



การวิเคราะห์คุณลักษณะความเสียหายและผลที่ตามมาของความชำรุด  
ของสลักปากขอพ่วง

ที่ใช้สำหรับรถบรรทุกสินค้าในการรถไฟแห่งประเทศไทย

FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS OF KNUCKLE PIN  
FOR AUTOMATIC COUPLING OF  
STATE RAILWAY OF THAILAND FREIGHT WAGON

อัศวิน มุ่งนากลาง

ASSAWIN MUNGNAKLANG

การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน (บัณฑิตศึกษา)

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2559



การวิเคราะห์คุณลักษณะความเสียหายและผลที่ตามมาของความชำรุด  
ของสลักปากขอพ่วง

ที่ใช้สำหรับรถบรรทุกสินค้าในการรถไฟแห่งประเทศไทย

FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS OF KNUCKLE PIN  
FOR AUTOMATIC COUPLING OF  
STATE RAILWAY OF THAILAND FREIGHT WAGON

อัศวิน มุ่งนากลาง

ASSAWIN MUNGNAKLANG

การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน (บัณฑิตศึกษา)

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อการค้นคว้าอิสระ การวิเคราะห์คุณลักษณะความเสียหายและผลที่ตามมาของความชำรุดของ  
ของสลักปากขอพ่วงที่ใช้สำหรับรถบรรทุกสินค้า  
ในการรถไฟแห่งประเทศไทย  
ชื่อ นามสกุล อัครวิน มุ่งนากลาง  
ชื่อปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน  
คณะ วิศวกรรมศาสตร์  
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ณัฐวรพล รัชสิริวัชรบุล

คณะกรรมการสอบการค้นคว้าอิสระได้ให้ความเห็นชอบการค้นคว้าอิสระฉบับนี้แล้ว

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ มินคร)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สหรัตน์ วงษ์ศรีชะ)

.....กรรมการ  
(ดร.ณัฐวรพล รัชสิริวัชรบุล)

.....กรรมการและที่ปรึกษา  
(ดร.ปริญญา บุญกนิษฐ)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร อนุมัติให้ดำเนินการค้นคว้าอิสระฉบับ  
นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการ  
จัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน (บัณฑิตศึกษา) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ ฤทธิ์ทอง)

วันที่..... เดือน..... พ.ศ.....

ชื่อการค้นคว้าอิสระ	การวิเคราะห์คุณลักษณะความเสียหายและผลที่ตามมาของความชำรุดของ ของสลักปากขอพ่วงที่ใช้สำหรับรถบรรทุกสินค้า ในการรถไฟแห่งประเทศไทย
ชื่อ นามสกุล	อัศวิน มุ่งนากลาง
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2559

### บทคัดย่อ

ขณะนี้รัฐบาลได้สนับสนุนและส่งเสริมระบบการขนส่งทางราง การรถไฟฯ ก็เป็นส่วนหนึ่งของระบบรางที่สำคัญในประเทศ การขนส่งสินค้าของการรถไฟฯ ก็เป็นรายได้หลักของการรถไฟฯ ปีละมากกว่า 1,000,000,000 บาท นอกจากการพัฒนาการขนส่งสินค้าให้รวดเร็ว ตรงต่อเวลาแล้ว ความปลอดภัยก็ต้องมีการพัฒนาควบคู่กันไปด้วย ถึงแม้ว่ารถสินค้าจะไม่มีผู้โดยสารก็ตาม แต่เมื่อเกิดอุบัติเหตุแล้วจะทำให้เกิดความสูญเสียขึ้นมาก การตรวจสอบการซ่อมบำรุง ในส่วนของล้อเลื่อน (Rolling Stock) จึงต้องทำโดยอาศัยหลักวิชาการและความรู้ทางวิศวกรรม สลักปากขอพ่วง (KNUCKLE PIN) มีหน้าที่ รับแรงดึง แรงเฉือนในการฉุดลากขบวนรถ สลักปากขอพ่วง ที่ใช้กับรถสินค้าในการรถไฟฯ มีจำนวนทั้งสิ้น 6000 ชิ้น และมีแนวโน้มที่จะใช้งานเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากโครงการก่อสร้างทางคู่ และโครงการจัดซื้อรถสินค้าใหม่ของการรถไฟฯ สลักปากขอพ่วง (KNUCKLEPIN) ความแข็งแรงและการยืดอายุการใช้งาน ก็ช่วยให้การรถไฟฯ ลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงและเพิ่มความปลอดภัยในการขนส่งสินค้า ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอีกมาก งานวิจัยนี้มุ่งสร้างความเข้าใจเกี่ยวกับคุณภาพของสลักปากขอพ่วงรุ่น NAT MALL สำหรับรถสินค้า โดยการทดสอบด้วยวิธี ทดสอบแรงดึง (Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials) วิธีหาค่าส่วนผสมของวัสดุ (Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry) วิธีทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Hardness Testing Machine) และวิธีทดสอบโครงสร้างจุลภาค เพื่อหาสาเหตุการชำรุด และนำไปสู่การกำหนดมาตรฐานคุณภาพของสลักปากขอพ่วงสำหรับรถสินค้าในประเทศไทย

