



การศึกษาและวิเคราะห์แรงยึดเกาะของลิ่มแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ใต้น้ำ

พ.ต.อาศิส บุญยะประภัศร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ
สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีการศึกษา 2556

การศึกษาและวิเคราะห์แรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ใต้น้ำ

พ.ต.อาศิส บุญยะประภัสร์ วศ.บ.(วิศวกรรมเครื่องกล)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ
สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ผศ. ดร.พิชิต ฤกษ์นันท์)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผศ. ดร.ถวิดา มณีวรรณ)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์(ร่วม)
(รศ. ดร.ราชวดี ศิลาพันธ์)

..... กรรมการ
(ดร.ปราการเกียรติ ยังกง)

..... กรรมการ
(ดร.มนต์ชัย สุระรัตน์ชัย)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาและวิเคราะห์แรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ไต่ผนัง
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	พ.ศ.อาศิษ บุนณะประภัศร
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ถวิดา มณีวรรณ รศ.ดร.ราชวดี ศิลาพันธ์
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิทยาการหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ
คณะ	สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม
ปีการศึกษา	2556

บทคัดย่อ

งานวิจัยชิ้นนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อที่จะทำการศึกษาและวิเคราะห์ แรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ไต่ผนัง โดยเน้นไปที่ล้อยแม่เหล็กที่มีการฝังแม่เหล็กถาวรขนาดเล็กด้วยการทดลองจริง ขั้นตอนการศึกษาประกอบด้วยสองขั้นตอนคือ ส่วนแรกเป็นการศึกษาในลักษณะสถิติของผลกระทบจากตัวแปรอิสระต่างๆ ได้แก่ ความหนาของกระทะล้อยแม่เหล็ก ความหนาของขอบกระทะล้อยที่เพิ่มเติม และจำนวนแท่งแม่เหล็กที่บรรจุต่อแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กเดี่ยวบนแผ่นเหล็กเรียบ ตลอดจนผลกระทบจากระยะห่างตามแนวแกนและการวางตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของล้อยแม่เหล็กทั้งสองล้อยต่อแรงยึดเกาะรวมของล้อยแม่เหล็กสองล้อยบนแผ่นเหล็กเรียบ ส่วนที่สองเป็นการทดสอบและประเมินความสามารถในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่ติดตั้งล้อยแม่เหล็กซึ่งประกอบด้วยการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งและการไต่ขึ้นลงในแนวตั้งของหุ่นยนต์บนผนังเหล็ก จากการศึกษาพบว่า ในกรณีล้อยแม่เหล็กเดี่ยว การเพิ่มขึ้นของความหนากระทะล้อย ความหนาของขอบกระทะล้อยที่เพิ่มเติม และจำนวนแท่งแม่เหล็กจะทำให้แรงยึดเกาะมีค่ามากขึ้น กรณีของล้อยแม่เหล็กสองล้อย การวางตำแหน่งของขั้วแม่เหล็กและระยะห่างระหว่างล้อยแม่เหล็กทั้งสองส่งผลต่อแรงยึดเกาะรวมของล้อยแม่เหล็กสองล้อย สำหรับความสามารถในการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งและการไต่ขึ้นลงในแนวตั้งของหุ่นยนต์บนผนังเหล็กได้รับผลกระทบจาก ความหนาของกระทะล้อย จำนวนแท่งแม่เหล็ก และการมีอยู่และชนิดของยางล้อย อีกทั้งการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งของหุ่นยนต์ได้รับอิทธิพลจากการปิดทับผิวด้วยรูปลอกบนผนังเหล็กและการไต่ขึ้นลงในแนวตั้งบนผนังของหุ่นยนต์ได้รับผลกระทบจากทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ในการออกแบบล้อยแม่เหล็ก การเพิ่มแรงยึดเกาะ โดยการเพิ่มจำนวนแท่งแม่เหล็กจะเป็นทางเลือกที่เหมาะสมกว่าการเพิ่มความหนาของกระทะล้อย ส่วนการเพิ่มความหนาของขอบกระทะล้อยก็เป็นทางเลือกหนึ่งที่มีประสิทธิภาพ ระยะห่างตามแนวแกนและขั้วของล้อยแม่เหล็กแต่ละล้อยจะต้องถูกนำมาพิจารณาในการติดตั้งบนหุ่นยนต์โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อล้อยแม่เหล็กแต่ละล้อยอยู่ใกล้กัน

คำสำคัญ : ล้อยแม่เหล็ก / การออกแบบล้อยแม่เหล็ก / หุ่นยนต์ไต่ผนัง

Thesis Title	Study and Analysis of Adhesion Force of Magnetic Wheels for Wall Climbing Robots
Thesis Credits	12
Candidate	Maj. Arsit Boonyaprapasorn
Thesis Advisors	Asst. Prof. Dr. Thavida Maneewarn Assoc. Prof. Dr. Rardchawadee Silapunt
Program	Master of Engineering
Field of Study	Robotics and Automation
Faculty	Institute of Field Robotics
Academic Year	2013

Abstract

This research focused on studying and analyzing of adhesion force of magnetic wheels for wall climbing robots. The magnetic wheel containing small permanent magnets was studied and analyzed by experiments. The study consisted of two parts. First, in the case of single magnetic wheel the effects of flanges thickness, additional rim thickness, and number of magnets to adhesion force of the magnetic wheels on the steel flat plate were studied statically. Then, in the case of twin magnetic wheels, the effect of axial distance and the polarity between magnetic wheels were investigated in the same fashion. Second, the mobility of a magnetic wheeled robot installed with selected magnetic wheels consisted of the static adhesion and ability of climbing on the steel wall were tested and evaluated. Based on the results, it was clear that in the case of a single magnetic wheel, the adhesion force became larger as thickness of flanges, additional rim thickness, and numbers of magnets were increased. In the case of twin magnetic wheels, the total adhesion force of the twin magnetic wheels was affected by the polarity and axial distance of the magnetic wheels. The static adhesion and ability of climbing of the robot on the steel wall were affected by the thickness of the flanges, the number of magnets, and the existence and types of tires. In addition, the coverage of the wall surface with the sticker influenced the static adhesion, and the direction of motion altered the climbing ability of climbing. In the design aspect, the increase of adhesion force by increasing the number of magnets is more appropriate than increasing flange thickness. The additional rim thickness also increases the adhesion force efficiently. The axial distance and polarity between two magnetic wheels need to be considered, especially when the axial distance is small.

Keywords : Magnetic wheel / Magnetic wheel design / Climbing robot

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาและความอนุเคราะห์จากอาจารย์ที่ปรึกษาคือ ผศ.ดร.ถวิดา มณีวรรณ และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมคือ รศ.ดร. ราชวดี ศิลาพันธ์ ที่ได้ให้โอกาสที่ได้ศึกษาในครั้งนี้และให้ความรู้คำปรึกษาที่มีค่ายิ่งทั้งต่องานวิจัยสำหรับวิทยานิพนธ์เล่มนี้ และงานด้านวิชาการในอนาคต ตลอดจนเอาใจใส่ดูแลแก้ไขปัญหาต่างๆระหว่างการดำเนินการวิจัยอย่างยิ่ง ผู้วิจัยได้ระลึกและตระหนักถึง ความกรุณาและความอนุเคราะห์ของอาจารย์ทั้งสองท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย อีกทั้งขอกราบขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านซึ่งประกอบด้วย ผศ.ดร. พิชิต ฤกษ์นันท์ ดร. ปราการเกียรติ ยังกง และดร. มนต์ชัย สุระรัตน์ชัย ที่ได้สละเวลาเพื่อทำหน้าที่เป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และ ได้ให้ความเห็นและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อผู้วิจัยอย่างยิ่ง ว่างการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้รับความกรุณาอาจารย์หลายท่านที่ให้ความรู้และความช่วยเหลือต่าง ได้แก่ ผศ.ดร. วันดี อ่อนเรียมร้อย ที่ได้สละเวลาให้คำความรู้และคำปรึกษาด้านแม่เหล็กกับผู้วิจัย รศ. ดร. สุรเชษฐ์ ชุตินา รศ. วีระชัย แก่นทรัพย์ และ ผศ.ดร. อธิรักษ์ กาญจนหฤทัย ที่ได้สนับสนุนและให้คำปรึกษาข้อคิดต่างๆมาโดยตลอด รวมถึงครูอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย ลำดับต่อไปผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณผู้บังคับบัญชาทุกท่านที่กรุณาให้โอกาสและช่วยเหลือในการศึกษาของผู้วิจัยในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณพี่และขอขอบคุณเพื่อนๆในความช่วยเหลือต่างๆ ได้แก่ พ.ท. อรรถพล จินดาทรัพย์ พ.ท. ดร.ประสิทธิ์ มากุลสวัสดิ์อุดม คุณ สหเทพ จ้อยประดิษฐ์ คุณ สหพล วรรณสุศรี คุณ วีรศักดิ์ พรชัยประติมา และพ.ต. ดร.กิตติพงษ์ กำจรเจริญ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผศ.ดร.พงศ์พันธ์ แก้วดาทิพย์ ผศ.ดร. วิฑูร อุทัยแสงสุข และ ผศ.ดร.อนรรฆ ชันชะชวณะ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือในการทดสอบในครั้งนี้ ลำดับต่อไป ผู้วิจัยขอขอบคุณ นักศึกษาและเจ้าหน้าที่สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนามและภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกคนในความช่วยเหลือต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณ คณศ ถงออก คุณ วิสวัท อรรถนกุล คุณ วิศณุ จูฑารี คุณ ทศพร เพ็ชรพันธุ์ คุณ อธิราช ภัทรรางกูร คุณ ชีรวัสส์ คำหน่อแก้ว คุณ กฤษนันท์ เจริญสุข คุณ ธาริณี ทองเกิด และน้องๆภายนอกต่อไปนี้ คือ ดร.ฉันทเศรษฐ์ เศรษฐบุตร คุณ วันฉัตร ชีระแนว คุณ มรุธร ลีมอดินบูลย์ และคุณ สรณ สีมাত্রัง และที่สำคัญผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณสมาชิกของครอบครัวที่สนับสนุนและเป็นกำลังใจมาโดยตลอด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ร.ต. ยงยุทธ บุญยะประภัศร ดร. กุลยา พิสิษฐ์สังฆการ คุณ วรรณวิภา บุญยะประภัศร ภรรยา และคุณ ภัทร์ บุญยะประภัศร

และที่สำคัญที่สุดผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณและมอบความกตเวทิตาต่อบิดาและมารดาของผู้วิจัย
คือ พล.อ.วินิจ บุญยะประสงค์ และนาง บุญทิศา บุญยะประสงค์ ที่มอบความรักและทุกสิ่งที่ดีที่สุด
ให้กับผู้วิจัยตลอดทั้งชีวิตของผู้วิจัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	ฉ
รายการตาราง	ฉ
รายการรูปประกอบ	ญ
รายการสัญลักษณ์	ฎ
ประมวลศัพท์และคำย่อ	ค
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของวิทยานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์ ขอบเขต และประโยชน์ของงานวิจัย	2
1.2.1 วัตถุประสงค์	2
1.2.2 ขอบเขต	2
1.2.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.3 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์	3
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1.1 แรงแม่เหล็ก (Magnetic Force)	4
2.1.2 การออกแบบส้อมแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ใต้น้ำ	6
2.2 ประเภทของส้อมแม่เหล็ก	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3. วิธีการวิจัย	23
3.1 ภาพรวมของระบบ	23
3.2 ตัวแปรอิสระ (Independent Variables) และตัวแปรตาม (Dependent Variables)	24
3.2.1 ตัวแปรอิสระ (Independent Variables)	24
3.2.2 ตัวแปรตาม (Dependent Variables)	26
3.3 ชิ้นงานและอุปกรณ์การทดลอง	26
3.3.1 ล้อแม่เหล็กและองค์ประกอบของล้อแม่เหล็ก	26
3.3.2 หุ่นยนต์ทดสอบ	29
3.3.3 เครื่องทดสอบแรงดึงเอนกประสงค์ (Universal Tensile Test)	31
3.3.4 แผ่นเหล็กเรียบ	32
3.3.5 ผนังทดสอบ	32
3.4 การทดลอง (Experiment)	33
3.4.1 การทดลองวัดค่าแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กแบบสถิต	33
3.4.2 การทดสอบความสามารถในการเคลื่อนที่บนผนังของหุ่นยนต์ที่ติดตั้งล้อแม่เหล็ก	36
3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเกาะและความสามารถในการยึดเกาะบนผนังของหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็ก	39
3.6 แบบจำลองคณิตศาสตร์แสดงการเคลื่อนที่บนผนังของหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็ก	39
4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	41
4.1 การทดลองวัดค่าแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กแบบสถิต : ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	41
4.1.1 การทดลองวัดค่าแรงยึดเกาะแบบสถิตของล้อแม่เหล็กเดี่ยว : ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ 3.4.1.1	41
4.1.2 การทดลองวัดค่าแรงยึดเกาะแบบสถิตของล้อแม่เหล็กสองล้อบนเพลาดียวกัน : ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ 3.4.1.2	46
4.2 การทดสอบความสามารถในการเคลื่อนที่บนผนังของหุ่นยนต์ที่ติดตั้งล้อแม่เหล็ก : ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ	50

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 การทดสอบความสามารถในการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งบนผนังของหุ่นยนต์ ล้อแม่เหล็ก : ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ 3.4.2.1	50
4.2.2 การทดสอบความสามารถในการไต่บนผนังของหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็ก : ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ 3.4.2.2	59
5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ	64
5.1 สรุปผล	64
5.2 ข้อเสนอแนะ	67
เอกสารอ้างอิง	68
ประวัติผู้วิจัย	73

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	ค่าแรงยึดเกาะที่วัดได้และจากการจำลองสถานการณ์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติของล้อยึดดั้งเดิมและล้อยึดที่ประกอบจากแม่เหล็กหลายชั้น	14
2.2 ก	ข้อมูลของล้อยึดแม่เหล็กแบบต่างๆที่ทำการศึกษาและวิเคราะห์	16
2.2 ข	แรงยึดเกาะของล้อยึดแม่เหล็กที่ได้จากการจำลองสถานการณ์และการทดลอง	17
3.1 ก	มวลของกระทะล้อยึดแบบต่าง ๆ	30
3.1 ข	มวลขององค์ประกอบล้อยึดแม่เหล็กได้แก่ ยางล้อยึด แกนล้อยึด และแม่เหล็ก	30
3.1 ค	มวลของหุ่นยนต์และเลเซอร์สแกนเนอร์	31
4.1	แรงยึดเกาะของล้อยึดแม่เหล็กติดตั้งกระทะล้อยึดปกติที่ความหนาต่างๆ	43
4.2	แรงยึดเกาะของล้อยึดแม่เหล็กติดตั้งกระทะล้อยึดที่มีขอบเพิ่มเติมที่ความหนาต่างๆ	43
4.3	อัตราส่วนระหว่างการเพิ่มขึ้นของแรงยึดเกาะล้อยึดแม่เหล็กต่อการเพิ่มขึ้นของมวลล้อยึดแม่เหล็กเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงมวลของกระทะล้อยึด	45
4.4	อัตราส่วนระหว่างการเพิ่มขึ้นของแรงยึดเกาะล้อยึดแม่เหล็กต่อการเพิ่มขึ้นของมวลล้อยึดแม่เหล็กเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงจำนวนแท่งแม่เหล็ก	45
4.5	แรงยึดเกาะรวมของล้อยึดแม่เหล็กสองล้อยึดบนเพลลาเดียวกันที่มีระยะห่างตามแนวแกนเพลลาที่แตกต่างกันและขั้วแม่เหล็กระหว่างล้อยึดแม่เหล็กทั้งสองล้อยึดที่เหมือนกันและต่างกัน	48
4.6	แรงยึดเกาะแม่เหล็กเดี่ยวแต่ละล้อยึดและค่าเฉลี่ยของแรงยึดเกาะของล้อยึดแม่เหล็กเดี่ยว	48
4.7	ความสามารถในการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งบนผนังทดสอบ (S_1) ของหุ่นยนต์ล้อยึดแม่เหล็ก	54
4.8	ความสามารถในการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งบนผนังทดสอบที่มีการปิดทับด้วยรูปลอก (S_2) ของหุ่นยนต์ล้อยึดแม่เหล็ก	55
4.9	แรงยึดเกาะของล้อยึดแม่เหล็กที่สัมผัสกับแผ่นเหล็กเมื่อไม่มีและมีการติดตั้งยางล้อยึด	55
4.10	แรงยึดเกาะของล้อยึดแม่เหล็กที่สัมผัสกับแผ่นเหล็กที่มีการปิดทับด้วยรูปลอกเมื่อไม่มีและมีการติดตั้งยางล้อยึด	56
4.11	ความสามารถในการไต่ขึ้นและลงบนผนังทดสอบของหุ่นยนต์ล้อยึดแม่เหล็ก	61

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
2.1	แรงแม่เหล็กระหว่างแท่งแม่เหล็กสองแท่ง	5
2.2	(ก) หลักการของล้อแม่เหล็ก (ข) วงจรแม่เหล็กของล้อแม่เหล็กที่สัมผัสกับผิวสัมผัสและมุมอิ่มตัว (Angle of Saturation)	6
2.3	(ก) แบบจำลองของหุ่นยนต์ (ข) แบบจำลองสภาพแวดล้อมภายใน Generator (ค) การทดสอบหุ่นยนต์ภายในห้องปฏิบัติการและสภาพแวดล้อมจริง	8
2.4	การทดสอบวัดแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กและความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเกาะและจำนวนแท่งแม่เหล็กที่ลักษณะการสัมผัสของล้อแม่เหล็กและผิวสัมผัสรูปแบบต่างๆ	8
2.5	(ก) แนวคิดของหุ่นยนต์ (ข) สภาพแวดล้อมและอุปสรรคในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ (ค) ผลกระทบของความหนาของผิวสัมผัสต่อแรงยึดเกาะ	10
2.6	(ก) การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ผ่านสัน (ข) การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนผิวสัมผัสสองผิวที่ทำมุมกัน 135° (ค) การเปลี่ยนการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จากแนวตั้ง (Vertical) สู่นวนระดับ (Horizontal)	10
2.7	(ก) หุ่นยนต์ล้อแม่เหล็กต้นแบบสำหรับตรวจสอบภายนอกถังอย่างอัตโนมัติ (ข) ล้อแม่เหล็กที่ประกอบขึ้นจากแม่เหล็กที่มีขนาดเล็ก	12
2.8	แรงที่เกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสระหว่างพื้นผิวสัมผัสและล้อแม่เหล็ก	12
2.9	(ก) ชุดทดสอบวัดค่าแรงในแนวตั้งจาก (F_N) และ แรงในแนวสัมผัส (F_T) (ข) กราฟแสดงค่าแรงซึ่งได้จากการทดสอบ (ค) การจำลองสถานการณ์ของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โดยโปรแกรม MSC ADAMS	13
2.10	การจำลองสถานการณ์โดยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติ (ก) ล้อแม่เหล็กรูปแบบปกติ (Convention configuration) (ข) ล้อแม่เหล็กรูปแบบหลายชั้น (Multi-layer configuration) ที่มีทิศแมกเนไทเซชันตรงข้ามกัน	14
2.11	(ก) ล้อแม่เหล็กที่มีอยู่เดิมของหุ่นยนต์ MagneBike (Initial MagneBike wheel) (ข) ล้อแม่เหล็กที่เหมาะสมที่สุด (Optimized wheel) (ค) ล้อแม่เหล็กหลายชั้น (Multi-layer wheel) (ง) หุ่นยนต์ MagneBike	15
2.12	ล้อแม่เหล็กรูปแบบต่างๆซึ่งถูกทำการศึกษาและวิเคราะห์	15

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป		หน้า
2.13	(ก) แบบจำลอง 3 มิติของล้อแม่เหล็กและ Mesh ของล้อแม่เหล็กและผิวสัมผัส (ข) เวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กของล้อแม่เหล็กที่มีหมุดเหนี่ยวนำและไม่มีหมุดเหนี่ยวนำ	16
2.14	(ก) ฐาน (Platform) ของหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็กที่มีข้อต่อยึดหุ่น (ข) รูปแบบของล้อแม่เหล็กที่ทำการออกแบบในเบื้องต้น (ค) รูปแบบของขอบล้อที่แตกต่างกัน	18
2.15	(ก) การสร้างแบบจำลองของล้อแม่เหล็ก (ข) ค่าแรงแม่เหล็กของขอบล้อแม่เหล็ก รูปแบบต่างๆที่สัมผัสกับผิวสัมผัสเรียบ (ค) ค่าแรงแม่เหล็กของขอบล้อแม่เหล็ก รูปแบบต่างๆที่สัมผัสกับผิวสัมผัสที่ทำมุมกัน 120°	19
2.16	รูปแบบล้อแม่เหล็กที่เหมาะสมที่สุดซึ่งแสดงองค์ประกอบต่างๆ	19
2.17	แนวคิดของหุ่นยนต์ Magnebot ซึ่งสามารถเคลื่อนที่บนเพดานและผนังซึ่งเป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกได้	20
2.18	ต้นแบบของหุ่นยนต์ Magnebot ซึ่งติดตั้งล้อแม่เหล็ก	20
2.19	โครงสร้างของล้อแม่เหล็กชนิด Magnetic wheel with permanent magnet disk และฟลักซ์แม่เหล็ก	22
2.20	โครงสร้างของล้อแม่เหล็กชนิด Magnetic wheel with several small permanent magnets in a matrix และฟลักซ์แม่เหล็ก	22
3.1	แผนผังแสดงภาพรวมของระบบ	23
3.2	(ก) รูปแบบของหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็ก (ข) องค์ประกอบล้อแม่เหล็กที่ใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์	25
3.3	(ก) แม่เหล็กทรงกระบอก (ข) แกนล้อทำจากพอลิเมอร์ (ค) ตำแหน่งและจำนวนแท่งแม่เหล็กที่บรรจุภายในล้อแม่เหล็กที่แตกต่างกัน	27

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป		หน้า
3.4	(ก) กระจกใสปกติกที่มีความหนา (tr) มีค่าเท่ากับ 3 mm 5 mm 7 mm และ 9 mm และตัวอย่างกระจกใสที่ tr มีค่าเท่ากับ 3 mm (ข) กระจกใสแม่เหล็กที่มีขอบเพิ่มเติมหนา (tre) มีค่าเท่ากับ 2 mm 4 mm และ 6 mm และตัวอย่างกระจกใสที่ tre มีค่าเท่ากับ 2 mm	28
3.5	ยางลื่น	28
3.6	ตัวอย่างลื่นแม่เหล็ก : (ก) กระจกใสปกติก (ข) กระจกใสที่มีขอบเพิ่มเติม (ค) กระจกใสปกติกและยางลื่นชนิดซิลิโคน (ง) กระจกใสที่มีขอบเพิ่มเติมและยางลื่นชนิดยางซิลิโคน	29
3.7	หุ่นยนต์และองค์ประกอบต่างๆ	30
3.8	(ก) เครื่องทดสอบแรงดึงเอนกประสงค์ (ข) Load cell	31
3.9	แผ่นเหล็กเรียบที่ใช้ในการทดสอบวัดค่าแรงยึดเกาะของลื่นแม่เหล็ก	32
3.10	ผนังทดสอบความสามารถในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์	32
3.11	ชุดการทดลองวัดค่าแรงยึดเกาะของลื่นแม่เหล็กโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงเอนกประสงค์ (Universal tensile test)	35
3.12	การทดลองวัดหาค่าแรงยึดเกาะของลื่นแม่เหล็กคู่	36
3.13	รูปแบบและลักษณะของการทดสอบการยึดเกาะของหุ่นยนต์ขณะหยุดนิ่ง (ก) ผนังทดสอบที่ไม่มีการปิดทับด้วยรูปลอก (ข) ผนังทดสอบที่มีการปิดทับด้วยรูปลอก	37
3.14	รูปแบบและลักษณะของการทดสอบความสามารถในการไต่ขึ้นและลงบนผนังเหล็กของหุ่นยนต์ลื่นแม่เหล็ก	38
4.1	แรงยึดเกาะของลื่นแม่เหล็กที่มีความแตกต่างของตัวแปรได้แก่ จำนวนแท่งแม่เหล็ก ความหนากระจกใส และความหนาขอบกระจกใสเพิ่มเติม	44
4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเกาะรวมของลื่นแม่เหล็กสองลื่น และระยะห่างระหว่างลื่นแม่เหล็กสำหรับการวางตำแหน่งของขั้วแม่เหล็กของลื่นแม่เหล็กแบบต่าง ๆ	49

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป		หน้า
4.3	พารามิเตอร์ของล้อแม่เหล็กที่หุ่นยนต์สามารถยึดเกาะได้ขณะหยุดนิ่งบน ผนังทดสอบที่ไม่มีการปิดทับด้วยรูปลอก จำแนกตามการมีอยู่และชนิดของ ยางล้อ : (ก) ไม่มียางล้อ (ข) ยางซิลิโคน (ค) ยางธรรมชาติ	57
4.4	พารามิเตอร์ของล้อแม่เหล็กที่หุ่นยนต์สามารถยึดเกาะได้ขณะหยุดนิ่งบน ผนังทดสอบที่มีการปิดทับด้วยรูปลอก จำแนกตามชนิดของ ยางล้อ : (ก) ยางซิลิโคน (ข) ยางธรรมชาติ	58
4.5	พารามิเตอร์ของล้อแม่เหล็กที่หุ่นยนต์สามารถทำการเคลื่อนที่ในแนวตั้งบนผนัง ทดสอบที่ไม่มีการปิดทับด้วยรูปลอก จำแนกตามการมีอยู่และชนิดของยางล้อ : (ก) ไม่มียางล้อ (ข) ยางซิลิโคน (ค) ยางธรรมชาติ	63

รายการสัญลักษณ์

หน่วย

A_g	=	พื้นที่ตัดขวางของขั้วแม่เหล็กแต่ละแท่ง	
Ad	=	ความสามารถในการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งบนผนังของหุ่นยนต์ ล้อแม่เหล็ก	
B_g	=	Magnetic flux density in gap (ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กใน ช่องว่างอากาศ) หรือ Magnetic Induction in gap	T
B_r	=	Residual magnetic induction	T
B_s	=	Saturation flux density of the material (ฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวในวัสดุ)	T
Cl	=	ความสามารถในการไต่แนวคิ่งของหุ่นยนต์	
$Different$	=	เมื่อขั้วแม่เหล็กของล้อแม่เหล็กสองล้อที่หันเข้าหากันต่างกัน	
dir	=	ทิศทางการเคลื่อนที่ในแนวคิ่งของหุ่นยนต์	
F	=	ค่าแรงแม่เหล็กดึงดูด (Magnetic attraction force) ในสมการที่ (2-2)	N
F_m	=	แรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กเดียว	N
F_{mag}	=	แรงแม่เหล็ก	N
F_{mT}	=	แรงยึดเกาะรวมของล้อแม่เหล็กคู่หรือของล้อแม่เหล็กมากกว่า หนึ่งล้อ	N
F_N	=	แรงในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัส	N
F_{o-r}	=	แรงเนื่องจากการเปลี่ยนรูปของโอริง	N
F_T	=	แรงในแนวสัมผัสกับผิวสัมผัส	N
F_x	=	แรงดึงดูดระหว่างแท่งสองแท่งเมื่อขั้วแม่เหล็กทั้งสองต่างกัน และหันเข้าหากัน	N
f	=	แรงแม่เหล็กเหล็กสถิตรวมจากล้อแม่เหล็กทั้งหมด	N
G	=	ความหนาของแม่เหล็ก	m
g	=	ความเร่งโน้มถ่วง	m/s ²
k	=	จำนวนล้อขับของหุ่นยนต์	ล้อ
L	=	ระยะห่างระหว่างล้อแม่เหล็กทั้งสองตามแนวแกนเพลลา	mm
l_g	=	ระยะห่างระหว่างแท่งแม่เหล็กสองแท่ง	
M	=	Magnetization ของเหล็ก ปรากฏในสมการที่ (2-3)	A/m

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

		หน่วย	
M	=	มวลรวมทั้งหมดของหุ่นยนต์ ปรากฏในสมการที่ (3-2) และสมการที่ (3-3)	kg
M_{pl}	=	น้ำหนักบรรทุกของหุ่นยนต์	kg
M_{robot}	=	น้ำหนักของหุ่นยนต์	kg
NM	=	จำนวนแท่งแม่เหล็ก	แท่ง
NR	=	ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)	
$no\ tire$	=	การไม่มียางล้อ	
P	=	ขั้วแม่เหล็กของล้อแม่เหล็กสองล้อที่หันเข้าหากัน	
R	=	รัศมีของล้อ	m
RM	=	รัศมีอ้างอิงตำแหน่งที่บรรจุแม่เหล็กบนแกนล้อ	
r	=	รัศมีของล้อแม่เหล็กหรือรัศมีกระทะล้อ	m
S	=	ลักษณะของพื้นผิวของผนังทดสอบ	
S_1	=	ผนังทดสอบทำจากเหล็กหนา 10 mm	
S_2	=	ผนังทดสอบทำจากเหล็กหนา 10 mm ที่มีการปิดทับด้วยรูปลอก	
$Same$	=	เมื่อขั้วแม่เหล็กของล้อแม่เหล็กสองล้อที่หันเข้าหากันเหมือนกัน	
SR	=	ยางซิลิโคน (Silicone rubber)	
T	=	ความหนาล้อ	m
$tire$	=	การมีอยู่และชนิดของยางล้อ	
tr	=	ขนาดของความหนากระทะล้อ	mm
tre	=	ขนาดของความหนาขอบล้อที่เพิ่มเติมจากความหนากระทะล้อ	mm
W	=	รัศมีของแม่เหล็ก	m
$+y$	=	ทิศทางการเคลื่อนที่ขึ้นในแนวตั้ง (Upward vertical direction) ของหุ่นยนต์	
$-y$	=	ทิศทางการเคลื่อนที่ลงในแนวตั้ง (Upward vertical direction) ของหุ่นยนต์	
μ	=	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานการกลิ้ง (Rolling friction)	
μ_0	=	Permeability of free space หรือ Magnetic constant	T.m/A
$\mu_0 M$	=	ค่า Strength ของแม่เหล็ก (Strength of magnet)	T

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

หน่วย

μ_{r-o}	=	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของยางโอริง (O-ring)	
μ_{steel}	=	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของเหล็ก	
μ'	=	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานการไถล (Coefficient of the sliding friction)	
θ	=	มุมของความเอียง	rad
θ_s	=	มุมของการอิ่มตัว (Angle of saturation)	rad
τ	=	แรงบิดขับจากมอเตอร์	N.m

ประมวลศัพท์และคำย่อ

A	=	แอมแปร์
A/m	=	แอมแปร์/เมตร
J	=	จูล
m	=	เมตร
mm	=	มิลลิเมตร
m/s ²	=	เมตร/วินาที ²
N	=	นิวตัน
N.m	=	นิวตัน.เมตร
PID	=	Proportional-Integral-Derivative
rad	=	เรเดียน
s	=	วินาที
T	=	เทสลา
V	=	โวลต์

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญของวิทยานิพนธ์

หุ่นยนต์ไต่ (Climbing robot) ที่อาศัยแรงยึดเกาะ (Adhesion force) จากแม่เหล็กถาวรรวมทั้งกลไกและเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องซึ่งการสนับสนุนการเคลื่อนที่และการยึดเกาะของหุ่นยนต์ซึ่งอาศัยแรงแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวร เช่น ล้อแม่เหล็ก สายพานแม่เหล็ก รวมทั้งการติดตั้งแม่เหล็กถาวร โครงสร้างหุ่นยนต์ได้ถูกวิจัยและพัฒนาโดยคณะผู้วิจัยหลายคณะดังปรากฏในเอกสารอ้างอิง [1]-[37] โดยหุ่นยนต์ไต่ชนิดนี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายในลักษณะหุ่นยนต์ตรวจสอบ (Inspection robot) ในการตรวจสอบและบำรุงรักษา สำหรับเครื่องจักรและ โครงสร้างในงานอุตสาหกรรมประเภทต่างๆซึ่งส่วนใหญ่แล้วทำจากวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) เช่น หม้อน้ำ เจนเนอเรเตอร์ กังหันเทอร์ไบน์ เรือเดินสมุทร เป็นต้น ดังที่ได้นำเสนอโดย Bogue [4] และ Caprari และคณะ [6] เป็นต้น ตัวอย่างบางส่วนของหุ่นยนต์ไต่ที่อาศัยแรงยึดเกาะจากแม่เหล็กซึ่งถูกประยุกต์ใช้งานตรวจสอบสามารถนำเสนอได้ดังนี้ หุ่นยนต์สำหรับทำการตรวจสอบองค์ประกอบต่างๆในโรงต้นกำลังได้ถูกวิจัยและพัฒนาขึ้นดังปรากฏในเอกสารอ้างอิง [1]-[10] [17] เป็นต้น หุ่นยนต์สำหรับการตรวจสอบถังเก็บน้ำมันขนาดใหญ่โดย Fernandez และคณะ [11] และ Shen และ คณะ [13] และ หุ่นยนต์สำหรับนำไปใช้ตรวจสอบและบำรุงรักษาสำหรับเรือเดินสมุทรโดย Eich และคณะ [14] และ Yi และคณะ [15] นอกจากการประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบสำหรับภาคอุตสาหกรรมแล้ว ในงานด้านความมั่นคง หุ่นยนต์ล้อแม่เหล็กได้ถูกพัฒนาขึ้นโดย Zhang และคณะ [19] เพื่อนำไปใช้ตรวจสอบตู้คอนเทนเนอร์สำหรับป้องกันการลักลอบเข้าเมือง ตรวจหายาเสพติด ฯลฯ

