

การลดการใช้พลังงานของแขนหุ่นยนต์หกแกนโดยใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบ  
กลุ่มอนุภาคและโครงข่ายประสาทเทียม

ENERGY CONSUMPTION MINIMIZATION OF SIX-AXIS ROBOT ARM USING  
PARTICLE SWARM OPTIMIZATION AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORK



วีระศักดิ์ ชนระรุ่งเรืองกิจ  
VEERASAK CHANARUNGRUENGIJ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2564

KMITL-2017-AMI-M-001-002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ENERGY CONSUMPTION MINIMIZATION OF SIX-AXIS ROBOT ARM USING  
PARTICLE SWARM OPTIMIZATION AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

VEERASAK CHANARUNGRUENGIJ

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2021

KMITL-2017-AMI-M-001-002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2021

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การลดการใช้พลังงานของแขนหุ่นยนต์หกแกนโดยใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคและโครงข่ายประสาทเทียม
นักศึกษา	นายวีระศักดิ์ ชนระุ่งเรืองกิจ
รหัสนักศึกษา	60601163
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2564
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล

## บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอการประยุกต์ใช้ระบบการผลิตแบบสลิ้นเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพและลดความสูญเสียเปล่าในสายการประกอบสายควบคุมในรถยนต์ในอุตสาหกรรมยานยนต์ ด้วยการปรับปรุงกระบวนการที่เป็นคอขวดและจัดทำสมดุลของกระบวนการโดยใช้ผังการไหลของกระบวนการในปัจจุบันและทำการตรวจสอบผลการปรับปรุงด้วยผังการไหลของกระบวนการหลังการปรับปรุง ซึ่งแนวคิดระบบการผลิตแบบสลิ้นส่งผลให้สายการผลิตที่ใช้เป็นกรณีศึกษา มีการไหลที่ต่อเนื่องมากขึ้น สามารถลดแรงงานลงได้ 33 เปอร์เซ็นต์ ของเสียลดลงเป็นศูนย์ในส่วนของปัญหาการวางไม่ตรงตำแหน่งเข้าแม่พิมพ์โดยการใช้แขนหุ่นยนต์

แต่การปรับปรุงโดยใช้แขนหุ่นยนต์เพื่อทำการลดปัญหาและต้นทุนนั้นจะต้องทำการพิจารณาให้รอบด้านเนื่องจากต้นทุนที่เพิ่มขึ้นจากการลดค่าใช้จ่ายด้านแรงงานจะเปลี่ยนเป็นค่าใช้จ่ายด้านพลังงานดังนั้นการที่จะทำการพิจารณาการลดการใช้พลังงานโดยใช้เทคนิคทางด้านปัญญาประดิษฐ์เพื่อใช้ในการหาค่าตอบที่เหมาะสมของการควบคุมหุ่นยนต์โดยที่มีการใช้พลังงานต่ำที่สุด

จากการปรับปรุงดังกล่าวสามารถลดการใช้พลังงานลงได้ถึง 12.30% โดยที่มีการเคลื่อนที่รูปแบบเดียวกันแต่จากการใช้งานจริงในอุตสาหกรรมนั้นการผลิตจริงจะมีการเปลี่ยนแปลงรอบเวลาการผลิตอยู่เสมอขึ้นอยู่กับการสั่งซื้อในช่วงเวลานั้นๆ การหาค่าตอบด้วยเทคนิคดังกล่าวจะต้องใช้เวลาในการประมวลผลเป็นระยะเวลายาวนานนั้นไม่สามารถตอบสนองการเปลี่ยนแปลงได้ทันทีจึงมีความจำเป็นที่จะดำเนินการหาความต่อเนื่องด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อให้ข้อมูลมีความครอบคลุมในทุกช่วงที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	MINIMIZE ENERGY CONSUMPTION OF SIX-AXIS ROBOT ARM USING PARTICLE SWARM OPTIMIZATION AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORK TO CONTROL CHANGE IN REAL-TIME
<b>Student</b>	Mr. Veerasak Chanarungruengkij
<b>Student ID.</b>	60601163
<b>Degree</b>	Doctor of Engineering
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2021
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Somyot Kaitwanidvilai

## ABSTRACT

This thesis proposes the application of lean manufacturing systems to improve efficiency and reduce waste in an assembly line of an automotive control cable in the automotive industries. The research aims to improve the bottleneck of the process, balance the process using the current value stream mapping, implement chart, and check the improvement results with the post-improvement process flow chart. The improvement from the lean concept in production line can improve production flow, reduce 33% in labor, decrease defect positions of inner in cavity of casting mold to 0 by robot arm concept.

The improvement by using a robotic arm to reduce problems and costs must be considered all around because the increased costs resulting from the reduction of labor costs can be converted to energy costs. The reduction of energy consumption here is determined by the use of artificial intelligence techniques (PSO) to find the optimal robot control solution with the lowest energy consumption.

As a result of this improvement, energy consumption can be reduced by 12.30% with the same path, but from the actual application in the industry a production plan can always change production cycle time depending on the order. During that duration, finding the answer with this technique requires a long period of processing time and cannot

respond to the sudden change from customers, and therefore it is necessary to conduct a continuous condition of parameters with neural network techniques to provide information that has the broad coverage in every required range.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก ดร.ภูมิ คงห้วยรอบ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณกรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะจนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. สมยศ เกียรติวนิชวิไล ที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการออกแบบเทคนิคในการลดพลังงานของแขนหุ่นยนต์โดยที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมจริง

ขอขอบคุณ Thai Steel Cable Public Co.,Ltd. ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยนี้ ขอขอบคุณน้อง ๆ ในฝ่ายวิศวกรรมการผลิตและฝ่ายผลิตที่ได้ให้ความช่วยเหลือ

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดาซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

วีระศักดิ์ ชนะรุ่งเรืองกิจ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	4
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	4
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.5 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในวิทยานิพนธ์.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 การผลิตแบบสลับ.....	7
2.1.1 ที่มาของระบบการผลิตแบบสลับ.....	7
2.1.2 แนวคิดและทฤษฎีสมดุลการผลิต.....	12
2.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการผลิตแบบสลับ.....	13
2.1.4 ผลที่ได้จากการมีระบบการผลิตแบบสลับ.....	19
2.2 การศึกษาเกี่ยวกับหุ่นยนต์.....	20
2.2.1 จลนศาสตร์ข้างหน้า.....	20
2.2.2 จลนศาสตร์ผกผัน.....	23
2.2.3 สมการออยเลอร์ - ลากรองจ์.....	28
2.2.4 สมการการเคลื่อนที่.....	29
2.2.5 การพิจารณาการใช้พลังงานที่เหมาะสม.....	32

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค .....	34
2.4 โค้งข่ายประสาทเทียม.....	39
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน .....	51
3.1 การวิเคราะห์แบบลีน.....	51
3.1.1 การปรับปรุงสายการผลิตที่ได้จากการวิเคราะห์แบบลีน.....	53
3.1.2 สํารวจสภาพปัจจุบันของสายการผลิต.....	55
3.1.3 การวิเคราะห์กระบวนการ และการปรับปรุงกระบวนการ.....	57
3.1.4 การลดของเสียจากการผลิต.....	59
บทที่ 4 การวิเคราะห์เพื่อทำการปรับปรุงการใช้พลังงานของแขนหุ่นยนต์ .....	62
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	74
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	74
5.2 ปัญหาและการแก้ไข .....	76
5.3 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย.....	76
เอกสารอ้างอิง .....	77
ภาคผนวก บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	81

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตาราง DH สำหรับ PUMA 560.....	23
ตารางที่ 2.2 แสดงความแตกต่างระหว่างประเภทของโครงข่ายประสาทเทียม .....	45
ตารางที่ 3.1 แสดงเวลามาตรฐานของกระบวนการก่อนการปรับปรุง.....	56
ตารางที่ 3.2 แสดงเวลามาตรฐานในแต่ละกระบวนการหลังการปรับปรุง .....	58
ตารางที่ 4.1 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในการผลิต .....	64
ตารางที่ 4.2 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่ และพลังงานที่ได้จากการเคลื่อนที่.....	66
ตารางที่ 4.3 แสดงผลการเปรียบเทียบการกำหนดจำนวนอนุภาคของ PSO.....	68
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการเปรียบเทียบการกำหนดการทำซ้ำของ PSO.....	68
ตารางที่ 4.5 พลังงานที่ต่ำที่สุดจากกระบวนการ PSO.....	70
ตารางที่ 4.6 ตารางเปรียบเทียบเวลา และพลังงาน ก่อนและหลังการปรับโดย PSO.....	70
ตารางที่ 4.7 ข้อมูลสำหรับฝึกสอนเครือข่ายประสาทเทียม.....	72

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างการจัดทำผังแห่งคุณค่า .....	10
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างคัมบังแบบบัตร.....	16
รูปที่ 2.3 PUMA 560 ในตำแหน่ง home .....	20
รูปที่ 2.5 การเคลื่อนที่ของฝูงสัตว์.....	34
รูปที่ 2.6 การทำงานของ PSO.....	35
รูปที่ 2.7 ลักษณะการค้นหาคำตอบของ PSO โดยทั่วไปเมื่อเริ่มต้นค้นหาคำตอบ .....	35
รูปที่ 2.8 ลักษณะการค้นหาคำตอบของ PSO เมื่อสิ้นสุดเงื่อนไขการค้นหา.....	36
รูปที่ 2.9 ผังการทำงานของ PSO.....	39
รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ของระบบประสาททั้ง 4 ส่วน .....	40
รูปที่ 2.11 แสดงการทำงานของเซลล์ประสาทเทียม.....	43
รูปที่ 2.12 สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียม .....	46
รูปที่ 2.13 ตัวอย่างโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับ.....	46
รูปที่ 2.14 สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับ.....	48
รูปที่ 2.15 แสดงค่าที่ได้จากฟังก์ชันซิกมอยด์.....	49
รูปที่ 3.1 กระบวนการประกอบก่อนการปรับปรุง.....	51
รูปที่ 3.2 กราฟ แสดงรอบเวลา (CT) ก่อนการปรับปรุง.....	52
รูปที่ 3.3 ผังการไหลของกระบวนการในปัจจุบัน .....	55
รูปที่ 3.4 แสดงรอบเวลาก่อน และ หลังการปรับปรุงกระบวนการ.....	57
รูปที่ 3.5 แสดงสายการผลิตก่อนและหลังการปรับปรุง.....	58
รูปที่ 3.6 ผังการไหลของกระบวนการหลังทำการปรับปรุง.....	59
รูปที่ 3.7 ของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการย้อนหลัง .....	60
รูปที่ 3.8 ตำแหน่งการวาง Inner ในแม่พิมพ์.....	60
รูปที่ 3.9 กระบวนการหลังการปรับปรุงโดยการฉีดโดยแขนหุ่นยนต์.....	61

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่.....	63
รูปที่ 4.2 สายการผลิตที่ออกแบบ .....	64
รูปที่ 4.3 รูปการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในพื้นที่การทำงาน.....	65
รูปที่ 4.4 ผังการทำงานของ PSO เพื่อใช้ในการหาพลังงาน.....	67
รูปที่ 4.5 การทำซ้ำในกระบวนการและ ผลที่ได้จาก PSO.....	69
รูปที่ 4.6 ข้อมูลที่มีความต่อเนื่องจากโครงข่ายประสาทเทียม.....	72
รูปที่ 4.7 การทดสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากการทำระบบประสาทเทียม.....	73



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

โลกยุคปัจจุบันการเปลี่ยนแปลงต่างๆ เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วซึ่งแนวทางล่าสุดคือการมุ่งเน้นไปสู่การใช้นวัตกรรมและเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่อยู่กับสิ่งต่างๆ ที่อยู่รอบตัวมากขึ้น หลายอุตสาหกรรมของไทยจึงมุ่งไปการพัฒนาในทิศทางนั้นซึ่งสอดคล้องกับทิศทางนโยบายของรัฐบาลที่เน้นให้มีการพัฒนาอุตสาหกรรมโดยใช้นวัตกรรมเป็นตัวขับเคลื่อนมากขึ้นโดยอุตสาหกรรมยานยนต์นับว่าเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมนำร่องของไทย และเมื่อประกอบกับแนวโน้มความต้องการสินค้าที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ทำให้การผลิตยานยนต์แบบเดิมๆอาจไม่สามารถตอบรับกับการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวได้อุตสาหกรรมยานยนต์ของไทยจึงต้องมีการพัฒนาขึ้นเป็นยานยนต์สมัยใหม่ที่ต้องการการออกแบบและคิดค้นโดยใช้นวัตกรรมและเทคโนโลยีขั้นสูงสมัยใหม่มากยิ่งขึ้น ทั้งนี้เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มและความได้เปรียบในการแข่งขันให้แก่อุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วนยานยนต์ของประเทศไทย [1]

เพื่อให้สอดคล้องกับเหตุการณ์ เทคนิคการผลิตแบบลีนถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตในโรงงาน การปรับปรุงทำให้เวลาที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการผลิต [2,3] ในแง่ของการเคลื่อนไหวและรูปแบบการผลิตส่งผลให้มีการพัฒนาแนวทางปรับปรุงกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมสมัยใหม่โดยการรวมทั้งสองแนวทางของลีนและการผลิตแบบอัตโนมัติเราทำให้ปรัชญาใหม่ Lean Automation ซึ่งสามารถช่วยให้เรามีสายการผลิตที่มีประสิทธิภาพโดยอัตโนมัติ [4,5] ซึ่งโดยทั่วไปหุ่นยนต์จะไม่ได้เป็นหัวใจสำคัญในการปรับปรุงแบบลีน อย่างไรก็ตามเนื่องจากการทำซ้ำของหุ่นยนต์ด้วยความเร็วและความถูกต้องแบบที่สามารถยืดหยุ่นในการทำงาน ทำให้บทบาทของหุ่นยนต์ในการใช้งานแบบลีนจึงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งอุปกรณ์อัตโนมัติซึ่งรวมถึงหุ่นยนต์กำลังกลายเป็นส่วนประกอบหลักในการผลิตแบบลีนและการลดต้นทุนการผลิต [6]

ดังนั้นการใช้หุ่นยนต์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตในการประยุกต์ใช้กับระบบลีนไม่มีความจำเป็นที่จะต้องทำงานด้วยความเร็วสูงที่สุดเนื่องจากการทำงานจะถูกควบคุมด้วยรอบเวลาในการผลิต (cycle time) รอบเวลาในการผลิตของบางกระบวนการหรือเครื่องจักรบางเครื่องจะช้ากว่าการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ทำให้การใช้หุ่นยนต์มีการรอคอยซึ่งจะทำให้มีการใช้พลังงานมากเกินความจำเป็นโดยการปรับปรุงลักษณะแบบนี้โดยการทำสมดุลสายการผลิตจะใช้วิธีการที่จะแบ่งงานของกระบวนการก่อนหรือหลังมาเพื่อทำการลดการว่างงาน แต่ในแง่ของการใช้หุ่นยนต์ในบางครั้งไม่สามารถทำได้เนื่องจากต้องมีการเคลื่อนที่เกินขอบเขตของหุ่นยนต์ ดังนั้นเมื่อความจำเป็นที่ต้องใช้หุ่นยนต์เพื่อทดแทนแรงงานและจะต้องมีการรอคอย จะต้องคำนึงถึงการใช้พลังงานของหุ่นยนต์ เนื่องจากพลังงานที่ใช้กับหุ่นยนต์จะเป็น

ต้นทุนที่เข้ามาทดแทนต้นทุนด้านแรงงาน เพราะนอกจากเครื่องจักรแล้วการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นจะมาจาก การใช้หุ่นยนต์ เนื่องจากพลังงานจะมีราคาที่สูงขึ้นตลอดเวลาในอนาคต

จากความสำคัญดังกล่าว การลดการใช้พลังงานในการผลิตถือเป็นส่วนสำคัญของความพยายาม การลดต้นทุนในการผลิต เนื่องจากแนวโน้มราคาพลังงานจะเพิ่มขึ้นตลอดเวลา [7] สืบเนื่องมาจากการ เพิ่มขึ้นของประชากร การลดลงของเชื้อเพลิงฟอสซิล และมลภาวะที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดกระแสการสร้าง ความยั่งยืนในการใช้พลังงาน ความยั่งยืนด้านพลังงานสำหรับระบบการผลิตได้กลายเป็นพื้นที่สำคัญ สำหรับการวิจัยและการกำหนดวิสัยทัศน์ของหลายบริษัท เพราะเกี่ยวข้องกับต้นทุนของสินค้าและความ ต้องการด้านการตลาด

จากข้อจำกัดด้านเทคโนโลยีในปัจจุบันมีการสูญเสียพลังงานอย่างมากในระหว่างกระบวนการผลิต เช่นการสูญเสียพลังงานให้กับภาวะแวดล้อม เป็นต้น การลดความสูญเสียเหล่านี้ทำได้โดยการพัฒนา อุปกรณ์ประหยัดพลังงานใหม่หรือการปรับปรุงคุณภาพในการผลิตด้วยการลดอัตราการการสูญเสียของ ชิ้นงานในกระบวนการ อย่างไรก็ตามการใช้พลังงานยังสามารถลดลงได้ด้วยวิธีการใช้พลังงานที่เหมาะสม

อย่างไรก็ตามการผลิตในปัจจุบันใช้แขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมสำหรับงานจำนวนมากเมื่อใช้แขน หุ่นยนต์จำนวนมากก็จะมีการใช้พลังงานเป็นจำนวนมาก ซึ่งการใช้พลังงานโดยรวมในภาคอุตสาหกรรมคือ 37% ของการใช้พลังงานทั้งหมดในโลก [8] พลังงานถูกใช้ในภาคอุตสาหกรรมโดยกลุ่มอุตสาหกรรมที่ หลากหลายเช่นอุตสาหกรรมการผลิตการเกษตรเหมืองแร่และการก่อสร้างและสำหรับกิจกรรมที่ หลากหลายเช่นการแปรรูปและการประกอบ การปรับปรุงพื้นที่และแสง [9] อุตสาหกรรมยานยนต์เป็น หนึ่งในอุตสาหกรรมที่ใหญ่ที่สุดในโลก ในการใช้พลังงานในอุตสาหกรรมยานยนต์โดยหุ่นยนต์อุตสาหกรรม ในสายการผลิตประมาณ 8% ของการใช้พลังงานทั้งหมด [10] และสัดส่วนมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นใน อนาคต การใช้พลังงานของหุ่นยนต์เป็นที่น่าสนใจเพราะเป็นต้นทุนทางตรงของธุรกิจ ด้วยเหตุผลข้างต้น การวิจัยและพัฒนาเพื่อลดการใช้พลังงานของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมเป็นสิ่งสำคัญ

การศึกษาจำนวนมากได้ทำการศึกษาเพื่อพิจารณาการใช้ชิ้นส่วนเช่นประเภทของแขนหุ่นยนต์ที่ ควรเลือกโดยพิจารณาการใช้พลังงาน [11] หรือการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าจากวัสดุ โดยการลดเกณฑ์การ สูญเสียทางไฟฟ้า การสูญเสียพลังงานที่สามารถควบคุมได้เช่นการสูญเสียในขดลวดทองแดง การสูญเสีย ในขดลวดโลหะ การสูญเสียสนามแม่เหล็กในทองแดง แรงเสียดทานและการสูญเสียจากการหมุน สามารถ แสดงได้ตามสัดส่วนของเมทริกซ์ของความเร็วเชิงมุมและพลาซิกซ์ของสนามแม่เหล็ก เงื่อนไขการสูญเสีย พลังงานที่ควบคุมได้นั้นรวมอยู่ในดัชนีประสิทธิภาพกำลังสองแบบอินทิกรัลการควบคุมที่ดีที่สุดซึ่งกำหนด ไว้สำหรับระยะเวลาการทำงานทั้งหมด ดังนั้นสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่จำเป็นสำหรับการติดตามวิถีที่ ต้องการโดยการลดการสูญเสียพลังงานพร้อมกันสำหรับช่วงเวลาการทำงานทั้งหมดจะทำได้ [12]

ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับการวางแผนการเคลื่อนที่ของโปรแกรมหุ่นยนต์ ตัวอย่างเช่นการวิจัย เกี่ยวกับการเลือกวิถีของแขนหุ่นยนต์พบว่าวิถีโค้งสามารถบรรลุการใช้พลังงานต่ำสุด โดยการกำหนด รูปแบบการเคลื่อนที่สำหรับการควบคุมแบบจุดต่อจุดภายใต้ความเร่งซึ่งใช้กับการใช้งานหลายอย่างใน ระบบเครื่องกลไฟฟ้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน ในขั้นต้นรูปแบบการเคลื่อนที่ในเชิงทฤษฎี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้มาจากการใช้หลักการขั้นต่ำของ *Pontryagin* ประสิทธิภาพของรูปแบบการเคลื่อนไหวที่มีประสิทธิภาพด้านพลังงานนี้เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการเคลื่อนไหวทั่วไป [13] วิธีของแขนหุ่นยนต์สามารถควบคุมโดยรอบการทำงานของแขนหุ่นยนต์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน หรือการลดการใช้พลังงานด้วยการใช้การเขียนโปรแกรมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์แบบไดนามิกโดยใช้เส้นทางการเคลื่อนที่ที่มีอยู่จะสร้างเส้นทางใหม่ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับพลังงานสำหรับเส้นทางการเคลื่อนที่เดียวกัน แต่อยู่ในกรอบเวลาการดำเนินการที่แตกต่างกัน ด้วยวิธีการใหม่นี้เป็นไปได้ที่จะแก้ปัญหาการปรับให้เหมาะสมสำหรับช่วงเวลาการดำเนินการสำหรับการดำเนินการแต่ละรายการโดยใช้การจำลองเพียงครั้งเดียวเท่านั้น ผลการวิจัยพบว่าสามารถลดการใช้พลังงานลงอย่างมีนัยสำคัญในช่วงเวลาใดก็ตาม [14-18] มีความพยายามในการควบคุมแนวการเคลื่อนที่และเวลาจากจุดสุดท้ายทำงานไปยังจุดพักของแขนหุ่นยนต์ตามรอบการทำงานโดยมีจุดมุ่งหมายของการลดเวลาและการใช้พลังงาน การประหยัดพลังงานที่เกิดขึ้นในสายการประกอบหุ่นยนต์สำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ การดำเนินการตามวิธีพลังงานที่ดีที่สุดที่ได้จากการปรับขนาดเวลาที่เกี่ยวข้องกับเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จากจุดกระบวนการสุดท้ายไปยังตำแหน่งที่ home และ การลดการใช้พลังงานโดยปล่อยเบรกแอกทูเอเตอร์จะถูกหยุดไว้ผลการจำลองตามลักษณะระยะเวลาการผลิตที่วัดที่โรงงานจริงแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการใช้พลังงานของระบบสามารถลดลงได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่มีผลเสียต่ออัตราการผลิต [19,20] นอกจากนี้ควบคุมเส้นทางเวลาและการเคลื่อนไหว ผลการวิจัยในการควบคุมความเร็ว การเร่งความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ยังสามารถใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเวลาที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ [21,22] จากการวิจัยพบว่ามี การลดพลังงานของแขนหุ่นยนต์โดยการปรับการเคลื่อนไหว และการควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ที่สามารถที่จะลดการใช้พลังงานของแขนหุ่นยนต์ได้

ในการที่จะหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมีหลายวิธีการ ซึ่งการเพิ่มประสิทธิภาพการจับกลุ่มอนุภาค (particle swarm optimization (PSO)) เป็นหนึ่งในอัลกอริทึมที่ใช้ในการหาค่าที่เหมาะสม มีความหลากหลายของใช้งานของ PSO เป็น ตัวอย่างหนึ่งคือการจัดตารางเวลาที่เหมาะสมของการผลิตทรานซิสเตอร์ฟิล์มบาง (Thin Film Transistor Array Process (TFTs)) ที่มีกำลังการผลิตจัดสรรโดยการค้นหาลำดับการผลิตที่เหมาะสมที่สุดและการแก้ไขข้อขัดข้องของกระบวนการที่เกิดขึ้นในการวางแผนการผลิตปกติ [23-26] PSO สามารถใช้สำหรับการวางแผนเส้นทางเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในการตัดสินใจผ่านเส้นทางที่ซับซ้อนอย่างมีประสิทธิภาพ เช่นการวางแผนเส้นทางเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ 10 ตัวที่เคลื่อนที่ผ่านอุปสรรคให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด [27] แต่การใช้ PSO จะทำให้สามารถได้ข้อมูลที่เป็นข้อมูลเดี่ยวในแต่ละเงื่อนไขเท่านั้น แต่สามารถหาค่าที่เหมาะสมที่มีความซับซ้อนในข้อกำหนดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

แต่การใช้งานที่ต้องการความรวดเร็วในการใช้ข้อมูล ดังนั้นเพื่อที่จะทำการหาชุดความต่อเนื่องของแต่ละข้อมูลเพื่อการตอบสนองที่ครอบคลุมกว่านั้น เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมสามารถใช้ในการค้นหาข้อมูลที่ต้องการความต่อเนื่องของข้อมูล เพื่อการปรับเปลี่ยนอย่างรวดเร็ว เช่นการออกแบบโปรแกรมในการคำนวณประสิทธิภาพการใช้พลังงานในเครื่องใช้ภายในบ้าน [28] และอุตสาหกรรม [29] เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยังถูกใช้ในการออกแบบกังหันลมในฟาร์ม [30] และการทำงานนายปัญหามอเตอร์เพื่อลดการสูญเสียพลังงานที่เกิดจากประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ลดลง [31]

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อทำการศึกษารูปแบบการปรับปรุงสายการผลิตสายควบคุมในรถยนต์โดยวิธีการแบบลีนและนำพาแผนหุ่นยนต์เข้ามาทำการใช้เพื่อทำการลดของเสีย และเพิ่มประสิทธิภาพ

1.2.2 เพื่อศึกษาโมเดลทางพลศาสตร์ของแขนหุ่นยนต์

1.2.3 เพื่อศึกษาการสร้างแบบจำลองของการใช้พลังงานของแขนหุ่นยนต์เพื่อหาค่าการใช้พลังงานที่น้อยที่สุดในวงรอบการทำงานที่กำหนด

1.2.4 เพื่อศึกษาการสร้างปัญญาประดิษฐ์เพื่อใช้ในการหาความต่อเนื่องของความเร็ว และความเร่งของแขนหุ่นยนต์ในทุกช่วงเวลา เพื่อลดเวลาในการคำนวณการใช้พลังงานที่เหมาะสม

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

### 1.3.1 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตของการศึกษาในครั้งนี้ทำการศึกษาเพื่อทำการออกแบบแนวทางการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์โดยการควบคุมความเร็วและความเร่งของแขนหุ่นยนต์ โดยการใช้พลังงานที่ต่ำที่สุดในทุกช่วงเวลาที่ต้องการโดยอยู่ในรอบเวลาที่กำหนดไว้ และทำการปรับปรุงการนำข้อมูลไปใช้งานอย่างรวดเร็วโดยการใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียม

โดยการศึกษาจะทำการศึกษาการใช้พลังงานของแขนหุ่นยนต์ โดยไม่นำประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเข้ามาทำการพิจารณาในการหาค่าพลังงานจะเป็นการพิจารณาการใช้พลังงานทางกลเท่านั้นเนื่องจากข้อมูลบางอย่างไม่ได้รับการเปิดเผยจากผู้ผลิต

### 1.3.2 ระเบียบวิธีวิจัย

1. เก็บข้อมูลและหารายละเอียดเกี่ยวกับงานวิจัย รวบรวมข้อมูล เช่นรอบเวลาในการผลิต การออกแบบสายการผลิต เทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์ และเทคนิคการค้นหาข้อมูลอย่างรวดเร็ว
2. ออกแบบแบบจำลองทางพลศาสตร์ของแขนหุ่นยนต์เพื่อการหาพลังงานของแขนหุ่นยนต์
3. เลือกเทคนิคที่เหมาะสมทางปัญญาประดิษฐ์เพื่อการหาพลังงานที่น้อยที่สุดในการใช้แขนหุ่นยนต์โดยอยู่ในวงรอบการทำงานที่กำหนด
4. ทดสอบผลการจำลองและวิเคราะห์ผล
5. สรุปและวิจารณ์และปรับแก้หากมีข้อแก้ไข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สายการผลิตสายควบคุมในยานยนต์ โดยการใช้แขนหุ่นยนต์และการใช้พลังงานที่น้อยที่สุดของแขนหุ่นยนต์

1.4.2 แบบจำลองในการหาพลังงานในแขนหุ่นยนต์

1.4.3 แบบจำลอง และวิธีการที่จะใช้ในการควบคุมในการปรับปรุงสายการผลิตที่มีการประยุกต์ใช้แขนหุ่นยนต์ในด้านการใช้พลังงานที่น้อยที่สุด เมื่อต้องการปรับเปลี่ยนเวลาในการผลิตและสามารถนำข้อมูลมาใช้ได้ในทันที

## 1.5 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วยเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการปรับปรุงสายการผลิตสายควบคุมในรถยนต์ ด้วยการใช้แขนหุ่นยนต์โดยที่จะต้องทำการศึกษาเพื่อทำการหาแบบจำลองและสมการทางพลศาสตร์ของแขนหุ่นยนต์ ในการสร้างแบบจำลองเพื่อนำไปใช้ในระบบปัญญาประดิษฐ์ โดยสามารถแบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความสำคัญและที่มาของปัญหา วัตถุประสงค์ของโครงการ ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ รวมถึงวิธีการดำเนินงาน และแผนการดำเนินโครงการ ตลอดจนประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยกล่าวถึงการประยุกต์ใช้ระบบสลิ้น พลศาสตร์ของแขนหุ่นยนต์ การพลังงานที่ใช้การทำงานของแขนหุ่นยนต์ การหาค่าความเหมาะสมที่สุดด้วยเทคนิคกลุ่มอนุภาค และการทำงานเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบและการปรับปรุงสายการผลิตโดยการนำเทคนิคการปรับปรุงแบบสลิ้นทำการปรับปรุงสายการผลิตเพื่อที่จะทำให้สายการผลิตมีประสิทธิภาพมากที่สุดและทำการลดของเสียที่เกิดขึ้นโดยการนำแขนหุ่นยนต์เข้ามาร่วมในการทำงาน

บทที่ 4 กล่าวถึงการพิสูจน์แบบจำลองทางพลศาสตร์ของแขนหุ่นยนต์ และทำการใช้แบบจำลองเพื่อทำการหาพลังงานของแขนหุ่นยนต์ จากนั้นนำระบบปัญญาประดิษฐ์เข้ามาประยุกต์ใช้โดยจะทำการหาค่าพลังงานของแขนหุ่นยนต์ที่น้อยที่สุดด้วยเทคนิคกลุ่มอนุภาค โดยการกำหนดเวลาในการเคลื่อนที่ ระบบจะส่งความเร็วและเวลาที่จะได้ออกมาเพื่อใช้ในการโปรแกรมในแขนหุ่นยนต์ อีกทั้งยังทำการหาความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อเนื่องของข้อมูลทั้งหมดในเวลาการทำงานที่น้อยที่สุด จนถึงเวลาทำงานที่มากที่สุด ที่สายการผลิตกำหนดไว้โดยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อใช้ในการทำงานในอุตสาหกรรม

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปที่ได้จากการศึกษาค้นคว้าทั้งหมดในงานวิจัยนี้ ตลอดจน ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัย

### 2.1 การผลิตแบบลีน

ในระบบการผลิตแบบลีนเป็นแนวคิดในการประยุกต์วิธีการต่างๆ เพื่อใช้เป็นตัวบ่งชี้และขจัดความสูญเปล่า หรือสิ่งที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่มใดๆ ให้แก่กระบวนการผลิต และผลิตภัณฑ์ โดยอ้างอิงจากความต้องการของลูกค้าและทำการสร้างระบบดึง ในกระบวนการเพื่อ ทำให้เกิดสภาพการไหลอย่างต่อเนื่องของกระบวนการ และมีการปรับปรุงกระบวนการอย่างต่อเนื่องเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่กระบวนการและผลิตภัณฑ์อย่างสม่ำเสมอ การขจัดความสูญเปล่าในกระบวนการผลิตเป็นเป้าหมายสำคัญของระบบการผลิตแบบลีน เนื่องจากความสูญเปล่าเป็นตัวการทำให้เกิดต้นทุนหรือเวลาในการผลิตสินค้าเพิ่มขึ้นซึ่งความสูญเปล่า 7 ประการ (7 wastes) มีดังนี้

- 1.การผลิตมากเกินไป (Overproduction)
- 2.การรอคอยในการปฏิบัติการ (Waiting)
- 3.การขนส่งมากเกินไป (Transportation)
- 4.การมีขั้นตอนการผลิตมากเกินไป (Processing)
- 5.การมีสินค้าคงคลังมากเกินไป (Inventory)
- 6.การเคลื่อนไหวมากเกินไป (Motion)
- 7.การมีชิ้นงานบกพร่อง และของเสีย (Defect)

#### 2.1.1 ที่มาของระบบการผลิตแบบลีน (Historical of Lean Manufacturing)

อุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์นั้นทำให้เกิดการพัฒนากระบวนการผลิตแบบลีนขึ้นครั้งแรก ในอดีตการผลิตสินค้าแบบต่างๆ รวมถึงรถยนต์มีลักษณะเป็นงานฝีมือ ที่มีการผลิตแบบที่ต้องใช้แรงงานและทักษะสูง และมาตรฐานการผลิตขึ้นอยู่กับแรงงาน โดยที่ไม่ได้มีสายการผลิตแบบต่อเนื่องตั้งแต่ครั้งแรก ผู้ผลิตสินค้าส่วนใหญ่ทำการผลิตโดยใช้ความชำนาญและทักษะของพนักงานสูง จึงทำให้มีต้นทุนการผลิตสินค้าต่อหน่วยสูง แต่ผู้ผลิตก็สามารถผลิตสินค้าต่างๆ ได้หลากหลายชนิดตามความต้องการของลูกค้า หลังจากนั้นในช่วงต้นศตวรรษที่ 20 เฮนรี ฟอร์ด (Henry Ford) ซึ่งเป็นผู้ก่อตั้งบริษัท ฟอร์ด มอเตอร์ ได้คิดเริ่มแนวคิดในการสร้างสายการผลิตที่มีลักษณะที่มีการผลิตอย่างต่อเนื่อง และเรียกสิ่งที่ขัดขวางต่อการเคลื่อนที่ในกระบวนการของสายการผลิตนั้นคือความสูญเปล่า โดยได้นำระบบสายพานลำเลียงมาใช้ในสายการประกอบชิ้นส่วนรถยนต์ของบริษัท และใช้ชิ้นส่วนที่มีคุณภาพ และมาตรฐานเดียวกัน ทำให้สามารถใช้ชิ้นส่วนเหล่านี้ทดแทนกันได้ทำให้เวลาที่ใช้ในการผลิตลดลงและได้ปริมาณที่เพิ่มขึ้นอย่างไรก็ตามด้วยวิธีการผลิตแบบที่ได้อธิบายมาทำให้ชิ้นส่วนและวัตถุดิบได้รับการผลิตถูกส่งต่อไปยังกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลิตถัดไป โดยที่ไม่มีการพิจารณาถึงความต้องการที่เหมาะสมระบบดังกล่าวถูกเรียกว่าระบบการผลิตโดยเน้นปริมาณ (Mass Production) คือผลิตแบบเน้นปริมาณมากและลืตที่ทำการผลิตมีจำนวนมากซึ่งจะทำให้ต้นทุนการผลิตต่อหน่วยให้ต่ำลงทางอ้อมทำให้ระบบการผลิตรถยนต์ของบริษัทฟอร์ดมีความประสบความสำเร็จอย่างมากโดยรถยนต์ของบริษัทฟอร์ดโมเดลที (FORD Model T) ซึ่งเป็นรถยนต์รุ่นยอดนิยมที่มีการผลิตและจำหน่ายได้เป็นจำนวนมากแม้ว่ารุ่นนี้จะมีจำหน่ายเพียงสี่ดำสี่เดียวแต่ด้วยว่าในช่วงนั้นตลาดยังเป็นของผู้ผลิตเนื่องจากจำนวนผู้ผลิตรถยนต์มีจำนวนน้อยรายแต่มีความต้องการซื้อเป็นจำนวนมากทำให้ผลิตเท่าไรก็สามารถจำหน่ายได้หมดและในอีกหลายปีถัดมา

จากความสำเร็จของบริษัทฟอร์ด นายอิชิ โทโยดะ (Eiji Toyoda) และนายไทอิชิ โอนะ (Taiichi Ohno) ผู้บริหารของบริษัทโตโยต้าได้พยายามนำเอาแนวความคิดการผลิตแบบใช้สายพานลำเลียงไปทำการปรับปรุงระบบการผลิตของบริษัทโตโยต้าในญี่ปุ่นแต่ในขณะนั้นประเทศญี่ปุ่นอยู่ในสภาพหลังจากสงครามทำให้ปัจจัยการผลิตต่างๆ และเงินทุนยังมีอยู่อย่างจำกัดด้วยสภาวะของบริษัทยังไม่เหมาะกับการใช้ระบบการผลิตแบบเน้นจำนวนมากจึงส่งผลให้ไม่สามารถลงทุนเพื่อสร้างระบบการผลิตที่เน้นปริมาณได้ตามอย่างของบริษัทฟอร์ด บุคคลทั้งสองจึงได้ร่วมกับทีมงานของบริษัทโตโยต้าทำการพัฒนาระบบการผลิตแบบของตนเองขึ้นมาโดยอาศัยประสบการณ์ที่เคยพบมาซึ่งเริ่มต้นจากการตรวจสอบและแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นทั้งหมดทั้งยังมีการนำข้อเสนอแนะของการปรับปรุงงานที่ได้จากพนักงานมาทดลองปฏิบัติ และประยุกต์แนวความคิดของระบบซูเปอร์มาร์เก็ตหรือที่เรียกว่าระบบดึงมาสร้างเป็นระบบการผลิตที่เรียกว่า “ระบบการผลิตแบบโตโยต้า” (Toyota Production System) ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีในชื่อระบบการผลิตแบบทันเวลาพอดี (just in time production system)

ซึ่งแนวคิดแบบลีน และระบบการผลิตแบบลีน (Lean Manufacturing) เป็นที่รู้จักมากขึ้นทั้งในอุตสาหกรรมโลกโรงงานต่างๆ ก็ต้องทำการเปลี่ยนระบบการผลิตจาก Mass Production สู่ Lean Production หรือ Lean Manufacturing ว่าด้วยเหตุผลต่างๆ กันคือ

James P. Womack ในปี 1990 ได้แต่งหนังสือชื่อ The Machine That Changed The World โดย James P.Womack ได้มีโอกาสที่ได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตของโตโยต้าเป็นเวลาหลายปีรวมทั้งศึกษาวิเคราะห์โรงงานประกอบรถยนต์ของญี่ปุ่น อเมริกา และยุโรป โดยเป็นผู้ให้กำเนิดคำว่า “Lean Manufacturing” ขึ้นครั้งแรก

โดยทั่วไปการที่โรงงานหรือบริษัทจะนำระบบลีนมาประยุกต์ใช้นั้นจะมีสาเหตุดังนี้

ประการที่ 1 ต้องการมีต้นทุนต่ำลง (cost reduction) เพื่อเพิ่มความสามารถในการแข่งขันให้มากขึ้น (competitiveness) หรือเป็นการรักษาส่วนแบ่งทางการตลาด

- ประการที่ 2 ต้องการเพิ่มผลิตภาพ (increased productivity) เพื่อเป็นการจัดส่งผลิตภัณฑ์ที่ดีขึ้นและรักษาหรือเพิ่มส่วนแบ่งทางการตลาดไว้
- ประการที่ 3 ต้องการลด lead time ในการผลิตสินค้าเพื่อการจัดส่งผลิตภัณฑ์ที่ตรงต่อเวลา (on time delivery) และเป็นการเพิ่มความพึงพอใจให้กับลูกค้า (customer satisfaction)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ประการที่ 4 ต้องการมีระบบการผลิตที่มีประสิทธิภาพสูงในระดับสากล (world class manufacturing) เพื่อการแข่งขัน และเป็นที่ยอมรับของทางลูกค้า
- ประการที่ 5 ลูกค้าต้องการให้ทำ จึงจำเป็นต้องทำเพื่อความพอใจของลูกค้า ซึ่งเป็นที่มาของการสั่งซื้อผลิตภัณฑ์
- ประการที่ 6 ลูกค้าจะมีการประเมินผลระบบการผลิตแบบ lean เปรียบเทียบกับผู้จัดส่ง (supplier) รายอื่น เพื่อพิจารณาผลงานของผู้จัดส่ง อันจะส่งผลต่อการสั่งซื้อผลิตภัณฑ์ต่อไป
- ประการที่ 7 บริษัทแม่ซึ่งอยู่ในต่างประเทศมีนโยบายให้ทำ

### ระบบการผลิตแบบลีน (Lean Manufacturing System)

ระบบการผลิตที่มุ่งเน้นเรื่องการไหลของงาน โดยการค้นหาและกำจัดความสูญเปล่าของงานเพื่อเพิ่มคุณค่าและทำการลดต้นทุนให้กับตัวสินค้าอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ลูกค้าเกิดความพึงพอใจมากที่สุดโดยมีลำดับขั้นตอนในการปรับปรุง 5 ขั้นตอน

#### 1.การระบุคุณค่าของสินค้า (specify value)

แนวคิดนี้สามารถระบุคุณค่าของผลิตภัณฑ์ให้ได้ว่าคุณค่าของสินค้าที่ผลิตมีคุณค่าอยู่ที่ไหนตรงกับความต้องการของลูกค้าบ้างหรือไม่การระบุว่าสินค้ามีคุณค่าอยู่ที่ใดอาจใช้การเปรียบเทียบกับคู่แข่งได้โดยที่การเปรียบเทียบจะต้องเป็นในมุมมองของลูกค้า ไม่ใช่ในมุมมองของผู้ผลิต การที่สามารถระบุว่าคุณค่าของสินค้าที่เป็นผลิตผลขององค์กรในมุมมองของลูกค้านั้นจะทำให้สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้อย่างถูกต้อง ซึ่งทำให้ลูกค้าเกิดความพึงพอใจ

#### 2.การแสดงผลผังแห่งคุณค่า (value stream)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการแสดงภาพรวมของกระบวนการทั้งหมดโดยมีเป้าหมายที่ต้องการเป็นเหมือนแผนที่แสดงกิจกรรมและการไหลของกระบวนการเรียกว่า “แผนภาพสายธารคุณค่า” โดยที่จะต้องทำการสร้างแผนภาพเพื่อแสดงกิจกรรมทั้งหมดของกระบวนการ โดยประกอบด้วย ระยะเวลาที่หยุดกระบวนการ วัสดุคงคลังในกระบวนการเคลื่อนย้ายวัสดุ เส้นทางการไหลของข้อมูลซึ่งจะช่วยแสดงให้เห็นถึงสถานะปัจจุบัน (current state) ของกิจกรรมในกระบวนการ และช่วยนำทางให้ในการสร้างสถานะที่ต้องการในอนาคต (future state) แผนผังแห่งคุณค่าสามารถใช้ในการสื่อสารในกระบวนการทั้งหมดไปจนถึงการวางแผนทางธุรกิจ และเครื่องมือที่ช่วยในการจัดการการเปลี่ยนแปลงกระบวนการ กระบวนการประกอบไปด้วยแผนภาพทางกายภาพของสถานะปัจจุบันจะแสดงให้เห็นถึงสภาพของปัจจุบันที่เป็นอยู่ และจะใช้สถานะที่ต้องการในอนาคตในการที่จะจัดเตรียม และเป็นแนวทางสำหรับการปรับปรุงต่างๆ

ซึ่งการจัดทำแผนผังแสดงคุณค่าจะเป็นจุดเริ่มต้นในการปรับปรุงของการจัดการ วิศวกร ผู้ทำการ

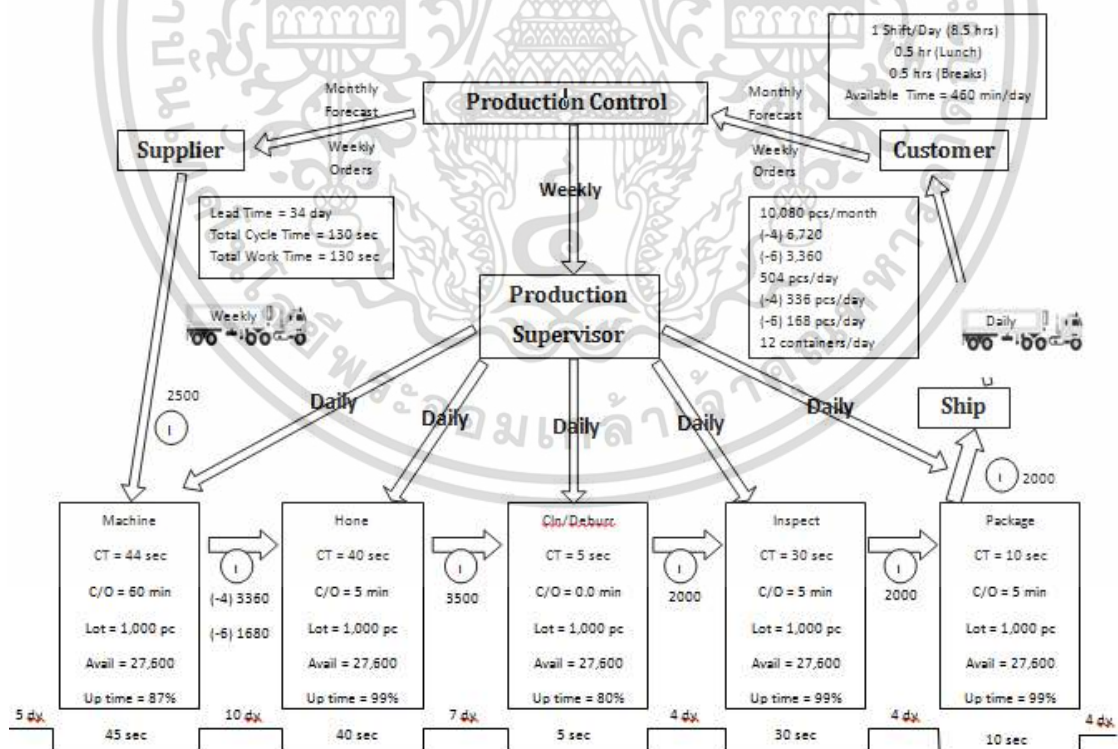
ผลิต ผู้วางแผนการผลิต ผู้จัดส่งสินค้า และลูกค้า ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงสิ่งที่ไม่มีความรู้และสามารถจำแนกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงสาเหตุที่เกิดขึ้นได้ โดยมีเป้าหมายคือการจำแนก และกำจัดสิ่งไร้ค่าในกระบวนการออกไปจากกิจกรรมต่างๆที่อยู่ในสายการผลิตทุกกิจกรรมที่เกี่ยวข้องตลอดทั้งสายการผลิตหรือการบริการ

