

## การศึกษาหาจำนวนคงเหลือของเบรคมือที่เหมาะสมและการลากจูงขบวนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนไปยังศูนย์ซ่อมบำรุงในขณะที่มีการใช้เบรคมือ

A study to determine the appropriate amount of parking brake and tractive effort to towing mass rapid transit train to depot while using parking brake

จิรายุ เจริญชัยสกุล\*, วิชัย ศิวะโกศิษฐ์

Jirayu Jaroenchaisakul\*, Wichai Siwakosit

ศูนย์วิศวกรรมระบบราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900  
Rail Engineering Center, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

\*Corresponding author. E-mail address: jirayu11176@gmail.com

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาหาจำนวนคงเหลือของเบรคมือที่เหมาะสมและการลากจูงขบวนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนไปยังศูนย์ซ่อมบำรุงในขณะที่มีการใช้เบรคมือ เพื่อป้องกันการไหลของรถไฟฟ้าขณะทำการช่วยเหลือบนทางลาดชันโดยผลการวิจัยมาจากการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูลจากโครงการรถไฟฟ้าจริง โดยพิจารณาลักษณะทางกายภาพของทางวิ่งและคุณสมบัติของขบวนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนของโครงการรถไฟฟ้าสายฉลองรัชธรรม นำมาวิเคราะห์และคำนวณหาแรงต้านทานการเคลื่อนที่และนำมาเปรียบเทียบสมรรถนะของขบวนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสายฉลองรัชธรรม ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า จำนวนเบรคมือที่เหมาะสมสำหรับรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนอยู่ที่ 4 เพลาสามารถป้องกันการไหลของรถไฟฟ้าขณะจอดบนทางลาดชันได้ และสามารถลากจูงรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกลับศูนย์ซ่อมบำรุงได้ทั้งบนเส้นทางสายหลักและภายในศูนย์ซ่อมบำรุงซึ่งสามารถลดความเสี่ยงและเพิ่มความปลอดภัยต่อการปฏิบัติการช่วยเหลือและลากจูงขบวนรถไฟฟ้ากรณีเกิดเหตุฉุกเฉินได้

**คำสำคัญ:** ระบบเบรคสำหรับรถไฟฟ้า, ระบบลากจูงสำหรับรถไฟฟ้า, ระบบรถไฟฟ้า

### Abstract

This paper presents a study to determine the appropriate amount of parking brake and tractive effort to towing mass rapid transit train while using parking brake to prevent sliding of vehicle during operate on slope track and the results based on the testing and analysis of actual mass rapid transit project. The analysis focuses on physical condition track and rolling stock performance of MRT Purple line. The analysis performed by calculated resistance force and compared to tractive effort of mass rapid transit train. The analysis results show that the proper number of remaining parking brake is 4 axle which can prevent sliding of vehicle when parking on slope track and able to tow the mass rapid transit train back to depot both on the mainline route and depot track which can reduce risk and increase safety for rescue and tow mass rapid transit train in case of emergency

**Keywords:** Railway Braking System, Railway Propulsion System, Rolling Stock

## คำนำ

ปัจจุบันการเดินทางด้วยรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนถือเป็นตัวเลือกสำคัญในการเดินทางของผู้คนในกรุงเทพมหานคร และจังหวัดใกล้เคียง เนื่องด้วยความสะดวกรวดเร็วสามารถร่นระยะเวลาการเดินทางของผู้คนอันเนื่องจากสภาพการจราจรที่หนาแน่นของกรุงเทพมหานครได้ อย่างไรก็ตามระบบรถไฟฟ้าที่ขึ้นชื่อว่าเป็นการเดินทางที่ปลอดภัยอันดับต้นๆเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการเดินทางอื่นๆ นั้นก็ยังมีโอกาสเกิดข้อบกพร่องของอุปกรณ์หรือความบกพร่องส่วนบุคคลที่ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยในการให้บริการได้ ดังเช่นกรณีรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลไหลชนกันที่สถานีศูนย์วัฒนธรรมเมื่อปี พ.ศ. 2548 ซึ่งการศึกษานี้จะวิเคราะห์การลากขบวนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนไปยังศูนย์ซ่อมบำรุงในขณะที่มีเบรกมือเพื่อป้องกันการไหลของขบวนรถไฟฟ้า เพื่อใช้สำหรับเป็นข้อมูลในการจัดการเหตุการณ์ในกรณีฉุกเฉินป้องกันปัญหาซ้ำรอยที่เกิดขึ้นในอดีตและเพื่อเพิ่มความปลอดภัยสูงสุดสำหรับการให้บริการต่อไป งานวิจัยนี้จะวิเคราะห์ข้อมูลของโครงการรถไฟฟ้าสายฉลองรัชธรรมช่วงบางใหญ่-บางซื่อ เท่านั้น

## ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### การทดสอบเบรกมือของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

American Public Transport Association (APTA) ได้กำหนดมาตรฐานและระเบียบวิธีการทดสอบเบรกมือสำหรับรถไฟ โดยการนำขบวนรถไฟวางไว้ในทางรถไฟที่มีความลาดชันสูงสุดของระบบหรือทางลาดชันขั้นต่ำ 3% โดยขบวนรถไฟจะต้องไม่ไหลเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 10 นาที หรือทำการทดสอบตั้งรถจักรด้วยอุปกรณ์วัดแรงบริเวณขอพวง แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดทางด้านการเดินทางและอุปกรณ์การทดสอบ งานวิจัยนี้จึงจำลองสถานการณ์โดยอ้างอิงจากมาตรฐานดังกล่าวเพื่อเป็นแนวทางสำหรับการคำนวณหาจำนวนเบรกมือที่เหมาะสม

### การคำนวณแรงเบรกของรถไฟฟ้า

การคำนวณแรงเบรก (Braking Force) ในบทความนี้จะเป็นการคำนวณระบบเบรก ของโครงการรถไฟฟ้าสายฉลองรัชธรรม ซึ่งระบบเบรกจะเป็นลักษณะเบรกที่อาศัยแรงเสียดทาน (Friction Brake) แบบ Disc Brake ซึ่งถูกติดตั้งอยู่ที่ทุกเพลา (Axle) ของรถไฟซึ่งสามารถคำนวณแรงเบรกที่กระทำต่อบริเวณจุดสัมผัสระหว่างล้อกับรางได้โดย Equation 1

$$F_b = \frac{4 \times \mu_g \times m \times \sum_{i=1}^n (P_{g,i})}{D_0} \quad (1)$$

โดยค่าพารามิเตอร์และลักษณะจำเพาะระบบเบรกของโครงการรถไฟฟ้าสายฉลองรัชธรรมนั้นถอดข้อมูลมาจาก Specification ของอุปกรณ์ที่ระบุอยู่ใน Definitive Design Brake System ของโครงการรถไฟฟ้าสายฉลองรัชธรรมนั้น ซึ่งต้องใช้ในการคำนวณดัง Table 1

**Table 1** The Calculation on parameter data of railway brake system

Parking Brake force per brake disc	28500 N
Mean Radius of brake disc	271 mm
Vehicle Mass AW0	116,400 Kg
Rotating Mass	5,820 Kg

$\mu$ disc brake	0.3
Number of parking brake	12
Wheel Diameter	830 mm

#### การคำนวณแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

แรงต้านการเคลื่อนที่จากความลาดชันของทางรถไฟ (Gradient Resistance,  $R_g$ ) สามารถคำนวณได้จากการที่ขบวนรถไฟทำมุมกับพื้นระนาบในทิศทางที่ขบวนรถไฟวิ่งไป สำหรับทางลาดชันที่ทำมุมน้อยๆ นั้นค่า  $\sin(\alpha)$  สามารถแทนได้ด้วยค่า  $\tan(\alpha)$  ซึ่งในงานทางด้านรถไฟนั้นค่า  $\tan(\alpha)$  จะถูกแทนด้วยค่าความลาดเอียง (i) ซึ่งปกติค่าความลาดชันของทางรถไฟจะแสดงในหน่วยต่อพันส่วน (Per mill) [%] โดยเขียนเป็นรูป Equation 2 และ Fig. 1 ดังนี้

$$R_g = m \times g \times \sin \alpha = m \times g \times \tan \alpha = m \times g \times i \quad (2)$$