การใช้แรงแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวรสำหรับการสร้างยึดเกาะหุ่นยนต์ไต่ในการไต่บนพื้นผิวสัมผัสที่เป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกนั้น มีข้อดีหรือจุดเด่นซึ่งได้มีการนำเสนอโดยคณะผู้วิจัยหลายคณะดังต่อไปนี้ Silva และคณะ [20] และ Chu และคณะ [21] ได้นำเสนอข้อดีของการใช้แรงแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวรคือมีค่าแรงยึดเกาะที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากและความน่าเชื่อถือสูง อีกทั้งหุ่นยนต์ไต่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็วเนื่องจากแรงยึดเกาะสามารถถูกสร้างขึ้นได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ Silva และคณะ [20] ได้นำเสนอจุดเด่นที่สำคัญอีกประการคือ การยึดเกาะ (Adhesion) และการเคลื่อนที่ (Locomotion) สามารถเกิดขึ้นได้พร้อมกันสำหรับหุ่นยนต์ซึ่งใช้ล้อแม่เหล็ก สำหรับ Fisher และคณะ [1] ได้สรุปและนำเสนอข้อดีของการใช้แรงแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวรกับหุ่นยนต์ไต่คือ หุ่นยนต์สามารถทำการไต่บนผนังเรียบแนวตั้งซึ่งไม่มีสิ่งช่วยในการจับยึดรวมทั้งสามารถทำการไต่บนพื้นผิวสัมผัสที่มีลักษณะพรุนหรือมีความสกปรกเล็กน้อยได้อีกด้วย ในแง่มุมของการใช้พลังงานนั้น หุ่นยนต์ไต่ซึ่งใช้แรงแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวรสามารถทำการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งและเคลื่อนที่โดย

ปราศจากการป้อนพลังงานเพื่อสร้างและรักษาการยึดเกาะซึ่งประเด็นนี้ได้ถูกนำเสนอในเอกสารอ้างอิง [1] [20] และ [21]

เมื่อเปรียบเทียบแนวทางการใช้แรงยึดเกาะจากแม่เหล็กถาวรระหว่างการใช้ล้อยแม่เหล็กและสายพานแม่เหล็กกับหุ่นยนต์ไต่จากข้อมูลของงานวิจัยที่มีมาก่อนจะพบว่า การใช้สายพานแม่เหล็กมีข้อดีคือ ปัญหาของการเลี้ยวและการเคลื่อนที่ผ่านพื้นผิวที่เป็นสันดงที่กล่าวถึงโดย Fisher และคณะ [26] รวมทั้งสามารถก่อให้เกิดความเสียหายกับพื้นผิวสัมผัสได้ตามที่ปรากฏใน [1] และ [11] ยิ่งไปกว่านั้นกรณีที่พื้นผิวที่มีความโค้ง การใช้ล้อยแม่เหล็กก็มีความเหมาะสมกว่าการใช้สายพานแม่เหล็กดังที่นำเสนอโดย Fisher และคณะ [1] ดังนั้นการใช้ล้อยแม่เหล็กกับหุ่นยนต์ไต่จึงเป็นแนวทางที่ได้รับความสนใจ ตัวอย่างของการศึกษาวิจัยหลายชิ้นที่เกี่ยวข้องกับหุ่นยนต์ไต่ล้อยแม่เหล็กและล้อยแม่เหล็กซึ่งปรากฏในเอกสารอ้างอิงต่อไปนี้ [1] [5]-[7] [11] [12] [14] [16]-[19] [23]-[34] และ [36]-[37]

จากข้อมูลทีกล่าวมาข้างต้น งานวิจัยชิ้นนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษาและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงตัวแปรหรือปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็ก แรงเสียดทาน และความสามารถในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ไต่ผนัง (Wall climbing robot) ซึ่งใช้ล้อยแม่เหล็ก เพื่อจะนำไปสู่แนวทางการออกแบบล้อยแม่เหล็กที่เหมาะสมซึ่งสามารถตอบสนองการเคลื่อนที่บนผนังของหุ่นยนต์ไต่ผนังได้ โดยล้อยแม่เหล็กมีแรงยึดเกาะและแรงเสียดทานที่เพียงพอที่จะทำให้หุ่นยนต์ยึดเกาะและเคลื่อนที่ได้ตามวัตถุประสงค์ของการออกแบบ

1.2 วัตถุประสงค์ ขอบเขต และประโยชน์ของงานวิจัย

1.2.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์แรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กที่พารามิเตอร์ของล้อยแม่เหล็กและพื้นผิวสัมผัสที่มีความแตกต่างในขอบเขตที่สนใจโดยการทดลองจริง
2. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์แรงยึดเกาะและแรงเสียดทานของล้อยแม่เหล็กที่มีผลต่อความสามารถในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ไต่ผนังเมื่อความเร็วของหุ่นยนต์คงที่ในขอบเขตที่สนใจ

1.2.2 ขอบเขต

1. ศึกษาและวิเคราะห์ผลของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของล้อยแม่เหล็กและพารามิเตอร์ของพื้นผิววัสดุเฟอร์โรแมกเนติกในขอบเขตที่สนใจ จากการทดลองจริงโดยวิธีการทดลองวัดแรงดึงแบบสถิต

2. ศึกษาและวิเคราะห์แรงยึดเกาะและแรงเสียดทานที่ผลต่อความสามารถในการไต่ในแนวตั้งของหุ่นยนต์เมื่อความเร็วของหุ่นยนต์คงที่และการยึดเกาะขณะหุ่นยนต์หยุดนิ่งบนผนังที่ทำจากวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก

1.2.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. พารามิเตอร์ของล้อยแม่เหล็กที่เหมาะสมเพื่อที่จะสามารถนำไปใช้ในการออกแบบล้อยแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ไต่ผนังที่ทำจากวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก ที่สามารถตอบสนองการเคลื่อนที่ที่ต้องการได้
2. เข้าใจถึงผลกระทบของแรงยึดเกาะและแรงเสียดทานที่มีต่อความสามารถในการเคลื่อนที่และการยึดเกาะของหุ่นยนต์บนผนังที่ทำจากวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก

1.3 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

โครงสร้างของวิทยานิพนธ์นี้จะประกอบด้วยเนื้อหา 5 บท ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึง ความสำคัญของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ ขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยชิ้นนี้

บทที่ 2 นำเสนอทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องประกอบด้วยเนื้อหาได้แก่ ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และประเภทของล้อยแม่เหล็ก

บทที่ 3 นำเสนอเนื้อหาซึ่งเกี่ยวข้องกับวิธีการวิจัยได้แก่ ภาพรวมของระบบของการศึกษาและวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ ตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ชิ้นงานและอุปกรณ์การทดลอง การทดลองและความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเกาะและความสามารถในการยึดเกาะของหุ่นยนต์ล้อยแม่เหล็กและแบบจำลองคณิตศาสตร์แสดงการเคลื่อนที่บนผนังของหุ่นยนต์ล้อยแม่เหล็ก

บทที่ 4 แสดงผลการทดลองและนำเสนอการวิเคราะห์ผลการทดลองซึ่งได้ดำเนินการทดลองตามที่ได้ออกแบบในบทที่ 3

บทที่ 5 กล่าวถึงการสรุปผลการวิจัยซึ่งได้จากการทดลองและนำเสนอข้อเสนอแนะเพื่อให้นักศึกษาและวิจัยที่จะกระทำต่อไปในอนาคตมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 แรงแม่เหล็ก (Magnetic Force)

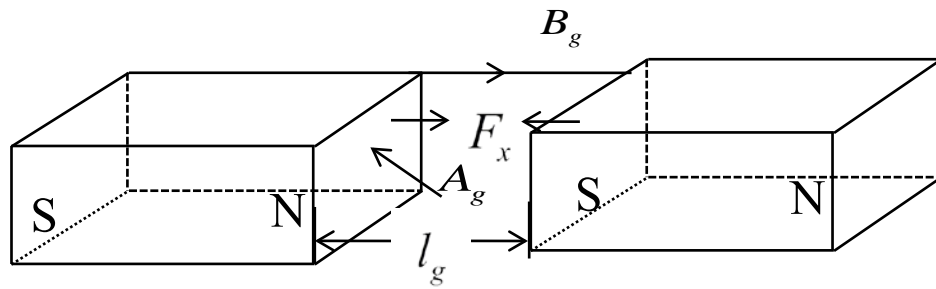
แรงยึดเกาะ (Adhesion force) จากแรงแม่เหล็กของหุ่นยนต์ไต่ผนังที่เป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกนั้น เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของหุ่นยนต์ที่ทำให้หุ่นยนต์สามารถยึดเกาะและเคลื่อนที่บนผนังได้ โดยแม่เหล็กจะถูกติดตั้งโดยตรงอุปกรณ์ที่ใช้ในการไต่ผนังของหุ่นยนต์ เช่น ที่ล้อหรือสายพานและ/หรือ ถูกติดตั้งที่โครงสร้างของหุ่นยนต์ เช่น ใต้ลำตัวของหุ่นยนต์ เป็นต้น

พิจารณาแรงแม่เหล็ก (Magnetic force) ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างแท่งสองแท่งเมื่อขั้วแม่เหล็กทั้งสองต่างกันและหันเข้าหากันแทนด้วยตัวแปร F_x ดังรูปที่ 2.1 ที่ระยะระหว่างแท่งแม่เหล็กเท่ากับ l_g ซึ่งแรงแม่เหล็กนี้สามารถแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์กับความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density) ในช่องว่างอากาศแทนด้วย B_g และพื้นที่ตัดขวางของขั้วแม่เหล็กแต่ละแท่ง A_g ดังสมการที่ (2-1)

$$F_x = -\frac{B_g^2 A_g}{2\mu_0} \quad (2-1)$$

ความสัมพันธ์ที่แสดงในสมการที่ (2-1) อ้างอิงจากเอกสารวิจัยโดย Campbell [38] และสามารถค้นคว้าเพิ่มเติมได้ในเอกสารอ้างอิงต่อไปนี้ Moskowitz [39] Parker [40] Zhang และคณะ [18] และ Rochat และคณะ [25] สำหรับระบบหน่วย SI F_x มีหน่วย N l_g จะมีหน่วย m B_g มีหน่วย (T) และ A_g มีหน่วย m^2 สำหรับ μ_0 คือ ค่าคงที่แม่เหล็ก (Magnetic constant) ตาม [40] หรือ ค่าเพอร์มิอิลิตีในสุญญากาศ (permeability of free space) ดังแสดงใน [25] มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ T.m/A

สำหรับช่องว่างระหว่างแท่งแม่เหล็กสองแท่งจะถูกกำหนดและพิจารณาว่าเป็นช่องว่างอากาศ (Air gap) โดย Parker [40] ได้ให้คำจำกัดความของ Air gap ไว้ว่า “Air Gap: A nonmagnetic discontinuity in a ferromagnetic circuit. For example, the space between the poles of a magnet, although filled with brass or wood or any nonmagnetic material, is nevertheless called an air gap.”



รูปที่ 2.1 แรงแม่เหล็กระหว่างแท่งแม่เหล็กสองแท่ง [38]

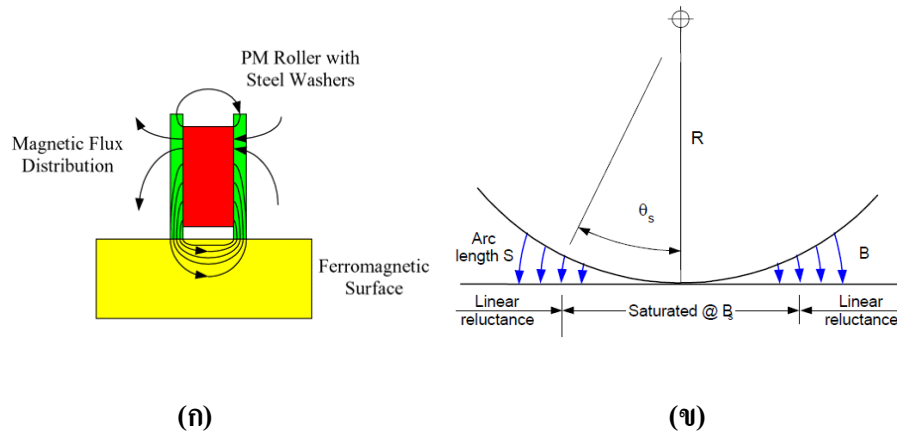
หากพิจารณาสื่อแม่เหล็กและผิวสัมผัสที่เป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) ในลักษณะวงจรมแม่เหล็กโดยฟลักซ์แม่เหล็กจะไหลจากกระทะลือที่เป็นขั้วเหนือไปยังกระทะลือที่เป็นขั้วใต้ผ่านพื้นผิวสัมผัสซึ่งสามารถพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงแม่เหล็กของวงจรมแม่เหล็กได้ในลักษณะเดียวกับ สมการที่ (2-1) ซึ่งแรงแม่เหล็กแปรผันตรงกับพื้นที่ตัดขวางของขั้วแม่เหล็กแต่ละแท่ง (A_g) และกำลังสองของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (B_g) เพื่อความสะดวกในการศึกษาและวิเคราะห์เกี่ยวกับแรงแม่เหล็กต่อไปในบทที่ 4 จะอ้างอิงถึงสมการที่ (2-1) ซึ่งถูกนำไปใช้วิเคราะห์ในลักษณะเดียวกันดังเอกสารอ้างอิงที่ [18] และ [25] เป็นต้น อย่างไรก็ตามสมการแรงแม่เหล็กของวงจรมแม่เหล็กที่ประกอบด้วยสื่อแม่เหล็กและพื้นผิวสัมผัสเฟอร์โรแมกเนติกซึ่งได้มีผู้นำเสนอดังต่อไปนี้

สำหรับแรงแม่เหล็กจากวงจรมแม่เหล็กที่สร้างแรงยึดเกาะของสื่อแม่เหล็กได้ถูกนำเสนอในงานวิจัยของ Slocum และคณะ [36] ซึ่งมีวงจรมแม่เหล็กและคิผลของมุมอิ่มตัว (Angular of saturation) แทนด้วย θ_s ดังรูปที่ 2.2 ค่าแรงแม่เหล็กดึงดูด (Magnetic attraction force) ทำให้สื่อแม่เหล็กถูกดึงดูดกับพื้นผิวสัมผัสแทนด้วย F มีหน่วย N ได้ถูกแสดงในสมการที่ (2-2) และมีความสัมพันธ์กับตัวแปรต่างๆ ได้แก่ รัศมีของลือแทนด้วย R มีหน่วย m ความหนากระทะลือแทนด้วย T มีหน่วย m รัศมีของแม่เหล็กแทนด้วย W มีหน่วย m ความหนาของแม่เหล็กแทนด้วย G มีหน่วย m ค่าความหนาแน่นฟลักซ์อิ่มตัวของวัสดุ (Saturation magnetic flux density of material). แทนด้วย B_s มีหน่วย T ซึ่งเป็นตัวย่อของหน่วยเทสลา (Tesla) และค่า Strength ของแม่เหล็กแทนด้วย ค่า $\mu_0 M$ มีหน่วย T

$$F = \frac{2R\theta_s B_s^2 T}{\mu_0} \quad (2-2)$$

โดยที่ค่ามุมอิ่มตัว (θ_s) ถูกแสดงดังสมการที่ (2-3)

$$\theta_s = \frac{2GT}{\pi R^2} \left[\sqrt{\frac{\mu_0 M \pi^2 R W^2}{4GT^2 B_s} + 1} - 1 \right] \quad (2-3)$$



รูปที่ 2.2 (ก) หลักการของล้อแม่เหล็ก [36] (ข) วงจรแม่เหล็กของล้อแม่เหล็กที่สัมผัสกับผิวสัมผัสและมุมอิ่มตัว (Angle of Saturation) [36]

นอกเหนือจากการวิเคราะห์แรงแม่เหล็กที่สร้างแรงยึดเกาะสำหรับล้อแม่เหล็กแล้ว สมการคำนวณแรงแม่เหล็กลักษณะเดียวกันกับสมการที่ (2-1) และ (2-2) ยังปรากฏในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณแรงแม่เหล็กของสายพานแม่เหล็กอีกด้วย เช่น หุ่นยนต์ที่ออกแบบโดย Gao และคณะใน [3] [8] และ [9] เป็นต้น

2.1.2 การออกแบบล้อแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ไต่ผนัง

เนื่องจากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยชิ้นนี้เกี่ยวข้องกับการศึกษาและวิเคราะห์แรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ไต่ผนังวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆ และผลกระทบของแรงยึดเกาะและแรงเสียดทานของล้อแม่เหล็กต่อความสามารถในการเคลื่อนที่บนผนังของหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็ก ดังนั้นการสำรวจเอกสารจึงมุ่งความสนใจไปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาวิเคราะห์และการออกแบบล้อแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ไต่ผนังล้อแม่เหล็ก (Magnetic wheeled climbing robot) ซึ่งมีประเด็นสำคัญคือการหาค่าแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็ก

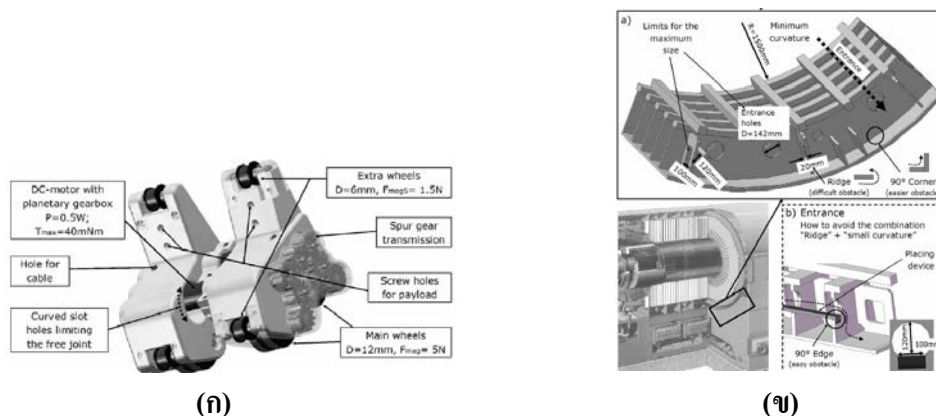
การหาค่าแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็ก

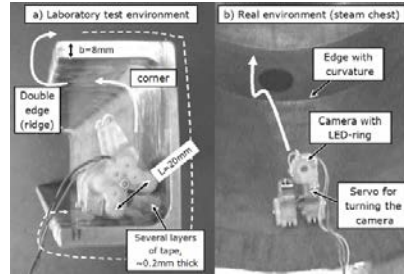
กลไกการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ไต่ผนังที่เป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกโดยล้อแม่เหล็กทำจากแม่เหล็กถาวร (Permanent magnet) และหุ่นยนต์ไต่ผนังล้อแม่เหล็กได้ถูกทำการศึกษาวิจัยและพัฒนาโดยคณะผู้วิจัยก่อนหน้านี้้อย่างมากมาย ดังที่แสดงในบทที่ 1 หนึ่งในขั้นตอนที่สำคัญของการออกแบบและสร้างกลไกการเคลื่อนที่ดังกล่าวคือการหาค่าแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ไต่ผนังที่ตอบสนองการเคลื่อนที่ภายใต้ผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ซึ่งจากการสำรวจเอกสารพบว่า สามารถแบ่งได้เป็นสองแนวทางหลักคือ 1) การคำนวณหาค่าแรงยึดเกาะด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์เอลิเมนต์บนโปรแกรมสำเร็จรูปซึ่งเกี่ยวข้องกับการแก้สมการ Maxwell หรือ ทำการคำนวณจาก

สมการคำนวณแรงเหล็กค้ำปรากฏในงานวิจัยหลายชิ้น เช่น Zhang และคณะ [18] Han และคณะ [24] Rochat และ [25] Slocum และคณะ [36] ฯลฯ 2) ทำการทดลองวัดค่าแรงยึดเกาะโดยตรงเพียงอย่างเดียวดังงานวิจัย เช่น Yukawa และคณะ [28] Fisher และคณะ [26] Fernandez และคณะ [12] ฯลฯ ได้ทำการทดลองเพื่อวัดค่าแรงยึดเกาะที่จะทำให้หุ่นยนต์สามารถยึดเกาะและเคลื่อนที่บนผนังได้ อย่างไรก็ตามในหลายงานวิจัย นอกเหนือจากการคำนวณหาค่าแรงยึดเกาะจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์หรือจากสมการแรงแม่เหล็กของลวดแม่เหล็กแล้ว คณะผู้วิจัยได้ทำการทดลองวัดค่าแรงยึดเกาะของลวดแม่เหล็กโดยตรงควบคู่ไปอีกด้วยดังปรากฏในเอกสารอ้างอิงเช่น [24] [25] [36] ฯลฯ

ต่อไปจะขอกล่าวถึงงานวิจัยที่ทำการหาค่าแรงยึดเกาะจากการทดลองภายใต้ผลกระทบของตัวแปรต่างๆเพียงอย่างเดียวที่น่าสนใจและเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมดังงานวิจัยได้แก่ 1) Fisher และคณะ [1] 2) Yukawa และคณะ [28] 3) Fisher และคณะ [26] 4) Fernandez และคณะ [11] และ [12]

1) Fisher และคณะ [1] ได้ทำการออกแบบหุ่นยนต์ลวดแม่เหล็กขนาดเล็กซึ่งดังรูปที่ 2.3 (ก) สำหรับการตรวจสอบภายในและวัดการสั่นสะเทือนในโครงสร้างของ Generator (เจนเนอเรเตอร์) ซึ่งหุ่นยนต์ขนาดเล็กมีความสามารถในการผ่านสิ่งกีดขวางภายใน Generator ได้แก่ มุม ขอบ และสามารถยึดเกาะกับพื้นผิวเอียงต่างๆ ได้ ภายใต้ข้อจำกัดต่างๆรวมถึงน้ำหนักบรรทุก สภาพแวดล้อมภายใน Generator มีลักษณะดังรูปที่ 2.3 (ข) สำหรับการหาค่าแรงยึดเกาะจากแรงแม่เหล็กกระทำโดยทำการวัดแรงยึดเกาะเมื่อลวดแม่เหล็กสัมผัสกับพื้นผิวเหล็กที่มีและไม่มีการทาสีซึ่งหนาประมาณ 0.2 mm เมื่อมียางหุ้มลวดมีความหนาประมาณ 0.1 mm พบว่า มีค่าประมาณ 5 N และ 10 N ตามลำดับ ยิ่งไปกว่านั้นยังได้เสนอวิธีการติดตั้งยางหุ้มลวดซึ่งสามารถยึดกับลวดได้อย่างมั่นคงอีกด้วย รูปที่ 2.3 (ค) แสดงการทดสอบหุ่นยนต์ภายใต้สภาวะแวดล้อมในห้องปฏิบัติการและสภาพแวดล้อมจริง

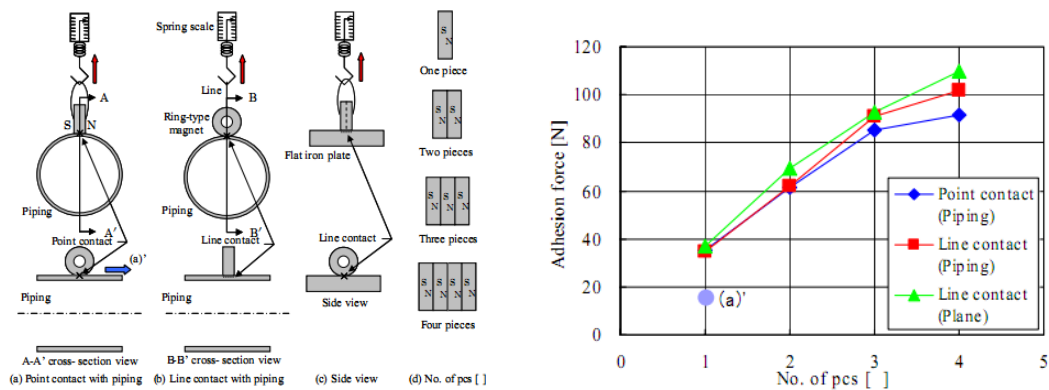




(ก)

รูปที่ 2.3 (ก) แบบจำลองของหุ่นยนต์ [1] (ข) แบบจำลองสภาพแวดล้อมล้อภายใน Generator [1] (ค) การทดสอบหุ่นยนต์ภายในห้องปฏิบัติการและสภาพแวดล้อมจริง [1]

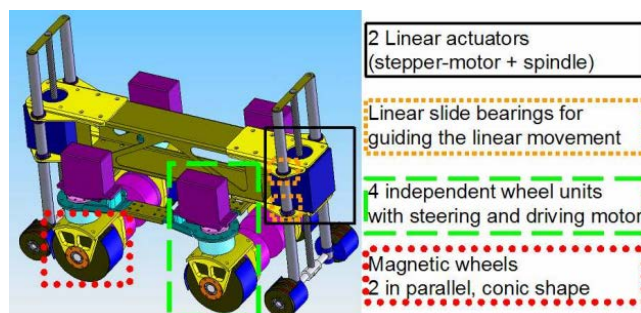
2) Yukawa และคณะ [28] ได้ออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ตรวจสอบตรวจสอบล้อแม่เหล็กที่สามารถเคลื่อนที่บนผิวท่อได้ ในการออกแบบล้อแม่เหล็ก การหาค่าแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กซึ่งมีการหุ้มยางหนาประมาณ 1 mm กระทำโดยทำการวัดแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กที่มีจำนวนแม่เหล็กวงแหวนต่างๆ และมีลักษณะการสัมผัสของล้อแม่เหล็กและผิวสัมผัสที่แตกต่างกันด้วยตราซังสปริง ดังรูปที่ 2.4 โดยการสัมผัสกับผิวท่อของล้อแม่เหล็กแบ่งเป็น 2 กรณี คือ การสัมผัสแบบเส้น (Line contact) และการสัมผัสแบบจุด (Point contact) ในขณะที่การสัมผัสของล้อแม่เหล็กกับแผ่นเหล็กเรียบเป็นแบบจุด อีกทั้งคณะผู้วิจัยได้นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนแท่งแม่เหล็กที่ใช้กับแรงยึดเกาะที่วัดได้แต่ละกรณีของการสัมผัสของล้อแม่เหล็กกับผิวท่อและกับแผ่นเหล็กเรียบดังรูปที่ 2.4 นอกจากนี้ยังได้ทำการประมาณค่าแรงเสียดทานที่กระทำต่อล้อแม่เหล็กอีกด้วย ในงานวิจัยของ Yukawa และคณะ [31] ได้ทำการทดสอบแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กที่ล้อแม่เหล็กที่สัมผัสกับท่อภายใต้รูปทรงของกระทะล้อแม่เหล็กที่แตกต่างกันเมื่อมีการติดตั้งและไม่มีการติดตั้งยางล้อ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหุ่นยนต์ตรวจสอบนี้สามารถค้นคว้าเพิ่มเติมได้ใน [32] และ [33]



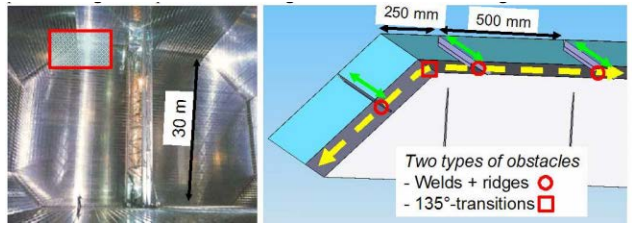
รูปที่ 2.4 การทดสอบวัดแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กและความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเกาะและจำนวนแท่งแม่เหล็กที่ลักษณะการสัมผัสของล้อแม่เหล็กและผิวสัมผัสรูปแบบต่างๆ [28]

- 3) Fisher และคณะ [26] ได้ออกแบบหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็กสำหรับตรวจสอบภายในถังก๊าซซึ่งมีรูปแบบเชิงแนวคิด (Concept) ดังรูปที่ 2.5 (ก) โดยกล่าวถึงปัญหาและแนวทางการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อหุ่นยนต์ใต้ต้องเคลื่อนที่บนพื้นผิวบางภายในถังเก็บก๊าซ ซึ่งพื้นผิวนี้อาจมีข้อจำกัดที่ทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ลำบาก 2 ลักษณะคือ 1) บริเวณสัน (Ridge) 2) การเชื่อมต่อของพื้นผิวที่ทำมุมกัน 135° สภาพแวดล้อมในการทำงานและอุปสรรคต่างๆของหุ่นยนต์แสดงดังรูปที่ 2.5 (ข) ความสามารถในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เมื่อล้อแม่เหล็กเคลื่อนที่บนสันทำให้แรงแม่เหล็กลดลงอย่างมาก สำหรับการเชื่อมต่อของผิวสัมผัสสองผิวที่ทำมุมกัน 135° ทำให้ต้องใช้พลังงานมากในการขับเคลื่อนเพราะมีการสัมผัสของล้อแม่เหล็กกับพื้นผิวสองจุด อีกทั้งคณะผู้วิจัยยังได้วิเคราะห์และนำเสนอผลกระทบจากพื้นผิวสัมผัสที่บางต่อแรงแม่เหล็กที่ใช้ในการยึดเกาะซึ่งพื้นผิวบางทำให้แรงแม่เหล็กลดลงเนื่องจากเกิดการอิ่มตัวของฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux saturation)

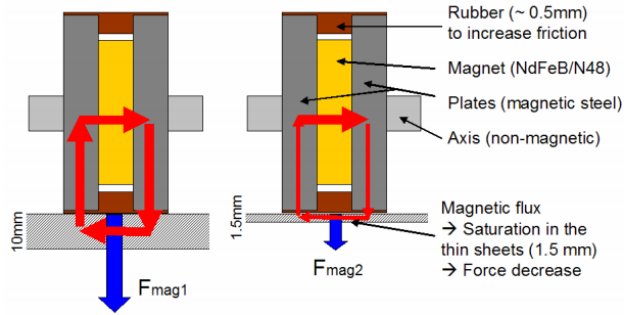
คณะผู้วิจัยได้นำเสนอการปรับปรุงล้อแม่เหล็กโดยกระทะล้อ (Wheel plate) ของล้อแม่เหล็กจะมีลักษณะเป็นรูปทรงกรวย (Conic shape) ซึ่งทำให้มวลล้อแม่เหล็กลดลงและส่งผลให้มวลรวมของโครงสร้างหุ่นยนต์ลดลงประมาณ 30 % แต่ค่าแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กยังคงไม่เปลี่ยนแปลง ในส่วนของยางล้อนั้นได้ถูกติดตั้งเพื่อเพิ่มแรงเสียดทาน ในงานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยได้ใช้ Tension spring เพื่อทำการวัดค่าแรงยึดเกาะจากแรงแม่เหล็กของล้อแม่เหล็กในกรณีต่างๆ หลังจากนั้นได้ทำการวิเคราะห์ผลกระทบของพื้นผิวทั้งสามรูปแบบข้างต้นรวมทั้งหลังคาและผนังต่อแรงแม่เหล็ก จากนั้นทำการวิเคราะห์และคำนวณทั้งค่าแรงบิดและสัมประสิทธิ์ที่ความต้องการของการเคลื่อนที่แต่ละกรณีและทำการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ผ่านสัน ผิวสัมผัสสองผิวที่ทำมุมกัน 135° และการเปลี่ยนการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จากแนวตั้ง (Vertical) สู่นแนวระดับ (Horizontal) แสดงดังในรูปที่ 2.6 (ก) รูปที่ 2.6 (ข) และ รูปที่ 2.6 (ค) ตามลำดับ



(ก)