**คำสำคัญ:** การรับแรงดึง ; สลักปากขอพ่วง , การวิบัติของสลักปากขอพ่วง

<b>Independent Study Title</b>	Failure Mode and Effect Analysis of Knuckle Pin For Automatic Coupling of State Railway of Thailand Freight Wagon
<b>Author</b>	Assawin Mungnaklang
<b>Major program</b>	Sustainable Industrial Management Engineering (Graduate Studies)
<b>Academic Year</b>	2016

## ABSTRACT

Freight is major source of income of the State Railway of Thailand (SRT); which had revenues of one billion baht a year. The development of freight by rail system to be fast, punctual, and safe is important. Knuckle pin serves tension and shear stress in pulling Rolling Stock. Strength testing of Knuckle pin must be done by technical and engineering knowledge. SRT has 6,000 Rolling Stocks; that means, 6,000 Knuckle Pin has been used and it is likely to increase due to the construction of the Double Track Project and the purchase of new Rolling Stocks. The efficient Knuckle Pin prolongs lifespan and SRT would have benefit on saving cost of maintenance and increase safety in the transportation of goods. This research is aimed at creating the understanding about the quality of the Knuckle Pin modeled Nat Mall. The pin would be test by Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials and the Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry and Hardness Testing Machine and Microstructure to determine the cause of pin's damage. This study will contribute the standardization of the quality of the Knuckle Pin which is used in Rolling Stocks of SRT.

**(Key word):** Tensile Stress ; KNUCKLE PIN, THE APOCALYPSE

## กิตติกรรมประกาศ

การค้นคว้าอิสระนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของดร.ณัฐวรพล รัชสิริวัชรบุล อาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระ ในการให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ของการวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณดร.ปริญญ์ บุญกนิษฐ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สหรัตน์ วงษ์ศรีษะ อาจารย์ประภาพร พลอยยอด อาจารย์ผู้สอนและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ในการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณนายช่างสกลธ นนทนิรัตศัย วิศวกรกำกับการซ่อมบำรุงรถสินค้าเขตบางซื่อ ศูนย์ซ่อมบำรุง และนายช่าง นพพร แก้วอำพุท วิศวกรระดับ 8 รักษาการณัวิศวกรกำกับการกองลากเลื่อนเขตอุตรดิตถ์ ศูนย์ลากเลื่อน ฝ่ายการช่างกล รวมถึงพนักงานของการรถไฟแห่งประเทศไทยทุกท่านที่สามารถทำให้งานวิจัยบรรลุผลสำเร็จและเกิดประโยชน์สูงสุดกับบริษัทของท่าน

ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง มา ณ โอกาสนี้

อัศวิน มุ่งนากลาง



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(ก)
Abstract	(ข)
กิตติกรรมประกาศ	(ค)
สารบัญ	(ช)
สารบัญตาราง	(ณ)
สารบัญภาพ	
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 สมมุติฐาน	2
1.5 กรอบแนวความคิด	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.7 นิยามศัพท์	3
1.8 คำสำคัญ	4
บทที่ 2 การศึกษาอุตสาหกรรมและทบทวนวรรณกรรม	5
2.1 การก่อสร้างโครงการรถไฟทางคู่	5
2.2 เส้นทางรถไฟฟ้าทางคู่ ปัจจุบันและอนาคต (ที่อนุมัติแล้ว)	6
2.3 โครงการรถไฟทางคู่ ช่วงฉะเชิงเทรา – ศรีราชา – แหลมฉบัง	8
2.4 เส้นทางรถไฟสายชายฝั่งทะเลตะวันออก ช่วงฉะเชิงเทรา คลองสิบเก้า – แก่งคอย	11
2.5 โครงการก่อสร้างรถไฟทางคู่ ช่วงชุมทางถนนจิระ – ขอนแก่น	14
2.6 โครงการก่อสร้างรถไฟทางคู่ ช่วงนครปฐม – หัวหิน	16
2.7 โครงการก่อสร้างรถไฟทางคู่ ช่วงประจวบคีรีขันธ์ – ชุมพร	17
2.8 โครงการก่อสร้างรถไฟทางคู่ ช่วงมาบกะเบา – ชุมทางถนนจิระ	19
2.9 โครงการก่อสร้างรถไฟทางคู่ ช่วงลพบุรี – ปากน้ำโพ	20