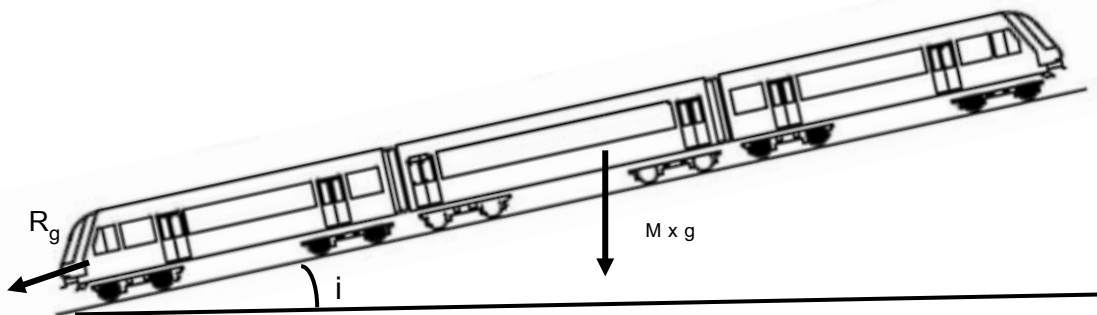


Fig. 1 Free body diagram of gradient resistance

แรงต้านการเคลื่อนที่จากสภาพการหยุดนิ่งของรถไฟ (Starting Resistance,  $R_s$ ) เป็นแรงต้านทานที่เกิดน้ำมันหล่อลื่นที่อยู่ภายในอุปกรณ์ทางกลของรถไฟกดทับจนเกิดการเสียดสีรูปน้ำมันหล่อลื่น ทำให้ขบวนรถไฟเกิดแรงต้านทานและต้องใช้แรงในการขับเคลื่อนมากกว่าปกติ โดยแรงต้านการเคลื่อนที่จากสภาพการหยุดนิ่งของรถไฟ ( $R_s$ ) จะมีค่าแตกต่างกันในแต่ละประเทศ โดยงานวิจัยนี้จะกำหนดค่า  $R_s = 3 \text{ Kg/Tons}$  ซึ่งเป็นค่าที่การรถไฟญี่ปุ่นกำหนดไว้ใช้สำหรับขบวนรถไฟฟ้า

แรงต้านจากการฝืนตัวของมวลขณะเร่งความเร็ว (Inertia Resistance,  $R_{in}$ ) เป็นแรงต้านทานจากความเฉื่อยของอุปกรณ์ส่วนหมุนของรถไฟ อาทิเช่น ชุดเพลาล้อรถไฟ ขณะรถไฟเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง โดยแรงต้านจากการฝืนตัวของมวลขณะเร่งความเร็วนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางรูปร่างทางกายภาพและวัสดุที่ถูกติดตั้งอยู่บนขบวนรถไฟ โดยได้ตาม Equation 3 ดังต่อไปนี้

$$R_{in} = M \times \alpha \times \left( 1 + \frac{M_{Rot}}{M} \right) \quad (3)$$

จากนั้นนำสมการทั้งหมดมารวมกันจะได้แรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนขณะหยุดนิ่ง โดยได้ตาม Equation 4 ดังต่อไปนี้

$$R = R_s + R_{in} + R_g \quad (4)$$

การคำนวณแรงขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า (Tractive Effort)

