

การตรวจจับข้อบกพร่องของลิเนียร์แบริงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับ  
ระบบควบคุมแบบเซอร์โวและตัวสังเกตสำหรับ  
เครื่องจักรอัตโนมัติความเร็วสูง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2562

**LINEAR BEARING FAULT DETECTION USING AN  
ARTIFICIAL NEURAL NETWORK BASED ON PI  
SERVO SYSTEM WITH THE OBSERVER FOR  
HIGH-SPEED AUTOMATION MACHINE**

**Thanasak Wanglomklang**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Mechatronic Engineering**

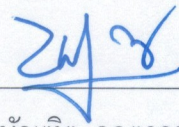
**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2019**

การตรวจจับข้อบกพร่องของลิเนียร์แบริงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ร่วมกับระบบ  
ควบคุมแบบเซอร์โวและตัวสังเกตสำหรับเครื่องจักรอัตโนมัติความเร็วสูง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.ปณิฑิต กฤดาคม)

ประธานกรรมการ



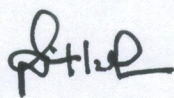
(รศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



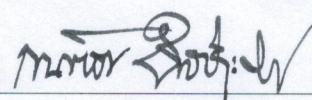
(อ. ดร.ธีทัต คลวิชัย)

กรรมการ



(ศ. ดร.สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชานีประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

รศ.ดร. หวังล้อมกลาง : การตรวจจับข้อบกพร่องของลิเนียร์เบริงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ร่วมกับระบบควบคุมแบบเซอร์โวและตัวสังเกตสำหรับเครื่องจักรอัตโนมัติความเร็วสูง (LINEAR BEARING FAULT DETECTION USING AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK BASED ON PI SERVO SYSTEM WITH THE OBSERVER FOR HIGH-SPEED AUTOMATION MACHINE) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล, 125 หน้า.

กระบวนการผลิตหัวอ่านเขียนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Head Gimbal Assembly, HGA) จะใช้เครื่องจักรอัตโนมัติในการหยอดกาวและติดหัวอ่านเขียน ซึ่งชิ้นงานจะถูกจับยึดโดยชุดแคลมป์ที่ติดตั้งบนบอลสกรู แกน X และ Y เพื่อนำชิ้นงานไปในตำแหน่งที่ต้องการ เมื่อเครื่องจักรทำงานอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานจะทำให้ลิเนียร์เบริงเกิดการสึกหรอซึ่งระบบจะเกิดการสั่นสะเทือนที่สูงขึ้นเนื่องจากเกิดแรงเสียดทานในการเคลื่อนที่ และยังส่งผลให้การควบคุมตำแหน่งของการเคลื่อนที่ของชุดบอลสกรูไม่มีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ยังทำให้มอเตอร์ต้องใช้กระแสเพิ่มขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงได้มีการศึกษาและเสนอการออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งของชุดขับเคลื่อนบอลสกรูในเครื่องจักรหยอดกาวและติดหัวอ่านของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ซึ่งใช้การออกแบบระบบควบคุมแบบเซอร์โวร่วมกับตัวสังเกตอันดับเต็มเพื่อทำการประมาณค่าตัวแปรสถานะโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ การออกแบบจะใช้การป้อนกลับตัวแปรสถานะ (State variable feedback) ผ่านเทคนิคของการวาง โพล (Pole placement) เพื่อปรับเปลี่ยนลักษณะของผลตอบสนองของระบบวงปิด เช่น เวลาเข้าสู่สถานะคงตัวและค่าสัญญาณพุงสูงสุดของระบบให้เป็นไปตามต้องการ และการตรวจจับข้อบกพร่องของลิเนียร์เบริงมีการทดลอง 4 สถานะที่สารหล่อลื่นเกิดข้อบกพร่องประกอบด้วย สารหล่อลื่นเหลือ 75%, สารหล่อลื่นเหลือ 50%, สารหล่อลื่นเหลือ 25% และสารหล่อลื่นเหลือ 0% เปรียบเทียบกับสถานะการทำงานปกติ (Healthy condition) และประยุกต์ใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network) ในการตรวจจับข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น ซึ่งอาศัยข้อมูลของระบบที่ได้จากการประมาณค่าตัวแปรสถานะมาใช้สำหรับการสร้างแบบจำลอง ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้คาดว่าระบบที่ออกแบบจะมีความสามารถในการควบคุมให้เอาต์พุตมีค่าเป็นไปตามสัญญาณอ้างอิง และสามารถคงทนต่อการรบกวนจากภายนอก รวมไปถึงเพิ่มความน่าเชื่อถือในการซ่อมบำรุงรักษาเครื่องจักรในอนาคต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
ปีการศึกษา 2562

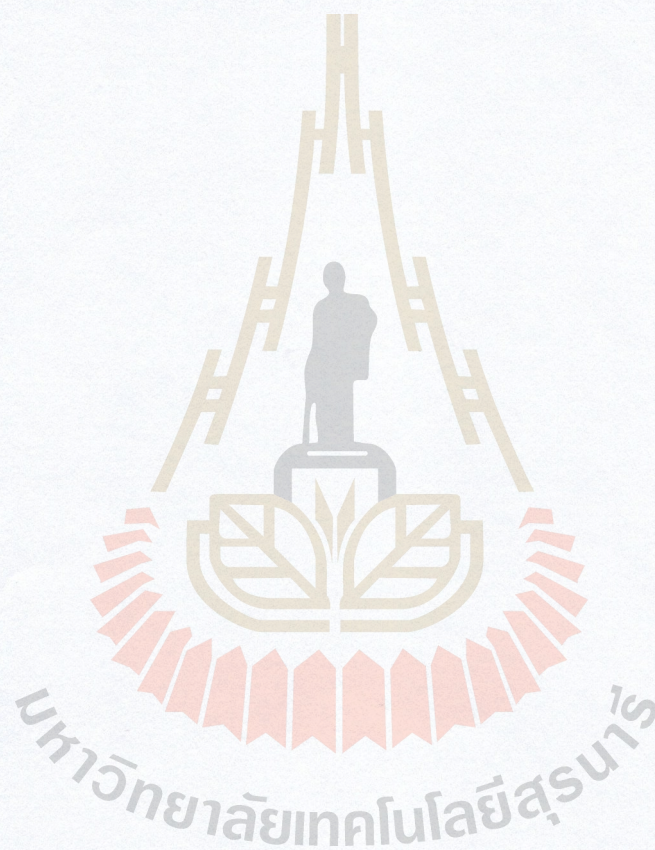
ลายมือชื่อนักศึกษา มินต์กมล  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา สม

THANASAK WANGLOMKLANG : LINEAR BEARING FAULT  
DETECTION USING AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK BASED ON  
PI SERVO SYSTEM WITH THE OBSERVER FOR HIGH-SPEED  
AUTOMATION MACHINE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.  
JIRAPHON SRISERTPHOL, Ph.D., 125 PP.

LINEAR BEARING/ PARAMETER ESTIMATION/ARTIFICIAL NEURAL  
NETWORK/ OBSERVER DESIGN/ SYSTEM IDENTIFICATION

The high-speed automation machine was used for Head Gimbal Assembly (HGA) process in the Hard Disk Drive (HDD) industry. The adhesive dispensing and slider attaching of read and write head is important to produce the HGA. The clamping unit was installed onto feed drive XY in order to move a workpiece in the desired position. However, the machine is operating in continuous time that effect of supporting device as a linear bearing prone to wear. This situation can induce the system vibration which causes to miss reference position by vision. In addition the actuator is used more energy consumption. This research established the linear bearing fault detection architecture by using an intelligent method as an Artificial Neural Network (ANN) based on observer information from the PI servo controller design. The controller and observer design was applied a pole placement technique to find the state feedback and controller gain. The linear bearing fault was simulated with remove amount of lubricant from the rolling element as follows 0%, 25%, 50%, 75% compares with normal condition. The expected result, the system has a tracking

response performance, robustness and increase the reliability for machine maintenance.



School of Mechanical Engineering

Academic Year 2019

Student's Signature \_\_\_\_\_

นิพนธ์ศักดิ์

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

Sutpol G

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลต่าง ๆ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ทั้งในด้านทฤษฎี และด้านปฏิบัติ และคอยให้คำแนะนำในการทำงานวิจัย อีกทั้งยังเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำรงชีวิต ให้รู้จักพากเพียร ช่วยเหลือผู้อื่น ซึ่งผู้วิจัยขอขอบคุณท่านเป็นอย่างสูง และจะนำเอาวิชาความรู้ และการดำรงชีวิตไปประยุกต์ใช้กับการทำงานในภายภาคหน้าต่อไป

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ อาจารย์ ดร.อุเทน ลีตติง ที่ให้ความรู้ที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย ซึ่งผู้วิจัยนำมาประยุกต์ใช้ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จได้

ขอขอบคุณบุคคลดังต่อไปนี้ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ในระหว่างทำงานวิจัย ซึ่งผู้วิจัยรู้สึกทราบบ้างซึ่งอย่างยั้ง และขอจดจำไว้ตลอดไป

ขอขอบพระคุณ บริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล ประเทศไทย จำกัด ที่ให้ประสบการณ์การทำงาน โอกาสในการศึกษาต่อระดับบัณฑิตศึกษาของผู้วิจัย ช่วยเหลือทุนวิจัย ตลอดจนค่าใช้จ่ายในการดำรงชีวิต

ขอขอบพระคุณ คุณประชาน ชมเมืองปัก คุณจักรวรรดิ ดิยัง คุณสันติ พุ่มกระจำง และพี่ ๆ ในแผนก HGA Assembly and Automation development ที่ให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษาในระหว่างการทำงาน ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้และประสบการณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ประจำสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ทุก ๆ ท่าน ที่อำนวยความสะดวกในด้านงานเอกสารต่าง ๆ ตลอดจนให้คำปรึกษาแก่ผู้วิจัยด้วยดีเสมอมา

คุณสุนทรี แสงศรี พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ ในกลุ่มวิจัย System and Control Engineering Laboratory ที่คอยให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ มาโดยตลอด

ท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อใจ คุณแม่อรชุน สมาชิกครอบครัวหวังล้อมกลาง และครอบครัวลาดนอก ทุก ๆ ท่าน ที่เลี้ยงดูด้วยความรักความอบอุ่น ให้การอบรมสั่งสอน ให้โอกาสทางการศึกษา และสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

ธนศักดิ์ หวังล้อมกลาง

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ง
สารบัญ .....	จ
สารบัญตาราง .....	ฉ
สารบัญรูป .....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	ต
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ</b> .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	4
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย .....	4
1.5 สถานที่ทำงานวิจัย .....	5
1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย .....	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	5
1.8 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ .....	5
<b>2 ปรัชญ์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	7
2.1 ประวัติความเป็นมาของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ .....	7
2.2 เทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ .....	7
2.3 ส่วนประกอบของการอ่านเขียนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ .....	8
2.4 ระบบควบคุมอัตโนมัติ .....	9
2.5 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ .....	11
2.5.1 ฟังก์ชันถ่ายโอน .....	11



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.2	กราฟการไหลของสัญญาณ .....	12
2.6	ตัวควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะ .....	12
2.7	ตัวสังเกต.....	15
2.7.1	ตัวสังเกตอันดับเต็ม .....	16
2.8	สภาพสังเกตได้ .....	17
2.9	สภาพควบคุมได้ .....	18
2.10	ระบบตรวจจับและจำแนกข้อบกพร่อง .....	18
2.11	การเรียนรู้ของเครื่องจักร .....	19
2.11.1	การคัดแยกลักษณะเด่นของข้อมูล .....	20
2.11.2	แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม .....	22
2.12	ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
2.12.1	งานวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบระบบควบคุม .....	25
2.12.2	งานวิจัยเกี่ยวกับระบบตรวจจับข้อบกพร่อง.....	26
2.13	สรุป .....	28
<b>3</b>	<b>วิธีการดำเนินงานวิจัย .....</b>	<b>29</b>
3.1	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนแนวแกน ด้วยบอลสกรูและเซอร์โวมอเตอร์ .....	30
3.1.1	แบบจำลองเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง .....	31
3.1.2	แบบจำลองทางกลของระบบบอลสกรู.....	32
3.1.3	แบบจำลองของระบบในปริภูมิสเตรท .....	33
3.1.4	แบบจำลองของระบบในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน .....	35
3.2	การออกแบบและสร้างชุดขับเคลื่อนแนวแกน ด้วยบอลสกรูและเซอร์โวมอเตอร์ .....	37
3.2.1	โปรแกรมสั่งงานและชุดควบคุม.....	37
3.2.2	เซอร์โวมอเตอร์และลิเนียร์เอน โค้ดเดอร์.....	40
3.3	การออกแบบการทดลองกรณีสารหล่อลื่นในลิเนียร์เบริงบกพร่อง .....	41

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.1	การกำหนดเงื่อนไขการทำงานของระบบ.....	43
3.3.2	การสร้างสภาวะสารหล่อลื่นบกพร่อง.....	44
3.4	สรุป.....	44
<b>4</b>	<b>การประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบและการจำลองสถานการณ์.....</b>	<b>47</b>
4.1	การระบุเอกลักษณ์ของระบบขับเคลื่อนแนวแกน.....	47
4.2	การทดสอบคุณลักษณะและผลตอบสนองของระบบ.....	49
4.3	การทดสอบแบบจำลองด้วยตัวสังเกตระบบวงเปิด.....	52
<b>5</b>	<b>การทดสอบระบบควบคุมและการจำแนกข้อบกพร่อง</b>	
	<b>โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม.....</b>	<b>56</b>
5.1	การทดสอบระบบควบคุม.....	56
5.1.1	กรณีที่ 1 ผลตอบสนองของระบบตามเวลาเข้าสู่สถานะคงตัว.....	58
5.1.2	กรณีที่ 2 ผลตอบสนองในการติดตามอินพุตอ้างอิง.....	63
5.2	ข้อมูลตัวแปรสถานะในแต่ละสภาวะของลิเนียร์แบร์ริง.....	64
5.2.1	กรณีที่ 1 สภาวะการทำงานปกติ.....	65
5.2.2	กรณีที่ 2 สภาวะที่สารหล่อลื่นเหลือ 75 %.....	65
5.2.3	กรณีที่ 3 สภาวะที่สารหล่อลื่นเหลือ 50%.....	66
5.2.4	กรณีที่ 4 สภาวะที่สารหล่อลื่นเหลือ 25%.....	66
5.2.5	กรณีที่ 5 สภาวะที่สารหล่อลื่นเหลือ 0%.....	67
5.3	ผลการคัดแยกลักษณะเด่นของข้อมูล.....	68
5.3.1	การแยกข้อมูลด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation).....	68
5.3.2	การแยกข้อมูลด้วยค่าความโด่ง (Kurtosis).....	70
5.3.3	การแยกข้อมูลด้วยค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square).....	71
5.3.4	การแยกข้อมูลด้วยอัตราส่วนค่าสูงสุดต่อค่าเฉลี่ย (Crest factor).....	73
5.4	การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วยโปรแกรมแมทแล็บ.....	74
5.5	ผลการจำแนกข้อบกพร่องของลิเนียร์แบร์ริง.....	76

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.5.1 การประเมินผลความถูกต้องของโมเดลด้วย คอนฟิวชั่นเมตริกซ์.....	78
<b>6 สรุปและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>80</b>
6.1 สรุป .....	80
6.2 ข้อเสนอแนะ .....	81
รายการอ้างอิง .....	82
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บล็อกไดอะแกรมจำลองการทำงานของระบบควบคุมใน Simulink .....	84
ภาคผนวก ข. การใช้โปรแกรมเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง.....	88
ภาคผนวก ค. โปรแกรมสำหรับฝึกสอนแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม .....	94
ภาคผนวก ง. รายละเอียดของลิเนียร์เอ็นโค้ดเดอร์และลิเนียร์แบร์ริง .....	102
ภาคผนวก จ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ .....	107
ประวัติผู้เขียน .....	125

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	รูปแบบฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function)..... 23
3.1	รายละเอียดการรับส่งสัญญาณของ RAPCON board ..... 39
4.1	พารามิเตอร์ของระบบจากการประมาณค่า ..... 49
4.2	โพลของระบบ..... 50
4.3	อัตรายายของตัวสังเกตของระบบวงเปิด ..... 52
5.1	อัตรายายของการป้อนกลับและอัตรายายของตัวควบคุม ..... 58
5.2	ตัวอย่างการจัดเตรียมชุดข้อมูลสำหรับฝึกสอน โคร่งข่ายประสาทเทียม..... 76
5.3	ผลการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของโมเดล โคร่งข่ายประสาทเทียม ..... 76
ง.1	ข้อมูลการใช้สารหล่อลื่นของลิเนียร์เบริ่ง..... 104
ง.2	ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของลิเนียร์เบริ่ง..... 104
ง.3	ขนาดของบอลสกรูที่ใช้ในงานวิจัย ..... 105
ง.4	ข้อมูลพารามิเตอร์ของเซอร์โวมอเตอร์..... 106

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 Head Gimbal Assembly (HGA).....	2
1.2 (a) กระบวนการหยอดกาว (b) กระบวนการติดหัวอ่านเขียน .....	2
1.3 เครื่องหยอดกาวและติดหัวอ่านเขียนอัตโนมัติ .....	3
1.4 กระบวนการหยอดกาวและติดหัวอ่านที่ผิดพลาด .....	3
2.1 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ รุ่น IBM Model 350 .....	7
2.2 รูปตัดขวางของพื้นผิวที่มีคุณสมบัติของแม่เหล็กที่เก็บข้อมูล โดยใช้ทิสของ สนามแม่เหล็ก แทนรหัส 0 หรือ 1.....	8
2.3 การเก็บข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ แบบแนวตั้งและแบบแนวนอน .....	8
2.4 suspension และ slider .....	9
2.5 การควบคุมระดับน้ำในถังให้คงที่ .....	9
2.6 แผนภาพระบบวงเปิด.....	10
2.7 แผนภาพระบบวงปิด.....	10
2.8 ฟังก์ชันถ่ายโอน.....	11
2.9 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบวงปิด.....	12
2.10 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะ .....	13
2.11 ตัวควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะร่วมกับตัวสังเกต .....	16
2.12 แผนภาพหลักการทำงานของตัวสังเกต .....	17
2.13 การจำแนกเทคนิคการตรวจจับข้อผิดพลาด.....	19
2.14 ประเภทของ Machine Learning .....	19
2.15 ขั้นตอนการเรียนรู้ของ Machine Learning .....	20
2.16 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม .....	22
2.17 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้า .....	24
2.18 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนกลับ .....	25

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 ภาพรวมการทำงานของระบบควบคุมและการตรวจจับข้อบกพร่องของลิเนียร์แบร์ริง .....	29
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานออกแบบและวิจัย .....	30
3.3 แบบจำลองทางจลศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนลิคตสกรูด้วยเซอร์โวมอเตอร์ .....	30
3.4 แบบจำลองทางไฟฟ้าและทางกลของเซอร์โวมอเตอร์ .....	31
3.5 แบบจำลองทางจลศาสตร์ของลิคตสกรู .....	32
3.6 บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลองตัวแปรสแตต .....	33
3.7 ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบเซอร์โวมอเตอร์และระบบทางกล .....	36
3.8 การออกแบบและสร้างชุดทดลอง .....	37
3.9 ชุดควบคุมการทำงาน .....	38
3.10 การเชื่อมต่อระหว่าง Simulink และ RAPCON บอร์ด .....	38
3.11 ไบรารีเพื่อใช้งานพลอตอินพุตและเอาต์พุตของบอร์ด .....	39
3.12 ส่วนประกอบหลักของชุดขับเคลื่อนลิคตสกรู .....	40
3.13 ลิเนียร์เอน โค้ดเคอร์ .....	41
3.14 หลักการทำงานของลิเนียร์เอน โค้ดเคอร์ .....	38
3.15 ลิเนียร์แบร์ริง .....	42
3.16 ขั้นตอนการสร้างโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม .....	42
3.17 ทิศทางและระยะการเคลื่อนที่ในการทดลอง .....	43
3.18 รูปแบบของอินพุตทดสอบที่ใช้ในการทดลอง .....	43
3.19 อุปกรณ์บรรจุสารหล่อลื่นในการทดลอง .....	44
4.1 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบสำหรับทำการระบุเอกลักษณ์ .....	47
4.2 บล็อกไดอะแกรมที่ใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ใน Simulink .....	48
4.3 เปรียบเทียบผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบ .....	48
4.4 โพล-ซีโร พล็อตของระบบ .....	50

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 ผลตอบสนองของอัตราเร็วของระบบต่อแรงดันอินพุตแบบขั้นบันได 1.5 โวลต์ .....	51
4.6 ผลตอบสนองของอัตราเร็วของระบบต่อแรงดันอินพุตแบบขั้นบันได 3 โวลต์ .....	51
4.7 ตัวสังเกตระบบวงเปิด .....	52
4.8 บล็อกไดอะแกรมในการทดสอบตัวสังเกต .....	53
4.9 การประมาณค่าระยะทางเมื่อโพลของตัวสังเกตเท่ากับโพลของระบบ.....	54
4.10 การประมาณค่าระยะทางเมื่อโพลของตัวสังเกตเป็น 10 เท่าของโพลของระบบ.....	54
4.11 เปรียบเทียบค่า Error ของการประมาณค่าเมื่อตัวสังเกตใช้โพลของระบบกับ 10 ของโพลของระบบ.....	55
5.1 ระยะในการเคลื่อนที่ตามระยะห่างของ HGA ในพลาเน็ต .....	56
5.2 ผลตอบจากการออกแบบ กรณีกำหนดเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวเท่ากับ 1 วินาที.....	58
5.3 ผลตอบจากการออกแบบ กรณีกำหนดเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวเท่ากับ 1.5 วินาที.....	59
5.4 ผลตอบจากการออกแบบ กรณีกำหนดเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวเท่ากับ 2 วินาที.....	59
5.5 ผลตอบสนองของตำแหน่งการเคลื่อนที่จริงที่เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว 1 วินาที.....	60
5.6 ตัวแปรสถานะที่ได้จากการประมาณค่าด้วยตัวสังเกตที่เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว 1 วินาที.....	60
5.7 ผลตอบสนองของตำแหน่งการเคลื่อนที่จริงที่เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว 1.5 วินาที.....	61

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.8 ตัวแปรสถานะที่ได้จากการประมาณค่าด้วยตัวสังเกตที่ เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว 1.5 วินาที.....	61
5.9 ผลตอบสนองของตำแหน่งการเคลื่อนที่จริงที่เวลาเข้าสู่ สภาวะคงตัว 2 วินาที.....	62
5.10 ตัวแปรสถานะที่ได้จากการประมาณค่าด้วยตัวสังเกตที่ เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว 2 วินาที.....	62
5.11 การทดสอบการติดตามอินพุตอ้างอิง.....	63
5.12 ตัวแปรสถานะที่ประมาณได้จากตัวสังเกตในการทดสอบ การติดตามอินพุตอ้างอิง.....	64
5.13 ข้อมูลตัวแปรสถานะในสภาวะลิเนียร์เบริงปกติ.....	65
5.14 ข้อมูลตัวแปรสถานะในสภาวะที่สารหล่อลื่นเหลือ 75 %.....	65
5.15 ข้อมูลตัวแปรสถานะในสภาวะที่สารหล่อลื่นเหลือ 50 %.....	66
5.16 ข้อมูลตัวแปรสถานะในสภาวะที่สารหล่อลื่นเหลือ 25 %.....	66
5.17 ข้อมูลตัวแปรสถานะในสภาวะที่สารหล่อลื่นเหลือ 0 %.....	67
5.18 การเปรียบเทียบตัวแปรสถานะในทุกกรณีทีลิเนียร์เบริงบกพร่อง.....	67
5.19 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระแสมอเตอร์.....	68
5.20 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็ว.....	69
5.21 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความคลาดเคลื่อนของตัวสังเกตกับระบบ.....	69
5.22 ค่าความโค้งของกระแสมอเตอร์.....	70
5.23 ค่าความโค้งของความเร็ว.....	70
5.24 ค่าความโค้งของความคลาดเคลื่อนของตัวสังเกตกับระบบ.....	71
5.25 ค่าเฉลี่ยกำลังสองของกระแสมอเตอร์.....	71
5.26 ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความเร็ว.....	72
5.27 ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนของตัวสังเกตกับระบบ.....	72
5.28 ค่าอัตราส่วนค่าสูงสุดต่อค่าเฉลี่ยของกระแสมอเตอร์.....	73



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.29	ค่าอัตราส่วนค่าสูงสุดต่อค่าเฉลี่ยของความเร็ว ..... 73
5.30	ค่าอัตราส่วนค่าสูงสุดต่อค่าเฉลี่ยของกระแสมอเตอร์ ..... 74
5.31	ไดอะแกรมการฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียมด้วยโปรแกรมเมทแลบ ..... 75
5.32	หน้าต่างรายละเอียดการฝึกสอนของโมเดล..... 75
5.33	คอนฟิวชันเมทริกซ์ของ โมเดลที่ความถูกต้องสูงที่สุด..... 78
ก.1	Simulink ของระบบควบคุมและตัวสังเกต ..... 87
ข.1	Simulink ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบ ..... 89
ข.2	ขั้นตอนการเข้า parameter estimation tool ..... 89
ข.3	ขั้นตอนการนำเข้าข้อมูลการทดลอง ..... 90
ข.4	ขั้นตอนการเลือกและกำหนดของเขตของพารามิเตอร์ ..... 91
ข.5	ขั้นตอนการเลือกวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ..... 92
ข.6	ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบ..... 93
ง.1	ส่วนประกอบของลิเนียร์เบริง ..... 104
ง.2	ส่วนประกอบของบอลสกรู..... 105
ง.3	ขนาดของเซอร์โวมอเตอร์และกราฟทอร์ก..... 106

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$K$	=	อัตราขยายของการป้อนกลับตัวแปรสถานะ
$L$	=	อัตราขยายของตัวสังเกต
$K_I$	=	อัตราขยายของตัวควบคุม
$u$	=	อินพุตของระบบควบคุม
$I$	=	เมทริกซ์เอกลักษณ์
$r$	=	สัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะ
$x$	=	ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของระบบจริง
$\hat{x}$	=	ตำแหน่งการเคลื่อนที่จากการประมาณค่า
$\dot{\hat{x}}$	=	ความเร็วจากการประมาณค่า
$P_o$	=	เมทริกซ์สำหรับตรวจสอบสภาพสังเกตได้
$P_c$	=	เมทริกซ์สำหรับตรวจสอบสภาพควบคุมได้
$t$	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
$W$	=	เมทริกซ์ค่าถ่วงน้ำหนัก
$b$	=	เมทริกซ์ค่าไบอัส
$y_{target}$	=	ค่าเอาต์พุตจริงสำหรับฝึกสอน
$y_{output}$	=	ค่าเอาต์พุตของโมเดล
$R$	=	ค่าคงที่การเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่เชิงมุมเป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้น
$p$	=	ระยะพิตช์ของสกรู
$x_i$	=	ข้อมูลแต่ค่าในกลุ่มตัวอย่าง
$\bar{x}$	=	ค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมดในกลุ่มตัวอย่าง
$\bar{S}$	=	ความเร็วที่ได้จากการประมาณค่า
$e_b$	=	แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (Back electromotive force voltage)
$i_a$	=	กระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์
$C_t$	=	ค่าความหน่วงสมมูลของระบบบอลสกรู
$M_t$	=	มวลสมมูลของโหลดภายนอกและบอลสกรู
$n_m$	=	ตำแหน่งเชิงมุมของมอเตอร์
$K_s$	=	ค่าความแข็งสมมูลของบอลสกรู

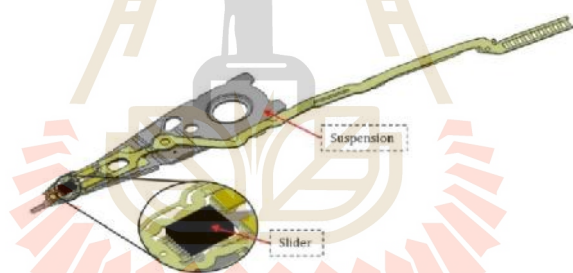
# บทที่ 1

## บทนำ

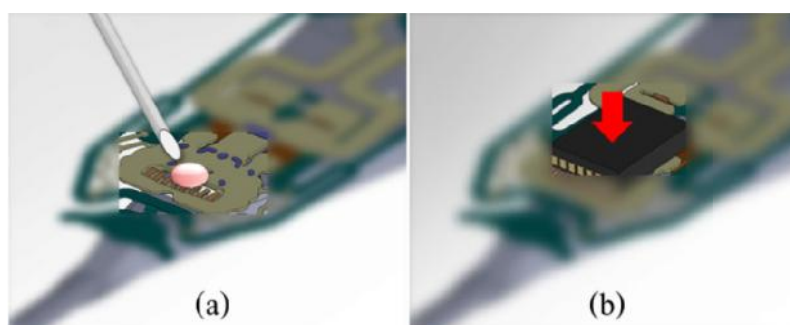
### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการจัดเก็บข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง และมีอัตราการผลิตที่เพิ่มขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งาน ดังนั้นกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จึงได้มีการนำเครื่องจักรอัตโนมัติเข้ามาใช้ในกระบวนการผลิต เนื่องจากมีความรวดเร็วและให้ความแม่นยำสูงในการผลิต การทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในส่วนของ การอ่านและเขียนข้อมูลจะมีส่วนประกอบที่เรียกว่า Head Gimbal Assembly (HGA) รูปที่ 1.1 ซึ่งจะบันทึกข้อมูลในรูปแบบของสัญญาณดิจิทัล 0 และ 1 ลงไปในแผ่นจานแม่เหล็กในกระบวนการประกอบ HGA จะมีส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ Slider ซึ่งมีหน้าที่อ่านเขียนข้อมูล และ Suspension จะทำหน้าที่รองรับ Slider และวงจรไฟฟ้า ซึ่งทั้งสองชิ้นส่วนนี้มีขนาดเล็กมาก การประกอบจึงเป็นงานระดับไมครอน ดังนั้นการควบคุมความแม่นยำในการประกอบจึงเป็นเรื่องสำคัญเนื่องจากหากตำแหน่งประกอบผิดพลาดไประดับไมครอนอาจจะมีผลต่อคุณภาพและการทำงานที่ผิดพลาดของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้ กระบวนการผลิต HGA ที่สำคัญคือการหยอดกาวและติดหัวอ่านเขียนลงบน Suspension แสดงดังรูปที่ 1.2 a และ b ตามลำดับ ในกระบวนการจะใช้เครื่องจักรอัตโนมัติ รูปที่ 1.3 ในการหยอดกาวและติดหัวอ่านเขียน ซึ่งชิ้นงานจะถูกจับยึดโดยชุดแคลมป์ที่ติดตั้งบนระบบขับเคลื่อนแนวแกนด้วยบอลสกรู แกน X และ Y เพื่อนำชิ้นงานไปในตำแหน่งที่ต้องการ ในกระบวนการผลิตต้องการความแม่นยำของตำแหน่งในการเคลื่อนที่ของชุดบอลสกรูเนื่องจากมีผลต่อตำแหน่งในการหยอดกาวและติดหัวอ่านเขียน เมื่อเครื่องจักรทำงานอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานจะทำให้ชิ้นส่วนที่รองรับการเคลื่อนที่ เช่น ลิเนียร์เบร็วริงเกิดการสึกหรอทำให้ระบบเกิดการสั่นสะเทือนที่สูงขึ้นเนื่องจากความไม่ราบเรียบในการเคลื่อนที่ ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการหยอดกาวและติดหัวอ่าน ดังรูปที่ 1.4 และการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของชุดบอลสกรูไม่มีประสิทธิภาพเนื่องจากตัวแปรของระบบเกิดการเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้ยังส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานที่สูงขึ้นในการเคลื่อนที่ทำให้มอเตอร์ต้องใช้กระแสเพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลโดยตรงต่อค่าใช้จ่ายที่ต้องสูญเสียไปกับพลังงานที่ใช้ ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาและเสนอการออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งของระบบขับเคลื่อนแนวแกนด้วยบอลสกรูในเครื่องจักรหยอดกาวและติดหัวอ่านของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ซึ่งใช้การออกแบบระบบควบคุมแบบเซอร์โวร่วมกับตัวสังเกตอันดับเต็มเพื่อทำ

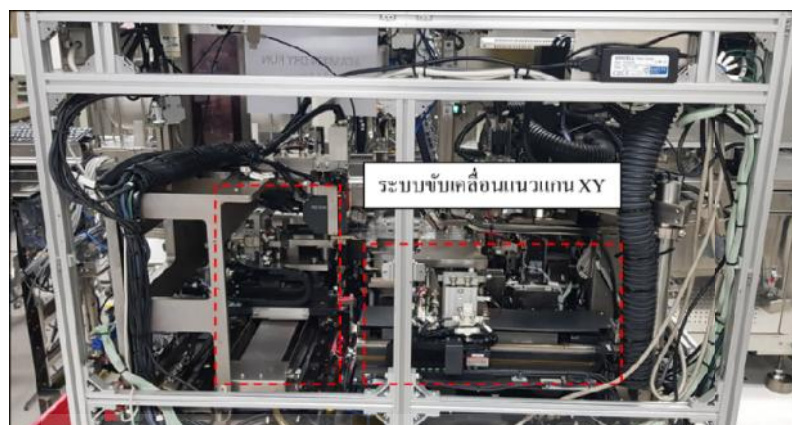
การประมาณค่าตัวแปรสถานะโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ การออกแบบจะใช้การป้อนกลับตัวแปรสถานะ (State variable feedback) ผ่านเทคนิคของการวางโพล (Pole placement) เพื่อปรับเปลี่ยนลักษณะของผลตอบสนองของระบบวงปิด เช่น เวลาเข้าสู่สถานะคงตัว และค่าสัญญาณพุ่งสูงสุดของระบบให้เป็นไปตามข้อกำหนด และการตรวจจับข้อผิดพลาดของลิเนียร์แบร์ริงเมื่อสารหล่อลื่นบกพร่องโดยมีการทดลอง 5 สถานะประกอบด้วย สถานะการทำงานปกติ (Healthy condition) สถานะที่สารหล่อลื่นเหลือ 75% (Lubricant 75%), สถานะที่สารหล่อลื่นเหลือ 50% (Lubricant 50%), สถานะที่สารหล่อลื่นเหลือ 25% (Lubricant 25%), สถานะที่สารหล่อลื่นเหลือ 0% (Lubricant 0%) และประยุกต์ใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network) ในการตรวจจับข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น ซึ่งอาศัยข้อมูลทางพลวัตของระบบที่ได้จากการประมาณค่าด้วยตัวสังเกตมาใช้สำหรับการสร้างแบบจำลอง ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้คาดว่าระบบที่ออกแบบจะมีความสามารถในการควบคุมให้เอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอ้างอิง และสามารถคงทนต่อการรบกวนจากภายนอก รวมไปถึงข้อมูลตัวแปรสถานะที่ได้จากตัวสังเกตจะสามารถนำไปวิเคราะห์ และสร้างระบบตรวจจับข้อบกพร่องของลิเนียร์แบร์ริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ



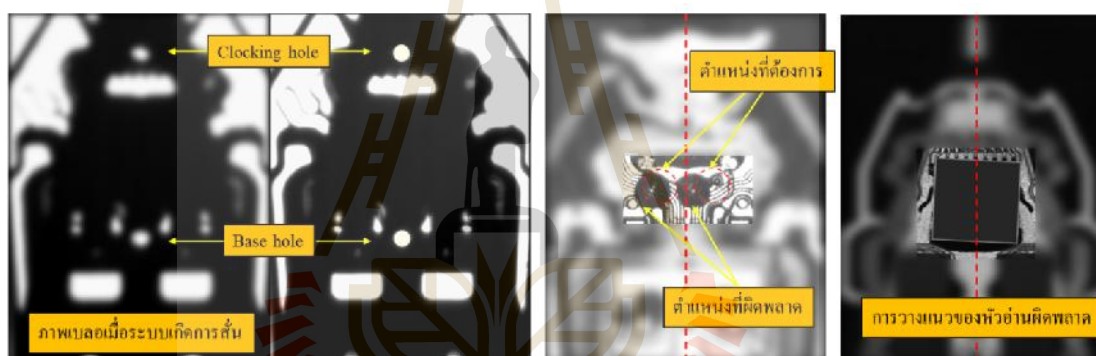
รูปที่ 1.1 Head Gimbal Assembly (HGA)



รูปที่ 1.2 (a) กระบวนการหยอดกาว (b) กระบวนการติดหัวอ่านเขียน



รูปที่ 1.3 เครื่องหยอดกาวและติดหัวอ่านเขียนอัตโนมัติ



รูปที่ 1.4 กระบวนการหยอดกาวและติดหัวอ่านที่ผิดพลาด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบระบบตรวจจับข้อบกพร่องของลิเนียร์แบร์ริงโดยประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์และนำข้อมูลผลตอบแทนทางพลวัตของระบบที่ได้จากการประมาณค่าด้วยตัวสังเกตไปใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

1.2.3 เพื่อออกแบบระบบควบคุมแบบเซอร์ร่วมกับตัวสังเกต สำหรับควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของระบบขับเคลื่อนแนวแกนด้วยบอลสกรู ในเครื่องหยอดกาวและติดหัวอ่านเขียนของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 สร้างชุดทดสอบระบบขับเคลื่อนแนวแกนด้วยบอลสกรูเพื่อใช้ในการจำลองการทำงานของระบบโดยใช้เซอร์โวมอเตอร์แกน X ขนาด 200 วัตต์ ใช้แรงดันอินพุต 24 โวลต์ ความเร็วรอบสูงสุด 6000 รอบต่อนาที

1.3.2 วิเคราะห์และหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนแนวแกนด้วยบอลสกรูในเครื่องหยอดกาวและติดหัวอ่านเขียนของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

1.3.3 ในระบบควบคุมแบบเซอร์โว ออกแบบตัวป้อนกับตัวแปรสถานะและสังเกตอันดับเต็มโดยใช้เทคนิคการวางโพล

1.3.4 การทดสอบการทำงานของระบบควบคุมจะจำลองสถานการณ์โดยใช้โปรแกรม MATLAB เวอร์ชัน 2017a ในส่วนของ Simulink ร่วมกับบอร์ดควบคุม RAPCON

1.3.5 สภาวะลิเนียร์แบร์ริงเกิดข้อบกพร่องจะทดลอง 5 กรณี ประกอบด้วย สภาวะปกติ, สภาวะที่สารหล่อลื่นเหลือ 75%, สภาวะที่สารหล่อลื่นเหลือ 50%, สภาวะที่สารหล่อลื่นเหลือ 25% และสภาวะที่สารหล่อลื่นเหลือ 0%,

### 1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

1.4.1 ศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนแนวแกนด้วยบอลสกรู การออกแบบระบบควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะ เทคนิคการวางโพลของระบบ และการตรวจจับข้อบกพร่องโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

1.4.2 ออกแบบและสร้างชุดทดสอบจำลองการทำงานของเครื่องจักรหยอดกาว และติดหัวอ่านในกระบวนการผลิตจริง

1.4.3 ออกแบบและทำการทดลองเก็บข้อมูลเพื่อทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบ

1.4.4 ออกแบบระบบควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะ ตัวประมาณค่าตัวแปรสถานะและจำลองการทำงานของตัวควบคุมด้วยโปรแกรม MATLAB ในส่วนของ Simulink

1.4.5 ทำการทดสอบตัวควบคุมและตัวประมาณค่าตัวแปรสถานะของระบบกับชุดทดสอบที่สร้างขึ้นโดยใช้บอร์ด RAPCON Real time controller ในการควบคุมระบบ

1.4.6 ทดลองการทำงานของระบบเมื่อลิเนียร์แบร์ริงอยู่ในสภาวะปกติและเมื่อสารหล่อลื่นเกิดข้อบกพร่อง

1.4.7 วิเคราะห์และออกแบบข้อมูลเพื่อสร้าง โมเดลตรวจจับข้อบกพร่องโดยใช้  
โครงข่ายประสาทเทียม

1.4.8 วิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผลลัพธ์ที่ได้

1.4.9 จัดทำเอกสารและรายงานการวิจัย

## 1.5 สถานที่ทำงานวิจัย

แผนก HGA Assembly and Automation Development บริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล ประเทศไทย จำกัด

## 1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย

1.6.1 ชุดทดลองระบบขับเคลื่อนแนวแกนด้วยบอลสกรู แกน X และ Y ด้วยเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และชุดควบคุมพีซีในงาน

1.6.2 โปรแกรม MATLAB 2017a ในส่วนของ Simulink สำหรับสร้างการจำลองการทำงานของตัวควบคุมที่ออกแบบและใช้ทดลองกับชุดทดสอบจริง

1.6.3 บอร์ดควบคุม RAPCON Real time controller สำหรับเชื่อมต่อกับ Simulink ในการควบคุมการทำงานของระบบ

1.6.4 Digital Multimeter

1.6.5 Linear Encoder

1.6.6 คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล และหน้าจอโมนิเตอร์

## 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 กระบวนการและวิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบเซอร์โวและตัวประมาณค่าตัวแปรสถานะของระบบขับเคลื่อนแนวแกนด้วยบอลสกรูและเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

1.7.2 สามารถควบคุมตำแหน่งของระบบขับเคลื่อนแนวแกนด้วยบอลสกรูด้วยเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในกระบวนการหยุดกาวและติดหัวอ่านเขียนของฮาร์ดดิสก์ใดก็ได้ให้มีผลตอบสนองเป็นไปตามต้องการ

1.7.3 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการออกแบบระบบควบคุมสมัยใหม่และสามารถใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการตรวจจับข้อบกพร่องกับเครื่องจักรอื่นๆได้

1.7.4 เผยแพร่บทความงานวิจัยในงานประชุมวิชาการในต่างประเทศไม่น้อยกว่า 1 การประชุม

## 1.8 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 เป็นบทนำซึ่งจะกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ตลอดจนขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

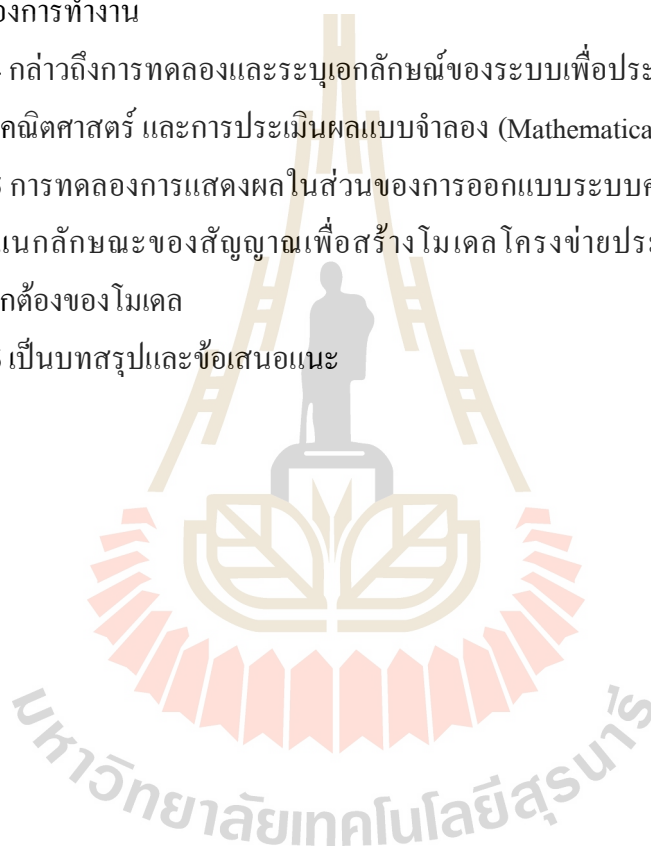
บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบควบคุมร่วมกับ ตัวสังเกตุและเทคนิคการตรวจจับข้อผิดพลาดโดยประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม

บทที่ 3 กล่าวถึงการสร้างชุดทดลองของตัวขับเคลื่อนแนวแกนในเครื่องหยอดกาแฟและติด หัวอ่านเขียน วิธีการดำเนินงานวิจัย และการใช้งาน Microcontroller ร่วมกับ MATLAB/Simulink 2017a เพื่อจำลองการทำงาน

