$ $(-2.725 \times 10^{-11}, 2.604 \times 10^{-10})$, $a_3 = -1.35 \times 10^{-7}$ $(-3.557 \times 10^{-7}, 8.579 \times 10^{-8})$, $a_4 = 5.901 \times 10^{-5}$ $(-8.862 \times 10^{-5}, 0.0002)$, $a_5 = -0.01532$ $(-0.05589, 0.02524)$ และ $a_6 = 59.25$ $(55.83, 62.68)$ จะเห็นว่าค่าระยะเคลื่อนเริ่มต้นที่ประมาณ 59% มีค่าลดลงจนถึงประมาณรอบที่ 800 ระยะเคลื่อนจะมีค่าค่อนข้างคงที่ที่ประมาณ 52% และเริ่มลดลงอย่างรวดเร็วอีกครั้งที่จำนวนรอบประมาณ 1400 รอบ โดยระยะสุดท้ายก่อนลวดจะขาดคือ 41.85% ที่สามารถประมาณระดับความล้าคร่าวๆ ได้สามระดับ ได้แก่ 0-800 รอบ, 800-1400 รอบ และ 1400 รอบเป็นต้นไป แต่ในช่วง 800-1400 ยังมีความคลุมเครือ ไม่ชัดเจนเท่าใดนัก อีกทั้งค่า R^2 (coefficient of determination) ซึ่งเป็นตัวเลขที่แสดงให้เห็นถึงความถูกต้องของโมเดลที่เลือกใช้นั้นที่ได้มีค่า 0.4669 นั้นหมายถึงมีค่าความผิดพลาดสูง วิธีการนี้จึงไม่เหมาะสมในการแบ่งระดับความล้า เพียงชี้ให้เห็นถึงการเกิดการเปลี่ยนแปลงของระยะทำงานอย่างรวดเร็วเมื่อผ่านจำนวนรอบของโหลดที่ 1400 รอบ จากวิธีการนี้จึงได้นำแนวความคิดในการพัฒนาเทคนิคการแบ่งระดับความล้าให้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยวิธีการอื่นๆ

ดังนั้นจึงได้พิจารณาตัวแปรที่จะสามารถแยกแยะระดับความล้าที่เกิดขึ้นซึ่งมีความจำเป็นอย่างมากสำหรับการวิเคราะห์การแบ่งระดับปริมาณความล้า โดยนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังสมการที่ 4.12 มาทดสอบหาตัวแปรทั้ง 8 ตัวบนสมการเพื่อวิเคราะห์หาตัวแปรที่เหมาะสมนำมาแยกแยะระดับความล้าโดยการเขียนโปรแกรมวิเคราะห์จากสัญญาณตกค้างแบบ MPE

$$y(n) = (\theta_1 u(n-3)^2) + (\theta_2 y(n-2)) - (\theta_3 y(n-2)u(n-3)) + (\theta_4 u(n-8)^2) - (\theta_5 y(n-4)) - (\theta_6 u(n-8)) - (\theta_7 u(n-3)u(n-8)) + (\theta_8 y(n-1)u(n-3)) \quad (4.12)$$

นำข้อมูลที่ N ตัว (1500 ข้อมูลในชุดข้อมูลแรกและ 460 ข้อมูลในชุดข้อมูลต่อไป) นำมาสร้างเป็นเมทริกซ์ของ $\mathbf{Y}_{N \times 1} = \boldsymbol{\Psi}^T(u, y)_{N \times 8} \times \boldsymbol{\theta}_{8 \times 1}$ ได้ดังนี้