หลักการในการทำให้วัตถุใดวัตถุหนึ่งเคลื่อนที่นั้นเกิดจากการออกแรงให้เอาชนะให้แรงเสียดทานการเคลื่อนที่ ซึ่งระบบรถไฟฟ้านั้นใช้หลักการเดียวกันโดยมีมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ในการสร้างแรงขับเคลื่อนและทำการเปลี่ยนพลังงานทางไฟฟ้าเป็นพลังงานทางกลส่งผ่านชุดเพลาเกียร์เพื่อไปทำการขับเคลื่อนล้อรถไฟฟ้า จากนั้นมาเปรียบเทียบกับแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน โดยสามารถคำนวณได้จาก Equation 5 ดังต่อไปนี้

$$TE - R - F_b = W \times \alpha \quad (5)$$

โดยแรงขับเคลื่อนของโครงการรถไฟฟ้าสายฉลองรัชธรรมถูกแบ่งออกเป็น 2 โหมดคือ Low Acceleration Mode เป็นโหมดที่ใช้สำหรับ Operation ในสถานการณ์ปกติ และ High Acceleration Mode ซึ่งเป็นโหมดที่ใช้สำหรับขับเคลื่อนรถไฟฟ้าในกรณีฉุกเฉิน เป็นข้อมูลที่จะระบุอยู่ใน Definitive design Traction Performance ของโครงการโดยมีรายละเอียดตาม Table 2

**Table 2** Tractive effort of normal and high acceleration mode

Tractive Effort per motor Normal Mode	Tractive Effort per motor High Acceleration Mode
AW0 = 19.1 kN	AW0 = 22.1 kN
AW1 = 20.6 kN	AW1 = 23.7 kN
AW2 = 26.9 kN	AW2 = 30.9 kN
AW3 = 28.6 kN	AW3 = 31.4 kN
AW4 = 31.4 kN	AW4 = Not applicable

ลักษณะทางกายภาพของทางกายภาพของทางวิ่งรถไฟฟ้าสายฉลองรัชธรรม

1. Mainline จากการสำรวจพบที่มีความลาดชัน Gradient สูงสุดอยู่ที่บริเวณสถานี PP13 แยกติวานนท์ – PP14 วงศ์สว่าง มีค่า 0.8% ยาว 487 เมตร โดยถอดข้อมูลจากแบบแผนผังด้านอาณัติสัญญาณของทางวิ่งหลัก (Signaling Scheme Plan Drawing Mainline) โดยมีตำแหน่งและข้อมูลดัง Fig. 2

2. Depot จากการสำรวจพบที่มีความลาดชัน Gradient อยู่ที่บริเวณ South Chord Line มีค่า 3.2% ยาว 167 เมตร และบริเวณ North Chord Line มีค่า 2.6% ยาว 205 เมตร โดยถอดข้อมูลจากแบบแผนผังด้านอาณัติสัญญาณของศูนย์ซ่อมบำรุง (Signaling Scheme Plan Drawing Depot) ของโครงการโดยมีตำแหน่งและข้อมูลดัง Fig. 3 และ Fig. 4