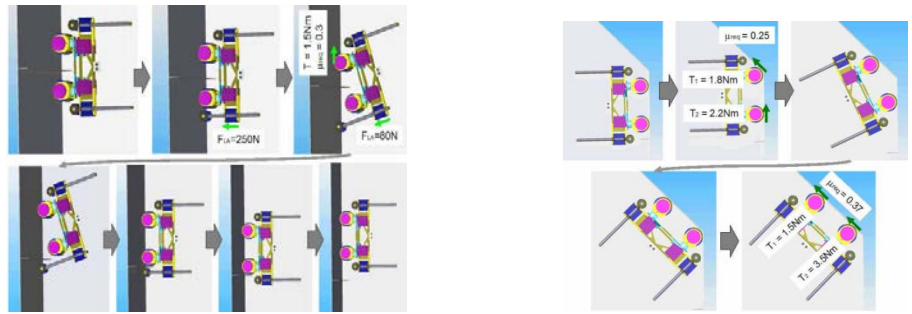


(ข)



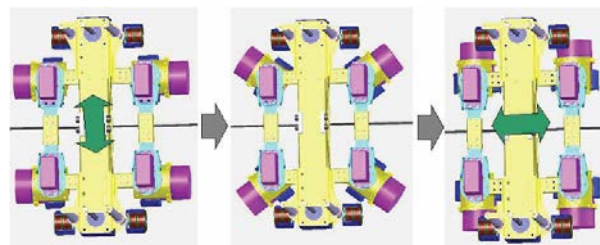
(ค)

รูปที่ 2.5 (ก) แนวคิดของหุ่นยนต์ [26] (ข) สภาพแวดล้อมและอุปสรรคในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ [26] (ค) ผลกระทบของความหนาของผิวสัมผัสต่อแรงยึดเกาะ [26]



(ก)

(ข)



(ค)

รูปที่ 2.6 (ก) การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ผ่านสัน [26] (ข) การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนผิวสัมผัสสองผิวที่ทำมุมกัน 135° [26] (ค) การเปลี่ยนการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จากแนวตั้ง (Vertical) สู่นแนวระดับ (Horizontal) [26]

- 4) Fernandez และคณะ [11] ได้นำเสนอหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็กต้นแบบสำหรับตรวจสอบภายนอกถึงอย่างอัตโนมัติแบบ Tricycle ดังรูปที่ 2.7 (ก) และสามารถรองรับการเคลื่อนที่บนผิวที่ไม่เรียบ (Non-flat) ซึ่งคณะผู้วิจัยได้กล่าวถึงข้อดีของการใช้แม่เหล็กขนาดเล็กหลายชิ้นเป็นองค์ประกอบของล้อแม่เหล็กคือการเพิ่มรัศมีของล้อแม่เหล็กสามารถกระทำได้ในขณะที่ไม่ต้องเพิ่มน้ำหนักของล้อมากดังปรากฏใน [11] สำหรับล้อแม่เหล็กประกอบขึ้นจากแม่เหล็กที่มีขนาดเล็กซึ่งมีองค์ประกอบของดังรูปที่ 2.7 (ข) รายละเอียดการออกแบบล้อแม่เหล็กและกลไกการเคลื่อนที่ได้ถูกแสดงใน [12] และคณะผู้วิจัย [12] ได้แสดงการหาแรงในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัส (F_N) ที่ทำให้หุ่นยนต์สามารถเกาะบนผนังได้โดยไม่ร่วงหล่นด้วยล้อแม่เหล็กซึ่งสัมผัสกับผิวสัมผัสและแรงในแนวสัมผัสกับผิวสัมผัส (F_T) ซึ่งเกี่ยวข้องกับแรงต่างๆตามรูปที่ 2.8 ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (2-4) และ (2-5)

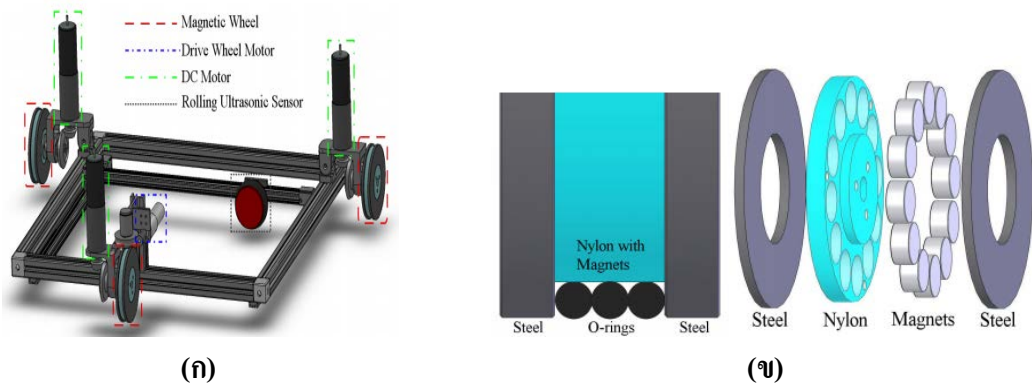
$$F_N = 2F_{mag} - F_{o-r} \quad (2-4)$$

$$F_T = \mu_{o-r}F_{o-r} + \mu_{steel}F_N \quad (2-5)$$

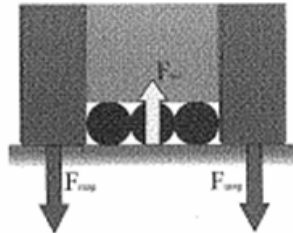
เมื่อ F_{mag} = แรงยึดเกาะแม่เหล็ก μ = สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน F_{o-r} = แรงเนื่องจากการเปลี่ยนรูปของยางโอริง (O-ring) อีกทั้งคณะผู้วิจัยได้แสดงเงื่อนไขที่หุ่นยนต์ทำให้หุ่นยนต์ไม่เกิดการลื่นไถลคือแรงที่เกิดจากน้ำหนักของหุ่นยนต์ M_{robot} และน้ำหนักบรรทุก M_{pl} จะต้องมีค่าน้อยกว่าแรงในแนวสัมผัสกับผิวสัมผัส (F_T) และ แรงในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัส (F_N) ดังสมการที่ (2-6)

$$F_N \geq F_T > (M_{pl} + M_{robot})g \quad (2-6)$$

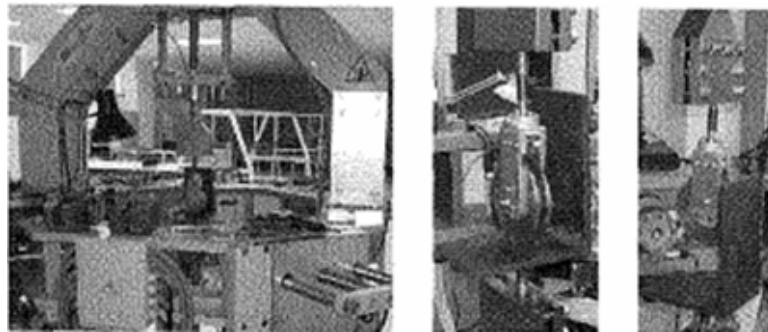
จากนั้นคณะผู้วิจัยกลุ่มนี้ [12] ได้ทำการทดสอบเพื่อวัดแรง F_N และ F_T สำหรับล้อแม่เหล็กที่ติดตั้งยาง O-ring ในกรณีต่างๆ ซึ่งชุดทดสอบถูกจัดตั้งดังแสดงดังรูปที่ 2.9 (ก) และได้ทำการหาขนาดและจำนวนของยาง O-ring ที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาจากแรง F_N F_T และการกลิ้งของล้อ ผลการทดสอบของแรง F_N และ F_T แสดงดังรูปที่ 2.9 (ข) สำหรับค่าแรง F_N และ F_T ที่ได้จากการทดสอบเป็นไปตามเงื่อนไขตามสมการที่ (2-6) และหุ่นยนต์สามารถเกาะติดกับพื้นผิวได้โดยค่าของแรงทั้งสอง ยิ่งไปกว่านั้นได้ทำการจำลองสถานการณ์ (Simulation) ของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ผ่านโปรแกรม MSC ADAMS ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ค) ผลของการจำลองสถานการณ์พบว่า หุ่นยนต์ทำการเลี้ยวได้ดี อีกทั้งจากการจำลองสถานการณ์ซึ่งการอาศัยข้อมูลของแรงที่ได้จากการทดสอบพบว่าหุ่นยนต์สามารถทำการไต่ได้



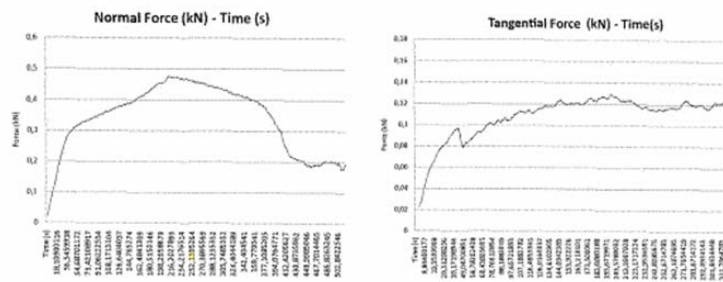
รูปที่ 2.7 (ก) หุ่นยนต์ล้อแม่เหล็กต้นแบบสำหรับตรวจสอบภายนอกถังอย่างอัตโนมัติ [11] (ข) ล้อแม่เหล็กที่ประกอบขึ้นจากแม่เหล็กที่มีขนาดเล็ก [11]



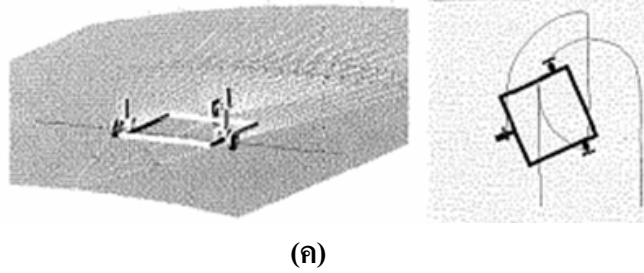
รูปที่ 2.8 แรงที่เกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสระหว่างพื้นผิวสัมผัสและล้อแม่เหล็ก [12]



(ก)



(ข)

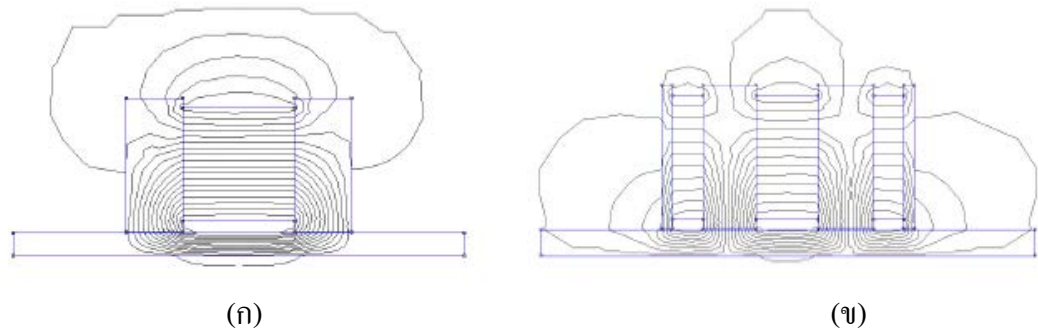


รูปที่ 2.9 (ก) ชุดทดสอบวัดค่าแรงในแนวตั้งฉาก (F_N) และ แรงในแนวสัมผัส (F_T) [12] (ข) กราฟแสดงค่าแรงซึ่งได้จากการทดสอบ [12] (ค) การจำลองสถานการณ์ของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โดยโปรแกรม MSC ADAMS [12]

งานวิจัยที่ใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งโปรแกรม เช่น ANSYS COMSOL ฯลฯ หรือสมการคำนวณแรงแม่เหล็กได้ถูกใช้ในการคำนวณแรงยึดเกาะสำหรับการออกแบบและวิเคราะห์ล้อแม่เหล็กคังงานวิจัยได้แก่ 1) Rochat และคณะ [25] 2) Han และคณะ [24] 3) Zhang และคณะ [18] 4) Slocum และคณะ [36] สำหรับบางงานวิจัยได้นำค่าที่ได้จากการคำนวณไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองวัดค่าแรงยึดเกาะอีกด้วยดังเอกสารอ้างอิง [24] [25] และ [36]

1) Rochat และคณะ [25] ได้เสนอแนวทางการออกแบบล้อแม่เหล็กที่เหมาะสมที่สุด (Optimal design) สำหรับหุ่นยนต์ตรวจสอบในบริเวณต่างๆของโรงต้นกำลังแบบ MagneBike ซึ่งปรากฏในหลายเอกสารวิจัยหลายชิ้น เช่น [6] [7] และ [17] เป็นต้น โดยได้เสนอแนวทางการออกแบบล้อที่น่าสนใจสองประเด็น ประเด็นแรกคือระยะห่างระหว่างกระทะล้อควรมีค่ามากเมื่อเทียบกับขนาดของ Air gap ประเด็นที่สองคือการทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของกระทะล้อและเส้นผ่านศูนย์กลางของแม่เหล็กมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุดมี เพื่อลดการรั่วไหลของฟลักซ์แม่เหล็ก อย่างไรก็ตามผลกระทบจากความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งสองจะมีผลน้อยลงเมื่อแม่เหล็กมีความหนามากขึ้น ซึ่งคณะผู้วิจัยได้ยืนยันและแสดงแนวทางการออกแบบนี้ด้วยการจำลองสถานการณ์โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งแบบ 2 มิติและ 3 มิติบนโปรแกรม FEMM และ COMSOL ตามลำดับ โดยคณะผู้วิจัยทำการศึกษาวิเคราะห์ฟลักซ์แม่เหล็กของล้อแม่เหล็กสองรูปแบบได้แก่ แบบของล้อแม่เหล็กรูปแบบปกติ (Conventional configuration) และล้อแม่เหล็กแบบหลายชั้น (Multi-layer configuration) กระทำบนโปรแกรม FEMM ดังรูปที่ 2.10 จากนั้นได้ศึกษาถึงผลกระทบของความหนาของแท่งแม่เหล็กต่อแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กรูปแบบปกติ และผลของเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งแม่เหล็กต่อแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กรูปแบบปกติและรูปแบบหลายชั้นซึ่งพบว่า ความหนาของแท่งแม่เหล็กควรมีค่าไม่มากเกินไปหรือน้อยเกินไปจึงจะได้แรงแม่เหล็กสูงสุด สำหรับผลการเพิ่มขึ้นของเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งแม่เหล็กจะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของแรงแม่เหล็กจนกว่าผิวสัมผัสและกระทะล้อเกิดสภาวะอิ่มตัว

(Saturation) จากนั้นได้ทำการคำนวณแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กทั้งแบบปกติและแบบหลายชั้นที่มีทิศทางของ แมกเนไทเซชัน (Magnetization) ต่างกันของโดยการจำลองสถานการณ์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ และเปรียบเทียบกับค่าของแรงที่ได้จากการวัดได้จริง ดังตารางที่ 2.1

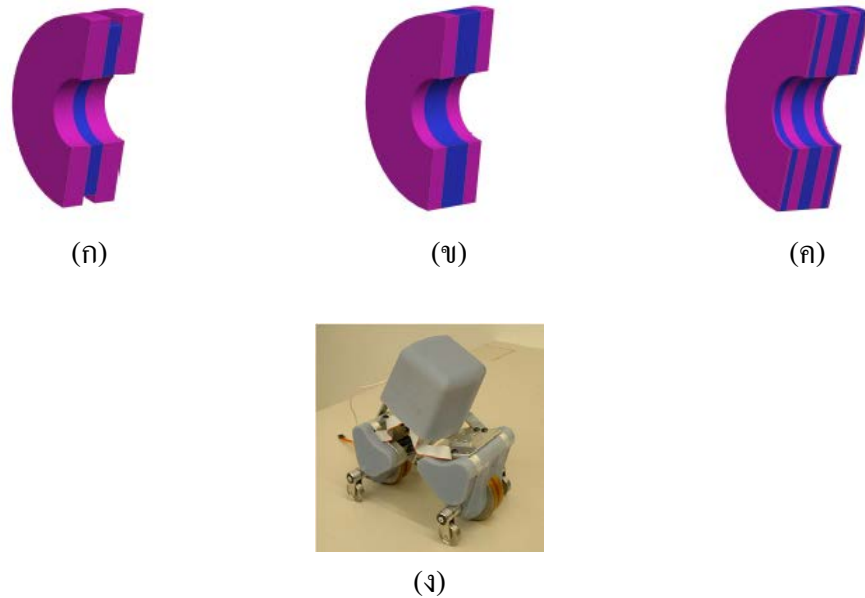


รูปที่ 2.10 การจำลองสถานการณ์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติ (ก) ล้อแม่เหล็กแบบปกติ (Convention configuration) [25] (ข) ล้อแม่เหล็กแบบหลายชั้น (Multi-layer configuration) ที่มีทิศแมกเนไทเซชันตรงข้ามกัน [25]

ตารางที่ 2.1 ค่าแรงยึดเกาะที่วัดได้และจากการจำลองสถานการณ์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติของล้อดั้งเดิมและล้อที่ประกอบจากแม่เหล็กหลายชั้น [25]

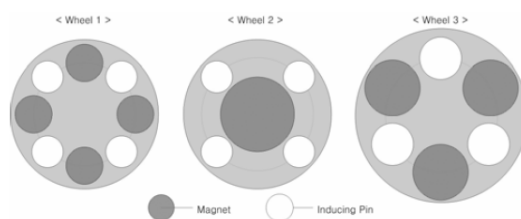
Adhesion force in N	Simulations	Measures
Conventional configuration	12.60	11.5
Multi-layer with inverted poles	27.53	24.5

จากนั้นคณะผู้วิจัยได้นำแนวทางการออกแบบไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบล้อแม่เหล็กให้กับหุ่นยนต์ MagneBike ภายใต้ข้อจำกัดของความหนาและเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกล้อ จากล้อแม่เหล็กเดิม อีกทั้งการออกแบบได้คำนึงถึงผลกระทบของการติดตั้งและพื้นผิวสัมผัสที่เป็นแผ่นเรียบ (Plate) และเป็นมุม (Corner) ซึ่งได้มีการเปรียบเทียบล้อแม่เหล็กหลายแบบได้แก่ ล้อแม่เหล็กที่มีอยู่เดิมของหุ่น MagneBike (Initial MagneBike wheel) ดังรูปที่ 2.11 (ก) ล้อแม่เหล็กที่ทำการปรับปรุง (Improved wheel) ดังรูปที่ 2.11 (ข) และล้อแม่เหล็กหลายชั้นที่มีทิศของ Magnetization ตรงข้ามกัน (Multi-layer inverted wheel) ดังรูปที่ 2.11 (ค) ซึ่งทำการคำนวณค่าแรงยึดเกาะจากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์บนโปรแกรม COMSOL และเปรียบเทียบกับค่าแรงยึดเกาะที่วัดได้จริงพบว่า ล้อแม่เหล็กที่ทำการปรับปรุงซึ่งได้จากการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดตามรูปแบบในรูปที่ 2.11 (ข) ให้ค่าแรงยึดเกาะสูงสุดและมีประสิทธิภาพมากที่สุด

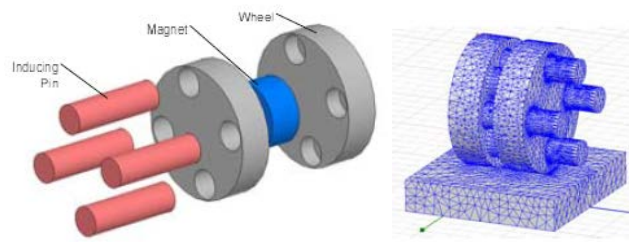


รูปที่ 2.11 (ก) ล้อแม่เหล็กที่มีอยู่เดิมของหุ่นยนต์ MagneBike (Initial MagneBike wheel) [25] (ข) ล้อแม่เหล็กที่เหมาะสมที่สุด (Optimized wheel) [25] (ค) ล้อแม่เหล็กหลายชั้น (Multi-layer wheel) [25] (ง) หุ่นยนต์ MagneBike [25]

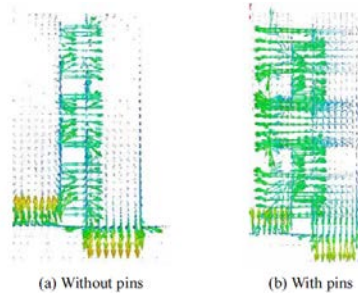
2) Han และคณะ [24] ได้ทำการออกแบบล้อแม่เหล็กโดยใช้หมุดเหนี่ยวนำ (Induction pin) ทำให้เกิดการกลับทิศทางของฟลักซ์แม่เหล็กเพื่อให้แรงที่ใช้ในการนำล้อแม่เหล็กออกจากผิวสัมผัสมีค่าน้อยลง คณะผู้วิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์แรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กจากล้อแม่เหล็กซึ่งมีความแตกต่างแม่เหล็กและหมุดเหนี่ยวนำในแง่ของจำนวนและขนาด รวมทั้งขนาดของกระทะล้อดังรูปที่ 2.12 และตารางที่ 2.2 (ก) คณะผู้วิจัยได้หาค่าแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กโดยการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MAXWELL ซึ่งแบบจำลอง 3 มิติและ mesh แสดงดังรูปที่ 2.13 (ก) และสนามแม่เหล็กของล้อแม่เหล็กที่มีหมุดเหนี่ยวนำและไม่มีหมุดเหนี่ยวนำแสดงในรูปที่ 2.13 (ข) อีกทั้งคณะผู้วิจัยได้ทำการสร้างล้อแม่เหล็กขึ้นและทำการวัดค่าแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กโดยใช้ Load cell พบว่า หมุดเหนี่ยวนำทำให้แรงยึดเกาะลดลงและเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองและผลจากการจำลองสถานการณ์พบว่า แรงยึดเกาะที่ได้จากทั้งสองแนวทางมีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงในตารางที่ 2.2 (ข)



รูปที่ 2.12 ล้อแม่เหล็กรูปแบบต่างๆซึ่งถูกทำการศึกษาและวิเคราะห์ [24]



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.13 (ก) แบบจำลอง 3 มิติของล้อแม่เหล็ก และ Mesh ของล้อแม่เหล็กและพิวสั่มผัส [24]
 (ข) เวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กของล้อแม่เหล็กที่มีหมุดเหนี่ยวนำและไม่มีหมุดเหนี่ยวนำ [24]

ตารางที่ 2.2 ก ข้อมูลของล้อแม่เหล็กแบบต่างๆที่ทำการศึกษาและวิเคราะห์ [24]

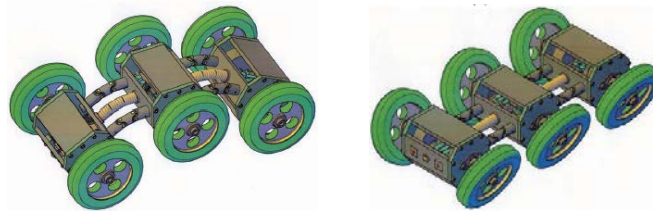
Wheel type		Magnet	Wheel	Pin
Wheel (1)	Diameter	10 mm	40 mm	9 mm
	Length	10 mm	10 mm	30 mm
	Number	4	2	4
Wheel (2)	Diameter	20 mm	40 mm	9 mm
	Length	10 mm	10 mm	30 mm
	Number	1	2	4
Wheel (3)	Diameter	15 mm	50 mm	11 mm
	Length	10 mm	10 mm	30 mm
	Number	3	2	4

ตารางที่ 2.2 ข แรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กที่ได้จากการจำลองสถานการณ์และการทดลอง [24]

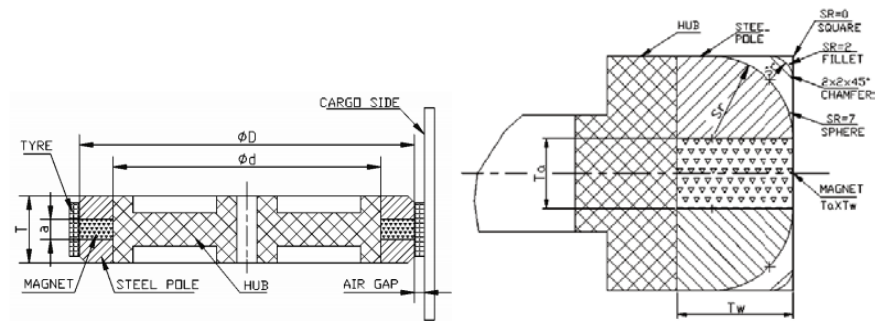
Wheel type		FEA	Experiment
Wheel (1)	w/o pin	78 N	72 N
	w/ pin	15 N	13 N
	ratio	0.19	0.18
Wheel (2)	w/o pin	99 N	76 N
	w/ pin	16 N	13 N
	ratio	0.16	0.17
Wheel (3)	w/o pin	297 N	282 N
	w/ pin	124 N	103 N
	ratio	0.42	0.36

- 3) Zhang และคณะ [18] ได้นำเสนอการออกแบบล้อแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ที่มีข้อต่อที่ยืดหยุ่น (Flexible joint) ซึ่งเหมาะสำหรับการไต่ผนังและเพดานโดยหุ่นยนต์ถูกนำไปใช้ตรวจตู้คอนเทนเนอร์ซึ่งโครงสร้างของหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็กที่มีข้อต่อยืดหยุ่นและรูปแบบของล้อแม่เหล็กที่ทำการออกแบบเบื้องต้นถูกแสดงในรูปที่ 2.14 (ก) และ 2.14 (ข) ตามลำดับ การคำนวณแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กกระทำโดยการจำลองสถานการณ์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์บนโปรแกรม ANSYS ภายใต้ความแตกต่างของตัวแปรหรือพารามิเตอร์ได้แก่ รูปแบบของขอบล้อ ขนาดของแม่เหล็ก ยางหุ้มล้อ และลักษณะของผิวสัมผัส ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ รูปแบบที่แตกต่างกันของขอบล้อ 4 แบบคือ Square Fillet Chamfer และ Sphere ถูกแสดงในรูปที่ 2.14 (ค) สำหรับความหนาของยางหุ้มล้อซึ่งจะถูกพิจารณาเป็นช่องว่างอากาศ (Air gap) ที่แตกต่างกัน ในส่วนของขนาดของแม่เหล็กวงแหวนถูกกำหนดโดยความหนาตามแนวแกน (Axial thickness) และความหนาของวงแหวน (Radial wall thickness) และลักษณะของพื้นผิวที่สัมผัสที่แตกต่างกันทั้งแผ่นเรียบและผิวสัมผัสที่ทำมุมกัน 120° ความสัมพันธ์ของตัวแปรหรือพารามิเตอร์ต่างๆเหล่านี้ต่อแรงแม่เหล็กได้ถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับล้อแม่เหล็ก รูปที่ 2.15 (ก) แสดงการสร้างแบบจำลองของล้อแม่เหล็กที่สัมผัสกับผิวสัมผัส และผลการคำนวณแรงแม่เหล็กของล้อแม่เหล็กที่สัมผัสกับผิวสัมผัสแบบเรียบและผิวสัมผัสที่ทำมุมกัน 120° ที่ช่องว่างอากาศต่างๆถูกแสดงในรูปที่ 2.15 (ข) และ 2.15 (ค) เมื่อได้รูปแบบของขอบล้อที่เหมาะสมแล้วคณะผู้วิจัยได้ทำ

การหาขนาดของแม่เหล็กและยางหุ้มล้อที่เหมาะสม รูปที่ 2.16 แสดงรูปแบบล้อแม่เหล็กที่เหมาะสมที่สุด ใน [19] Zhnag และคณะได้นำเสนอต้นแบบของหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็กที่มีข้อต่อยืดหยุ่น



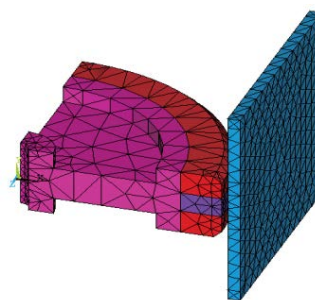
(ก)



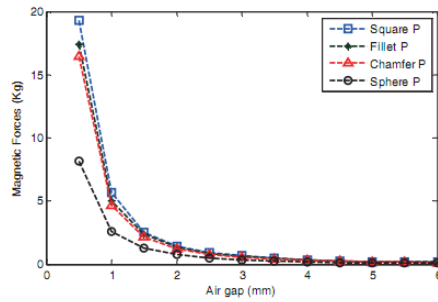
(ข)

(ค)

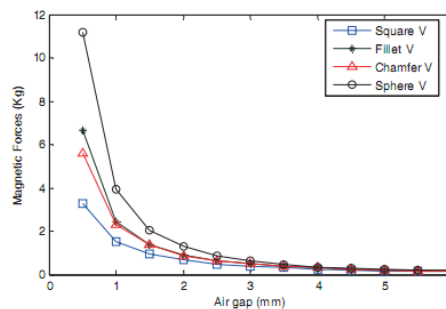
รูปที่ 2.14 (ก) ฐาน (Platform) ของหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็กที่มีข้อต่อยืดหยุ่น [18] (ข) รูปแบบของล้อแม่เหล็กที่ทำการออกแบบในเบื้องต้น [18] (ค) รูปแบบของขอบล้อที่แตกต่างกัน [18]



(ก)

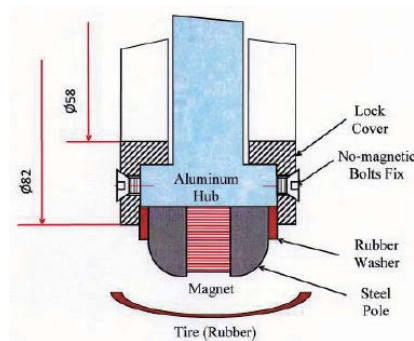


(ข)



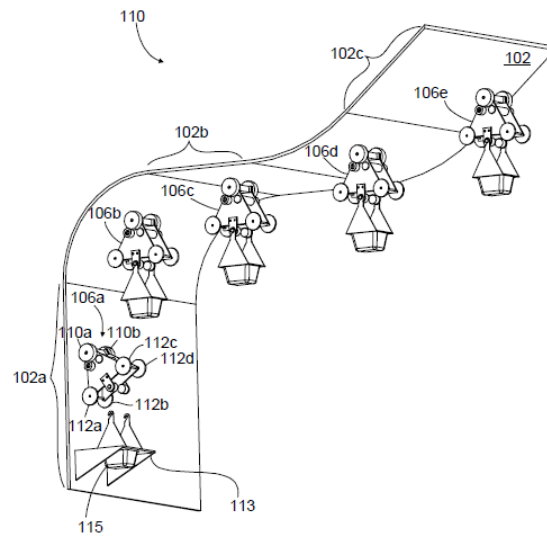
(ค)

รูปที่ 2.15 (ก) การสร้างแบบจำลองของล้อแม่เหล็ก [18] (ข) ค่าแรงแม่เหล็กของขอบล้อแม่เหล็ก รูปแบบต่างๆที่สัมผัสกับผิวสัมผัสเรียบ [18] (ค) ค่าแรงแม่เหล็กของขอบล้อแม่เหล็ก รูปแบบต่างๆที่สัมผัสกับผิวสัมผัสที่ทำมุมกัน 120° [18]

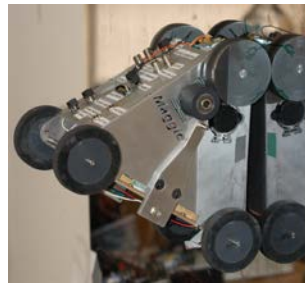


รูปที่ 2.16 รูปแบบล้อแม่เหล็กที่เหมาะสมที่สุดซึ่งแสดงองค์ประกอบต่างๆ [18]

4) Slocum และคณะ [36] ได้ออกแบบหุ่นยนต์ Magnebot ที่เคลื่อนที่เหนือศีรษะโดยใช้ล้อแม่เหล็กซึ่งมีแนวคิดดังรูปที่ 2.17 แรงยึดเกาะจากล้อแม่เหล็กได้ถูกคำนวณโดยสมการที่ได้นำเสนอไปแล้วในสมการที่ (2-2) พบว่า ค่าแรงที่คำนวณได้ของล้อแม่เหล็กแต่ละล้อมีค่าเท่ากับ 682 N และค่าแรงที่ได้จากการวัดมีค่าเท่ากับ 620 N ซึ่งหุ่นยนต์ขั้นต้นแบบแสดงดังรูปที่ 2.18 ข้อมูลเกี่ยวกับหุ่นยนต์ Magnebot ได้ที่ถูกรนำเสนอ โดย Slocum และคณะในเอกสารอ้างอิง [37] อีกด้วย



รูปที่ 2.17 แนวคิดของหุ่นยนต์ Magnebot ซึ่งสามารถเคลื่อนที่บนเพดานและผนังซึ่งเป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกได้ [36]



รูปที่ 2.18 ต้นแบบของหุ่นยนต์ Magnebot ซึ่งติดตั้งล้อแม่เหล็ก [36]

2.2 ประเภทของล้อแม่เหล็ก

จากการสำรวจเอกสารและจากข้อมูลซึ่งนำเสนอโดย Hutter [29] Tâche [17] และ Tâche และคณะ [16] พบว่า ล้อแม่เหล็กที่ใช้แม่เหล็กถาวร (Permanent magnet) สำหรับหุ่นยนต์ไต่ผนังสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทคือ

- 1) ล้อแม่เหล็กที่สร้างขึ้นจากแม่เหล็กรูปทรงแบบจาน (Magnetic wheel with permanent magnet disk) ซึ่งได้ให้คำจำกัดความโดย Hutter [29]) โดยทั่วไปล้อแม่เหล็กชนิดนี้มีโครงสร้างและฟลักซ์แม่เหล็กดังรูปที่ 2.19 ซึ่งประกอบด้วยแม่เหล็กรูปร่างวงแหวน (Magnetic ring) และแผ่นจานเหล็ก (Steel disk) สำหรับแม่เหล็กที่บรรจุภายในล้อนอกจากมีลักษณะเป็นวงแหวน และอาจรวมถึงการใช้แม่เหล็กทรงกระบอก(ซึ่งก็สามารถพิจารณาเป็น Disk ที่มีความหนาแน่น) ขึ้นใหญ่จำนวน 1 ชิ้นหรือมากกว่า 1 ชิ้นมาเรียงซ้อนกัน เช่น งานวิจัยของ Fisher และคณะ [1] งานวิจัยของ Rochat และคณะ [25] งานวิจัยของ Yukawa และคณะ[28] เป็นต้น

หลักการงานซึ่งกล่าวโดย Hutter [29] คือ ฟลักซ์แม่เหล็กจะถูกสร้างขึ้นจากการใช้แม่เหล็กวงแหวนขนาดใหญ่ โดยฟลักซ์แม่เหล็กจะไหลผ่านแผ่นจานโลหะ (Steel disk) ซึ่งเป็นกระทะล้อด้านหนึ่งไปสู่กระทะล้ออีกด้านหนึ่งผ่านพื้นผิวสัมผัสที่เป็นโลหะดังรูปที่ 2.19 ทำให้เกิดแรงแม่เหล็กระหว่างพื้นผิวและล้อแม่เหล็ก

- 2) ล้อแม่เหล็กที่สร้างจากแม่เหล็กถาวรหลายชิ้นนำมาจัดเรียงในเมทริกซ์ (Magnetic wheel with several small permanent magnets in a matrix) ซึ่งได้ให้คำจำกัดความโดย Hutter [29]) ดังรูปที่ 2.20 แม่เหล็กขนาดเล็กจำนวนหลายชิ้นจะถูกนำมาประกอบกับโครงสร้างของล้อที่ทำจากวัสดุต่างๆ เช่น งานวิจัยของ Fernandez และคณะ [11] และ [12] และอาจรวมไปถึงการใช้แม่เหล็กทรงกระบอกบรรจุในล้อแม่เหล็กบางรูปแบบ เช่น งานของ Han และคณะ [24]

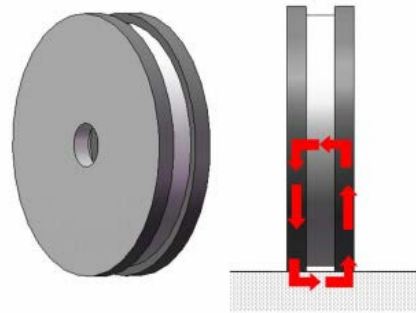
หลักการงานตามที่กล่าวไว้โดย Hutter [29] คือฟลักซ์แม่เหล็กจะถูกสร้างขึ้นจากการใช้แม่เหล็กขนาดเล็กหลายชิ้นที่ฝังอยู่ที่ล้อและมีการไหลของฟลักซ์แม่เหล็กจากกระทะล้อด้านหนึ่งไปสู่กระทะล้ออีกด้านหนึ่งโดยผ่านพื้นผิวสัมผัสที่เป็นโลหะดังรูปที่ 2.20

ยิ่งไปกว่านั้น Fernandez และคณะ [11] และ [12] และ Hutter [29] ได้กล่าวถึงจุดเด่นของล้อแม่เหล็กประเภทนี้คือขนาดของแม่เหล็กไม่เป็นข้อจำกัดสำหรับการสร้างล้อแม่เหล็กขนาดใหญ่ อีกทั้งสามารถลดน้ำหนักของล้อแม่เหล็กลงได้เนื่องจากล้อแม่เหล็กถูกบรรจุด้วยแม่เหล็กขนาดเล็ก

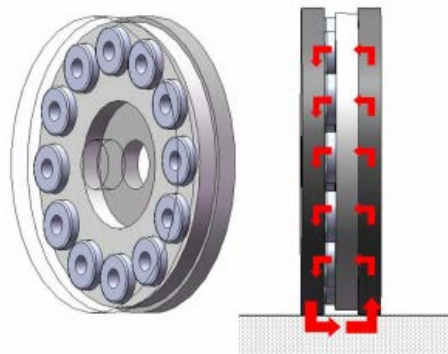
แทนการใช้แม่เหล็กขึ้นขนาดใหญ่ซึ่งมีน้ำหนักมากกว่าสิ่งที่ได้กล่าวถึง โดย Fernandez และคณะ [12] และ Hutter [29]

3) ล้อแม่เหล็กแบบอื่นๆ

ล้อแม่เหล็กหรือระบบล้อแม่เหล็กที่มีความซับซ้อนขึ้นซึ่งได้รวบรวมและปรากฏในงานวิจัยหลายชิ้น เช่น Hutter [29] Täche และคณะ [16] และ Täche [17] ซึ่งมีหลายรูปแบบ เช่น ระบบล้อภายในล้อ (Wheel in wheel system) ระบบหลายล้อภายในล้อ (Multiple wheel in wheel system) ระบบล้อแบบสกรูน็อต (Screw nut wheel system) ระบบล้อภายในล้อแบบขนาน (Wheel parallel to wheel system) และระบบล้อแอคทีฟ (Active) ที่มีกลไกยกตัว (Active arm lifter system) เป็นต้น ตัวอย่างของล้อแม่เหล็กเหล่านี้สามารถพบและค้นคว้าเพิ่มเติมได้ในงานวิจัยที่มีมาก่อนดังเอกสารอ้างอิงต่างๆ เช่น [16] [17] [29] และ [30] เป็นต้น



รูปที่ 2.19 โครงสร้างของล้อแม่เหล็กชนิด Magnetic wheel with permanent magnet disk และฟลักซ์แม่เหล็ก [29]



รูปที่ 2.20 โครงสร้างของล้อแม่เหล็กชนิด Magnetic wheel with several small permanent magnets in a matrix และฟลักซ์แม่เหล็ก [29]

บทที่ 3 วิธีการวิจัย

3.1 ภาพรวมของระบบ

จากการสำรวจเอกสารในบทที่ 2 แสดงให้เห็นว่าคณะผู้วิจัยหลายคนได้ทำการจำลองสถานการณ์ (Simulation) ด้วยวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์และการทดลองในการหาค่าแรงยึดเกาะของลื้อแม่เหล็กภายใต้การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆ สำหรับการจำลองสถานการณ์ด้วยวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์มีข้อดีหลายประการ เช่น การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของลื้อแม่เหล็กและผิวสัมผัสที่ทำการศึกษากะทำได้ง่ายและรวดเร็ว อีกทั้งทำให้เกิดความเข้าใจการกระจายตัวของฟลักซ์แม่เหล็กได้อย่างชัดเจน ดังจะเห็นได้จากเอกสารอ้างอิงที่ [18] และ [25] เป็นต้น ดังนั้นการหาค่าแรงยึดเกาะจากแนวทางทั้งสองควบคู่กันในการศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรต่างๆต่อแรงยึดเกาะของลื้อแม่เหล็กจึงเป็นการดำเนินการที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามข้อมูลคุณสมบัติแม่เหล็กของแม่เหล็กและเหล็กของกระทะลื้อและผิวสัมผัสไม่สามารถระบุได้อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นข้อมูลต้องใช้ในการจำลองสถานการณ์ด้วยวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์ ทำให้การศึกษาและวิเคราะห์ในงานวิจัยชิ้นนี้จึงกระทำโดยการทดลองเพียงอย่างเดียว

ภาพรวมของการศึกษาและวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 โดยที่การศึกษาวิเคราะห์จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ 1) การศึกษาและวิเคราะห์แรงยึดเกาะของลื้อแม่เหล็กที่มีพารามิเตอร์ของลื้อแม่เหล็กแตกต่างกันแบบสถิติศาสตร์กระทำโดยการวัดค่าแรงยึดเกาะของลื้อแม่เหล็ก และ 2) การศึกษาและวิเคราะห์แรงยึดเกาะและแรงเสียดทานของลื้อแม่เหล็กที่ติดตั้งบนหุ่นยนต์ที่ส่งผลต่อความสามารถในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กระทำโดยการทดสอบความสามารถในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ลื้อแม่เหล็กบนผนัง



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงภาพรวมของระบบ

3.2 ตัวแปรอิสระ (Independent Variables) และตัวแปรตาม (Dependent Variables)

3.2.1 ตัวแปรอิสระ (Independent Variables)

จากข้อมูลเชิงทฤษฎีตามสมการที่ (2-1) (2-2) และ (2-3) ในบทที่ 2 ปัจจัยหรือพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแรงยึดเกาะและแรงเสียดทานของล้อยแม่เหล็กดังปรากฏงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น [1] [11] [12] [18] [19] [24] [25] [26] [28] [31] และ [36] จะถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลในการเลือกและจำแนกตัวแปรเพื่อพิจารณาเป็นตัวแปรอิสระและออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเหล่านั้นต่อแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็ก และผลของแรงยึดเกาะแรงเสียดทานของล้อยแม่เหล็กซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการเคลื่อนที่แนวคิงของหุ่นยนต์ใต้น้ำในขอบเขตที่สนใจ

ตัวแปรอิสระหรือปัจจัยซึ่งมีผลกระทบต่อแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กนั้นประกอบด้วยกลุ่มตัวแปร 3 กลุ่มหลักได้แก่ 1) กลุ่มตัวแปรที่อธิบายคุณลักษณะล้อยแม่เหล็ก 2) กลุ่มตัวแปรของที่อธิบายคุณลักษณะของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ล้อยแม่เหล็ก 3) กลุ่มตัวแปรที่อธิบายคุณลักษณะของพื้นผิววัสดุเฟอร์โรแมกเนติก ซึ่งตัวแปรที่สนใจสามารถจำแนกและสรุปได้ดังต่อไปนี้

1) กลุ่มตัวแปรที่อธิบายคุณลักษณะล้อยแม่เหล็ก

พารามิเตอร์ของล้อยแม่เหล็กซึ่งบรรจุแม่เหล็กตระกูล Neodymium-iron-boron ขนาดเล็กหลายชิ้นที่ถูกนำมาพิจารณาเป็นตัวแปรอิสระในการศึกษาและวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

- 1.1) ความหนากระดะล้อยมีหน่วย mm ที่แตกต่างกัน 4 ค่า กำหนดโดยตัวแปร tr ซึ่งถูกแสดงได้ดังนี้

$$tr = \{3, 5, 7, 9\}$$

- 1.2) ความหนาขอบล้อยที่เพิ่มเติมจากความหนากระดะล้อยปกติที่ 3 mm ที่แตกต่างกัน 4 ค่ากำหนดโดยตัวแปร tre มีหน่วย mm เป็นความหนาของขอบกระดะล้อยเพิ่มเติมจากความหนาขอบล้อยปกติที่ $tr = 3$ mm แต่ละค่าจะทำให้กระดะล้อยที่มีขอบเพิ่มเติมมีความหนารวมที่บริเวณขอบกระดะล้อยเท่ากับความหนาของกระดะล้อยปกติหนา 3 mm 5 mm 7 mm และ 9 mm ตามลำดับ ยกตัวอย่างเช่น ความหนาขอบกระดะล้อยที่เพิ่มเติมเท่ากับ 2 mm ($tre = 2$ mm) จะมีความหนารวมที่ขอบกระดะล้อย เท่ากับ 5 mm ซึ่งตัวแปร tre ค่าถูกแสดงได้ดังนี้

$$tre = \{0, 2, 4, 6\}$$

- 1.3) จำนวนแท่งแม่เหล็กที่แตกต่างกัน 3 ค่า กำหนดโดยตัวแปร NM ซึ่งถูกแสดงได้ดังนี้

$$NM = \{30, 52, 66\}$$

1.4) ยางล้อสามารถจำแนกตามการมีอยู่และชนิดของยางล้อซึ่งแบ่งเป็น 3 กรณีได้แก่ ไม่มียางล้อ แทนด้วย *no tire* ยางล้อชนิดยางธรรมชาติ (Natural rubber) แทนด้วย *NR* และยางล้อชนิดยางซิลิโคน (Silicone rubber) แทนด้วย *SR* ซึ่งกำหนดโดยตัวแปร *tire* และถูกแสดงได้ดังนี้

$$tire = \{no\ tire, NR, SR\}$$

1.5) กลุ่มตัวแปรที่อธิบายคุณลักษณะของล้อแม่เหล็กสองล้อบนเพลลาเดียวกัน

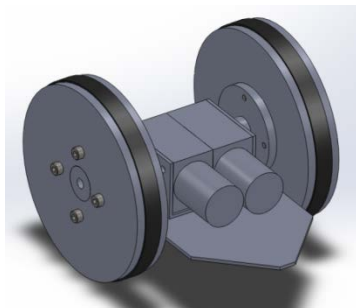
1.5.1) ระยะห่างระหว่างล้อแม่เหล็กทั้งสองตามแนวแกนเพลลา (Axial Distance) มีหน่วย mm ซึ่งแตกต่างกัน 7 ค่ากำหนดโดยตัวแปร *L* ซึ่งถูกแสดงได้ดังนี้

$$L = \{0, 3, 10, 30, 40, 70, 100\}$$

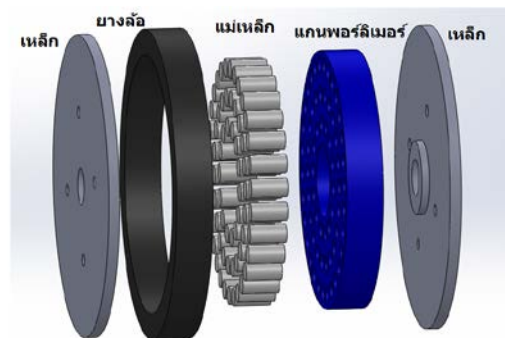
1.5.2) ทิศทางของขั้วแม่เหล็กของล้อแม่เหล็กสองล้อ (Polarity or Magnetization Direction) เมื่อขั้วแม่เหล็กของล้อแม่เหล็กทั้งสองล้อที่หันเข้าหากันเหมือนกันต่าง (*Same*) และต่างกัน (*Different*) กำหนดโดยตัวแปร *P* ซึ่งถูกแสดงได้ดังนี้

$$P = \{Same, Different\}$$

รูปแบบของหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็กและองค์ประกอบของล้อแม่เหล็กที่ใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 (ก) และ 3.2 (ข) ตามลำดับ การนำเสนอองค์ประกอบของล้อแม่เหล็กในรูปที่ 3.2 (ข) นั้นเป็นไปในรูปแบบเดียวกับเอกสารอ้างอิง [11] โดย Fernandez และคณะ



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.2 (ก) รูปแบบของหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็ก (ข) องค์ประกอบล้อแม่เหล็ก [11] ที่ใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์

2) กลุ่มตัวแปรที่อธิบายคุณลักษณะของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็กหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่นั่นคือล้อแม่เหล็กทั้งล้อซ้ายและขวาหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมเท่ากัน ซึ่งพารามิเตอร์ที่ถูกนำมาพิจารณาเป็นตัวแปรอิสระในการศึกษาและวิเคราะห์คือทิศทางการเคลื่อนที่หุ่นยนต์ได้ผนังซึ่งกำหนดโดยตัวแปร *dir* ซึ่งถูกแสดงได้ดังนี้

$$dir = \{-y, +y\},$$

เมื่อ $+y$ คือ ทิศทางการเคลื่อนที่ในแนวตั้งขาขึ้น (Upward vertical direction) ของหุ่นยนต์

และ $-y$ คือ ทิศทางการเคลื่อนที่ในแนวตั้งขาลง (Downward vertical direction) ของหุ่นยนต์

3) กลุ่มตัวแปรที่อธิบายคุณลักษณะของพื้นผิววัสดุเฟอร์โรแมกเนติก

พารามิเตอร์ที่ถูกนำมาพิจารณาเป็นตัวแปรอิสระในการศึกษาและวิเคราะห์คือลักษณะของพื้นผิวสัมผัสที่แตกต่างกัน 2 ชนิดกำหนดโดยตัวแปร S ซึ่งถูกแสดงได้ดังนี้

$$S = \{S_1, S_2\}$$

เมื่อ S_1 คือ ผนังทดสอบทำจากเหล็กหนา 10 mm และ S_2 คือ ผนังทดสอบทำจากเหล็กหนา 10 mm ที่มีการปิดทับด้วยรูปลอก (Sticker)

3.2.2 ตัวแปรตาม (Dependent Variables)

ตัวแปรตามที่น่าสนใจสามารถแบ่งได้สองส่วน ในส่วนแรก ตัวแปรตามที่น่าสนใจคือแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กกำหนดโดยตัวแปร F_m ซึ่งเป็นแรงแม่เหล็กที่เป็นแรงดึงดูดระหว่างล้อยแม่เหล็กเดี่ยวและพื้นผิววัสดุเฟอร์โรแมกเนติก [36] ในที่นี้คือแผ่นเหล็กเรียบ โดยที่ F_m ถูกพิจารณาลักษณะเดียวกับแรงแม่เหล็กในสมการที่ (2-1) และสมการที่ (2-2) สำหรับล้อยแม่เหล็กเดี่ยว ในกรณีแรงยึดเกาะรวมของล้อยแม่เหล็กคู่หรือสองล้อยบนเพลาดียวกันจะถูกกำหนดโดยตัวแปร F_{mT} ในส่วนที่สองเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ความสามารถในการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของหุ่นยนต์ซึ่งตัวแปรตามคือ ความสามารถในการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งบนผนังของหุ่นยนต์ล้อยแม่เหล็ก (Static adhesion) กำหนดโดยตัวแปร Ad และความสามารถในการไต่บนผนังของหุ่นยนต์ล้อยแม่เหล็ก (Climbing ability) กำหนดโดยตัวแปร Cl

3.3 ชิ้นงานและอุปกรณ์การทดลอง

3.3.1 ล้อยแม่เหล็กและองค์ประกอบของล้อยแม่เหล็ก

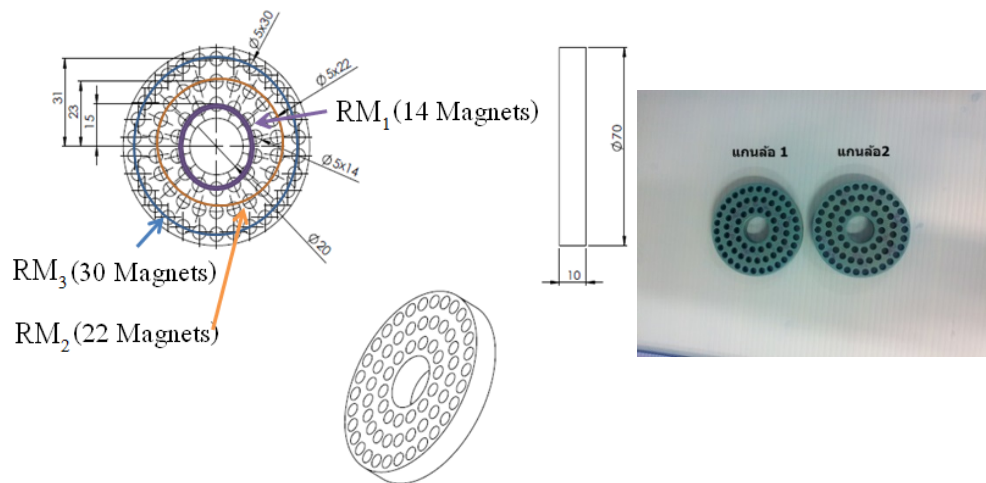
ล้อยแม่เหล็กจะบรรจุแม่เหล็กขนาดเล็กหลายชิ้นถูกสร้างขึ้น โดยมีพารามิเตอร์ที่สอดคล้องกับกลุ่มตัวแปรอิสระที่สนใจดังรูปที่ 3.2 ล้อยแม่เหล็กประกอบไปด้วย 1) แม่เหล็กทรงกระบอกชนิด Neodymium Boron เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm มีความยาว 10 mm ดังรูปที่ 3.3 (ก) 2) แกนล้อยที่ทำจากโพลีเมอร์ดังรูปที่ 3.3 (ข) ซึ่งสามารถบรรจุแม่เหล็กจำนวนแตกต่างกันดังรูปที่ 3.3 (ค) 3) กระทะล้อยแม่เหล็กสองชนิดได้ถูกสร้างขึ้นจากเหล็กวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกเท่ากับ 10 mm และ 82 mm ตามลำดับ โดยกระทะล้อยชนิดแรกสำหรับความหนาของกระทะล้อย (tr) มีค่าเท่ากับ 3 mm 5 mm 7 mm และ 9 mm และตัวอย่างกระทะล้อยที่ $tr = 3$ mm แสดงดังรูปที่ 3.4 (ก) และกระทะล้อยชนิดที่สองจะเป็นกระทะล้อยที่มีความหนาเพิ่มเติมที่ชอบ (tre) มีค่าเท่ากับ 2 mm 4 mm และ 6 mm จาก

กระทะลื้อปกติที่มี $tr = 3\text{mm}$ และตัวอย่างกระทะลื้อที่ $tre = 2\text{mm}$ ดังรูปที่ 3.4 (ข) 4) ยางลื้อ (*tire*) ทำจากยางธรรมชาติ (Natural rubber) และยางซิลิโคน (Silicone rubber) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกเท่ากับ 69 mm และ 83 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และยางลื้อแต่ละชนิดมีความแข็งที่ต่างกัน โดยยางลื้อที่ทำจากยางธรรมชาติมีความแข็งโดยประมาณอยู่ในช่วง 40-50 Shore ขณะที่ยางลื้อที่ทำจากยางซิลิโคนมีความแข็งโดยประมาณอยู่ในช่วง 20-30 Shore มวลเฉลี่ยของกระทะลื้อและองค์ประกอบลื้อแม่เหล็กอื่นๆแต่ละชิ้นแสดงในตารางที่ 3.1 ก และตารางที่ 3.1 ข ตามลำดับ

ตัวอย่างของลื้อแม่เหล็กที่ติดตั้งกระทะลื้อปกติที่ความหนากระทะลื้อ (tr) มีค่าเท่ากับ 3 mm และติดตั้งกระทะลื้อที่มีขอบเพิ่มเติมมีความหนา (tre) เท่ากับ 2 mm ทั้งที่มีและไม่มีติดตั้งยางลื้อแสดงดังรูปที่ 3.6



(ก)



(ข)



NM=30



NM=52



NM=66

(ค)

รูปที่ 3.3 (ก) แม่เหล็กทรงกระบอก (ข) แกนลื้อทำจากพอลิเมอร์ (ค) ตำแหน่งและจำนวนแท่งแม่เหล็กที่บรรจุภายในลื้อแม่เหล็กที่แตกต่างกัน



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างล้อแม่เหล็ก : (ก) กระดาษล้อปกติ (ข) กระดาษล้อที่มีขอบเพิ่มเติม (ค) กระดาษล้อปกติ และยางล้อชนิดซิลิโคน (ง) กระดาษล้อที่มีขอบเพิ่มเติมและยางล้อชนิดยางซิลิโคน

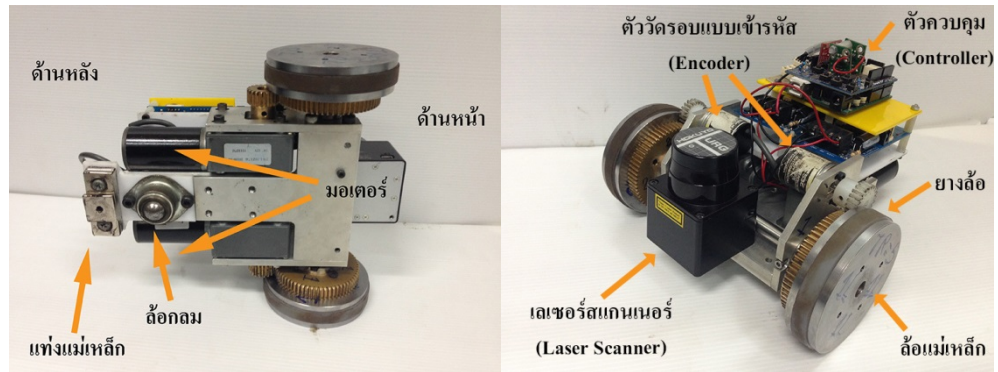
3.3.2 หุ่นยนต์ทดสอบ

หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบสองล้อ (Two-wheeled mobile robot) ได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นแท่นทดสอบ สำหรับการศึกษาระบบและวิเคราะห์แรงยึดเกาะและแรงเสียดทานของล้อแม่เหล็กต่อความสามารถในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ภายใต้ผลกระทบจากตัวแปรอิสระที่อธิบายคุณลักษณะของล้อแม่เหล็ก การเคลื่อนที่ และผิวสัมผัส โดยล้อแม่เหล็กสองล้อจะถูกติดตั้งกับหุ่นยนต์เพื่อทำการทดสอบ ในส่วนของ ล้อทรงกลม (Ball wheel) ได้ถูกติดตั้งไว้ที่ลำตัวของหุ่นยนต์เพื่อเพิ่มเสถียรภาพให้กับหุ่นยนต์ อีกทั้งหุ่นยนต์จะได้รับการติดตั้งแท่งแม่เหล็กบน โครงสร้างไว้ที่ลำตัวของหุ่นยนต์เพื่อเพิ่มแรงยึดเกาะ

องค์ประกอบของอุปกรณ์ทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญของหุ่นยนต์ทดสอบมีดังต่อไปนี้
 1) มอเตอร์กระแสตรง ขนาดความต่างศักย์ป้อนเข้า 12 V จำนวน 2 ตัว และมีรอบสูงสุดเท่ากับ 111 rpm
 2) ตัววัดรอบแบบเข้ารหัส (Encoder) จำนวน 2 ตัว แต่ละตัวมีจำนวนพัลส์ต่อรอบเท่ากับ 100
 3) บอร์ดควบคุมรุ่น (ATMEGA 168)
 4) บอร์ดวงจรสำหรับขับมอเตอร์ (Circuit driver board) ที่ กระแสสูงสุด 30 A โดยมีช่วงการทำงานของความต่างศักย์ตั้งแต่ 5.5 ถึง 36 V
 5) เลเซอร์สแกนเนอร์ (Laser scanner) รุ่น (URG-04LX-UG01) มี มวล 140.57 g

การควบคุมแบบ Proportional-Integral -Derivative (PID Controller) ได้ถูกออกแบบและใช้งาน ในส่วนควบคุม (Controller) ของหุ่นยนต์เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในระหว่างการทดสอบ

หุ่นยนต์และองค์ประกอบที่สำคัญต่างๆถูกแสดงดังรูปที่ 3.7 สำหรับมวลขององค์ประกอบต่างๆถูกแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.7 หุ่นยนต์และองค์ประกอบต่างๆ

ตารางที่ 3.1 ก มวลของกระทะล้อแบบต่าง ๆ

กระทะล้อ	มวลของกระทะล้อ			
	ล้อที่1ด้านซ้าย	ล้อที่1ด้านขวา	ล้อที่2ด้านซ้าย	ล้อที่2ด้านขวา
$tr = 3 \text{ mm}$	125.41 g	124.30 g	124.2 g	123.47 g
$tr = 5 \text{ mm}$	208.77 g	203.26 g	203.31 g	208.17 g
$tr = 7 \text{ mm}$	283.66 g	285.76 g	–	–
$tr = 9 \text{ mm}$	366.95 g	358.84 g	–	–
$tre = 2 \text{ mm}$	134.47 g	134.80 g	133.18 g	127.84 g
$tre = 4 \text{ mm}$	139.14 g	140.42 g	–	–
$tre = 6 \text{ mm}$	160.45 g	157.94 g	–	–

ตารางที่ 3.1 ข มวลขององค์ประกอบล้อแม่เหล็กได้แก่ ยางล้อ แกนล้อ และแม่เหล็ก

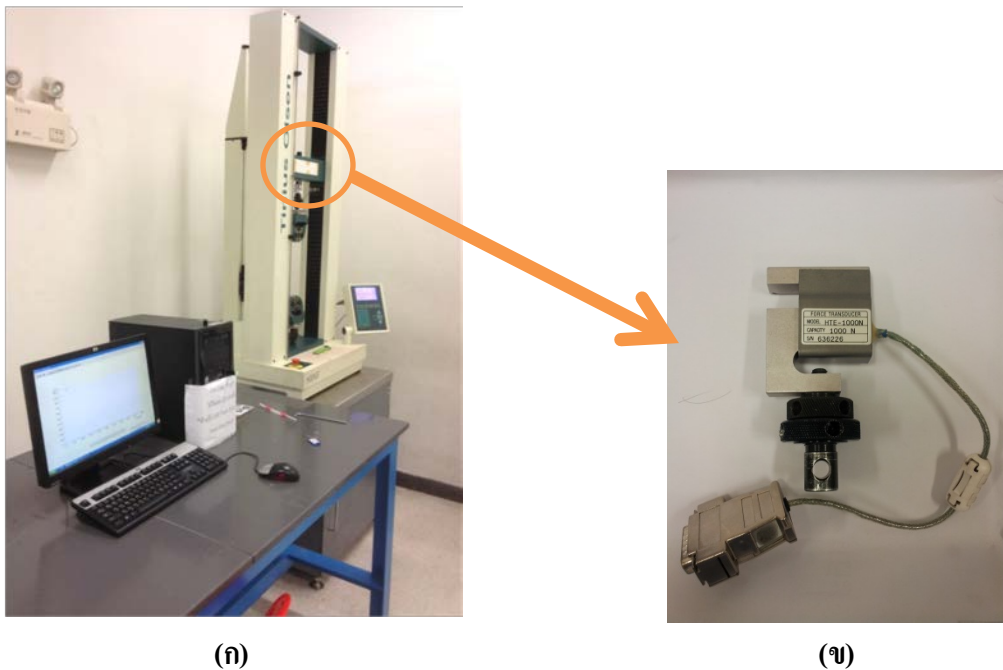
รายการ	มวล	
	ล้อที่1	ล้อที่2
ยางล้อ NR	17.95 g	17.65 g
ยางล้อ Silicone	17.50 g	17.51 g
แกนล้อ	26.44 g	26.42 g
แม่เหล็ก	1.41 g	

ตารางที่ 3.1 ค มวลของหุ่นยนต์และเลเซอร์สแกน

รายการ	มวล
หุ่นยนต์ไม่มีล้อแม่เหล็กและไม่ติดตั้งเลเซอร์สแกนเนอร์	2280.29 g
เลเซอร์สแกนเนอร์และสลักเกลียวที่ใช้ยึด	140.35g

3.3.3 เครื่องทดสอบแรงดึงเอนกประสงค์ (Universal Tensile Test)

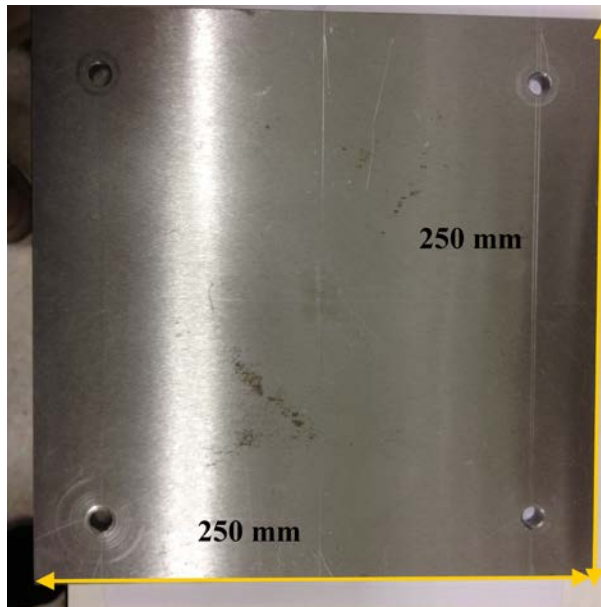
ในการวัดแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็ก เครื่องทดสอบแรงดึงเอนกประสงค์ (Universal tensile test) ได้ถูกดัดแปลงเพื่อวัดแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กภายใต้ผลกระทบจากตัวแปรอิสระที่อธิบายคุณลักษณะของล้อแม่เหล็กทั้งกรณีล้อแม่เหล็กเดี่ยวและกรณีล้อแม่เหล็กคู่ โดยแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กคือค่าแรงดึงสูงสุดที่ใช้ในการแยกล้อแม่เหล็กออกจากแผ่นเหล็ก สำหรับเครื่องทดสอบที่ใช้งานคือเครื่องยี่ห้อ TINUS OLSEN / รุ่น H50-KS (S/N 0529) โหลดเซลล์ (Load cell) คือ Force transducer / THE-1000N (S/N 636226) ซึ่งสามารถวัดแรงดึงสูงสุดได้ 1000 N ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 (ก) เครื่องทดสอบแรงดึงเอนกประสงค์ (ข) Load cell