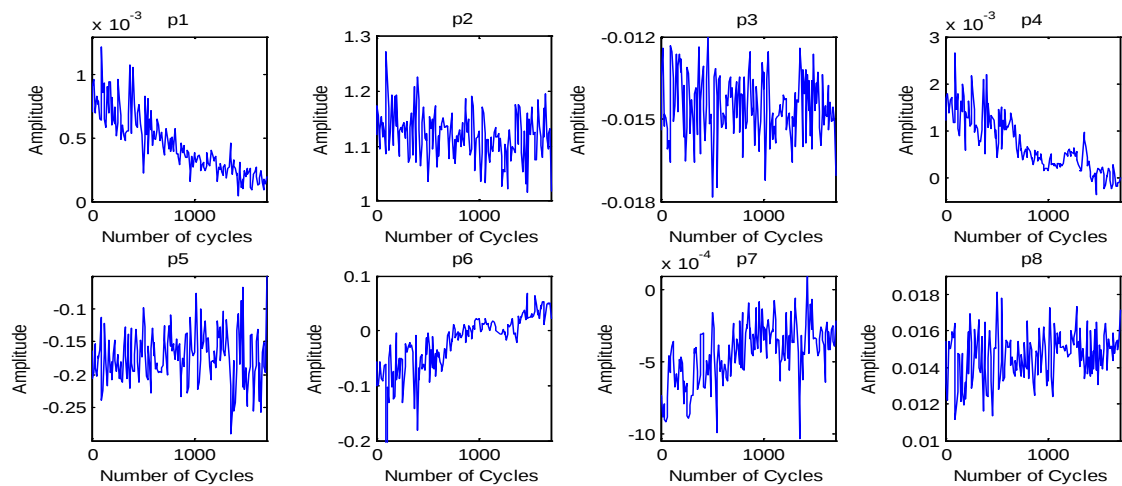
$$\begin{bmatrix} y(9) \\ y(10) \\ \vdots \\ y(N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u^2(6) & y(7) & \cdot & \cdot & y(8)u(6) \\ u^2(7) & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ u^2(N-3) & y(N-2) & \cdot & \cdot & y(N-1)u(N-3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \theta_8 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

หาสัมประสิทธิ์ของเทอมแต่ละตัวในโมเดลแบบ NARX ได้เป็น

$$\mathbf{Y} = \boldsymbol{\Psi}^T \times \boldsymbol{\theta} \quad (4.14)$$

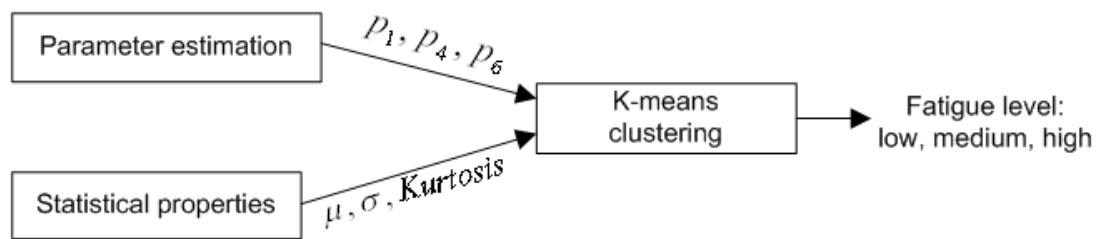
$$\boldsymbol{\theta} = (\boldsymbol{\Psi}^T)^+ \times \mathbf{Y} \quad (4.15)$$

จากสมการที่ 4.14 ใช้ pseudo inverse $(\cdot)^+$ เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์ $(\boldsymbol{\Psi})$ ดังสมการที่ 4.15 เนื่องจากเมทริกซ์ของสัมประสิทธิ์ไม่เป็นเมทริกซ์จัตุรัสจึงไม่สามารถใช้การหาอินเวอร์สของเมทริกซ์แบบทั่วไปได้ สุดท้ายจึงได้ค่าของสัมประสิทธิ์ของโมเดลในแต่ละเทอมเพื่อนำไปใช้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับภาระทางความร้อนในปริมาณที่เพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.18 เมื่อ $p_1 - p_8$ อ้างถึงเทอมในตารางที่ 4.4