Fig. 2 PP13 Yaek Tiwanon Station - PP14 Wong Sawang Station of MRT Purple Line



Fig. 3 South Chord Line of MRT Purple Line

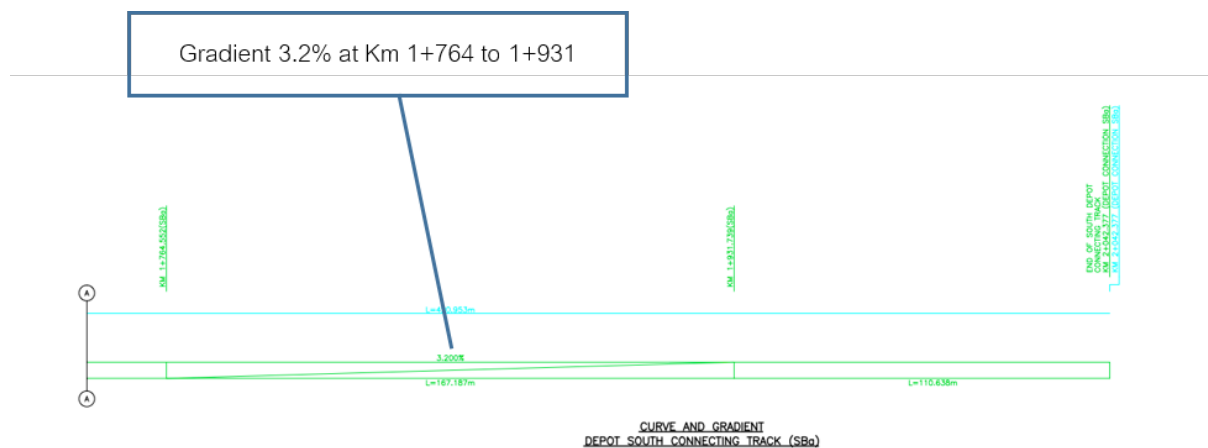


Fig. 4 Curve and Gradient Southbound Track Khlong Bang Phai Depot

### ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ประการแรกทำการศึกษาค้นหาจำนวนคงเหลือของเบรคมือที่เหมาะสมกรณีที่ต่อพ่วงรถไฟฟ้าอยู่บริเวณทางลาดชันเพื่อป้องกันการไถลของรถไฟฟ้า การคำนวณจะจำลองโดยการนำขบวนรถไฟฟ้า 1 ขบวนไปวางไว้ที่ทางลาดชันสูงสุดของระบบจากนั้นทำการคำนวณหาแรงการไถลที่เกิดจากทางลาดชันของทางรถไฟฟ้าและนำมาเปรียบเทียบกับแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของเบรคมือที่ติดตั้งอยู่ทุกๆ เฟลาล้อของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน โดยการทดลองจะดำเนินการทดสอบโดยค่อยๆ เพิ่มการลงเบรคมือทีละ 1 เฟลา โดยเริ่มจาก 0 เฟลา ไปยัง 12 เฟลา ซึ่งจะทำให้แรงต้านทานการเคลื่อนที่จากเบรคมือแตกต่างกันโดยผลการคำนวณพบว่า จำนวนคงเหลือขั้นต่ำของเบรคมือที่เหมาะสมอยู่ที่ 4 เฟลา (Axle) ซึ่งจะทำให้รถไม่เกิดการไถล กรณีรถไฟฟ้าจอดอยู่ที่บริเวณทางลาดชัน Gradient 3.2% นอกจากนี้ทำการเปรียบเทียบบริเวณอื่นๆ ของโครงการ แสดงดัง Fig. 5