การแสดงสายธารแห่งคุณค่า รูปที่ 2.1 คือการจัดทำผังแห่งคุณค่า (value stream mapping : VSM) จะต้องทำการระบุกิจกรรมที่ต้องทำทั้งหมด ตั้งแต่รับวัตถุดิบเข้าที่ประตูโรงงานของผู้ผลิต จนกระทั่งสินค้าได้ถูกส่งถึงประตูโรงงานของบริษัทลูกค้า รวมถึงเวลารอคอยและสินค้าคงคลังที่มีอยู่ตามกระบวนการต่างๆ

การจัดทำผังแห่งคุณค่า จะทำให้มองเห็นกระบวนการทั้งระบบ และสามารถมองเห็นความสูญเปล่า (Muda) ได้ง่าย และยังมีประโยชน์ในการสื่อสารกับผู้ที่เกี่ยวข้องโดยตรง และทางอ้อมอีกด้วย สิ่งที่จะเห็นจากการทำผังแห่งคุณค่า ได้แก่

- 1 หลายๆกระบวนการเป็นกระบวนการที่มีคุณค่า และต้องทำอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้กระบวนการเหล่านี้เป็นกระบวนการที่ควรให้การใส่ใจอย่างยิ่ง
- 2 หลายๆกระบวนการเป็นกระบวนการที่ไม่มีคุณค่าแต่จำเป็นต้องทำโดยไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้
- 3 หลายๆกระบวนการเป็นกระบวนการที่ไม่มีคุณค่าและสามารถยกเลิกได้ทันที



รูปที่ 2.1 แผนภาพสายธารคุณค่าในกระบวนการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. การทำให้เกิดการไหลต่อเนื่อง

การทำให้กระบวนการเกิดการไหลอย่างต่อเนื่องคือ การทำให้สายการผลิตสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการหยุดสายการผลิตไม่ว่าเหตุผลใดๆก็ตาม การไหลของงานเป็นส่วนแรกของการปรับปรุงแบบลีนซึ่งเป็นหัวข้อแรกที่จะต้องทำการพิจารณาและปรับปรุงให้มีการไหลดุจดังสายน้ำ

การทำให้กระบวนการเกิดการไหลอย่างต่อเนื่องสามารถทำได้ดังนี้ คือ

1. ปล่อยให้เครื่องจักรว่างงานด้วยเหตุอันใดก็ตาม (idle time)
2. หากเครื่องจักรเสีย (breakdown time) ต้องแก้ไขให้กลับสู่สภาวะปกติให้เร็วที่สุด
3. การบำรุงรักษาเครื่องจักรเชิงป้องกัน (preventive maintenance : PM) เป็นสิ่งที่ต้องใช้เวลาน้อยที่สุดแม้ว่าจะอยู่ในแผนการผลิตก็ตามเพราะบางกรณีไม่สามารถควบคุมเวลานี้ได้
4. อย่าขัดจังหวะการผลิตไม่ว่าจะด้วยเหตุผลใด
5. จัดกำลังผลิตของแต่ละกระบวนการให้มีความสมดุลกัน (line balancing) ซึ่งจะทำให้ไม่มีการกองของงานในแต่ละกระบวนการหรือเกิดการคอขวดขึ้น

6. ลดการเก็บงานเพื่อรอการผลิต (waiting)

7. จัดผังโรงงาน (line layout) ให้เหมาะสม

4. การให้ลูกค้าเป็นผู้ดึงผลิตภัณฑ์จากกระบวนการ (pull)

การให้ลูกค้าเป็นผู้ดึงผลิตภัณฑ์จากกระบวนการคือ จะทำการผลิตเมื่อลูกค้ามีความต้องการสินค้า นั้นและผลิตแค่เพียงพอกับปริมาณที่ลูกค้าต้องการโดยหมายถึงทั้งลูกค้าภายในและลูกค้าภายนอกเป็นการผลิตที่เข้าใกล้กับลักษณะของการผลิตตามสั่ง (made to order) ไม่ใช่การผลิตเพื่อเก็บและรอการขาย (made to Stock) ซึ่งการผลิตเพื่อเก็บและรอการขายถือเป็นความสูญเปล่าชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นเพราะการรอคอย (waiting)

ระบบดึงจะเป็นการทำงานแบบย้อนกลับ (work backward) โดยการนำความต้องการของลูกค้า (customer requirements) มากำหนดแผนการทำงานไม่ใช่ทำการผลิตสินค้าคงคลังเพื่อรอลูกค้ามาซื้อ การผลิตต้องทำเมื่อลูกค้าต้องการจริงๆไม่ใช่ผลิตตามแผนการผลิตของผู้ผลิตหรือการผลิตตามการพยากรณ์ยอดขาย

ในการใช้ระบบดึงให้สมบูรณ์แบบให้ใช้กับทั้งลูกค้าภายนอกซึ่งก็คือบริษัทหรือบุคคลที่ซื้อสินค้าจากเราและกับทั้งลูกค้าภายในคือบุคคลหรือหน่วยงานที่เราต้องให้การสนับสนุนแก่เขาหรือบุคคลที่ได้รับผลกระทบจากการทำงานของเรา

### 5. การกำจัดความสูญเสีและการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง (perfection)

เมื่อเข้าใจความต้องการของลูกค้า รู้และเข้าใจในสินค้าที่ผลิต จัดทำผังของคุณค่าและให้ลูกค้าเป็นผู้ดึงงานและกำหนดกิจกรรมในการผลิต ขั้นตอนต่อมาคือการพยายามเพิ่มคุณค่าให้กับสินค้าและบริการอย่างต่อเนื่องรวมถึงการค้นหาความสูญเปล่าให้พบและกำจัดอย่างต่อเนื่องตลอดไปซึ่งก็คือแนวคิดของการทำ PDCA (Plan Do Check Act) นั่นเองซึ่งจะต้องตรวจสอบเพื่อทำการขจัดความสูญเปล่าโดยที่มีหลักการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการในการกำจัดความสูญเปล่าเพื่อส่งมอบผลิตภัณฑ์ที่ลูกค้าต้องการและส่งตรงเวลาหรือจะเรียกได้ว่า ลีน คือปรัชญาการผลิตซึ่งจะถือว่าความสูญเปล่าเป็นสิ่งที่ทำให้เวลาที่ใช้ในการผลิตนานขึ้น และมีการนำเทคนิคต่างๆมาใช้ในการกำจัดความสูญเปล่าออก

ความสูญเปล่า คือ การทำกิจกรรมในรูปแบบต่างๆตามที่ใช้ทรัพยากรไปไม่ว่าจะเป็นวัตถุดิบ เงิน แรงงาน เวลา หรือสิ่งอื่น แต่ไม่ทำให้สินค้าและบริการมีคุณค่าที่เพิ่มขึ้นหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง”

สามารถแยกได้เป็น 7 ประการ ซึ่งภาษาญี่ปุ่นเรียกความสูญเปล่าว่า "มุดะ (Muda)"

1. การมีของเสียเกิดขึ้น (defect)
2. การผลิตที่มากเกินไปโดยไม่จำเป็น (over production)
3. การมีสินค้าคงคลังมากเกินไป (unnecessary inventory) สูญเปล่าเนื่องจากการใช้ต้นทุนไปก่อนเวลาที่จำเป็นหรือการทำงานล่วงเวลาเพื่อสร้าง WIP (work in process) โดยไม่จำเป็น ดังนั้นควรใช้หลักการผลิตแบบทันเวลาพอดี (JIT)

4. การมีกระบวนการที่ไม่จำเป็นเกิดขึ้น (unnecessary processing)
5. การเคลื่อนไหวของร่างกายที่ไม่จำเป็น (unnecessary motion)
6. การขนส่งที่ไม่จำเป็น (unnecessary transportation)
7. การรอคอย (waiting)

### 2.1.2 แนวคิดและทฤษฎีสมดุลการผลิต (Line balancing)

การจัดสมดุลสายการผลิตถือเป็นเครื่องมือสำคัญในการปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยเฉพาะระบบการผลิตแบบต่อเนื่อง การวางแผนตามชนิดผลิตภัณฑ์นั้นมักใช้กับระบบการผลิตแบบต่อเนื่อง ในระบบนี้ถ้าอัตราการปฏิบัติงานของพนักงานอัตราความเร็วต่างกันย่อมจะทำให้ผลผลิตที่ได้้น้อยกว่าที่ประเมินไว้ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะพนักงานมีทักษะ ความชำนาญ หรือประสบการณ์ที่ต่างกันจึงส่งผลให้ทำงานได้ความเร็วต่างกัน ด้วยถ้าสถานีทำงานหนึ่งเกิดความล่าช้าขึ้นจะส่งผลให้สถานีถัดมาเกิดความล่าช้าตามไปด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับการผลิตให้เกิดความสมดุลขึ้นเพื่อให้ทุกสถานีทำงานด้วยเวลาที่กำหนดให้ตัวเดียวกันจึงจะไม่เกิดเวลาสูญเปล่าหรือถ้าเกิดก็มีน้อยมากการจัดเวลานี้เรียกว่าการจัดการผลิตให้สมดุล (line balancing) จากเวลาที่คำนวณได้สามารถจัดสถานีทำงานได้เหมาะสมยิ่งขึ้นนับว่าเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้วางแผนการผลิตเพื่อให้ได้ผลผลิตเพิ่มขึ้น

จุดประสงค์ของการจัดการผลิตให้สมดุล เพื่อที่จะรวมงานย่อยที่สามารถรวมไว้ที่สถานีทำงานเดียวกันแล้วคำนวณเวลาประมาณการของสถานีทำงานต่างๆ ทั้งนี้เพื่อพยายามลดเวลาสูญเปล่าในสายการผลิตซึ่งเกิดจากการทำงานในแต่ละสถานีด้วยอัตราความเร็วและเวลาที่ไม่เท่ากัน หรือปรับอัตราการผลิตให้เหมาะสมตามปริมาณที่ตลาดต้องการสินค้าตลอดจนลดสิ่งสูญเปล่าที่ไม่จำเป็นในกระบวนการผลิตด้วย

ประโยชน์ของการจัดการผลิตให้สมดุลคือ

1. การจัดการผลิตให้สมดุลจะทำให้สามารถลดเวลาสูญเสียเปล่าได้ทั้งนี้เพื่อให้การผลิตมีผลผลิตมากที่สุดเท่าที่จะทำได้

2. ทราบรอบเวลา (cycle time) ที่ใช้ในการผลิตสินค้า 1 หน่วย ซึ่งจะนำไปคำนวณผลผลิตของแต่ละวันที่ผลิตได้จากสูตร

$$\text{ผลิตผล} = \text{เวลาผลิตในหนึ่งวัน} / \text{เวลาปฏิบัติการแต่ละสถานี}$$

3. ทำให้ทราบจำนวนสถานีที่ทำการผลิตซึ่งจะคำนวณได้จากสูตร

$$\text{จำนวนสถานีการผลิต} = (\text{อัตราการผลิตต่อวัน} \times \text{ผลรวมของเวลางานย่อย})$$

### 2.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการผลิตแบบลีนมีดังนี้

1. 5 ส คือ วิธีปฏิบัติในการดูแลรักษาพื้นที่ปฏิบัติการของการผลิตแบบลีน ทำความสะอาด คำนวณการจัดการ การใช้และจัดสร้างระบบของพื้นที่การทำงาน (work place) มุ่งเน้นไปที่ การแสดงให้เห็นถึงความโปร่งใส การจัดการองค์กร ความสะอาด และการสร้างให้เป็นมาตรฐานดำรงไว้ซึ่งระเบียบแบบแผนที่เป็นของการทำงานที่ดีประกอบไปด้วย

ส 1 สะสาง แยกสิ่งของที่ต้องการและไม่ต้องการออกจากกันและกำจัดสิ่งของที่ไม่ต้องการนั้นออกไปจากสถานที่นั้นๆ

ส 2 สะดวก จัดสิ่งของที่เป็นเหล่านั้นให้อยู่ในสภาพที่จะใช้งานได้อย่างง่ายและมีประสิทธิภาพ

ส 3 สะอาด จัดสถานที่ทำงานให้ปราศจากสิ่งสกปรก

ส 4 สุขลักษณะ ดำรงสภาพของสะสาง สะดวก สะอาด อยู่ตลอดเวลา

ส 5 สร้างเสริมลักษณะนิสัยปลูกฝังสิ่งเหล่านี้ให้อยู่ในนิสัยประพฤติอย่างถูกต้องตามกฎระเบียบกฎระเบียบวินัยผลดีที่ได้จากการทำ 5 ส เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานสะท้อนออกมาในมิติของการลดเวลาการทำงานที่ลดลง ลดอุบัติเหตุ ลดเวลากิจกรรมการเปลี่ยนรุ่นการผลิต (change over) กิจกรรมเพิ่มคุณค่าของพนักงานและพนักงานมีส่วนร่วมในการพัฒนาการทำงานมากขึ้น

2. การลดเวลาของการเปลี่ยนงาน (set up reduction) ซึ่งก็หมายถึงการจัดเตรียมความพร้อมของเครื่องมือ อุปกรณ์ ในการผลิตจะใช้ในการลดเวลาการจัดตั้งเครื่องจักรในกรณีที่ต้องเปลี่ยนการผลิตจากผลิตภัณฑ์หนึ่งไปสู่อีกผลิตภัณฑ์หนึ่งให้ใช้เวลาให้น้อยที่สุด

3. การผลิตโดยอิงเวลามาตรฐาน (production to takt time) คือการสร้างสมดุลการทำงานโดยให้ระยะเวลาของการการทำงาน (cycle time) เท่ากับ takt time โดยการคำนวณ takt time เท่ากับระยะเวลาสุทธิในกระบวนการ ทารด้วยผลผลิตทั้งหมดที่ต้องผลิต วิธีการคำนวณ takt time คือระยะเวลาเท่าไรที่งาน 1 ชิ้นจะเสร็จสมบูรณ์ตามที่ลูกค้าระบุโดยคำนวณจากปริมาณความต้องการของลูกค้าและเวลาทำงานที่มีอยู่ (available time) takt time ถูกกำหนดเป็นจังหวะสำหรับมาตรฐานการทำงานรอบเวลาของผู้ปฏิบัติงาน(operator cycle time) เป็นเวลาทั้งหมดที่ต้องการสำหรับผู้ปฏิบัติงานหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คนทำงานสำเร็จ 1 ชิ้น โดยหนึ่งรอบของผู้ปฏิบัติงานประกอบไปด้วย การเดิน ติดตั้งงาน การปลดงาน และการตรวจสอบ รอบเวลาของ เครื่องจักร คือเวลาระหว่างทันทีที่ปั๊มเปิดการทำงานของเครื่องจักรถูกกดลงและจุดที่เครื่องจักรกลับมาอยู่ที่เดิมหลังการปฏิบัติงาน takt time เป็นสัดส่วนของเวลาการปฏิบัติงานแต่ละวันและความต้องการสินค้าในแต่ละวันเช่นกัน ตัวแปรประกอบด้วยความต้องการของลูกค้า และเวลาทำงานที่มีอยู่ เมื่อความต้องการของลูกค้าและเวลาการทำงานที่มีอยู่เปลี่ยนไป takt time จะถูกคำนวณใหม่ ดังสมการที่ 2.1

$$\text{takt Time} = \frac{\text{Customer Demand}}{\text{Available Time}} \quad (2.1)$$

ยกตัวอย่างการคำนวณ

takt Time ในการผลิตของโรงงานหนึ่งระยะเวลาการทำงาน 1 กะเท่ากับ 480 นาที เวลาพัก 60 นาที ดังนั้น เวลาที่ใช้ในการผลิต คือ  $480 - 60 = 420$  นาที โดยที่ความต้องการของลูกค้าคือ 380 ชิ้น สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{takt time} = \frac{420}{380} = 1.10 \text{ นาที} = 1.10 \text{ นาที} = 66 \text{ วินาที}$$

takt time แตกต่างกับ cycle time คือ takt time หมายถึงอัตราความต้องการ ของลูกค้าจะมีค่าคงที่เสมอเว้นแต่ความต้องการของลูกค้าเพิ่มขึ้นหรือลดลง cycle time (รอบเวลา) หมายถึง เวลาที่ใช้ในการผลิตหรือประกอบงานหนึ่งรอบกระบวนการ

4. งานมาตรฐาน (standardize work) ประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นมากที่สุดในการทำงานร่วมกันของแรงงานคน วัสดุ และเครื่องจักร นั้นคือการสร้างรากฐานของการพัฒนารายวัน โดยการสร้างกระบวนการซ้ำๆโดยให้คำจำกัดความของขั้นตอนเวลาและการจัดระเบียบแบบแผนของการปฏิบัติงาน เพื่อได้ผลตามที่ต้องการในราคาที่ต่ำและรับประกันในคุณภาพที่สูงประโยชน์ที่ได้รับจากงานมาตรฐาน คือ สร้างผังโรงงานที่มีพื้นที่ไร้ประโยชน์น้อยที่สุด จำแนกความต้องการของงานในกระบวนการที่น้อยที่สุดได้เข้าใจเวลานำที่มีผลกระทบต่อปริมาณงานระหว่างผลิตสามารถคำนวณความต้องการของพนักงานที่ต้องการต่อความต้องการที่หลากหลายได้ การจัดการด้วยการมองเห็น (visual management) ของงานที่กำลังก้าวหน้าและเกิดความผิดปกติได้

5. แบบแสดงวิธีปฏิบัติงาน (method sheets) แสดงภาพวิธีปฏิบัติงานที่เป็นมาตรฐานของงานนั้นรวมถึงการอธิบายวิธีการทำงานที่ถูกต้องเพื่อควบคุมการปฏิบัติงานให้ถูกต้องอยู่เสมอ

6. กลุ่มการผลิต (flow cells) สำหรับกระบวนการผลิตคือ การจัดการไหลของวัสดุและลำดับของการผลิตให้สอดคล้องกับรอบเวลาการผลิตโดยจะมีคน เครื่องจักร และอุปกรณ์ เป็นกลุ่มของตัวเองเรียกเป็นหนึ่งเซลล์โดยในแต่ละเซลล์จะกำหนดลักษณะการทำงานให้สอดคล้องกับรอบเวลาการผลิตในกระบวนการให้บริการก็คือการสร้างเส้นทางการเดินของลูกค้าและลำดับการรับบริการให้สอดคล้องกับเจ้าหน้าที่ที่ให้บริการ และพอดีกับรอบเวลา

7. การควบคุมด้วยสายตา (visual control) เป็นกุญแจในทฤษฎีของการผลิตแบบลีนเป็นการมุ่งเน้นที่สร้างสถานที่ปฏิบัติงานให้มีสัญลักษณ์เครื่องหมายสัญญาณสีต่างๆ ที่แตกต่างกันเท่าที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นต้นการค้นคว้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการจะสามารถแสดงได้ในเวลาสั้นๆ ให้ความรู้ว่าสิ่งใดกำลังเกิดขึ้นสามารถเข้าใจได้ในกระบวนการ และรู้ว่าสิ่งใดเป็นสิ่งที่ถูกต้องหรือสิ่งใดไม่ควรอยู่ในสถานที่ปฏิบัติการอย่างเช่น แบบจำลองของโรงงาน (visual factory) ถูกสร้างขึ้นด้วยการจัดวาง (display) และการควบคุมที่สามารถเห็นได้ด้วยตาซึ่งจะช่วยดำเนินงานให้มีประสิทธิภาพตรงตามที่ต้องการออกมา การใช้ข้อมูลร่วมกันด้วยอุปกรณ์เสมือน (visual tool) จะช่วยดำเนินงานให้ราบรื่นและปลอดภัยจากการออกแบบและนำไปใช้งานเครื่องมือเหล่านี้จะลดความยุ่งยากให้แก่ทีมปฏิบัติงานในพื้นที่ปฏิบัติงานตลอดจนงาน 5 ส และกิจกรรมการพัฒนาด้านอื่น ๆ visual display คือการแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลข่าวสาร และข้อมูลของพนักงานในพื้นที่นั้นๆ เช่น แผนภูมิที่แสดงผลกำไรของบริษัทในแต่ละเดือน หรือภาพกราฟิกแสดงให้เห็นชนิดที่แน่นอนของคุณภาพที่แสดงออกที่สมาชิกของกลุ่มที่ควรจะต้องปฏิบัติตามประสิทธิภาพของการออกแบบกระบวนการเป็นผลมาจากการประยุกต์ใช้ของการผลิตแบบลีนโดยการตั้งสมมุติฐาน กระบวนการจะดำเนินต่อไปที่ราบที่การตั้งสมมุติฐานถูกต้องโรงงานที่มี visual control และ display ที่ละเอียดชัดเจนพนักงานจะสามารถทราบได้ทันทีในกรณีที่เกิดกิจกรรมใดกิจกรรมหนึ่งไม่เป็นไปตามที่ตั้งสมมุติฐาน สัญญาณเสียง (audio signal) ในโรงงานเป็นส่วนสำคัญเพราะเป็นสัญญาณที่แสดงเสียงออกมาเมื่ออุปกรณ์ใดๆ ไม่สามารถปฏิบัติงานได้ เสียงจะส่งสัญญาณเตือนก่อนที่จะมีการเปิดเครื่องจักรหรือส่งข้อมูลที่มีประโยชน์


8. การไหลที่ละชิ้น (one piece flow) คือ การผลิตตรวจสอบและส่งมอบที่ละชิ้นโดยมีหลักการที่กำหนด cycle time ให้ตรงกับความต้องการสินค้าของตลาด การบริการก็เช่นกัน คือ ระยะเวลาการให้บริการแก่ลูกค้าทันกับปริมาณของลูกค้า

9. การผลิตแบบผสมรุ่น (mixed model production) คือการผลิตแบบหลายๆโมเดลในสายการผลิตเดียวกันโดยปรับสัดส่วนการผลิตสินค้าให้เท่าทันความต้องการของลูกค้าที่สั่งเข้ามาผลิตสลับปรับเปลี่ยนกันไปตลอดสายการผลิต

10. การเตรียมพร้อมใช้งาน ณ จุดปฏิบัติงาน (point of used storage) การจัดเตรียมและบริหารพื้นที่ให้สามารถนำมาใช้งานได้สะดวก ลดการเคลื่อนที่หรือขนย้ายวัสดุจากนี้ยังหมายรวมถึงการจัดเก็บอุปกรณ์ในพื้นที่ที่สะดวกต่อการใช้งานด้วย

11. คัมบัง (kanban) หรือ pull scheduling เป็นภาษาญี่ปุ่น หมายถึงสัญญาณ (signal) เป็นหนึ่งในเครื่องมือพื้นฐานของระบบทันเวลาพอดี เป็นสัญญาณการเติมเต็มสำหรับการผลิตและวัสดุให้คงไว้ อย่างเป็นลำดับและไหลของวัตถุดิบตลอดทั้งกระบวนการอย่างมีประสิทธิภาพ ระบบคัมบังเป็นกุญแจของความสำเร็จของระบบการผลิตแบบลีน การใช้สัญญาณง่ายๆ ที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเป็นการวัดความต้องการและลำดับก่อนหลังของลูกค้าในระบบดึง คัมบังมักอยู่ในลักษณะของบัตร (card) ลูกบอล รถเข็น หรือ ตู้คอนเทนเนอร์ (container) แต่ส่วนใหญ่อยู่ในลักษณะของบัตรที่มีรายละเอียดข้อมูลจำเพาะ เช่น ชื่อของชิ้นส่วนรายละเอียดอธิบายลักษณะ ปริมาณ เป็นต้น คัมบังสามารถใช้ได้ทั้งในการไหลของวัสดุ ข้อมูลในโรงงาน หรือ การไหลของโครงการ (project flow) ในสำนักงานและการไหลของวัตถุดิบระหว่างผู้จัดส่งสินค้าและลูกค้าตัวอย่างของคัมบังซึ่งใช้อยู่ในสายการผลิต ดังแสดงตัวอย่างของคัมบังแบบบัตรในรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KANBAN CARD	
Product Number: _____	Issue Date: _____
Product Description: _____	Required Date: _____
Quantity Required: _____	Additional Notes: _____ _____
Location: _____	
Container: _____	
Supplier: _____	
Supplier Code: _____	

รูปที่ 2.2 ตัวอย่างคัมบังแบบบัตร

[http://www.leantoolset.com/wp-content/uploads/2013/12/kanban\\_card.png](http://www.leantoolset.com/wp-content/uploads/2013/12/kanban_card.png)

ประโยชน์และข้อดีของคัมบังคือ ลดสินค้าคงคลังสามารถพยากรณ์การไหลของวัสดุได้สร้างตารางเวลาได้อย่างง่ายสร้างระบบดึงด้วยสายตา (visual pull system) ที่ตำแหน่งการผลิต

12. การฝึกอบรมพนักงานข้ามสายงาน (cross trained work force) การฝึกอบรมพนักงานในส่วนที่ไม่ใช่เจ้าหน้าที่เฉพาะด้านให้สามารถที่จะทำงานได้หลายๆ อย่าง เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นในการปฏิบัติงานสามารถที่จะรองรับความต้องการของลูกค้าได้อย่างทันท่วงที่สามารถที่จะช่วยไปทำงานในส่วนอื่นๆ ได้ในหลายๆ กิจกรรม

13. เครื่องมือป้องกันความผิดพลาด (mistaking proofing) หรือ Poka Yoke เป็นเครื่องมืออย่างง่ายและราคาถูก ซึ่งขึ้นส่วนที่เสียหายจากการผลิตและการส่งผ่านเข้ามาในกระบวนการ Poka Yoke กำจัดสิ่งไร้ค่าโดยการกำจัดความผิดพลาด เครื่องมือทั่วไปของ Poka Yoke เช่นหมุดนำร่องขนาดต่าง ๆ เครื่องเตือนและเครื่องตรวจหาสิ่งผิดปกติและใบตรวจสอบรายการ

14. การควบคุมตัวเองโดยอัตโนมัติ (autonomation) หมายถึงการติดตั้งกลไกหรือตัวรับสัญญาณที่เครื่องจักรเพื่อตรวจสอบดูว่าชิ้นงานที่ผลิตมีข้อบกพร่องหรือผิดปกติอยู่หรือไม่ถ้าเครื่องจักรตรวจพบเครื่องจักรจะหยุดทำงานโดยทันทีจุดสำคัญคือการทำงานของเครื่องจักรต้องอิสระไม่ต้องมีคนมาคอยควบคุมจุดประสงค์สำคัญของเครื่องมือคือไม่ปล่อยให้เสียผ่านเข้าไปสู่กระบวนการได้

15. การหยุดสายการผลิต (line stop) คือ พนักงานสามารถที่จะหยุดสายการผลิตได้เมื่อตรวจพบว่าสิ่งผิดปกติเกิดขึ้นกับกระบวนการ

16. การตรวจสอบด้วยตนเอง (self check inspection) คือการตรวจสอบความเรียบร้อยของชิ้นงานด้วยตัวพนักงานเองก่อนที่จะส่งชิ้นงานไปสู่ขั้นตอนถัดไปข้อมูลที่ได้จากการบันทึกผลจะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อควบคุมกระบวนการผลิตป้องกันไม่ให้เกิดการผลิตของเสียขึ้นมาอีกของเสียอาจผ่านเข้าสู่กระบวนการได้โดยความไม่ตั้งใจของพนักงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17. การตรวจสอบอย่างต่อเนื่อง (successive check inspection) การตรวจสอบชิ้นงานโดยผู้ที่ไม่ได้อยู่ในกระบวนการผลิตก่อนที่จะเริ่มกระบวนการขึ้นตอนถัดไปและทำการหยุดการผลิต เพื่อแก้ไขหรือปรับปรุงสภาพการผลิตโดยอัตโนมัติเพื่อได้รับข้อมูลความผิดปกติในขั้นตอนการผลิตการตรวจสอบนี้รวมถึงพนักงานในกระบวนการผลิตถัดไปต้องมีหน้าที่ตรวจสอบชิ้นงานก่อนจะเริ่มการผลิตในขั้นตอนต่อไป

18. การปรับเรียบการผลิต (smoothed production scheduling) คือ การจัดตารางการปฏิบัติงานให้ได้ปริมาณคงที่สม่ำเสมอตามความต้องการ หรือตามปริมาณของลูกค้าในกรณีของการบริการก็เช่นการจัดตารางการนัดหมาย และการมาของลูกค้าปกติเพื่อสามารถที่จะรองรับลูกค้าได้ทั้งหมดรวมไปถึงการเก็บข้อมูลและใช้ข้อมูลในอดีตในการพยากรณ์ความต้องการของลูกค้าเพื่อที่จะลดความแปรปรวนในกระบวนการ

19. กลุ่มการแก้ปัญหา (team based problem solving) คือการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการโดยมีการประชุมทีมงานที่เกี่ยวข้องเพื่อหาทางแก้ไขปัญหาทุกวันหรือเป็นประจำตามการตกลงโดยให้ทุกคนมีส่วนร่วมในการแก้ไขปัญหาเป็นสำคัญ

20. การปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง (continuous improvement) หรือ Kaizen เป็นภาษาญี่ปุ่นแปลว่าการปรับปรุงซึ่งเป็นแนวคิดที่นำมาใช้ในการบริหารจัดการได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมุ่งเน้นที่การมีส่วนร่วมของพนักงานทุกคนร่วมกันแสวงหาแนวทางใหม่ๆ เพื่อปรับปรุงวิธีการทำงานและสภาพแวดล้อมการทำงานให้ดีขึ้นอยู่เสมอ หัวใจสำคัญคือการดำรงอยู่ของสิ่งที่ดีอยู่แล้วและการพัฒนาอย่างต่อเนื่องไม่มีที่สิ้นสุดความสำคัญในกระบวนการของคัมบังคือการใช้ความรู้ ความสามารถของพนักงานมาคิดปรับปรุงงาน โดยการใช้เพียงการลงทุนเล็กน้อยซึ่งทำให้เกิดการปรับปรุงทีละน้อยค่อยๆ เพิ่มพูนอย่างต่อเนื่องตรงข้ามกับแนวคิดนวัตกรรม (innovation) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงขนานใหญ่ต้องใช้เทคโนโลยีซับซ้อนขั้นสูงด้วยเงินลงทุนมหาศาล ดังนั้นไม่ว่าจะอยู่ในภาวะเศรษฐกิจแบบไหนเราก็ใช้คัมบังเพื่อปรับปรุงได้

21. การบำรุงรักษาทีละคนมีส่วนร่วม (total productive maintenance: TPM) คือระบบการบำรุงรักษาที่จะทำให้เครื่องจักร อุปกรณ์เกิดประสิทธิภาพสูงสุด (overall efficiency) โดยพนักงานทุกคนที่เป็นผู้ใช้เครื่องจักร เครื่องมือ หรืออุปกรณ์นั้นๆมีส่วนร่วมในการดูแลรักษาให้อยู่ในสภาพดีพร้อมใช้งานอยู่เสมอด้วยตนเองเช่นการตรวจสอบเครื่องจักรเป็นประจำทุกวัน การดูแลรักษาตามคู่มือการใช้งานอย่างสม่ำเสมอเปลี่ยนอะไหล่ตามอายุการใช้งานหมั่นตรวจสอบและสังเกตสิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์เป้าหมายสูงสุดของ TPM คือ อุปกรณ์เครื่องมือ เสียหายเป็นศูนย์ (zero break down) ความผิดพลาดที่เกิดจากเครื่องมือเป็นศูนย์ (zero defect) อุบัติเหตุที่เกิดจากการใช้งานเครื่องจักร เครื่องมือเป็นศูนย์ (zero accident) องค์ประกอบ 8 ประการ ของ TPM ประกอบด้วย

1. การปรับปรุงเฉพาะเรื่อง (individual improvement) คือให้ฝ่ายที่มีหน้าที่เกี่ยวข้องโดยตรงต่อเครื่องมือเป็นผู้รับผิดชอบและฝ่ายอื่น ๆ เป็นผู้สนับสนุนควบคู่ไปกับกิจกรรมบำรุงรักษาด้วยตนเองโดยเป็นการปรับปรุงที่อุปกรณ์ต้นแบบก่อนจากนั้นค่อยขยายการปรับปรุงไปยังเครื่องอื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การบำรุงรักษาด้วยตนเอง (autonomous maintenance) โดยมีแนวคิดที่ไม่มีใครจะเข้าใจ เครื่องมือไปมากกว่าผู้ใช้เองผู้ใช้งานจะสามารถสังเกตสิ่งผิดปกติได้ดีกว่าคนอื่น ๆ

3. การบำรุงรักษาตามแผน (planned maintenance) คือการที่ฝ่ายซ่อมบำรุงดำเนินการกิจกรรมตามระยะเวลาของการใช้งานโดยให้สอดคล้องกับกิจกรรมที่ดำเนินอยู่ไม่ไปขัดขวางงานปกติ

5. การพัฒนาทักษะการปฏิบัติงานและการบำรุงรักษาแม้ว่าผู้ใช้เครื่องมือเครื่องจักรอาจจะเข้าใจ เครื่องดีเพียงใดแต่เครื่องมือที่ออกแบบเฉพาะมาเพื่อการใช้งานต่างๆกันไปผู้ใช้เครื่องจำเป็นต้องเพิ่มทักษะ การปฏิบัติงานและการบำรุงรักษาอย่างถูกวิธีด้วยรวมไปถึงผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกคนทั้งโดยตรงและทางอ้อม

6. การคำนึงถึงการบำรุงรักษาตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบ (initial phase maintenance) หมายถึงตั้งแต่เริ่มที่จะสร้างผลิตภัณฑ์และกระบวนการต้องคำนึงถึงการใช้งานเครื่องจักรด้วยเพื่อเป็นการ ส่งเสริมกระบวนการให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

7. การบำรุงรักษาเพื่อคุณภาพ (quality maintenance) การเชื่อมโยงความสัมพันธ์และกิจกรรม การควบคุมเครื่องมือเข้าด้วยกันโดยการติดตามระหว่างกิจกรรมประกันคุณภาพคุณลักษณะด้านคุณภาพ ของงานและการใช้เครื่องมือตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้

8. กิจกรรม TPM ในสำนักงาน หน่วยงานซึ่งไม่ได้เกี่ยวข้องโดยตรงในกระบวนการเช่น ฝ่าย บริหาร ฝ่ายวิจัยและพัฒนา ฝ่ายบัญชี ซึ่งเป็นส่วนสนับสนุนกระบวนการให้เป็นไปได้อย่าง ราบรื่น 5 องค์ประกอบในงาน TPM คือ การบำรุงรักษาด้วยตนเอง การศึกษาและฝึกอบรมการจัดระบบการ มอบหมายงาน และการจัดทำระบบประเมินผลซึ่งต้องกำหนดดัชนีชี้วัดความสำเร็จเพื่อติดตามความ คืบหน้าและผลการปฏิบัติงาน

9. ระบบชีวอนามัย ความปลอดภัย และสิ่งแวดล้อม (safety, hygiene and environment) ซึ่ง เป็นเงื่อนไขของการดำเนินกระบวนการในปัจจุบัน เพื่อความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องโดยตรง และผู้คนที่อาศัยอยู่ในชุมชนนั้นๆ โดยระลึกถึงการปฏิบัติงานใดๆ ย่อมมีอุบัติเหตุเกิดขึ้นได้เสมอและมี ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น หากเครื่องจักรไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพโอกาสที่จะเกิด ของเสี่ย่อมมีสูงฉะนั้นวัตถุดิบก็ต้องใช้ในปริมาณที่มากขึ้นทรัพยากรย่อมถูกใช้ไปมากขึ้นเช่นกัน อุบัติเหตุ จากความไม่พร้อมของเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ใดๆ ย่อมมีโอกาสมากขึ้นเช่นกันขั้นตอนการบริหารความ ปลอดภัยในกิจกรรม TPM ประกอบด้วยความปลอดภัยในการบำรุงรักษาด้วยตนเองความปลอดภัยในการ บำรุงรักษาตามแผน และความปลอดภัยในการป้องกันการ บำรุงรักษา

22. การออกแบบการทดลอง (design of experiment: DOE) เป็นการใช้เครื่องมือทางสถิติใน การออกแบบการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่ผลกระทบในการทำงาน

23. การวิเคราะห์รากสาเหตุ (root cause analysis) เป็นเทคนิคในการแก้ปัญหาเบื้องต้น คือ การย้อนกลับขึ้นไปหาถึงสาเหตุของปัญหาโดยพยายามเจาะลึกถึงสาเหตุของปัญหา เช่น 5 Whys

24. การควบคุมกระบวนการทางสถิติ (statistical process control) เป็นการควบคุม กระบวนการโดยการหาค่าเฉลี่ยของตัวแปรในกระบวนการกำหนดควบคุมเขตจำกัดบนและล่างตรวจสอบ ตัวแปรและควบคุมกระบวนการให้อยู่ในขอบเขตที่ควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

25. การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (preventive maintenance) เป็นกลยุทธ์การซ่อมบำรุงโดยมีแนวคิดในการดูแลรักษาก่อนที่จะเครื่องจักรจะเสียหายโดยการดูแลรักษาและตรวจสอบเครื่องมือและชิ้นส่วนต่างๆอย่างสม่ำเสมอตามเวลาที่กำหนด ก่อนที่เครื่องมือเครื่องจักรจะเสียหาย

26. การบำรุงรักษาโดยการพยากรณ์ (predictive maintenance) เป็นกลยุทธ์การซ่อมบำรุงจากการเก็บข้อมูลการใช้งานและความเสียหายตรวจสอบดูว่าเกิดอะไรขึ้นบ้างแล้วคาดการณ์ว่าจะเกิดขึ้นเมื่อไรแล้วดำเนินการแก้ไขก่อนที่จะเกิดปัญหา

26. การบำรุงรักษาอย่างน่าเชื่อถือ (reliability centered maintenance) เป็นกลยุทธ์การซ่อมบำรุงซึ่งต้องมีการทำ failure modes and effects analysis อย่างละเอียดสำหรับเครื่องมือที่มีความสำคัญเป็นการรับประกันว่าจะไม่เกิดความเสียหาย

#### 2.1.4 ผลที่ได้จากการมีระบบการผลิตแบบลีน

ได้มีการพิสูจน์โดยการปฏิบัติกันมาแล้วว่าการมีระบบการผลิตแบบลีนจะทำให้เกิดสิ่งเหล่านี้ขึ้นได้แก่

1. สิ้นค้าคงคลังลดลงในระดับที่ยังคงตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าได้อยู่ซึ่งเป็นการลดลงทั้งในส่วนของวัตถุดิบ (raw material) งานระหว่างทำ (work in process) ซึ่งจะลดลงได้ระหว่าง 30-90% และสินค้าสำเร็จรูปที่ผลิตเสร็จแล้ว (finished goods) ซึ่งจะลดลงได้ 50-90% จะเห็นได้ว่าการที่สิ้นค้าคงคลังลดลงมีผลต่อต้นทุนที่ลดลง โดยจะมีเฉพาะต้นทุนที่จำเป็นทั้งในแง่ของปริมาณและในเวลาที่เหมาะสม
2. ผลิตภาพเพิ่มขึ้น 5-50% ซึ่งจะทำให้ต้นทุนต่อหน่วยลดลง
3. เวลาในการผลิตลดลง (lead time) 80-90% ทำให้สามารถปรับเปลี่ยนการผลิตและตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ดีขึ้น
4. ราคาจัดซื้อลดลง 20-60% หากผู้จัดส่ง (supplier) มีระบบการผลิตแบบลีนด้วย

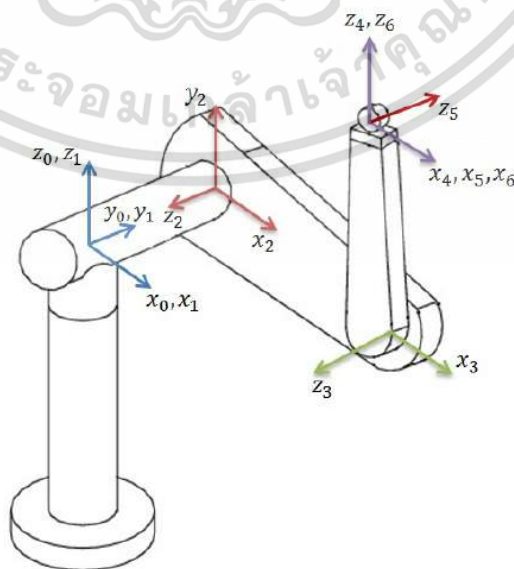
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1 การศึกษาเกี่ยวกับหุ่นยนต์

### 2.2.1 จลนศาสตร์ข้างหน้า

จลนศาสตร์คือคำอธิบายของการเคลื่อนที่โดยไม่คำนึงถึงแรงที่ทำให้เกิดเกี่ยวข้องกับการศึกษาตำแหน่ง ความเร็ว ความเร่งที่จุดต่างๆของวัตถุแข็งเกร็ง

จลนศาสตร์ข้างหน้า ปัญหาจลนศาสตร์ข้างหน้าสามารถระบุได้ดังต่อไปนี้ ตัวแปรของหุ่นยนต์ กำหนดตำแหน่งและการวางแนวของตัวทำงานส่วนปลายหุ่นยนต์ ตั้งแต่ข้อต่อแต่ละข้อมีระดับความอิสระเพียงระดับเดียวการกระทำของข้อต่อแต่ละข้อสามารถอธิบายได้โดยหมายเลขเดียว คือ มุมการหมุนในกรณีของข้อต่อหมุนรอบ วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์จลนศาสตร์ข้างหน้าคือการตรวจสอบผลสะสมของตัวแปรร่วมสมมติว่าหุ่นยนต์มีก้านต่อหุ่นยนต์  $n + 1$  ที่มีหมายเลขตั้งแต่ 0 ถึง  $n$  โดยเริ่มจากฐานของหุ่นยนต์ที่จะนำมาเป็นก้านต่อหุ่นยนต์ 0 ข้อต่อมีหมายเลขตั้งแต่ 1 ถึง  $n$  และ  $z_i$  เป็นหน่วยเวกเตอร์ตามแนวแกนในพื้นที่การทำงานซึ่งก้านต่อหุ่นยนต์  $i - 1$  และ  $i$  เชื่อมต่ออยู่  $i - th$  ตัวแปรร่วมถูกแสดงโดย  $q_i$  ในกรณีที่ข้อต่อหมุนรอบ  $q_i$  จะเป็นมุมที่ทำการหมุน และในกรณีที่ข้อต่อ  $q_i$  คือมุมของการหมุนและในกรณีที่ข้อต่อแนวเส้นตรง  $q_i$  คือข้อต่อที่มีการเปลี่ยนแปลง ถัดไปในพื้นที่การทำงานในทิศทางที่อยู่กับข้อต่อในแต่ละก้านต่อของหุ่นยนต์ โดยการเลือกเฟรม ( frame ) 1 ถึง  $n$  เพื่อให้เฟรม  $i$  ติดต่อกับก้านต่อ  $i$  รูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงแนวคิดของการต่อเฟรมเชื่อมโยงติดกันในกรณีของหุ่นยนต์ PUMA 560 ,  $T_i^{i-1}$  เป็นเมทริกซ์เอกพันธ์ซึ่งถูกกำหนดให้แปลงพิกัดของจุดจากเฟรม  $i$  เป็นเฟรม  $i - 1$ , เมทริกซ์  $T_i^{i-1}$  จะไม่คงที่ แต่เปลี่ยนแปลงไปตามการกำหนดค่าของหุ่นยนต์ อย่างไรก็ตามอนุมานว่าข้อต่อทั้งหมดเป็นได้ทั้งข้อต่อแบบหมุน และข้อต่อแบบเส้นตรงหมายความว่า  $T_i^{i-1}$  รูปที่ 2.3 แสดงแกนหมุนของแขนหุ่นยนต์ในตำแหน่ง Home



รูปที่ 2.3 PUMA 560 ในตำแหน่ง home  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับจลนศาสตร์การเคลื่อนไหวเป็นฟังก์ชันของตัวแปรร่วมเดียวเท่านั้นคือ  $q_i$  จะสามารถแปลงได้

$$T_i^{i-1} = T_i^{i-1}(q_i) \quad (2.1)$$

เมทริกซ์เอกพันธ์ที่แปลงพิกัดของจุดจากกรอบ  $i$  เพื่อเฟรม  $j$  เขียนแทนโดย  $T_i^{i-1}$  ( $i > j$ )

แสดงถึงตำแหน่งและทิศทางของตัวทำงานส่วนปลาย ตามลำดับความเฉื่อยหรือเฟรมฐานโดยเวกเตอร์สามมิติ  $d_n^0$  และเมทริกซ์การหมุน  $3 \times 3$   $R_n^0$  ตามลำดับ สามารถกำหนดเมทริกซ์เอกพันธ์

$$T_n^0 = \begin{bmatrix} R_n^0 & d_n^0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

จากนั้นตำแหน่งและทิศทางของของตัวทำงานส่วนปลาย ในกรอบของความเฉื่อยจะได้สมการ

$$T_n^0(q_1, q_2, \dots, q_n) = T_1^0(q_1)T_2^0(q_2) \dots T_n^{n-1}(q_n) \quad (2.3)$$

จากการแปลงเอกพันธ์  $T_n^{i-1}$  จะได้ว่ารูปแบบ

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} R_i^{i-1} & d_i^{i-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

จะได้

$$T_i^j = T_{j+1}^j \dots T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} R_i^{i-1} & d_i^{i-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

สำหรับเมทริกซ์  $R_i^j$  แสดงการวางแนวของเฟรม  $i$  เมื่อเทียบกับเฟรม  $j$  ( $i > j$ ) และได้รับจากส่วนการหมุนของเมทริกซ์  $T_i^j$  ( $i > j$ ) จะได้ว่า

$$R_i^j = R_{j+1}^j \dots R_i^{i-1} \quad (2.6)$$

เวกเตอร์  $R_i^j$  ( $i > j$ ) จะทำให้เกิดการทำซ้ำโดยสมการ

$$d_i^j = d_{i+1}^j + R_{i-1}^j d_i^{j-1} \quad (2.7)$$

ทั่วไปการใช้วิธีการที่จะใช้เพื่อทำการกำหนดการแก้ปัญหาในการที่จะกำหนดเฟรมในของหุ่นยนต์คือ Denavit-Hartenberg หรือ DH Convention จะเป็นการหาความสัมพันธ์ของการแปลงเอกพันธ์  $T_i^{i-1}$  เป็นการแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงพื้นฐานทั้งสิ้น

$$T_i^{i-1} = Rot(x, \alpha_{i-1})Trans(x, a_{i-1})Rot(z, \theta_i)Trans(z, d_i) \quad (2.8)$$