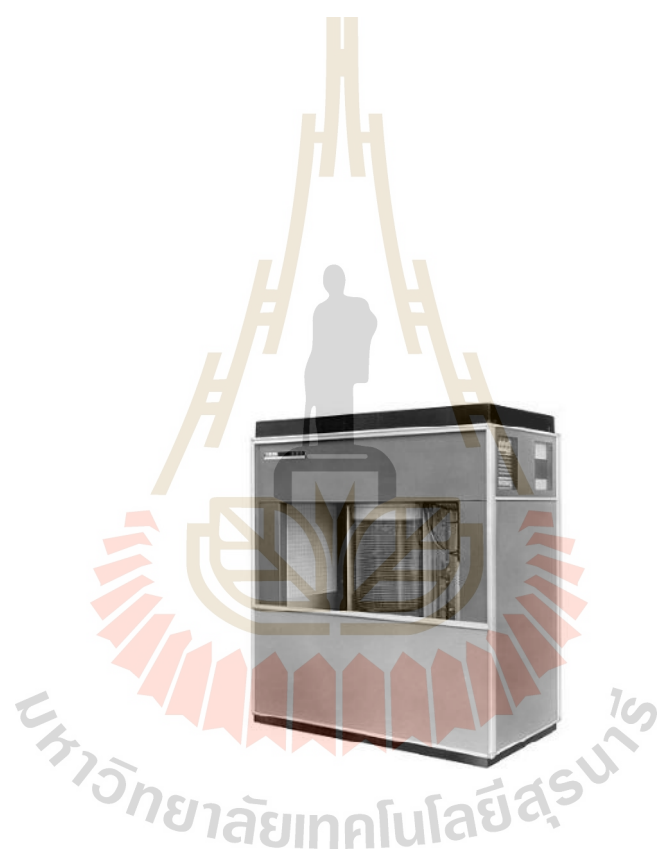
บทที่ 4 กล่าวถึงการทดลองและระบุเอกลักษณ์ของระบบเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ของ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการประเมินผลแบบจำลอง (Mathematical model validation)

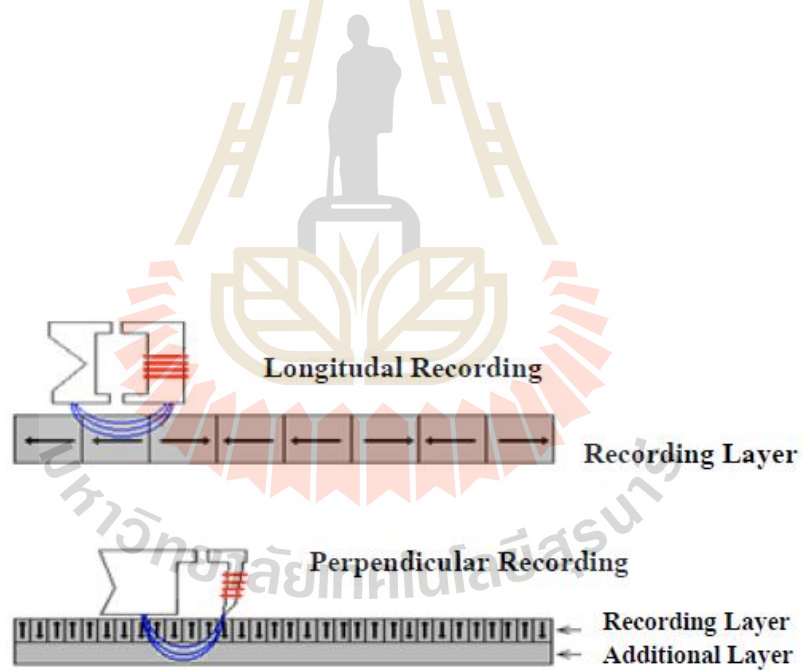
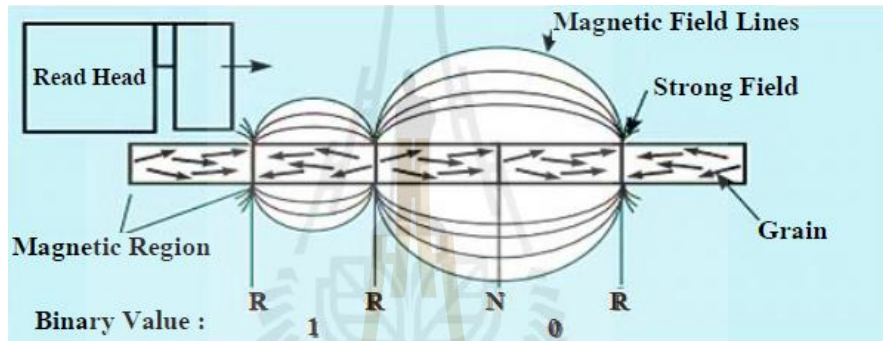
บทที่ 5 การทดลองการแสดงผลในส่วนของการออกแบบระบบควบคุมร่วมกับตัวสังเกตุ และผลการจำแนกลักษณะของสัญญาณเพื่อสร้าง โมเดล โครงข่ายประสาทเทียม รวมถึงการ ประเมินความถูกต้องของโมเดล

บทที่ 6 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ





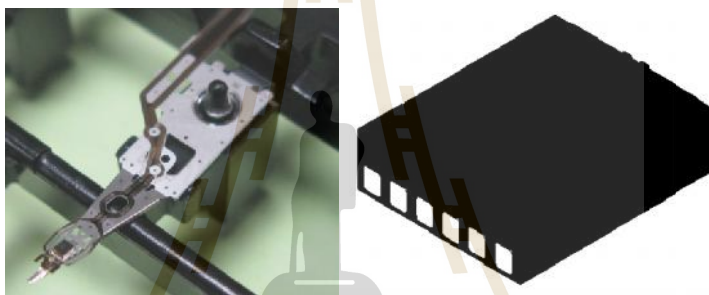




## 2.3 ส่วนประกอบของการอ่าน/เขียนของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

หัวอ่านเขียน (Read/Write Head) เป็นส่วนที่ใช้ในการอ่านเขียนข้อมูลลักษณะโดยทั่วไปมีขนาดเล็กและมีความซับซ้อนจึงมีราคาแพง ภายในหัวอ่าน/เขียนมีลักษณะเป็นขดลวด โดยในการอ่านเขียนข้อมูลเกิดขึ้นเมื่อคอนโทรลเลอร์ (Controller) ของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ได้รับคำสั่งจาก Host ให้มีการอ่านเขียนข้อมูล จะนำคำสั่งที่ได้รับมาแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าแล้วป้อนเข้าสู่ขดลวดทำให้เกิดแรงเหนี่ยวนำไปเปลี่ยนโครงสร้างของสารแม่เหล็กที่ฉาบบนแผ่นดิสก์ซึ่งมีรูปแบบของการบันทึกข้อมูลในที่สุด

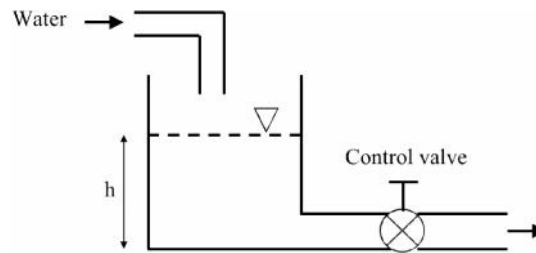
- ส่วนประกอบของหัวอ่านจะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ suspension ซึ่งทำหน้าที่รองรับหัวอ่าน/เขียน หรือที่เรียกว่า slider



รูปที่ 2.4 suspension และ slider

## 2.4 ระบบควบคุมอัตโนมัติ

ระบบควบคุมคือกระบวนการ (Process) ที่ใช้ในการควบคุมเอาต์พุตของกระบวนการที่ต้องการควบคุม ตัวอย่างเช่น เครื่องปรับอากาศจะมีกระบวนการที่ใช้ปรับความเย็นของเครื่องปรับอากาศเพื่อควบคุมอุณหภูมิของห้องให้อยู่ในช่วงที่ผู้ใช้ต้องการเราสามารถมองภาพง่ายๆ ของการควบคุมโดยพิจารณาจากรูปที่ 2.5 เราต้องการที่จะควบคุมระดับน้ำในถังให้คงที่ โดยกำหนดว่าเราไม่สามารถควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่เข้าถังได้ แต่เราสามารถควบคุมอัตราการไหลออกของน้ำได้ ดังนั้นเมื่อเราต้องการควบคุมระดับน้ำในถังเราสามารถทำได้โดยการปรับอัตราการไหลออกของน้ำให้สัมพันธ์กับระดับน้ำในถัง กล่าวคือเมื่อระดับน้ำในถังสูงกว่าจุดที่ต้องการเราต้องเปิดให้น้ำไหลออกมากขึ้น และเมื่อระดับน้ำต่ำกว่าที่เรต้องการเราต้องเปิดให้น้ำไหลออกน้อยลง เราจะเห็นว่าระบบนี้เป็นระบบที่ใส่คนควบคุมนั่นคือคนเปรียบเสมือนเป็นตัวควบคุม (Controller) และวิธีการควบคุมคือการเปิดวาล์วให้น้ำไหลออกมากหรือน้อย



รูปที่ 2.5 การควบคุมระดับน้ำในถังให้คงที่

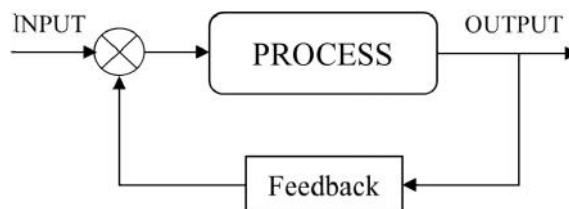
ระบบควบคุม (Control system) มีโครงสร้าง 2 รูปแบบคือ

1. ระบบควบคุมแบบวงเปิด (Open loop control system) เป็นระบบควบคุมที่ไม่มีนำเอาต์พุตการป้อนกลับมาเปรียบเทียบกับอินพุตจึงง่ายต่อการสร้างและประหยัด แต่ค่าเอาต์พุตจะไม่มีผลต่อการควบคุมขบวนการของระบบดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนภาพระบบวงเปิด

2. ระบบควบคุมแบบวงปิด (Close loop control system) เป็นระบบควบคุมที่มีการป้อนกลับ (Feedback) โดยนำเอาเอาต์พุตมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุต ความแตกต่างที่เกิดขึ้นจะถือเป็นความผิดพลาด เพื่อเอาสัญญาณนี้ป้อนเข้าระบบแล้วตัวควบคุมจะนำไปสร้างสัญญาณควบคุมใหม่ เพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับระบบดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แผนภาพระบบวงปิด

การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมมีจุดมุ่งหมาย เพื่อให้กระบวนการที่เราต้องการควบคุมมีคุณลักษณะที่ต้องการ 3 อย่างต่อไปนี้ตรงตามข้อกำหนด คือ

- Transient Response เป็นการตอบสนองของเอาต์พุตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอินพุต โดยเป็นช่วงสภาวะของการเปลี่ยนแปลงก่อนเข้าสู่สภาวะคงที่

- Steady-State Response เป็นสภาวะหลังจาก Transient response เป็นสภาพที่ผลการตอบสนองเกือบได้ตามคำสั่งหรือตามความต้องการ สำหรับระบบที่เสถียรเท่านั้น

- Stability ระบบที่เสถียรคือระบบที่ทำให้เอาต์พุตที่มีค่าจำกัดเมื่อ ป้อนอินพุตที่มีค่าจำกัดไว้ให้กับระบบ

## 2.5 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

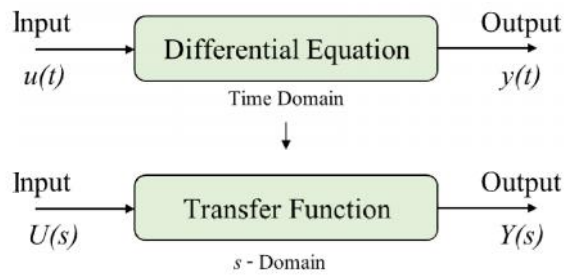
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกนำมาใช้ในระบบควบคุมมีอยู่หลายรูปแบบด้วยกันเช่น ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) สมการสเปซสถานะ (State space variables) เป็นต้น ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Modeling) ที่ใช้ในระบบควบคุมพื้นฐานของระบบใดๆ สามารถหาได้จาก

1) สมการความสัมพันธ์ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ของตัวแปรใดๆ แล้วแปลงให้อยู่ในรูปฟังก์ชันเอส (s-domain) ด้วยวิธีการแปลงลาปลาซ (Laplace's Transform) ซึ่งในเบื้องต้นอาจจะสร้างขึ้นมาจากสมการความสัมพันธ์ที่มีหลายตัวแปร แล้วทำให้เหลือเพียงแค่สมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุตกับเอาต์พุตของระบบเท่านั้น สุดท้ายจึงจัดให้อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอน

2) ทดสอบผลตอบสนองของระบบด้วยอินพุตอย่างใดอย่างหนึ่ง บันทึกผลตอบสนองที่ได้ แล้วนำไปหา สมการความสัมพันธ์ด้วยวิธีการของการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification) ที่พบเจอบ่อยๆก็คือการทดสอบระบบด้วยผลตอบสนองเชิงความถี่ แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างฟังก์ชันถ่ายโอนโดยตรง

### 2.5.1 ฟังก์ชันถ่ายโอน

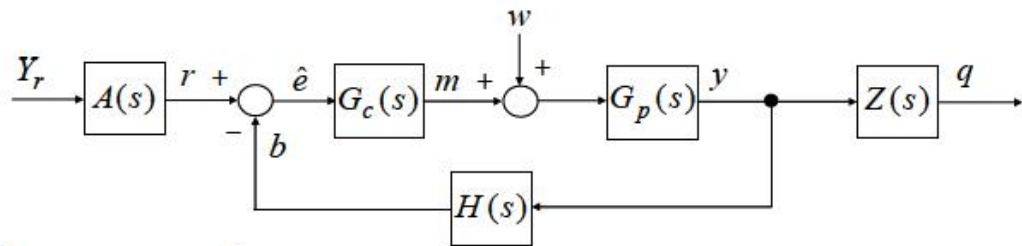
ฟังก์ชันถ่ายโอนสร้างขึ้นมาจาก สมการความสัมพันธ์ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์แปลงสมการเหล่านั้นให้อยู่ในรูปฟังก์ชันเอสด้วยการแปลงลาปลาซ (Laplace's Transform) ด้วยค่าเริ่มต้นเป็นศูนย์ จัดสมการความสัมพันธ์ให้เหลือเพียงแค่ตัวแปรสองตัวคือตัวแปรอินพุตกับเอาต์พุตของระบบ ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนจึงหมายถึง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุต โดยจะจำกัดการพิจารณาเฉพาะกับระบบที่เป็นเชิงเส้น และไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเท่านั้น ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ฟังก์ชันถ่ายโอน

### 2.5.2 กราฟการไหลของสัญญาณ

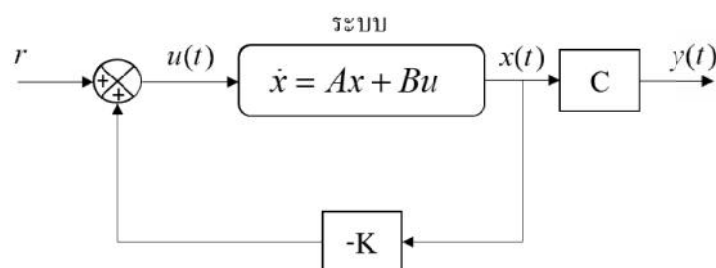
การแทนระบบควบคุมด้วยบล็อกไดอะแกรม เป็นรูปแบบที่รวมเอาส่วนประกอบต่างๆ ของระบบที่มีการเชื่อมต่อพารามิเตอร์กันภายใน ซึ่งการเชื่อมต่อพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้จะมีลักษณะเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนย่อยหลายๆ ตัว ส่งผ่านค่าพารามิเตอร์ให้แก่กันและกันภายในระบบเอง รวมถึงมีการส่งสัญญาณเข้าไปในระบบและออกจากระบบด้วยเช่นกัน การแทนระบบแบบนี้จะทำให้เห็นภาพรวมของระบบทั้งระบบ รวมทั้งการเชื่อมต่อของสัญญาณต่างๆ ภายในระบบ และยังสามารถยุบรวมส่วนต่างๆ ให้กระชับเพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบระบบควบคุมได้อีกด้วย และบล็อกไดอะแกรมจะเชื่อมต่อกันด้วยลูกศรซึ่งจะใช้สำหรับกำกับทิศทางการไหลของข้อมูลหรือสัญญาณภายในระบบ รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะทั่วไปของบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบวงปิด ที่ประกอบด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนของ ตัวปรับเปลี่ยนรูปแบบสัญญาณอินพุต  $A(s)$ , ตัวควบคุม  $G_c(s)$ , สิ่งที่ต้องการควบคุม  $G_p(s)$ , ตัวตรวจจับ  $H(s)$  และ ตัวปรับเปลี่ยนสัญญาณเอาต์พุต  $Z(s)$  ทุกฟังก์ชันถ่ายโอนเชื่อมต่อกันด้วยลูกศรที่กำกับทิศทางการไหลของสัญญาณ รวมไปถึงมีการรวมสัญญาณและตรวจจับสัญญาณ ในระบบควบคุมในทางปฏิบัติ ตัวปรับเปลี่ยนสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตอาจจะไม่มีใช้งานก็ได้ ระบบทั่วไปจึงมีฟังก์ชันถ่ายโอนหลักๆ เพียงแค่สามส่วน สัญญาณอินพุตของระบบมี 2 สัญญาณคือ สัญญาณอ้างอิงของระบบ  $r$  และสัญญาณรบกวนของระบบ  $w$  สัญญาณเอาต์พุตมีสัญญาณเดียวคือ  $y$  การทำงานของระบบควบคุมตามบล็อกไดอะแกรมนี้ ก็คือการทำงานของระบบควบคุมแบบวงปิดที่ได้ศึกษามาแล้วก่อนหน้านี้เพียงแต่จะเห็นบล็อกต่าง ๆ เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ และสามารถนำไปใช้ในการคำนวณต่าง ๆ ได้อย่างชัดเจนต่อไป



รูปที่ 2.9 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบวงปิด

## 2.6 ตัวควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะ

การออกแบบระบบควบคุมของระบบที่อยู่ในรูปแบบปริภูมิสถานะที่เสนอในงานวิจัยนี้เป็น การออกแบบผลตอบสนองของระบบวงปิดให้เป็นไปตามต้องการ โดยใช้เทคนิคการวาง โพลของ ระบบ (Pole placement method) ซึ่งก่อนที่จะออกแบบจะต้องมีการตรวจสอบว่าระบบมีสภาพ ควบคุมได้ และต้องสมมติว่าตัวแปรสถานะของระบบทุกตัวสามารถวัดค่าได้แต่ในความเป็นจริง แล้วสำหรับระบบที่มีอันดับสูง นั้นเป็นเรื่องปกติที่จะไม่สามารถวัดค่าตัวแปรสถานะได้ทุกตัว หาก ต้องการจะวัดก็ต้องเสียค่าใช้จ่ายที่สูงสำหรับระบบตรวจรู้หรือเซ็นเซอร์ที่จะต้องติดตั้งเพื่อทำ การวัด โดยในงานวิจัยจึงได้มีการนำตัวสังเกต (Observer) มาใช้ในการประมาณค่าตัวแปรสถานะ ซึ่งจะกล่าวในส่วนถัดไป สำหรับการป้อนกลับตัวแปรสถานะของระบบจะต้องมีการคำนวณหาค่า อัตราขยายของการป้อนกลับตัวแปรสถานะ (State feedback gain, K) ซึ่งมีวิธีการหาค่าอยู่หลายวิธี และเนื่องจากระบบที่ศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นระบบอันดับสูงจึงเสนอการหาค่า K ด้วยวิธีของ แอค เคอร์แมน (Ackermann's Formula) ซึ่งสามารถแก้ปัญหาโดยใช้ฟังก์ชันช่วยในโปรแกรม MATLAB กราฟการไหลของสัญญาณของระบบควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะ ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะ

ในการออกแบบจะทำการสมมติให้สัญญาณอ้างอิงเป็นศูนย์ ( $r=0$ ) ดังนั้นสัญญาณควบคุมจะได้ว่า

$$u = -Kx = -[k_1 \ k_2 \ k_3 \dots \ k_n] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

จากสมการที่ 2.1 พบว่าค่าอัตราขยาย  $K$  จะขึ้นอยู่กับจำนวนของตัวแปรสถานะของระบบ เมื่อพิจารณาสมการแทนค่าสมการที่ 1 ลง ในสมการของระบบ จะได้

$$\dot{x}(t) = Ax(t) - BKx \quad (2.2a)$$

หรือ

$$\dot{x}(t) = (A - BK)x \quad (2.2b)$$

ดังนั้น เมื่อจัดรูปสมการที่ 2.2b ในโดเมนความถี่จะได้

$$\det(sI - (A - BK)) = 0 \quad (2.3)$$

เมื่อ  $I$  คือ เมทริกซ์เอกลักษณ์

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมคือการหาค่าอัตราขยาย  $K$  ที่ทำให้รากของสมการพหุนามมีผลตอบสนองตามต้องการ โดยการเลือกโพลของระบบปิดคือ  $(s + p_1)(s + p_2)(s + p_3) \dots (s + p_n)$  จากนั้นจึงคำนวณหาค่า  $K$  โดยการเทียบสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนาม จะเห็นว่าวิธีในการออกแบบจะยุ่งยากมากเมื่อระบบที่ต้องการจะควบคุมมีอันดับมากกว่า 3 ซึ่งในงานวิจัยนี้ระบบขับเคลื่อนแนวแกนด้วยบอลสกรูและเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงเป็นระบบอันดับ 5 การออกแบบค่าจะใช้โปรแกรม MATLAB ในการคำนวณโดยมีพื้นฐานมาจากสมการของ แอคเคอร์แมน (Ackermann's Formula) แสดงได้ดังนี้



กำหนดให้ระบบอยู่ในรูปของ state space model ที่แทนค่าสัญญาณควบคุมดังสมการที่ 2.2b โดยจาก

$$\dot{x}(t) = (A - BK)x$$

กำหนด

$$\tilde{A} = A - BK$$

สมการคุณลักษณะของระบบที่ต้องการคือ

$$s^n + r_1 s^{n-1} + r_2 s^{n-2} + \dots + r_{n-1} s + r_0 = 0 \quad (2.4)$$

จากทฤษฎีของ Cayley–Hamilton จะได้

$$w(\tilde{A}) = \tilde{A}^n + r_1 \tilde{A}^{n-1} + \dots + r_{n-1} \tilde{A} + r_n I = 0 \quad (2.5)$$

ในการวิเคราะห์จะสมมติให้ระบบมีอันดับเป็น 3 และแทนค่า  $\tilde{A} = A - BK$  ในสมการที่ 2.5 จะได้ว่า

$$I = I$$

$$\tilde{A} = A - BK$$

$$\tilde{A}^2 = (A - BK)^2 = A^2 - ABK - BK\tilde{A}$$

$$\tilde{A}^3 = (A - BK)^3 = A^3 - A^2BK - ABK\tilde{A} - BK\tilde{A}^2$$

แทนค่าลงในสมการที่ 2.5 ดังนี้

$$\tilde{A}^3 + r_1 \tilde{A}^2 + r_2 \tilde{A} + r_3 I =$$

$$r_3 I + r_2 A + r_1 A^2 + A^3 - r_2 BK - r_1 ABK - r_1 BK\tilde{A} - A^2 BK - ABK\tilde{A} - BK\tilde{A}^2 \quad (2.6)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ 2.6 จะพบว่า  $r_3 I + r_2 A + r_1 A^2 + A^3 = w(A) \neq 0$  ดังนั้นจะพบว่าเมื่อ  $w(\tilde{A}) = 0$  จะได้ดังสมการที่ 2.7 คือ

$$\begin{aligned} w(A) &= B(r_2 K + r_1 K\tilde{A} + K\tilde{A}^2) + AB(r_1 K + K\tilde{A}) + A^2 BK \\ &= [B \mid AB \mid A^2 B] \begin{bmatrix} r_2 K + r_1 K\tilde{A} + K\tilde{A}^2 \\ r_1 K + K\tilde{A} \\ K \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.7)$$

ซึ่งเมทริกซ์  $[B \mid AB \mid A^2 B]$  ก็คือเมทริกซ์ที่ตรวจสอบสภาพควบคุมได้นั่นเอง จากสมการที่ 2.7 จัดรูปสมการต่อโดยคูณอินเวอร์สของเมทริกซ์  $[B \mid AB \mid A^2 B]$  ทั้งสองข้างของสมการที่ 2.7 จะได้

$$[B \mid AB \mid A^2 B]^{-1} w(A) = \begin{bmatrix} r_2 K + r_1 K\tilde{A} + K\tilde{A}^2 \\ r_1 K + K\tilde{A} \\ K \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

จะเห็นว่าอัตราขยาย  $K$  จะหาได้จากการนำ  $[0 \ 0 \ 1]$  คูณสมการที่ 2.8 ซึ่งก็คือ

$$K = [0 \ 0 \ 1][B \mid AB \mid A^2 B]^{-1} w(A) \quad (2.9)$$

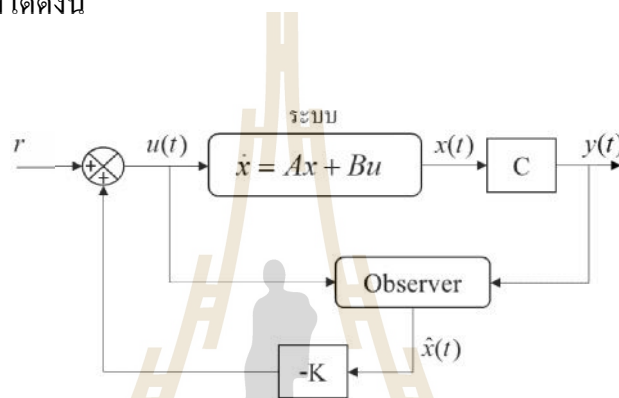
หรือเมื่อระบบมีอันดับเท่ากับ  $n$  ก็สามารถคำนวณได้จาก

$$K = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1][B \mid AB \mid \dots \mid A^{n-1} B]^{-1} w(A) \quad (2.10)$$

## 2.7 ตัวสังเกต

การออกแบบระบบควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะ (State variable feedback control) ดังที่กล่าวมาแล้วนั้น จะต้องการข้อมูลของตัวแปรสถานะทุกตัวของระบบ ซึ่งก็คือตัวแปรสถานะทุกตัวต้องสามารถวัดได้ แต่ในความเป็นจริงแล้วการที่เราจะทำการวัดตัวแปรสถานะทุกตัวเป็นไปได้ยาก หรือหากต้องการจะวัดก็ต้องเสียค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นในการสร้างระบบตรวจรู้หรือเซ็นเซอร์มาใช้ในการวัด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะศึกษาการออกแบบตัวประมาณค่าตัวแปรสถานะ (State estimator) หรือ บ่อยครั้งเรียกว่า ตัวสังเกต (State observer) ซึ่งจะออกแบบบนพื้นฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเอง ข้อมูลที่ได้จากการประมาณค่าจะถูกใช้ร่วมกับระบบ

ควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะ ดังรูปที่ 2.11 โดยที่การออกแบบตัวประมาณค่าตัวแปรสถานะจะแบ่งเป็น 2 วิธีคือ แบบอันดับเต็ม (Full-order state estimator) และลดอันดับ (Reduced order observer) ซึ่งตัวประมาณค่าอันดับเต็ม คือการประมาณค่าตัวแปรสถานะใหม่หมดทุกตัว โดยอาศัยข้อมูลของตัวแปรสถานะบางตัวที่วัดได้ กับสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้ระบบ ส่วนตัวประมาณค่าแบบลดอันดับ คือการสร้างตัวประมาณค่าตัวแปรสถานะโดยอาศัยข้อมูลของตัวแปรสถานะที่วัดได้และสัญญาณอินพุตของระบบควบคุม ทำการประมาณเฉพาะตัวแปรสถานะที่ไม่สามารถวัดได้เท่านั้น โดยในงานวิจัยนี้จะทำการวัดค่าตัวแปรสถานะใหม่ทุกตัวโดยใช้ Full-order state estimator แสดงได้ดังนี้



รูปที่ 2.11 ตัวควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะร่วมกับตัวสังเกต

### 2.7.1 ตัวสังเกตอันดับเต็ม

การออกแบบตัวสังเกตอันดับเต็ม (Full-order state estimator) จะทำการประมาณค่าตัวแปรสถานะทุกตัวใหม่ทั้งหมดโดยใช้ข้อมูลของเอาต์พุตบางตัวที่สามารถวัดได้และสัญญาณอินพุตที่ส่งเข้าไปในระบบที่จะทำการประมาณค่าตัวแปรสถานะ สมการระบบสามารถทำหน้าที่เป็นตัวประมาณค่าตัวแปรสถานะของตัวเองได้แต่เป็นการประมาณในลักษณะแบบวงเปิด (Open – Loop Observer) พิจารณาระบบเชิงเส้นที่ค่าตัวแปรของระบบไม่ขึ้นกับเวลา (Linear Time Invariant System) ที่ต้องการจะใช้ตัวสังเกตในการประมาณค่าตัวแปรสถานะของระบบเขียนในรูป State Space Form คือ

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.11)$$

ตัวสังเกตของระบบพลศาสตร์ที่ต้องการจะทำการควบคุมมีรูปแบบดังนี้คือ

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L[y - C\hat{x}] \quad (2.12)$$

เมื่อ  $L$  คือ เมทริกซ์อัตราขยายของตัวสังเกต  $[n \times 1]$

$\hat{x}$  คือ ค่าตัวแปรสถานะของตัวสังเกต  $[n \times 1]$

พิจารณาสสมการที่ 2.11 ลบด้วยสมการที่ 2.12 จะได้

$$\dot{x} - \dot{\hat{x}} = Ax + Bu - \{A\hat{x} + Bu + L[y - C\hat{x}]\} \quad (2.13)$$

จัดรูปสมการที่ 2.13 จะได้

$$\dot{x} - \dot{\hat{x}} = [A - LC](x - \hat{x}) \quad (2.14)$$

ในการออกแบบตัวสังเกตต้องการให้ประมาณค่า  $\hat{x}$  ให้เข้าใกล้  $x$  หรือ  $\hat{x} \rightarrow x$  เมื่อ  $t \rightarrow \infty$  แต่ในเงื่อนไขเริ่มต้นจำเป็นต้องกำหนดค่า  $\hat{x}(t=0)$  ให้กับระบบตัวสังเกต การประมาณค่าความผิดพลาด (Estimation error) ดังสมการที่ 2.15

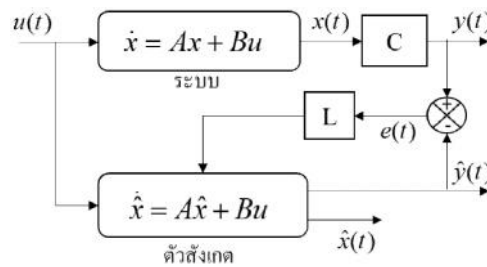
$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (2.15)$$

การออกแบบตัวสังเกตควรจะต้องทำให้  $e(t) \rightarrow 0$  เมื่อ  $t \rightarrow \infty$  และจากสมการที่ 2.13 จะเขียนได้เป็น

$$\dot{e}(t) = Ax + Bu - \{A\hat{x} + Bu + L[y - C\hat{x}]\} \quad (2.16)$$

หรือ

$$\dot{e} = [A - LC]e \quad (2.17)$$



รูปที่ 2.12 แผนภาพหลักการทำงานของตัวสังเกต

## 2.8 สภาพสังเกตได้

สภาพสังเกตได้ (Observability) เป็นสภาพที่บ่งบอกว่าระบบพลวัตมีความสามารถที่จะส่งผ่านข้อมูลของตัวแปรสถานะได้ดีแค่ไหนเมื่อพิจารณาจากสัญญาณขาออก สภาพควบคุมได้ และสภาพสังเกตได้เป็นสภาพคู่กันทางคณิตศาสตร์ (Duality) กล่าวคือ ในขณะที่สภาพควบคุมได้ หมายถึง สภาพที่แสดงออกถึงว่าสัญญาณขาเข้าสามารถขับเคลื่อนตัวแปรสถานะไปที่ค่าใดๆ ที่ต้องการได้ แต่ สภาพสังเกตได้ จะเป็นสภาพที่แสดงออกว่าการรู้รอยสัญญาณขาออก (Output trajectory) จะให้ข้อมูลเพียงพอต่อการคาดคะเนค่าเริ่มต้นของตัวแปรสถานะของระบบได้ ในกรณีระบบพลวัตเชิงเส้นเวลาต่อเนื่องไม่แปรผันตามเวลานั้นเงื่อนไขที่จะทำให้มีสภาพสังเกตได้ ก็ต่อเมื่อ determinant ของ observability matrix ( $P_o$ ) ไม่เท่ากับศูนย์ หรือ Rank ของเมทริกซ์ต้องเท่ากับ  $n$  เมทริกซ์  $P_o$  แสดงในสมการที่ 18

$$P_o = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

โดยที่ระบบจะมีสภาพสังเกตได้ (Observability) ก็ต่อเมื่อ

$$\det P_o = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \neq 0 \quad \text{หรือ} \quad \text{rank} \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} = n$$

## 2.9 สภาพควบคุมได้

สภาพควบคุมได้ (Controllability) จะบ่งบอกถึงความสามารถที่สัญญาณขาเข้าที่เป็นไปได้ (Admissible inputs) จะสามารถขับเคลื่อนตัวแปรสถานะให้ไปถึงค่าใด ๆ ได้ในช่วงเวลาจำกัด ไม่ว่าค่าเริ่มต้น (Initial value) ของตัวแปรสถานะนั้น ๆ จะเป็นค่าอะไร ในกรณีระบบพลวัตเชิงเส้น เวลาต่อเนื่องไม่แปรผันตามเวลานั้นเงื่อนไขที่จะทำให้มีสภาพควบคุมได้ ก็ต่อเมื่อ determinant ของ controllability matrix ( $P_c$ ) ไม่เท่ากับศูนย์ หรือ Rank ของเมทริกซ์ต้องเท่ากับ  $n$  เมทริกซ์  $P_c$  แสดงในสมการที่ 2.19

$$P_c = [B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{n-1}B] \quad (2.19)$$

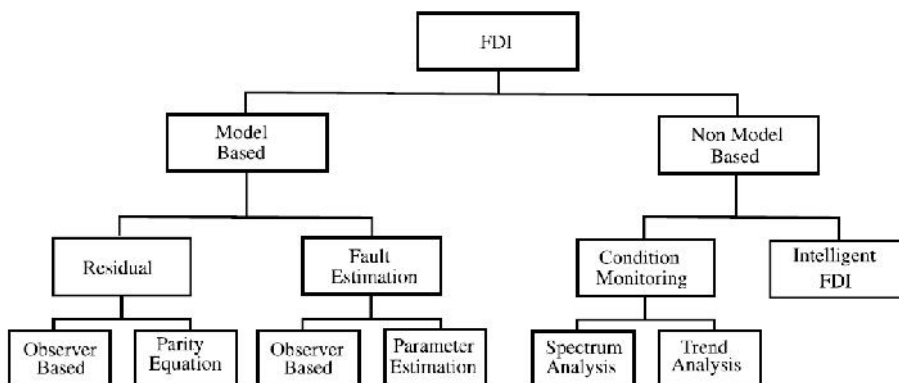
โดยที่ระบบจะมีสภาพควบคุมได้ (Controllability) ก็ต่อเมื่อ

$$\det P_c = [B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{n-1}B] \neq 0$$

หรือ  $rank [B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{n-1}B] = n$

## 2.10 ระบบตรวจจับและจำแนกข้อบกพร่อง

การตรวจจับ และระบุตำแหน่งของข้อบกพร่อง (Fault Detection and Isolation, FDI) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์และประเมินสภาพการทำงานที่ผิดปกติของเครื่องจักร แบ่งออกเป็น 2 วิธี ดังรูปที่ 2.13 คือการใช้แบบจำลองของระบบ (Model based approach) และการตรวจสอบสภาพการทำงานของเครื่องจักร (Condition based monitoring) บนพื้นฐานของการวัดและวิเคราะห์สัญญาณ ในงานวิจัยนี้มีการออกแบบตัวสังเกตอันดับเต็มซึ่งจะทำให้ทราบตัวแปรของระบบที่สนใจเมื่อลิเนียร์แบริงเกิดข้อบกพร่องขึ้นจะทำให้ตัวแปรบางตัวเปลี่ยนแปลงทำให้สามารถตรวจจับข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นได้แต่เนื่องจากในบางกรณีเริ่มเกิดข้อบกพร่องขึ้นเพียงเล็กน้อย อาจจะไม่สามารถสังเกตได้ ดังนั้นจึงมีการประยุกต์ใช้เทคนิค FDI แบบชาญฉลาด (Intelligent FDI) โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมมาช่วยในการจำแนกสถานะของ

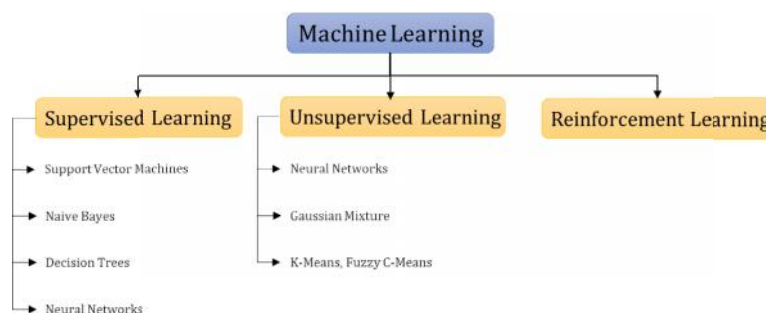


รูปที่ 2.13 การจำแนกเทคนิคการตรวจจับข้อผิดพลาด

ข้อบกพร่อง โดยอาศัยข้อมูลที่ประมาณได้จากตัวสังเกตมาใช้ในการสร้างโมเดลซึ่งจะนำไปสู่การบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ (Predictive Maintenance) เพื่อลดผลกระทบต่อความเสียหายของชิ้นส่วนอื่น ๆ ทั้งนี้จะส่งผลให้เครื่องจักรทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และการสิ้นเปลืองพลังงานของเครื่องจักรลดน้อยลง

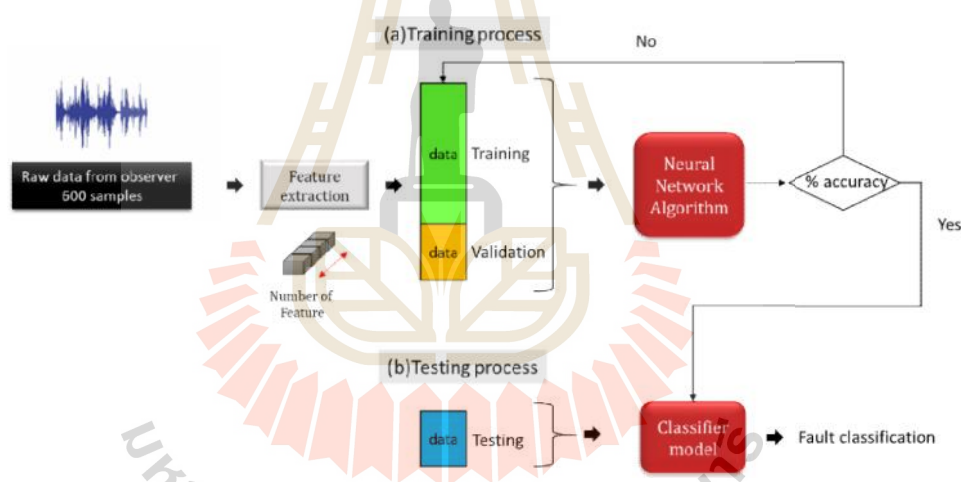
### 2.11 การเรียนรู้ของเครื่องจักร

การเรียนรู้ของเครื่องจักร (Machine Learning) คือเทคนิคในการสอนคอมพิวเตอร์ให้สามารถเรียนรู้และทำบางอย่างที่ใกล้เคียงกับมนุษย์ได้ซึ่งเป็นกระบวนการเรียนรู้จากประสบการณ์ แต่จะให้คอมพิวเตอร์เรียนรู้ผ่านข้อมูลที่เราสอนใจโดยใช้วิธีการคำนวณ และให้อัลกอริทึมทำการปรับตัวโมเดลให้มีความถูกต้องมากขึ้นเพื่อให้สอดคล้องกับข้อมูล ประเภทของ Machine learning แบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ประเภทของ Machine Learning

ซึ่ง Supervised learning คือการเรียนรู้แบบมีผู้สอนโดยการสอนให้คอมพิวเตอร์สามารถหาคำตอบได้ด้วยตัวเองจากการสอนจากข้อมูลของผู้สอนอื่นพุทและผลลัพธ์ ส่วน Unsupervised learning คือกระบวนการเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอนซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่ให้คอมพิวเตอร์เรียนรู้ชุดข้อมูลอินพุทที่ไม่ทราบผลลัพธ์อย่างชัดเจน และ Reinforcement learning หรือการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง จะเป็นการเรียนรู้ที่เปลี่ยนไปตามสิ่งแวดล้อม ในปัจจุบัน Machine learning เริ่มเข้ามามีบทบาทมากขึ้นในงานทางด้านวิศวกรรม เช่น การใช้ในงานการทำนายการซ่อมบำรุง (Predictive Maintenance) ระบบควบคุม และการตรวจจับและระบุข้อบกพร่อง (Fault detection and Isolation) ในงานวิจัยนี้ได้มีการเสนอการประยุกต์ใช้วิธีทาง Machine learning มาใช้ในการตรวจจับข้อบกพร่องของลิเนียร์เบริงในเครื่องจักรในการบวนการหยอดดาวและติดหัวอ่านเขียนของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ โดยใช้ อัลกอริทึมที่ชื่อว่าโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN) มาช่วยในการสร้างโมเดล ซึ่งขั้นตอนในการเรียนรู้เพื่อสร้างโมเดลของปัญหา แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ขั้นตอนการเรียนรู้ของ Machine Learning

### 2.11.1 การคัดแยกลักษณะเด่นของข้อมูล

กระบวนการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจะต้องจัดเตรียมชุดข้อมูลให้เหมาะสมเพื่อทำให้โมเดลเกิดการจดจำรูปแบบได้ดี ขั้นตอนการคัดแยกลักษณะของข้อมูล (Feature extraction) จึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการจัดการข้อมูล ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการทางสถิติมาใช้ในการเตรียมชุดข้อมูลสำหรับฝึกสอน ประกอบด้วยค่า ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation), ค่าความโด่ง (Kurtosis), ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square, RMS) และค่า



อัตราส่วนค่าสูงสุดต่อค่าเฉลี่ย (Crest factor) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.20 – 2.23 ตามลำดับ

- ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$† = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.20)$$

- ค่าความโด่ง

$$Kurtosis = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i - \bar{x}}{†} \right)^4 \quad (2.21)$$

- ค่าเฉลี่ยกำลังสอง

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (2.22)$$

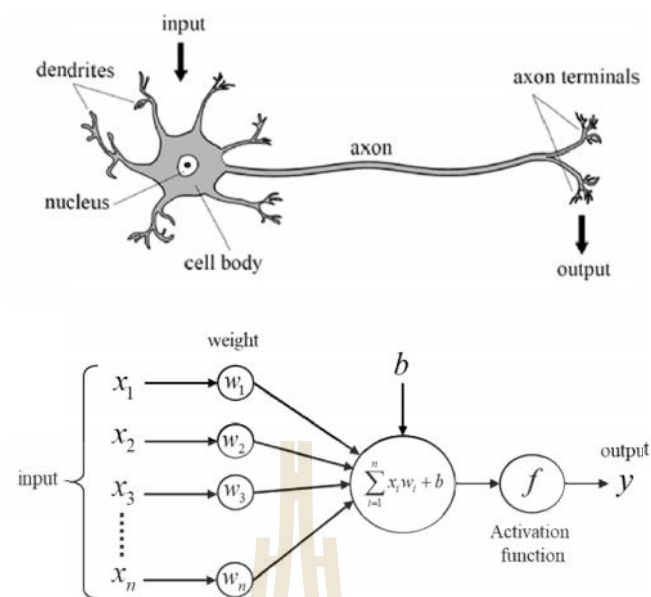
- ค่าอัตราส่วนค่าสูงสุดต่อค่าเฉลี่ย

$$Crest\ factor = \frac{peak\ value}{rms\ value} \quad (2.23)$$

โดยที่	†	คือ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	n	คือ จำนวนของข้อมูลทั้งหมดในกลุ่มตัวอย่าง (Sample size)
	$x_i$	คือ ข้อมูลแต่ละค่าของกลุ่มตัวอย่าง
	$\bar{x}$	คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด

### 2.11.2 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

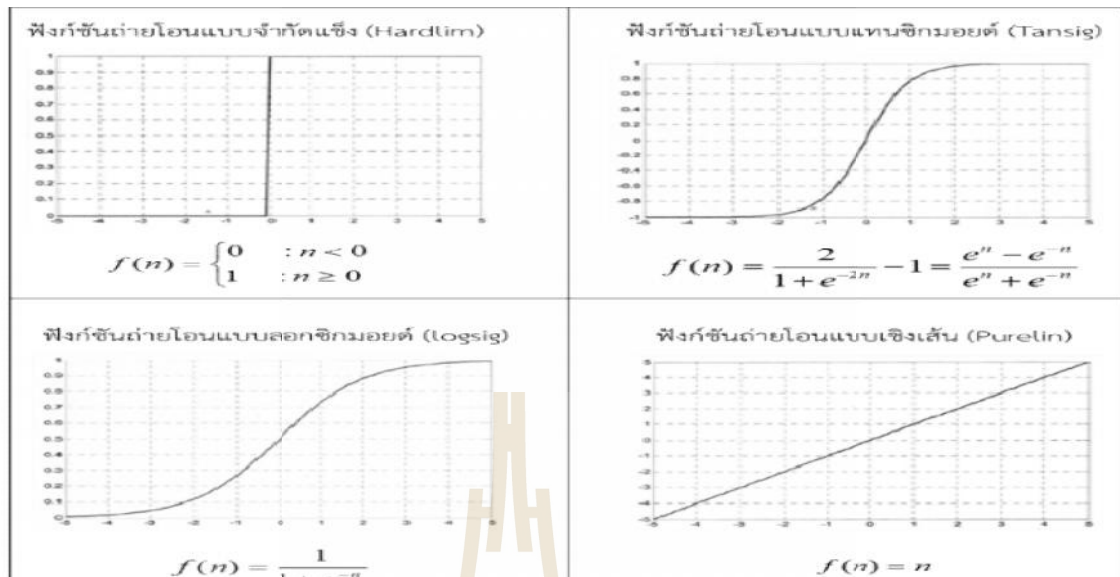
โครงข่ายประสาทเทียมจัดอยู่ในอัลกอริทึมของ Machine learning คือการใช้คอมพิวเตอร์ในการจำลองการทำงานของเซลล์ประสาทภายในสมองของมนุษย์ ดังรูปที่ 2.16 ที่มีการเรียนรู้ จำแนก และจดจำข้อมูล



รูปที่ 2.16 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

ซึ่งปัจจุบันประสิทธิภาพในการประมวลผลข้อมูลของคอมพิวเตอร์มีความรวดเร็วขึ้นมาก ทำให้โครงข่ายประสาทเทียมถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในแต่ละสาขา เช่น งานทางด้านการแพทย์ การเกษตร และงานทางด้านวิศวกรรม กระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised Learning) และการเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised Learning) ในงานวิจัยนี้จะนำข้อมูลที่ได้จากการประมาณของตัวสังเกตมาสร้างโมเดลจึงเป็นการเรียนรู้แบบมีผู้สอน ในการสร้างโมเดลจะอาศัยฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function) ซึ่งจะทำหน้าที่รวมค่าตัวเลขจากเอาต์พุตของนิวรอนและทำการตัดสินใจว่าจะส่งเอาต์พุตแบบใดออกไป ฟังก์ชันกระตุ้นสามารถเป็นแบบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นก็ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะของระบบ ซึ่งมีหลายแบบที่นิยมใช้โดยทั่วไป ดังแสดงในตารางที่ 2.1

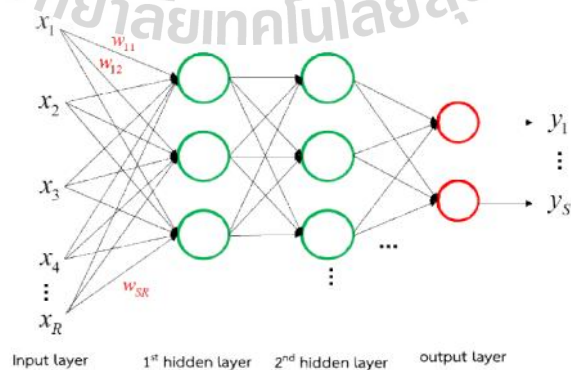
ตารางที่ 2.1 รูปแบบฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function)



โดยวิธีการสร้างโมเดลของโครงข่ายประสาทเทียม มี 2 แบบคือ เครือข่ายการส่งข้อมูลไปข้างหน้า (Feed forward network) และ เครือข่ายการส่งข้อมูลย้อนกลับ (Back-propagation network)

#### 2.11.2.1 เครือข่ายการส่งข้อมูลไปข้างหน้า

สำหรับรูปแบบการสร้างโมเดลนี้จะเป็นลักษณะการไหลของอินพุตไปเอาต์พุต โดยไม่มีการย้อนกลับค่าใดๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 หากโครงสร้างมีจำนวนชั้นซ่อน (Hidden layer) เพียง 1 ชั้นจะเรียกว่า โครงข่ายประสาทเทียมแบบง่ายมีหน่วยเดียว (Single Layer Perceptron Network) แต่หากมีชั้นซ่อนมากกว่า 1 ชั้นจะเรียกว่า โครงข่ายประสาทเทียมแบบซับซ้อน (Multi-Layer Perceptron Network)



รูปที่ 2.17 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบไปข้างหน้า

โดยที่การใช้ในการหาค่าเอาต์พุตสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.24

$$y = f(Wx + b) \quad (2.24)$$

โดยที่

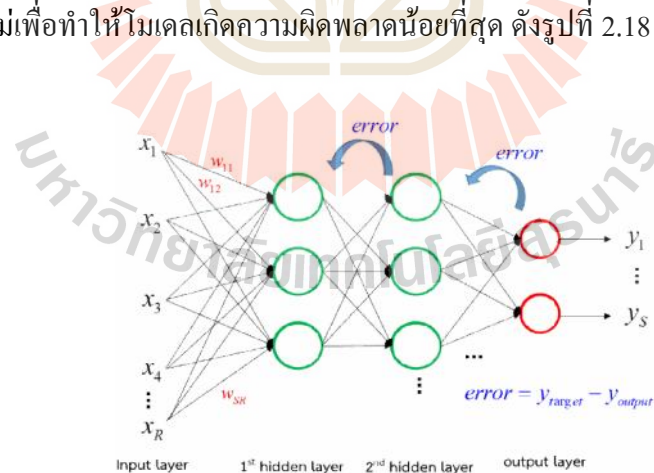
$$x^T = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_s] \quad \text{คือ เมทริกซ์อินพุต}$$

$$b^T = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_R] \quad \text{คือ เมทริกซ์ไบอัส}$$

$$W = \begin{pmatrix} W_{11} & K & W_{1R} \\ M & O & M \\ W_{S1} & L & W_{SR} \end{pmatrix} \quad \text{คือ เมทริกซ์ค่าถ่วงน้ำหนัก}$$

### 2.11.2.2 เครื่องมือการส่งข้อมูลย้อนกลับ

โครงข่ายประสาทเทียมที่มีการสร้างโมเดลแบบการส่งข้อมูลย้อนกลับ คือจะมีการนำค่าความผิดพลาดของเอาต์พุตของโมเดลกับเอาต์พุตจริงย้อนกลับเพื่อทำการปรับค่าถ่วงน้ำหนักใหม่เพื่อให้โมเดลเกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบย้อนกลับ

ซึ่งสมการค่าความผิดพลาดของการสร้างโมเดลสามารถหาในรูปแบบของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Mean Square Error, MSE) ดังสมการที่ 2.25 ดังนี้

$$Error = \frac{1}{2}(y_{target} - y_{output})^2 \quad (2.25)$$

## 2.12 ปรัชญ่นวัตกรรมกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.12.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบระบบควบคุม

ในปี ค.ศ. 2012 Xie Dong และคณะ [1] ได้นำเสนอการควบคุมระบบขับเคลื่อนแกนของเครื่องจักร CNC โดยใช้เซอร์โวมอเตอร์ ซึ่งตัวควบคุมที่ใช้มีการประยุกต์ระบบควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ (Fuzzy logic controller) ร่วมกับตัวควบคุมแบบ PID แนวคิดของงานวิจัยนี้คือการใช้ระบบ Fuzzy ในการสร้างกฎการตัดสินใจเมื่อเกิดค่าความผิดพลาดเกิดขึ้นเพื่อที่จะสามารถปรับเปลี่ยนค่าแกนของตัวควบคุมแบบ PID ต่อไป ผลการทดลองจะเปรียบเทียบระหว่างระบบควบคุมแบบ PID ธรรมดาและระบบที่นำ Fuzzy logic เข้ามาใช้ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมที่ใช้ Fuzzy logic ให้ผลตอบสนองที่เร็วกว่าระบบควบคุมแบบ PID ธรรมดาและให้ความแม่นยำของการควบคุมที่สูงกว่า

ในปี ค.ศ. 2015 Kelvinder Singh และคณะ [2] เสนอวิธีการปรับจูนพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PID โดยการใช้แบทอัลกอริทึม (Bat algorithm BA) เพื่อปรับผลตอบสนองของระบบให้เป็นที่ไปตามต้องการ เปรียบเทียบกับการใช้ particle Swarm Optimization (PSO) ในการปรับจูน การทดสอบจะเปรียบเทียบ 3 กรณีคือ ระบบอันดับสอง ระบบอันดับสาม และระบบของเซอร์โวมอเตอร์ ผลที่ได้ BA algorithm ให้ผลของเวลาเข้าสู่สถานะคงตัว และ โอเวอร์ชูท ที่ต่ำกว่า PSO algorithm

ในปี ค.ศ. 2016 Mohd Salim Qureshi และคณะ [3] ได้ออกแบบระบบควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ โดยใช้ Sliding Mode Controller (SMC) เปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบ PI โดยในการทดสอบจะพิจารณาสถานะมีโหลดกับไม่มีโหลด ซึ่งมีการจำลองการทำงานผ่านโปรแกรม MATLAB ผลการทดสอบพบว่าตัวควบคุมแบบ SMC มีเวลาเข้าสู่สถานะคงตัวเร็วกว่าตัวควบคุมแบบ PI และสามารถต้านทานการรบกวนได้ดีกว่า

ในปี ค.ศ. 2008 Masaki Sazawa และคณะ [4] มีแนวคิดในการออกแบบระบบควบคุมเซอร์โวมอเตอร์เพื่อให้มีตำแหน่งที่แม่นยำขึ้น โดยการออกแบบป้องกันผลของ Anti-wind up ของตัวควบคุมแบบ PI นอกจากนี้ยังมีการออกแบบตัวสังเกตการรบกวนจากภายนอก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเซอร์โวมอเตอร์มีการเคลื่อนที่ราบเรียบขึ้นและยังให้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว

ในปี ค.ศ. 2006 Jinxing Zheng และคณะ [5] เสนอการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของลีดสกรูในเครื่อง CNC ในการทดลองมีการสร้าง

แบบจำลองของแรงเสียดทานขณะเคลื่อนที่และทำการควบคุมเส้นทางความเร็ว ผลการทดลองตรวจสอบด้วยการจำลองระบบ ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพสูงขึ้นในการ tracking ตามอินพุตอ้างอิง

ในปี ค.ศ. 2016 Rongrong Qian และคณะ [6] ได้มีการเสนอวิธีใหม่ในการออกแบบระบบควบคุมแบบ NSMC สำหรับควบคุมตำแหน่งของระบบบอลสกรูเปรียบเทียบกับ LSMC ในการสร้างแบบจำลองใช้ระบบอันดับขึ้นความอิสระเท่ากับสอง การออกแบบตัวควบคุมเพื่อปรับปรุงผลตอบสนองเริ่มต้นและลดค่าฟุ้งเกิน จากการทดลองพบว่า NSMC มีค่าความผิดพลาดในการ tracking น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับ LSMC

ในปี ค.ศ. 2017 Chien-Yu Lin และคณะ [7] ทำการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนแนวแกนในเครื่อง CNC เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองด้วยวิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบภายใต้ผลตอบสนองเชิงความถี่ ผลการทดลองพบว่าแบบจำลองที่วิเคราะห์สามารถนำไปออกแบบตัวควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 2.12.2 งานวิจัยเกี่ยวกับระบบตรวจจับข้อบกพร่อง

ในปี ค.ศ. 2009 R. J. Patton และคณะ [8] มีการออกแบบการประมาณและชดเชยข้อผิดพลาดของระบบ โดยใช้ตัวสังเกตในการประมาณขนาดข้อผิดพลาด สำหรับการจำลองสถานการณ์การเกิดข้อผิดพลาดมีการจำลองแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นกับระบบลูกค้อนแบบผกผันบนรางเคลื่อนที่ ผลการทดลองชี้ชัดว่าตัวสังเกตที่ออกแบบสามารถประมาณค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นกับระบบได้ และระบบสามารถทำงานได้ราบเรียบมากขึ้นเมื่อตัวชดเชยมีการทำงาน

ในปี ค.ศ. 2011 E.C. Mid และคณะ [9] ทำการศึกษาผลของการทำงานที่ผิดพลาดของเซ็นเซอร์ในระบบควบคุมแบบวงปิด และได้ปรับปรุงระบบควบคุมแบบคงทนต่อความผิดพลาด โดยการใช้ตัวสังเกตในการประมาณค่าขนาดของข้อผิดพลาด โดยเมื่อเซ็นเซอร์มีการทำงานผิดพลาด ระบบจะชดเชยและปรับเปลี่ยนให้เซ็นเซอร์ทำงานถูกต้องก่อนส่งค่าให้ตัวควบคุม

ในปี ค.ศ. 2011 Claudio Bianchini และคณะ [10] เสนอการตรวจจับข้อผิดพลาดของลิเนียร์แบร์ริงของลิเนียร์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ โดยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน ในการวิจัยได้มีการหาความถี่ที่เกี่ยวข้องกับความเร็วในการเคลื่อนที่คือ ความถี่ของลูกปืน ความถี่ของรางเคลื่อนที่ และความถี่ของรางวิ่งของลูกปืน สำหรับวิธีในการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนมีการใช้วิธีทางสถิติและฟาสฟูเรียร์ในการระบุปัญหา ซึ่งผลพบว่าสามารถแยกแยะข้อผิดพลาดของลิเนียร์แบร์ริงได้โดยการพิจารณาขนาดการสั่นสะเทือนในแต่ละความถี่

ในปี ค.ศ. 2016 Aditi B. Patil และคณะ [11] ได้ใช้วิธีการของโครงข่ายประสาทเทียมในจำแนกความเสียหายที่เกิดกับลิเธียม แบตเตอรี่ ซึ่งการทดลองจะใช้การวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนในรูปแบบของโดเมนเวลา และใช้เทคนิคการประมวลผลสัญญาณในการสร้างข้อมูลเพื่อนำไปสร้างโมเดลของโครงข่ายประสาทเทียม โดยที่วิธีการเรียนรู้ของโมเดลจะเปรียบเทียบกับสามแบบ คือ Levenberg-Marquardt, Resilient back-propagation และ Scaled Conjugate method เพื่อหาโมเดลที่ให้ความแม่นยำมากที่สุด ผลพบว่า โมเดลที่ใช้ Levenberg-Marquardt ในการเรียนรู้ให้ค่าความแม่นยำสูงที่สุดอยู่ที่ 98.7 %

ในปี ค.ศ. 2006 Sulochana Wadhvani และคณะ [12] เสนอวิธีใหม่ในการตรวจจับความเสียหายของแบตเตอรี่โดยใช้โมเดล Adaptive Neuro-Fuzzy (ANFIS) งานวิจัยได้ใช้ข้อมูลการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนร่วมกับเทคนิคทางสัญญาณในการสร้างฟีเจอร์สำหรับการเรียนรู้ สำหรับการเทรนโมเดลมีการใช้จำนวนอินพุต 200 เวกเตอร์สร้างกฎการตัดสินใจทั้งหมด 26 กฎ โดยให้ค่าความถูกต้อง 99 % ในการทำนาย

ในปี ค.ศ. 2016 G.-L. Osorio-Gordillo และคณะ [13] ทำการศึกษาการตรวจจับข้อผิดพลาดของแบตเตอรี่ ซึ่งใช้การออกแบบ Takagi-Sugeno PI observer ในการประมาณโหลดทอร์ก การทดลองจะใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกรณีศึกษาและการวิเคราะห์ผลแสดงให้เห็นว่าระบบไม่สามารถประมาณค่าโหลดทอร์ก ที่เกิดขึ้นได้หากแบตเตอรี่เกิดข้อผิดพลาดเกิดขึ้น

ในปี ค.ศ. 2018 Canan Tastimur และคณะ [14] อธิบายเนื่องจากการวิเคราะห์ความเสียหายของแบตเตอรี่ โดยปกติจะวิเคราะห์จากสัญญาณการสั่นสะเทือนและต้องใช้ผู้ที่มีประสบการณ์ในการวิเคราะห์ ในงานวิจัยจึงได้เสนอการตรวจจับความเสียหายโดยใช้ convolution neural network (CNN) มาช่วยในการวิเคราะห์ ในการทดลองมีการจำลองสถานะความเสียหาย 4 กรณี ซึ่งในแต่ละกรณีมีการเก็บค่าการสั่นสะเทือนในโดเมนเวลา ขั้นตอนการสร้าง CNN โมเดล จะใช้ภาพของสัญญาณการสั่นสะเทือนในแต่ละกรณีจากผลโมเดลให้ค่าความแม่นยำ 100 %

ในปี ค.ศ. 2018 GyuBeom Han และคณะ [15] ใช้วิธีการวิเคราะห์ค่าสเปกตรัมของกระแสร่วมกับ machine learning algorithms ในการตรวจจับความเสียหายของแบตเตอรี่ การสร้างโมเดลจะใช้อินพุตเป็นสเปกตรัมของกระแสและใช้วิธีการเรียนรู้ของโมเดล 10 วิธีเปรียบเทียบกัน ซึ่งพบว่า โมเดลที่ใช้การเรียนรู้แบบ SVM ให้ค่าความแม่นยำสูงที่สุด

ในปี ค.ศ. Prathan Chommaungpuck และคณะ [16] ได้ทำการศึกษาการตรวจจับข้อบกพร่องของลิเธียม แบตเตอรี่ลิเธียม แบตเตอรี่ในมอเตอร์ของเครื่องในกระบวนการหยอดกาวและติดหัวอ่านของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยการใช้การวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนและค่ากระแสของมอเตอร์ และใช้ค่า FFT, Crest factor และ กระแสของมอเตอร์ สำหรับเป็นอินพุตในการสร้างโมเดล

โครงข่ายประสาทเทียม ผลการทดลองพบว่า โมเดลที่ใช้ 3 ตัวแปรในการสร้างให้ค่าความแม่นยำสูงที่สุดที่ 93 %

### 2.13 สรุป

จากปฏิสัมพันธ์ที่เกี่ยวเนื่องได้มีการเสนอวิธีการตรวจจับข้อบกพร่องของลิเนียร์แบร์ริงทั้งการวิเคราะห์ตามสถานะการ (Condition monitoring) และการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมทางการเรียนรู้ของเครื่องจักร (Machine learning) มาช่วยในการจำแนกปัญหา ซึ่งจากที่กล่าวมาส่วนใหญ่ จะใช้การวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนแล้วนำข้อมูลมาวิเคราะห์ทั้งการดูที่ความถี่ที่สนใจ และการใช้ Machine learning เข้ามาช่วย แต่ในกระบวนการผลิตจริงเช่นเซอร์และอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือนมีค่าใช้จ่ายที่สูงและต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้านในการวิเคราะห์ อีกทั้ง บางครั้งพื้นที่ในการติดตั้งจำกัด วิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้ข้อมูลจากตัวสังเกตมาวิเคราะห์ โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งสามารถลดค่าใช้จ่ายด้านเซ็นเซอร์ พื้นที่ในการติดตั้ง และยังให้ระบบสามารถทำงานได้ภายใต้การควบคุมการเคลื่อนที่

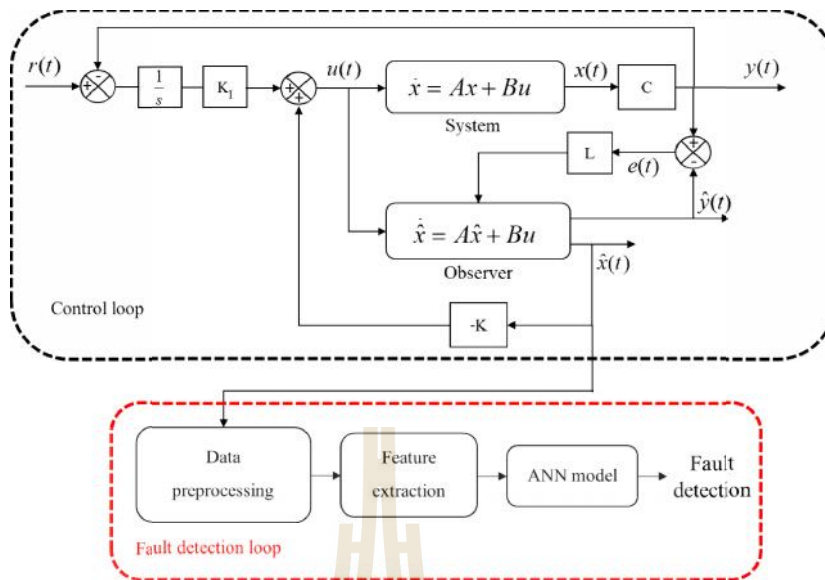




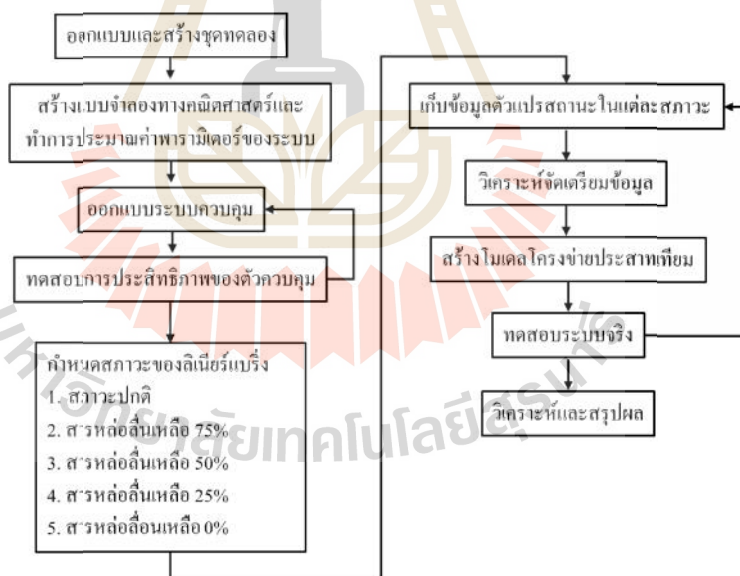
### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

การออกแบบระบบควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะในงานวิจัยนี้ เพื่อควบคุมตำแหน่งของระบบขับเคลื่อนแนวแกนด้วยมอเตอร์ในเครื่องหยอดกาแฟและติดหัวอ่านของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ข้อดีของการออกแบบจะสามารถกำหนดผลตอบสนองทางพลวัตของระบบให้เป็นไปตามที่ผู้ออกแบบต้องการได้ ซึ่งอาศัยเทคนิคการวางโพลที่ทำให้ได้ผลตอบสนองของระบบวงปิด (Close-loop pole) เป็นไปตามต้องการ เทคนิคนี้ยังเป็นการยืนยันความมีเสถียรภาพของระบบอีกด้วย การออกแบบจะต้องอาศัยข้อมูลของตัวแปรสถานะของระบบที่วัดได้ทุกตัวเพื่อป้อนให้อัตราขยาย  $K$  แต่ในทางปฏิบัติ นั้น ระบบมีอันดับที่สูง จึงไปได้ยากที่จะสามารถวัดค่าตัวแปรสถานะได้ทุกตัวในการศึกษานี้จึงได้มีการใช้ตัวสังเกตตัวแปรสถานะ (State observer) มาช่วยในการประมาณค่าตัวแปรของระบบ โดยการออกแบบจะต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ สำหรับการตรวจจับข้อบกพร่องของลิเนียร์แบร์ริงจะทดลองในสภาวะที่ปริมาณของสารหล่อลื่นบกพร่องและสภาวะปกติซึ่งจะใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN) ในการจำแนกข้อบกพร่องผ่านการใช้ข้อมูลผลตอบสนองทางพลวัตจากตัวสังเกต โดยภาพรวมของระบบเป็นดังรูปที่ 3.1 ดังนั้นในงานวิจัยจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือการออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ และการตรวจจับข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับลิเนียร์แบร์ริงซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบควบคุม ลำดับของการทำวิจัยนี้แสดงในรูปที่ 3.2



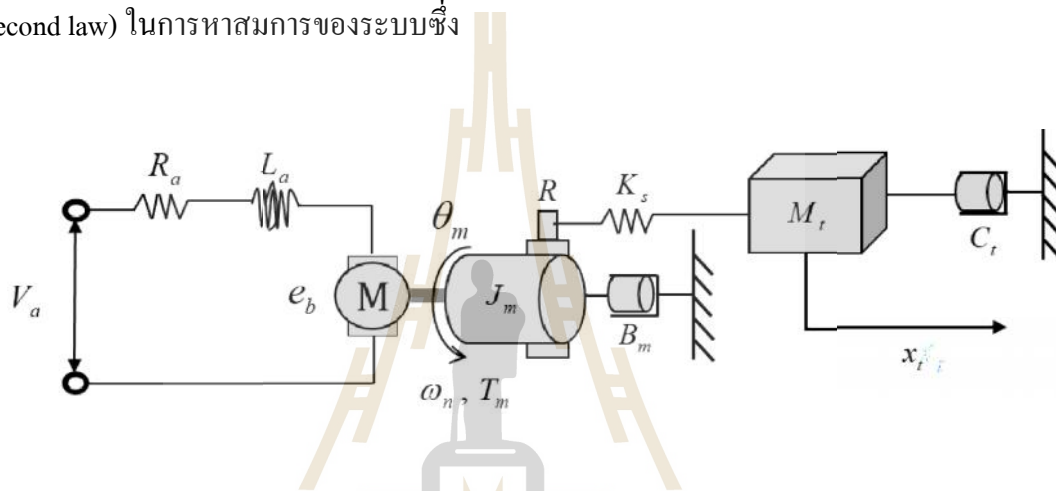
รูปที่ 3.1 ภาพรวมการทำงานของระบบควบคุมและการตรวจจับข้อบกพร่องของลิเนียร์เบริง



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานออกแบบและวิจัย

### 3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนแนวแกนด้วยบอลสกรูและเซอร์โวมอเตอร์

จากการศึกษาโครงสร้างและการทำงานของระบบขับเคลื่อนแนวแกนด้วยบอลสกรูและเซอร์โวมอเตอร์ในเครื่องหยอดคาวและติดหัวอ่านเขียนของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์จะมีส่วนประกอบ 2 ส่วน สามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบได้ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบทางกลของชุดบอลสกรูและส่วนประกอบทางเครื่องจักรกลไฟฟ้าคือเซอร์โวมอเตอร์ ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยนี้ได้ใช้กฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's Second law) ในการหาสมการของระบบซึ่ง



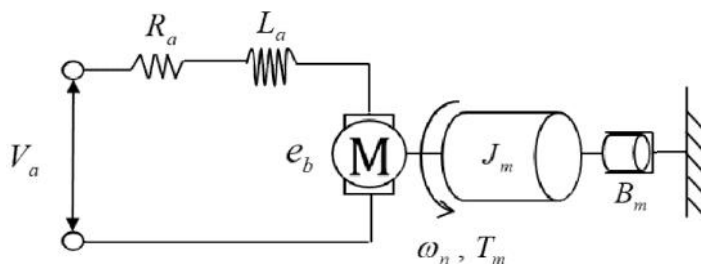
รูปที่ 3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนบอลสกรูด้วยเซอร์โวมอเตอร์

สามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยพิจารณา 2 ส่วนคือ

- แบบจำลองของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC servo motor)
- แบบจำลองของระบบทางกลของระบบบอลสกรู (Ball screw system)

#### 3.1.1 แบบจำลองของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

โดยทั่วไปนั้นในการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะพิจารณาวงจรไฟฟ้าและทางกลดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แบบจำลองทางไฟฟ้าและทางกลของเซอร์โวมอเตอร์

โดยพารามิเตอร์ต่างๆของแบบจำลองสามารถอธิบายได้ดังนี้

$V_a$ Armature voltage (V)	$I_a$ Armature current (A)	$L_a$ Armature inductance (H)
$\dot{\theta}_m$ Rotation speed (rad/s)	$R_a$ Armature resistance ( $\Omega$ )	$J_m$ Moment of inertia (kg.m <sup>2</sup> )
$T_m$ Motor torque (N.m)	$K_t$ Torque coefficient (N.m/A)	$e_b$ Back electromotive force voltage (V)
$K_b$ Back electromotive force coefficient (V.s/rad)	$B_m$ Coefficient of viscous friction (N.m.s/rad)	

จากการประยุกต์ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (kirchhoff's voltage law) ในการพิจารณาวงจรไฟฟ้า จะได้ว่าสมการทางไฟฟ้าของเซอร์โวมอเตอร์แสดงได้ดังสมการที่ (3.1)-(3.4) ดังนี้

$$V_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_b(t) \quad (3.1)$$

$$e_b(t) = K_b \dot{\theta}_m(t) \quad (3.2)$$

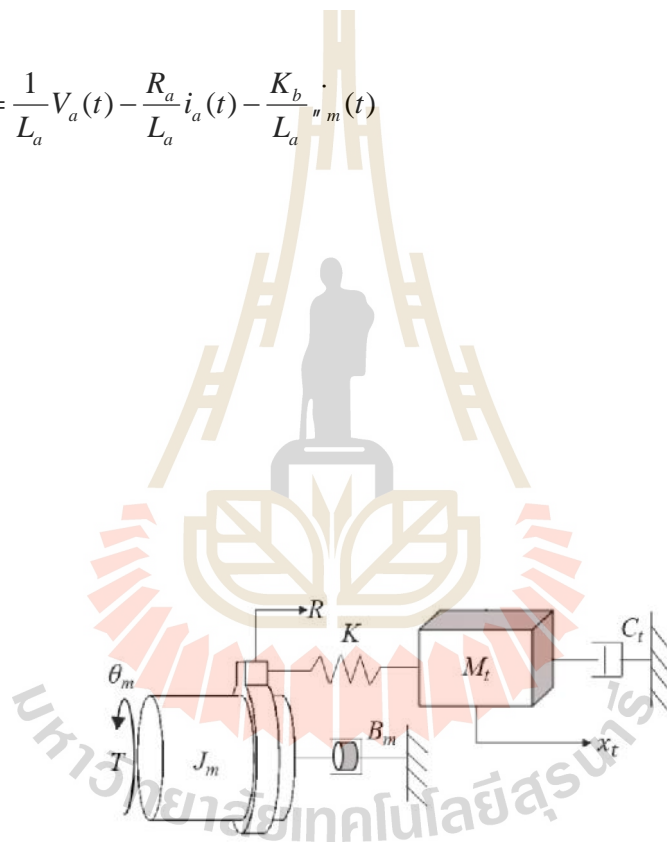
แรงบิดของมอเตอร์จะเป็นสัดส่วนกับกระแสอาร์เมเจอร์ที่ไหลผ่านขดลวดซึ่ง สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$T_m(t) = K_t i_a(t) \quad (3.3)$$

$K_t$

$$\frac{di_a(t)}{dt} = \frac{1}{L_a} V_a(t) - \frac{R_a}{L_a} i_a(t) - \frac{K_b}{L_a} \frac{d\theta_m(t)}{dt}$$

$$\dot{i}_a(t) = \frac{1}{L_a} V_a(t) - \frac{R_a}{L_a} i_a(t) - \frac{K_b}{L_a} \dot{\theta}_m(t)$$



$$J_m \frac{d^2 \theta_m(t)}{dt^2} + B_m \frac{d\theta_m(t)}{dt} = T_m(t) \quad (3.5)$$

$$\frac{d^2 \theta_m(t)}{dt^2} = -\frac{B_m}{J_m} \frac{d\theta_m(t)}{dt} + \frac{K_t}{J_m} i_a(t)$$

หรือ

$$\ddot{\theta}_m(t) = -\frac{B_m}{J_m} \dot{\theta}_m(t) + \frac{K_t}{J_m} i_a(t) \quad (3.6)$$

พิจารณาการเคลื่อนที่ของมวล  $M_t$  จะได้ว่า

$$M_t \frac{d^2 x_t(t)}{dt^2} + C_t \frac{dx_t(t)}{dt} + K_s (x_t(t) - R\theta_m(t)) = 0 \quad (3.7)$$

$$M_t \frac{d^2 x_t(t)}{dt^2} + C_t \frac{dx_t(t)}{dt} + K_s x_t(t) - RK_s \theta_m(t) = 0 \quad (3.8)$$

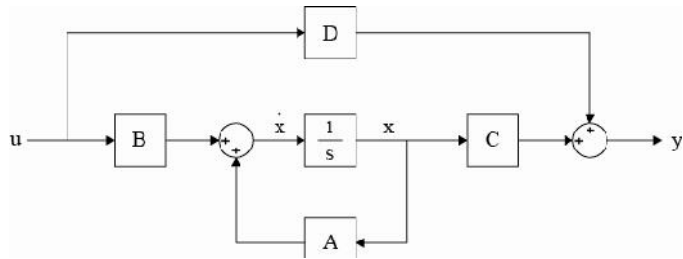
$$\frac{d^2 x_t(t)}{dt^2} = -\frac{C_t}{M_t} \frac{dx_t(t)}{dt} - \frac{K_s}{M_t} x_t(t) + \frac{RK_s}{M_t} \theta_m(t)$$

หรือ

$$\ddot{x}_t(t) = -\frac{C_t}{M_t} \dot{x}_t(t) - \frac{K_s}{M_t} x_t(t) + \frac{RK_s}{M_t} \theta_m(t) \quad (3.9)$$

### 3.1.3 แบบจำลองของระบบในปริภูมิสถานะ

ในการวิเคราะห์และสร้างระบบควบคุมสมัยใหม่โดยทั่วไปจะทำการออกแบบระบบบนโดเมนเวลาหรือ State space form ซึ่งมีกราฟการไหลของสัญญาณดังรูปที่ 3.6



$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t)$$

$x$

$y$

$u$



$$x_1 = i_a, x_2 = u_m, x_3 = \dot{u}_m, x_4 = x_t, x_5 = \dot{x}_t$$

$$\dot{x}_1 = -\frac{R_a}{L_a} x_1 - \frac{K_b}{L_a} x_3 + \frac{1}{L_a} V(t)$$

$$\dot{x}_2 = x_3$$

$$\dot{x}_3 = \frac{K_t}{J_m} x_1 - \frac{B_m}{J_m} x_3$$

$$\dot{x}_4 = x_5$$

$$\dot{x}_5 = \frac{RK}{M_t} x_2 - \frac{K}{M_t} x_4 - \frac{C_t}{M_t} x_5$$

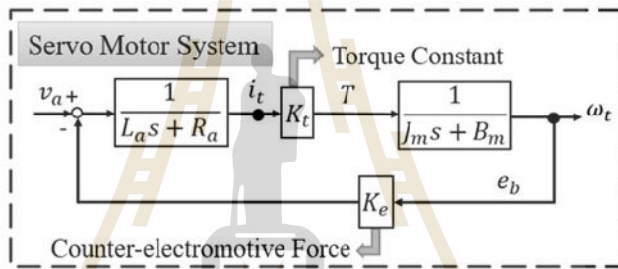
เขียนในรูปของเมทริกซ์จะได้เมทริกซ์ของระบบ เมทริกซ์อินพุต และเมทริกซ์เอาต์พุต ดังนี้

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & 0 & -\frac{K_b}{L_a} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{K_t}{J_m} & 0 & -\frac{B_m}{J_m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{RK_s}{M_t} & 0 & -\frac{K_s}{M_t} & -\frac{C_t}{M_t} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, C = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0] \quad (3.12)$$

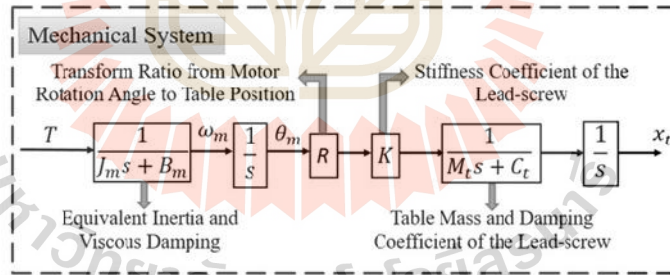
โดยที่

$$y(t) = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$





(a)



(b)

$$\frac{X(s)}{V(s)} = \frac{a}{s^5 + bs^4 + cs^3 + ds^2 + es} \quad (3.14)$$

เมื่อ

$$a = \frac{KRK_t}{M_t L_a J_m}$$

$$b = \frac{M_t R_a J_m + M_t L_a B_m + C_t L_a J_m}{M_t L_a J_m}$$

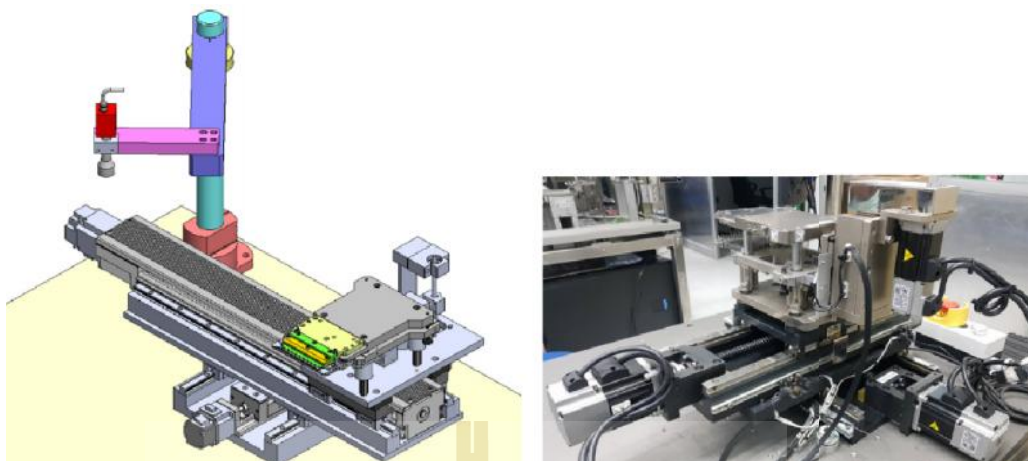
$$c = \frac{M_t R_a B_m + M_t K_t K_b + C_t R_a J_m + C_t L_a B_m + K L_a J_m}{M_t L_a J_m}$$

$$d = \frac{C_t R_a B_m + C_t K_t K_b + K R_a J_m + K L_a B_m}{M_t L_a J_m}$$

$$e = \frac{K R_a B_m + K K_t K_b}{M_t L_a J_m}$$

### 3.2 การออกแบบและสร้างชุดขับเคลื่อนแกนด้วยบอลสกรูและเซอร์โวมอเตอร์

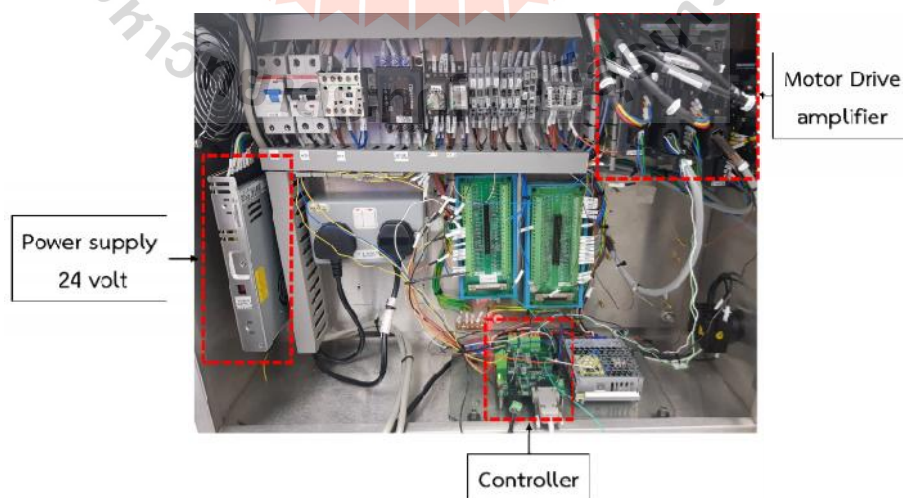
จากรูปที่ 3.8 มีส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วนคือ บอลสกรูทำหน้าที่รองรับหน่วยการเคลื่อนที่ขึ้นงาน และเคลื่อนไปที่ตำแหน่งที่ต้องการ โดยระบบจะประกอบด้วย 2 แกนการทำงานคือ XY อีกส่วนคือเซอร์โวมอเตอร์ทำหน้าที่ในการขับเคลื่อนชุดบอลสกรูไปในตำแหน่งที่ต้องการ โดยการ ทำงานของมอเตอร์ จะอาศัยชุดควบคุมขับเคลื่อน ซึ่งจะรับสัญญาณจากโปรแกรมสั่งงาน ในการ ออกแบบระบบควบคุมชุดขับเคลื่อนนี้ จำเป็นต้องทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ เพื่อที่จะใช้ในการออกแบบตัวควบคุมและการออกแบบตัวสังเกตต่อไป การสร้างแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ของระบบนั้นจะมองรวมทั้งบอลสกรูและเซอร์โวมอเตอร์คือระบบเดียวกันซึ่งจะ ประกอบไปด้วยส่วนทางกลและส่วนของเครื่องกลไฟฟ้าดังจะกล่าวต่อไป



รูปที่ 3.8 การออกแบบและสร้างชุดทดลอง

### 3.2.1 โปรแกรมสั่งงานและชุดควบคุม

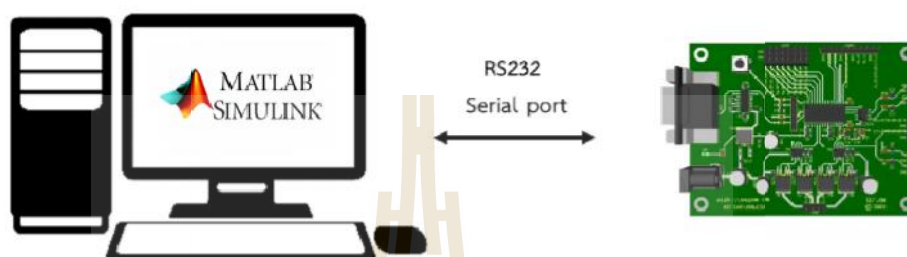
ในการสั่งงานชุดขับเคลื่อนบอลลิสทาร์จะอาศัยชุดควบคุมโดยสั่งงานผ่านโปรแกรม MATLAB ในส่วนของ Simulink ดังรูปที่ 3.9 ชุดควบคุมประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักคือ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 24 โวลต์ ชุดกำลังขยายขับมอเตอร์ (Motor Drive amplifier) และบอร์ดควบคุม RAPCON (RAPCON Controller) ซึ่งจะใช้เชื่อมต่อกับโปรแกรม MATLAB Simulink ในการเขียนบล็อกไดอะแกรม ของระบบควบคุมที่ได้จากการออกแบบในทฤษฎี ในการใช้งานบอร์ด RAPCON จะกล่าวในส่วนถัดไป