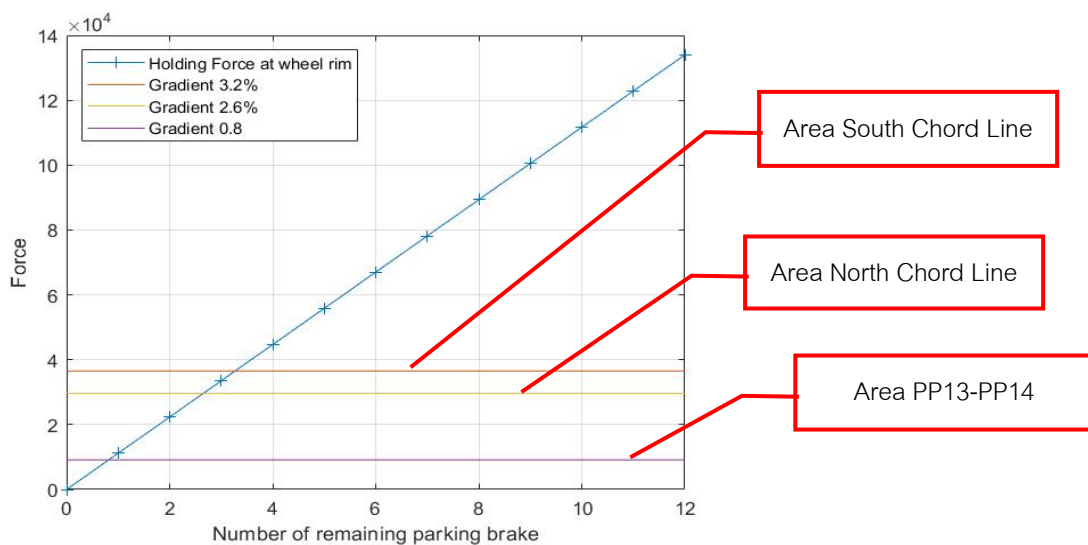


Fig. 5 The Parking brake force compared with resistance force at different area

ประการที่สอง ทำการศึกษาค้นหาความลาดชันสูงสุดที่รถไฟฟ้าสามารถลากจูงขณะที่มีการใช้เบรคมือ โดยคำนวณจะใช้สมมุติฐานรถไฟฟ้าเป็นลักษณะน้ำหนักแค่ตัวรถไม่รวมคนโดยสารหรือ Tare Load (AW0) เนื่องจากในสถานการณ์ฉุกเฉินนั้นการช่วยเหลือขบวนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนจะกระทำหลังมีการอพยพผู้โดยสารแล้ว และเนื่องจากระบบขับเคลื่อนของโครงการรถไฟฟ้าสายฉลองรัชธรรมถูกแบ่งออกเป็น 2 โหมด ได้แก่ Normal Mode และ High Acceleration Mode การคำนวณจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กรณีเนื่องจากแรงขับเคลื่อนของแต่ละโหมดต่างกันดัง Table 2 โดยการทดลองจะดำเนินการทดสอบโดยค่อยๆ เพิ่มการลงเบรคมือทีละ 1 เฟลา โดยเริ่มจาก 0 เฟลา ไปยัง 12 เฟลา ซึ่งจะทำให้แรงต้านทานการเคลื่อนที่จากเบรคมือแตกต่างกัน จากนั้นนำค่าที่ได้ในแต่ละช่วงเฟลามาคำนวณร่วมกับแรงขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าเพื่อคำนวณย้อนกลับหาแรงต้านการเคลื่อนที่จากความลาดชัน ( $R_g$ ) จาก Equation 5 และนำแรงต้านการเคลื่อนที่จากความลาดชันไปหาค่าความลาดชันสูงสุดที่รถไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้จาก Equation 2 โดยผลการคำนวณพบว่ากรณีลากจูงด้วย High Acceleration Mode สามารถลากจูงโดยคงจำนวนของคงเหลือของเบรคมือได้มากที่สุดที่ 5 เฟลา และ กรณีลากจูงด้วย Normal Mode สามารถลากจูงโดยคงจำนวนของคงเหลือของเบรคมือได้มากที่สุดที่ 3 เฟลา นั้นสามารถลากจูงผ่าน

ความลาดชัน Gradient 3.2% ซึ่งเป็นจุดที่มีความลาดชันและความต้านทานการเคลื่อนที่สูงที่สุดของโครงการได้ แสดงดัง