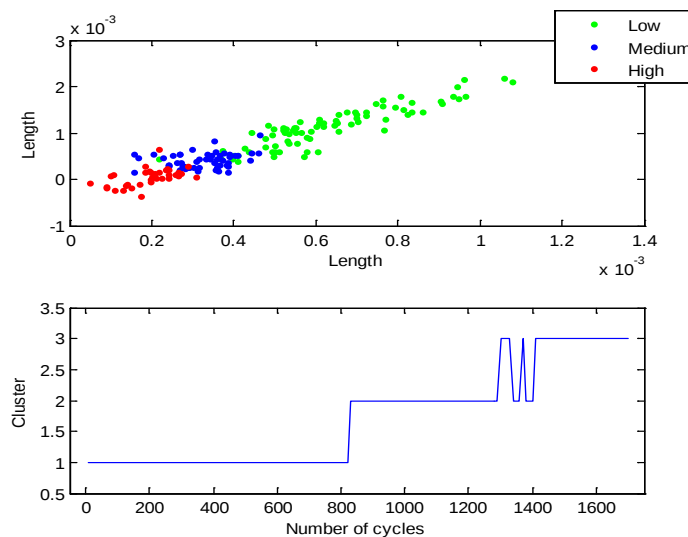
รูปที่ 4.19 ตัวแปรของโมเดล NARX เมื่อผ่านการใช้งานในจำนวนรอบต่างๆ

จากรูปที่ 4.19 จะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนรอบมากขึ้นตัวแปรที่ p_1, p_4 และ p_6 มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ตัวแปรดังกล่าวจึงเหมาะสมในการนำไปใช้แบ่งระดับความล้าที่เกิดขึ้น ขั้นตอนการแบ่งระดับความล้า ได้เลือกใช้อัลกอริทึม k-means clustering ดังที่ได้อธิบายในบทที่ 2 โดยใช้ลักษณะสำคัญ (features) 6 ตัว คือ p_1, p_4, p_6 , ค่าเฉลี่ยของ $MPE(\mu)$, ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ $MPE(\sigma)$ และค่าความโด่ง (kurtosis) ของ MPE ซึ่งตัวแปรทั้ง 6 ตัวที่นำมาใช้แบ่งกลุ่มระดับความล้าออกเป็นสามระดับ



รูปที่ 4.20 ตัวแปรที่ใช้ในการจัดกลุ่มความล้า

เมื่อนำตัวแปรทั้ง 6 จัดกลุ่มความล้าด้วย k-means clustering ได้ผลดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 การแบ่งกลุ่มระดับความล้าเป็นสามระดับด้วยอัลกอริทึม k-means clustering

จากรูปที่ 4.21 จะเห็นได้ชัดเจนว่าระดับความล้าบนวาล์วควบคุมตั้งแต่เริ่มใช้งานในสถานะปกติจนถึงวาล์วควบคุมเสียหายสามารถแบ่งระดับความล้าได้เป็น 3 ระดับของสถานะของความล้าที่ระดับต่ำ กลาง และสูง ได้อย่างชัดเจนที่จำนวนข้อมูลของสัญญาณทดสอบในช่วงสามเหลี่ยมที่ 800 รอบและ 1400 รอบ นี่เป็นเพียงวิธีการตรวจจับความล้าแบบออฟไลน์ ที่ต้องใช้ข้อมูลทั้งหมดที่ได้มาวิเคราะห์ในครั้งสุดท้ายหลังจากการทดลอง จึงไม่เหมาะสมในการพัฒนามาเป็นฟังก์ชันการตรวจสอบตัวเองในวาล์วอัจฉริยะซึ่งจำเป็นต้องมีการทำงานของอัลกอริทึมแบบออนไลน์

4.8 การตรวจจับความล่าช้าในวาล์วแบบออนไลน์ในสัญญาณตกค้างด้วยอัลกอริธึม CUSUM

เพื่อการตรวจจับความล่าช้าแบบออนไลน์จึงได้นำอัลกอริธึม CUSUM แบบตรวจจับการเปลี่ยนของค่าความแปรปรวน (variance change detection) มาใช้ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงค่าความแปรปรวนของสัญญาณตกค้าง ซึ่งอัลกอริธึมดังกล่าวสามารถทำงานได้พร้อมกันกับขณะที่วาล์วทำงาน