3.3.4 แผ่นเหล็กเรียบ

แผ่นเหล็กเรียบซึ่งมีความหนา 10 mm ขนาดกว้าง 250 mm ยาว 250 mm โดยถูกนำมาติดตั้งกับเครื่องวัดแรงดึงเอนกประสงค์เพื่อวัดค่าแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กที่สัมผัสแผ่นเหล็กเรียบดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แผ่นเหล็กเรียบที่ใช้ในการทดสอบวัดค่าแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็ก

3.3.5 ผนังทดสอบ

ผนังทดสอบทำขึ้นจากแผ่นเหล็กซึ่งมีความหนา 10 mm ขนาด กว้าง 0.5 m ยาว 1.5 m วางตั้งฉากกับพื้นจะถูกนำมาใช้ทดสอบความสามารถในการยึดเกาะหยุดนิ่งและการไต่ขึ้นลงของหุ่นยนต์ล้อยแม่เหล็กบนผนังที่ทำจากวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ผนังทดสอบความสามารถในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

3.4 การทดลอง (Experiment)

การทดลองกระทำเพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรอิสระหรือพารามิเตอร์ดังกล่าวในหัวข้อ 3.2 ต่อแรงยึดเกาะล้อยแม่เหล็ก อีกทั้งเพื่อศึกษาและวิเคราะห์แรงยึดเกาะและแรงเสียดทานของล้อยแม่เหล็กที่ส่งผลต่อความสามารถในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่ติดตั้งล้อยแม่เหล็กภายใต้การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆ ซึ่งการทดลองสามารถแบ่งได้เป็นสองส่วนดังต่อไปนี้

1) การทดลองวัดค่าแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กแบบสถิต

การทดลองวัดค่าแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กในลักษณะสถิตกระทำโดยการวัดค่าแรงดึงที่ทำให้ล้อยแม่เหล็กทั้งล้อเดี่ยวและล้อคู่แยกออกจากพื้นผิวสัมผัสภายใต้ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรอิสระได้แก่ ความหนาของกระทะล้อและขอบกระทะล้อที่เพิ่มเติม จำนวนแท่งแม่เหล็ก ระยะห่างระหว่างล้อยแม่เหล็ก และทิศทางขั้วแม่เหล็กของล้อยแม่เหล็กสองล้อบนเพลลาเดียวกัน

2) การทดสอบความสามารถในการเคลื่อนที่บนผนังของหุ่นยนต์ที่ติดตั้งล้อยแม่เหล็ก

การทดสอบความสามารถในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่ติดตั้งล้อยแม่เหล็กประกอบด้วย การยึดเกาะขณะหยุดนิ่งและความสามารถในการไต่ขึ้นและลงของหุ่นยนต์บนผนังภายใต้ความแตกต่างของตัวแปรอิสระต่อไปนี้ได้แก่ ความหนากระทะล้อ จำนวนแท่งแม่เหล็ก การมีอยู่และชนิดของยางล้อ ลักษณะของผิวสัมผัส และทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ สำหรับการทดสอบผลกระทบจากลักษณะของผิวสัมผัสของผนังทดสอบกระทำเฉพาะกรณีการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งของหุ่นยนต์บนผนัง ในส่วนของการทดสอบผลกระทบจากความแตกต่างของทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กระทำการทดสอบเฉพาะกรณีความสามารถในการไต่ของหุ่นยนต์บนผนังทดสอบเท่านั้น

3.4.1 การทดลองวัดค่าแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กแบบสถิต

เพื่อทำการศึกษาผลกระทบของตัวแปรอิสระต่างๆที่สนใจต่อแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็ก การทดลองวัดค่าแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กแบบสถิตจึงถูกออกแบบและทำการทดลองซึ่งประกอบด้วย การทดลองย่อยสองการทดลองคือ 1) การทดลองวัดค่าแรงยึดเกาะแบบสถิตของล้อยแม่เหล็กเดี่ยวในหัวข้อที่ 3.4.1.1 2) การทดลองวัดค่าแรงยึดเกาะแบบสถิตของล้อยแม่เหล็กสองล้อบนเพลลาเดียวกัน ในหัวข้อที่ 3.4.1.2

3.4.1.1 การทดลองวัดค่าแรงยึดเกาะแบบสถิตของลื้อแม่เหล็กเดี่ยว

1. จุดประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลของจำนวนแท่งแม่เหล็กต่อแรงยึดเกาะของลื้อแม่เหล็ก
- 2) เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลของความหนาของกระทะลื้อแม่เหล็กและความหนาของขอบกระทะลื้อเพิ่มเติมต่อแรงยึดเกาะของลื้อแม่เหล็ก

2. วิธีการทดลอง

- 1) ทำการทดลองหาค่าแรงยึดเกาะ โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงเอนกประสงค์ (Universal tensile test) จากแรงที่ใช้ในการทำให้ลื้อแม่เหล็กแยกออกจากแผ่นเหล็กเรียบที่มีความหนา 10 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.11 สำหรับลื้อแม่เหล็กแต่ละกรณีที่มีความแตกต่างของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1.1) จำนวนของแท่งแม่เหล็ก NM

$NM =$ จำนวนแท่งแม่เหล็ก 30 แท่ง ที่วางตัวบนรัศมีแกนลื้อ RM_3

$NM =$ จำนวนแท่งแม่เหล็ก 52 แท่ง ที่วางตัวที่รัศมีแกนลื้อ RM_2 และ RM_3

$NM =$ จำนวนแท่งแม่เหล็ก 66 แท่ง ที่วางตัวที่รัศมีแกนลื้อ RM_1 RM_2 และ RM_3

ซึ่งรูปที่ 3.3 (ค) แสดงจำนวนและตำแหน่งการวางตำแหน่งของแท่งแม่เหล็กที่รัศมี RM_1 RM_2 และ RM_3

1.2) ความหนาของกระทะลื้อแบบปกติ (tr)

ความหนากระทะลื้อปกติ (tr) ที่สนใจมีค่าเท่ากับ 3 mm 5 mm 7 mm และ 9 mm และตัวอย่างกระทะลื้อที่มีความหนา 3 mm แสดงดังรูปที่ 3.4 (ก)

1.3) ความหนาของขอบกระทะลื้อเพิ่มเติมจากกระทะลื้อแบบปกติ (tre)

ความหนาของขอบกระทะลื้อเพิ่มเติม (tre) จากขอบของกระทะลื้อปกติที่ $tr = 3$ mm ที่สนใจมีค่าเท่ากับ 0 mm 2 mm 4 mm และ 6 mm และตัวอย่างกระทะลื้อที่มีขอบเพิ่มเติมหนา 2 mm แสดงดังรูปที่ 3.4 (ข)

โดยทำการทดลองซ้ำ 10 ครั้งในแต่ละกรณีจากนั้นทำการหาค่าเฉลี่ยและเก็บข้อมูล

- 2) วิเคราะห์และเปรียบเทียบแรงยึดเกาะที่ได้แต่ละกรณี



รูปที่ 3.11 ชุดการทดลองวัดค่าแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงเอกประสงค์
(Universal tensile test)

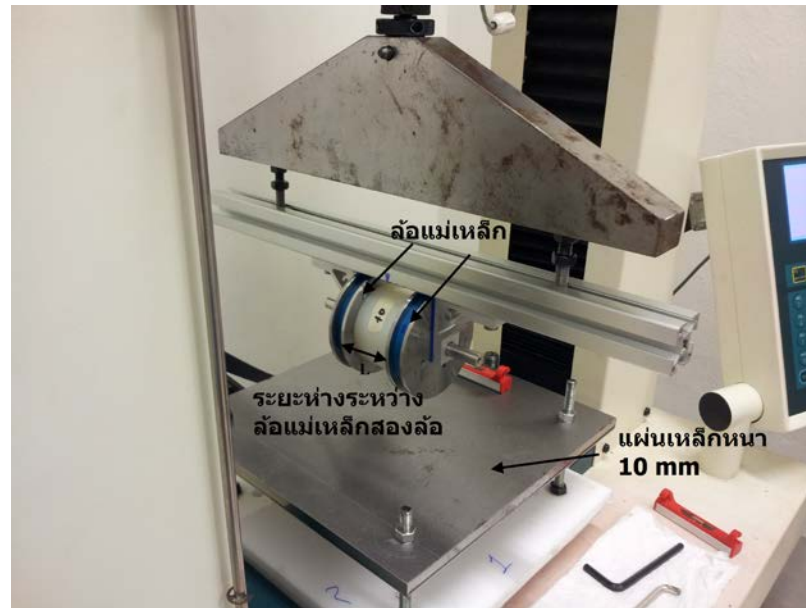
3.4.1.2 การทดลองวัดค่าแรงยึดเกาะแบบสถิติของล้อยแม่เหล็กสองล้อยบนเพลลาเดียวกัน

1. จุดประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลของระยะห่างระหว่างล้อยแม่เหล็กและการวางตำแหน่งของขั้วแม่เหล็กของล้อยแม่เหล็กทั้งสองล้อยบนเพลลาเดียวกันต่อแรงยึดเกาะรวมของล้อยแม่เหล็ก
- 2) เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเกาะรวมของล้อยแม่เหล็กสองล้อยและแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กเดี่ยว

2. วิธีการทดลอง

- 1) ทำการทดลองวัดค่าแรงยึดเกาะรวมของล้อยแม่เหล็กสองล้อย โดยการวัดแรงที่ทำให้ล้อยแม่เหล็กทั้งสองล้อยที่มีความหนากระดะล้อย 3 mm แยกออกจากแผ่นเหล็กเรียบหนา 10 mm ที่ระยะห่างระหว่างล้อยแม่เหล็กสองล้อยตามแนวแกนเพลลา (L) มีค่าเท่ากับ 0 mm 3 mm 10 mm 40 mm 70 mm และ 100 mm เมื่อขั้วแม่เหล็กของล้อยแม่เหล็กทั้งสองล้อยที่เหมือนกันและหันเข้าหากันตามรูปที่ 3.12 โดยทำการทดลองซ้ำ 10 ครั้งในแต่ละระยะห่างระหว่างล้อยแม่เหล็กสองล้อยตามแนวแกนเพลลาจากนั้นทำการหาค่าเฉลี่ยและเก็บข้อมูล
- 2) ทำการทดลองซ้ำในกรณีที่ขั้วแม่เหล็กของล้อยแม่เหล็กทั้งสองต่างกันและหันเข้าหากัน
- 3) วิเคราะห์และเปรียบเทียบแรงยึดเกาะรวมของล้อยแม่เหล็กสองล้อยแต่ละกรณีและกับกรณีแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กเดี่ยว



รูปที่ 3.12 ชุดการทดลองวัดหาค่าแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กคู่

3.4.2 การทดสอบความสามารถในการเคลื่อนที่บนผนังของหุ่นยนต์ที่ติดตั้งล้อแม่เหล็ก

เพื่อทำการประเมินความสามารถในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็กภายใต้ผลของแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กและแรงเสียดทาน การทดสอบได้ถูกออกแบบซึ่งประกอบด้วยการทดสอบย่อย 2 การทดลองต่อไปนี้ 1) การทดสอบความสามารถในการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งบนผนังของหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็กในหัวข้อที่ 3.4.2.1 และ 2) การทดสอบความสามารถในการไต่บนผนังของหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็กในหัวข้อที่ 3.4.2.2

3.4.2.1 การทดสอบความสามารถในการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งบนผนังของหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็ก

1. จุดประสงค์

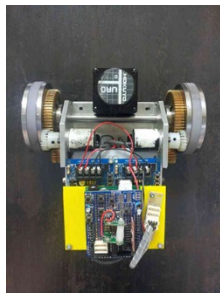
เพื่อศึกษาและวิเคราะห์แรงยึดเกาะและแรงเสียดทานของล้อแม่เหล็กที่มีความแตกต่างกันของตัวแปรอิสระได้แก่ ความหนากระทะล้อ การมีอยู่และชนิดของยางล้อย่างล้อ จำนวนแท่งแม่เหล็ก และลักษณะพื้นผิวสัมผัส ต่อความสามารถในการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งของหุ่นยนต์บนผนังที่ทำจากวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก

2. วิธีการทดสอบ

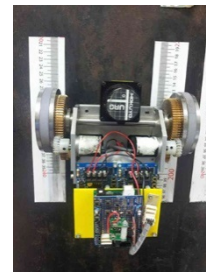
- 1) ติดตั้งล้อแม่เหล็กที่มีจำนวนแท่งแม่เหล็กและความหนากระทะล้อที่แตกต่างกันแต่ละกรณีบนหุ่นยนต์และทำการทดสอบความสามารถในการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งของหุ่นยนต์บนผนังทดสอบที่ไม่มีและมีการปิดทับด้วยรูปลอก (Sticker) โดยทำการทดสอบและเก็บข้อมูลในแต่ละ

ละกรณีของการทดสอบสำหรับทุกกรณีของล้อแม่เหล็กที่มีกระทะล้อปกติที่มีความหนา (tr) ที่แตกต่างกันได้แก่ 3 mm และ 5 mm และถูกบรรจุด้วยแม่เหล็กที่มีจำนวนแท่งแม่เหล็ก (NM) ที่แตกต่างกันได้แก่ 30 52 และ 66 แท่ง เมื่อไม่มีการติดตั้งยางล้อ

- 2) ทำการทดสอบซ้ำใน 1) เมื่อมีการติดตั้งยางล้อทั้งชนิดยางซิลิโคนและชนิดยางธรรมชาติที่ล้อแม่เหล็กสำหรับทุกกรณีที่แตกต่างกันของความหนากระทะล้อและจำนวนแท่งแม่เหล็กของล้อแม่เหล็ก ซึ่งรูปแบบและลักษณะในการทดสอบถูกแสดงดังรูปที่ 3.10 (ก) และรูปที่ 3.10 (ข)
- 3) วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบแต่ละกรณี



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.13 รูปแบบและลักษณะของการทดสอบการยึดเกาะของหุ่นยนต์ขณะหยุดนิ่ง (ก) ผนังทดสอบที่ไม่มีการปิดทับด้วยรูปบล็อก (ข) ผนังทดสอบที่มีการปิดทับด้วยรูปบล็อก

3.4.2.2 การทดสอบความสามารถในการไต่บนผนังของหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็ก

1. จุดประสงค์

เพื่อศึกษาและวิเคราะห์แรงยึดเกาะและแรงเสียดทานของล้อแม่เหล็กที่มีความแตกต่างกันของตัวแปรอิสระได้แก่ ความหนากระทะล้อ ความหนาขอบกระทะล้อเพิ่มเติม การมีอยู่และชนิดของยางล้อ จำนวนแท่งแม่เหล็ก และทิศทางเคลื่อนที่ ต่อความสามารถในการไต่ผนังของหุ่นยนต์

2. วิธีการทดสอบ

- 1) ติดตั้งล้อแม่เหล็กที่มีจำนวนแท่งแม่เหล็กและความหนากระทะล้อที่แตกต่างกันแต่ละกรณีบนหุ่นยนต์และทำการทดสอบการไต่ขึ้นและไต่ลงของหุ่นยนต์บนผนังทดสอบซึ่งเมื่อไม่ติดตั้งยางล้อให้กับล้อแม่เหล็กด้วยความเร็วเป้าหมายคงที่ (Constant target velocity) โดยทำการเก็บข้อมูลในแต่ละกรณีของการทดสอบและทำการหาค่าเฉลี่ยของความเร็วจากการทดสอบซ้ำกัน 3 ครั้งในแต่ละกรณีที่หุ่นยนต์มีความสามารถในการไต่ทิศขึ้นและทิศลงรวมทั้งในแต่ละกรณีที่หุ่นยนต์มีความสามารถในการไต่ในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ซึ่งการทดสอบถูกกระทำกับทุก

กรณีของล้อยแม่เหล็กที่มีกระทะล้อยปกติที่มีความหนา (tr) ที่แตกต่างกันได้แก่ 3 mm และ 5 mm และถูกบรรจุด้วยแม่เหล็กที่มีจำนวนแท่งแม่เหล็ก (NM) ที่แตกต่างกันได้แก่ 30 52 และ 66 แท่ง สำหรับลักษณะและรูปแบบของการทดสอบถูกแสดงดังรูปที่ 3.14

- 2) ทำการทดสอบซ้ำในข้อ 1) เมื่อมีการติดตั้งยางล้อยชนิดยางซิลิโคนและยางธรรมชาติที่ล้อยแม่เหล็กสำหรับทุกกรณีที่แตกต่างกันของความหนากระทะล้อยและจำนวนแท่งแม่เหล็กของล้อยแม่เหล็ก
- 3) วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบแต่ละกรณี



รูปที่ 3.14 รูปแบบและลักษณะของการทดสอบความสามารถในการไต่ขึ้นและลงบนผนังเหล็กของหุ่นยนต์ล้อยแม่เหล็ก

3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเกาะและความสามารถในการยึดเกาะบนผนังของหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็ก

เพื่อที่จะทำให้หุ่นยนต์สามารถยึดเกาะบนผนังเฟอร์โรแมกเนติกได้นั้น แรงแม่เหล็กของล้อแม่เหล็ก ซึ่งก็คือแรงยึดเกาะจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

$$\mu' f \geq Mg \quad (3-1)$$

โดยที่ $\mu' f$ และ M คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานการไถล (Coefficient of the sliding friction) แรงแม่เหล็กรวมจากล้อแม่เหล็กทั้งหมดมีหน่วย N และมวลรวมทั้งหมดของหุ่นยนต์มีหน่วย kg ตามลำดับ สำหรับความเร่งโน้มถ่วงแทนด้วยตัวแปร g มีค่าเท่ากับ 9.81 m/s^2 ที่มาของสมการ (3-1) นำมาจากเอกสารวิจัยโดย Yukawa และคณะ [28] และ [31] ซึ่งสอดคล้องข้อมูลที่ปรากฏในงานวิจัย โดย Fernandez และคณะ [12] และ Fisher และคณะ [1]

3.6 แบบจำลองคณิตศาสตร์แสดงการเคลื่อนที่บนผนังของหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็ก

การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็กในแนวตั้งสามารถถูกพิจารณาและนำเสนอได้ตามกฎของนิวตัน ซึ่งได้แสดงไว้ในงานวิจัยของ Yukawa และคณะ [28] และ [31] โดยสอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็กในการศึกษานี้ซึ่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ดังสมการที่ (3-2)

$$Mg \sin(\theta) + \mu(f + Mg \cos(\theta)) = k \frac{\tau}{r} \quad (3-2)$$

โดยที่ τ คือ แรงบิดขับจากมอเตอร์แทนด้วยตัวแปรมีหน่วย N.m f คือ แรงแม่เหล็กรวมจากล้อแม่เหล็กทั้งหมดมีหน่วย N M คือ มวลของหุ่นยนต์แทนด้วยตัวแปร มีหน่วย kg k คือ จำนวนล้อขับ r คือ รัศมีของล้อแม่เหล็ก มีหน่วย m θ คือ มุมของความเอียงมีหน่วย rad g คือ ความเร่งโน้มถ่วงมีค่าเท่ากับ 9.81 m/s^2 และ μ คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานการกลิ้ง (Coefficient of rolling friction) สมการ (3-2) บ่งบอกถึงปริมาณแรงบิดที่ต้องการสำหรับใช้ในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ดังแสดงใน [32] และ [33] และเมื่อนำสมการที่ (3-2) มาประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็กขับเคลื่อนสองล้อที่ทำการเกาะ และเคลื่อนที่ขึ้นในแนวตั้งบนผนังเหล็กในกรณีความเอียงของผนังที่ตั้งฉาก (มุมเอียง $\theta = \pi/2 \text{ rad}$) [28] สมการที่ (3-2) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3-3) คือ

$$Mg + \mu f = 2 \frac{\tau}{r} \quad (3-3)$$

ที่มาสมการ (3-2) และสมการ (3-3) นำมาจากเอกสารวิจัยโดย Yukawa และคณะ [28] และ [31] และ [33] และ Suzuki และคณะ [32] และสอดคล้องกับข้อมูลที่นำเสนอโดย Fisher และคณะ [1] และ Fernandez และคณะ [12] สำหรับการเคลื่อนที่ลงในแนวตั้งเครื่องหมายหน้าเทอม Mg ในสมการที่ (3-3) จะมีการเปลี่ยนแปลง

ตัวแปร M ในสมการที่ (3-3) และสมการ (3-4) เป็นผลรวมของหุนยนต์ซึ่งกำหนดตามเอกสารวิจัยที่ [28] ไม่ใช่ค่าแมกเนไทเซชัน (Magnetization) ซึ่งปรากฏในสมการที่ (2-3) จากเอกสารวิจัยที่ [26] โดย Slocum และคณะ ส่วนตัวแปร f แทนแรงแม่เหล็กรวมจากล่อแม่เหล็กหลายล่อซึ่งกำหนดตามเอกสารวิจัยที่ [28] สำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ตัวแปร F_{mT} แทนแรงแม่เหล็กหรือแรงยึดเกาะรวมของล่อแม่เหล็กมากกว่าหนึ่งล่อซึ่งจึงสามารถพิจารณาได้ว่า $f = F_{mT}$

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองในแต่ละการทดลองจะที่กล่าวในบทที่ 3 จะแสดงในหัวข้อ 4.1 และ 4.2 แบ่งตามประเภทของการทดลองและการทดสอบ ได้แก่ การทดลองวัดค่าแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กแบบสถิตและการทดสอบความสามารถในการเคลื่อนที่บนผนังของหุ่นยนต์ที่ติดตั้งล้อยแม่เหล็ก

4.1 การทดลองวัดค่าแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กแบบสถิต : ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1.1 การทดลองวัดค่าแรงยึดเกาะแบบสถิตของล้อยแม่เหล็กเดี่ยว : ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.4.1.1

ค่าแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กภายใต้ความแตกต่างของตัวแปรอิสระ ได้แก่ จำนวนแท่งแม่เหล็ก (NM) ความหนาล้อยแม่เหล็ก (tr) และความหนาล้อยเพิ่มเติม (tre) ถูกแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของจากการทดลองซ้ำจำนวน 10 ครั้งในแต่ละกรณีที่แตกต่างกันของตัวแปรอิสระและจะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป โดยจะเห็นได้ว่า การเพิ่มขึ้นของตัวแปรเหล่านี้นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กซึ่งวางบนแผ่นเหล็กเรียบหนา 10 mm ดังจะเห็นได้ชัดเจนในรูปที่ 4.1 โดยค่าแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กนี้เป็นแรงแม่เหล็กที่ดึงดูดล้อยแม่เหล็กให้ติดกับแผ่นเหล็กเรียบดังแสดงใน [36]

ในกรณีกระทะล้อยปกติที่แต่ละจำนวนแท่งแม่เหล็ก ค่าอัตราส่วนของการเพิ่มของแรงยึดเกาะต่อการเพิ่มของมวลมีค่าลดลงเมื่อความหนากระทะล้อยแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 4.3 และที่การเพิ่มขึ้นของความหนากระทะล้อยเดียวกัน ยิ่งจำนวนแท่งแม่เหล็กมากขึ้นอัตราส่วนดังกล่าวยังมีค่ามากและจากตารางที่ 4.4 ในแต่ละการเพิ่มจำนวนแท่งแม่เหล็กจากจำนวนแท่งแม่เหล็ก 30 แท่งเป็น 52 และ 66 แท่ง อัตราส่วนของการเพิ่มขึ้นของแรงยึดเกาะต่อการเพิ่มขึ้นของมวลมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อความหนาของกระทะล้อยมีค่ามากขึ้น

ในกรณีกระทะล้อยที่มีความหนาขอบกระทะล้อยเพิ่มเติมพบว่า อัตราส่วนของแรงยึดเกาะที่เพิ่มขึ้นต่อมวลที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มความหนาของขอบกระทะล้อยเพิ่มเติมจะมีค่าลดลงเมื่อจำนวนแท่งแม่เหล็กเท่ากับ 30 แท่ง และ 52 แท่ง แต่แนวโน้มจะไม่เป็นเช่นนั้นสำหรับที่จำนวนแท่งแม่เหล็กเท่ากับ 66 แท่ง ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และเมื่อพิจารณาข้อมูลจากตารางที่ 4.4 พบว่า สำหรับการเพิ่มของจำนวนแท่งแม่เหล็กจาก 30 แท่ง เป็น 52 แท่ง อัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของแรงยึดเกาะต่อการเพิ่มขึ้น

ของมวลจะลดลงเมื่อความหนาของกระดาษล้อยเพิ่มเติมมีค่ามากขึ้นแต่การเปลี่ยนแปลงจะไม่เป็นเช่นเดียวกันในกรณีแท่งแม่เหล็กถูกเพิ่มจำนวนจาก 30 แท่งเป็น 66 แท่ง

หากเปรียบเทียบกรณีการเพิ่มความหนากระดาษล้อยปกติและกรณีการเพิ่มความหนาของกระดาษล้อยเพิ่มเติมเมื่อจำนวนแท่งแม่เหล็กเท่ากันดังตารางที่ 4.3 พบว่า อัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของแรงยึดเกาะต่อการเพิ่มขึ้นของมวลโดยการเพิ่มความหนาของกระดาษล้อยเพิ่มเติมจะมีค่าสูงกว่า แต่หากพิจารณาจากค่าแรงยึดเกาะความหนาของกระดาษล้อยที่มีขอบล้อยเพิ่มเติมที่ได้จะมีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาของกระดาษล้อยปกติที่มีความหนารวมเท่ากันแต่จะมากกว่าการไม่มีความหนาของล้อยเพิ่มเติมคือกระดาษล้อยปกติที่ $tr = 3 \text{ mm}$ เมื่อจำนวนแท่งแม่เหล็กเท่ากัน เช่น กรณีกระดาษล้อยที่มีขอบเพิ่มเติมที่ $tre = 2 \text{ mm}$ จะมีค่าแรงยึดเกาะน้อยกว่าแรงยึดเกาะของกรณีกระดาษล้อยปกติที่ $tr = 5 \text{ mm}$ แต่จะมากกว่าแรงยึดเกาะของกรณีกระดาษล้อยที่ $tr = 3 \text{ mm}$ ที่แต่ละจำนวนแท่งแม่เหล็ก อย่างไรก็ตามการเพิ่มความหนาของขอบกระดาษล้อยเพิ่มเติมเป็นการเพิ่มแรงยึดเกาะที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่ง

ในกรณีกระดาษล้อยปกติ เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของแรงยึดเกาะต่อการเพิ่มขึ้นของมวลจากการเพิ่มความหนากระดาษล้อยในตารางที่ 4.3 และจากการเพิ่มจำนวนแท่งแม่เหล็กในตารางที่ 4.3 ที่ความหนากระดาษล้อยและจำนวนแท่งแม่เหล็กสอดคล้องกันพบว่า อัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของแรงยึดเกาะต่อการเพิ่มขึ้นของมวลจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนแท่งแม่เหล็กมีค่าสูงกว่าอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของแรงยึดเกาะต่อการเพิ่มขึ้นของมวลจากการเพิ่มความหนากระดาษล้อยอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นการเพิ่มแรงยึดเกาะโดยการเพิ่มจำนวนแท่งแม่เหล็กจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมกว่า อย่างไรก็ตาม ในกรณีกระดาษล้อยที่มีขอบเพิ่มเติม ที่ความหนาของกระดาษล้อยเพิ่มเติมและจำนวนแท่งแม่เหล็กสอดคล้องกันพบว่า อัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของแรงยึดเกาะต่อการเพิ่มขึ้นของมวลจากการเพิ่มขึ้นของความหนาของกระดาษล้อยเพิ่มเติมมีค่าสูงกว่าอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของแรงยึดเกาะต่อการเพิ่มขึ้นของมวลจากการเพิ่มจำนวนแท่งแม่เหล็ก

ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความหนาของกระดาษล้อยและจำนวนแท่งแม่เหล็กต่อแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กสามารถอธิบายด้วยแรงแม่เหล็กของวงจรมแม่เหล็กดังแสดงสมการที่ (2-1) ดังแสดงใน [38] และสมการลักษณะเดียวกันในเอกสารอ้างอิงอื่นๆหัวข้อ 2.1.1 ซึ่งวงจรมประกอบด้วยล้อยแม่เหล็กและแผ่นเหล็กเรียบ เมื่อพิจารณาขนาดแรงแม่เหล็กของวงจรมแม่เหล็ก (F_x) ในสมการที่ (2-1) ให้มีค่าเท่ากับแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กเดี่ยว (F_m) ที่ได้จากการทดลองจะเห็นได้ว่า ค่า F_m ขึ้นกับความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (B_g) และพื้นที่ตัดขวางของขั้วแม่เหล็กแต่ละแท่ง (A_g) ซึ่งจำนวนแท่งแม่เหล็กส่งผลต่อค่า B_g ในขณะที่ความหนากระดาษล้อยจะส่งผลต่อขนาดของ A_g และเมื่อพิจารณา

ผลกระทบของตัวแปรเหล่านี้ต่อแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กสอดคล้องกับสมการที่ (2-2) โดย Slocum และคณะ [36] ก็พบว่าสอดคล้องกัน

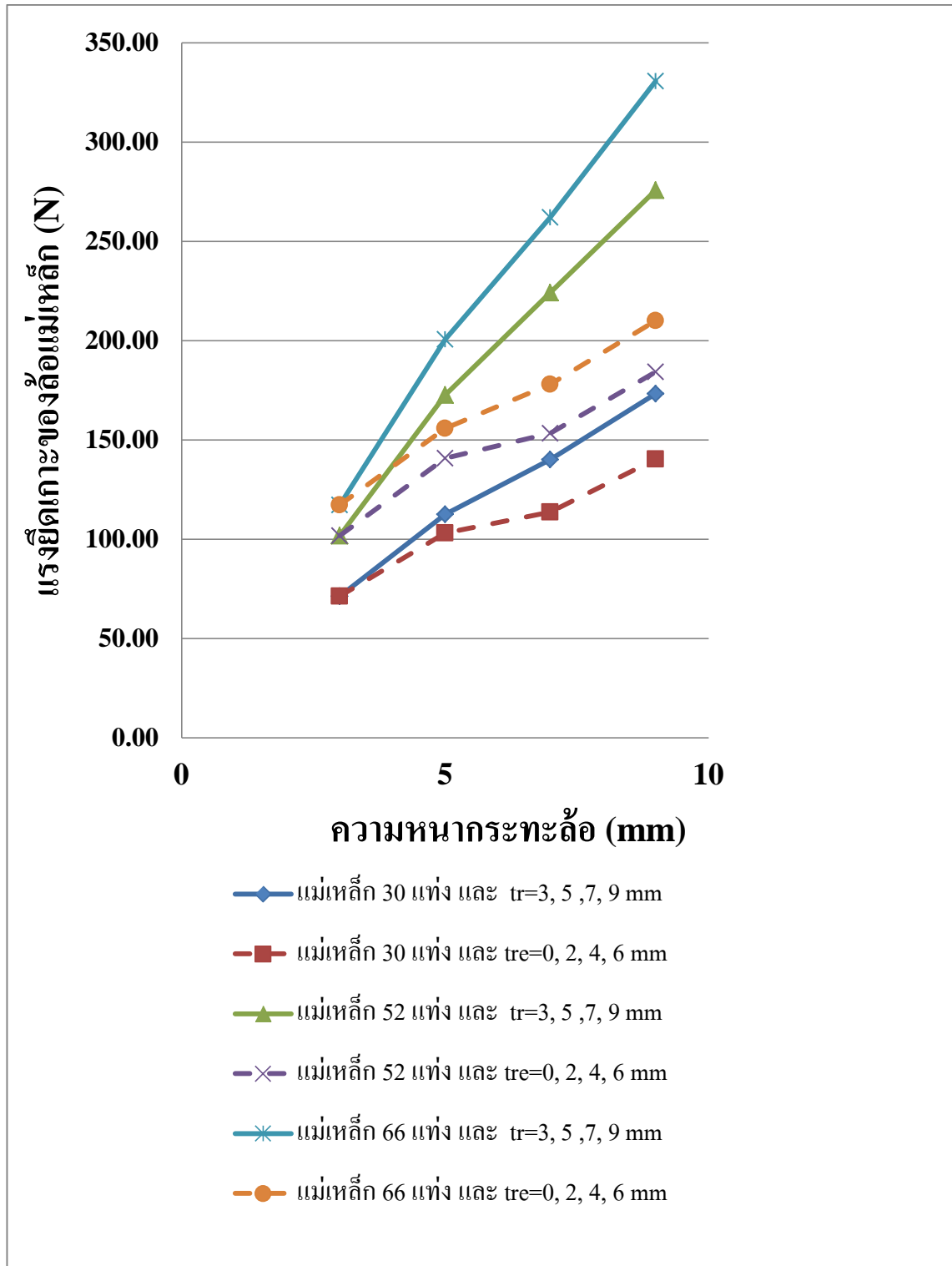
การทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอิสระต่อไปนี้ได้แก่ จำนวนแท่งแม่เหล็ก ความหนาของกระทะล้อย และความหนาของขอบกระทะล้อยเพิ่มเติม ส่งผลต่อแรงแม่เหล็กซึ่งก็คือแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็ก ดังนั้นการออกแบบล้อยแม่เหล็กเพื่อให้ได้แรงยึดเกาะที่ต้องการ พารามิเตอร์หรือตัวแปรเหล่านี้จะต้องถูกเลือกอย่างเหมาะสมเพื่อให้ได้การยึดเกาะของหุ่นยนต์ที่ต้องการ ในกรณีของกระทะล้อยปกติการเพิ่มแรงยึดเกาะโดยการเพิ่มจำนวนแท่งแม่เหล็กจะมีประสิทธิภาพมากกว่าการเพิ่มความหนาของกระทะล้อย ส่วนกรณีของขอบกระทะล้อยเพิ่มเติมเป็นแนวทางการเพิ่มแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กอย่างมีประสิทธิภาพอีกแนวทางหนึ่ง