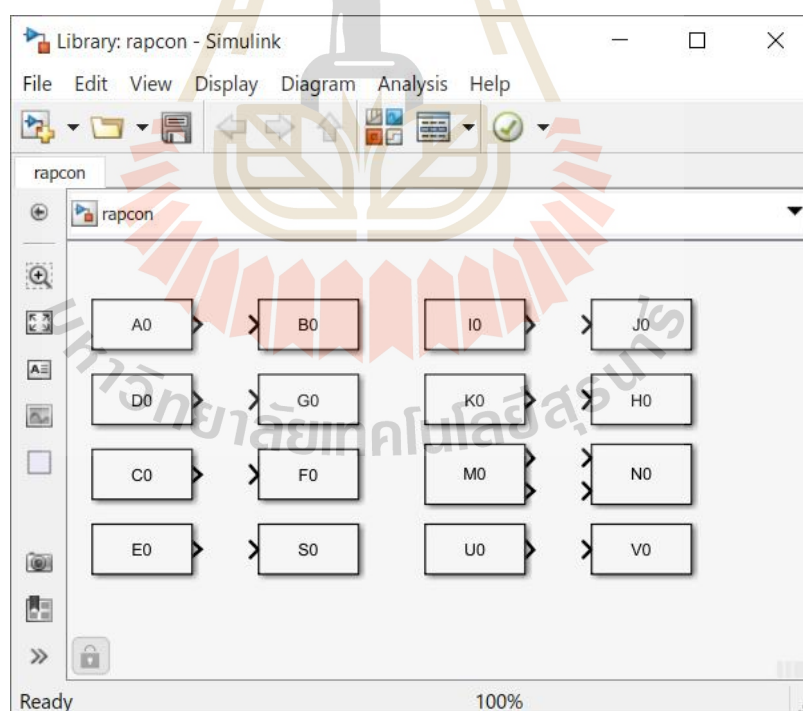
รูปที่ 3.9 ชุดควบคุมการทำงาน

- RAPCON (Real time rapid control platform)

เพื่อที่จะทดสอบระบบควบคุมที่ได้ออกแบบและการเก็บข้อมูลการทดลอง จะใช้บอร์ด RAPCON รูปที่ 3.10 เชื่อมต่อกับ Simulink เวอร์ชัน 2017a โดยต้องติดตั้งไลบรารีเพื่อใช้งานพลอตอินพุตและเอาต์พุตของบอร์ด ดังรูปที่ 3.11 และรายละเอียดของบอร์ดควบคุม RAPCON แสดงในตารางที่ 3.1

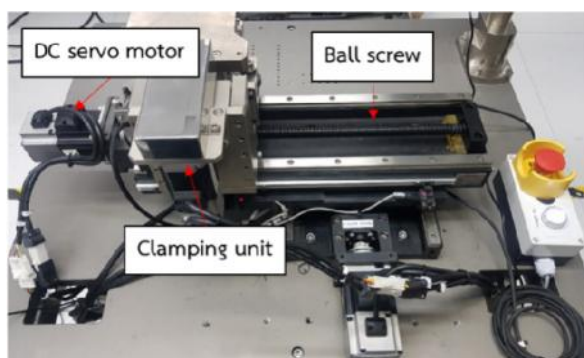


รูปที่ 3.10 การเชื่อมต่อระหว่าง Simulink และ RAPCON บอร์ด



รูปที่ 3.11 ไลบรารีเพื่อใช้งานพลอตอินพุตและเอาต์พุตของบอร์ด

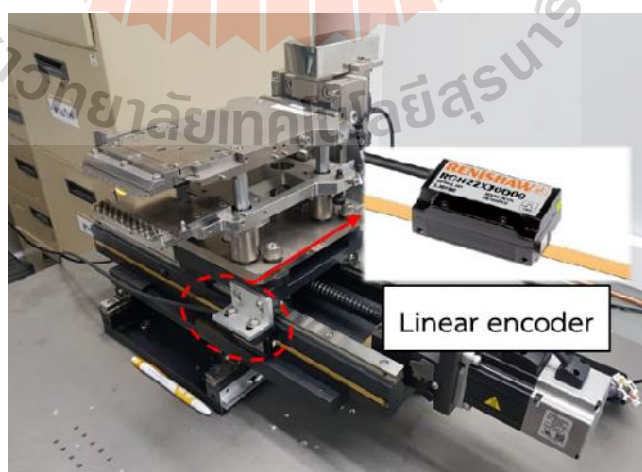
<b>Meaning</b>	<b>Magnitude</b>	<b>Unit</b>
Power Supply (Minimum Current)	6 – 15 (0.15)	VDC (A)
Analog Input A0 – A7 Analog 12 Bit	0 - 5	V
Capture Input C0 – C1 Digital 16 Bit		
Digital Input D0_d0 – D0_d0 Digital		
Encoder Input E0 – E1 Digital 16 Bit		
Frequency Output F0 – F1 Digital 16 Bit		
Analog Output B0 – B1 Analog 12 Bit		
Digital Output G0_g0 – G0_d7 Digital		
Pulse Output H0 – H1 Digital 16 Bit		
Filtered Pulse Output L0 – L1 Analog		
H – Bridge Output P0 – P1 Digital	0 – Supply Voltage, 5 A	
Voltage Regulator Output	5 (0.25)	V (A)
Ground GND	0	V
Sampling Rage	Up to 15.2	kHz



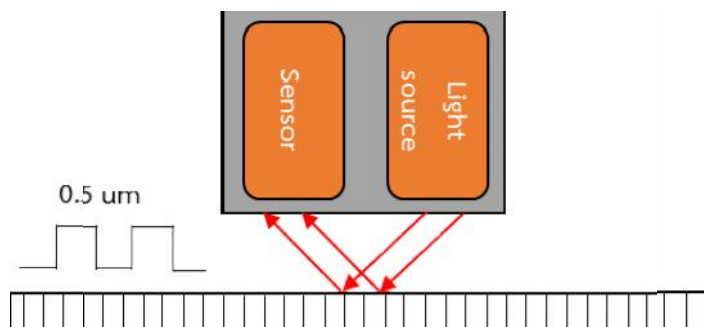
รูปที่ 3.12 ส่วนประกอบหลักของชุดขับเคลื่อนแนวแกน

- ลิเนียร์เอนโค้ดเดอร์ (Linear encoder)

การวัดระยะเคลื่อนที่แนวแกนของบอลสกรูจะใช้ Incremental linear encoder ดังรูปที่ 3.13 ในการตรวจจับตำแหน่ง ซึ่งความละเอียดของการวัดจะอยู่ที่ 0.5 ไมโครเมตร โดยส่วนประกอบจะมี 3 ส่วนหลักคือ ชุดแหล่งกำเนิดแสงชุดรับแสง และแถบสเกล ซึ่งจะอาศัยการสะท้อนแสง (Reflection Type) เมื่อระบบเคลื่อนที่แหล่งกำเนิดแสงจะส่องแสงไปที่แถบสเกลและสะท้อนกลับมายังตัวรับแสง ดังรูปที่ 3.14 ซึ่งเมื่อแสงส่งไปถึงตัวรับแสงจะแสดงลอจิกของสัญญาณเป็น 1 และหากไม่มีแสงไปกระทบจะให้สัญญาณเป็น 0 ในงานวิจัยได้ใช้ linear encoder ในการป้อนกับระยะการเคลื่อนที่ในระบบควบคุม และผลที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับ Rotary encoder ของเซอร์โวมอเตอร์เพื่อประเมินความถูกต้องของตัวสังเกตที่ออกแบบ



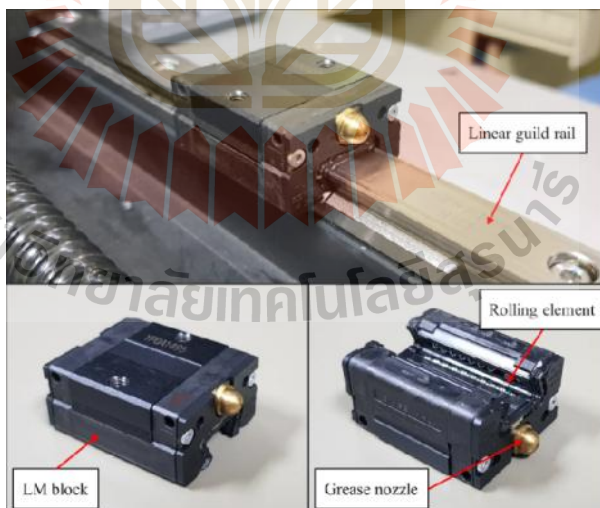
รูปที่ 3.13 ลิเนียร์เอนโค้ดเดอร์



รูปที่ 3.14 หลักการทำงานของลิเนียร์เอนโค้ดเดอร์

### 3.3 การออกแบบการทดลองกรณีสารหล่อลื่นในลิเนียร์แบร์ริงบัพพร้อม

ลิเนียร์แบร์ริงในรูปที่ 3.15 เป็นอุปกรณ์รองรับและลดแรงเสียดทานระหว่างการเคลื่อนที่ของชุดขับเคลื่อนแนวแกนในเครื่องหยอดคาวและตีหัวอ่านเขียน สภาวะของลิเนียร์แบร์ริงที่สารหล่อลื่นไม่เพียงพอ เป็นการสร้างให้ระบบทำงานในขณะที่ชิ้นส่วนที่เป็นตัวรองรับการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นข้อบกพร่อง เนื่องจากเครื่องจักรในกระบวนการผลิตหัวอ่านเขียนของฮาร์ดดิสก์ใดก็ตามที่มีการทำงานด้วยความเร็วสูงและต่อเนื่องทำให้โอกาสที่จะเกิดการสึกหรอหรือสารหล่อลื่นบัพพร้อมมีสูง



รูปที่ 3.15 ลิเนียร์แบร์ริง

ในงานวิจัยนี้จะจำลองทั้งหมด 5 กรณี ประกอบด้วย สภาวะที่สารหล่อลื่นเหลือ 0 %, สภาวะที่สารหล่อลื่นเหลือ 25 %, สภาวะที่สารหล่อลื่นเหลือ 50 %, สภาวะที่สารหล่อลื่นเหลือ 75

% และสภาวะปกติ โดยในการทดลองจะออกแบบตัวควบคุมและกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของระบบด้วยระยะทาง 150 มิลลิเมตร เพื่อคุณลักษณะของสัญญาณเอาต์พุตและตัวแปรจากการประมาณค่าด้วยตัวสังเกตในแต่ละสภาวะที่ลิเนียร์แบริงเกิดข้อบกพร่อง ซึ่งแสดงขั้นตอนการทดลอง ในรูปที่ 3.16 ดังนี้



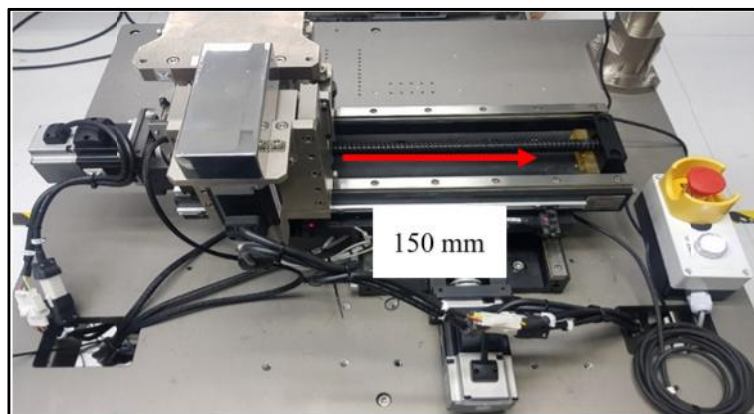
รูปที่ 3.16 ขั้นตอนการสร้างโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม

### 3.3.1 การกำหนดเงื่อนไขการทำงานของระบบ

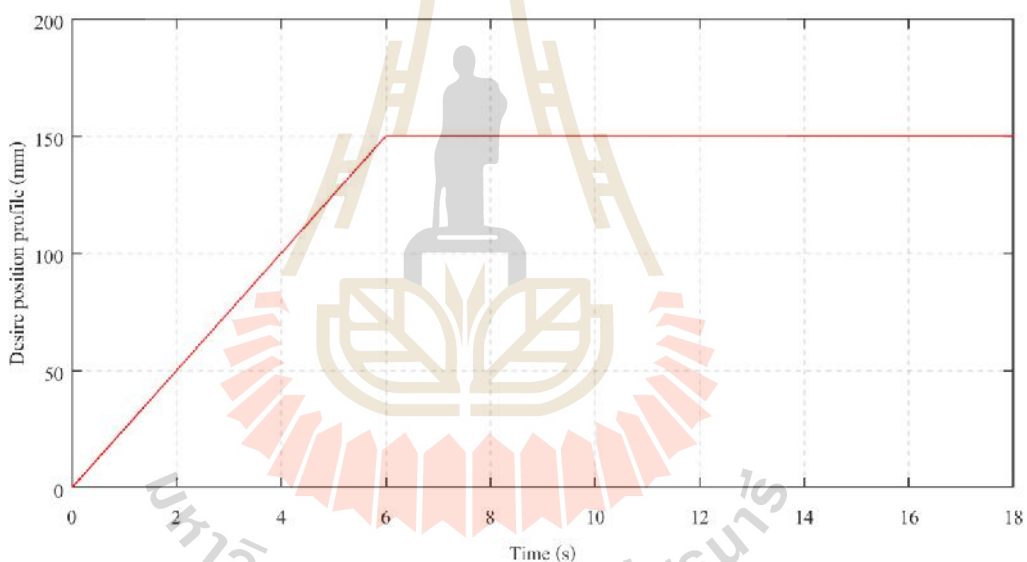
ในส่วนนี้เป็นการกำหนดเงื่อนไขในการทำงานของระบบผ่านการออกแบบตัวควบคุมและกำหนดระยะการเคลื่อนที่ดังรูปที่ 3.17 ซึ่งลักษณะของอินพุตที่ใช้ทดสอบแสดงในรูปที่

3.18





รูปที่ 3.17 ทิศทางและระยะการเคลื่อนที่ในการทดลอง



รูปที่ 3.18 รูปแบบของอินพุตทดสอบที่ใช้ในการทดลอง

### 3.3.2 การสร้างสภาวะสารหล่อลื่นบกพร่อง

ปริมาณของสารหล่อลื่นในลิเนียร์แบร์ริง โดยปกติแล้วจะมีข้อมูลการใช้งานในแต่ละรุ่นและขึ้นอยู่กับสภาพการทำงาน ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ลิเนียร์แบร์ริงที่มีขนาดของการบรรจุสารหล่อลื่นอยู่ที่ 2 มิลลิลิตร ในสภาวะการใช้งานปกติ ดังนั้นจะกำหนดปริมาณของสารหล่อลื่นตามเปอร์เซ็นต์ที่กำหนด สำหรับการทดลองแต่ละกรณี อุปกรณ์การทดลองแสดงดัง รูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 อุปกรณ์บรรจุสารหล่อลื่นในการทดลอง

### 3.4 สรุป

ก่อนจะกล่าวถึงวิธีการดำเนินงานวิจัยจะต้องมีความรู้พื้นฐาน มีความเข้าใจในหลักการทาง ทฤษฎีการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การออกแบบการทดลอง และหลักการงานพื้นฐานที่ เกี่ยวข้องกับฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ โดยแบ่งเป็น 4 ส่วนคือ

ส่วนที่ 1 เป็นความเข้าใจทฤษฎีที่เกี่ยวกับการออกแบบระบบควบคุมพื้นฐานและการ ออกแบบระบบควบคุมแบบเซอร์โวร่วมกับตัวสังเกต โดยใช้หลักการการวางโพลของระบบซึ่งเป็น เงื่อนไขทางเสถียรภาพที่ต้องนำมาพิจารณา และการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเพื่อ จำลองการทำงาน นอกจากนี้ในส่วนของการทำระบบตรวจจับข้อบกพร่องของลิเนียร์แบร์ริงโดยการ ใช้โครงข่ายประสาทเทียมจะต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจในการออกแบบการทดลองเพื่อเก็บข้อมูล การเตรียมข้อมูล การสกัดลักษณะของข้อมูล และการสอนให้โมเดลเกิดการเรียนรู้ ซึ่งต้องใช้ความรู้ ทางด้านสถิติพื้นฐานและการเลือกใช้วิธีการสอน โมเดลที่เหมาะสม

ส่วนที่ 2 ศึกษาการทำงานของเครื่องจักร และใช้งาน โปรแกรม Solid work ในการ ออกแบบเพื่อสร้างชุดจำลองการทำงานของเครื่องจริง โดยจะต้องทราบหลักการงานของเซอร์โว มอเตอร์ บอลสกรู ลิเนียร์เอน โค้ดเดอร์ ลิเนียร์แบร์ริง และข้อมูลการใส่สารหล่อลื่น ตลอดจน วงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุมระบบ และการทำงานของบอร์ดควบคุม ซึ่งทั้งหมดจะต้องสามารถที่ จะใช้งานร่วมกันและควบคุมผ่าน โปรแกรม MATLAB/Simulink 2017a ได้

ส่วนที่ 3 ในงานวิจัยนี้เลือกใช้งาน โปรแกรม MATLAB/Simulink 2017a เนื่องจากใช้ภาษา รูปภาพในการเขียน หรือที่เรียกว่า Graphics language ซึ่งไม่ซับซ้อนง่ายต่อการใช้งาน มีเครื่องมือ ในการออกแบบระบบควบคุม สามารถจำลองการทำงานหลังการออกแบบ และสามารถเชื่อมต่อกับ

บอร์ดควบคุม RAPCON เพื่อควบคุมการทำงานของระบบจริงได้ นอกจากนี้ยังสามารถเขียนโปรแกรมสำหรับงานทางด้านการเรียนรู้ของเครื่องจักร (Machine learning) โดยที่มีอัลกอริทึมใช้งานหลากหลาย และหนึ่งในนั้นคือโครงข่ายประสาทเทียม

จากความเข้าใจในทฤษฎีและการทำงานทั้งในส่วนของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ การทดลองจะแบ่งออกเป็น 8 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนที่ 1 ออกแบบชุดขับเคลื่อนแนวแกนด้วยบอลสกรูและเซอร์โวมอเตอร์สำหรับจำลองการทำงาน เนื่องจากในกระบวนการผลิตจริงไม่สามารถเข้าไปทำการทดลองได้เพราะจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการและอัตราการผลิต

ขั้นตอนที่ 2 หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในที่นี่จะอ้างอิงจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแต่นำมาวิเคราะห์ในโดเมนเวลา (State space model) จากนั้นจะทำการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองโดยใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification) ซึ่งต้องทำการเก็บค่าอินพุตและเอาต์พุตในย่านการทำงานที่ต้องการ และประยุกต์ใช้เครื่องมือในส่วนของ Parameter estimation ใน Simulink เพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ ในขั้นตอนนี้ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการออกแบบตัวสังเกตแบบวงเปิด และการทดสอบเปรียบเทียบเวลาเข้าสู่สถานะคงตัวด้วยอินพุตแบบขั้นบันได

ขั้นตอนที่ 3 ออกแบบระบบควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะร่วมกับตัวสังเกต โดยใช้เทคนิคการวางโพลของระบบวงปิดที่ต้องการ ทั้งหมดจะเขียนโปรแกรมด้วย MATLAB/M-file เพื่อหาค่าอัตราขยายของการป้อนกลับตัวแปรสถานะ อัตราขยายของตัวสังเกต และอัตราขยายของตัวควบคุม

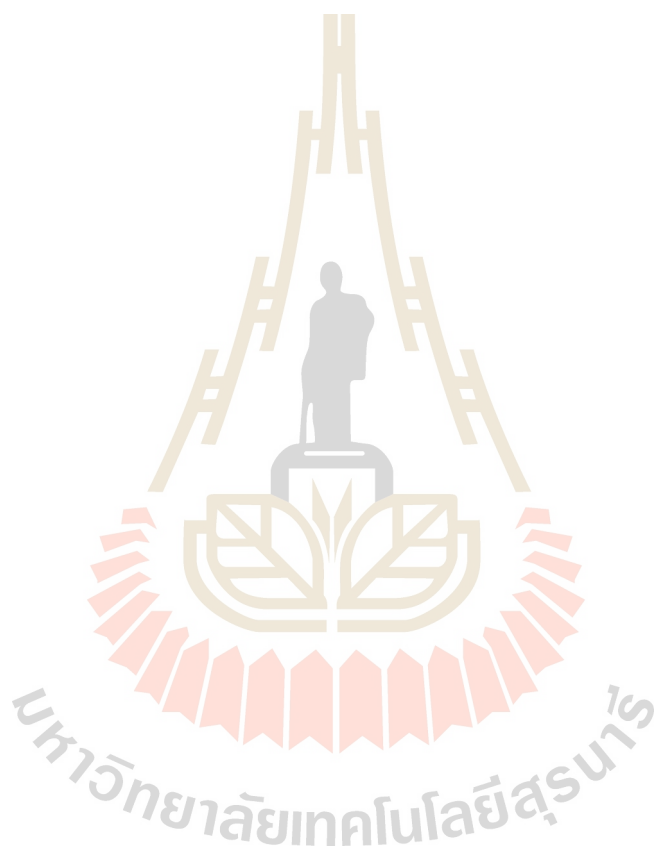
ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบระบบควบคุมที่ได้ออกแบบ จะจำลองการทำงาน และทดสอบกับระบบจริงผ่าน Simulink ซึ่งการทดสอบจะประกอบด้วย การติดตามอินพุตอ้างอิง (Tracking response testing) และการตอบสนองตามค่าเวลาเข้าสู่สถานะคงตัวที่ออกแบบ

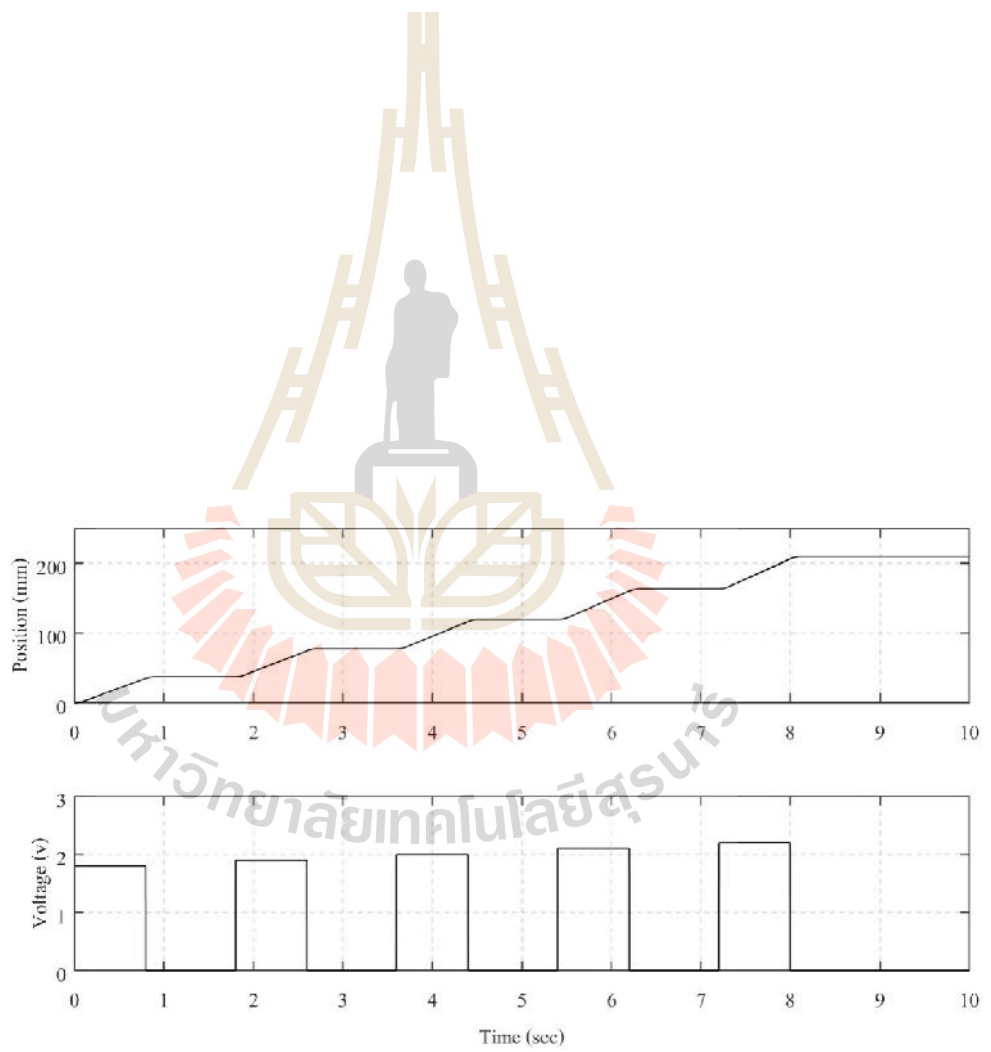
ขั้นตอนที่ 5 การทดลองกรณีลิเนียร์เบริงทำงานในสภาวะสารหล่อลื่นบกพร่อง โดยจำลองทั้งหมด 5 สภาวะ ประกอบด้วย สารหล่อลื่นเหลือ 75%, สารหล่อลื่นเหลือ 50%, สารหล่อลื่นเหลือ 25%, สารหล่อลื่นเหลือ 0% และสภาวะปกติ จากนั้นทำการเก็บข้อมูลตัวแปรสถานะที่ประมาณจากตัวสังเกตทั้งหมด 120 ตัวอย่าง ในแต่ละสภาวะเพื่อสร้างโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม

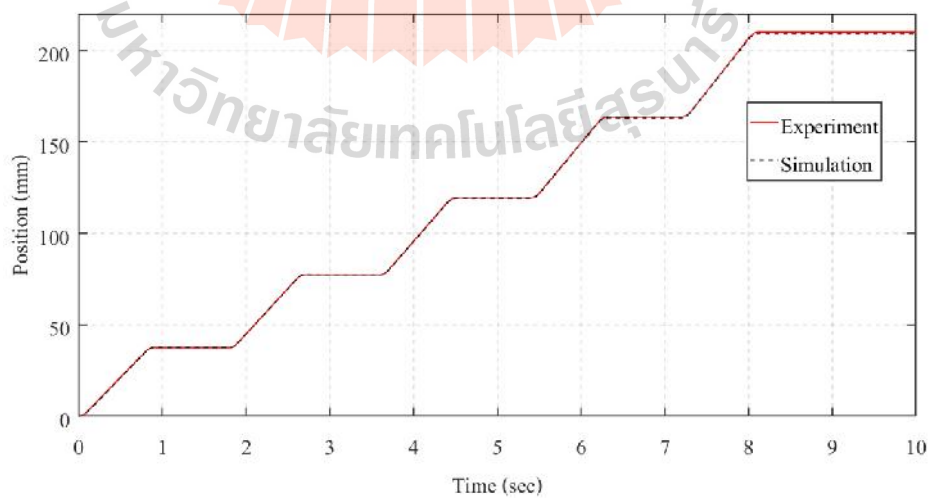
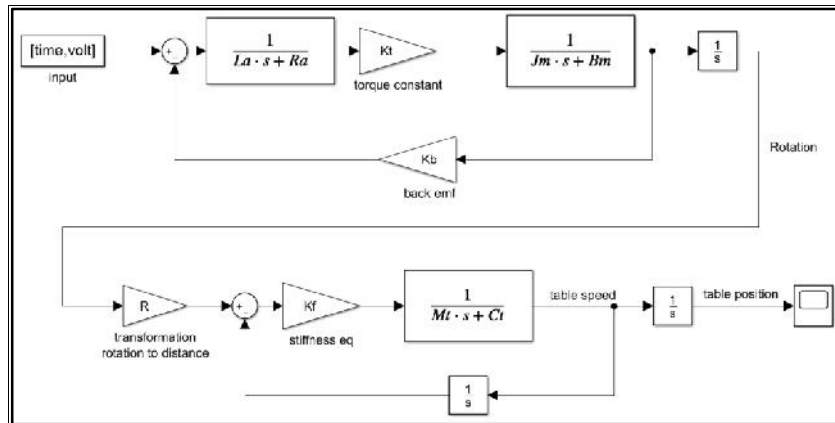
ขั้นตอนที่ 6 เป็นกระบวนการวิเคราะห์ข้อมูล จำแนกลักษณะทางสถิติและจัดเตรียมข้อมูลสำหรับฝึกสอนโมเดล ซึ่งในขั้นตอนนี้จะใช้การเขียนโปรแกรมด้วย MATLAB/M-file เพื่อสร้างชุดข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตสำหรับฝึกสอนที่เหมาะสม

ขั้นตอนที่ 7 เป็นการสร้างโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมจากชุดข้อมูลฝึกสอน ซึ่งจะทำการสอนโมเดลจนกว่าค่าความผิดพลาดระหว่างเอาต์พุตของโมเดลกับเอาต์พุตจริงมีค่าตามที่กำหนดไว้ ทั้งนี้เพื่อให้ได้โมเดลที่มีความถูกต้อง จะทำการสอนด้วย 3 อัลกอริทึมเปรียบเทียบกัน


ขั้นตอนที่ 8 วิเคราะห์โมเดลการจำแนกข้อบกพร่องและสรุปการทดลอง







Parameter	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4	รอบที่ 5	ค่าเฉลี่ย
Bm (Nms/rad)	0.35656	0.34564	0.34211	0.34565	0.34566	0.34712
Ct (Ns/m)	66276.00000	65145.00000	65014.00000	66275.00000	66271.00000	65796.20000
Jm (kgm <sup>2</sup> )	0.29232	0.30241	0.31026	0.31030	0.31010	0.30508
K (N/m)	47549000.00000	47549100.00000	47490005.00000	47490011.00000	47490010.00000	47513625.20000
Kb (Vs/rad)	0.02828	0.02915	0.02916	0.02917	0.02916	0.02899
Kt (Nm/A)	0.81130	0.81210	0.81211	0.81210	0.81222	0.81197
La (H)	0.00006	0.00005	0.00006	0.00006	0.00006	0.00006
Mt (kg)	11.06500	11.10500	11.06600	11.06400	11.06300	11.07260
R	0.79985	0.79985	0.79985	0.79985	0.79983	0.79985
Ra (Ω)	0.00511	0.00512	0.00511	0.00515.2	0.00514	0.00512

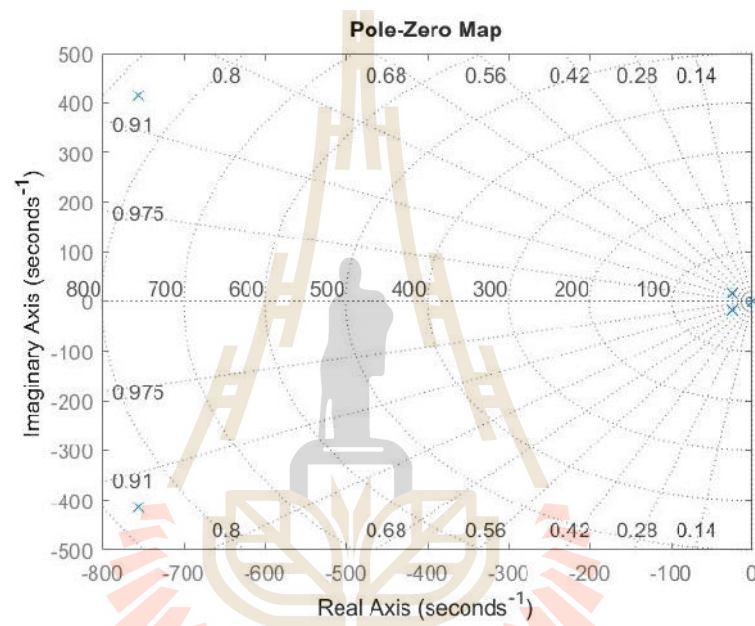


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & 0 & -\frac{K_b}{L_a} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{K_t}{J_m} & 0 & -\frac{B_m}{J_m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{RK_f}{M_t} & 0 & -\frac{K_f}{M_t} & -\frac{C_t}{M_t} \end{bmatrix}$$

(A - } I)

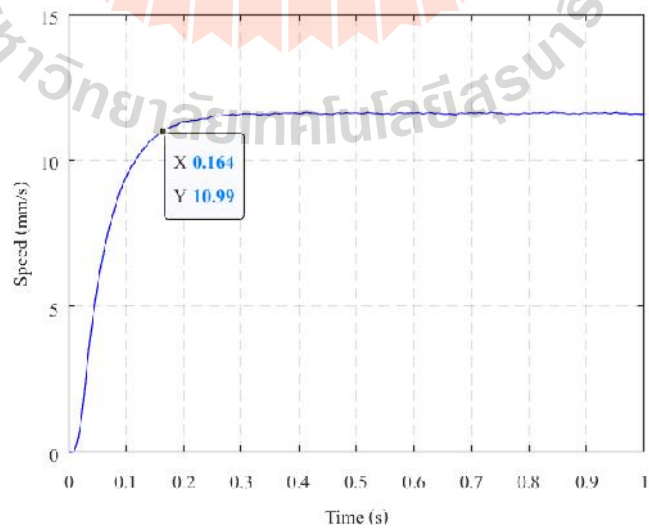
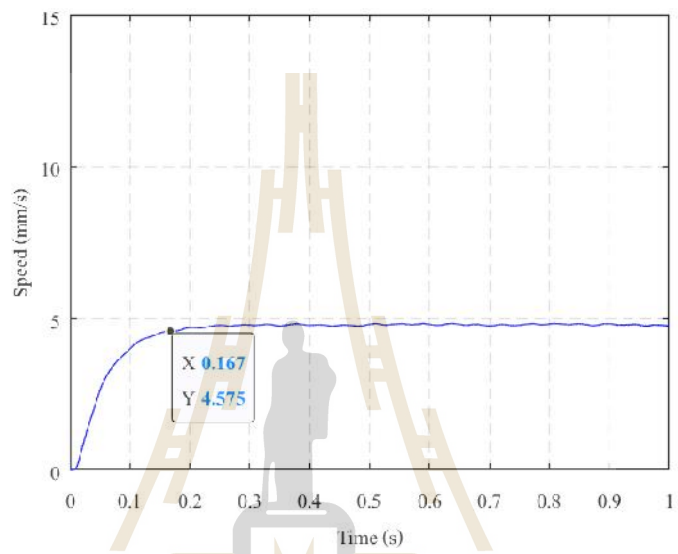
0.00 + 0.00i	-24.25 + 17.64i	-24.25 - 17.64i	-754.71 + 414.27i	-754.71 - 414.27i
--------------	-----------------	-----------------	-------------------	-------------------

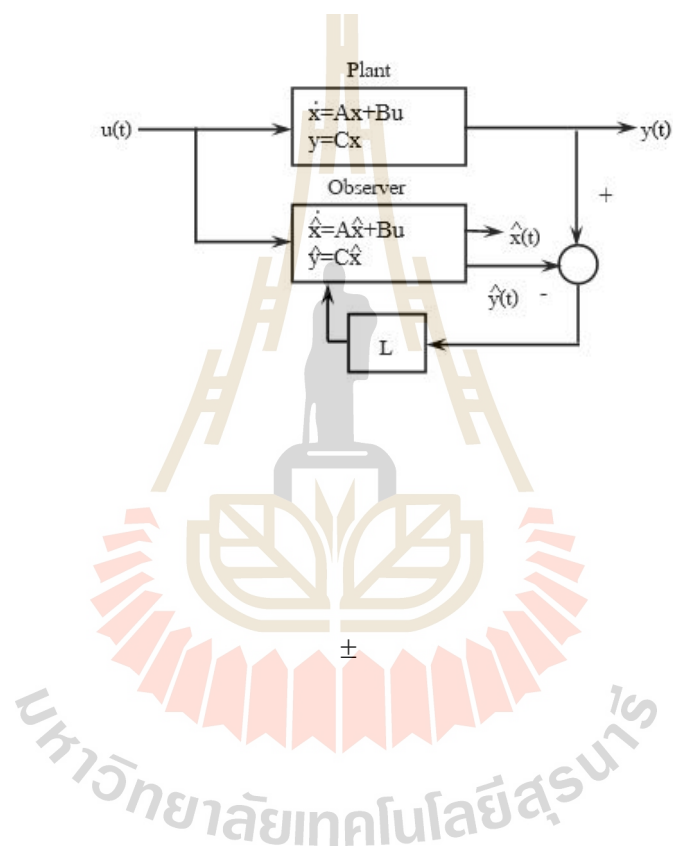


$$\zeta_n = \sqrt{(-24.25)^2 + (17.64)^2} = 29.98 \text{ rad / s}$$

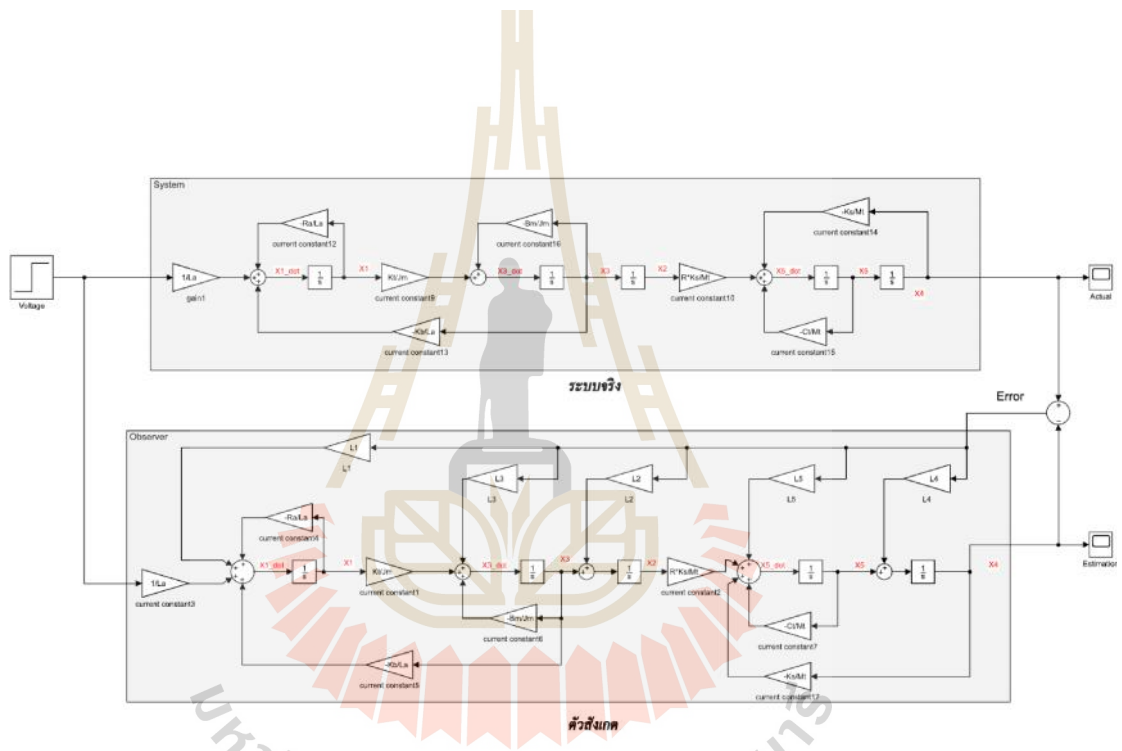
$$T_s = \frac{4}{\zeta_n} = \frac{4}{24.25} = 0.16 \text{ s}$$



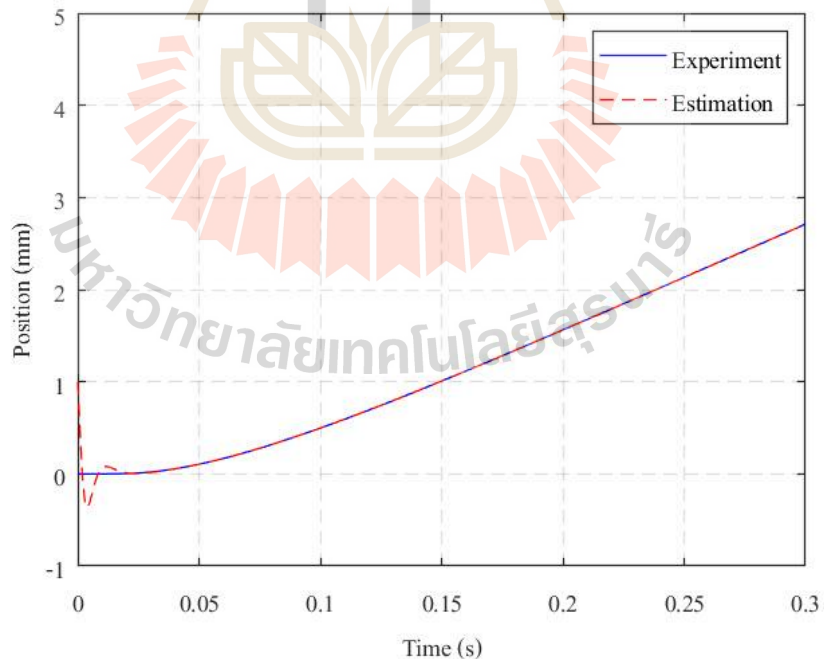
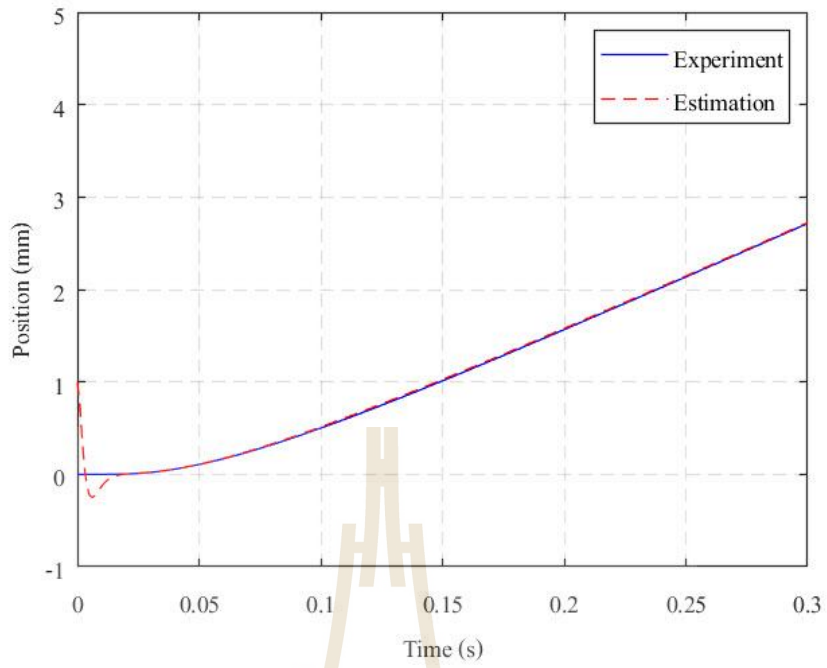


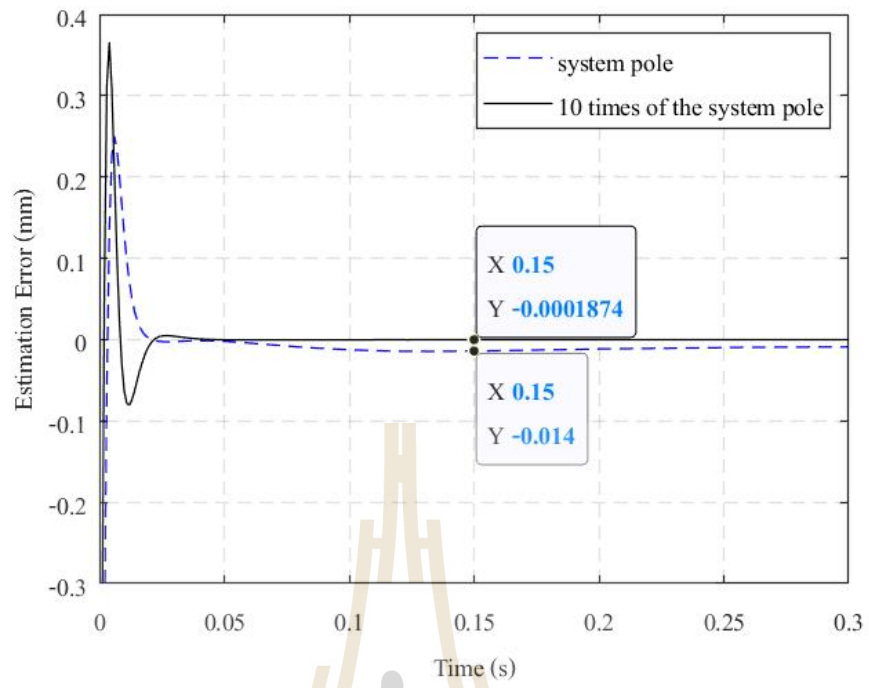


	โพลเด่นของระบบ	10 เท่า ของโพลเด่นระบบ
	$-24.25 \pm 17.64j$	$-242.5 \pm 17.64j$
Observer gain 1 ( $L_1$ )	0.000053	73.127
Observer gain 2 ( $L_2$ )	211.908	4100.016
Observer gain 3 ( $L_3$ )	-1.046	917397.763
Observer gain 4 ( $L_4$ )	-9.435	1927.065
Observer gain 5 ( $L_5$ )	23017.737	696545.358



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี





มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## บทที่ 5

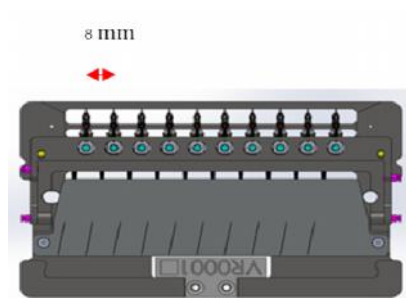
### การทดสอบระบบควบคุมและการจำแนกข้อบกพร่องโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