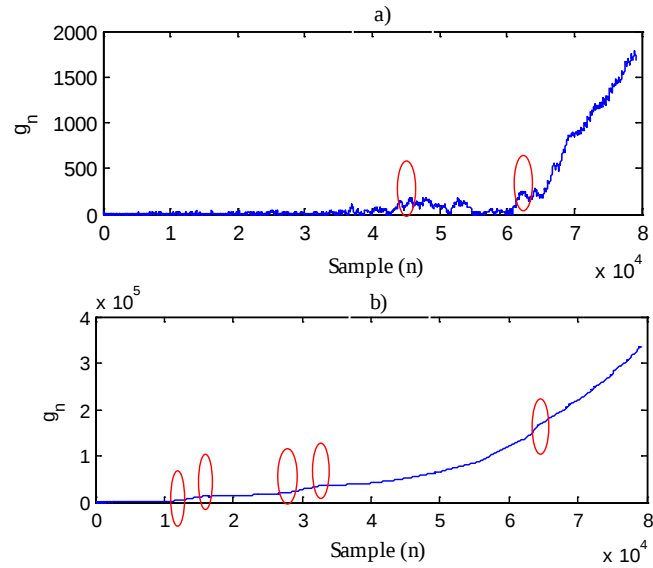
กำหนดค่าตัวแปรเริ่มต้นของอัลกอริธึม CUSUM จากการกำหนดขนาดวินโดว์ (M) เพื่อบอกจำนวนข้อมูลที่ใช้พิจารณานั้นคือสัญญาณตกค้างในช่วงของสถานะการทำงานที่ปกติที่ 1500 ข้อมูลแรกมาประมาณค่าเฉลี่ยเริ่มต้น (μ) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเริ่มต้น (σ_0) ในสมการที่ 4.16 และ 4.18 ตามลำดับและค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยกำหนดให้ $\sigma_1 = 2\sigma_0$ ในสมการที่ 4.19

$$\mu = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M r_i \quad (4.16)$$

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (r_i - \mu)^2}{M}} \quad (4.17)$$

$$\sigma_1 = 2\sigma_0 \quad (4.18)$$

จากนั้นใช้ข้อมูลของสัญญาณตกค้างในชุดของ OSA และ MPE มาหา CUSUM ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.22 ค่า CUSUM ของสัญญาณตกค้าง

a) ค่า CUSUM ที่ได้จาก OSA

b) ค่า CUSUM ที่ได้จาก MPE

กราฟของ CUSUM ที่คำนวณจากสัญญาณตกค้างในแบบ OSA และ MPE แสดงในรูปที่ 4.22 จะพบว่าวิธี CUSUM แบบ OSA มีการเพิ่มค่าอย่างชัดเจนที่ข้อมูล 45485 และ 61560 ข้อมูล หรือประมาณได้เป็นโหนดความร้อนรอบที่ 960 และ 1310 รอบ ตามลำดับ ในขณะที่ CUSUM แบบ MPE มีการเปลี่ยนแปลงความชันอย่างชัดเจนประมาณ 5 ครั้ง ที่ข้อมูลที่ 11160, 15981, 27329, 33381 และ 62220 หรือประมาณได้เป็นโหนดความร้อนรอบที่ 210, 310, 560, 690 และ 1320 รอบตามลำดับ ผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 4.5