เมื่อ พจน์  $Rot(x, \alpha_{i-1})$  ใช้สำหรับการหมุนแกน  $x_i$  โดย  $\alpha - 1$ ,

$Trans(x, a_{i-1})$  เป็นการแปลงแกน  $x_i$  โดยการไ้ระยะห่าง  $a_{i-1}$ ,

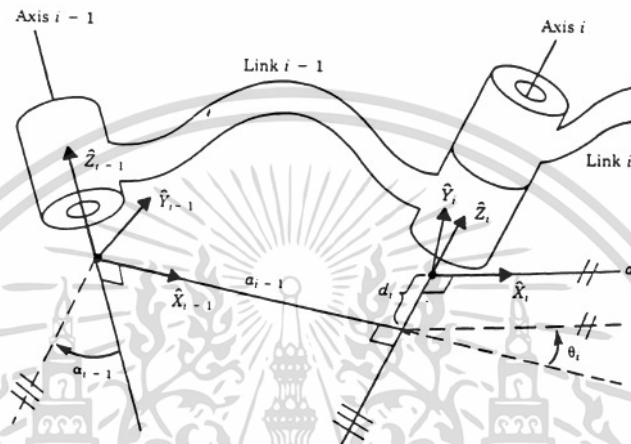
$Rot(z, \theta_i)$  เป็นการหมุนสำหรับแกน  $Z_i$  โดยการไ้ระยะห่าง  $d_i$

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{\alpha_{i-1}} & -s_{\alpha_{i-1}} & 0 \\ 0 & s_{\alpha_{i-1}} & c_{\alpha_{i-1}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{i-1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{\theta} & -s_{\theta} & 0 & 0 \\ s_{\theta} & c_{\theta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i} & 0 & a_{i-1} \\ s_{\theta_i}c_{\alpha_{i-1}} & c_{\theta_i}c_{\alpha_{i-1}} & -s_{\alpha_{i-1}} & -s_{\alpha_{i-1}}d_i \\ s_{\theta_i}s_{\alpha_{i-1}} & c_{\theta_i}s_{\alpha_{i-1}} & c_{\alpha_{i-1}} & c_{\alpha_{i-1}}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

เมื่อจำนวนทั้ง 4 ค่า  $\theta_i, a_i, d_i, \alpha_i$  เป็นตัวแปรของก้านต่อ  $i$  และข้อต่อ  $i$  รูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงการเชื่อมต่อกันของเฟรม โดยที่เฟรม  $\{i\}$  จะต่อกับก้านต่อ  $i$



รูปที่ 2.4 พิกัดเฟรม

ค่าตัวแปรต่างๆ ในสมการที่ (2.10) สามารถแสดงได้ดังนี้

$a_i$  เป็นระยะตามแนวแกน  $z_i$  ถึง  $z_{i+1}$  วัดตามค่า  $x_i$ ;

$\alpha_i$  เป็นมุมระหว่าง  $z_i$  ถึง  $z_{i+1}$  วัดตามค่า  $x_i$ ;

$d_i$  เป็นระยะระหว่าง  $x_{i-1}$  ถึง  $x_i$  วัดตามค่า  $z_i$ ;

$\theta_i$  เป็นระยะระหว่าง  $x_{i-1}$  ถึง  $x_i$  วัดตามค่า  $z_i$ ;

ในกรณีของข้อต่อแบบหมุน  $\theta_i$  เรียกว่าองศาการเปลี่ยนแปลงของข้อต่อและค่าที่คงที่อีกทั้ง 3 ค่าของก้านต่อหุ่นยนต์ สำหรับหุ่นยนต์ PUMA 560 ค่าคงที่ที่ต้องใช้ในการที่กำหนดค่าคงที่ของจลนศาสตร์มีความจำเป็นที่จะต้องใช้ทั้งหมด 18 ค่าแสดงในตารางที่ (2.1)

$i$	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	0	0	$\theta_1$
2	-90	0	$d_2$	$\theta_2$
3	0	$a_2$	$d_3$	$\theta_3$
4	90	$a_3$	$d_4$	$\theta_4$
5	-90	0	0	$\theta_5$
6	90	0	0	$\theta_6$

ตารางที่ 2.1 ตาราง DH สำหรับ PUMA 560

การใช้ค่าตามตาราง 2.1 ของพารามิเตอร์กำหนด เป็นการแปลงการเชื่อมโยงแต่ละรายการของเมทริกซ์  $T_i^{i-1}$  เพื่อใช้ในการคำนวณ จากนั้นการแปลงกำหนดสามารถต่อกันได้ โดยการคูณร่วมกันเพื่อค้นหาการแปลงครั้งเดียวที่สัมพันธ์กับเฟรม 6 ถึง เฟรม 0:

$$T_6^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 \dots T_6^5 \quad (2.11)$$

การเปลี่ยนแปลงที่กำหนดโดยสมการ (2.11) เป็นฟังก์ชันของตัวแปรร่วม 6 ตัว จากเซ็นเซอร์ตำแหน่งข้อต่อของหุ่นยนต์, ตำแหน่งคาร์ทีเซียนและตำแหน่งปัจจุบันของกำหนดจะทำการคำนวณโดยใช้สมการ (2.11)

### 2.2.2 จลนศาสตร์ผกผัน

การแก้ไขปัญหาจลนศาสตร์ผกผันจะตรงกันข้ามกับจลนศาสตร์ข้างหน้าจะทำได้ดังต่อไปนี้ เมื่อได้รับตำแหน่งและการวางแนวที่ต้องการสำหรับตัวทำงานสุดท้ายของหุ่นยนต์ กำหนดจุดของตัวแปรร่วมที่กำหนด ตำแหน่งและทิศทางที่ต้องการ

สมการสำหรับการแก้จลนศาสตร์ผกผันของหุ่นยนต์เป็นแบบไม่เชิงเส้น จะได้ค่าตัวเลขจากการแปลงเมทริกซ์ จะได้ค่า  $\theta_1, \theta_2, \theta_3 \dots \theta_n$  พิจารณาสมการสำหรับ  $T_6^0$  จะได้เมทริกซ์

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} C_{\theta_1} & -S_{\theta_1} & 0 & 0 \\ S_{\theta_1} & C_{\theta_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_2^1 = \begin{bmatrix} C_{\theta_2} & -S_{\theta_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ -S_{\theta_2} & -C_{\theta_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} C_{\theta_3} & -S_{\theta_3} & 0 & a_2 \\ S_{\theta_3} & C_{\theta_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_4^3 = \begin{bmatrix} C_{\theta_4} & -S_{\theta_4} & 0 & a_3 \\ 0 & 0 & -1 & -d_4 \\ S_{\theta_4} & C_{\theta_4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_5^4 = \begin{bmatrix} C_{\theta_5} & -S_{\theta_5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -S_{\theta_5} & -C_{\theta_5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_6^5 = \begin{bmatrix} C_{\theta_6} & -S_{\theta_6} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S_{\theta_6} & C_{\theta_6} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

และสำหรับการแปลงเมตริกซ์สุดท้ายสำหรับหุ่นยนต์ PUMA560 จะได้สมการ (2.13)

$$T_6^0 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & d_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & d_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

สำหรับหุ่นยนต์ PUMA 560 จะทำให้การแก้สมการแสดงได้โดย ให้เมทริกซ์การแปลงสำหรับ  $T_6^0$  สำหรับการหาค่าของข้อต่อทั้งหกข้อต่อ โดยใช้ มุม  $\theta_1$  ถึง  $\theta_6$  สำหรับ PUMA 560 ที่มี 6 ข้อต่อจะได้สมการ

$$\begin{aligned} r_{11} &= (c_1 c_{23} c_4 - s_1 s_4) c_5 c_6 - c_1 s_{23} s_5 c_6 - c_1 c_{23} s_4 s_6 - s_1 c_4 s_6 \\ r_{12} &= -(c_1 c_{23} c_4 - s_1 s_4) c_5 s_6 + c_1 s_{23} s_5 c_6 - c_1 c_{23} s_4 c_6 - s_1 c_4 c_6 \\ r_{13} &= (c_1 c_{23} c_4 - s_1 s_4) c_5 + c_1 s_{23} c_5 \\ r_{21} &= (s_1 c_{23} c_4 + c_1 s_4) c_5 c_6 - c_1 s_{23} s_5 c_6 - s_1 c_{23} s_4 s_6 - c_1 c_4 s_6 \\ r_{22} &= -(s_1 c_{23} c_4 + c_1 s_4) c_5 s_6 + c_1 s_{23} s_5 c_6 - s_1 c_{23} s_4 c_6 - c_1 c_4 c_6 \\ r_{23} &= (s_1 c_{23} c_4 + c_1 s_4) s_5 + s_1 s_{23} c_5 \\ r_{31} &= -s_{23} c_4 c_5 c_6 - c_{23} s_5 c_6 + s_{23} s_4 s_6 \\ r_{32} &= s_{23} c_4 c_5 s_6 + c_{23} s_5 c_6 + s_{23} s_4 c_6 \\ r_{33} &= -s_{23} c_4 s_5 + c_{23} c_5 \\ d_x &= c_1 (c_{23} a_3 + s_{23} d_4 + c_2 a_2) - s_1 d_{23} \\ d_y &= s_1 (c_{23} a_3 + s_{23} d_4 + c_2 a_2) + c_1 d_{23} \\ d_z &= -s_{23} a_3 + c_{23} d_4 - s_2 a_2 \end{aligned} \quad (2.14)$$

โดยที่จะมี 12 สมการและ 6 ตัวแปร อย่างไรก็ตามในบรรดา 9 สมการที่เกิดจากส่วนการหมุนของเมทริกซ์การแปลง  $T_6^0$  จะมี 3 สมการที่เป็นอิสระเพิ่มด้วยสมการทั้งสามจากส่วนตำแหน่งของ  $T_6^0$  จะแปลงได้ 6 สมการโดยที่ใช้ 6 ตัวแปรสมการเหล่านี้จะไม่ใช่สมการเชิงเส้น หุ่นยนต์จะถูกพิจารณาว่าสามารถทำงานได้หากสามารถกำหนดตัวแปรทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งและทิศทางที่กำหนดได้

เงื่อนไขที่แก้ปัญหาแบบปิดคือกำหนดข้อต่อสามจุดติดต่อกันตัดกันที่จุดแกนสามอันสุดท้ายนั่นคือ 4, 5, และ 6 ของ PUMA 560 เมื่อสามแกนสุดท้ายตัดกันต้นกำเนิดของกำหนดเฟรมจะอยู่ที่จุดตัดกันนี้ จุดนี้ได้รับในพิกัดฐานเป็น

$$P_{4ORG}^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 P_{4ORG}^3 \quad (2.15)$$

ใช้คอลัมน์ที่สี่ ของสมการที่ 2.10 สำหรับ  $i = 4$

$$P_{4ORG}^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 \begin{bmatrix} a_3 \\ -d_4 s \alpha_3 \\ d_4 c \alpha_3 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad (2.16)$$

หรือ

$$P_{4ORG}^0 = T_1^0 T_2^1 \begin{bmatrix} f_1(\theta_3) \\ f_2(\theta_3) \\ f_3(\theta_3) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

เมื่อ

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ 1 \end{bmatrix} = T_3^2 \begin{bmatrix} a_3 \\ -d_4 s \alpha_3 \\ d_4 c \alpha_3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

ใช้สมการ (2.10) สำหรับ  $T_3^2$  ในสมการ (2.18) จะแสดงได้ดังต่อไปนี้สำหรับ  $f_i$

$$\begin{aligned} f_1 &= a_3 c_3 + d_4 s \alpha_3 s_3 + a_2 \\ f_2 &= a_3 c \alpha_2 s_3 - d_4 s \alpha_3 c \alpha_2 c_3 - d_4 s \alpha_2 c \alpha_3 - d_3 s \alpha_2 \\ f_3 &= a_3 s \alpha_2 s_3 - d_4 s \alpha_3 s \alpha_2 c_3 + d_4 c \alpha_2 c \alpha_3 + d_3 s \alpha_2 \end{aligned} \quad (2.19)$$

เมื่อใช้สมการ (2.10) สำหรับ  $T_1^0$  และ  $T_2^1$  ในสมการ (2.17) จะได้

$$P_{4ORG}^0 = \begin{bmatrix} c_1 g_1 - s_1 g_2 \\ s_1 g_1 + c_1 g_2 \\ g_3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} g_1 &= c_2 f_1 - s_2 f_2 + a_1 \\ g_2 &= s_2 c \alpha_1 f_1 + c_2 c \alpha_1 f_2 - s \alpha_1 f_3 - d_2 s \alpha_1 \\ g_3 &= s_2 s \alpha_1 f_1 + c_2 s \alpha_1 f_2 + c \alpha_1 f_3 + d_2 c \alpha_1 \end{aligned} \quad (2.21)$$

ตอนนี้เราเขียนนิพจน์สำหรับขนาดกำลังสองของ  $P_{4ORG}^0$  ซึ่งดูได้จาก สมการ (2.20) จะได้

$$r = g_1^2 + g_2^2 + g_3^2 \quad (2.22)$$

หรือใช้สมการ (2.21) สำหรับ  $g_i$  เราจะได้

$$r = f_1^2 + f_2^2 + f_3^2 + a_1^2 + d_2^2 + 2d_2 f_3 + 2a_1(c_2 f_1 - s_2 f_2) \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนนี้เราเขียนสมการนี้พร้อมกับสมการองค์ประกอบ  $Z$  จากสมการ (2.20) ในระบบสองสมการ ในรูปแบบ

$$\begin{aligned} r &= (k_1c_1 + k_2s_2)2a_1 + k_3 \\ z &= (k_1s_1 - k_2c_2)sa_1 + k_4 \end{aligned} \quad (2.24)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} k_1 &= f_1 \\ k_2 &= -f_2 \\ k_3 &= f_1^2 + f_2^2 + f_3^2 + a_1^2 + d_2^2 + 2d_2f_3 \\ k_4 &= f_3ca_1 + d_2ca_1 \end{aligned} \quad (2.25)$$

สำหรับสมการ (2.24) ที่จะต้องใช้ค่า  $\theta_1$  จะถูกกำจัดและการใช้ค่า  $\theta_2$  จะใช้รูปแบบที่มาตรฐาน สำหรับกรณีของ PUMA 560 เนื่องจากเราได้เลือกพารามิเตอร์ D-H เช่นนั้นวิธีที่  $a_1$  เป็นศูนย์ (ดูตาราง (2.1) ) ดังนั้นหลังจากทำการแทนค่า

$$\begin{aligned} u &= \tan \frac{\theta}{2} \\ \cos\theta &= \frac{1-u^2}{1+u^2} \\ \sin\theta &= \frac{2u}{1+u^2} \end{aligned} \quad (2.26)$$

โดยที่  $r = k_3$  เมื่อสามารถรู้ค่า  $r$  ด้วยกฎของมือขวา  $k_3$  จะเป็นฟังก์ชันของ  $\theta_3$  เท่านั้น เหล่านี้จะเป็นสมการกำลัง 2 ในกรณี  $u$  สำหรับการแก้ปัญหา  $\theta_3$

เมื่อต้องแก้สมการหาค่า  $\theta_3$  จะสามารถแก้โดยสมการ (2.24) สำหรับ  $\theta_2$  และสมการ (2.20) สำหรับ  $\theta_1$

เพื่อให้การหาค่าทุกแกนจะต้องทำการหาค่า  $\theta_4, \theta_5,$  และ  $\theta_6$  เมื่อแกนเหล่านี้ตัดกันมุมเชื่อมต่อ เหล่านี้มีผลต่อการวางแนวของก้านต่อล่าสุดเท่านั้น เราสามารถคำนวณได้ตามส่วนการหมุนเวียนของเป้าหมายที่ระบุเท่านั้น  $R_6^0$  โดยจะมีมุม  $\theta_1, \theta_2,$  และ  $\theta_3$  เราจะสามารถคำนวณหาค่า  $R_3^0$  การวางแนวของก้านต่อเฟรม 3 ที่สัมพันธ์กับกรอบฐาน

การวางแนวที่ต้องการของ 6 แตกต่างจากการวางแนวนี้โดยเฉพาะการกระทำของข้อต่อสามครั้งล่าสุด เนื่องจากปัญหาถูกระบุให้  $R_6^0$  เราสามารถคำนวณได้

$$R_6^3 = (R_3^0)^{-1}R_6^0 \quad (2.27)$$

สำหรับตัวจัดการ สามารถปรับสามมุมสุดท้ายสามารถแก้ไขได้โดยใช้  $Z - Y - Z$  วิธีแก้ปัญหา มุมออยเลอร์ที่กำหนดในโดยการเริ่มต้นจากเฟรมที่เหมือนกันของเฟรม A ถ้าเฟรม B หมุนเป็นเฟรมแรก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย  $Z$  โดยมีมุม  $\alpha$  เมื่อหมุนไปเท่ากับ  $Y$  โดยมีมุม  $\beta$  และทำการหมุนไปเท่ากับ  $Z$  โดยมีมุม  $\gamma$  เมทริกซ์การหมุนที่เท่ากันจะได้รับเป็น:

$$R_{ZYX(\alpha,\beta,\gamma)}^i = \begin{bmatrix} C_\alpha C_\beta C_\gamma - S_\alpha S_\gamma & -C_\alpha C_\beta S_\gamma - S_\alpha C_\gamma & C_\alpha S_\beta \\ S_\alpha C_\beta C_\gamma - C_\alpha S_\gamma & -S_\alpha C_\beta S_\gamma - C_\alpha C_\gamma & S_\alpha S_\beta \\ -S_\beta C_\gamma & C_\beta S_\gamma & C_\beta \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

วิธีการแก้ปัญหาสำหรับการแยกมุมออยเลอร์  $Z - Y - Z$  จากเมทริกซ์การหมุนแสดงไว้ด้านล่างจะได้

$$R_{ZYX(\alpha,\beta,\gamma)}^i = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

ถ้า  $\sin\beta \neq 0$ , เมื่อ

$$\begin{aligned} \beta &= \text{Atan2}(\sqrt{r_{31}^2 + r_{32}^2}, r_{33}) \\ \alpha &= \text{Atan2}\left(\frac{r_{23}}{S_\beta}, \frac{r_{13}}{S_\beta}\right) \\ \gamma &= \text{Atan2}\left(\frac{r_{32}}{S_\beta}, \frac{r_{31}}{S_\beta}\right) \end{aligned} \quad (2.30)$$

ถ้า  $\beta = 0.0$  เมื่อการหาผลลัพธ์จะสามารถคำนวณได้โดย

$$\begin{aligned} \beta &= 0.0 \\ \alpha &= 0.0 \\ \gamma &= \text{Atan2}(-r_{12}, r_{11}) \end{aligned} \quad (2.31)$$

ถ้า  $\beta = 180.0^\circ$  เมื่อการหาผลลัพธ์จะสามารถคำนวณได้โดย

$$\begin{aligned} \beta &= 180.0^\circ \\ \alpha &= 0.0 \\ \gamma &= \text{Atan2}(r_{12}, -r_{11}) \end{aligned} \quad (2.32)$$

สมการ (2.29) (2.30) (2.31) และ (2.32) ที่ใช้กับ  $R_6^3$  สำหรับตัวจัดการจำนวนมาก (พร้อมแกนที่ตัดกัน 4, 5 และ 6) มุมแก้ไขสามข้อสุดท้ายสามารถแก้ไขได้ด้วยชุดของมุมออยเลอร์ที่กำหนดอย่างเหมาะสม เนื่องจากมีข้อต่อสองข้อเสมอสำหรับข้อต่อสามข้อสุดท้ายจำนวนทั้งหมดของตัวแก้ไขสำหรับตัวจัดการจะเป็นสองเท่าของจำนวนที่พบสำหรับข้อต่อสามข้อแรก จะแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งสอดคล้องกับ 2 ค่าของ  $\theta_3$  (ที่ได้จากสมการ 2.24 โดยใช้การแทนค่าของสมการ 2.26) จะได้ค่า 2 ค่าของ  $\theta_2$  สมการสำหรับการหาค่าสองอีกครั้งในภายหลัง ใช้กระบวนการแบบนี้เพื่อหาค่าที่สอดคล้องกันสำหรับ  $\theta_1, \theta_4, \theta_5$  และ  $\theta_6$  ดังนั้นเราจะมีวิธีแก้ไขปัญหาร่วมกันสี่ชุดสำหรับการแก้ไขของข้อต่อ สำหรับ  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_6$

นิพจน์สำหรับมุมร่วมที่เกี่ยวข้องสำหรับ PUMA 560 ได้ดังนี้:

$$\theta_1 = \text{Atan2}(Y_e, X_e) - \text{Atan2}(g_2, g_1)$$

$$\theta_2 = \text{Atan2}(-k_1, k_2) \pm \text{Atan2}\left(\sqrt{k_2^2 + k_1^2 - Z_e^2}, Z_e\right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
\theta_3 &= \text{Atan2}(d_4, a_3) \pm \text{Atan2}(\sqrt{a_3^2 + d_4^2 - KC^2}, Z_e) \\
\theta_4 &= \text{Atan2}\left[\frac{r_{33}}{\sin \theta_5}, \frac{r_{13}}{\sin \theta_5}\right] \\
\theta_5 &= \text{Atan2}[\sqrt{r_{21}^2 + r_{22}^2}, -r_{23}] \\
\theta_6 &= \text{Atan2}\left[\frac{-r_{22}}{\sin \theta_5}, \frac{r_{21}}{\sin \theta_5}\right]
\end{aligned} \tag{2.33}$$

โดยที่  $X_e$ ,  $Y_e$ , และ  $Z_e$  เป็นพิกัดตำแหน่งของปลายแขนตำแหน่งสุดท้ายที่สอดคล้องกับคอลัมน์ที่ 4 ของเมทริกซ์  $T_{desired}$  และ "KC" ถูกกำหนดโดย

$$KC = (r - 2d_2d_3 - d_2^2 - a_2^2 - d_3^2 - d_4^2 - a_3^2)/2a_2 \tag{2.34}$$

ส่วนประกอบ  $r_{ij}$  สอดคล้องกับ R.H.S ของสมการ (2.27)

ถ้า  $\theta_5 = 0.0$  จะได้  $\theta_5 = 0.0$ ,  $\theta_4 = 0.0$ , และ  $\theta_6 = \text{Atan2}[-r_{12}, r_{11}]$

ถ้า  $\theta_5 = \pi$  จะได้  $\theta_5 = \pi$ ,  $\theta_4 = 0.0$  และ  $\theta_6 = \text{Atan2}[-r_{12}, -r_{11}]$

### 2.2.3 สมการออยเลอร์ - ลากรองจ์

การหาสมการการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ สามารถหาได้จากสมการออยเลอร์ - ลากรองจ์ เพื่อที่จะกำหนดสมการเหล่านี้ในสถานการณ์เฉพาะเราต้องสร้างลากรองจ์ของระบบ สูตรไดนามิกลากรองจ์เป็นวิธีการใช้พลังงานพลวัตโดยใช้พลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของระบบ

มีสองปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของหุ่นยนต์ที่เราต้องการเพื่อหาคำตอบ ปัจจัยแรกต้องค้นหาแรงบิดรวม  $\tau$  ได้รับวิถี  $\theta$   $\dot{\theta}$  และ  $\ddot{\theta}$  การกำหนดสูตรนี้มีประโยชน์สำหรับการควบคุมหุ่นยนต์ ปัญหาที่สองคือการคำนวณว่ากลไกจะเคลื่อนไหวยังไงภายใต้การประยุกต์ใช้ข้อต่อแรงบิด นั่นคือจากเวกเตอร์แรงบิด  $\tau$  คำนวณการเคลื่อนที่ของผลลัพธ์หุ่นยนต์  $\theta$   $\dot{\theta}$  และ  $\ddot{\theta}$  สิ่งนี้มีประโยชน์สำหรับการจำลองหุ่นยนต์

การคำนวณสูตรลากรองจ์ของแขนหุ่นยนต์เริ่มต้นด้วยปรับสมการของพลังงานจลน์ของหุ่นยนต์ พลังงานจลน์ของ ith ก้านต่อ 4 สามารถแสดงเป็น

$$K_i = \frac{1}{2} m_i V_{ci}^T V_{ci} + \frac{1}{2} \omega_i^T (I_i) \omega_i \tag{2.35}$$

โดยที่สมการชุดแรกแสดงพลังงานจลน์ที่สามารถแปลงได้ และสมการชุดที่สองคือพลังงานจลน์ของการหมุน  $V_{ci}$  คือความเร็วเชิงเส้นของจุดศูนย์กลางของการเชื่อมโยงคือ  $\omega_i$  ความเร็วเชิงมุมของการเชื่อมโยงและ  $I_i$  เป็นความเฉื่อย พลังงานจลน์รวมของหุ่นยนต์คือผลรวมของพลังงานจลน์ของแต่ละก้านต่อเช่น

$$K = \sum_{i=1}^n K_i \tag{2.36}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตั้งแต่  $V_{ci}$  และ  $\omega_i$  ในสมการ (2.35) เป็นฟังก์ชันของ  $\theta$  และ  $\dot{\theta}$  เราจะเห็นว่า การเคลื่อนไหวพลังงานของหุ่นยนต์สามารถอธิบายได้ด้วยสูตรสเกลาร์เป็นฟังก์ชันของข้อต่อตำแหน่งและความเร็ว,  $K(\theta, \dot{\theta})$  ในความเป็นจริงพลังงานจลน์ของหุ่นยนต์นั้นได้มาจาก

$$K(\theta, \dot{\theta}) = \frac{1}{2} \dot{\theta}^T M(\theta) \dot{\theta}, \quad (2.37)$$

โดยที่  $M(\theta)$  คือ  $n \times n$  เมทริกซ์มวลเมทริกซ์สมมาตรและบวกแน่นอนการแสดงผลของรูปแบบของสมการ (2.37) เป็นที่รู้จักกันในชื่อรูปสี่เหลี่ยมกำลังสองนับตั้งแต่เมื่อขยายออกสมการที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วยเพียงค่าที่มีการใช้ค่า  $\theta_i$  คือสมการกำลังสอง สมการ (2.37) สามารถแสดงให้เห็นคล้ายกับการผลลัพธ์ที่ปรกติสำหรับพลังงานจลน์

$$K = \frac{1}{2} mV^2 \quad (2.38)$$

ของมวลจุดพลังงานศักย์ของก้านต่อ  $i$ th,  $U_i$ , สามารถแสดงได้

$$U_i = -m_i \hat{g}^T P_{ci} \quad (2.39)$$

เป็นโดยที่  $\hat{g}$  คือเวกเตอร์แรงโน้มถ่วง  $3 \times 1$ ,  $P_{ci}$  เป็นเวกเตอร์ที่หาจุดศูนย์กลางของมวลของก้านต่อ  $i$ th พลังงานศักย์ทั้งหมดที่แสดงในการแปลงค่าคือผลรวมของศักย์ภาพพลังงานในแต่ละก้านต่อเช่น

$$U = \sum_{i=1}^n U_i \quad (2.40)$$

เนื่องจาก  $P_{ci}$  ในสมการ (4.5) เป็นฟังก์ชัน  $\theta$  เราจะเห็นว่าพลังงานศักย์ของหุ่นยนต์สามารถอธิบายได้ด้วยสูตรสเกลาร์ในฐานะฟังก์ชันของตำแหน่งข้อต่อ,  $U(\theta)$

สูตรพลศาสตร์ของลากรองจ์เป็นวิธีการในการหาสมการเคลื่อนที่จากฟังก์ชันสเกลาร์ที่เรียกว่าลากรองจ์ ซึ่งถูกกำหนดให้เป็นความแตกต่างระหว่างพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของระบบกลไกในสัญกรณ์ของเรา

ลากรองจ์ของหุ่นยนต์คือ

$$L(\theta, \dot{\theta}) = K(\theta, \dot{\theta}) - U(\theta) \quad (2.41)$$

## 2.2.4 สมการการเคลื่อนที่

สมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะถูกกำหนดโดย

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial L}{\partial \theta} = \tau \quad (2.42)$$

โดยที่  $\tau$  คือเวกเตอร์  $n \times 1$  ของแรงบิดแอกชูเอเตอร์

ในกรณีของหุ่นยนต์สมการนี้จะกลายเป็น

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial K}{\partial \theta} + \frac{\partial U}{\partial \theta} = \tau \quad (2.43)$$

โครงสร้างที่ขยายของคำศัพท์ที่สอดคล้องกับสมการ (4.9) มีดังนี้:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการพิจารณาพจน์แรกของสมการเราจะได้

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_k} = \sum_j M_{kj}(\theta) \dot{\theta}_j \quad (2.44)$$

และ

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_k} = \sum_j M_{kj}(\theta) \ddot{\theta}_j + \sum_j \frac{d}{dt} M_{kj}(\theta) \dot{\theta}_j = \sum_j M_{kj}(\theta) \ddot{\theta}_j + \sum_{ij} \frac{\partial M_{kj}}{\partial \theta_i} (\dot{\theta}_i) \dot{\theta}_j \quad (2.45)$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_k} = \frac{1}{2} \sum_{ij} \frac{\partial M_{ij}}{\partial \theta_k} \dot{\theta}_i \dot{\theta}_j - \frac{\partial U}{\partial \theta_k} \quad (2.46)$$

ดังนั้นสมการออยเลอร์ – ลากรองจ์สามารถเขียนได้

$$\sum_j M_{kj}(\theta) \ddot{\theta}_j + \sum_{ij} \left\{ \frac{\partial M_{kj}}{\partial \theta_i} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{ij}}{\partial \theta_k} \right\} \dot{\theta}_i \dot{\theta}_j + \frac{\partial U}{\partial \theta_k} = \tau_k \quad (2.47)$$

$$k = 1, \dots, n$$

ในสมการข้างต้น (2.47) มีเงื่อนไขสามประเภท ครั้งแรกที่เกี่ยวข้องกับอนุพันธ์อันดับสองของพิกัดทั่วไป ประการที่สองคือเงื่อนไขกำลังสองในอนุพันธ์อันดับแรกของ  $\theta$  ซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานจลน์ของ  $\theta$  ทั้งหมดนี้จะเพิ่มเติมแบ่งออกเป็นสองประเภท ในกรณีที่เกี่ยวข้องกับชนิดของ  $\theta_i^2$  เรียกว่าแรงเหวี่ยง ในขณะที่มีการเกี่ยวข้องกับ  $\dot{\theta}_i \dot{\theta}_j$  จะเรียกว่าเงื่อนไข คอริโอลิส ในกรณีที่สามที่มีความสัมพันธ์  $\theta$  เท่านั้น แต่ไม่ใช่อนุพันธ์ อย่างชัดเจน เกิดขึ้นจากความแตกต่างของพลังงานที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งสามารถแปลงเป็นสมการ (2.47)

$$M(\theta) \ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = \tau \quad (2.48)$$

แรงที่กำหนดขึ้นในส่วนของตัวทำงานส่วนปลาย  $F$  สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกรณีที่ข้อต่อของแขนโดยใช้ความสัมพันธ์

$$\tau = J^T(\theta) F \quad (2.49)$$

โดยที่สมการจาโคเบียน,  $J(\theta)$  เขียนไว้ในเฟรมเดียวกัน  $F$  โดยปกติจะเป็นเฟรมเครื่องมือ  $\{T\}$

จาโคเบียนเป็นรูปแบบจากหลายมิติของอนุพันธ์ ในสาขาหุ่นยนต์ จาโคเบียนคือการเปลี่ยนแปลงเชิงเส้นที่แปรผันตามเวลา ซึ่งสัมพันธ์กับความเร็วของรอยต่อความเร็วของคาร์ทีเซียนที่ปลายแขนของหุ่นยนต์ รูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ของจลนศาสตร์ข้างหน้า สมการกำหนดฟังก์ชันระหว่างช่องว่างของตำแหน่งคาร์ทีเซียนและทิศทางและพื้นที่ของตำแหน่งร่วมกัน ความสัมพันธ์ของความเร็วจะถูกกำหนดโดยจาโคเบียนของฟังก์ชันนี้ โดยที่จาโคเบียนจะเป็นฟังก์ชันที่ให้ผลลัพธ์และสามารถคำนวณได้

$$\dot{X} = J(\theta) \dot{\theta} \quad (2.50)$$

โดยที่  $\theta$  คือเวกเตอร์ของมุมร่วมของหุ่นยนต์ และ  $X$  เป็นเวกเตอร์ของเส้นตรงและความเร็วเชิงมุมของตัวทำงานส่วนปลายสำหรับการกำหนดค่าใด ๆ ของหุ่นยนต์อัตราข้อต่อสัมพันธ์กับความเร็วของปลายในแบบเส้นตรง นี่เป็นเพียงความสัมพันธ์ทันที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับ PUMA 560 เมทริกซ์ของ จาโคเบียน คือ  $6 \times 6$ ,  $\theta$  คือ  $6 \times 1$  และ  $X$  คือ  $6 \times 1$ . เมทริกซ์  $6 \times 1$  นี้เวกเตอร์ความเร็วคาร์ทีเซียนเป็นเวกเตอร์ความเร็วเชิงเส้น  $3 \times 1$  และความเร็วการหมุนแบบ  $3 \times 1$  เวกเตอร์ซ้อนกัน

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} V \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

มิติของจาโคเบียนถูกกำหนดไว้เช่นนั้นจำนวนแถวเท่ากับจำนวนองศาอิสระในพื้นที่คาร์ทีเซียนที่ต้องการพิจารณา จำนวนคอลัมน์ในจาโคเบียนเท่ากับจำนวนของข้อต่อของหุ่นยนต์ การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของหุ่นยนต์ด้วยการพิจารณาตัวแปรคาร์ทีเซียน โดยการกำหนดสูตรของสมการไดนามิกที่เกี่ยวข้องกับการเร่งความเร็วของ ตัวทำงานส่วนปลายที่มีผลในพื้นที่คาร์ทีเซียนจะแสดงถึงแรงของคาร์ทีเซียน และช่วงเวลาแสดงถึงตัวทำงานส่วนปลาย รูปแบบทั่วไปของคาร์ทีเซียนสมการจะได้รับเป็น

$$F = M_x(\theta)\dot{X} + V_x(\theta, \dot{\theta}) + G_x(\theta) \quad (2.52)$$

โดยที่  $F$  คือเวกเตอร์แรงบิดที่กระทำกับตัวทำงานส่วนปลายของหุ่นยนต์ และ  $X$  คือเวกเตอร์คาร์ทีเซียนที่เหมาะสมแสดงถึงตำแหน่งและการวางแนวของตัวทำงานส่วนปลายคล้ายกับปริมาณพื้นที่รอยต่อ  $M_x(\theta)$  เมทริกซ์มวลคาร์ทีเซียน,  $V_x(\theta, \dot{\theta})$  เป็นเวกเตอร์ของเทอมความเร็วในพื้นที่คาร์ทีเซียนและ  $G_x(\theta)$  เป็นเวกเตอร์ของเทอมแรงโน้มถ่วงในพื้นที่คาร์ทีเซียน

เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของสมการ (2.48) และสมการ (2.52) ด้วยวิธีดังต่อไปนี้ ก่อนอื่นเราต้องทำการคูณสมการ (4.14) โดยการผกผันของการแปลงจาโคเบียนจะได้

$$J^{-T}\tau = J^{-T}M(\theta)\ddot{\theta} + J^{-T}V(\theta, \dot{\theta}) + J^{-T}G(\theta) \quad (2.53)$$

หรือ

$$F = J^{-T}M(\theta)\ddot{\theta} + J^{-T}V(\theta, \dot{\theta}) + J^{-T}G(\theta) \quad (2.54)$$

สามารถปรับระดับความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของข้อต่อ กับความเร่งคาร์ทีเซียนเริ่มต้นด้วยคำจำกัดความของจาโคเบียน

$$\dot{X} = J\dot{\theta} \quad (2.55)$$

และจะแสดงความแตกต่างที่จะได้รับ

$$\ddot{X} = j\dot{\theta} + J\ddot{\theta} \quad (2.56)$$

การแก้ปัญหามสมการ (2.56) สำหรับความเร่งของข้อต่อนำไปสู่

$$\ddot{\theta} = J^{-1}\ddot{X} - J^{-1}j\dot{\theta} \quad (2.57)$$

แทนค่าสมการ (2.57) ในสมการ (2.54) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F = J^{-T}M(\theta)J^{-1}\ddot{X} - J^{-T}M(\theta)J^{-1}j\dot{\theta} + J^{-T}V(\theta, \dot{\theta}) + J^{-T}G(\theta) \quad (2.58)$$

จะได้รับสมการสำหรับการแปลงคาร์ทีเซียนเป็น

$$\begin{aligned} M_x(\theta) &= J^{-T}(\theta)M(\theta)J^{-1}(\theta), \\ V_x(\theta, \dot{\theta}) &= J^{-T}(\theta)(V(\theta, \dot{\theta}) - M(\theta)J^{-1}(\theta)j(\theta)\dot{\theta}), \\ G_x(\theta) &= J^{-T}(\theta)G(\theta) \end{aligned} \quad (2.59)$$

จาโคเบียนที่แสดงในสมการ (2.59) เขียนในเฟรมเดียวกับ  $F$  และ  $X$  ในสมการ (2.52)

### 2.2.5 การพิจารณาการใช้พลังงานที่เหมาะสม

การวางแผนการเคลื่อนที่สำหรับกรณีที่สามารถทำให้หุ่นยนต์สามารถใช้พลังงานที่น้อยที่สุดตามการเคลื่อนที่ที่กำหนด ในกรณีดังกล่าวการคำนวณเรื่องของพลังงานจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งและรูปแบบเคลื่อนที่ โดยใช้เรื่องของเวลาเป็นตัวแปรในการทำงานดังนั้น

การเคลื่อนที่ที่ทำการพิจารณาคือเส้นทางวงกลมในระนาบ  $x, y$  ตำแหน่งตามเส้นทางนี้กำหนดโดยพิกัดทั่วไป  $\theta \in [0, 2\pi]$  จากตำแหน่งเริ่มต้นและพิกัดทั่วไปเป็นไปได้ที่จะถึงพิกัดคาร์ทีเซียนของตัวทำงานส่วนปลายในระบบพิกัดเฟรมฐานซึ่งสามารถใช้เพื่อตั้งมุมร่วมผ่านจลนศาสตร์ไปข้างหน้า ดังนั้นเราจึงได้รับฟังก์ชันมากกว่าเวลางาน

$$q_i = \varphi_i(\theta), i = 1, 2, 3 \quad (2.60)$$

โดยการแยกความแตกต่างนี้ทั้งสองครั้งโดยที่ความเร็วเชิงมุมและความเร่งสำหรับข้อต่อสามข้อแรกจะถูกดึงออกมา

$$\dot{q}_i = \varphi'_i(\theta)\dot{\theta} \quad (2.61)$$

$$\ddot{q}_i = \varphi''_i(\theta)\dot{\theta}^2 + \varphi'_i(\theta)\ddot{\theta} \quad (2.62)$$

ในการสร้างโปรไฟล์ความเร็วในระยะของ  $\theta$  จะทำได้โดยทำเป็นผลรวมของไซน์และโคไซน์ที่ได้จากชุดของสัมประสิทธิ์ที่แตกต่างกัน ค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้จะเป็นค่าตัวแปรของการเพิ่มประสิทธิภาพ มีการกำหนดรูปแบบของความเร็ว

$$\dot{\theta} = h(\theta) = \sum(a_i \sin(i\omega\theta) + b_i \cos(i\omega\theta)) \quad (2.63)$$

โดยที่  $\omega$  คือความถี่เชิงมุมและ  $i$  คือดัชนี  $a_i$  และ  $b_i$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้เป็นตัวย่อ  $i \in [1 \dots n]$  โดยที่  $n$  หมายถึงลำดับของรูปแบบความเร็ว

ในลักษณะของการเคลื่อนที่จะมีการเคลื่อนไหวที่น้อยในก้านต่อที่ 3, 5 และ 7 โดยจะถูกนำไปใช้เพื่อตรวจสอบการเพิ่มประสิทธิภาพที่เป็นไปได้ โปรดสังเกตว่าดัชนีเริ่มต้นที่ศูนย์ ที่ความถี่เชิงมุม  $\omega = 1$  ส่วนประกอบทั้งหมดของลำดับที่สูงกว่าศูนย์จะรวมเป็นศูนย์ส่วน  $\theta \in [0, 2\pi]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a_1 \sin(0 \cdot \theta) = 0, \quad b_1 \cos(0 \cdot \theta) = b_1, \quad \forall \theta \in \mathbb{R}^1 \quad (2.64)$$

ดังนั้น  $b_1$  จึงถือเป็นความเร็วเชิงมุมเฉลี่ยตาม  $\theta$  นอกจากนี้ความเร็วเฉลี่ยโดยทั่วไป  $\theta$  จะแตกต่างจากความเร็วเฉลี่ยตลอดเวลาของ  $\theta$

เพื่อให้ได้โปรไฟล์การเร่งความเร็วจะมีการคำนวณอนุพันธ์ตามเวลาของ ฟังก์ชัน  $h(\theta)$  นี้

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} &= \frac{d}{dt} h(\theta) \\ &= \frac{d}{d\theta} h(\theta) \frac{d\theta}{dt} \\ &= h'(\theta) h(\theta) \end{aligned}$$

$$\ddot{\theta} = (\sum i\omega a_i \cos(i\omega\theta) - i\omega b_i \sin(i\omega\theta)) (\sum a_i \sin(i\omega\theta) + b_i \cos(i\omega\theta)) \quad (2.65)$$

$\theta$  และฟังก์ชันสำหรับ  $\dot{\theta}$  และ  $\ddot{\theta}$  สามารถรวมเข้ากับ (2.48), (2.61) และ (2.62) ได้แล้ว ทั้ง  $\varphi'(\theta)$  และ  $\varphi''(\theta)$  โดยการแทนค่า  $\theta, \dot{\theta}$  และ  $\ddot{\theta}$  ลงในสูตรสำหรับ  $q, \dot{q}$  และ  $\ddot{q}$  จากนั้นแทนค่ามุมความเร็วและความเร่งที่เกิดขึ้นเข้ากับสมการหุ่นยนต์ทำให้สามารถรักษาแรงบิด  $\tau$  ที่สอดคล้องกัน ณ จุดใดก็ได้บนวิถี สมการหุ่นยนต์ตามที่ระบุไว้ก่อนหน้านี้จะได้สมการ

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + \tau f = \tau \quad (2.66)$$

ณ จุดนี้ได้มีการพัฒนาโครงร่างสำหรับการรับแรงบิดตามรูปแบบการเคลื่อนที่ที่กำหนดโดยสัมประสิทธิ์ที่กำหนดไว้ล่วงหน้าใน  $h(\theta)$

พลังงานกลทั้งหมดที่ใช้ไปตามเส้นทางนั้นได้รับจากส่วนหนึ่งของกำลังตามการขยายเวลาตามเส้นทาง พลังงานที่หุ่นยนต์ใช้ในระยะเวลาใดเวลาหนึ่งจะได้รับ

$$P = |\tau \dot{q}| \quad (2.67)$$

ดังนั้นการใช้พลังงานทั้งหมดจะได้สมการ

$$E = \int_0^T |\tau \dot{q}| dt \quad (2.68)$$

ดังนั้นสมการดังกล่าวสามารถใช้เป็นสมการหลักในการที่จะคำนวณการใช้พลังงานที่เหมาะสมโดยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมต่างๆ

## 2.3 การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization(PSO))

การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization, PSO) เป็นอัลกอริทึมที่มีแรงจูงใจมาจากธรรมชาติ จัดเป็นวิธีการค้นหาแบบสุ่มโดยอาศัยจุดเริ่มต้นหลายจุด โดยประยุกต์มาจากหลักการทางจิตวิทยาทางสังคมในการหาอาหารของสัตว์ เช่น ผีเสื้อกลางคืน หรือ ปลาเป็นต้น โดยธรรมชาตินั้นปลาหรือนก สามารถเคลื่อนที่ไปเป็นฝูงแยกตัวออกจากฝูงแล้วรวมกลับเข้ามาใน

ฝูงอีกครั้ง การเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคนี้สามารถพิจารณาเป็นพฤติกรรมทางสังคมฝูงสัตว์ (swarm) รูปที่ 2.5



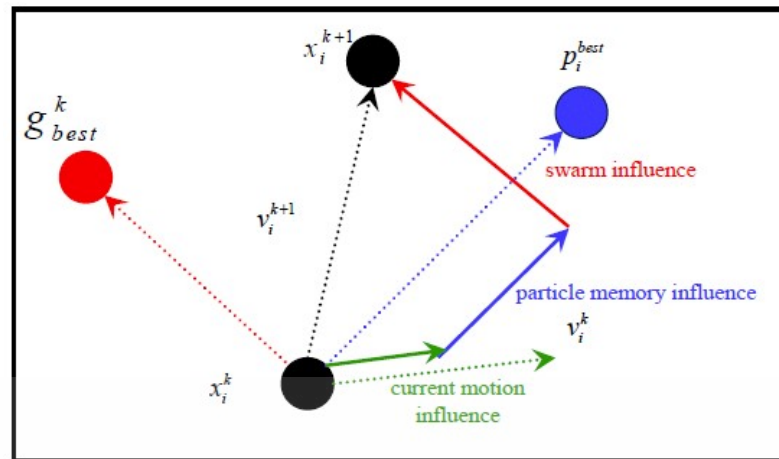
รูปที่ 2.5 การเคลื่อนที่ของฝูงสัตว์

( <https://arjn95.medium.com/particle-swarm-optimization-8ad9a88a81e3> )

ใน PSO แท้จริงแล้ว คือ กลุ่มของอนุภาคในพื้นที่หลายมิติ ซึ่งแต่ละอนุภาคจะต้องเก็บข้อมูลเวกเตอร์สองเวกเตอร์ คือ เวกเตอร์ระบุตำแหน่งและเวกเตอร์ระบุความเร็วในการบิน เราสมมติให้ฝูงอนุภาคบินอยู่ในพื้นที่ค้นหาหลายมิติ ตัวอนุภาคแต่ละตัวในฝูงจะต้องจำตำแหน่งที่ดีที่สุดของตัวเอง และตำแหน่งที่ดีที่สุดของเพื่อนร่วมฝูง ความหมายของคำว่าตำแหน่งที่ดีที่สุดในที่นี้หมายถึง ตำแหน่งที่มีค่าคำตอบที่ดีที่สุดนั่นเอง สมาชิกในฝูงจะทำการสื่อสารข้อมูลของตำแหน่งกับสมาชิกตัวอื่นและทำการเปลี่ยนความเร็ว แล้วเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง ใหม่เพื่อให้เข้าใกล้ตำแหน่งที่ดีที่สุดมากยิ่งขึ้น