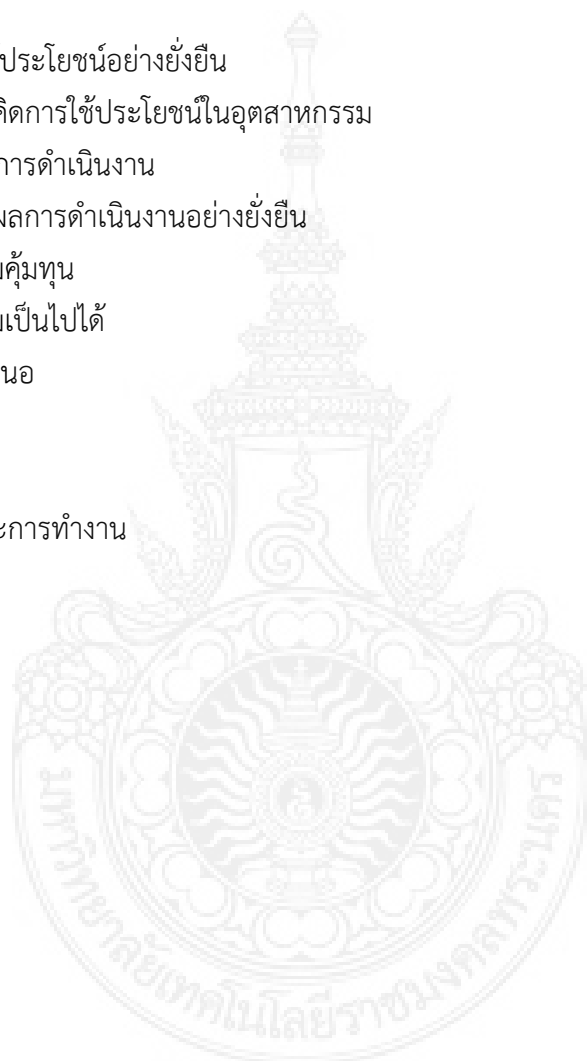
## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.10 แนวคิดทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	21
2.11 เครื่องฟุ้งอัตโนมัติที่มีใช้งานอยู่ในการรถไฟมี 4 ประเภท	23
2.12 มาตรฐานของเครื่องฟุ้ง SRT	27
2.13 มาตรฐานและการทดสอบ	28
2.14 มาตรฐานและสลักปากขอฟุ้งที่ใช้ในต่างประเทศ	28
2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	41
3.1 วิธีดำเนินการวิจัย	41
บทที่ 4 วิธีการทดสอบ	44
4.1 ทดสอบแรงดึง	44
4.2 ทดสอบหาค่าประกอบทางเคมี	45
4.3 ทดสอบความแข็ง	45
4.4 ทดสอบโครงสร้างจุลภาค	45
บทที่ 5 ผลการทดลอง	46
5.1 ผลการทดลอง	46
5.2 วิเคราะห์เปรียบเทียบกับมาตรฐาน	53
บทที่ 6 อภิปรายผล	55
6.1 การวิเคราะห์อาการขัดข้องและผลกระทบ	55
6.2 การกำหนดปัจจัยบนก้างปลา	58
6.3 ประโยชน์ของแผนผังสาเหตุและผล	58
6.4 สรุปการอภิปรายผล	66



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 7 สรุปผล	62
บทที่ 8 การนำไปใช้ประโยชน์อย่างยั่งยืน	65
8.1 แนวคิดการใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม	65
8.2 แผนการดำเนินงาน	65
8.3 สรุปผลการดำเนินงานอย่างยั่งยืน	67
8.4 ความคุ้มค่า	67
8.5 ความเป็นไปได้	71
8.5 ข้อเสนอ	72
เอกสารอ้างอิง	73
ภาคผนวก	74
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	79



## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 chemical composition of the material	34
2.2 Rockwell C (HRC) hardness measurements on the transverse section of the half-shaft	35
2.3 Mechanical properties from tensile test	35
5.1 การทดสอบชิ้นงานโดยวิธี Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials	48
5.2 การทดสอบชิ้นงานโดยวิธี Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry	49
5.3 การทดสอบความแข็งใช้วิธีการทดสอบแบบร็อคเวลล์	50
5.4 Internal Standard and Analytical Lines Element Wavelength nm Line Possible Interference	53
6.1 การวิเคราะห์อาการขัดข้องและผลกระทบของขอฟังรถสินค้า	57
7.1 ค่าความแข็งของสลักปากขอฟัง จากการทดสอบ	62
7.2 ค่าที่ทางการกำหนด เป็นค่า Minimum ของคุณสมบัติของสลักปากขอฟัง	63
7.3 ตารางเปรียบเทียบค่าที่ทางการกำหนด, ค่าทดสอบ, ค่าตามมาตรฐาน AAR.M – 118	64
8.1 รายละเอียดประมาณการผลประโยชน์ในการลงทุน	66
8.2 สรุปผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าการลงทุนทางเศรษฐศาสตร์โครงการ	66
8.3 ผลการศึกษามูลค่าทางเศรษฐศาสตร์	67
8.4 แสดงรายการค่าใช้จ่ายในการซ่อมรถสินค้าวาระหนักของการรถไฟฯ ค่าใช้จ่ายซ่อมรถประจำเดือนธันวาคม พ.ศ. 2558 สังกัดแขวงโรงงานอุตรดิตถ์ ประเภทการซ่อมซ่อมวาระรถสินค้า(วาระ 8 เดือน)	68

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
8.5 แสดงรายการค่าใช้จ่ายในการซ่อมรถโดยสารวาระหนักของการรถไฟฟ้า ค่าใช้จ่ายซ่อมรถประจำเดือน ตุลาคม พ.ศ. 2559 สังกัดแขวงโรงงานอุตสาหกรรมดีดี ประเภทการซ่อมซ่อมหนักโดยสาร (วาระ 40 เดือน)	68
8.6 แสดงรายการค่าใช้จ่ายในการซ่อมรถสินค้าถาวรของการรถไฟฟ้า	69
8.7 แสดงรายการค่าใช้จ่ายในการซ่อมรถสินค้า วาระ 8 เดือนของการรถไฟฟ้า	69
8.8 แสดงรายการค่าใช้จ่ายในการซ่อมรถสินค้าวาระปานกลางของการรถไฟฟ้า	69
8.9 แสดงรายการค่าใช้จ่ายในการซ่อมรถสินค้าวาระหนักของการรถไฟฟ้า	69
8.10 ค่าใช้จ่ายในส่วนของแรงในการถอดประกอบสลักปากขอพวง	70