ในบทนี้เป็นการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะและกระบวนการจัดเตรียมข้อมูลเพื่อสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในกระบวนการทำงานของเครื่องจักรในกระบวนการหยุดทวนและติดหัวอ่านเขียนของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ที่สถานะของโหนดจะมีค่าที่ แต่เวลาในการทำงานมีการปรับเปลี่ยนตามอัตราการผลิต ดังนั้น ในส่วนของระบบควบคุมจะทดสอบผลตอบสนองของระบบและการติดตามอินพุตอ้างอิงเป็นหลัก

การจำแนกข้อบกพร่องของลิเนียร์แบริงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในงานวิจัยนี้จะจำลองสถานะที่สารหล่อลื่นของลิเนียร์แบริงบกพร่อง เปรียบเทียบกับสภาวะปกติ ซึ่งการทดลองทั้งหมดจะประกอบด้วย 5 สภาวะ คือ 1. สารหล่อลื่นเหลือ 0% 2. สารหล่อลื่นเหลือ 25 % 3. สารหล่อลื่นเหลือ 50% 4. สารหล่อลื่นเหลือ 75% 5. สภาวะปกติ สำหรับการทดสอบในแต่ละสภาวะจะกำหนดระยะเวลาการเคลื่อนที่ของระบบ และผลตอบสนองให้คงที่

#### 5.1 การทดสอบระบบควบคุม

ในส่วนนี้เป็นการทดสอบการทำงานของตัวควบคุมจากการออกแบบ ซึ่งแบ่งเป็น 2 กรณี คือ 1. การออกแบบผลตอบสนองของระบบ โดยเปลี่ยนเวลาเข้าสู่สถานะคงตัว (Settling time) 2. การติดตามอินพุตของตำแหน่งที่ต้องการ (Tracking reference input) โดยตำแหน่งของการเคลื่อนที่จะอ้างอิงจากระยะห่างของ HGA ในพาเลต ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งชิ้นงานแต่ละชิ้นจะมีระยะห่างเท่ากับ 8 มิลลิเมตร ในกรณีนี้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะจะให้เทคนิคการวางโพลของระบบวงปิด (Close loop pole) ซึ่งเป็นการกำหนดผลตอบสนองตามต้องการ



รูปที่ 5.1 ระยะในการเคลื่อนที่ตามระยะห่างของ HGA ในพาเลต

แต่จะต้องอาศัยข้อมูลของตัวแปรสถานะที่ได้จากการประมาณค่าโดยใช้ตัวสังเกต (Observer) ซึ่งในที่นี้จะออกแบบระบบแบบหน่วงเกิน (Over damp response) และเปรียบเทียบเวลาเข้าสู่สถานะคงตัวเท่ากับ 1, 1.5 และ 2 วินาที ตามลำดับ ในการออกแบบจะอาศัยข้อมูลจากการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบ และจัดอยู่ในรูปของเมทริกซ์ เพื่อคำนวณหาค่าอัตราขยายของการป้อนกลับตัวแปรสถานะ  $K$ , อัตราขยายของตัวควบคุม  $K_f$  และอัตราขยายของตัวสังเกต  $L$  โดยการวางโพลในตำแหน่งที่ทำให้ผลตอบสนองเป็นไปตามต้องการ ด้วยวิธีของแอกเคอแมนต์ (Ackermann's formula) ซึ่งรายละเอียดจะแสดงต่อไปนี้

จากเมทริกซ์ของระบบจะได้

$$A = \begin{bmatrix} -47.87574985 & 0 & -0.00120798 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 7.19493670 & 0 & -0.63038948 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5.89858328 \times 10^5 & 0 & -7.41214285 \times 10^5 & -1.50942857 \times 10^3 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.0411 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, C = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0], D = [0]$$

การออกแบบระบบควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะจะต้องวิเคราะห์ความสามารถในการควบคุมได้และความสามารถในการสังเกตได้เสียก่อน โดยวิธีการตรวจสอบจะหาค่าดีเทอร์มิแนนต์ของเมทริกซ์  $P_c$  และ  $P_o$  ซึ่งจะต้องมีค่าไม่เท่ากับ 0 จึงจะสามารถออกแบบตัวควบคุมต่อไปได้

$$P_c = [B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{n-1}B]$$

$$= \begin{bmatrix} 9.4823 \times 10^3 & -4.5907 \times 10^0 & 2.2149 \times 10^9 & -1.068 \times 10^{12} & 515.5849 \times 10^{12} \\ 0 & 0 & 28.473 \times 10^3 & -13.825 \times 10^6 & 6.670 \times 10^9 \\ 0 & 28.473 \times 10^3 & -13.825 \times 10^6 & 6.6704 \times 10^9 & -3.2183 \times 10^{12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 582.089 \times 10^9 \\ 0 & 0 & 0 & 582.089 \times 10^9 & -3.498 \times 10^{15} \end{bmatrix}$$

$$P_o = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 20.443 \times 10^6 & 0 & -25.558 \times 10^6 & -5.524 \times 10^3 \\ 0 & -112.930 \times 10^9 & 20.443 \times 10^6 & 141.189 \times 10^9 & 4.957 \times 10^6 \\ 61.387 \times 10^6 & 101.348 \times 10^{12} & -112.958 \times 10^9 & -126.708 \times 10^{12} & 113.802 \times 10^9 \end{bmatrix}$$

จากการหาค่าดีเทอร์มิแนนต์ของเมทริกซ์  $P_c$  และ  $P_o$  พบว่ามีค่าไม่เท่ากับ 0 ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่าระบบมีความสามารถในการควบคุมได้และการสังเกตได้ ซึ่งเมื่อออกแบบระบบควบคุมแล้วนั้นได้มีการวิเคราะห์ผลตอบสนอง 2 กรณี ดังแสดงต่อไปนี้

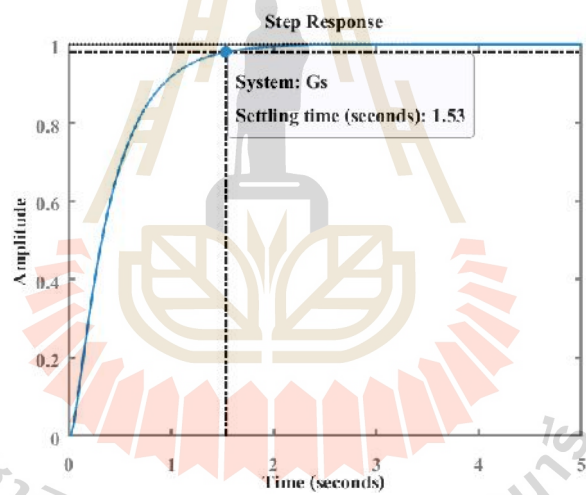
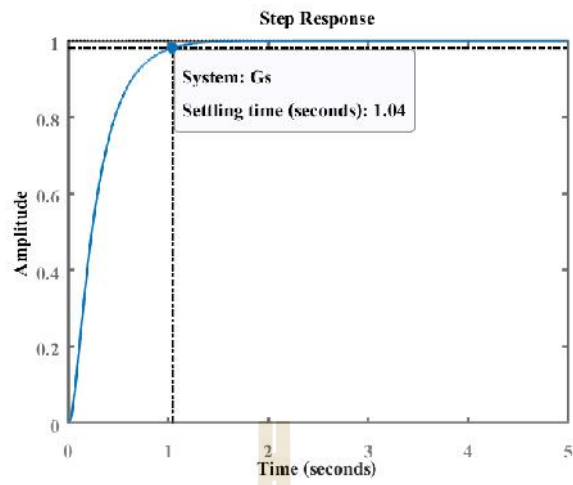
### 5.1.1 กรณีที่ 1 ผลตอบสนองของระบบตามเวลาเข้าสู่สถานะคงตัว

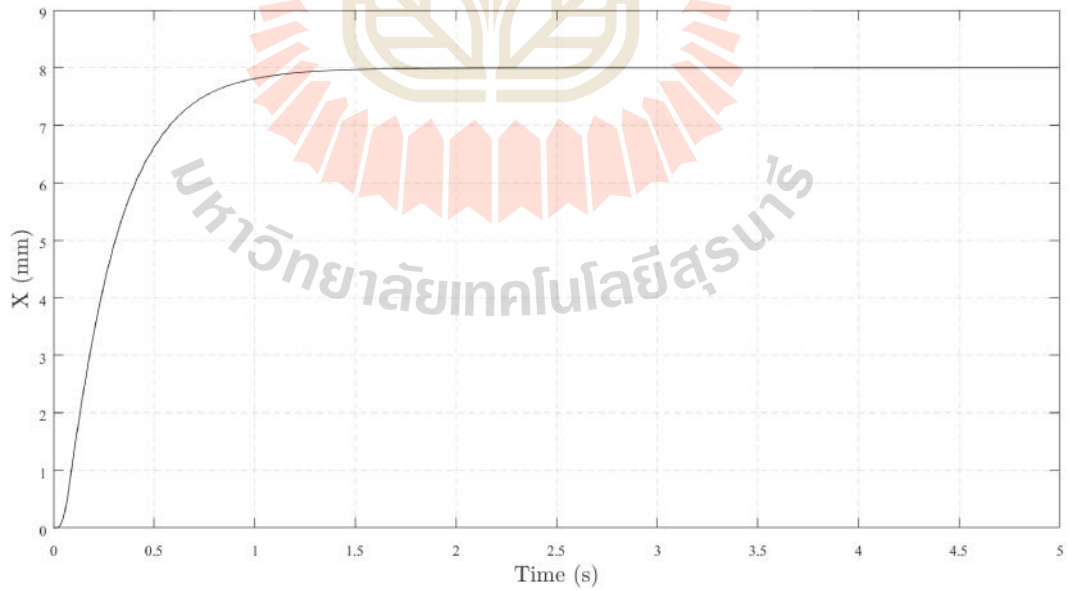
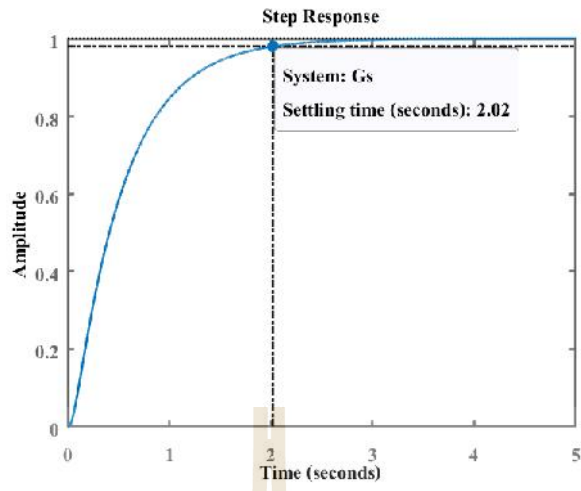
การกำหนดเวลาเข้าสู่สถานะคงตัวจะให้เทคนิคการวางโพลเด่น ซึ่งจะกำหนดให้มีค่าเวลาเข้าสู่สถานะคงตัวเท่ากับ 1, 1.5 และ 2 วินาที ตามลำดับ ดังนั้นจะได้ โพลเท่ากับ  $(s_1 = -4, s_2 = -20)$ ,  $(s_1 = -2.66, s_2 = -20)$  และ  $(s_1 = -2, s_2 = -20)$  จากนั้นทำการหาค่าอัตราขยาย  $K$  และ  $K_f$  ด้วยวิธีการของแอกเคอร์มันต์ แต่เนื่องจากระบบมีอันดับเท่ากับ 5 จะต้องวางโพลอีก 4 ตัวโดยที่ต้องห่างจากโพลเด่นอย่างน้อย 10 เท่าเพื่อไม่ให้กระทบต่อผลตอบสนอง ในที่นี้จะเลือกวางโพลที่เหลือ คือ  $s_3 = -400, s_4 = -400, s_5 = -400, s_6 = -400$  จากการคำนวณจะได้ค่าอัตราขยาย ดังตารางที่ 5.1 และผลตอบสนองของการออกแบบแสดงในรูปที่ 5.2 ถึง 5.4

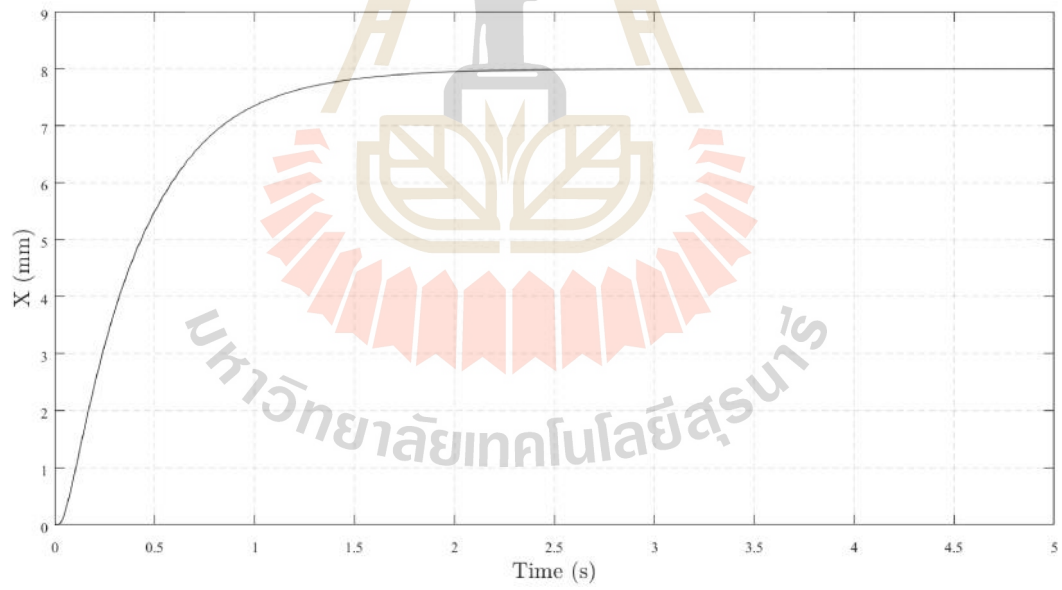
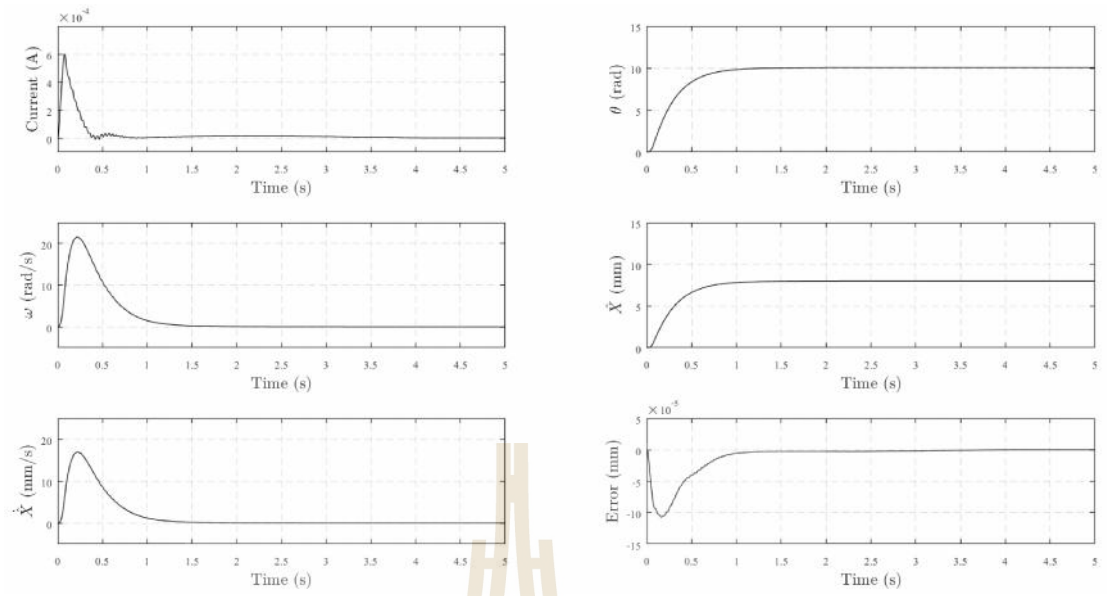
ตารางที่ 5.1 อัตราขยายของการป้อนกลับและอัตราขยายของตัวควบคุม

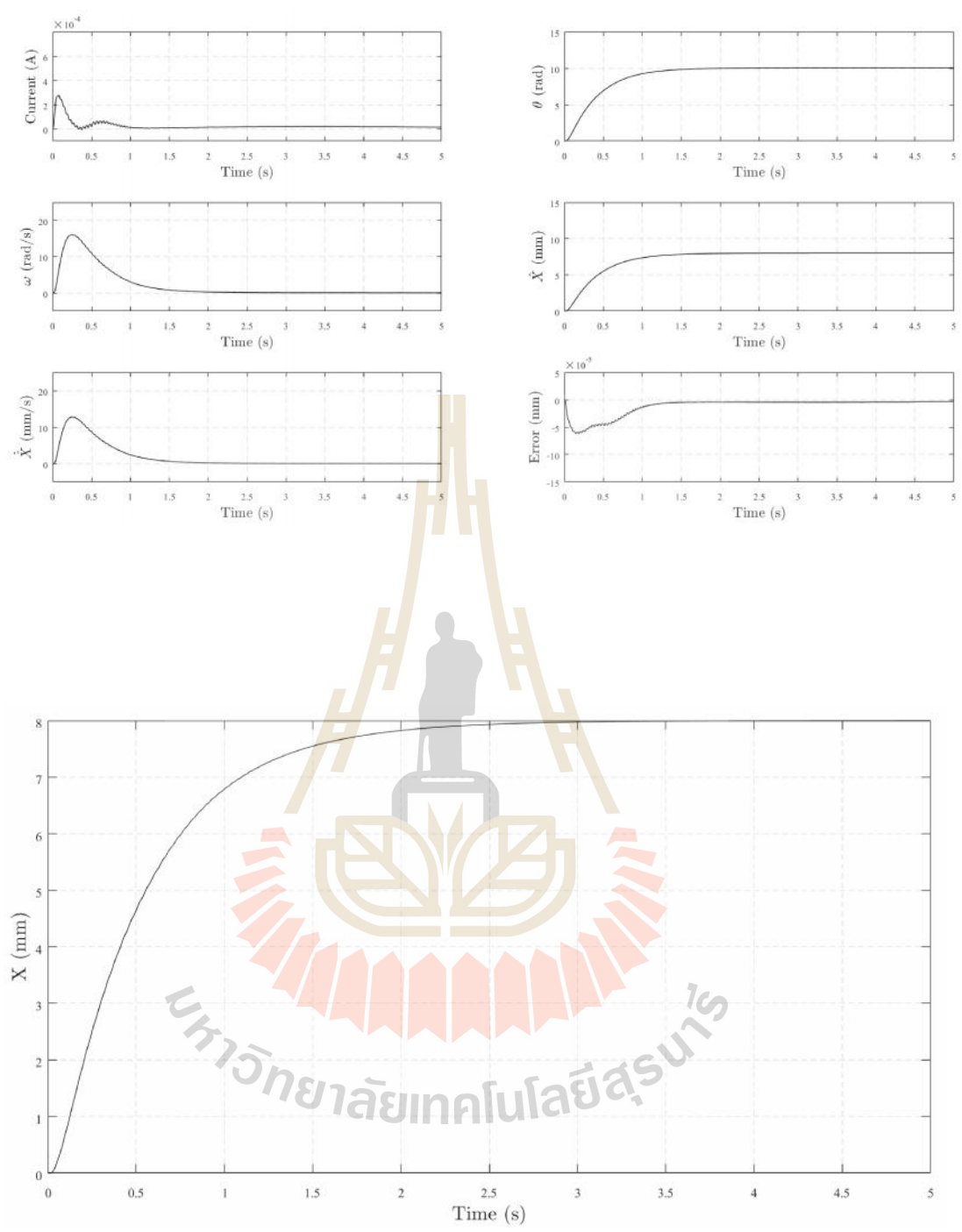
Settling time (Sec)	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$
1	1607.897	2264.974	2.821	-2809.751	-7.555	117.456
1.5	1575.284	2261.171	2.816	-2807.333	-7.561	78.101
2	1559.221	2259.298	2.813	-2806.143	-7.563	58.723

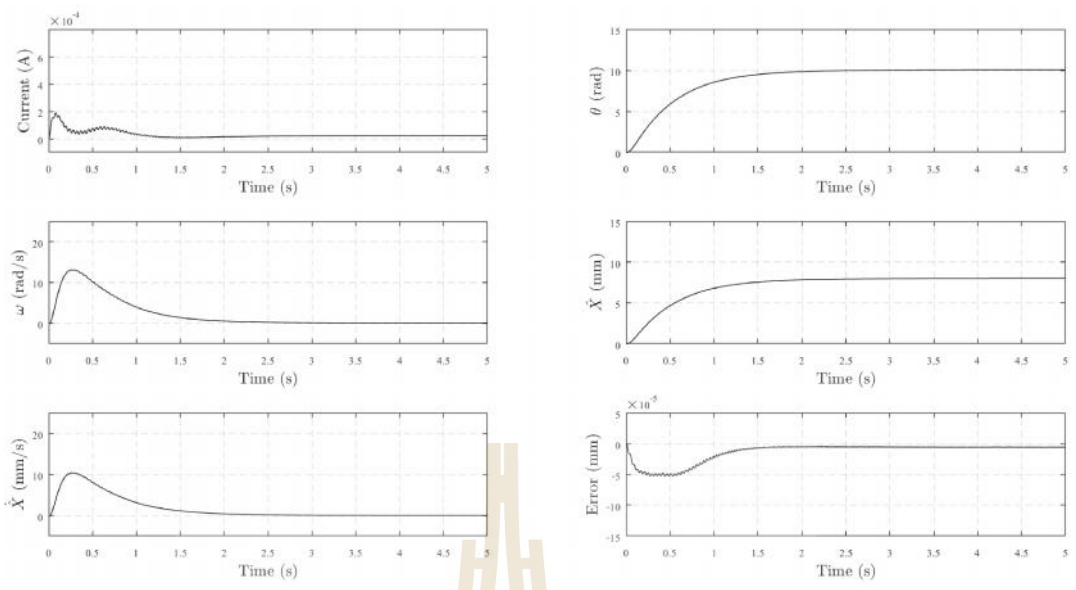










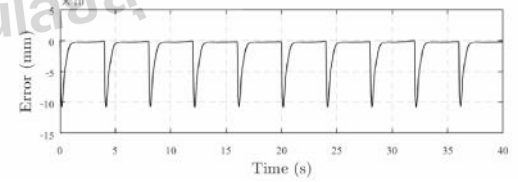
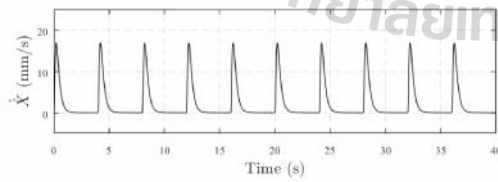
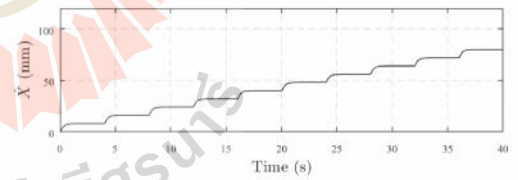
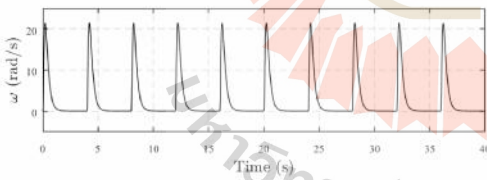
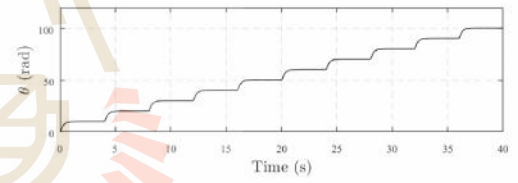
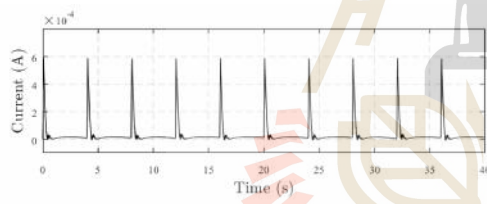
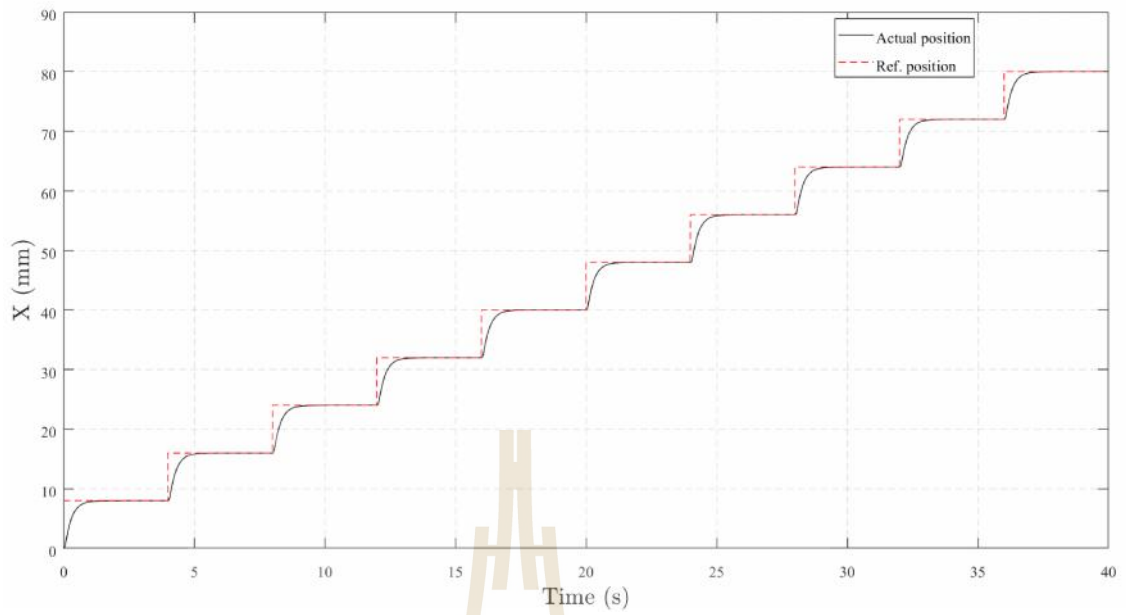


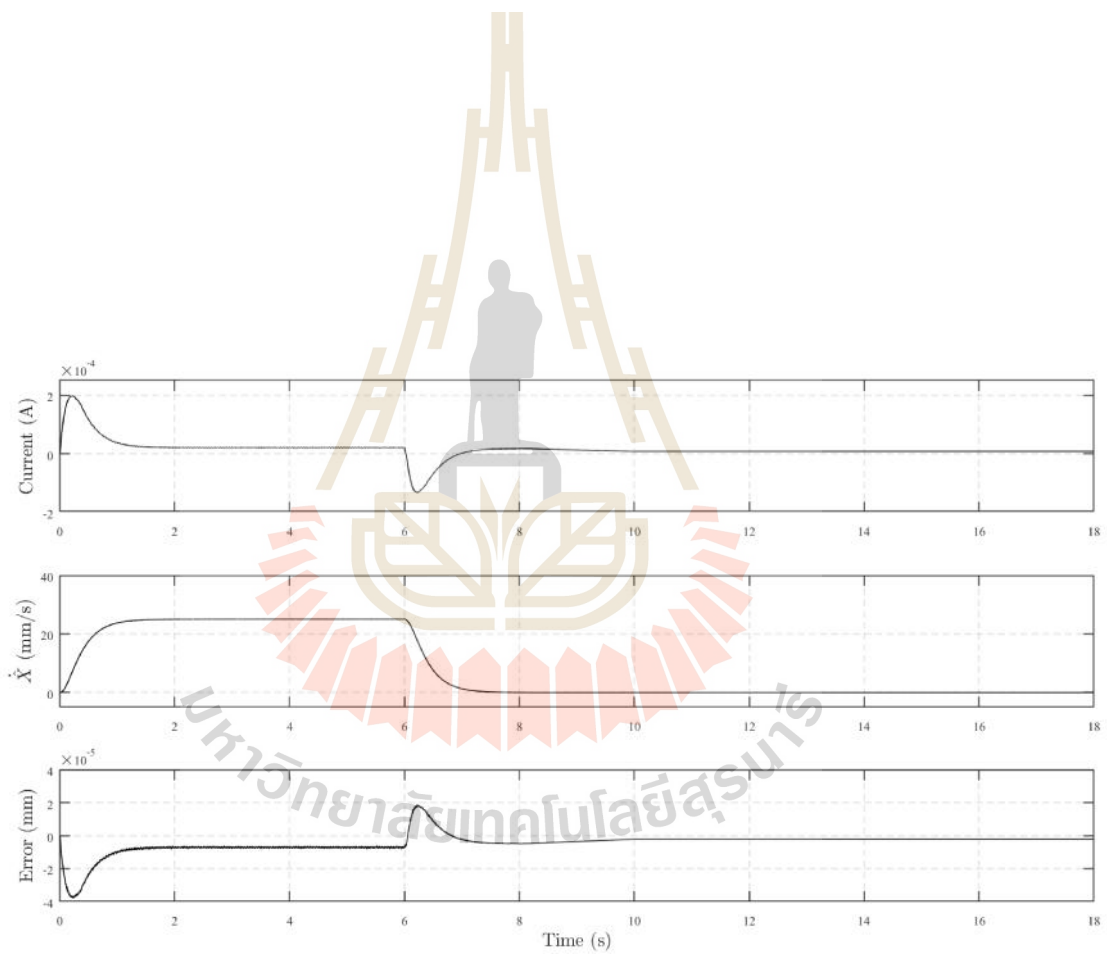
$X$

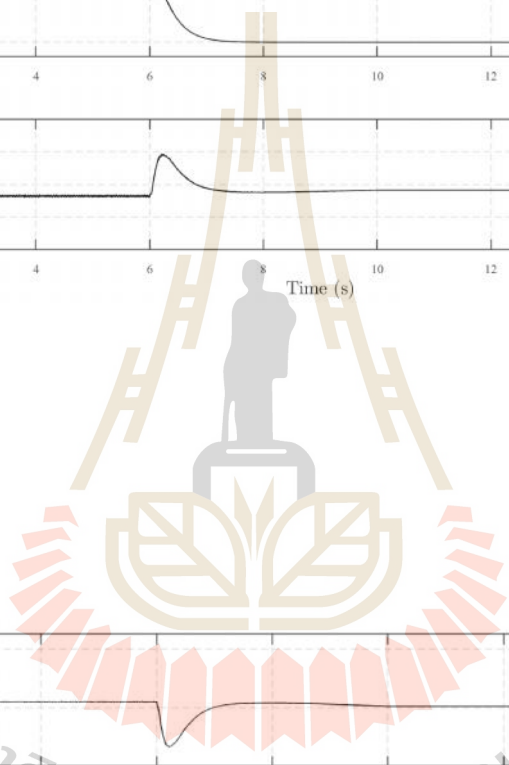
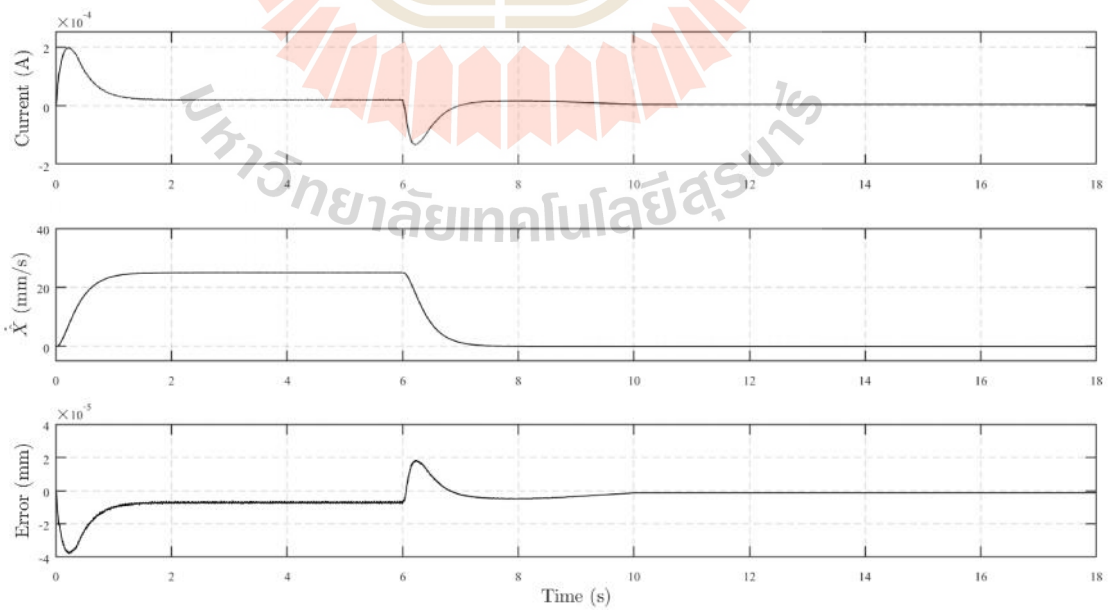
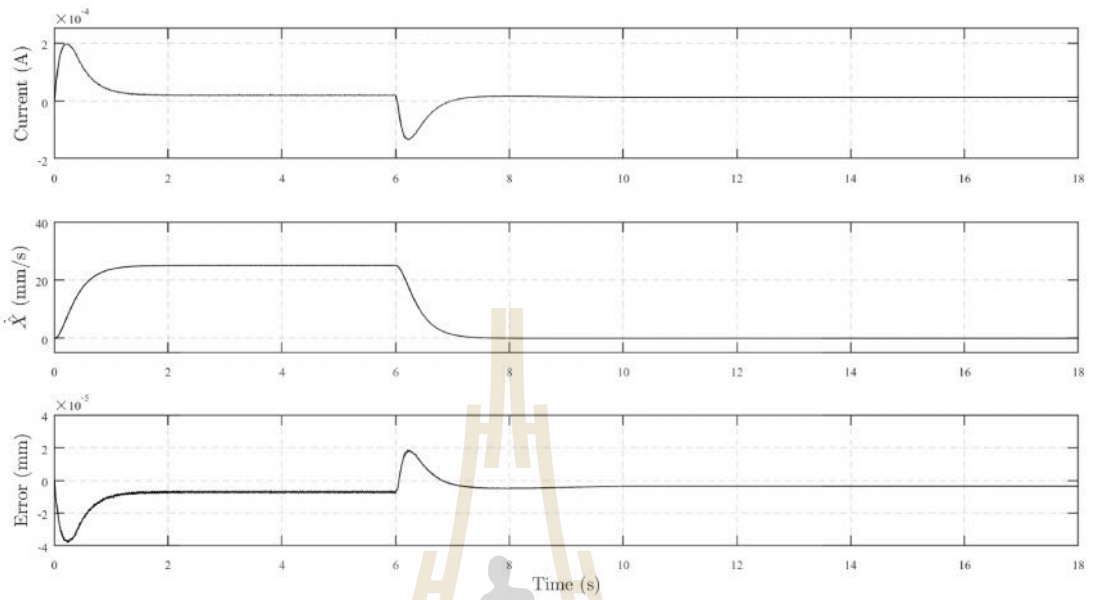
$u$

$R$

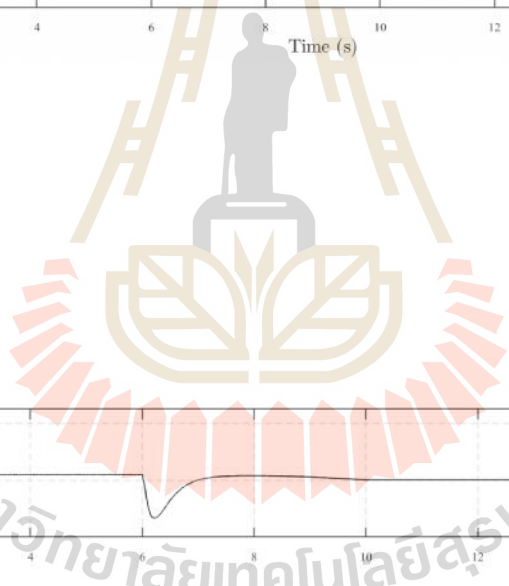
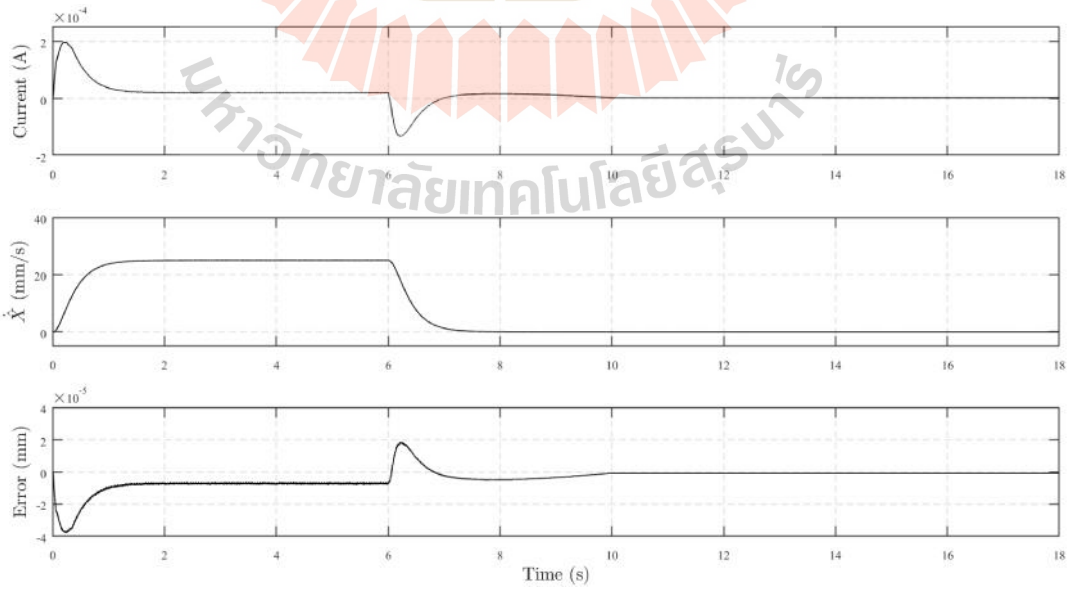
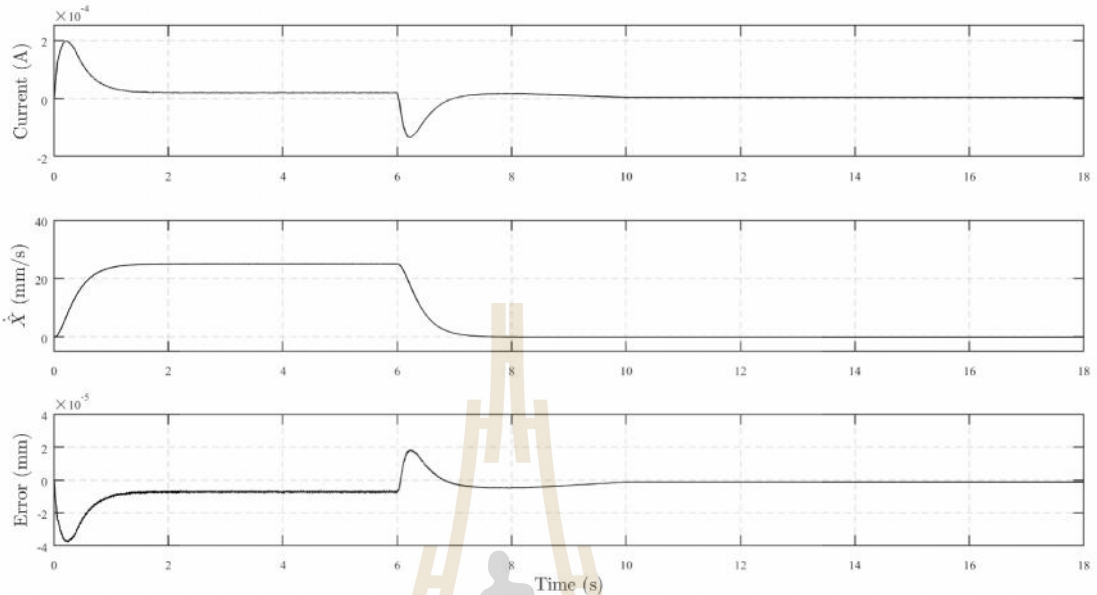
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

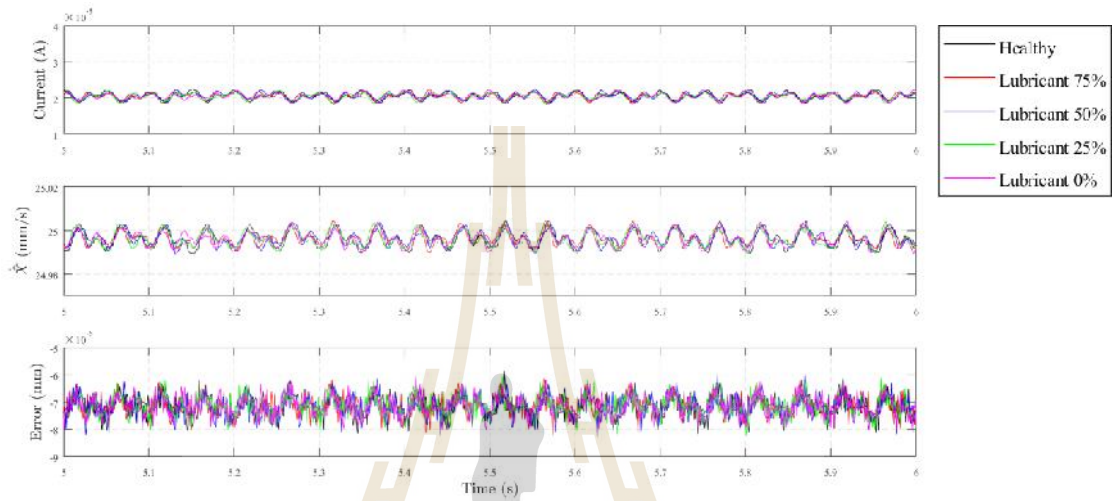




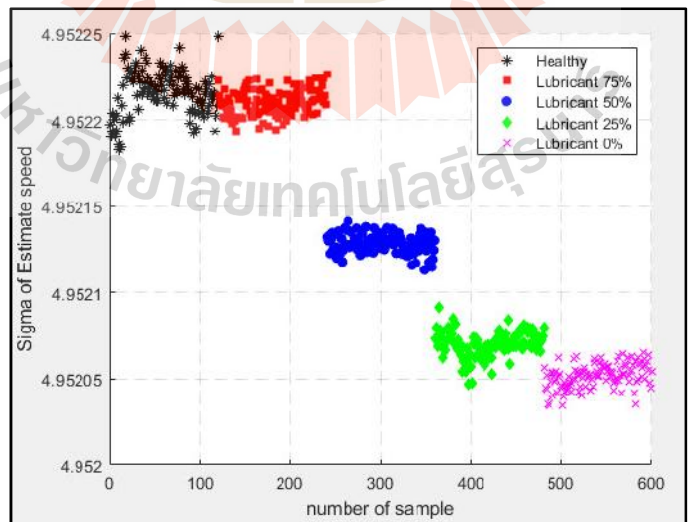
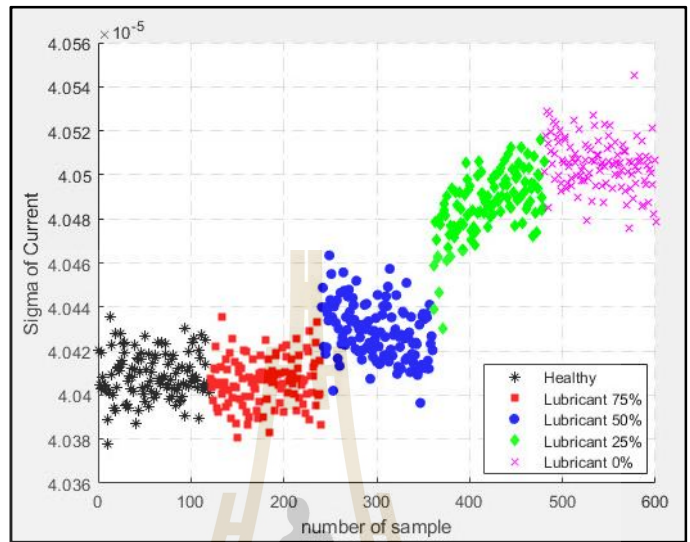