อัลกอริทึม PSO เป็นอัลกอริทึมเชิงประชากรโดยใช้หลักการทำงานร่วมมือกันในการแก้ปัญหาของอนุภาค สิ่งที่น่าสนใจใน PSO คือความเรียบง่ายของอัลกอริทึมและกระบวนการคิด ทำให้นำไปใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ แผนผังพื้นฐานการทำงานของ PSO แสดงในรูปที่ 2.6

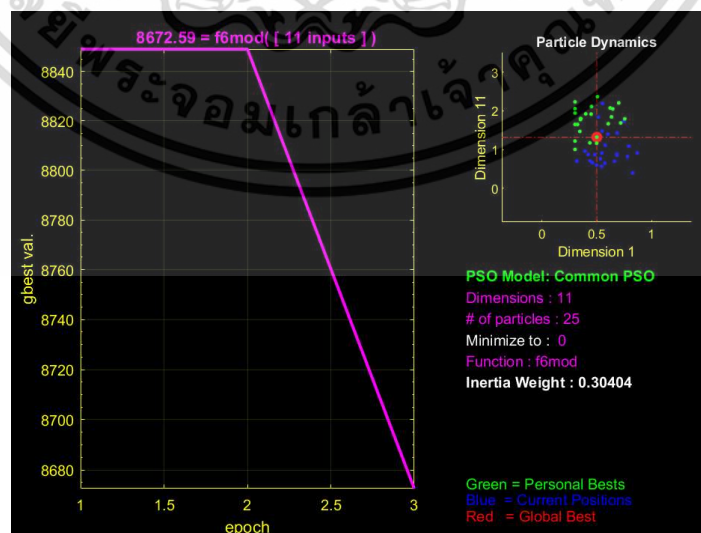
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 การทำงานของ PSO

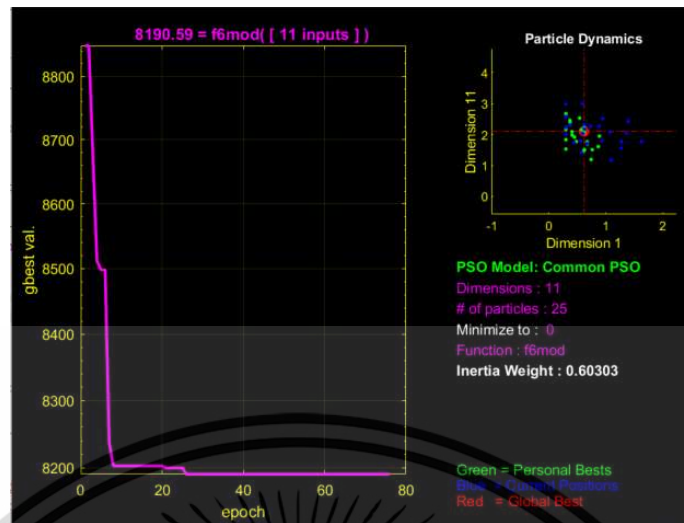
( [https://www.researchgate.net/figure/Velocity-component-construction-of-a-particle-swarm-optimization-algorithm-Mohamed\\_fig4\\_324470759](https://www.researchgate.net/figure/Velocity-component-construction-of-a-particle-swarm-optimization-algorithm-Mohamed_fig4_324470759) )

อัลกอริทึม PSO ได้ถูกนำไปใช้เพื่อค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาหลายประเภท อย่างไรก็ตามแม้ว่าวิธีการดังกล่าวได้แสดงให้เห็นถึงข้อดีในการใช้งานและสามารถหาผลลัพธ์ในระยะเวลาอันสั้น การศึกษาจะแสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมสามารถค้นหาเส้นทางที่ดีที่สุดในการเดินทางแม้จะมีอุปสรรคและหาคำตอบได้ยาก คุณภาพของผลลัพธ์จะขึ้นอยู่กับกระบวนการปรับจูนค่าตัวแปรต่างๆนอกจากนี้กระบวนการจะทำการปรับตำแหน่งและน้ำหนักในตัวแปรเพื่อทำการตัดสินใจในการคำนวณรูปที่ 2.7 เมื่อเริ่มต้นการคำนวณกราฟจะยังไม่ลู่เข้าเนื่องจากอนุภาคจะสุ่มค่าไปยังที่ต่างๆ ในพื้นที่ทั่วโลก รูปที่ 2.8 เมื่อการคำนวณได้คำตอบที่ต้องการกราฟที่ได้จะลู่เข้า และอนุภาคจะวิ่งเข้าสู่ศูนย์กลาง



รูปที่ 2.7 ลักษณะการค้นหาคำตอบของ PSO โดยทั่วไปเมื่อเริ่มต้นค้นหาคำตอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ลักษณะการค้นหาคำตอบของ PSO เมื่อสิ้นสุดเงื่อนไขการค้นหา

การทำงานของ PSO มีประโยชน์มากในการค้นหาคำตอบอย่างรวดเร็ว ด้วยการใช้แนวคิดของการให้น้ำหนักความเชื่อของจุดมุ่งหมาย คือเพื่อความสมดุลและปรับแต่งการค้นหาทั่วโลกและการค้นหาในท้องถิ่น นอกจากนี้จะได้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้นแล้วหากน้ำหนักของความเชื่อในช่วงเวลาที่ต่างกันลดลงเป็นเส้นตรงแทนที่จะเป็นค่าคงที่ ดังนั้นน้ำหนักความเชื่อที่สูงขึ้นหมายถึงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วที่เพิ่มขึ้นต่อการเกิดซ้ำและทำการสำรวจพื้นที่การค้นหาใหม่เพื่อหาทางออกที่ดีกว่า อย่างไรก็ตามความเชื่อ น้ำหนักที่น้อยลงหมายถึงความผันแปรของความเร็วที่น้อยลงทำให้การเปลี่ยนแปลงช้าลงในแง่ของการปรับแต่งการค้นหาในท้องถิ่น ดังนั้นกระบวนการค้นหาควรเริ่มต้นด้วยน้ำหนักความเชื่อที่สูงขึ้นสำหรับการสำรวจทั่วโลกด้วยน้ำหนักความเชื่อเชิงเส้นลดลงเพื่อให้ง่ายต่อการการสำรวจท้องถิ่นในภายหลัง

ฟังก์ชันที่ไม่ใช่เชิงเส้นซึ่งควบคุมน้ำหนักของความเชื่อที่แปรผันตามเวลานำเสนอในการศึกษานี้ ใน PSO นี้เราได้ทำการแก้ไขความเชื่อของตัวแปรเช่นเดียวกับโมดูลเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพเมื่อนำไปใช้กับปัญหาเกี่ยวกับตัวแปรไบนารี น้ำหนักตัวเหี่ยวน้ำหนักที่ได้รับมีดังนี้:

$$w = (w_{max} - w_{min}) \times \left( \frac{iter}{iter_{max}} \right)^{\alpha} \quad (2.69)$$

ในกรณีที่  $w_{max}$  คือ 1.0 ตั้งค่าให้เป็นน้ำหนักสูงสุดของความเชื่อสูงสุด  $w_{min}$  คือ 0.3 ตั้งค่าให้เป็นน้ำหนักต่ำสุดของแรงเฉื่อย  $iter$  คือหมายเลขการเกิดซ้ำซ้ำในเวลาปัจจุบัน  $iter_{max}$  คือจำนวนการทำซ้ำการทำซ้ำสูงสุดจะได้รับการเรียกใช้และ  $\alpha$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์การปรับในระหว่างการทำซ้ำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วย  $\alpha = 1$  การเปลี่ยนแปลงจะกลายเป็นกรณีพิเศษของความเฉื่อยเชิงเส้นที่ควบคุมเวลา กระบวนการค้นหาเริ่มต้นด้วยน้ำหนักความเฉื่อยสูงสุด ( $w_{max}$ ) ซึ่งสามารถช่วยในการสำรวจพื้นที่การแก้ปัญหาสมการ (2.152) จะส่งผลให้เส้นทางลดลงที่แตกต่างกันสำหรับค่าที่แตกต่างกันของ  $\alpha$  ถึง  $w_{min}$  ในการเกิดซ้ำซ้ำ ( $iter_{max}$ ) โดยที่  $\alpha = 1.5$  มีค่า  $w$  ที่สูงกว่าในช่วงต้นการทำซ้ำซึ่งมีค่าที่มากกว่าแบบจำลองเชิงเส้นของ Chi และ Eberhart ( $\alpha = 1$ )

นอกจากนี้โมเดลระหว่างการทำซ้ำในภายหลัง  $w$  จะลดลงอย่างรวดเร็วในกรณีเชิงเส้นซึ่งมีประโยชน์ในการเร่งการลู่เข้าของผลลัพธ์ อย่างไรก็ตามหาก  $\alpha$  มีขนาดใหญ่มากก็อาจข้ามผ่านตำแหน่งที่ดีที่สุดในช่วงการทำซ้ำในตอนเริ่มต้น เนื่องจากกระบวนการค้นหาที่มีขนาดใหญ่เกินไปและความแตกต่างหรือ over-swing ในระหว่างการทำซ้ำเนื่องจากการลดลงอย่างรวดเร็วในค่าของ  $w$

ดังนั้นงานวิจัยนี้แก้ปัญหาโดยวิธีการแก้ปัญหาแบบไบนารีด้วยน้ำหนักความเฉื่อยที่ปรับได้และกลไกการกลายพันธุ์รวมทั้งเทคนิคการจัดการข้อจำกัด ขั้นตอนดังต่อไปนี้:

#### (1) การเริ่มต้น

PSO สำหรับการศึกษานี้อนุภาคของอนุภาคถูกสร้างขึ้นแบบสุ่มที่ตำแหน่งอนุภาคเป็น 0 หรือ 1 จากนั้นเราจะกำหนดความเร็วสูงสุดและต่ำสุดของอนุภาคซึ่งถูกจำกัดขอบเขตไว้ที่ขอบเขต  $V = [V_{min}, V_{max}] = [2.1, 3.1]$  และความเร็วเริ่มต้นถูกสร้างโดยสิ่งต่อไปนี้:

$$V = V_{min} + rand(V_{max} - V_{min}) \quad (2.70)$$

โดยที่ rand หมายถึงหมายเลขสุ่ม

ค่าที่ต้องการถูกประเมินโดยทั้งวัตถุประสงค์และฟังก์ชันการปรับค่าเนื่องจากข้อจำกัดของรูปแบบการเขียนโปรแกรมโปรแกรม

#### (2) การอัปเดตตำแหน่งและความเร็ว

ในระหว่างการทำซ้ำความเร็วของแต่ละอนุภาคจะถูกปรับโดย (2.71) โดยที่  $c_1$  และ  $c_2$  เป็นพารามิเตอร์ทางสังคมและการเรียนรู้  $rand1$  และ  $rand2$  เป็นตัวเลขสุ่มระหว่าง (0, 1)  $pBest$  เป็นตำแหน่งปัจจุบันที่ดีที่สุดแต่ละอนุภาคในเส้นทางค้นหาของตัวเองและ  $gBest$  เป็นค่าที่ดีที่สุดของฝูงทั้งหมด

$$V_{new} = w \times V_{old} + c_1 \times rand_1 \times (pBest - X_{old}) + c_2 \times rand_2 \times (gBest - X_{old}) \quad (2.71)$$

น้ำหนักของความเฉื่อยถูกกำหนดไม่เชิงเส้นตรงในระหว่างการทำซ้ำตามสมการ (2.72)

$$W = W_{max} - (W_{max} - W_{min}) \times \left(\frac{iter}{iter_{max}}\right)^\alpha \quad (2.72)$$

ถ้าความเร็วของอนุภาคน้อยกว่าค่าต่ำสุด  $V_{max}$  จะต้องถูกแทนที่ด้วย  $V_{min}$  นอกจากนี้ยังใช้ฟังก์ชัน sigmoid (2.73) เพื่อปรับความเร็วระหว่าง 0 ถึง 1 เนื่องจากฟังก์ชัน sigmoid จะเพิ่มขึ้นเป็น 1 เมื่อ  $\varepsilon$  เข้าใกล้ค่าบวกบวกและ 0 เมื่อ  $\varepsilon$  เข้าใกล้ค่าอนันต์ลบ

$$\text{Sigmoid}(\varepsilon) = \frac{1}{1+e^{-\varepsilon}} \quad (2.73)$$

ในที่สุดตำแหน่งของอนุภาคแต่ละตำแหน่งจะได้รับการอัปเดตตามสมการ (2.74)

$$X = \begin{cases} 1, & \text{if } U(0,1) < \text{Sigmoid}(V) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.74)$$

(3) การอัปเดตอนุภาคที่ดีที่สุด ( $pBest$ )

$pBest$  เป็นตำแหน่งที่ดีที่สุดของแต่ละอนุภาคในการค้นหากระบวนการ ในระหว่างการเกิดซ้ำอนุภาคสมรรถภาพสมรรถภาพจะถูกเปรียบเทียบกับ  $pBest$  หากค่าปัจจุบันดีกว่า  $pBest$  และค่า  $pBest$  จะเท่ากับค่าปัจจุบัน

(4) การอัปเดตทั่วโลกที่ดีที่สุด ( $gBest$ )

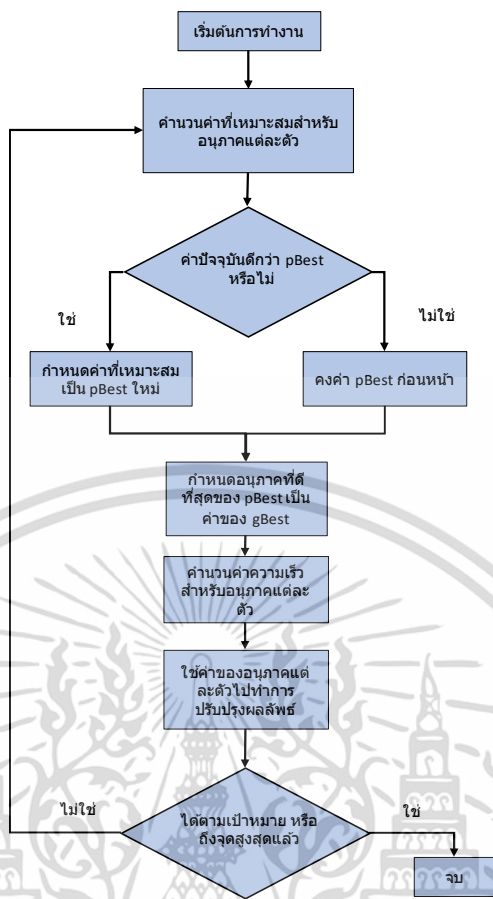
เปรียบเทียบฟังก์ชันของสมการครอสฟังก์ชันกับการรวมกันของประชากรที่ดีที่สุดก่อน  $gBest$  หากค่าปัจจุบันดีกว่า  $gBest$  ให้อัปเดตค่าของอนุภาคปัจจุบันเป็น  $gBest$

(5) กลไกการกลายพันธุ์

ทำซ้ำในภายหลังกลไกการกลายพันธุ์มีส่วนร่วมในแนวทาง PSO ที่เสนอเพื่อหลีกเลี่ยงการตกสู่พื้นที่ที่เหมาะสมที่สุด มันถูกตั้งค่าเป็น 0.03

(6) การหยุดกระบวนการ

หากจำนวนการทำซ้ำเกินจำนวนการทำซ้ำสูงสุดที่ได้ทำการกำหนดกระบวนการจะทำการหยุดการคำนวณ ซึ่งขั้นตอนทั้งหมดสามารถแสดงได้ตามขั้นตอนการทำงานดัง รูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ผังการทำงานของ PSO

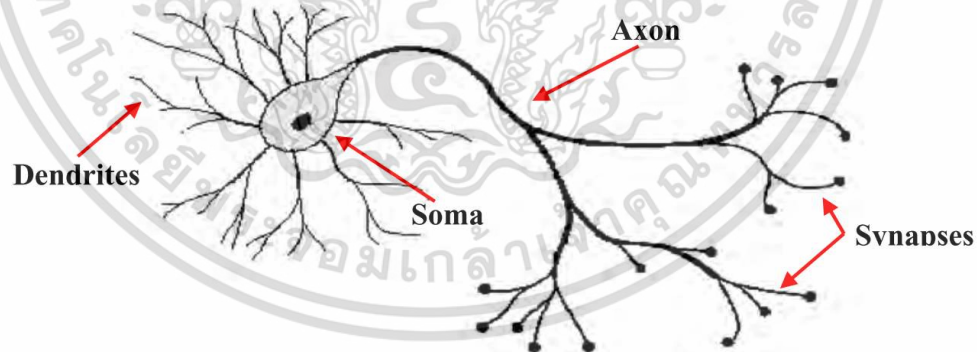
### 2.4 โครงข่ายประสาทเทียม

ในปัจจุบันมีการนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้งานวิจัยเช่น การจัดกลุ่มข้อความ การจำแนก โดยเป็นเพราะโครงข่ายประสาทเทียมสามารถที่จะปรับตัวให้สามารถรับรู้สภาพที่เปลี่ยนแปลงได้ สิ่งนี้เป็นประโยชน์อย่างมากในการแก้ปัญหาอีกหลายประเภทที่คอมพิวเตอร์อาจไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งานและอาจเป็นงานที่มีการคิดและวิเคราะห์เช่นการค้นหาใจความสำคัญของเอกสารที่โดยทั่วไปแล้วมักจะต้องทำการวิเคราะห์โดยคนหรือผู้เชี่ยวชาญในด้านภาษาศาสตร์เพราะสมองของมนุษย์เราสามารถที่จะคิดและวิเคราะห์ได้อย่างสลับซับซ้อน จึงได้มีการนำแนวคิดการทำงานของสมองมนุษย์นั้นมาประยุกต์ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพความฉลาดของคอมพิวเตอร์โดยวิธีการนี้จะทำหน้าที่คล้ายกับสมองของมนุษย์ในรูปแบบของโครงข่ายประสาทเทียมอันเป็นการลอกเลียนการทำงานของเซลล์ประสาท (nerve cells) ซึ่งชื่อเรียกอีกอย่างว่า นิวรอน (neuron) จึงมีความจำเป็นที่จะต้องกล่าวถึงนิยามต่างๆ ของโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อเป็นความรู้เบื้องต้นที่สำคัญก่อนที่จะมีการนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

1. โครงข่ายประสาทเทียมถูกสร้างขึ้นเพื่อเลียนแบบการทำงานของสมองมนุษย์มีการทำงานแบบขนานจำนวนมาก ในงานวิจัยนี้เลือกใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซพตรอนหลายชั้น (multi-layer เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

perceptron neural network) หรือโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับ (feed-forward backpropagation neural network) ซึ่งเป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบต้องมีผู้สอน (supervised learning)

2. แบบจำลองของเซลล์ประสาท เรื่องราวของโครงข่ายประสาทเทียมนั้นมีพื้นฐานมากจากนิเวศที่เป็นของจริงในสมองมนุษย์นิเวศหรือเซลล์ประสาทในสมองนั้นจะมีหน้าที่หลักสองประการคือการคำนวณและทำการส่งผลที่ได้จากการคำนวณไปยังอีกปลายหนึ่งของเซลล์ประสาทอย่างรวดเร็วเพื่อให้สามารถส่งผลดังกล่าวไปยังเซลล์อื่นๆ ได้อย่างทันทั่วทั้งที่ ซึ่งทั้งหมดนี้จะทำงานโดยอาศัยหลักการทางไฟฟ้าโดยรูปร่างลักษณะของนิเวศในสมองมนุษย์นั้นดังแสดงใน ภาพที่ 2.14 ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับต้นไม้ที่ปราศจากใบที่แต่ละกิ่งและรากที่เชื่อมโยงกันด้วยลำต้นโดยส่วนประกอบการทำงานหลักของข่ายประสาทคือเซลล์ประสาทและกลุ่มเซลล์ประสาทนั้นจะมีการรับรู้โดยมีการทำงานคือจะรับอินพุต (input) จากแหล่งต่างๆ นำมารวมเข้าด้วยกันและมีการทำงานในแบบไม่เป็นเส้นตรง (non-linear) และส่งเอาต์พุตสุดท้ายออกมา มนุษย์นั้นมีความซับซ้อนในกระบวนการคิดซ้ำทำให้เซลล์ประสาทมีความหลากหลายอย่างมากอย่างไรก็ดีเซลล์ประสาทตามธรรมชาติทั้งหมดมีส่วนประกอบพื้นฐาน 4 ส่วนเหมือนกัน ส่วนประกอบเหล่านี้เรียกตามชื่อทางชีววิทยาว่า เดนไดรต์ (dendrites), โซมา (soma), แอ็คซอน (axon) และซินแนปส์ (synapses) ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ของระบบประสาททั้ง 4 ส่วน

เดนไดรต์เป็นส่วนขยายหรือส่วนต่อของโซมาซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นใยซึ่งทำหน้าที่เหมือนเป็นช่องทางนำเข้าของค่าอินพุตและเดนไดรต์จะทำการรับอินพุตผ่านซินแนปส์ของเซลล์ประสาทอื่น โดยโซมาจะคอยประมวลผลสัญญาณไฟฟ้าที่รับเข้ามาตลอดเวลาแล้วส่งผลการทำงานเป็นเอาต์พุตออกไปให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลล์ประสาทอื่น โดยผ่านทางแอกซอนและซินแนปส์การเรียนรู้และความทรงจำเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดในการนำมาใช้งานการเรียนรู้ของมนุษย์ไม่ได้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีชีวภาพเพียงอย่างเดียวแต่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงทางด้านกายวิภาค (anatomical alterations) ควบคู่ไปด้วยซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางกายวิภาคนี้จะไม่เกิดกับนิวรอนหรือซินแนปส์เพียงตัวเดียวหรือจุดเดียวคือจะเกิดกับหลาย ๆ นิวรอนพร้อม ๆ กันเมื่อถึงเวลาหนึ่งนิวรอนก็จะหมดหน้าที่ไปแต่การลบล้างของความทรงจำจะไม่เหมือนกับการสลายไปของนิวรอน นิวรอนตัวหนึ่งจะร่วมงานกับนิวรอนอีกหลายตัวเพื่อก่อให้เกิดรูปแบบของความทรงจำสำหรับเรื่องใดเรื่องหนึ่งขึ้นในสมอง หมายความว่าความจำในเรื่องหนึ่ง ๆ มักเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของนิวรอนหลาย ๆ ตัวและจะเกิดในส่วนใดส่วนหนึ่งของสมองโดยแต่ละส่วนของสมองจะแบ่งหน้าที่และความถนัดในเรื่องที่ต่างกันออกไปนิวรอนเหล่านี้คือรากฐานระบบประสาทของมนุษย์รวมทั้งการทำหน้าที่ในด้านการคิดคำนึงต่าง ๆ ด้วยโดยจำนวนนิวรอนที่มีอยู่ในสมองมนุษย์นั้นมียู่เป็นจำนวนมากโดยนิวรอนแต่ละตัวจะเชื่อมโยงกับนิวรอนตัวอื่นอีกนับพันตัวและเชื่อกันว่าความรู้ทั้งหมดของมนุษย์นั้นจะเก็บไว้ในจุดเชื่อมโยง (connections) ต่าง ๆ โดยขึ้นอยู่กับความเข้มของการเชื่อมโยงด้วยสิ่งเหล่านี้ทำให้มนุษย์สามารถเรียน คิด จดจำ หรือระลึกถึงสิ่งที่จำไว้เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างฉับพลันจึงเป็นความมหัศจรรย์ที่คอมพิวเตอร์ไม่สามารถทำได้

3. คุณสมบัติของโครงข่ายประสาทเทียม โครงข่ายประสาทเทียมนี้มีคุณสมบัติที่เทียบเท่ากับสมองมนุษย์คนเราในด้านของการเรียนและจดจำเช่น สมองของมนุษย์เรานั้นเมื่อได้รับการเรียนรู้บางสิ่งหลาย ๆ ครั้งนั้นก็เกิดการจดจำและเมื่อพบเห็นสิ่งที่ไม่เคยได้เรียนรู้มาก่อนก็สามารถที่จะอนุมานได้ว่าสิ่งนั้นคืออะไรจากความรู้ที่ได้รับจากการเรียนรู้ในก่อนหน้าที่ผ่านมาโครงข่ายประสาทมีคุณสมบัติ 2 ประการ คือ

3.1) การเรียนรู้ (learning) โครงข่ายประสาทสามารถเรียนรู้จากชุดฝึกสอนที่ได้ทำการป้อนให้โครงข่ายประสาทเทียมได้เรียนรู้

3.2) การระลึกหรือจดจำได้ (recall) โครงข่ายประสาทเทียมสามารถระลึกได้ทั้งชุดฝึกสอนและชุดทดสอบหรือชุดทั่วไปได้ดีในระดับที่ยอมรับได้โดยชุดทดสอบจะมีความแตกต่างจากชุดฝึกสอนซึ่งความแตกต่างนั้นเรียกว่ามีสิ่งบิดเบือนของข้อมูลนั้น ๆ ซึ่งเป็นลักษณะของสภาพความเป็นจริงที่เกิดขึ้น

โครงข่ายประสาทเทียมในแบบของคอมพิวเตอร์นั้น จะประกอบไปด้วยหน่วยประมวลผล (processing elements (PE)) ที่เชื่อมโยงกันหลายตัวทำงานในลักษณะขนานกันไปคล้ายกับนิวรอนในสมองของมนุษย์เพื่อแปลงข้อมูลจากรูปแบบหนึ่งไปสู่อีกรูปแบบหนึ่งการใช้โครงข่ายประสาทเทียมนี้จะ เป็นไปรูปแบบของการสอนให้คอมพิวเตอร์เรียนรู้แทนที่จะเป็นการป้อนโปรแกรมให้กับคอมพิวเตอร์โดยจุดมุ่งหมายของการสอนนิวรอนหรือการป้อนข้อมูลที่ต้องการให้กับคอมพิวเตอร์เรียนรู้คือ การทำให้ระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นเป็นประโยชน์ในการศึกษา  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอมพิวเตอร์นี้สามารถแสดงคำตอบในรูปแบบที่ต้องการได้ซึ่งจะเป็นการป้อนข้อมูลที่ถือว่ารู้อยู่แล้วเข้าไปให้โครงข่ายประสาทเทียมพร้อมด้วยค่าเอาต์พุตที่ต้องการให้โครงข่ายประสาทเทียมนั้นแสดงออกมา จากนั้นโครงข่ายประสาทเทียมจะทำการคำนวณและปรับค่าตัวเลขน้ำหนักเองโดยใช้กฎเกณฑ์ต่างๆ เข้าช่วย จนกระทั่งเอาต์พุตที่ได้ออกมานั้นถูกต้องแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจส่วนตัวเลขที่เป็นกลไกที่ทำให้โครงข่ายประสาทเทียมสามารถเรียนรู้และจดจำได้นั้นจะอยู่ในรูปที่เรียกว่า “เมตริกซ์ น้ำหนัก” โดยกำหนดในรูปแบบของ “ เมตริกซ์ของค่าและค่าน้ำหนักของแต่ละคำหรือวลี ” ลักษณะการทำงานแบบนี้จะทำให้ผู้ใช้โครงข่ายประสาทเทียมสามารถที่จะป้อนข้อมูลใหม่ ๆ เข้าไปแล้วปล่อยให้เป็นที่ของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดนั้น ๆ ที่จะหาทางที่จะจัดการปรับตัวเพื่อที่จะหาคำตอบนั้นเอาเอง ความก้าวหน้าของโครงข่ายประสาทเทียมในปัจจุบันเป็นไปอย่างรวดเร็วทำให้สามารถแก้ปัญหาให้กับงานบางประเภทที่ไม่สามารถทำงานได้จนสัมฤทธิ์ผลและให้คำตอบในแบบที่ผู้ใช้งานพึงพอใจ

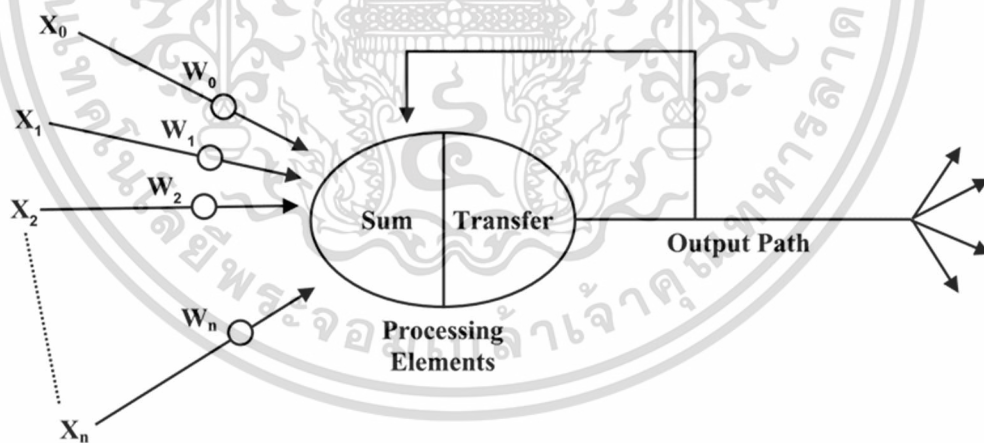
ข้อเปรียบเทียบระหว่างการประมวลผลแบบดั้งเดิมกับโครงข่ายประสาทเทียม

1. การประมวลผลแบบดั้งเดิม (traditional approach) เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลโดยมนุษย์ ดังนั้นทรัพยากรมนุษย์จะถูกใช้ในการพัฒนาอัลกอริทึมและโปรแกรม
2. การประมวลผลแบบโครงข่ายประสาทเทียม (neural network approach) ในกระบวนการสอนจะมีการสอนวนซ้ำหลาย ๆ รอบเพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียมเกิดการเรียนรู้ เมื่อสิ้นสุดการสอนแล้วโครงข่ายประสาทเทียมก็จะสามารถจำแนกข้อมูลได้และเมื่อมีข้อมูลใหม่ ๆ ที่ต้องการให้โครงข่ายรู้จักก็สามารถทำในทำนองเดียวกันและต้องมีการสอนใหม่แต่ทำให้ประหยัดเวลาและแรงงานในการพัฒนาโปรแกรมขึ้นมาใหม่การเก็บข้อมูลของโครงข่ายประสาทเทียมเป็นแบบกระจายและถูกใช้ร่วมกันโดยหลาย ๆ เซลล์ประสาทซึ่งต่างกับแบบดั้งเดิมคือข้อมูลจะเก็บไว้ในหน่วยความจำ การเก็บข้อมูลของโครงข่ายประสาทเทียมแบบกระจายนั้นทำให้เกิดความซ้ำซ้อนซึ่งเป็นการเพิ่มความทนทานคือ เป็นระบบสำรองทดแทน (fault/error tolerance system) รูปแบบของโครงข่ายประสาทเทียมส่วนใหญ่จะมีองค์ประกอบที่สำคัญเช่น รูปแบบการเรียนรู้ภายในส่วนโปรเซสซึ่งมีการบวก การคูณ การลบตัวเลขบรรจุอยู่หน่วยโปรเซสซึ่งในโครงข่ายประสาทเทียมจะทำงานสัมพันธ์กันโดยขึ้นกับการเชื่อมโยงกันหมดทุกส่วนหรือเชื่อมโยงเพียงบางส่วนก็ได้ การสร้างโครงข่ายประสาทเทียมต้องเริ่มด้วยการพิจารณาจากเรื่องของ การเชื่อมต่อกันภายในและสถาปัตยกรรมที่สนับสนุนการสร้างโครงข่ายประสาทเทียมให้เป็นไปได้

3. หลักการทำงาน ข้อมูลการทดลองในปัจจุบันได้แสดงให้เห็นว่าเซลล์ประสาททางชีววิทยา (biological neurons) ของมนุษย์นั้นมีความซับซ้อนทางโครงสร้างมากกว่าโครงข่ายประสาทเทียมที่สร้างโดยวงจรโครงข่ายเซลล์ประสาทเทียมอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อทางด้านชีววิทยานั้นสามารถให้ความ

เข้าใจเกี่ยวกับเซลล์ประสาทได้ดีกว่ารวมถึงเมื่อเทคโนโลยีในปัจจุบันที่ก้าวหน้าไปอย่างมากนั้น นัก  
เอกสาร เป็นเอกสาร ที่สงวนเวลาให้กับ การแข่งขัน เพื่อ การศึกษา เท่านั้น เมื่อคุณผู้ใดเห็นไป เชิญ ประโยชน์ ด้าน การศึกษา  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบวงจรโครงข่ายประสาทเทียมจึงสามารถที่จะพัฒนาระบบของโครงข่ายได้อย่างต่อเนื่องโดยเป็นการสร้างที่มีความสามารถเหนือกว่าความเข้าใจของมนุษย์ในด้านของสมองแต่ในปัจจุบันนี้เป้าหมายของวงจรโครงข่ายประสาทเทียมไม่ใช่การสร้างสมองที่ยิ่งใหญ่หรือแต่เป็นในทางตรงข้ามคือ นักวิจัยวงจรโครงข่ายเซลล์ประสาทได้กำลังค้นหาเพื่อที่ทำความเข้าใจเกี่ยวกับความสามารถของเซลล์ประสาทตามธรรมชาติของมนุษย์เพื่อที่จะนำไปใช้ในการแก้ปัญหาที่ไม่สามารถแก้ได้โดยวิธีการคำนวณดั้งเดิม โดยเซลล์ประสาทเทียมนั้นได้ถูกจำลองขึ้นมาตามหน้าที่พื้นฐานทั้ง 4 ของเซลล์ประสาทธรรมชาติดังแสดงในภาพที่ 2.11 โครงข่ายประสาทเทียมจะมีอินพุตหลายค่าเข้ามาในโครงข่ายโดยจะถูกแทนด้วยสัญลักษณ์ทางคณิตศาสตร์  $X(n)$  และแต่ละอินพุตนั้นจะถูกคูณด้วยค่าความรู้หรือเป็นค่าน้ำหนัก (weight) ซึ่งแทนด้วย  $W(n)$  โดยที่ปกติผลคูณของค่าน้ำหนักและอินพุตที่เข้าสู่โครงข่ายนั้นจะถูกนำมารวมกันและส่งผ่านเข้าไปในฟังก์ชัน (transfer function) เพื่อที่จะหาเอาต์พุตหรือผลลัพธ์ออกมา โดยกระบวนการนี้นั้นทำให้ง่ายต่อการใช้งานและสามารถนำไปใช้กับโครงสร้างวงจร โครงข่ายอื่นที่ใช้ฟังก์ชันผลรวม (summing functions) และฟังก์ชันการส่งผ่านที่ต่างกันได้ โดยที่บางแอปพลิเคชันนั้นต้องการคำตอบที่เป็น “ใช่หรือไม่ใช่” หรือค่าไบนารี (binary) โดยแอปพลิเคชันนั้นอาจจะรวมถึงการจดจำข้อความการชี้เฉพาะคำพูดและการแปลความหมาย รูปภาพของเหตุการณ์ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 แสดงการทำงานของเซลล์ประสาทเทียม

3.1 การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม (learning of neural network) โดยทั่วไปการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมก็คือการสอนโครงข่ายให้ทำ

การคำนวณข้อมูลเอาต์พุตพร้อมกับปรับปรุงค่าน้ำหนักโดยใช้ข้อมูลอินพุตที่ป้อนให้กับโครงข่าย โดยอาศัยกระบวนการทำซ้ำ (iterative) สามารถแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 การเรียนรู้แบบมีผู้สอน การเรียนรู้แบบมีผู้สอนนั้นต้องการชุดข้อมูลอินพุตและเอาต์พุต เป้าหมายเป็นชุดฝึกสอนควบคู่ (training pair) โดยปกติการสอนโครงข่ายนั้นจะใช้ชุดฝึกสอนควบคู่กัน หลายชุดในระหว่างการสอนโครงข่ายจะเกิดเอาต์พุตจริงซึ่งแตกต่างจากเอาต์พุตเป้าหมายทำให้ได้ค่าความคลาดเคลื่อนหรือค่าความผิดพลาด โดยโครงข่ายจะเรียนรู้ข้อมูลทั้งสองโดยการปรับค่าน้ำหนักเพื่อลดค่าความแตกต่างหรือค่าความผิดพลาดระหว่างค่าของตัวแปรเอาต์พุตของโครงข่ายกับค่าของข้อมูลเอาต์พุตที่ถูกต้องให้น้อยที่สุดการปรับค่าน้ำหนักจะปรับทีละน้อยๆ โดยกระบวนการทำซ้ำกับข้อมูลที่ละชุดจนกระทั่งค่าน้ำหนักในโครงข่ายลู่เข้าซึ่งทั้งหมดนี้เรียกว่าการเรียนรู้จากนั้นเมื่อเราป้อนค่าข้อมูลอินพุตล่าสุดซึ่งเป็นข้อมูลชุดใหม่ก็จะได้ค่าตัวแปรเอาต์พุตของโครงข่ายเมื่อโครงข่ายทำการเรียนรู้แล้วก็จะป้อนข้อมูลอินพุตล่าสุดให้กับโครงข่ายเพื่อที่จะหาค่าของตัวแปรเอาต์พุตซึ่งคือค่าผลการทำนายหรือระบุค่าหรือวิธีสำคัญเป็นต้น

3.1.2 การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (unsupervised learning) การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอนนั้นได้ถูกพัฒนาเพื่อให้ใกล้เคียงกับระบบการเรียนรู้ของสมองมนุษย์มากยิ่งขึ้น โดยจะมีเพียงชุดข้อมูลอินพุตเท่านั้น จากนั้นกระบวนการเรียนรู้จะใช้หลักทางสถิติโดยหาค่าทางสถิติของชุดฝึกสอนและทำการจัดกลุ่มข้อมูลออกเป็นระดับต่างๆ โดยโครงข่ายประสาทเทียมจะหาค่าเอาต์พุตเองจากความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลอินพุตและเอาต์พุต

3.1.3 การเรียนรู้เชิงบังคับ (reinforcement learning) การเรียนรู้เชิงบังคับนั้นเป็นการเรียนรู้แบบมีผู้สอนและไม่มีผู้สอนโดยจะใช้การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอนในระหว่างการสอนที่มีเพียงชุดข้อมูลอินพุตและจะใช้การเรียนรู้แบบมีผู้สอนคือเมื่อได้ค่าเอาต์พุตและจะทำการบอกว่าถูกหรือผิดแต่จะไม่บอกว่าเอาต์พุต

4. ประเภทของโครงข่ายประสาทเทียม แนวคิดของเซลล์ประสาทเทียมที่ต้องการเชื่อมต่อและมีการคำนวณค่าแอกติเวชันฟังก์ชันโดยมากจะเป็นตัวบ่งบอกโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมซึ่งจะมีกฎกำหนดวิธีการของโครงข่ายโดยแบ่งออกเป็นประเภทได้ 5 ประเภท ดังนี้

1. ประเภทการคาดเดา (prediction)
2. ประเภทการจัดลำดับหมวดหมู่ (classification)
3. ประเภทการเชื่อมโยงข้อมูล (data association)
4. ประเภทกระบวนการสร้างความคิด (data conceptualization)
5. ประเภทการกรองข้อมูล (data filtering) ที่ถูกคืออะไร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดโครงข่าย	โครงข่าย	การใช้งาน
การคาดเดา Prediction	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Back-propagation</li> <li>- Delta Bar Delta</li> <li>- Extended Delta Bar Delta</li> <li>- Directed Random Search</li> <li>- Higher Order Neural Networks</li> <li>- Self-organizing map into Back-propagation</li> </ul>	ใช้ค่าอินพุตเพื่อการคาดเดาเอาต์พุต
การจัดหมวดหมู่ Classification	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Learning Vector Quantization</li> <li>- Counter-propagation</li> <li>- Probabilistic associative Memory</li> </ul>	ใช้ค่าอินพุตเพื่อกำหนดการจำการหมวดหมู่
การเชื่อมโยงข้อมูล Data Association	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hopfield</li> <li>- Boltzmann Machine</li> <li>- Hamming Network</li> <li>- Bidirection associative memory</li> </ul>	เหมือนกับ Classification แต่จะจดจำข้อมูลที่มี Error ด้วย
กระบวนการสร้างความคิด Data Conceptualization	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adaptive Resonance Network</li> <li>- Self Organizing Map</li> </ul>	วิเคราะห์อินพุตเพื่อการจัดกลุ่ม
การกลั่นกรองข้อมูล Data Filtering	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recirculation</li> </ul>	ทำให้สัญญาณอินพุตเรียบสม่ำเสมอ

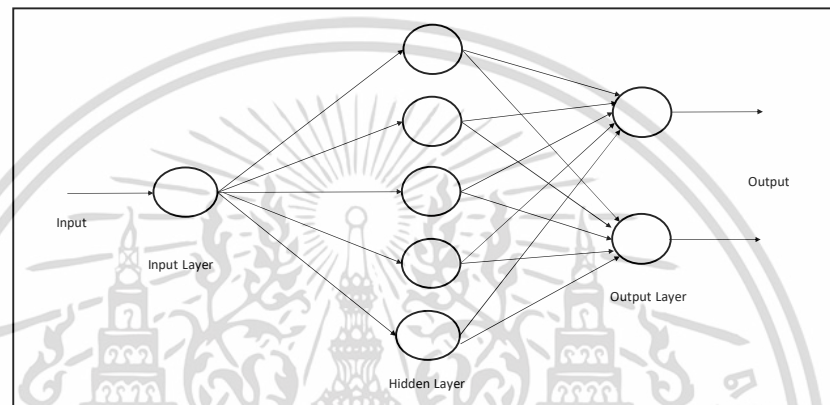
## ตารางที่ 2.2 แสดงความแตกต่างระหว่างประเภทของโครงข่ายประสาทเทียม

5. โครงข่ายประสาทเทียมพอร์เซพตรอนแบบหลายชั้นสถาปัตยกรรมโครงข่ายพอร์เซพตรอนแบบหลายชั้นเป็นโครงข่ายประเภทการคาดเดา (networks for prediction) ที่มักใช้ทำงานกับงานคาดเดาสามารถช่วยกำหนดลำดับความสำคัญได้โดยในงานวิจัยนี้นำมาใช้สำหรับการคาดเดาและทำนายว่าคำหรือวลีนั้นเป็นคำหรือ วลีสำคัญหรือไม่

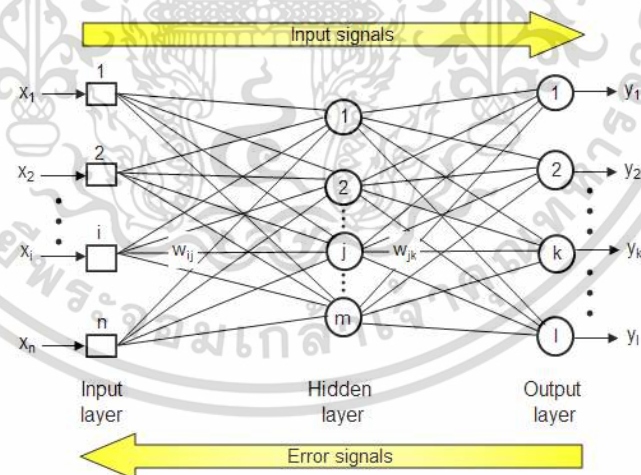
5.1 สถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมพอร์เซพตรอนแบบหลายชั้น สถาปัตยกรรมโครงข่ายพอร์เซพตรอนแบบหลายชั้นหรือโครงข่ายแบบป้อนไปข้างหน้าโดยมีการเรียนรู้แบบย้อนกลับนั้นถูกพัฒนาในต้นปี 1970 โดยจากหลายๆ แหล่งและเป็นการทำงานพัฒนาร่วมกันอย่างอิสระโดยในปัจจุบันสถาปัตยกรรมแบ็คพรอพากะชันหรือแบบแพร่ย้อนกลับนี้เป็นที่นิยมสูงสุดและยังมีประสิทธิภาพมาก รวมถึงยังมีความง่ายสำหรับการเป็นต้นแบบสำหรับโครงข่ายประสาทเทียมที่มีความซับซ้อนมากขึ้นที่เป็นแบบหลายเลเยอร์ โดยเทคนิคการแพร่ย้อนของสถาปัตยกรรมแบบนี้ได้ถูกใช้ในหลายแอปพลิเคชันด้วยกันและยังมีผลต่อชนิดของโครงข่ายขนาดใหญ่ในด้านของรูปร่างและวิธีการฝึกที่แตกต่างกันไปเพราะมีจุดแข็งที่สำคัญของเทคนิคคือ วิธีการทำงานแบบไม่เชิงเส้น (non-linear) ที่มีความเหมาะสมต่อการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก้ปัญหาที่มีความไม่ชัดเจนโครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซพตรอนแบบหลายชั้นนั้นมีลักษณะต้นแบบ คือ จะมีจำนวนหนึ่งชั้นอินพุต (input layer) หนึ่งชั้นเอาต์พุต (output layer) และอย่างน้อยหนึ่งชั้นซ่อน (hidden layer) ซึ่งลักษณะของโครงข่ายประสาทเทียมนั้นไม่มีข้อจำกัดทางทฤษฎีต่อจำนวนของชั้นซ่อน แต่ตามแบบต้นฉบับจะมีเพียงหนึ่งชั้นหรือสองชั้นเท่านั้น โดยบางการทำงานที่แก้ปัญหาที่ซับซ้อนจะต้องมีอย่างน้อยที่สุดสี่ชั้น (สามชั้นซ่อน กับหนึ่งชั้นเอาต์พุต) แต่ละชั้นเชื่อมต่อกับชั้นที่ตามมา ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียม



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับ

( [https://www.researchgate.net/figure/Feed-Forward-Neural-Network-with-Back-Propagation\\_fig2\\_281271367](https://www.researchgate.net/figure/Feed-Forward-Neural-Network-with-Back-Propagation_fig2_281271367) )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.13 นั้นชั้นอินพุตและชั้นเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมจะเป็นการแสดงถึงการไหลของข้อมูล (information) ในกระบวนการของการเรียกซ้ำหรือการแพร่กลับโดยการเรียกซ้ำนั้นเป็นกระบวนการนำข้อมูลอินพุตสู่โครงข่ายที่ได้รับการฝึกสอนแล้ว และรอรับคำตอบที่เอาต์พุตโดยการเปรียบเทียบค่าความแตกต่างหรือ ค่าความผิดพลาดจากการแพร่ย้อนกลับในช่วงของการเรียกซ้ำโดยจะใช้ในขณะที่โครงข่ายกำลังเรียนรู้จากข้อมูลชุดฝึกสอนจำนวนชั้นและจำนวนโหนดในแต่ละชั้นนั้นเป็นมีผลต่อการทำงานของโครงข่ายแบบป้อนไปข้างหน้าและมีการเรียนรู้แพร่ย้อนกลับ โดยสิ่งเหล่านี้เป็นสิ่งที่ละเอียดอ่อนมากและเป็นศิลปะของนักออกแบบโครงข่าย โดยไม่มีคำตอบที่ตายตัวหรือแน่นอนสำหรับการออกแบบโครงข่ายจะมีเพียงกฎทั่วไปที่นักวิจัยและวิศวกรส่วนใหญ่หยิบยกขึ้นมาและทำตามกฎนั้นดังต่อไปนี้

