

บทความวิจัย

การศึกษาการเคลื่อนที่ของแท่งแม่เหล็กผ่านการจัดเรียงแม่เหล็ก  
แบบฮอลแบ็ค

STUDY THE MOTION OF MAGNET BY HALLBACH ARRAY

ธัญนพ นิลกำจร<sup>1</sup>ธีรธวัชย์ ปานกลาง<sup>2\*</sup> พันธุ์ศักดิ์ ดีรักษา<sup>1</sup> ภคินี ทองฤทธิ์<sup>1</sup> ศิริสกุล สันตะวงศ์<sup>1</sup>  
รัตนสุดา สุภคณัยสร<sup>2</sup> ชลิต วณิชยานันต์<sup>2</sup> สายัณห์ พุทธลา<sup>2</sup> และพงษ์แก้ว อุดมสมุทธีรวิทย์<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กรุงเทพมหานคร 10110

<sup>2</sup>สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา กรุงเทพมหานคร 10600

Tunyanop Nilkamjon<sup>1</sup>, Theerathawan Panklang<sup>2\*</sup>, Phansak Deeraksa<sup>1</sup>, Pakinee Thongrit<sup>1</sup>,  
Sirisakul Suntawong<sup>1</sup>, Rattanasuda Supadanaison<sup>2</sup>, Chalit Wanichayanan<sup>2</sup>,  
Sayan Puttala<sup>2</sup> and Pongkaew Udomsamuthirun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Faculty of Science, Srinakharinwirot University, Bangkok 10110

<sup>1</sup>Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University, Bangkok 10600

\*E-mail: rattanasuda@yahoo.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษา และสร้างชุดทดลองการเคลื่อนที่ของแท่งแม่เหล็ก โดยการจัดเรียงแม่เหล็กแบบฮอลแบ็ค (Halbach array) คณะผู้วิจัยได้ศึกษาหลักการและวิธีการ จัดเรียงแม่เหล็กแบบฮอลแบ็คโดยใช้เครื่อง เทสลาไมเตอร์วัดขั้วแม่เหล็ก และได้สร้างชุดแม่เหล็ก ที่จัดเรียงแม่เหล็กแบบฮอลแบ็คโดยทำให้ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กด้านหนึ่งมีมากที่สุด ขณะที่อีกด้านมีความเข้มสนามแม่เหล็กน้อยมาก ต่อมาได้จัดวางชุดแม่เหล็กแบบฮอลแบ็ค จำนวน 2 คู่ ในมุมและระยะห่างที่ทำให้แท่งแม่เหล็กสามารถเคลื่อนที่ได้ในราง จากการศึกษา พบว่าแท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่ในอัตราเร็วที่ดีที่สุด มีความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 2.20 เมตรต่อวินาที โดยแท่งแม่เหล็กคู่แรกวางทำมุมกับราง 5 องศา คู่ที่ 2 ทำมุมกับราง 10 องศา

คำสำคัญ: ฮอลแบ็ค แม่เหล็กถาวร แม็กเลฟ

## ABSTRACT

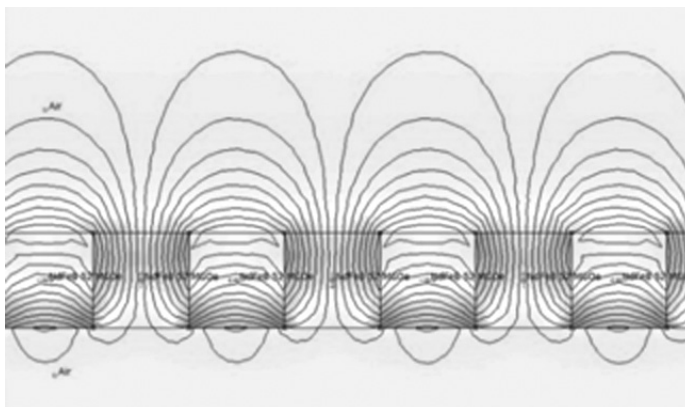
The purpose of this research is to study and construct the motion of magnet experiment by Halbach array. We studied the principles and how to array the magnetic bars to be Halbach array by The testlameter was used for measuring the magnetic pole and putting magnetic bar to be the set of Halbach array. We construct the set of magnetic bar to be Halbach array by making the one side of magnetic set to have most of magnetic field intensity as the other side having . There were 2 couple sets of magnetic arrangement that set up in proper angle and distance so the magnet bar can move through the track. We found that our Halbach array can make the best average speed at 2.20 m/s as the first Halbach array set on the tracks with angle  $5^{\circ}$  and second Halbach array set with angle  $10^{\circ}$ .