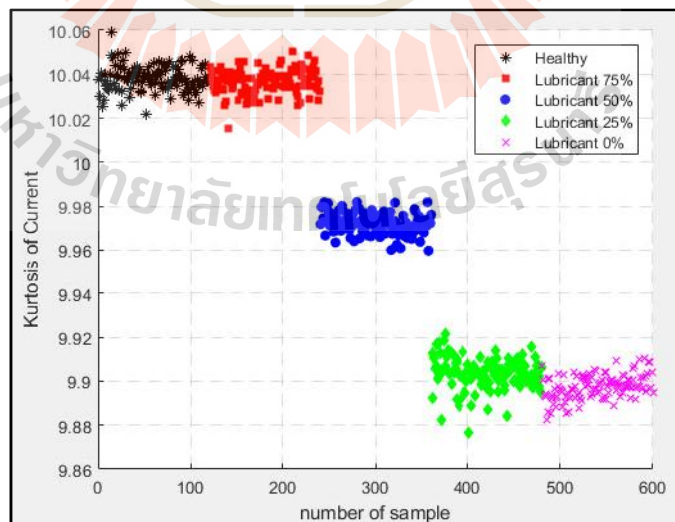
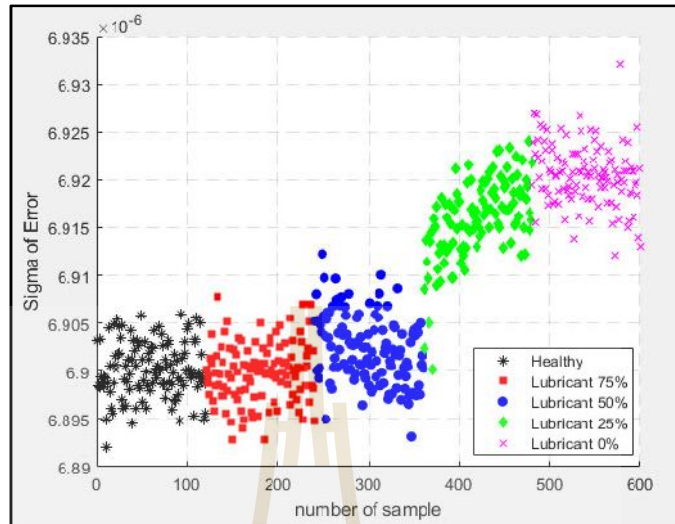


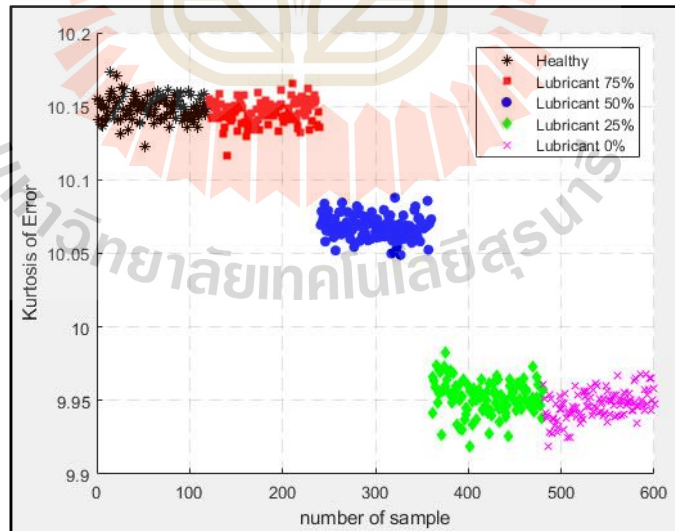
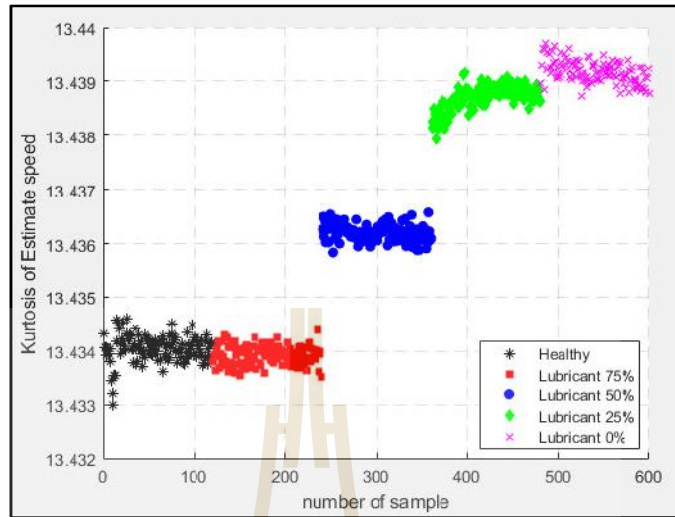


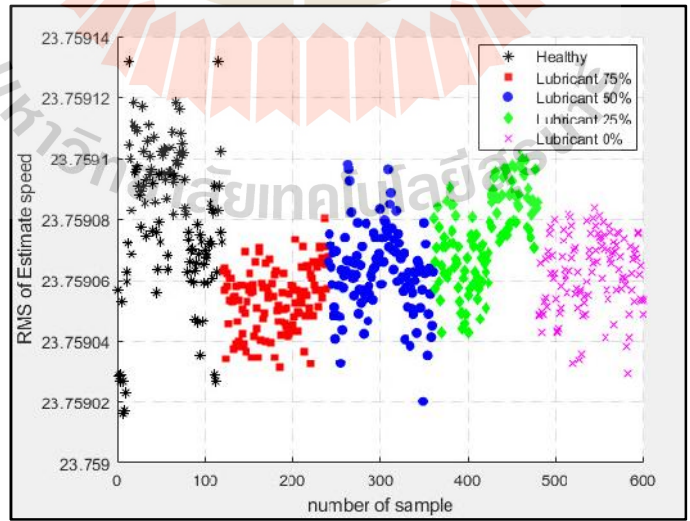
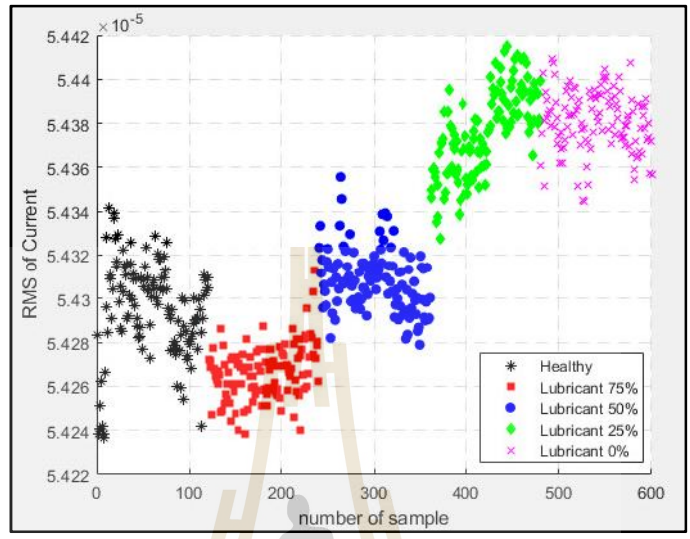


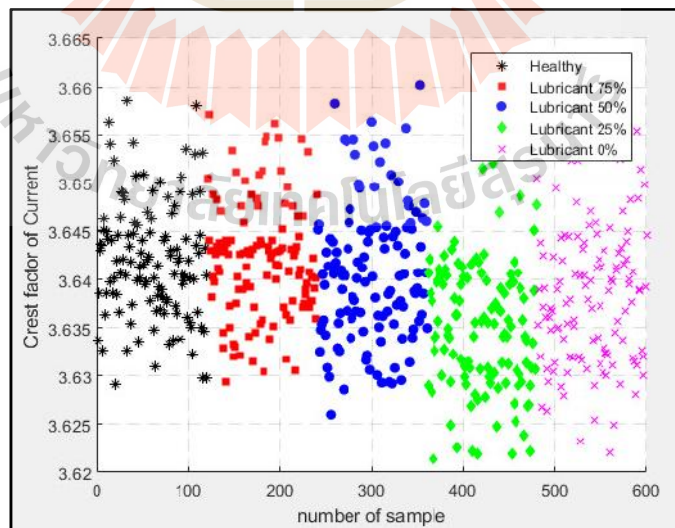
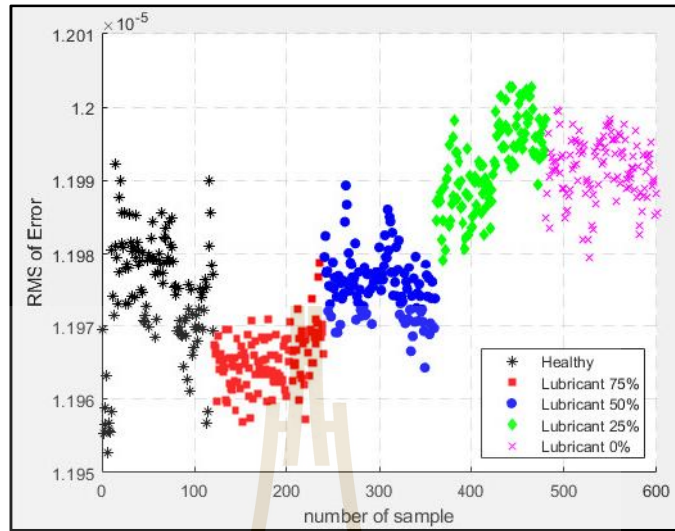
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

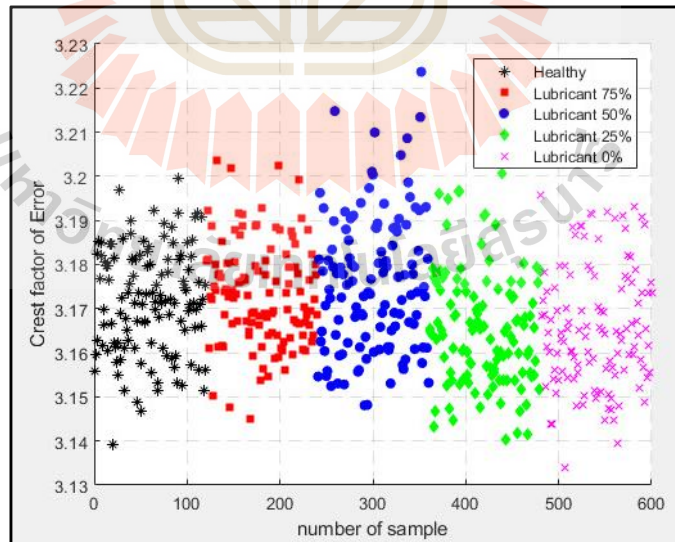
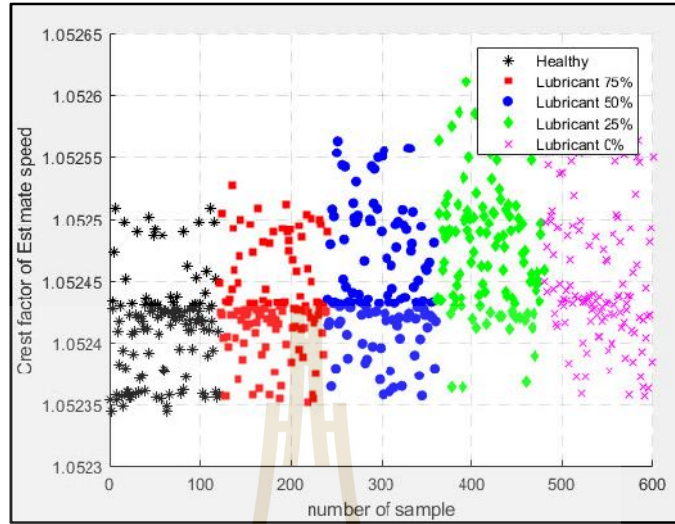














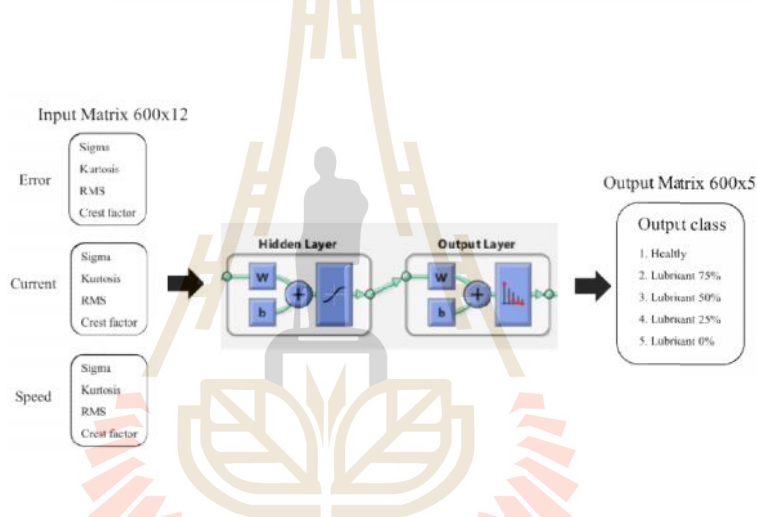
จากผลการคัดแยกลักษณะเด่นของข้อมูลตามในรูปที่ 5.19 ถึง 5.30 จะเห็นได้ว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าความโค้งสามารถแสดงข้อแตกต่างของกลุ่มข้อมูลในสภาวะปกติ, สภาวะที่สารหล่อลื่นเหลือ 50% และสภาวะที่สารหล่อลื่นเหลือ 0% ได้อย่างชัดเจน แต่ยังมีในบางกรณีที่ไม่สามารถแยกสภาวะของลิเนียร์แบร์ริงได้ชัดเจน คือ สภาวะปกติกับสภาวะที่สารหล่อลื่นเหลือ 75% และ สภาวะที่สารหล่อลื่นเหลือ 50% กับสภาวะที่สารหล่อลื่นเหลือ 0% ในขณะที่เดียวกันหากพิจารณาการคัดแยกข้อมูลด้วยค่าเฉลี่ยกำลังสอง จะสามารถแยกข้อมูลได้ชัดเจนเพียงสภาวะที่สารหล่อลื่นเหลือ 0% และ 25% เทียบกับสภาวะอื่นๆ ยกเว้นค่าเฉลี่ยกำลังสองของความเร็วที่ไม่สามารถแยกข้อมูลแต่ละกลุ่มได้ หากวิเคราะห์ห้เมื่อนำค่าอัตราส่วนค่าสูงสุดต่อค่าเฉลี่ยมาใช้คัดแยกข้อมูลจะแสดงได้ชัดเจนว่าไม่สามารถแบ่งกลุ่มข้อมูลในแต่ละสภาวะได้ ซึ่งจะเป็นผลทำให้ความถูกต้องของโครงข่ายประสาทเทียมลดลงเมื่อนำตัวแปรนี้ไปเป็นชุดข้อมูลฝึกสอนโมเดล

#### 5.4 การฝึกสอนแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมด้วยโปรแกรมแมทแลบ

กระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมจะต้องอาศัยชุดข้อมูลฝึกสอนประกอบด้วย อินพุต คือกลุ่มข้อมูลที่ทำการคัดแยกไว้ในรูปของพารามิเตอร์ทางสถิติจากหัวข้อที่กล่าวมาแล้ว และข้อมูลเอาต์พุตซึ่งเป็นคลาสของกรณีต่างๆ ของลิเนียร์แบร์ริงซึ่งจะมีทั้งหมด 5 คลาส ในการสร้างโมเดลให้เกิดการจดจำชุดข้อมูล จะกำหนดให้โปรแกรมทำการฝึกสอนจนกว่าค่าความผิดพลาดระหว่างโมเดลกับเอาต์พุตจริง (คลาสดิจริง) จะมีค่าน้อยกว่าที่กำหนด ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกำหนดค่าความผิดพลาดไว้ที่ 5% ตัวอย่างของข้อมูลอินพุตและเอาต์พุต แสดงดังตารางที่ 5.2 ในการเขียนโปรแกรมโดยใช้แมทแลบจะต้องจัดข้อมูลให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ ดังรูปที่ 5.31 โดยแบ่งสัดส่วนของข้อมูลสำหรับฝึกสอน (Training) 75% สำหรับประเมินผล (Validation) 15% และสำหรับทดสอบ (Testing) 15% โดยที่สิ่งที่จะต้องกำหนดคือจำนวนของชั้นซ่อน (Hidden layers) ที่ส่งผลต่อความถูกต้องของโมเดล (Model accuracy) ในงานวิจัยนี้จะกำหนดจำนวนชั้นซ่อนเท่ากับ 1 และทำการเพิ่ม จำนวนของนิวรอนในชั้นซ่อนเพื่อเปรียบเทียบความถูกต้อง และเปรียบเทียบอัลกอริทึมในการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) และค่าไบอัส (Bias) คือ Scale Conjugate method, Levenberg Marquardt algorithm และ Resilient Back-propagation เพื่อที่จะหาโมเดลที่ให้ค่าความถูกต้องสูงที่สุด โดยที่หน้าปรับจูนพารามิเตอร์ของโมเดลแสดงในรูปที่ 5.32 และผลการทดลองแสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.2 ตัวอย่างการจัดเตรียมชุดข้อมูลสำหรับฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

	Input												Output				
	SigmaError	SigmaCurrent	SigmaSpeed	KurError	KurCurrent	KurSpeed	CrestError	CrestCurrent	CrestSpeed	RMSError	RMSCurrent	RMSSpeed	Healthy	Lub75%	Lub50%	Lub25%	Lub0%
0	0.00007	0.000040	4.952197	10.155253	10.037793	13.434318	3.155910	3.633716	1.052354	0.000012	0.000054	23.759055	1	0	0	0	0
1	0.00007	0.000040	4.952191	10.141304	10.029004	13.434066	3.159709	3.638548	1.052344	0.000012	0.000054	23.759021	1	0	0	0	0
2	0.00007	0.000040	4.952193	10.153797	10.038586	13.434054	3.182323	3.643082	1.052397	0.000012	0.000054	23.759029	1	0	0	0	0
3	0.00007	0.000040	4.952204	10.151293	10.040678	13.433933	3.162850	3.643894	1.052427	0.000012	0.000054	23.759027	1	0	0	0	0
4	0.00007	0.000040	4.952200	10.137805	10.025261	13.434051	3.185206	3.643533	1.052433	0.000012	0.000054	23.759053	1	0	0	0	0
5	0.00007	0.000040	4.952190	10.137006	10.028240	13.433951	3.179771	3.632888	1.052473	0.000012	0.000054	23.759013	1	0	0	0	0
6	0.00007	0.000040	4.952194	10.149383	10.038938	13.434031	3.182033	3.645006	1.052508	0.000012	0.000054	23.759027	1	0	0	0	0
7	0.00007	0.000040	4.952202	10.149017	10.040004	13.433798	3.18942	3.646363	1.052354	0.000012	0.000054	23.759017	1	0	0	0	0
8	0.00007	0.000040	4.952213	10.141146	10.034347	13.433406	3.161759	3.630297	1.052357	0.000012	0.000054	23.759023	1	0	0	0	0
9	0.00007	0.000040	4.952185	10.148881	10.035275	13.433202	3.169428	3.644931	1.052409	0.000012	0.000054	23.758959	1	0	0	0	0
10	0.00007	0.000040	4.952173	10.142089	10.033320	13.432981	3.169864	3.638552	1.052417	0.000012	0.000054	23.758902	1	0	0	0	0
11	0.00007	0.000040	4.952163	10.143545	10.032618	13.433548	3.189626	3.641162	1.052382	0.000012	0.000054	23.758911	1	0	0	0	0
12	0.00007	0.000040	4.952182	10.153874	10.039809	13.433558	3.179694	3.650276	1.052429	0.000012	0.000054	23.758953	1	0	0	0	0
13	0.00007	0.000040	4.952180	10.159851	10.048629	13.434176	3.179832	3.654038	1.052357	0.000012	0.000054	23.758973	1	0	0	0	0
14	0.00007	0.000041	4.952184	10.173553	10.058951	13.434587	3.160481	3.639781	1.052303	0.000012	0.000054	23.758989	1	0	0	0	0
15	0.00007	0.000041	4.952208	10.100279	10.047470	13.434543	3.170482	3.644056	1.052503	0.000012	0.000054	23.759003	1	0	0	0	0



รูปที่ 5.31 โค้ดอะแกรมการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วยโปรแกรมเมทแลบ

Neural Network Training (ntraintool)

**Neural Network**

**Algorithms**

Data Division: Random (dividerand)  
 Training: Levenberg-Marquardt (trainlm)  
 Performance: Mean Squared Error (mse)  
 Calculations: MEX

**Progress**

Epoch:	0	15 iterations	1000
Time:		0:00:00	
Performance:	0.0109	0.00638	0.00
Gradient:	0.0204	0.0127	1.00e-07
Mu:	0.00100	0.000100	1.00e+10
Validation Checks:	0	6	6

**Plots**

- Performance (plotperform)
- Training State (plottrainstate)
- Error Histogram (ploterrhist)
- Confusion (plotconfusion)
- Receiver Operating Characteristic (plotroc)

Plot Interval: 1 epochs

Opening Confusion Plot

Stop Training Cancel

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## 5.5 ผลการจำแนกข้อบกพร่องของลิเนียร์แบริง

ตารางที่ 5.3 ผลการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของโมเดล โครงข่ายประสาทเทียม

Algorithm	Training iteration	Number of Neural	Epochs	Accuracy (%)
Levenberg Marquardt	215	10	8	97.5
	857	20	8	97.3
	174	30	7	97.2
	148	40	15	97.5
	455	50	7	97.5
	470	60	13	97.5
	369	70	8	97.2
Scale Conjugate method	3904	10	7	96.3
	4279	20	9	96.3
	4824	30	7	96.2
	3851	40	11	96.2
	6456	50	8	96.3
	5748	60	7	96.3
	6713	70	7	96.3
Resilient Back-propagation	7582	10	12	96.2
	6707	20	24	96.2
	3572	30	12	96.2
	5640	40	24	96.3
	5313	50	27	96.2
	4813	60	15	96.3
	5573	70	16	96.3

จากการประยุกต์ใช้การเขียนโปรแกรมภาษาแมทแลบในการสร้างโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม ผลในตารางที่ 5.3 เป็นการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของโมเดลในแต่ละวิธีการเรียนรู้ของโมเดล

ซึ่งจะทำการเพิ่มจำนวนนิวรอนของชั้นซ่อนในการสอน โมเดล จะเห็นว่าวิธีการฝึกสอนแบบ Levenberg Marquardt Algorithm มีประสิทธิภาพและให้ความรวดเร็วในการฝึกสอนโดยให้ค่าความถูกต้องสูงสุด แต่ในการเลือกใช้จริงจะต้องคำนึงถึงตัวแปรอื่น คือ ระยะเวลาในการฝึกสอน จากผลพบว่า โมเดลที่ให้ความถูกต้องสูงที่สุดคือ 97.5% และใช้จำนวนรอบของการสอนทั้งหมด 148 รอบ โดยรายละเอียดและเงื่อนไขพื้นฐานที่เกี่ยวข้องในการสิ้นสุดการสอนดังนี้

- ค่า Gradient เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่ใช้ในการพิจารณาถึงการสิ้นสุดของการฝึกสอน ในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสแต่ละรอบ Gradient จะเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับค่าความผิดพลาดในการฝึกสอนแต่ละครั้ง (Epoch) ซึ่งการสอนจะสิ้นสุดลงเมื่อ Gradient มีค่าน้อยกว่า 0
- ค่า Learning rate หรือ Mu เป็นค่าคงที่ใช้เร่งการปรับน้ำหนักและไบแอสให้ลู่ออกค่าตอบเร็วขึ้น ในการปรับค่า Mu จะขึ้นอยู่กับ Gradient หากในแต่ละรอบของการฝึกสอน Gradient มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ค่า Mu จะถูกปรับให้เพิ่มเพื่อทำให้ Gradient มีแนวโน้มลดลง โดยที่การฝึกสอนจะสิ้นสุดลงก็ต่อเมื่อค่า Mu หรือ Gradient มากกว่าค่าที่กำหนด

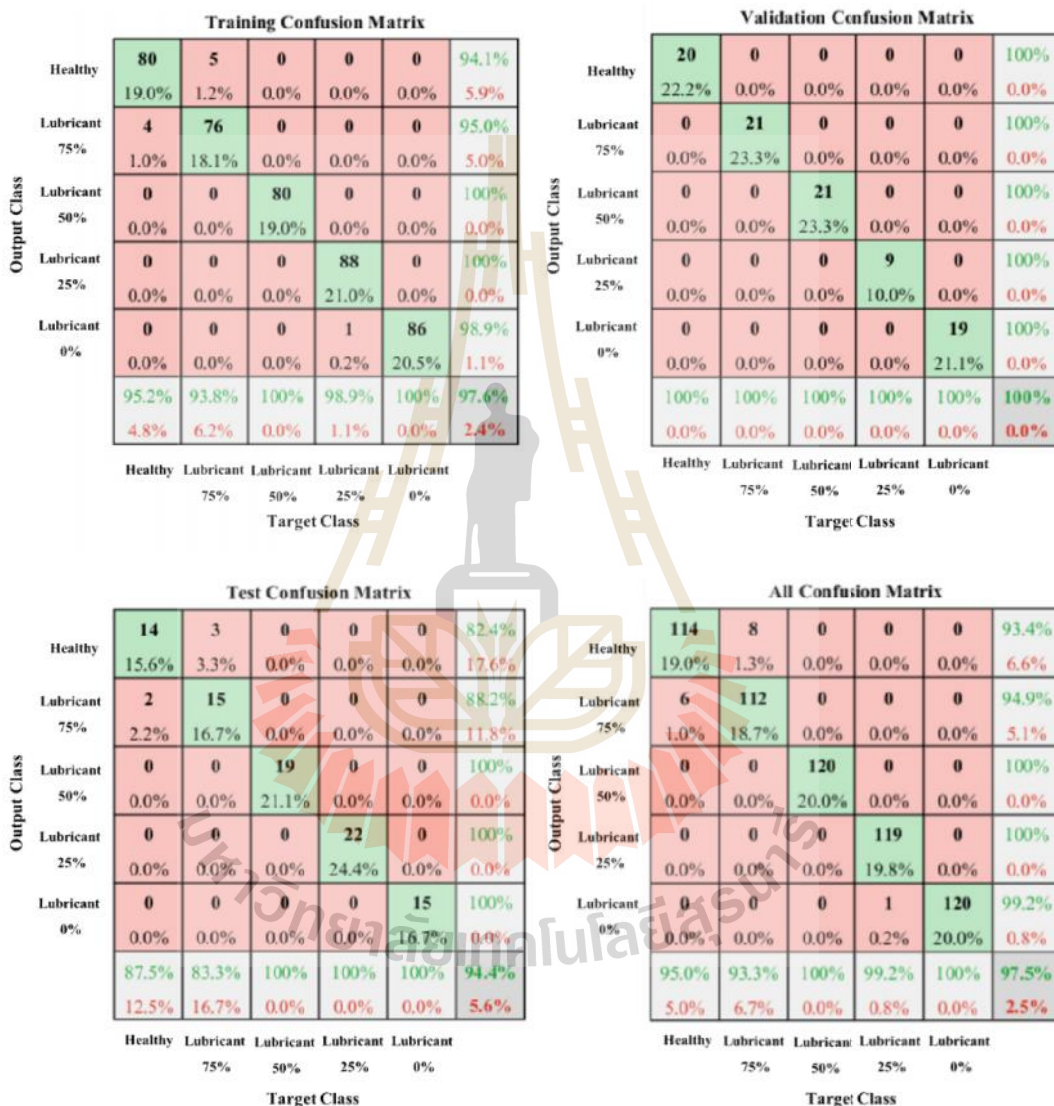
#### 5.5.1 การประเมินผลความถูกต้องของโมเดลด้วยคอนฟิวชันเมทริกซ์

การวัดประสิทธิภาพและการประเมินผลของ โมเดล โครงข่ายประสาทเทียม สามารถวิเคราะห์ได้หลายวิธี โดยในงานวิจัยนี้จะ ใช้การวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องจากตารางคอนฟิวชันเมทริกซ์ (Confusion matrix) ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่มีความซับซ้อน และตีความหมายของโมเดลได้ง่าย โดยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องคำนวณได้ดังนี้

$$\text{Accuracy (\%)} = \frac{\text{จำนวนข้อมูลที่จำแนกได้ถูกต้อง}}{\text{จำนวนข้อมูลที่ใช้ทดสอบ}} \times 100$$

คอนฟิวชันเมทริกซ์เป็นการประเมินผลลัพธ์ในการทำงานของ โมเดลเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จริง โดยจะแบ่งออกเป็นเอาต์พุตจากโมเดล (Output Class) และเอาต์พุตจริง (Target Class) ในแต่ละแถวและหลักคือกรณีของลิเนียร์แบริงที่เกิดข้อบกพร่องและสภาพปกติ ซึ่งแถวขวาสุดและล่างสุดในแต่ละช่องจะเป็นการคำนวณหาค่าความถูกต้องและค่าความผิดพลาดของการจำแนกข้อบกพร่องในแต่ละกรณี โดยที่ความถูกต้องโดยรวมจะสามารถหาได้จากแนวทะแยงของคอนฟิวชันเมทริกซ์ พิจารณารูปที่ 5.33 คือคอนฟิวชันเมทริกซ์ของการจำแนกข้อบกพร่องของลิเนียร์แบริง ประกอบด้วย คอนฟิวชันเมทริกซ์สำหรับการฝึกสอน คอนฟิวชันเมทริกซ์สำหรับการประเมินผล คอนฟิวชันเมทริกซ์สำหรับการทดสอบ และคอนฟิวชันเมทริกซ์รวมของการจำแนก ซึ่งจะเห็นว่า

ประสิทธิภาพโดยรวมของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถจำแนกลักษณะข้อบกพร่องเมื่อสารหล่อลื่นเหลืออยู่ 50% และสภาพสารหล่อลื่น 0% ได้ชัดเจนด้วยความถูกต้องของการจำแนก 100% (Accuracy 100%) และในกรณีอื่นๆ สามารถจำแนกได้ไม่ต่ำกว่า 93% โดยรวมโครงข่ายประสาทเทียมสามารถจำแนกข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นได้ถึง 97.5%



รูปที่ 5.33 คอนฟิวชันเมทริกซ์ของโมเดลที่ความถูกต้องสูงที่สุด

## บทที่ 6

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุป

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาและออกแบบระบบตรวจจับข้อบกพร่องของลิเนียร์แบร์ริงของระบบขับเคลื่อนแนวแกนในเครื่องจักรหยอดกาวและติดหัวอ่านเขียนของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ โดยใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN) และข้อมูลผลตอบสนองทางพลวัตของระบบจากการประมาณค่าด้วยตัวสังเกต (Observer) ผ่านการออกแบบระบบควบคุมแบบเซอร์โว ซึ่งขั้นตอนของการวิจัยและผลงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ออกแบบและสร้างชุดขับเคลื่อนแนวแกนด้วยบอลสกรูและเซอร์โวมอเตอร์โดยการทำงานเหมือนในกระบวนการผลิตจริงโดยประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบและค่าสัมประสิทธิ์เทียบเท่าที่เกี่ยวข้องในแบบจำลองโดยการระบุเอกลักษณ์ของระบบผ่านข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตในย่านการทำงานที่ต้องการ ด้วยวิธี Nonlinear least Square ซึ่งผลการตอบสนองของแบบจำลองสอดคล้องกับระบบจริงโดยทดสอบด้วยการออกแบบตัวสังเกตระบบวงเปิด (Open loop observer) และตรวจสอบความสามารถในการสังเกตได้กับควบคุมได้ของระบบ ก่อนที่จะออกแบบระบบควบคุมต่อไป

2. ออกแบบและทดสอบระบบควบคุมด้วยเทคนิคการวางโพล (Pole placement method) เพื่อหาค่าอัตราขยายของการป้อนกลับตัวแปรสถานะ (K), อัตราขยายของตัวควบคุม ( $K_p$ ) และอัตราขยายของตัวสังเกต (L) สำหรับตัวควบคุมและตัวสังเกตจะใช้โปรแกรม MATLAB ในการหาค่าอัตราขยาย และทดสอบการทำงานกับระบบจริงโดยการใช้ Simulink ร่วมกับ RAPCON Board สั่งจ่ายแรงดันให้ระบบอย่างเหมาะสมเพื่อให้ผลตอบสนองเป็นไปตามที่ออกแบบ การทดสอบการควบคุมจะกระทำ 2 กรณีคือ ผลตอบสนองตามเวลาเข้าสู่สถานะคงตัว กับการติดตามค่าอินพุตอ้างอิง (Tracking response) ซึ่งพบว่าระบบสามารถให้ผลตอบสนองเป็นไปตามที่ออกแบบ และสามารถติดตามอินพุตอ้างอิงได้ นอกจากนี้ยังให้ค่าข้อมูลตัวแปรสถานะจากตัวสังเกต เพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์และจำแนกข้อบกพร่องของลิเนียร์แบร์ริงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

3. ได้ออกแบบการทดลองโดยการสร้างสภาวะข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับลิเนียร์แบร์ริงประกอบด้วยสภา

วะที่สารหล่อลื่นเหลือ 75%, สภาวะที่สารหล่อลื่นเหลือ 50%, สภาวะที่สารหล่อลื่นเหลือ 25%, สภาวะที่สารหล่อลื่นเหลือ 0%, เปรียบเทียบกับสภาวะปกติ การทดลองจะเก็บข้อมูลจากตัวสังเกต ประกอบด้วยค่ากระแสที่ประมาณได้ ค่าความเร็วที่ประมาณได้ และค่าความผิดพลาดระหว่างตัวสังเกตกับระบบจริง โดยในแต่ละสภาวะจะเก็บข้อมูลจำนวน 120 ครั้ง

4. สร้างชุดข้อมูลสำหรับฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม โดยจะคัดแยกคุณลักษณะของข้อมูลด้วยตัวแปรทางสถิติ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ค่าความโด่ง (Kurtosis) ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square) และอัตราส่วนค่าสูงสุดต่อค่าเฉลี่ย (Crest factor) ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจะแบ่งสัดส่วนของข้อมูลสำหรับฝึกสอน 75% สำหรับประเมินผล 15% และสำหรับทดสอบ 15% จากนั้นประยุกต์ใช้การเขียนโปรแกรมด้วย MATLAB / M-file ซึ่งใช้โมเดลแบบแพร่กลับ (back-propagation) และคำนวณค่าความผิดพลาดของโมเดลในรูปแบบของ Mean Square Error (MSE)

5. สำหรับขั้นตอนในการฝึกสอนโมเดลจะเปรียบเทียบ 3 วิธีการที่ใช้ปรับค่าถ่วงน้ำหนัก และไปอัลคือ Scale Conjugate method (traincg), Levenberg Marquardt algorithm (trainlm) และ Resilient Back-propagation (trainrp) เพื่อที่จะหาโมเดลที่ให้ค่าความถูกต้องสูงสุด การประเมินผลโมเดลจะใช้การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง (Accuracy) โดยการใช้คอนฟิวชันเมตริกซ์ซึ่งพบว่าโมเดลที่ให้ค่าความถูกต้องสูงสุดคือ 97.5 % ในขณะที่ใช้จำนวนรอบในการฝึกสอนน้อยที่สุดเท่ากับ 148 รอบ

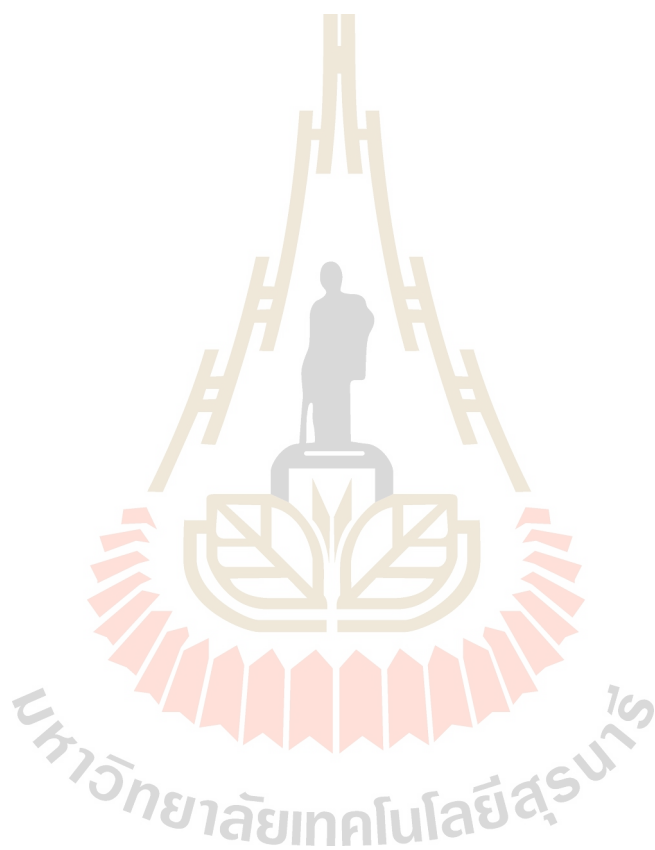
## 6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการทำงานของระบบควบคุมจะเกิดปัญหาการล่าช้าของสัญญาณป้อนกลับ เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ทำการกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลาเท่ากับ 0.25 วินาที นั้นจะทำให้ระบบทำงานไม่เป็นไปตามที่ออกแบบหากออกแบบให้เวลาในเข้าสู่สถานะคงตัวมีค่าเร็วกว่า 4 เท่าของค่าคงตัวเวลา ดังนั้นหากต้องการออกแบบระบบให้มีการตอบสนองที่เร็วขึ้น จะต้องใช้เซ็นเซอร์ในการวัดที่มีการกรองสัญญาณรบกวนหรือมีสัญญาณรบกวนให้น้อยที่สุด

2. การสร้างโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อให้เกิดการเรียนรู้และสามารถจดจำรูปแบบของข้อมูลได้จะต้องอาศัยชุดข้อมูลฝึกสอนที่มากพอสมควร ซึ่งในงานวิจัยมีชุดข้อมูลตัวอย่างเพียง 120 ชุดข้อมูล ซึ่งในการใช้งานจริงอาจจะยังไม่เพียงพอที่จะสอนให้โมเดลเกิดการจดจำ เมื่อนำโมเดลไปใช้กับชุดข้อมูลอื่นที่ไม่เคยผ่านการสอนมาก่อนจะทำให้ประสิทธิภาพการจำแนกข้อบกพร่องลดลง



3. การคัดแยกลักษณะของข้อมูลในงานวิจัยนี้เป็นการทำด้วยผู้ใช้งานเอง ซึ่งต้องใช้เวลานานในการจัดการข้อมูลและจำนวนลักษณะที่คัดแยกออกมาได้อาจไม่ครอบคลุม ดังนั้นผู้วิจัยจึงแนะนำให้ใช้โมเดลโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (Convolution Neural Network, CNN) เป็นการคัดแยกลักษณะของข้อมูลอัตโนมัติโดยวิธีการทางรูปภาพ ซึ่งจะช่วยให้ผู้ใช้งานลดขั้นตอนการสร้างโมเดลเพื่อจำแนกข้อบกพร่องได้ และการเลือกตัวแปรที่แบ่งกลุ่มของข้อมูลได้ไม่ดีจะส่งผลทำให้ความถูกต้องของโมเดลลดลง



## รายการอ้างอิง

- [1] Dong, X., Jian-qu, Z., & Feng, W. (2012). Fuzzy PID control to feed servo system of CNC machine tool. *Procedia Engineering*, 29, 2853-2858.
- [2] Singh, K., Vasant, P., Elamvazuthi, I., & Kannan, R. (2015). PID tuning of servo motor using bat algorithm. *Procedia computer science*, 60, 1798-1808.
- [3] Qureshi, M. S., Swarnkar, P., & Gupta, S. (2016, January). Assessment of DC servo motor with sliding mode control approach. In *2016 IEEE First International Conference on Control, Measurement and Instrumentation (CMI)* (pp. 351-355). IEEE.
- [4] Sazawa, M., Ohishi, K., & Katsura, S. (2008, November). High speed positioning servo system using integrator correction of PI controller based on disturbance observer. In *2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics* (pp. 2539-2544). IEEE.
- [5] Zheng, J., Zhang, M., & Meng, Q. (2006, June). Modeling and design of servo system of CNC machine tools. In *2006 International Conference on Mechatronics and Automation* (pp. 1964-1969). IEEE.
- [6] Qian, R., Luo, M., Zhao, J., & Li, T. (2016). Novel Sliding Mode Control for Ball Screw Servo System. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 54, p. 03007). EDP Sciences.
- [7] Lin, C. Y., & Lee, C. H. (2017). Remote Servo Tuning System for Multi-Axis CNC Machine Tools Using a Virtual Machine Tool Approach. *Applied Sciences*, 7(8), 776.
- [8] Patton, R. J., & Klinkhieo, S. (2009, December). Actuator fault estimation and compensation based on an augmented state observer approach. In *Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control (CDC) held jointly with 2009 28th Chinese Control Conference* (pp. 8482-8487). IEEE.
- [9] Mid, E. C., & Yang, S. S. (2011, November). Modified feedback configuration via observer based sensor compensation. In *2011 2nd International Conference on Instrumentation Control and Automation* (pp. 364-369). IEEE.

- [10] Bianchini, C., Immovilli, F., Cocconcelli, M., Rubini, R., & Bellini, A. (2010). Fault detection of linear bearings in brushless AC linear motors by vibration analysis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(5), 1684-1694.
- [11] Patil, A. B., Gaikwad, J. A., & Kulkarni, J. V. (2016, July). Bearing fault diagnosis using discrete wavelet transform and artificial neural network. In *2016 2nd International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology (iCATccT)* (pp. 399-405). IEEE.
- [12] Wadhvani, S., Wadhvani, A. K., Gupta, S. P., & Kumar, V. (2006, December). Detection of bearing failure in rotating machine using adaptive neuro-fuzzy inference system. In *2006 International Conference on Power Electronic, Drives and Energy Systems* (pp. 1-5). IEEE.
- [13] Martínez-García, C., Osorio-Gordillo, G. L., Astorga-Zaragoza, C. M., & Puig, V. (2016, September). Fault detection on bearings coupled to permanent magnet DC motors by using a generalized Takagi-Sugeno PI observer. In *2016 3rd Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol)*, (pp. 579-584). IEEE.
- [14] Tastimur, C., Karakose, M., Aydın, I., & Akin, E. (2018, September). Defect Diagnosis of Rolling Element Bearing using Deep Learning. In *2018 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP)* (pp. 1-5). IEEE.
- [15] Han, G., & Kim, J. K. (2018, July). Classifier Comparison for Failure Detection of Induction Motors Using Current Signal. In *2018 Tenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)* (pp. 28-31). IEEE.
- [16] Chommaungpuck, P., Lawbootsa, S., and Srisertpol, J. 2019. Fault Detection of Linear Bearing in Auto Core Adhesion Mounting Machine using Artificial Neural Network. *WSEAS Transactions on Systems and Control*, 14, (pp. 31-42).