กฎข้อที่ 1 เมื่อข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่ต้องการมีความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนมากขึ้นจำนวนของหน่วยประมวลผลในชั้นซ่อนก็ควรจะมากขึ้นด้วย

กฎข้อที่ 2 ถ้ากระบวนการสามารถแยกเป็นหลายขั้นตอนได้ก็ต้องเพิ่มชั้นซ่อนแต่ถ้ากระบวนการไม่สามารถแยกเป็นขั้นตอนได้ชั้นที่เพิ่มเข้าไปอาจทำให้สามารถจดจำอย่างง่ายได้แต่จะไม่ใช้วิธีการธรรมดา

กฎข้อที่ 3 ปริมาณข้อมูลการฝึกสร้างขอบเขตบนของหน่วยประมวลผลในชั้นซ่อน

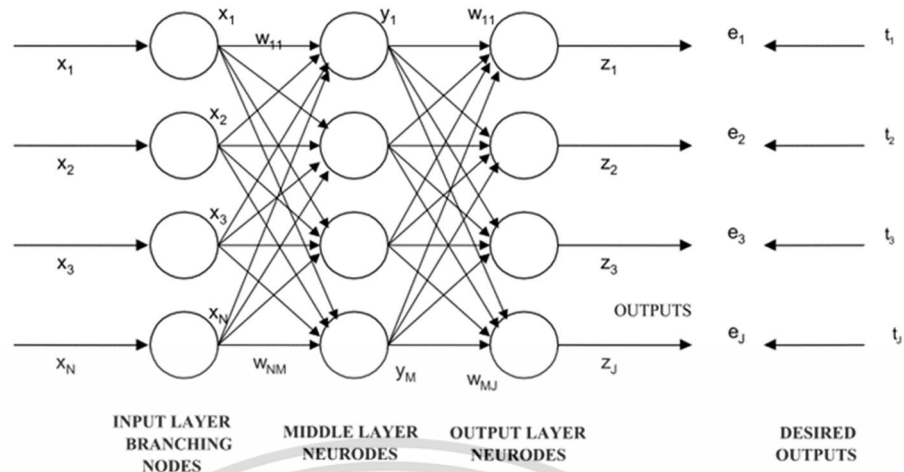
5.2 ลักษณะโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับ โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับหรือแบบเพอร์เซพตรอนหลายชั้นมีลักษณะหลักๆ ดังนี้คือ

5.2.1 จำนวนชั้นต่างๆ โครงข่ายประสาทเทียมจะประกอบด้วยชั้นต่างๆ คือ ชั้นอินพุต ชั้นเอาต์พุต และชั้นซ่อนซึ่งจะอยู่ระหว่างชั้นอินพุตและชั้นเอาต์พุต

5.2.2 การเชื่อมต่อระหว่างชั้นต่างๆ นั้นจะมีลักษณะที่ทุกๆ โหนดในชั้นอินพุตนั้นจะส่งสัญญาณไปยังทุกๆ โหนดในชั้นซ่อนและทุกๆ โหนดในชั้นซ่อนจะทำการส่งสัญญาณต่อไปยังโหนดในชั้นเอาต์พุต

5.2.3 การทำงานของชั้นต่างๆ นั้น ในชั้นอินพุตจะไม่มีการประมวลผลใด ๆ ทั้งสิ้นจะทำหน้าที่เพียงแคร์รับสัญญาณหรือข้อมูลเข้าแล้วกระจายออกไปยังแต่ละโหนดในชั้นซ่อนส่วนชั้นซ่อนและชั้นเอาต์พุตนั้นจะเป็นชั้นที่มีการประมวลผลโดยรูปที่ 2.18 จะเป็นการแสดงถึงลักษณะของโครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซพตรอนแบบหลายชั้น ซึ่งจะประกอบไปด้วยชั้นอินพุต ชั้นซ่อนจำนวน 1 ชั้น และชั้นของเอาต์พุต โดยแต่ละโหนดจะถูกเชื่อมต่อกันเป็นโครงข่าย

5.3 วิธีการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ โครงข่ายแบบเพอร์เซพตรอนแบบหลายชั้นมีรายละเอียดดังนี้ ดังในภาพที่ 2.14



รูปที่ 2.14 สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับ

ความหมายของตัวแปรต่างๆที่ใช้

$x_n$  = อินพุตโหนดที่  $n$  มีทั้งหมด  $N$  โหนด

$s_m$  = เอาต์พุตของชั้นซ่อน ก่อนทำการปรับค่า ( Activation ) เป็น  $y_m$

$y_m$  = เอาต์พุตของชั้นซ่อน หลังทำการปรับค่าของโหนดที่  $m$  มีทั้งหมด  $M$  โหนด

$V_j$  = เอาต์พุตของชั้นเอาต์พุต ก่อนทำการปรับค่า ( Activation ) เป็น  $Z_j$

$Z_j$  = ค่าเอาต์พุตที่ได้ทำการปรับค่าแล้วของชั้นเอาต์พุตโหนดที่  $j$  มีทั้งหมด  $J$  โหนด

$t_j$  = ค่าเอาต์พุตที่ต้องการที่ชั้นเอาต์พุตโหนดที่  $j$  มีทั้งหมด  $J$  โหนด

$W_{nm}$  = น้ำหนักของเส้นเชื่อมระหว่างชั้นอินพุต กับชั้นซ่อน

$W_{mj}$  = น้ำหนักของเส้นเชื่อมระหว่างชั้นซ่อน กับชั้นอินพุต

$\eta$  = อัตราการเรียนรู้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

$r$  = จำนวนรอบที่จะทำการเรียนรู้  $R$  เป็นจำนวนรอบที่กำหนด

$q$  = จำนวนชุดของข้อมูลตัวอย่าง มี  $Q$  เป็นตัวกำหนด

$e^{(q)}$  = ค่าผิดพลาดของข้อมูลตัวอย่าง

$E$  = ค่าผิดพลาดรวมเฉลี่ยของข้อมูลตัวอย่าง

5.3.2 ขั้นตอนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับแบ่งเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

5.3.2.1 กำหนดจำนวนโหนดในชั้นอินพุต ( $N$ ) จำนวนโหนดในชั้นเอาต์พุต ( $J$ ) จำนวนโหนดในชั้น

ซ่อน ( $M$ ) จำนวน 1 ชั้นซ่อนและกำหนดจำนวนข้อมูลอินพุตและข้อมูลเอาต์พุตต่อจากนั้นจะทำการกำหนดจำนวนรอบสูงสุดที่จะทำการเรียนรู้ ( $R$ ) รวมถึงค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้

5.3.2.2 กำหนดค่าพารามิเตอร์ของอัตราการเรียนรู้ ( $\eta$ ) ที่อยู่ในช่วง  $[0, 1]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นแก่ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.2.3 การสุ่มน้ำหนักเริ่มต้นให้กับทุกๆเส้นเชื่อมโยงภายในโครงข่ายประสาทเทียมในทั้ง 2 ชั้น โดยให้มีค่าอยู่ระหว่าง  $[-1,1]$

5.3.2.4 รับค่าอินพุตของข้อมูลชุดแรกหรือข้อมูลแถวแรกเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียม

5.3.2.5 คำนวณค่าผลรวมของโหนดในชั้นซ่อน (Sm) ก่อนทำการปรับค่ารวมด้วยฟังก์ชันกระตุ้น (activation function) ฟังก์ชันซิกมอยด์ ซึ่งจะได้ค่าของโหนดในชั้นซ่อนที่อยู่ ในช่วง  $[0, 1]$  โดยมีรายละเอียดดังสมการ (2.74) – (2.76) ค่าเอาต์พุตของชั้นซ่อนก่อนทำการปรับค่า ดังสมการที่ (2.74)

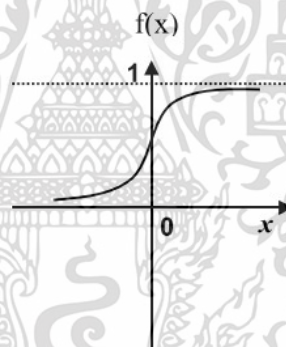
$$s_m = \sum_{n=1}^N x_n \times w_{nm} \quad (2.74)$$

ค่าเอาต์พุตของชั้นซ่อนหลังทำการปรับค่าดังสมการที่ (2.75)

$$y_m = f(s_m) \quad (2.75)$$

ฟังก์ชันที่ใช้ปรับค่า  $f(x)$  ดังสมการที่ (2.76)

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (2.76)$$



รูปที่ 2.15 แสดงค่าที่ได้จากฟังก์ชันซิกมอยด์

5.3.2.6 คำนวณเอาต์พุตของโหนดในเลเยอร์เอาต์พุตด้วยสมการ (2.74) แล้วปรับผลรวมโดยฟังก์ชัน Sigmoid เช่นเดียวกับในสมการ (2.162) ซึ่งจะได้รับค่าของโหนดในชั้นเอาต์พุตอยู่ในช่วง  $[0, 1]$  สำหรับค่าของผลลัพธ์ในโหนดของเลเยอร์เอาต์พุต หลังจากปรับค่าที่แสดงในสมการ (2.77)

$$v_j = \sum_{m=1}^M y_m \times w_{mj} \quad (2.77)$$

ค่าเอาต์พุตของเลเยอร์เอาต์พุตหลังจากการปรับสมการ (2.78)

$$z_j = f(v_j) \quad (2.78)$$

5.3.2.7 ค้นหาข้อผิดพลาดของโหนดในเลเยอร์เอาต์พุตและปรับน้ำหนัก โดยการนำเอาต์พุตจากการคำนวณเทียบกับชุดเอาต์พุต เพื่อหาค่าความผิดพลาดของข้อมูลหากข้อมูลผิดพลาดน้อยกว่าค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อผิดพลาดที่ยอมรับได้ เครือข่ายประสาทจะได้รับชุดข้อมูลถัดไปเข้าสู่เครือข่ายถ้าไม่ได้ปรับเครือข่ายประสาทเทียมจะได้รับแฉวถัดไปและจะกลับไปที่ยันตอนที 6.3.2.5

$$e^{(q)} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^J (t_j - z_j)^2 \quad (2.79)$$

การปรับน้ำหนักระหว่างโหนดในชั้นซ่อนและชั้นเอาต์พุต ดังสมการที่ (2.80)

$$w_{mj}^{(r+1)} = w_{mj}^{(r)} + \eta \left\{ (t_j^{(q)} - z_j^{(q)}) * [z_j^{(q)} (1 - z_j^{(q)})] * y_m^{(q)} \right\} \quad (2.80)$$

การปรับน้ำหนักระหว่างโหนดในชั้นอินพุตและชั้นซ่อน ดังสมการที่ (2.81)

$$w_{nm}^{(r+1)} = w_{nm}^{(r)} + \eta \left\{ \sum_{j=1}^J (t_j^{(q)} - z_j^{(q)}) [z_j^{(q)} (1 - z_j^{(q)})] w_{mj}^{(r)} \right\} * [y_m^{(q)} (1 - y_m^{(q)})] [x_n^{(q)}] \quad (2.81)$$

5.3.2.8 คำนวนค่าผิดพลาดรวมเฉลี่ย ( mean square error : MSE ) ในทุกๆ แฉวข้อมูล โดยการนำค่าผิดพลาดของแต่ละแฉวของชุดข้อมูลมารวมกันแล้วทำการหาค่าเฉลี่ย เพื่อใช้ในการตรวจสอบผลลัพธ์ของทุกๆ ข้อมูลในแต่ละรอบนั้นมีค่าน้อยกว่าค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้ในทุกๆ แฉวข้อมูลหรือไม่ โดยถ้าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยมากกว่าค่าที่ยอมรับได้ให้จบการเรียนรู้ แต่ถ้าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยมากกว่าค่าที่ยอมรับได้ให้ตรวจสอบว่าได้ทำการเรียนรู้ครบตามจำนวนรอบที่กำหนดไว้หรือไม่ถ้าครบแล้วให้จบการเรียนรู้ แต่ถ้ายังไม่ครบให้กลับไปทำข้อที่ 6.3.2.4 ใหม่ ซึ่งก็คือเริ่มต้นการเรียนรู้รอบใหม่

ค่าผิดพลาดรวมเฉลี่ย ดังสมการ (2.82)

$$E = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q e^{(q)} \quad (2.82)$$

ข้อดีและข้อเสียของการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ

ข้อดี คือ การเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับนั้นจะมีความสามารถในการจดจำรูปแบบซึ่งการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับสามารถที่จะเรียนรู้ความสัมพันธ์ของรูปแบบได้มากมาย โดยการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับต้องการตัวอย่างรูปแบบที่จะเรียนรู้ความยืดหยุ่นของการเรียนรู้อยู่ที่ความหลากหลายในการออกแบบทางเลือกต่างๆ เช่นจำนวนชั้น เส้นเชื่อมโยงจำนวนโหนดในแต่ละชั้นที่ได้ทำการกำหนดขึ้น โดยความยืดหยุ่นนี้เองทำให้การเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับสามารถแก้ปัญหาทางงานประยุกต์ได้อย่างมากมาย

ข้อจำกัด คือ การใช้เวลามากในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมให้เกิดการเรียนรู้การแก้ปัญหา

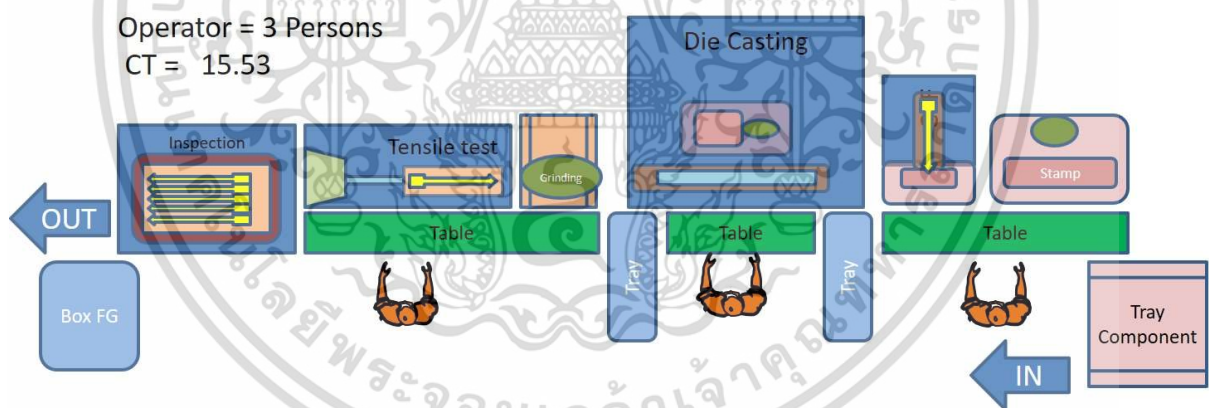
## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

#### 3.1 การวิเคราะห์แบบลีน(Lean Analysis)

การศึกษาระบบการผลิตแบบ A ดังรูปที่ 3.1 ด้านล่างนั้น ในกระบวนการผลิตสายเคเบิลแต่ละเส้นออกมาค่อนข้างใช้เวลาในการผลิตนาน เนื่องจากรอบเวลา (cycle time) ของสายการผลิตแบบ A สูงถึง 15.53 วินาที ซึ่งอยู่ในกระบวนการของการประกอบในกระบวนการแรกจากการที่ตรวจสอบพบว่ามีเวลาที่แตกต่างจากกระบวนการฉีดโลหะถึง 6.38 วินาที ( 41% ) และ แตกต่างจากกระบวนการตรวจสอบถึง 9.08 วินาที ( 58% ) ทำให้กระบวนการฉีดโลหะต้องเกิดการรอหรือต้องรอเวลาให้ส่วนของการประกอบทำสต่องานไว้ให้ได้จำนวนมากก่อน จึงจะสามารถนำมาฉีดได้หากรวมเวลาทั้งหมดของขั้นตอนการประกอบชิ้นงานและขั้นตอนการฉีดโลหะแล้ว จะใช้เวลาทั้งสิ้น 2.2 วัน ดังนั้น

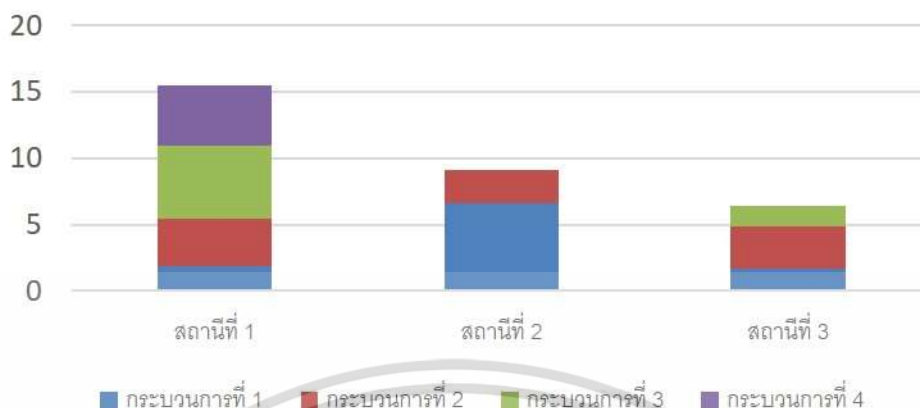
ทำให้มีการหาวิธีการปรับปรุงกระบวนการผลิตออกมา เป้าหมายหลักๆก็คือ สามารถลดรอบเวลาของกระบวนการผลิต, กำจัดการรองาน, การประกอบงานจากแบบเดิมครั้งละ 10 เส้น ไปเป็นประกอบแบบทีละ 1 เส้น (one piece flow) และลดจำนวนพนักงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตได้ ซึ่งในที่นี้เราจะใช้หลักการวิเคราะห์แบบลีนเข้ามาช่วยในการปรับปรุงกระบวนการผลิต ดังนี้



รูปที่ 3.1 กระบวนการประกอบก่อนการปรับปรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอบเวลาของกระบวนการ



รูปที่ 3.2 กราฟ แสดงรอบเวลา (CT) ก่อนการปรับปรุง

จากการตรวจสอบกระบวนการผลิตและทำการวิเคราะห์และกำจัดความสูญเปล่า 8 อย่าง (8 Wastes) เพื่อการส่งมอบสินค้าที่ลูกค้าต้องการ และส่งสินค้าได้ทันเวลา โดยประกอบไปด้วย

1. การผลิตมากเกินไป (overproduction) ในส่วนของการวิเคราะห์แบบลีน ในข้อนี้กระบวนการผลิตแบบเดิม ตามรูปแบบรูป 3.1 เนื่องจากในส่วนของกระบวนการประกอบใช้เวลาสูงทำให้เกิดการรอ งานและเวลาในการผลิตสายเคเบิลแต่ละเส้นต้องใช้เวลาาน จึงทำได้เพียงสามารถผลิตสินค้าส่งได้ทันตามจำนวนสินค้าที่ลูกค้าต้องการ (forecast) ในแต่ละรอบของการส่งสินค้าแต่ไม่สามารถผลิตได้เพียงพอสำหรับมีสต็อกสินค้าไว้บางส่วน ตามที่ได้วางแผนไว้ การที่มีสินค้าสต็อกไว้นั้นจะช่วยทำให้ การผลิตสินค้าในรอบการส่งสินค้ารอบถัดไป ไม่ต้องเร่งการผลิตสินค้ามากเกินไป เพราะการเร่งการผลิตสินค้ามากเกินไปนั้นทำให้อาจเกินการประกอบงานที่ไม่สมบูรณ์ได้ แต่ก็ไม่ควรทำการจัดเก็บสต็อกสินค้ามากเกินไปเช่นกัน เนื่องจากจะทำให้เกิดต้นทุนในการจัดเก็บสินค้าเกินความจำเป็น ทำให้เกิดแนวคิดการปรับปรุงกระบวนการผลิตขึ้นมาใหม่เพื่อที่จะสามารถผลิตสินค้าให้ได้อย่างการผลิตตามเป้าหมายและมีสินค้าสต็อกไว้ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น

2. การรอคอยในการปฏิบัติการ (waiting) จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้น ในส่วนของกระบวนการประกอบชิ้นงาน นั้นเป็นกระบวนการที่ใช้เวลาในการผลิตมากที่สุด ซึ่งกระบวนการถัดไปจากการประกอบนั้น เป็นการฉีดโลหะทำให้เกิดการรอนานที่ค่อนข้างนาน รวมถึงเวลาที่แตกต่างของกระบวนการที่ 1 และกระบวนการที่ 2 ที่มีความต่างกัน 6.38 วินาที และระยะเวลาความต่างของเวลาระหว่างกระบวนการที่ 1 และกระบวนการที่ 3 ที่มีความต่างของเวลาที่ค่อนข้างมากถึง 58% ทำให้ต้องหาวิธีการปรับปรุงกระบวนการผลิตให้เวลาในการผลิตแต่ละกระบวนการมีเวลาที่ใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การขนส่งมากเกินไป (transportation) ในส่วนของการขนส่งที่มากเกินไปนั้น การส่งสินค้าให้กับลูกค้าเป็นไปตามรอบที่ลูกค้าต้องการและมีการวางแผนไว้ไม่มีการขนส่งที่มากเกินไปแต่จะมีการขาดส่งสินค้าในกรณีที่ไม่สามารถผลิตสินค้าได้ตามเป้าทำให้ต้องเลื่อนรอบการส่งออกไปจนเกิดความเสียหายในเรื่องของค่าปรับและความน่าเชื่อถือจากทางลูกค้าไปในที่สุดและการที่มีการออกแบบกระบวนการที่ไม่เป็นแบบการไหลที่ละชั้นทำให้เกิดโอกาสที่จะมีปัญหาทางด้านคุณภาพได้

4. การมีขั้นตอนการผลิตมากเกินไป (processing) ในส่วนของการพิจารณาขั้นตอนการผลิตมีขั้นตอนบางขั้นตอนที่สามารถปรับปรุงเพื่อทำการลดเวลาในการผลิตได้มีขั้นตอนการผลิตมากเกินไปนั้นในกระบวนการผลิตเดิมมีส่วนของประกอบถึง 4 กระบวนการ และรอบเวลา (Cycle Time) ที่สูงที่สุดของสายการผลิตอยู่ที่ขั้นตอนที่ 1 จากการวิเคราะห์และแนวคิดแล้วทำให้เกิดความคิดที่จะรวมกระบวนการตัดสาย Inner และการปั๊มวันที่ทำการผลิตไว้ด้วยกัน เพื่อเป็นการลดขั้นตอนกระบวนการในการผลิตให้น้อยลง

5. การมีสินค้าคงคลังมากเกินไป (Inventory) ในส่วนของการมีสินค้าคงคลังมากเกินไปนั้นในกระบวนการผลิตสายเคเบิลตามที่ได้กล่าวข้างต้น ว่าสามารถผลิตสินค้าได้เพียงตามจำนวนสินค้าที่ลูกค้าต้องการเท่านั้นยังไม่สามารถผลิตสินค้าให้ได้อย่างการผลิตตามเป้าหมาย คือ 1.ตามจำนวนสินค้าที่ลูกค้าต้องการ 2.มีสต็อกสินค้าไว้บางส่วน ซึ่งในขณะนี้ยังไม่สามารถทำการผลิตตามที่ต้องการได้ แต่จะมีสินค้าคงคลังมากในส่วนของสินค้าสำเร็จรูปโดยจะมีถึง 2.2 วันของการผลิตซึ่งการจะลดลงได้นั้นจะต้องทำการปรับการผลิตให้ยืดหยุ่นมากกว่านี้

6. การเคลื่อนไหวมากเกินไป (Motion) สำหรับการเคลื่อนไหวที่มากเกินไปนั้น จากสายการผลิตแบบเดิมเกิดจากกระบวนการที่ 1 มีกระบวนการที่มากเกินไปทำให้มีรอบเวลาทำงานที่สูงดังนั้นจึงทำการปรับปรุงโดยการควบรวมกระบวนการที่ 3 และ 4 เข้าด้วยกัน

7. การมีชิ้นงานบกพร่องและของเสีย (Defect) ในส่วนของการมีชิ้นงานบกพร่องและของเสีย นั้น การวางตำแหน่งของหัวสายที่ไม่ถูกต้องส่งผลให้เกิดการสั้นหรือยาวของ Inner และมีผลต่อการรับแรงดึงของสายเคเบิล

### 3.1.1 การปรับปรุงสายการผลิตที่ได้จากการวิเคราะห์แบบลีน

ระบบการผลิตแบบลีนเป็นแนวคิดหรือปรัชญาในการบูรณาการวิธีการบ่งชี้และขจัดความสูญเปล่าหรือสิ่งที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่มให้แก่กระบวนการและผลิตภัณฑ์โดยอาศัยความต้องการของลูกค้าและการสร้างระบบดึงในกระบวนการเพื่อทำให้เกิดสภาพการไหลอย่างต่อเนื่องของกระบวนการและปรับปรุงกระบวนการอย่างต่อเนื่องเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่กระบวนการและผลิตภัณฑ์อย่างสม่ำเสมอ การขจัดความสูญเปล่าในกระบวนการผลิตเป็นเป้าหมายที่สำคัญของระบบการผลิตแบบลีนเนื่องจากความสูญเปล่าเป็นตัวการทำให้เกิดต้นทุนหรือเวลาในการผลิตสินค้าเพิ่มขึ้นซึ่งความสูญเปล่า 8 ประการ (8 wastes) มีดังนี้

1.การผลิตมากเกินไป (Overproduction)

2.การรอคอยในการปฏิบัติการ (Waiting)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การขนส่งมากเกินไป (Transportation)
4. การมีขั้นตอนการผลิตมากเกินไป (Processing)
5. การมีสินค้าคงคลังมากเกินไป (Inventory)
6. การเคลื่อนไหวมากเกินไป (Motion)
7. การมีชิ้นงานบกพร่องและของเสีย (Defect)
8. การใช้ทรัพยากรบุคคลไม่เต็มประสิทธิภาพ

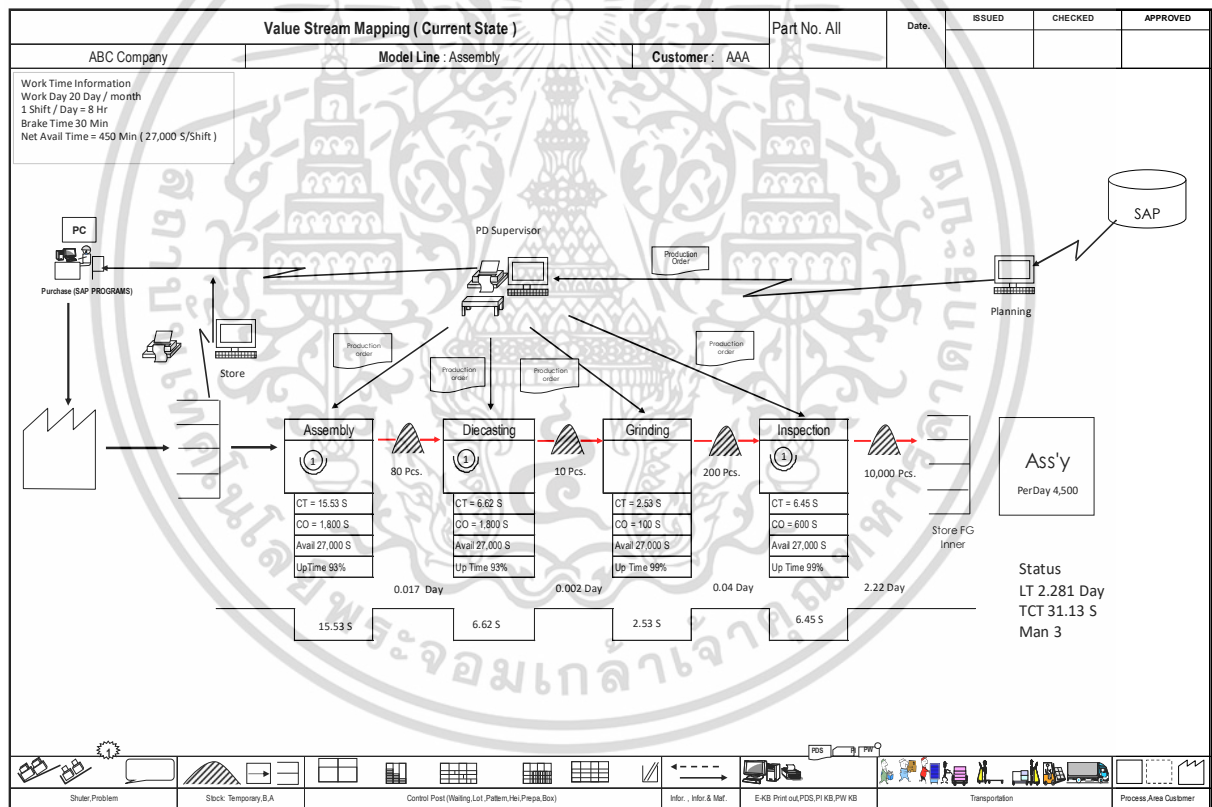
แนวคิดแบบลีนมีหลักการดังนี้

1. ทำการวางแผน line balance โดยรวมกระบวนการตัด inner เข้ากับกระบวนการปั๊มวันที่ เพื่อเป็นการควบคุมกระบวนการให้สามารถทำงานในเวลาเดียวกันเพื่อทำการลดรอบเวลาในการทำงานตามหลักการของทฤษฎีการวิเคราะห์แบบลีนและหากมีการทำ line balance แล้วโดยที่ระยะเวลาที่ใช้ในแต่ละกระบวนการต่างๆ มีความต่างกันไม่มากมีความสมดุลของสายการผลิตมากขึ้นลดการรอคอยงานลงจะทำให้การผลิตสินค้าของสายการผลิตเป็นไปตามแผนการผลิตที่วางไว้ได้
2. ทำการรวมเครื่องจักรที่มีกรรมวิธีที่ใกล้เคียงกันหรือเป็นเครื่องจักรที่เราคิดว่าหากนำมาทำงานกระบวนการต่อกันแล้วจะทำให้ง่ายต่อการประกอบงานมากขึ้น
3. ทดลองวางขั้นตอนกระบวนการประกอบงานใหม่ โดยอาจจะทำการสลับกระบวนการบางกระบวนการ ก่อน-หลัง ดูตามความเหมาะสมและทำให้เวลาที่ใช้ในกระบวนการประกอบงานมีความกระชับมากขึ้นลดการเคลื่อนไหวให้มีการเคลื่อนไหวน้อยที่สุดเพื่อความสมดุลของการประกอบงานและลดเวลาสูญเสียเปล่า
4. ระบุคุณค่าของสินค้า (specified value) และบริการในมุมมองของลูกค้าคนสุดท้ายให้ถูกต้อง
5. การระบุสายธารคุณค่า (value stream) ของผลิตภัณฑ์ในทุกขั้นตอนของการดำเนินการผลิต เช่น การรับคำสั่งซื้อการวางแผนการผลิตสินค้าเป็นต้นเพื่อดูกระบวนการใดที่ไม่เพิ่มมูลค่าและเป็นความสูญเสียเปล่า
6. การสร้างการไหลของกระบวนการอย่างต่อเนื่อง (flow) ไม่ให้กระบวนการหยุดรอกระบวนการก่อนหน้า
7. การใช้ระบบดึง (pull) โดยใช้หลักของการความต้องการของลูกค้าเป็นหลักคือทำเฉพาะสิ่งที่ลูกค้าต้องการตามที่ต้องการและภายในเวลาที่ต้องการ
8. ความสมบูรณ์แบบ (perfection) คือการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องเพื่อขจัดความสูญเสียที่ยังซ่อนเร้นอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 สํารวจสภาพปัจจุบันของสายการผลิต

ในขั้นตอนนี้จะทํการศึกษาแหล่งที่มาของความสูญเปล่าทั้ง 7 ประการที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตโดยการใช้ผังการไหลของกระบวนการทั้งหมดเพื่อให้ทราบว่ากระบวนการทั้งหมดที่เราสนใจนั้นมีปัญหาที่ใดจุดคอขวดอยู่ที่ใดประสิทธิภาพของเครื่องจักรเป็นอย่างไรจากนั้นศึกษาอย่างละเอียดในแต่ละขั้นตอนโดยใช้แผนผังการไหลของแต่ละกระบวนการและศึกษาข้อมูลของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตเพื่อลดความสูญเปล่าจากการข้อบกพร่องในกระบวนการผลิตจากการข้อมูลที่ได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตสายเคเบิลควบคุมยานยนต์เพื่อทําการวิเคราะห์ขั้นตอนการทำงานทั้งหมดของกระบวนการผลิตโดยพิจารณาในแต่ละขั้นตอนการผลิตทำให้พบว่าเวลาน่าที่ ใช้ในการผลิต 2.281 วัน เนื่องจากมีการเก็บสินค้าคงคลังในแต่ละกระบวนการเป็นจํานวนมาก และรอบเวลาในการผลิต (cycle time ) ในแต่ละกระบวนการไม่สมดุลกัน โดยที่ในบางกระบวนการแตกต่างกันถึง 58% ในกระบวนการที่มากที่สุดและน้อยที่สุด



รูปที่ 3.3 ผังการไหลของกระบวนการในปัจจุบัน

หลังจากที่ได้ทำการศึกษาผังการไหลของกระบวนการสายการผลิตแล้วในรูปที่ 3.4 จากนั้นทำการจับเวลาของสายการผลิตและจัดทำตารางเวลามาตรฐานในการผลิตในขั้นตอนการประกอบงาน (Assembly) โดยพยายามจับเวลาและขั้นตอนการทำงานในแต่ละขั้นตอนให้ละเอียดมากที่สุด เพื่อที่จะนำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางเวลามาตรฐานในการผลิตนั้นมาศึกษาและดูถึงความสูญเสียเปล่าจากข้อบกพร่องในกระบวนการผลิตจากการข้อมูลที่ได้ทำการศึกษาระบวนการผลิตสายเคเบิลควบคุมยานยนต์เพื่อใช้ในการทำสมดุลสายการผลิตต่อไปซึ่งตารางเวลามาตรฐานในการผลิตของกระบวนการผลิตมีดังนี้

รอบเวลาทำงาน		
กระบวนการที่ 1		
ลำดับ	กระบวนการ	วินาที
1	ทาบารปีกับ Inner	1.85
2	ใส่ Inner กับ Mold Outer	3.63
3	ตัด Inner พร้อมตีหัว Inner	5.48
4	ปั๊มหมายเลข และวันที่	4.57
	รวมเวลา	15.53
กระบวนการที่ 2		
ลำดับ	กระบวนการ	วินาที
1	ฉีดโลหะหุ้มหัวสาย	6.62
2	ทำความสะอาดครีป	2.53
	รวมเวลา	9.15
กระบวนการที่ 3		
ลำดับ	กระบวนการ	วินาที
1	ตรวจสอบระยะ A+B	1.64
2	ตรวจผิวด้านนอก	3.25
3	ทำการบรรจุ	1.56
	รวมเวลา	6.45

ตารางที่ 3.1 แสดงเวลามาตรฐานของกระบวนการก่อนการปรับปรุง

จากนั้นจึงทำการสรุปถึงความสูญเสียเปล่าจากข้อบกพร่องในกระบวนการผลิตว่ามาจากสิ่งใดและในส่วนใดบ้างและมีปัจจัยอื่นได้อีกหรือไม่ที่มีผลกับการทำงานเช่น ความสูญเสียเปล่าของเวลารองาน เวลาใน

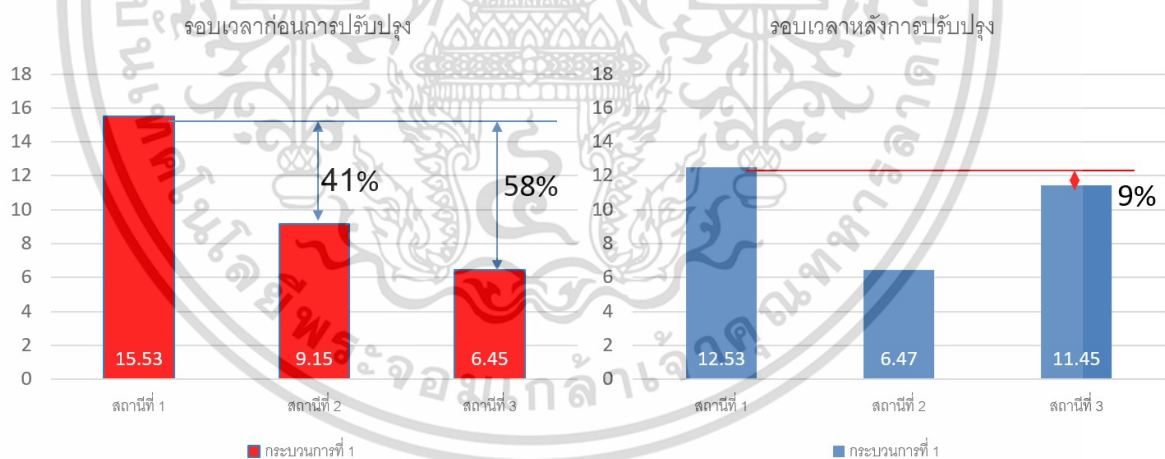
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพิ่มขึ้นงานหรือการปรับตั้งเครื่องมือว่าต้องใช้เวลาอย่างน้อยเพียงใดเป็นต้น เพื่อที่เราจะได้ทำการเข้าไปแก้ไข ปรับปรุงในส่วนนั้นได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพสูงสุด

หลังจากที่เราทำการสำรวจสภาพปัจจุบันของสายการผลิตไปแล้วนั้นจนได้ผลสรุปว่ามีความสูญเสียเปล่าจากข้อบกพร่องในส่วนใดบ้างแล้วนั้นจากนั้นเราจะทำการวิเคราะห์กระบวนการและทำการปรับปรุงกระบวนการซึ่งการปรับปรุงจะมีการทดแทนบางกระบวนการด้วยแขนหุ่นยนต์

### 3.1.3 การวิเคราะห์กระบวนการ และการปรับปรุงกระบวนการ

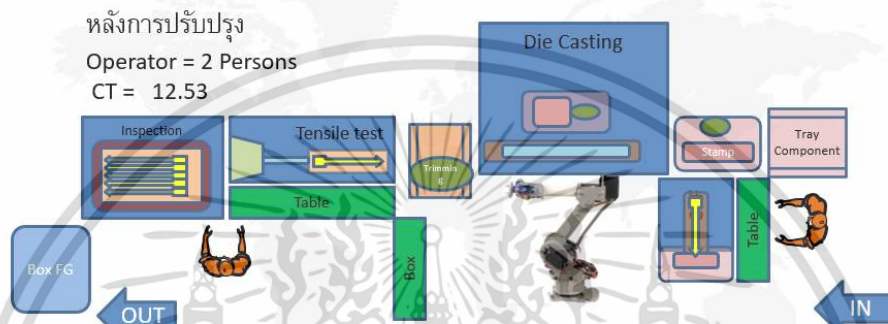
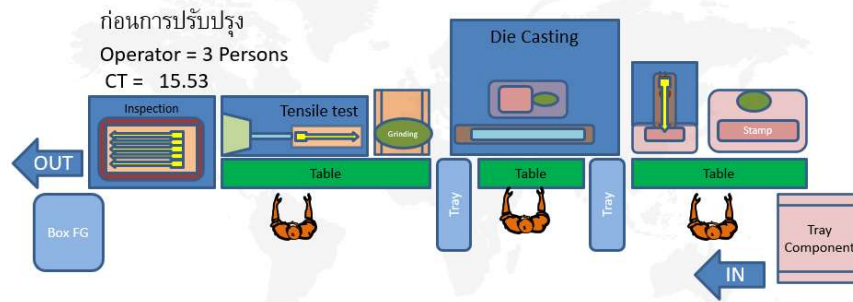
จากการศึกษาและการสำรวจสภาพปัจจุบันของสายการผลิตทำให้พบว่าการลดความสูญเสียเปล่าจากสินค้าคงคลังและกระบวนการที่เป็นคอขวดจากการที่ได้ทำการสำรวจกระบวนการพบว่ากระบวนการมีสินค้าคงคลังระหว่างกระบวนการในส่วนของการประกอบอยู่ที่ 2.281 วันทำงานซึ่งจะเป็นสินค้าคงคลังในส่วนของการประกอบ(WIP) ที่เป็นสินค้าสำเร็จรูป 2.2 วันทำงานและกระบวนการประกอบ 0.081 วันทำงานแต่ปัญหาสำคัญของกระบวนการประกอบเป็นการที่มีเวลาที่แตกต่างกันเป็นอย่างมากในการประกอบโดยการที่มีเวลาที่แตกต่างกันถึง 41% และ 58% ตามลำดับจึงได้ทำการปรับปรุงกระบวนการโดยการ ทำ line balance ในกระบวนการและทำการรวบรวมกระบวนการประกอบ inner และกระบวนการป้อนล้อตของการผลิตให้เป็นกระบวนการเดียวกัน และทำการปรับปรุงการไหลของงานจากครั้งละ 10 ชิ้น ไปเป็นการไหลแบบการไหลทีละชิ้นเพื่อทำการลดสินค้าคงคลังในกระบวนการ



รูปที่ 3.4 แสดงรอบเวลาก่อน และ หลังการปรับปรุงกระบวนการ

จากการปรับปรุงกระบวนการสามารถลดสินค้าคงคลังระหว่างกระบวนการได้ลงทั้งหมดและการไหลของงานเป็นแบบการไหลทีละชิ้นจากการไหลทีละ 10 ชิ้น โดยที่สามารถทำให้กระบวนการมีความต่างของเวลาเหลือเพียง 9% ทำให้สามารถลดการรอคอยได้มากขึ้นสามารถเขียนผังกระบวนการไหลหลังการปรับปรุงได้ตามรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



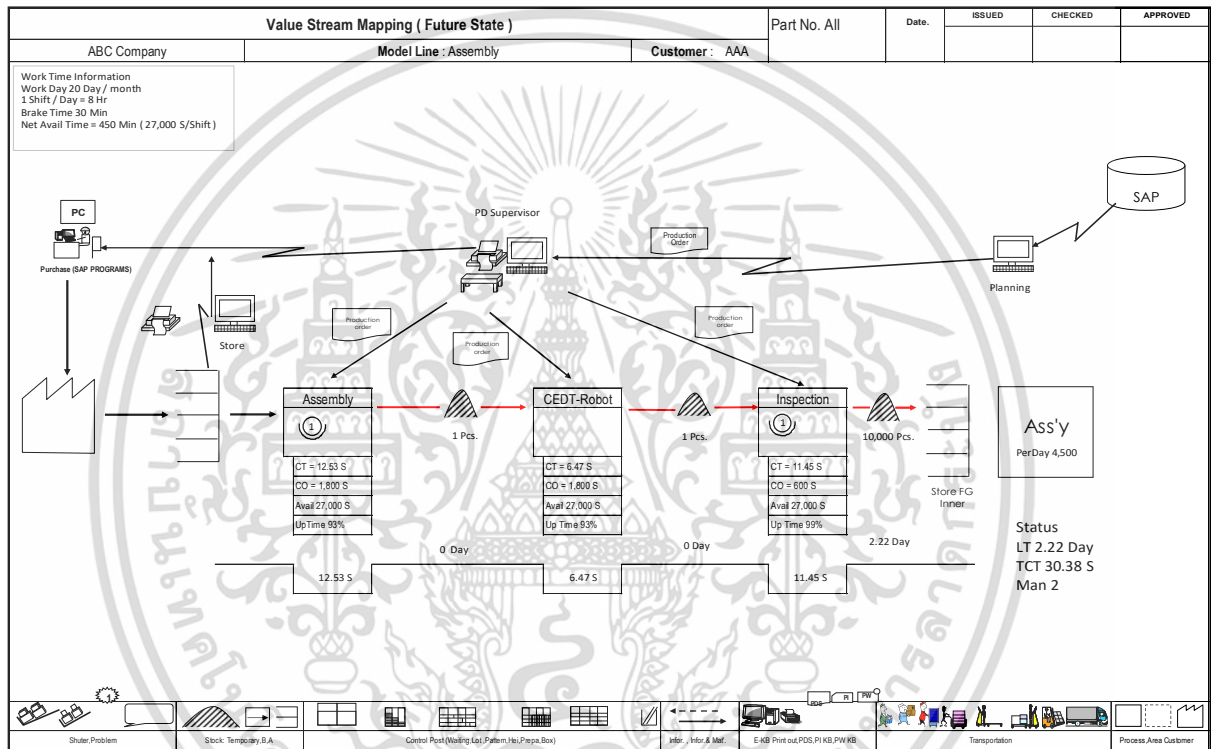
รูปที่ 3.5 แสดงสายการผลิตก่อนและหลังการปรับปรุง

รอบเวลาทำงาน		
กระบวนการที่ 1		
ลำดับ	กระบวนการ	วินาที
1	ทاجرปีกกับ Inner	1.85
2	ใส่ Inner กับ Mold Outer	3.63
3	ตัด Inner พร้อมตีหัว Inner ปุ่มหมายเลข และวันที่	7.05
รวมเวลา		12.53
กระบวนการที่ 2		
ลำดับ	กระบวนการ	วินาที
1	ฉีดโลหะหุ้มหัวสายและทำความสะอาดครีบ	6.47
รวมเวลา		6.47
กระบวนการที่ 3		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับ	กระบวนการ	วินาที
1	ตรวจสอบระยะ A+B	2.64
2	ตรวจผิวด้านนอก	5.25
3	ทำการบรรจุ	3.56
	รวมเวลา	11.45

ตารางที่ 3.2 แสดงเวลามาตรฐานในแต่ละกระบวนการหลังการปรับปรุง



รูปที่ 3.6 ผังการไหลของกระบวนการหลังทำการปรับปรุง

### 3.1.4 การลดของเสียจากการผลิต

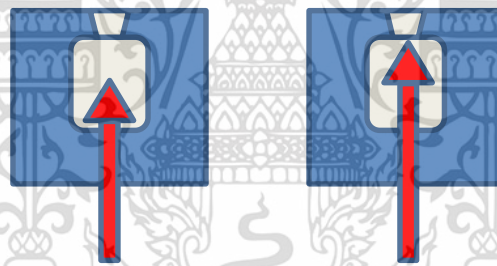
จากการตรวจสอบประวัติการผลิตย้อนหลัง พบว่าในกระบวนการผลิตจะมีของเสียอยู่ประมาณ 100 PPM ซึ่งของเสียอันดับที่ 1 55% เป็นการเสียจากการที่ A+B ไม่ได้ระยะ และของเสียอันดับที่ 2 เป็นปัญหาของการฉีกไม่เต็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการย้อนหลัง