Fig. 6

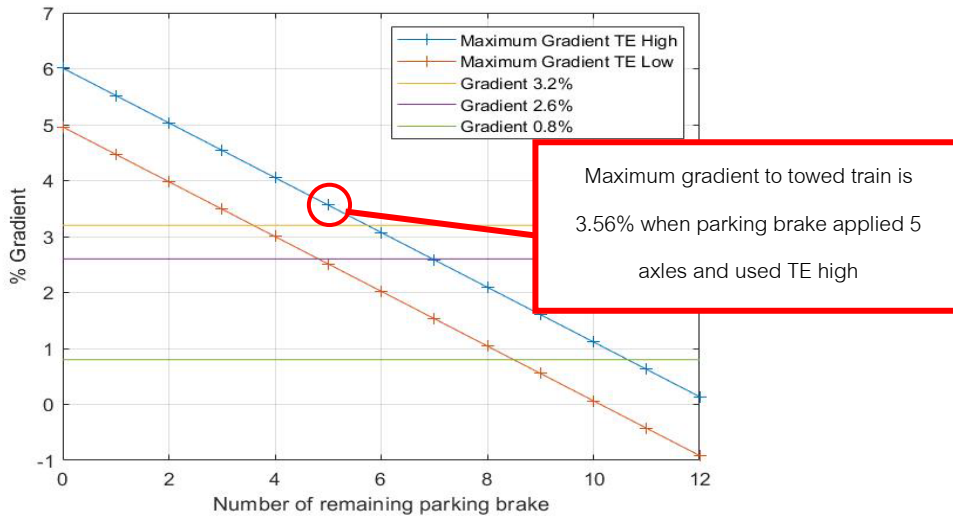


Fig. 6 Maximum gradient while towing with normal and high acceleration mode

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาหาจำนวนคงเหลือของเบรกมือที่เหมาะสมและการลากจูงขบวนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนไปยังศูนย์ซ่อมบำรุงในขณะที่มีการใช้เบรกมือเพื่อป้องกันการไหลของรถไฟฟ้าขณะทำการช่วยเหลือบนทางลาดชันของโครงการรถไฟฟ้าสายฉลองรัชธรรม ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า จำนวนเบรกมือที่เหมาะสมสำหรับรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนอยู่ที่ 4 เพลาซึ่งสามารถป้องกันการไหลของรถไฟฟ้าขณะจอดบนทางลาดชันได้ และสามารถลากจูงรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกลับศูนย์ซ่อมบำรุงได้โดยใช้โหมด High Acceleration Mode ทั้งบนเส้นทางสายหลักและภายในศูนย์ซ่อมบำรุง แต่ทั้งนี้จากผลการศึกษาพบว่ามีข้อจำกัดเพิ่มเติมกรณีลากจูงขบวนรถไฟฟ้าด้วย Normal Mode จะไม่สามารถลากจูงผ่านความลาดชันสูงสุดที่ 3.2% ของโครงการที่บริเวณ South Chord Line เนื่องจากกำลังลากจูงของรถไฟฟ้าไม่เพียงพอ แต่ทั้งนี้สามารถหลีกเลี่ยงการเคลื่อนที่ผ่าน South Chord Line ได้โดยเสนอแนะให้พิจารณาใช้เส้นทาง North Chord Line ในการลากจูงขบวนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกลับศูนย์ซ่อมบำรุงแทนเนื่องจากมีความลาดชันเพียง 2.6% ซึ่งสามารถลดความเสี่ยงและเพิ่มความปลอดภัยต่อการปฏิบัติการช่วยเหลือและลากจูงขบวนรถไฟฟ้ากรณีเกิดเหตุฉุกเฉินได้

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ศูนย์วิศวกรรมระบบรางมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ บริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน) ที่สนับสนุนข้อมูลของกรณีศึกษาโครงการรถไฟฟ้าสายฉลองรัชธรรม

### เอกสารอ้างอิง

การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย. โครงการรถไฟฟ้า. <https://www.mrta.co.th/th/index.php>, 10 กุมภาพันธ์ 2559.

การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย. Signaling Scheme Plan Drawing MRT Purple Line.

การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย. Definitive Design Train braking system MRT Purple Line.

การรถไฟฟ้ําขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย. Definitive Design Traction Performance MRT Purple Line. นคร จันทรศร. 2555. ช่างรถไฟ ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ. สํานักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.

กรุงเทพฯ.

วิชัย ศิวะโกศิษฐ. 2563. หลักการวิศวกรรมระบบราง. สํานักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

วเรศรา วีระวัฒน์, โชคชัย จุฑะโกสิทธิกานนท์, อธิธิโชติ จักรไพวงศ์, สมณิดา รัตนานะโชติ, ธรรมวฤทธิ สิงหวิสัย, ภูมินท์ กิระวานิช. 2557. ระบบรางขั้นพื้นฐาน (Fundamentals of rail systems). โครงการศูนย์นวัตกรรมทางโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยมหิดล. นครปฐม.

American Public Transportation. 2017. Parking Brakes for Passenger Locomotives and Cars, 3<sup>rd</sup> ed.

Washington DC, USA.

Cruceanu. C. 2012. Train braking. In: Perpinya, X. (Ed.). Reliability and Safety in Railway. Intech. Rijeka,

Croatia, pp. 30–46.

Profillidis, V.A. 2014. Railway Management and Engineering, 4<sup>th</sup> ed. Ashgate Publishing Limited. UK.

Limpert, R. 1999. Brake Design and Safety. 2<sup>nd</sup> ed. Society of Automotive Engineers. Inc., USA.