ตารางที่ 4.1 แรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กติดตั้งกระทะล้อยปกติที่ความหนาต่างๆ

จำนวนแท่งแม่เหล็ก (NM)	แรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กติดตั้งกระทะล้อยแบบปกติ (F_m)			
	ความหนาของกระทะล้อย			
	$tr = 3$ mm	$tr = 5$ mm	$tr = 7$ mm	$tr = 9$ mm
30	71.36 N	112.68 N	140.11 N	173.29 N
52	101.77 N	172.73 N	224.23 N	275.68 N
66	117.24 N	200.78 N	262.11 N	330.59 N

ตารางที่ 4.2 แรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กติดตั้งกระทะล้อยที่มีขอบเพิ่มเติมที่ความหนาต่างๆ

จำนวนแท่งแม่เหล็ก (NM)	แรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กติดตั้งกระทะล้อยที่มีขอบเพิ่มเติม (F_m)			
	ความหนาของขอบกระทะล้อยเพิ่มเติม (tre)			
	$tre = 0$ mm	$tre = 2$ mm	$tre = 4$ mm	$tre = 6$ mm
30	71.36 N	103.08 N	113.70 N	140.40 N
52	101.77 N	140.72 N	153.31 N	184.34 N
66	117.24 N	155.79 N	177.98 N	210.15 N



รูปที่ 4.1 แรงยึดเกาะของลือแม่เหล็กที่มีความแตกต่างของตัวแปรได้แก่ จำนวนแท่งแม่เหล็ก ความหนากระทั่ลลือ และความหนาขอบกระทั่ลลือเพิ่มเติม

ตารางที่ 4.3 อัตราส่วนระหว่างการเพิ่มขึ้นของแรงยึดเกาะล้อยแม่เหล็กต่อการเพิ่มขึ้นของมวลล้อยแม่เหล็กเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงมวลของกระทะล้อย

จำนวนแท่งแม่เหล็ก (<i>NM</i>)	อัตราส่วน					
	จาก	จาก	จาก	จาก	จาก	จาก
	<i>tr</i> = 3	<i>tr</i> = 3	<i>tr</i> = 3	<i>tre</i> = 0	<i>tre</i> = 0	<i>tre</i> = 0
	เป็น	เป็น	เป็น	เป็น	เป็น	เป็น
	<i>tr</i> = 5	<i>tr</i> = 7	<i>tr</i> = 9	<i>tre</i> = 2	<i>tre</i> = 4	<i>tre</i> = 6
	mm	mm	mm	mm	mm	mm
30	1.136	0.960	0.955	7.235	6.329	4.487
52	1.501	1.315	1.254	6.836	5.929	4.129
66	1.621	1.427	1.411	6.204	6.407	4.260

ตารางที่ 4.4 อัตราส่วนระหว่างการเพิ่มขึ้นของแรงยึดเกาะล้อยแม่เหล็กต่อการเพิ่มขึ้นของมวลล้อยแม่เหล็กเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงจำนวนแท่งแม่เหล็ก

การเพิ่มขึ้น ของจำนวน แท่งแม่เหล็ก	อัตราส่วน							
	กระทะล้อยปกติ (<i>tr</i>)				กระทะล้อยที่มีความหนาขอบเพิ่มเติม (<i>tre</i>)			
	3 mm	5 mm	7 mm	9 mm	0 mm	2 mm	4 mm	6 mm
จาก <i>NM</i> = 30 เป็น <i>NM</i> = 52	4.375	8.260	12.351	15.134	4.375	3.979	3.912	3.906
จาก <i>NM</i> = 30 เป็น <i>NM</i> = 66	4.034	7.405	10.947	14.209	4.034	3.405	3.880	3.789

4.1.2 การทดลองวัดค่าแรงยึดเกาะแบบสถิติของล้อยแม่เหล็กสองล้อบนเพลาดียวกัน : ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.4.1.2

แรงยึดเกาะรวมของล้อยแม่เหล็กสองล้อหรือล้อยแม่เหล็กคู่บนเพลาดียวกัน (F_{mT}) ซึ่งได้จากการทดลองโดยการวัดแรงดึงที่ทำให้ล้อยแม่เหล็กสองล้อแยกจากแผ่นเหล็กหนา 10 mm ที่ระยะห่างระหว่างล้อยแม่เหล็กสองล้อตามแนวแกนเพลาค่าต่างๆ (L) และการวางตำแหน่งของขั้วแม่เหล็กที่หันเข้าหากันระหว่างล้อยแม่เหล็กทั้งสองล้อ (P) ทั้งกรณีขั้วแม่เหล็กของล้อยแม่เหล็กเหมือนกัน (*Same*) และต่างกัน (*Different*) หรือทิศของแมกเนไทเซชัน (Magnetization direction) ของล้อยแม่เหล็กทั้งสองที่มีทิศทางตรงข้ามกันและทิศทางเดียวกันสำหรับจำนวนแท่งแม่เหล็กต่างๆ ถูกแสดงในตารางที่ 4.5 และกราฟในรูปที่ 4.2 ซึ่งค่าแรงยึดเกาะรวมเหล่านี้เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองซ้ำจำนวน 10 ครั้งในแต่ละกรณีที่แตกต่างกันของตัวแปรอิสระและจะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

แรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กเดี่ยว (F_m) ของล้อยแม่เหล็กแต่ละล้อและค่าเฉลี่ยแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กเดี่ยวที่คำนวณจากแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กเดี่ยวสองล้อที่แต่ละจำนวนแท่งแม่เหล็กถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.6 สำหรับค่าแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กเดี่ยวล้อที่ 1 ที่แต่ละจำนวนแท่งแม่เหล็กนั้นนำมาจากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.1.1 ในขณะที่ค่าแรงยึดเกาะล้อยแม่เหล็กเดี่ยวล้อที่ 2 ในแต่ละจำนวนแท่งแม่เหล็กได้จากการทดลองในรูปแบบเดียวกับการทดลองที่ 3.4.1.1 ซึ่งค่าแรงยึดเกาะเหล่านี้จะถูกนำมาวิเคราะห์ร่วมกับผลการทดลองของแรงยึดเกาะรวมของล้อยแม่เหล็กคู่บนเพลาดียวกันต่อไป

เมื่อพิจารณาในกรณีขั้วแม่เหล็กที่หันเข้าหากันของล้อยแม่เหล็กทั้งสองล้อเหมือนกันหรือแมกเนไทเซชันของล้อยแม่เหล็กทั้งสองมีทิศทางตรงข้ามกัน (Opposite magnetization direction) พบว่า ค่าเฉลี่ยของแรงยึดเกาะรวมของล้อยแม่เหล็กสองล้อซึ่งคำนวณจากค่าแรงยึดเกาะรวมที่ระยะห่างระหว่างล้อยแม่เหล็กสองล้อต่างๆ ที่แต่ละจำนวนแท่งแม่เหล็ก 30 52 และ 66 แท่ง มีค่าเท่ากับ 138.37 N 205.19 N และ 238.37 N และมีค่าความเบี่ยงเบนเท่ากับ 4.37 N 4.38 N และ 8.18 N ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของแรงยึดเกาะรวมของล้อยแม่เหล็กคู่นี้จะมีค่าเข้าใกล้ประมาณสองเท่าของค่าเฉลี่ยของแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กเดี่ยวเมื่อจำนวนแท่งแม่เหล็กในล้อยแม่เหล็กเดี่ยวเท่ากับจำนวนแท่งแม่เหล็กในแต่ละล้อของล้อยแม่เหล็กคู่ ดังข้อมูลในตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6

ในกรณีขั้วแม่เหล็กที่หันเข้าหากันของล้อยแม่เหล็กทั้งสองล้อต่างกันหรือแมกเนไทเซชันของล้อยแม่เหล็กทั้งสองมีทิศทางเดียวกัน (Same magnetization direction) พบว่า เมื่อระยะห่างตามแนวแกนเพลามีค่าอยู่ระหว่าง 0 mm และ 10 mm ค่าแรงยึดเกาะรวมของล้อยแม่เหล็กคู่นี้มีค่าน้อยกว่าแรงยึดเกาะรวมของล้อยแม่เหล็กคู่ของกรณีขั้วแม่เหล็กที่หันเข้าหากันของล้อยแม่เหล็กสองล้อเหมือนกันที่จำนวนแท่งแม่เหล็ก

เท่ากันและมีค่าน้อยกว่าสองเท่าของค่าเฉลี่ยของแรงยึดเกาะล้อยแม่เหล็กเดี่ยวที่จำนวนแท่งแม่เหล็กของล้อยแม่เหล็กเดี่ยวเท่ากับจำนวนแท่งแม่เหล็กที่บรรจุในแต่ละล้อยของล้อยแม่เหล็กคู่ อย่างไรก็ตามเมื่อระยะห่างระหว่างล้อยแม่เหล็กทั้งสองตามแนวแกนเพลามากกว่าเท่ากับ 40 mm ค่าแรงยึดเกาะรวมของล้อยแม่เหล็กคู่มีค่าเข้าใกล้แรงยึดเกาะรวมของล้อยแม่เหล็กคู่ของกรณีขั้วแม่เหล็กที่หันเข้ากันของล้อยแม่เหล็กทั้งสองล้อยเหมือนกันที่จำนวนแท่งแม่เหล็กเท่ากัน และมีค่าเข้าใกล้ประมาณสองเท่าของค่าเฉลี่ยของแรงยึดเกาะล้อยแม่เหล็กเดี่ยวที่จำนวนแท่งแม่เหล็กในล้อยแม่เหล็กเดี่ยวเท่ากับจำนวนแท่งแม่เหล็กในแต่ละล้อยของล้อยแม่เหล็กคู่ ดังข้อมูลในตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 กรณีที่น่าสนใจคือกรณีขั้วแม่เหล็กที่หันเข้าหากันของล้อยแม่เหล็กทั้งสองล้อยต่างกันและระยะห่างระหว่างล้อยแม่เหล็กทั้งสองมีค่าเป็นศูนย์ ค่าแรงยึดเกาะรวมของล้อยแม่เหล็กคู่มีค่ามากกว่าค่าแรงยึดเกาะเฉลี่ยของล้อยแม่เหล็กเดี่ยวที่จำนวนแท่งแม่เหล็กในล้อยแม่เหล็กเดี่ยวเท่ากับจำนวนแท่งแม่เหล็กในแต่ละล้อยของล้อยแม่เหล็กคู่และมีค่าน้อยกว่าแรงยึดเกาะรวมของล้อยแม่เหล็กคู่ของกรณีขั้วแม่เหล็กที่หันเข้ากันของล้อยแม่เหล็กทั้งสองล้อยเหมือนกันอย่างชัดเจน ดังข้อมูลในตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6

ดังนั้นในกรณีขั้วแม่เหล็กของล้อยแม่เหล็กทั้งสองล้อยต่างกันและระยะห่างระหว่างล้อยแม่เหล็กทั้งสองมีค่าน้อย ที่จำนวนแท่งแม่เหล็กในล้อยแม่เหล็กเดี่ยวเท่ากับจำนวนแท่งแม่เหล็กในแต่ละล้อยของล้อยแม่เหล็กคู่ ค่าแรงยึดเกาะรวมของล้อยแม่เหล็กสองล้อยบนเพลาดียวกันจะไม่สามารถประมาณเป็นสองเท่าของแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กเดี่ยวได้ดังเช่นกรณีล้อยแม่เหล็กสองล้อยที่ขั้วแม่เหล็กเหมือนกัน

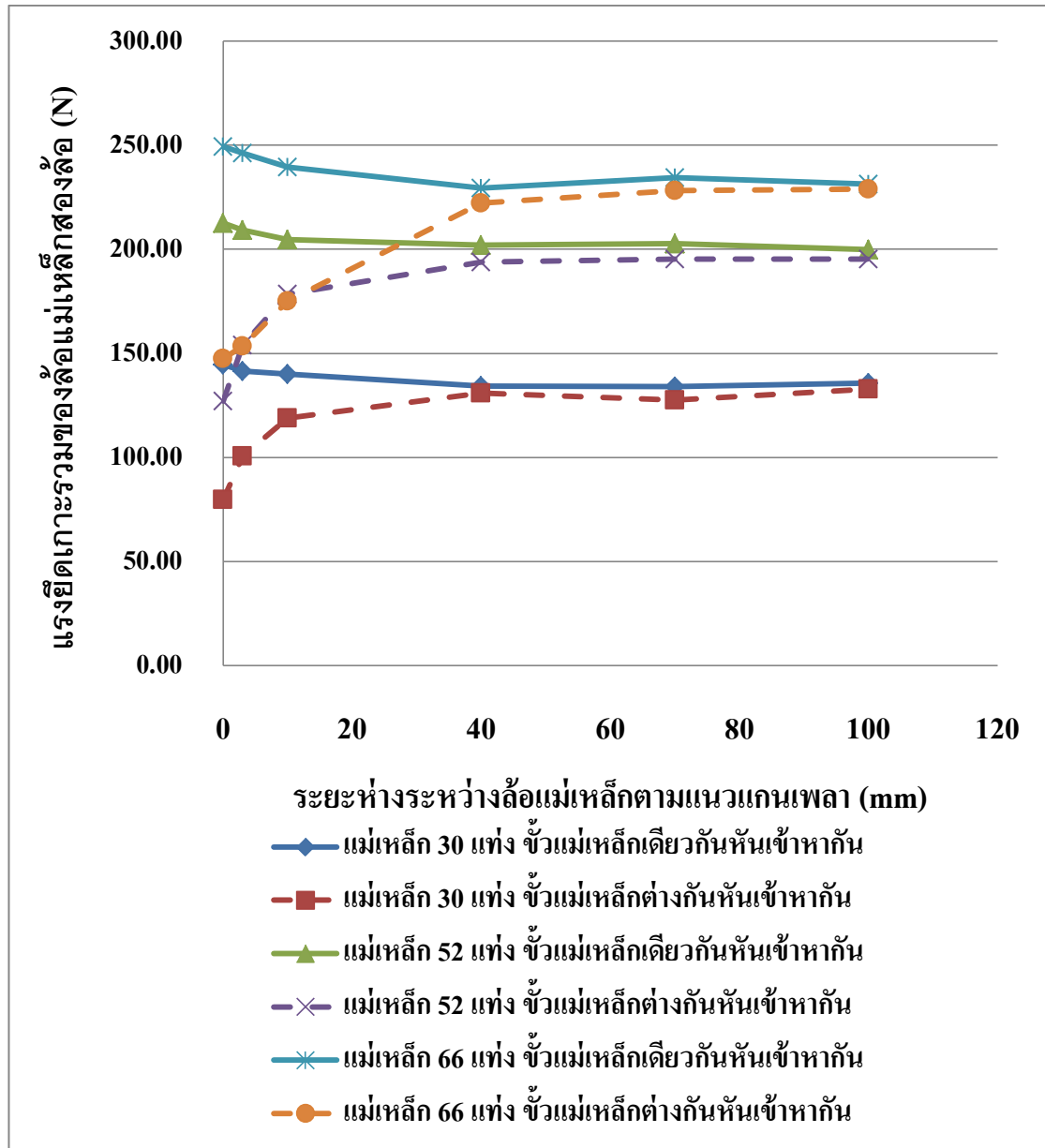
จากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงตัวแปรอิสระได้แก่ ระยะห่างตามแนวแกนเพลาลและการวางตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของล้อยแม่เหล็กทั้งสองล้อย ส่งผลต่อแรงยึดเกาะรวมของล้อยแม่เหล็กสองล้อยและส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเกาะรวมของล้อยแม่เหล็กคู่และแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กเดี่ยว ดังนั้นเพื่อที่จะให้ได้แรงยึดเกาะรวมที่ต้องการสำหรับหุ่นยนต์ใต้ผนังเฟอร์โรแมกเนติกตัวแปรทั้งสองนี้จะต้องถูกนำมาพิจารณาในการออกแบบหุ่นยนต์ ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่มีมาก่อน โดย Boonyaprapasorn และคณะ [34] ที่ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างตามแนวแกนเพลาลและการวางตัวของขั้วแม่เหล็กของล้อยแม่เหล็กสองล้อยบนเพลาดียวกันต่อแรงยึดเกาะรวมของล้อยแม่เหล็กสองล้อยที่วางบนแผ่นเหล็กหนา 2 mm

ตารางที่ 4.5 แรงยึดเกาะรวมของล้อยแม่เหล็กสองล้อบนเพลลาเดียวกันที่มีระยะห่างตามแนวแกนเพลลาที่แตกต่างกันและขั้วแม่เหล็กระหว่างล้อยแม่เหล็กทั้งสองล้อที่เหมือนกันและต่างกัน

ขั้วแม่เหล็ก (P)	จำนวนแท่ง แม่เหล็ก (NM)	แรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กสองล้อที่ระยะห่างระหว่างล้อยแม่เหล็กต่างๆ (F_{mT})					
		$L=0$ mm	$L=3$ mm	$L=10$ mm	$L=40$ mm	$L=70$ mm	$L=100$ mm
เหมือนกัน (<i>Same</i>)	30	144.70 N	141.40 N	140.18 N	134.22 N	134.06 N	135.68 N
ต่างกัน (<i>Different</i>)	30	79.76 N	100.78 N	119.01 N	130.86 N	127.67 N	132.77 N
เหมือนกัน (<i>Same</i>)	52	212.55 N	209.28 N	204.70 N	202.03 N	202.70 N	199.90 N
ต่างกัน (<i>Different</i>)	52	127.08 N	153.95 N	178.58 N	193.95 N	195.23 N	195.28 N
เหมือนกัน (<i>Same</i>)	66	249.43 N	246.24 N	239.61 N	229.32 N	234.38 N	231.23 N
ต่างกัน (<i>Different</i>)	66	147.57 N	153.45 N	175.18 N	222.30 N	228.33 N	228.83 N

ตารางที่ 4.6 แรงยึดเกาะแม่เหล็กเดี่ยวแต่ละล้อและค่าเฉลี่ยของแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กเดี่ยว

จำนวนแท่งแม่เหล็ก (NM)	แรงยึดเกาะของ ล้อยแม่เหล็กเดี่ยว (F_m)		ค่าเฉลี่ยแรงยึดเกาะ ล้อยแม่เหล็กเดี่ยว
	ล้อที่ 1	ล้อที่ 2	
30	71.36 N	71.27 N	71.31 N
52	101.84 N	103.13 N	102.48 N
66	117.24 N	116.72 N	116.98 N



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเกาะรวมของดัดแม่เหล็กสองดัดและระยะห่างระหว่างดัดแม่เหล็กสำหรับการวางตำแหน่งของขั้วแม่เหล็กของดัดแม่เหล็กแบบต่างๆ

4.2 การทดสอบความสามารถในการเคลื่อนที่บนผนังของหุ่นยนต์ที่ติดตั้งล้อแม่เหล็ก : ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

4.2.1 การทดสอบความสามารถในการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งบนผนังของหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็ก : ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ 3.4.2.1

ความสามารถในการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งบนผนังของหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็ก (Ad) ภายใต้อิทธิพลของความแตกต่างของตัวแปรอิสระได้แก่ ความหนาของกระทะล้อ (tr) จำนวนแท่งแม่เหล็ก (NM) การมีอยู่และชนิดของยางล้อ ($tire$) และลักษณะของพื้นผิวสัมผัส (S) ซึ่งผลการทดสอบในแต่ละกรณีสามารถถูกแสดงได้ดังตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8

เมื่อล้อแม่เหล็กสัมผัสกับผนังทดสอบโดยตรง ความสามารถในการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งของหุ่นยนต์บนผนังทดสอบสามารถจำแนกตามการมีอยู่และชนิดของยางล้อเป็น 3 กรณีดังต่อไปนี้ 1) กรณีที่ไม่มีติดตั้งยางล้อ หุ่นยนต์สามารถยึดเกาะได้ในทุกความหนาของกระทะล้อและทุกจำนวนแท่งแม่เหล็ก 2) กรณีติดตั้งยางล้อชนิดยางซิลิโคนให้กับล้อแม่เหล็ก หุ่นยนต์มีความสามารถในการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งในทุกความหนาของกระทะล้อและทุกจำนวนแท่งแม่เหล็ก 3) กรณีของการติดตั้งยางชนิดยางธรรมชาติความสามารถในการยึดเกาะของหุ่นยนต์จะลดลง โดยหุ่นยนต์จะไม่สามารถทำการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งเมื่อจำนวนแท่งแม่เหล็กเท่ากับ 30 แท่งที่ความหนากระทะล้อเท่ากับ 3 mm และ 5 mm แต่ความสามารถดังกล่าวยังคงมีอยู่เมื่อจำนวนแท่งแม่เหล็กมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 52 แท่งที่ทุกความหนากระทะล้อ

อย่างไรก็ตามเมื่อมีการปิดรูปลอกบนพื้นผิวผนังทดสอบ ความสามารถในการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งของหุ่นยนต์บนผนังทดสอบสามารถจำแนกตามการมีอยู่และชนิดของยางล้อเป็น 3 กรณีดังต่อไปนี้ 1) กรณีไม่ติดตั้งยางล้อ หุ่นยนต์ไม่มีความสามารถในการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งในขอบเขตของจำนวนแท่งแม่เหล็กและความหนากระทะล้อที่ทำการทดสอบ 2) กรณีมียางล้อชนิดยางซิลิโคน หุ่นยนต์จะสามารถยึดเกาะขณะหยุดนิ่งได้ เมื่อจำนวนแท่งแม่เหล็กเท่ากับ 52 แท่งและ 66 แท่งสำหรับทุกความหนากระทะล้อ 3) กรณียางล้อชนิดยางธรรมชาติ ความสามารถดังกล่าวจะมีเมื่อจำนวนแท่งแม่เหล็กเท่ากับ 66 แท่งที่ความหนากระทะล้อทุกความหนา

เมื่อนำข้อมูลของแรงยึดเกาะซึ่งก็คือแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อล้อแม่เหล็กที่มีความแตกต่างกันของจำนวนแท่งแม่เหล็กและความหนากระทะล้อทั้งกรณีติดตั้งยางและไม่ติดตั้งยางเปรียบเทียบกับความสามารถในการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งของหุ่นยนต์เมื่อไม่มีการปิดรูปลอกบนผนัง จำนวนแท่งแม่เหล็กและความหนากระทะล้อของล้อแม่เหล็กซึ่งสอดคล้องกับแรงยึดเกาะที่ต่ำที่สุดซึ่งแสดงใน

ตารางที่ 4.9 และหุ่นยนต์ยังคงสามารถทำการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งได้ สามารถแสดงตามการมียู่และชนิดของยางล้อได้ดังต่อไปนี้ 1) ในกรณีไม่มียางล้อ ($tr = 3 \text{ mm}$ และ $NM = 30$) 2) ในกรณีติดตั้งยางซิลิโคน ($tr = 3 \text{ mm}$ และ $NM = 30$) 3) ในกรณีติดตั้งยางธรรมชาติ ($tr = 3 \text{ mm}$ และ $NM = 52$) ดังการเปรียบเทียบข้อมูลในตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.9 และสามารถแสดงด้วยกราฟดังรูปที่ 4.3 โดยข้อมูลของแรงยึดเกาะในตารางที่ 4.9 ได้มาจากการวัดแรงที่ใช้ในการแยกล้อแม่เหล็กเดี่ยวออกจากแผ่นเหล็กเรียบที่ไม่มีการปิดรูปลอกในลักษณะเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่ 3.4.1.1 โดยเพิ่มเติมกรณีการติดตั้งยางล้อกับล้อแม่เหล็กเดี่ยว สำหรับกรณีไม่ติดตั้งยางล้อค่าแรงยึดเกาะนำมาจากการทดลองในหัวข้อที่ 4.1.1

เมื่อมีการปิดทับด้วยรูปลอกบนผนังทดสอบ พารามิเตอร์ของล้อแม่เหล็กที่จำนวนแท่งแม่เหล็กและความหนากระเพาะล้อของล้อแม่เหล็กซึ่งสอดคล้องกับแรงยึดเกาะที่ต่ำที่สุดซึ่งแสดงในตารางที่ 4.10 และหุ่นยนต์ยังคงสามารถทำการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งได้ ซึ่งพิจารณาเฉพาะกรณีการติดตั้งยางล้อชนิดยางซิลิโคนและยางธรรมชาติสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้คือ 1) ในกรณีติดตั้งยางล้อชนิดยางซิลิโคน ($tr = 3 \text{ mm}$ และ $NM = 52$) 2) ในกรณีติดตั้งยางล้อชนิดยางธรรมชาติ ($tr = 3 \text{ mm}$ และ $NM = 66$) ดังการเปรียบเทียบข้อมูลในตารางที่ 4.8 และตารางที่ 4.10 และสามารถแสดงด้วยกราฟดังรูปที่ 4.4 โดยข้อมูลของแรงยึดเกาะในตารางที่ 4.10 ได้มาจากการวัดแรงที่ใช้ในการแยกล้อแม่เหล็กเดี่ยวออกจากแผ่นเหล็กเรียบที่มีการปิดรูปลอกในลักษณะเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่ 3.4.1.1 โดยเพิ่มเติมกรณีการติดตั้งยางล้อกับล้อแม่เหล็กและการปิดทับรูปลอกบนแผ่นเหล็กเรียบ

เนื่องจากผลการทดสอบเป็นไปตามหลักกลศาสตร์ที่แสดงถึงเงื่อนไขในการยึดเกาะของหุ่นยนต์บนผนังดังที่กล่าวไว้แล้วในสมการที่ (3-1) ในหัวข้อที่ 3.5 นั่นคือแรงเสียดทานซึ่งเป็นผลคูณของแรงแม่เหล็กหรือค่าแรงยึดเกาะรวมของล้อแม่เหล็กทั้งหมดและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างล้อแม่เหล็กและผิวของผนังทดสอบต้องมีค่ามากกว่าเท่ากับน้ำหนักของหุ่นยนต์ซึ่งแสดงในเทอมของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานการไถล (Coefficient of the sliding friction) แรงแม่เหล็กรวมจากล้อแม่เหล็กทั้งหมดมวลรวมทั้งหมดของหุ่นยนต์ และความเร่งโน้มถ่วงแทนด้วยตัวแปร μ , f , M และ g ตามลำดับ และตัวแปรเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระที่ทำการศึกษาได้แก่ จำนวนแท่งแม่เหล็ก ความหนากระเพาะล้อ การมียู่และชนิดของยางล้อ และลักษณะของผิวสัมผัส ดังนั้นผลกระทบของตัวแปรอิสระเหล่านี้ต่อความสามารถในการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งของหุ่นยนต์จึงสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

ความหนาของกระเพาะล้อและจำนวนแท่งแม่เหล็กจะเป็นสิ่งที่กำหนดปริมาณของแรงยึดเกาะหรือแรงแม่เหล็กของล้อแม่เหล็กแต่ละล้อ (F_m) และแน่นอนต่อแรงยึดเกาะรวมของล้อแม่เหล็กสองล้อ (F_{mT}) ซึ่งแรงยึดเกาะรวมนี้สามารถพิจารณาได้เช่นเดียวกับตัวแปร f ซึ่งปรากฏในสมการที่ (3-1) ดังจะ

เห็นได้จากผลการทดลองวัดค่าแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กแบบสถิตทั้งกรณีแม่เหล็กล้อเดี่ยวและล้อยแม่เหล็กสองล้อบนเพลลาเดียวกันในหัวข้อ 4.1

ในขณะที่การมีอยู่และชนิดของยางล้อและลักษณะของผิวสัมผัสที่มีและไม่มี การปิดทับด้วยรูปดอกจะส่งผลต่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างล้อยแม่เหล็กและผิวสัมผัสซึ่งแทนด้วยตัวแปร μ ซึ่งปรากฏในสมการที่ (3-1) และต่อแรงแม่เหล็กรวมของล้อยแม่เหล็กสองล้อ F_{mT} หรือ f ในสมการที่ (3-1) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ความแตกต่างของลักษณะระหว่างผิวสัมผัสที่มีและไม่มี การปิดทับด้วยรูปดอกส่งผลต่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างล้อยแม่เหล็กและผิวสัมผัสซึ่งแทนด้วยตัวแปร μ ปรากฏในสมการที่ (3-1) ยิ่งไปกว่านั้นผลกระทบจากการปิดทับพื้นผิวสัมผัสด้วยรูปดอกยังส่งผลต่อแรงยึดเกาะรวมจากล้อยแม่เหล็กสองล้อซึ่งแทนด้วยตัวแปร f ในสมการที่ (3-1) ซึ่งมีสาเหตุมาจากรูปดอกซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่เป็นแม่เหล็ก (Nonmagnetic material [40]) วางคั่นระหว่างล้อยแม่เหล็กและแผ่นเหล็กทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของวงจรแม่เหล็กที่ฟลักซ์แม่เหล็กจะไหลจากขั้วเหนือไปขั้วใต้ของล้อยแม่เหล็กผ่านผนังเหล็กหรือแผ่นเหล็กซึ่งช่องว่างที่ทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องนี้และสามารถถูกพิจารณาเป็นช่องว่างอากาศ (Air gap) ส่งผลต่อแรงแม่เหล็กผลกระทบดังกล่าวจะเห็นได้จากเปอร์เซ็นต์การลดลงของแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กในตารางที่ 4.10 และส่งผลให้ความสามารถในการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งของหุ่นยนต์ลดลงดังการเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างตารางที่ 4.7 และ 4.8

การติดตั้งยางล้อมีผลต่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างล้อยแม่เหล็กซึ่งแทนด้วยตัวแปร μ และต่อแรงยึดเกาะรวมของล้อยแม่เหล็กสองล้อแทนด้วยตัวแปร f ซึ่งปรากฏในสมการที่ (3-1) ดังที่นำเสนอโดย Rochat และ คณะ [25] ในกรณีมีการปิดทับผิวสัมผัสด้วยรูปดอกการติดตั้งยางล้อสามารถเพิ่มสัมประสิทธิ์ความเสียดทานซึ่งจะเห็นได้จากความสามารถในการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งของหุ่นยนต์ล้อยแม่เหล็กที่มากกว่าการไม่ติดตั้งยางล้อแม้ว่าแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กจะถูกลดทอนลงจากการปิดทับพื้นผิวสัมผัสด้วยรูปดอกและการติดตั้งยางล้อดังผลการทดสอบในตารางที่ 4.8 และเปอร์เซ็นต์การลดลงของแรงยึดเกาะจากแรงแม่เหล็กในตารางที่ 4.10 ในกรณีที่ผิวสัมผัสไม่มี การปิดทับด้วยรูปดอก การติดตั้งยางล้อเป็นการเพิ่มสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและลดปริมาณของแรงยึดเกาะเช่นกัน ดังผลการทดสอบในตารางที่ 4.7 และเปอร์เซ็นต์การลดลงของแรงยึดเกาะจากแรงแม่เหล็กในตารางที่ 4.9 ซึ่งจะเห็นได้ว่า กรณีการติดตั้งยางล้อชนิดยางซิลิโคนที่ทุกความหนากระทักล้อและทุกจำนวนแท่งแม่เหล็ก ความสามารถในการยึดเกาะบนผนังของหุ่นยนต์ล้อยแม่เหล็กนั้นเป็นเช่นเดียวกับกรณีไม่มีการติดตั้งยางล้อแม้ว่าแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กกรณีติดตั้งยางล้อชนิดยางซิลิโคนมีค่าน้อยกว่ากรณีที่ไม่มีการติดตั้งยางล้อที่แต่ละจำนวนแท่งแม่เหล็กและความหนากระทักล้อเดียวกัน สำหรับ