จากการวิเคราะห์ปัญหาของ A+B ไม่ได้ระยะ เกิดจากสาเหตุการวางปลายของ Inner ไม่ตรงตำแหน่งในแม่พิมพ์ ซึ่งการวาง Inner เป็นการวางชิ้นงานโดยพนักงานทำให้ตำแหน่งไม่แน่นอน



ผิดตำแหน่ง

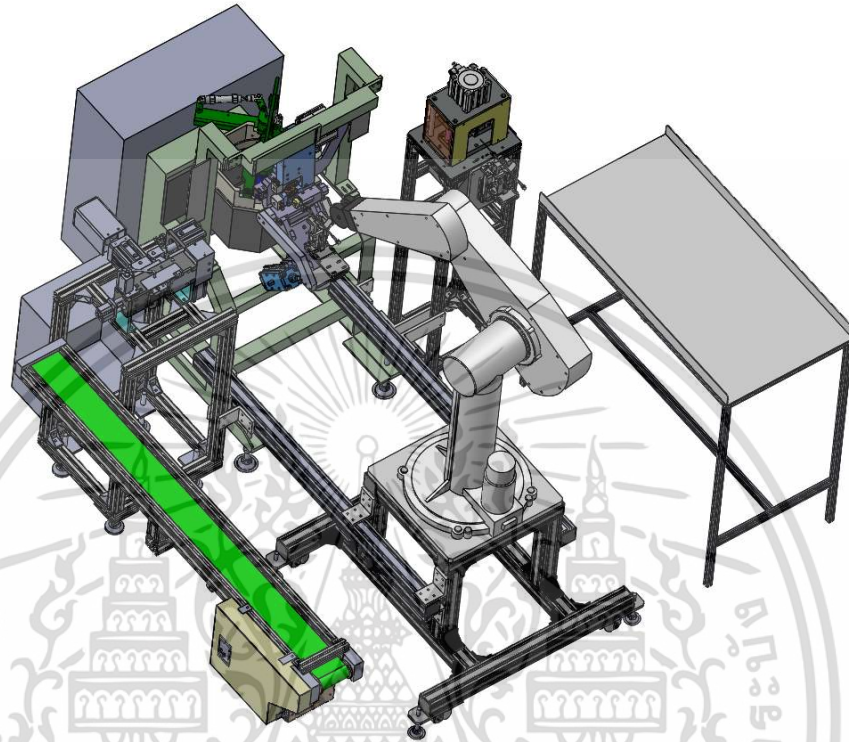
ถูกตำแหน่ง

รูปที่ 3.8 ตำแหน่งการวาง Inner ในแม่พิมพ์

การวิเคราะห์ปัญหาของการฉีดไม่เต็มพบว่าเป็นจากการที่ความเร็วในการฉีดไม่แน่นอน เนื่องจากโครงสร้างของเครื่องฉีดมีการให้ความร้อนหัวฉีดด้วยการเผาด้วยไฟเพื่อให้โลหะไม่แข็งตัวในหัวฉีดโดยจะต้องใช้เวลา 4 วินาทีในการหลอมละลาย ดังนั้นการใช้พนักงานฉีดจะไม่สามารถควบคุมรอบเวลาของการฉีดได้ทำให้ชิ้นงานบางชิ้นเมื่อ พนักงานที่มีทักษะในการทำงานสูงจะสามารถทำการวางชิ้นงานได้รวดเร็วกว่าเวลาที่โลหะหลอมละลายสามารถวางได้เร็วกว่า 4 วินาทีทำให้เกิดปัญหาที่หัวชิ้นงานไม่สมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแก้ไขปัญหามีความสามารถของทั้ง 2 ปัญหานั้นทำได้โดยการควบคุมตำแหน่งและเวลาของรอบการฉีดยาให้คงที่ ดังนั้นได้ทำการปรับปรุงการวาง inner ให้ตำแหน่งและเวลาคงที่โดยการใช้แขนหุ่นยนต์ทำการวาง ซึ่งสามารถควบคุมระยะ ตำแหน่ง และเวลาได้อย่างแน่นอนตามรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 กระบวนการหลังการปรับปรุงโดยการฉีดยาโดยแขนหุ่นยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การวิเคราะห์เพื่อทำการปรับปรุงการใช้พลังงานของแขนหุ่นยนต์

#### 4.1 การวิเคราะห์เพื่อทำการปรับปรุงการใช้พลังงานของแขนหุ่นยนต์

จากการปรับปรุงกระบวนการจะมีการใช้แขนหุ่นยนต์เพื่อเป็นการลดกระบวนการรอคอยของพนักงานและลดปัญหาที่เป็นปัญหาคุณภาพอันดับที่ 1 และ 2 คือ ระยะ A+B ที่ไม่ได้ระยะและหัวของชิ้นงานผิดไม่เต็มซึ่งเกิดจากความไม่แน่นอนของการวาง inner และการที่ไม่สามารถควบคุมเวลาของพนักงานในระหว่างการฉีด ดังนั้นเมื่อมีการใช้หุ่นยนต์ที่จะต้องทำการพิจารณาเพิ่มเติมจะเป็นด้านของพลังงานเนื่องการใช้หุ่นยนต์เพื่อทำการลดค่าใช้จ่ายในการผลิตในแง่ของค่าแรงงานจะถูกทำการแทนที่ด้วยค่าไฟฟ้าของหุ่นยนต์เพราะการที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่จะต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในการที่จะเคลื่อนไหว

เพื่อเป็นการใช้พลังงานในระบบการผลิตอย่างเหมาะสมจะใช้วิธีการปรับความเร็วและเวลาที่เคลื่อนที่ ในโปรแกรม MATLAB โดยการจำลองใช้หุ่นยนต์ PUMA 560 สมการหุ่นยนต์เพื่อทำการหาค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นเพื่อส่งผลไปยังการหาการใช้พลังงานที่เกิดขึ้นตามที่ระบุไว้ก่อนหน้านี้โดยการใช้สมการ

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + \tau f = \tau \quad (4.1)$$

พลังงานทั้งหมดที่ใช้ไปตามเส้นทางนั้นได้รับจากส่วนหนึ่งของกำลังตามการเพิ่มหรือลดเวลาตามเส้นทาง พลังที่หุ่นยนต์ใช้ในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งจะได้สมการ

$$P = |\tau \dot{q}| \quad (4.2)$$

ดังนั้นการใช้พลังงานทั้งหมดจะได้สมการ

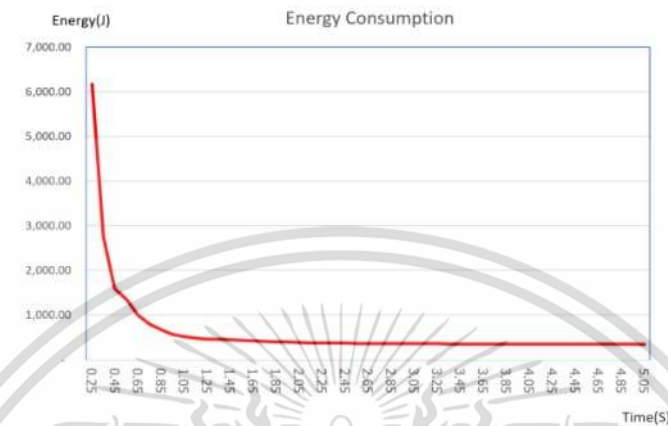
$$E = \int_0^T |\tau \dot{q}| dt \quad (4.3)$$

ดังนั้นสมการดังกล่าวสามารถใช้เป็นสมการหลักในการที่จะคำนวณการใช้พลังงานที่เหมาะสมโดยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมต่างๆโดยความสัมพันธ์หลังของการหาพลังงานจะมาจากเวลา และความเร็วที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่ทำงานดังนั้นในการพิสูจน์ความสัมพันธ์ระหว่างการใช้พลังงานและเวลา หุ่นยนต์เคลื่อนที่จากจุด A ไปยังจุด B โดยที่ระยะห่างระหว่างจุด A และ B ถูกตั้งค่าเป็น 100 มม. บนแกน X เวลาเริ่มต้นของเส้นทางนี้คือ 0.15 วินาที และพลังงานที่หุ่นยนต์ใช้จะถูกวัดในช่วงเวลา 0.1 วินาที ถึง 5 วินาที โดยการใช้ โปรแกรม Matlab ทำการจำลองการเคลื่อนที่และการใช้พลังงานดังแสดงใน รูปที่ 4.5

ผลของการจำลองที่มีระยะทางเดียวกันระหว่าง A และ B โดยที่เวลารวมแตกต่างกัน การใช้พลังงานจะมีทิศทางที่ลดลงเป็นอย่างมากในช่วง 0.15 – 0.45 วินาทีแรก และยังมีทิศทางที่ลดลงจนถึงเวลาที่ 1.05 วินาที แต่ลดลงน้อยกว่าในช่วงแรกหลังจากนั้นจะมีการลดลงแต่เป็นการลดลงอย่างน้อยๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

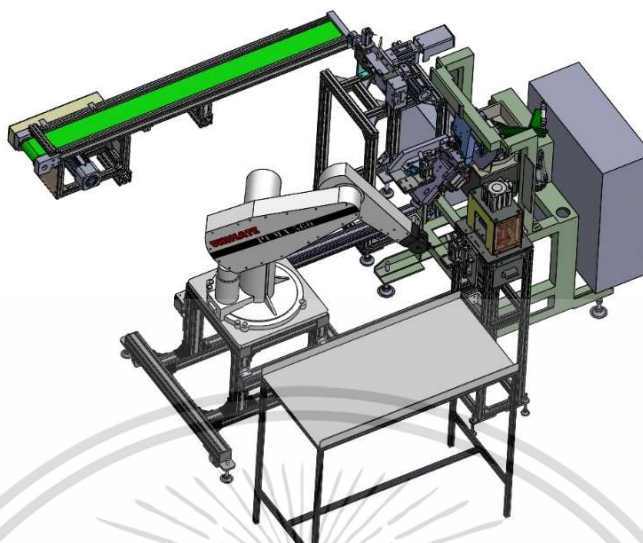
ดังนั้นเมื่อมีการเคลื่อนที่ช้าลงโดยที่การใช้พลังงานที่ลดลงของการเคลื่อนที่ส่งผลให้แต่ละกระบวนการไม่จำเป็นต้องมีการเคลื่อนที่โดยเวลาที่ต่ำที่สุดเพราะแขนหุ่นยนต์จะมีเวลารอก่อนที่จะทำการผลิตรอบถัดไป



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นความสัมพันธ์ดังกล่าวการที่จะลดการใช้พลังงานของแขนหุ่นยนต์ จะทำการกำหนดเวลาที่เหมาะสมเพื่อใช้ความคุม ความเร็ว และการเร่งความเร็วของหุ่นยนต์เมื่อมีการเคลื่อนที่จากการที่ทำการปรับปรุงสายการผลิตจากวิธีการของสตัน โดยการออกแบบสายการผลิตที่มีการนำหุ่นยนต์เข้ามาใช้เพื่อทำการแก้ปัญหาที่มีการออกแบบสายการผลิตไว้ตามรูปที่ 4.2 และจะได้รอบเวลาในแต่ละกระบวนการดังนี้

- กระบวนการที่ 1 รอบเวลาในการทำงาน 12.53 วินาที ทำงานโดยพนักงาน
- กระบวนการที่ 2 รอบเวลาในการทำงาน 6.47 วินาที ทำงานโดยหุ่นยนต์
- กระบวนการที่ 3 รอบเวลาในการทำงาน 11.45 วินาที ทำงานโดยพนักงาน



รูปที่ 4.2 สายการผลิตที่ออกแบบ

ข้อมูลของรอบเวลาที่ใช้ในการผลิตจะแสดงให้เห็นว่าเวลาที่น้อยที่สุดของการผลิตในกระบวนการที่ 2 เป็น 6.47 วินาที และเวลาสูงที่สุดในการผลิตในกระบวนการที่ 1 เป็น 12.53 วินาที โดยที่การผลิตในกระบวนการที่ 1 และ 3 จะเป็นการใช้พนักงานในการผลิตซึ่งจะเห็นได้ว่าเวลาในการใช้หุ่นยนต์นั้นมีเวลาที่สั้นกว่ามาก ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องให้หุ่นยนต์ทำงานที่รอบเวลาปกติ เนื่องจากหลังจากหุ่นยนต์ทำงานเสร็จจะต้องมีการรอกระบวนการก่อนหน้า และกระบวนการถัดไปทำให้สามารถมีเวลาที่จะทำการลดเรื่องของความเร็ว และเวลาเพื่อที่จะสามารถพิจารณาการใช้พลังงานที่เหมาะสมได้

ดังนั้นจึงมีการกำหนดการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ตามตำแหน่งต่างๆ เพื่อทำการผลิตงานตามตารางที่ 4.1

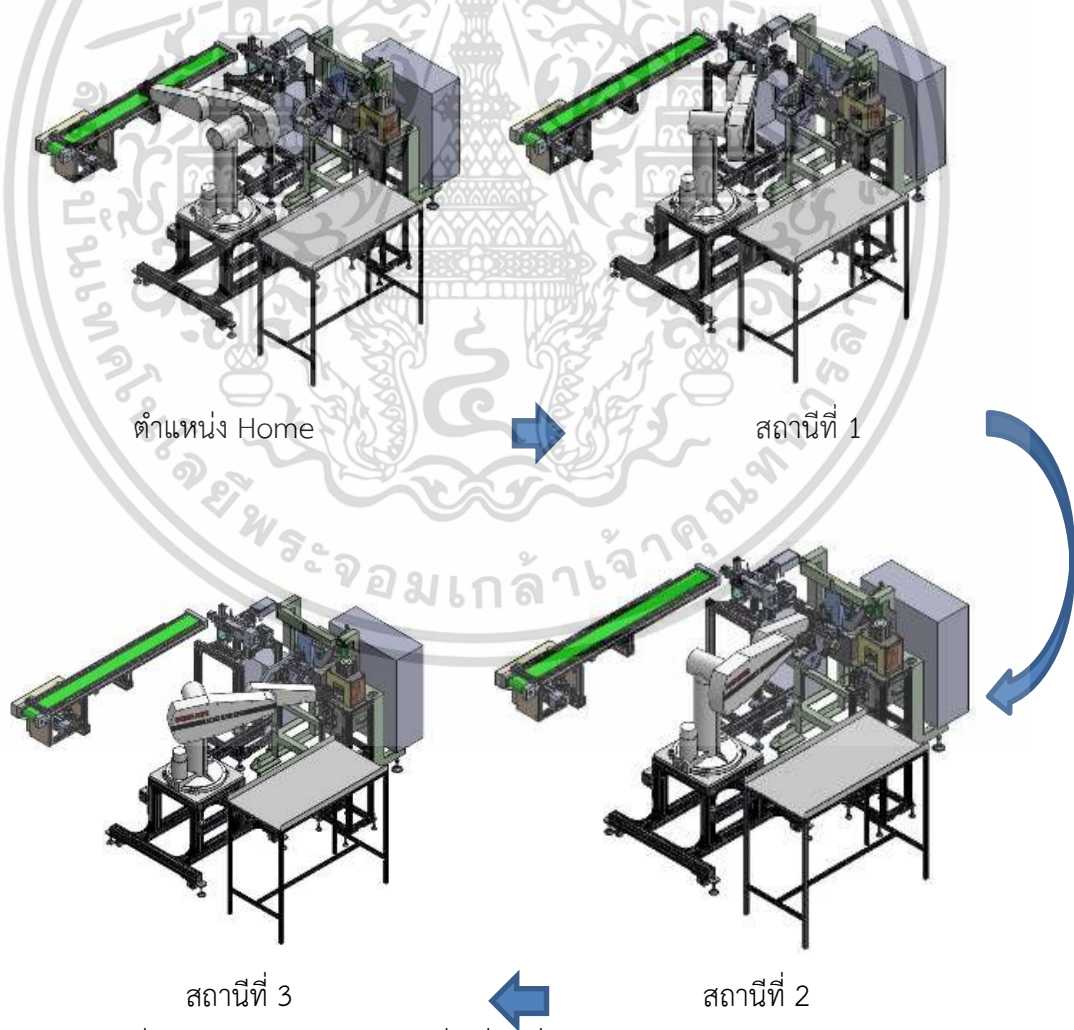
ตำแหน่ง	แกน X	แกน Y	แกน Z
1	0.613	0.587	0
2	0.513	0.587	0
3	0.609	0	-0.092
4	0.709	0	-0.092
5	0.609	0	-0.092
6	0.424	-0.569	-0.075
7	0.524	-0.569	-0.075
8	0.424	-0.569	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่ง	แกน X	แกน Y	แกน Z
9	0.0424	0.569	0
10	0.424	-0.569	0
11	0.513	0.587	0

ตารางที่ 4.1 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในการผลิต

รูปที่ 4.3 การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะถูกเริ่มต้นในตำแหน่ง home หลังจากนั้นแขนหุ่นยนต์จะรับชิ้นงานและจากสถานีที่ 1 ที่ผ่านการตัดและบานหัวฉีดของ inner แขนหุ่นยนต์จะนำชิ้นงานเข้าเครื่องฉีดโลหะหลอมเหลวในสถานีที่ 2 เพื่อทำการฉีดชิ้นงานด้วยโลหะหลอมเหลว เมื่อทำการฉีดเสร็จสิ้น แขนหุ่นยนต์จะทำการย้ายชิ้นงานไปยังเครื่องลบครีบบนโต๊ะในสถานีที่ 3 และทำการนำชิ้นงานใส่เครื่องเมื่อลบครีบบนโต๊ะเสร็จสิ้น จึงนำชิ้นงานไปวางบนโต๊ะเพื่อส่งไปยังสถานีถัดไป



รูปที่ 4.3 ตำแหน่งของหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ในสายการผลิตตามกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการที่มีการปรับปรุงสายการผลิตโดยวิธีการแบบลีนจะทำให้สามารถได้ตำแหน่งของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์และเวลาที่ใช้ในผลิตในแต่ละกระบวนการย่อยซึ่งเมื่อทำการวัดพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่จากข้อมูลดังกล่าวโดยการกำหนดพิกัดและเวลาที่กำหนดไว้เข้าไปเพื่อทำการวัดความเร็ว ความเร่งและพลังงานจะได้ผลตามตารางที่ 4.2

ตำแหน่ง	เวลา(S)	ความเร็ว (m/S)	ความเร่ง (m/S <sup>2</sup> )	พลังงาน (J)
1 (0.613, 0.587, 0)	0.30	38.78	461.60	767.70
2 (0.513, 0.587, 0)	0.30	270.79	3,231.40	743.50
3 (0.609, 0, -0.092)	1.00	10.51	33.90	1,473.20
4 (0.709, 0, -0.092)	0.30	1.25	26.30	541.60
5 (0.609, 0, -0.092)	0.30	2.21	26.30	542.40
6 (0.424, -0.569, -0.075)	1.00	1.89	6.10	916.20
7 (0.524, -0.569, -0.075)	0.30	0.93	20.80	469.40
8 (0.424, -0.569, 0)	0.30	1.84	21.90	324.50
9 (0.0424, -0.569, 0)	1.00	0.37	19.80	574.70
10 (0.424, -0.569, 0)	0.30	2.32	27.60	600.70
11 (0.513, 0.587, 0)	1.50	2.74	8.50	1,201.30
ผลรวม	6.60			8,155.20

ตารางที่ 4.2. ตำแหน่งของการเคลื่อนที่ และพลังงานที่ได้จากการเคลื่อนที่

ในการวัดพลังงานที่เป็นค่าเริ่มต้นจากการปรับปรุงจะได้ผลของพลังงานที่ออกมาจากกระบวนการที่ 8,155.20 จูลซึ่งผลที่ได้นั้นมาจากการควบคุมตำแหน่งและเวลารวมของการเคลื่อนที่เท่านั้น

เพื่อเป็นการลดการใช้พลังงานของการเคลื่อนที่โดยมีการกำหนดเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่รวมของกระบวนการ แต่จะเป็นการปรับเรื่องของเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่อย่างเหมาะสมโดยการใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (PSO) ซึ่งการใช้ PSO จะต้องทำการกำหนดสมการที่ต้องใช้ในการคำนวณและค่าควบคุมต่างๆ เพื่อใช้ในการหาค่าที่ดีที่สุดของพลังงานโดยสมการที่ใช้ในการคำนวณจากสมการพลังงานที่ได้

$$E = \int_0^T |\tau \dot{q}| dt \quad (4.4)$$

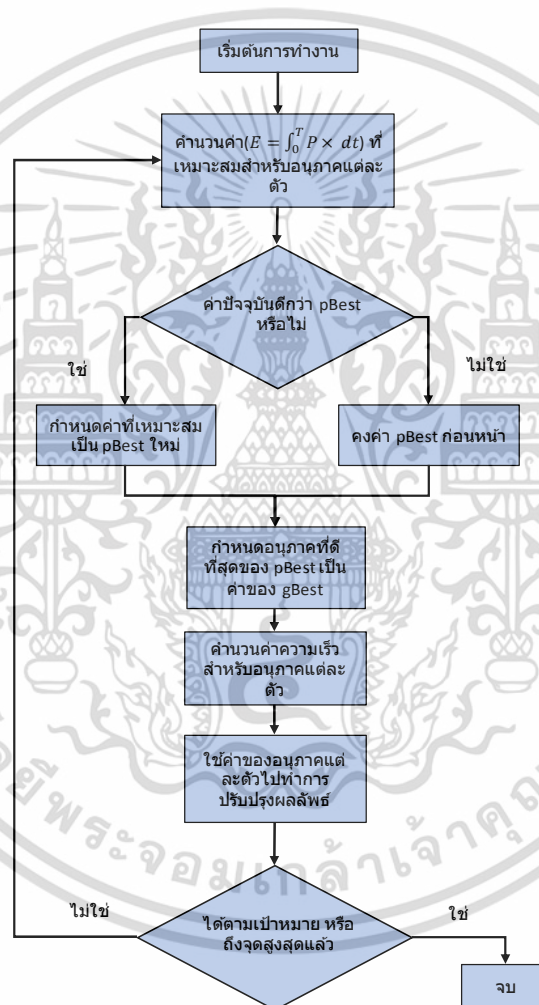
จะแทนค่า  $\tau$  โดย

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + \tau f = \tau \quad (4.5)$$

จะได้สมการ

$$E = \int_0^T |(M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + \tau f) \times \dot{q}| dt \quad (4.6)$$

โดยที่สมการ 4.6 จะเป็นการหาพลังงานของแขนหุ่นยนต์ เมื่อมีการใช้เทคนิค PSO จะสามารถนำสมการเข้าไปใช้ในขั้นตอนที่มีการคำนวณ รูปที่ 4.4 แสดงผังการทำงานของ PSO และขั้นตอนที่มีการใช้สมการเพื่อหาพลังงาน



รูปที่ 4.4 ผังการทำงานของ PSO เพื่อใช้ในการหาพลังงาน

โดยที่การกำหนดค่าของแบบจำลองของ PSO ทำการกำหนดมาจากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลอง โดยแบบจำลองซึ่งผลการทดสอบการใช้แบบจำลองเพื่อหาจำนวนอนุภาคที่เหมาะสม โดยการกำหนดจำนวนอนุภาคที่ใช้ในการค้นหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการกำหนดจำนวนอนุภาค 15, 25, 30, 50, 75, 100, 500, 1000 อนุภาคเพื่อทำการพิจารณาในหัวข้อ เวลาในการคำนวณ พลังงานที่ได้รับ และเวลาที่ใช้ในการผลิต

จำนวนอนุภาค (ตัว)	เวลาจำลอง (วินาที)	รอบเวลาผลิต (วินาที)	พลังงาน (J)	% เวลา	% รอบเวลาผลิต	% พลังงาน
15	Error	Error	Error	Error	Error	Error
25	2,499.02	10.49	8,331.00	-	-	-
30	3,547.00	11.50	8,199.00	41.94%	9.63%	-1.58%
50	4,310.00	11.49	8,180.00	72.47%	9.53%	-1.81%
75	6186.18	11.50	8,174.00	147.54%	9.63%	-1.88%
100	7771.05	11.50	8,152.00	210.96%	9.63%	-2.15%

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการเปรียบเทียบการกำหนดจำนวนอนุภาคของ PSO

จากตารางที่ 4.3 เมื่อทำการพิจารณาใช้จำนวนอนุภาคต่ำกว่า 25 ตัวการทำงานของ PSO จะไม่สามารถทำงานได้ แต่เมื่อพิจารณาการใช้จำนวนอนุภาคมากขึ้นจาก 25 จนถึง 100 ตัวจะพบว่า การเพิ่มขึ้นของจำนวนอนุภาคจะไม่ส่งผลต่อรอบเวลาที่ใช้ในการผลิตที่ PSO ให้ผลลัพธ์ออกมา และมีการเปลี่ยนแปลงของพลังงานไม่เกิน 2.15% แต่จะส่งผลอย่างมากต่อเวลาที่ใช้ในการคำนวณของแบบจำลอง โดยที่จำนวนอนุภาค 100 ตัวนั้นจะใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้นถึง 210% จึงทำการพิจารณาการใช้จำนวนอนุภาคที่ 25 ตัวเนื่องจากการเพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อพลังงานมากนัก

การทำซ้ำ (ครั้ง)	เวลาจำลอง (วินาที)	รอบเวลาผลิต (วินาที)	พลังงาน (J)	% เวลา	% รอบเวลาผลิต	% พลังงาน	การทำซ้ำ (ครั้ง)
10	309.93	10.49	8,437.11	-	-	-	10/10
30	1,354.90	11.50	8,183.56	337.16%	9.63%	-3.01%	30/30
50	1,359.04	11.50	8,177.36	338.50%	9.63%	-3.08%	50/50
70	1,893.84	10.50	8,334.00	511.05%	0.10%	-1.22%	70/70
100	2,449.02	10.49	8,331.55	690.18%	0.00%	-1.26%	71/100

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการเปรียบเทียบการกำหนดการทำซ้ำของ PSO

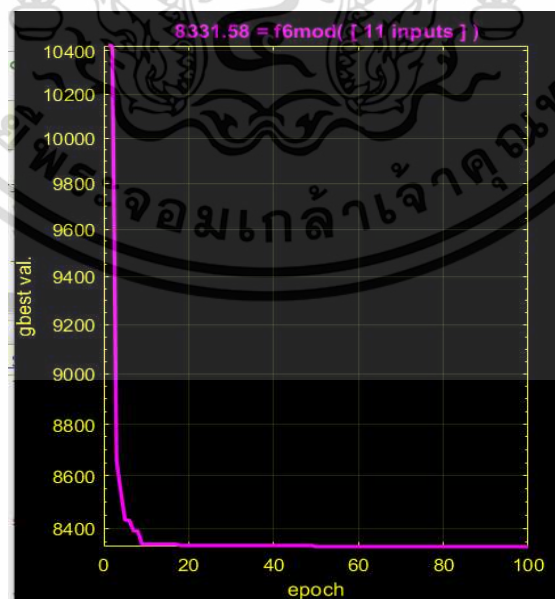
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาการทำซ้ำของ PSO ทำการทดสอบโดยการกำหนดการทำซ้ำของระบบ โดยกำหนดการทำซ้ำที่ 10 30 50 70 และ 100 ครั้งตามลำดับ เมื่อทำการคำนวณผลที่ได้จะพบว่าการทำซ้ำจะส่งผลต่อเวลาในการคำนวณโดยที่การเมื่อเพิ่มการทำซ้ำจาก 10 จนถึง 100 เวลาที่ใช้จะเพิ่มขึ้นถึง 690.18 % และเวลาของรอบการผลิต และพลังงานจะมีการเปลี่ยนแปลงที่ 3.08% แต่เมื่อพิจารณาผลของการทำซ้ำที่ระบบใช้จะเห็นได้ว่าการทำซ้ำของระบบตั้งแต่ 10 จนถึง 70 จะใช้การทำซ้ำเต็มจำนวน การทำซ้ำแสดงให้เห็นว่าการทำซ้ำอาจจะไม่เพียงพอที่จะทำให้สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดของระบบ แต่เมื่อทำการพิจารณาการทำซ้ำที่ 100 ครั้งจะพบว่ามีการใช้งานเพียง 71 ครั้ง แสดงว่าระบบสามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดจึงทำการพิจารณาการทำซ้ำที่ 100 ครั้งเพื่อให้สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดของระบบ

การกำหนดค่าที่ใช้ในการหาจุดที่ดีที่สุดนั้นในการใช้ PSO นั้นจำเป็นที่จะต้องทำการกำหนดจำนวนของอนุภาค การทำซ้ำ และความเร็วของการเคลื่อนที่ของอนุภาค โดยการกำหนดค่าที่จะใช้ในการจำลองของ PSO จะมีดังนี้

- จำนวนอนุภาค = 25
- ความเร็ว = 2.1
- ความเฉื่อยของอนุภาคสูงสุดและต่ำสุด = 0.3 และ 0.7
- จำนวนรอบสูงสุด = 100

เมื่อทำการจำลองการใช้พลังงานโดย MATLAB การใช้พลังงานโดยที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ เมื่อมีการทำซ้ำในการหาค่า ที่ดีที่สุดในแต่ละการทำซ้ำ จะแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งทิศทางของการใช้พลังงานจะมีทิศทางที่ลดลง เป็นอย่างมากในการทำซ้ำช่วงแรก และมีการลดลงอย่างต่อเนื่องแต่เป็นการลดลงที่น้อยจนได้ค่าที่ดีที่สุดของการใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์



รูปที่ 4.5 การทำซ้ำในกระบวนการและ ผลที่ได้จาก PSO.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงการใช้พลังงานที่ต่ำที่สุดโดยการที่หาจากวิธีการของ PSO ซึ่งผลที่ได้จากการทำการคำนวณโดยวิธีการนี้จะทำได้โดยการลดความเร็วและความเร่งทำให้เวลาเพิ่มขึ้นในแต่ละการเคลื่อนที่ แต่พลังงานในภาพรวมของการเคลื่อนที่ลดลง

ตำแหน่ง	เวลา(S)	ความเร็ว (m/S)	ความเร่ง (m/S <sup>2</sup> )	พลังงาน (J)
1 (0.613, 0.587, 0)	0.45	26.30	176.09	758.10
2 (0.513, 0.587, 0)	0.87	97.07	359.04	734.80
3 (0.609, 0, -0.092)	2.11	4.86	7.23	1,200.10
4 (0.709, 0, -0.092)	0.41	0.93	12.23	531.00
5 (0.609, 0, -0.092)	0.30	2.21	26.32	542.40
6 (0.424, -0.569, -0.075)	1.98	0.92	1.45	635.40
7 (0.524, -0.569, -0.075)	0.49	0.63	7.93	461.80
8 (0.424, -0.569, 0)	0.73	0.76	3.23	308.80
9 (0.0424, -0.569, 0)	0.67	0.56	47.03	566.60
10 (0.424, -0.569, 0)	0.73	0.96	4.07	567.60
11 (0.513, 0.587, 0)	2.60	1.55	2.73	842.00
รวม	11.34			7,148.60

ตารางที่ 4.5 พลังงานที่ต่ำที่สุดจากกระบวนการ PSO.

ตารางที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบของพลังงานก่อนและหลังทำการปรับค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ เทคนิค PSO ที่จะทำให้การหาการลดลงของพลังงาน

ตำแหน่ง	ก่อน PSO		หลัง PSO		ผลต่าง เวลา %	ผลต่าง พลังงาน %
	เวลา(S)	พลังงาน(J)	เวลา(S)	พลังงาน(J)		
1 (0.613, 0.587, 0)	0.30	767.70	0.45	758.1	50%	-1.20%
2 (0.513, 0.587, 0)	0.30	743.50	0.87	734.80	190%	-1.10%
3 (0.609, 0, -0.092)	1.00	1,473.20	2.11	1,200.10	111%	-18.50%
4 (0.709, 0, -0.092)	0.30	541.60	0.41	531.00	36%	-1.80%
5 (0.609, 0, -0.092)	0.30	542.40	0.30	542.40	0%	0%
6 (0.424, -0.569, -0.075)	1.00	916.20	1.98	635.40	98%	-30.60%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่ง	ก่อน PSO		หลัง PSO		ผลต่าง เวลา %	ผลต่าง พลังงาน %
	เวลา(S)	พลังงาน(J)	เวลา(S)	พลังงาน(J)		
7 (0.524, -0.569, -0.075)	0.30	469.40	0.49	461.80	63%	-1.60%
8 (0.424, -0.569, 0)	0.30	324.50	0.73	308.80	133%	-4.80%
9 (0.0424, -0.569, 0)	1.00	574.70	0.67	566.60	-33%	-1.40%
10 (0.424, -0.569, 0)	0.30	600.70	0.73	567.60	143%	-0.90%
11 (0.513, 0.587, 0)	1.50	1,201.30	2.60	842.00	73%	-30.00%
ผลรวม	6.60	8,155.20	11.34	7,148.60	71.8%	-12.30%

#### ตารางที่ 4.6 ตารางเปรียบเทียบเวลาและพลังงานก่อนและหลังการปรับโดย PSO

จากผลที่ได้จากการเปรียบเทียบการใช้พลังงานและ เวลาที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมโดย PSO ในการเพิ่มของเวลา จะมีการเพิ่มขึ้นในการเคลื่อนไหวทั้ง 11 การเคลื่อนที่ แต่พลังงานที่จะต้องจะใช้จะมีทิศทางที่ลดลงโดยมีการลดลงมากที่สุดถึง 30% เมื่อเทียบกับผลก่อนที่จะทำการปรับปรุง โดยผลรวมที่ได้ สามารถลดการใช้พลังงานจาก 8,155.20 จูลเป็น 7,148.6 จูลพลังงานลดลง 12.3% ในขณะที่เวลาเคลื่อนที่ทั้งหมดเพิ่มขึ้น 71.8% จาก 6.60 เป็น 11.34 วินาที

จากการปรับปรุงด้วยการหาค่าที่เหมาะสมด้วยเทคนิค PSO โดยทั่วไปแล้วเมื่อทำการพิจารณาค่าที่เหมาะสมจะได้จากการปรับปรุง แต่เมื่อมีความต้องการที่จะทำการเปลี่ยนแปลงในแง่ของรอบการผลิตของกระบวนการจะต้องผ่านกระบวนการทำการคำนวณใหม่ทุกครั้งซึ่งการหาผลลัพธ์จากเทคนิค PSO ในแต่ละครั้งจะใช้เวลานาน เช่นในการศึกษานี้ใช้เวลาประมาณ 1,680 วินาทีในการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ในแต่ละรอบการคำนวณแต่ในการทำงานจริงๆในสายการผลิตนั้นเกิดความไม่สะดวกอย่างมากในการที่จะต้องทำการหาค่าใหม่ทุกครั้งดังนั้น การนำข้อมูลที่เป็นลักษณะที่เป็นจุดในแต่ละช่วงเวลามาทำการคำนวณให้ข้อมูลมีความต่อเนื่องในทุกช่วงของเวลาจะทำให้ข้อมูลสามารถใช้งานได้อย่างรวดเร็วในสายการผลิตจริง

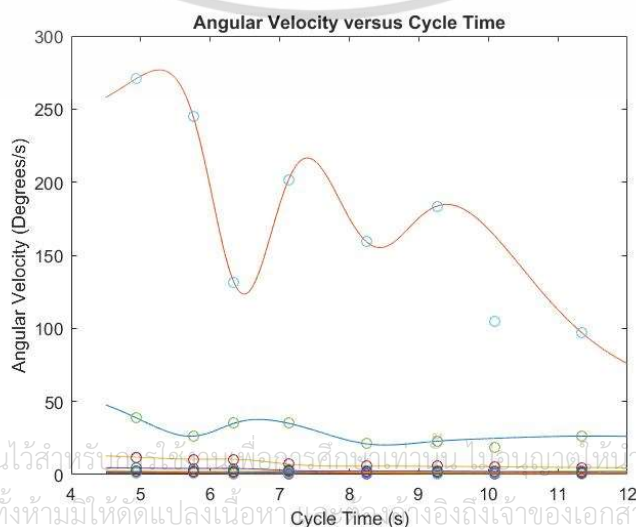
โครงข่ายประสาทเทียมจะถูกนำมาใช้เพื่อทำการคำนวณค่าที่ต้องการโดยการกำหนดค่าที่เป็นแต่ละช่วงเวลาโดยเริ่มจากค่าที่ต่ำที่สุดที่กำหนดไว้ไปจนถึงค่าที่มากที่สุดที่จะทำงานได้โดยกำหนดให้ความห่างของคาบเวลาอยู่ที่ 1 วินาทีในแต่ละช่วงและทำการใช้ PSO เพื่อทำการหาผลลัพธ์ในแต่ละช่วงโดยการกำหนดค่าที่มากที่สุดคือ 12.00 วินาที และต่ำที่สุด 5.00 วินาที โดยข้อมูลที่ได้จะพบว่าเมื่อใช้เวลามากขึ้นความเร็ว และความเร่งจะลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.7 แสดงถึงข้อมูลของพลังงานที่ดีที่สุดในแต่ละช่วงเวลาโดยเทคนิค PSO เพื่อเป็นข้อมูลที่ใช้ในการฝึกอบรมเครือข่ายประสาทเทียม

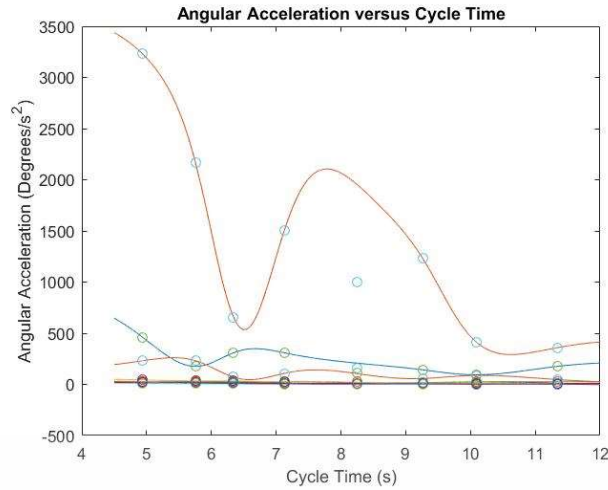
	Path	Path	Path	Path	Path	Path	Path	Path	Path	Path	Path	เวลา โดยรวม (S)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
เวลา	0.45	0.87	2.11	0.41	0.30	1.98	0.49	0.73	0.67	0.73	2.60	11.34
ความเร็ว	26.30	97.07	4.86	0.93	2.21	0.92	0.63	0.76	0.56	0.96	1.55	
ความเร่ง	176.09	359.04	7.23	12.23	26.32	1.45	7.93	3.23	47.03	4.07	2.73	
เวลา	0.67	0.83	1.88	0.30	0.30	1.85	0.83	0.35	0.47	0.43	2.17	10.09
ความเร็ว	18.81	104.94	5.44	1.25	2.21	0.98	0.36	1.67	0.79	1.73	1.87	
ความเร่ง	94.05	413.06	9.09	26.32	26.32	1.63	2.66	14.70	88.05	12.85	4.01	
เวลา	0.53	0.45	1.82	0.43	0.34	1.98	0.51	0.46	0.57	0.47	1.70	9.26
ความเร็ว	22.80	183.64	5.62	0.93	2.00	0.92	0.55	1.25	0.63	1.57	2.37	
ความเร่ง	142.50	1232.7	9.70	12.20	17.60	1.40	6.40	8.40	57.70	10.50	6.40	
เวลา	0.61	0.52	1.78	0.32	0.30	1.30	0.43	0.43	0.37	0.47	1.72	8.25
ความเร็ว	21.04	159.23	5.79	1.25	2.21	1.40	0.69	1.37	1.05	1.57	2.37	
ความเร่ง	115.41	997.56	10.26	26.32	26.32	3.36	9.66	10.20	154.60	10.54	6.41	
เวลา	0.36	0.44	1.45	0.30	0.30	1.35	0.46	0.30	0.42	0.30	1.44	7.13
ความเร็ว	35.06	201.39	7.18	1.25	2.21	1.35	0.63	1.84	0.86	2.32	2.84	
ความเร่ง	309.20	1502.00	15.80	26.30	26.30	3.10	7.90	21.90	107.30	27.60	9.20	
เวลา	0.39	0.65	0.96	0.30	0.30	1.00	0.42	0.46	0.52	0.35	0.97	6.34
ความเร็ว	35.06	131.36	10.51	1.25	2.21	1.89	0.69	1.25	0.68	2.10	4.16	
ความเร่ง	309.19	658.36	33.90	26.32	26.32	6.09	9.66	8.37	71.25	18.51	19.81	
เวลา	0.45	0.39	1.00	0.30	0.32	0.99	0.30	0.34	0.31	0.37	0.98	5.76
ความเร็ว	26.30	244.85	10.51	1.25	2.21	1.89	0.93	1.67	1.16	2.10	4.16	
ความเร่ง	176.10	2164.30	33.90	26.30	26.30	6.10	20.80	14.70	230.80	18.50	19.80	
เวลา	0.30	0.30	0.84	0.30	0.30	0.74	0.30	0.30	0.30	0.33	0.93	4.94
ความเร็ว	38.78	270.79	11.89	1.25	2.21	2.46	0.93	1.84	1.16	2.32	4.45	
ความเร่ง	461.60	3231.40	43.90	26.30	26.30	10.50	20.80	21.90	230.80	27.60	22.40	

ตารางที่ 4.7 ข้อมูลสำหรับฝึกสอนเครือข่ายประสาทเทียม

หลังจากใช้เครือข่ายประสาทเทียมข้อมูลที่ได้รับจาก PSO เครือข่ายประสาทเทียมจะทำการสร้างข้อมูลอย่างต่อเนื่องของความเร็วเชิงมุมและการเร่งความเร็วตามที่แสดงในรูปที่ 4.6 จะสามารถทำให้นำค่าที่ได้มาทำการควบคุมแขนหุ่นยนต์ในการที่จะรักษาพลังงานในกรณีที่รอบเวลาในการผลิตที่ใช้ต่างกัน

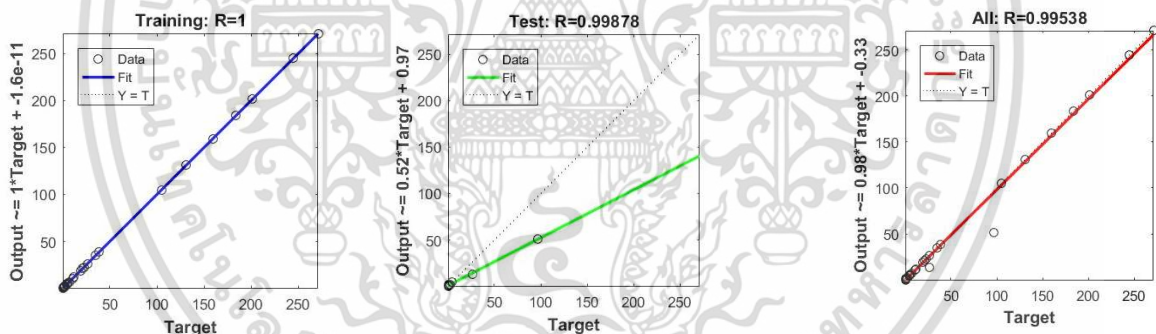


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาข้างต้นไปยังผู้อื่นโดยไม่แจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ข้อมูลที่มีความต่อเนื่องจากโครงข่ายประสาทเทียม

เพื่อเป็นการทดสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูลจึงมีการทดสอบเพื่อความน่าเชื่อถือของข้อมูล รูปที่ 4.7 แสดงเส้นแนวโน้มของค่า R ที่แสดงถึงความน่าเชื่อถือของผลที่ได้จากการฝึกสอนระบบประสาทเทียม ค่า R ระหว่างผลลัพธ์จริงและผลการฝึกอบรมคือ 1.0 และระหว่างผลการฝึกอบรมและข้อมูลจริงคือ 0.9988 และผลโดยรวมของระบบมีค่า 0.99538 ซึ่งแสดงว่าระบบสามารถคำนวณความเร็ว อัตราเร่ง และพลังงานของการเคลื่อนไหวที่เหมาะสมที่สุดของแขนหุ่นยนต์.