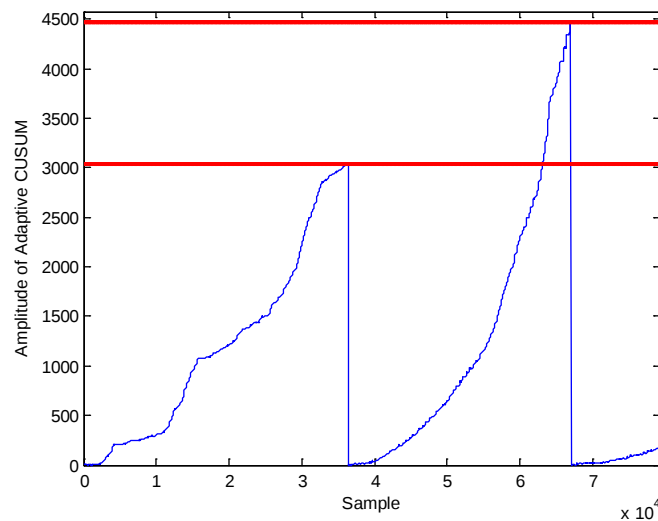
ตารางที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงระยะจัดการเคลื่อนที่และระดับของความล้าที่ถูกตรวจจับโดยอัลกอริทึม CUSUM แบบ OSA และ MPE

Residual	Fatigue event (number of thermal cycles)	Working displacement (mm)	Fatigue (%)
OSA	960	8.43	14.30
	1130	8.08	17.91
MPE	210	9.78	0.60
	310	9.58	2.61
	560	9.44	4.04
	690	8.89	9.63
	1320	7.78	20.88

สามารถสรุปจากตารางที่ 4.5 ได้ว่าผลการตรวจจับด้วยสัญญาณตกค้างแบบ OSA นั้นจะตรวจจับระดับความล้าเมื่อความล้ามีขนาดใหญ่ ในขณะที่สัญญาณตกค้างแบบ MPE นั้นมีช่วงการตรวจจับความล้าที่ละเอียดกว่าที่แยกให้เห็นความแตกต่างระหว่างถึงระดับความล้าที่น้อยและกลาง ค่าความเปลี่ยนแปลงของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ_1 นั้นมาจากการสมมติการเปลี่ยนแปลงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นสองเท่า ซึ่งอาจจะไม่ใช่ค่าที่ดีที่สุดก็ได้ ในหัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณตกค้างด้วยวิธี adaptive CUSUM

4.9 การตรวจจับความล้าในสัญญาณตกค้างด้วยอัลกอริทึม adaptive CUSUM

เนื่องจากข้อจำกัดของอัลกอริทึม CUSUM แบบตรวจจับการเปลี่ยนของค่าความแปรปรวนที่กล่าวใน 4.6 นั้นจึงได้สร้างอัลกอริทึมใหม่ที่มีรายละเอียดของอัลกอริทึมดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2.3.4 ซึ่งสามารถกำหนดของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในสถานะสมมติเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลง (σ_1) ได้ครอบคลุมตามหลักการทางคณิตศาสตร์และมีความเหมาะสมในการกำหนด threshold ให้ดียิ่งขึ้น ทำให้สามารถระบุค่าความแตกต่างของค่า CUSUM ในสถานะเริ่มต้นไปจนถึงสถานะที่ควรจะเป็นสถานะที่เกิดความผิดปกติขึ้น ซึ่งอาจมีมากกว่า 1 ระดับ อีกทั้งยังสามารถคำนวณ ค่าเฉลี่ยเริ่มต้น μ_0 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในสถานะปกติเริ่มต้น (σ_0) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในสถานะสมมติเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลง (σ_1) ผลการทดสอบอัลกอริทึมแบบ adaptive CUSUM กับสัญญาณตกค้างแบบ MPE เมื่อใช้ $M = 460$ ซึ่งเท่ากับจำนวนของข้อมูลในช่วง PRBS ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 ผลการทดลองตรวจจับความล่าช้าด้วยอัลกอริทึม Adaptive CUSUM ที่ $\beta=600$

ใช้ข้อมูลเดิมในการทดสอบอัลกอริทึมที่ค่าเบต้าค่าต่างๆ ได้ผลการตรวจจับความล่าช้าดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าเบต้าที่จำนวนต่างๆ