**Keywords:** Halbach array, permanent magnets, Maglev

## บทนำ

รถไฟฟ้าความเร็วสูงหรือที่เรียกว่า Maglev train ย่อมาจาก Magnetic Levitation train เป็นรถไฟฟ้าที่อาศัยการขับเคลื่อนด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า ที่สามารถให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ได้สูงมาก เช่น รถไฟฟ้าความเร็วสูงของญี่ปุ่นวิ่งทดสอบมีความเร็วสูงสุดถึง 600 กิโลเมตรต่อชั่วโมง การขับเคลื่อนด้วยแม่เหล็กไฟฟ้านี้อาศัยสมบัติของแม่เหล็กไฟฟ้าในการทำงานเพื่อสร้างแรงยกและแรงผลักให้รางกับตัวรถไฟ ทำให้ตัวรถไฟจะลอยอยู่เหนือแม่เหล็กและเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและด้วยสาเหตุที่ตัวรถไฟลอยอยู่เหนือรางจึงทำให้ Maglev สามารถลดแรงเสียดทานกับพื้นทำให้สามารถเคลื่อนที่อย่างไม่มีแรงเสียดทาน นอกจากนี้ยังมีกลไกหลักอีกประการหนึ่งที่เป็นส่วนทำให้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยการจัดเรียงขั้วแม่เหล็กแบบฮอลแบ็ค (Halbach array) ด้วยรูปแบบการจัดเรียงตัวของแม่เหล็กที่เหมาะสมจะทำให้เกิดแรงดูดและแรงผลักในจังหวะที่เหมาะสมจึงทำให้รถไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ไปข้างหน้าอย่างรวดเร็ว การจัดขั้วแม่เหล็กแบบฮอลแบ็คนี้จะนำไปสู่เทคนิคของมอเตอร์เชิงเส้น (Linear Motor) ซึ่งมอเตอร์แบบนี้แตกต่างจากมอเตอร์ไฟฟ้าทั่วไปที่มีการหมุนรอบแกนของตนเอง โดยมอเตอร์เชิงเส้นจะมีแกนหมุนในแนวราบ เมื่อมีการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่รางหรือ Stator จะเกิดการดูด และการผลักสลับกันในแนวราบ ทำให้ขบวนรถซึ่งทำหน้าที่เป็น Rotor สามารถเคลื่อนที่ไปข้างหน้าได้ ปัจจุบันเทคนิคนี้ได้ถูกสร้างขึ้นอย่างกว้างขวาง เนื่องจากแม่เหล็กความเข้มสูงมีความจำเป็นมากในการทำให้เกิดแรงผลักและดูดสูง ๆ ที่สามารถเพิ่มความเร็วของรถไฟฟ้าได้อย่างมาก ปัจจุบันจึงมีการใช้สารตัวนำยิ่งยวด (superconductivity material) ซึ่งคาดว่าจะทำให้เกิดเป็นรถไฟฟ้าความเร็วสูงมาก ๆ ในอนาคตได้

เนื่องจากการจัดเรียงขั้วแม่เหล็กแบบฮอลแบ็ค เป็นกลไกสำคัญในการทำให้เกิดการเคลื่อนโดยใช้แรงจากสนามแม่เหล็กเป็นตัวขับเคลื่อนให้วัสดุที่เป็นเหล็กหรือแม่เหล็กเคลื่อนที่ได้ในงานวิจัยนี้มีความสนใจในรูปแบบการจัดเรียงขั้วแม่เหล็กถาวรที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของแท่งแม่เหล็กได้ โดยการจัดเรียงแม่เหล็กแบบนี้จะทำให้วัสดุที่เป็นสารแม่เหล็กเกิดการเคลื่อนที่ได้โดยไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอก จึงเป็นเทคนิคที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ที่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมน้อย การจัดเรียงขั้วแม่เหล็กแบบฮอลแบ็คนี้นอกจากนำมาใช้กับรถไฟความเร็วสูงแล้ว ยังสามารถนำมาใช้ในเครื่องเร่งอนุภาคด้วย การจัดเรียงแม่เหล็กแบบฮอลแบ็คนี้จะทำให้แมกนีไทเซชัน (Magnetization) ของแม่เหล็กเปลี่ยนไปโดยจะทำให้สนามแม่เหล็กด้านหนึ่งมีค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กเข้าใกล้ศูนย์ แล้วทำให้สนามแม่เหล็กอีกด้านหนึ่งมีค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กเพิ่มมากขึ้น ซึ่งรูปแบบการจัดเรียงแม่เหล็กถาวรของจัดเรียงแม่เหล็กถาวรแบบฮอลแบ็คแบบนี้อย่างต่อเนื่อง จะทำให้เกิดลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กได้ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพของเส้นแรงแม่เหล็กจากการจัดเรียงแม่เหล็กแบบฮอลแบ็ค

ลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กตามรูปที่ 1 ถูกค้นพบโดย John C. Mallinson ในปี พ.ศ. 2516 โดยทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กด้านเดียว (One-sided flux) ต่อมาในปี พ.ศ. 2523 สถาบันวิจัยแห่งชาติลอเรนซ์ เบิร์กเลย์ (Lawrence Berkeley National Laboratory) ได้มีนักฟิสิกส์ชื่อว่า คลอส ฮอลแบ็ค (Klaus Halbach) ประดิษฐ์คิดค้นการจัดเรียงแม่เหล็กที่ทำให้เกิดฟลักซ์ด้านเดียวเพื่อนำไปใช้ในการเร่งอนุภาคจนเกิด การจัดเรียงแม่เหล็กแบบฮอลแบ็ค (Halbach array) ขึ้นมา สนามแม่เหล็กด้านที่มีการรวมกันของ ฟลักซ์แม่เหล็กการแปลงและการจัดเรียงอย่างต่อเนื่องเป็นไปตามสมการ

$$F(x,y) = F_0 e^{ikx} e^{-ky} \quad (1)$$

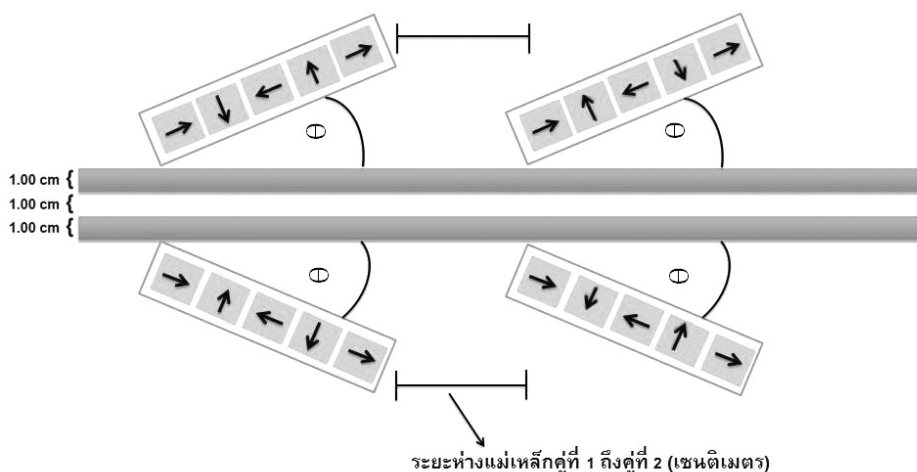
เมื่อ  $F(x,y)$  คือ สนามแม่เหล็กในรูป  $F + iF$   
 $F_0$  คือ ขนาดของสนามแม่เหล็กที่พื้นผิวของการจัดเรียง  
 $k$  คือ เลขคลื่น

ปัจจุบันการจัดเรียงแม่เหล็กของฮอลล์แบ็ค มีการจัดเรียงอยู่ 3 แบบ ได้แก่ การจัดเรียงแม่เหล็กแบบแบนราบ การจัดเรียงแม่เหล็กแบบทรงกระบอก และการจัดเรียงแม่เหล็กแบบทรงกลม

เนื่องจากการจัดเรียงแม่เหล็กแบบฮอลล์แบ็คยังมีงานวิจัยที่ไม่แพร่หลายมากนัก ในประเทศอื่นทั้งในต่างประเทศก็เป็นงานวิจัยที่มุ่งผลสำเร็จในการประยุกต์ใช้งานในระบบรถไฟฟ้หรือเครื่องเร่งอนุภาคเป็นหลัก ในงานวิจัยนี้มีความสนใจในรูปแบบการจัดเรียงขั้วแม่เหล็กถาวรที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของแท่งแม่เหล็กได้ เพื่อนำมาสร้างชุดทดลองการเคลื่อนที่ของแท่งแม่เหล็กแล้วนำไปเป็นชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการเคลื่อนที่ของแท่งแม่เหล็กโดยการจัดเรียงแบบฮอลล์แบ็ค เพื่อให้สามารถเข้าใจทฤษฎีและหลักการได้ง่าย เพื่อนำไปประยุกต์และพัฒนาเพื่อก่อให้เกิดประโยชน์ในชีวิตประจำวัน ต่อตนเอง สังคม และประเทศชาติต่อไป

## วิธีการ

หลังจากศึกษาการเคลื่อนที่ของแท่งแม่เหล็กผ่านการจัดเรียงแม่เหล็กตามทฤษฎีของฮอลล์แบ็คแล้ว คณะผู้วิจัยได้ออกแบบชุดแม่เหล็กที่ประกอบด้วยแม่เหล็กนีโอไดเมียมมาประกอบให้เป็นชุดแม่เหล็กที่บรรจุในกล่องอะคริลิกขนาด  $2.60 \times 10.00 \times 0.15$  เซนติเมตร<sup>3</sup> และทำสัญลักษณ์เพื่อแสดงทิศทางและขั้วของชุดแม่เหล็ก ในขั้นตอนแรกจะทำการวัดลักษณะการกระจายตัวของเส้นแรงแม่เหล็กของชุดทดลองโดยการวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กด้วยเทสลามิเตอร์ยี่ห้อ PHYWE และหัววัด Hall probe แบบaxial ยี่ห้อ PHYWE และใช้ผงตะไบเหล็ก หลังจากนั้นนำชุดแม่เหล็กที่จัดเรียงสอดคล้องกับทฤษฎีของฮอลล์แบ็ค ทำมุม  $5^\circ$   $10^\circ$  และ  $15^\circ$  กับรางไม้อัดแท่งทรงกระบอกยาว 2 เมตร ทดลองยิงแม่เหล็กทรงกลม โดยใช้แรงกระตุ้นเล็กน้อยเพื่อให้แม่เหล็กทรงกลมสามารถเคลื่อนที่ในรางได้ในระยะ 1 เมตร บันทึกอัตราเร็ว จากนั้นจัดวางชุดแม่เหล็กฮอลล์แบ็คคู่ที่ 2 และทำการทดลองเช่นเดียวกันโดยให้ระยะห่างจากชุดแม่เหล็กฮอลล์แบ็คคู่ที่ 1 และชุดแม่เหล็กฮอลล์แบ็คคู่ที่ 2 มีระยะห่างกัน 3 , 5 และ 7 เซนติเมตรตามลำดับ เพื่อหาเงื่อนไขที่ทำให้แม่เหล็กทรงกลมสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วที่สุดในราง ทำการวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กด้วย เทสลามิเตอร์ยี่ห้อ PHYWE และหัววัด Hall probe แบบaxial ยี่ห้อ PHYWE และวัดความเร็วการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กทรงกลมด้วยการถ่ายภาพที่อัตราเร็ว 30 ภาพต่อวินาที การออกแบบชุดทดลองการเคลื่อนที่ของแท่งแม่เหล็กสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2

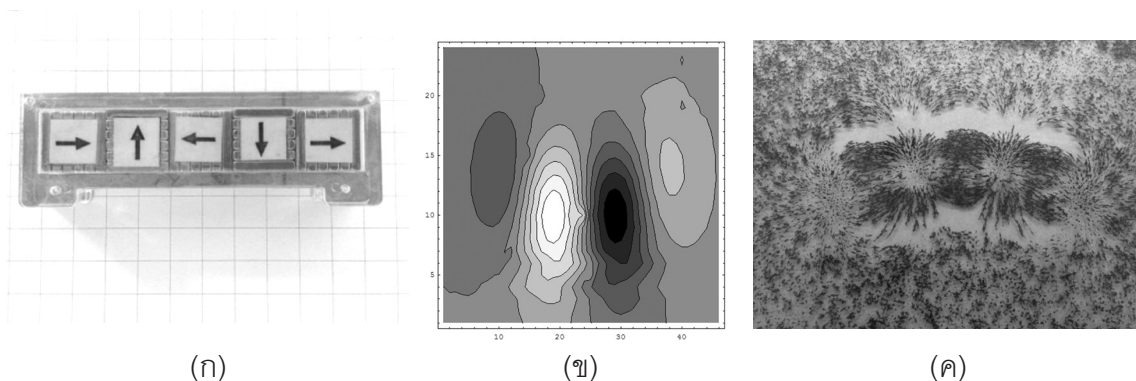


รูปที่ 2 ชุดทดลองการเคลื่อนที่ของแท่งแม่เหล็กโดยการจัดเรียงแบบฮอลล์แบ็ค

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาผลของการชุดแม่เหล็กที่มีการจัดเรียงแบบฮอลล์แบ็ค