รูปที่ 4.7 การทดสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากการทำระบบประสาทเทียม

เมื่อเปรียบเทียบเวลาในการที่จะคำนวณค่า เพื่อที่จะใช้ในการปรับแต่งระบบของหุ่นยนต์ โดยการปรับตามรอบของเวลาในการผลิต ความเร็วของระบบสามารถ คำนวณความเร็วและเร่งความเร็วอย่างถูกต้องในทันที ในขณะที่เวลาที่ใช้โดยเทคนิค PSO เพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุดคือ 1,690.80 วินาที ซึ่งหมายความว่าเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบของค่าที่ดีที่สุดจะลดลงอย่างมากจนเข้าใกล้ 0

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

การศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นการนำเทคนิคในการปรับปรุงงานหลายๆ ด้านมาพัฒนาเพื่อให้ตอบสนองต่อความต้องการในการยกระดับการผลิตของอุตสาหกรรมโดยการพิจารณาจากการปรับปรุงสายการผลิตแบบลีนก่อนเนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรมจริงและการปรับปรุงดังกล่าวจะนำไปสู่การนำแขนหุ่นยนต์เข้ามาทำการทดแทนพนักงานในการทำงาน

เมื่อมีการใช้แขนหุ่นยนต์ในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลายต้นทุนของการผลิตนั้นจึงมีความเปลี่ยนแปลงจากค่าแรงที่ต้องจ่ายในการจ้างพนักงานเข้ามาทำงาน เป็น การจ่ายค่าไฟฟ้าเพื่อที่จะให้หุ่นยนต์สามารถทำงานได้ ซึ่งมีความสำคัญอย่างมากต่อต้นทุนในการผลิต วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงทำการพิจารณาเพื่อทำการศึกษาการที่จะลดการใช้พลัง โดยการที่จะให้แขนหุ่นยนต์ใช้พลังงานอย่างเหมาะสม ในขณะที่สามารถตอบสนองต่อการปรับเปลี่ยนรอบเวลาในการผลิตอย่างรวดเร็วเพื่อตอบสนองการผลิต ในการศึกษาทำโดยการควบคุมแขนหุ่นยนต์โดยการปรับความเร็วเพื่อลดการใช้พลังงานเนื่องจากพลังงานที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนไหวจะมีความสัมพันธ์กับความเร็ว และความเร่งของแขนหุ่นยนต์ ยังรวมถึงการสร้างแบบจำลองโดยการจำลองแขนหุ่นยนต์ทางพลศาสตร์เพื่อการหาการใช้พลังงานใน Matlab ในการหาสมการทางพลศาสตร์

จากการที่เราสามารถทำการหาพลังงานจากแบบจำลองเมื่อมีความต้องการที่จะปรับเปลี่ยนเพื่อให้สามารถตอบสนองกับความเร็วของการใช้งานของค่าพารามิเตอร์ ของหุ่นยนต์นั้นจำเป็นที่จะต้องมีความรู้ค่าในทุกช่วงของเวลาเพื่อที่จะสามารถนำมาใช้ได้ทันที จากความต้องการดังกล่าวจึงมีการนำเทคนิคทางด้านปัญญาประดิษฐ์เข้ามาใช้เพื่อศึกษาการหาค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลกับพลังงานที่เหมาะสมที่สุดโดยยังสามารถควบคุมเวลาของการผลิตตามต้องการและยังใช้เพื่อศึกษาความต่อเนื่องของข้อมูลที่ต้องการเพื่อการนำไปใช้จริงในการผลิต

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองในวิทยานิพนธ์นี้ถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ การออกแบบและปรับปรุงสายการผลิตสายควบคุมในยานยนต์ด้วยวิธีการของลีน จากการปรับปรุงดังกล่าวนำไปสู่การใช้แขนหุ่นยนต์ในการทดแทนแรงงานที่ต้องใช้ในสายการผลิต ทำให้ต้องมีการพิจารณาเรื่องการใช้พลังงานของหุ่นยนต์อย่างเหมาะสมโดยการใช้ระบบปัญญาประดิษฐ์ในการกำหนดความเร็ว และเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ซึ่งจะได้ค่าที่เหมาะสมในแต่ละช่วงเวลาเพียงค่าเดียวเท่านั้น แต่ในการปรับปรุงดังกล่าวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงในเรื่องของความต้องการของงานทำให้รอบเวลาที่สามารถทำได้เปลี่ยนไปและต้องทำการคำนวณใหม่ทุกครั้งซึ่งจะใช้เวลาในการหาคำตอบ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงทำการพิจารณาในส่วนของการแก้ไขปัญหา ดังกล่าวด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์โดยการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการที่จะหาข้อมูลเพื่อสร้างความต่อเนื่องของข้อมูลดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนแรกที่มีการออกแบบและทำการปรับปรุงสายการผลิตโดยวิธีการแบบลีนและการปรับปรุงจะส่งผลที่ได้ออกมาจะสามารถที่จะทำการ

ลดสินค้าคงคลังจาก 2.81 วัน เป็น 2.20 วัน ซึ่งสามารถลดสินค้าคงคลังลงได้ 21.70%

ลดจำนวนพนักงาน จาก 3 คน เป็น 2 คน โดยการออกแบบให้ใช้แขนหุ่นยนต์ เพื่อทำการทดแทนพนักงานซึ่งสามารถลดแรงงานได้ 33.30%

สายการผลิตมีความแตกต่างของรอบเวลาในแต่ละกระบวนการจากก่อนการปรับปรุงอยู่ที่ 42% เพิ่มขึ้นเป็น 91%

ของเสียจากสายการผลิตปัญหา A+B ไม่ได้ระยะสามารถแก้ปัญหาได้ 100%

ดังนั้นการปรับปรุงดังกล่าวส่งผลให้ประสิทธิภาพของสายการผลิตมีประสิทธิภาพในทุกๆด้าน แต่จากการออกแบบสายการผลิตที่มีแขนหุ่นยนต์เข้ามามีส่วนร่วมด้วยนั้น เมื่อทำการใช้งานแขนหุ่นยนต์ค่าใช้จ่ายที่จะเกิดขึ้นจากการที่ปรับปรุงเพื่อทำการลดพนักงานในสายการผลิต จะแปรเปลี่ยนเป็นค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานแทนดังนั้นจึงมีการศึกษาเพื่อการใช้พลังงานอย่างเหมาะสม

ส่วนที่สองเป็นการหาพลังงานที่เหมาะสมที่สุดของหุ่นยนต์โดยการใช้ปัญญาประดิษฐ์ที่เป็นเทคนิคที่เรียกว่าการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค ( PSO ) การหาค่าที่ดีที่สุดด้วยเทคนิคดังกล่าวจะสามารถทำให้ทำการลดการใช้พลังงานได้ถึง 12.30% เมื่อเทียบกับวิธีการกำหนดเวลาในการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ด้วยวิธีการแบบลีนเนื่องจากการปรับปรุงการเคลื่อนที่แบบลีนจะเป็นการปรับปรุงโดยการคำนวณและกำหนดการเคลื่อนไหวจากการจับเวลาเท่านั้น การปรับปรุงแบบลีนจะส่งผลให้มีการกำหนดตำแหน่งของของชิ้นงานในการเคลื่อนที่ไปในแต่ละกระบวนการเพราะจะมีการกำหนดรูปแบบของสายการผลิตและมีการกำหนดความเร็วของแต่ละกระบวนการไว้โดยที่ส่วนใหญ่จะกำหนดให้เวลาน้อยที่สุด ซึ่งจะทำให้หุ่นยนต์เกิดเวลาที่จะต้องรอเนื่องจากกระบวนการที่เป็นคอขวดนั้นจะเป็นตัวกำหนดความเร็วของสายการผลิตทั้งสายการผลิตดังนั้นเมื่อทำการพิจารณาจากจุดดังกล่าวในส่วนของหุ่นยนต์ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเร็วที่สุด แต่จะเป็นการเคลื่อนที่ที่อยู่ในกรอบของเวลาที่เป็นคอขวดของกระบวนการซึ่งคือกระบวนการที่ 1 ดังนั้นในการปรับกรอบของเวลาสามารถทำลดพลังงานที่ใช้ลงได้ซึ่งตามผลการทดลองจะพบว่าพลังงานจะลดลงเมื่อเวลาในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นในระยะทางเท่ากัน ดังนั้นการกำหนดเวลาของแต่ละการเคลื่อนไหวโดยการใช้ปัญญาประดิษฐ์ทำให้สามารถกำหนดเวลาในการเคลื่อนที่ในแต่ละการเคลื่อนไหวได้อย่างเหมาะสมโดยการพิจารณาและตัดสินใจจากพลังงานรวมที่ต่ำสุดของสายการผลิต แต่การใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวข้อมูลที่ได้จะมีข้อมูลที่เหมาะสมชุดเดียวในหนึ่งช่วงเวลาเท่านั้น แต่ในกรณีของการผลิตในอุตสาหกรรมจริง ความเปลี่ยนแปลงของความต้องการของลูกค้ามีอยู่ตลอดเวลาทำให้การเปลี่ยนแปลงเพื่อรองรับในการทำงานจริงของอุตสาหกรรมยังไม่สามารถรองรับได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นจึงทำการพิจารณาเพิ่มในส่วนของการปรับปรุงเพื่อสามารถทำการหาค่าอย่างรวดเร็วเพิ่มเติม

ส่วนที่สามเป็นการปรับปรุงวิธีการหาค่าพลังงานอย่างรวดเร็วโดยการใช้เทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์แบบโครงข่ายประสาทเทียมในส่วนนี้เนื่องจากการที่ใช้เทคนิคแบบ PSO ทำให้สามารถหาค่าเพียงค่าเดียวในหนึ่งช่วงเวลาและใช้เวลาในการคำนวณแต่ละครั้งเป็นเวลาเฉลี่ย 1,690.80 วินาที ดังนั้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อที่จะทำการค้นหาค่าที่อยู่ระหว่างจุดของข้อมูลจึงเป็นเทคนิคที่สามารถทำได้อย่างรวดเร็ว หลังจากที่ทำการหาความต่อเนื่องของข้อมูลโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ทำให้สามารถนำข้อมูลไปทำการโปรแกรมหุ่นยนต์ได้ทันทีเมื่อมีความต้องการเพราะข้อมูลมีเตรียมไว้ในทุกช่วงเวลาอยู่แล้ว โดยความถูกต้องของข้อมูลอยู่ที่ 99.5 % ซึ่งสามารถบ่งชี้ได้ว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือสูง และเวลาที่ใช้ในการค้นหาข้อมูลก็สามารถลดลงได้เป็นอย่างมากคือแทบจะเป็น 0 เนื่องจากข้อมูลที่ได้มีในทุกช่วงเวลาอยู่แล้ว

## 5.2 ปัญหาและการแก้ไข

ในงานวิจัยฉบับนี้นั้น ปัญหาที่พบเป็นการหาค่าทางพลศาสตร์ของแขนหุ่นยนต์ที่นำมาทดสอบ เนื่องจากจะต้องใช้ข้อมูลดังกล่าวในการทำการจำลองด้วยโปรแกรม Matlab ซึ่งค่าที่ได้จากงานวิจัยที่ผ่านมาก่อนหน้านี้ยังมีข้อมูลที่ไม่ครบถ้วนและยังไม่มีมีการเปรียบเทียบกับค่าที่ใช้งานจริงจากแขนหุ่นยนต์ โดยที่การจำลองครั้งนี้จะไม่นำประสิทธิภาพทางไฟฟ้ามาทำการพิจารณา จะทำการพิจารณาในส่วนของประสิทธิภาพเชิงกลเท่านั้น แต่การนำไปใช้งานจริงในสายการผลิตนั้นทางโรงงานจะนำหุ่นยนต์ ABB IRB 1200 มาทำการใช้งานในการใช้งานจริงซึ่งจะต้องทำการเก็บข้อมูลของค่าเชิงกลเช่น DH Matrix ที่ใช้ในการทำแบบจำลอง แต่โปรแกรมแบบจำลองของ ABB ที่ใช้เรียกว่า Robot Studio สามารถส่งพลังงานที่แขนหุ่นยนต์ใช้จริงออกมาแสดงได้ ทำให้สามารถวัดผลการประหยัดของพลังงานได้อย่างถูกต้อง

## 5.3 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย

ในการออกแบบด้วยเทคนิคแบบลีนนั้นเป็นการออกแบบที่มีความนิยมในทางอุตสาหกรรมมาก แต่การออกแบบในปัจจุบันจะมีการนำแขนหุ่นยนต์ หรือ หุ่นยนต์แบบต่าง ๆ เข้ามาประยุกต์ใช้ในการลดความสูญเสียอย่างมากมายซึ่งการนำอุปกรณ์เหล่านี้เข้ามาใช้จะทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายแรงงาน และความสูญเสียได้อย่างมากมาย แต่จะมีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานและการซ่อมบำรุงเข้ามาทดแทนดังนั้นในแง่ของการปรับปรุงควรพิจารณาให้ครบทุกด้าน เนื่องจากแขนหุ่นยนต์มีข้อจำกัดมากมายเช่น ตำแหน่งของการหยิบชิ้นงาน การที่ไม่สามารถปรับตำแหน่งได้ด้วยตัวเอง และพลังงานที่ถูกใช้ไปในการดำเนินการ ผู้ที่จะนำอุปกรณ์อัตโนมัติไปประยุกต์ใช้จึงควรทำการศึกษาเพิ่มเติม

ในส่วนของการหาพลังงานของหุ่นยนต์นั้นการหาข้อมูลทางพลศาสตร์ทำได้ยากมากและไม่ถูกต้องมากนักดังนั้นเมื่อมีการพิจารณาถึงเรื่องดังกล่าวจึงควรจะมีการเปรียบเทียบกับหุ่นยนต์จริงเพื่อทำการปรับค่าของความถูกต้องนอกจากนี้ขอบเขตของการค้นหาคำตอบของตัวควบคุมโดยการใช้ปัญญาประดิษฐ์ จำเป็นต้องเลือกกำหนดค่าเริ่มต้นและขอบเขตให้มีความ กว้างที่เหมาะสมเพื่อช่วยให้การหาค่าเหมาะสมจากเทคนิคปัญญาประดิษฐ์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] สถาบันยานยนต์ “แผนแม่บทอุตสาหกรรมยานยนต์ ปี พ.ศ. 2555-2559” , ธันวาคม 2555
- [2] Rasli Muslimen, Sha’riMohd Yusof, Ana Sakura Zainal Abidin, Lean Manufacturing Implementation in Malaysian Automotive Components Manufacturer: A Case Study, Proceedings of the World Congress on Engineering 2011 Vol I WCE 2011, July 6 - 8, 2011, London, U.K.
- [3] Denish B.Modi, Hemant Thakkar, Lean Thinking: Reduction of Waste, Lead Time, Cost through Lean Manufacturing Tools and Technique, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Volume 4, Issue 3, March 2014
- [4] Yasuhiko Yamazaki, Shozo Takata, Hisashi Onari, Fumio Kojima, Shigeya Kato, Lean Automation System Responding to the Changing Market, 49th CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP-CMS 2016), Procedia CIRP 57 ( 2016 ) pp. 201 – 206
- [5] Dennis Kolberg, Detlef Zühlke, Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies, IFAC-PapersOnLine 48-3 (2015) pp. 1870–1875.
- [6] ABB, Ten Ways Robots Enhance Lean Manufacturing Environments.
- [7] Alberto Vergnano, Carl Thorstensson, Bengt Lennartson, PetterFalkman, Marcello Pellicciari, Chengyin Yuan, Stephan Biller, Francesco Leali, Embedding detailed robot energy optimization into high-level scheduling, 6th annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering, Marriott Eaton Centre Hotel Toronto, Ontario, Canada, August 21-24, 2010
- [8] 11 E.A. Abdelaziz, R. Saidura, and S. Mekhilef: Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (Elsevier, 2011) pp. 150–168.
- [9] E.A. Abdelaziz a, R. Saidura, S.Mekhilefb, A review on energy-saving strategies in the industrial sector, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) pp. 150–168
- [10] D.Meike, L. Ribickis, Energy-efficient use of robotics in the automobile industry, in Proc. IEEE 15th Int. Conf. AdvancedRobot.,2011, pp. 507–511.
- [11] Oded Maimon, Eli Profeta, Sigmund Singer, Energy Analysis of Robot Task Motions, Journal of intelligent and Robotic Systems 4:, 1991, pp. 175-198.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Eleftheria S. Sergaki, George S. Stavrakaki, Anastasios D. Pouliezo, Optimal Robot Speed Trajectory by Minimization of the Actuator Motor Electromechanical Losses, *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 33:, 2002, pp. 187–207.
- [13] J. S. Park, Motion Profile Planning of Repetitive Point-to-Point Control for Maximum Energy Conversion Efficiency Under Acceleration Conditions, *Mechatronics* Vol. 6, No. 6, 1996, pp. 649-663.
- [14] Jiantao Yaoab, Weidong Gua, Zongqiang Fenga, Lipo Chena, Yundou Xuab, Yongsheng Zhaoab, Dynamic analysis and driving force optimization of a 5-DOF parallel manipulator with redundant actuation, *Robotics, and Computer-Integrated Manufacturing* 48, 2017, pp. 51–58.
- [15] Oskar Wigström, Bengt Lennartson, Member, IEEE, Alberto Vergnano, and ClaesBreitholtz, High-Level Scheduling of Energy Optimal Trajectories, *IEEE Transaction on Automation Science and Engineering*, VOL. 10, NO. 1, 2013.
- [16] He Lyu<sup>1</sup>, Xiangbao Song<sup>2</sup>, Dan Dai<sup>2</sup>, Jiangang Li<sup>3</sup> and Zexiang Li<sup>1</sup>, Time-optimal and energy-efficient trajectory generation for robot manipulator with kinematic constraints, 2017 13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE) Xi'an, China, August 20-23, 2017
- [17] Stefania Pellegrinellia, Stefano Borgiaa, Nicola Pedrocchia, Enrico Villagrossia, Giacomo Bianchia, Lorenzo Molinari Tosattia, Minimization of the energy consumption in motion planning for single-robot tasks, *The 22nd CIRP Conference on Life Cycle Engineering*, Institute of Industrial Technology and Automation, National Research Council, ITIA-CNR, Via Bassini 15, Milan, Italy, 2013,
- [18] Raza Ur-Rehman, Stéphane Caro, Damien Chablat, Philippe Wenger, Path placement optimization of manipulator based on energy consumption: Application to the orthoglide 3-Axis, *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, Vol. 33, No. 3, 2009
- [19] Petr Cezner, *Robotic Trajectory Optimization*, Czech Technical University in Prague, *Systems and Control*, 2017.

- [20] Davis Meike, Marcello Pellicciari, and Giovanni Berselli, Energy Efficient Use of Multirobot Production Lines in the Automotive Industry: Detailed System Modeling and Optimization, IEEE Transaction on Automation Science and Engineering, VOL. 11, NO. 3, 2014.
- [21] Yi-Lung Hsu, Ming-Shyan Huang, Rong-Fong Fung, Energy-saving trajectory planning for a toggle mechanism driven by a PMSM, 6th IFAC Symposium on Mechatronic Systems the International Federation of Automatic Control April 10-12, 2013.
- [22] Raza UR-REHMAN, St'ephane CARO, Damien CHABLAT, Philippe WENGER, Path Placement Optimization of Manipulators Based on Energy Consumption: Application to the Orthoglide 3-axis, Mechanism and Machine Theory 45 (2010) ,pp. 1125–1141.
- [23] Yunong Zhang and Jun Wang, A Dual Neural Network for Constrained Joint Torque Optimization of Kinematically Redundant Manipulators, IEEE Transaction on Systems, Man, And Cybernetics-Part B (Cybernetics), VOL. 32, NO. 5, 2002.
- [24] H. Du, J. M. Du, L. A. Chen, Z. W. Mai, X. H. Liu, Multi-DOF Robotic Manipulator Trajectory Controlling Based on Minimum Energy Optimization, International Conference on Artificial Intelligence and Industrial Engineering (AIIE 2015), 2015.
- [25] Pisut Pongchairerks, Various Versions of Particle Swarm Optimization Algorithm Applied for JOB-SHOP Schedule Problems, Journal of Industrial Education, Vol. 1 January 2012.
- [26] Yin-Yann Chen, A Production Planning Problem Solved by the Particle Swarm Optimization, The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2010 Vol III, 2010.
- [27] Yanwu Guo, Weidong Li, A R Mileham, GW Owen, Optimization of Integrated Process Planning and Scheduling Using a Particle Swarm Optimization Approach, International Journal of Production Research, Taylor & Francis, 47 (14), 2009, pp.3775-3796.
- [28] Pisut Pongchairerks, Particle swarm optimization algorithm applied to schedule problems, Science Asia 35, 2009.

- [29] Asma Ayari, Sadok Bouamama, A New Multi-Robot Path Planning Algorithm: Dynamic Distributed Particle Swarm Optimization, The 2017 IEEE International Conference on Real-Time Computing and Robotics, 2017
- [30] Chenyi Zhou, Song Liu, Peng Liu, Neural Network Pattern Recognition Based Non-Intrusive Load Monitoring for a Residential Energy Management System, 3rd International Conference on Information Science and Control Engineering., 2016
- [31] Li Wei, Shang Yumin, Prediction of Energy Production and Energy Consumption based on BP Neural Networks, IEEE, 2008.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก  
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



th **iEECON 2018**  
The 6 International Electrical Engineering Congress  
7-9 March 2018, Krabi, THAILAND

Power & Energy  
Communications  
Electronics & Control  
Digital Signal Processing  
Computer & IT

Organized by



Technical Co-sponsored by



Sponsored by



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# An application of lean automation: a case study of Thailand's control cable manufacturing

Veerasak Chanarungruegkij and Somyot Kaitwanidvilai  
Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Bangkok, Thailand 10520  
vee7713@gmail.com, [drsomyotk@gmail.com](mailto:drsomyotk@gmail.com)

**Abstract**— This article proposes an application of lean and automated system to improve the efficiency, productivity and reduce the waste in Thailand's control cable manufacturing process for the automotive industry. By improving the 7 wastes in process and reducing the process flow by automating the process integration process to achieve continuous flow. As results indicated, the proposed system can reduce the inventory parts of the process to 0, the cycle time of the process by 61.25%, and the operation distance by 75%.

**Keywords**— lean manufacturing, lean automation, value stream mapping.

## I. INTRODUCTION

In 2016, Thailand was expected to be the world's 13<sup>th</sup> largest automobile manufacturing with an export value of the product more than 9.2 billion Baht, accounting for 12 percent of total exports of Thailand products [1]. Control cable is one of the most automotive components with a value of more than 2 billion Baht per year. Although the development of automation was applied to many manufacturings; however, there are still many manual processes in this type of manufacturing because of the nature of the product assembly. There is more than 2 meters long of the cable which can be categorized as a specialized manufacturing with very few companies succeeding. In addition, it is not easy to apply the automation to the production processes which each process has many parts to be assembled.

Lean manufacturing is a concept or philosophy that integrates the identification and elimination of waste. In addition, something that does not add value to the process and the product, based on the needs of the customer, is also considered to be eliminated. By formulating the pulling system in the process, a continuous flow of the process can be achieved. This causes the continuous improvement processes to maximize the added value to the processes and products. Elimination of waste in the production process is an important goal of lean manufacturing. In this scheme, waste causes the cost or increasing time of the production. The seven wastes aimed to be reduced in lean management system are as follows [13]: over production, waiting, transportation, over-processing, inventory, in contrary, and defects.

In general, robots does not have any dominant role in lean strategy; however, due to the repeatability of robots, fast

speed, high accuracy and flexibility, automated devices including robots, are becoming a major component of lean manufacturing and cost reduction [2]. In the production process, the increasing of capabilities and repeatability of the entire system using robots is oftenly used to support and improve the lean manufacturing process. In the other words, robots can help to increase productivity, reduce the waiting times, and improve the accuracy, flexibility. In addition, machines including robots can be programmed for maximizing performance and solve the problem of "human variant" to ensure that the system is performing consistently. Many researchers attempted to apply the lean system for various manufacturings. Lean Automation Kaizen can also help to reduce non-value added activities. Ultimately, by combining both Lean's philosophy and automation, the Lean Automation's new philosophy can be a powerful automated production line [3]. Juthamas et. al. proposed the reduction of the non-value-added activities decreasing from 6,582 to 2,468 seconds or 62.5%. The value added activities decreased from 1,086 activities to 261 activities or 66.53%. In [5], the cellular manufacturing proved that lean was a viable and cost-effective, economical method in the use of machinery. The corresponding solution used a number of basic machines adapted to the task of the appropriate device [5]. It was believed that the use of the Lean concept allows organizations to design this process easily which are important for cell design. In [6], the Lean was applied to reduce the overtime to \$1,764 per year. Yasuhiko et. al. [7] showed that the global environmental issues and the advancement of information technology have led to an accelerated evolution in industrial products and increasingly intense international competition. Under one circumstance, one of the company's most important problems is to make the production system adapt to changes in the market. They applied the "Lean Automation" which is based on the concept of "lean manufacturing" developed for human-based production systems and focused on the low power consumption of the MUDA mechanism at the device rather than the station level and devise ways to increase the overall utilization rate of the device. This method applied to the assembly system of an electronic engine control unit to demonstrate efficiency in system cost reduction [7]. Since the early 1990s, after the end of the era of integrated computer-aided manufacturing (CIM), Lean's application

successes have been gained more attention due to its high efficiency by reducing the dependency. Industry 4.0 describes the vision of future production; however, many people are at least skeptical or unfriendly towards this new approach. This article provides an overview on the existing combinations of lean manufacturing technology and automation called Lean Automation and links to the Lean proven methods. It is a smart watch to support the principle of Andon or Cyber Physical Systems (CPS) to schedule flexible production [14]. In addition, this paper proposes the study of the lean management system for the inner cable manufacturing focusing on the cutting, end forming, diecasting, and inspection processes.

## II. LEAN MANAGEMENT SYSTEMS

For non value - added activities, first of all, the preparation of a VSM of automation cell, which may give us a perspective on what is going on in the cell, what activities are worthwhile, which parts of them are not worthwhile, and help reduce losses is carried out. In addition, having visible indicators such as "Andon" allows the cell to attract attention in value-added activities. But it is simple. VSM monitoring may be more useful. Anything that could increase the capacity of the cell to reduce non-value-added activities is considered to simplify the process. One production process is another one that can make the cell more efficient. The wastes attempted to be eliminated are as follows:

1. Over Production: To produce the finish goods is over the demands from customer or made a stock to long time. From the original idea of production that each stage must be produce as many works as possible. In a order to achieve the lowestcost per unit, regardless of the number of work in process (WIP) in the process.
2. Waiting: Loss from machine or employees stop working because they have to wait raw materials ,wait for machinery failure ,Wait for unbalanced production process, waiting for change of production model.
3. Transportation: Transportation it's does not value added to the products. Therefore, it is necessary to control and reduce the transportation distance to shorter.
4. Over-Processing: The process that work repeatedly in multiple stages and process that does not improve the quality of the product. Such a inspection process. These processes are not necessary because they are non value added the process.
5. Inventory: Buy a material big lot to ensure that materials are always available to production for get a discount from the supplier. As a result, the material in the warehouse it's over demand. It is a burdensome to care and management.
6. Motion: Normal over movement can see in the factory. Moving objects without using the right tools and don't follow a standard work. Cause the movement is not the same throughout the production period. That effect to quality of the product to down.

7. Defects: When the defect it's produce from a process. Loss from defect it's come from rework and scrap.

From the lean way ,Use step follow to improve process.

1. Walk in production site to check the current state of the production line, identify and put the process of each step and identify wastes from production and draw value stream mapping.
2. Improvement the process by reduce wastes.
3. Made future state value stream mapping.
4. Summarize the results.

## III. EXPERIMENTS AND RESULTS

Based on the Lean manufacturing system, the following issues describe the details of each step including the results.

### A. Current state survey

At this stage, the study of the manufacturing process was investigated. The seven sources of waste generated in the production process by Using a flow chart of the whole process to know where all the processes we are interested in, where the bottleneck is, what is the efficiency of the machine. Then study in details at each stage. using a flow chart of each process and the data of defects in the production process to reduce wastage from defects in the production process in Inner Cable manufacturing process. As shown in our study in Fig. 1, it was found that the lead time used in the production was 6.7 days because of the large amount of inventory stored in each process. Total cycle time (TCT) is 49.22 seconds and the cycle time (CT) in each process was unbalanced. In some processes, there is 61.5% difference between maximum and minimum sub-processes. There is a waste of 1500 ppm (parts per million), which makes low efficiency. Finally, there are 4 persons for operating the process.

As seen in Fig. 1, there are 4 important steps to manufactured the inner cable those are cutting, end forming, diecasting, and inspection processes.

### B. Process analysis

Reducing waste from the inventory and bottom neck process is the main proposed of this study. Based on the study and analysis as shown in Fig. 2, the process has inventory process delays of 4.3 working days, which causes from inner cables process 1.7 working days and the die casting process 2.6 working days. By designing the new machine, cutting and forming machine for inner cable, the improvement of the flow of work from 400 pieces per flow to "One Piece Flow" to reduce the inventory delay in the process and reduce the number of the operators from 4 to 0.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

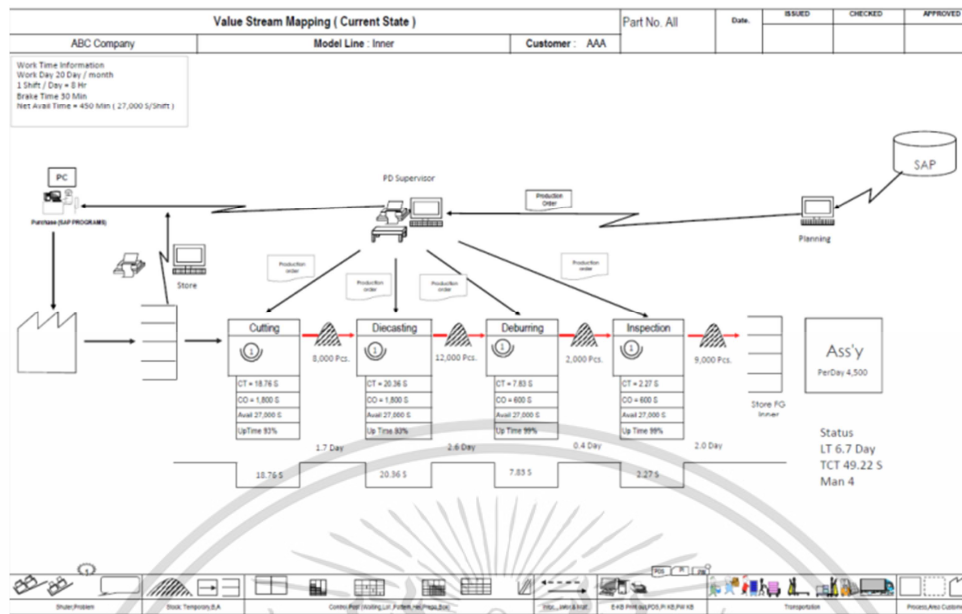


Fig. 1 Inner cable manufacturing: flow chart

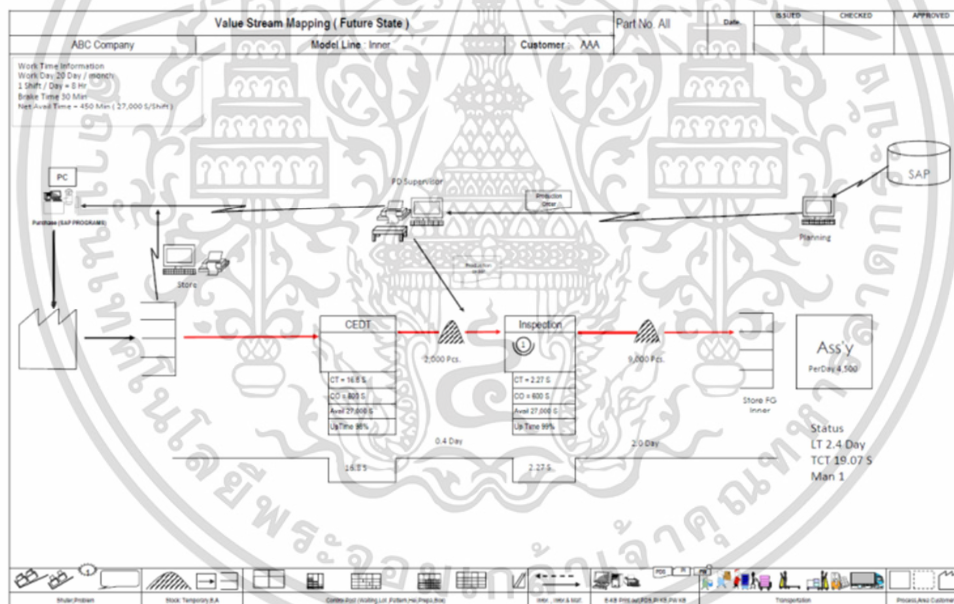


Fig. 2 The future process by adding new automatic machine.

### C. Process improvement

Based on a 1 year history of production, it is estimated that there are about 1500 ppm of waste in the production process. All wastes are caused by the faulty work pieces and the clamping process in each process. The defects caused by the Cutting process through 300 PPM, Die Casting 550 PPM, and De-Burr 650 PPM and all causes are from the mistakes of the operators. The improvement is expected to reduce the waste

from 1500 to 100 PPM by using the autonomous machine. As shown in Fig. 3, the current flow is 0-1-2-3-4-5 (brown circle) while the future improved flow will be 0-1 (violet circle). The process distance are decreased from 100 to 25 meters and the cycle time of the production is reduced from 190.08 to 16.92 seconds. The sub process and the cycle time are reduced as shown in Fig. 4. The sub-processes or steps of the production is also reduced from 10 to 6 steps. This leads to the increasing of productivity of the production.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

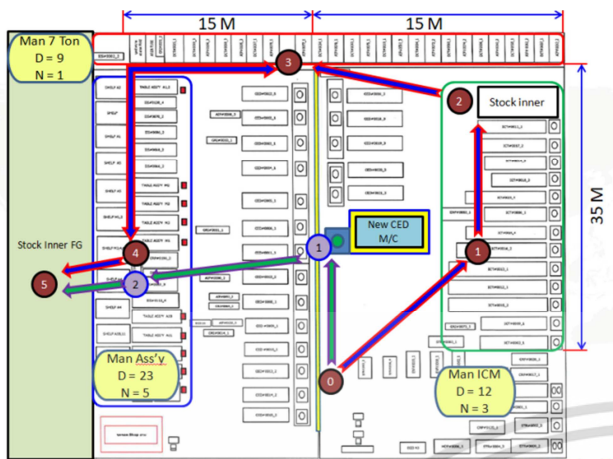
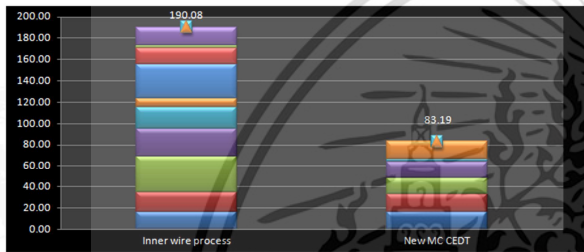


Fig. 3 process improvement



No.	Inner wire process	Sec	Delay	New MC CEDT	Sec
1	Material stock move to ICM	16.32	4 Hr	Material stock move to ICM	16.32
2	Inner cutting and end forming	18.76		Inner cutting and end forming and die cast and trimming	16.80
3	ICM Move to Stock store	34.01	4 Hr	Stock store	15.43
4	Stock store Move to Die casting	26.30		Assembly Boot and Cover	15.45
5	Die-casting 7 T	20.36		Inspection	2.27
6	Trimming	7.83		Move to Stock store FG	16.92
7	Stock store	31.86	2 Hr		
8	Assembly Boot and Cover	15.44			
9	Inspection	2.27			
10	Move to Stock store FG	16.92	1-2 day		
	Total	190.08			

Fig. 4 Cycle time and delay time expected to the improvement

#### IV. CONCLUSIONS

By adopting a lean approach and lean automation using process mergers for the inner cable production line, using the new automation machine instead of human operation, the reduction of wastes and increasing of productivity displayed in Table 1 can be expected. Based on the conclusion in Table 1, it can be seen that from the improvement can be gained from the concept of process integration. In addition, the design of new autonomous machine makes the optimal integration of processes.

#### ACKNOWLEDGMENT

This work was financially supported by NSTDA and TSC (Thai Steel Cable) under grant no. FDA-CO-2559-2738-TH.

Table 1 conclusion of the process improvement

Description	Current operation	New (Future) operation	Difference or improvement
Cycle Time	46.95 Sec	16.80 Sec	30.15Sec, 64.21%
Operator	3	0	3, 100.00%
Productivity	38.34 Pcs /ManHr	214.29 Pcs	>100 %
Process distance	100 meters	25 meters	75 meters

#### REFERENCES

- [1] K SME Analysis, Kasikorn Bank, 2017, [https://www.kasikornbank.com/th/business/sme/KSMEKnowledge/article/KSMEAnalysis/Pages/Thai-Automotive\\_4-0.aspx](https://www.kasikornbank.com/th/business/sme/KSMEKnowledge/article/KSMEAnalysis/Pages/Thai-Automotive_4-0.aspx)
- [2] ABB, "Robotics White Paper Ten Ways Robots Enhance Lean Manufacturing Environments," 2016. <https://library.e.abb.com/public/38a1844ff3123f9cc125794b00480c7c/Lean%20Robotics%20White%20Paper.pdf>
- [3] Mats Jackson, "Lean Automation: Combining Lean with Industrial Robotic in Real Examples," *Master Thesis Work*, Innovative Production, Malardalen University, Sweden. 2012.
- [4] Elisabeth Lervåg Synnesa, Torgeir Weloa, "Enhancing Integrative Capabilities through Lean Product and Process Development," *6<sup>th</sup> CLF - 6<sup>th</sup> CIRP Conference on Learning Factories*, CIRP 54, 221 – 226, 2016.
- [5] Stefan Seifermann, Jörg Böllhoff, Joachim Metternich, Amin Bellaghnach, "Evaluation of Work Measurement Concepts for a Cellular Manufacturing Reference Line to enable Low Cost Automation for Lean Machining," *Proceedings of the 47<sup>th</sup> CIRP Conference on Manufacturing Systems*, CIRP 17, 588 – 59, 2014.
- [6] Juthamas Choomlucksana, Monsiri Ongsaranakorna, Phrompong Suksabaia, "Improving the productivity of sheet metal stamping subassembly area using the application of lean manufacturing principles," *2<sup>nd</sup> International Materials, Industrial, and Manufacturing Engineering Conference, MIMEC2015*, Manufacturing 2, 102 – 107, 2015.
- [7] Yasuhiko YAMAZAKI, Shozo TAKATA, Hisashi ONARI, Fumio KOJIMA, Shigeya KATO, "Lean Automation System Responding to the Changing Market," *49<sup>th</sup> CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP-CMS 2016)*, CIRP 57, 201 – 206, 2016.
- [8] MM Thailand, "Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies", 2017, <https://www.mmthailand.com>
- [9] Don Tapping, Tom Luyster, Tom Shuker "value stream management : Eight Steps to Planning, Mapping, and Sustaining Lean Improvement" Productivity Inc, a Division of Kraus Productivity Organization, Ltd., 2002
- [10] Womack, James P., Daniel T. Jones. *Lean Thinking : Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*, New York: Simon & Schueter, 1996
- [11] Mike Rother, Rick Harris "Creating Continuous Flow : An Action Guide for Manager, Engineer and Production Associates" Cambridge, Massachusetts, 2001
- [12] Rick Harris, Chris Harris, Earl Wilson "Making Material Flow : a lean material-handling guide for operation, production-control, and engineering professionals" Cambridge, Massachusetts, 2003
- [13] Productivity Press Development Team, *Identifying Waste on the Shopfloor*, Kraus Organization, Ltd., 2003
- [14] Dennis Kolberg and Detlef Zühlke "Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies, *IFAC-2015*, 48-3, P. 1870-1875, 2015.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Sensors and Materials

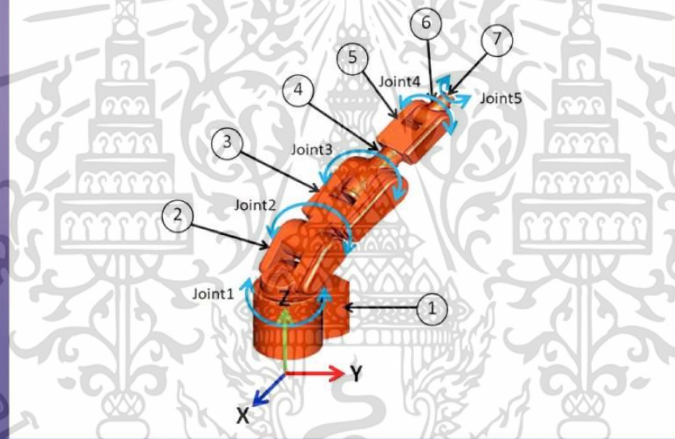
International Journal on Sensor Technology

EDITOR-IN-CHIEF  
M. Ishida

EDITORS  
J. Wilde K. Mitsubayashi S. Roy

ASSOCIATE EDITORS  
K. Maenaka J. Ohta

**Special Issue on Smart Sensing Technology and  
Materials for Smart Industry and Environmental Applications**  
Guest editor: Somyot Kaitwanidvilai  
(King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Remote Sensing to Minimize Energy Consumption of Six-axis Robot Arm Using Particle Swarm Optimization and Artificial Neural Network to Control Changes in Real Time

Somyot Kaitwanidvilai, Veerasak Chanarungruekij,\* and Poom Konghuayrob

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

(Received May 9, 2019; accepted January 14, 2020)

**Keywords:** neural network, optimal energy, PSO, remote sensor, lean manufacturing

We propose a new method for the analysis and design of a robotic system that minimizes the energy consumption of a six-axis robot arm by controlling the velocity and acceleration of each arm of the robot to achieve the specified trajectory of the robot determined from a lean manufacturing method. A dynamic model of the PUMA 560 robot has been simulated on MATLAB, while the Robotics Toolbox and particle swarm optimization (PSO) are utilized to search for optimal paths and the optimal velocity and acceleration of the robot arms. The optimal velocity and acceleration are described as those giving minimum overall energy consumption constrained by a specified cycle time of the entire robotic system. Typically, the picking and placing of materials are carried out by humans, causing a variation in production rate, whereas our system using a robot arm ensures a stable production rate. Moreover, the optimal results obtained from PSO are adopted to train an artificial neural network (ANN) to extend the design system from discrete optimal values to a continuous and near-optimal value. In other words, the ANN is used to obtain an approximate optimal value between those obtained from PSO to make the system applicable to a real-world system. As shown by the simulation results, this method reduces the energy consumption of 12.3% from the initial energy and reduces the time for optimization by 99.8% compared with that for the PSO technique.

## 1. Introduction

Lean manufacturing techniques are used to improve the production process in factories. The improvement yields the most optimal time of the production process<sup>(1,2)</sup> in terms of motion and production layout. To serve industry 4.0, the proposed method remotely controls the production parameters continuously, considering the time, cost, transportation cost, safety, and reliability. This system minimizes the amounts of all materials in the supply chain and reduces labor costs.<sup>(3–7)</sup> Remote sensing has a number of applications such as detecting the temperature of electromagnetic compatibility (EMC) on aerospace platforms,<sup>(8)</sup> wireless remote control to send data to a server for processing,<sup>(9)</sup> and using a smartphone as a mobile gateway to send data from a sensor to a server for processing.<sup>(10)</sup>

\*Corresponding author: e-mail: vee7713@gmail.com

<https://doi.org/10.18494/SAM.2020.2428>

However, current production employs industrial robot (IR) arms for many tasks where the speed can be remotely controlled from anywhere. When using many robotic arms, energy must be considered because the energy cost is one of the main production costs. The total energy consumption in the industrial sector is 37% of the total energy consumption in the world.<sup>(11)</sup> The automotive industry is one of the largest industries in the world. In the automotive industry, the energy consumption by IRs in the production line is about 8% of the total energy consumption<sup>(12)</sup> and the proportion is likely to increase in the future. The energy consumption of robots is of interest because it is a direct cost of business. For the above reasons, research and development to reduce the energy consumption of IR is important.

Many studies have been performed on hardware such as the type of robot arm that should be selected by considering energy consumption<sup>(13)</sup> or electric energy loss from materials.<sup>(14)</sup> There have also been many studies on software. For example, research on choosing the trajectory of a robot arm found that a parabolic trajectory can achieve the lowest energy consumption.<sup>(15)</sup> The trajectory of a robot arm can be controlled by the working cycle time of the robot arm to optimize the use of energy.<sup>(16–22)</sup> There have been many attempts to control the trajectory and time from the last working point to the home point of a robot arm in accordance with the standard cycle time with the aim of reducing time and energy consumption.<sup>(23,24)</sup> In addition to controlling the time and movement path, the results of research on controlling the speed, acceleration, and torque of a motor can also be used to optimize the time for which robot moves.<sup>(25,26)</sup> Various algorithms for obtaining an optimal condition related to a robot arm have been developed. Particle swarm optimization (PSO) is one of the algorithms used to find optimized values. There are a variety of applications of PSO. One example is the optimal scheduling of the production of thin-film transistors (TFTs), with production capacity allocated by finding the most appropriate production sequence and resolving the bottlenecks of the process occurring in normal production planning.<sup>(27–30)</sup> PSO can be used for the path planning of mobile robots to decide complex paths, such as the paths of 10 mobile robots moving around obstacles.<sup>(31)</sup>

To adjust the conditions to respond to changes, neural networks can be used to find continuous data for rapid adjustment, for example, when designing an application to calculate energy efficiency in home appliances<sup>(32)</sup> and industry.<sup>(33)</sup> They have also been used to design wind turbines on a farm<sup>(34)</sup> and to predict motor trouble to reduce the energy loss resulting from the low efficiency of faulty motors.<sup>(35)</sup>

In industry 4.0, industries will be integrated with the production world owing to network connectivity in the form of the Internet of Things (IoT), which will connect all devices in the production system. A network system will be able to communicate and exchange information from anywhere at any time. As an advantage of industry 4.0, customers should be able to place orders in an application via a phone or computer to control the production cycle time from anywhere. However, a remote-control system for IR to operate at the required time while maintaining the lowest energy consumption has not yet been found. In response to this problem we present a system of remote sensing for controlling a robot arm that can also minimize energy consumption.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. Modeling of Energy Consumption

For the production system to receive information about customer requirements, the customer must enter the number of required pieces into the system. The quantity of the product required by the customer can be converted to the maximum TackTime of production by

$$TackTime = \frac{Working\ Time}{Demand}. \quad (1)$$

In Eq. (1), TackTime is the maximum time required for the system to control the speed of the production line. This time is used to determine the speed and acceleration appropriate for movement while using the minimum energy to control the movement of a robot arm. Normally, the production line is designed by the lean manufacturing technique, which focuses on reducing all waste in a production line. However, the energy consumption is not typically considered in the design. Therefore, the energy consumption must be considered in the dynamics of the robot arm, which is determined by the angular coordinates of the robot arm shown in Fig. 1. The movement path can be applied to simulate the trajectory of a robot in a current production system or in the development of a new system.

In each operation, the sum of the energy must be calculated for each path. The energy consumption for the operation is a nonlinear function of the execution time. The same robot also consumes energy while idling after the completion of the operation.

The study of the robot energy is necessary to develop the dynamics of the robot model. A dynamic equation describes the relationship between force and movement. It is important to consider the equation for movement in robot design, including by simulation, to develop an algorithm for control. There are many ways to formulate a dynamic equation of a robot arm. The equation incorporates the force, torque, speed, acceleration, and position.

The torque equation can be expressed as follows, where  $q$  is the resulting angle,  $\dot{q}$  is speed, and  $\ddot{q}$  is acceleration, while the torque must be on the trajectory.

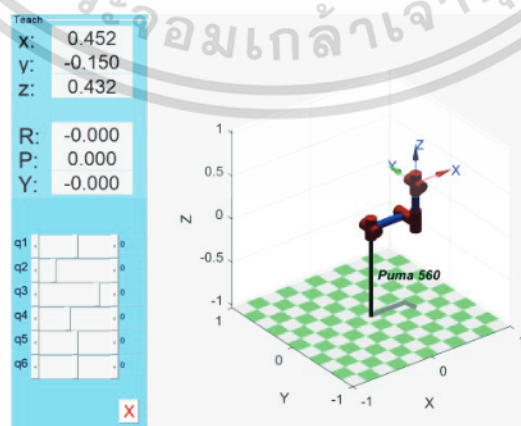


Fig. 1. (Color online) Simulation model of PUMA 560.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + \tau_f = \tau. \quad (2)$$

The total energy consumption of the path is given by the integral of the absolute value of the product of torque and speed. The power consumed by the robot at any given instance of time is given by

$$P = |\tau \dot{q}|. \quad (3)$$

Thus, the total energy consumption is

$$E = \int_0^T |\tau \dot{q}| dt. \quad (4)$$

Energy can be calculated from the torque and time. Obviously, the energy consumption is related to the speed and acceleration of the robot arm movement, which means that reducing the speed and acceleration can reduce energy consumption.