กรณีการติดตั้งยางล้อชนิดยางธรรมชาตินั้น ความสามารถในการยึดเกาะบนผนังของหุ่นยนต์มีน้อยกว่าของกรณีไม่มีการติดตั้งยางล้อที่จำนวนแท่งแม่เหล็กเท่ากับ 30 แท่งที่ทุกความหนาของกระทะล้อ เนื่องจากได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานน้อยกว่าผลกระทบจากการลดลงของแรงยึดเกาะจากการติดตั้งยางล้อชนิดยางธรรมชาติ อย่างไรก็ตามที่จำนวนแท่งแม่เหล็กมากกว่าหรือเท่ากับ 52 แท่งที่ทุกความหนากระทะล้อ ความสามารถในการยึดเกาะของหุ่นยนต์ของกรณีติดตั้งยางล้อชนิดยางธรรมชาติจะเป็นเช่นเดียวกับของกรณีไม่มีการติดตั้งยางล้อแม้ว่าจะมีแรงยึดเกาะของกรณียางล้อชนิดยางธรรมชาติมีค่าน้อยกว่าของกรณีไม่มียางล้อที่แต่ละจำนวนแท่งแม่เหล็กและความหนากระทะล้อเดียวกัน ซึ่งเป็นผลมาจากการลดทอนของแรงยึดเกาะมีค่าน้อยลงจากการติดตั้งยางล้อชนิดยางธรรมชาติเมื่อจำนวนแท่งแม่เหล็กมีเท่ากับ 52 และ 66 แท่งและจากสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ได้จากการติดตั้งยางล้อชนิดยางธรรมชาติ สำหรับสาเหตุของการลดลงของแรงยึดเกาะในกรณีการติดตั้งยางล้อกับล้อแม่เหล็กนั้นเกิดจากแรงต้านในทิศตรงข้ามกับแรงแม่เหล็กเนื่องจากการเปลี่ยนรูปของยางดังที่แสดงในงานวิจัยของ Fernandez และคณะ [12] ที่กล่าวถึงผลของแรงต้านจากยางล้อที่ทำจากยางโอริง (O-ring) ติดตั้งกับล้อแม่เหล็กซึ่งแรงต้านนี้จะลดทอนแรงแม่เหล็กที่ผนังเหล็กทดสอบกระทำกับล้อแม่เหล็ก ซึ่งยางที่ติดตั้งในการทดสอบนี้จะมีความสูงกว่ากระทะล้อประมาณ 1 mm เมื่อยังไม่มีการเปลี่ยนรูปของยาง ซึ่งหากแรงต้านมีค่ามากพอหรือแรงแม่เหล็กมีค่าน้อยเกินไปก็จะทำให้วงจรแม่เหล็กซึ่งประกอบด้วยล้อแม่เหล็กและผิวสัมผัสของผนังเหล็กทดสอบเกิดความไม่ต่อเนื่องในลักษณะช่องว่างอากาศ (Air gap) คล้ายกับกรณีของการปิดทับรูปลอกบนผนังทดสอบและทำให้เกิดการลดลงของแรงแม่เหล็กซึ่งเป็นแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็ก

นอกจากการมีอยู่ของยางล้อแล้ว ชนิดของยางล้อที่แตกต่างกันส่งผลต่อการลดลงของแรงแม่เหล็กที่แตกต่างกัน ดังจะเห็นได้จากเปอร์เซ็นต์การลดลงของแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กในตารางที่ 4.9 และ ตารางที่ 4.10 และความสามารถของการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งของหุ่นยนต์ที่แตกต่างกันดังแสดงใน ตารางที่ 4.7 และ ตารางที่ 4.8 ซึ่งพบว่า ล้อแม่เหล็กที่ติดตั้งยางล้อชนิดยางซิลิโคนให้ความสามารถในการยึดเกาะสูงกว่าและมีการลดลงของแรงแม่เหล็กหรือแรงยึดเกาะที่ต่ำกว่าล้อแม่เหล็กที่ติดตั้งยางล้อชนิดยางธรรมชาติซึ่งสาเหตุมาจากความแข็งของยางล้อชนิดยางซิลิโคนมีค่าต่ำกว่าความแข็งของยางล้อชนิดยางธรรมชาติ

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการยึดเกาะบนผนังของหุ่นยนต์ขณะหยุดนิ่งในกรณีต่างๆ ได้แก่ ไม่มียางล้อ ยางล้อชนิดยางซิลิโคน และยางล้อชนิดยางธรรมชาติ จะเห็นว่า ยางล้อชนิดยางซิลิโคนให้ความสามารถในการยึดเกาะดีที่สุด

ในการศึกษาผลกระทบจากยางล้อและลักษณะผิวสัมผัสเหล่านี้ต่อแรงแม่เหล็กซึ่งเป็นแรงยึดเกาะและความสามารถในการยึดเกาะของหุ่นยนต์ของการทดสอบนี้ ผลการทดสอบที่ได้สอดคล้องกับข้อมูลซึ่งปรากฏในงานวิจัยโดย Rochat และคณะ [25] Fernandez และคณะ [12] Hutter [29] และ Yukawa และคณะ [31] เป็นต้น

การทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่า ความแตกต่างของตัวแปรอิสระได้แก่ ความหนาของกระทะล้อ จำนวนแท่งแม่เหล็ก การมีอยู่และชนิดของยาง และลักษณะของผิวของผนังทดสอบ มีผลทั้งต่อแรงแม่เหล็ก ซึ่งก็คือแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กและต่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสและล้อแม่เหล็กซึ่งนำไปสู่ความสามารถในการยึดเกาะของหุ่นยนต์ขณะหยุดนิ่งที่แตกต่างกันบนผนังทดสอบซึ่งทำจากเหล็ก

ตารางที่ 4.7 ความสามารถในการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งบนผนังทดสอบ (S_1) ของหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็ก

จำนวนแท่งแม่เหล็ก (NM)	ความสามารถในการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งบนผนัง (Ad)		
	<i>tire</i>	$tr = 3 \text{ mm}$	$tr = 5 \text{ mm}$
30	<i>no tire</i>	ได้	ได้
	<i>SR</i>	ได้	ได้
	<i>NR</i>	ไม่ได้	ไม่ได้
52	<i>no tire</i>	ได้	ได้
	<i>SR</i>	ได้	ได้
	<i>NR</i>	ได้	ได้
66	<i>no tire</i>	ได้	ได้
	<i>SR</i>	ได้	ได้
	<i>NR</i>	ได้	ได้

ตารางที่ 4.8 ความสามารถในการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งบนผนังทดสอบที่มีการปิดทับด้วยรูปลอก (S_2) ของหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็ก

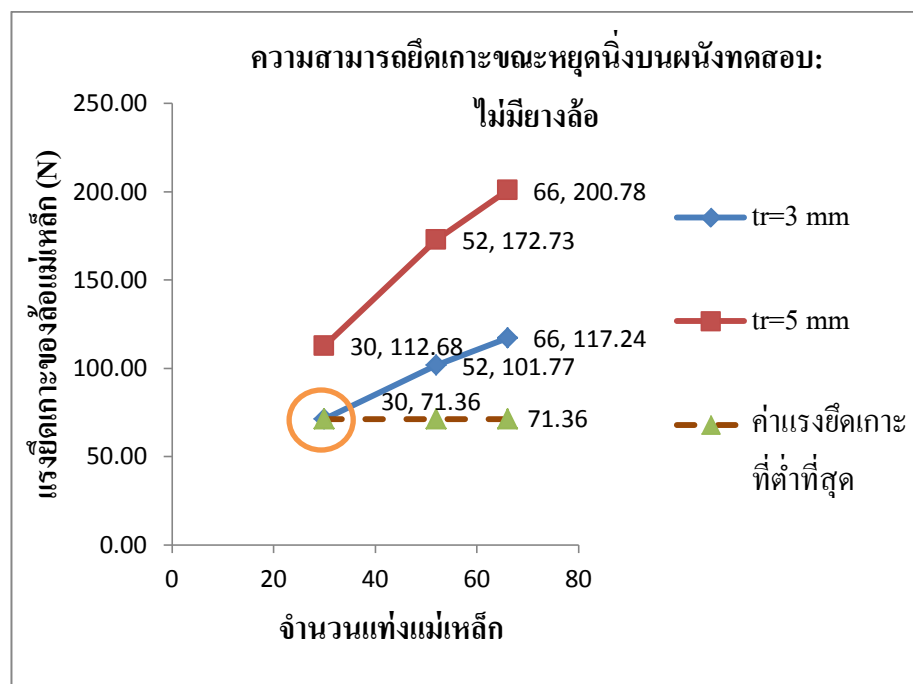
จำนวนแท่งแม่เหล็ก (NM)	ความสามารถในการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งบนผนัง (Ad)		
	<i>tire</i>	$tr = 3$ mm	$tr = 5$ mm
30	<i>no tire</i>	ไม่ได้	ไม่ได้
	<i>SR</i>	ไม่ได้	ไม่ได้
	<i>NR</i>	ไม่ได้	ไม่ได้
52	<i>no tire</i>	ไม่ได้	ไม่ได้
	<i>SR</i>	ได้	ได้
	<i>NR</i>	ไม่ได้	ไม่ได้
66	<i>no tire</i>	ไม่ได้	ไม่ได้
	<i>SR</i>	ได้	ได้
	<i>NR</i>	ได้	ได้

ตารางที่ 4.9 แรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กที่สัมผัสกับแผ่นเหล็กเมื่อ ไม่มีและมีการติดตั้งยางล้อ

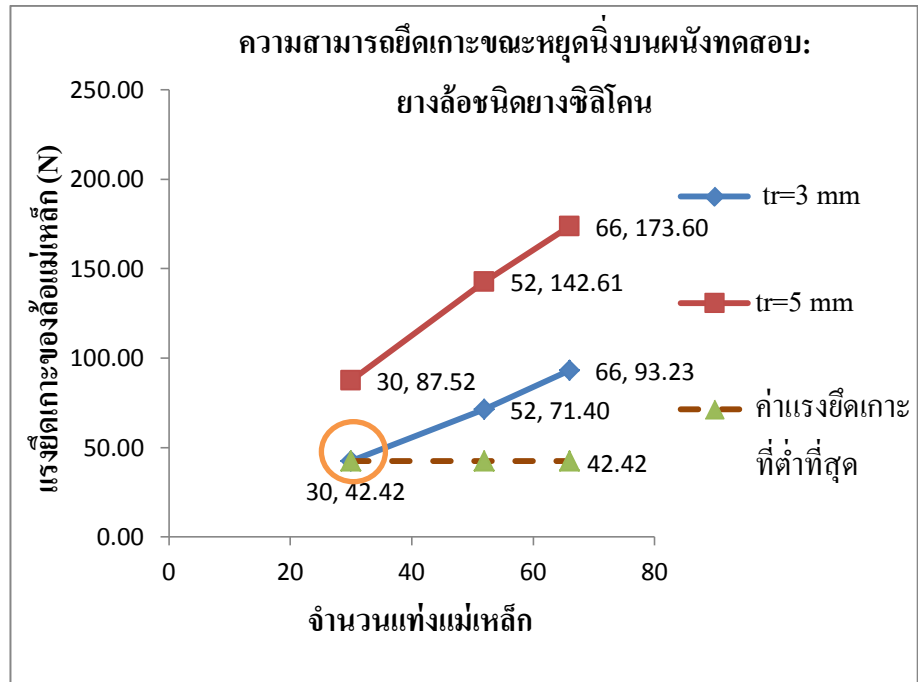
จำนวนแท่ง แม่เหล็ก (NM)	<i>tire</i>	แรงยึดเกาะ (F_m)		เปอร์เซ็นต์การลดลงของ แรงยึดเกาะ	
		$tr = 3$ mm	$tr = 5$ mm		
30	<i>no tire</i>	71.36 N	112.68 N	-	-
	<i>NR</i>	6.32 N	21.63 N	91.14	80.80
	<i>SR</i>	42.42 N	87.52 N	40.56	22.33
52	<i>no tire</i>	101.77 N	172.73 N	-	-
	<i>NR</i>	32.92 N	109.57 N	67.65	36.57
	<i>SR</i>	71.40 N	142.61 N	29.84	17.44
66	<i>no tire</i>	117.24 N	200.78 N	-	-
	<i>NR</i>	59.12 N	129.25 N	49.58	35.62
	<i>SR</i>	93.23 N	173.60 N	20.48	13.54

ตารางที่ 4.10 แรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กที่สัมผัสกับแผ่นเหล็กที่มีการปิดทับด้วยรูปดอกเมื่อไม่มี
และมีการติดตั้งยางล้อ

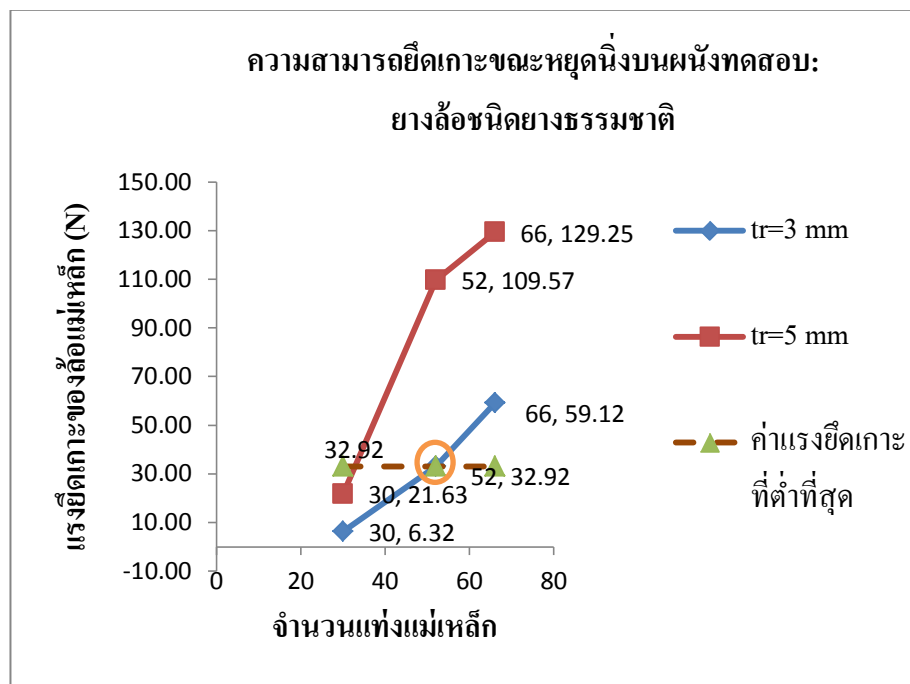
จำนวนแท่ง แม่เหล็ก (NM)	tire	แรงยึดเกาะ (F_m)		เปอร์เซ็นต์การลดลงของแรง ยึดเกาะ	
		$tr = 3$ mm	$tr = 5$ mm		
30	no tire	17.05 N	23.09 N	-	-
	NR	3.94 N	5.37 N	76.89	76.74
	SR	4.16 N	6.10 N	75.62	73.56
52	no tire	46.77 N	69.86 N	-	-
	NR	12.39 N	19.11 N	73.51	72.65
	SR	18.04 N	42.50 N	61.43	39.16
66	no tire	65.80 N	105.40 N	-	-
	NR	20.94 N	35.98 N	68.18	65.86
	SR	37.31 N	88.64 N	43.30	15.90



(ก)

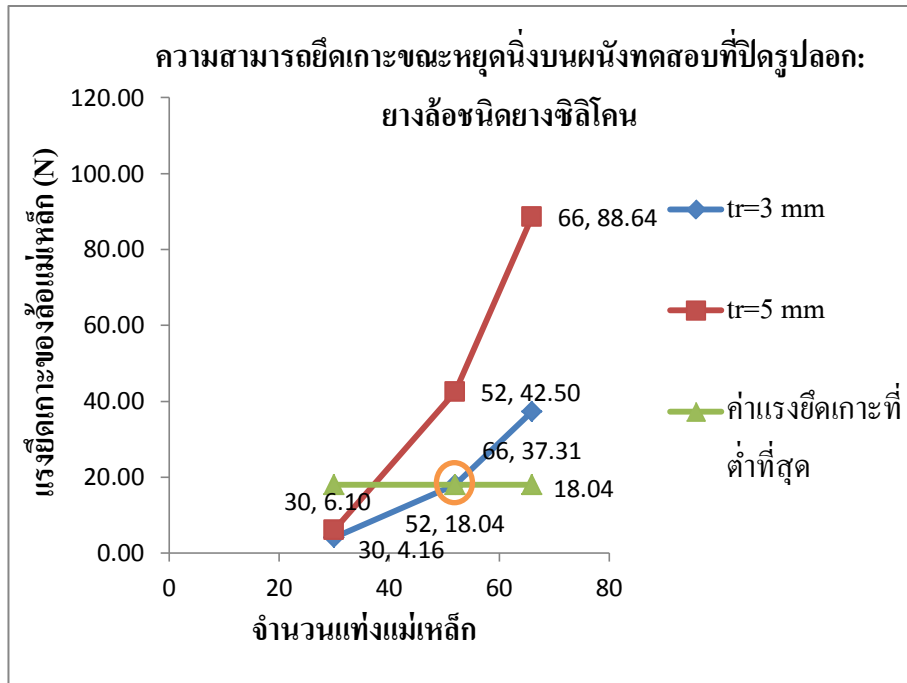


(ข)

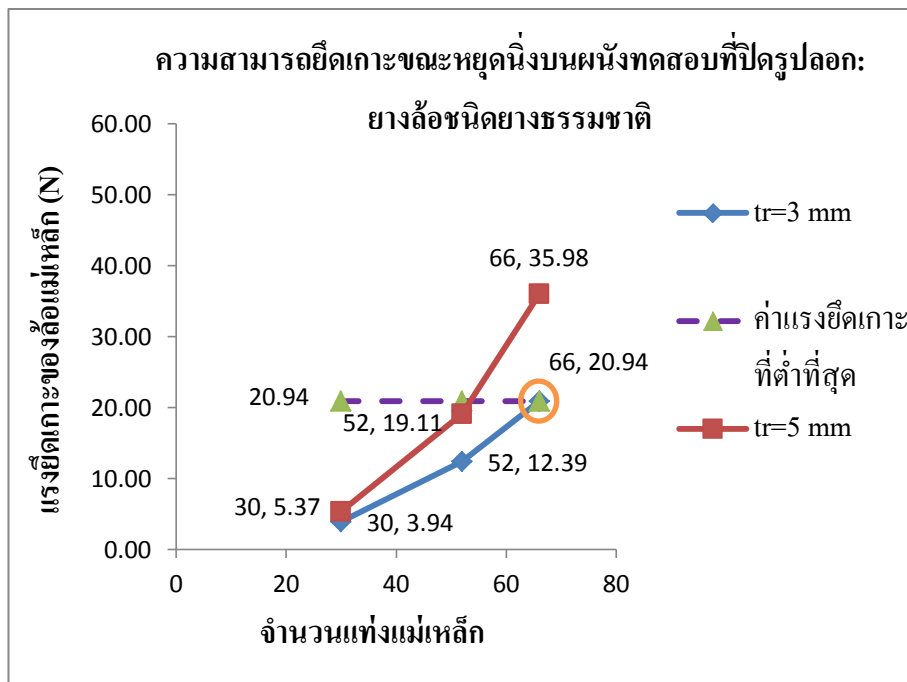


(ค)

รูปที่ 4.3 พารามิเตอร์ของล้อแม่เหล็กที่หุ่นยนต์สามารถยึดเกาะได้ขณะหยุดนิ่งบนผนังทดสอบที่ไม่มี การปิดทับด้วยรูปลอก จำแนกตามการมียูและชนิดของยางล้อ: (ก) ไม่มียางล้อ (ข) ยาง ซิลิโคน (ค) ยางธรรมชาติ



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.4 พารามิเตอร์ของล้อแม่เหล็กที่หุ่นยนต์สามารถยึดเกาะได้ขณะหยุดนิ่งบนผนังทดสอบที่มีการปิดทับด้วยรูปลอก จำแนกชนิดของยางล้อ: (ก) ยางซิลิโคน (ข) ยางธรรมชาติ

4.2.2 การทดสอบความสามารถในการไต่บนผนังของหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็ก : ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ 3.4.2.2

ความสามารถในการไต่ขึ้นและลงของหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็กบนผนังทดสอบ (CI) เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ภายใต้ความแตกต่างของตัวแปรอิสระได้แก่ ความหนาของกระทะล้อ (tr) จำนวนแท่งแม่เหล็ก (NM) การมีอยู่และชนิดของยางล้อ ($tire$) และทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ (dir) ผลการทดสอบสามารถแสดงดังตารางที่ 4.11. สำหรับความเร็วที่ปรากฏนั้นเป็นค่าเฉลี่ยของความเร็วจากทดสอบ 3 ครั้งในแต่ละกรณีที่หุ่นยนต์สามารถทำการไต่ได้ในทิศทางนั้นๆ และจะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

ในกรณีไม่มีการติดตั้งยางล้อ หุ่นยนต์มีความสามารถในการไต่ขึ้นและไต่ลงเมื่อจำนวนแท่งแม่เหล็กเท่ากับ 52 แท่ง และ 66 แท่งที่ความหนากระทะล้อ 5 mm และหุ่นยนต์สามารถไต่ลงได้แต่ไม่สามารถไต่ขึ้นได้เมื่อจำนวนแท่งแม่เหล็กเท่ากับ 30 แท่ง ที่ความหนากระทะล้อเท่ากับ 5 mm และจำนวนแท่งแม่เหล็กเท่ากับ 52 แท่ง และ 66 แท่งที่ความหนากระทะล้อเท่ากับ 3 mm ในกรณีการติดตั้งยางล้อชนิดยางซิลิโคน หุ่นยนต์มีความสามารถในการไต่ขึ้นและไต่ลงได้เมื่อจำนวนแท่งแม่เหล็กมากกว่าหรือเท่ากับ 52 แท่งที่ทุกความหนากระทะล้อ เมื่อจำนวนแท่งเท่ากับ 30 แท่งหุ่นยนต์จะสามารถไต่ขึ้นและไต่ลงเฉพาะที่ความหนากระทะล้อเท่ากับ 5 mm ในกรณีการติดตั้งยางล้อชนิดยางธรรมชาติ หุ่นยนต์มีความสามารถในการไต่ขึ้นและไต่ลงเมื่อจำนวนแท่งแม่เหล็กเท่ากับ 52 แท่ง ที่ความหนากระทะล้อ 5 mm และเมื่อจำนวนแท่งแม่เหล็กเท่ากับ 66 แท่งที่ทุกความหนากระทะล้อ

เมื่อพิจารณาผลของการทดสอบความสามารถในการเคลื่อนที่บนผนังทดสอบในทิศขึ้น (Upward direction) กำหนดโดยตัวแปร $+y$ และทิศลง (Downward direction) กำหนดโดยตัวแปร $-y$ ดังตารางที่ 4.11 ร่วมกับค่าแรงยึดเกาะที่วัดได้ของล้อแม่เหล็กที่กระทะต่อแผ่นเหล็กเรียบทั้งกรณีติดตั้งยางและไม่ติดตั้งยางล้อจากตารางที่ 4.9 พบว่า จำนวนแท่งแม่เหล็กและความหนากระทะล้อซึ่งสอดคล้องกับแรงยึดเกาะที่ต่ำที่สุดดังตารางที่ 4.9 และหุ่นยนต์ยังสามารถทั้งไต่ขึ้นและไต่ลงในแนวตั้งจำแนกตามการมีอยู่และชนิดของยางล้อคือ 1) ในกรณีไม่มียางล้อ (tr 5 mm และ $NM = 52$) 2) ในกรณีติดตั้งยางซิลิโคน ($tr = 3$ mm และ $NM = 52$) 3) ในกรณีติดตั้งยางธรรมชาติ ($tr = 3$ mm และ $NM = 66$) ดังการเปรียบเทียบข้อมูลในตารางที่ 4.11 และตารางที่ 4.9 และสามารถแสดงด้วยกราฟดังรูปที่ 4.5 โดยข้อมูลของแรงยึดเกาะในตารางที่ 4.9 ได้มาจากการวัดแรงที่ใช้ในการแยกล้อแม่เหล็กออกจากแผ่นเหล็กเรียบที่ไม่มีการปิดรูปลอก

สำหรับกรณีที่หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่หรือไต่ในแนวตั้งได้เฉพาะทิศทางลงเพียงทิศเดียวมีในกรณีไม่มียางล้อ เมื่อจำนวนแท่งแม่เหล็กเท่ากับ 30 แท่ง ที่กระทะล้อหนา 5 mm และจำนวนแท่งแม่เหล็ก

เท่ากับ 52 และ 66 แห่ง ที่ความหนากระดะล้อเท่ากับ 3 mm ดังนั้นจะเห็นได้ว่าทิศทางการเคลื่อนที่มีผลต่อความสามารถในการเคลื่อนที่แนวตั้งของหุ่นยนต์บนผนังด้วย

การเคลื่อนที่หรือการไต่ของหุ่นยนต์บนผนังในแนวตั้งสามารถอธิบายโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งแสดงในเทอมของมวลของหุ่นยนต์ (M) ความเร่งโน้มถ่วง (g) มุมของความเอียง (θ) สัมประสิทธิ์ความเสียดทานการกลิ้ง (μ) แรงแม่เหล็กรวมจากล้อแม่เหล็กทั้งหมด (f) จำนวนล้อแม่เหล็ก (k) แรงบิดขับจากมอเตอร์ (τ) และรัศมีของล้อแม่เหล็ก (r) ดังความสัมพันธ์ตามสมการที่ (3-2) และสมการที่ (3-3) ในหัวข้อที่ 3.6 ซึ่งบอกถึงปริมาณของแรงบิดขับที่ต้องการจากมอเตอร์ (τ) เพื่อใช้สำหรับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในแนวตั้ง

ความสามารถในการเคลื่อนที่ในแนวตั้งหรือการไต่ของหุ่นยนต์บนผนังขึ้นกับแรงดึง (Traction force) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างล้อแม่เหล็กและพื้นผิวสัมผัส และแรงที่ผิวสัมผัสกระทำต่อล้อแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับผิวสัมผัสซึ่งขึ้นกับขนาดของแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กหรือแรงแม่เหล็ก โดยสามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกับการเคลื่อนที่ของยานพาหนะที่เคลื่อนที่ด้วยล้อบนพื้น (Ground wheeled vehicle) ดังแสดงใน [41] และ [42] ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างล้อและผิวสัมผัส และค่าแรงที่ผิวสัมผัสกระทำต่อล้อแม่เหล็กจะต้องมีค่ามากเพียงพอที่จะไม่ให้เกิดการลื่นไถล (Slip)

ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอิสระได้แก่ จำนวนของแท่งแม่เหล็ก ความหนากระดะล้อ และการมีอยู่และชนิดของยางต่อความสามารถในการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของหุ่นยนต์บนผนังด้วยความเร็วคงที่สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

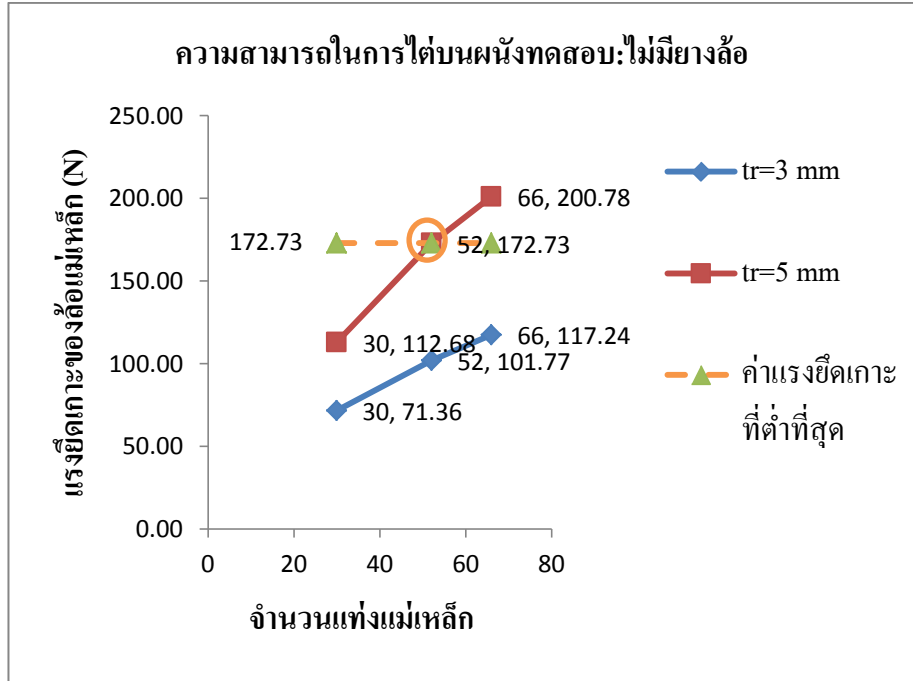
การเพิ่มขึ้นของจำนวนแท่งแม่เหล็กและความหนากระดะล้อทำให้แรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กเดี่ยว (F_m) แต่ละล้อมีค่าเพิ่มขึ้นและทำให้ผลรวมของแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กสองล้อ (F_{mT}) มีค่ามากขึ้นด้วย ดังนั้นแรงที่พื้นผิวกระทำต่อล้อแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับผิวสัมผัสจึงมีค่ามากขึ้นดังผลการทดลองในหัวข้อ 4.1 ในขณะที่การติดตั้งยางล้อทำให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างล้อแม่เหล็กและมีค่าเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของแรงยึดเกาะจากแรงแม่เหล็กและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานนี้ส่งผลต่อแรงดึง (Traction force) ที่มากขึ้นซึ่งนำไปสู่ความสามารถในการเคลื่อนที่แนวตั้งหรือการไต่ของหุ่นยนต์บนผนังที่เพิ่มมากขึ้นดังตารางที่ 4.11 อย่างไรก็ตามแม้ว่าการติดตั้งยางล้อจะเป็นการเพิ่มสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแต่ก็ทำให้เกิดช่องว่างอากาศ (Air gap) ด้วยและทำให้แรงแม่เหล็กซึ่งก็คือแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กแต่ละล้อลดลงและแน่นอนทำให้แรงยึดเกาะรวมของล้อแม่เหล็กสองล้อลดลง ดังจะเห็นได้จากเปอร์เซ็นต์การลดลงของแรงยึดเกาะดังตารางที่ 4.9 ซึ่งล้อแม่เหล็กที่ติดตั้งยางล้อชนิดยางซิลิโคนมีการลดลงของแรงยึดเกาะน้อยกว่าในกรณีของล้อแม่เหล็กที่ติดตั้งยางชนิดยาง

ธรรมชาติทำให้ช่องว่างอากาศ (Air gap) มีค่าลดลงเนื่องจากมีความแข็งของยางล้อชนิดยางซิลิโคนมีค่าต่ำกว่าความแข็งของยางล้อชนิดยางธรรมชาติ ล้อแม่เหล็กที่ติดตั้งยางล้อชนิดยางซิลิโคนจึงมีแรงยึดเกาะมากกว่ากรณีของล้อแม่เหล็กที่ติดตั้งยางล้อชนิดยางธรรมชาติ ส่งผลให้ล้อแม่เหล็กที่ติดตั้งยางล้อชนิดยางซิลิโคนให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของหุ่นยนต์ที่ดีกว่าการติดตั้งยางล้อชนิดยางธรรมชาติ ซึ่งผลกระทบจากยางล้อต่อแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็ก สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และความสามารถในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์นี้สอดคล้องกับข้อมูลที่น่าเสนอในงานวิจัยของ Fernandez และคณะใน [11] และ [12] และปรากฏในงานวิจัยของ Rochat และคณะ [25] Yukawa และคณะ [31] เป็นต้น