ภาคผนวก ก

โปรแกรมและ Simulink ในการทดสอบระบบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## ก.1 โปรแกรมในการออกแบบระบบควบคุมและตัวสังเกต

```
clc
clear all

%% System parameter %%

Bm = 0.37845;
Ct = 38669;
Jm = 0.27084;
Ks = 1.7891e+08;
Kb = 0.028151;
Kt = 0.81329;
La = 0.00010546;
Mt = 7;
R = 0.79985;
Ra = 0.051057;

%% transfer function model %%
a = (K*R*Kt)/(Mt*La*Jm);
b = (Mt*Ra*Jm + Mt*La*Bm + Ct*La*Jm)/(Mt*La*Jm);
c = (Mt*Ra*Bm + Mt*Kt*Kb + Ct*Ra*Jm + Ct*La*Bm + K*La*Jm)/(Mt*La*Jm);
d = (Ct*Ra*Bm + Ct*Kt*Kb + K*Ra*Jm + K*La*Bm)/(Mt*La*Jm);
e = (K*Ra*Bm + K*Kt*Kb)/(Mt*La*Jm);
num = [a];
den = [1 b c d e 0];
GS = tf(num,den)

%% State space model %%
A=[-Ra/La 0 -Kb/La 0 0; 0 0 1 0 0; Kt/Jm 0 -Bm/Jm 0 0; 0 0 0 0 1; 0 R*Ks/Mt 0 -Ks/Mt -
Ct/Mt];
B=[1/La; 0; 0; 0; 0];
C=[0 0 0 1 0];
D=[0];
sys = ss(A,B,C,D);
```

```

%% Controllable check %%
OrderSys = order(sys);
RankSysCl = rank(ctrb(A,B));
Pc = [B A*B (A^2)*B (A^3)*B (A^4)*B];
if OrderSys == RankSysCl
    fprintf('System controllable\n')
else
    fprintf('System is not controllable\n')
end

%% Observability check %%
RankSysOB=rank(observ(A,C));
Po = [C; C*A; C*(A^2); C*(A^3); C*(A^4)];
if OrderSys == RankSysOB
    fprintf('System observability\n')
else
    fprintf('System is not observability\n')
end

%% State feedback design with Type 1 servo system %%
Ahat = [A zeros(5,1); -C 0];
Bhat = [B;0];
CLpole = [-4 -5 -500 -500 -500]; % settling time 2 second
Khat = acker(Ahat,Bhat,CLpole);
K = [Khat(1) Khat(2) Khat(3) Khat(4) Khat(5)];
KI = -Khat(6);

%% Observer design %%
obs_P = [-400 -500 -1000 -1000 -1000];
L = acker(A',C',obs_P);
L = L';
for i = 1:5
    fprintf('state feedback gain K(%d) = %f\n',i,K(i))
end
fprintf('controller gain KI = %f\n',KI)

AA = [A - B*K B*KI;-C 0];
BB = [0;0;0;0;0;1];
CC = [C 0];
DD = [0];
sys_N = ss(AA,BB,CC,DD);
step(sys_N,10)

```



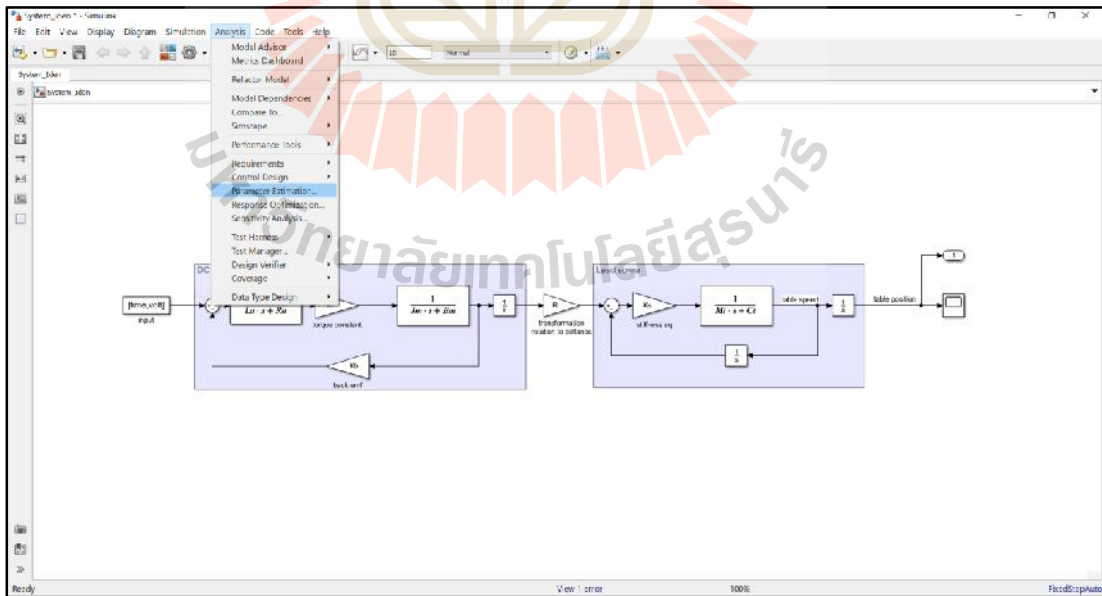
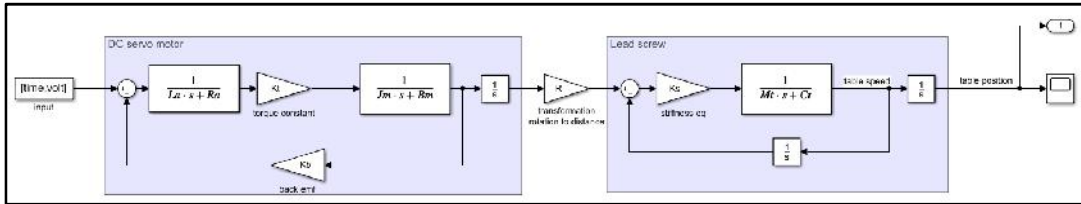


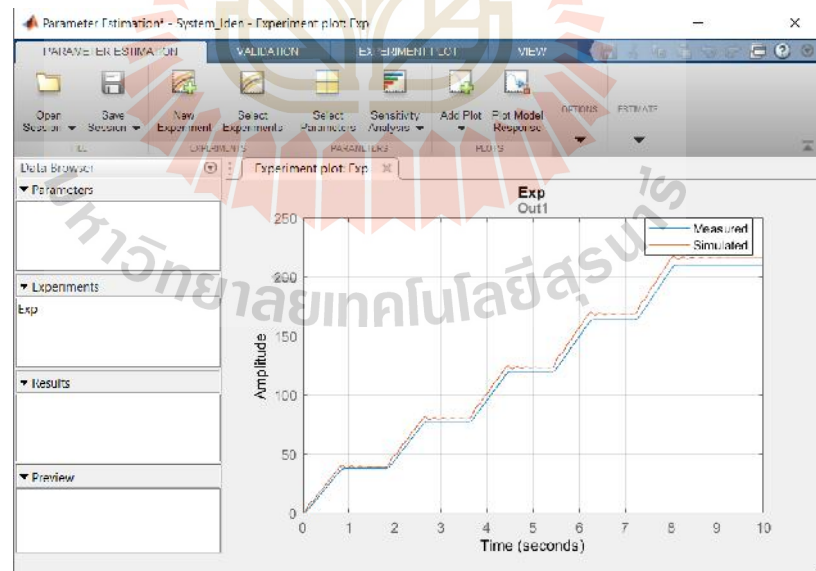
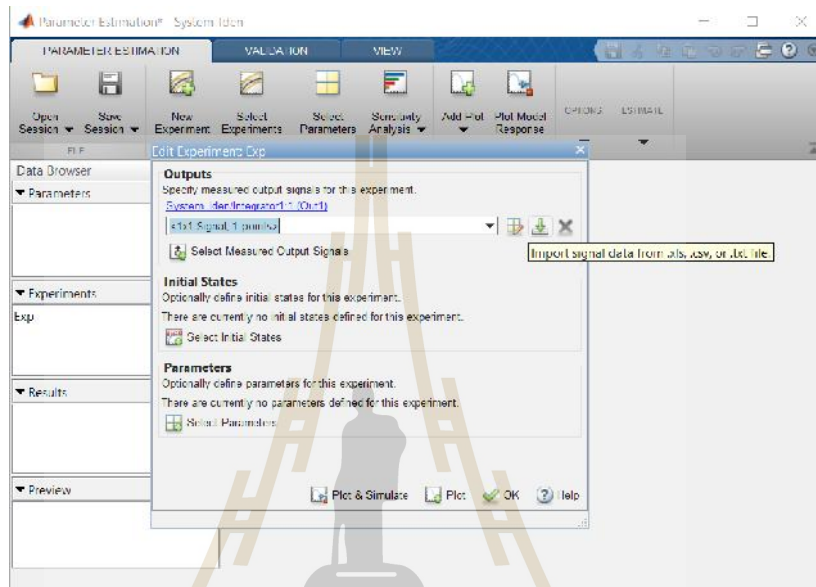
ภาคผนวก ข

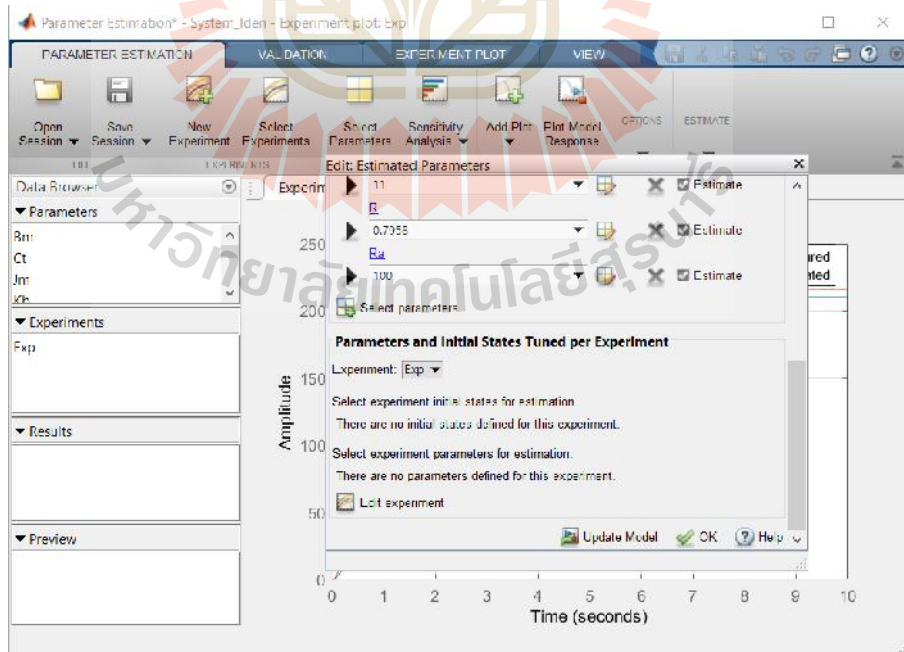
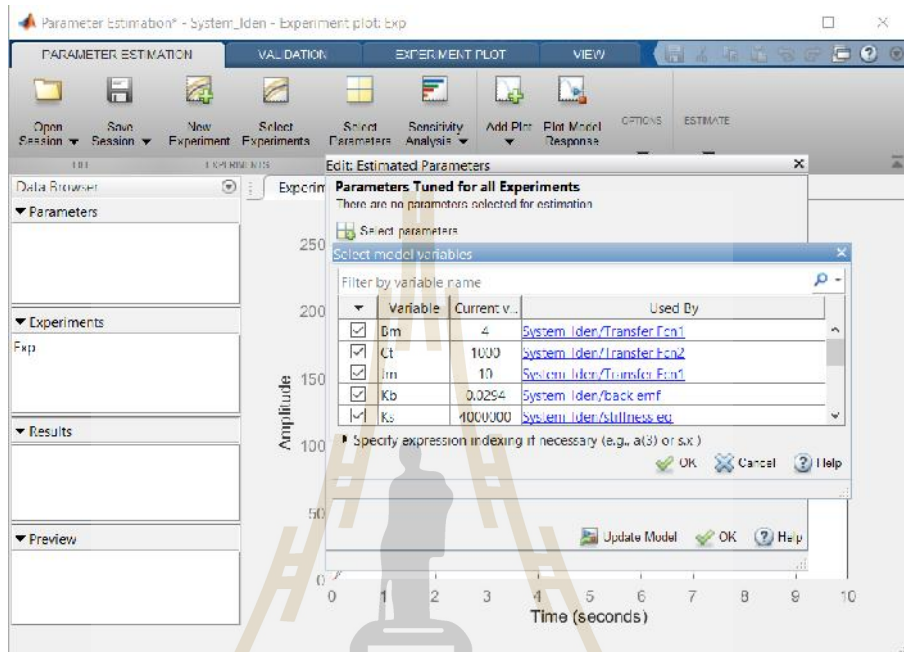
การใช้โปรแกรมเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง

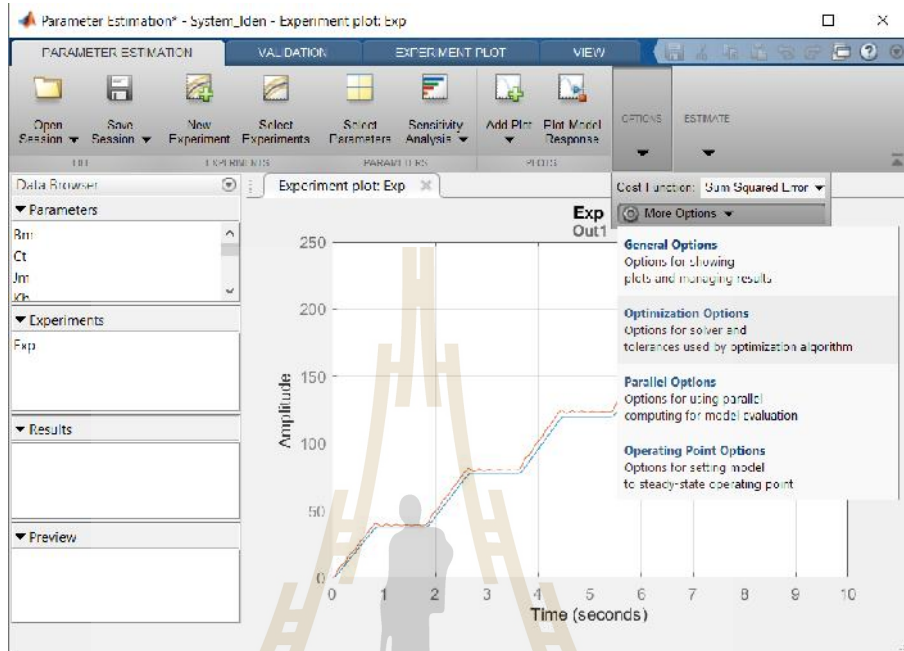
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



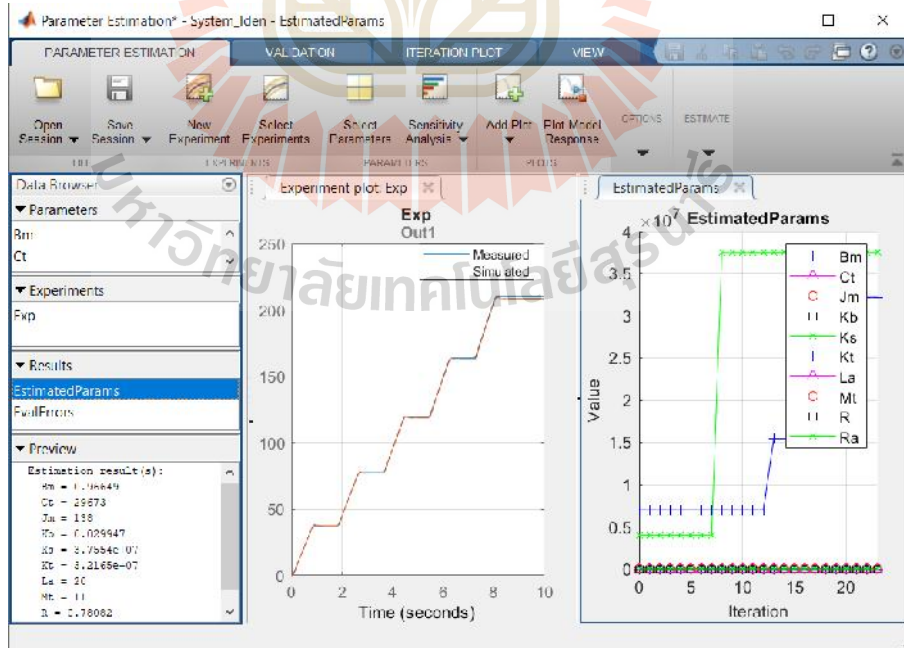
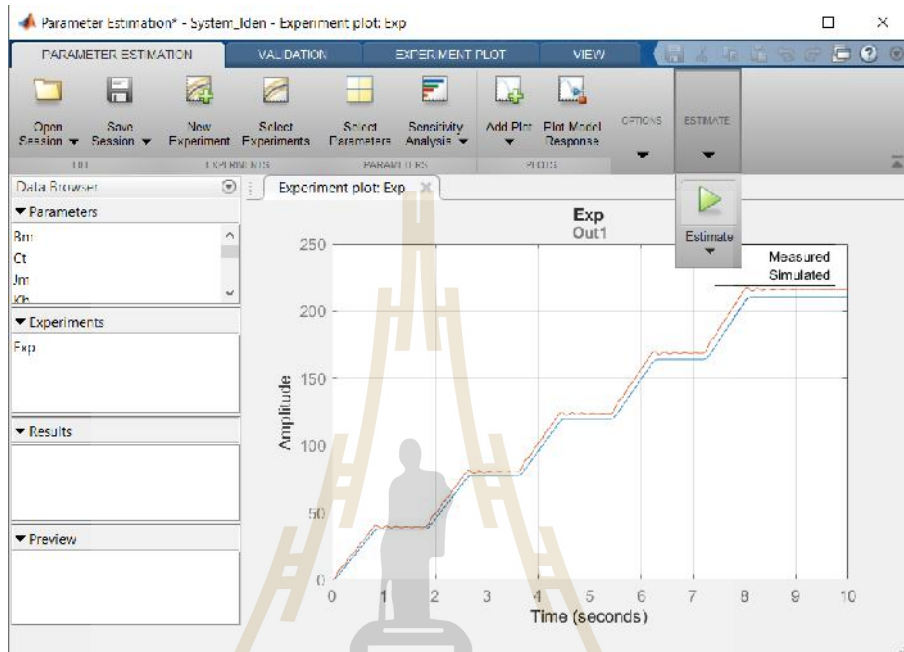


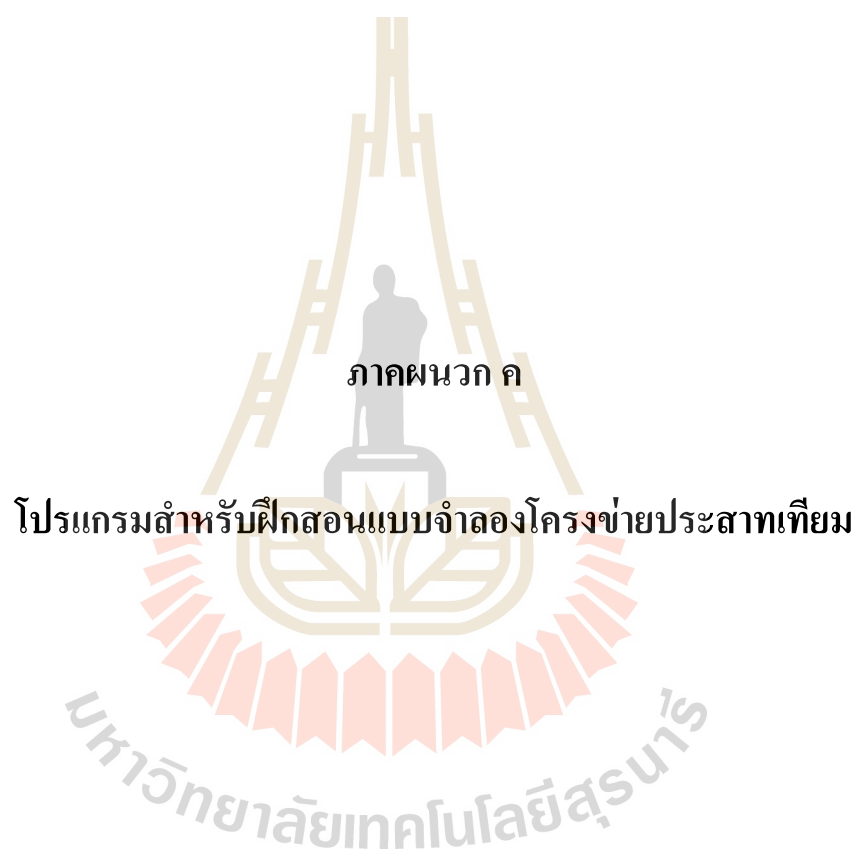






The screenshot shows the 'Estimation Options' dialog box. The 'Optimization Options' tab is active. The 'Optimization method' section shows 'Method: Nonlinear least squares' and 'Algorithm: Trust-Region-Reflective'. A dropdown menu is open for 'Method', listing 'Gradient descent', 'Nonlinear least squares', 'Pattern search', and 'Simplex search'. The 'Function tolerance' is set to '0.001'. The 'Display level' is set to 'Iteration' and 'Restarts' is set to '0'. The 'Use robust cost' checkbox is unchecked. The dialog box has 'OK', 'Cancel', and 'Help' buttons at the bottom.





ภาคผนวก ค

โปรแกรมสำหรับฝึกสอนแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## ค.1 การคัดแยกลักษณะของข้อมูลและสร้างชุดข้อมูลทดสอบ

```
%% Load data Healthy %%
dir1 =
'D:\SUT\Mdegree\Master_Thesis\project_leadcrew\mathmodel_leadcrew\Data\FDI\DATA\Healthy
\';
for i = 1:120
    Hcon(i) = load([dir1 'test' num2str(i) '.mat']);
end
Hsignals = struct2table(Hcon);
Hsignals = table2cell(Hsignals);
for i = 1:120
    HObsvErrorsignals{i,1} = Hsignals{i,1}(1:6000,1);
    HCurrentsignals{i,1} = Hsignals{i,1}(1:6000,2);
    HThetasignals{i,1} = Hsignals{i,1}(1:6000,3);
    HOmegasignals{i,1} = Hsignals{i,1}(1:6000,4);
    HPositionsignals{i,1} = Hsignals{i,1}(1:6000,5);
    HSpeedsignals{i,1} = Hsignals{i,1}(1:6000,6);
end
%Hsignals =
[HObsvErrorsignals,HCurrentsignals,HThetasignals,HOmegasignals,HPositionsignals,HSpeedsignals
];
Hsignals = [HObsvErrorsignals,HCurrentsignals,HSpeedsignals];

%% Load data Lub75 %%
dir2 =
'D:\SUT\Mdegree\Master_Thesis\project_leadcrew\mathmodel_leadcrew\Data\FDI\DATA\Starved
75%';
for i = 1:120
    F1con(i) = load([dir2 'test' num2str(i) '.mat']);
end
F1signals = struct2table(F1con);
F1signals = table2cell(F1signals);
for i = 1:120
    F1ObsvErrorsignals{i,1} = F1signals{i,1}(1:6000,1);
    F1Currentsignals{i,1} = F1signals{i,1}(1:6000,2);
    F1Thetasignals{i,1} = F1signals{i,1}(1:6000,3);
    F1Omegasignals{i,1} = F1signals{i,1}(1:6000,4);
    F1Positionsignals{i,1} = F1signals{i,1}(1:6000,5);
    F1Speedsignals{i,1} = F1signals{i,1}(1:6000,6);
end
```

```

%F1signals =
[F1ObsvErrorsignals,F1Currentsignals,F1Thetasignals,F1Omegasignals,F1Positionsignals,F1Speedsignals];
F1signals = [F1ObsvErrorsignals,F1Currentsignals,F1Speedsignals];

%% Load data Lub50 %%
dir3 =
'D:\SUT\Mdegree\Master_Thresiss\project_leadscrew\mathmodel_leadcrew\Data\FDI\DATA\Starved
50%';
for i = 1:120
    F2con(i) = load([dir3 'test' num2str(i) '.mat']);
end
F2signals = struct2table(F2con);
F2signals = table2cell(F2signals);
for i = 1:120
    F2ObsvErrorsignals{i,1} = F2signals{i,1}(1:6000,1);
    F2Currentsignals{i,1} = F2signals{i,1}(1:6000,2);
    F2Thetasignals{i,1} = F2signals{i,1}(1:6000,3);
    F2Omegasignals{i,1} = F2signals{i,1}(1:6000,4);
    F2Positionsignals{i,1} = F2signals{i,1}(1:6000,5);
    F2Speedsignals{i,1} = F2signals{i,1}(1:6000,6);
end
%F2signals =
[F2ObsvErrorsignals,F2Currentsignals,F2Thetasignals,F2Omegasignals,F2Positionsignals,F2Speedsignals];
F2signals = [F2ObsvErrorsignals,F2Currentsignals,F2Speedsignals];

%% Load data Lub25 %%
dir4 =
'D:\SUT\Mdegree\Master_Thresiss\project_leadscrew\mathmodel_leadcrew\Data\FDI\DATA\Starved
25%';
for i = 1:120
    F3con(i) = load([dir4 'test' num2str(i) '.mat']);
end
F3signals = struct2table(F3con);
F3signals = table2cell(F3signals);
for i = 1:120
    F3ObsvErrorsignals{i,1} = F3signals{i,1}(1:6000,1);
    F3Currentsignals{i,1} = F3signals{i,1}(1:6000,2);
    F3Thetasignals{i,1} = F3signals{i,1}(1:6000,3);
    F3Omegasignals{i,1} = F3signals{i,1}(1:6000,4);
    F3Positionsignals{i,1} = F3signals{i,1}(1:6000,5);
    F3Speedsignals{i,1} = F3signals{i,1}(1:6000,6);
end

```



```

%F3signals =
[F3ObsvErrorsignals,F3Currentsignals,F3Thetasignals,F3Omegasignals,F3Positionsignals,F3Speedsignals];
F3signals = [F3ObsvErrorsignals,F3Currentsignals,F3Speedsignals];

%% Load data Lub0 %%
dir5 =
'D:\SUT\Mdegree\Master_Thesis\project_leadscrew\mathmodel_leadcrew\Data\FDI\DATA\Starved
0%';
for i = 1:120
    F4con(i) = load([dir5 'test' num2str(i) '.mat']);
end
F4signals = struct2table(F4con);
F4signals = table2cell(F4signals);
for i = 1:120
    F4ObsvErrorsignals{i,1} = F4signals{i,1}(1:6000,1);
    F4Currentsignals{i,1} = F4signals{i,1}(1:6000,2);
    F4Thetasignals{i,1} = F4signals{i,1}(1:6000,3);
    F4Omegasignals{i,1} = F4signals{i,1}(1:6000,4);
    F4Positionsignals{i,1} = F4signals{i,1}(1:6000,5);
    F4Speedsignals{i,1} = F4signals{i,1}(1:6000,6);
end
%F4signals =
[F4ObsvErrorsignals,F4Currentsignals,F4Thetasignals,F4Omegasignals,F4Positionsignals,F4Speedsignals];
F4signals = [F4ObsvErrorsignals,F4Currentsignals,F4Speedsignals];

%% Combine data %%
Signals = [Hsignals;F1signals;F2signals;F3signals;F4signals];

%% feature extraction %%
for i = 1:600
    ObsvErrorSixma{i,1} = std(Signals{i,1});
    ObsvErrorRootMean{i,1} = rms(Signals{i,1});
    ObsvErrorCrest{i,1} = peak2rms(Signals{i,1});
    ObsvErrorSkew{i,1} = skewness(Signals{i,1});
    ObsvErrorKur{i,1} = kurtosis(Signals{i,1});

    CurrentSixma{i,1} = std(Signals{i,2});
    CurrentRootMean{i,1} = rms(Signals{i,2});
    CurrentCrest{i,1} = peak2rms(Signals{i,2});
    CurrentSkew{i,1} = skewness(Signals{i,2});
    CurrentKur{i,1} = kurtosis(Signals{i,2});

```

```

% ThetaSixma{i,1} = std(Signals{i,3});
% ThetaRootMean{i,1} = rms(Signals{i,3});
% ThetaSkew{i,1} = skewness(Signals{i,3});
% ThetaKur{i,1} = kurtosis(Signals{i,3});

% OmegaSixma{i,1} = std(Signals{i,4});
% OmegaRootMean{i,1} = rms(Signals{i,4});
% OmegaSkew{i,1} = skewness(Signals{i,4});
% OmegaKur{i,1} = kurtosis(Signals{i,4});

% PositionSixma{i,1} = std(Signals{i,5});
% PositionRootMean{i,1} = rms(Signals{i,5});
% PositionSkew{i,1} = skewness(Signals{i,5});
% PositionKur{i,1} = kurtosis(Signals{i,5});

SpeedSixma{i,1} = std(Signals{i,3});
SpeedRootMean{i,1} = rms(Signals{i,3});
SpeedCrest{i,1} = peak2rms(Signals{i,3});
SpeedSkew{i,1} = skewness(Signals{i,3});
SpeedKur{i,1} = kurtosis(Signals{i,3});
end

% Sixma = [ObsvErrorSixma,CurrentSixma,ThetaSixma,OmegaSixma,PositionSixma,SpeedSixma];
% Skew = [ObsvErrorSkew,CurrentSkew,ThetaSkew,OmegaSkew,PositionSkew,SpeedSkew];
% Kur = [ObsvErrorKur,CurrentKur,ThetaKur,OmegaKur,PositionKur,SpeedKur];
% RootMean =
[ObsvErrorRootMean,CurrentRootMean,ThetaRootMean,OmegaRootMean,PositionRootMean,SpeedRootMean];

Sixma = [ObsvErrorSixma,CurrentSixma,SpeedSixma];
Crest = [ObsvErrorCrest,CurrentCrest,SpeedCrest];
Kur = [ObsvErrorKur,CurrentKur,SpeedKur];
RootMean = [ObsvErrorRootMean,CurrentRootMean,SpeedRootMean];
Skew = [ObsvErrorSkew,CurrentSkew,SpeedSkew];
% Sixma = [CurrentSixma,OmegaSixma];
% Skew = [CurrentSkew,OmegaSkew];
% Kur = [CurrentKur,OmegaKur];
% RootMean = [CurrentRootMean,OmegaRootMean];

% Sixma = [OmegaSixma,SpeedSixma];
% Skew = [OmegaSkew,SpeedSkew];
% Kur = [OmegaKur,SpeedKur];
% RootMean = [OmegaRootMean,SpeedRootMean];
%% training data %%
Input = [Sixma,Kur,Crest,RootMean];

```

```
Input = cell2mat(Input);  
%% creat target %%  
for i = 1:120  
    A(i,1) = 1;  
    A(i,2) = 0;  
    A(i,3) = 0;  
    A(i,4) = 0;  
    A(i,5) = 0;  
  
    B(i,1) = 0;  
    B(i,2) = 1;  
    B(i,3) = 0;  
    B(i,4) = 0;  
    B(i,5) = 0;  
  
    C(i,1) = 0;  
    C(i,2) = 0;  
    C(i,3) = 1;  
    C(i,4) = 0;  
    C(i,5) = 0;  
  
    D(i,1) = 0;  
    D(i,2) = 0;  
    D(i,3) = 0;  
    D(i,4) = 1;  
    D(i,5) = 0;  
  
    E(i,1) = 0;  
    E(i,2) = 0;  
    E(i,3) = 0;  
    E(i,4) = 0;  
    E(i,5) = 1;  
  
end  
Target = [A;B;C;D;E];
```



## ค.2 โปรแกรมการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

```

x = Input';
t = Target';

% Choose a Training Function
% For a list of all training functions type: help ntrain
% 'trainlm' is usually fastest.
% 'trainbr' takes longer but may be better for challenging problems.
% 'trainscg' uses less memory. Suitable in low memory situations.
% Scaled conjugate gradient backpropagation.
% Create a Pattern Recognition Network
hiddenLayerSize = 100;
net = patternnet(hiddenLayerSize);
% Setup Division of Data for Training, Validation, Testing
net.divideParam.trainRatio = 70/100;
net.divideParam.valRatio = 15/100;
net.divideParam.testRatio = 15/100;
%view(net)
Error = 30;
count = 0;
while Error >= 3
    count = count + 1;
    if Error >= 3
        % Train the Network
net.trainFcn = 'trainscg';
[net,tr] = train(net,x,t);
        % Test the Network
y = net(x);
e = gsubtract(t,y);
    end
end

```

```
performance = perform(net,t,y);
tind = vec2ind(t);
yind = vec2ind(y);
percentErrors = sum(tind ~= yind)/numel(tind);
Error = percentErrors*100
    else
    % View the Network
    view(net)

    figure, plotperform(tr)
    figure, plottrainstate(tr)
    figure, ploterrhist(e)
    figure, plotconfusion(t,y)
    figure, plotroc(t,y)
    end
end
disp(count)
```



ภาควิชา

รายละเอียดของเซ็นเซอร์และระบบขับเคลื่อนแนวแกน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

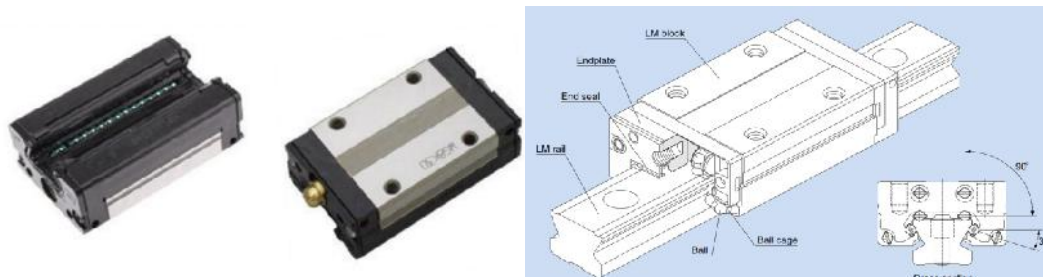
## General specifications

<b>Power supply</b>	5 V $\pm$ 5%	120 mA (typical), 200 mA RGH22Y, S and H. <b>NOTE:</b> Current consumption figures refer to unterminated readheads. For digital outputs a further 25 mA per channel pair (e.g. A+, A-) will be drawn when terminated with 120 $\Omega$ . For analogue outputs a further 20 mA will be drawn when terminated with 120 $\Omega$ . Power from a 5 V dc supply complying with the requirements for SELV of standard IEC BS EN 60950-1.	
	Ripple	200 mVpp @ frequency up to 500 kHz maximum.	
<b>Temperature</b>	Storage	-20 °C to +70 °C	
	Operating	0 °C to +55 °C	
<b>Humidity</b>		95% relative humidity (non-condensing) to EN 60068-2-78	
<b>Sealing</b>		IP50	
<b>Acceleration</b>	Operating	600 m/s <sup>2</sup> , 3 axes	
<b>Shock</b>	Non-operating	1000 m/s <sup>2</sup> , 6 ms, ½ sine, 3 axes	
<b>Vibration</b>	Operating	100 m/s <sup>2</sup> max @ 55 Hz to 2000 Hz, 3 axes	
<b>Mass</b>	Readhead	45 g	
	Cable	38 g/m	
<b>Cable</b>		12 core, double shielded, maximum diameter 4.7 mm. Flex life >20 × 10 <sup>6</sup> cycles at 50 mm bend radius.	
<b>Connector options</b>	<b>Code</b>	<b>Connector type</b>	<b>Application</b>
	D	15 way D type plug	RGH22D, X, Z, Y, H, P, O, R and S
	R	12 way circular plug	RGH22D, X, Z, Y, H, P, O, R and S
	L	15 way D type plug	RGH22A and B
	V	12 way circular plug	RGH22B
	W	12 way circular coupling	RGH22B
	F	untersminated cable	all readheads
	X	16 way in-line connector	all readheads

## Scale specifications

<b>Scale type</b>	RG320-S	Reflective gold plated steel tape with protective lacquer coating. Adhesive backing tape allows direct mounting to the machine substrate.
	RG320-P	Reflective gold plated steel tape with tough polyester coating for applications using harsh solvents. Adhesive backing tape allows direct mounting to the machine substrate.
<b>Scale period</b>		20 $\mu$ m
<b>Linearity</b>	RG320-S	-3 $\mu$ m/m
	RG320-P	-5 $\mu$ m/m
<b>Scale length</b>		Up to 50 m (>50 m by special order)
<b>Form (H x W)</b>	RG320-S	0.2 mm x 6 mm (includes adhesive)
	RG320-P	0.3 mm x 6.3 mm (includes adhesive)
<b>Substrate materials</b>		Metals, ceramics and composites with expansion coefficients between 0 and 22 $\mu$ m/m/°C (steel, aluminium, Invar, granite, ceramic etc.)
<b>Coefficient of thermal expansion</b>		Matches that of substrate material when scale ends are fixed by epoxy mounted end clamps
<b>End fixing</b>		Epoxy mounted end clamps (A-9523-4015) using 2 part epoxy adhesive (A-9531-0342). Scale end movement typically <1 $\mu$ m up to +40 °C.
<b>Temperature</b>	Operating	-10 °C to +120 °C
	Minimum installation	10 °C
	Storage	-20 °C to +70 °C
<b>Humidity</b>		95% relative humidity (non-condensing) to EN 60068-2-78

ง.2 รายละเอียดของลิเนียร์เบริ่ง



รูปที่ ง.1 ส่วนประกอบของลิเนียร์เบริ่ง

ตารางที่ ง.1 ข้อมูลการใช้สารหล่อลื่นของลิเนียร์เบริ่ง

Clean room	<ul style="list-style-type: none"> <li>- THK also offers a range of clean room-compatible grease products.</li> <li>• AFE-CA Grease (THK)</li> <li>• AFF Grease (THK)</li> <li>• L100 Grease (THK)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Two reasons for the generation of dust are metal-to-metal contact and mutual friction between rolling elements. THK offers a range of products with a cage for minimizing metal-to-metal contact and mutual friction between the rolling elements. Furthermore, the cage is also structured in a way that maintains the lubricity, making it suitable for use in clean rooms.</li> <li>- Anti-rust oil is applied as standard, so please specify if it is not required.</li> </ul>
------------	---	---

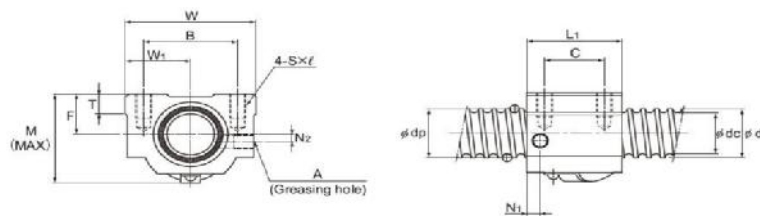
ตารางที่ ง.2 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของลิเนียร์เบริ่ง

Table5 Frictional Resistances ( $\mu$ ) of LM Systems

Types of LM systems	Representative types	Frictional resistance ( $\mu$ )
LM Guide	SSR, SHS, SRS, RSR, HSR, NR/NRS	0.002 to 0.003
	SRG, SRN	0.001 to 0.002



ง.3 รายละเอียดของระบบบอลสกรู



รูปที่ ง.2 ส่วนประกอบของบอลสกรู

ตารางที่ ง.3 ขนาดของบอลสกรูที่ใช้ในงานวิจัย

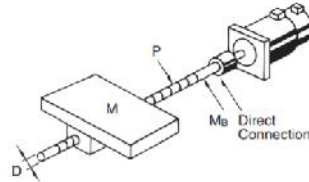
Screw shaft outer diameter d mm	Lead Ph mm	Model No.	Ball center-to-center diameter dp mm	Thread minor diameter dc mm	No. of loaded circuits Rows x turns	Basic load rating			Rigidity K N/μm	Nut dimensions											Axial clearance mm	Screw shaft inertial moment/mm <sup>2</sup>	Nut mass kg
						Dynamic C kN	Static Co kN	Dynamic K N/μm		Width W mm	Center Height F mm	Overall length L1 mm	Mounting hole			W1	T	M	N1	N2			
14	4	BNT1404-3.6	14.4	11.5	1x3.65	5.5	11.5	150	34	13	35	26	22	M4x7	17	6	30	6	2	M6x1	0.1	$2.96 \times 10^{-4}$	0.15
14	5	BNT1405-2.6	14.5	11.2	1x2.65	5	11.4	110	34	13	35	26	22	M4x7	17	6	31	6	2	M6x1	0.1	$2.96 \times 10^{-4}$	0.15
16	5	BNT1605-2.6	16.75	13.5	1x2.65	5.4	13.3	130	42	16	36	32	22	M5x8	21	21.5	32.5	6	2	M6x1	0.1	$5.05 \times 10^{-4}$	0.3
18	8	BNT1808-3.6	19.3	14.4	1x3.65	13.1	31	210	48	17	56	35	35	M6x10	24	10	44	8	3	M6x1	0.1	$8.09 \times 10^{-4}$	0.47
20	5	BNT2005-2.6	20.5	17.2	1x2.65	6	16.5	150	48	17	35	35	22	M6x10	24	9	39	5	3	M6x1	0.1	$1.23 \times 10^{-3}$	0.28
20	10	BNT2010-2.6	21.25	16.4	1x2.65	10.6	25.1	160	48	18	58	35	35	M6x10	24	9	46	10	2	M6x1	0.1	$1.23 \times 10^{-3}$	0.5
25	5	BNT2505-2.6	25.5	22.2	1x2.65	6.7	20.8	180	60	20	35	40	22	M8x12	30	9.5	45	7	5	M6x1	0.1	$3.01 \times 10^{-3}$	0.41
25	10	BNT2510-5.3	26.8	20.2	2x2.65	31.2	83.7	400	60	23	94	40	60	M8x12	30	10	55	10	0	M6x1	0.1	$3.01 \times 10^{-3}$	1.18
28	6	BNT2806-2.6	28.5	25.2	1x2.65	7	23.4	200	60	22	42	40	18	M8x12	30	10	50	8	0	M6x1	0.1	$4.74 \times 10^{-3}$	0.81
28	6	BNT2806-5.3	28.5	25.2	2x2.65	12.8	46.8	390	60	22	57	40	40	M8x12	30	10	50	8	0	M6x1	0.1	$4.74 \times 10^{-3}$	0.78
32	10	BNT3210-2.6	33.75	27.2	1x2.65	19.8	53.8	250	70	26	54	50	45	M8x12	35	12	62	10	0	M6x1	0.14	$8.08 \times 10^{-3}$	1.3
32	10	BNT3210-5.3	33.75	27.2	2x2.65	36	107.5	490	70	26	94	50	60	M8x12	35	12	62	10	0	M6x1	0.14	$8.08 \times 10^{-3}$	2.0
36	10	BNT3610-2.6	37	30.5	1x2.65	20.8	59.3	270	86	29	54	60	45	M10x16	4	17	67	11	0	M6x1	0.17	$1.29 \times 10^{-2}$	1.8
36	10	BNT3610-5.3	37	30.5	2x2.65	37.8	118.7	530	86	29	96	60	60	M10x16	43	17	67	11	0	M6x1	0.17	$1.29 \times 10^{-2}$	2.4
45	12	BNT4512-5.3	46.5	39.2	2x2.65	49.5	169	650	100	36	115	75	75	M10x16	50	20.5	80	13	0	M6x1	0.2	$3.16 \times 10^{-2}$	4.1

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## Sample Calculations

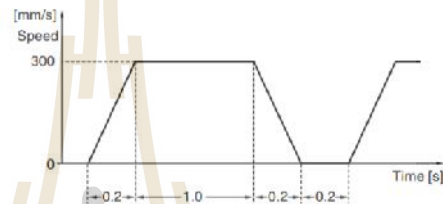
### 1. Machinery Selection

- Load Mass  $M = 5$  [kg]
- Ball Screw Pitch  $P = 10$  [mm]
- Ball Screw Diameter  $D = 20$  [mm]
- Ball Screw Mass  $M_b = 3$  [kg]
- Ball Screw Friction Coefficient  $\mu = 0.1$
- Since there is no decelerator,  $G = 1, \eta = 1$



### 2. Determining Operating Pattern

- One Speed Change
- Velocity for a Load Travel  $V = 300$  [mm/s]
- Strokes  $L = 360$  [mm]
- Stroke Travel Time  $t_S = 1.4$  [s]
- Acceleration/Deceleration Time  $t_A = 0.2$  [s]
- Positioning Accuracy  $A_p = 0.01$  [mm]



### 3. Calculation of Motor Shaft Conversion Load Inertia

Ball screw Inertia $J_b$	$J_b = \frac{M_b D^2}{8} \times 10^{-6}$	$J_b = \frac{3 \times 20^2}{8} \times 10^{-6} = 1.5 \times 10^{-4}$ [kg·m <sup>2</sup> ]
Load Inertia $J_w$	$J_w = M \left( \frac{P}{2\pi} \right)^2 \times 10^{-6} + J_b$	$J_w = 5 \times \left( \frac{10}{2 \times 3.14} \right)^2 \times 10^{-6} + 1.5 \times 10^{-4} = 1.63 \times 10^{-4}$ [kg·m <sup>2</sup> ]
Motor Shaft Conversion Load Inertia $J_L$	$J_L = G^2 \times (J_w + J_2) + J_1$	$J_L = J_w = 1.63 \times 10^{-4}$ [kg·m <sup>2</sup> ]

### 4. Load Torque Calculation

Torque against Friction Torque $T_w$	$T_w = \mu M g \frac{P}{2\pi} \times 10^{-3}$	$T_w = 0.1 \times 5 \times 9.8 \times \frac{10}{2 \times 3.14} \times 10^{-3} = 7.8 \times 10^{-3}$ [N·m]
Motor Shaft Conversion Load Torque $T_L$	$T_L = \frac{G}{\eta} \cdot T_w$	$T_L = T_w = 7.8 \times 10^{-3}$ [N·m]

### 5. Calculation of Rotation Speed

Rotations $N$	$N = \frac{60V}{P \cdot G}$	$N = \frac{60 \times 300}{10 \times 1} = 1800$ [r/min]
---------------	-----------------------------	--

### 6. Motor Temporary Selection [In case OMNUC U Series Servomotor is temporarily selected]

The Rotor/Inertia of the selected Servomotor is more than 1/30 <sup>th</sup> of a load	$J_M \geq \frac{J_L}{30}$	$\frac{J_L}{30} = \frac{1.63 \times 10^{-4}}{30} = 5.43 \times 10^{-6}$ [kg·m <sup>2</sup> ] Temporarily selected Model R88M-U20030 ( $J_M = 1.23 \times 10^{-5}$ ).
80% of the Rated Torque of the selected Servomotor is more than the load torque of the Servomotor shaft conversion value	$T_M \times 0.8 > T_L$	Rated Torque for R88M - U20030 Model from TM = 0.637 [N·m] $T_M \times 0.8 > T_L = 7.8 \times 10^{-3}$ [N·m]





ภาคผนวก จ

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

ธนศักดิ์ หวังด้อมกลาง ประธาน ชมเมืองปัก และจิระพล ศรีเสริฐผล. (2562) “การวิเคราะห์การสูญเสียพลังงานของชุดลิเนียร์เบริงที่บกพร่องในกระบวนการหยอดกาวและติดหัวอ่านเขียน” การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15 (E-NETT 15) ณ โรงแรม เดอะ กรีนเนอรี รีสอร์ท เขาใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา วันที่ 22-24 พฤษภาคม พ.ศ. 2562 จำนวน 9 หน้า.