## สารบัญภาพ

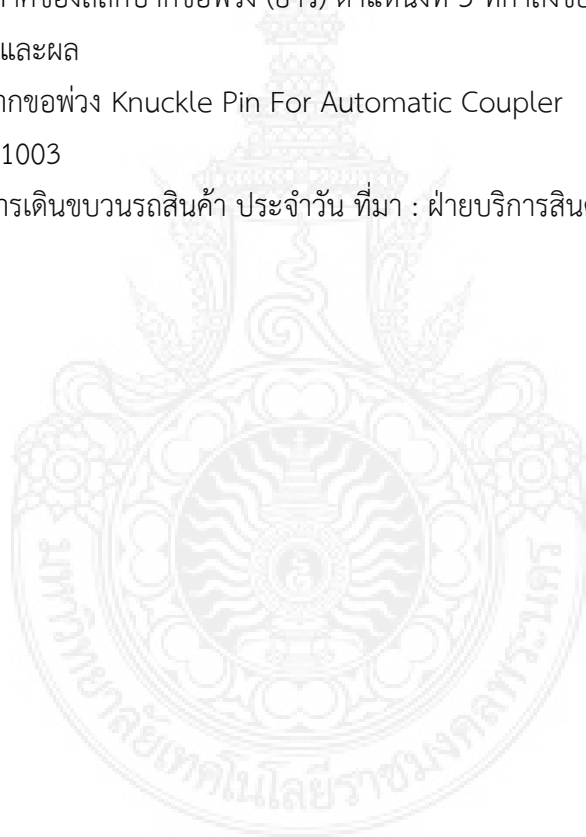
ภาพ	หน้า
1.1 แนวคิดและสมมุติฐานการวิจัย	3
2.1 เส้นทางรถไฟที่ คสช. อนุมัติแล้ว	6
2.2 รถไฟทางคู่และทางสามในปัจจุบัน	7
2.3 โครงการรถไฟทางคู่ ช่วงฉะเชิงเทรา – ศรีราชา – แหลมฉบัง	8
2.4 เส้นทางรถไฟสายชายฝั่งทะเลตะวันออก ช่วงฉะเชิงเทรา – คลองสิบกี้ – แก่งคอย	11
2.5 โครงการก่อสร้างรถไฟทางคู่ ช่วงชุมทางถนนจิระ – ขอนแก่น	14
2.6 โครงการก่อสร้างรถไฟทางคู่ ช่วงนครปฐม – หัวหิน	16
2.7 โครงการก่อสร้างรถไฟทางคู่ ช่วงประจวบคีรีขันธ์ – ชุมพร	17
2.8 โครงการก่อสร้างรถไฟทางคู่ ช่วงมาบตาพาด – ชุมทางถนนจิระ	19
2.9 โครงการก่อสร้างรถไฟทางคู่ ช่วงลพบุรี – ปากน้ำโพ	20
2.10 เครื่องฟ่วงอัตโนมัติแบบแนทมอลล์ (ทำปิด)	24
2.11 เครื่องฟ่วงอัตโนมัติแบบแนทมอลล์ (ทำเปิด)	24
2.12 เครื่องฟ่วงอัตโนมัติแบบญี่ปุ่น	25
2.13 เครื่องฟ่วงอัตโนมัติแบบเบลเยียม	25
2.14 เครื่องฟ่วงอัตโนมัติแบบอินเดีย	26
2.15 เครื่องฟ่วงอัตโนมัติแบบ Controlled slack	26
2.16 เครื่องฟ่วงอัตโนมัติแบบ Tight Lock (ทำเปิด)	27
2.17 เครื่องฟ่วงอัตโนมัติแบบ Tight Lock (ทำปิด)	27
2.18 มาตรฐาน AAR-10A Contour	28
2.19 (a) การเชื่อมต่อของ Half-shaft และข้อต่อ CV กับล้อ และ (b) ร่องฟันที่ปลายของเพลลา	29
2.20 ส่วนประกอบและการเชื่อมต่อกันของ half-shaft กับข้อต่อ CV ที่ล้อ	30
2.21 (a) การแตกของร่องฟันบน half-shaft การแตกหักเป็นปกติกับแกนตามยาว ของชิ้นส่วน ภาพการบิดในรูป (b) โดยที่มีลูกศรสีแดงแสดงตำแหน่งส่วนบน ของร่องฟันของเส้นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า	30
2.22 ภาพตัดขวางของส่วนที่แตกหัก	31

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
2.23 (a) โกล้ชขอบ, (b) ที่ระยะหนึ่งโนสีของรัศมีจากขอบ (c) ที่ระยะครึ่งหนึ่งจากรัศมีจากขอบ, (d) ที่ระยะศูนย์กลาง	32
2.24 (a) รอยแตกทุติยภูมิ บริเวณที่โกล้กับขอบ (ลูกศรสีเหลือง), (b) บริเวณร้อยพันกับการแตกร้าวมแนวขวางและการแตกหัก ตามยาวที่โคนร้องพัน (ลูกศรสีแดง)	33
2.25 ภาพด้านขวางของ half-shaft ส่วนที่โกล้กับพื้นผิวที่แตก (a) รอยแตกขนาดใหญ่จากโคนร้องพัน และการสึกหรอของร้องพัน (ลูกศรสีเหลือง), (b) รอยแตกทุติยภูมิ (ลูกศรสีแดง)	33
2.26 โครงสร้างจุลภาคของ half-shaft (a) โกล้กับพื้นผิว; (b) ที่ตำแหน่งกึ่งกลาง ทั้งสองลักษณะเป็นโครงสร้างจุลภาคแบบ Bainitic	34
2.27 แรงประสิทธิผลบนพื้นผิวของ half-shaft	36
3.1 วิธีดำเนินการวิจัย	43
5.1 รูปสลักปากขอพ่วงที่ยังไม่ได้ใช้งาน	46
5.2 รูปสลักปากขอพ่วงที่ประกอบกับลำตัวเครื่องพ่วง	46
5.3 รูปสลักปากขอพ่วงที่ชำรุด	47
5.4 รูปการเตรียมชิ้นงานก่อนการทดสอบ	47
5.5 การทดสอบโดยวิธี Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry	48
5.6 การทดสอบแรงดึงโดยวิธี Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials	48

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
5.7 โครงสร้างจุลภาคของสลักปากขอพวง (สั้น) ตำแหน่งที่ 1 ที่กำลังขยาย 200X	50
5.8 โครงสร้างจุลภาคของสลักปากขอพวง (สั้น) ตำแหน่งที่ 2 ที่กำลังขยาย 200X	51
5.9 โครงสร้างจุลภาคของสลักปากขอพวง (สั้น) ตำแหน่งที่ 3 ที่กำลังขยาย 200X	51
5.10 โครงสร้างจุลภาคของสลักปากขอพวง (ยาว) ตำแหน่งที่ 1 ที่กำลังขยาย 200X	52
5.11 โครงสร้างจุลภาคของสลักปากขอพวง (ยาว) ตำแหน่งที่ 2 ที่กำลังขยาย 200X	52
5.12 โครงสร้างจุลภาคของสลักปากขอพวง (ยาว) ตำแหน่งที่ 3 ที่กำลังขยาย 200X	53
6.1 แผนผังสาเหตุและผล	59
7.1 แผนผังสลักปากขอพวง Knuckle Pin For Automatic Coupler เลขที่ 3-PG5-1003	63
8.1 แสดงรายได้การเดินขบวนรถสินค้า ประจำวัน ที่มา : ฝ่ายบริการสินค้า การรถไฟฯ	71



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การขนส่งระบบรางเป็นการขนส่งผู้โดยสารหรือสินค้าด้วยยานพาหนะที่วิ่งไปตามราง การขนส่งระบบรางเป็นรูปแบบการขนส่งที่มีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากการขนส่งคราวละมากๆ ประหยัดพลังงาน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ช่วยลดการพึ่งพาพลังงานจากฟอสซิลและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านระบบขนส่งทางรางนั้น นอกจากจะเป็นโครงสร้างพื้นฐานหลักด้านการคมนาคมขนส่งแล้วยังช่วยส่งเสริมการพัฒนาภูมิภาคและเมือง รวมถึงการพัฒนาเศรษฐกิจตามแนวของเส้นทางรถไฟอีกด้วย โดยทั่วไปรางรถไฟจะประกอบไปด้วยราง 2 รางคู่ขนานกันไป ปกติแล้วจะทำมาจากเหล็กกล้าแล้วหุ้มด้วยไม้หมอน ไม้หมอนจะช่วยรักษาระยะห่างหรือความกว้างระหว่างรางทั้งสองข้าง ซึ่งจะมีความกว้างแตกต่างกันไปในแต่ละประเทศ

รัฐบาลไทยได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของระบบขนส่งทางรางเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการขนส่งทางบกและระบบโลจิสติกส์ของประเทศในอนาคต โดยเชื่อมโยงโครงข่ายและการบริหารจัดการขนส่งผู้โดยสาร สินค้าและบริการที่สะดวกและปลอดภัย ทั้งในพื้นที่ชนบท พื้นที่เมืองและระหว่างประเทศ รวมทั้งสนับสนุนการขยายฐานการผลิตตามแนวเส้นทางรถไฟ จึงได้เร่งพัฒนาโครงข่ายรถไฟระหว่างเมือง ปรับปรุงระบบอุปกรณ์และโครงสร้างพื้นฐานการขนส่งทางราง และพัฒนาระบบรถไฟทางคู่ที่มีความพร้อมดำเนินการ รวมถึงเร่งผลักดันให้สามารถ ดำเนินการก่อสร้างทางคู่ขนาดรางมาตรฐาน (Standard Gauge) เชื่อมโยงกับประเทศเพื่อนบ้าน และสาธารณรัฐประชาชนจีน (จีนตอนใต้) เพื่อให้รถไฟเป็นทางเลือกใหม่ของการเดินทาง และสร้างความได้เปรียบในการแข่งขันของประเทศ

การรถไฟแห่งประเทศไทยเป็นจักรกลสำคัญของรัฐบาลในการพัฒนาคุณภาพการขนส่งระบบราง มีภารกิจในการดูแลและรับผิดชอบการขนส่งทางรถไฟ โดยจำแนกการบริการเชิงพาณิชย์ซึ่งมุ่งหวังกำไรจากการขนส่งสินค้าและการจัดเดินขบวนรถโดยสารระยะไกลที่มีคุณภาพ

การขนส่งสินค้าของการรถไฟฯ สร้างรายได้หลักให้กับการรถไฟ โดยในปี 2557 มีการขนส่งสินค้าทางรถไฟจำนวน 10.94 ล้านตัน คิดเป็นรายได้ 1,437 ล้านบาท การพัฒนาระบบการขนส่งสินค้าให้มีความสะดวก ปลอดภัย ตรงต่อเวลา และรักษาคุณภาพของการบริการ รวมถึงการลดต้นทุนในการดำเนินการของการรถไฟฯ จึงมีผลอย่างยิ่งในการเพิ่มรายได้

ส่วนประกอบสำคัญในการทำให้ขนส่งสินค้าได้ปริมาณมากขึ้นคือเครื่องฟ่วง ซึ่งปัจจุบันได้มีการเปลี่ยนมาใช้แบบอัตโนมัติ แทนแบบกึ่งอัตโนมัติแล้ว ทำให้การเสียเวลาของรถไฟลดลง อีกทั้งยังสามารถฟ่วงขบวนได้จำนวนมากยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามคุณภาพของอะไหล่เครื่องฟ่วงก็เป็นองค์ประกอบสำคัญ โดยเฉพาะอุปกรณ์สลักปากขอฟ่วง (Knuckle Pin) ซึ่งทำหน้าที่รับแรงดึง แรง

เนื่องในการลดแลกขบวนรถ โดยสลักปากขอพ่วงที่ใช้กับรถสินค้าในการรถไฟฯ มีจำนวนทั้งสิ้น 6,000 ชิ้น และมีแนวโน้มที่จะใช้งานเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากโครงการก่อสร้างทางคู่ และโครงการจัดซื้อรถสินค้าใหม่ของการรถไฟฯ หากเลือกใช้สลักปากขอพ่วงที่มีมาตรฐานสูงขึ้นเหมาะสมกับการใช้งานถึงแม้ว่าจะมีราคาต้นทุนการเปลี่ยนสลักปากขอพ่วง แต่ต้นทุนการตรวจสอบการซ่อมบำรุงในส่วนของล้อเลื่อน (Rolling Stock) ที่น้อยลงย่อมทำให้ต้นทุนการดำเนินการขนส่งโดยรวมของระบบลดลงตามไปด้วย

การวิจัยครั้งนี้จึงเกิดขึ้นเพื่อศึกษาคุณลักษณะของความเสียหายของสลักปากขอพ่วงที่เกิดจากการใช้งานตามปกติของรถขนส่งสินค้า และวิเคราะห์ถึงความเหมาะสมของมาตรฐานสลักปากขอพ่วงที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ทั้งนี้เพื่อนำเสนอสลักปากขอพ่วงที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับเครื่องพ่วงที่ใช้ในขบวนต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

วิเคราะห์คุณลักษณะของความเสียหายและผลกระทบการชำรุดของสลักปากขอพ่วงที่ใช้สำหรับรถบรรทุกสินค้าในการรถไฟแห่งประเทศไทย

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ศึกษาสลักปากขอพ่วงรุ่น Natmall ที่ใช้ในรถบรรทุกสินค้าของการรถไฟแห่งประเทศไทย

1.3.2 มาตรฐานที่ใช้เปรียบเทียบในการวิเคราะห์ครั้งนี้ ได้แก่ มาตรฐาน AAR

## 1.4 สมมุติฐาน

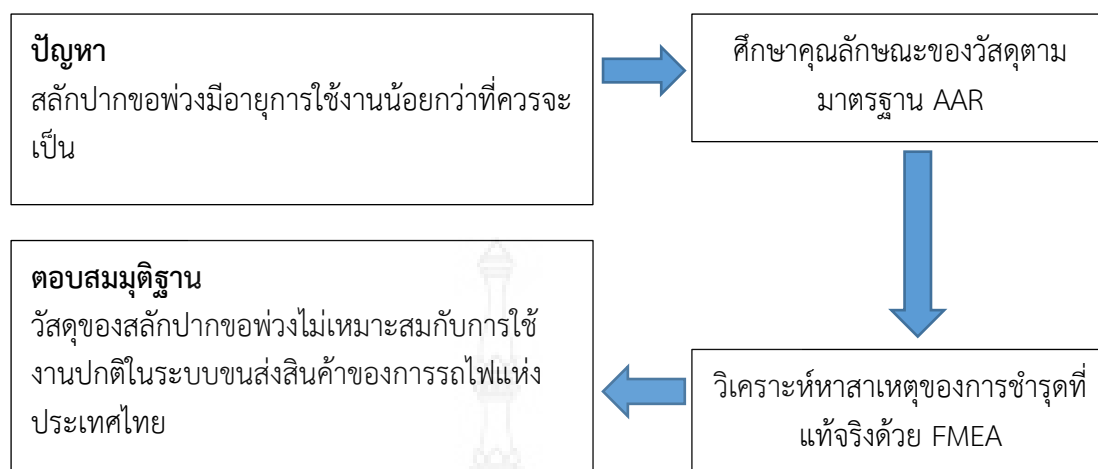
1.4.1 วัสดุของสลักปากขอพ่วงไม่เหมาะสมกับการใช้งานปกติในระบบขนส่งสินค้าของการรถไฟแห่งประเทศไทย