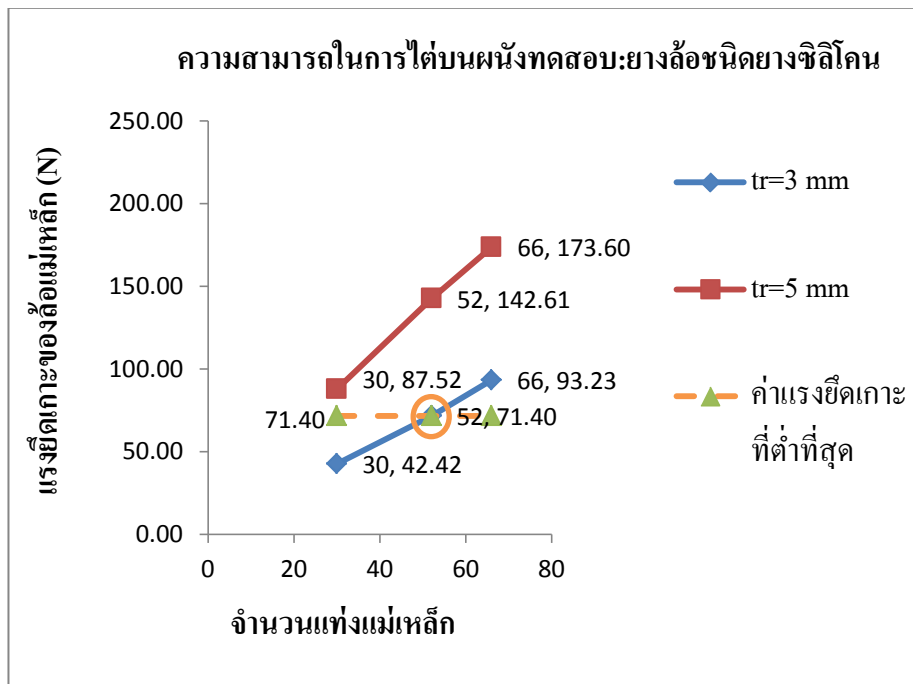
จากการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าความแตกต่างของตัวแปรอิสระต่อไปนี้ได้แก่ ความหนาของกระทะล้อ จำนวนแท่งแม่เหล็ก การมีอยู่และชนิดของยาง และทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ มีผลกระทบต่อความสามารถในการเคลื่อนที่ในแนวตั้งบนผนังทดสอบของหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็ก

ตารางที่ 4.11 ความสามารถในการไต่ขึ้นและลงบนผนังทดสอบของหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็ก

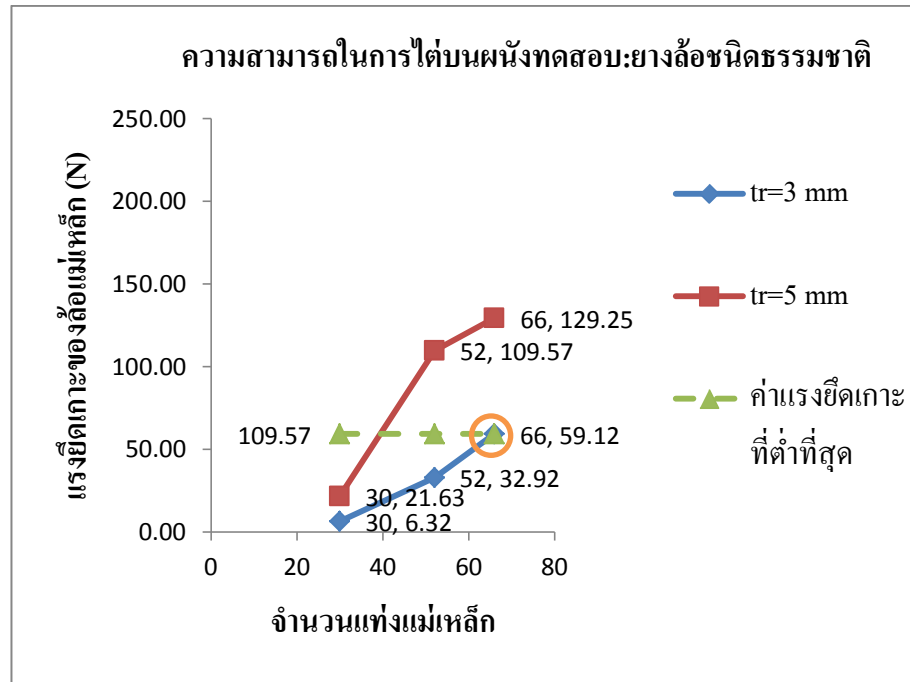
จำนวนแท่งแม่เหล็ก (<i>NM</i>)	<i>tire</i>	ความสามารถในการไต่บนผนังของหุ่นยนต์ (<i>CI</i>) : ความเร็วมีหน่วย mm/s			
		<i>tr</i> = 3 mm		<i>tr</i> = 5 mm	
		ขึ้น	ลง	ขึ้น	ลง
30	<i>no tire</i>	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	107.7
	<i>SR</i>	ไม่ได้	ไม่ได้	86.4	111.6
	<i>NR</i>	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้
52	<i>no tire</i>	ไม่ได้	111.9	90.9	105.3
	<i>SR</i>	83.6	110.6	87.3	108.2
	<i>NR</i>	ไม่ได้	ไม่ได้	86.3	113.3
66	<i>no tire</i>	ไม่ได้	117.3	90.8	105.7
	<i>SR</i>	87.9	110.3	89.4	108.8
	<i>NR</i>	80.2	119.7	85.4	110.9



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.5 พารามิเตอร์ของลวดแม่เหล็กที่หุ่นยนต์สามารถทำการเคลื่อนที่ในแนวตั้งบนผนังทดสอบที่ไม่มีการปิดทับด้วยรูปลอก จำแนกตามการมีอยู่และชนิดของยางล้อ : (ก) ไม่มียางล้อ (ข) ยางซิลิโคน (ค) ยางธรรมชาติ

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

ในการพิจารณาแรงยึดเกาะล้อยแม่เหล็กในของกรณีล้อยแม่เหล็กเดี่ยวพบว่า การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอิสระได้แก่ ความหนาของกระทะล้อย ความหนาของขอบกระทะล้อยที่เพิ่มเติม และจำนวนแท่งแม่เหล็ก ส่งผลต่อแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กเดี่ยว ในกรณีของล้อยแม่เหล็กสองล้อยบนเพลลาเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอิสระได้แก่ ระยะห่างระหว่างล้อยแม่เหล็กสองล้อย และการวางตำแหน่งของขั้วแม่เหล็กของล้อยแม่เหล็กสองล้อย มีผลต่อแรงยึดเกาะรวมของล้อยแม่เหล็กสองล้อยและต่อความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเกาะรวมของล้อยแม่เหล็กสองล้อยบนเพลลาเดียวกันและแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กเดี่ยว ดังจะเห็นได้จากผลการทดลองซึ่งแสดงในหัวข้อ 4.1.1 และ 4.1.2

ในกรณีล้อยแม่เหล็กเดี่ยว การเพิ่มของตัวแปรได้แก่ จำนวนแท่งแม่เหล็ก ความหนากระทะล้อย และความหนาขอบกระทะล้อยเพิ่มเติม ทำให้แรงยึดเกาะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบแนวทางในการเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างการเพิ่มความหนาของกระทะล้อยและการเพิ่มจำนวนแท่งแม่เหล็กจากค่าอัตราส่วนการเพิ่มแรงยึดเกาะต่อการเพิ่มขึ้นของมวลพบว่า ในกรณีของกระทะล้อยปกติ การเพิ่มจำนวนแท่งแม่เหล็กจะมีประสิทธิภาพมากกว่าเพราะอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของแรงยึดเกาะต่อการเพิ่มขึ้นของมวลล้อยแม่เหล็กมีค่ามากกว่า

ในกรณีล้อยแม่เหล็กที่มีกระทะล้อยที่มีขอบกระทะล้อยเพิ่มเติม การเพิ่มความหนาขอบกระทะล้อยเพิ่มเติมมีอัตราส่วนของการเพิ่มของแรงยึดเกาะต่อการเพิ่มขึ้นของมวลที่สูงแต่ปริมาณของแรงยึดเกาะน้อยกว่าการเพิ่มความหนาของกระทะล้อยทั้งกระทะล้อยและความแตกต่างของแรงยึดเกาะระหว่างกรณีกระทะล้อยปกติและกระทะล้อยที่มีความหนาเพิ่มเติมซึ่งมีความหนาที่ขอบกระทะล้อยเท่ากันที่แต่ละจำนวนแท่งแม่เหล็ก โดยจะเห็นอย่างได้ชัดเจนเมื่อจำนวนแท่งแม่เหล็กมีค่ามากขึ้น อย่างไรก็ตามการมีขอบกระทะล้อยเพิ่มเติมก็เป็นวิธีการเพิ่มแรงแม่เหล็กที่มีประสิทธิภาพวิธีการหนึ่ง

ในกรณีล้อยแม่เหล็กสองล้อย ระยะห่างระหว่างล้อยและการวางตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของล้อยแม่เหล็กทั้งสองล้อยส่งผลต่อแรงยึดเกาะรวมของล้อยแม่เหล็กสองล้อย เมื่อขั้วแม่เหล็กของล้อยแม่เหล็กเหมือนกันและหันเข้าหากัน แรงยึดเกาะรวมของล้อยแม่เหล็กสองล้อยจะมีค่าประมาณสองเท่าของแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กเดี่ยวที่จำนวนแท่งแม่เหล็กคู่แต่ละล้อยเท่ากับจำนวนแท่งแม่เหล็กของล้อยแม่เหล็กเดี่ยว ในกรณีขั้วแม่เหล็กของล้อยแม่เหล็กทั้งสองล้อยต่างกันและหันเข้าหากัน เมื่อระยะห่างระหว่างล้อยแม่เหล็กทั้งสองมีค่าน้อย แรงยึดเกาะรวมของล้อยแม่เหล็กคู่จะลดลงอย่างเห็นได้ชัดและมีค่าน้อยกว่าแรงยึดเกาะรวมของล้อยแม่เหล็กคู่ที่ขั้วแม่เหล็กเหมือนกันและหันเข้าหากันที่จำนวนแท่งแม่เหล็กเท่ากัน ยิ่งไปกว่า

นั้นแรงยึดเกาะรวมของล้อยแม่เหล็กคู่ที่ขั้วแม่เหล็กต่างกันและหันเข้าหากันมีค่าน้อยกว่าสองเท่าของแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กเดี่ยวเมื่อจำนวนแท่งแม่เหล็กคู่แต่ละล้อเท่ากับจำนวนแท่งแม่เหล็กของล้อยแม่เหล็กเดี่ยว อย่างไรก็ตามการที่ขั้วแม่เหล็กที่หันเข้าหากันของล้อยแม่เหล็กทั้งสองล้อต่างกันและมีระยะห่างระหว่างล้อยแม่เหล็กทั้งสองล้อตามแนวแกนเพลามีค่าน้อยซึ่งอาจสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการลดแรงแม่เหล็กที่มีมากเกินไปได้ ดังนั้นการวางตำแหน่งของขั้วแม่เหล็กระหว่างล้อยแม่เหล็กทั้งสองล้อเป็นประเด็นที่ไม่อาจมองข้ามในการออกแบบหุ่นยนต์ล้อยแม่เหล็กขั้วแม่เหล็กของล้อยแม่เหล็กทั้งสองจะต้องเป็นชนิดเหมือนกันและหันเข้าหากันจึงจะได้แรงยึดเกาะรวม โดยประมาณเป็นจำนวนเท่าของแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กเดี่ยว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบางสถานการณ์ล้อยแม่เหล็กทั้งสองล้ออาจจะมีระยะห่างตามแนวแกนน้อยเนื่องมาจากข้อจำกัดในการออกแบบและโครงสร้างของหุ่นยนต์ เช่น ขนาดและรูปร่างของหุ่นยนต์ การวางตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของล้อยแม่เหล็กทั้งสองล้อจึงเป็นสิ่งที่สำคัญที่จะต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบหุ่นยนต์ล้อยแม่เหล็ก

ทางเลือกของการเพิ่มแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กก็เป็นสิ่งสำคัญเช่นกันที่นักออกแบบและวิศวกรจะต้องคำนึงถึง หากไม่มีข้อจำกัดในเรื่องการเพิ่มขึ้นของจำนวนแท่งแม่เหล็กและราคา การเพิ่มแรงยึดเกาะโดยการเพิ่มจำนวนแท่งแม่เหล็กซึ่งจะเป็นการเพิ่มค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กนั้นจะมีประสิทธิภาพมากกว่าการเพิ่มความหนาของล้อยแม่เหล็ก ดังเห็นได้จากอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของแรงยึดเกาะต่อการเพิ่มขึ้นของมวลและค่าแรงยึดเกาะที่ได้ ซึ่งการเพิ่มจำนวนแท่งแม่เหล็กทำให้สามารถลดมวลของหุ่นยนต์เนื่องจากมวลของล้อยแม่เหล็กลดลงแต่ยังคงได้แรงยึดเกาะตามที่ต้องการแต่พลังงานและขนาดของมอเตอร์ที่ป้อนให้กับหุ่นยนต์ก็จะมีขนาดลดลง อย่างไรก็ตามการเพิ่มแรงยึดเกาะโดยการเพิ่มความหนาของล้อยแม่เหล็กอาจเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการเพิ่มค่าแรงยึดเกาะได้ในกรณีที่ไม่สามารถเพิ่มค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กด้วยการเพิ่มจำนวนแท่งแม่เหล็กจากข้อจำกัดต่างๆ

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบความสามารถในการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งของหุ่นยนต์บนผนังทดสอบที่ทำจากเหล็ก การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอิสระได้แก่ ความหนาของล้อยแม่เหล็ก จำนวนแท่งแม่เหล็ก การมีอยู่และชนิดของยางล้อ และลักษณะของพื้นผิวของผนังทดสอบมีผลต่อความสามารถในการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งของหุ่นยนต์ล้อยแม่เหล็กโดยส่งผลกระทบต่อแรงเสียดทานที่ทำให้เกิดการยึดเกาะ ดังจะเห็นได้จากการผลการทดสอบซึ่งแสดงในหัวข้อ 4.2.1

เนื่องจากแรงเสียดทานขึ้นอยู่กับแรงยึดเกาะของล้อยแม่เหล็กซึ่งมีทิศตั้งฉากกับผิวสัมผัสและสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน การเพิ่มจำนวนแท่งแม่เหล็กและความหนาของล้อยแม่เหล็กจะทำให้ค่าแรงแม่เหล็กมีค่ามากขึ้น ส่วนการมีอยู่ของยางล้อจะทำให้สัมประสิทธิ์ของความเสียดทานระหว่างล้อยแม่เหล็กและผิวสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ก็ทำให้แรงแม่เหล็กลดลงจากผลของช่องว่างอากาศ (Air gap) ซึ่งการติดตั้งยางล้อชนิดยางซิลิโคนจะมีการลดลงของแรงแม่เหล็กน้อยกว่าการติดตั้งยางล้อชนิดยางธรรมชาติ

เพราะมีความแข็งน้อยกว่า ส่วนการปิดทับรูปลอกบนผนังทดสอบ ทำให้แรงแม่เหล็กลดลงเนื่องจากผลของช่องว่างอากาศ (Air gap) และมีผลต่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ดังนั้นการเพิ่มของความหนากระทะลื้อและจำนวนแท่งแม่เหล็ก และการติดตั้งยางซิลิโคนจะทำให้ความสามารถในการยึดเกาะขณะหยุดนิ่งของหุ่นยนต์เพิ่มขึ้น ในขณะที่การปิดทับผนังทดสอบที่ทำจากเหล็กด้วยรูปลอกทำให้ความสามารถดังกล่าวลดลง

สำหรับการศึกษาและวิเคราะห์ความสามารถในการเคลื่อนที่ในแนวตั้งด้วยความเร็วคงที่ของหุ่นยนต์ลื้อแม่เหล็กบนผนังภายใต้ตัวแปรอิสระหรือพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันได้แก่ จำนวนแท่งแม่เหล็ก ความหนากระทะลื้อ การมีอยู่และชนิดของยางลื้อ และทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ จากผลการทดสอบพบว่า ความแตกต่างของตัวแปรอิสระเหล่านี้มีผลต่อความสามารถในการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของหุ่นยนต์ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของจำนวนแท่งแม่เหล็กและความหนากระทะลื้อเหล่านี้มีผลต่อแรงยึดเกาะของลื้อแม่เหล็ก ในขณะที่การมีอยู่และชนิดของยางลื้อมีซึ่งขนาดของช่องว่างอากาศ (Air gap) มีผลต่อแรงยึดเกาะของลื้อแม่เหล็กและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างลื้อแม่เหล็กและผิวสัมผัส ซึ่งทั้งแรงยึดเกาะและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานดังกล่าวส่งผลต่อค่าแรงดึง (Traction force) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอิสระเหล่านี้จึงนำไปสู่ความแตกต่างของความสามารถในการเคลื่อนที่ในแนวตั้งหรือการไต่ขึ้นลงของหุ่นยนต์ด้วยความเร็วคงที่บนทดสอบที่ทำจากเหล็ก ดังจะเห็นได้จากผลการทดสอบในหัวข้อ 4.2.2

จากการศึกษาและวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่าลื้อแม่เหล็กที่บรรจุแม่เหล็กชั้นเหล็กขนาดเล็กหลายชั้นสามารถตอบสนองการเพิ่มจำนวนแท่งแม่เหล็กได้อย่างสะดวกและประหยัด ต่างจากการใช้แม่เหล็กที่ทำจากแม่เหล็กจานชั้นใหญ่เพียงชั้นเดียวซึ่งการปรับเปลี่ยนรูปร่างและปริมาตรกระทำได้ยากซึ่งสอดคล้องกับสิ่งที่กล่าวโดย Hutter [29] และ Fernandez และคณะ [11] และอาจมีราคาที่สูงหากต้องทำขึ้น โดยความต้องการเฉพาะ

ความเข้าใจถึงผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรอิสระที่มีผลต่อการเพิ่มหรือลดของแรงยึดเกาะของลื้อแม่เหล็กและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างลื้อแม่เหล็กและพื้นผิวสัมผัส ตลอดจนการทราบถึงทางเลือกที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มและลดค่าแรงยึดเกาะและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานดังกล่าวจะนำไปสู่แนวทางการออกแบบลื้อแม่เหล็กที่เหมาะสม นั่นคือได้ปริมาณแรงยึดเกาะของลื้อแม่เหล็กและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างลื้อแม่เหล็กและผิวสัมผัสซึ่งเพียงพอที่จะสามารถตอบสนองความต้องการในการยึดเกาะและการเคลื่อนที่บนผนังของหุ่นยนต์ลื้อแม่เหล็ก ดังนั้นจากผลการศึกษาและวิเคราะห์ของงานวิจัยนี้จะช่วยให้กระบวนการออกแบบลื้อแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ไต่ผนังเป็นไปอย่างเหมาะสม

5.2 ข้อเสนอแนะ

นอกเหนือจากการศึกษาและการวิเคราะห์ด้วยการทดลองและการทดสอบที่ได้กระทำไปแล้ว เห็นควรที่จะทำการศึกษาและค้นคว้าเพิ่มเติม อันจะนำไปสู่การออกแบบล้อแม่เหล็กอย่างเหมาะสมมากขึ้น ทั้งนี้ก็เพื่อให้ล้อแม่เหล็กมีน้ำหนักเบาแต่ยังคงให้แรงยึดเกาะซึ่งเพียงพอที่จะตอบสนองความต้องการในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ประเด็นที่ควรทำการศึกษาและวิเคราะห์เพิ่มเติมซึ่งเกี่ยวข้องกับตัวแปรอิสระต่างๆที่มีผลต่อแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กและความสามารถในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์สามารถสรุปการศึกษาและวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้ 1) รูปแบบกระทะล้อที่เหมาะสมจากรูปแบบของกระทะล้อที่มีการเพิ่มหรือลดมวลและรูปทรงทางเรขาคณิตที่แตกต่างออกไปของกระทะล้อ เช่น ความหนาของขอบกระทะล้อเพิ่มเติมตามแนวรัศมีที่มีค่าแตกต่างกัน เป็นต้น 2) ขนาดและรูปทรงทางเรขาคณิตของแม่เหล็กที่เหมาะสมสำหรับบรรจุในล้อแม่เหล็กเพิ่มเติมจากรูปทรงและขนาดที่ได้ทำการศึกษาไปแล้ว 3) คุณลักษณะที่เหมาะสมของยางล้อสำหรับติดตั้งกับล้อแม่เหล็ก เช่น ลักษณะของผิวของยางล้อ ความหนาของยางล้อ เป็นต้น รวมทั้งคุณลักษณะของยางล้อ ได้แก่ ชนิดและความแข็งของยาง เพิ่มเติมเพื่อให้ชัดเจนยิ่งขึ้น 4) ผลกระทบจากตัวแปรหรือปัจจัยต่างๆที่กำหนดคุณลักษณะของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็กและพื้นผิวทดสอบต่อแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กและความสามารถในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็กด้วยการทดสอบและประเมินความสามารถในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กับเส้นทางการเคลื่อนและพื้นผิวทดสอบที่มีความซับซ้อนและอุปสรรคมากขึ้น เช่น เส้นทางโค้ง (Curvature path) พื้นผิวที่ขรุขระ โครงสร้างหรือเครื่องจักรในอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นต้น และ 5) ผลกระทบจากพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันของล้อแม่เหล็กและพื้นผิวทดสอบต่อแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กและความสามารถในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็กด้วยการจำลองสถานการณ์ (Simulation) เพื่อนำไปสู่ความเข้าใจผลกระทบจากตัวแปรหรือปัจจัยต่างๆต่อแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กและความสามารถในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ล้อแม่เหล็กมากขึ้น

การศึกษาและวิเคราะห์ทั้งหมดเหล่านี้จะทำให้การศึกษาแรงยึดเกาะของล้อแม่เหล็กและแนวทางการออกแบบล้อแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ได้พัฒนามีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นต่อไป

เอกสารอ้างอิง

1. Fisher, W., Capari, G., Siegwart, R. and Moser, R., 2009, "Compact magnetic Wheel Robot for Inspecting Complex Shape Structure in Generator Housing and Similar Environment", **2009 IEEE/RJS International Conference on Intelligence Robots and Systems**, 11-15 October 2009 St. Louis, U.S.A., pp. 4116-4121.
2. Badodkar, D.N., Singh, N.K., Dadal, N.S. and Singh, M., 2009, "EMAT Integrated with Vertical Climbing Robot for Boiler Tube Inspection", **National Seminar a exhibition on Non-Destructive Evaluation. NDE 2009**, 9-12 December 2009, BHEL & NIT, Tiruchirappalli, India, pp. 32-35.
3. Gao, X., Xu, D., Wang, Y., Pan, H. and Shen, W., 2009, "Multifunctional Robot to Maintain Boiler Water-Cooling Tubes", **Robotica**, Vol. 27, pp. 941-948.
4. Bogue, R., 2010, "The Role of Robotics in Nondestructive Testing", **Industrial Robot : An International Journal**, Vol. 37 Issue 5 , pp. 421-426.
5. Park, S., Jeong, H.D. and Lim, S.T., 2002, "Development of Mobile Robot Systems for Automatic Diagnosis of Boiler Tubes Fossil Power Plants and Large Size Pipelines", **2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and System**, 30 September-4 October 2002, EPFL, Lausanne, Switzerland, pp. 1880-1885.
6. Caprari, G., Breitenmoser, A., Fischer, W., Hurzeler, C., Tâche, F., Siegwart, R., Schoeneich, P., Rochat, F., Mondada, F. and Moser, R., 2010, "Highly Compact Robots for Inspection of Power Plants", **2010 1st International Conference on Applied Robotics Power Industry (CARPI)**, 5-7 October 2010, Delta Centre-Ville, Montreal, Canada, pp. 1-6.
7. Breitenmoser, A., Tâche, F., Capari, C., Siegwart, R. and Moser, R., 2010, "MagneBike – Toward Multi Climbing Robots for Power Plant Inspection", **The 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2010)**, Van der Kaminka, Lesperance, Luck and Sen (eds.), 10-14 May 2010, Toronto, Canada, pp. 1713-1722.
8. Gao, X., Shao, J., Dai, F., Zong, C., Guo, W. and Bai, Y., 2012, "Strong Magnetic Units for a Wind Power Tower Inspection and Maintenance Robot", **International Advanced Robotic System**, Vol. 9, pp. 1-9.

9. Gao, X., Jiang, J., Gao, J., Xu, D., Wang, Y. and Pan, H., 2008, "Boiler Maintenance Robot with Multi – operational Schema", **2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation**, 5-8 August 2008, Takamatsu Japan, pp. 610-615.
10. Xueqin, L., Rongfu, Q., Gang, C. and Fuzhen, H., 2009, "The Design of An Inspection Robot for Boiler Tubes Inspection", **2009 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence(AICI'09)**, 7-8 November 2009, Shanghai, China, pp. 313-317.
11. Fernandez, R., Gonzalez, E., Feliu, V. and Rodriguez, A. G., 2009, "A wall Climbing Robot for Tank Inspection. An Autonomous Prototype", **IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society**, 7-10 November 2010, Renaissance Hotel & Spa, Glendale, AZ, USA, pp. 1424-1429.
12. Fernandez, R. R., Feliu, V. and Rodriguez, A. G., 2008, "A Proposed Wall Climbing Robot for Oil Tank Inspection", **The 11th International Conference on Climbing and Walking Robots and Support Technologies for Mobile Machine (CLAWAR 2008)**, 8-10 September 2008, Coimbra, Portugal, pp. 597-604.
13. Shen, W. ,Gu, J. and Shen, Y., 2005, "Proposed Wall Climbing Robot with Permanent magnetic Tracks for Inspecting Oil Tanks", **IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2005)**, 29 July–1 August 2005, Niagara Fall City, Canada, pp 2072-2077.
14. Eich, M. and Vogele, T., 2011, "Design and Control of A Lightweight Climbing Robot for Vessel Inspection", **2011 19th Mediterranean Conference on Control and Automation**, 20-23 June 2011, Aquis Corfu Holiday Palace, Corfu, Greece, pp.1200-1205.
15. Yi, Z., Gong, Y., Wang, Z. and Wang, X., 2009, "Development of a Wall Climbing Robot for Ship Rust Removal", **The 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2009)**, 9-12 August 2009, Changchun China, pp. 4610-4615.
16. Tâche, F., Fisher, W., Moser, R., Mondada. F. and Siegwart, R., 2007, "Adapted Magnetic Wheel Unit for Compact Robots Inspecting Complex Shaped Pipe Structures", **2007 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics**, 4–7 September 2007, Zürich, Switzerland, pp. 1-6.
17. Tâche, F., 2010, **Robot Locomotion and Localization on 3D Complex-Shaped Structures**, Ph.D. Dissertation, Institute of Robotics and Intelligent Systems (IRIS), The Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH), Zurich, Switzerland.

18. Zhang, Y., Dodd, T, Atallah, K. and Lyne, I., 2010, "Design and Optimization of Magnetic Wheel for Wall and Ceiling Climbing Robot", **2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2010)**, August 4-7 2010, Xian China, pp. 1393-1398.
19. Zhang, Y. and Dodd, T., 2011, "Systematic Design of Flexible Magnetic Wall and Ceiling Climbing Robot for Cargo Screening", **The 12th Annual conference on Towards autonomous robotic systems (TAROS'11)**, 31 August–2 September 2011, Sheffield, UK, Vol.6856, 2011, pp. 414-415.
20. Silva, M.F. and Machado. J.A.T., 2008, "Climbing Robots: A Survey of Technologies and Applications", **The11th International Conference on Climbing and Walking Robots and Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR 2008)**, 8-10 September 2008, Coimbra, Portugal, pp. 1133-1140.
21. Chu, B., Jung, K., Han, C. S. and Hong, D., 2010, "A Survey of Climbing Robots : Locomotion and Adhesion", **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, Vol. 11, No. 4, pp. 633-647.
22. Pingxi, Y. and Dewei, L., 2009, "The Magnetic Field Analysis and Optimization of Permanent–Magnetic Adhesion Device for Novel Wall-Climbing Robot", **International Technology and Innovation Conference 2009 (ITIC 2009)**, 12-14 October 2009, Xian, China, pp. 1-5.
23. Yanqing, F. and Libo, S., "Design and Analysis of Modular Mobile Robot with Magnetic Wheels", **WSEAS Transaction on Applied and Theoretical Mechanics** Issue 12, Vol. 3, pp. 902-911.
24. Han, S.C., Kim, J. and Yi, H.C., 2009, "A Novel Design of Permanent Magnet Wheel with Induction Pin for Mobile Robot", **Journal of Precision Engineering and Manufacturing** Vol. 10, No. 4, pp 143-146.
25. Rochat, F., Schoenneich, P., Mondana F., Bleuler, H. and Tâche F., 2010, "Magnetic Wheels Optimization and Application to the MagneBike Climbing Robot", **The 13th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR 2010)**, 31 August–3 September 2010, Nagoya Institute of Technology, Japan, pp. 801-808.
26. Fisher, W., Tâche, F. and Seigwart, R., 2007, "Magnetic Wall Climbing Robot for Thin Surfaces with Specific Obstacles", **The 6th International Conference on Field and Service Robotics (FRS)**, 9-12 July 2007, Chamonix, France, pp 551-561.

27. Jin, Y., Chen, J. and Li, Z., 2009, "Magnetic Wheel Structure for an Omni-Directional Microrobot to Limit Slip Effect", **International Journal of Advanced Robotic System**, Vol. 6, No. 4, pp 277-284.
28. Yukawa, T., Suzuki, M., Satoh, Y. and Okano, H., 2006, "Magnetic Part Design of Pipe-Surface Inspection Robot", **IECON2006 – 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics**, 6-10 November 2006, Paris, France, pp. 3957-3962.
29. Hutter, U., 2009, **Realization of a New Compact Magnetic Wheel Climbing Robot**, Semester-Thesis, Institute of Robotics and Intelligent System (IRIS), The Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETHZ), Switzerland.
30. Kawaguchi, Y., Yoshida, I., Kurumatani, H., Kikuta, T. and Yamada, Y., 1995, "Internal Pipe Inspection Robot", **1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation**, Nagoya Congress Center, 21-27 May 1995 Nagoya, Aichi, Japan, pp. 857-862.
31. Yukawa, T., Suzuki, M., Satoh, Y. and Okano, H., 2006, "Design of Magnetic Wheels in Pipe Inspection Robot", **IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC'06)**, 8-11 October 2006, Taipei, Taiwan, pp. 235-240.
32. Suzuki, M., Yukawa, T., Satoh, Y. and Okano, H., 2006, "Mechanism of Autonomous Pipe-Surface Inspection Robot with Magnetic Elements", **IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC'06)**, 8-11 October 2006, Taipei, Taiwan pp. 3286-3291.
33. Yukawa, T., Okano, H. and Komatsubara, S., 2005, "Mechanism of Piping Inspection Robot with Magnetic Elements", **The 3rd International Conference on Computing, Communications and Control Technologies (CCCT 2005)**, 24-25 July 2005, Austin, Texas, USA, PP 289-294.
34. Boonyaprapasorn, A., Thung-Od, K., Silapunt, R. and Maneewarn, T., "Studies of Total Adhesive Force of Multiple Magnetic Wheels for A Climbing Robot", **The 16th International Conference on Climbing and Walking Robots and Support Technologies for Mobile Machines**, (CLAWAR 2013), 14-17 July 2013, Sydney, Australia, pp. 578-584.
35. Hussain, S., Sattar, T. and Salinas, E., 2012, "Parameter Analysis and Design Framework for Magnetic Adhesion Wall Climbing Wheeled Robot", **International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications**, Vol 11, No. 1/2, pp. 102-116.

36. Slocum, A., Lang, J., Awtar, S., Hart, J. A. and Mukaddam, K., 2004, "Magnetically Preloaded Wheels", **The 4th International Conference, (EUSPEN 2004)**, Glasgow, Scotland, pp.368-369
37. Slocum, A., Awtar, S. and Hart, J., 2002, "Magnebots- A Magnetic Wheels Based Overhead Transportation Concept", **The 2nd IFAC Conference on Mechatronic Systems**, Berkley, California, 9-11 December 2002, pp. 761-766
38. Campbell, P., 1994, **Permanent Magnet Materials and their Application**, Cambridge University Press, New York U.S.A..
39. Moskowitz, L.R., 1976, **Permanent Magnet Design and Application Handbook**, Cahners Books International Inc., Boston Massachusetts, 1976.
40. Parker, R. J., 1990, **Advances in Permanent Magnetism**, John Wiley & Sons Inc., Canada.
41. Canudas, de Wit, C. and Tsiotras, P., 1999, "Dynamic Tire Friction Models for Vehicle Traction Control", **The 38th IEEE Conference on Decision and Control**, 7-10 December 1999, Phoenix, Arizona, U.S.A., pp. 3646-3751.
42. Abeykoon, A.M.H.S. and Ohnishi, K., 2005, "Traction Force Improvement of a Two Wheel Mobile Manipulator by Changing The Center of Gravity", **2005 3rd IEEE International Conference on Industrial Informatics, (INDIN '05)**, 10-12 Aug. 2005, pp.756-760.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล	พ.ต.อาศิษ บุนณะประภัสร์
วัน เดือน ปีเกิด	21 กันยายน 2519
ประวัติการศึกษา	
ระดับมัธยมศึกษา	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเทพศิรินทร์ พ.ศ. 2537
ระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2541
ระดับปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2556
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์	Boonyaprapasorn A., Thung-Od, K., Silapunt, R. and Maneewarn, T., “Studies of Total Adhesive Force of Multiple Magnetic Wheels for A Climbing Robot”, The16th International Conference on Climbing and Walking Robots and Support Technologies for Mobile Machine, (CLAWAR 2013) , Sydney, Australia, 14-17 July 2013 pp. 578-584