



การออกแบบหุ่นยนต์ใต้อ่างภายในท่อโดยใช้แม่เหล็กถาวรและล้อโอโมนิ

วิทยานิพนธ์
ของ
คุณศุภ ฤกษ์ออกอด

พหุ ประชิต โสโณ

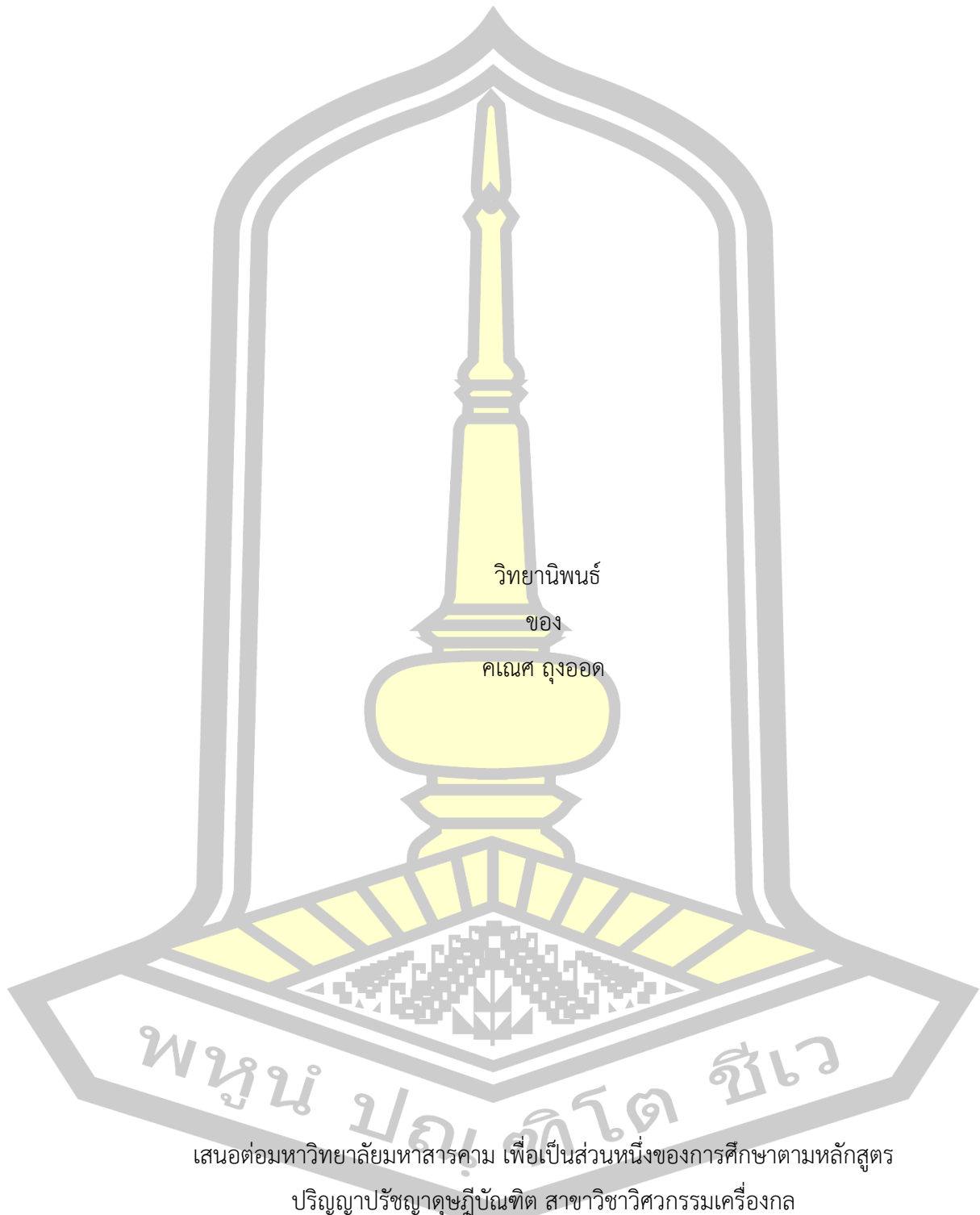
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มีนาคม 2564

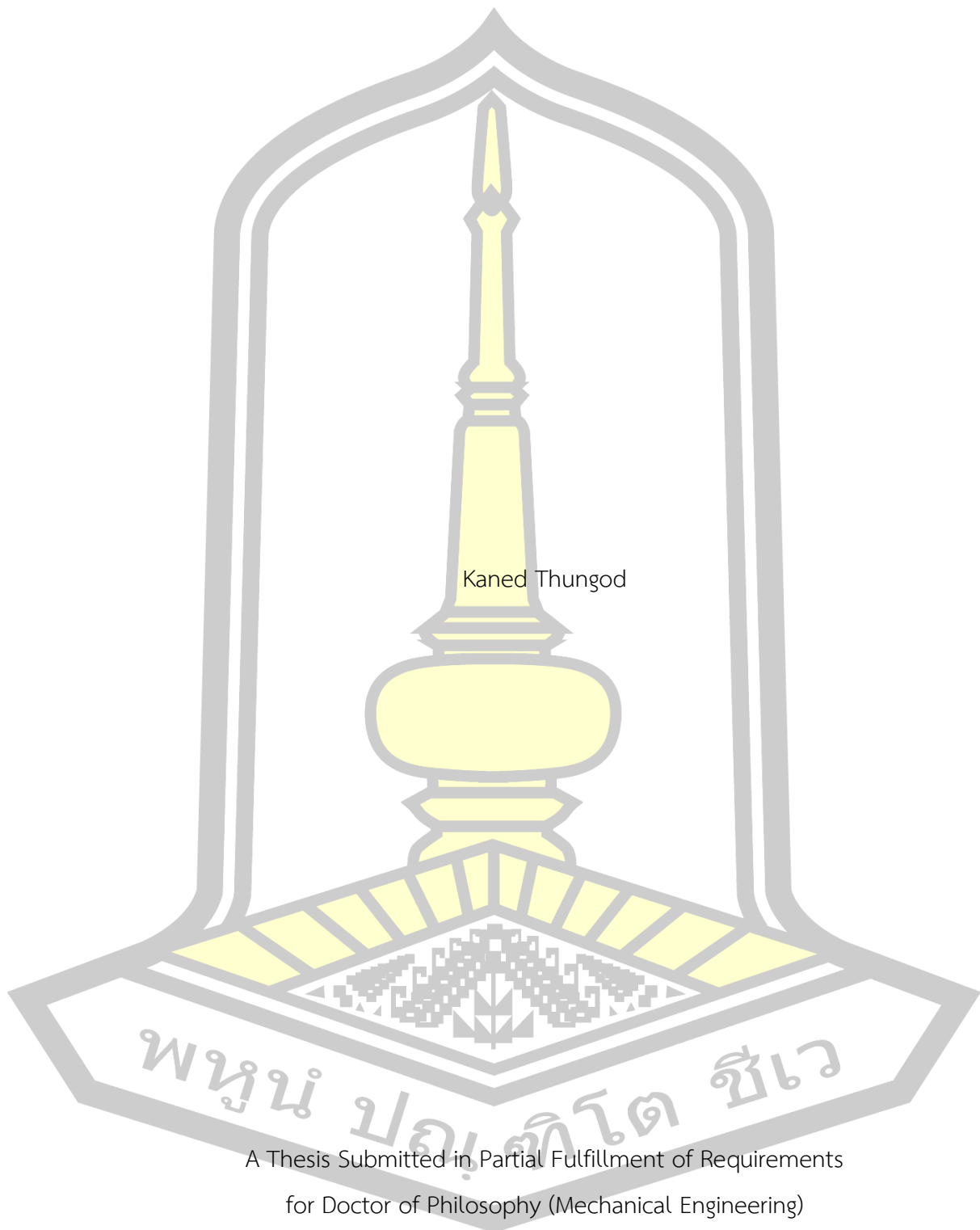
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การออกแบบหุ่นยนต์ใต้ออกในท่อโดยใช้แม่เหล็กถาวรและล้อโอโมนิ



เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มีนาคม 2564
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Design of an in-pipe climbing robot based on permanent magnets and omni wheels



Kaned Thungod

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering)

March 2021

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายคณศ กุงออกด แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. พงุทธิกร สมิตไมตรี)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. เกียรติสิน กาญจนวนิชกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผศ. ดร. ถวิดา มณีวรรณ)

กรรมการ

(ผศ. ดร. ชีรพัฒน์ ชมภูคำ)

กรรมการ

(ผศ. ดร. ธวัชชัย คุณะโคตร)

กรรมการ

(ผศ. ดร. วสันต์ ดั่งคำจันทร์)

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การออกแบบหุ่นยนต์ไต่ภายในท่อโดยใช้แม่เหล็กถาวรและล้อโอโมนิ		
ผู้วิจัย	คณศ ฤงออด		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติสิน กาญจนวินิชกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ถวิดา มณีวรรณ		
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2564

บทคัดย่อ

การตรวจสอบสภาพและซ่อมแซมท่อโลหะต่างๆ ในโรงงานอุตสาหกรรมนั้นมีความจำเป็นเพื่อช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดความเสียหายระหว่างการใช้งาน โดยการตรวจสอบปัจจุบันโดยผู้ปฏิบัติงานนั้นมีความเสี่ยงเนื่องจาก อุปกรณ์อยู่ที่สูง พื้นที่อับอากาศ หรือพื้นที่แคบ ขนาดเล็กไม่สามารถเข้าถึงได้ ดังนั้น งานวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อออกแบบและสร้างหุ่นยนต์สำรวจสภาพพื้นผิวภายในท่อโลหะหรือพื้นที่ที่เป็นเหล็ก เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานซ่อมบำรุงและลดความเสี่ยงของผู้ปฏิบัติงาน หุ่นยนต์ที่พัฒนาขึ้นสามารถเคลื่อนที่บนพื้นผิวได้ใน 2 รูปแบบคือ เคลื่อนที่ภายในท่อเหล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 นิ้วขึ้นไปและบนแผ่นเหล็กในแนวตั้งและแนวระดับ โดยใช้ล้อโอโมนิและแม่เหล็กถาวรช่วยในการเคลื่อนที่ สามารถเคลื่อนที่ในพื้นที่ที่มีน้ำสูงเท่ากับตัวหุ่นยนต์ ควบคุมหุ่นยนต์ด้วยชุดกล่องควบคุมโดยผู้ควบคุมผ่านกล่องที่มีการแสดงภาพจากกล้องหน้าและหลังจากตัวหุ่นยนต์ มีจอแสดงอุณหภูมิและความชื้นภายนอกและภายในหุ่นยนต์ การเชื่อมต่อหุ่นยนต์และชุดควบคุมใช้สายยาว 50 เมตร หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ในแนวตั้งได้ที่ความสูงสูงสุด 10 เมตร ดังนั้นหุ่นยนต์ที่พัฒนาขึ้นจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจสอบ ซ่อมบำรุง และลดความเสี่ยงของผู้ปฏิบัติงาน

คำสำคัญ : ล้อโอโมนิ, แม่เหล็กถาวร, หุ่นยนต์ไต่

พิมพ์ที่ ปณ. ที. โตะ ชีเว

TITLE	Design of an in-pipe climbing robot based on permanent magnets and omni wheels		
AUTHOR	Kaned Thungod		
ADVISORS	Associate Professor Kiattisin Kanjanawanishkul , Ph.D. Assistant Professor Thavida Maneewarn , Ph.D.		
DEGREE	Doctor of Philosophy	MAJOR	Mechanical Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2021

ABSTRACT

Periodic inspection and maintenance of steel pipelines in industrial need to be scheduled in order to reduce the risk of failure during process. Currently, such inspection is in high risk as a result that most devices are equipped in high position, confined space, narrow space unreachable. Therefore, this work aims at developing a robot used to survey a steel pipe or steel plate. For the goals of increasing working performance and decreasing the risk occurring to operators. The developed robot could move on the pipe surface in 2 patterns, including moving inside the steel pipe with a diameter larger than 5 inches and steel plate. Furthermore, it could move in both horizontal and vertical direction using omni wheels and permanent magnet. As the robot was designed to be waterproof in water level was not higher than robot. The robot can be control manually and monitored front and rear cameras, temperature and moisture with the Control station . The control cable length 50 meter for connected The robot and Control station. The robot can move in vertical motion with the maximum height of 10 m. Consequently, the robot developed in this work could enhance the pipeline inspection and maintenance, as well as reduce the working risk for the operators.

Keyword : Climbing Robot, Permanent Magnet, Omni Wheel

กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จของงานวิจัยนี้เกิดขึ้นจากโครงการ “การพัฒนาหุ่นยนต์เพื่อสำรวจภายในท่อโลหะโค้ง” โดยความร่วมมือของ โรงไฟฟ้าน้ำพอง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) และ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุกฝ่ายที่มีส่วนช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จดังนี้

ขอขอบพระคุณ โรงไฟฟ้าน้ำพอง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณการวิจัย และ ข้อเสนอแนะด้วยดี ตลอดระยะเวลาการดำเนินโครงการ ซึ่งคณะผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ซึ่งเป็นสถานที่ในการดำเนินโครงการวิจัย ให้การสนับสนุนเครื่องมือ จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.เกียรติสิน กาญจนวินิชกุล และ ผศ.ดร.ธิดา มณีวรรณ ที่ให้คำปรึกษาเป็นอย่างดีตลอดเวลาในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.พฤทธิกร สมิตไมตรี, ผศ.ดร.ธีรพัฒน์ ชมภูคำ, ผศ.ดร.ธวัชชัย คุณะโคตร, ผศ.ดร.วสันต์ ดั่งคำจันทร์ ที่ให้คำแนะนำในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ซึ่งส่งผลให้งานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณครอบครัวและผู้ที่ไม่ได้ถูกกล่าวถึงที่ให้การสนับสนุน และสุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยที่ได้จัดทำขึ้นนี้จะสามารถก่อประโยชน์ต่อการพัฒนาหุ่นยนต์สำรวจไม่ว่าด้านใดก็ตาม

คณศ ถู้ออด

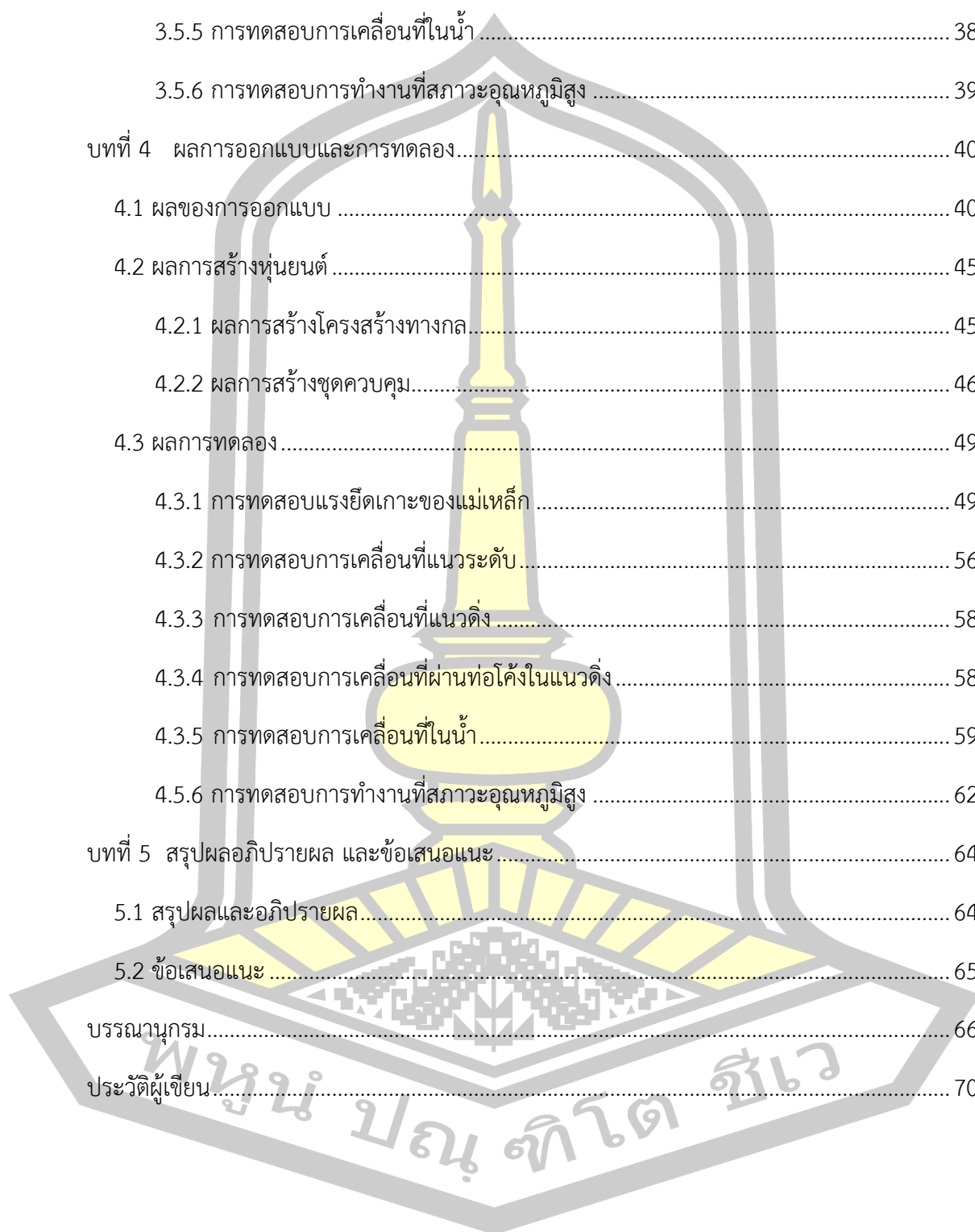
พูน ปณุ ทิโต ชีเว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของการวิจัย.....	1
1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐาน.....	2
1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	3
1.4.1 ศึกษาหลักการออกแบบหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในท่อเหล็กขนาดมากกว่า 5 นิ้ว ตาม มาตรฐานเหล็กโครงสร้างรูปพรรณกลวง มอก 107-2533 ที่มีลักษณะเป็น ท่อตรง ท่อ โค้ง 90 องศา โดยเคลื่อนที่ทั้งในแนวตั้งและแนวระดับ.....	3
1.4.2 ออกแบบหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่ภายในท่อเหล็กตามของเขตงานวิจัยข้อที่ 1 โดยใช้ แนวคิดการออกแบบหุ่นยนต์ตามหัวข้อ 1.3 สมมติฐาน ซึ่งการออกแบบนั้นได้คำนึงถึง การคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของหุ่นยนต์ การคำนวณโดยใช้จลศาสตร์หุ่นยนต์ (Robot Kinematic) การคำนวณหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ของหุ่นยนต์ที่เหมาะสมในการ ออกแบบหุ่นยนต์ในการเคลื่อนที่แนวตั้ง.....	3
1.4.3 สร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในท่อเหล็กตามการคำนวณและการออกแบบตามขอบเขต งานวิจัยข้อที่ 2.....	3
1.4.4 ทดสอบหาข้อจำกัดของหุ่นยนต์ ทดสอบหุ่นยนต์ตามขอบเขตของงานวิจัยในข้อที่ 1 ...	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3

บทที่ 2	ปริทัศน์เอกสารข้อมูล.....	4
2.1	ท่อเหล็ก.....	4
2.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.2.1	หุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในท่อแบบใช้ล้อ	8
2.2.2	หุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในท่อแบบหนอน.....	9
2.2.3	หุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในท่อแบบล้อสมมาตร.....	11
2.2.4	หุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในท่อแบบใช้แรงแม่เหล็ก.....	12
2.2.5	หุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในท่อโดยใช้ข้อต่อแบบยืดหยุ่น.....	13
2.3	การสื่อสารระหว่างเครื่องจักรและผู้ใช้งาน (Human Machine Interface).....	15
2.4	มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (brushless dc motor).....	16
2.5	มาตรฐานการสื่อสารข้อมูลดิจิทัลแบบอนุกรม RS485.....	16
บทที่ 3	วิธีดำเนินงานวิจัย.....	18
3.1	แนวคิดในการออกแบบโครงสร้างทางกล	18
3.1.1	การออกแบบล้อของหุ่นยนต์.....	19
3.1.2	การออกแบบการเคลื่อนของหุ่นยนต์.....	20
3.1.3	การคำนวณแรงยึดเกาะ.....	22
3.1.4	การคำนวณกำลังมอเตอร์สำหรับขับเคลื่อน.....	25
3.1.5	จลศาสตร์การควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์.....	27
3.2	การออกแบบโครงสร้างทางไฟฟ้า.....	29
3.3	การออกแบบส่วนควบคุม.....	32
3.5	ขั้นตอนการทดลอง.....	35
3.5.1	การทดสอบแรงยึดเกาะชุดล้อแม่เหล็ก.....	35
3.5.2	การทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวระดับ.....	35
3.5.3	การทดสอบการเคลื่อนที่แนวตั้ง.....	36

3.5.4 การทดสอบการเคลื่อนที่ผ่านท่อโค้งในแนวตั้ง	37
3.5.5 การทดสอบการเคลื่อนที่ในน้ำ	38
3.5.6 การทดสอบการทำงานที่สภาวะอุณหภูมิสูง	39
บทที่ 4 ผลการออกแบบและการทดลอง.....	40
4.1 ผลของการออกแบบ	40
4.2 ผลการสร้างหุ่นยนต์	45
4.2.1 ผลการสร้างโครงสร้างทางกล.....	45
4.2.2 ผลการสร้างชุดควบคุม.....	46
4.3 ผลการทดลอง.....	49
4.3.1 การทดสอบแรงยึดเกาะของแม่เหล็ก	49
4.3.2 การทดสอบการเคลื่อนที่แนวระดับ.....	56
4.3.3 การทดสอบการเคลื่อนที่แนวตั้ง.....	58
4.3.4 การทดสอบการเคลื่อนที่ผ่านท่อโค้งในแนวตั้ง.....	58
4.3.5 การทดสอบการเคลื่อนที่ในน้ำ.....	59
4.5.6 การทดสอบการทำงานที่สภาวะอุณหภูมิสูง	62
บทที่ 5 สรุปผลอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	64
5.1 สรุปผลและอภิปรายผล.....	64
5.2 ข้อเสนอแนะ	65
บรรณานุกรม.....	66
ประวัติผู้เขียน.....	70



สารบัญภาพ

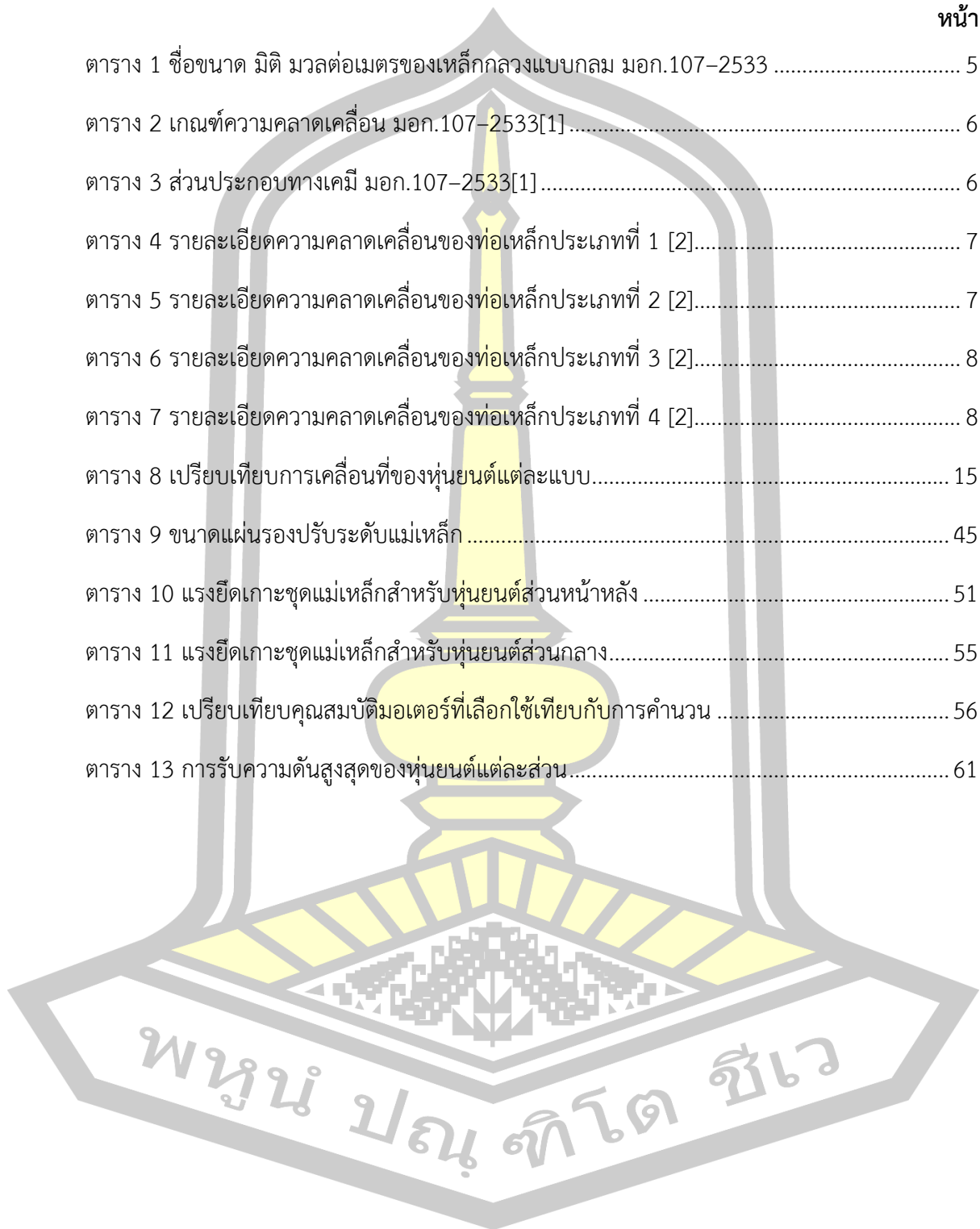
	หน้า
ภาพประกอบที่ 1 หุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยล้อ [3].....	9
ภาพประกอบที่ 2 หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบหนอนโดยใช้มอเตอร์ [4].....	9
ภาพประกอบที่ 3 หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบหนอนโดยใช้สนามแม่เหล็ก[5].....	10
ภาพประกอบที่ 4 หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบหนอนโดยใช้ระบบไฮดรอลิก[8].....	10
ภาพประกอบที่ 5 หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบล้อสมมาตร [9].....	11
ภาพประกอบที่ 6 หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบล้อสมมาตรงานวิจัยของ [10]	12
ภาพประกอบที่ 7 หุ่นยนต์แบบใช้แรงแม่เหล็ก [15], [16].....	12
ภาพประกอบที่ 8 หุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในท่อโดยใช้ข้อต่อแบบยืดหยุ่น [21].....	13
ภาพประกอบที่ 9 หุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในท่อโดยใช้ข้อต่อแบบยืดหยุ่น [22].....	14
ภาพประกอบที่ 10 ลักษณะหน้าจอสื่อแสดงผลใช้ร่วมกับ PLC [23].....	15
ภาพประกอบที่ 11 โครงสร้างมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน [24]	16
ภาพประกอบที่ 12 การเชื่อมต่อ RS485 ระหว่างอุปกรณ์ Master และ Slave [25]	17
ภาพประกอบที่ 13 แนวคิดการออกแบบหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในท่อ	19
ภาพประกอบที่ 14 แนวคิดการออกแบบขนาดของหุ่นยนต์.....	19
ภาพประกอบที่ 15 ล้อแบบหลายทิศทาง	20
ภาพประกอบที่ 16 ข้อต่อและการวางชุดแม่เหล็กของหุ่นยนต์	20
ภาพประกอบที่ 17 สมมุติฐานการเคลื่อนที่ในท่อตรง	21
ภาพประกอบที่ 18 ทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แบบ 2 แกน.....	21
ภาพประกอบที่ 19 สมมุติฐานการเคลื่อนที่แนวโค้ง.....	22
ภาพประกอบที่ 20 ผลการจำลองสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเมื่อแม่เหล็กอยู่ในท่อ	23
ภาพประกอบที่ 21 ผลการจำลองสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเมื่อแม่เหล็กอยู่บนผิวเหล็ก	23
ภาพประกอบที่ 22 แรงยึดเกาะและแรงโน้มถ่วงซึ่งมีผลต่อการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในแนวตั้ง	24

ภาพประกอบที่ 23	ระบบพิกัดของหุ่นยนต์ (ก) ภายในท่อเหล็ก (ข) แผ่นเหล็ก	27
ภาพประกอบที่ 24	โครงสร้างการเชื่อมต่ออุปกรณ์ของหุ่นยนต์	31
ภาพประกอบที่ 25	แผงควบคุมส่วนมองภาพ	32
ภาพประกอบที่ 26	แผงส่วนควบคุมหุ่นยนต์	33
ภาพประกอบที่ 27	การออกแบบหน้าจอแสดงผล	34
ภาพประกอบที่ 28	การออกแบบการทดลองแรงยึดเกาะของแม่เหล็ก	35
ภาพประกอบที่ 29	การออกแบบการทดสอบหาแรงดึงภาระสูงสุด	36
ภาพประกอบที่ 30	การออกแบบการทดสอบดึงสายควบคุม	36
ภาพประกอบที่ 31	การออกแบบการทดสอบการเคลื่อนที่แนวตั้ง	37
ภาพประกอบที่ 32	การทดสอบการเคลื่อนที่ผ่านท่อโค้งในแนวตั้งในรูปแบบโค้งคว่ำและโค้งหงาย..	38
ภาพประกอบที่ 33	ผลการออกแบบหุ่นยนต์	40
ภาพประกอบที่ 34	โครงสร้างภายในชุดขับเคลื่อนส่วนหน้า	41
ภาพประกอบที่ 35	โครงสร้างภายในชุดขับเคลื่อนส่วนกลาง	41
ภาพประกอบที่ 36	โครงสร้างภายในชุดขับเคลื่อนส่วนหลัง	42
ภาพประกอบที่ 37	ขนาดของหุ่นยนต์	42
ภาพประกอบที่ 38	หุ่นยนต์เมื่ออยู่ในท่อขนาด 5 นิ้ว	43
ภาพประกอบที่ 39	ขนาดของหุ่นยนต์เมื่อเทียบกับท่อ	43
ภาพประกอบที่ 40	แผ่นรองปรับระดับแม่เหล็ก	44
ภาพประกอบที่ 41	ความสัมพันธ์ของขนาดหุ่นยนต์และแผ่นรองแม่เหล็ก	44
ภาพประกอบที่ 42	ผลการสร้างหุ่นยนต์ตามแบบ	46
ภาพประกอบที่ 43	ผลการสร้างชุดควบคุมและกล่องเก็บสายไฟ	47
ภาพประกอบที่ 44	ชุดบันทึกภาพด้านหน้าและด้านหลังหุ่นยนต์	47
ภาพประกอบที่ 45	ชุดควบคุมหุ่นยนต์	48
ภาพประกอบที่ 46	ชุดม้วนเก็บสายไฟ	48

ภาพประกอบที่ 47 การทดสอบแรงดึงชุดแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ส่วนหน้าหลัง	49
ภาพประกอบที่ 48 ผลการทดสอบแรงดึงแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ส่วนหน้าหลังกับเหล็กแผ่น	50
ภาพประกอบที่ 49 ผลการทดสอบแรงดึงแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ส่วนหน้าหลังกับท่อเหล็กขนาด 5 นิ้ว	50
ภาพประกอบที่ 50 ผลการทดสอบแรงดึงแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ส่วนหน้าหลังกับท่อเหล็กขนาด 6 นิ้ว	51
ภาพประกอบที่ 51 การทดสอบแรงดึงชุดแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ส่วนกลาง	52
ภาพประกอบที่ 52 ผลการทดสอบแรงดึงแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ส่วนกลางกับเหล็กแผ่น	53
ภาพประกอบที่ 53 ผลการทดสอบแรงดึงแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ส่วนกลางกับท่อเหล็กขนาด 5 นิ้ว	54
ภาพประกอบที่ 54 ผลการทดสอบแรงดึงแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ส่วนกลางกับท่อเหล็กขนาด 6 นิ้ว	54
ภาพประกอบที่ 55 มอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนและมอเตอร์สำหรับหมุนกลิ้ง	56
ภาพประกอบที่ 56 ผลการทดสอบแรงดึงในการเคลื่อนที่แนวระดับ	57
ภาพประกอบที่ 57 ผลการทดสอบแรงดึงสายควบคุมในการเคลื่อนที่แนวระดับ	57
ภาพประกอบที่ 58 การทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง	58
ภาพประกอบที่ 59 การทดสอบเคลื่อนที่ผ่านท่อโค้ง (ก) จากแนวระดับไปแนวตั้ง (ข) จากแนวตั้งไปแนวระดับ	59
ภาพประกอบที่ 60 การทดสอบวัดความสามารถในการรับความดันภายในตัวหุ่นยนต์	60
ภาพประกอบที่ 61 จุดเชื่อมต่อสายลมชั่วคราวที่หุ่นยนต์	60
ภาพประกอบที่ 62 ชุด Air service unit สำหรับทดสอบขีดจำกัดการรับความดันของหุ่นยนต์	61
ภาพประกอบที่ 63 การทดสอบการเคลื่อนที่ในน้ำ	62
ภาพประกอบที่ 64 เครื่องอบลมร้อนสำหรับทดสอบการทำงานที่อุณหภูมิ 80 องศา	62
ภาพประกอบที่ 65 หุ่นยนต์ขณะทดสอบในเครื่องอบลมร้อน	63

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 ชื่อขนาด มิติ มวลต่อเมตรของเหล็กกลางแบบกลม มอก.107-2533	5
ตาราง 2 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน มอก.107-2533[1]	6
ตาราง 3 ส่วนประกอบทางเคมี มอก.107-2533[1]	6
ตาราง 4 รายละเอียดความคลาดเคลื่อนของท่อเหล็กประเภทที่ 1 [2].....	7
ตาราง 5 รายละเอียดความคลาดเคลื่อนของท่อเหล็กประเภทที่ 2 [2].....	7
ตาราง 6 รายละเอียดความคลาดเคลื่อนของท่อเหล็กประเภทที่ 3 [2].....	8
ตาราง 7 รายละเอียดความคลาดเคลื่อนของท่อเหล็กประเภทที่ 4 [2].....	8
ตาราง 8 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แต่ละแบบ.....	15
ตาราง 9 ขนาดแผ่นรองปรับระดับแม่เหล็ก	45
ตาราง 10 แรงยึดเกาะชุดแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ส่วนหน้าหลัง	51
ตาราง 11 แรงยึดเกาะชุดแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ส่วนกลาง.....	55
ตาราง 12 เปรียบเทียบคุณสมบัติมอเตอร์ที่เลือกใช้ในการคำนวณ	56
ตาราง 13 การรับความดันสูงสุดของหุ่นยนต์แต่ละส่วน.....	61



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของการวิจัย

ท่อเหล็กถูกใช้เป็นเครื่องมือหลักในการขนส่ง ลำเลียง สิ่งของประเภท แก๊ส น้ำ น้ำมัน หรือของเหลว โดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมเพื่อขนส่งวัตถุดิบไปตามที่ต่าง ๆ ช่วยเพิ่มความรวดเร็วและประสิทธิภาพในการทำงาน หรือเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ในการใช้งานท่อเป็นเวลานานจะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของท่อจากสภาพแวดล้อมภายนอกหรือวัตถุในการลำเลียงเช่น การเกิดสนิม การบวม การกร่อน ซึ่งปัญหาเหล่านี้หากไม่เร่งแก้ไข เมื่อเกิดความเสียหายจะทำให้เครื่องจักรหยุดการทำงานหรือทำให้งานไม่สามารถดำเนินต่อไปได้ เกิดการสูญเสียรายได้จากการปิดซ่อมแซม ดังนั้นการสำรวจท่อเพื่อซ่อมบำรุงจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อป้องกันการเกิดความเสียหายและทำงานนั้นดำเนินได้ตามแผน

การสำรวจท่อในปัจจุบันทำได้จากการสำรวจดูสภาพจากภายนอกท่อโดยผู้ปฏิบัติงาน แต่การสำรวจภายในท่อนั้นทำได้ยากกับท่อที่มีขนาดเล็ก ท่อที่มีทางเดินซับซ้อน และการสำรวจท่อที่อยู่สูงท่อที่มีแก๊สอันตราย ซึ่งมีความเสี่ยงที่จะเกิดอันตรายกับผู้ปฏิบัติงาน ดังนั้นการใช้หุ่นยนต์เข้าไปสำรวจจึงเป็นทางออกที่น่าสนใจ โดยภายในท่อเหล็กนั้นมีอุปสรรคสำหรับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์คือท่อที่มีลักษณะโค้ง ท่อแยก ท่อแนวตั้ง และท่อที่มีขนาดเปลี่ยนแปลง ซึ่งทำให้ยากต่อการออกแบบหุ่นยนต์ มีงานวิจัยที่ออกแบบหุ่นยนต์สำรวจภายในท่อไว้หลายรูปแบบเช่น หุ่นยนต์แบบล้อ ออกแบบมาเพื่อใช้ในการเคลื่อนที่ในระดับ มีความง่ายในเรื่องการควบคุมและการออกแบบ หุ่นยนต์แบบหนอน หุ่นยนต์มีขนาดเล็กสามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งท่อแนวระดับและแนวตั้ง มีขนาดเล็ก แต่ไม่สามารถเคลื่อนที่ในท่อโค้งได้ หุ่นยนต์แบบสมมาตรใช้แรงกดกำแพง และหุ่นยนต์แบบแม่เหล็ก สามารถเคลื่อนที่แนวระดับ แนวตั้ง และท่อโค้งได้ แต่เมื่อเจอกับท่อที่มีลักษณะทางแยกจะควบคุมทิศทางได้ยาก ซึ่งแต่ละงานวิจัยถูกออกแบบมาเพื่อการใช้งานตามลักษณะและสภาพแวดล้อมของท่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การออกแบบและสร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ในแนวตั้งเพื่อสำรวจภายในท่อเหล็กที่มีขนาด 5 นิ้วขึ้นไปจนถึงแผ่นเหล็ก เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถทำงานได้ในพื้นที่ที่หลากหลาย โดยท่อมีลักษณะเป็น ท่อตรงและท่อโค้ง 90 องศา โดยใช้แม่เหล็กถาวรในการยึดเกาะภายในท่อเพื่อให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวตั้ง ออกแบบให้มีลักษณะเป็น 3 โมดูล ต่อกันเพื่อให้หุ่นยนต์โค้งตามแนวท่อ และแต่ละโมดูลใช้ล้อขับเคลื่อนแบบโอโมนิเพื่อให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่แนวข้างได้สำหรับใช้เปลี่ยนตำแหน่งหุ่นยนต์เพื่อให้ง่ายสำหรับการเคลื่อนที่ผ่านท่อโค้งและช่วยให้แนวแกนของ

หุ่นยนต์ขนานกับแนวแกนของท่อ เพื่อให้ง่ายในการควบคุม และเลือกใช้อุปกรณ์ภายในหุ่นยนต์เป็นแบบที่ไม่มีประกายไฟเพื่อลดความเสี่ยงเมื่อหุ่นยนต์ทำงานในพื้นที่ที่มีสารไวไฟ

1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย

เพื่อศึกษา ออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่ภายในท่อเหล็กที่มีลักษณะเป็นท่อตรง ท่อโค้ง 90 องศา ที่ขนาดรัศมีต่าง ๆ จนถึงแผ่นเรียบ โดยเคลื่อนที่ได้ทั้งในแนวตั้งและแนวระดับ เพื่อเป็นหุ่นยนต์สำรวจ สามารถทำงานในพื้นที่ที่มีน้ำท่วมขังและหุ่นยนต์มีความเสี่ยงน้อยเมื่อทำงานในพื้นที่ที่มีสารไวไฟ

1.3 สมมติฐาน

การออกแบบหุ่นยนต์ใต้น้ำท่อเหล็กด้วยการใช้แม่เหล็กถาวรร่วมกับล้อแบบโอโมนิ หุ่นยนต์จะสามารถเคลื่อนที่ได้ในท่อเหล็กที่เป็นท่อตรงและท่อโค้ง ในแนวตั้งและแนวระดับ ออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์เป็นระบบปิดและเลือกใช้อุปกรณ์ที่ไม่ก่อให้เกิดประกายไฟ ทำให้หุ่นยนต์สามารถทำงานในน้ำและพื้นที่ที่มีสารไวไฟ



1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.4.1 ศึกษาหลักการออกแบบหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในท่อเหล็กขนาดมากกว่า 5 นิ้ว ตามมาตรฐานเหล็กโครงสร้างรูปพรรณกลวง มอก 107-2533 ที่มีลักษณะเป็น ท่อตรง ท่อโค้ง 90 องศา โดยเคลื่อนที่ทั้งในแนวตั้งและแนวระดับ

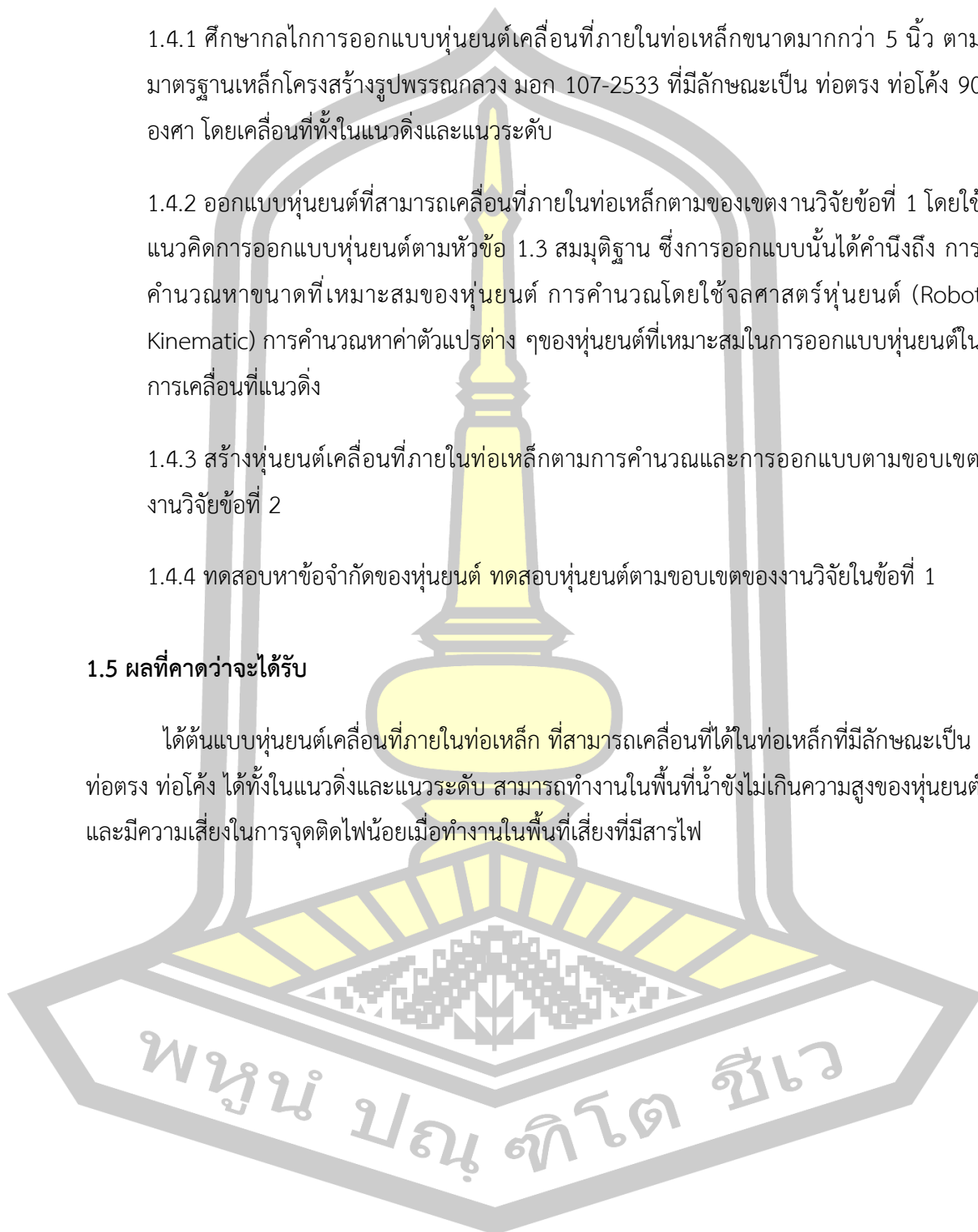
1.4.2 ออกแบบหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่ภายในท่อเหล็กตามของเขตงานวิจัยข้อที่ 1 โดยใช้แนวคิดการออกแบบหุ่นยนต์ตามหัวข้อ 1.3 สมมุติฐาน ซึ่งการออกแบบนั้นได้คำนึงถึง การคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของหุ่นยนต์ การคำนวณโดยใช้จลศาสตร์หุ่นยนต์ (Robot Kinematic) การคำนวณหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ของหุ่นยนต์ที่เหมาะสมในการออกแบบหุ่นยนต์ในการเคลื่อนที่แนวตั้ง

1.4.3 สร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในท่อเหล็กตามการคำนวณและการออกแบบตามขอบเขตงานวิจัยข้อที่ 2

1.4.4 ทดสอบหาข้อจำกัดของหุ่นยนต์ ทดสอบหุ่นยนต์ตามขอบเขตของงานวิจัยในข้อที่ 1

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ต้นแบบหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในท่อเหล็ก ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ในท่อเหล็กที่มีลักษณะเป็นท่อตรง ท่อโค้ง ได้ทั้งในแนวตั้งและแนวระดับ สามารถทำงานในพื้นที่น้ำขังไม่เกินความสูงของหุ่นยนต์ และมีความเสี่ยงในการจุดติดไฟน้อยเมื่อทำงานในพื้นที่เสี่ยงที่มีสารไฟ



บทที่ 2

ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

ในบทนี้ได้นำเสนอความสำคัญของท่อเหล็ก ความหมายของท่อเหล็กที่มีใช้ตามมาตรฐานไทย งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับแบบต่าง ๆ ของหุ่นยนต์สำรวจภายในท่อเหล็ก อุปกรณ์สำคัญต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างหุ่นยนต์ในงานวิจัยนี้

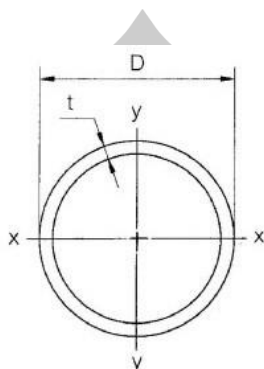
2.1 ท่อเหล็ก

ท่อเหล็กถูกใช้ เป็นเครื่องมือหลักในการขนส่ง ลำเลียง สิ่งของประเภท แก๊ส น้ำ น้ำมัน หรือของเหลว โดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมเพื่อขนส่งวัตถุดิบไปยังที่ต่าง ๆ ช่วยเพิ่มความรวดเร็วและประสิทธิภาพในการทำงาน โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง มาตรฐานของท่อเหล็กตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก) ของเหล็กกลางแบบกลม มอก.107-2533

ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเหล็กโครงสร้างรูปพรรณกลวงตามมาตรฐานเลขที่ มอก.107-2533 [1] แบ่งตามรูปภาคตัดออกเป็น 3 แบบ คือ แบบกลม แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสและแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเฉพาะ แบบกลม ตามจุดประสงค์ของงานวิจัย เหล็กกลางแบบกลมแบ่งออกตามสมบัติในการดึงออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพคือ HS41 HS50 และ HS51 โดยมีชื่อขนาด มิติ มวลต่อเมตร ดังตาราง 1 มีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนดังตาราง 2 และส่วนประกอบทางเคมีดังตาราง 3

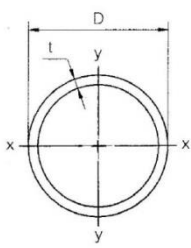
พหุ ประ โท ชี เว

ตาราง 1 ชื่อขนาด มิติ มวลต่อเมตรของเหล็กกลางแบบกลม มอก.107-2533



ชื่อขนาด	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก	ความหนา	พื้นที่หน้าตัด	มวลต่อเมตร	โมเมนต์ความเฉื่อย	มอดุลัสภาคตัด	รัศมีไจเรชัน
	mm	mm	cm ²		cm ⁴	cm ³	
	D	t	A		I	Z	
15	21 .7	2.0	1. 238	0. 972	0. 607	0. 560	0.700
20	27 .2	2.3	1. 799	1. 41	1. 41	1. 03	0.880
25	34 .0	2.3	2. 291	1. 80	2. 89	1. 70	1.12
32	42 .7	2.3	2. 919	2. 29	5. 97	2. 80	1.43
40	48 .6	2.3	3. 345	2. 63	8. 99	3. 70	1.64
		3.2	4. 564	3. 58	11. 8	4. 86	1.61
50	60 .5	3.2	5. 760	4. 52	23. 7	7. 84	2.03
		4.0	7. 100	5. 57	28. 5	9. 41	2.00
65	76 .3	3.2	7. 349	5. 77	49. 2	12. 9	2.59
		4.0	9. 085	7. 13	59. 5	15. 6	2.56
80	89 .1	3.2	8. 636	6. 78	79. 8	17. 9	3.04
		4.0	10. 69	8. 39	97. 0	21. 8	3.01
90	101 .6	3.2	9. 892	7. 76	120	23. 6	3.48
		4.0	12. 26	9. 63	146	28. 8	3.45
100	114 .3	3.2	11. 17	8. 77	172	30. 2	3.93
		4.5	15. 52	12. 2	234	41. 0	3.89
		5.6	19. 12	15. 0	283	49. 6	3.85
125	139 .8	4.5	19. 13	15. 0	438	62. 7	4.79
		6.0	25. 22	19. 8	566	80. 9	4.74
150	165 .2	4.5	22. 72	17. 8	734	88. 9	5.68
		6.0	30. 01	23. 6	952	115	5.63
175	190 .7	5.0	29. 17	22. 9	1 260	132	6.57
		7.0	40. 40	31. 7	1 710	179	6.50
200	216 .3	6.0	39. 61	31. 1	2 190	203	7.44
		8.0	52. 35	41. 1	2 840	263	7.37

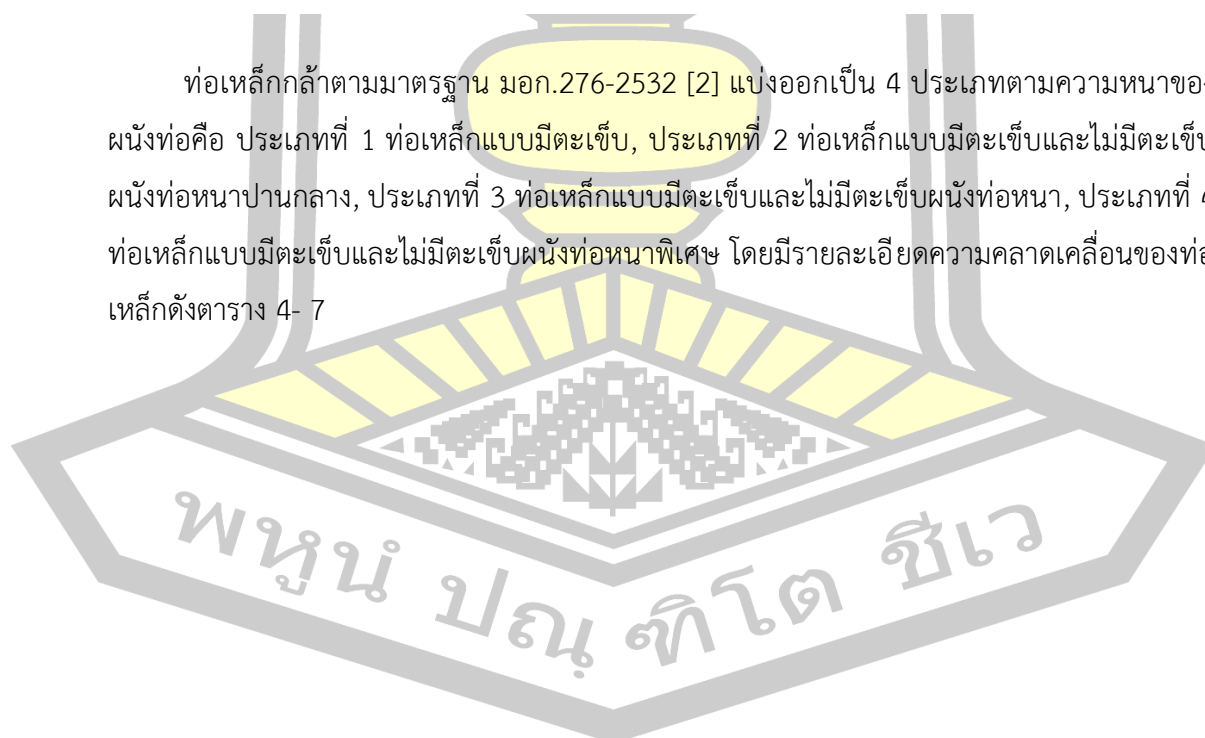
ตาราง 2 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน มอก.107-2533[1]

มิติ มิลลิเมตร		เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน	หมายเหตุ
เส้นผ่านศูนย์กลาง	ไม่เกิน 50	± 0.5 มิลลิเมตร	
	เกิน 50	\pm ร้อยละ 1	
ความหนา	2.0 ถึง 3.2	± 0.3 มิลลิเมตร	
	4.0 ถึง 8.0	\pm ร้อยละ 10	
ความตรง		\pm ร้อยละ 0.3 ของความยาว	
ความยาว		\pm ไม่กำหนด	
		0	

ตาราง 3 ส่วนประกอบทางเคมี มอก.107-2533[1]

ชั้นคุณภาพ	ส่วนประกอบทางเคมี สูงสุด ร้อยละ				
	คาร์บอน	ซิลิคอน	แมงกานีส	ฟอสฟอรัส	กำมะถัน
HS 41	0.28	-	-	0.048	0.048
HS 50	0.21	0.57	1.53	0.048	0.048
HS 51	0.33	0.37	0.33 ถึง 1.03	0.048	0.048

ท่อเหล็กกล้าตามมาตรฐาน มอก.276-2532 [2] แบ่งออกเป็น 4 ประเภทตามความหนาของผนังท่อคือ ประเภทที่ 1 ท่อเหล็กแบบมีตะเข็บ, ประเภทที่ 2 ท่อเหล็กแบบมีตะเข็บและไม่มีตะเข็บ ผนังท่อหนาปานกลาง, ประเภทที่ 3 ท่อเหล็กแบบมีตะเข็บและไม่มีตะเข็บผนังท่อหนา, ประเภทที่ 4 ท่อเหล็กแบบมีตะเข็บและไม่มีตะเข็บผนังท่อหนาพิเศษ โดยมีรายละเอียดความคลาดเคลื่อนของท่อเหล็กดังตาราง 4- 7



ตาราง 4 รายละเอียดความคลาดเคลื่อนของท่อเหล็กประเภทที่ 1 [2]

ขนาดระบุ	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก		ความยาว	เกณฑ์ความคลาด เคลื่อนของความยาว	ความหนา ของผนังท่อ	เกณฑ์ความคลาด เคลื่อนของความหนา ของผนังท่อ	มวลต่อเมตร	เกณฑ์ความ คลาดเคลื่อน ของมวลต่อเมตร
	มิลลิเมตร							
	ต่ำสุด	สูงสุด		มิลลิเมตร	มิลลิเมตร		กิโลกรัม	
8	13.2	13.6	หากมิได้มี การตกลงกัน เป็นอย่างอื่น ระหว่างผู้ซื้อ กับผู้ขาย ให้ ท่อเหล็กยาว ท่อนละ 4 ถึง 7 เมตร	+ 50 0	1.8	+ ไม่จำกัด - ร้อยละ 8	0.515	+ ร้อยละ 10 - ร้อยละ 8
10	16.7	17.1			1.8		0.670	
15	21.0	21.4			2.0		0.947	
20	26.4	26.9			2.3		1.380	
25	33.2	33.8			2.6		1.980	
32	41.9	42.5			2.6		2.540	
40	47.8	48.4			2.9		3.230	
50	59.6	60.2			2.9		4.080	
65	75.2	76.0			3.2		5.710	
80	87.9	88.7			3.2		6.720	
100	113.0	113.9	3.6	9.750				

ตาราง 5 รายละเอียดความคลาดเคลื่อนของท่อเหล็กประเภทที่ 2 [2]

ขนาดระบุ	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก		ความยาว	เกณฑ์ความคลาด เคลื่อนของความยาว	ความหนา ของผนังท่อ	เกณฑ์ความคลาด เคลื่อนของความหนา ของผนังท่อ	มวลต่อเมตร	เกณฑ์ความ คลาดเคลื่อน ของมวลต่อเมตร
	มิลลิเมตร							
	ต่ำสุด	สูงสุด		มิลลิเมตร	มิลลิเมตร		กิโลกรัม	
8	13.2	14.0	หากมิได้มี การตกลงกัน เป็นอย่างอื่น ระหว่างผู้ซื้อ กับผู้ขาย ให้ ท่อเหล็กยาว ท่อนละ 4 ถึง 7 เมตร	+ 50 0	2.3	+ ไม่จำกัด - ร้อยละ 8	0.641	+ ร้อยละ 10 - ร้อยละ 8
10	16.7	17.5			2.3		0.839	
15	21.0	21.8			2.6		1.210	
20	26.5	27.3			2.6		1.560	
25	33.3	34.2			3.2		2.410	
32	42.0	42.9			3.2		3.100	
40	47.9	48.8			3.2		3.560	
50	59.7	60.8			3.6		5.030	
65	75.3	76.6			3.6		6.420	
80	88.0	89.5			4.0		8.360	
100	113.1	115.0	4.5	12.200				
125	138.5	140.8	5.0	16.600				
150	163.9	166.5	5.0	19.800				

พูน ปณ ทิโต ชีเว

ตาราง 6 รายละเอียดความคลาดเคลื่อนของท่อเหล็กประเภทที่ 3 [2]

ขนาดระบุ	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก มิลลิเมตร		ความยาว	เกณฑ์ความคลาด เคลื่อนของความยาว มิลลิเมตร	ความหนา ของผนังท่อ มิลลิเมตร	เกณฑ์ความคลาด เคลื่อนของความหนา ของผนังท่อ	มวลต่อเมตร กิโลกรัม	เกณฑ์ความ คลาดเคลื่อน ของมวลต่อเมตร
	ต่ำสุด	สูงสุด						
15	21.0	21.8	หากมิได้มี การตกลงกัน เป็นอย่างอื่น ระหว่างผู้ซื้อ กับผู้ขาย ให้ ท่อเหล็กยาว ท่อนละ 4 ถึง 7 เมตร	+ 50 0	3.2 3.2 4.0 4.0 4.0 4.5 4.5 5.0 5.4 5.4 5.4	+ ไม่จำกัด - ร้อยละ 12.5	1.44 1.87 2.93 3.79 4.37 6.19 7.93 10.30 14.50 17.90 21.30	+ ร้อยละ 10 - ร้อยละ 8
20	26.5	27.3						
25	33.3	34.2						
32	42.0	42.9						
40	47.9	48.8						
50	59.7	60.8						
65	75.3	76.6						
80	88.0	89.5						
100	113.1	115.0						
125	138.5	140.8						
150	163.9	166.5						

ตาราง 7 รายละเอียดความคลาดเคลื่อนของท่อเหล็กประเภทที่ 4 [2]

ขนาดระบุ	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก มิลลิเมตร		ความยาว	เกณฑ์ความคลาด เคลื่อนของความยาว มิลลิเมตร	ความหนา ของผนังท่อ มิลลิเมตร	เกณฑ์ความคลาด เคลื่อนของความหนา ของผนังท่อ	มวลต่อเมตร กิโลกรัม	เกณฑ์ความ คลาดเคลื่อน ของมวลต่อเมตร
	ต่ำสุด	สูงสุด						
65	72.3	73.7	หากมิได้มีการ ตกลงกันเป็น อย่างอื่นระหว่าง ผู้ซื้อกับผู้ขาย ให้ท่อเหล็กยาว ท่อนละ 4 ถึง 7 เมตร	+ 50 0	5.2 5.5 6.0 6.6 7.1 7.0 8.2	+ ไม่จำกัด - ร้อยละ 12.5	8.6 11.3 16.1 21.8 28.3 36.8 42.5	± ร้อยละ 5
80	88.0	89.8						
100	113.2	115.4						
125	139.9	142.7						
150	166.6	170.0						
200 ก	216.9	221.3						
200 ข	216.9	221.3						

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่ศึกษาการออกแบบหุ่นยนต์สำรวจท่อหลายชนิดเช่น ท่อเหล็ก ท่อพลาสติก ท่อซีเมนต์ ในท่อแต่ละชนิดมีการออกแบบที่แตกต่างกันตามชนิดและลักษณะของท่อ โดยผู้วิจัยได้แบ่งการออกแบบหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในท่อไว้ 5 รูปแบบดังนี้

2.2.1 หุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในท่อแบบใช้ล้อ

การออกแบบหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในท่อโดยใช้ล้อดังงานวิจัยของ [3] เพื่อใช้ในการทำงานขุดรอยเชื่อมภายในท่อขนาดตั้งแต่ 550 มิลลิเมตร ถึง 714 มิลลิเมตร ใช้แสงเลเซอร์และกล้องในการสแกนหารอยเชื่อมจากนั้นทำการถือค้ำตำแหน่งหุ่นยนต์โดยใช้การยึดค้ำยันที่ด้านบนของท่อ และใช้เครื่องขุดที่ติดบนแขนหมุนทำการขุดรอยเชื่อม

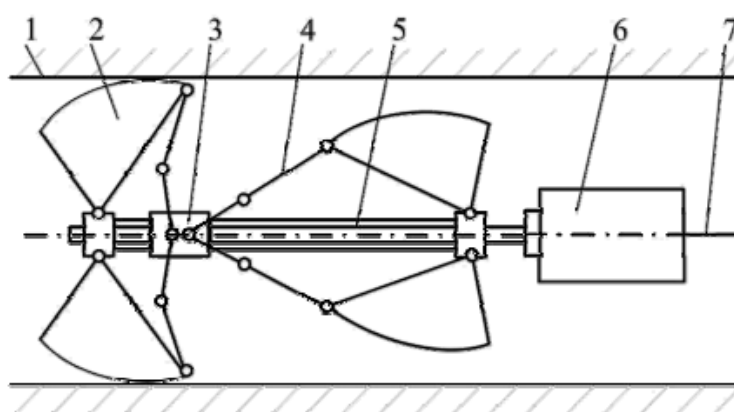


ภาพประกอบที่ 1 หุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยล้อ [3]

มีหลักการออกแบบการเคลื่อนที่โดยใช้ล้อที่มีลักษณะป้องกันเสียงกับตัวหุ่นยนต์ได้เพื่อให้ล้อสัมผัสเป็นแนวเดียวกันกับท่อดังภาพประกอบที่ 1 เพื่อให้หุ่นยนต์มั่นคงเมื่อทำการลื้อคตำแหน่ง โดยงานวิจัยนี้เน้นการเคลื่อนที่ในท่อแนวระดับเท่านั้น

2.2.2 หุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในท่อแบบนอน

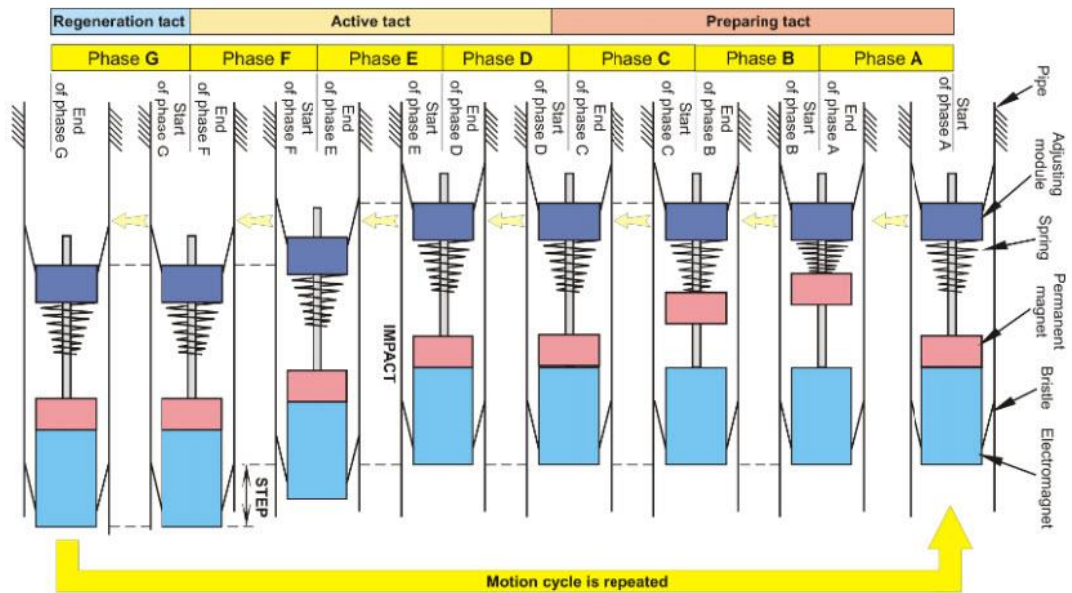
การออกแบบหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในท่อแบบนอนอาศัยหลักการการยึดหดของตัวหุ่นยนต์ และมีกลไกในการลื้อคและปลดลื้อคระหว่างสองโมดูลยกตัวอย่างเช่นงานวิจัยของ [4] ใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนหนึ่งตัวในการขับเคลื่อนให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง ใช้ก้านเชื่อมต่อขาระหว่างสองโมดูลทำให้เกิดการทำงานสลับกันดังภาพประกอบที่ 2 หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ภายในท่อขนาด 17-20 มิลลิเมตร ที่ความเร็ว 10 มิลลิเมตร/วินาที



ภาพประกอบที่ 2 หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบนอนโดยใช้มอเตอร์ [4]

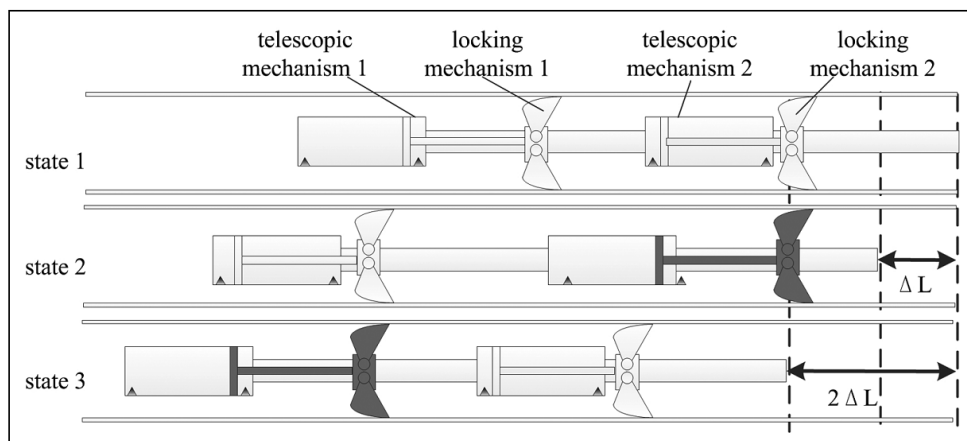
งานวิจัยที่ใช้แม่เหล็กทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบนอนดังงานวิจัยของ [5]–[7] อาศัยหลักการดูดและผลัก ของสนามแม่เหล็กทำให้เกิดการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง มีกลไกในการลื้อคการทำงาน

ระหว่างสองโมดูล หุ่นยนต์มีขนาดเล็กและเบากว่าแบบมอเตอร์เนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ดังภาพประกอบที่ 3 หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ภายในท่อตรงเท่านั้น



ภาพประกอบที่ 3 หุ่นยนต์เคลื่อนแบบหนอนโดยใช้สนามแม่เหล็ก[5]

หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบหนอนโดยใช้ไฮดรอลิกดังงานวิจัยของ [8] มีหลักการทำงานเหมือน [4] แต่ใช้ไฮดรอลิกในการขับเคลื่อนในแนวเส้นตรงแทนมอเตอร์ดังภาพประกอบที่ 4 มีแรงในการขับเคลื่อนหุ่นยนต์ 586 นิวตัน ความเร็วในการขับเคลื่อน 0.11 เมตร/วินาที



ภาพประกอบที่ 4 หุ่นยนต์เคลื่อนแบบหนอนโดยใช้ระบบไฮดรอลิก[8]

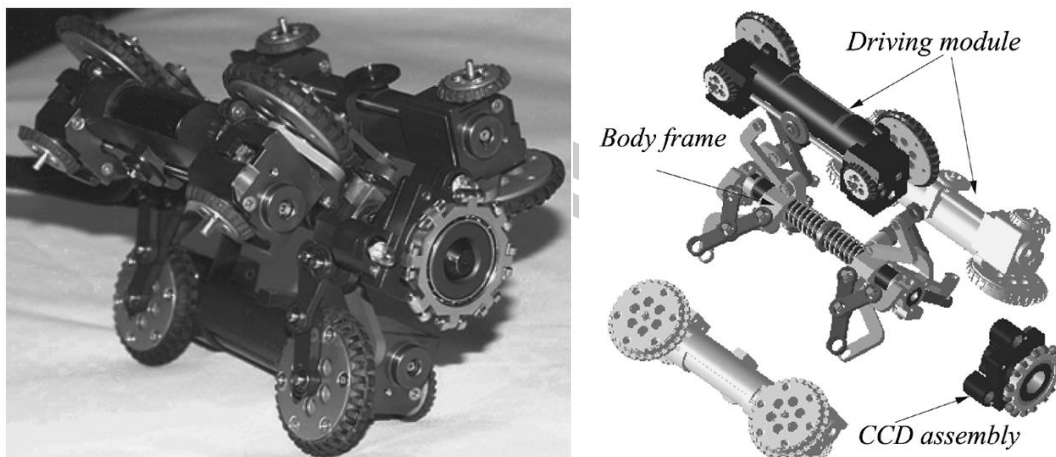
2.2.3 หุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในท่อแบบล้อสมมาตร

หุ่นยนต์แบบล้อสมมาตรออกแบบให้ล้อขับเคลื่อนมีลักษณะสมมาตรกับท่อเพื่อเพิ่มแรงเสียดทานระหว่างล้อกับท่อ ทำให้หุ่นยนต์นั้นสามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวตั้งดังงานวิจัยของ [9] ออกแบบหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในท่อเพื่อหิบบัวตฤขนาดเล็กดังภาพประกอบที่ 5 โดยหุ่นยนต์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 23 มิลลิเมตร ยาว 110 มิลลิเมตร น้ำหนัก 16 กรัม มีล้อขนาดเล็กที่ด้านหน้าหุ่นยนต์ออกแบบเป็นสองโมดูลการเคลื่อนที่ เชื่อมต่อกันด้วยยางยืดหยุ่นและวางตำแหน่งล้อให้สมมาตรกับท่อ เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ในท่อโค้งและท่อแนวตั้ง ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาดเล็ก (micro electromagnetic motor) และเคลื่อนที่ที่ล้อด้วย Pneumatic Wobble Motor ซึ่งมีขนาดเล็กกว่ามอเตอร์ไฟฟ้า จากการออกแบบหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ที่ความเร็ว 6 มิลลิเมตร/วินาที และมีแรงดึง 1 นิวตัน ดึงสายควบคุมได้ 5 เมตรในแนวตั้ง



ภาพประกอบที่ 5 หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบล้อสมมาตร [9]

งานวิจัยของ [10] ดังภาพประกอบที่ 6 ออกแบบหุ่นยนต์ที่มีชุดขับเคลื่อน (Driving module) สามชุดในลักษณะสมมาตรกับท่อแต่ละชุดขับเคลื่อนประกอบด้วยล้อขับเคลื่อนสองล้อหน้าหลัง ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า ชุดขับเคลื่อนทั้งสามประกอบกันกับตัวกลาง (Body frame) ในลักษณะเป็นข้อต่อมีสปริงดันเพื่อช่วยเพิ่มแรงเสียดทานระหว่างล้อกับท่อทำให้สามารถเคลื่อนที่ในแนวตั้ง และช่วยปรับในกรณีเคลื่อนที่ไปในท่อโค้งและท่อแยก หุ่นยนต์ติดตั้งกล้องสำรวจ (CCD) ไว้ที่ส่วนหน้าเพื่อมองภาพภายในท่อ จากการออกแบบหุ่นยนต์มีขนาดยาว 150 มิลลิเมตร และความกว้างปรับได้ 85-109 มิลลิเมตร แรงดึงขณะเคลื่อนที่ 9.8 นิวตัน ความเร็วในการเคลื่อนที่ 0.15 เมตรต่อวินาที และมีน้ำหนักหุ่นยนต์ 0.7 กิโลกรัม สามารถเคลื่อนที่ได้ในท่อโค้ง ท่อแยก และท่อแนวตั้ง

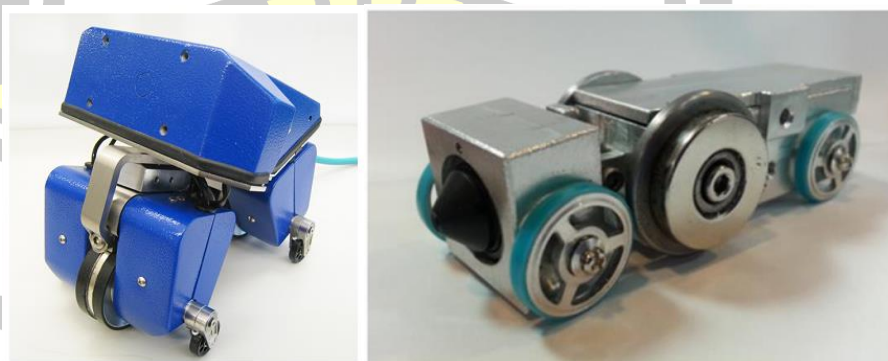


ภาพประกอบที่ 6 หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบล้อสมมาตรงานวิจัยของ [10]

และยังมีงานวิจัยที่ออกแบบหุ่นยนต์แบบสมมาตรกับท่อก็คือหลายงานวิจัยดัง [11]–[14] โดยแต่ละงานวิจัยออกแบบเพื่อนำไปใช้งานในรูปแบบที่ต่างกันตามลักษณะของท่อ แต่มีหลักการออกแบบเหมือนกันคือเพิ่มแรงยึดเกาะท่อด้วยการออกแบบให้ล้อดันท่อในลักษณะสมมาตรเพื่อเพิ่มแรงเสียดทาน

2.2.4 หุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในท่อแบบใช้แรงแม่เหล็ก

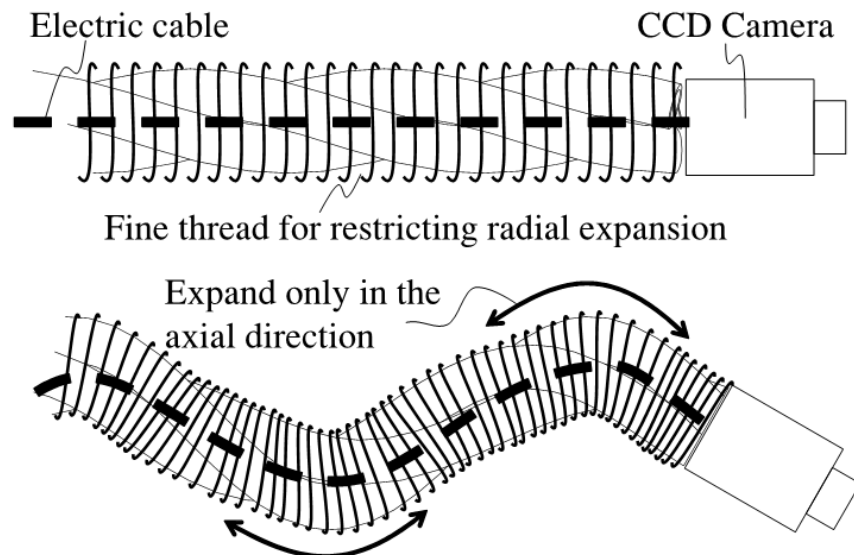
หุ่นยนต์สำรวจท่อโดยใช้แรงยึดเกาะด้วยแม่เหล็กถาวรออกแบบมาเพื่อใช้กับท่อประเภทโลหะ ดังงานวิจัยของ [15], [16] ออกแบบโดยใช้แม่เหล็กที่มีลักษณะเป็นล้อเพื่อใช้ในงานสำรวจในโรงไฟฟ้า ด้วยแรงยึดเกาะจากแม่เหล็กทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ในแนวตั้ง และมีขนาดเล็กเนื่องจากมีกลไกที่ไม่ซับซ้อนดังภาพประกอบที่ 7



ภาพประกอบที่ 7 หุ่นยนต์แบบใช้แรงแม่เหล็ก [15], [16]

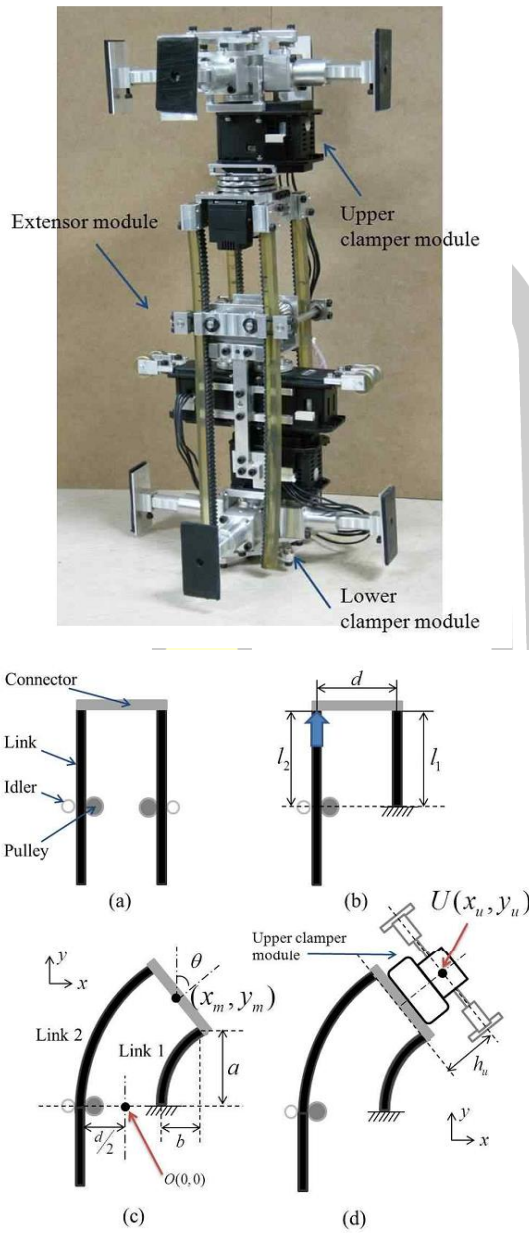
2.2.5 หุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในท่อโดยใช้ข้อต่อแบบยืดหยุ่น

ข้อต่อแบบยืดหยุ่นมีหลายแบบเช่น ใช้ลม [17-18] ใช้สปริง [19] และใช้เชือก [20] ออกแบบมาเพื่อให้โค้งงอในทุกทิศทางและสามารถโค้งงอตามผิวสัมผัสได้ระดับหนึ่งเหมาะสำหรับนำไปออกแบบหุ่นยนต์ ที่ไม่ได้ต้องการความแม่นยำมาก ต้องการให้โค้งงอตามสิ่งแวดล้อมได้ดังงานวิจัยของ [21] ออกแบบหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในท่อโดยใช้ท่อลมสามท่อพันเป็นเกลียวและอาศัยการจ่ายความดัน ลมเป็นลำดับเพื่อให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ จากการออกแบบหุ่นยนต์มีขนาดเล็กและเบาเนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน โดยหุ่นยนต์สามารถเข้าท่อที่มีขนาด 9-25 มิลลิเมตร ความเร็วในการเคลื่อนที่สูงสุด 45 มิลลิเมตร/วินาที ด้านหน้าติดกล้องขนาดเล็กเพื่อมองภายในท่อ ดังภาพประกอบที่ 8



ภาพประกอบที่ 8 หุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในท่อโดยใช้ข้อต่อแบบยืดหยุ่น [21]

งานวิจัยของ [22] ออกแบบหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบหนอนร่วมกับข้อต่อแบบยืดหยุ่นทำให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่เปลี่ยนทิศทางได้เมื่อผ่านท่อแยกและท่อโค้ง ออกแบบข้อต่อโดยใช้แท่งยาง 4 แท่งติดสายพานแบบเปิดขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์สองตัวดังภาพประกอบที่ 9 จากการออกแบบหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ในท่อขนาด 244 มิลลิเมตร และสามารถเคลื่อนที่ผ่านท่อแยกได้



ภาพประกอบที่ 9 หุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในท่อโดยใช้ข้อต่อแบบยืดหยุ่น [22]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาในหัวข้อที่ 2.2 สามารถสรุปข้อเด่น ข้อด้อย ของหุ่นยนต์แต่ละแบบ ได้ดังตาราง 8 เพื่อนำข้อมูลไปออกแบบแนวคิดการสร้างหุ่นยนต์ในบทที่ 3 ให้ตรงตามความมุ่งหมายของงานวิจัย

ตาราง 8 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แต่ละแบบ

รูปแบบของหุ่นยนต์	ลักษณะการเคลื่อนที่ในท้อ			ขนาด ท้อที่ใช้	ข้อเด่น ข้อด้อย
	เหล็ก		ท้อโค้ง		
	ท้อตรง	ดิ่ง			
ระดับ	ดิ่ง	ท้อโค้ง			
1.แบบล้อ	√	×	○	□	ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวตั้ง
2.แบบหนอน	√	√	×	△	เคลื่อนที่ช้าและไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในท้อโค้ง
3.แบบสมมาตร	√	√	√	△	จำกัดขนาดท้อใช้งาน
4.แบบแม่เหล็ก	√	√	√	□	ควบคุมยากในการเลี้ยวเปลี่ยนมุมในท้อโค้ง
5.แบบข้อต่อยืดหยุ่น	√	√	√	△	เคลื่อนที่ช้า
เป้าหมายงานวิจัย	√	√	√	□	ใช้กับท้อได้หลายขนาด ควบคุมง่าย

√ เคลื่อนที่ได้, × เคลื่อนที่ไม่ได้, ○ เคลื่อนที่ได้บางรูปแบบ, □ ท้อหลายขนาด, △ จำกัดขนาดท้อ

2.3 การสื่อสารระหว่างเครื่องจักรและผู้ใช้งาน (Human Machine Interface)

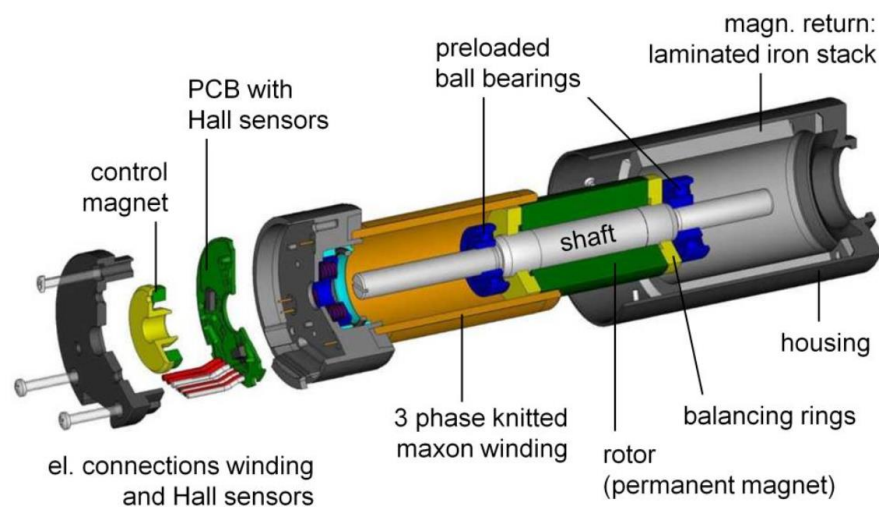
การควบคุมหุ่นยนต์หรือการอ่านข้อมูลจากตัวตรวจวัดภายในหุ่นยนต์นั้น จำเป็นต้องมีระบบสื่อสารระหว่างหุ่นยนต์และผู้ใช้งาน โดยในปัจจุบันนี้มีหลายรูปแบบเช่นการใช้คอมพิวเตอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอลโทรล (PLC) เป็นต้น



ภาพประกอบที่ 10 ลักษณะหน้าจอแสดงผลใช้ร่วมกับ PLC [23]

โดยแต่ละแบบก็จะมีรูปแบบการใช้งานที่แตกต่างกันตามประเภทของการใช้งาน โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การใช้งาน PLC ร่วมกับจอแสดงผลดั่งภาพประกอบที่ 10 เนื่องจาก PLC เป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานกันในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งมีความเสถียรและความคง โดยที่จอแสดงผลสามารถนำภาพกราฟฟิกมาใส่เพิ่มเติมเพื่อใช้ผู้ใช้งานเข้าใจได้ง่าย

2.4 มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (brushless dc motor)

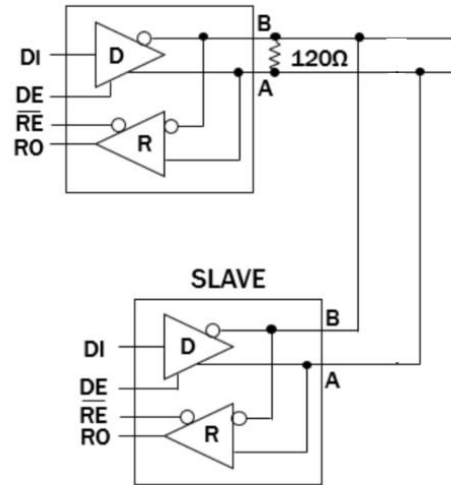


ภาพประกอบที่ 11 โครงสร้างมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน [24]

มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านเป็นมอเตอร์ที่ไม่ใช้แปรงถ่านในการส่งกำลังไฟฟ้า ไปยังโรเตอร์แต่อาศัยการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกระแสสลับเพื่อขับโรเตอร์ที่เป็นแม่เหล็กถาวร โดยความเร็วมอเตอร์จะขึ้นอยู่กับความถี่ของไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์มีโครงสร้างดังภาพประกอบที่ 11 ข้อดีของมอเตอร์ประเภทนี้คือ มีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบแปรงถ่าน และไม่มีสเก็ดไฟจากการเสียดสีของแปรงถ่านและ คอมมิวเตเตอร์ เหมาะสำหรับการใช้งานในพื้นที่เสี่ยงต่อการติดไฟ

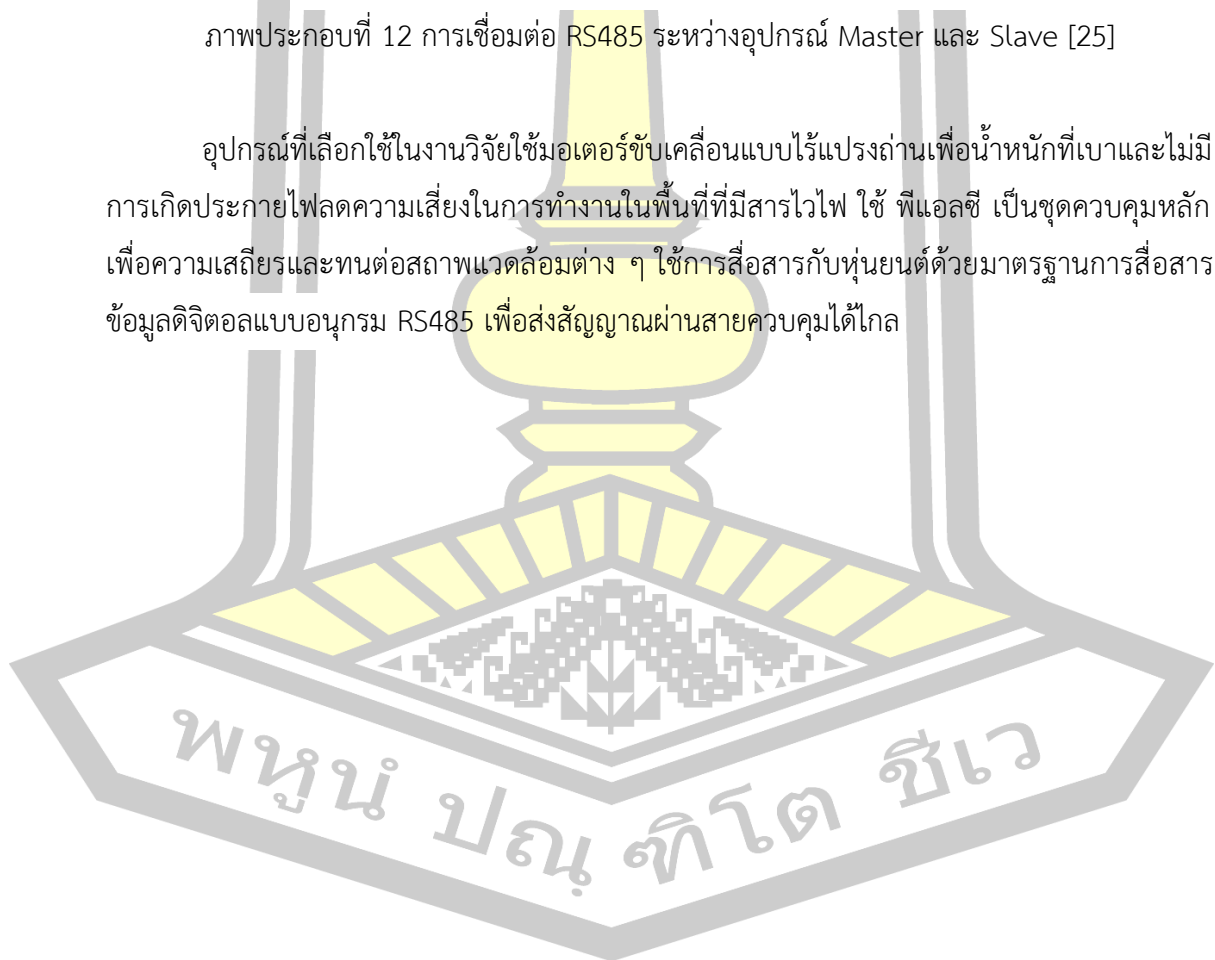
2.5 มาตรฐานการสื่อสารข้อมูลดิจิทัลแบบอนุกรม RS485

มาตรฐานการสื่อสารข้อมูลดิจิทัลแบบอนุกรม RS485 (Recommended Standard no. 485) คือมาตรฐานการสื่อสารข้อมูลดิจิทัลแบบอนุกรม (serial communication) โดยทำงานเป็นแบบ Slave และ Master ดังภาพประกอบที่ 12 โดย Slave แต่ละตัวจะมีเลข Address เป็นของตัวเอง มีจำนวนอุปกรณ์สูงสุดได้ 256 ตัวและส่งสัญญาณผ่านสายได้ระยะ 1200 เมตร



ภาพประกอบที่ 12 การเชื่อมต่อ RS485 ระหว่างอุปกรณ์ Master และ Slave [25]

อุปกรณ์ที่เลือกใช้ในงานวิจัยใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนแบบไร้แปรงถ่านเพื่อน้ำหนักที่เบาและไม่มี การเกิดประกายไฟลดความเสี่ยงในการทำงานในพื้นที่ที่มีสารไวไฟ ใช้ พีแอลซี เป็นชุดควบคุมหลัก เพื่อความเสถียรและทนต่อสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ใช้การสื่อสารกับหุ่นยนต์ด้วยมาตรฐานการสื่อสาร ข้อมูลดิจิทัลแบบอนุกรม RS485 เพื่อส่งสัญญาณผ่านสายควบคุมได้ไกล



บทที่ 3

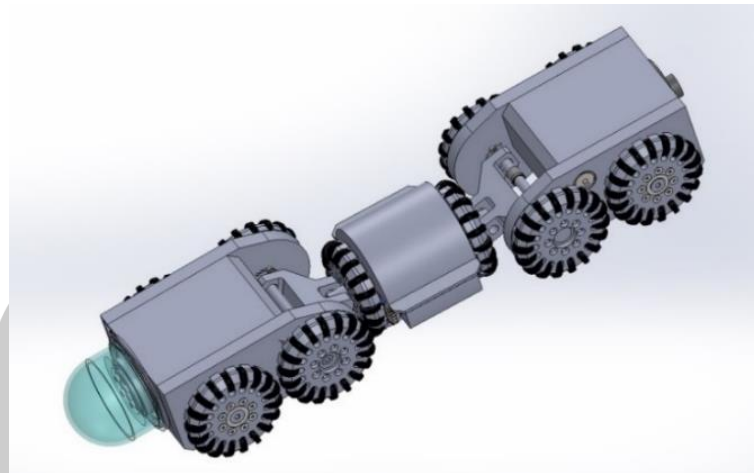
วิธีดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้นำเสนอวิธีดำเนินงานวิจัย เป็นแนวทางการออกแบบและทดลองหุ่นยนต์เพื่อใช้ในการเคลื่อนที่ภายในท่อเหล็ก ประกอบด้วย แนวทางการออกแบบโครงสร้างทางกล แนวทางการออกแบบโครงสร้างทางไฟฟ้า แนวทางการออกแบบการควบคุม สมมุติฐานในการเคลื่อนที่ และขั้นตอนการทดลอง

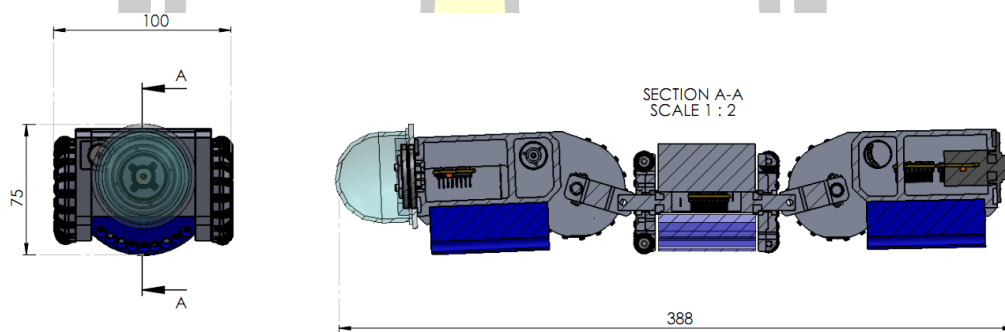
3.1 แนวคิดในการออกแบบโครงสร้างทางกล

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ตรวจสอบภายในท่อเหล็กที่มีขนาด 5 นิ้ว ขึ้นไปจนถึงกำแพงเหล็กเรียบ เพื่อการใช้งานได้หลากหลาย สามารถทำงานได้ในพื้นที่ ที่มีน้ำท่วมขัง โดยลักษณะของท่อเหล็ก เป็นท่อตรงและท่อโค้ง 90 องศา วางในแนวตั้งและแนวระดับ จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 ผู้วิจัยสรุปการออกแบบของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในท่อ โดยแบ่งตามความสามารถในการเคลื่อนที่ผ่านท่อลักษณะต่าง ๆ ได้ดังตาราง 8 เห็นได้ว่าหุ่นยนต์แบบใช้แม่เหล็กสามารถเคลื่อนที่ได้ในทุกลักษณะท่อ แต่ยากในการควบคุมเมื่อเคลื่อนที่ผ่านท่อโค้ง เนื่องจากไม่สามารถเปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่ด้านข้างเพื่อให้หุ่นยนต์อยู่ในแนวโค้งของท่อได้ เพื่อแก้ไขปัญหานี้ผู้วิจัยจึงเลือกนำล้อโอมนิมาช่วยเพิ่มเติมในการออกแบบร่วมกับการใช้แม่เหล็กถาวรเพื่อให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ตามวัตถุประสงค์ โดยล้อโอมนิจะทำให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ 2 ทิศทาง เดินหน้าถอยหลังและด้านข้างซ้ายขวา พร้อมทั้งทำให้หุ่นยนต์สามารถรักษาแนวการเคลื่อนที่ให้ขนานกับแนวท่อในขณะที่กำลังเคลื่อนที่ ทำให้ง่ายในการควบคุมดังภาพประกอบที่ 13 เพื่อให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ตามวัตถุประสงค์จึงออกแบบให้หุ่นยนต์มีขนาด กว้าง 100 มิลลิเมตร ยาว 388 มิลลิเมตร และสูง 75 มิลลิเมตร ดังภาพประกอบที่ 14

พูนุ ปณุกิติโต ชิว



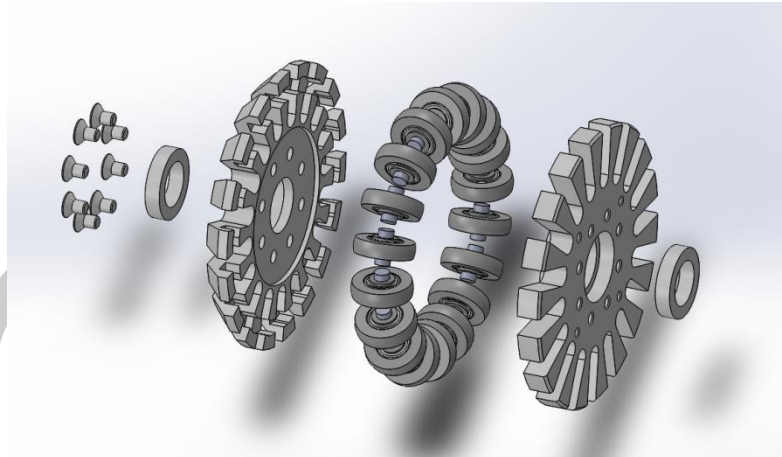
ภาพประกอบที่ 13 แนวคิดการออกแบบหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในท่อ



ภาพประกอบที่ 14 แนวคิดการออกแบบขนาดของหุ่นยนต์

3.1.1 การออกแบบล้อของหุ่นยนต์

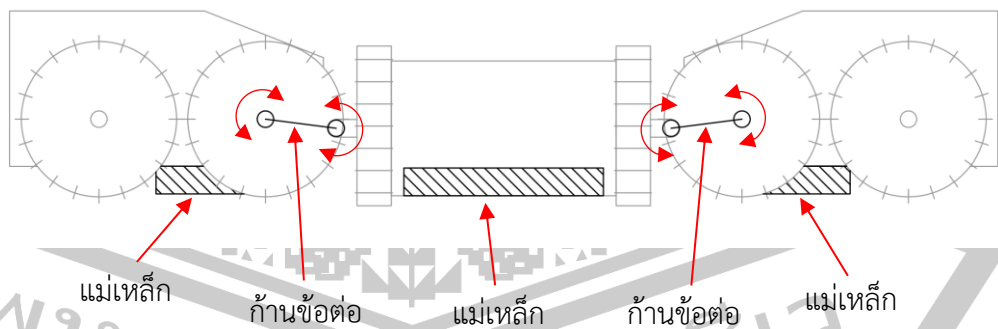
แนวคิดการออกแบบล้อของหุ่นยนต์ในงานวิจัย ใช้แนวคิดการออกแบบล้อให้สามารถเคลื่อนที่ได้หลายทิศทางหรือเรียกว่าล้อโอโมนิ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ 2 ทิศทางคือเดินหน้าถอยหลัง เลื่อนซ้ายขวา และยังช่วยรักษาแนวทางการเคลื่อนที่ให้อยู่ในแนวท่อตลอดการเคลื่อนที่ ออกแบบโดยให้ล้อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร วัสดุทำจากอลูมิเนียม ภายในประกอบไปด้วยล้อขนาดเล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 เซนติเมตร จำนวน 18 ล้อ โดยที่แกนหมุนของล้อเล็กทำมุม 90 องศา กับแกนหมุนของล้อ ทำให้ล้อสามารถเคลื่อนที่ได้ 2 แกนอิสระ ดังภาพประกอบที่ 15



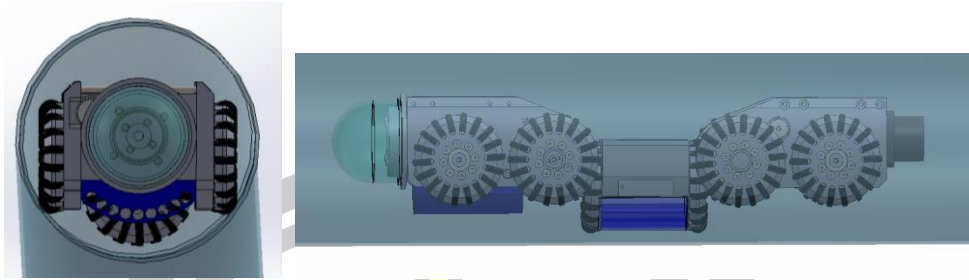
ภาพประกอบที่ 15 ล้อแบบหลายทิศทาง

3.1.2 การออกแบบการเคลื่อนของหุ่นยนต์

หุ่นยนต์ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักคือ ส่วนหน้า ส่วนกลาง และส่วนหลัง ซึ่งแต่ละส่วนจะถูกเชื่อมต่อกันโดยก้านข้อต่อ 2 แกนหมุนอิสระ ทำให้ลำตัวของหุ่นยนต์นั้นสามารถโค้งงอได้ตามรูปร่างของผิวท่อและช่วยให้ส่วนขับเคลื่อนส่วนกลางแนบกับผิวท่อตลอดการเคลื่อนที่ ออกแบบชุดแม่เหล็กถาวรแรงสูง Neodymium ให้วางอยู่ใต้ห้องของหุ่นยนต์ในชุดขับเคลื่อนทั้งสาม เพื่อช่วยในการเคลื่อนที่แนวตั้ง ดังภาพประกอบที่ 16 มีสมมุติฐานในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ขณะอยู่ในท่อตรงดังภาพประกอบที่ 17

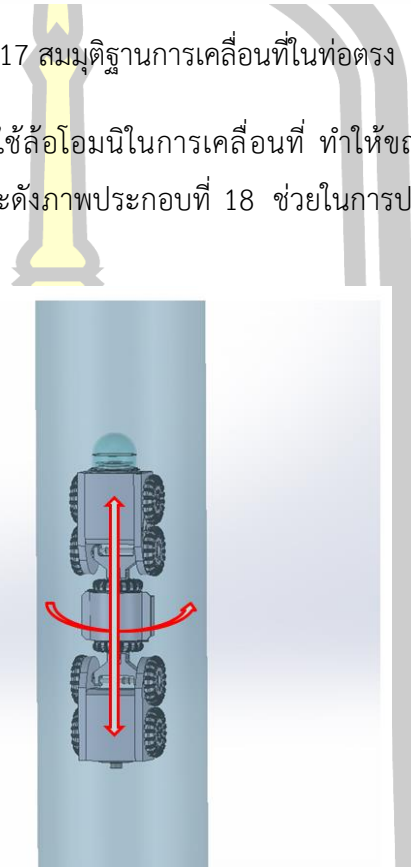


ภาพประกอบที่ 16 ข้อต่อและการวางชุดแม่เหล็กของหุ่นยนต์



ภาพประกอบที่ 17 สมมติฐานการเคลื่อนที่ในท่อตรง

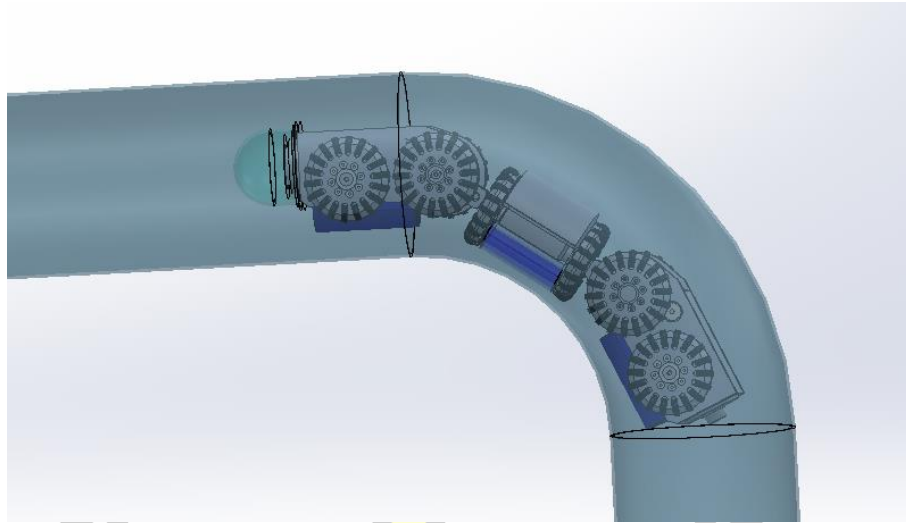
จากการออกแบบหุ่นยนต์โดยใช้ล้อโอมนิในการเคลื่อนที่ ทำให้ขณะเคลื่อนที่ในท่อตรง หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ 2 แกนอิสระดังภาพประกอบที่ 18 ช่วยในการปรับทิศทางยัดเกาะของหุ่นยนต์ก่อนถึงท่อโค้ง



ภาพประกอบที่ 18 ทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แบบ 2 แกน

ลักษณะการเคลื่อนที่แนวโค้ง อาศัยข้อต่อทำให้ตัวหุ่นยนต์โค้งตามรูปท่อ ทำให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ โดยการควบคุมหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่มีลักษณะโค้งดังภาพประกอบที่ 19

หุ่นยนต์ โพลี เทคโนโลยี



ภาพประกอบที่ 19 สมมุติฐานการเคลื่อนที่แนวโค้ง

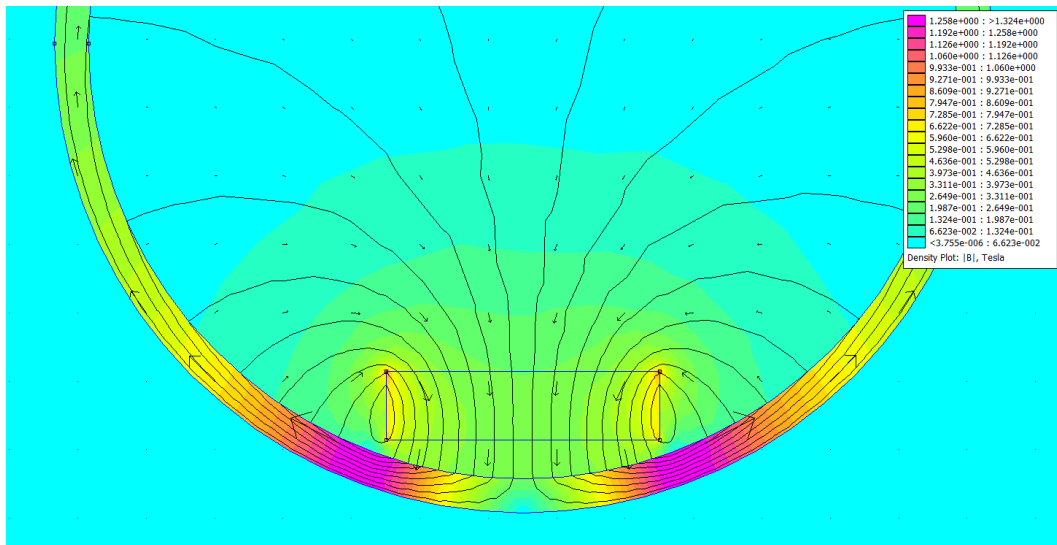
3.1.3 การคำนวณแรงยึดเกาะ

งานวิจัยนี้ใช้แรงจากแม่เหล็กถาวรในการเคลื่อนที่ในแนวโค้ง โดยสิ่งสำคัญคือที่ต้องคำนึงถึงคือการคำนวณแรงจากแม่เหล็ก จากงานวิจัย [26] ดังสมการ 1 สมการคำนวณแรงแม่เหล็ก โดย B คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก จะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามระยะห่างระหว่างแม่เหล็กและแผ่นเหล็ก A_g คือพื้นที่หน้าตัดแม่เหล็ก และ μ_0 คือค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็ก (Permeability) ของอากาศมีค่า $4\pi \times 10^{-7}$ H/m

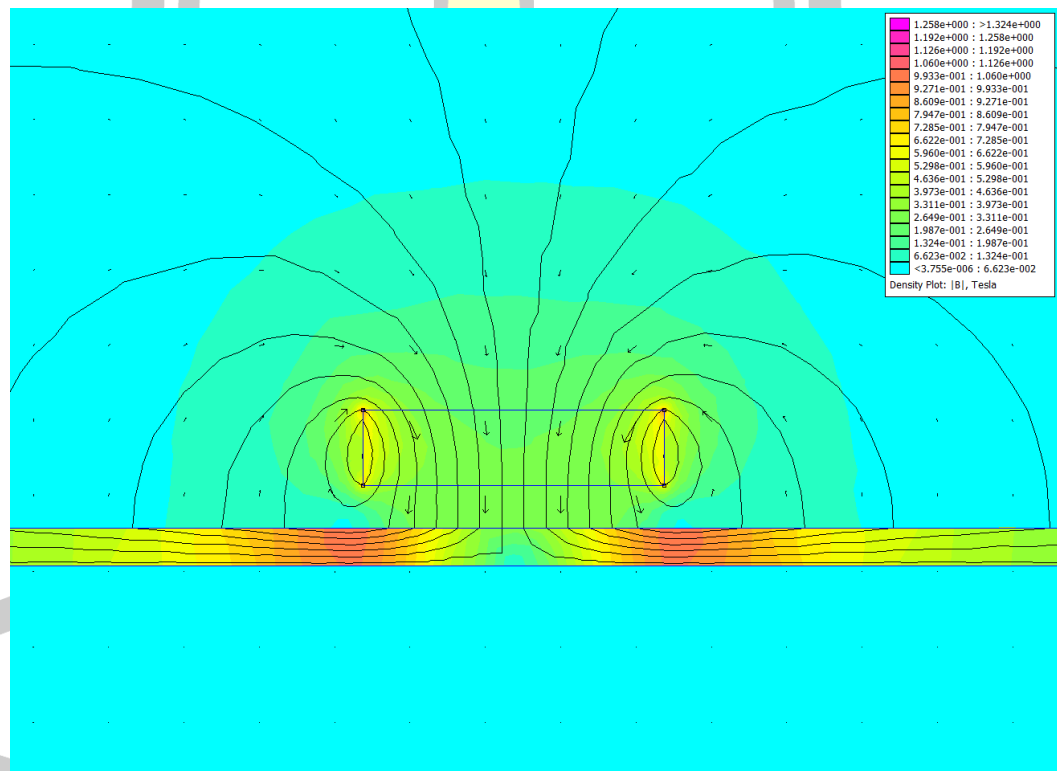
$$F_{magnet} = \frac{B^2 A_g}{2\mu_0} \quad (1)$$

การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ทั้งในท่อและแผ่นเหล็กซึ่งที่ระยะความสูงเท่ากันค่าสนามแม่เหล็กจะมีค่าต่างกันเนื่องจากความโค้งของท่อ โดยสนามแม่เหล็กเมื่อเคลื่อนที่ภายในท่อจะมีค่ามากกว่าแผ่นเหล็กดังภาพประกอบที่ 20 และภาพประกอบที่ 21 โดยใช้โปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM4.2) จำลองการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็ก

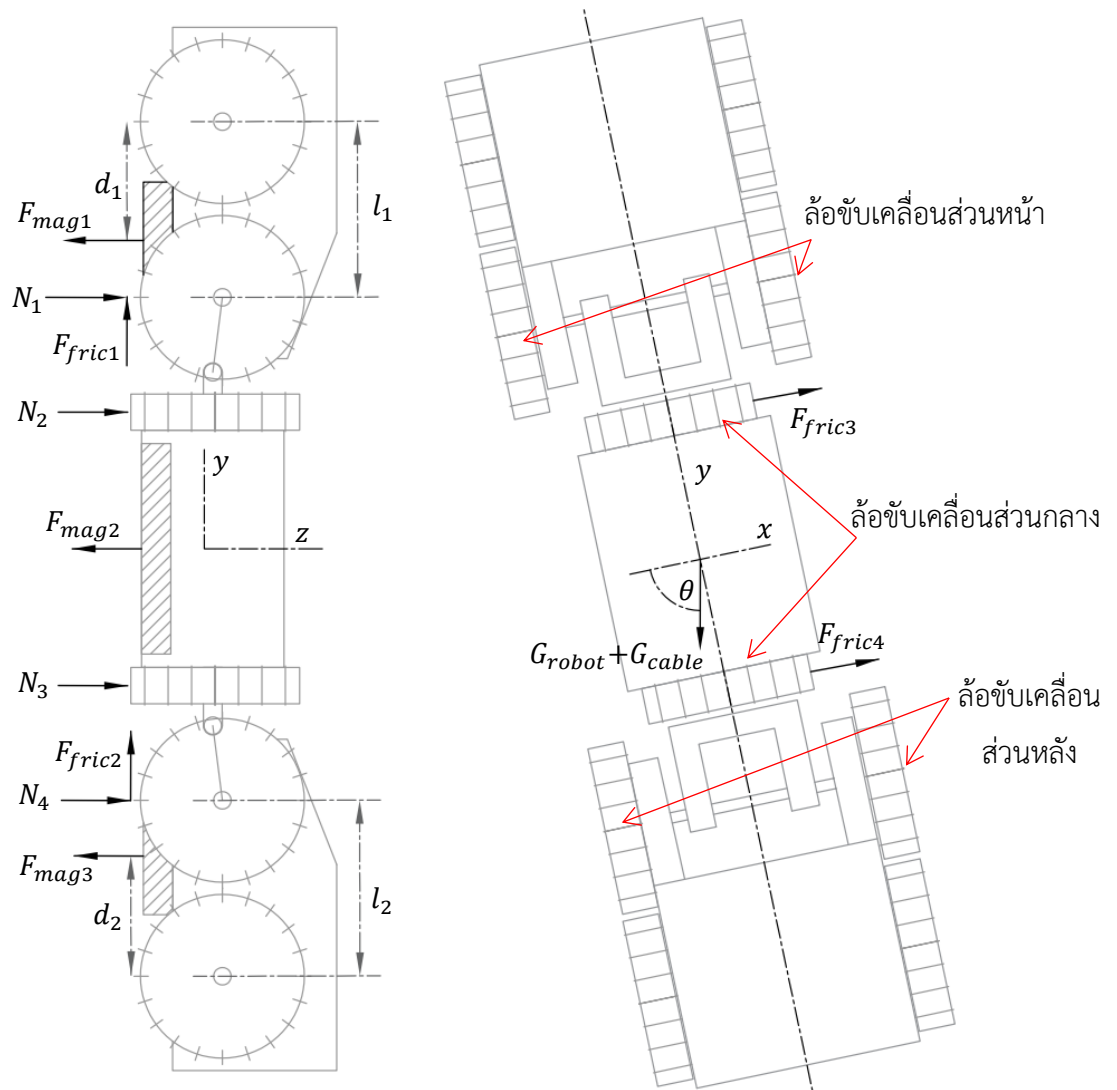
พหุ ประถมศึกษา



ภาพประกอบที่ 20 ผลการจำลองสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเมื่อแม่เหล็กอยู่ในท่อ



ภาพประกอบที่ 21 ผลการจำลองสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเมื่อแม่เหล็กอยู่บนผิวเหล็ก



ภาพประกอบที่ 22 แรงยึดเกาะและแรงโน้มถ่วงซึ่งมีผลต่อการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในแนวตั้ง

แรงเสียดทานเป็นสิ่งจำเป็นที่ทำให้หุ่นยนต์ไม่ลื่นไถล $F_{fric1}, F_{fric2}, F_{fric3}, F_{fric4}$ โดยแรงที่มีผลกับขนาดของแรงเสียดทานคือค่าแรงปฏิกิริยาที่จุดล้อขับเคลื่อน N_1, N_2, N_3, N_4 ดังภาพประกอบที่ 22 จะมีค่าขึ้นอยู่กับแรงแม่เหล็กดังสมการ 2 - 4

$$N_1 = \frac{d_1}{l_1} F_{mag1} \tag{2}$$

$$N_4 = \frac{d_2}{l_2} F_{mag3} \tag{3}$$

$$N_2 = N_3 = \frac{F_{mag2}}{2} \tag{4}$$

การคำนวณแรงยึดเกาะเพื่อไม่ให้หุ่นยนต์ลื่นไถลในงานวิจัยนี้คำนวณแรงในสภาวะหุ่นยนต์เกาะนิ่ง โดยสมการทั่วไปของแรงเสียดทาน $F = \mu_s N$ โดย μ_s คือค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตระหว่างล้อของหุ่นยนต์และเหล็ก โดยแรงเสียดทานที่ล้อของหุ่นยนต์ที่ทำให้หุ่นยนต์ไม่ลื่นไถลดังสมการ 5-7

$$F_{fric1} = \mu_s \frac{d_1}{l_1} F_{mag1} \quad (5)$$

$$F_{fric2} = \mu_s \frac{d_2}{l_2} F_{mag3} \quad (6)$$

$$F_{fric3} = F_{fric4} = \mu_s \frac{F_{mag2}}{2} \quad (7)$$

เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ในแนวตั้งหุ่นยนต์จะรับภาระน้ำหนักจากสายควบคุมเพิ่มขึ้นตามความยาว (l) โดยแรงที่กระทำกับหุ่นยนต์จากสายควบคุม (G_{cable}) มีค่าดังสมการ 8 โดย A_m คืออัตราน้ำหนักต่อหน่วยความยาวของสายควบคุม $m_{slipring+connector}$ คือน้ำหนักของวงแหวนลื่นและปลั๊กเชื่อมต่อ

$$G_{cable} = 9.8(A_m l + m_{slipring+connector}) \quad (8)$$

แรงจากน้ำหนักและสายเคเบิล (G_{robot}, G_{cable}) ของหุ่นยนต์ในขณะเคลื่อนที่ในแนวตั้งต้องมีค่ารวมน้อยกว่าแรงรวมจากแรงเสียดทานเพื่อให้หุ่นยนต์ไม่ลื่นไถล โดยสมการความสัมพันธ์สำหรับการเคลื่อนที่แนวแกน y ดังสมการ 9 และแนวแกน x ดังสมการ 10

$$\mu_s \frac{d_1}{l_1} F_{mag1} + \mu_s \frac{d_2}{l_2} F_{mag3} \geq (G_{robot} + G_{cable}) \sin \theta \quad (9)$$

$$\mu_s F_{mag2} \geq G_{robot} \cos \theta \quad (10)$$

3.1.4 การคำนวณกำลังมอเตอร์สำหรับขับเคลื่อน

การขับเคลื่อนหุ่นยนต์ในงานวิจัยนี้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงทำให้มีน้ำหนักน้อยกว่ามอเตอร์แบบมีแปรงถ่านในกำลังเท่ากันเหมาะสำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ในแนวตั้ง และยังมีประกายไฟเนื่องจากไม่มีแปรงถ่านทำให้เพื่อลดความเสี่ยงในการจุดติดไฟ

แรงที่มีผลต่อมอเตอร์คือ แรงจากแม่เหล็ก แรงจากน้ำหนักมวลของหุ่นยนต์ แรงจากการเคลื่อนที่ โดยการคำนวณกำลังขับเคลื่อนในงานวิจัยนี้ใช้การคำนวณในขณะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ในแนวตั้งเพราะเป็นขณะที่หุ่นยนต์รับภาระจากน้ำหนักของหุ่นยนต์มากที่สุด โดยแรงที่ต้องการใช้ในการขับเคลื่อน (F_{req}) ดังสมการ 11 โดยแรงเสียดทาน F_{fric} ใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากการหมุน (Rolling Friction) และแรงแม่เหล็กที่กระทำกับล้อขับเคลื่อน 12 ในงานวิจัยนี้กำหนดให้แรงเสียดทานจากความหนืด (viscous friction) $B_\omega \omega, B_v v$ เท่ากับศูนย์ เนื่องจากหุ่นยนต์เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตามแนวท่อและความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ช้าทำให้แรงมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับแรงที่มาจากส่วนอื่น ๆ

$$F_{req} = F_{fric} + (G_{robot} + G_{cable}) \sin \theta + m_{robot+cable} a \quad (11)$$

$$F_{fric} = \mu_{rolling} \left(\frac{d_1}{I_1} F_{mag1} + \frac{d_2}{I_2} F_{mag3} \right) \quad (12)$$

กำลังที่ต้องการในการขับเคลื่อนในการเคลื่อนที่แนวตั้ง (P_{req}) ดังสมการ 13 โดย V_{robot} คือความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

$$P_{req} = F_{req} V_{robot} \quad (13)$$

มอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนในแนวตั้งในงานวิจัยนี้ใช้มอเตอร์ 2 ตัวที่หุ่นยนต์ส่วนหน้าและส่วนหลัง ทำให้กำลังในการขับเคลื่อนถูกแบ่งครึ่งไปยังมอเตอร์ทั้งสองตัว แต่การคำนวณในงานวิจัยนี้คิดกรณีที่เกิดเหตุการณ์มอเตอร์ 1 ตัวต้องรับภาระหุ่นยนต์ทั้งหมดเช่น การเริ่มหมุนไม่พร้อมกันของมอเตอร์ทั้งสองหรือมีมอเตอร์บางตัวไม่ทำงาน จึงไม่แบ่งครึ่งกำลังที่ต้องใช้ดังสมการ 14 โดย S_{fs} คืออัตราส่วนปลอดภัย (factor of safety) เนื่องจากมีกำลังการสูญเสียอื่น ๆ ที่ไม่ได้นำมาคำนวณเช่น กำลังการสูญเสียจากการหมุน กำลังการสูญเสียจากอุปกรณ์ทางกลและไฟฟ้า โดยในงานวิจัยนี้กำหนดให้ S_{fs} เท่ากับ 2

$$P_{motor} = P_{req} S_{fs} \quad (14)$$

นอกจากกำลังขับเคลื่อน จำเป็นต้องคำนวณความเร็วในการหมุนและแรงบิดของมอเตอร์ เพื่อให้ได้อัตราทดที่เหมาะสม โดยอัตราทดของมอเตอร์ในงานวิจัยนี้มาจาก 2 ส่วนคือ อัตราทดจาก

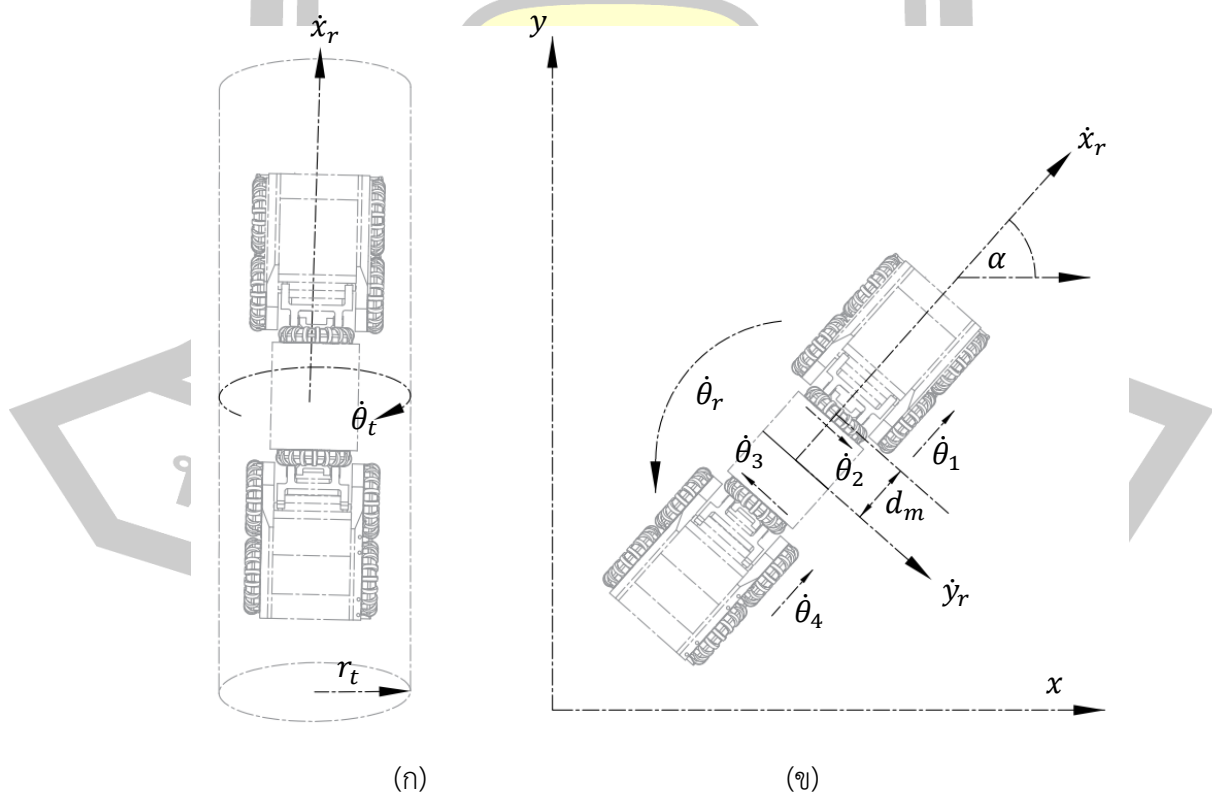
ชุดหัวมอเตอร์ (rt_{motor}) และอัตราทดจากหุ่นยนต์ (rt_{robot}) โดย ความเร็วในการหมุนมอเตอร์ (ω_{motor}) และ แรงบิดของมอเตอร์ (τ_{motor}) มีความสัมพันธ์ดังสมการ 15 และ 16 ตามลำดับ และ r_w คือรัศมีของล้อหุ่นยนต์

$$\omega_{motor} = rt_{motor} \times rt_{robot} \times \frac{60v_{robot}}{2\pi r_w} \quad (15)$$

$$\tau_{motor} = \frac{P_{motor}}{\omega_{motor}} \quad (16)$$

3.1.5 จลศาสตร์การควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

จลศาสตร์การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ จลศาสตร์การเคลื่อนที่ในท่อเหล็ก และจลศาสตร์การเคลื่อนที่บนแผ่นเหล็ก โดยมีค่าตัวแปรต่าง ๆ ดังภาพประกอบที่ 23 ในงานวิจัยนี้ใช้การสั่งงานมอเตอร์จากส่วนประมวลผลออกมาเป็นความเร็วในการหมุน ไม่ใช่คำสั่งที่เป็นแรงบิด เนื่องจากชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เป็นแบบควบคุมความเร็วในการหมุน



ภาพประกอบที่ 23 ระบบพิกัดของหุ่นยนต์ (ก) ภายในท่อเหล็ก (ข) แผ่นเหล็ก

\dot{x}_r	คือความเร็วหุ่นยนต์ในแนวแกน x
$\dot{\theta}_t$	คือความเร็วหุ่นยนต์ในการหมุนรอบแกนต่อ
r_t	คือรัศมีท่อ
r_w	คือรัศมีล้อหุ่นยนต์
$\dot{\theta}_1$	คือความเร็วการหมุนล้อของหุ่นยนต์ส่วนหน้า
$\dot{\theta}_2$	คือความเร็วการหมุนล้อของหุ่นยนต์ส่วนกลางล้อหน้า
$\dot{\theta}_3$	คือความเร็วการหมุนล้อของหุ่นยนต์ส่วนกลางล้อหลัง
$\dot{\theta}_4$	คือความเร็วการหมุนล้อของหุ่นยนต์ส่วนหลัง
x, y, α	คือตำแหน่งหุ่นยนต์บนพิกัดแผ่นเหล็ก
\dot{y}_r	คือความเร็วหุ่นยนต์ในแนวแกน y บนแผ่นเหล็ก
$\dot{\theta}_r$	คือความเร็วหุ่นยนต์ในการหมุนบนแผ่นเหล็ก
d_m	คือระยะจากจุดศูนย์กลางถึงล้อของหุ่นยนต์ส่วนกลาง

ในขณะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่บนท่อเหล็กด้วยลักษณะของล้อโอมนิจะทำให้หุ่นยนต์อยู่ในแนวแกนของท่อตลอดการเคลื่อนที่ที่ทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์มี 2 แกน คือ \dot{x}_r และ $\dot{\theta}_t$ สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์และล้อขับเคลื่อนของหุ่นยนต์ได้ดังสมการ 17 เมื่อต้องการหาความเร็วการหมุนของล้อ และสมการ 18 เมื่อต้องการหาความเร็วของหุ่นยนต์

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{r_w} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & r_t \\ 0 & -r_t \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} = r_w \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 & 0.5 \\ 0 & \frac{1}{2r_t} & \frac{-1}{2r_t} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} \quad (18)$$

ในขณะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่บนแผ่นเหล็กความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะมี 3 แกนคือ \dot{x}_r , \dot{y}_r , $\dot{\theta}_r$ สามารถเขียนสมการแปลงความเร็วของหุ่นยนต์เป็นความเร็วในการเคลื่อนที่บนแผ่นเหล็กได้ดังสมการ 19

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = r_w \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} \quad (19)$$

สมการความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วของหุ่นยนต์และล้อขับเคลื่อนของหุ่นยนต์ได้ดังสมการ 20 เมื่อต้องการหาความเร็วการหมุนของล้อ และสมการ 21 เมื่อต้องการหาความเร็วของหุ่นยนต์บนแผ่นเหล็ก

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{r_w} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & d_m \\ 0 & -1 & d_m \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} = r_w \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2d_m} & \frac{-1}{2d_m} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} \quad (21)$$

3.2 การออกแบบโครงสร้างทางไฟฟ้า

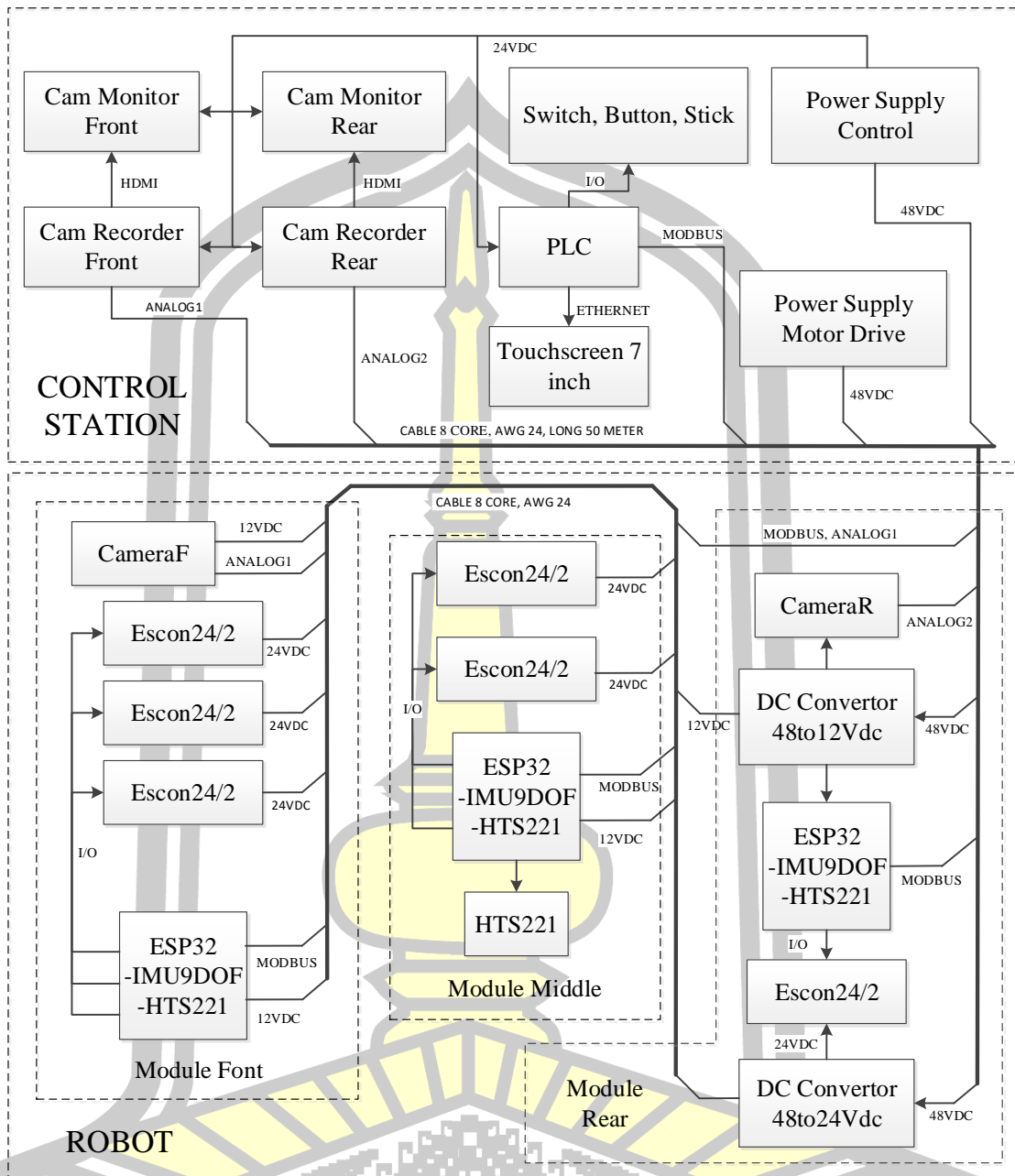
เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่และวัดค่าต่าง ๆ ได้ตามวัตถุประสงค์นั้นจำเป็นต้องมีการออกแบบระบบไฟฟ้าและการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ให้กับหุ่นยนต์ โดยแนวคิดการออกแบบประกอบด้วยสองส่วนหลักคือ ส่วนฝั่งควบคุม (Control Station) และ ส่วนของหุ่นยนต์ดังภาพประกอบที่ 24

ส่วนสถานีควบคุม (Control Station) ทำหน้าที่หลักคือ สั่งการให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ แสดงผลข้อมูลจากเซนเซอร์ และจ่ายพลังงานให้กับหุ่นยนต์ โดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ และมีชุดแปลงแรงดันไฟฟ้าภายในเพื่อนำไปใช้งานต่าง ๆ โดยงานวิจัยนี้ใช้ PLC เป็นตัวประมวลผลหลักโดยการรับคำสั่งจากสวิตช์ควบคุมส่งไปยังหุ่นยนต์และรับค่าเซนเซอร์ต่าง ๆ จากหุ่นยนต์มาแสดงผลที่หน้าจอสัมผัส มีส่วนแสดงภาพกล้องด้านหน้าและกล้องด้านหลัง สามารถบันทึกวีดีโอหรือภาพนิ่งได้

ส่วนหุ่นยนต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำหน้าที่ในการรับคำสั่งและส่งค่าเซนเซอร์ อุณหภูมิภายในหุ่นยนต์ อุณหภูมิภายนอก และความชื้น ไปยังส่วนควบคุม โดยทำงานแบบแยกอิสระ 3 ส่วนคือ ส่วนหน้า ส่วนกลาง และส่วนหลัง และมีกล้องด้านหน้าและกล้องด้านหลัง สำหรับดูสภาพภายในท่อ

การส่งสัญญาณระหว่างหุ่นยนต์และชุดควบคุมใช้สัญญาณมาตรฐาน RS485 และโปรโตคอล Modbus RTU ซึ่งสามารถส่งสัญญาณผ่านสายสัญญาณได้ในระยะไกลโดยใช้สายสัญญาณ 2 เส้น โดยกำหนดให้ PLC ที่กล่องควบคุมเป็น Master และ หุ่นยนต์เป็น Slave ไฟฟ้าสำหรับใช้กับหุ่นยนต์แยกเป็น 2 ชุด สำหรับส่วนควบคุมและขับเคลื่อน เป็นไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 48 โวลต์เพื่อให้สามารถส่งได้ในระยะไกลโดยที่แรงดันไม่ตก และมีสายสัญญาณสำหรับส่งสัญญาณกล้องหน้าและกล้องหลัง รวมสายส่งสัญญาณเป็นสายไฟขนาด AWG24 แบบ 8 แกน



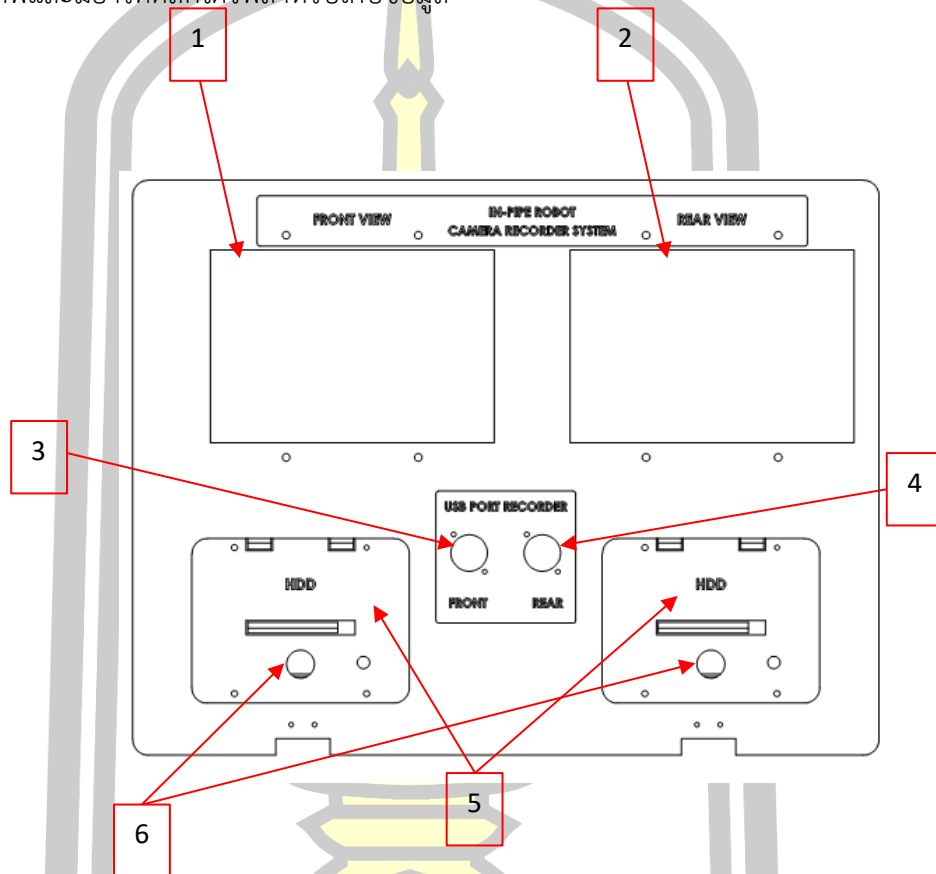


ภาพประกอบที่ 24 โครงสร้างการเชื่อมต่ออุปกรณ์ของหุ่นยนต์

พหุบัณฑิต โสวัต

3.3 การออกแบบส่วนควบคุม

การควบคุมหุ่นยนต์ใช้การควบคุมโดยผู้ใช้งานผ่านการมองด้วยกล้องด้านหน้าและกล้องด้านหลังของหุ่นยนต์ดังภาพประกอบที่ 25 โดยมีส่วนแสดงจอภาพด้านหน้าและด้านหลัง สามารถกดบันทึกภาพและมีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สำหรับเก็บข้อมูล

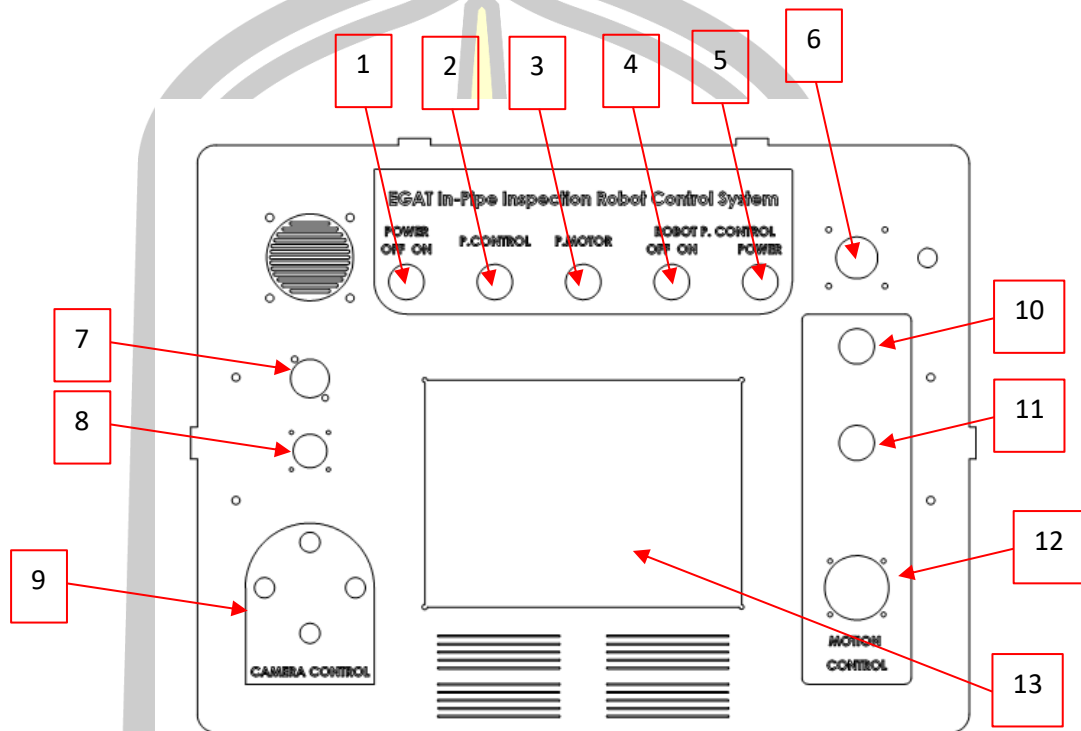


ภาพประกอบที่ 25 แผงควบคุมส่วนมองภาพ

แผงควบคุมกล้องควบคุมส่วนมองภาพมีดังนี้

1. Front View Display จอแสดงภาพกล้องด้านหน้า
2. Rear View Display จอแสดงภาพกล้องด้านหลัง
3. Front USB Port สำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์บันทึกภาพกล้องหน้า (Hard disk, Thumb Drive)
4. Rear USB Port สำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์บันทึกภาพกล้องหลัง (Hard disk, Thumb Drive)
5. SSD Holder จุดสำหรับจับยึดฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ SanDisk
6. ปุ่มสำหรับกดบันทึกวีดีโอ

ส่วนแผงการควบคุมหุ่นยนต์ ประกอบด้วยแกนบังคับการเคลื่อนที่ที่ ปุ่มสำหรับควบคุมกล้อง ไฟแสดงสถานะต่าง ๆ จุดเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ดังภาพประกอบที่ 26 และมีจอแสดงผลแบบสัมผัส สำหรับแสดงค่าเซนเซอร์ภายในตัวหุ่นยนต์ดังภาพประกอบที่ 27

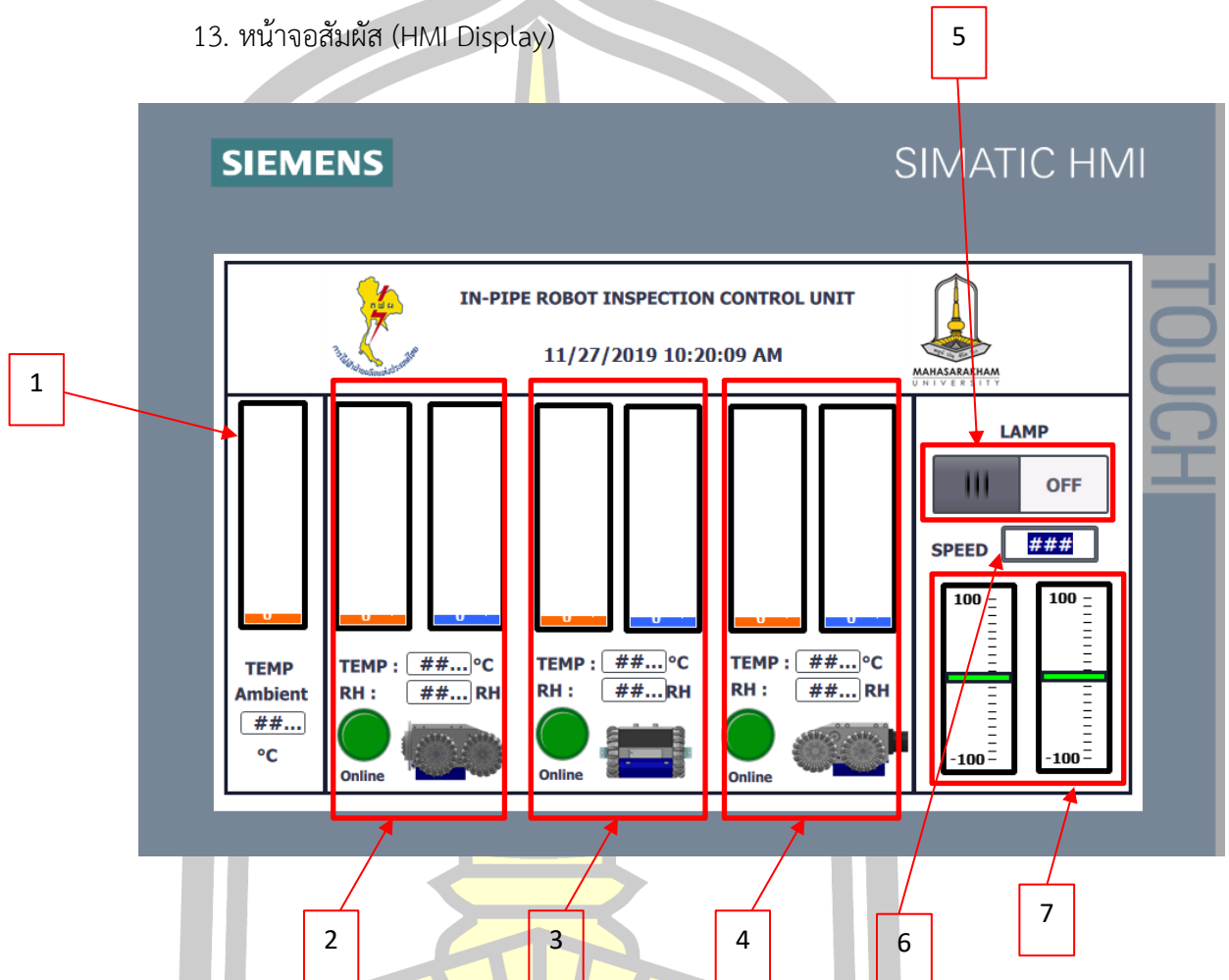


ภาพประกอบที่ 26 แผงส่วนควบคุมหุ่นยนต์

แผงควบคุมส่วนควบคุมหุ่นยนต์ดังรูปที่ 3 มีดังนี้

1. POWER คีย์สวิตช์สำหรับ เปิด-ปิด กล้องควบคุม
2. P. Control ไฟแสดงสถานะสำหรับแสดงสถานะระบบไฟสำหรับชุดควบคุม
3. P. Motor ไฟแสดงสถานะสำหรับแสดงสถานะระบบไฟสำหรับชุดขับเคลื่อน
4. Robot P. ON-OFF สวิตช์เลือกสำหรับ เปิด-ปิด พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหุ่นยนต์
5. Robot P. Power ไฟแสดงสถานะสำหรับแสดงสถานะระบบไฟสำหรับหุ่นยนต์
6. Robot Power Plug สำหรับเชื่อมต่อสายสัญญาณ
7. Control Power Plug สำหรับเชื่อมต่อสาย 220VAC
8. ช่องเชื่อมต่อสำหรับโหนดและแก้ไขโปรแกรม
9. ปุ่มควบคุมกล้องด้านหน้าของหุ่นยนต์
10. Power Robot Motor ไฟแสดงสถานะเมื่อมีการกดปุ่มฉุกเฉิน

11. Emergency Switch ปุ่มฉุกเฉินสำหรับตัดไฟฟ้าเฉพาะระบบขับเคลื่อน (มอเตอร์) ของหุ่นยนต์
12. Joystick สำหรับบังคับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์
13. หน้าจอสัมผัส (HMI Display)



ภาพประกอบที่ 27 การออกแบบหน้าจอแสดงผล

แผงควบคุมส่วนหน้าจอสัมผัส (HMI Display) มีดังนี้

1. แสดงอุณหภูมิห้องในแบบตัวเลขและกราฟแท่ง
2. แสดงอุณหภูมิภายใน ความชื้น ของหุ่นยนต์ส่วนหน้า
3. แสดงอุณหภูมิภายใน ความชื้น ของหุ่นยนต์ส่วนกลาง
4. แสดงอุณหภูมิภายใน ความชื้น ของหุ่นยนต์ส่วนหลัง
5. เปิด-ปิด ไฟสำหรับมองภาพ
6. ตั้งค่าเปอร์เซ็นต์ความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์
7. แสดงระดับความเร็วขณะควบคุมการเคลื่อนที่

3.5 ขั้นตอนการทดลอง

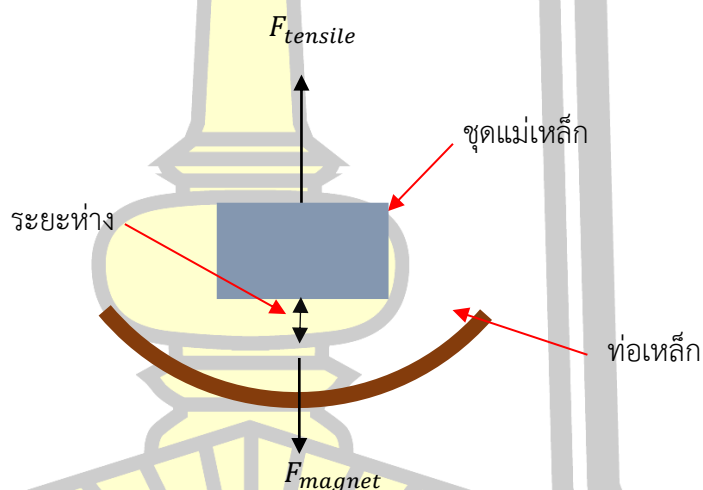
3.5.1 การทดสอบแรงยึดเกาะชุดล่อแม่เหล็ก

วัตถุประสงค์การทดสอบแรงยึดเกาะระหว่างล่อแม่เหล็กและท่อเหล็ก เพื่อหาแรงยึดเกาะของชุดแม่เหล็ก ที่ทำให้สามารถเคลื่อนที่ในแนวตั้งได้ไม่เกิดการลื่นไถล และนำค่ามาใช้ในการคำนวณกำลังขับเคลื่อนมอเตอร์ขับเคลื่อน ดำเนินการทดลองโดยใช้เครื่องวัดแรงดึง (Tensile Test) ดังภาพประกอบที่ 28 โดยทดสอบที่ท่อเหล็กที่มีความหนาต่าง ๆ และแผ่นเหล็ก บันทึกค่าแรงยึดเกาะที่ได้จากเครื่องทดสอบเทียบกับระยะห่างที่เปลี่ยนไปโดยมีตัวแปรในการทดลองดังนี้

ตัวแปรต้นในการทดลองคือ ท่อเหล็ก แผ่นเหล็ก ชุดแม่เหล็ก

ตัวแปรตามในการทดลองคือ แรงยึดเกาะของล่อแม่เหล็กที่ระยะห่างต่าง ๆ

ตัวแปรควบคุมในการทดลองคือ เครื่องทดสอบแรงดึง



ภาพประกอบที่ 28 การออกแบบการทดลองแรงยึดเกาะของแม่เหล็ก

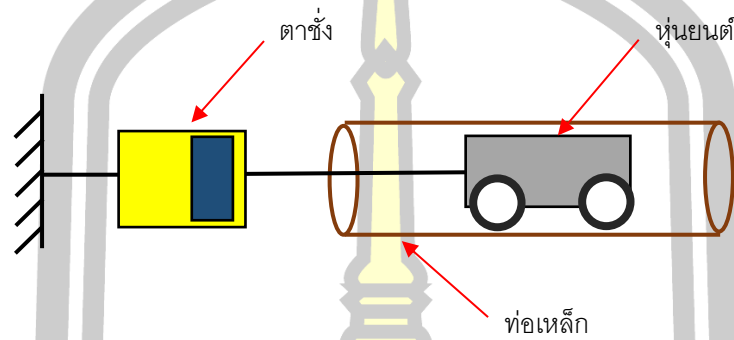
3.5.2 การทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวระดับ

วัตถุประสงค์การทดสอบหาแรงในการดึงภาระของหุ่นยนต์ในขณะวิ่งในแนวระดับ เพื่อทดสอบหาแรงสูงสุดในการดึงเนื่องจากขณะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในท่อด้วยสายควบคุม ซึ่งสายควบคุมนั้นจะเป็นภาระของหุ่นยนต์เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นสายควบคุมก็จะยาวมากขึ้นทำให้สายควบคุมเป็นภาระให้กับหุ่นยนต์และเพื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากการทดลองวัดแรงแม่เหล็ก ดำเนินการทดลองออกเป็น 2 การทดลองดังภาพประกอบที่ 29 และภาพประกอบที่ 30 โดยมีตัวแปรในการทดลองดังนี้

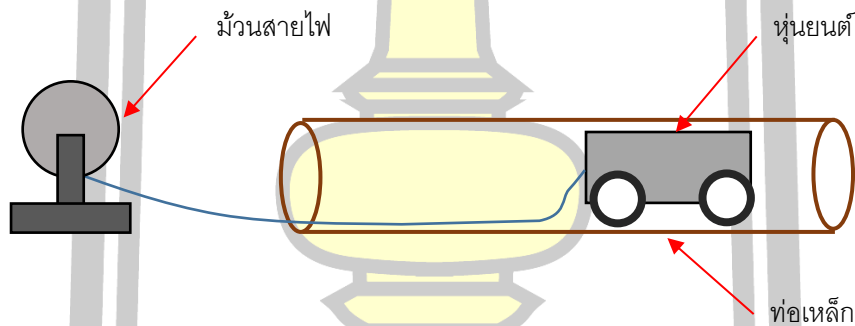
ตัวแปรต้นในการทดลองคือ แรงดึงหุ้ยนนต์

ตัวแปรตามในการทดลองคือ การไถลของหุ้ยนนต์

ตัวแปรควบคุมในการทดลองคือ ท่อเหล็ก ขนาดสายควบคุม



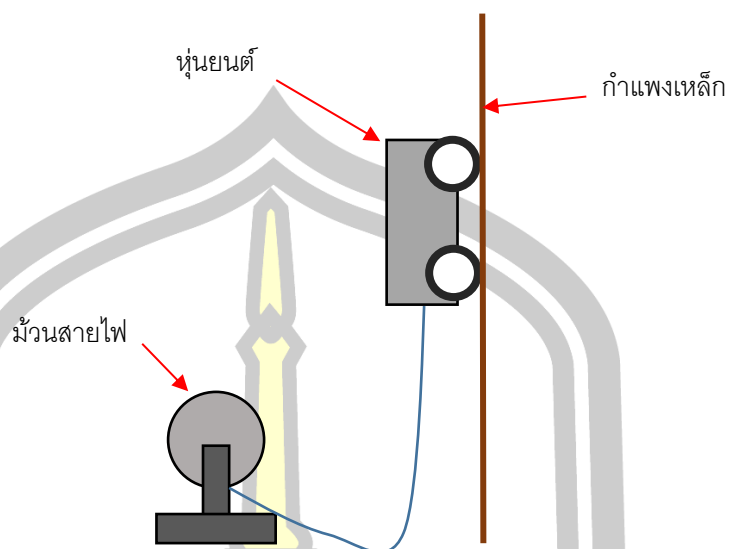
ภาพประกอบที่ 29 การออกแบบการทดสอบหาแรงดึงภาาระสูงสุด



ภาพประกอบที่ 30 การออกแบบการทดสอบดึงสายควบคุม

3.5.3 การทดสอบการเคลื่อนที่แนวตั้ง

วัตถุประสงค์การทดสอบการเคลื่อนที่แนวตั้ง เพื่อหาระยะสูงสุดในการเคลื่อนที่ของหุ้ยนนต์ในแนวตั้ง เนื่องด้วยสายควบคุมจะเป็นภาระให้หุ้ยนนต์ เมื่อระยะทางเพิ่มมากขึ้นน้ำหนักสายควบคุมก็จะเพิ่มมากขึ้นและเพื่อเปรียบเทียบกับค่าคำนวณจากการทดลองวัดแรงแม่เหล็ก



ภาพประกอบที่ 31 การออกแบบการทดสอบการเคลื่อนที่แนวตั้ง

ดำเนินการทดลองดังภาพประกอบที่ 31 โดยให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่บนก้ำแพงเหล็กและวัดระยะการเคลื่อนที่โดยวัดที่ความยาวของสายควบคุม

ตัวแปรต้นในการทดลองคือ ระยะความสูงของหุ่นยนต์

ตัวแปรตามในการทดลองคือ การไหลของหุ่นยนต์

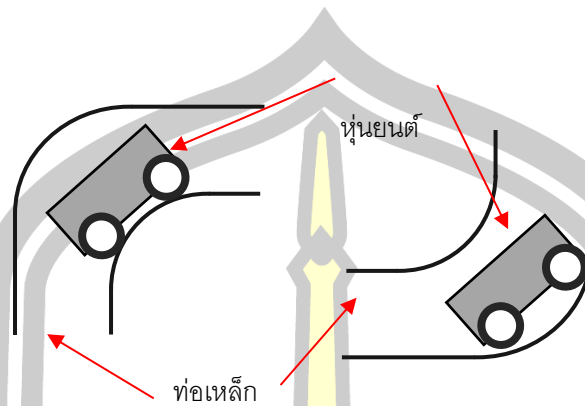
ตัวแปรควบคุมในการทดลองคือ ก้ำแพงเหล็ก

3.5.4 การทดสอบการเคลื่อนที่ผ่านท่อโค้งในแนวตั้ง

วัตถุประสงค์การทดสอบการเคลื่อนที่ในท่อโค้ง เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ผ่านในท่อเหล็ก

โค้ง ดำเนินการทดลองดัง

ภาพประกอบที่ 32 โดยให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ในท่อเหล็กโค้ง 2 ลักษณะคือ ท่อเหล็กโค้งจากแนวตั้งไปยังแนวระดับ (โค้งคว่ำ) และจากแนวระดับไปแนวตั้ง (โค้งหงาย) ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ทดลองการเคลื่อนที่ในท่อโค้งซ้ายขวาในแนวระดับเนื่องจากหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่สไลด์ข้างและเคลื่อนที่ผ่านไปได้ ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ที่ง่ายกว่าท่อโค้งในแนวตั้ง



ภาพประกอบที่ 32 การทดสอบการเคลื่อนที่ผ่านท่อโค้งในแนวตั้งในรูปแบบโค้งคว่ำและโค้งหงาย

ตัวแปรต้นในการทดลองคือ การเคลื่อนที่ในท่อโค้งคว่ำและโค้งหงาย

ตัวแปรตามในการทดลองคือ สมรรถนะในการเคลื่อนที่ผ่านท่อโค้ง

ตัวแปรควบคุมในการทดลองคือ ท่อเหล็กโค้ง

3.5.5 การทดสอบการเคลื่อนที่ในน้ำ

วัตถุประสงค์การทดสอบการเคลื่อนที่ในพื้นที่น้ำท่วมขัง เพื่อทดสอบหาระดับการป้องกันน้ำของหุ่นยนต์เนื่องจากสภาพท่อสำรวจในบางครั้งอาจจะมีของเหลวตกค้างอยู่ในท่อทดสอบ จึงจำเป็นต้องทดสอบหาระดับสูงสุดในการป้องกันเหลวของหุ่นยนต์

ดำเนินการทดลองโดยการอัดความดัน เข้าในหุ่นยนต์เพื่อหาระดับความดันภายในหุ่นยนต์ที่รับได้เพื่อใช้ในการคำนวณหาระดับความสูงของระดับน้ำโดยไม่ต้องทดสอบกับน้ำจริงเพื่อลดความเสี่ยงในการเกิดความเสียหาย โดยการค่อยๆปรับความดันเพิ่มขึ้นจนกว่าความดันจะรั่วออกจากหุ่นยนต์และบันทึกผล โดยความสูง (h) สามารถหาได้จากการคำนวณดังสมการ 22

ตัวแปรต้นในการทดลองคือ ระดับความดันลม

ตัวแปรตามในการทดลองคือ การเก็บความดันภายในหุ่นยนต์

ตัวแปรควบคุมในการทดลองคือ ระดับความสูงในการทดลอง

$$Pr_{robot} = \rho gh \quad (22)$$

ความดันภายในหุ่นยนต์จากการอัดความดันลม Pr_{robot} คำนวณหาความสูงได้ดังสมการ 23 โดยกำหนดให้ความหนาแน่นของน้ำ $\rho = 1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ และ $g = 9.8 \text{ m/s}^2$

$$h = \frac{Pr_{robot}}{1 \times 10^3 \times 9.8} \quad (23)$$

3.5.6 การทดสอบการทำงานที่สภาวะอุณหภูมิสูง

วัตถุประสงค์การทดสอบการทำงานที่สภาวะอุณหภูมิสูง เพื่อหาสมรรถนะของหุ่นยนต์ในการทำงานที่อุณหภูมิสูง เนื่องด้วยบางครั้งในการสำรวจทดสอบอาจจะยังมีอุณหภูมิเหลืออยู่ในท่อ จึงจำเป็นต้องทดสอบหาสมรรถนะในการทำงานที่อุณหภูมิสูง

ดำเนินการทดลอง โดยนำไปทดสอบในเครื่องทำความร้อน โดยการเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องขึ้นเรื่อย ๆ และสังเกตการทำงานของหุ่นยนต์

ตัวแปรต้นในการทดลองคือ อุณหภูมิความร้อน

ตัวแปรตามในการทดลองคือ การทำงานของหุ่นยนต์



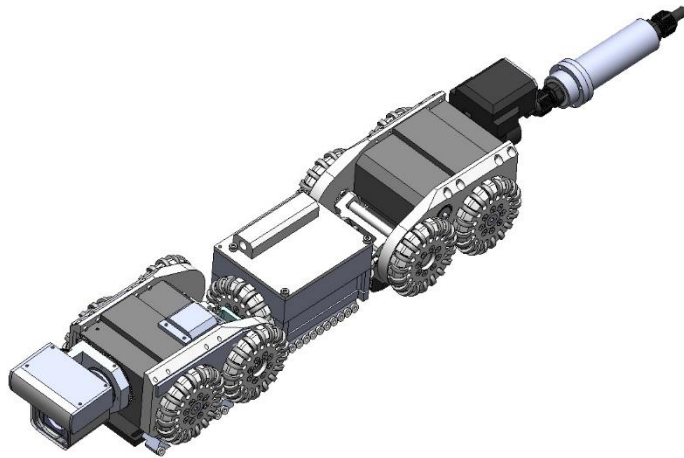
บทที่ 4

ผลการออกแบบและการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการออกแบบของหุ่นยนต์ด้วยโปรแกรมช่วยทางคอมพิวเตอร์ ผลของการสร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในท่อจากการออกแบบ และการทดลองของ 3 การทดลองคือ การทดสอบแรงยึดเกาะชุดล้อแม่เหล็ก การทดสอบแรงในการดึงภาระของหุ่นยนต์ การทดสอบการเคลื่อนที่ผ่านท่อ

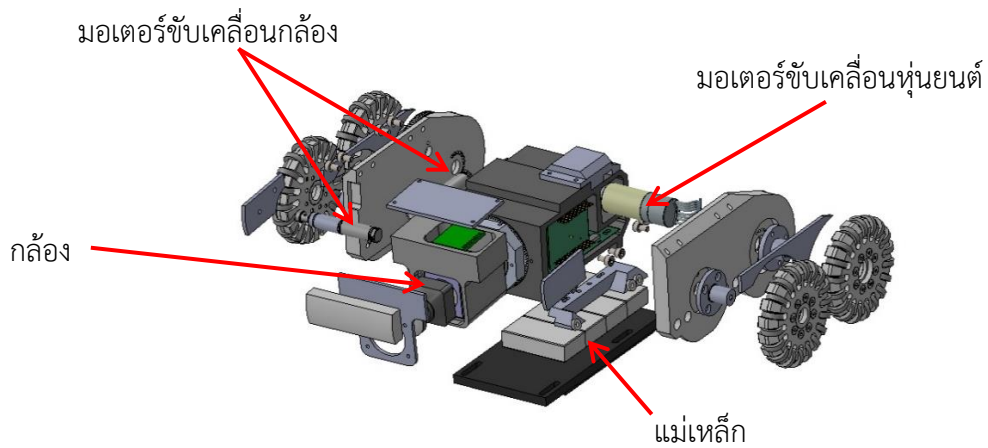
4.1 ผลของการออกแบบ

จากแนวคิดการออกแบบหุ่นยนต์ในบทที่ 3 ผู้วิจัยได้นำมาออกแบบโดยละเอียด โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบดังภาพประกอบที่ 33 โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือส่วนหน้า ส่วนกลาง และส่วนหลัง



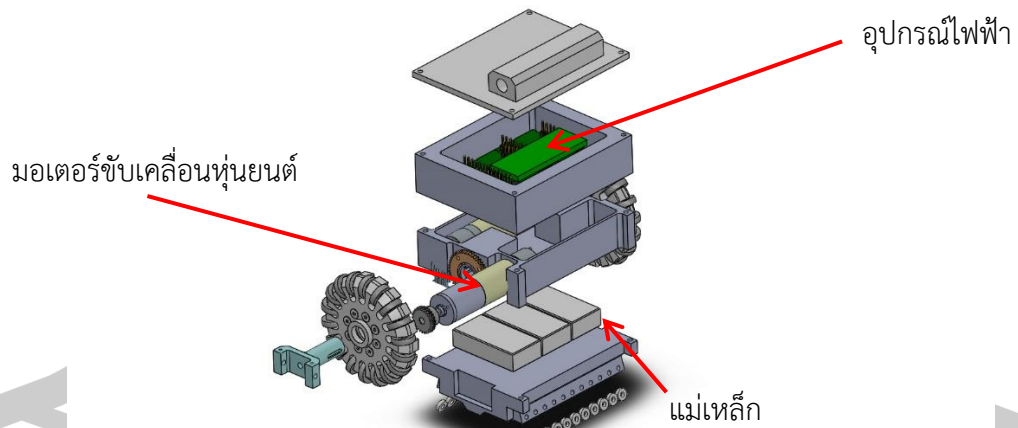
ภาพประกอบที่ 33 ผลการออกแบบหุ่นยนต์

ชุดขับเคลื่อนส่วนหน้า หุ่นยนต์มีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนคือ กิ่ง และชุดขับเคลื่อน หุ่นยนต์ โดยกิ่งสามารถหมุนได้ 2 แกนอิสระขับเคลื่อนโดยใช้มอเตอร์ และชุดขับเคลื่อนหุ่นยนต์ใช้มอเตอร์หนึ่งตัวทำหน้าที่เดินหน้าถอยหลัง โดยมีโครงสร้างภายในดังภาพประกอบที่ 34 ออกแบบให้โครงสร้างประกบเข้าขวาทเพื่อให้หุ่นยนต์มีความสามารถในการกั้นน้ำได้



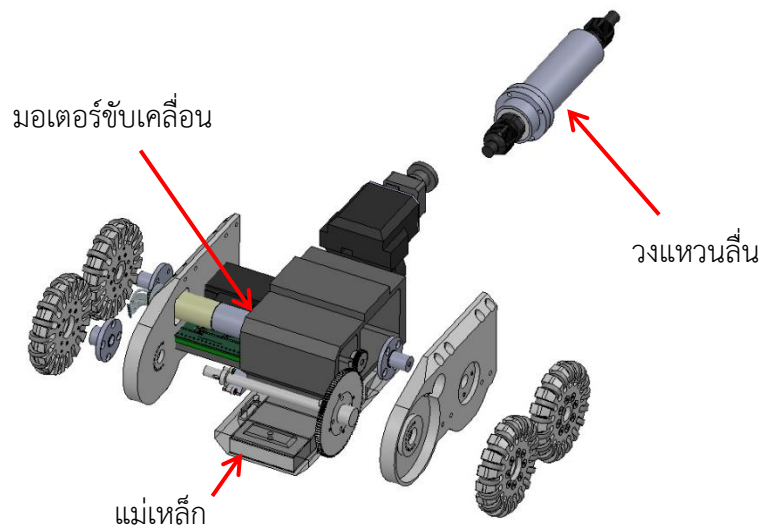
ภาพประกอบที่ 34 โครงสร้างภายในชุดขับเคลื่อนส่วนหน้า

ชุดขับเคลื่อนส่วนกลางทำหน้าที่หลักในการขับเคลื่อนหุ่นยนต์ทางซ้ายขวา ใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนจำนวน 2 ตัว โดยออกแบบให้เป็น 2 ห้อง คือห้องของมอเตอร์และห้องของวงจรมอเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถกักน้ำได้ดังภาพประกอบที่ 35



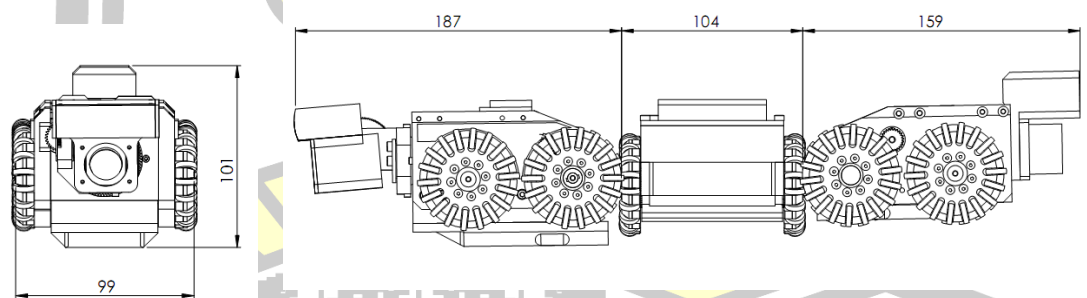
ภาพประกอบที่ 35 โครงสร้างภายในชุดขับเคลื่อนส่วนกลาง

ชุดขับเคลื่อนส่วนหลังของหุ่นยนต์มีส่วนประกอบ 2 ส่วนคือกลิ้งและชุดขับเคลื่อน กลิ้งไม่สามารถหมุนได้และชุดขับเคลื่อนมีมอเตอร์ 1 ตัวสำหรับเคลื่อนที่ไปหน้าและถอยหลังดังภาพประกอบที่ 36



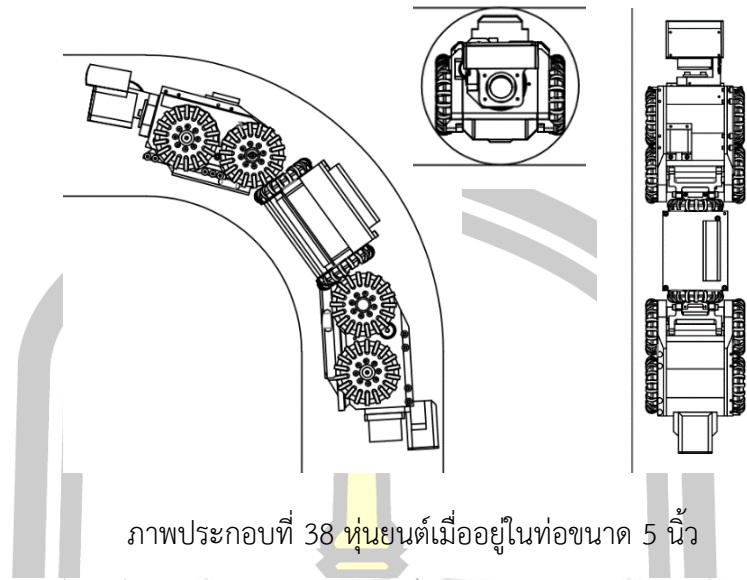
ภาพประกอบที่ 36 โครงสร้างภายในชุดขับเคลื่อนส่วนหลัง

ขนาดของหุ่นยนต์ดังภาพประกอบที่ 37 โดยจากขนาดหุ่นยนต์ หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ภายในท่อตั้งแต่ท่อขนาด 5 นิ้ว (เส้นผ่านศูนย์กลาง 127 มิลลิเมตร) ขึ้นไปตั้ง ภาพประกอบที่ 38 และขนาดของหุ่นยนต์เมื่อเทียบกับท่อขนาดต่าง ๆ ดังภาพประกอบที่ 39

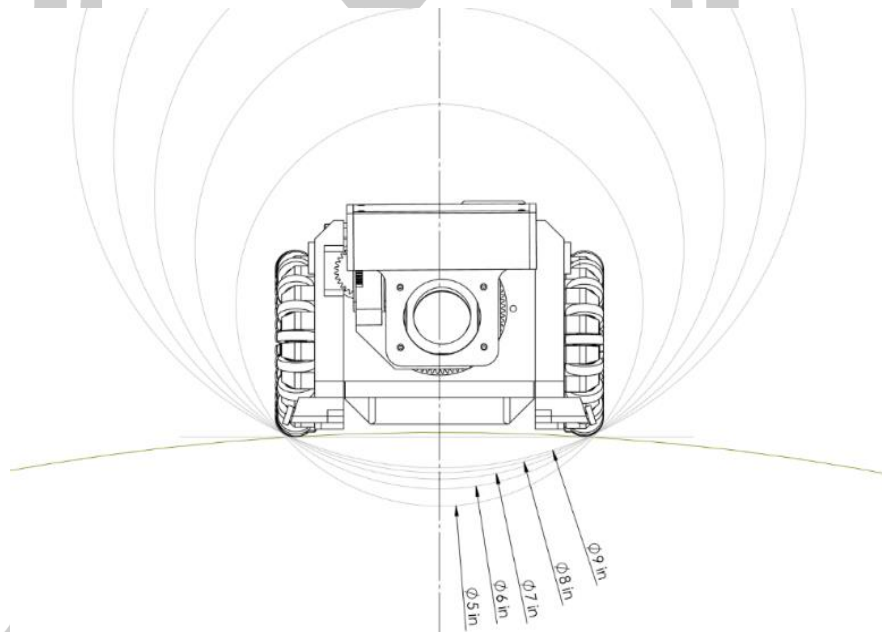


ภาพประกอบที่ 37 ขนาดของหุ่นยนต์

พูน ปรุ ทิโต ชเว

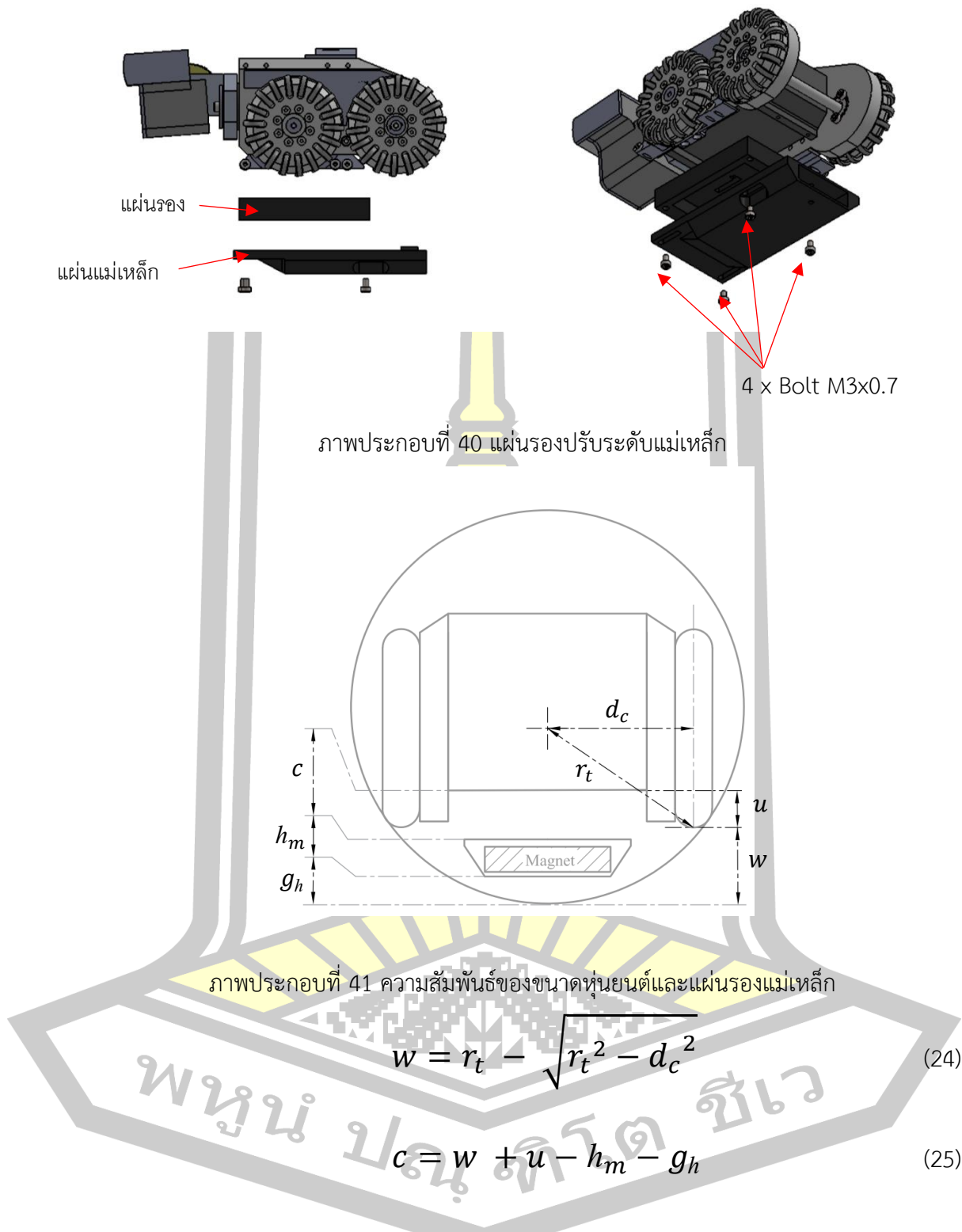


ภาพประกอบที่ 38 หุ่นยนต์เมื่ออยู่ในท่อขนาด 5 นิ้ว



ภาพประกอบที่ 39 ขนาดของหุ่นยนต์เมื่อเทียบกับท่อ

การเปลี่ยนขนาดท่อจำเป็นต้องใช้แผ่นรองแม่เหล็กที่โมดูลหน้าและหลังดัง ภาพประกอบที่ 40 เพื่อให้แม่เหล็กส่งแรงเกาะไปยังท่อได้ตามแรงที่กำหนด โดยที่ขนาดแผ่นรองแม่เหล็กที่เหมาะสมกับขนาดท่อต่าง ๆ เป็นดังตาราง 9 โดยการคำนวณจากขนาดของหุ่นยนต์ตามสมการ 25 โดยมีตัวแปรต่างดังภาพประกอบที่ 41



- c คือขนาดของแผ่นรองชุดแม่เหล็ก
- r_t คือรัศมีของท่อ
- d_c คือความกว้างจากศูนย์กลางหุ่นยนต์ถึงศูนย์กลางล้อมีค่าเท่ากับ 45.0 มิลลิเมตร

- u คือความสูงจากด้านล่างของหุ่นยนต์ถึงล้อมีค่าเท่ากับ 17.4 มิลลิเมตร
- w คือความสูงจากด้านล่างของช่องท่อถึงล้อหุ่นยนต์
- h_m คือความสูงของชุดแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 13.5 มิลลิเมตร
- g_h คือความสูงระหว่างชุดแม่เหล็กและท่อมีค่าเท่ากับ 4 มิลลิเมตร

ตาราง 9 ขนาดแผ่นรองปรับระดับแม่เหล็ก

ขนาดท่อ (นิ้ว)	5	6	7	8	9	10	11	แผ่นเรียบ
ความหนาแผ่นรอง (มิลลิเมตร)	18	14	12	10	9	8	7	1

จากตาราง 9 พบว่าแผ่นรองแม่เหล็กจะมีขนาดหนาสุด 18 มิลลิเมตร ที่ขนาดท่อ 5 นิ้วและมีความหนาลดลงเมื่อขนาดท่อมีรัศมีเพิ่มมากขึ้น จนถึงแผ่นเรียบมีขนาดเท่ากับ 1 มิลลิเมตร เพื่อรักษาระดับความสูงของแม่เหล็กไว้ที่ 4 มิลลิเมตร ในการเคลื่อนที่ในท่อตรง

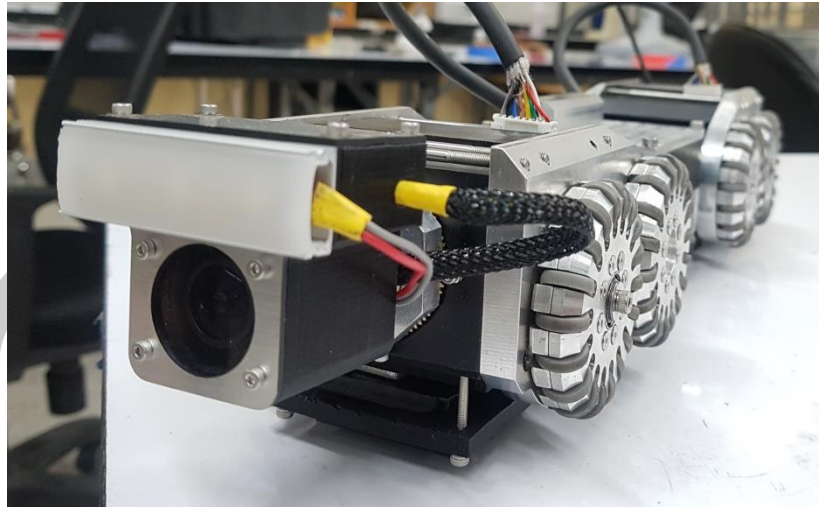
จากผลการออกแบบ หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ในท่อเหล็กขนาดเริ่มตั้งแต่ 5 นิ้วขึ้นไปจนถึงแผ่นเหล็กได้ โดยการเปลี่ยนแผ่นรองแม่เหล็กเพื่อให้แม่เหล็กมีระยะห่างกับท่อเหล็กตามกำหนดไว้ เพื่อไม่ให้แรงยึดเกาะลดลง โดยแผ่นรองจะมีความหนาสูงสุด 18 มิลลิเมตรในท่อ 5 นิ้ว จะทำให้แม่เหล็กมีระยะห่างระหว่างแม่เหล็ก 4.0 มิลลิเมตร ในระหว่างการเคลื่อนที่

4.2 ผลการสร้างหุ่นยนต์

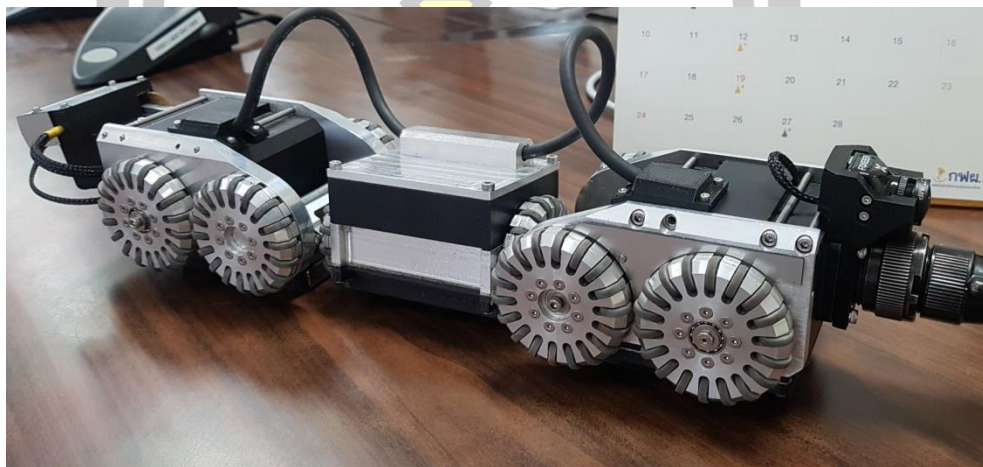
4.2.1 ผลการสร้างโครงสร้างทางกล

จากการออกแบบในหัวข้อที่ 4.1 ได้นำแบบแต่ ละชิ้นมาทำการขึ้นรูปดังภาพประกอบที่ 42 โดยโครงสร้างหลักทำจากอลูมิเนียม และ MC-Nylon น้ำหนักของหุ่นยนต์มีขนาด 3 กิโลกรัม หุ่นยนต์สามารถวิ่งได้ความเร็วสูงสุด 30 เซนติเมตรต่อวินาที

พูนุ ปณุกิตโต ชิว



(ก)



(ข)

ภาพประกอบที่ 42 ผลการสร้างหุ่นยนต์ตามแบบ

แม่เหล็กที่ใช้ในสร้างหุ่นยนต์เป็นแม่เหล็กแม่เหล็กถาวรนีโอไดเมียม NdFeB (Neodymium) ขนาด $40 \times 20 \times 10$ เกรต N35 โดยใช้จำนวน 4 ชั้นในส่วนหุ่นยนต์ด้านหน้าและหลัง และส่วนตรงกลางใช้จำนวน 3 ชั้น โดยออกแบบให้บรรจุรวมกันอยู่ในกล่องขึ้นส่วนจากการพิมพ์สามมิติ

4.2.2 ผลการสร้างชุดควบคุม

ชุดควบคุมแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนกล่องควบคุมและกล่องม้วนสายควบคุมดังภาพประกอบที่ 43 ออกแบบให้อุปกรณ์ทั้งหมดอยู่ในกล่องกันกระแทก



ภาพประกอบที่ 43 ผลการสร้างชุดควบคุมและกล่องเก็บสายไฟ

กล่องควบคุมแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนชุดควบคุมหุ่นยนต์และชุดบันทึกภาพ โดยชุดบันทึกภาพจากกล้องหน้าหลังของหุ่นยนต์สามารถบันทึกภาพเคลื่อนไหวและภาพนิ่งได้ผ่านทาง USB พอร์ต ลงบนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 250 GB ดังภาพประกอบที่ 44



ภาพประกอบที่ 44 ชุดบันทึกภาพด้านหน้าและด้านหลังหุ่นยนต์

ชุดควบคุมหุ่นยนต์ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์มีพิวส์ขนาด 10 แอมป์ สำหรับตัดการทำงานเมื่อมีกระแสเกิน สวิตช์และแกนควบคุมสำหรับควบคุมหุ่นยนต์ และจอสัมผัส สำหรับแสดงผลขนาด 7 นิ้วดัง ภาพประกอบที่ 45



ภาพประกอบที่ 45 ชุดควบคุมหุ่นยนต์

ชุดม้วนเก็บสายไฟสามารถม้วนเก็บสายไฟได้ 50 เมตร โดยการหมุนแกนด้านข้างของกล่อง และมีล้อสำหรับลากเข็นดังภาพประกอบที่ 46

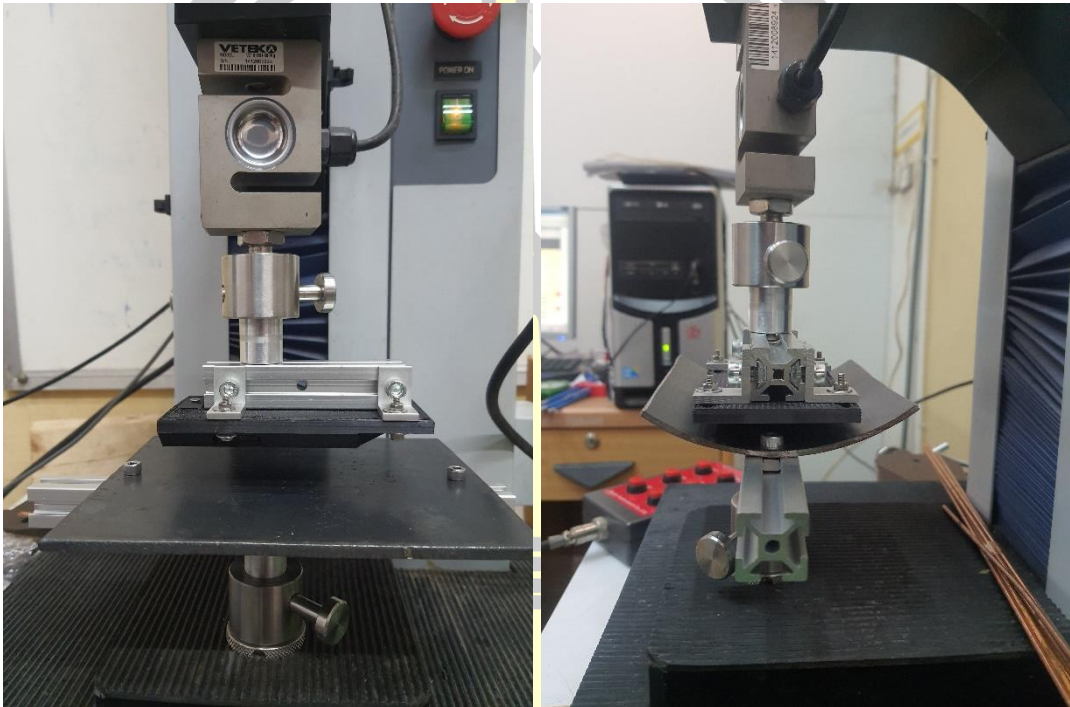


ภาพประกอบที่ 46 ชุดม้วนเก็บสายไฟ

4.3 ผลการทดลอง

4.3.1 การทดสอบแรงยึดเกาะของแม่เหล็ก

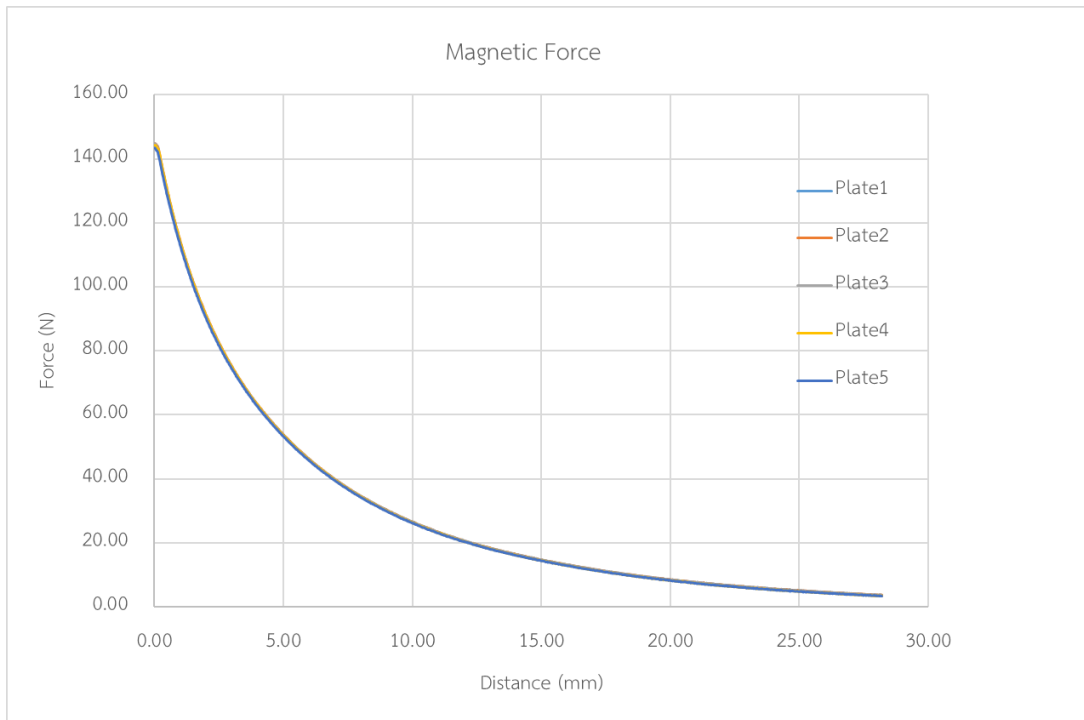
การทดสอบแรงยึดเกาะของแม่เหล็กโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง แบ่งการทดลองชุดแม่เหล็กออกเป็น 2 ชุดคือ ชุดแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ส่วนหน้าหลัง และชุดแม่เหล็กสำหรับส่วนกลาง ดังนี้



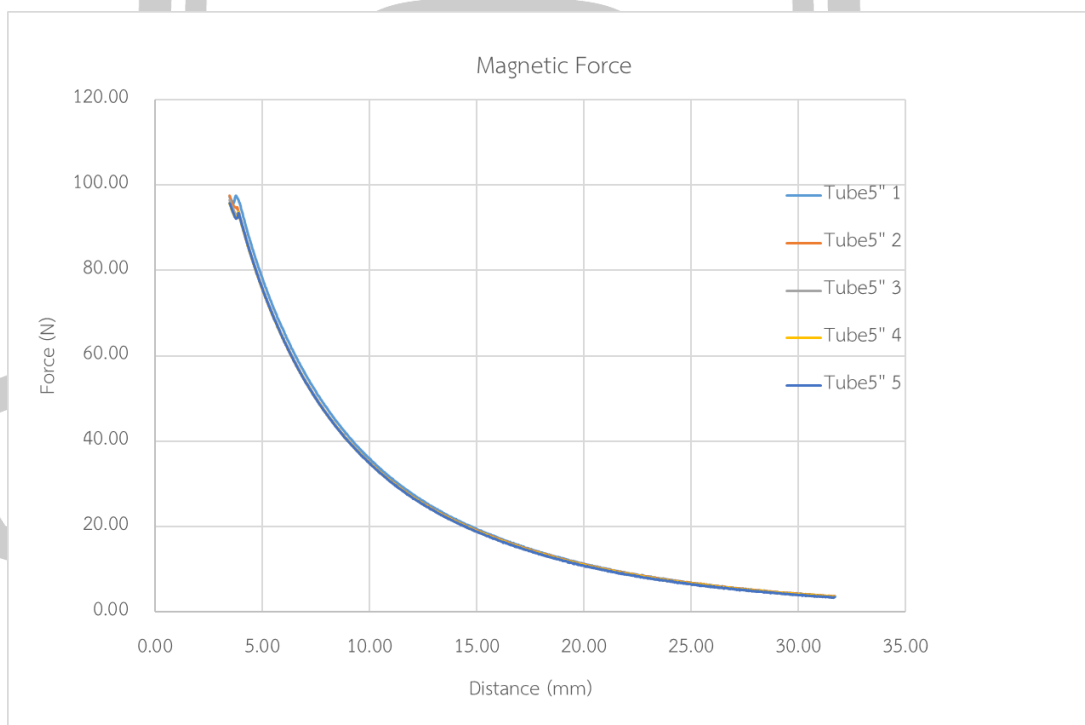
ภาพประกอบที่ 47 การทดสอบแรงดึงชุดแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ส่วนหน้าหลัง

การทดลองแรงยึดเกาะชุดแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ส่วนหน้าหลังดังภาพประกอบที่ 47 ทดสอบกับแผ่นเหล็กขนาดความหนา 4 มิลลิเมตร ท่อเหล็กขนาด 5 นิ้ว และท่อเหล็กขนาด 6 นิ้ว โดยทดสอบทั้งหมด 5 ครั้ง มีผลการทดลองดัง ภาพประกอบที่ 48 ภาพประกอบที่ 49 ภาพประกอบที่ 50 ตามลำดับ

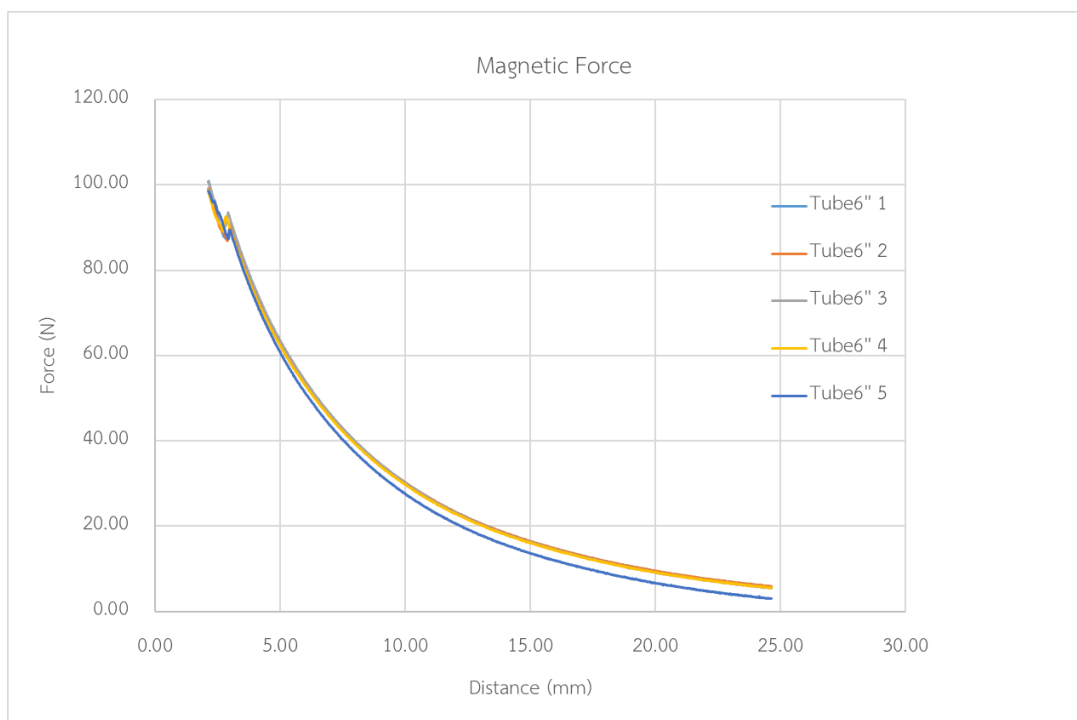
พหุ ประถม ศึกษาศาสตร์



ภาพประกอบที่ 48 ผลการทดสอบแรงดึงแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ส่วนหน้าหลังกับเหล็กแผ่น



ภาพประกอบที่ 49 ผลการทดสอบแรงดึงแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ส่วนหน้าหลังกับท่อเหล็กขนาด 5 นิ้ว



ภาพประกอบที่ 50 ผลการทดสอบแรงดึงแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ส่วนหน้าหลังกับท่อเหล็กขนาด 6 นิ้ว

จากผลการทดสอบแรงดึงของชุดแม่เหล็กเทียบกับระยะห่างกับเหล็กทั้ง 3 แบบ แต่ละแบบ ทำซ้ำทั้งหมด 5 ครั้งพบว่ามีความใกล้เคียงกัน โดยมีลักษณะกราฟเป็นแบบ Exponential เมื่อระยะห่างของชุดแม่เหล็กห่างจากแผ่นทดสอบแรงยึดเกาะยิ่งลดลง ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนดังสมการ 1 โดยค่า B ลดน้อยลงเมื่อมีระยะห่างมากขึ้น และท่อขนาด 5 นิ้วมีแรงแม่เหล็กมากที่สุดและลดลงเมื่อขนาดท่อใหญ่ขึ้น เป็นไปตามการจำลองสนามแม่เหล็กในหัวข้อ 3.1.2

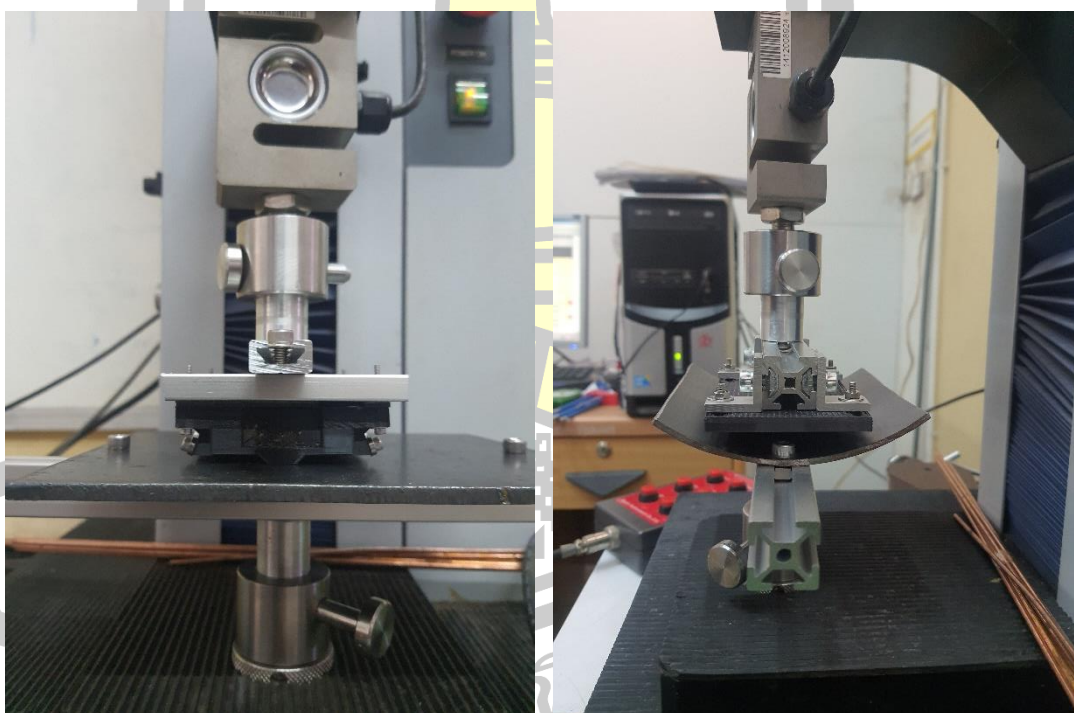
งานวิจัยนี้เลือกใช้ความสูงของแม่เหล็กที่ 4 มิลลิเมตร ซึ่งทำให้หุ่นยนต์ส่วนหน้าและส่วนหลังมีแรงยึดเกาะดัง ตาราง 10 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองทั้งหมด 5 ครั้ง

ตาราง 10 แรงยึดเกาะชุดแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ส่วนหน้าหลัง

	แรงยึดเกาะเฉลี่ย (N)	S.D.
แผ่นเหล็ก	62.7	0.2
ท่อเหล็กขนาด 5 นิ้ว	92.4	1.5
ท่อเหล็กขนาด 6 นิ้ว	74.4	1.0

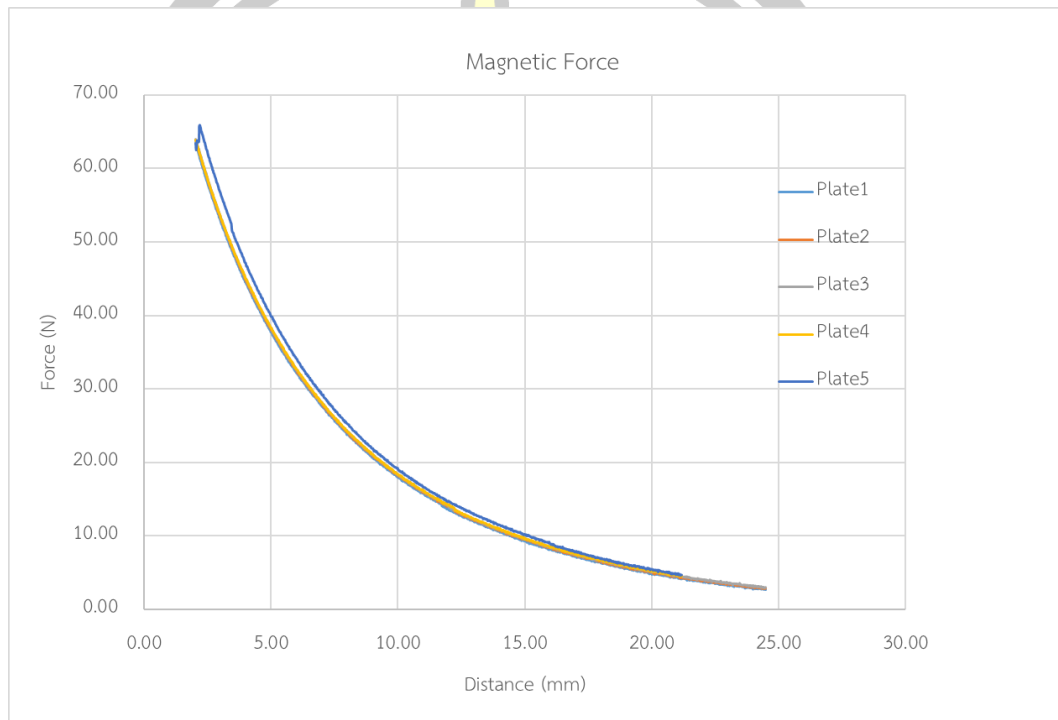
จากผลการทดสอบสามารถรวมแรงในการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของหุ่นยนต์เพื่อใช้ในการคำนวณในสมการ 8 โดยแรงน้อยที่สุดคือขณะที่หุ่นยนต์อยู่บนแผ่นเหล็กเท่ากับ 62.7 นิวตัน มุมการเคลื่อนที่ (θ) เท่ากับ 90 องศา และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (μ_s) เท่ากับ 0.55 จะได้แรงเสียดทานในการยึดเกาะจากชุดแม่เหล็กเท่ากับ 41.3 นิวตันและแรงจากน้ำหนักหุ่นยนต์ (G_{robot}) เท่ากับ 29.4 นิวตัน ดังนั้นแรงเสียดทานจึงมีค่ามากพอที่จะทำให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวตั้ง โดยผลต่างของแรงทั้งสองจะเป็นน้ำหนักของสายเคเบิลที่หุ่นยนต์บรรทุกได้ (G_{cable}) คือ 11.9 นิวตัน เมื่อนำไปแทนค่าในสมการ 8 จะทำให้ได้ความยาวของสายไฟในการเคลื่อนที่แนวตั้งเท่ากับ 11.9 เมตร โดย $m_{slipring+connector}$ มีค่าเท่ากับ 0.6 กิโลกรัม

การคำนวณกำลังขับเคลื่อนมอเตอร์ตั้งสมการ 14 โดยใช้ผลการทดลองจากตาราง 10 โดยที่แรงแม่เหล็กจะมีค่ามากที่สุดเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ในท่อโค้งขนาด 5 นิ้ว คือ 92 นิวตัน โดยกำหนดความเร็วและความเร่งในการเคลื่อนที่ (V_{robot}, a) เท่ากับ 0.3 m/s และ 0.3 m/s² ตามลำดับ โดยกำลังมอเตอร์ที่คำนวณได้คือ 31 วัตต์



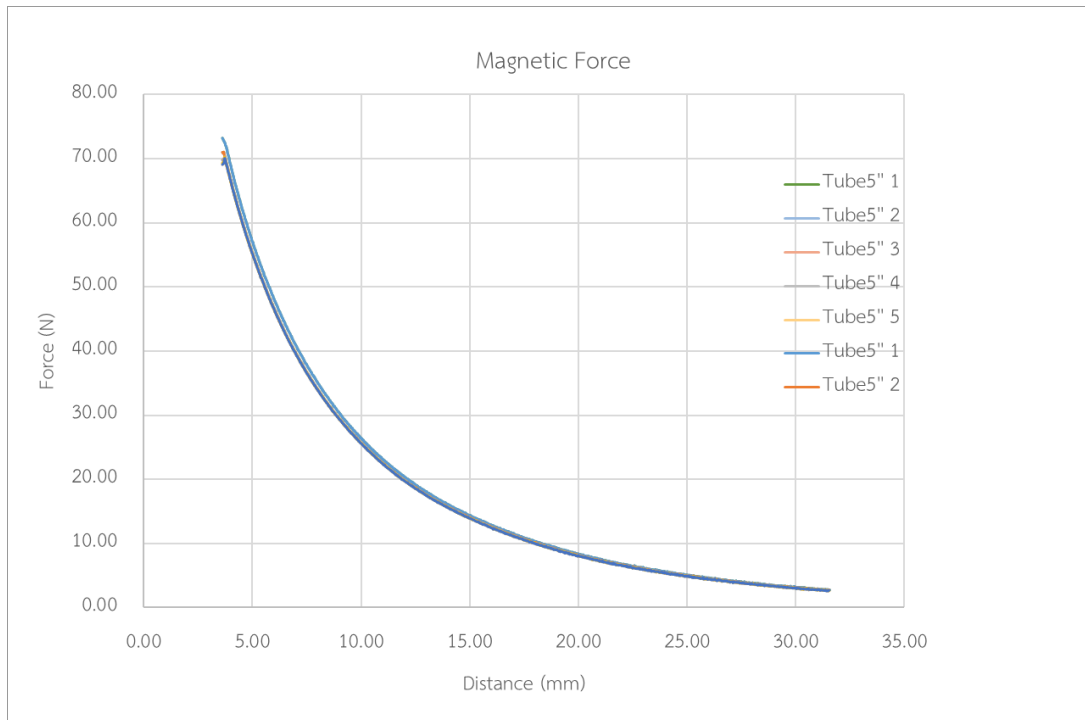
ภาพประกอบที่ 51 การทดสอบแรงดึงชุดแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ส่วนกลาง

การทดลองแรงยึดเกาะชุดแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ส่วนกลางดังภาพประกอบที่ 51 ทดสอบกับแผ่นเหล็กขนาดความหนา 4 มิลลิเมตร ท่อเหล็กขนาด 5 นิ้ว และท่อเหล็กขนาด 6 นิ้ว โดยทดสอบทั้งหมด 5 ครั้ง มีผลการทดลองดัง ภาพประกอบที่ 52 ภาพประกอบที่ 53 ภาพประกอบที่ 54 ตามลำดับ

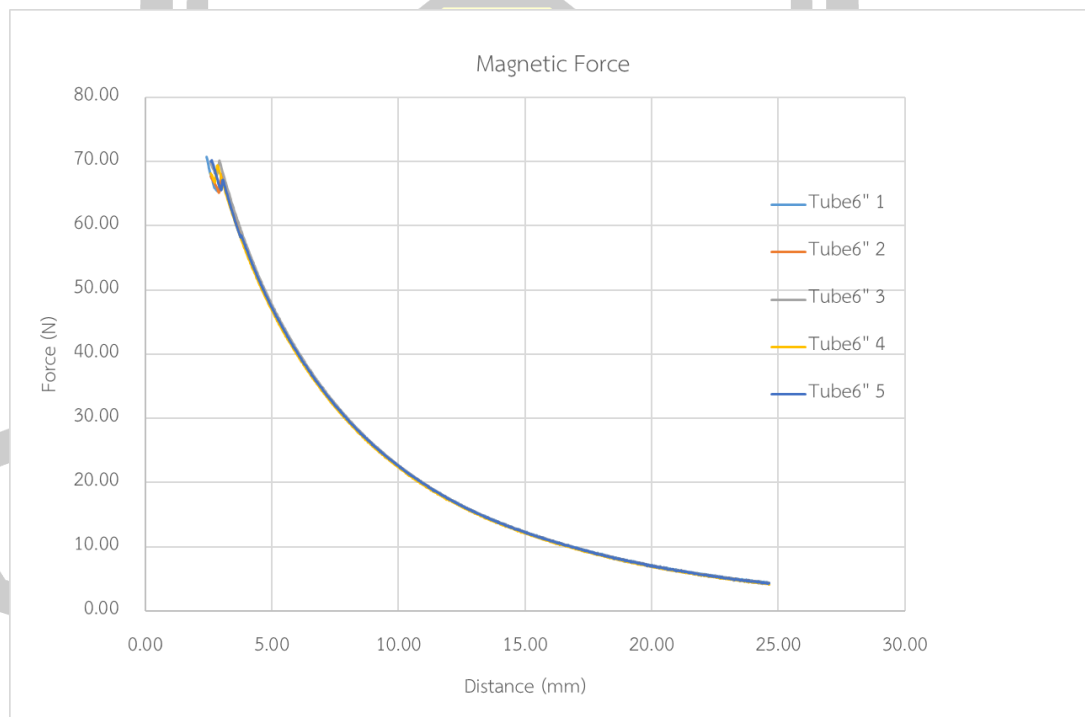


ภาพประกอบที่ 52 ผลการทดสอบแรงดึงแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ส่วนกลางกับเหล็กแผ่น





ภาพประกอบที่ 53 ผลการทดสอบแรงดึงแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ส่วนกลางกับท่อเหล็กขนาด 5 นิ้ว



ภาพประกอบที่ 54 ผลการทดสอบแรงดึงแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ส่วนกลางกับท่อเหล็กขนาด 6 นิ้ว

จากผลการทดสอบแรงดึงของชุดแม่เหล็กเทียบกับระยะห่างกับเหล็กทั้ง 3 แบบ แต่ละแบบ ทำซ้ำทั้งหมด 5 ครั้ง พบว่ามีความใกล้เคียงกัน โดยมีลักษณะกราฟเป็นแบบ Exponential เช่นเดียวกันกับการทดลองแม่เหล็กส่วนหน้าและหลัง โดยสำหรับหุ่นยนต์ส่วนกลางนั้นระยะห่างระหว่างแม่เหล็กและท่อเหล็กจะมีระยะห่างคงที่ตลอดการเคลื่อนที่ที่ระยะความสูงของชุดแม่เหล็กเท่ากับ 2.9 มิลลิเมตร ทำให้หุ่นยนต์ส่วนกลางมีแรงยึดเกาะดังตาราง 11 เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองทั้งหมด 5 ครั้ง

ตาราง 11 แรงยึดเกาะชุดแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ส่วนกลาง

	แรงยึดเกาะ (N)	S.D.
แผ่นเหล็ก	55.0	1.5
ท่อเหล็กขนาด 5 นิ้ว	71.6	0.6
ท่อเหล็กขนาด 6 นิ้ว	67.1	1.9

จากทดลองของชุดแม่เหล็กทั้ง 2 ชุด พบว่าขนาดของท่อมีผลกับแรงยึดเกาะของแม่เหล็กโดยท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กจะมีแรงยึดเกาะมากและลดลงเมื่อขนาดของท่อใหญ่ขึ้นและน้อยสุดเมื่อเหล็กเป็นแผ่นเรียบ

จากผลการทดสอบสามารถรวมแรงในการเคลื่อนที่ด้านข้างของหุ่นยนต์เพื่อใช้ในการคำนวณในสมการ 9 โดยแรงน้อยที่สุดคือขณะที่หุ่นยนต์อยู่บนแผ่นเหล็กเท่ากับ 55.0 นิวตัน มุมการเคลื่อนที่ (θ) เท่ากับ 0 องศา หุ่นยนต์จะรับแรงจากน้ำหนักมากที่สุดในการเคลื่อนที่ด้านข้าง โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (μ_s) เท่ากับ 0.55 จะได้แรงเสียดทานในการยึดเกาะจากชุดแม่เหล็กเท่ากับ 30 นิวตันและแรงจากน้ำหนักหุ่นยนต์ (G_{robot}) เท่ากับ 29 นิวตัน ดังนั้นแรงเสียดทานจึงมีค่ามากพอที่จะทำให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวข้าง

พหุ ประทีป ชีวะ



ภาพประกอบที่ 55 มอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนและมอเตอร์สำหรับหมุนกลิ้ง

มอเตอร์ที่เลือกใช้สำหรับงานวิจัยนี้ใช้มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านดังภาพประกอบที่ 55 เนื่องจากเป็นมอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อให้มีน้ำหนักเบาและไม่เกิดประกายไฟเพื่อลดความเสี่ยงเมื่อใช้งานในที่ที่สารไวไฟ โดยมอเตอร์ขับเคลื่อนที่เลือกใช้ รุ่น EC18 ขนาด 30 วัตต์ และชุดอัตราทดมอเตอร์ GP16A (rt_{motor}) เท่ากับ 104:1 และอัตราทดของหุ่นยนต์ (rt_{robot}) เท่ากับ 4 โดยแทนค่าลงในสมการ 14 และ 15 ได้ค่าต่าง ๆ ดังตาราง 12 โดยคุณสมบัติมอเตอร์ที่เลือกมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณ

ตาราง 12 เปรียบเทียบคุณสมบัติมอเตอร์ที่เลือกใช้เทียบกับการคำนวณ

	กำลัง (Watt)	ความเร็ว (RPM)	แรงบิด (Nm)
คำนวณ	31	37,836	0.0078
EC18+GP16A	30	38,100	0.0083

4.3.2 การทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวระดับ

จากการทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวระดับตามหัวข้อที่ 3.5.2 เพื่อทดสอบหาแรงสูงสุดในการดึงและการดึงสายควบคุม เพื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยแรงแม่เหล็ก โดยมีผลคือ หุ่นยนต์สามารถดึงภาระโหลดสูงสุดได้ 6 กิโลกรัม (58.8 นิวตัน) ภาพประกอบที่ 56 และสามารถลากสายควบคุมที่มีความยาว 50 เมตร ดังภาพประกอบที่ 57



ภาพประกอบที่ 56 ผลการทดสอบแรงดึงในการเคลื่อนที่แนวระดับ



ภาพประกอบที่ 57 ผลการทดสอบแรงดึงสายควบคุมในการเคลื่อนที่แนวระดับ

จากผลการทดลองหุ่นยนต์สามารถดึงสายควบคุมในแนวระดับได้ 59 นิวตัน เมื่อคำนวณโดยใช้แรงแม่เหล็กจากการทดลองที่ 4.3.1 มีค่าเท่ากับ 60 นิวตันซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณ

4.3.3 การทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง

จากการทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งตามหัวข้อที่ 3.5.3 เพื่อทดสอบหาระยะสูงสุดในการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง ดังภาพประกอบที่ 58 มีผลการทดลองคือ หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ขึ้นสูงสุดได้ที่ความสูงจากพื้น 10 เมตร โดยการวัดระยะจากสายควบคุม โดยเมื่อจากถึงระยะสูงสุดหุ่นยนต์จะเกิดการไถลไม่สามารถเคลื่อนที่ต่อได้ เนื่องจากน้ำหนักของสายควบคุม

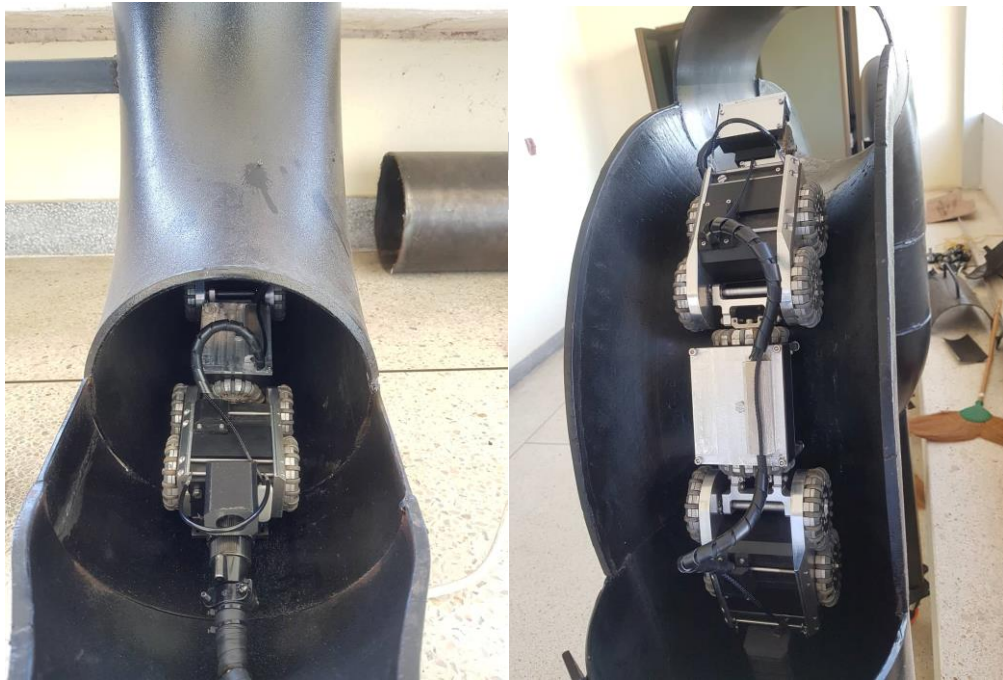


ภาพประกอบที่ 58 การทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง

จากการทดลองที่ 4.3.1 ได้ค่าน้ำหนักของสายควบคุมขณะที่ความสูง 10 เมตร เมื่อเทียบกับ การ คำนวณความยาวโดยใช้ผลจากแรงแม่เหล็กในการทดลองที่ 4.3.1 ได้ 11.9 เมตร ซึ่งมีผลต่างกันเท่ากับ 1.9 เมตร เป็นผลมาจากพื้นผิววัสดุแตกต่างกัน และในการทดลองนี้พื้นผิวเหล็กมีฝุ่นเกาะที่ทำให้แรงเสียดทานลดลง

4.3.4 การทดสอบการเคลื่อนที่ผ่านท่อโค้งในแนวดิ่ง

จากการทดสอบการเคลื่อนที่ผ่านท่อโค้งในแนวดิ่งตามหัวข้อที่ 3.5.4 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ผ่านในท่อเหล็กโค้ง โดยการทดสอบ 2 รูปแบบการเคลื่อนที่จากแนวระดับไปแนวดิ่งและจากแนวดิ่งไปแนวระดับ ดังภาพประกอบที่ 59



(ก)

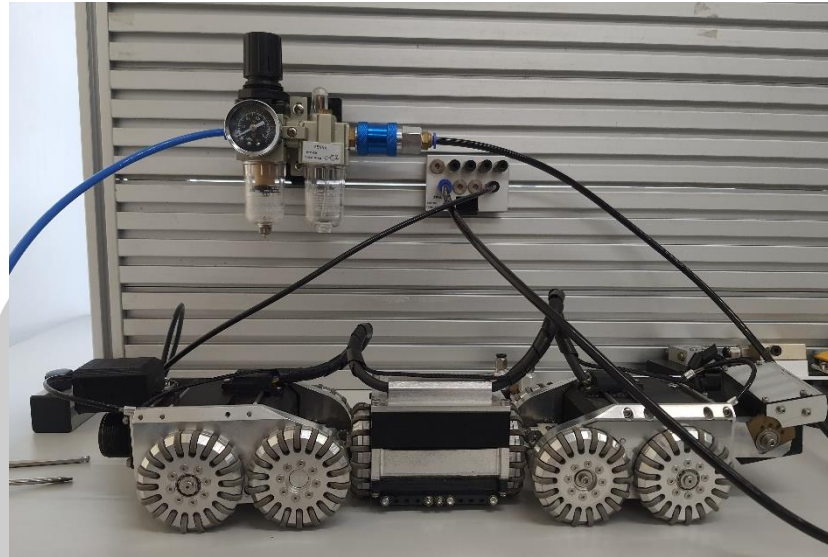
(ข)

ภาพประกอบที่ 59 การทดสอบเคลื่อนที่ผ่านท่อโค้ง (ก) จากแนวระดับไปแนวตั้ง (ข) จากแนวตั้งไปแนวระดับ

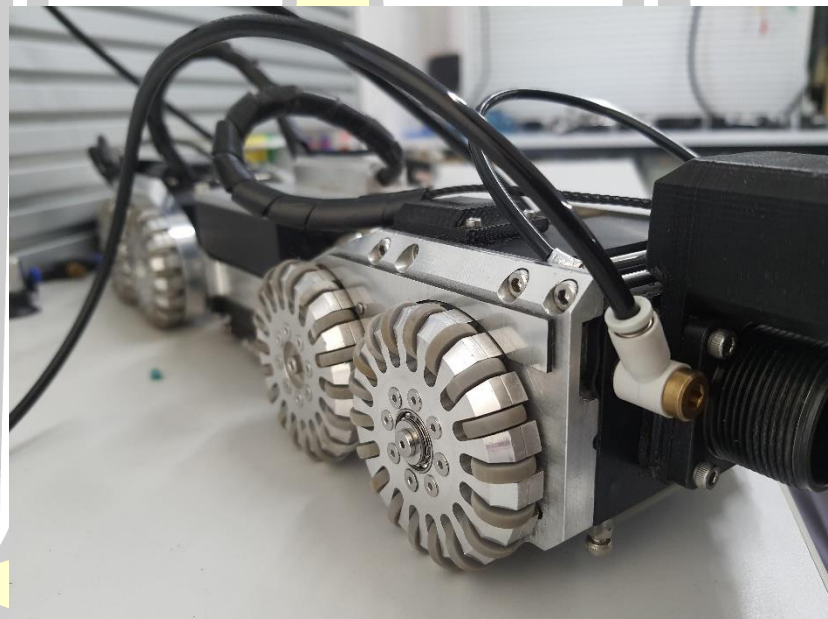
จากผลการทดสอบหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่จากแนวระดับไปแนวตั้งดังภาพประกอบที่ 59 (ก) ได้ดี แต่ในการเคลื่อนที่จากท่อแนวตั้งไปท่อแนวระดับ ภาพประกอบที่ 59 (ข) ยังพบปัญหาที่ติดกับชิ้นส่วนแม่เหล็กที่ด้านใต้หุ่นยนต์เนื่องจากรอยต่อของท่อและระยะความสูงของแม่เหล็กน้อย ความสูง 4 มิลลิเมตรที่หุ่นยนต์ส่วนหน้าหลัง และ 2.9 มิลลิเมตรที่หุ่นยนต์ส่วนกลาง ทำให้เกิดการสั่นไถลของล้อขับเคลื่อนส่งผลให้บางครั้งหุ่นยนต์ไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านไปได้

4.3.5 การทดสอบการเคลื่อนที่ในน้ำ

จากการทดสอบตามหัวข้อที่ 3.5.5 โดยแบ่งหุ่นยนต์ออกเป็น 3 ส่วนสำหรับทดสอบคือส่วนหน้า ส่วนกลาง และส่วนหลัง เพื่อทดสอบความสามารถในการรับความดันน้ำจากภายนอกดังภาพประกอบที่ 60 เป็นการทดสอบความสามารถในการรับความดันทดสอบโดยการต่อสายลมเข้าที่จุดต่อลมชั่วคราวที่ตัวของหุ่นยนต์ดังภาพประกอบที่ 61 และอ่านค่าความดันจากชุด Air Service Unit ดังภาพประกอบที่ 62



ภาพประกอบที่ 60 การทดสอบวัดความสามารถในการรับความดันภายในตัวหุ่นยนต์



ภาพประกอบที่ 61 จุดเชื่อมต่อสายลมชั่วคราวที่หุ่นยนต์

พหุพันธ์ ปณฺ ทิโต ชีเว



ภาพประกอบที่ 62 ชุด Air service unit สำหรับทดสอบขีดจำกัดการรับความดันของหุ่นยนต์

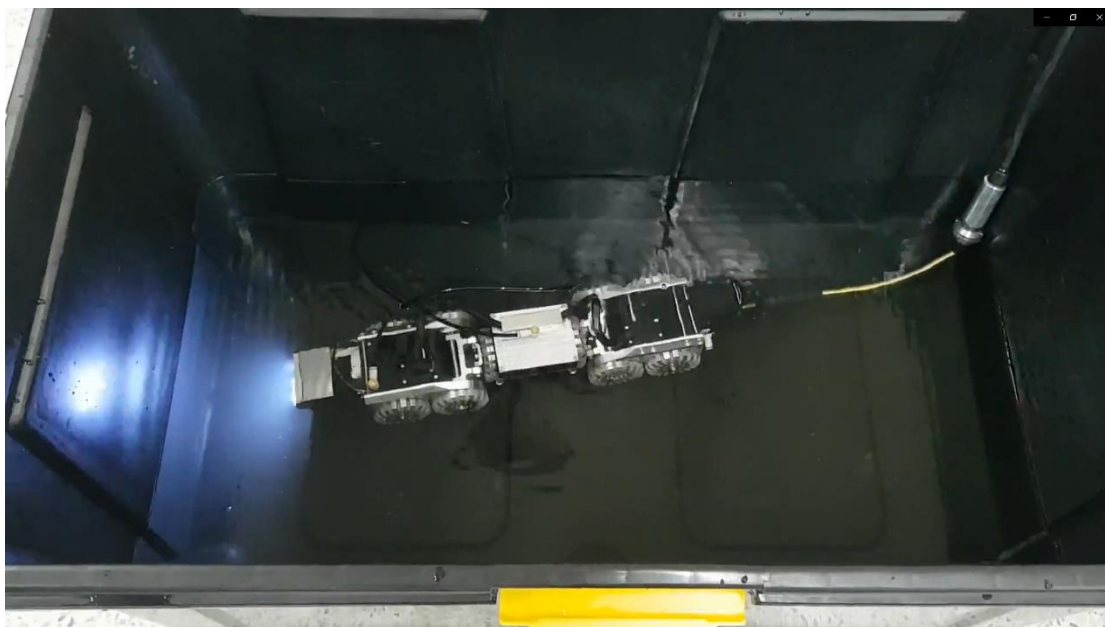
จากทดลองอัดแรงลมสูงสุดที่ 0.1 MPa เท่ากันทั้ง 3 ส่วนของหุ่นยนต์ส่วนหน้า กลาง หลัง พบว่า ในแต่ละส่วนของหุ่นยนต์สามารถรับความดันสูงสุดได้ดังตาราง 13

ตาราง 13 การรับความดันสูงสุดของหุ่นยนต์แต่ละส่วน

	ส่วนหน้า	ส่วนกลาง	ส่วนหลัง
ความดัน (MPa)	0.01	0.01	0.01

จากการทดลองอัดความดันลมเข้าทั้งสามส่วนของหุ่นยนต์ พบว่าหุ่นยนต์ทั้งสามส่วนรับความดันได้ค่าประมาณใกล้เคียงกันคือส่วนหลัง 0.01 MPa เนื่องจากเกจวัดความดันมีความละเอียดน้อย โดยจุดที่ลมออกจะเป็นที่จุดเพลลาซ์มอเตอร์เหมือนกันทั้ง 3 ส่วน และจากสมการ 8 การคำนวณระดับน้ำโดยคำนวณจากความดันต่ำที่สุด จะได้ขีดจำกัดของระดับน้ำสูงสุดที่หุ่นยนต์สามารถทำงานได้คือ 1 เมตร

ทดสอบการเคลื่อนที่ภายในน้ำจากระดับน้ำสูงสุดที่หุ่นยนต์ทำงานได้ดังภาพประกอบที่ 63 หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่และมองภาพใต้น้ำ ได้โดยที่ระดับความขึ้นจากการอ่านค่าเซนเซอร์ภายในตัวหุ่นยนต์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง



ภาพประกอบที่ 63 การทดสอบการเคลื่อนที่ในน้ำ

4.5.6 การทดสอบการทำงานที่สภาวะอุณหภูมิสูง

ดำเนินการทดสอบตามหัวข้อที่ 3.5.6 การทำงานที่อุณหภูมิสูง ดังภาพประกอบที่ 64 ทำการทดสอบโดย เพิ่มอุณหภูมิเครื่องทำความร้อนขึ้น และสังเกตการทำงานของหุ่นยนต์ที่มีการเปลี่ยนไปได้ผลการทดลองคือเมื่อทดสอบถึงอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ภาพที่ได้จากหุ่นยนต์จะเริ่มขาดหาย จึงหยุดการทดลองที่อุณหภูมินี้



ภาพประกอบที่ 64 เครื่องอบลมร้อนสำหรับทดสอบการทำงานที่อุณหภูมิ 80 องศา



ภาพประกอบที่ 65 หุ่นยนต์ขณะทดสอบในเครื่องอบลมร้อน



สรุปผลอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้มุ่งศึกษา ออกแบบหุ่นยนต์เคลื่อนที่ในแนวตั้งเพื่อการสำรวจ โดยมุ่งเน้นการใช้งานในพื้นที่เป็นสื่อแม่เหล็ก 2 แบบคือ ท่อเหล็กขนาดต่าง ๆ และแผ่นเหล็ก จากการออกแบบหุ่นยนต์มีขนาดยาว 450 มิลลิเมตร สูง 110 มิลลิเมตร กว้าง 99 มิลลิเมตร ออกแบบให้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนต่อกันเพื่อให้รูปร่างของหุ่นยนต์โค้งตามท่อ ใช้แม่เหล็กถาวรนีโอไดเมียม ในการเพิ่มแรงยึดเกาะเพื่อเคลื่อนที่ในแนวตั้ง ใช้ล้อขับเคลื่อนเป็น 2 แนวเพื่อให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ 2 ทิศทางคือหน้าหลังและด้านข้างซ้ายขวาเพื่อช่วยในการควบคุมผ่านท่อโค้ง และล้อโอมนิช่วยให้น้ำหนักของหุ่นยนต์อยู่แนวเดียวกันกับท่อ สามารถทำงานในท่อเหล็กตรงและโค้งตั้งแต่ขนาด 5 นิ้วขึ้นไปจนถึงแผ่นเหล็ก โดยการเปลี่ยนระดับแม่เหล็ก ออกแบบให้ลำตัวของหุ่นยนต์มีการป้องกันน้ำเข้าและใช้มอเตอร์แบบไร้แปรงถ่านเพื่อลดการเกิดประกายไฟจากหุ่นยนต์เพื่อป้องกันความเสี่ยงจากการทำงานในพื้นที่ที่มีแก๊สไวไฟ ควบคุมหุ่นยนต์แบบใช้สายผ่านกล่องควบคุม โดยกล่องควบคุมสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ แสดงภาพจากกล้องด้านหน้าและด้านหลังกดบันทึกภาพนิ่งและวีดีโอ แสดงอุณหภูมิภายในท่อและภายในหุ่นยนต์ แสดงความชื้นภายในหุ่นยนต์

จากผลการทดลองหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ในท่อเหล็กตรงแนวระดับได้ที่ระยะทางสูงสุด 50 เมตรตามความยาวสูงสุดของสายควบคุม มีภาระตั้งได้สูงสุดที่ 3 กิโลกรัม และแนวตั้งสามารถเคลื่อนที่ได้ที่ความสูงสูงสุด 10 เมตร การเคลื่อนที่ในท่อโค้ง 90 องศาในลักษณะลำตัวหงายหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ดี และการเคลื่อนที่ในท่อโค้งลักษณะลำตัวคว่ำหุ่นยนต์เคลื่อนที่ผ่านได้ในท่อเรียบไม่มีรอยเชื่อม แต่ในท่อที่มีรอยเชื่อมต่อที่มากกว่าความสูงของแม่เหล็กจะทำให้แม่เหล็กติดกับรอยเชื่อมส่งผลให้ล้อขับเคลื่อนของหุ่นยนต์เกิดการลื่นไถลทำให้หุ่นยนต์ไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านไปได้ และจากการทดลองการเคลื่อนที่ในน้ำหุ่นยนต์สามารถทำงานได้ที่ระดับน้ำ 10 เซนติเมตร อุณหภูมิสูงสุดในการทำงานที่ 80 องศาเซลเซียส หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วสูงสุด 30 เซนติเมตรต่อวินาที มีระยะควบคุมสูงสุด 50 เมตร

จากงานวิจัยนี้ทำให้ได้ต้นแบบหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในท่อเหล็ก ที่สามารถทำงานได้กับท่อตรงและท่อโค้งที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลายขนาด ไปจนถึงการทำงานบนแผ่นเหล็ก ทำให้สามารถทำงานได้หลากหลาย มีการออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์ที่คำนึงถึงการป้องกันน้ำและเลือกใช้อุปกรณ์เพื่อลดความเสี่ยงในการทำงานบริเวณที่มีสารไวไฟ

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยในงานวิจัยนี้ ในการเคลื่อนที่ในแนวตั้งกรณีต้องการเพิ่มความสูงในการเคลื่อนที่ ผู้วิจัยเสนอแนะให้เพิ่มแรงยึดเกาะแม่เหล็ก ลดน้ำหนักสายไฟหรือเพิ่มแรงเสียดทานที่ล้อ เพื่อให้เคลื่อนที่ได้ไกลมากขึ้น และการเคลื่อนที่ในทอโค้งคว่ายังพบปัญหาจากแม่เหล็กติดกับทอทำให้หุ่นยนต์ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ เนื่องด้วยต้องให้ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับพื้นทอเหล็กน้อยเพื่อให้หุ่นยนต์มีแรงยึดเกาะมากพอสำหรับการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อไปควรเพิ่มระยะห่างของแม่เหล็กให้มากขึ้น โดยการเพิ่มขนาดแม่เหล็กหรือใช้ล้อแม่เหล็กแบบโอมนิเพื่อเสริมแรงยึดเกาะให้เพิ่มมากขึ้น



บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

- [1] S. T. Industrial, เหล็กโครงสร้างรูปพรรณกลวง มอก.107-2533
- [2] T. I. Standard, “ท่อเหล็กกล้า มอก.276-2532.”
- [3] Z.-L. Xu, S. Lu, J. Yang, Y.-H. Feng, and C.-T. Shen, “A wheel-type in-pipe robot for grinding weld beads,” *Adv. Manuf.*, vol. 5, no. 2, pp. 182–190, 2017, doi: 10.1007/s40436-017-0174-9.
- [4] J. Yang, Y. Xue, J. Shang, and Z. Luo, “Research on a new bilateral self-locking mechanism for an inchworm micro in-pipe robot with large traction,” *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, vol. 11, pp. 1–11, 2014, doi: 10.5772/59309.
- [5] Y. J. Yum, H. S. Hwang, M. Kelemen, V. Maxim, and P. Frankovský, “In-pipe micromachine locomotion via the inertial stepping principle,” *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 28, no. 8, pp. 3237–3247, 2014, doi: 10.1007/s12206-014-0734-x.
- [6] H. Yaguchi and T. Izumikawa, “Wireless in-piping actuator capable of high-speed locomotion by a new motion principle,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 18, no. 4, pp. 1367–1376, 2013, doi: 10.1109/TMECH.2012.2201496.
- [7] S. Yim and D. Jeon, “Magnetic mechanical capsule robot for multiple locomotion mechanisms,” *Int. J. Control. Autom. Syst.*, vol. 12, no. 2, pp. 383–389, 2014, doi: 10.1007/s12555-013-0078-9.
- [8] D. Fang, J. Shang, Z. Luo, P. Lv, and G. Wu, “Development of a novel self-locking mechanism for continuous propulsion inchworm in-pipe robot,” *Adv. Mech. Eng.*, vol. 10, no. 1, p. 168781401774940, 2018, doi: 10.1177/1687814017749402.
- [9] K. Suzumori, T. Miyagawa, M. Kimura, and Y. Hasegawa, “Micro Inspection Robot for 1-in Pipes,” *IEEE/ASME Trans. MECHATRONICS, VOL. 4, NO. 3, Sept. 1999 Micro*, vol. 4, no. 3, pp. 286–292, 1999.
- [10] S. G. Roh and H. R. Choi, “Differential-drive in-pipe robot for moving inside urban gas pipelines,” *IEEE Trans. Robot.*, vol. 21, no. 1, pp. 1–17, 2005, doi: 10.1109/TRO.2004.838000.
- [11] T. Buratowski and K. Kurc, “DESIGN , MODELLING AND LABORATORY TESTING,” *Arch. Mech. Eng.*, 2015.

- [12] H. M. Kim, Y. S. Choi, Y. G. Lee, and H. R. Choi, "Novel mechanism for in-pipe robot based on a multiaxial differential gear mechanism," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 22, no. 1, pp. 227–235, 2017, doi: 10.1109/TMECH.2016.2621978.
- [13] Y. Zhang and G. Yan, "In-pipe inspection robot with active pipe-diameter adaptability and automatic tractive force adjusting," *Mech. Mach. Theory*, vol. 42, no. 12, pp. 1618–1631, 2007, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2006.12.004.
- [14] S. G. Roh, D. W. Kim, J. S. Lee, H. Moon, and H. R. Choi, "In-pipe robot based on selective drive mechanism," *Int. J. Control. Autom. Syst.*, vol. 7, no. 1, pp. 105–112, 2009, doi: 10.1007/s12555-009-0113-z.
- [15] F. Tâche *et al.*, "MagneBike: Compact magnetic wheeled robot for power plant inspection," *2010 1st Int. Conf. Appl. Robot. Power Ind. CARPI 2010*, pp. 1–2, 2010, doi: 10.1109/CARPI.2010.5624442.
- [16] M. F. Abdul Jalal, K. S. Mohamed Sahari, and A. Anuar, "Development of magnetic wheeled boiler tube inspection robot," *J. Teknol.*, vol. 76, no. 4, pp. 19–23, 2015, doi: 10.11113/jt.v76.5478.
- [17] G. Robinson and J. B. C. Davies, "Continuum robots-a state of the art," *IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, vol. 4, no. May, pp. 2849–2854, 1999, doi: 10.1109/ROBOT.1999.774029.
- [18] B. A. Jones and I. D. Walker, "Kinematics for multisection continuum robots," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 22, no. 1, pp. 43–55, 2006, doi: 10.1109/TRO.2005.861458.
- [19] T. L. Lam and Y. Xu, "A flexible tree climbing robot: Treebot-design and implementation," *IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 5849–5854, 2011.
- [20] G. Immega and K. Antonelli, "The KSI tentacle manipulator," *Proc. 1995 IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, vol. 3, pp. 3149–3154, 1995, doi: 10.1109/ROBOT.1995.525733.
- [21] T. Takayama, H. Takeshima, T. Hori, and T. Omata, "A Twisted Bundled Tube Locomotive Device Proposed for In-Pipe Mobile Robot," *IEEE/ASME Trans. MECHATRONICS*, vol. 20, no. 6, 2015, doi: 10.1109/TMECH.2015.2411752.
- [22] W. Jeon, J. Park, and I. Kim, "Development of high mobility in-pipe inspection robot," in *System Integration (SII), 2011 IEEE/SICE International Symposium on*, 2011, pp. 479–484, doi: 10.1109/SII.2011.6147496.

[23] “Machine-level visualization with SIMATIC HMI,” *Siemen AG*, 2018.

<https://new.siemens.com/global/en/products/automation/simatic-hmi/panels/basic-panels.html>.

[24] maxon, “An introduction to brushless DC motors,” 2012.

https://www.maxongroup.us/medias/sys_master/root/8803451338782/maxonECmotor-Notes.pdf?attachment=true.

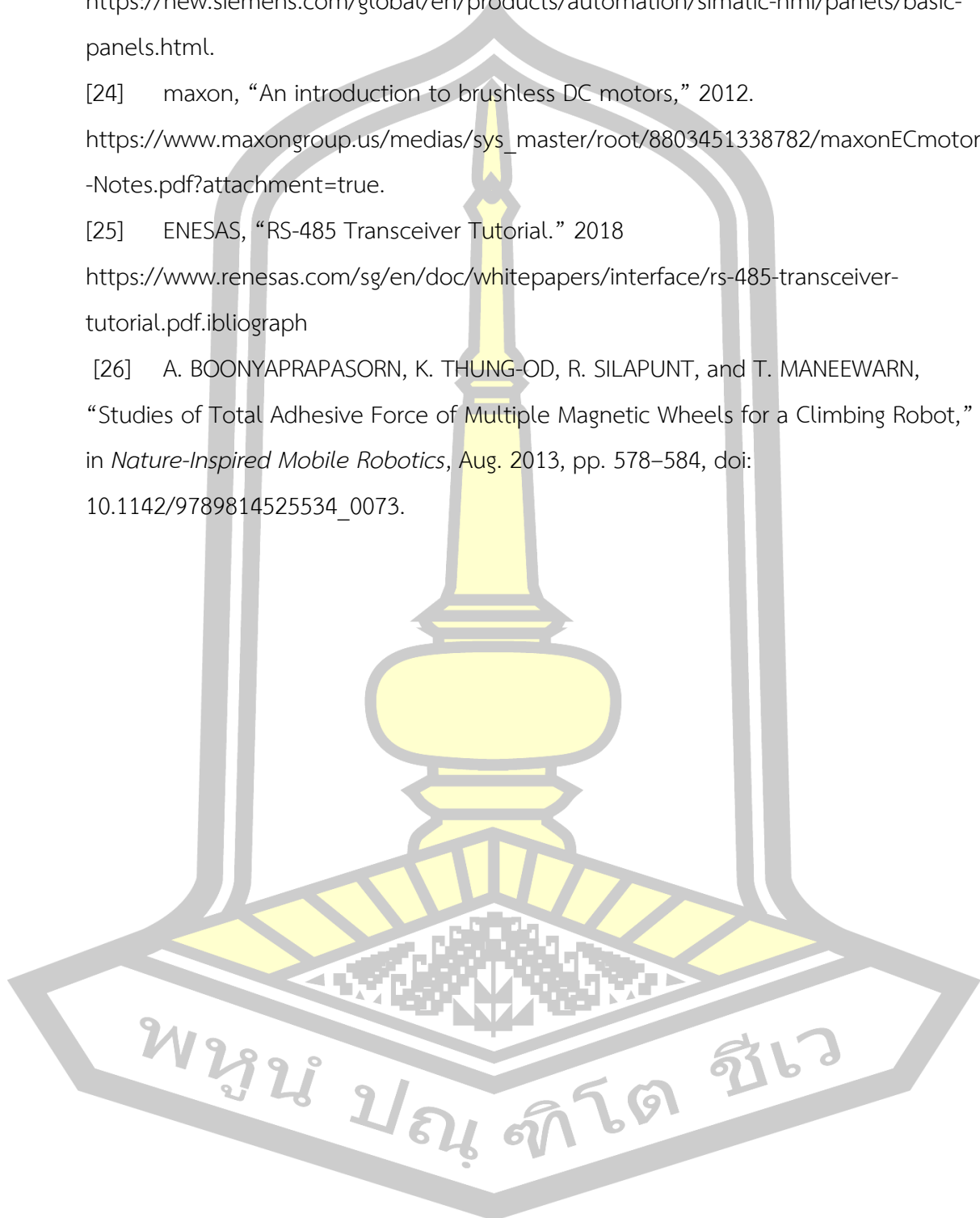
[25] ENESAS, “RS-485 Transceiver Tutorial.” 2018

<https://www.renesas.com/sg/en/doc/whitepapers/interface/rs-485-transceiver-tutorial.pdf>.
ibliograph

[26] A. BOONYAPRAPASORN, K. THUNG-OD, R. SILAPUNT, and T. MANEEWARN,

“Studies of Total Adhesive Force of Multiple Magnetic Wheels for a Climbing Robot,”
in *Nature-Inspired Mobile Robotics*, Aug. 2013, pp. 578–584, doi:

10.1142/9789814525534_0073.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายคณิศ ฤงออด
วันเกิด	26 ตุลาคม 2530
สถานที่เกิด	มหาสารคาม
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	153/14 หมู่บ้านเฮา ถนนถีนานนท์ ตำบลตลาด อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม 44000
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	อาจารย์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2553 ระดับปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2556 ระดับปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2564 ระดับปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผลงานวิจัย	2017, Boonyaprapasom A, Natsupakpong S, Ngiumsunthorn PS, Thung-Od K, Fractional order sliding mode control for vaccination in epidemic systems. In: 2017 2nd International Conference on Control and Robotics Engineering, ICCRE 2017 2015, Boonyaprapasorn A, Maneewarn T, Thung-Od K (2015) A prototype of inspection robot for water wall tubes in boiler. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Applied Robotics for the Power Industry, CARPI 2015, Maneewarn T, Thung-Od K, ICP-EKF localization with adaptive covariance for a boiler inspection robot. In: Proceedings of the 2015 7th IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, CIS 2015 and Robotics, Automation and Mechatronics, RAM 2013, BOONYAPRAPASORN A, THUNG-OD K, SILAPUNT R, MANEEWARN T , STUDIES OF TOTAL ADHESIVE FORCE OF

MULTIPLE MAGNETIC WHEELS FOR A CLIMBING ROBOT. In:
Nature-Inspired Mobile Robotics. WORLD SCIENTIFIC, pp 578–584