รหัสบทความ

ECPE0044

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15  
22-24 พฤษภาคม 2562 จังหวัดนครราชสีมา



การวิเคราะห์การสูญเสียพลังงานของชุดลิเนียร์แบร์ริงที่บกพร่องในกระบวนการหยอดกาวและติด  
หัวอ่านเขียน

ENERGY LOSS ANALYSIS OF LINEAR BEARING FAILURES IN AUTOMATIC SLIDER ATTACHING  
PROCESS

ธนศักดิ์ หวังล้อมกลาง<sup>1</sup> ประชาน ชมเมืองปัก<sup>1,2</sup> และ จิระพล ศรีเสวีชุมพล<sup>2</sup>

<sup>1</sup>บริษัทเวสต์เทิร์น ดิจิตอล ประเทศไทย (จำกัด) 140 หมู่ 2 ถนนอนุสรณ์ท่าบดคลองจิก อำเภอบางปะอิน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13160  
<sup>2</sup>สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

[thelookak.pongkorn@gmail.com](mailto:thelookak.pongkorn@gmail.com), [natthan.chommuwanpongkorn@wdo.com](mailto:natthan.chommuwanpongkorn@wdo.com), [jiraphon@wdo.co.th](mailto:jiraphon@wdo.co.th)

บทคัดย่อ

ปัจจุบันหลายอุตสาหกรรมได้หาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตให้ได้มากที่สุด ซึ่งการประหยัดพลังงานที่ใช้ในการผลิตเป็นปัจจัยหนึ่งที่หลายบริษัทคำนึงถึง เช่นเดียวกับกับอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็วเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งาน ในกระบวนการผลิตหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่เครื่องหยอดกาวและติดหัวอ่านเขียนแบบอัตโนมัติ (Auto Core Adhesive Mounter Machine, ACAM) จะใช้สำหรับหยอดกาวและติดหัวอ่านเขียนลงบนแขนจับหัวอ่าน โดยใช้ลิเนียร์มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนชิ้นส่วนไปยังตำแหน่งที่ต้องการ แต่เนื่องจากความเร็วในการทำงานที่สูงและเครื่องจักรทำงานอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาปัญหาที่เกิดขึ้นคือความเสียหายของลิเนียร์แบร์ริงที่ส่งผลให้มอเตอร์รับภาระโหลดมากขึ้น เพื่อรักษาความเร็วให้ได้ตามต้องการลิเนียร์มอเตอร์ต้องใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทำให้ต้นทุนการผลิตมากขึ้นตามไปด้วย งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการวิเคราะห์การสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นจากความบกพร่องของลิเนียร์แบร์ริง โดยการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและขนาดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ในการศึกษาได้จำลองสภาพที่ลิเนียร์แบร์ริงเกิดข้อบกพร่อง 5 กรณีเปรียบเทียบกับสภาพปกติ และทดสอบที่ความเร็ว 0.25, 0.50 และ 1.00 เมตรต่อวินาที ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อลิเนียร์มอเตอร์ทำงานในสภาพที่ลิเนียร์แบร์ริงเกิดข้อบกพร่องจะมีการใช้กระแสไฟฟ้ามากขึ้น โดยพบว่าความเร็วที่อัตราการผลิต 0.50 เมตรต่อวินาที ของเครื่องจักรในสายการผลิตปัจจุบันมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 594,323.29 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี เมื่อชุดลิเนียร์แบร์ริงเกิดข้อบกพร่องเครื่องจักรจะใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเป็น 681,890.25 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 14.74 เปอร์เซ็นต์จากสภาพปกติ และผลจากการวัดการสั่นสะเทือนแสดงให้เห็นว่าขนาดการสั่นสะเทือนในแต่ละกรณีแตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังนั้นหากมีการประยุกต์ใช้เทคนิคตรวจจับข้อบกพร่อง (Fault Detection and Isolation) ของชุดลิเนียร์แบร์ริง จะสามารถรู้และทำการแก้ไขสาเหตุของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับชุดลิเนียร์แบร์ริงก่อนส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นส่วนอื่น ๆ รวมไปถึงสามารถลดการสิ้นเปลืองพลังงานของเครื่องจักรได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำหลัก: ข้อบกพร่องของลิเนียร์แบร์ริง; การประหยัดพลังงาน; ลิเนียร์มอเตอร์; การตรวจจับและระบุข้อบกพร่อง

**Abstract**

Recently, in many industries increase in the efficiency of the production process has made it possible for the reduction of unit costs, using energy-saving techniques. The Hard Disk Drive (HDD) industry is rapidly growing up to the customers requirement. The movement of Auto Core Adhesive Mounter Machine (ACAM) is used in the linear motors to drive the work pieces to the desired position for dispensing an adhesive and attaching the read/write head onto the suspension. The linear motor operates at high speed and continuous time. Therefore, failure in the linear bearing can occur and thus effecting the load increases. In order to maintain speed as needs, the linear motor requires more power, resulting in higher production costs for electricity consumption as well. This research presented the analysis of energy losses caused by the faulty linear bearing by measuring the linear motor current and vibration signal. The condition of linear bearing was simulated 5 cases compare with the healthy condition and test speed, referring to the actual production process is 0.25, 0.50 and 1.00 m/s. The result indicates that when the linear motor operated in the faulty bearing situation the current will be increased. Analysis of the production rate at 0.50 m/s, which refers to the actual speed in the production line currently, the machine has the electricity consumption 594,323.29 kWh/year. When the linear bearing is faulty the machine will consume more energy to 681,890.25 kWh/year or increase 14.74% more than when the machine is in a healthy condition. In addition, the vibration result, illustrated clearly the separation of each linear bearings condition. Accordingly, by applying an in- fault detection and isolation technique to the linear bearings, it will be able to detect and locate the causes of the faults that occur. This will result in controlling the damage to the linear bearings and other parts of the machine, and also have the ability to reduce the energy consumption of the machine.

**Keywords:** Linear bearing fault; Energy savings; Linear motor; Fault detection and isolation.

**1. บทนำ**

เนื่องจากอุตสาหกรรมในประเทศไทยมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง [1] ความต้องการพลังงานไฟฟ้าของประเทศไทยแนวโน้มสูงขึ้นทุกปี ทั้งนี้เพื่อตอบสนองความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจโดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมที่มีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าถึงร้อยละ 37.1 ของการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งประเทศ [2] ในปัจจุบันเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตมีการพัฒนาและก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว ทำให้ในบางอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์เริ่มมีการนำเทคโนโลยีใหม่ๆ มาปรับใช้เพื่อเพิ่มอัตราการผลิตให้สูงขึ้น ดังนั้นจึงหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่ใช้เครื่องจักรที่มีความแม่นยำและความเร็วในการเคลื่อนที่สูงมาใช้ในกระบวนการส่งผลทำให้เกิดการใช้ทรัพยากรทางด้านเชื้อเพลิงและด้านพลังงานเป็นอย่างมากในกระบวนการผลิต [3] แนวทางการประหยัดพลังงานอย่างหนึ่งที่มีให้เห็นคือ มาตรการประหยัดด้านพลังงานที่ถูกนำมาบรรณรณคในบริษัทหลายแห่ง ซึ่งการพิจารณาความเหมาะสมคุ่มค่าของการใช้พลังงาน โดย

สามารถที่จะใช้ดัชนีตรวจติดตามการใช้พลังงานต่อปริมาณการผลิตที่เรียกว่า ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption : SEC) มาติดตามประสิทธิภาพการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตได้ [4] ในอุตสาหกรรมการผลิตด้วยขั้วคอยล์มอเตอร์ (Voice coil motor) การวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงการใช้พลังงานของห้องสะอาด (Cleanroom) ได้ถูกนำมาศึกษาด้วยวิธีการเชิงสถิติเนื่องจากการควบคุมสภาวะแวดล้อมภายในห้อง เช่น ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และอุณหภูมิ ต้องเป็นไปตามเงื่อนไขทำให้ระบบปรับอากาศต้องทำงานตลอดเวลา [5] ตลอดจนกลุ่มอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ ก็มีระบบการวางแผนและควบคุมการใช้พลังงาน เนื่องจากขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่เกินกว่า 1,175 kVA ทำให้ในบริษัทต้องวางแผนจัดการพลังงานให้อยู่ในข้อกำหนดของกฎหมายเพื่อไม่ให้เสียค่าปรับ [6] จะเห็นว่าในภาคอุตสาหกรรมมีแนวทางในการประหยัดพลังงานไฟฟ้า ซึ่งคำนึงถึงการลดต้นทุนการผลิต ดังนั้นการประหยัดพลังงานเป็นปัจจัยสำคัญที่จะทำให้

บริษัททำกำไรได้สูงสุด และกระบวนการผลิตเกิดประสิทธิภาพมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งภาคธุรกิจอุตสาหกรรมที่มีการแข่งขันสูง จึงจำเป็นต้องหาแนวทางประหยัดและลดต้นทุนด้านพลังงานลง เพื่อให้สามารถแข่งขันในตลาดโลกได้ เช่นเดียวกับอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีการแข่งขันที่สูงทั้งในด้านราคาและความรวดเร็วในการอ่านเขียนข้อมูล [7] ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นอุปกรณ์ชิ้นหนึ่งที่สามารถเก็บข้อมูลต่างๆ ของคอมพิวเตอร์เปรียบเสมือนส่วนความจำของคอมพิวเตอร์ ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นั้นมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการทำงานของการทำงานอ่านเขียนข้อมูล ซึ่งหนึ่งในส่วนประกอบที่สำคัญของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์คือหัวอ่านเขียนข้อมูลโดยในการผลิตหัวอ่านเขียนข้อมูลนั้นจะใช้เครื่องจักรแบบอัตโนมัติ โดยมีกระบวนการทำงานที่สำคัญ คือ หยอดกาวและติดหัวอ่านเขียน กระบวนการดังกล่าวจะทำโดยเครื่อง Auto Core Adhesive Mounter Machine (ACAM) แสดงดังในรูปที่ 1 ซึ่งการทำงานของเครื่องจักรจะใช้ชุดลิเนียร์มอเตอร์ (Linear motor) เป็นอุปกรณ์สำหรับเคลื่อนชิ้นงานไปยังตำแหน่งที่ต้องการก่อนจะทำการทำตำแหน่งอ้างอิงบนแขนจับหัวอ่านเขียนเพื่อหยอดกาวและติดหัวอ่านเขียนให้ตรงตามตำแหน่งที่ต้องการซึ่งส่วนที่สำคัญในการช่วยรองรับการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ก็คือชุดลิเนียร์แบร์ริง โดยตัวบนของลิเนียร์แบร์ริงจะติดตั้งชุดฟริกเจอร์สำหรับจับยึดชิ้นงาน ซึ่งลิเนียร์แบร์ริงจะทำหน้าที่รองรับน้ำหนักของชิ้นส่วนนี้ขณะขับเคลื่อน



รูปที่ 1 เครื่องหยอดกาวและติดหัวอ่านเขียนอัตโนมัติ

ดังนั้นจึงมีโอกาสที่ลิเนียร์แบร์ริงจะเกิดข้อบกพร่องในขณะเคลื่อนที่ ซึ่งในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจสอบ

ข้อบกพร่องของแบร์ริง การวิเคราะห์ค่าขอบของสัญญาณในโดเมนความถี่ถูกใช้ในการตรวจสอบความเสียหายของลูกบอลแบร์ริงโดยมีการประยุกต์ใช้ชุดข้อมูลในการแยกความแตกต่างของค่าขอบสัญญาณโดยวิธีที่ใช้สามารถวิเคราะห์กรณีที่ลูกบอลแบร์ริงเสียหายได้อย่างชัดเจนในขณะที่ความเร็วรอบมีค่าเปลี่ยนแปลง [8] การตรวจสอบข้อบกพร่องของลิเนียร์แบร์ริงของลิเนียร์มอเตอร์จากการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติถูกนำเสนอโดย [9] โดยสามารถตรวจสอบและระบุข้อบกพร่องของลิเนียร์แบร์ริงอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้วิธีการเรียนรู้แบบโครงข่ายประสาทเทียมถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบข้อบกพร่องของแบร์ริงในแฉะละกรณีโดยการสร้างโมเดลเพื่อจำแนกข้อมูลจากการวัด ซึ่งให้ความแม่นยำในการจำแนก 90 เปอร์เซ็นต์ [10,11]

งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์การสูญเสียพลังงานของชุดลิเนียร์แบร์ริงที่บกกพร่องในเครื่องหยอดกาวและติดหัวอ่านเขียนอัตโนมัติ โดยพิจารณาข้อบกพร่อง 5 กรณี ได้แก่ 1.สภาวะขาดสารหล่อลื่น 2.สภาวะลูกบอลแบร์ริงสูญหาย 3.สภาวะลูกบอลแบร์ริงเสียหาย 4.สภาวะลูกบอลแบร์ริงเสียหายและขาดสารหล่อลื่น และ 5.สภาวะลูกบอลแบร์ริงสูญหายและขาดสารหล่อลื่น เปรียบเทียบกับสภาวะปกติของชุดลิเนียร์แบร์ริง และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อบกพร่องและความเร็วของมอเตอร์ทั้ง 3 ระดับ คือ 0.25, 0.50 และ 1.00 เมตรต่อวินาที เพื่อให้ทราบถึงแนวโน้มการใช้พลังงานของชุดลิเนียร์มอเตอร์เมื่อลิเนียร์แบร์ริงเกิดข้อบกพร่องที่ความเร็วต่าง ๆ โดยวิเคราะห์จากปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้เมื่อลิเนียร์แบร์ริงเกิดข้อบกพร่องจะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลง จะส่งผลให้มอเตอร์รับภาระโหลดมากขึ้นและทำให้เครื่องจักรใช้พลังงานมากขึ้น ทำให้ใช้พลังงานสิ้นเปลือง ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้น

## 2. แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ลิเนียร์มอเตอร์และลิเนียร์แบร์ริง

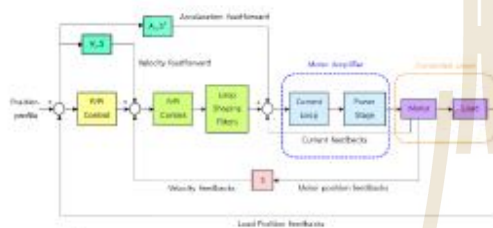
เครื่องจักรในกระบวนการหยอดกาวและติดหัวอ่านเขียนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์หรือเครื่อง ACAM จะใช้ลิเนียร์มอเตอร์แม่เหล็กไฟฟ้ากระแสตรง (Magnetic Linear DC motor) ดังรูปที่ 2 ในการเคลื่อนชิ้นงานไปยังตำแหน่งที่ต้องการเนื่องจากมีความรวดเร็วและสามารถควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ได้เป็นอย่างดีมีประสิทธิภาพ โดยการทำงานของลิเนียร์มอเตอร์จะอาศัยระบบควบคุมแบบ PIV (Proportional Integral Velocity Controller) ดังแสดงในรูปที่ 3 มาใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่





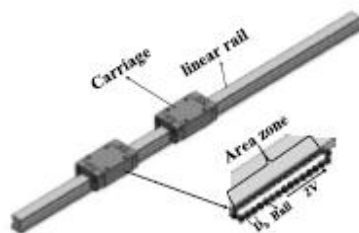
Magnetic Linear DC motor  
(Akribis SGL 100-AUM3-PS4J)

รูปที่ 2 ชุดลิเนียร์มอเตอร์



รูปที่ 3 ระบบควบคุมแบบ PIV ของลิเนียร์มอเตอร์

โดยโครงสร้างของระบบควบคุมจะมีการเพิ่มลูบการป้อนกลับความเร็ว (Velocity loop) ข้างในลูบของตำแหน่ง (Position loop) ซึ่งนอกจากการควบคุมตำแหน่งแล้วยังทำให้สามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ได้อย่างแม่นยำซึ่งจะส่งผ่านความเร็วที่ต้องการผ่านเทอมของตัวป้อนความเร็วไปข้างหน้า (Velocity feedforward term) ในการทำงานของตัวควบคุมเพื่อรักษาตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ให้เป็นไปตามต้องการภายในจะมีการชดเชยค่าความผิดพลาดโดยการปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้มอเตอร์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับภาระโหลดที่มอเตอร์กระทำอยู่ ณ ตอนนั้น ซึ่งส่วนประกอบสำคัญที่ช่วยให้มอเตอร์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพคือลิเนียร์แบร์ริง ดังแสดงในรูปที่ 4 ทำหน้าที่รองรับน้ำหนักของโหลดและช่วยให้การเคลื่อนที่มีความรวดเร็วและต่อเนื่อง



รูปที่ 4 แสดงองค์ประกอบของลิเนียร์แบร์ริง

## 2.2 การตรวจจับและระบุข้อบกพร่อง (Fault Detection and Isolation; FDI)

การตรวจจับและระบุตำแหน่งของข้อบกพร่องเป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์และประเมินสภาพการทำงานที่ผิดปกติของเครื่องจักร แบ่งออกเป็น 2 วิธีคือการใช้แบบจำลองของระบบ (Model based approach) และการตรวจสอบสภาพการทำงานของเครื่องจักร (Condition based monitoring) บนพื้นฐานของการวัดและวิเคราะห์สัญญาณ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเน้นการใช้เทคนิคการตรวจจับและระบุข้อบกพร่องแบบการตรวจสอบสภาพการทำงานของเครื่องจักร โดยการวัดค่าปริมาณการใช้กระแสของลิเนียร์มอเตอร์ที่ทำงานในสภาวะที่ลิเนียร์แบร์ริงเกิดข้อบกพร่องเทียบกับสภาวะการทำงานปกติ และการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนของลิเนียร์มอเตอร์เมื่อลิเนียร์แบร์ริงเกิดข้อบกพร่องในกรณี ต่างๆ ข้อมูลการใช้กระแสและการสั่นที่เกิดขึ้นจะนำไปสู่การบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ (Predictive Maintenance) เพื่อลดผลกระทบต่อความเสียหายของชิ้นส่วนอื่นๆ ซึ่งจะส่งผลให้เครื่องจักรทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และการสิ้นเปลืองพลังงานของเครื่องจักรลดน้อยลง

## 2.3 การคำนวณอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า

ปริมาณการใช้พลังงานของเครื่องหยอดกาวและตัดหัวอ่านเขียน จะเน้นวิเคราะห์เฉพาะลิเนียร์มอเตอร์ซึ่งอ้างอิงจากการทำงานจริงของเครื่องจักรในกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์โครมีมีเครื่องหยอดกาวและตัดหัวอ่านอัตโนมัติในสายการผลิตทั้งหมด 48 เครื่อง ในแต่ละเครื่องจะติดตั้งลิเนียร์มอเตอร์ 4 แกน และลิเนียร์มอเตอร์มีการทำงานอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ซึ่งการคำนวณปริมาณการใช้พลังงานหาได้จากสมการที่ 1 [12] ดังนี้

$$P = I \times V \quad (1)$$

เมื่อ  $P$  คือ กำลังไฟฟ้า (วัตต์)

$I$  คือ กระแสไฟฟ้าของลิเนียร์มอเตอร์ (แอมแปร์)

$V$  คือ แรงดันไฟฟ้าของลิเนียร์มอเตอร์ (โวลต์)

โดยหากพิจารณาลิเนียร์มอเตอร์ทั้งหมดในกระบวนการผลิต ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อปีหาได้จากสมการที่ 2 ซึ่งสามารถประเมินค่าใช้จ่ายด้านพลังงานโดยรวมของเครื่องจักรในกระบวนการผลิตได้

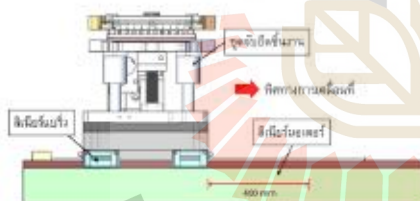
หน่วยการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อปี (กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี) =  
กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์) x จำนวนแกนของมอเตอร์ x จำนวน  
เครื่องจักร x 8640 ชั่วโมงต่อปี (2)

โดยที่ จำนวนแกนของมอเตอร์ = 4 แกน  
จำนวนเครื่องจักร = 48 เครื่อง  
ชั่วโมงการทำงานต่อวัน = 24 ชั่วโมง  
จำนวนวันใน 1 เดือน = 30 วัน

3. การทดลอง

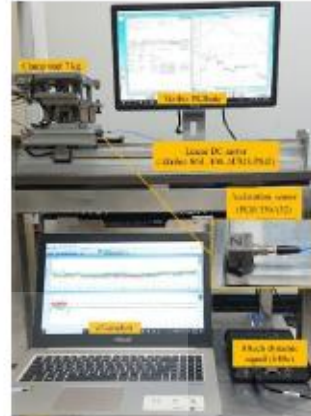
3.1 ออกแบบการทดลองและเก็บข้อมูล

การทดลองจะใช้ลิเนียร์มอเตอร์แม่เหล็กไฟฟ้ากระแสตรง (Magnetic Linear DC motor) รุ่น Akribis SGL 100-AUM3-PS4.J ที่ติดตั้งอยู่ในเครื่องหยอดกาแฟและตัดหัวอ่านเขียนอัตโนมัติ และชุดรองรับการเคลื่อนที่ของลิเนียร์มอเตอร์จะมี ลิเนียร์แบร์ริง รุ่น SGL 100-AUM3-PS4.J ซึ่งมีการใช้งานใน กระบวนการผลิตปัจจุบัน สำหรับการทดสอบชุดจับยึด ชิ้นงาน (Clamping unit) จะถูกติดตั้งไว้ด้านบนของลิเนียร์ แบร์ริง ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งทำให้ภาระกรรมโหลดโดยรวมที่ กระทำกับลิเนียร์แบร์ริงจะอยู่ที่ 7 กิโลกรัม



รูปที่ 5 ส่วนประกอบของชุดทดลอง

ในการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อเก็บข้อมูล แสดงในรูปที่ 6 จะทำการ เก็บค่ากระแสที่ลิเนียร์มอเตอร์ใช้จากโปรแกรม Akribis โดย ตั้งค่าพารามิเตอร์ของโปรแกรมตาม เครื่องจักรใน กระบวนการผลิต และการวัดการสั่นสะเทือนจะใช้อุปกรณ์วัด สัญญาณพลวัตการสั่น (Dynamic signal analyst) รุ่น IO-tech 640u และหัววัดการสั่นสะเทือนแบบความเร่ง 3 แกน (3 axis acceleration sensor) ร่วมกับโปรแกรม eZ-Analyst เพื่อวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน



รูปที่ 5 ชุดการทดลอง

สำหรับข้อมูลการทดลองจะพิจารณาความบกพร่องที่เกิด ขึ้นกับลิเนียร์แบร์ริงจำนวน 5 กรณีเปรียบเทียบกับสภาวะ ปกติ ได้แก่ สภาวะลูกบอลเบร้งเสียหายหนึ่งลูก, สภาวะลูก บอลเบร้งสูญหายหนึ่งลูก, สภาวะการขาดสารหล่อลื่น, สภาวะลูกบอลเบร้งเสียหายหนึ่งลูกร่วมกับการขาดสารหล่อ ลื่น และสภาวะลูกบอลเบร้งสูญหายหนึ่งลูกร่วมกับการขาด สารหล่อลื่น ซึ่งในแต่ละกรณีจะทดลอง 3 ความเร็วของ มอเตอร์คือ 0.25, 0.50 และ 1.00 เมตรต่อวินาที โดยที่ระยะ การเคลื่อนที่ของลิเนียร์มอเตอร์ในแต่ละความเร็วจะอยู่ที่ 400 มิลลิเมตร ขั้นตอนในการทดลองแสดงดังรูปที่ 6 โดย ข้อมูลของกระแสไฟฟ้าที่ลิเนียร์มอเตอร์ใช้ในแต่ละกรณีจะถูก นำไปวิเคราะห์ปริมาณการใช้พลังงานต่อไป



รูปที่ 6 ขั้นตอนการทดลอง

3.2 ลักษณะข้อบกพร่องของลิเนียร์แบร์ริง

3.2.1 กรณีลิเนียร์แบร์ริงสภาพปกติ

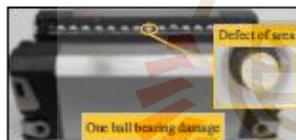
ลิเนียร์แบร์ริงในสภาวะปกติจะต้องมีสารหล่อลื่นที่เหมาะสมเพื่อช่วยลดแรงเสียดทานทำให้ลิเนียร์มอเตอร์ทำงานได้มีประสิทธิภาพ และลูกบอลแบร์ริงในรางแต่ละด้านจะมีทั้งหมด 32 ลูก ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ลิเนียร์แบร์ริงในสภาวะปกติ

3.2.2 กรณีลูกบอลแบร์ริงเสียหาย

การจำลองความเสียหายที่เกิดกับลูกบอลแบร์ริงทำโดยการขัดลูกบอลแบร์ริงให้เกิดรอยหยาบที่ไม่สม่ำเสมอ ผิวโดยมีพื้นที่ความเสียหายเท่ากับ 1.327 ตารางมิลลิเมตร จำนวน 1 ลูก ดังแสดงในรูปที่ 8 เพื่อสร้างข้อบกพร่องทำให้การหมุนของลูกบอลแบร์ริงไม่ต่อเนื่องในขณะที่ลิเนียร์มอเตอร์เคลื่อนที่



รูปที่ 8 ลิเนียร์แบร์ริงในสภาวะลูกบอลแบร์ริงเสียหายหนึ่งลูก

3.2.3 กรณีลูกบอลแบร์ริงสูญหาย

ลิเนียร์แบร์ริงที่รองรับการเคลื่อนที่จะมีการทำงานต่อเนื่องภายใต้การกระแสรวมไหลที่กระทำอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงมีโอกาสสูงที่ลูกบอลแบร์ริงที่ถูกแรงกดจะหลุดออกจากราง ซึ่งในการทดลองจะจำลองสภาวะของลูกบอลแบร์ริงสูญหายโดยจะทำการนำลูกบอลแบร์ริงออก 1 ลูก ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ลิเนียร์แบร์ริงในสภาวะลูกบอลแบร์ริงสูญหายหนึ่งลูก

3.2.4 กรณีลิเนียร์แบร์ริงสภาพขาดสารหล่อลื่น

สารหล่อลื่นในลิเนียร์แบร์ริงมีความสำคัญอย่างมากเนื่องจากช่วยลดแรงเสียดทานในการเคลื่อนที่และทำให้การเคลื่อนที่มีความราบรื่นขณะทำงาน โดยหากลิเนียร์แบร์ริงขาดสารหล่อลื่นหรือมีปริมาณที่ไม่เพียงพอจะทำให้เกิดแรงเสียดทานในระหว่างการเคลื่อนที่ซึ่งก่อให้เกิดความร้อน จนนำไปสู่ความเสียหายของลิเนียร์แบร์ริงได้ ในการทดลองจึงได้จำลองการทำงานในสภาวะที่ไม่มีสารหล่อลื่นโดยนำสารหล่อลื่นออกและใช้น้ำยาทำความสะอาดไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) กับเครื่องทำความสะอาดอัลตราโซนิก ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 การกำจัดสารหล่อลื่นออกจากลิเนียร์แบร์ริง

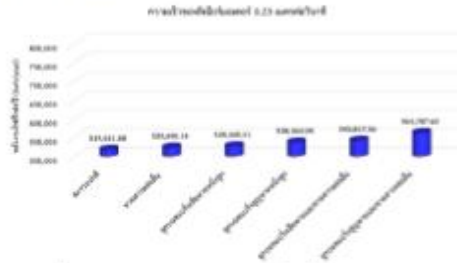
3.2.5 กรณีลิเนียร์แบร์ริงมีสภาพบกพร่องมากกว่า 1 กรณี

ในกระบวนการผลิตข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับลิเนียร์แบร์ริงสามารถเกิดขึ้นได้หลายจุดพร้อมกันเนื่องจากเมื่อแบร์ริงทำงานในสภาวะที่มีข้อบกพร่องอย่างหนึ่งเช่น การขาดสารหล่อลื่น อาจส่งผลให้เกิดการเสียดสีของลูกบอลแบร์ริงกับรางการเคลื่อนที่ทำให้ลูกบอลและรางเกิดความเสียหายได้ ในงานวิจัยนี้จึงได้เสนอสถานการณ์ที่แบร์ริงทำงานแบบที่เกิดข้อบกพร่องมากกว่าหนึ่งอย่าง โดยจะจำลอง 2 กรณีคือ สภาพขาดสารหล่อลื่นและลูกบอลแบร์ริงเสียหาย และสภาพขาดสารหล่อลื่นและลูกบอลแบร์ริงสูญหาย

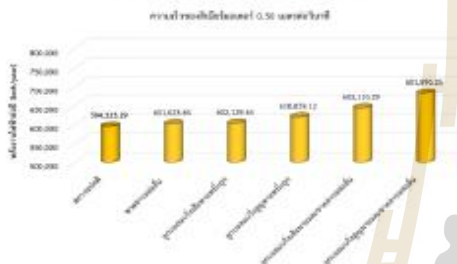
4. ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์อัตราการใช้พลังงาน

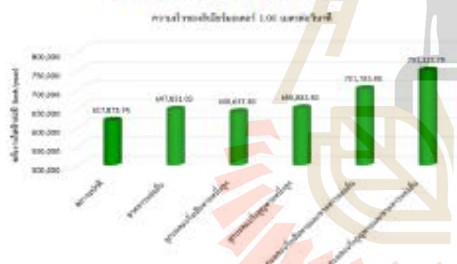
จากการทดลองจำลองลักษณะของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับลิเนียร์แบร์ริง 5 กรณีเปรียบเทียบกับสภาวะการทำงานปกติ ซึ่งในการเก็บรวบรวมข้อมูลแต่ละกรณีจะพิจารณา 3 ความเร็วของลิเนียร์มอเตอร์ คือ 0.25, 0.50 และ 1.00 เมตรต่อวินาที เพื่อวิเคราะห์ปริมาณการใช้พลังงานของเครื่องจักรเมื่อทำงานในขณะแบร์ริงเกิดข้อบกพร่อง โดยผลการเปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละกรณี แสดงในรูปที่ 11-13



รูปที่ 11 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่เครื่องจักรใช้ต่อปีที่ความเร็ว 0.25 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 12 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่เครื่องจักรใช้ต่อปีที่ความเร็ว 0.50 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 13 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่เครื่องจักรใช้ต่อปีที่ความเร็ว 1.00 เมตรต่อวินาที

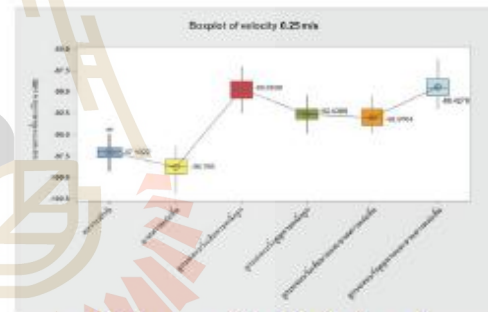
จากรูปที่ 11 ความเร็วของมอเตอร์ที่ 0.25 เมตรต่อวินาทีพบว่า ลิเนียร์แบบเรียงในสภาวะปกติจะใช้พลังงานน้อยที่สุดประมาณ 519,631.88 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี และเมื่อพิจารณาที่ข้อบกพร่องของลิเนียร์แบบเรียงทั้ง 5 กรณี จะเห็นว่าข้อบกพร่องของลิเนียร์แบบเรียงที่เกิดจากสภาวะการขาดสารหล่อลื่น, สภาวะลูกบอลบดบวมหรือเสียหาย, สภาวะลูกบอลเสียหายและสภาวะลูกบอลเสียหายและไม่มีสารหล่อลื่นมีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นตามลำดับ โดยการที่ใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นสูงสุดคือ 8.5 เปอร์เซ็นต์

วิเคราะห์รูปที่ 12 ความเร็วของมอเตอร์ที่ 0.50 เมตรต่อวินาที ซึ่งความเร็วของกระบวนการผลิตชิ้นงานในปัจจุบัน การ

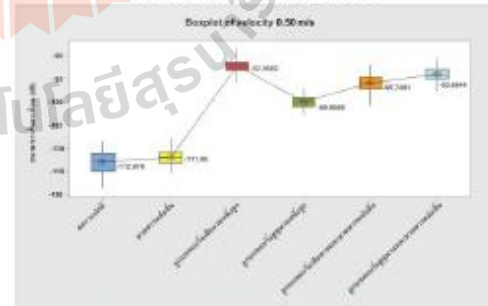
ใช้พลังงานในสภาวะปกติประมาณ 594,323.29 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี โดยหากพิจารณาเปรียบเทียบเมื่อลิเนียร์แบบเรียงเกิดข้อบกพร่องกรณีสภาวะลูกบดบวมหรือเสียหายและไม่มีสารหล่อลื่น พบว่าปริมาณการใช้พลังงานจะสูงขึ้นจากเดิมถึง 14.73 เปอร์เซ็นต์ และจากรูปที่ 13 แสดงให้เห็นว่า เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นเป็น 1.00 เมตรต่อวินาที จะทำให้มอเตอร์มีการใช้พลังงานที่มากขึ้นในการขับเคลื่อน ซึ่งสภาวะปกติของลิเนียร์แบบเรียงจะมีการใช้พลังงาน 617,873.74 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเร็วของมอเตอร์ในการเคลื่อนที่การใช้พลังงานจะเพิ่มมากขึ้นในทุกกรณี

4.2 การวิเคราะห์ผลการวัดการสั่นสะเทือน

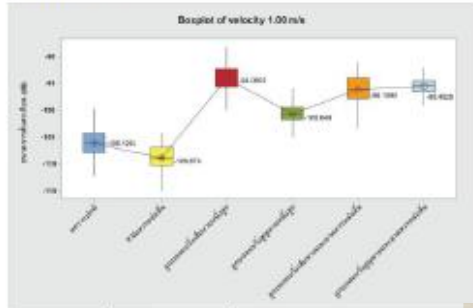
การวัดค่าขนาดการสั่นสะเทือนของลิเนียร์มอเตอร์ในขณะทำงาน เป็นแนวทางที่จะช่วยวิเคราะห์ถึงสภาพความเสียหายที่เกิดขึ้นของลิเนียร์มอเตอร์ได้ โดยพิจารณาในแต่ละความเร็วคือ 0.25, 0.50 และ 1.00 เมตรต่อวินาที ดังแสดงในรูปที่ 14-16 ดังนี้



รูปที่ 14 ขนาดการสั่นสะเทือนในแต่ละกรณี ที่ความเร็ว 0.25 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 15 ขนาดการสั่นสะเทือนในแต่ละกรณี ที่ความเร็ว 0.50 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 16 ขนาดการสั่นสะเทือนในแต่ละกรณี ที่ความเร็ว 1.00 เมตรต่อวินาที

รูปที่ 14-16 เปรียบเทียบลิเนียร์แบริงที่เกิดสภาพข้อบกพร่องจะส่งผลให้ขนาดการสั่นสะเทือนขณะที่ความเร็วของลิเนียร์มอเตอร์ทำงานมีแตกต่างกัน ซึ่งสภาวะที่ลิเนียร์แบริงขาดสารหล่อลื่นมีแนวโน้มใกล้เคียงกับสภาวะปกติ แต่หากพิจารณาที่ลักษณะของข้อบกพร่องอื่นๆ พบว่าขนาดการสั่นสะเทือนจะแตกต่างจากสภาวะปกติอย่างชัดเจน ทั้งนี้หากเปรียบเทียบในแต่ละความเร็ว การเพิ่มความเร็วของลิเนียร์มอเตอร์จะทำให้ขนาดการสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้นในกรณีที่ลูกบอลแบริงเสียหาย, ลูกบอลแบริงสูญเสีย และสภาวะที่เกิดร่วมกับการขาดสารหล่อลื่น ดังนั้นการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่าการวัดขนาดการสั่นสะเทือนสามารถใช้ตรวจจับและระบุสาเหตุของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับลิเนียร์แบริงได้

**5.อภิปรายผล**

ผลการศึกษาแนวโน้มการใช้พลังงานเมื่อลิเนียร์แบริงสภาพเกิดข้อบกพร่องทั้ง 5 กรณี ในกระบวนการหยุดถ่วงและตัดหัวอ่านเขียนข้อมูลของอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไครท์ ที่ความเร็วของมอเตอร์ในการขับเคลื่อนเท่ากับ 0.25, 0.50 และ 1.00 เมตรต่อวินาทีสอดคล้องกับกระบวนการผลิตจริง โดยใช้หลักการ Fault Detection and Isolation (FDI) ตรวจจับข้อบกพร่องเพื่อวิเคราะห์การใช้พลังงาน ได้แก่ กรณีสภาพขาดสารหล่อลื่น, กรณีลูกบอลแบริงสูญเสีย, กรณีลูกบอลแบริงเสียหาย, กรณีสภาพขาดสารหล่อลื่นร่วมกับลูกบอลแบริงเสียหาย และกรณีสภาพขาดสารหล่อลื่นร่วมกับลูกบอลแบริงสูญเสีย เปรียบเทียบกับสภาพปกติของลิเนียร์แบริง ตามลำดับ พบว่าแนวโน้มของการใช้พลังงานของกระบวนการผลิตได้ โดยการใช้พลังงานของมอเตอร์เรียงลำดับจากน้อยไปมากคือ 1.สภาพปกติของลิเนียร์แบริง

2.สภาพขาดสารหล่อลื่น 3.ลูกบอลแบริงเสียหาย 4.ลูกบอลแบริงสูญเสีย 5.สภาพการขาดสารหล่อลื่นและลูกบอลแบริงเสียหาย และ 6.สภาพการขาดสารหล่อลื่นและลูกบอลแบริงสูญเสีย และการเพิ่มความเร็วของมอเตอร์ การสูญเสียพลังงานจะเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ ชุดลิเนียร์แบริงที่เกิดข้อบกพร่องพร้อมกันทั้ง 2 กรณี การใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 8 – 21 เปอร์เซ็นต์ต่อปี เมื่อเทียบกับสภาพปกติของชุดลิเนียร์แบริงและการวัดสัญญาณขนาดการสั่นสะเทือนสามารถตรวจจับและระบุข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับลิเนียร์แบริงได้ ดังนั้นการตรวจจับข้อบกพร่องและประสิทธิภาพการทำงานของชุดลิเนียร์แบริงสามารถช่วยแจ้งเตือนให้ผู้ควบคุมสามารถแก้ปัญหาได้ทันก่อนจะเกิดความเสียหาย ลดการใช้พลังงาน และสามารถลดต้นทุนในกระบวนการผลิตหัวอ่านเขียนในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไครท์ได้

**6. กิตติกรรมประกาศ**

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก บริษัทเวสเทิร์น ดิจิตอล ประเทศไทย (จำกัด) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

**7.เอกสารอ้างอิง**

[1] ปารุวัฒน์ ชูวงศ์, วีระเดช ชีวพันธ์ชัย และ สุมล แซ่เซ่ง พิสิทธิ์สังฆการ (2558). การลดพลังงานไฟฟ้าในโรงงานตัดเหล็กแผ่น, วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต, ฉบับที่ 1, หน้า 42-52.

[2] วัจนชัย นิธิฤทธิไกร, สุชิน อรุณสวัสดิ์วงศ์ และ บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ (2556). การออกแบบระบบควบคุมการผลิตอัตโนมัติโดยใช้วิธีออสการ, วารสารวิจัยพลังงาน, ฉบับที่ 3, หน้า 57-71.

[3] พรรณิกา เกษมเจริญวงศ์ และ สุทัศน์ รัตนเกื้อกังวาน (2557). การศึกษาเส้นฐานอ้างอิงของการใช้พลังงานของอุตสาหกรรมผลิตสายไฟ, วารสารวิจัยพลังงาน, ฉบับที่ 1, หน้า 15-24.

[4] สุวิทย์ ภูลี และ ปารเมศ ชูติมา (2555). การปรับปรุงงานบำรุงรักษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในกระบวนการผลิต, วารสารวิจัยพลังงาน, ฉบับที่ 1, หน้า 30-46.

[5] เกศินี พรหมธิ (2555). การวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงการใช้พลังงานของห้องสะอาดด้วยวิธีการเชิงสถิติ กรณีศึกษาอุตสาหกรรมผลิต วอยซ์ คอยล์ มอเตอร์, วารสารวิจัยพลังงาน, ฉบับที่ 3, หน้า 24-35.

[6] อณาวิรุ์ เทียมเศวต และ สุทัศน์ รัตนเกื้อกังวาน (2557). ระบบการวางแผนและควบคุมการใช้พลังงานของอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์, วารสารวิจัยพลังงาน, ฉบับที่ 2, หน้า 1-13.

[7] Deeying J., Asawarungsangkul K., Chutima P., (2018). Multi-objective optimization on laser solder jet bonding process in head gimbal assembly using the response surface methodology, Optics & Laser Technology, Vol.98, pp.158-168.

[8] Guo, Y., Liu, T.W., Na, J. and Fung, R.F., (2012). Envelope order tracking for fault detection in rolling element bearings. Journal of Sound and Vibration, Vol.331(25), pp.5644-5654.

[9] Bianchini, C., Immovilli, F., Cocconcelli, M., Rubini, R., & Bellini, A. (2011). Fault detection of linear bearings in brushless AC linear motors by vibration analysis. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.58(5), pp.1684-1694.

[10] Lu, C., Wang, Z. and Zhou, B., (2017). Intelligent fault diagnosis of rolling bearing using hierarchical convolutional network-based health state classification. Advanced Engineering Informatics, Vol.32, pp.139-151.

[11] Prathan C., Siwanu L. and Jiraphon S., (2019). Fault Detection of Linear Bearing in Auto Core Adhesion Mounting Machine using Artificial Neural Network, WSEAS Transactions on Systems and Control, Vol.14, pp.31-42.

[12] Alexandra, V. M. (2006). Electric Power Systems: A Conceptual Introduction. A John Wiley & Sons, New Jersey.

## ประวัติผู้เขียน

นายชนศักดิ์ หวังล้อมกลาง เกิดเมื่อวันที่ 24 พฤศจิกายน 2538 ที่อำเภอโนนไทย จังหวัดนครราชสีมา เริ่มการศึกษาในระดับประถมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนบ้านหนองโพธิ์ และมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 ที่ โรงเรียนบุญเหลือวิทยานุสรณ์ 2 สำเร็จการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2561 ได้ศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ ขณะศึกษาได้ทำงานอยู่ที่บริษัทเวสเทิร์น ดิจิตอล ประเทศไทย จำกัด และได้เป็นผู้สอนจำนวน 3 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 3 (2) ปฏิบัติการวิศวกรรมยานยนต์ 2 (3) วิชาเขียนแบบวิศวกรรม 1 เป็นเวลา 1 ปี ขณะศึกษาระดับปริญญาโทได้นำเสนอผลงานทางวิชาการจำนวน 1 เรื่องในการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15 ระหว่างวันที่ 22 – 24 พฤษภาคม 2562 ณ จังหวัดนครราชสีมา รายละเอียดคปรากฎในภาคผนวก จ.



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี