

การพัฒนาชุดทดลองประเภทเคลื่อนที่ของโมเดลไฟฟ้ากลอง
DEVELOPMENT OF BOGIE-MODEL MOTION TEST RIG

นายสุทัศน์ เตชะทอง
นายอภิรักษ์ นามใหญ่
นายสมรวิทย์ ชัยเฉย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

การพัฒนาชุดทดลองการเคลื่อนที่ของโบกี้รถไฟจำลอง

DEVELOPMENT OF BOGIE-MODEL MOTION TEST RIG

นาย สุทธินันท์ เสือหลง

นาย อภิรักษ์ นามใหญ่

นาย อมรเทพ ผันผาย

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

DEVELOPMENT OF BOGIE-MODEL MOTION TEST RIG

SUTTINAN SUEALONG
APHIRUK NAMYAI
AMORNTHEP PHANPHAY

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2013

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนาชุดทดลองการเคลื่อนที่ของโบกี้รถไฟจำลอง

(Development of Bogie-Model Motion Test Rig)

ผู้จัดทำ

1. นาย สุทธินันท์ เสือหลง 53011736
2. นาย อภิรักษ์ นามใหญ่ 53011867
3. นาย อมรเทพ ผันผาย 53011881



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร)

การพัฒนาชุดทดลองการเคลื่อนที่ของโบกี้รถไฟจำลอง

นายสุทินันท์	เสือหลง	53011736
นายอภิรักษ์	นามใหญ่	53011867
นายอมรเทพ	ผันผาย	53011881
ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษาที่ 2556		

บทคัดย่อ

ปัจจุบันรถไฟนั้นมีความสำคัญในด้านขนส่งมากยิ่งขึ้น เพราะมีความประหยัด ปลอดภัย สามารถขนส่งผู้โดยสารได้ครั้งละเป็นจำนวนมาก และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยขบวนรถไฟนั้นประกอบด้วย ตัวตู้รถไฟ และโบกี้ 2 โบกี้ เพื่อรองรับตู้รถไฟทั้งด้านหน้าและด้านหลัง ล้อรถไฟที่ใช้มีลักษณะเป็นรูปทรงกรวย ซึ่งทำให้โบกี้เมื่อเคลื่อนที่ไปตามรางจะมีการเคลื่อนที่ส่าย (Hunting Motion) ดังนั้น ในโครงการได้พัฒนาชุดทดลองการเคลื่อนที่ของโบกี้รถไฟจำลอง เพื่อแสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนที่ส่ายของโบกี้ ชุดโบกี้จำลองที่พัฒนาขึ้นมา มีขนาด 1 ต่อ 15 ของขนาดจริง สามารถเปลี่ยนรูปแบบล้อได้ โดยรูปแบบของล้อ ประกอบด้วย ล้อแบบทรงกระบอก กับล้อแบบทรงกรวย ที่มีมุมกรวย (Conicity) 10 , 20 และ 30 องศา รางที่ใช้จะประกอบไปด้วยทางตรงและทางโค้ง โดยในทางตรงจะแสดงให้เห็นการเคลื่อนที่ส่าย ส่วนในทางโค้งใช้ในการทดลองความเร็วหลุดโค้ง นอกจากนั้นสามารถปรับอัตราเร็วของโบกี้ได้ตั้งแต่ 0 ถึง 1.29 เมตรต่อวินาที จากผลการทดลองกับชุดสาดิตที่พัฒนาขึ้นสามารถแสดงให้เห็นการเคลื่อนที่ส่ายได้และรูปแบบการเคลื่อนที่ส่ายมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์จากทางทฤษฎี

DEVELOPMENT OF BOGIE-MODEL MOTION TEST RIG

SUTTINAN SUEALONG 53011736

APHIRUK NAMYAI 53011867

AMORNTHAP PHANPHAY 53011881

Asst.Prof.Dr.Monsak Pimsarn Adviser

Year 2556

ABSTRACT

Nowadays, trains have greatly become essential in transportation due to their cost-savings, security, massive passengers commuting, and being friendly to environment. Trains normally consist of railway wagon and two bogies which are functional to support both front and back side of the whole wagon. Mostly, train wheels have conical shape which causes hunting motion to bogies while they have been moving along the rail. Therefore, this project is aimed to develop bogie model, with size 1:15 to demonstrate the hunting motion. The wheelsets are also adjustable. Wheel shapes employed in this project are cylindrical and conical with conicity 10°, 20°, and 30° whereas railway track employed both curved and straight ones. In straight railway track, it is used to demonstrate hunting motion while the curved track is for testing of over-turning speed on curve. In addition, the speed of bogie can be adjusted between 0 – 1.29 meters/sec. According to the experimental result ; it indicates that hunting motion was observed and the motion pattern is in good agreement with the theoretical result.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ลงได้ด้วยดี เนื่องด้วยได้รับการอนุเคราะห์ แนะนำ ค่อยให้คำปรึกษาการแก้ไขกับปัญหา และช่วยเหลือในด้านต่างๆ เสมอมาจาก ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษา รวมทั้งอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านตลอดจนรุ่นพี่ที่ให้ความเมตตา ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อการทำปริญญาบัตรฉบับนี้ ซึ่งต้องขอบคุณเป็นสูง

และต้องขอขอบคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูข้าพเจ้ามาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมาในทุกๆด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายสุทินันท์	เสื่อหลง
นายอภิรักษ์	นามใหญ่
นายอมรเทพ	ผันผาย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินการ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 โบกี้รถไฟ.....	3
2.2 รางรถไฟ.....	4
2.2.1 หน้าที่ของรางรถไฟ.....	4
2.2.1.1 หน้าที่ในการรับน้ำหนักขบวนรถไฟ.....	4
2.2.1.2 หน้าที่ในการกำหนดทิศทางการวิ่งขบวนรถไฟ.....	5
2.2.2 ขนาดความกว้างของรางรถไฟ.....	5
2.2.2.1 ขนาดความกว้าง 1.435 เมตร (4 ฟุต 8-1/2 นิ้ว).....	5
2.2.2.2 ขนาดความกว้าง 1.067 เมตร (3 ฟุต 6 นิ้ว).....	6
2.2.2.3 ขนาดความกว้าง 1.00 เมตร (3 ฟุต 3-3/8 นิ้ว).....	6
2.3 การเข้าโค้ง.....	7
2.4 การเคลื่อนที่ส่าย.....	8
บทที่ 3 ชุดการทดลองและวิธีการทดลอง.....	13
3.1 ส่วนประกอบของชุดทดลอง.....	13
3.1.1 โครงโบกี้รถไฟ.....	14

สารบัญต่อ

	หน้า
3.1.2 ล้อรถไฟ.....	15
3.1.3 รางรถไฟ.....	16
3.1.4 แบตเตอรี่.....	16
3.1.5 เฟืองดอกจอก.....	17
3.1.6 ตัวปรับความเร็วรอบมอเตอร์.....	17
3.2 การคำนวณหาขนาดมวลและเส้นลวดที่ใช้ถ่วง.....	18
3.2.1 ความถี่ธรรมชาติจากคานปลายยื่น.....	19
3.2.2 ความถี่ธรรมชาติจากการเคลื่อนที่ส่าย.....	20
3.3 การคำนวณหาขนาดของมอเตอร์.....	21
3.3.1 ความเร็วเข้าโค้งสูงสุด.....	21
3.3.2 จุดศูนย์กลางมวล.....	22
3.3.3 แรงขับเคลื่อน.....	23
3.3.4 กำลังขับ.....	25
3.3.5 ทอร์ก.....	26
3.3.6 จำนวนรอบ.....	26
3.4 วิธีการทดลอง.....	27
3.4.1 การทดลองเพื่อทดสอบว่าแบบล้อต่างๆเคลื่อนที่ได้ตามทฤษฎีหรือไม่.....	27
3.4.2 การทดลองเพื่อทดสอบว่าล้อทรงกรวย (γ เป็นบวก) จะเคลื่อนที่ ในทางโค้งด้วยความเร็วสูงสุดเท่าไร.....	27
3.4.3 การทดลองเพื่อหาค่าฟังก์ชันของการเคลื่อนที่ส่าย.....	27
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	29
4.1 ผลการทดลอง.....	29
4.1.1 ผลการทดลองของรูปทรงล้อ ทรงกระบอก ทรงกรวยที่มีคามเป็นกรวยบวก (γ เป็นบวก) และทรงกรวยที่มีความเป็นกรวยลบ (γ เป็นลบ).....	29
4.1.2 ผลการทดลองหาความเร็วสูงสุดที่สามารถวิ่งบนรางได้.....	29
4.1.3 ผลการทดลองหาค่าฟังก์ชันของการเคลื่อนที่ส่าย.....	30
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	32
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	32

สารบัญต่อ

	หน้า
5.2 วิจัยรณัผลการทดลอง.....	32
5.2.1 จากการทดลองในทางตรงและทางโค้ง.....	32
5.2.2 จากการทดลองหาความเร็วสูงสุดที่สามารถวิ่งได้บนรางรถไฟได้.....	33
5.2.3 จากการผลการทดลองหาค่าฟังก์ชันของการเคลื่อนที่ส่าย.....	33
เอกสารอ้างอิง.....	36
ภาคผนวก ก	37
ภาคผนวก ข	43

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 การออกแบบโบกี้ขนาดจำลอง.....	14
4.1 ผลการทดลองของรูปทรงล้อต่างๆในการวิ่งทางตรงทางโค้ง.....	29
4.2 ผลการทดลองหาความเร็วสูงสุดที่สามารถวิ่งในทางโค้งได้.....	29
4.3 ฟังก์ชันของการเคลื่อนที่ส่าย ของล้อทรงกรวยเอียง 10° จากการทดลอง.....	30
4.4 ฟังก์ชันของการเคลื่อนที่ส่าย ของล้อทรงกรวยเอียง 20° จากการทดลอง.....	30
4.5 ฟังก์ชันของการเคลื่อนที่ส่าย ของล้อทรงกรวยเอียง 30° จากการทดลอง.....	31
ก-1 แสดงค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุต่าง ๆ.....	38
ก-2 แสดงการเปรียบเทียบของกฎการย่อส่วน.....	39
ก-3 สัมประสิทธิ์แรงต้านการหมุนของล้อ.....	40
ก-4 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน.....	41

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของโบกี้รถไฟ.....	3
2.2 รางรถไฟ.....	4
2.3 การเรียกทางรถไฟที่มีความกว้างต่างๆ.....	6
2.4 การเข้าโค้งของโบกี้รถไฟที่มีค่าการยกโค้งเท่ากับศูนย์.....	7
2.5 การสายตัวของชุดล้อ.....	8
2.6 ชุดล้อ.....	9
2.7 การสายตัวของชุดล้อ.....	10
2.8 การเคลื่อนที่ของชุดล้อรูปทรงต่างๆ.....	12
3.1 ส่วนประกอบของชุดทดลอง.....	13
3.2 โครงโบกี้รถไฟ.....	14
3.3 ล้อทรงกระบอก.....	15
3.4 ล้อทรงกรวยที่มีความเป็นกรวยเป็นบวก.....	15
3.5 กรวยที่มีความเป็นกรวยเป็นลบ.....	15
3.6 รางรถไฟ.....	16
3.7 แบตเตอรี่.....	16
3.8 เฟืองดอกจอก.....	17
3.9 ตัวปรับความเร็วรอบมอเตอร์.....	18
3.10 การวิเคราะห์การสั่นอย่างอิสระของคานปลายยื่นที่มีมวล M อยู่ปลายคาน.....	19
3.11 แสดงตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงมวล.....	22
3.12 FBD ของโบกี้รถไฟจำลอง.....	23
3.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา.....	24
3.14 ชุดทดลองที่ใช้หาฟังก์ชันการเคลื่อนที่ที่สาย.....	27
4.1 กราฟฟังก์ชันของการเคลื่อนที่ที่สาย จากการทดลอง ของล้อทรงกรวย 10° ที่ความเร็ว 0.88 m/s	30
4.2 กราฟฟังก์ชันของการเคลื่อนที่ที่สาย จากการทดลอง ของล้อทรงกรวย 20° ที่ความเร็ว 0.88 m/s	31
4.3 กราฟฟังก์ชันของการเคลื่อนที่ที่สาย จากการทดลอง ของล้อทรงกรวย 30° ที่ความเร็ว 0.88 m/s	31
5.1 การเคลื่อนที่ของชุดล้อรูปทรงต่างๆ.....	32

สารบัญรูปต่อ

รูปที่	หน้า
5.2 กราฟเปรียบเทียบฟังก์ชันของการเคลื่อนที่ที่ส่ายจากการคำนวณและการทดลอง ของล้อยกรวย 10° ที่ความเร็ว 0.88 m/s	33
5.3 กราฟเปรียบเทียบฟังก์ชันของการเคลื่อนที่ที่ส่ายจากการคำนวณและการทดลอง ของล้อยกรวย 20° ที่ความเร็ว 0.88 m/s	34
5.4 กราฟเปรียบเทียบฟังก์ชันของการเคลื่อนที่ที่ส่ายจากการคำนวณและการทดลอง ของล้อยกรวย 30° ที่ความเร็ว 0.88 m/s	34
5.5 กราฟเปรียบเทียบฟังก์ชันของการเคลื่อนที่ที่ส่าย จากการคำนวณของล้อยกรวย 10° , 20° และ 30° ที่ความเร็ว 0.88 m/s	35
ก-1 สัมประสิทธิ์ค่าแรงเสียดทานของอากาศที่ไหลผ่านวัตถุรูปทรงต่างๆ.....	42
ข-1 แบบประกอบของโบกักรถไฟจำลอง.....	44
ข-2 แบบเขียนและขนาดโครงข้างโบกักรถ 1.....	45
ข-3 แบบเขียนและขนาดโครงข้างโบกักรถ 2.....	46
ข-4 แบบเขียนและขนาดโครงกลางโบกักรถ.....	47
ข-5 แบบเขียนและขนาดเพลลา.....	48
ข-6 แบบเขียนและขนาดล้อยกรวยระบอบ.....	49
ข-7 แบบเขียนและขนาดล้อยกรวย 10°	50
ข-8 แบบเขียนและขนาดล้อยกรวย 20°	51
ข-9 แบบเขียนและขนาดล้อยกรวย 30°	52
ข-10 แบบเขียนและขนาดเฟืองดอกจอก.....	53
ข-11 แบบเขียนและขนาดมอเตอร์.....	54
ข-12 แบบเขียนและขนาดแบตเตอรี่.....	55
ข-13 แบบเขียนและขนาดกล่องบรรจุตัวปรับความเร็วรอบและสวิตซ์.....	56

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปริญญานิพนธ์

ในปัจจุบันนี้หากเราพูดถึงการขนส่งนั้นรถไฟถือได้ว่าเป็นตัวเลือกหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญมาเป็นอันดับต้นๆ เพราะมีความประหยัด ปลอดภัย สามารถขนส่งได้ครั้งละเป็นจำนวนมาก และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม รวมทั้งการเดินทางทางรถไฟก็เป็นที่ยอมรับเช่นกัน จากการเดินทางที่มีความปลอดภัย รวดเร็วสะดวกสบาย แต่การเดินทางและขนส่งทางรถไฟนั้นอาจจะมีปัญหาอยู่บ้าง อาทิ รถไฟนั้นยังมีการพัฒนาที่น้อยอยู่สำหรับประเทศไทยซึ่งทำให้เรื่องความปลอดภัยและตรงเวลาของรอบรถไฟนั้นยังด้อยอยู่ และเนื่องด้วยทางคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้เปิดหลักสูตรขนส่งทางรางขึ้น คณะผู้จัดทำจึงมีความคิดที่จะพัฒนาอุปกรณ์โดยการจำลองโบกี้รถไฟขึ้นมาและศึกษารูปแบบของล้อกับการเคลื่อนที่ของโบกี้รถไฟ ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการสายของรถไฟ โดยการออกแบบและสร้างโบกี้รถไฟจำลองที่มีอัตราส่วน 1/15 โดยใช้หลักการย่อส่วนของ Iwnicki ที่สามารถเปลี่ยนรูปแบบล้อได้ โดยรูปแบบของล้อประกอบด้วย ล้อแบบทรงกรวย กับล้อแบบทรงกระบอก ทางคณะผู้จัดทำหวังว่าจะได้เรียนรู้ทฤษฎีเกี่ยวกับการสายตัวของรถไฟ และได้สร้างชุดทดลองโบกี้รถไฟเพื่อนำมาใช้ในห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

1.2 จุดประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาและพิสูจน์ทฤษฎีเกี่ยวกับลักษณะการเคลื่อนที่สายของรถไฟ
- 1.2.2 เพื่อสร้างชุดทดลองโบกี้รถไฟจำลองที่สามารถเปลี่ยนรูปแบบล้อได้ โดยรูปแบบของล้อจะประกอบด้วย ล้อแบบทรงกรวยและแบบทรงกระบอก

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 รูปทรงของล้อที่ใช้ทดลอง ใช้แบบทรงกระบอกกับทรงกรวย
- 1.3.2 ใช้มอเตอร์กระแสตรงในการขับเคลื่อนแบบจำลองโบกี้รถไฟ
- 1.3.3 รางที่ใช้ในการทดสอบเป็นทางตรงกับทางโค้ง
- 1.3.4 ขนาดของโบกี้จำลองมีอัตราส่วน 1/15 จากขนาดจริง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1. ได้ชุดทดลองโบทรีดไฟเพื่อนำไปใช้ในห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
- 1.4.2. ได้ศึกษาเรียนรู้ทฤษฎีเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของรถไฟ

1.5 ขั้นตอนการดำเนินการ

- 1.5.1 ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการเคลื่อนที่สาย
- 1.5.2 ศึกษาลักษณะของล้อรถไฟ
- 1.5.3 ศึกษาส่วนประกอบของโบทรีดไฟ
- 1.5.4 ศึกษาลักษณะรางที่ใช้ในการทดสอบ
- 1.5.5 ออกแบบโบทรีดในอัตราส่วน 1/15
- 1.5.6 คำนวณความเร็วสูงสุดในการเข้าโค้งของโบทรีดจำลอง
- 1.5.7 คำนวณขนาดกำลังของมอเตอร์
- 1.5.8 สร้างโบทรีดจำลอง
- 1.5.9 ประกอบชิ้นส่วนโบทรีดไฟจำลอง
- 1.5.10 สร้างรางรถไฟจำลอง
- 1.5.11 ทดสอบและปรับปรุงโบทรีดจำลอง
- 1.5.12 สรุปผล

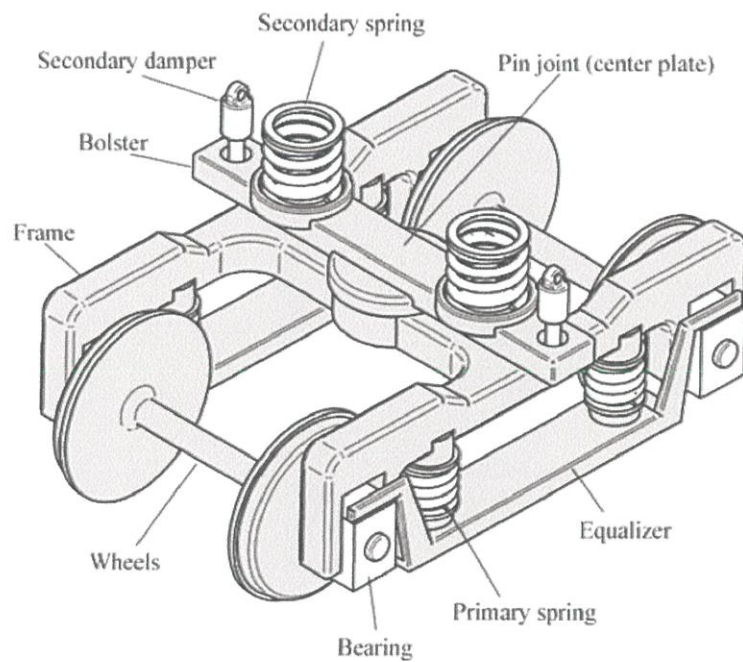
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 โบกี้รถไฟ[1]

โบกี้รถไฟ หลายคนคงจะเรียกทั้งตัวรถไฟว่าเป็นโบกี้ ซึ่งเป็นคำที่ใช้กันติดปาก แต่ในความเป็นจริงนั้น โบกี้รถไฟหมายถึง ส่วนที่ใส่รองรับน้ำหนักของตัวรถ มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า แคร่ นอกจากนี้จะเป็นส่วนที่ออกแบบมาเพื่อรับน้ำหนักแล้วยังเป็นส่วนที่มีระบบกันสะเทือนและระบบอื่นๆที่ช่วยทำให้เกิดความนิ่มนวลต่อผู้โดยสาร และสามารถทำให้รถไฟวิ่งด้วยความเร็วสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย

โบกี้ไฟฟ้านั้นมีหลายชนิด ขึ้นอยู่กับการออกแบบ และการนำไปใช้งาน มีตั้งแต่ โบกี้แบบ 1 เพลา มี 2 ล้อ โบกี้ 2 เพลา มี 4 ล้อ หรือโบกี้แบบอื่นๆ ในระยะแรกตัวรถไฟยังไม่มีในส่วนของโบกี้ ทำให้ไม่สามารถวิ่งด้วยความเร็วสูงได้ ต่อมาเมื่อมีการออกแบบให้รถไฟมีส่วนของโบกี้ ทำให้ตัวรถมีความมั่นคง โดยโบกี้ยี่นั้นจะรับการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการยุบตัวของล้อ แล้วส่งไปยังตัวรถ ซึ่งสามารถเพิ่มสมรรถนะให้กับรถไฟเป็นอย่างดี



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของโบกี้รถไฟ

: ที่มาของรูปภาพ Ahmed A. Shabana, Khaled E. Zaazaa, Hiroyuki Sugiyama. *RAILROAD VEHICLE DYNAMICS A Computational Approach*. New York. Taylor & Francis Group, 2008.

2.2 รางรถไฟ[1]

รางรถไฟมีประวัติวิวัฒนาการมายาวนานตามเทคโนโลยีในการผลิตที่ทำได้ในแต่ละยุคสมัย จนกระทั่งถึงปัจจุบัน รางรถไฟจะทำด้วยเหล็กเหนียวรีดร้อนมีรูปร่าง มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ หัวราง (Rail Head) เอวราง (Web) และฐานราง (Foot) รางที่นิยมใช้ คือ แบบฐานรางกว้าง ซึ่งสามารถยึดเกาะอยู่กับหมอนรองรางได้อย่างมั่นคงด้วยเครื่องยึดเหนี่ยวราง (Rail Fastener) ในอดีตจะมีการยึดรางเข้ากับไม้หมอนแล้วใช้ตะปูรางตอกยึดฐานรางไว้กับไม้หมอน รางรถไฟจะรับแรงกดที่ส่งผ่านจากเพลาล้อลงไปที่โครงสร้างทางรถไฟ การกำหนดขนาดของรางจึงเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งปัจจุบันการกำหนดมาตรฐานรางสำหรับทางสร้างใหม่หรือทางที่ได้มีการปรับปรุงแล้วไว้ 100 ปอนด์ต่อหลาตามมาตรฐานอังกฤษหรือประมาณ 50 กิโลกรัมต่อเมตรในมาตรฐาน UIC ปัจจุบัน พบว่ามีการใช้หมอนคอนกรีตมากขึ้นเนื่องจากหมอนไม้ ต้องใช้ไม้เนื้อแข็งที่นับวันจะหายากและมีราคาแพง ในขณะที่หมอนคอนกรีตอัดแรงจะมีอายุการใช้งานจนถึง 60 ปี



รูปที่ 2.2 รางรถไฟ

: ที่มาของรูป <http://www.bitterwallet.com/nobody-wants-a-stupid-high-speed-rail-link/46215>

2.2.1 หน้าที่ของรางรถไฟ

รางรถไฟ มีหน้าที่สำคัญ 2 ประการ คือ รับน้ำหนักขบวนรถไฟ (Load Bearing) และประคองขบวนรถไฟให้วิ่งไปตามทาง (Direction Guiding)

2.2.1.1 หน้าที่ในการรับน้ำหนักขบวนรถไฟ

การทำหน้าที่รับน้ำหนักขบวนรถไฟเป็นเรื่องตรงไปตรงมา สิ่งที่ต้องอธิบายถึงความสามารถในการรับน้ำหนักของรางรถไฟกำหนดโดยมาตรฐาน เรียกว่า น้ำหนักกดเพลลา (Axle Load) และการกระจาย

น้ำหนักบนราง (Load Concentration) ตัวเลขดังกล่าวจะใช้เป็นข้อกำหนดออกแบบรางรถไฟและขบวนรถไฟรางรถไฟที่ออกแบบโดยใช้มาตรฐานน้ำหนักดเพลาสสูง หมายถึง ต้องใช้รางขนาดใหญ่วางอยู่บนโครงสร้างที่มีความมั่นคง แข็งแรง ซึ่งแน่นอนที่จะทำให้ค่าก่อสร้างแพงขึ้น แต่ก็จะมีขีดความสามารถในการขนส่งสูงด้วย รวมทั้งเมื่อนำขบวนรถไฟที่มีน้ำหนักเบามาวิ่งก็จะรู้สึกมันคงแม้จะไม่ค่อยสมประโยชน์มากนัก ตัวอย่างเช่น รางรถไฟที่ออกแบบเพื่อรองรับรถสินค้าซึ่งมีน้ำหนักดเพลาสสูง เมื่อนำรถโดยสารที่มีน้ำหนักน้อยกว่ามาวิ่งก็จะรู้สึกมันคงดี หรือกลับกัน คือ รางรถไฟสำหรับวิ่งขบวนรถโดยสารที่ต้องทำการบำรุงรักษาด้วยมาตรฐานสูงซึ่งมีค่าใช้จ่ายจำนวนมาก เมื่อนำมาใช้วิ่งรถสินค้าด้วยก็จะทำให้รางที่บำรุงรักษาไว้ดีต้องทรุดโทรมเร็วและการเดินรถสินค้าก็ไม่จำเป็นต้องบำรุงรักษารางรถไฟด้วยมาตรฐานสูงถึงมากเพียงนั้น

2.2.1.2 หน้าที่ในการกำหนดทิศทางการวิ่งขบวนรถไฟ

ล้อรถไฟและรางรถไฟได้พัฒนารูปแบบมาจนถึงปัจจุบันซึ่งเป็นล้อแบบมีบังใบ (Flange) อยู่ด้านในของหัวราง บังใบล้อจะเป็นตัวระบองให้ขบวนรถไฟวิ่งไปตามรางระยะห่างระหว่างหัวรางด้านในเรียกว่า “เรลเกจ”(Rail Gauge) ส่วนจุดที่ล้อสัมผัสหัวรางเรียกว่า “เทรด” (Thread) เส้นผ่าศูนย์กลางของล้อรถไฟจะวัดตรงจุดสัมผัสนี้โดยเรียกว่าเป็นเส้นผ่าศูนย์กลาง ณ จุดสัมผัส (Diameter on thread) ระยะห่างระหว่างจุดสัมผัสด้านบนที่ล้อกดลงบนรางกับจุดสัมผัสด้านข้างของบังใบ เมื่อล้อรถไฟเคลื่อนที่ไปไกลสุดทางด้านข้าง เรียกว่า ระยะสายตัวของล้อ (Wheel Flange Play) ระยะสายตัวจะสัมพันธ์กับความลาดเอียงที่พื้นล้อและรูปร่างของหัวรางซึ่งเป็นตัวกำหนดความถี่การสายตัวแบบงูเลื้อย (Sing Wave) ของล้อพร้อมเพล

2.2.2 ขนาดความกว้างของรางรถไฟ

เมื่อรถไฟได้มีการพัฒนามากขึ้น สิ่งหนึ่งที่สำคัญต้องคำนึงถึง ก็คือ การกำหนดมิติความกว้างของรางรถไฟ (Track Gauge) จะวัดจากหัวรางด้านในข้างซ้ายถึงหัวรางด้านในข้างขวาขนาดความกว้างของรางรถไฟที่มีการอยู่ทั่วโลก ประกอบด้วยรางรถไฟแคบที่สุด คือ รางเดี่ยว (Mono rail) ไปจนถึงรางรถไฟกว้างที่สุดที่มีการ คือ มีขนาดความกว้าง 2.140 เมตร ในบรรดาขนาดความกว้างของรางต่างๆ นั้น จะมีรางรถไฟ 3 ขนาดที่มีการอยู่มากที่สุดทั่วโลก และที่มีจำนวนประเทศที่ใช้รางขนาดนี้ใกล้เคียงกันซึ่งได้แก่

2.2.2.1 ขนาดความกว้าง 1.435 เมตร (4 ฟุต 8-1/2 นิ้ว)

เป็นขนาดรางรถไฟที่ใช้กันมากที่สุด เรียกมาตรฐานรางกว้างขนาดนี้ว่า European Standard Gauge บางครั้งก็เรียกอย่างย่อว่า Standard Gauge เป็นรางรถไฟที่กำหนดเป็นมาตรฐานของกลุ่มใน

ประเทศยุโรป เพื่อช่วยให้การดำเนินรถถึงกันกระทำโดยสะดวก มากกว่า 60% ของทางรถไฟทั่วโลก จะใช้มาตรฐานนี้เป็นหลัก โดย Standard Gauge นี้มีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Stephenson Gauge ซึ่งมาจากชื่อของ George Stephenson ผู้ที่สร้างรถไฟคันแรกของโลกนั่นเอง

2.2.2.2 ขนาดความกว้าง 1.067 เมตร (3 ฟุต 6 นิ้ว)

เป็นขนาดรางที่ใช้มากเป็นลำดับที่สอง เรียกมาตรฐานรางกว้างขนาดนี้ว่า Caps Gauge มีใช้อยู่กระจัดกระจายทั่วโลก โดยเฉพาะประเทศที่เป็นเกาะในทวีปเอเชีย (เช่น ญี่ปุ่น อินโดนีเซีย) เข้าใจว่ารางกว้างขนาดนี้ได้ชื่อมาจาก การนำไปใช้ในการสร้างทางรถไฟในสหภาพแอฟริกาใต้

2.2.2.3 ขนาดความกว้าง 1.00 เมตร (3 ฟุต 3-3/8 นิ้ว)

เป็นขนาดรางที่ใช้มากเป็นลำดับที่สาม เรียกมาตรฐานรางกว้างนี้ว่า Meter Gauge ใช้อยู่ในกลุ่มทางประเทศ โซนเอเชียอาคเนย์ทั้งหมด บางประเทศในแอฟริกา อเมริกาใต้ และทางรถไฟสายแยกในยุโรปบางประเทศ

ทางรถไฟที่ใช้รางกว้างบางขนาดก็ยกเลิกใช้การไปแล้ว ส่วนมากทางรถไฟที่มีจำนวนประเทศที่ใช้น้อย แต่มีความยาวทางรถไฟค่อนข้างมาก เช่น รางกว้าง 1.676 เมตร (5 ฟุต 6 นิ้ว) รางกว้าง 1.600 เมตร (5 ฟุต 3 นิ้ว) และรางกว้าง 1.524 เมตร (5 ฟุต) ซึ่งเรียกรวมๆ กันว่า รางกว้างกว่ามาตรฐาน (Broad Gauge) ใช้อยู่มากในประเทศที่มีขนาดพื้นที่กว้างเช่น อินเดีย ออสเตรเลีย และสหภาพโซเวียต เป็นต้น

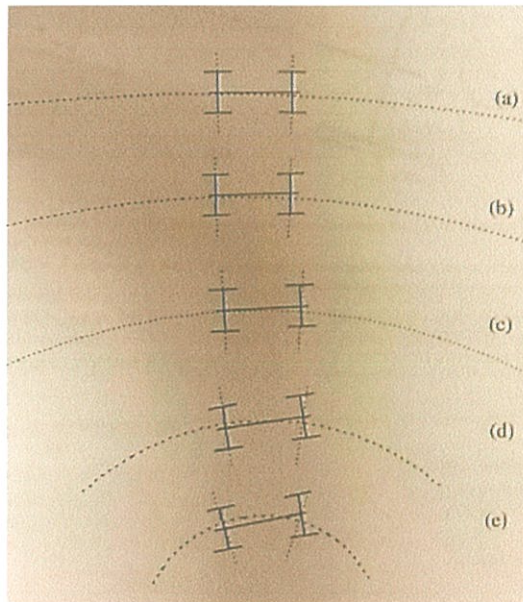


รูปที่ 2.3 การเรียกทางรถไฟที่มีความกว้างต่างๆ

: ที่มาของรูป นคร จันทสร. ช่างรถไฟ:ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ โครงการพัฒนาระบบขนส่งทางรางและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องของประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2554.

2.3 การเข้าโค้ง[2]

การวิเคราะห์เชิงเส้นนั้นสามารถนำมาใช้อธิบายกลไกพื้นฐานการตอบสนองแบบสภาวะคงตัวของยานพาหนะเพื่อตรวจสอบการเข้าโค้ง และข้อบกพร่องในการเข้าโค้ง และยังสามารถนำมาใช้อธิบายการเคลื่อนที่แบบรัศมีโค้งวงกว้างที่มีชุดล้อแคบได้เป็นอย่างดี ซึ่งสามารถเพิ่มด้วยการรวมเอาผลกระทบของแรงหมุนกับคุณสมบัติในการต้านทานต่อแรงโน้มถ่วงเข้าไป อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เชิงเส้นนั้น ยังคงมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน เนื่องจากวิถีโค้งรัศมีวงแคบ (อธิบายอย่างคร่าวคือส่วนโค้งที่มีรัศมี $R_0 < 100$) มีผลต่อสัดส่วนช่องว่างระหว่างล้อของชุดล้อทั้งหมดหรือบางตัวอย่างมีนัยสำคัญ เราคาดคิดของล้อรถไฟไม่สามารถอธิบายโดยการใช้เพียงแค่ฟังก์ชันเชิงเส้นแบบง่ายๆ อีกทั้งยังต้องใช้ค่าส่วนโค้ง, ค่าความชัน และรัศมีของล้อ ที่เกิดขึ้นจริงอีกด้วย โดยหน้าสัมผัสความชันอาจมีมากเพื่อเพิ่มแรงหมุนให้สูงขึ้น และส่งผลให้แรงมีองค์ประกอบต่อทิศทางด้านข้าง (Lateral Direction) การเปลี่ยนแปลงความเร็วการหมุนของชุดล้ออาจส่งผลต่อขนาดของการคืบ และเนื่องจาก contact patch มีการเคลื่อนผ่านไปตามรางและเปลี่ยนแปลงไปตามรูปร่างนั้น การเปลี่ยนแปลงส่วนโค้งจะส่งผลต่อขนาดของแรงคืบ และดังที่แรงคืบและแรงหมุนอาจจะมีมาก ทำให้อาจจะเกิดการอิมิตัวของการคืบขึ้นได้



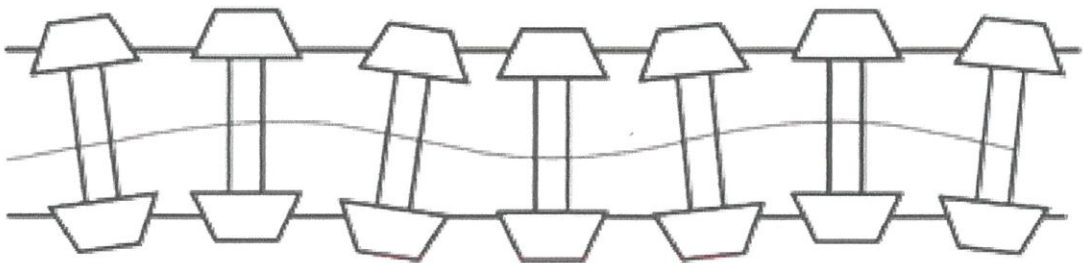
รูปที่ 2.4 การเข้าโค้งของโบกี้รถไฟที่มีค่าการยกโค้งเท่ากับศูนย์ (a) รัศมีความโค้ง $R_0 = 1500$ เมตร (b) รัศมีความโค้ง $R_0 = 800$ เมตร (c) รัศมีความโค้ง $R_0 = 500$ เมตร (d) รัศมีความโค้ง $R_0 = 250$ เมตร (e) รัศมีความโค้ง $R_0 = 100$ เมตร

: ที่มาของรูป A.H. Wickens. *Fundamentals of rail vehicle dynamics: guidance and stability*. Lisse. Swets & Zeitlinger B.V., 2003.

2.4 การเคลื่อนที่สาย[3]

การเคลื่อนที่สาย คือ การที่ชุดล้อสายตัวตามรูปร่างของมันในระหว่างการเคลื่อนที่ และผลลัพธ์คือ มีการสั่นสะเทือนด้านข้างทั้งสองด้านควบคู่กันไป เป็นมุมเฉียงที่เกิดจากการหมุน และการสั่นนั้นต้องอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ เพื่อให้เกิดความสบายและความปลอดภัยสำหรับผู้ใช้งาน ในส่วนของความเร็วนั้นขึ้นอยู่กับรถไฟและรางที่เราออกแบบ ซึ่งต้องอาศัยประสบการณ์ในการจัดการกับความไม่สะดวกสบายและสาเหตุของการตกราง ความเร็วที่ซึ่งทำให้รถไฟไม่เสถียรเรียกว่า critical speed ที่ความเร็วนี้รถไฟจะตกอยู่ภายใต้แรงกระทำที่สูงมากในระหว่างการเกิดปรากฏการณ์การสั่นขึ้นและส่งผลต่อบังคับของล้อกับราง ผลกระทบดังกล่าวทำให้เกิดจุดสัมผัสที่สองขึ้น เช่น สมมติว่าจุดสัมผัสที่หนึ่ง คือการสัมผัสกันระหว่างล้อกับราง ที่ความเร็วต่ำกว่าความเร็ววิกฤติ ความเร็วที่จุดสัมผัสที่สอง (บังคับกับราง)จะทำให้แน่ใจว่ารถไฟจะมีเสถียรภาพในการเคลื่อนที่และยังสามารถป้องกันการตกรางได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามถ้าจุดสัมผัสที่สองมีแรงกระทำเกินขีดจำกัดในระหว่างการสั่นที่รุนแรง การตกรางย่อมเกิดขึ้นได้ มันเป็นสิ่งสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามมีล้อบางรูปแบบที่ออกแบบให้ไม่มีจุดสัมผัสที่สอง และล้อจะมีจุดสัมผัสเพียงจุดเดียวกับรางเสมอ ในกรณีนี้แรงที่กระทำจะเกิดที่จุดๆเดียว ซึ่งจะไม่คำนึงถึงจำนวนของล้อที่สัมผัสกับจุดนั้นๆ ทำให้รู้ถึงความเร็ววิกฤติของรถไฟ ความเร็วนั้นสามารถหาค่าได้โดยใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์หรือการทดสอบจริงภาคสนาม

โดยทั่วไป เราคาดว่าจะสามารถหาสองส่วนที่ไม่เสถียรของรถไฟ ส่วนที่หนึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงความเร็วต่ำซึ่งเกี่ยวข้องกับความเร็วของตัวรถไฟ ส่วนที่สองจะเกิดขึ้นในช่วงความเร็วสูงซึ่งเกี่ยวข้องกับการสั่นของโบกี้รถไฟ สองลักษณะสามารถบ่งชี้โดย Matsudaira ผู้ซึ่งค้นพบทั้งสองส่วนดังกล่าว คือ การสั่นแบบปฐมภูมิและการสั่นแบบทุติยภูมิ มันมีความสำคัญที่จะชี้ให้เห็นถึงความไม่เสถียร ในแบบแรกนั้นสามารถควบคุมโดยใช้ตัวลดการสั่นสะเทือน(Damper) ในระบบกันสะเทือนทุติยภูมิ เพื่อที่จะลดแอมพลิจูดในด้านข้างของตัวรถไฟ ส่วนในแบบที่สองนั้นจะเกิดขึ้นที่ความเร็วสูงซึ่งเป็นแบบเฉพาะของระบบโบกี้รถไฟ ความไม่เสถียรนี้ขึ้นอยู่กับ การออกแบบระบบกันสะเทือนและลักษณะของล้อ

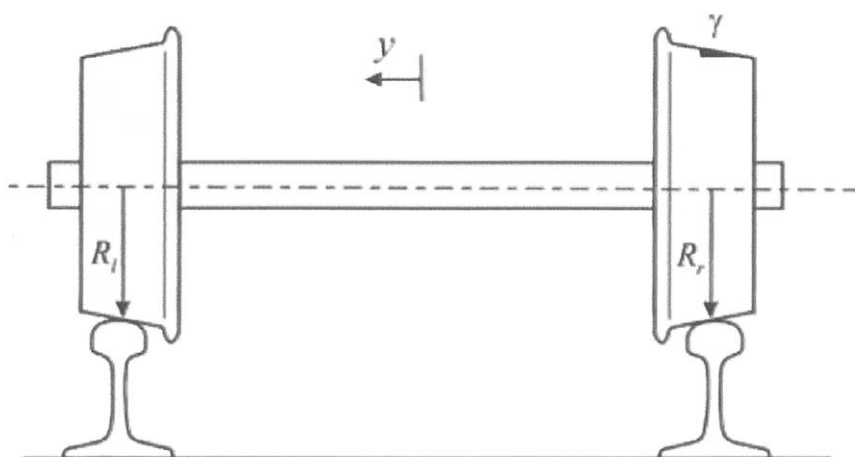


รูปที่ 2.5 การส่ายตัวของชุดล้อ

: ที่มาของรูป Simon Iwnicki. *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*. New York. Taylor & Francis Group, 2006.

เมื่อรถไฟเคลื่อนที่ไปบนราง จะเกิดปรากฏการณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่งนั่นคือ การเคลื่อนที่ส่าย ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของชุดล้อจากตำแหน่งสมดุล ชุดล้อประกอบด้วยล้อ 2 ข้าง (ขวาและซ้าย) ซึ่งยึดติดกับเพลลา และหมุนไปพร้อมกัน ล้อมีรูปทรงกรวย ด้วยรูปทรงนี้เมื่อมีการเคลื่อนที่ไปบนรางชุดล้อจะพยายามรักษาสถิตไว้

สามารถอธิบายพฤติกรรมนี้โดยการวิเคราะห์แบบง่าย สมมติชุดล้อวิ่งไปบนราง แสดงในรูป 2.6



รูปที่ 2.6 ชุดล้อ

: ที่มาของรูป Ahmed A. Shabana, Khaled E. Zaazaa, Hiroyuki Sugiyama. *RAILROAD VEHICLE DYNAMICS A Computational Approach*. New York. Taylor & Francis Group, 2008.

เมื่อชุดล้ออยู่ในตำแหน่งสมดุล ($y = 0$) ล้อขวาและซ้ายจะมีรัศมีเริ่มต้น R_l และ R_r ตามลำดับ ถ้าล้อทั้ง 2 ข้างเหมือนกัน และสมมาตรกัน ในตำแหน่งสมดุล รัศมี R_l และ R_r จะเท่ากัน เรียกว่ารัศมี R_0 ค่าความเป็นกรวยของล้อ (γ) คือ ความลาดเอียงของล้อ แสดงในรูป 2.6

เมื่อชุดล้อเคลื่อนที่ไปด้านข้างการเปลี่ยนแปลงรัศมี ΔR ของล้อทั้งสองข้างหาได้จากสมการ

$$\Delta R = y\gamma \quad (2.1)$$

รัศมีของล้อขวาและล้อซ้ายหาได้จากสมการ

$$\left. \begin{aligned} R_r &= R_0 - y\gamma \\ R_l &= R_0 + y\gamma \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

ถ้าชุดล้อหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω ความเร็วที่ล้อข้างขวาและซ้าย คือ V_r และ V_l ตามลำดับ

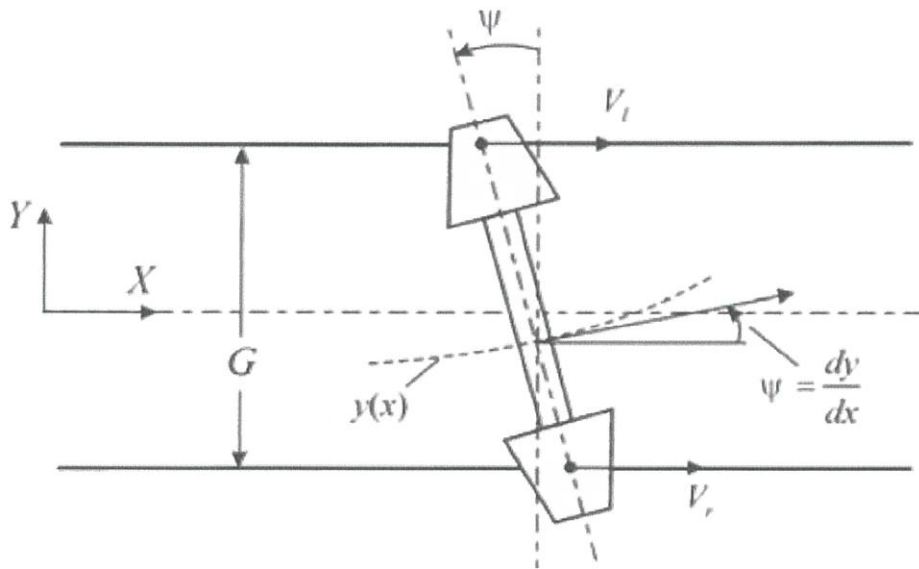
$$\left. \begin{aligned} V_r &= R_r \omega \\ V_l &= R_l \omega \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

จาก R_l และ R_r ในสมการ 2.2 ความเร็วที่ตำแหน่งกึ่งกลางชุดล้อ คือ V

$$V = (V_r + V_l) / 2 = R_0 \omega \quad (2.4)$$

มุมหัน ψ แสดงในรูป 2.7 สมมติให้มุมมีขนาดเล็กมาก ($\tan \psi \approx \psi$) ความเร็วที่ล้อเคลื่อนที่ไปด้านข้าง หาได้จากสมการ

$$\dot{y} = \frac{dy}{dt} = \frac{dy}{dx} \frac{dx}{dt} = \psi V = \psi R_0 \omega \quad (2.6)$$



รูป 2.7 การส่ายตัวของชุดล้อ

: ที่มาของรูป Ahmed A. Shabana, Khaled E. Zaazaa, Hiroyuki Sugiyama. *RAILROAD VEHICLE DYNAMICS A Computational Approach*. New York. Taylor & Francis Group, 2008.

จากการวิเคราะห์แบบง่าย อัตราการเปลี่ยนแปลงของมุมหันคือ

$$\dot{\psi} = (V_r - V_l)/G = -2y\omega\gamma/G \quad (2.7)$$

เมื่อ G แสดงในรูป 2.7 ค่าอนุพันธ์ของสมการ 2.6 โดยใช้ค่า $\dot{\psi}$ จากสมการ 2.7 คือ

$$\ddot{y} + \left(\frac{2R_0\omega^2\gamma}{G}\right)y = 0 \quad (2.8)$$

จากสมการนี้ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายแบบระบบมวล - สปริง ถ้า γ มีค่าเป็นบวก ผลลัพธ์ของสมการสามารถเขียนได้ดังนี้

$$y = A \sin(\omega_n t + C) \quad (2.9)$$

เมื่อ A และ C คือค่าคงที่ หาค่าได้จากสภาวะเริ่มต้น และ ω_n คือความถี่ธรรมชาติ ซึ่งหาได้จากสมการ

$$\omega_n = V \sqrt{\frac{2\gamma}{R_0 G}} \quad (2.10)$$

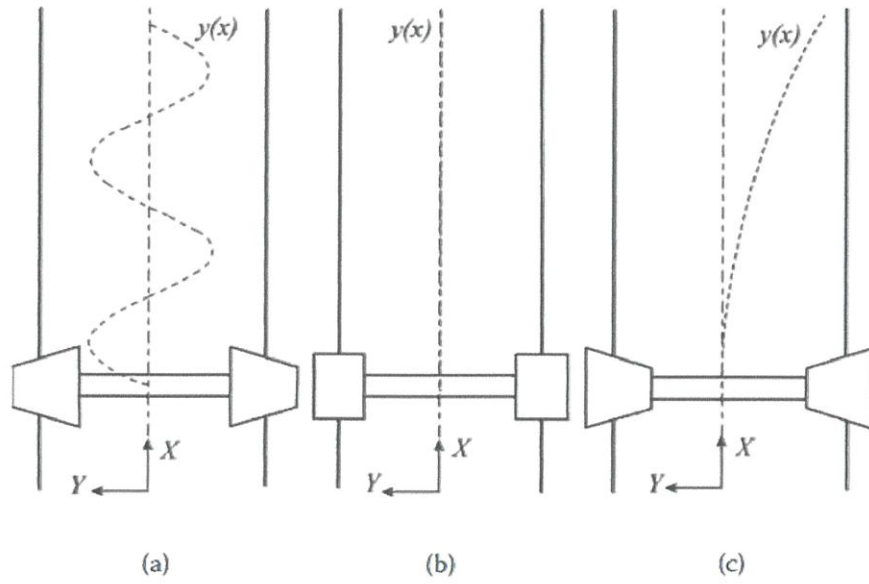
และคาบ คือ

$$\lambda = \frac{2\pi}{\omega_n} = \frac{2\pi}{V} \sqrt{\frac{R_0 G}{2\gamma}} \quad (2.11)$$

กรณีล้อเป็นรูปทรงกระบอก ค่าความเป็นกรวยจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ($\gamma = 0$) ผลลัพธ์จากสมการ 2.8 จะเป็นเส้นตรง แสดงในรูป 2.8b ชุดล้อจะไม่มีกรวยตัว

กรณีที่ค่าความเป็นกรวยมีค่าเป็นลบ ผลลัพธ์จากสมการ 2.8 จะเป็นฟังก์ชันเพิ่ม แสดงในรูป 2.8c

ดังนั้นล้อที่มีค่าความเป็นกรวยเป็นบวก จะให้การส่ายตัวอย่างคงที่



รูปที่ 2.8 การเคลื่อนที่ของจุดล้อยู่รูปทรงต่างๆ

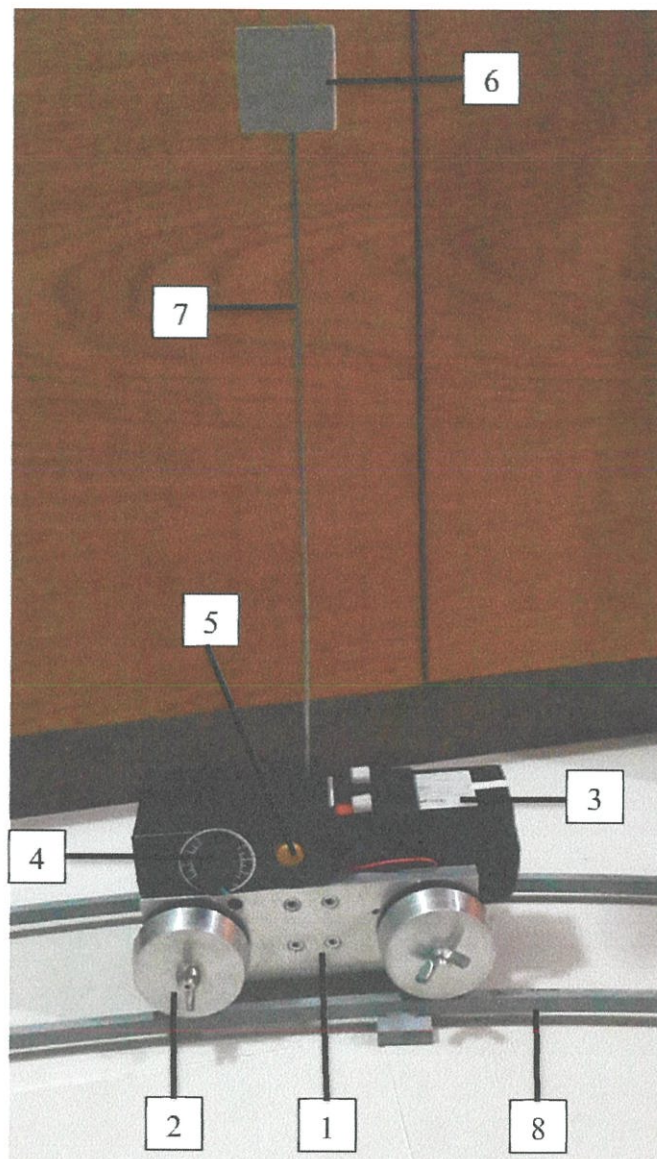
: ที่มาของรูป Ahmed A. Shabana, Khaled E. Zaazaa, Hiroyuki Sugiyama. *RAILROAD VEHICLE DYNAMICS A Computational Approach*. New York. Taylor & Francis Group, 2008.

บทที่ 3

ชุดการทดลองและวิธีการทดลอง

3.1 ส่วนประกอบของชุดทดลอง

ส่วนของชุดทดลองนี้ประกอบไปด้วย หมายเลข (1) โครงโบกั้รลไฟ (2) ล้อรถไฟ (3) แบตเตอรี่ (4) ตัวปรับความเร็วรอบมอเตอร์ (5) สวิตช์ (6) มวลที่ใช้ถ่วง (7) เส้นลวด (8) รางรถไฟ



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของชุดทดลอง

ตารางที่ 3.1 การออกแบบโบกี้ขนาดจำลอง

ส่วนประกอบ	ขนาดจริง	กฎการย่อส่วน	ขนาดที่ได้ออกแบบ [1/15]
ความยาวของโบกี้ (m)	3.606	$1/\varphi$	0.2404
ความกว้างของโบกี้ (m)	2.268	$1/\varphi$	0.1512
ความสูงของโบกี้ (m)	0.897	$1/\varphi$	0.0598
ฐานล้อ (m)	2.5	$1/\varphi$	0.1667
ขนาดของล้อ (m)	0.914	$1/\varphi$	0.0609
ความกว้างของราง (m)	1.435	$1/\varphi$	0.0957

3.1.1 โครงโบกี้รถไฟ

แผ่นอลูมิเนียมขนาดหนา 10 มิลลิเมตร สูง 60 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร ทำการกัด (Milling) ให้ได้ตามที่ออกแบบไว้ จำนวน 2 ชิ้น ดังรูป



รูปที่ 3.2 โครงโบกี้รถไฟ

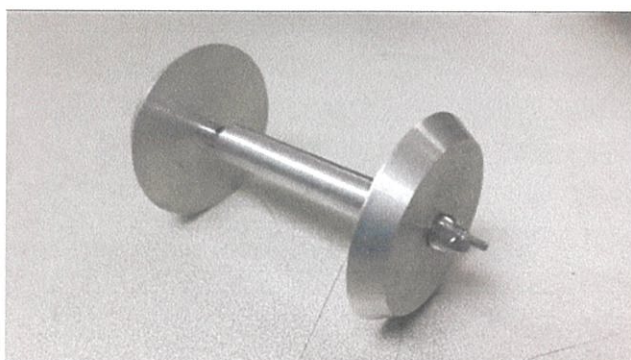
3.1.2 ล้อรถไฟ

ล้อรถไฟที่ใช้ทดลองมีด้วยกัน 3 แบบ คือ 1. ทรงกระบอก 2. ทรงกรวยที่มีมุมกรวยเป็นบวก

3. ทรงกรวยที่มีมุมกรวยเป็นลบ



รูปที่ 3.3 ล้อทรงกระบอก



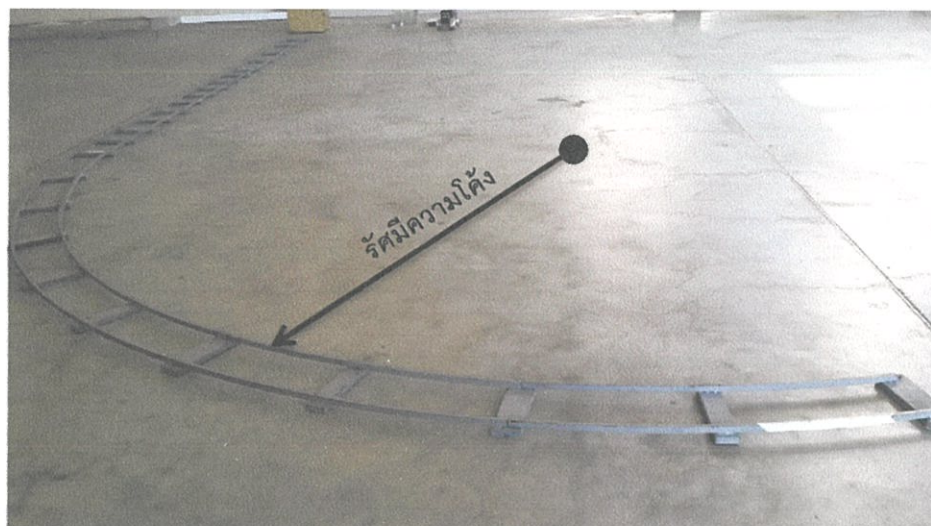
รูปที่ 3.4 ล้อทรงกรวยที่มีมุมกรวยเป็นบวก



รูปที่ 3.5 ล้อทรงกรวยที่มีมุมกรวยเป็นลบ

3.1.3 รางรถไฟ

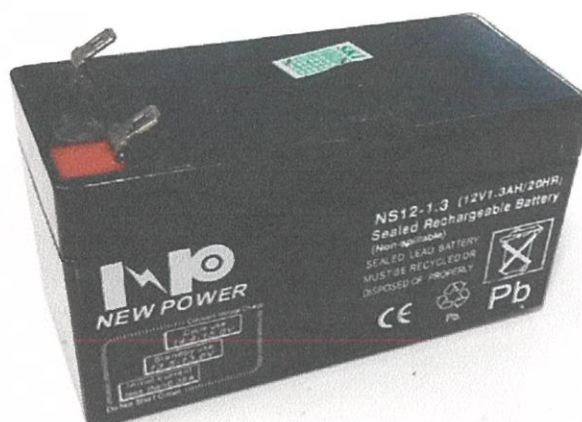
รางรถไฟมีความยาวทั้งหมด 4.678 เมตร โดยรางทางตรงมีความยาว 2.5 เมตร รางทางโค้งมีความยาว 2.178 เมตร และมีรัศมีความโค้ง 1.5 เมตร



รูปที่ 3.6 รางรถไฟ

3.1.4 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ที่เลือกใช้เป็นแบตเตอรี่แห้ง ขนาด 12 โวลต์ 1.2 แอมป์ชั่วโมง เนื่องจากมีขนาดเล็กและเพียงพอต่อการใช้งาน



รูปที่ 3.7 แบตเตอรี่

3.1.5 เฟืองดอกจอก

เฟืองที่เลือกใช้เป็นเฟืองดอกจอก 2 ชั้น ขนาดเท่ากัน โดยมีจำนวนฟันเท่ากับ 30 และมุมของหน้าฟันทำมุมเอียงกัน 45 องศา โดยตัวเฟืองทำมาจากเหล็ก และมีระบบส่งถ่ายกำลังในอัตรา 1:1

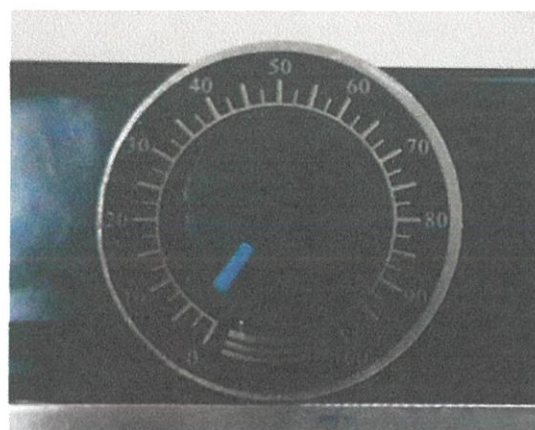
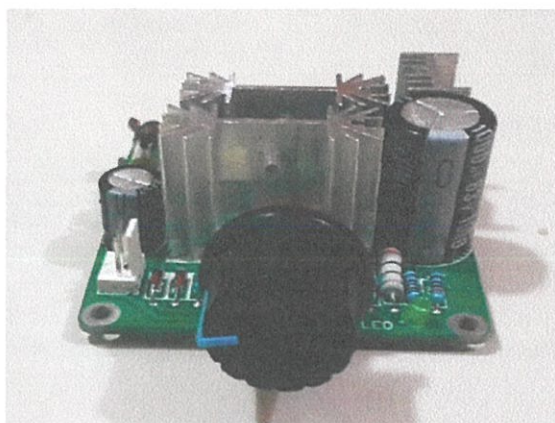


รูปที่ 3.8 เฟืองดอกจอก

3.1.6 ตัวปรับความเร็วรอบมอเตอร์

ตัวปรับความเร็วรอบมอเตอร์ ใช้ปรับเพื่อเพิ่มหรือลดความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าจำลองโดยหาความเร็วจากการปรับสเกลที่ตัวปรับความเร็วรอบมอเตอร์ ขึ้นครั้งละ 5 และจับเวลาโดยทดลองวิ่งบนรางทางตรงที่ระยะทาง 1.5 เมตร ทำซ้ำ 5 ครั้ง เพื่อหาเวลาเฉลี่ย จากนั้นหารด้วยเวลาเฉลี่ยที่บันทึก จะได้ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าจำลองที่สเกลต่างๆออกมา

ที่ สเกล	0 ถึง 35	มีความเร็ว	เท่ากับ	0	m/s
ที่ สเกล	40	มีความเร็ว	เท่ากับ	0.43	m/s
ที่ สเกล	45	มีความเร็ว	เท่ากับ	0.63	m/s
ที่ สเกล	50	มีความเร็ว	เท่ากับ	0.75	m/s
ที่ สเกล	55	มีความเร็ว	เท่ากับ	0.88	m/s
ที่ สเกล	60	มีความเร็ว	เท่ากับ	0.98	m/s
ที่ สเกล	65	มีความเร็ว	เท่ากับ	1.14	m/s
ที่ สเกล	70	มีความเร็ว	เท่ากับ	1.18	m/s
ที่ สเกล	75	มีความเร็ว	เท่ากับ	1.29	m/s

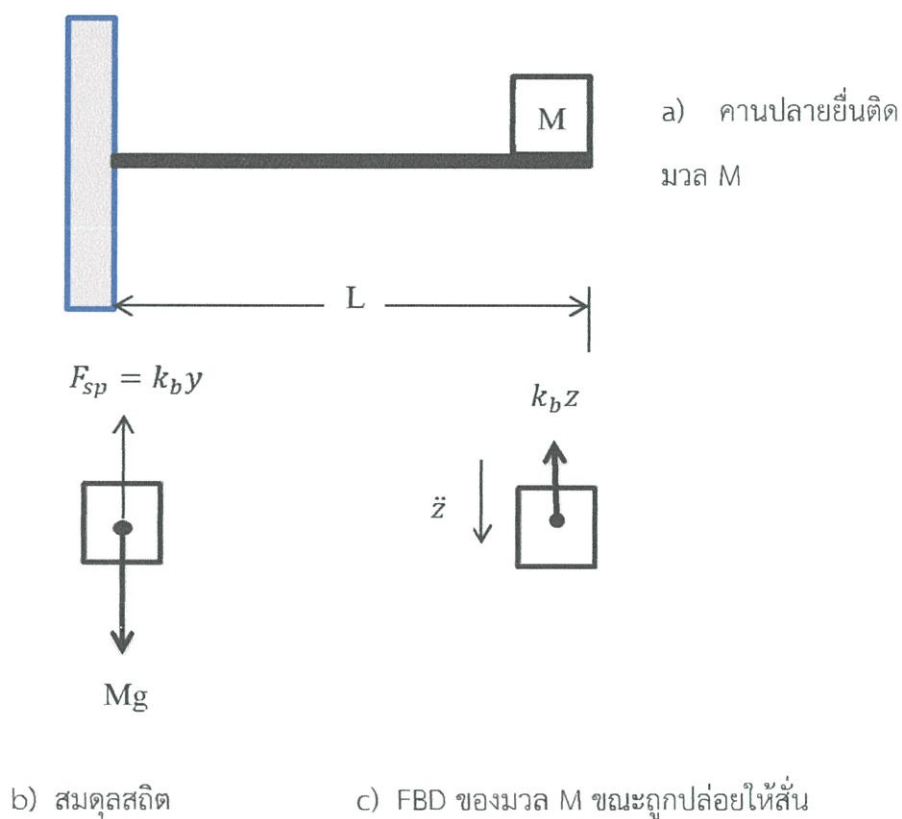


รูปที่ 3.9 ตัวปรับความเร็วรอบมอเตอร์

3.2 การคำนวณหาขนาดมวลงและเส้นลวดที่ใช้ถ่วง

เพื่อให้เห็นภาพการเกิดการเคลื่อนที่สายที่ชัดเจนขึ้น เราจึงใช้มวลง่วงติดกับเส้นลวดแล้วติดบนตัวโบกักรถไฟ โดยวัดค่าความถี่ธรรมชาติ (ω_n) ของคานปลายยื่น จากนั้นนำความถี่ธรรมชาติของคานปลายยื่นและความถี่ธรรมชาติของการเคลื่อนที่สายมาเท่ากัน ก็จะได้น้ำหนักของมวลง่วงและความยาวของเส้นลวดที่เหมาะสม

3.2.1 หาความถี่ธรรมชาติจากคานปลายยื่น

รูปที่ 3.10 การวิเคราะห์การสั่นอย่างอิสระของคานปลายยื่นที่มีมวล M อยู่ปลายคาน

เมื่อทราบค่า k_b ของคานแล้วจะพิจารณาความถี่ธรรมชาติของการสั่นอย่างอิสระ โดยตั้งมวล M ให้อยู่ในตำแหน่ง Z ใดๆ วัดจาก SEP ดังภาพ (c)

$$\downarrow + \sum F = m\ddot{z}$$

$$-k_b z = M\ddot{z}$$

$$\ddot{z} + \frac{k_b}{M} z = 0$$

ความถี่ธรรมชาติของการสั่นขึ้นลงอย่างอิสระของคาน คือ

$$\omega_n = 2\pi f_n = \sqrt{\frac{k_b}{M}}$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_b}{M}}$$

สำหรับกรณีของคานปลายยื่น จะได้ $k_b = 3EI/L^3$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{ML^3}}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_b}{M}} = \sqrt{\frac{3EI}{ML^3}} \quad (3.1)$$

3.2.2 หาความถี่ธรรมชาติจากการเคลื่อนที่สาย

$$\omega_n = V \sqrt{\frac{2\gamma}{R_0 G}} \quad (3.2)$$

เพื่อให้เห็นภาพการส่ายตัวที่ชัดเจนขึ้น จะต้องหาค่าความยาวของลวดและมวลที่ติดบนตัวรถไฟที่เหมาะสมโดยการทำให้ความถี่ธรรมชาติของคานปลายยื่นเท่ากับความถี่ธรรมชาติของการเคลื่อนที่สายจะได้

ความถี่ธรรมชาติของคานปลายยื่น = ความถี่ธรรมชาติของการเคลื่อนที่สาย

$$\sqrt{\frac{3EI}{ML^3}} = V \sqrt{\frac{2\gamma}{R_0 G}} \quad (3.3)$$

V คือ	ความเร็ว	เท่ากับ	0.88 m/s
G คือ	ความกว้างของราง	เท่ากับ	0.094 m
R ₀ คือ	รัศมีของล้อที่ตำแหน่งสมดุล	เท่ากับ	0.06 m
E คือ	ค่ามอดูลัสสภาพยืดหยุ่น	เท่ากับ	196.5 N/m ²
I คือ	ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้วของวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับ c คือ	$I = \frac{1}{2} \pi c^4$	
	ในท้องตลาดเส้นลวดมีรัศมีเท่ากับ	$1.75 \times 10^{-3} \text{ m}$	
จะได้	โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้ว	เท่ากับ	$1.473 \times 10^{-11} \text{ m}^4$
M คือ	มวลที่ใช้ถ่วง	เท่ากับ	0.2 kg

แทนค่าในสมการ (3.3) จะได้

$$\sqrt{\frac{3EI}{ML^3}} = V \sqrt{\frac{2\gamma}{R_0 G}}$$

$$\sqrt{\frac{3(196.5 \times 10^9)(1.473 \times 10^{-11})}{(0.2)L^3}} = 0.88 \sqrt{\frac{2(0.577)}{0.06(0.094)}}$$

$$L = 0.365 \text{ m}$$

เพราะฉะนั้น จึงเลือกใช้ความยาวของเส้นลวด คือ 0.365 m

3.3 การคำนวณหาขนาดของมอเตอร์

มอเตอร์ที่ใช้กับชุดทดลองควรเป็นมอเตอร์ที่มีขนาดเล็ก สามารถให้กำลังขับสูงกว่าที่ออกแบบไว้ โดยมีวิธีการคำนวณหามอเตอร์ ดังนี้

3.3.1 ความเร็วเข้าโค้งสูงสุด

จากสมการ
$$V = \sqrt{\phi_0 R_0 g} \quad (3.4)$$

เมื่อ V คือ ความเร็วสูงสุด

ϕ_0 คือ มุมยกเอียง (Cant angle)

R_0 คือ รัศมีความโค้งของรางรถไฟ

g คือ ความเร่งจากแรงโน้มถ่วง

แทนค่าลงในสมการ (3.4) จะได้

$$V = \sqrt{\phi_0 R_0 g}$$

$$= \sqrt{0.1 \times 1.5 \text{ m} \times 9.81 \text{ m/s}^2}$$

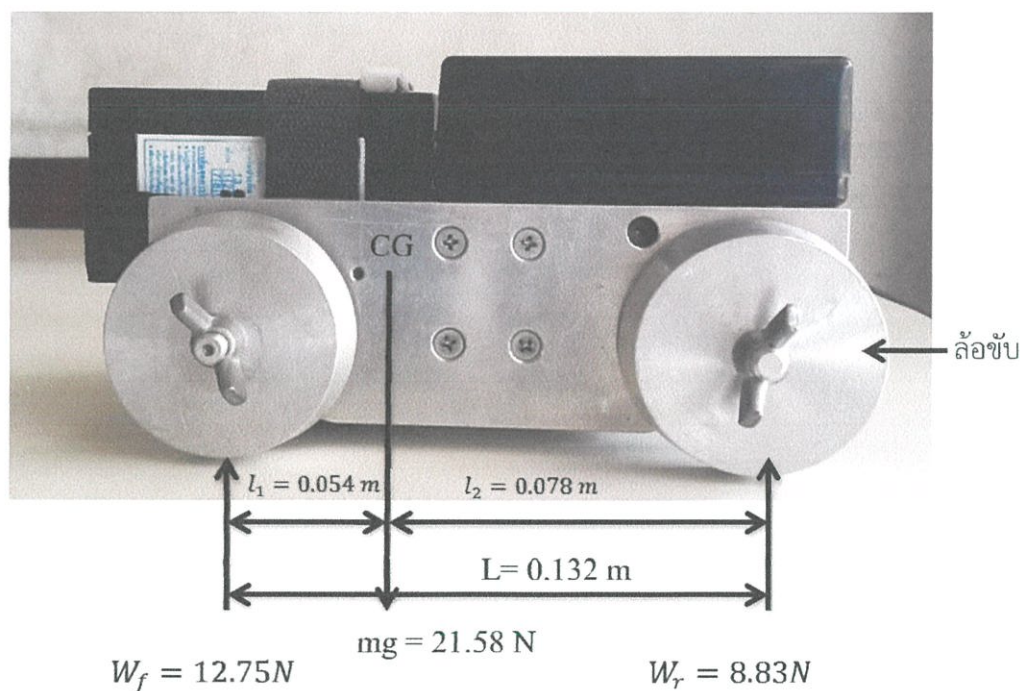
$$= 1.21 \text{ m/s}$$

3.3.2 จุดศูนย์ถ่วงมวล

หาจุดศูนย์ถ่วงมวลของโบกี้รถไฟจำลองโดยการใช้เครื่องชั่งน้ำหนักสองเครื่อง โดยวางโบกี้รถไฟจำลองให้น้ำหนักถ่ายเทน้ำหนักลงเครื่องชั่งน้ำหนักที่หนึ่งและน้ำหนักถ่ายเทลงเครื่องชั่งน้ำหนักที่สอง

จะได้

น้ำหนักโบกี้	เท่ากับ	2.2	kg
น้ำหนักกดที่ล้อหน้า	เท่ากับ	1.3	kg
น้ำหนักกดที่ล้อหลัง	เท่ากับ	0.9	kg
ระยะฐานล้อ	เท่ากับ	0.132	m

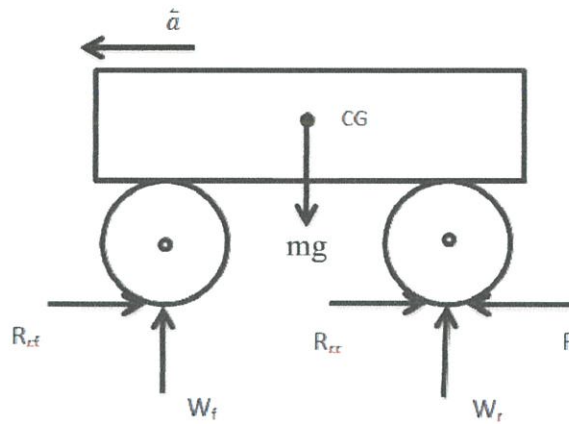


รูปที่ 3.11 แสดงตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงมวล

เพราะฉะนั้น ระยะจุดศูนย์ถ่วงมวลอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางล้อหน้า 0.054 m

3.3.3 แรงขับเคลื่อน

การคำนวณหาแรงขับเคลื่อนโดยวาด FBD ได้ดังนี้



รูปที่ 3.12 FBD ของมอเตอร์ไฟจำลอง

จากสมการ
$$F = R_a + R_r + \frac{aW}{g} \quad (3.5)$$

เมื่อ F คือ แรงขับเคลื่อน (Traction force)

R_a คือ แรงต้านอากาศ

R_r คือ แรงต้านการหมุนของล้อ

a คือ ความเร่ง

W คือ น้ำหนักของมอเตอร์ไฟจำลอง (หน่วย N)

g คือ ความเร่งจากแรงโน้มถ่วง

จากสมการ
$$R_a = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_d \quad (3.6)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ

A คือ พื้นที่หน้าตัดของใบพัด เท่ากับ $0.11\text{m} \times 0.1\text{m} = 0.011 \text{ m}^2$

v คือ ความเร็วของอากาศ เท่ากับ ความเร็วสูงสุดจากสมการ 3.4 เท่ากับ 1.21 m/s

C_d คือ สัมประสิทธิ์แรงฉุดของอากาศ สำหรับรูปทรงที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม เท่ากับ 1.05

แทนค่าในสมการที่ 3.6 จะได้

$$\begin{aligned} R_a &= \frac{1}{2} \left(1.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) (1.21 \text{ m/s})^2 (0.011 \text{ m}^2) (1.05) \\ &= 0.0101 \text{ N} \end{aligned}$$

จากสมการ $R_r = R_{rf} + R_{rr} = f_r(W_f + W_r)$ (3.7)

เมื่อ R_{rf} คือ แรงต้านการหมุนของล้อหน้า

R_{rr} คือ แรงต้านการหมุนของล้อหลัง

f_r คือ สัมประสิทธิ์แรงต้านการหมุนของล้อ (จากตาราง ก-3 สำหรับล้อเหล็กที่วิ่งบนรางเหล็ก)

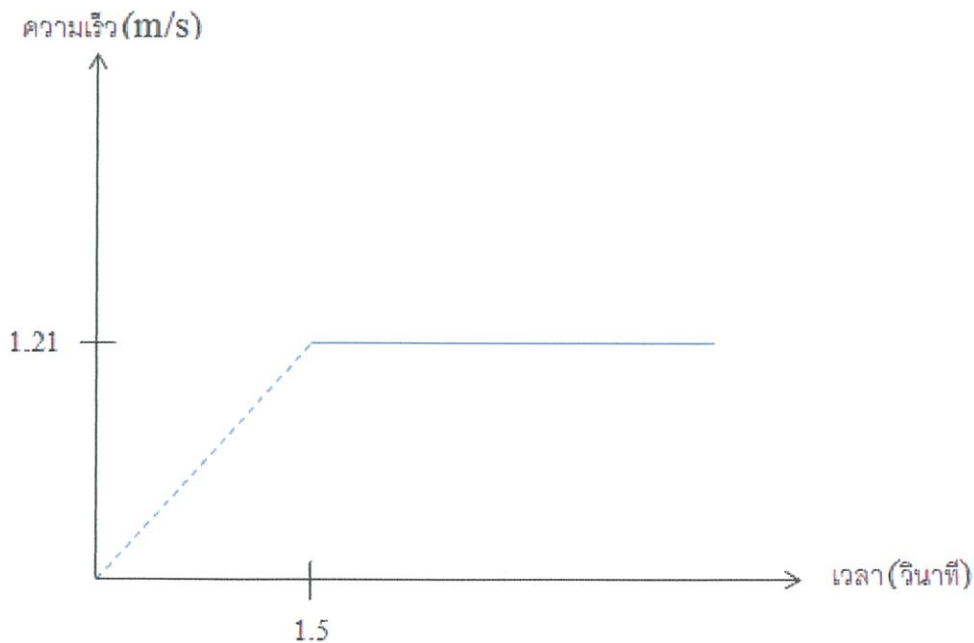
W_f คือ แรงกดที่ล้อหน้า

W_r คือ แรงกดที่ล้อหลัง

แทนค่าลงในสมการที่ 3.7 จะได้

$$\begin{aligned} R_r &= 0.002(12.75 \text{ N} + 8.83 \text{ N}) \\ &= 0.0432 \text{ N} \end{aligned}$$

สมมติให้ความเร็วจาก 0 ถึง 1.21 m/s ของโบกี้รถไฟจำลอง ใช้เวลา 1.5 วินาที สามารถเขียนกราฟได้ดังนี้



รูปที่ 3.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา

จะได้ ความเร่ง เท่ากับ $\frac{1.21 \text{ m/s}}{1.5 \text{ s}} = 0.81 \text{ m/s}^2$

จากนั้น แทนค่าทั้งหมดลงสมการที่ 3.5 จะได้

$$F = 0.0101N + 0.0432N + \left(\frac{0.81 \text{ m/s}^2 \times 21.58N}{9.81 \text{ m/s}^2} \right)$$

$$= 1.8351 \text{ N}$$

จากสมการ $F_{max} = \mu W_r$ (3.8)

เมื่อ F_{max} คือ แรงขับเคลื่อนสูงสุด

μ คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน จากตาราง ก-4

W_r คือ แรงกดที่ล้อหลัง

แทนค่าลงในสมการที่ 3.8 จะได้

$$F_{max} = 0.3 \times 8.83 \text{ N}$$

$$= 2.6490 \text{ N}$$

แรงขับเคลื่อนที่คำนวณมีค่าน้อยกว่าแรงขับเคลื่อนสูงสุด แสดงว่าล้อขับเคลื่อนของมอเตอร์ไฟฟ้าจำลองจะไม่ลื่นไถลกับราง

3.3.4 กำลังขับ

จากสมการ $P = FV$ (3.9)

เมื่อ P คือ กำลัง

F คือ แรงขับเคลื่อน

V คือ ความเร็วสูงสุด จากสมการ 3.4

แทนค่าลงในสมการ (3.9) จะได้

$$P = FV$$

$$= 1.8351 \text{ N} \times 1.21 \text{ m/s}$$

$$= 2.2205 \text{ W}$$

3.3.5 ทอร์ก

จากสมการ
$$T = F \times r \quad (3.10)$$

เมื่อ T คือ ทอร์ก
 F คือ แรงขับเคลื่อน
 r คือ รัศมีล้อโบกี้

แทนค่าในสมการ (3.10) จะได้

$$\begin{aligned} T &= F \times r \\ T &= 1.8351 \text{ N} \times 0.03045 \text{ m} \\ &= 0.0559 \text{ N.m} \end{aligned}$$

3.3.6 จำนวนรอบ

จากสมการ
$$N = \frac{60P}{2\pi T} \quad (3.11)$$

เมื่อ N คือ จำนวนรอบ
 P คือ กำลังขับ
 T คือ ทอร์ก

แทนค่าในสมการ (3.11) จะได้

$$\begin{aligned} N &= \frac{60P}{2\pi T} \\ &= \frac{60 \times 2.2205 \text{ W}}{2\pi \times 0.0559 \text{ N.m}} \\ &= 379 \text{ rpm} \end{aligned}$$

ดังนั้น จากค่าที่ได้ทำการคำนวณ จะได้ กำลังขับ เท่ากับ 2.2205 W และ จำนวนรอบ เท่ากับ 375 rpm เพราะฉะนั้น เราจึงเลือกใช้ มอเตอร์ที่มีกำลังขนาด 7 W 12 V 600 rpm เพราะมีขนาดเหมาะสมกับแบบชุดทดลองที่ได้ทำการออกแบบไว้

3.4 วิธีการทดลอง

รูปแบบการทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ

3.4.1 การทดลองเพื่อทดสอบว่าแบบล้อต่างๆเคลื่อนที่ได้ตามทฤษฎีหรือไม่

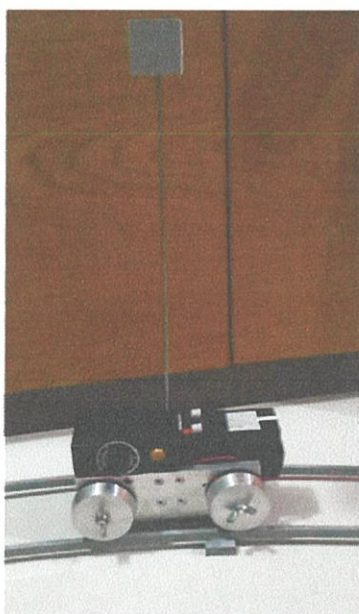
การทดลอง เริ่มจากใช้ล้อทรงกระบอกในการทดสอบ โดยปรับความเร็วไว้ที่ค่าๆหนึ่ง ในที่นี้เลือกปรับความเร็วของมอเตอร์ไปที่สเกลเท่ากับ 50 คือ ความเร็ว 0.75 m/s ทดสอบวิ่งบนรางทางตรงระยะทาง 2.5 เมตร และบันทึกว่าสามารถเคลื่อนที่ได้ตามทฤษฎีหรือไม่ จากนั้นเปลี่ยนรูปแบบล้อเป็นทรงกรวยที่มีความเป็นกรวยเป็นบวก (γ เป็นบวก) และทรงกรวยที่มีความเป็นกรวยเป็นลบ (γ เป็นลบ) ว่าเคลื่อนที่เป็นไปตามทฤษฎีหรือไม่

3.4.2 การทดลองเพื่อทดสอบว่าล้อทรงกรวย (γ เป็นบวก) จะเคลื่อนที่ในทางโค้งด้วยความเร็วสูงสุดเท่าไร

การทดลอง คือ ใช้ล้อทรงกรวยที่มีค่าความเป็นกรวยเป็นบวก มุมเอียง 30° ทำการวิ่งบนรางในทางตรงและทางโค้ง และปรับความเร็วเพิ่มขึ้น โดยเริ่มจากปรับตำแหน่งของสเกลไปที่ 40 คือ ความเร็ว 0.48 m/s และค่อยเพิ่มสเกลไปที่ละ 5 ไปเรื่อยๆ และหาความเร็วสูงสุดที่วิ่งได้โดยไม่ตกราง ทดลองซ้ำเพื่อหาค่าเฉลี่ย

3.4.3 การทดลองเพื่อหาค่าฟังก์ชันของการเคลื่อนที่สาย

เริ่มจากเตรียมอุปกรณ์ ปรับความเร็วไปที่ตำแหน่ง 55 ความเร็ว 0.88 m/s



รูปที่ 3.14 ชุดทดลองที่ใช้หาฟังก์ชันของการเคลื่อนที่สาย

เพื่อดูระยะการส่ายตัว ทำเส้นอ้างอิงที่พื้นกับตัวรถ จากนั้นถ่ายวิดีโอจากมุมบนตั้งฉากกับตัวรถ แล้วเริ่มทำการทดลองใช้ล้อทรงกระบอกที่มีความเป็นกรวยเป็นบวก มุมเอียง 10° ทำการวิ่งบนรางในทางตรง พร้อมทั้งถ่ายวิดีโอ จากนั้นนำวิดีโอที่ได้ มาหาคาบและแอมพลิจูดของการส่ายตัว เมื่อได้ระยะความยาวคลื่น λ ก็นำค่าไปหาค่าความถี่ธรรมชาติ ω_n จากสมการ $\lambda = \frac{2\pi}{\omega_n}$ จะได้ความถี่ธรรมชาติ ω_n จากการทดลอง แทนค่า ω_n และแอมพลิจูดในสมการการเคลื่อนที่ส่าย จากนั้นเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณ

จากนั้นทำการทดลองเหมือนกับล้อทรงกรวยที่มีความเป็นกรวยเป็นบวก มุมเอียง 10° โดยเปลี่ยนรูปแบบล้อเป็นมุมเอียง 20° , 30° ตามลำดับ

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลอง

4.1.1 ผลการทดลองของรูปทรงล้อ ทรงกระบอก ทรงกรวยที่มีความเป็นกรวยเป็นบวก (γ เป็นบวก) และทรงกรวยที่มีความเป็นกรวยเป็นลบ (γ เป็นลบ) ในการวิ่งทางตรงและทางโค้ง

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองของรูปทรงล้อต่างๆในการวิ่งทางตรงและทางโค้ง

รูปทรงล้อ	ทางตรง	ทางโค้ง
ทรงกระบอก	ไม่ตก	ตก
ทรงกรวย (γ เป็นบวก)	ไม่ตก	ไม่ตก
ทรงกรวย (γ เป็นลบ)	ตก	ตก

4.1.2 ผลการทดลองหาความเร็วสูงสุดของล้อทรงกรวยที่มีความเป็นกรวยเป็นบวก (γ เป็นบวก) ที่สามารถวิ่งในทางโค้งได้

จากการทดลอง พบว่า ความเร็วสูงสุดที่สามารถวิ่งในทางโค้งได้ คือ 0.88 m/s

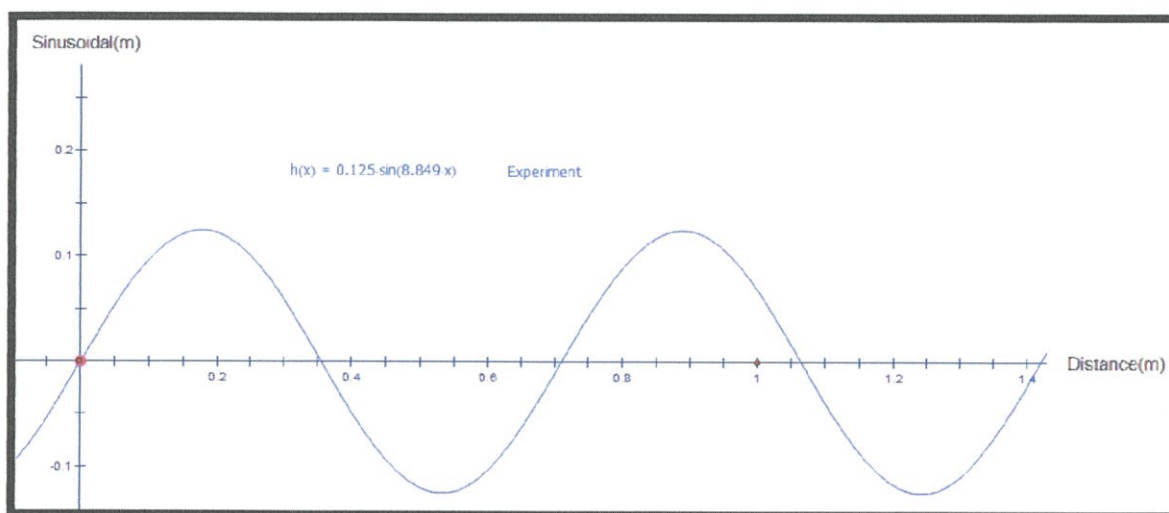
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองหาความเร็วสูงสุดที่สามารถวิ่งในทางโค้งได้

สเกล	ความเร็ว (m/s)	ทางตรง	ทางโค้ง
40	0.43	ไม่ตก	ไม่ตก
45	0.63	ไม่ตก	ไม่ตก
50	0.75	ไม่ตก	ไม่ตก
55	0.88	ไม่ตก	ไม่ตก
60	0.98	ไม่ตก	ตก

4.1.3 ผลการทดลองหาค่าฟังก์ชันของการเคลื่อนที่ส่าย

ตารางที่ 4.3 ฟังก์ชันของการเคลื่อนที่ส่าย ของล้อยกรวยเอียง 10° จากการทดลอง

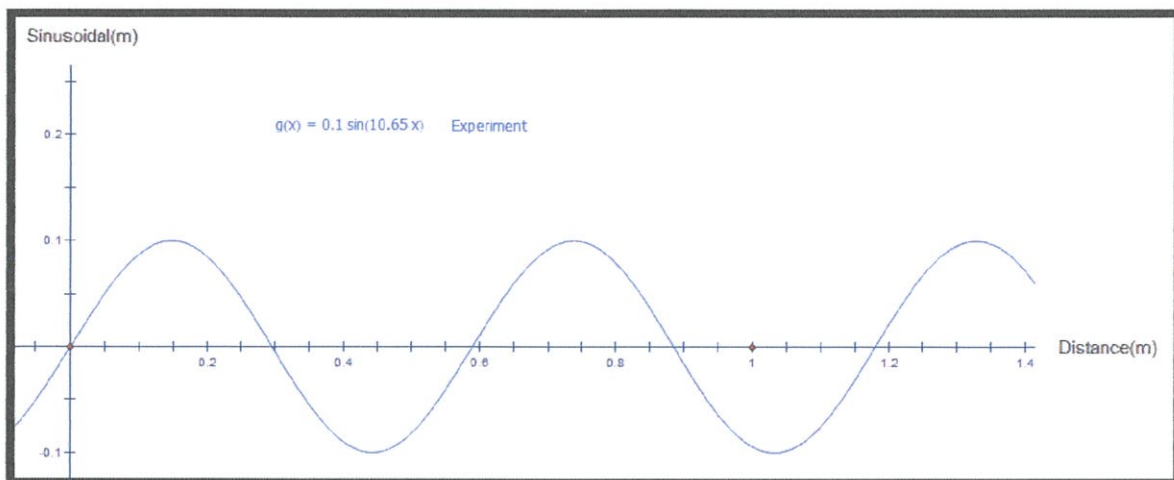
ล้อยกรวย (มีความเอียง 10°)	จากการทดลอง
ความยาวคลื่น (m)	0.710
แอมพลิจูด (m)	0.125
ค่าความเป็นกรวย	0.176
ความถี่ธรรมชาติ (Hz)	8.849
ฟังก์ชันการเคลื่อนที่ส่าย	$y(x) = 0.125 \sin(8.849x)$



รูปที่ 4.1 กราฟฟังก์ชันของการเคลื่อนที่ส่ายจากการทดลองของล้อยกรวย 10° ที่ความเร็ว 0.88 m/s

ตารางที่ 4.4 ฟังก์ชันของการเคลื่อนที่ส่าย ของล้อยกรวยเอียง 20° จากการทดลอง

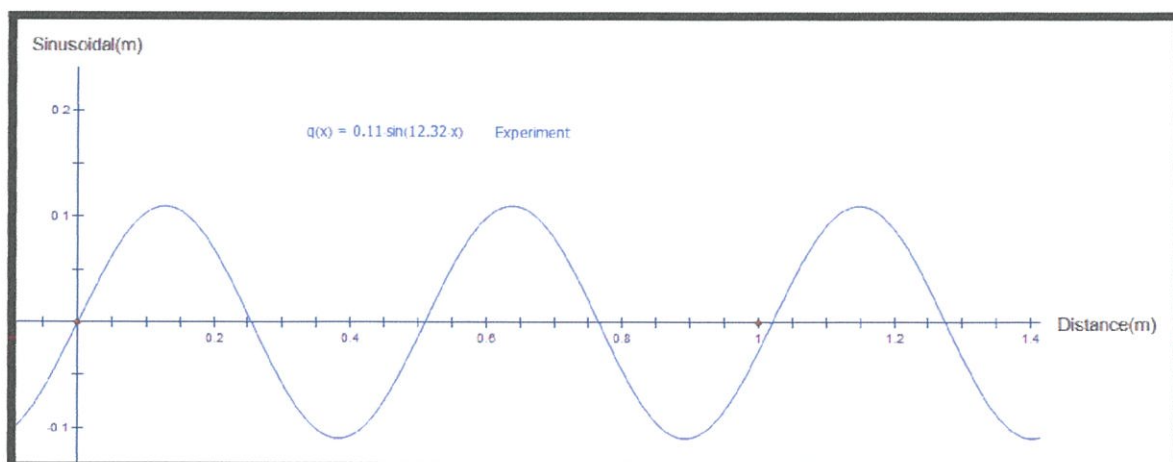
ล้อยกรวย (มีความเอียง 20°)	จากการทดลอง
ความยาวคลื่น (m)	0.590
แอมพลิจูด (m)	0.100
ค่าความเป็นกรวย	0.364
ความถี่ธรรมชาติ(Hz)	10.65
ฟังก์ชันการเคลื่อนที่ส่าย	$y(x) = 0.1 \sin(10.65x)$



รูปที่ 4.2 กราฟฟังก์ชันของการเคลื่อนที่ที่สายจากการทดลองของล้อยทรงกรวย 20° ที่ความเร็ว 0.88 m/s

ตารางที่ 4.5 ฟังก์ชันของการเคลื่อนที่ที่สาย ของล้อยทรงกรวยเอียง 30° จากการทดลอง

ล้อยทรงกรวย (มีความเอียง 30°)	จากการทดลอง
ความยาวคลื่น (m)	0.510
แอมพลิจูด (m)	0.110
ค่าความเป็นกรวย	0.577
ความถี่ธรรมชาติ(Hz)	12.32
ฟังก์ชันการเคลื่อนที่ที่สาย	$y(x) = 0.11 \sin(12.32x)$



รูปที่ 4.3 กราฟฟังก์ชันของการเคลื่อนที่ที่สายจากการทดลองของล้อยทรงกรวย 30° ที่ความเร็ว 0.88 m/s

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. จากการศึกษาและพัฒนาโบกัรไฟฟ้าจำลอง เราได้ชุดทดลองโบกัรไฟฟ้าจำลองที่สามารถเปลี่ยนรูปแบบล้อยเป็นแบบ ทรงกระบอกและทรงกรวย ซึ่งมีมุมเอียง 10, 20 และ 30 องศาได้ เพื่อใช้ทดลองศึกษาการเคลื่อนที่แบบส่าย อีกทั้งโบกัรไฟฟ้าจำลองนี้ สามารถวิ่งด้วยความเร็ว 0 – 1.29 m/s เพื่อใช้ทดลองศึกษาความเร็วหลุดโค้ง

2. จากการศึกษาการเคลื่อนที่แบบส่าย โดยใช้ชุดทดลองโบกัรไฟฟ้าจำลอง สามารถเห็นการส่ายได้อย่างชัดเจน และได้ฟังก์ชันของการเคลื่อนที่ที่ส่ายที่ลุ่มเอียงต่างๆ ดังนี้

$$\text{มุมเอียง 10 องศา } y(x) = 0.125\sin(8.849x)$$

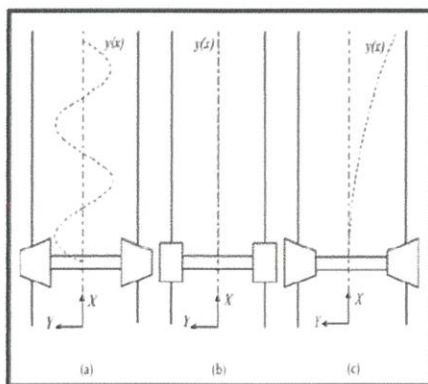
$$\text{มุมเอียง 20 องศา } y(x) = 0.100\sin(10.650x)$$

$$\text{มุมเอียง 30 องศา } y(x) = 0.110\sin(12.320x)$$

5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

5.2.1 จากการศึกษาทดลองในทางตรงและทางโค้ง

พบว่าล้อทรงกระบอกสามารถวิ่งได้ในทางตรงแต่ไม่สามารถวิ่งได้ในทางโค้ง ส่วนล้อทรงกรวยที่มีความเป็นกรวยเป็นบวก สามารถวิ่งได้ในทางและทางโค้ง และล้อทรงกรวยที่มีความเป็นกรวยเป็นลบจะไม่สามารถวิ่งในทางตรงและทางโค้งได้ ซึ่งล้อทั้ง 3 แบบได้ผลออกมาเป็นไปตามทฤษฎีทั้งหมด เพราะจากสมการ $\ddot{y} + \left(\frac{2R_0\omega^2\gamma}{G}\right)y = 0$ ถ้าค่าแกมมาเป็นบวก โบกัรไฟฟ้าจะสามารถวิ่งได้เหมือนกับภาพ (a) ถ้าแกมมาเป็นศูนย์ โบกัรไฟฟ้าจะสามารถวิ่งได้แค่ทางตรงเหมือนกับภาพ (b) แต่ถ้าค่าแกมมาเป็นลบ โบกัรไฟฟ้าจะไม่สามารถวิ่งได้ในทางตรงและทางโค้งเหมือนกับภาพ (c)



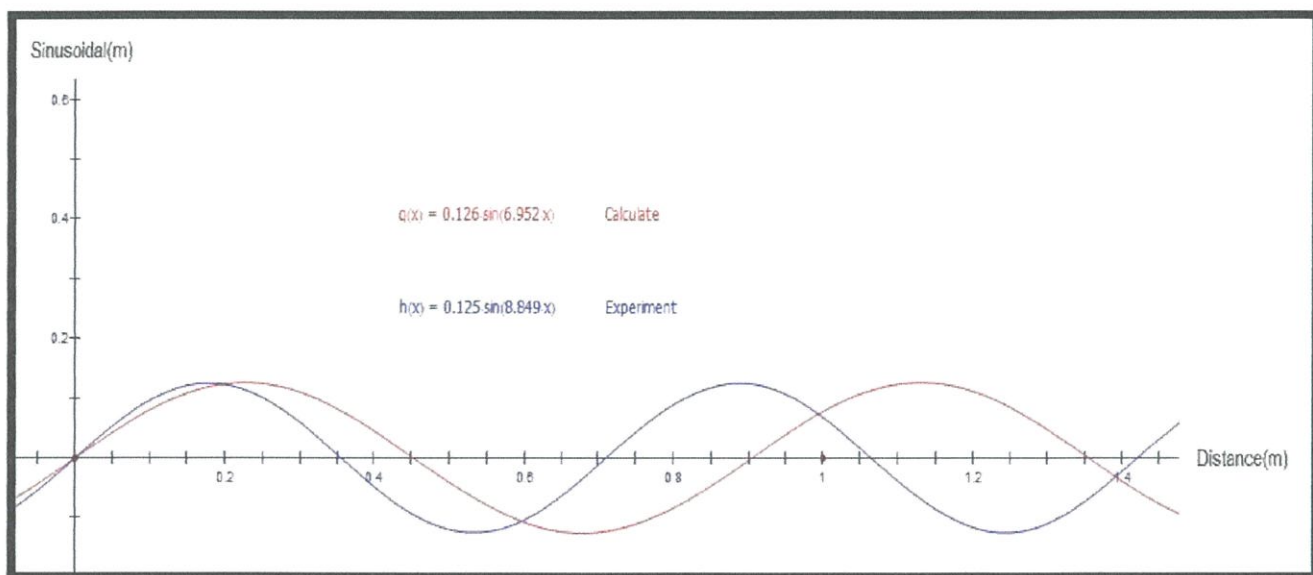
รูปที่ 5.1 การเคลื่อนที่ของชุดล้อรูปทรงต่างๆ

5.2.2 จากการทดลองหาความเร็วสูงสุดที่สามารถวิ่งได้บนรางรถไฟใต้

พบว่ามีความเร็วเท่ากับ 0.88 m/s ซึ่งจากการคำนวณจากสมการ $V = \sqrt{\phi_0 R_0 g}$ พบว่ามีความเร็วเท่ากับ 1.2 m/s ความคลาดเคลื่อนนี้เป็นผลมาจากรอยต่อระหว่างรางรถไฟไม่เรียบสนิทกัน

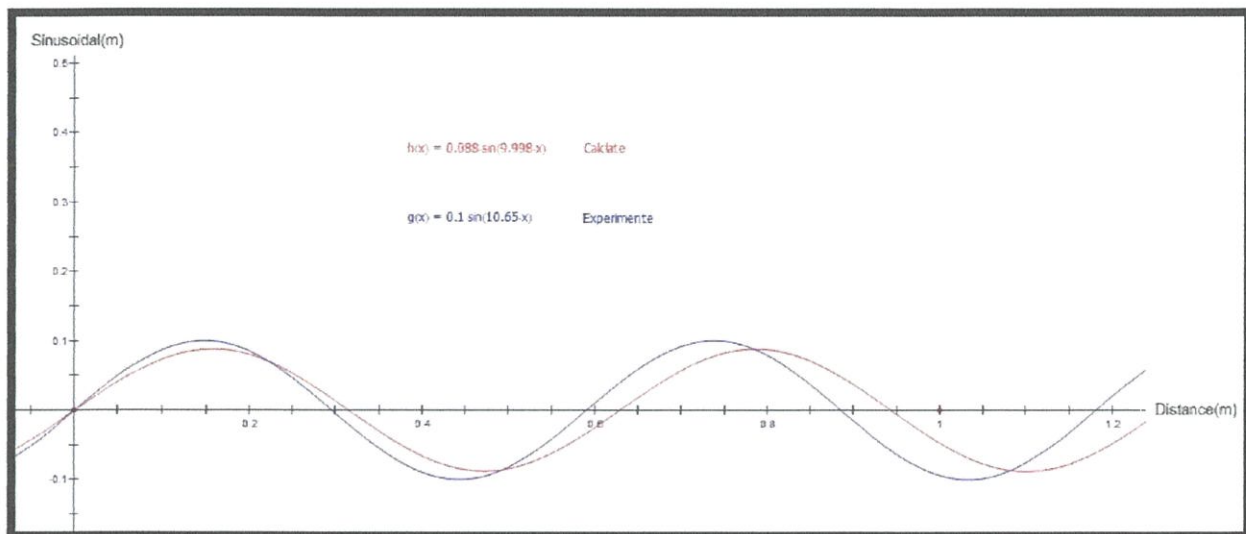
5.2.3 จากการผลการทดลองหาค่าฟังก์ชันของการเคลื่อนที่สาย

1. ฟังก์ชันของการเคลื่อนที่สาย ของล้อยทรงกรวยมุมเอียง 10° ที่ได้จากการคำนวณ คือ $y(x) = 0.126\sin(6.952x)$ นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองได้ดังรูป



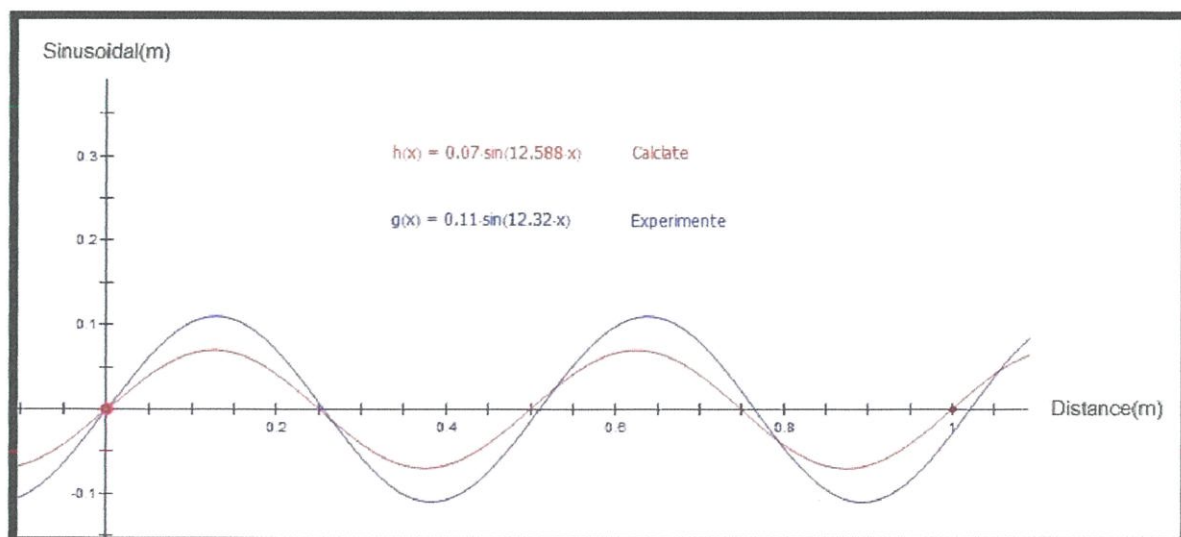
รูปที่ 5.2 กราฟเปรียบเทียบฟังก์ชันของการเคลื่อนที่สายจากการคำนวณและการทดลองของล้อยทรงกรวย 10° ที่ความเร็ว 0.88 m/s

2. ฟังก์ชันของการเคลื่อนที่ส่าย ของล้อยทรงกรวยมุมเอียง 20° ที่ได้จากคำนวณ คือ $y(x) = 0.088\sin(9.998x)$ นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองได้ดังรูป

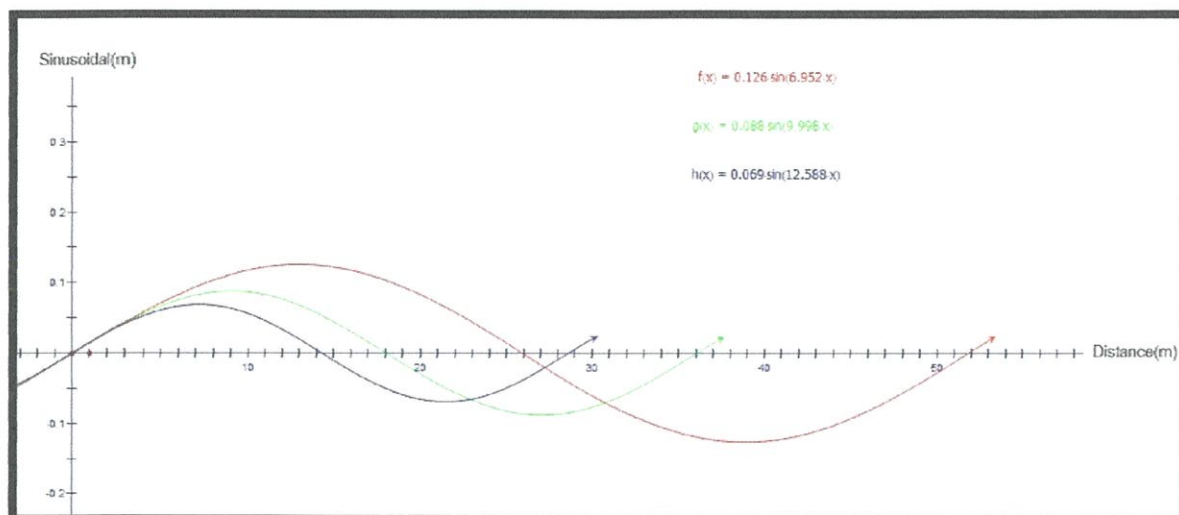


รูปที่ 5.3 กราฟเปรียบเทียบฟังก์ชันของการเคลื่อนที่ส่ายจากการคำนวณและการทดลองของล้อยทรงกรวย 20° ที่ความเร็ว 0.88 m/s

3. ฟังก์ชันของการเคลื่อนที่ส่าย ของล้อยทรงกรวยมุมเอียง 30° ที่ได้จากคำนวณ คือ $y(x) = 0.070\sin(12.588x)$ นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองได้ดังรูป



รูปที่ 5.4 กราฟเปรียบเทียบฟังก์ชันของการเคลื่อนที่ส่ายจากการคำนวณและการทดลองของล้อยทรงกรวย 30° ที่ความเร็ว 0.88 m/s



รูปที่ 5.5 กราฟเปรียบเทียบฟังก์ชันของการเคลื่อนที่สายที่สายจากการคำนวณของล้อยทรงกรวย 10° 20° และ 30° ที่ความเร็ว 0.88 m/s

จากการทดลอง การเคลื่อนที่สายที่ความเร็ว 0.88 m/s และล้อยทรงกรวยที่มีความเป็นกรวยเป็นบวกเอียงต่างกัน พบว่า ได้ค่าความยาวคลื่น และความถี่ธรรมชาติ ที่ค่าจากการคำนวณใกล้เคียงจากการคำนวณมาก และที่ความเร็วเดียวกัน ล้อที่มีมุมเอียงมากกว่า จะมีระยะการส่ายตัวน้อยกว่า แต่มีความถี่ในการส่ายตัวมากกว่า และล้อที่มีมุมเอียงเดียวกัน วงที่ความเร็วต่ำจะมีความถี่ในการส่ายน้อยกว่า

เอกสารอ้างอิง

- [1] นคร จันทศร. ช่างรถไฟ:ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ โครงการพัฒนาระบบขนส่งทางราง และอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องของประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพมหานคร : สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2554.
- [2] A.H. Wickens. *Fundamentals of rail vehicle dynamics:guidance and stability*. Lisse. Swets & Zeitlinger B.V. , 2003.
- [3] Ahmed A. Shabana, Khaled E. Zaazaa, Hiroyuki Sugiyama. *RAILROAD VEHICLE DYNAMICS A Computational Approach*. New York. Taylor & Francis Group, 2008.
- [4] Simon Iwnicki. *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*. New York. Taylor & Francis Group, 2006.
- [5] Eom, B.-G., B.-B. Kang, and H.S. Lee. *Design of small-scaled derailment simulator simulator for investigating bogie dynamics*. International Journal of Railway, 2011.
- [6] รศ.มนตรี พิรุณเกษตร. การสั่นสะเทือนทางกล Mechanical Vibrations. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, 2551.

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก-1 แสดงค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุต่างๆ

: ที่มาของตาราง http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?bookID=1818&pageid=25&read=true&count=true

วัสดุ	ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (E) 10^9 N/m^2 หรือ GPa (จิกะปาสคาล)
เหล็ก (Iron)	196.5
แคดเมียม (Cadmium)	55.16
เงิน (Silver)	72.39
ตะกั่ว (Lead)	13.79
ทอง (Gold)	74.46
ทังสแตน (Tungsten)	344.7
ทอเรียม (Thorium)	58.61
ทองแดง (Copper)	117.2
ไทเทเนียม (Titanium)	110.3
สังกะสี (Zinc)	82.74
วานาเดียม (Vanadium)	131
โรเดียม (Rhodium)	289.6
ยูเรเนียม (Uranium)	165.5
โมลิบดีนัม (Molybdenum)	275.8
แมงกานีส (Manganese)	158.6
แมกนีเซียม (Magnesium)	44.13
แทนทาลัม (Tantalum)	186.2
ไนโอเบียม (Niobium)	103.4
พลวง (Antimony)	77.91
อลูมิเนียม (Aluminum)	68.95
ออสเมียม (Osmium)	551.6
เบริลเลียม (Beryllium)	289.6
บิสมัท (Bismuth)	31.72
นิกเกิล (Nickel)	213.7

ตารางที่ ก-2 แสดงการเปรียบเทียบของกฎการย่อส่วน[5]

Scaling factor	Iwnicki	Pascal	Jaschinski	Jaschinski modified
Φ_l length	Φ	Φ	Φ	Φ
Φ_t time	1	Φ	$\sqrt{\Phi}$	$\sqrt{\Phi}$
Φ_f frequency	1	$1/\Phi$	$1/\sqrt{\Phi}$	$1/\sqrt{\Phi}$
Φ_v velocity	Φ	1	$\sqrt{\Phi}$	$\sqrt{\Phi}$
Φ_a acceleration	Φ	$1/\Phi$	1	1
Φ_ρ density	1	1	1	0.6
Φ_m mass	Φ^3	Φ^3	Φ^3	$\Phi^3/2$
Φ_I inertia	Φ^5	Φ^5	Φ^5	$\Phi^5/2$
Φ_E elasticity	1	1	1	3
Φ_W weight	Φ^3	Φ^3	Φ^3	$\Phi^3/2$
Φ_F force	Φ^4	Φ^2	Φ^3	$\Phi^3/2$
Φ_k stiffness	Φ^3	Φ	Φ^2	$0.6\Phi^2$
Φ_c damping	Φ^3	Φ^2	$\Phi^{2.5}$	$0.6\Phi^{2.5}$
Φ_μ friction	1	1	1	1

ตารางที่ ก-3 สัมประสิทธิ์แรงต้านการหมุนของล้อ










: ที่มาของตาราง http://www.engineeringtoolbox.com/rolling-friction-resistance-d_1303.html

Rolling Resistance Coefficient	
c	
0.001-0.002	Railroad steel wheels on steel rails
0.001	Bicycle tire on wooden track
0.002-0.005	Low resistance tubeless tires
0.002	Bicycle tire on asphalt road
0.004	Dirty tram rails
0.005	Truck tire on asphalt
0.006-0.01	Bicycle tire on rough paved road
0.008	Ordinary car tires on concrete
0.01-0.015	Car tires on tar or asphalt
0.03	Car tires on tar or asphalt
0.04-0.08	Car tire on solid sand
0.2-0.4	Car tire on loose sand

ตารางที่ ก-4 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

: ที่มาของตาราง <http://blog.mechguru.com/machine-design/typical-coefficient-of-friction-values-for-common-materials/>

Material-1	Material-1	Coefficient of static friction (μ_s)	Coefficient of sliding friction (μ_s)
Aluminum (Al)	Aluminum (Al)	0.42	0.34
Aluminum (Al)	Copper (Cu)	0.28	0.23
Aluminum (Al)	Steel	0.30	0.25
Aluminum (Al)	Titanium	0.34	0.29
Aluminum (Al)	PTFE	-	0.19
Aluminum (Al)	Teflon	0.19	0.18
Aluminum (Al)	Chromium (Cr)	0.27	0.22
Aluminum (Al)	Nickel (Ni)	0.33	0.25
Aluminum (Al)	Mild Steel	0.61	-
Aluminum (Al)	Glass	0.17	0.14
Aluminum (Al)	Graphite	0.16	-
Bronze	Steel	-	0.16

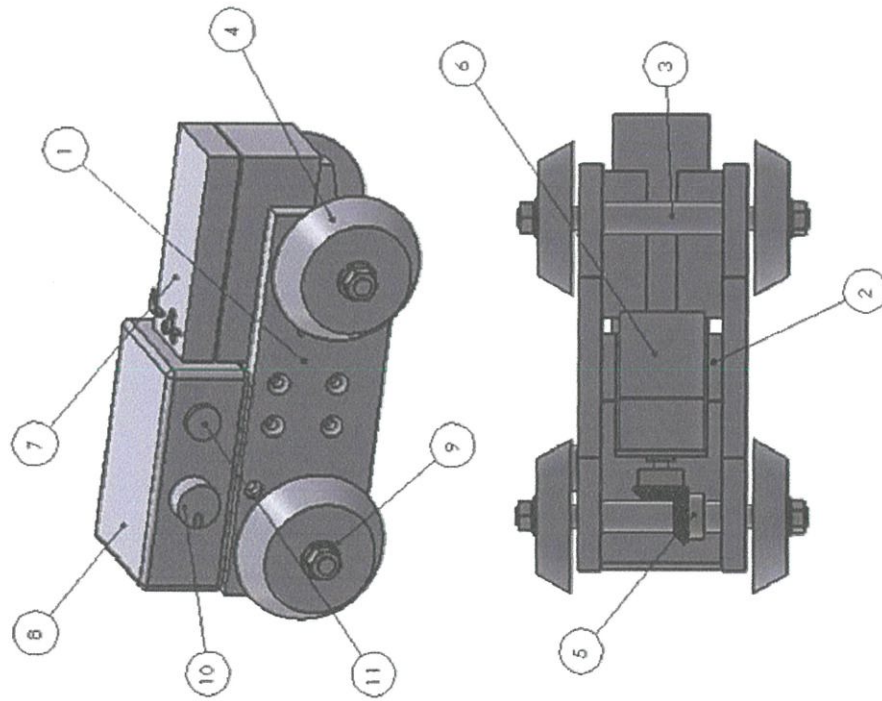
Shape	Drag Coefficient
sphere \Rightarrow 	0.47
half-sphere \Rightarrow 	0.42
cone \Rightarrow 	0.50
cube \Rightarrow 	1.05
angled cube \Rightarrow 	0.80
long cylinder \Rightarrow 	0.82
short cylinder \Rightarrow 	1.15
streamlined body \Rightarrow 	0.04
streamlined half-body \Rightarrow 	0.09

Measured Drag Coefficients

รูปที่ ก-1 สัมประสิทธิ์ค่าแรงเสียดทานของอากาศที่ไหลผ่านวัตถุรูปทรงต่างๆ

: ที่มาของรูป http://www.brighthubengineering.com/hydraulics-civil-engineering/58434-drag-force-for-fluid-flow-past-an-immersed-object/#imgn_2

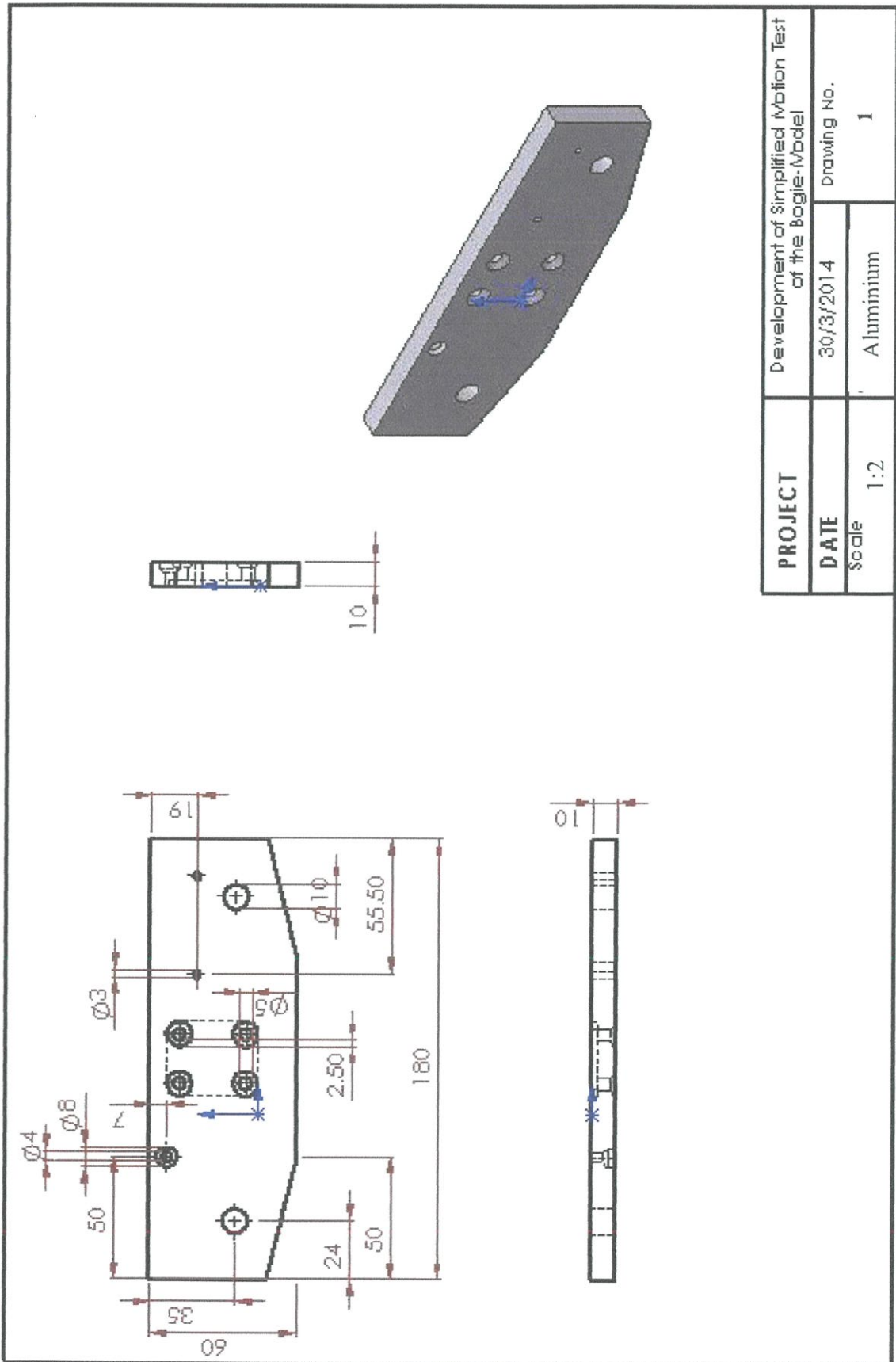
ภาคผนวก ข



ITEM NO.	PART NUMBER	QTY
1	โครงข้าง	2
2	โครงกลางใบก	1
3	เพลา	2
4	ล้อ	4
5	เฟืองคอกอก	2
6	มอเตอร์	1
7	แบดเตอร์รี่	1
8	กล่องแนวประตงค์	1
9	Nut	4
10	ตัวปรับความเร็วรวมมอเตอร์	1
11	สวิตซ์	1