ผลการทดลองวัดลักษณะการกระจายตัวของเส้นแรงแม่เหล็กของชุดทดลองให้สอดคล้องกับทฤษฎีของฮอลล์แบ็ค ได้ผลการทดลองดังรูป



รูปที่ 3 แสดงผลการวัดความเข้มสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กที่จัดเรียงแบบฮอลล์แบ็ค

ก) ภาพจริง ข) ภาพการกระจายตัวของเส้นแรงแม่เหล็กจากการวัดด้านบน ค) ภาพการกระจายตัวของผงตะไบเหล็กด้านบน

จากการทดลอง พบว่า ภาพการกระจายตัวของเส้นแรงแม่เหล็กจากการวัดด้านบนที่ได้จากการวัดด้วย Hall probe แล้วนำมาสร้างภาพด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับภาพที่ได้จากผงตะไบไม่มีความสอดคล้องกันและเป็นไปตามทฤษฎีคือมีความ

หนาแน่นของเส้นแรงด้านบนที่มากกว่าด้านล่าง โดยบริเวณที่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กสูงที่สุดจะมีสี่ขาว และบริเวณที่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กต่ำที่สุดจะมีสีดำ

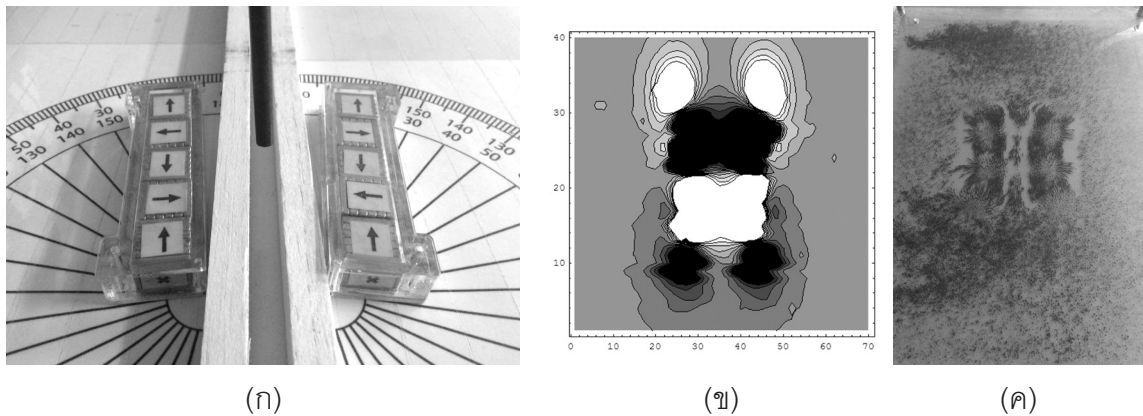
ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาผลของการชุดแม่เหล็กที่มีการจัดเรียงแบบฮอลแบ็ค 1 คู่

การศึกษาเส้นแรงแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กที่จัดเรียงแบบฮอลแบ็ค 1 คู่ 1 คู่ ทำมุมกับราง 5, 10 และ 15 องศา ได้ผลดังตารางที่ 1

**ตารางที่ 1** แสดงผลการศึกษากการเคลื่อนที่ของแท่งแม่เหล็กในระยะ 1 เมตร โดยใช้ชุดแม่เหล็กฮอลแบ็ค 1 คู่

มุมระหว่างชุดแม่เหล็กกับราง ( $\theta$ )	เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการเคลื่อนที่	อัตราเร็วเฉลี่ย (m/s)
5	0.52	1.92
10	0.59	1.70
15	0.79	1.26