Beta	Detection cycle				Beta	Detection cycle			
Offline	-	80	-	140	605	-	77	-	142
100	23	80	114	158	620	-	79	-	118
300	52	85	-	155	630	-	81	-	160
500	64	-	-	129	650	-	83	-	-
550	-	67	-	131	800	-	-	95	-
570	-	70	-	132	1000	-	-	106	-
600	-	76	-	133	1200	-	-	115	-
601	-	78	-	142	1400	-	-	120	-
610	-	78	-	148					

จุดประสงค์คือ ต้องการอัลกอริทึมที่สามารถตรวจจับความล่าช้าได้ 3 ระดับตามที่ได้แนะนำจากผลการวิเคราะห์ด้วย k-means clustering นั่นคือ ระดับต่ำเกิดที่รอบที่ 0-800, ระดับกลางเกิดที่รอบที่ 800-1400 และระดับสูงเกิดที่รอบตั้งแต่ 1400 ขึ้นไป จากตารางที่ 4.3 หากลดค่าเบต้าจะมีการตรวจจับความล่าช้าบ่อยครั้งกว่าที่ค่าเบต้ามาก และยังพบว่าค่าเบต้าที่ 601-610 ทำให้การตรวจจับมีความใกล้เคียงกับระดับความล่าช้าที่แบ่งด้วยวิธี k-means clustering นั่นคือ จากรูปที่ 4.20 ซึ่งแสดงตัวอย่างผลการ

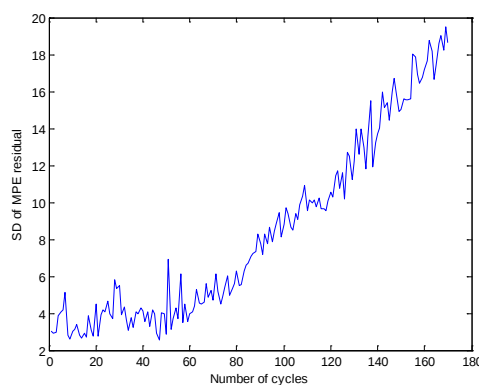
ตรวจจับกรณีใช้เบต้าเท่ากับ 601 จะได้ผลการตรวจจับได้ที่ 36500 ข้อมูลหรือเทียบได้กับการผ่าน โหลดความร้อนไป 760 รอบ และตรวจได้อีกครั้งที่ข้อมูลที่ 67119 หรือ เทียบได้กับการผ่าน โหลดความร้อนไป 1420 รอบ ซึ่งใกล้เคียงกับการแบ่งระดับความล้าด้วยวิธีออฟไลน์โดยใช้อัลกอริทึม k-means clustering ที่รอบ 800 และ 1400 ตามลำดับ

สำหรับการใช้งานจริง ค่าเบต้าที่เหมาะสมควรเลือกใช้ในช่วง 550-630 เนื่องจากช่วงดังกล่าวสามารถ ให้ผลการตรวจจับความล้าที่สอดคล้องกับเป้าหมายในการตรวจจับระดับความล้าที่เกิดขึ้นเป็นสามระดับ ที่ระดับต่ำ กลาง และสูง

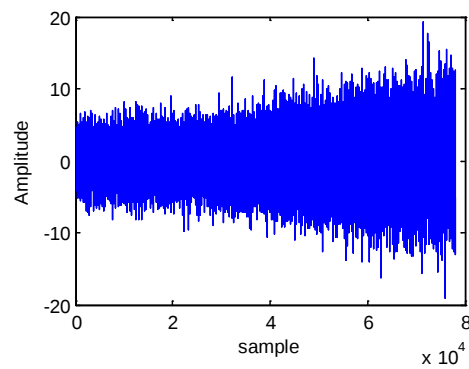
ตั้งข้อสันนิษฐานว่าหากมีการใช้งานใหม่อัลกอริทึมนี้กับวาล์วควบคุมอีกครั้ง การทำงานของ อัลกอริทึมจะทำงาน ได้ดีเหมือนเดิม ภายใต้สมมติฐานให้ค่าทางสถิติมีการเปลี่ยนแปลงเหมือนกัน แต่ สัญญาณที่ใช้พิจารณาถูกสร้างขึ้นใหม่ ได้พิสูจน์ด้วยตัวอย่างที่ 4.1