The study shows that the PSO algorithm can find the optimal solution to most equations, then an appropriate result can be obtained by tuning the obtained solution. The process can obtain the result by considering the following equation:

$$E = \int_0^T \left| \left( M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + \tau_f \right) \times \dot{q} \right| dt. \quad (5)$$

From this equation, the energy in joules can be calculated and used as a fitness value in PSO optimization, the flow chart for which is shown in Fig. 2.

The PSO technique can find only one optimal value. In this paper, we propose the use of neural network techniques to find the velocity and acceleration in every period.

As shown in Fig. 3, in the artificial neural network (ANN), all nodes in the input layer send signals to all nodes in the first hidden layer, and all nodes in the first hidden layer send signals to all nodes in the next layer. This is performed until all nodes in the last hidden layer send signals to the nodes in the output layer. The results from such processing will be the output values. Therefore, the values obtained from the ANN will provide the speed and acceleration required in every period to control the robot so that it uses energy efficiently.

### 3. Case Study of Energy Optimization

For industry 4.0, it is necessary to adjust conditions for production in real time. Therefore, we propose the design of a system able to receive a work order from a mobile application and to send data to the production line as shown in Fig. 4.

To adjust the speed and acceleration to reduce energy use in the production system, the program simulation applies a PUMA 560 robot with the D–H parameters in Table 1. Figure 5 shows the dimensions of the robot.

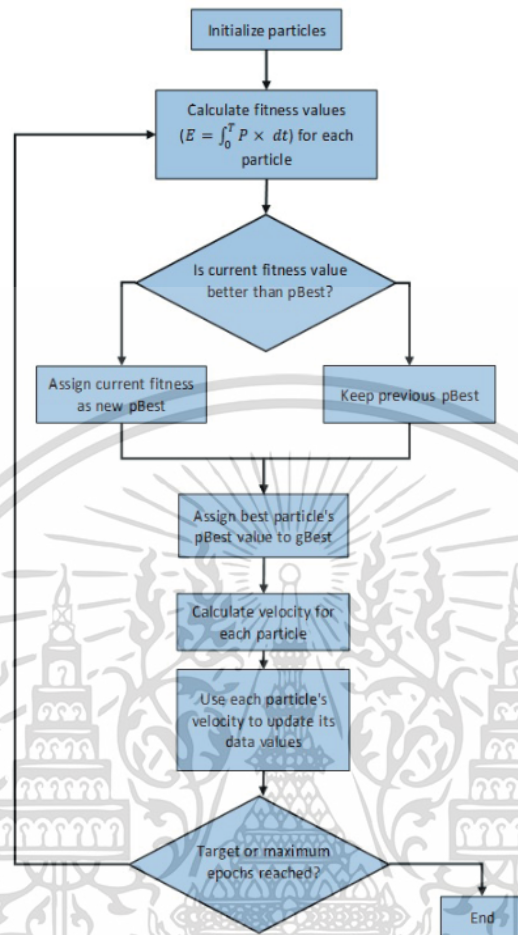


Fig. 2. (Color online) Flow chart for PSO optimization.

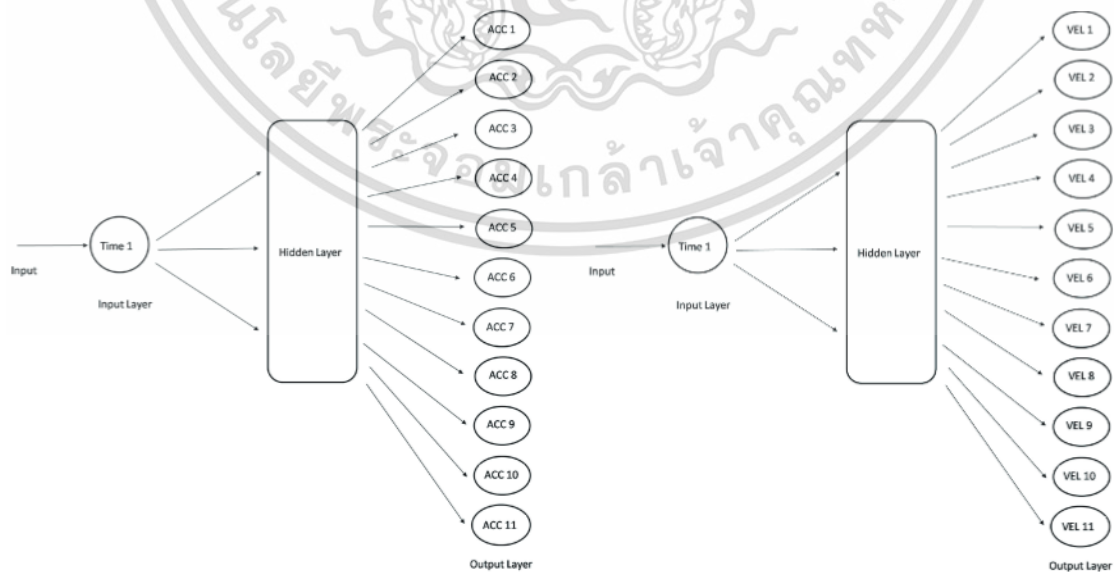


Fig. 3. Diagram of the backpropagation neural network.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Fig. 4. (Color online) System diagram for robot remote control.

Table 1

D–H parameters of PUMA 560.

Link	$a$ (m)	$\alpha$ (rad)	$d$ (m)
1	0	$\pi/2$	0.67
2	0.4318	0	0
3	0.4318	$-\pi/2$	0.1505
4	0	$\pi/2$	0
5	0	$-\pi/2$	0
6	0	0	0.2

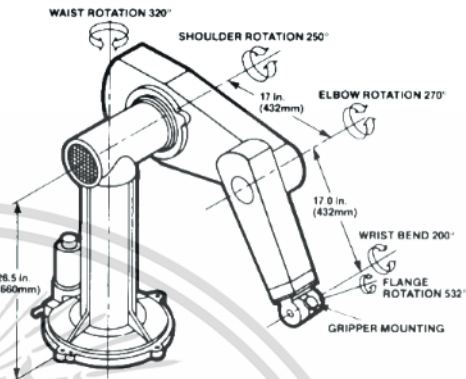


Fig. 5. Dimensions of PUMA 560.

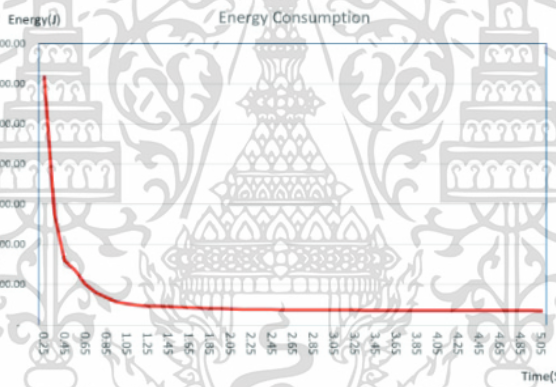


Fig. 6. (Color online) Graph showing relationship between energy consumption and time.

In the simulation of the relationship between energy consumption and time, the robot moves from point A to point B and the distance between points A and B is set to 100 mm on the X-axis. The starting time of this path is 0.15 s and the energy consumed by the robot arm is measured at intervals of 0.1 s up to 5 s. Figure 6 shows the result of the simulation with the same distance between A and B but different total times of the trajectory. Lower energy consumption is obtained for longer times, which can be achieved when moving, i.e., when the robot arm moves slowly. The energy consumption can be reduced because the cycle time of each process does not need to change with the minimum cycle time. This is because the robot arm has a waiting time before the next cycle.

The study of the robot to reduce its energy consumption is performed by finding the suitable time, velocity, and acceleration of the moving robot. The initial time of the total trajectory is set to 6.60 s with a maximum time of the trajectory of 12.09 s to compare the decrease in energy consumption.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 7 shows the layout of a process and Figs. 8 and 9 show movement in the simulation and the parameters of PSO with a particle size of 25, 100 iterations, and velocities of 0.3 to 1.0 simulated by MATLAB. The energy from the initial time is presented in Table 2. The data used for training in the neural network simulation obtained from PSO with a period of 1 s are shown in Table 3.

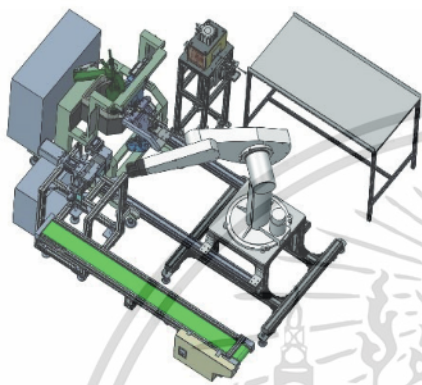


Fig. 7. (Color online) Layout of simulation.

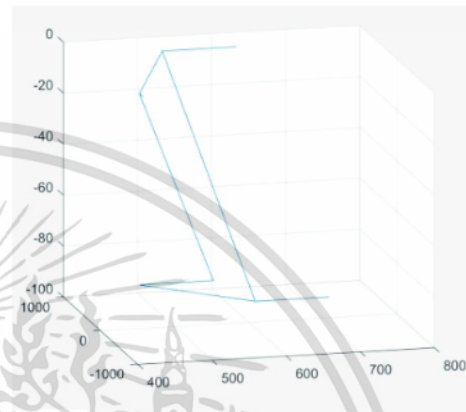
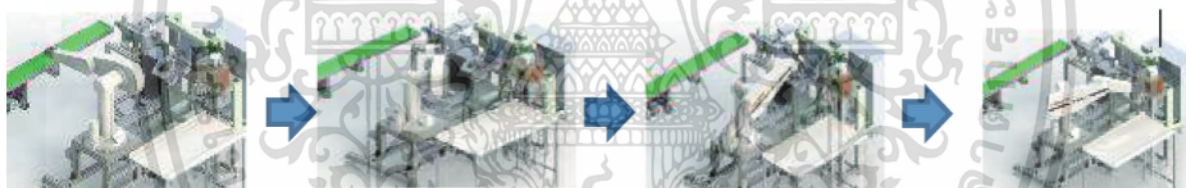


Fig. 8. (Color online) Path used in simulation.



Home Position

1 Station

2 Station

Last Station

Fig. 9. (Color online) Position of the robot arm when moving to different positions.

Table 2  
Position of end effector and energy from the initial time.

Path	Time	Velocity	Acc.	Energy
1 (0.613, 0.587, 0)	0.30	38.78	461.60	767.70
2 (0.513, 0.587, 0)	0.30	270.79	3231.40	743.50
3 (0.609, 0, -0.092)	1.00	10.51	33.90	1473.20
4 (0.709, 0, -0.092)	0.30	1.25	26.30	541.60
5 (0.609, 0, -0.092)	0.30	2.21	26.30	542.40
6 (0.424, -0.569, -0.075)	1.00	1.89	6.10	916.20
7 (0.524, -0.569, -0.075)	0.30	0.93	20.80	469.40
8 (0.424, -0.569, 0)	0.30	1.84	21.90	324.50
9 (0.0424, -0.569, 0)	1.00	0.37	19.80	574.70
10 (0.424, -0.569, 0)	0.30	2.32	27.60	600.70
11 (0.513, 0.587, 0)	1.50	2.74	8.50	1201.30
Total	6.60	—	—	8155.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 3  
Data used to train neural network.

	Path	Path	Path	Path	Path	Path	Path	Path	Path	Path	Path	Total time
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Time	0.45	0.87	2.11	0.41	0.30	1.98	0.49	0.73	0.67	0.73	2.60	11.34
Velocity	26.30	97.07	4.86	0.93	2.21	0.92	0.63	0.76	0.56	0.96	1.55	
Acc.	176.09	359.04	7.23	12.23	26.32	1.45	7.93	3.23	47.03	4.07	2.73	
Time	0.67	0.83	1.88	0.30	0.30	1.85	0.83	0.35	0.47	0.43	2.17	10.09
Velocity	18.81	104.94	5.44	1.25	2.21	0.98	0.36	1.67	0.79	1.73	1.87	
Acc.	94.05	413.06	9.09	26.32	26.32	1.63	2.66	14.70	88.05	12.85	4.01	
Time	0.53	0.45	1.82	0.43	0.34	1.98	0.51	0.46	0.57	0.47	1.70	9.26
Velocity	22.80	183.64	5.62	0.93	2.00	0.92	0.55	1.25	0.63	1.57	2.37	
Acc.	142.50	1232.70	9.70	12.20	17.60	1.40	6.40	8.40	57.70	10.50	6.40	
Time	0.61	0.52	1.78	0.32	0.30	1.30	0.43	0.43	0.37	0.47	1.72	8.25
Velocity	21.04	159.23	5.79	1.25	2.21	1.40	0.69	1.37	1.05	1.57	2.37	
Acc.	115.41	997.56	10.26	26.32	26.32	3.36	9.66	10.20	154.60	10.54	6.41	
Time	0.36	0.44	1.45	0.30	0.30	1.35	0.46	0.30	0.42	0.30	1.44	7.13
Velocity	35.06	201.39	7.18	1.25	2.21	1.35	0.63	1.84	0.86	2.32	2.84	
Acc.	309.20	1502.00	15.80	26.30	26.30	3.10	7.90	21.90	107.30	27.60	9.20	
Time	0.39	0.65	0.96	0.30	0.30	1.00	0.42	0.46	0.52	0.35	0.97	6.34
Velocity	35.06	131.36	10.51	1.25	2.21	1.89	0.69	1.25	0.68	2.10	4.16	
Acc.	309.19	658.36	33.90	26.32	26.32	6.09	9.66	8.37	71.25	18.51	19.81	
Time	0.45	0.39	1.00	0.30	0.32	0.99	0.30	0.34	0.31	0.37	0.98	5.76
Velocity	26.30	244.85	10.51	1.25	2.21	1.89	0.93	1.67	1.16	2.10	4.16	
Acc.	176.10	2164.30	33.90	26.30	26.30	6.10	20.80	14.70	230.80	18.50	19.80	
Time	0.30	0.30	0.84	0.30	0.30	0.74	0.30	0.30	0.30	0.33	0.93	4.94
Velocity	38.78	270.79	11.89	1.25	2.21	2.46	0.93	1.84	1.16	2.32	4.45	
Acc.	461.60	3231.40	43.90	26.30	26.30	10.50	20.80	21.90	230.80	27.60	22.40	

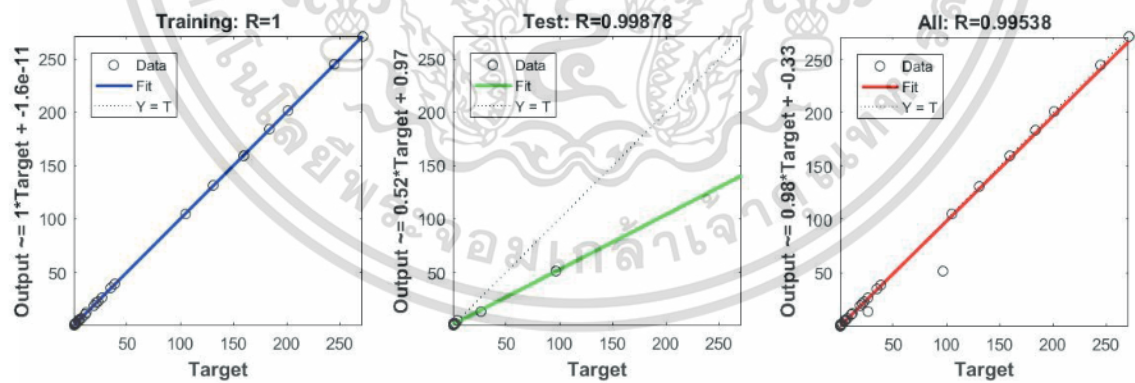


Fig. 10. (Color online) Regression between actual output and the output obtained by the proposed neural network.

Figure 10 shows the lines of best fit between the actual output and the output obtained with the proposed neural network. The correlation coefficient  $R$  between the actual output and the training result was 1 and that between the training result and the actual data was 0.9988. The system calculates the speed, acceleration, and energy of the most suitable movements of the robotic arm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4. Results

MATLAB is applied to optimize the energy consumption resulting from moving the robot arm. Figure 11 shows the number of iterations with different fitness values. Table 4 shows the minimum energy consumption obtained by PSO. This method reduces energy consumption from 8155.20 to 7148.6 J, a decrease of 12.3%. On the other hand, the total moving time is increased by 71.8% from 6.60 to 11.34 s.

After applying an ANN, the data obtained from PSO creates continuous data of angular velocity and acceleration (Fig. 12). To minimize the energy consumed by the robot arm, the ANN provides the acceleration and speed for different cycle times.

When entering the cycle time into the system, the system correctly calculated the speed and acceleration. The time required by the PSO technique to obtain the optimal value was 1690.80 s in addition to the 2 s required by the neural network. This means that the time will be reduced significantly when an order is entered from a remote controller.



Fig. 11. (Color online) Number of iterations with different fitness values.

Table 4  
Minimum energy consumption obtained from PSO.

Path	Time	Velocity	Acc.	Energy
1 (0.613, 0.587, 0)	0.45	26.30	176.09	758.10
2 (0.513, 0.587, 0)	0.87	97.07	359.04	734.80
3 (0.609, 0, -0.092)	2.11	4.86	7.23	1200.10
4 (0.709, 0, -0.092)	0.41	0.93	12.23	531.00
5 (0.609, 0, -0.092)	0.30	2.21	26.32	542.40
6 (0.424, -0.569, -0.075)	1.98	0.92	1.45	635.40
7 (0.524, -0.569, -0.075)	0.49	0.63	7.93	461.80
8 (0.424, -0.569, 0)	0.73	0.76	3.23	308.80
9 (0.0424, -0.569, 0)	0.67	0.56	47.03	566.60
10 (0.424, -0.569, 0)	0.73	0.96	4.07	567.60
11 (0.513, 0.587, 0)	2.60	1.55	2.73	842.00
Total	11.34	—	—	7148.60

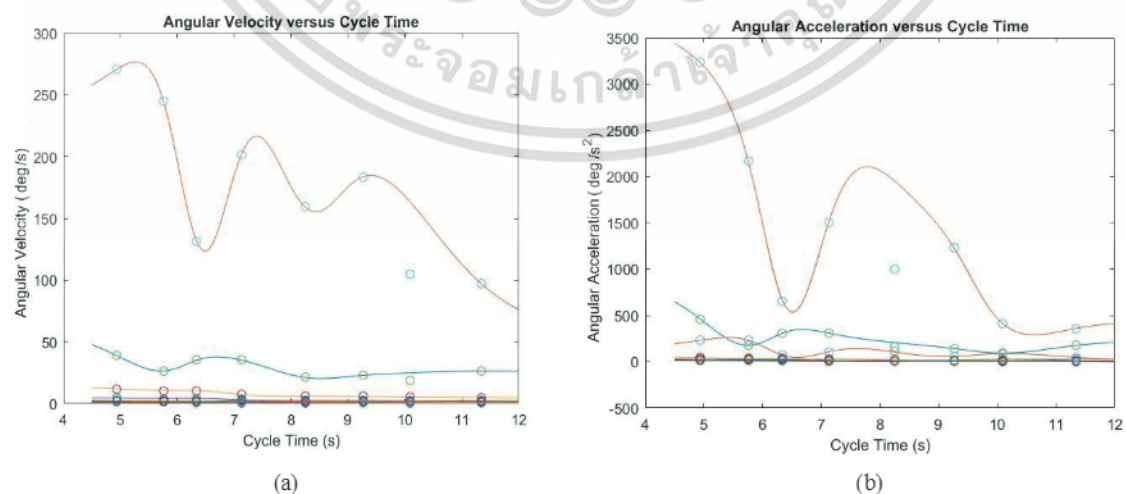


Fig. 12. (Color online) Continuous data of (a) velocity and (b) acceleration obtained from the neural network.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5. Conclusion

Because of the widespread use of robot arms in industry, the cost of the energy consumed by them is significant. We present a new method of remote control to adjust production in real time by using energy optimization techniques to maximize the efficiency of remote-control production orders. By applying IoT technology, our method can control a robot arm by adjusting its speed while minimizing its energy consumption. Our method can be applied to smart factories to obtain the most effective time and minimize energy consumption when receiving orders from a distance.

## Acknowledgments

This work was supported by Thailand Research Fund and NSTDA.

## References

- 1 R. Muslimen, S. Yusof, and A. Abidin: 2011 World Congress on Engineering (WCE, 2011), Vol. I. <https://ir.unimas.my/id/eprint/13996/1/A%20case%20study%20of%20Lean%20Manufacturing%20Implementation%20Approach%20in%20Malaysian%20Automotive%20Components%20Manufacturer.pdf>
- 2 D. B. Modi and H. Thakkar: *Int. J. Emerging Technol. Adv. Eng.* **4** (2014) 339. <https://pdfs.semanticscholar.org/8f25/5854b85da898d368c79ae2b8daeed9a65e16.pdf>
- 3 S. Wang, J. Wan, D. Li, and C. Zhang: *Int. J. Distrib. Sens. Netw.* **2016** (2016) 1. <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1155/2016/3159805>
- 4 J. Posada, C. Toro, I. Barandiaran, and D. Oyarzun: *IEEE Comput. Graphics Appl.* **35** (2015) 26. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7064655>
- 5 P. Robison, M. Sengupta, and D. Rauch: *IT Prof.* **17** (2015) 17. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7116423>
- 6 X. Zhou, H. Yan, J. Wang, and Y. Wang: *IEEE Int. Conf. Enterprise Systems* (2017) 331. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8119412>
- 7 M. Unterhofer, E. Rauch, D. T. Matt, and S. Santiteerakul: *IEEE Int. Conf. Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)* (2018) 720. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8607445>
- 8 P. Gamba, E. Goldoni, P. Savazzi, P. G. Arpesi, C. Sopranzi, J. F. Dufour, and M. Lavagna: *IEEE Sens. J.* **14** (2011) 3883. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6888464>
- 9 W. C. Huang, G. Zhang, and D. Li: *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **54** (2016) 4355. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7446303>
- 10 P. Angove, M. O'Grady, J. Hayes, and B. O'Flynn: *IEEE Sens. J.* **11** (2011) 3309. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5871997>
- 11 E. A. Abdelaziz, R. Saidura, and S. Mekhilef: *Renewable Sustainable Energy Rev.* **15** (2011) 150.
- 12 D. Meike and L. Ribickis: *15th IEEE Int. Conf. Advanced Robotics (ICAR)* (2011) 507. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6088567>
- 13 O. Maimon, E. Profeta, and S. Singer: *J. Intell. Rob. Syst.* **4** (1991) 175. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00440418>
- 14 E. S. Sergaki, G. S. Stavrakaki, and A. D. Pouliezo: *J. Intell. Rob. Syst.* **33** (2020) 187. [http://pouliezos.dpem.tuc.gr/pdf/JIRS\\_2002.pdf](http://pouliezos.dpem.tuc.gr/pdf/JIRS_2002.pdf)
- 15 J. S. Park: *Mechatronics* **6** (1996) 649. <https://fdocuments.in/document/motion-profile-planning-of-repetitive-point-to-point-control-for-maximum-energy.html>
- 16 J. Yao, W. Gu, Z. Feng, L. Chen, Y. Xu, and Y. Zhao: *Rob. Comput. Integr. Manuf.* **48** (2017) 51. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0736584516300278>
- 17 A. Vergnano, C. Thorstensson, B. Lennartson, P. Falkman, M. Pellicciari, C. Yuan, S. Biller, and F. Leali: *IEEE Conf. Automation Science and Engineering* (2010) 386. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5584686>
- 18 O. Wigström, B. Lennartson, A. Vergnano, and C. Breitholtz: *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.* **10** (2013) 57. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6204092>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 19 H. Lyu, X. Song, D. Dai, J. Li, and Z. Li: 13th IEEE Conf. Automation Science and Engineering (CASE) (2017) 503. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8256154>
- 20 S. Pellegrinelli, S. Borgia, N. Pedrocchi, E. Villagrossi, G. Bianchi, and L. M. Tosatti: Proc. CIRP **29** (2015) 354. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827115004886>
- 21 R. Ur-Rehman, S. Caro, D. Chablat, and P. Wenger: Can. Soc. Mech. Eng. **33** (CSME, 2009) 523. <https://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/tcsme-2009-0035>
- 22 P. Cezner: Robotic Trajectory Optimization, Czech Technical University in Prague, Syst. and Control (May 2017). [https://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/images/4/4f/Bp\\_2017\\_cezner\\_petr.pdf](https://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/images/4/4f/Bp_2017_cezner_petr.pdf)
- 23 D. Meike, M. Pellicciari, and G. Berselli: IEEE Trans. Autom. Sci. Eng. **11** (2014) 798. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6668986>
- 24 Y. L. Hsu, M. S. Huang, and R. F. Fung: 6th IFAC Symp. Mechatronic Syst. **24** (2013) 628. [https://www.researchgate.net/publication/259519035\\_Energy-saving\\_trajectory\\_planning\\_for\\_a\\_toggle\\_mechanism\\_driven\\_by\\_a\\_PMSM](https://www.researchgate.net/publication/259519035_Energy-saving_trajectory_planning_for_a_toggle_mechanism_driven_by_a_PMSM)
- 25 Y. Zhang and J. Wang: IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. (2002) 654. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1033184>
- 26 H. Du, J. M. Du, L. A. Chen, Z. W. Mai, and X. H. Liu: Int. Conf. Artificial Intelligence and Industrial Eng. (2015) 345. <https://www.atlantis-pess.com/proceedings/aiie-15/22139>
- 27 P. Pongchairerks: Asia Pac. J. Oper. Res. **26** (2009) 161. [https://www.researchgate.net/publication/46510351\\_A\\_particle\\_swarm\\_optimization\\_algorithm\\_on\\_job-shop\\_scheduling\\_problems\\_with\\_multi-purpose\\_machines](https://www.researchgate.net/publication/46510351_A_particle_swarm_optimization_algorithm_on_job-shop_scheduling_problems_with_multi-purpose_machines)
- 28 Y. Y. Chen: Int. Multi Conf. Engineering and Computer Scientists 2010 (IMCES, 2010). [http://www.iaeng.org/publication/IMECS2010/IMECS2010\\_pp1791-1796.pdf](http://www.iaeng.org/publication/IMECS2010/IMECS2010_pp1791-1796.pdf)
- 29 Y. Guo, W. Li, A. R. Mileham, and G. W. Owen: Int. J. Prod. Res. **14** (2009) 3775. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00513021/document>
- 30 P. Pongchairerks: Sci. Asia **35** (2009) 89. [http://www.scienceasia.org/2009.35.n1/scias35\\_89.pdf](http://www.scienceasia.org/2009.35.n1/scias35_89.pdf)
- 31 A. Ayar and S. Bouamama: IEEE Int. Conf. Real-Time Computing and Robotics (2017) 437. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8311901>
- 32 C. Zhou, S. Liu, and P. Liu: 3rd IEEE Int. Conf. Information Science and Control Engineering (2016) 483. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7726207>
- 33 L. Wei and S. Yumin: IEEE Int. Symp. Knowledge Acquisition and Modeling Workshop (2008) 176. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4810454>
- 34 M. C. Mabel and E. Fernandez: IEEE Trans. Energy Convers. **24** (2009) 459. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4738388>
- 35 L. F. Tsai, Y. T. Ku, Y. C. Chang, and H. L. Chung: IEEE Int. Conf. Computer Engineering and Technology (2009) 548. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4769663>

## About the Authors



**Somyot Kaitwanidvilai** received his B.Eng and M.Eng degrees in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Thailand, in 1996 and 2000, respectively. He received his Ph.D. degree in mechatronics engineering from the Asian Institute of Technology in 2005. Currently, he works at KMITL in the Department of Electrical Engineering. His research interests include artificial intelligence in power and energy systems, control systems, mechatronics, power electronics, and robust and adaptive control in power systems. (somyot.ka@kmitl.ac.th)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**Veerasak Chanarungruengkij** received his B.Eng degree in material handling technology from King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok (KMITNB), Thailand, in 1997. He received his M.Eng degree in information and system engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) Thailand, in 2017. Currently, he is studying for a Ph.D. degree in electrical engineering at KMITL. His research interests include artificial intelligence in energy systems, control systems, mechatronics, and robotics technology. (vee7713@gmail.com)



**Poom Konghuayrob** received his B.Eng and M.Eng degrees in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Bangkok, Thailand, in 2012 and 2013, respectively. He is currently working towards a Ph.D. degree in electrical engineering at KMITL. His research interests are in the areas of robust control, DC/AC inverters, solar cell fields, and artificial intelligence. (poom.konghuayrob@gmail.com)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# The 5<sup>th</sup> National Conference The 1<sup>st</sup> International Conference

on Informatics, Agriculture, Management  
Business administration, Engineering  
Sciences and Technology

28 – 29 May 2020

Online Conference

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Prince of Chumphon Campus



**Abstract**

<http://www.pcc.kmitl.ac.th/iambest>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Minimize Energy of Robot Arm by particle swarm optimization: A case study of control cable.

Somyot Kaitwanidvilai,<sup>1\*</sup> Veerasak Chanarungruengkij,<sup>2\*</sup> and Poom Konghuayrob<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

### Abstract

Energy is a manufacturing cost. Most of production engineers must be consider the production at lowest cost, which develops the production system in industrial plants. Lean manufacturing system is a popular application in industry for improvement production line from manufacturing by humans to automatics system with robot arm. But it is not yet updated in terms of the overall energy consumption of the production line. This article introduces how to optimization a robot energy. After determining the movement of the robot by lean manufacturing method. The Energy equation used for robot is the fitness function. The parameters of function are the start and end points. The optimum power and minimum energy consumption of robot is determined by the particle swarm optimization. Swarm Optimization targets to reduce energy consumption by controlling the speed and overall acceleration of the system. A sample robot production system will indicate that there is a possibility to have a reduction in comparison of the energy consumption compared to the normal method.

**Keywords:** lean manufacturing, PSO, optimal energy, energy of robot

## 1. Introduction

Today, the world is changing rapidly growing, and the latest approach is to focus on the innovation and modern technology in things around the world. To develop the production of modern industries, it combines 2 production technic system lean and Automation. We call 'Lean Automation' can improve an efficient of production line. [1] Basically, robots do not play a remarkable role in lean strategy. However, robot can work high speed, high accuracy and flexibility the role of robots in lean manufacturing applications, including robots, is becoming a main component in lean manufacturing and reducing production costs. [2]

Using a robot to increase production performance with a robot when a Lean application has no need to work at its highest speed, as it is controlled by the Cycle time. Cycle time of some machinery has over cycle time of robot movement, it is necessary to observe energy due to Energy is a cost that the industry must consider, because in addition to the machines, the increased energy will come from using the robot because energy will have a rising price all the time in the future.

Reducing energy consumption from production is an integral part of the effort to reduce the cost of production, because the energy price trends will increase always. [3] due to the increase in population, the reduction of fossil fuels and increased pollution. Creating Sustainable energy sustainability Energy sustainability for production systems has become a key area for the research and vision of many company due to its cost and market demand, due to the current technology limitation, has greatly wasted energy during production processes such as loss of energy to the environment, reducing these losses can be made by developing new energy-saving equipment. Improvement in production quality with reduced loss rate. However, power consumption can also be reduced. Consider how to use energy appropriately.

Considering the trajectory placement of the robot. The robot's movement planning is largely determined by considering the only time that robot uses it. Regardless of the speed and acceleration of the robot. Make the robot use more energy than necessary and stop waiting.

Using a method that will optimize the process of finding the most suitable value there are several types of algorithms, but in the past few years has developed several algorithms for the optimization of various issues related to finding the value of robot applications. The aim of the enhancement technique is to find solutions that represent the most appropriate global or lowest solutions in a properly defined solution domain, which means finding a good solution. The best of those solutions is possible for considering the problem, such as using PSO in solving problems in production planning, to help allocate capacity, solve the order of production, troubleshoot route bottlenecks compared to a regular plan. A result is faster, high accurate [4,5,6,7] and easy to use for plan complex robot movements, such as the path planning of mobile robot 10 units movement pass through the obstacles, which can be used to solve problems of mobile robot planning [8].

There are many research literatures comparing the algorithm of evolution algorithms to solve some difficult enhancements in many domains. Comparisons are often made indirectly because many researchers use different troubleshooting guidelines together with local search. Therefore, it is not clear that a part of the performance of the algorithm comes from the evolution algorithm or by local search. This comparison is more comprehensive when the solution is active compared to the same solution and the number of equal function estimates [9].

The study of work has compared these techniques, such as about the time to learn, PSO and q-learning, with non-consecutive conditions, must take on all evaluations combined for a single robot. Both techniques can provide an answer in less than 10000 seconds, but in the work of q-learning, it takes more

time than PSO in which the value will track into the final response and PSO to get better Fitness function. The PSO is significantly down due to the dispersion characteristics of the [10] algorithm, or the design of the “backstepping” control to track the purpose of the nonlinear system, due to the controller's performance, depending on the value of the parameter to the search process. Gravity find (GSA) and optimizing the particle-processing technique (PSO) used to optimize these parameters to obtain the performance of predefined system performance will be evaluated according to tracking errors between the system and the output data.

Particle Swarm optimization (PSO) and gravitational search algorithm (GSA) is a tool to optimize the parameters of the control. The simulation results show that the combination of PSO better GSA performance shows that PSO cause a smooth response error. With less tracking errors compared to GSA, the designed controller strength has been tested by providing various types of noise [11]. The researchers therefore attention to the PSO technique due to consideration. The technical comparison techniques such as PSO compare GA, GSA and q-learning. Find that PSO has a superior feature over GA, GSA and q-learning, by PSO, can find the best current results and the best results from the past to the present. Data sharing allows each particle to use to calculate the direction of movement, which differs from GA, GSA and q-learning are dividing the data of the position between populations in a limited scope, making the calculation speed to get the results of PSO a speed greater than [12,13] and providing a level of confidence higher than GA [14].

In this research, it considers the use of the robot's energy related to the scheduled implementation, which allows the use of energy as an optimization criterion for finding a good moment. It can best allocate time to work in each stage correctly and set the speed and acceleration in each of the most energy-efficient work sequences possible.

## 2. Scheduling of Energy Consumption by PSO

The proposed method requires power as a variable only during the operating time. This is done by post-processing of previously defined robots. The power consumption will allow the debug to adjust the operating time, which will be used to power the system. Minimal energy will help the program to correct speed and acceleration. This method does not modify the current environment. For example, trajectory of robots. Because they want to use current resources without new investment, means that the recommended approach can be used to optimize the current production system, which will determine all operations and scheduled.

The work of the robot is determined and studied as a form of motion of the angular coordinates of the robot joint. This information can be retrieved from a verified virtualization model or a physical system, so that it can be used on both systems and production systems installed during development.

Each operation must be processed by the sum of energy in each path motion. The power consumption for the operation is a non-linear function of the execution time. The same robot is also used to obtain the energy of idle time after the completion of the operation. Entering data into a time format will consist of a series of energy, operations, and energy consumption.

PSO algorithms is very helpful to find out the answers quickly. By adopting the concept of Inertia Weight, the aim is to balance and refine global search and local search. In addition, better performance is obtained if the weight of inertia at different times decreases linearly, instead of constant. Thus, higher inertia weight means increased variation in speed per recurrence and make a survey of new search areas for better solutions. However, the smaller inertia weight means less variation in speed, making the change slower in terms of local search refinement. Therefore, it is better that the search process should begin with a higher

inertia weight for exploration across. Earth, with a reduced linear inertia weight, to facilitate local exploration at the later recurrence.

From the equation given for energy  $E = P \times t$  the dynamic equation of the robot can be transformed.

$$E = \int_0^T P \times dt \text{ When } P = |\tau \dot{q}| \quad (1)$$

And

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + \tau_f = \tau \quad (2)$$

From (1) and (2) Where

$$E = \int_0^T |(M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + \tau_f) \times \dot{q}| \times dt \quad (3)$$

From equation (3) can be calculated the energy it's call 'Joule'. It can be used as a fitness value function of PSO optimization.

### 3. Result and Discussion Result

In the research to prepare the speed, processing speed and acceleration to save energy in the production system. To be used as a real program information. Computer simulations performed on 560 puma robots.

When studying the relationship between energy consumption and time from point A to point B, it is found that when the distance is the same, but there are different times. This is due to the reduce the speed of the robot into the program speed of the robot. This will result in lower energy consumption when moving slower. The improvement of the energy by this method is possible because the factory case will work is done with the cycle time of each process. No need to move at maximum speed because robot has waiting time to work again.

Process improvement to reduce energy by finding time, velocity, and trajectory of the robot can be start with the improvement in the process. By combine operation of robots and operator in some processes by using the concept of lean manufacturing. By surveying and improving a value stream mapping to layout the production line, Layout of the production process is shown in Fig 1.

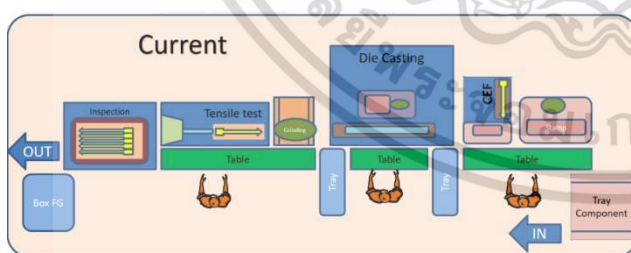


FIGURE 1. Current process layout.

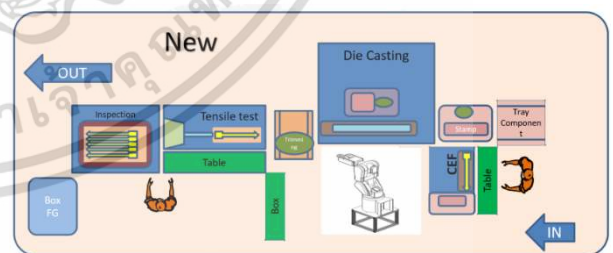


FIGURE 2. Improvement process layout.

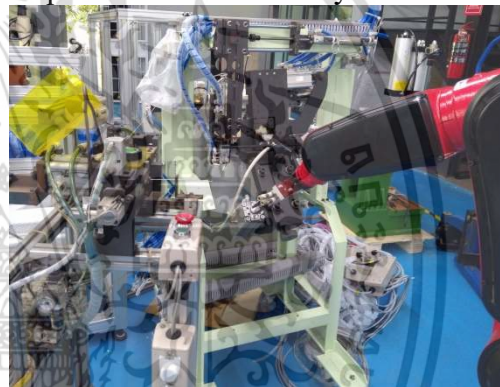
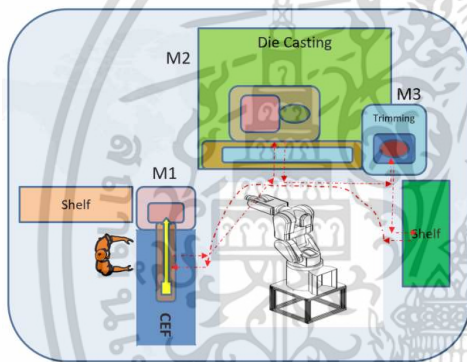
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Process 1	sec.
Applied grease with inner	1.85
Insert inner with mold outer.	3.63
Inner length cutting & End forming	5.48
Stamping P/No. & DATE on outer	4.57
<b>Sum</b>	<b>15.53</b>
Process 2	sec.
Die-casting T-End	6.62
Grinding T-End	2.53
<b>Sum</b>	<b>9.15</b>
Process 3	sec.
Inspection test confirm length A+B	1.64
Final inspection	3.25
Packing	1.56
<b>Sum</b>	<b>6.45</b>

Process 1	sec.
Applied grease with inner	1.85
Insert inner with mold outer	3.63
Inner length cutting & End forming & Stamping P/No. & DATE on outer	7.05
<b>Sum</b>	<b>12.53</b>
Process 2	sec.
Robot Die-casting T-End & Trimming T-End	6.47
<b>Sum</b>	<b>6.47</b>
Process 3	sec.
Inspection test confirm length A+B	2.64
Final inspection	5.25
Packing	3.56
<b>Sum</b>	<b>11.45</b>

**TABLE 1.** Current work element and time. **TABLE 2.** Improvement work element and time.

By the new production layout, can be compare the process cycles before and after improvement it's show in table 1,2. After improvement, process 1 will have a cycle time of 12.53 sec. The process 2 have a cycle time of 6.47 sec. The process 3 will have a cycle time of 11.45 sec.



**FIGURE 3.** Robot trajectory of process 2.

**FIGURE 4.** Test process.

Figure 3 and 4 shows the layout of the process 2, So the trajectory of the robot takes the total time it takes to produce.

$$T = \sum_{i=0}^n t \quad \text{By} \quad T \leq \text{Total Cycle Time} \quad (4)$$

Where t is the time taken to move each path of the robot from the figure 3 showing the direction of movement of the robot. This will move all 11 paths in 1 cycle, A bottleneck of the all process is process 1 cycle time 12.53 sec, but in the process 2 has cycle time at 6.47 sec, which is the max speed of the robot, causing the robot to use the highest speed and acceleration all the time. This is because after work, the robot will stop and waiting.

At work, because process 1 is a bottleneck in the production line. In the next process, there is no need to work faster than the process 1. So, the total time to use for robot trajectory to obtain  $\sum_{i=1}^{11} t \leq 12.53$ . Based on the test, the lay out of the robot has been optimized. Can be defined as follows table 3.

Path	x	y	z
1	0.71	0.68	0
2	0.61	0.68	0
3	0.60	0	-0.10
4	0.80	0	-0.10

5	0.70	0	-0.10
6	0.52	-0.66	-0.08
7	0.62	-0.66	-0.08
8	0.52	-0.66	0
9	0.52	-0.76	0
10	0.52	-0.66	0
11	0.61	0.68	0

**TABLE 3.** Trajectory of process.

From factory engineer determines the movement of the robot due to the characteristics of the production line being tested and must be determined to avoid obstructions and safety in the workplace.

From the initial planning from factory engineer the energy consumption from the trajectory time and velocity according to the table 5. The total energy consumption is 5,733.94 joules.

Path	time	velocity	Acc.	Energy
1	0.35	0.64	7.69	689.47
2	0.35	0.64	7.69	689.47
3	0.59	1.55	5.02	277.00
4	0.31	0.22	2.62	689.47
5	0.35	0.22	2.62	689.47
6	1.00	1.89	6.09	177.57
7	0.35	0.53	6.318	689.47
8	0.37	0.53	6.318	689.47
9	1.00	0.19	0.617	297.57
10	0.30	0.60	7.198	689.47
11	1.50	2.27	4.771	155.51
Total	6.47			5,733.94

**TABLE 4.** Time, velocity and acceleration from trajectory.

By considering the trajectory of a robot, it is found that the factory engineer's program has a high energy input. The PSO technique was used to find the optimal energy consumption and not affect the production cycle time. After applying the PSO technique to optimization of energy efficiency is shown in table 5

Path	time	velocity	Acc.	E
1	0.60	0.35	1.92	87.75
2	0.58	0.35	1.92	88.90
3	1.27	1.21	3.01	256.37
4	0.56	0.11	0.65	61.79
5	0.57	0.11	0.65	256.37
6	1.92	0.95	1.53	157.82
7	0.57	0.28	1.57	256.37
8	0.56	0.28	1.57	256.37
9	2.00	0.09	0.14	157.72
10	0.60	0.32	1.79	256.37
11	2.60	1.28	1.53	156.21
Total	11.83			1,992.09

**TABLE 5.** Time, velocity and acceleration from PSO.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

By finding the best and most suitable time for the entire production system, the best point is determined by the PSO, and the result is the time and speed that will be used to program the robot. The results can be reduced. The power consumption from 5,733.94 joules reduce to 1,992.09 joules, which can be reduced to 65.25%. It can bring the speed and time used to assist in the robot program in the actual use to reduce the time to program the robot.

#### 4. Conclusion.

This article presents a new method for the optimizing energy consumption in production systems using robotic substitutes human. Because cost of human will be replaced by cost of energy from robots, it is essential that robots are planned for the optimum condition.

By examining the timing of each path, the production plan of the robot by the production engineer is planned by approximation time. Without considering the power consumption from speed and acceleration of the robot, the result form that method meaning over to use resource consumption. This article can be applied to the development of robotic motion plans.

Future development of the program will automatically develop the robot program by considering energy consumption and speed optimization using optimization techniques.

#### 5. Acknowledgements.

This work was supported by Thailand Research Fund and NSTDA.

#### 6. References.

- [1] Mats Jackson, Lean Automation: Combining Lean with Industrial Robotic in Real Examples, Master Thesis Work, Innovative Production, Malardalen University Sweden.
- [2] ABB, Robotics White Paper Ten Ways Robots Enhance Lean Manufacturing Environments.
- [3] <http://www2.eppo.go.th/vrs/VRS52-06-oil.html>
- [4] Pisut Pongchairerks, Various Versions of Particle Swarm Optimization Algorithm Applied for JOB-SHOP Schedule Problems, Journal of Industrial Education, Vol. 1 January 2012.
- [5] Yin-Yann Chen, A Production Planning Problem Solved by the Particle Swarm Optimization, The International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists 2010 Vol III, March 2010.
- [6] Yanwu Guo, Weidong Li, A R Mileham, G W Owen, Optimization of Integrated Process Planning and Scheduling Using a Particle Swarm Optimization Approach, International Journal of Production Research, Taylor & Francis, 2009, 47 (14), pp.3775-3796.
- [7] Pisut Pongchairerks, Particle swarm optimization algorithm applied to scheduling problems, Science Asia 35, Feb 2009
- [8] Asma Ayari, Sadok Bouamama, A New Multi-Robot Path Planning Algorithm: Dynamic Distributed Particle Swarm Optimization, The 2017 IEEE International Conference on Real Time Computing and Robotics, July 2017
- [9] Voratas Kachitvichyanukul, Comparison of Three Evolutionary Algorithms: GA, PSO, and DE, Industrial Engineering & Management Systems, Vol 11, No 3, September 2012, pp.215-223
- [10] Vu Truong Vu, A Comparison of Particle Swarm Optimization and Differential Evolution, International Journal on Soft Computing (IJSC) Vol.3, No.3, August 2012
- [11] Sahazati Md Rozali, Mohd Fua'ad Rahmat, Abdul Rashid Husain., Performance Comparison of Particle Swarm Optimization and Gravitational Search Algorithm to the Designed of Controller for Nonlinear System, Hindawi Publishing Corporation Journal of Applied Mathematics Volume 2014.

- [12] Supakit Nutayasakul, Evolutionary computation between Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization, Journal of Information Science and Technology, VOL 2. ISSUE 2 JUL-DEC 2011
- [13] Chao Ou, Weixing Lin, Comparison between PSO and GA for Parameters Optimization of PID Controller, 2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation June 25 - 28, 2006.
- [14] Rania Hassan, Babak Cohanime, Olivier de Weck, A Compare of Particle Swarm Optimization and The Genetic Algorithm, American Institute of Aeronautics and Astronautics, published by AIAA 2004.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้