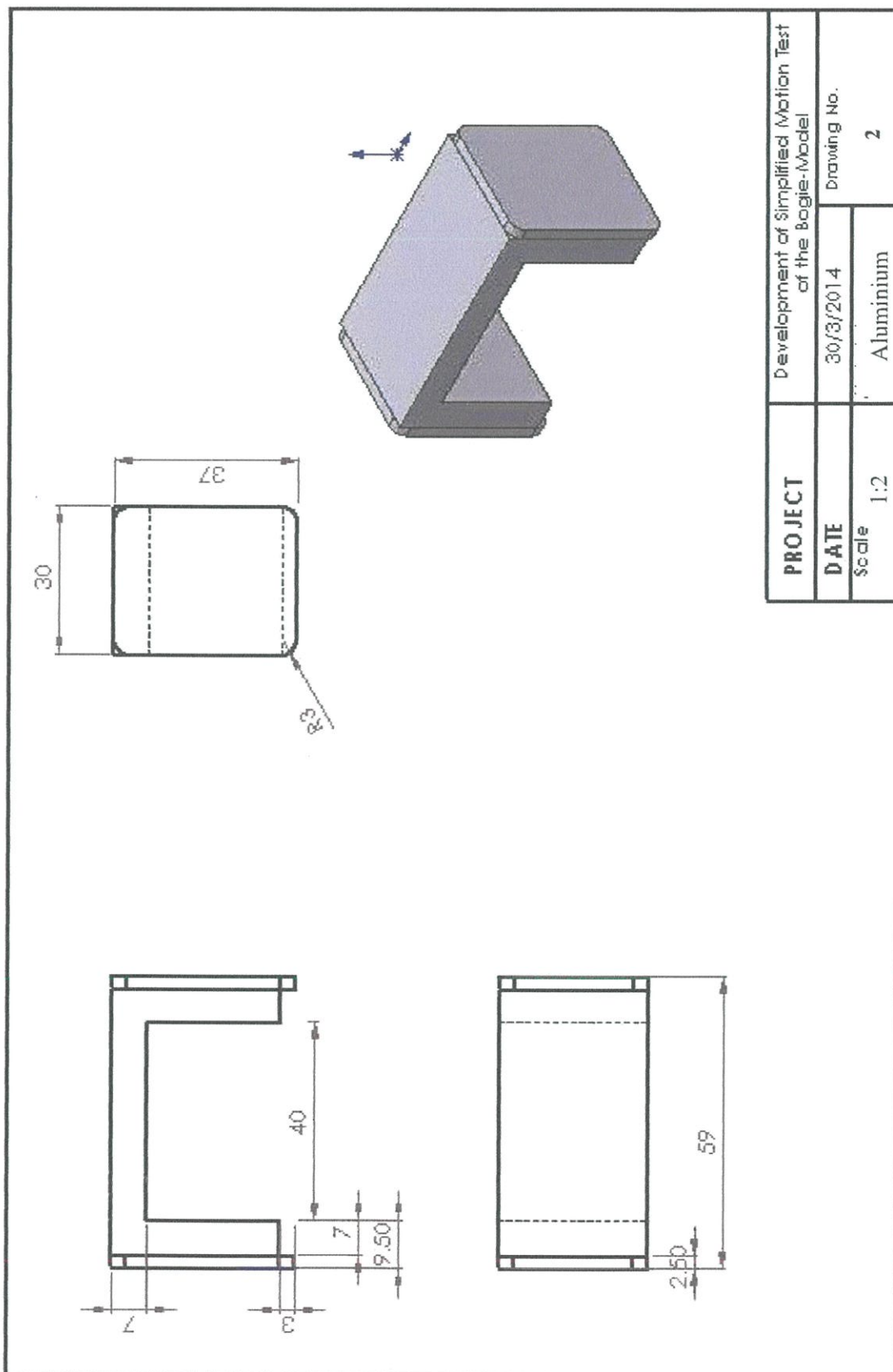
PROJECT	Development of Simplified Motion Test of the Bicycle Model	
DATE	30/3/2014	Drawing No.
Scale 1:2	Material Aluminium	Assembly

รูปที่ ข-1 แบบประกอบของใบกั้รถไฟจำลอง

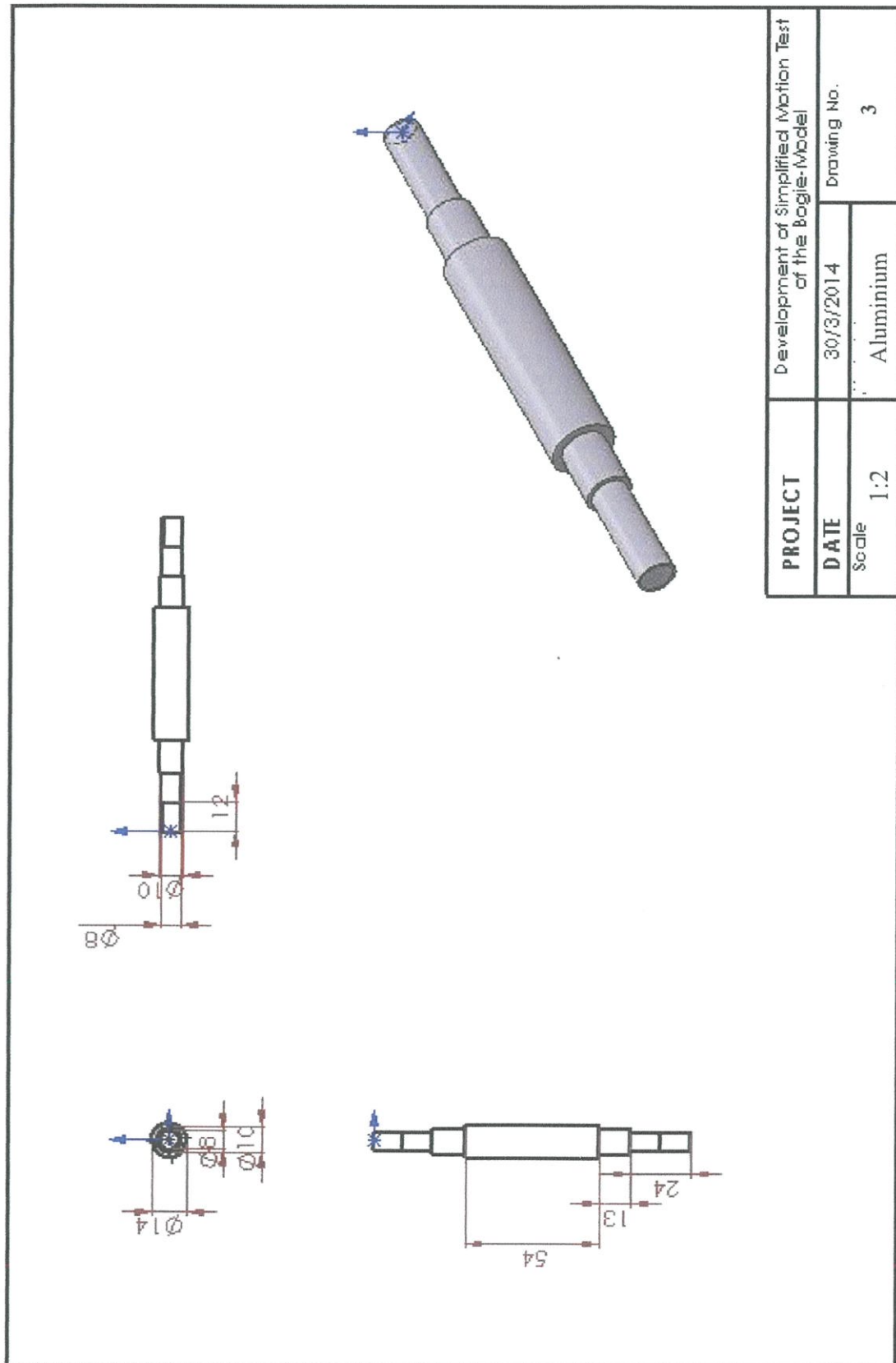


PROJECT	Development of Simplified Motion Test of the Bagie-Model	
DATE	30/3/2014	Drawing No. 1
Scale	1:2	Aluminium