ตัวอย่าง 4.1: ทดสอบการทำงานของอัลกอริทึม adaptive CUSUM

ตัวอย่างนี้เป็นการทดสอบการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงค่าความแปรปรวนด้วยอัลกอริทึม adaptive CUSUM สำหรับข้อมูลชุดใหม่ที่มีค่าทางสถิติเลียนแบบสัญญาณตกค้างที่ได้จากการทดสอบวาล์ว ควบคุม โดยสมมติให้สัญญาณตกค้างในแต่ละรอบมีการกระจายตัวแบบ Gaussian ที่มีค่าความ เบี่ยงเบนมาตรฐานทุกๆ 460 ข้อมูล เท่ากับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบวาล์ว ควบคุมจนเสียดสภาพ มีลักษณะดังรูป 4.24 เพื่อสร้างตัวอย่างสัญญาณทดสอบดังรูปที่ 4.25

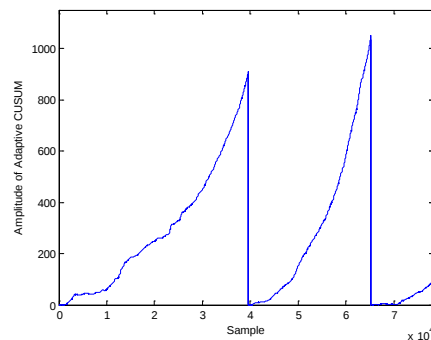


รูปที่ 4.24 ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐานที่เลือกใช้ในการทดสอบ

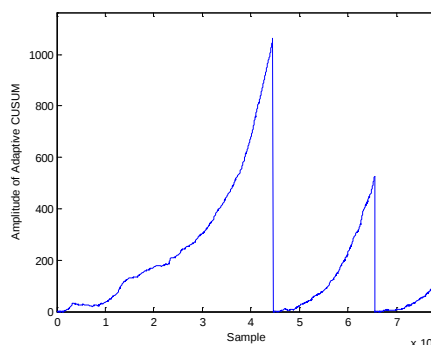


รูปที่ 4.25 สัญญาณทดสอบอัลกอริทึม adaptive CUSUM

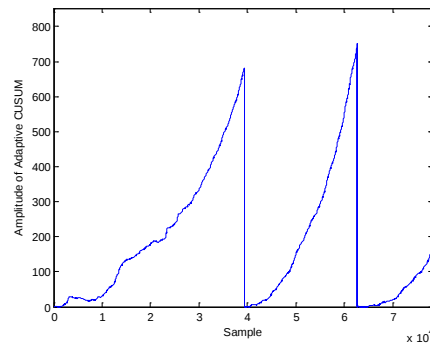
นำสัญญาณทดสอบที่สร้างขึ้นมาทดสอบกับอัลกอริทึม adaptive CUSUM โดยเลือกใช้ตัวแปร M และ β ค่าเดียวกับที่ใช้ในวาล์วทดสอบ ผลการทดสอบการตรวจจับค่าการเปลี่ยนแปลงความแปรปรวนของสัญญาณตัวอย่างครั้งที่ 1-3 แสดงในรูปที่ 4.26-4.28 ตามลำดับ



รูปที่ 4.26 ผลการทดสอบด้วยอัลกอริทึม adaptive CUSUM ครั้งที่ 1 (alarm รอบที่ 82 และ 138)



รูปที่ 4.27 ผลการทดสอบด้วยอัลกอริทึม adaptive CUSUM ครั้งที่ 2 (alarm รอบที่ 93 และ 139)



รูปที่ 4.28 ผลการทดสอบด้วยอัลกอริธึม adaptive CUSUM ครั้งที่ 3 (alarm รอบที่ 82 และ 132)

เมื่อทดสอบอัลกอริธึมด้วยสัญญาณทดสอบที่สร้างขึ้นใหม่จากสัญญาณแบบ Gaussian ที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเหมือนกันทุกครั้ง จะได้ผลลัพธ์การทดสอบทั้ง 3 ครั้งที่มีความแตกต่างกันเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าการใช้อัลกอริธึมในการทดลองแต่ละครั้ง ให้แนวโน้มของเวลาในการตรวจจับทั้ง 3 ครั้งที่มีค่าใกล้เคียงกันซึ่งหมายความว่ามีความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์อัลกอริธึมที่พัฒนาการตรวจจับความล่าที่ระดับต่างกันในขณะที่ใช้งานแล้วควบคุม แต่อาจต้องมีการทดสอบซ้ำหลายๆ ครั้ง เพื่อเก็บตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงของความแปรปรวนของสัญญาณตกค้างที่ได้จากแล้วควบคุมที่ใช้โลหะผสมจำรูปเส้นอื่นๆ เพื่อหาชุดของค่า β ที่เหมาะสมสำหรับแล้วควบคุมตัวนี้ต่อไป

4.10 สรุปผลการทดลอง

การตรวจจับความล่าในระบบแล้วควบคุมจำเป็นต้องเข้าใจพฤติกรรมของโลหะจำรูปดีในระดับหนึ่ง เช่น ความเร็วในการตอบสนอง พฤติกรรมของฮิสเทอรีซิสและระยะจัดการเคลื่อนที่ของโลหะผสมจำรูปเป็นต้น สำหรับการออกแบบการสร้างปริมาณความล่าให้แล้วแล้วควบคุมเพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์ หักวิเคราะห์ ปริมาณความล่าที่เกิดขึ้น ซึ่งการวิจัยนี้การแบ่งระดับความล่าด้วย k-means clustering และเปรียบเทียบวิธีการตรวจจับระหว่างอัลกอริธึม CUSUM กับ adaptive CUSUM ในส่วนของ k-means clustering ได้นำตัวแปรจากโมเดลแบบ NARX 3 ตัวแปรและตัวแปรทางสถิติได้แก่ ค่าเฉลี่ย ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าความโค้งของสัญญาณตกค้างที่ได้จากการทำงานร่วมกับโมเดลแบบ NARX และระบบแล้วควบคุมในรูปแบบของ MPE มาแยกกลุ่มข้อมูล ซึ่งสามารถแยกระดับความล่าทั้ง 3 ระดับออกมาได้ที่จำนวนรอบทางความล่าที่ 0-800, 800-1400 และมากกว่า 1400 รอบ จากนั้นพัฒนาระบบการตรวจจับความล่าแบบออนไลน์โดยนำโมเดลแบบ NARX มาทำงานร่วมกับระบบแล้วควบคุมเพื่อสร้างสัญญาณตกค้างในรูปแบบของ MPE จากนั้นนำสัญญาณตกค้างมาผ่านอัลกอริธึมแบบ CUSUM ซึ่งสามารถแยกแยะระดับปริมาณความล่าได้แต่มีข้อเสียที่การกำหนดตัวแปรและกำหนด threshold ซึ่งการกำหนดต้องทราบค่าของตัวแปรบางตัวหลังการเปลี่ยนแปลงทำให้เกิดความไม่สะดวกในการใช้งาน และต้องเป็นตัวแปรที่มีค่าที่เหมาะสมกับระบบแล้วควบคุม

เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีตรวจจับความล่า ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาอัลกอริธึมแบบ adaptive CUSUM มาใช้แทนซึ่งสามารถตรวจจับระดับความล่าและแก้ไขข้อผิดพลาดอัลกอริธึม CUSUM ได้เป็นอย่างดี