ทำการวัดการกระจายตัวของเส้นแรงแม่เหล็กและคำนวณความเร็วการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กทรงกลมผ่านราง ผลการทดลองพบว่าชุดแม่เหล็กตามการจัดเรียงฮอลแบ็ควางทำมุมกับราง 5 องศา ทำให้แม่เหล็กทรงกลมเคลื่อนที่ผ่านรางได้อัตราเร็วที่มากที่สุด เท่ากับ 1.92 m/s และเมื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็กพบว่า ชุดแม่เหล็กที่มีการจัดเรียงแบบฮอลแบ็ค 1 คู่ ที่ทำมุมกับราง 5 องศา มีความเข้มของสนามแม่เหล็กกระจายตัวอย่างหนาแน่นที่บริเวณของรางมากกว่าชุดแม่เหล็กที่จัดวางในมุมอื่นๆ ดังนั้นจึงใช้ผลการทดลองนี้เพื่อทำการทดลองในขั้นตอนถัดไป ซึ่งผลการทดลองชุดแม่เหล็กที่มีการจัดเรียงแบบฮอลแบ็ค 1 คู่ ที่ทำมุมกับราง 5 องศา รูปที่ 4



**รูปที่ 4** แสดงผลการวัดความเข้มสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กที่มีการจัดเรียงแบบฮอลแบ็ค 1 คู่ ทำมุมกับราง 5 องศา ก) ภาพจริง ข) ภาพการกระจายตัวของเส้นแรงแม่เหล็ก ค) ภาพการกระจายตัวของผงตะไบเหล็ก

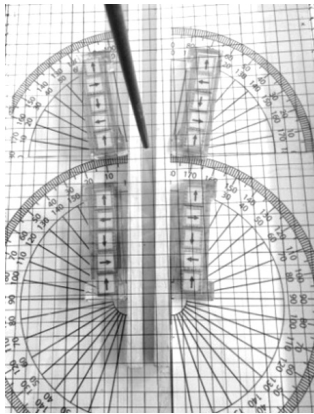
ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาผลของการชุดแม่เหล็กที่มีการจัดเรียงแบบฮอลแบ็ค 2 คู่ จัดชุดแม่เหล็กที่มีการจัดเรียงแบบฮอลแบ็คชุดที่ 1 ที่ทำมุมกับราง 5 องศา แล้วกำหนดระยะห่างของชุดแม่เหล็กชุดที่ 1 กับชุดที่ 2 ที่ระยะต่าง ๆ ได้ผลดังตารางที่ 2

**ตารางที่ 2** แสดงผลการศึกษาการเคลื่อนที่ของแท่งแม่เหล็กในระยะ 1 เมตร โดยใช้ชุดแม่เหล็กฮอลแบ็ค 2 คู่

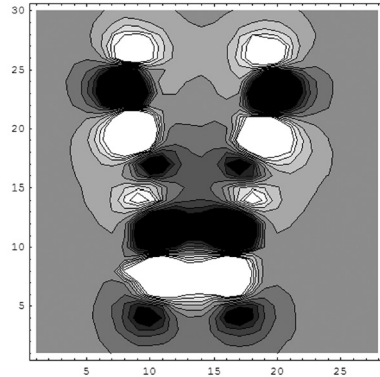
ระยะห่างระหว่างชุดแม่เหล็กฮอลแบ็ค (cm)	มุมระหว่างชุดแม่เหล็กคู่ที่ 2 กับราง ( $\theta$ )	เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการเคลื่อนที่ (s)	อัตราเร็วเฉลี่ย (m/s)
3	5	0.47	2.12
	10	0.45	2.22
	15	0.49	2.04
5	5	0.48	2.08
	10	0.48	2.08
	15	0.50	2.00
7	5	0.57	1.75
	10	0.56	1.79
	15	0.58	1.72



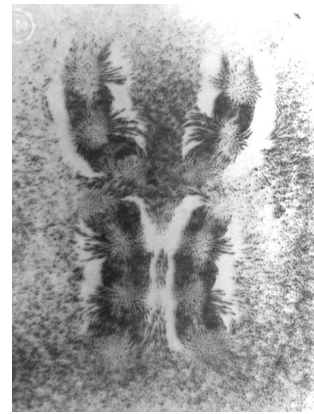
ทำการวัดการกระจายตัวของเส้นแรงแม่เหล็กและวัดความเร็วการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กทรงกลมผ่านรางที่ระยะ 1 เมตร ผลการทดลองพบว่า ชุดแม่เหล็กตามการจัดเรียงฮอลล์แบ็คคู่ที่ 2 ซึ่งวางทำมุมกับราง 10 องศา โดยระยะห่างของชุดแม่เหล็กชุดที่ 1 กับชุดที่ 2 ห่างกัน 3.00 cm ทำให้แม่เหล็กทรงกลมเคลื่อนที่ ผ่านรางด้วยอัตราเร็วมากที่สุด เท่ากับ 2.22