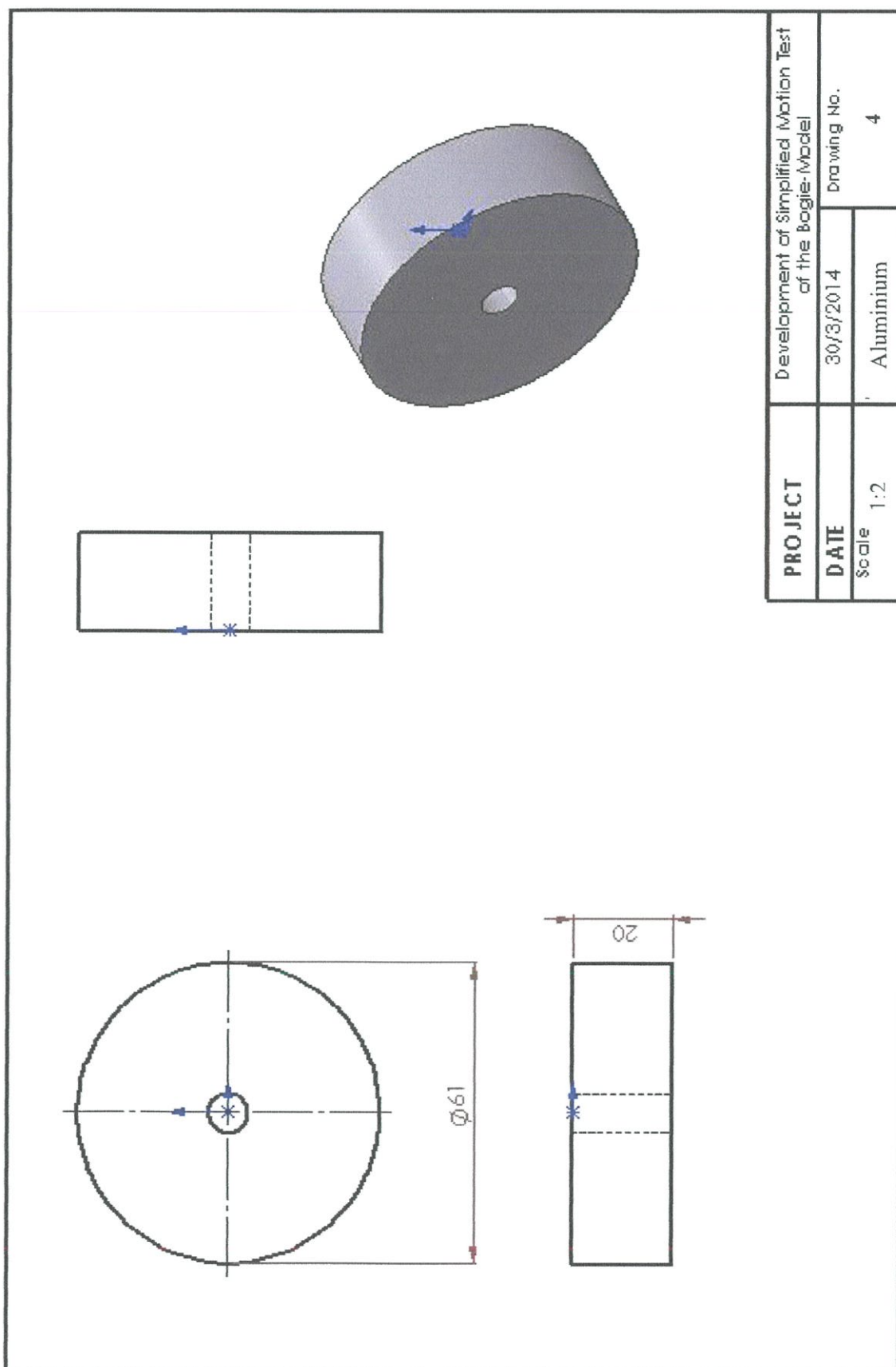
รูปที่ ข-2 แบบเขียนและขนาดโครงข้างบอก 1



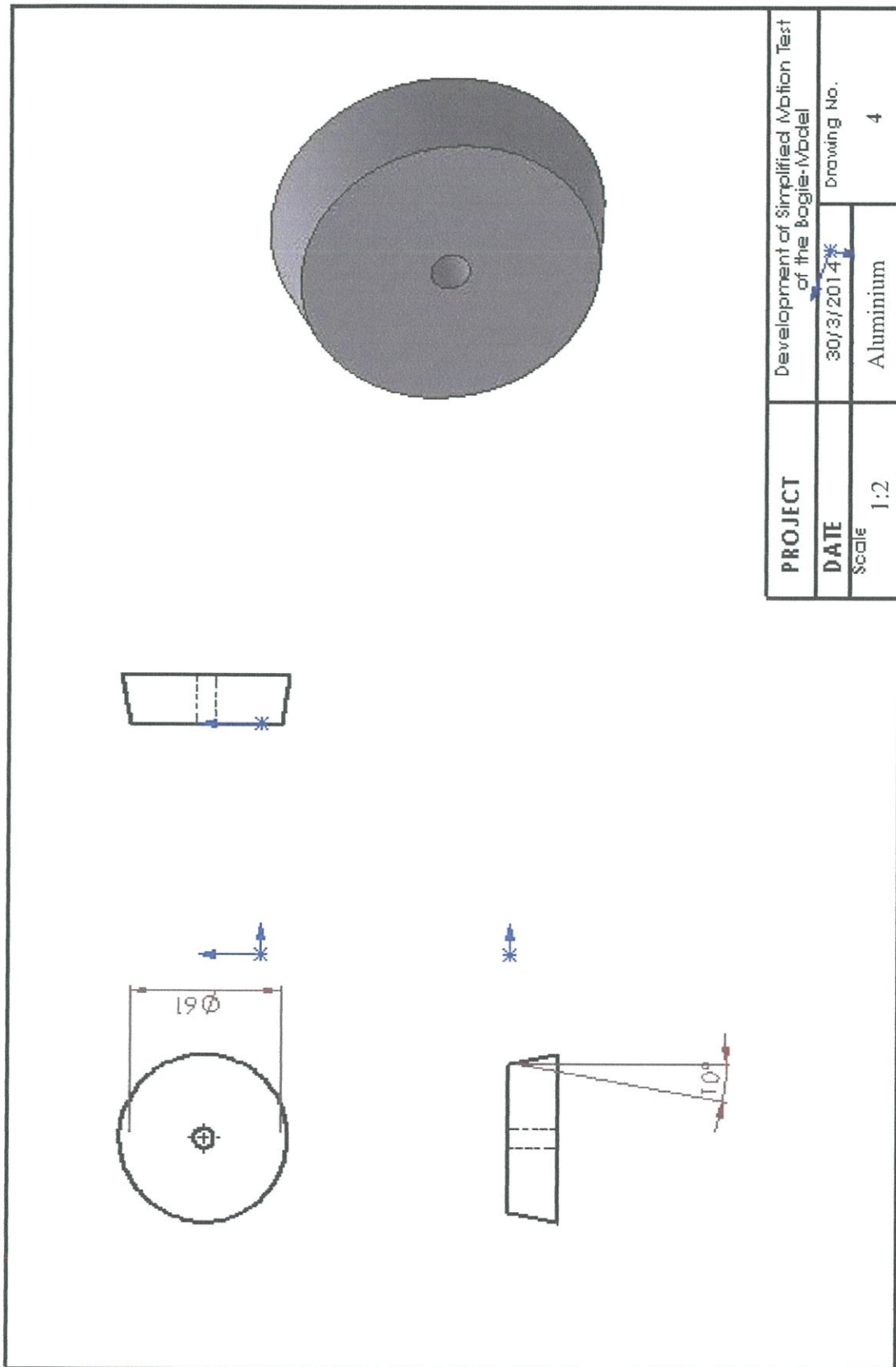
รูปที่ ข-4 แบบเขียนและขนาดโครงกลางโบกี้



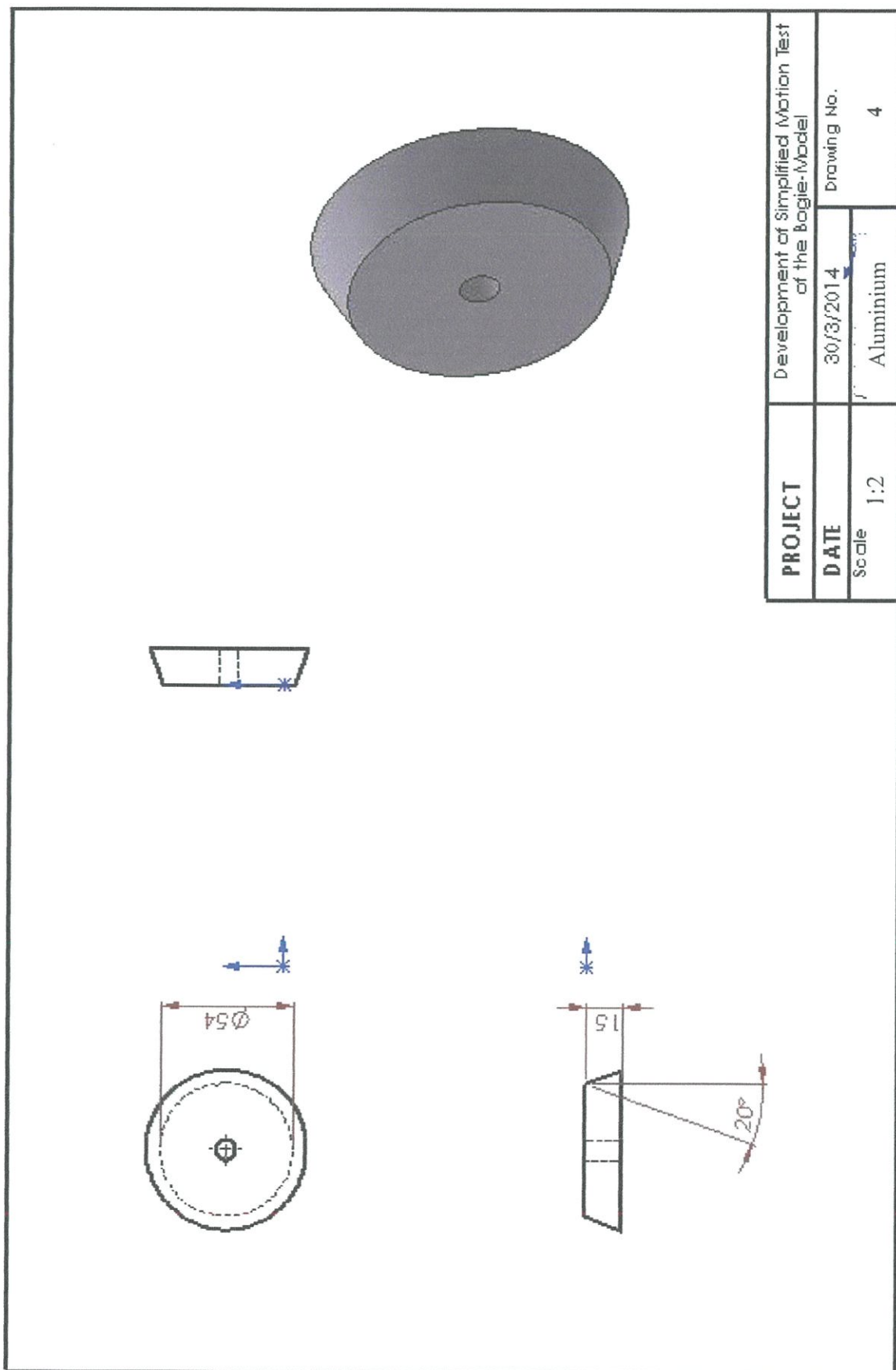
รูปที่ ๕-๕ แบบเขียนและขนาดเพลา



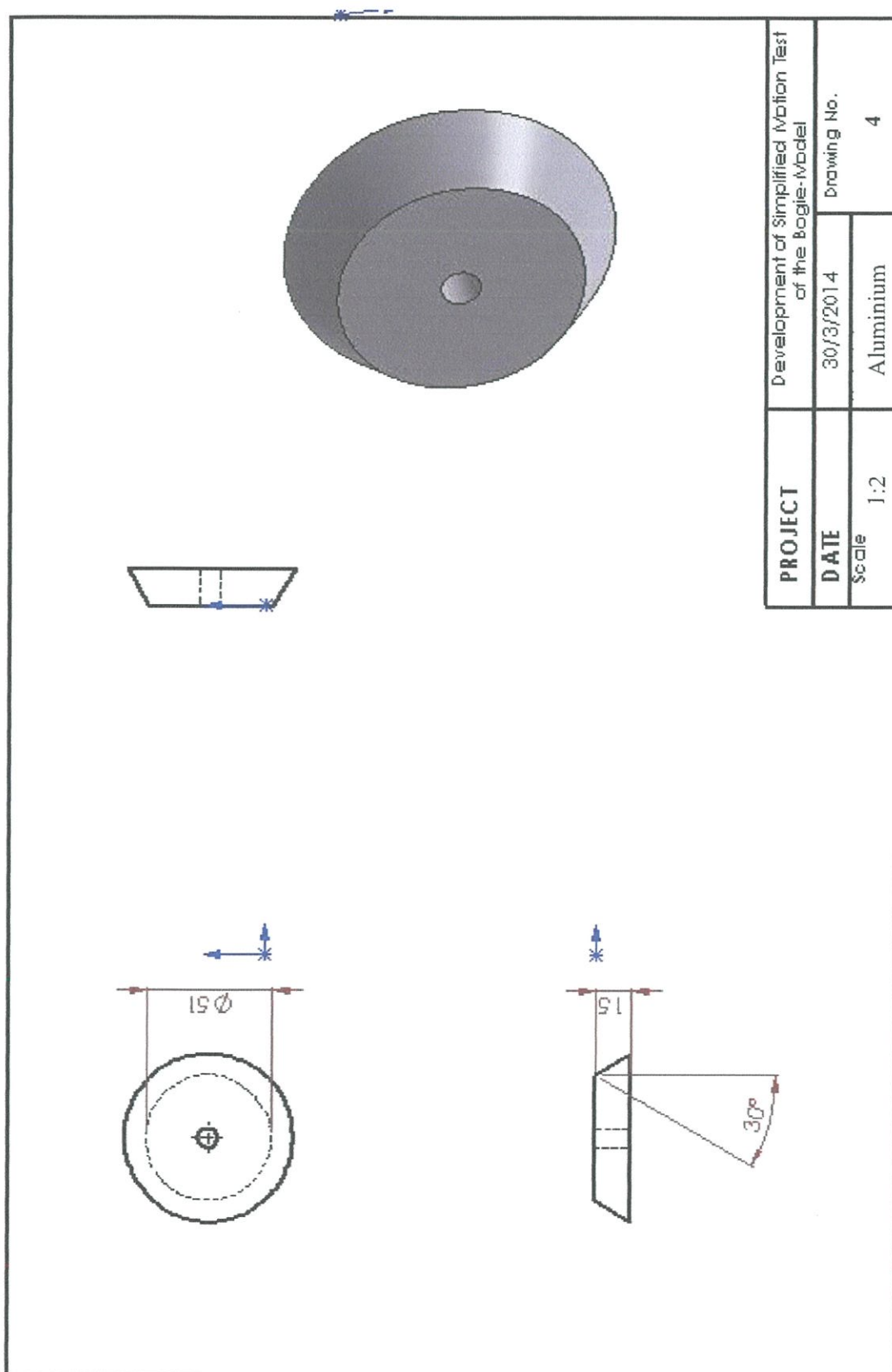
รูปที่ ข-6 แบบเขียนและขนาดล้อทรงกระบอก



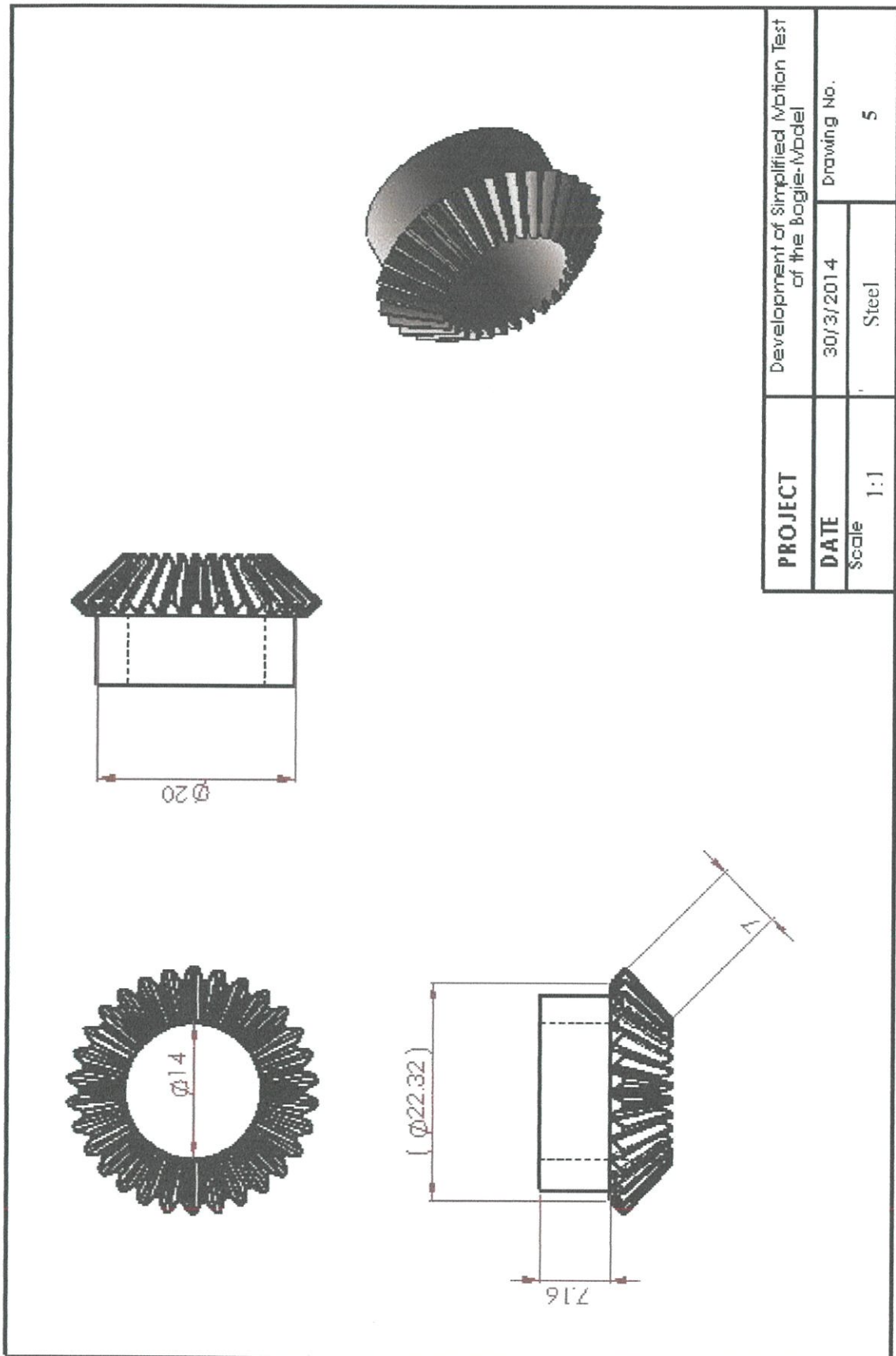
รูปที่ ข-7 แบบเขียนและขนาดล้อทรงกรวย 10°



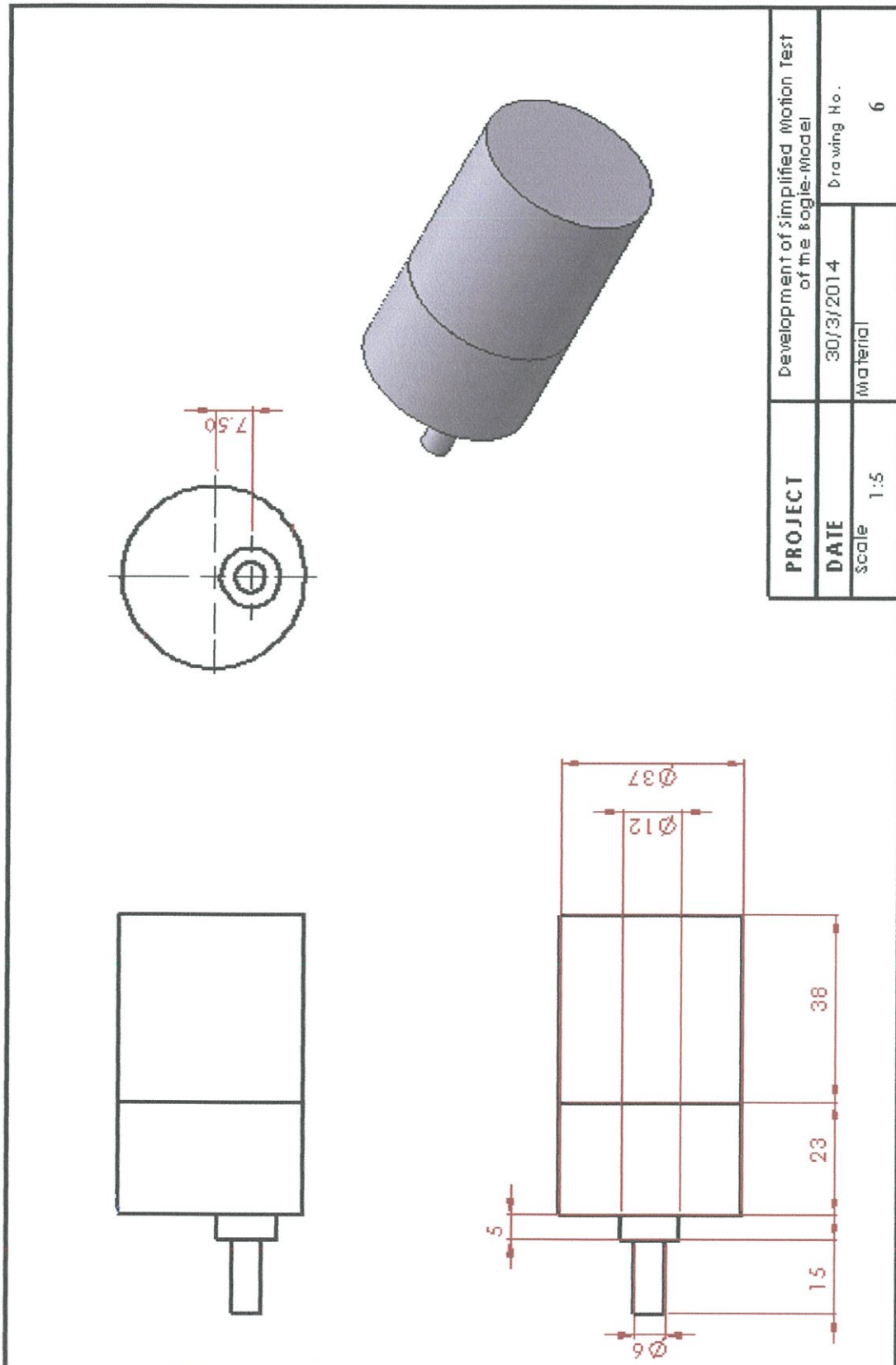
รูปที่ ข-8 แบบเขียนและขนาดล้อทรงกรวย 20°



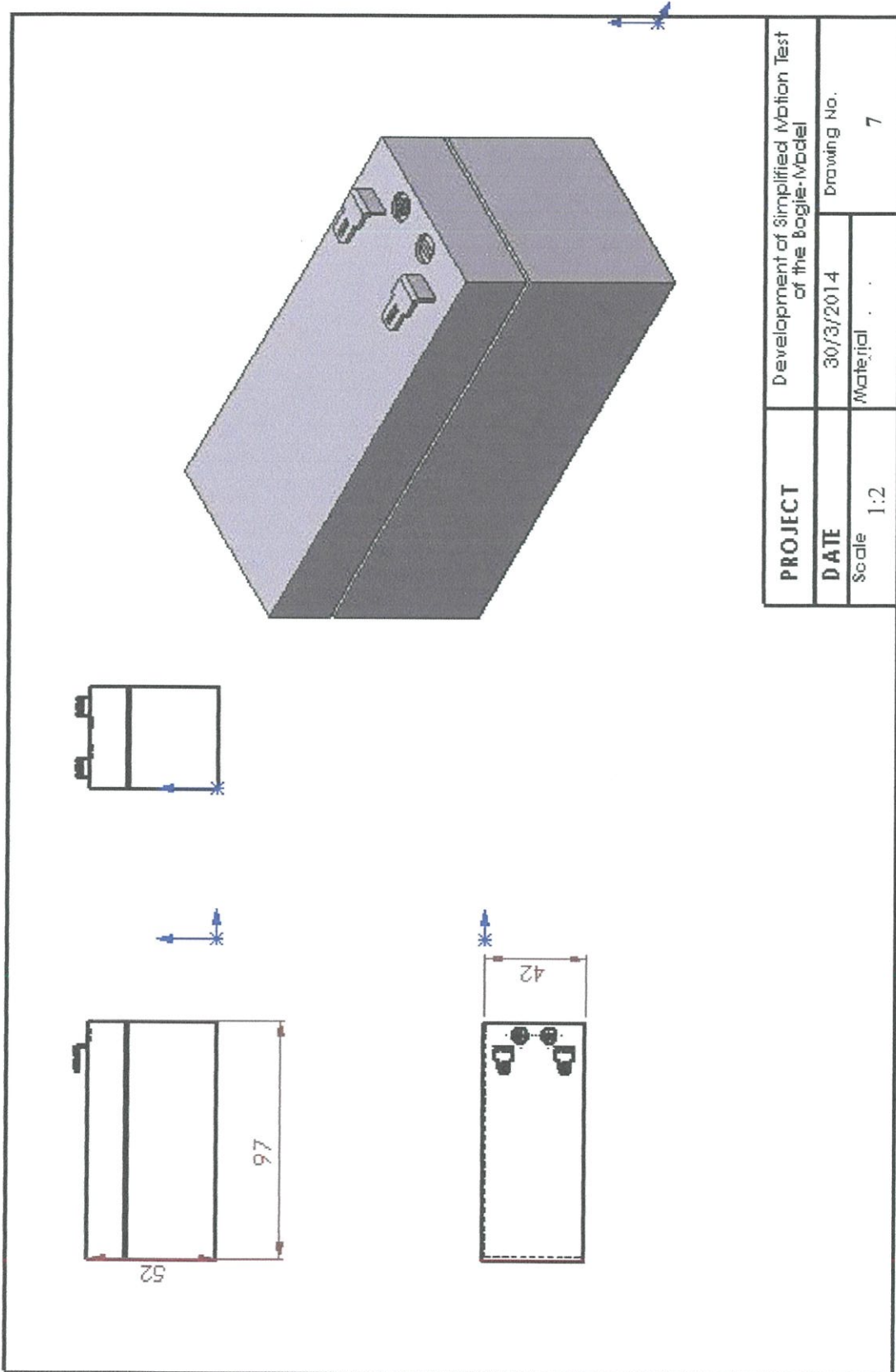
รูปที่ ข-9 แบบเขียนและขนาดล้อทรงกรวย 30°



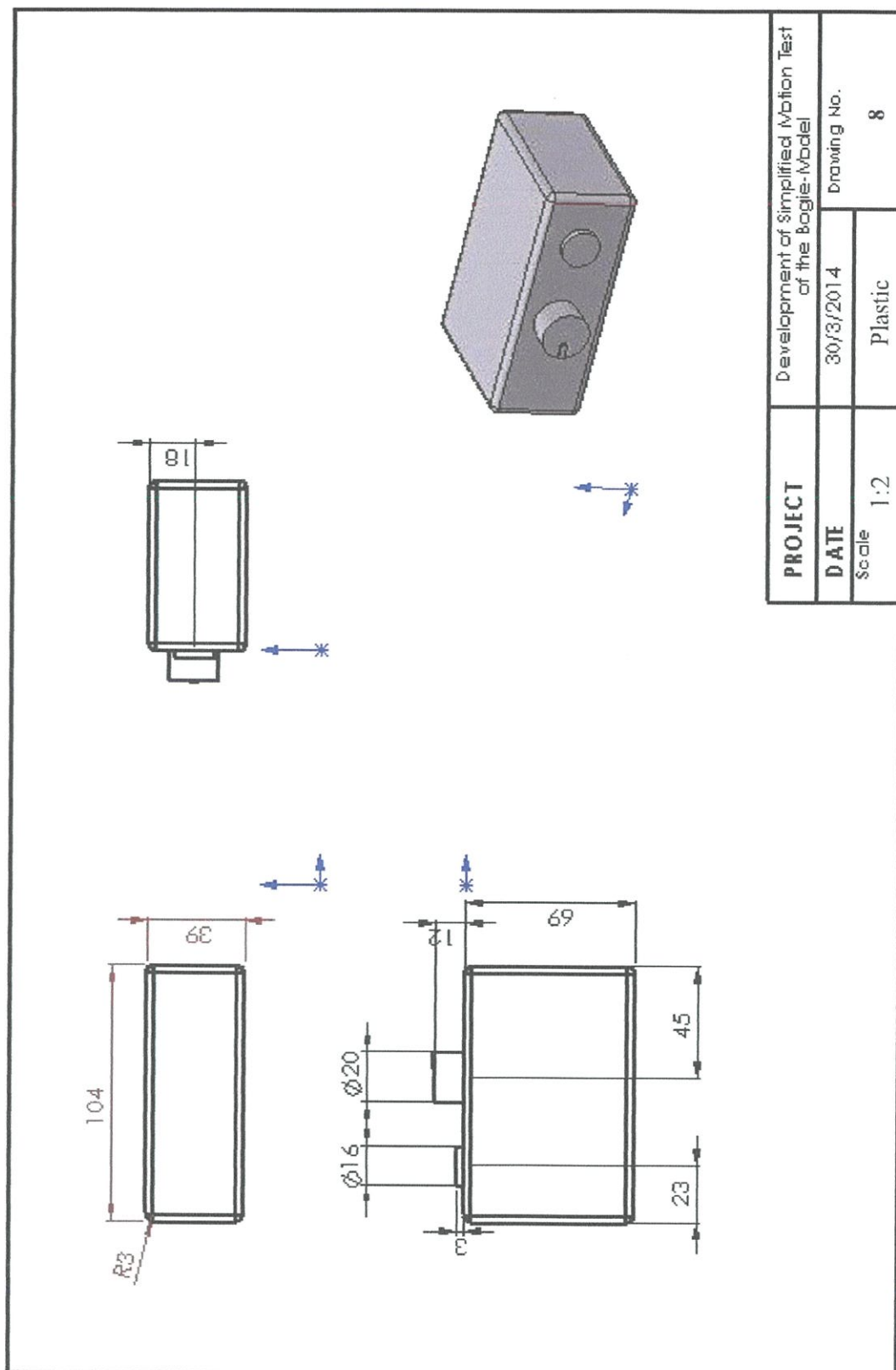
รูปที่ ข-10 แบบเขียนและขนาดเฟืองดอกจอก



รูปที่ ข-11 แบบเขียนและขนาดมอเตอร์



รูปที่ ข-12 แบบเขียนและขนาดแบตเตอรี่



รูปที่ ข-13 แบบเขียนและขนาดกล่องบรรจุตัวปรับความเร็วรอบและสวิตช์