(ก)



(ข)



(ค)

**รูปที่ 5** แสดงผลการวัดความเข้มสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กที่มีการจัดเรียงแบบฮอลล์แบ็ค 2 คู่ โดยชุดที่ 2 ทำมุมกับราง 10 องศา ก) ภาพจริง ข) ภาพการกระจายตัวของเส้นแรงแม่เหล็ก ค) ภาพการกระจายตัวของผงตะไบเหล็ก

ดังนั้นผลจากการศึกษาจัดวางชุดแม่เหล็ก 2 คู่ พบว่าสำหรับกรณีที่คู่ที่ 2 ทำมุมกับรางในมุม 10 องศา และระยะห่างระหว่างชุดแม่เหล็กที่จัดเรียงแบบฮอลล์แบ็ค คู่ที่ 1 กับคู่ที่ 2 ที่ระยะ 3.00 เซนติเมตร มีอัตราเร็วของแม่เหล็กทรงกลมเท่ากับ 2.20 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นอัตราเร็วเฉลี่ยที่ดีที่สุดของการศึกษาในครั้งนี้

### สรุปผลการทดลอง

การศึกษากการจัดเรียงตัวของแม่เหล็กเพื่อสร้างชุดแม่เหล็กที่จัดเรียงแม่เหล็กแบบฮอลล์แบ็คในครั้งนี้สามารถสร้างชุดแม่เหล็กที่มีการจัดเรียงตัวของความเข้มของสนามแม่เหล็กด้านหนึ่งได้มากกว่าอีกด้านหนึ่งได้โดยใช้แม่เหล็กจำนวน 5 ก้อนแล้วนำมาสร้างชุดการทดลองวัดการเคลื่อนที่ของแท่งแม่เหล็กผ่านรางโดยพบว่า ชุดแม่เหล็กที่มีการจัดเรียงแบบฮอลล์แบ็ค 1 คู่ที่ทำมุมกับราง 5 องศา มีความเข้มของสนามแม่เหล็กกระจายตัวอย่างหนาแน่นที่บริเวณของรางมากกว่าชุดแม่เหล็กที่จัดวางในมุมอื่นๆ มีอัตราเร็วของแม่เหล็กทรงกลมที่เคลื่อนที่ผ่านรางเท่ากับ 1.92 เมตรต่อวินาที และเมื่อเพิ่มชุดแม่เหล็กชุดที่ 2 พบว่าสำหรับกรณีที่คู่ที่ 2 ทำมุม



กับรางในมุม 10 องศา และระยะห่างระหว่างขดแม่เหล็กที่จัดเรียงแบบฮอลแบ็ค ขดที่ 1 กับ ขดที่ 2 ที่ระยะ 3.00 เซนติเมตร มีอัตราเร็วของแม่เหล็กทรงกลมเท่ากับ 2.20 เมตรต่อวินาที แสดงว่าเมื่อขดของแม่เหล็กเพิ่มขึ้นสามารถทำให้แท่งแม่เหล็กมีการเคลื่อนที่ผ่านรางด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้นได้

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่สนับสนุนจัดหาเครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดลองในครั้งนี้

### เอกสารอ้างอิง

- Piyapong, S. (2548). **University physics with modern physics**. Bangkok. Pearson Education Indochina Ltd.
- Peerapat, C.(2015). **Maglev**. Retrieved February 28, 2017, from <http://www.nextwider.com/2015/04/22/japan-maglev-train>.
- Kraison, U. (2012). Electromagnetic compatibility: EMC. **Technology Promotion Association (Thailand-Japan)**. 38(220), 40-44.
- Klaus, H. (1980). Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material. **Nuclear Instruments and Methods**. 169 (1), 1–10.
- Klaus, H. (1985). Application of permanent magnets in accelerators and electron storage rings. **Journal of Applied Physics**. 57, 3605.
- Mallinson, J.C. (973). One-sided fluxes — A magnetic curiosity?, **IEEE Transactions on Magnetics**. 9, 678-682.

.....