1.4.2 อายุการใช้งานสลักปากขอพ่วงน้อยกว่าปกติเกิดจากการเลือกใช้วัสดุมาตรฐานไม่ตรงกับคุณลักษณะการใช้งาน

## 1.5 กรอบแนวความคิด

วิเคราะห์คุณลักษณะของสลักปากขอพ่วงโดยใช้มาตรฐาน AAR โดยการทดสอบแรงดึง (Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry) และองค์ประกอบทางเคมี (Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials) ของสลักปากขอพ่วง เพื่อศึกษาความเหมาะสมของวัสดุ และนำมาวิเคราะห์หาสาเหตุของการชำรุดที่แท้จริงด้วย FMEA ดังภาพ 1.1





ภาพ 1.1 แนวคิดและสมมุติฐานการวิจัย

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 การรถไฟแห่งประเทศไทยได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา
- 1.6.2 เพิ่มความปลอดภัยให้กับล้อเลื่อน
- 1.6.3 สร้างความมั่นใจให้ลูกค้าที่ใช้บริการขนส่งทางรถไฟ
- 1.6.4 ลดการสูญเสียทั้งแก่ชีวิตและทรัพย์สิน

## 1.7 นิยามศัพท์

เครื่องพวงอัตโนมัติ	เป็นอุปกรณ์ในการต่อพวงขบวนรถไฟให้มีขบวนที่ยาวขึ้น
สลักปากขอพวง	มีหน้าที่ยึดระหว่างปากขอพวงกับลำตัวเครื่องพวง
มาตรฐาน AAR	คือมาตรฐานที่ใช้ในการเปรียบเทียบสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้อย่างหนึ่งของประเทศอเมริกา
มาตรฐาน ASTM	คือมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบวัสดุของงานวิจัยในครั้งนี้อย่างหนึ่ง
Rolling Stock	หมายถึงรถจักรและล้อเลื่อน ที่มีชื่อใช้ในการรถไฟ
NATMALL	คือชนิดของเครื่องพวงอัตโนมัติ ที่มีใช้งานอยู่ในการรถไฟ
มาตรฐานเครื่องพวง	เส้นโอบรอบปากขอพวง AAR-10A Contour ความสูงจากระดับส้นรางถึงกึ่งกลางปากขอพวง 850 mm ระยะจากหน้าสุดถึงแนวพวงต่อ 400 mm ระดับความสูงปากขอพวงไม่ควรต่างกันเกินกว่า 50 mm
การซ่อมวาระ	คือการบำรุงรักษาตามระยะเวลาที่กำหนด
รถบรรทุกสินค้า	คือรถที่ใช้สำหรับบรรทุกและขนส่งสินค้าทางรถไฟ
แรงดึงที่จุดคราก	(Yield)
ความต้านแรงดึงที่จุดคราก	(Yield stress)

แรงดึงสูงสุด	(maximum tensile)
ความต้านแรงดึงสูงสุด	(Ultimate tensile stress)
บตด.	โบกี้บรทุกคอนเทรนเนอร์
บตค.	โบกี้บรทุกน้ำมันชั้น
บตท.	โบกี้บรทุกแก๊ส
บตข.	โบกี้บรทุกหินเทซัง
FMEA	การวิเคราะห์คุณลักษณะความเสียหายและผลที่ตามมาของความชำรุด

## 1.8 คำสำคัญ

การรับแรงดึง , สลักปีกขอพ่วง , การวิบัติของสลักปีกขอพ่วง



## บทที่ 2

### การศึกษาอุตสาหกรรมและทบทวนวรรณกรรม

ดังที่ได้กล่าวในบทที่ 1 ถึงที่มาและความสำคัญของปัญหาที่จำเป็นต้องดำเนินการวิจัยครั้งนี้ สาระสำคัญในบทนี้จะกล่าวถึง การศึกษาอุตสาหกรรม และทบทวนวรรณกรรม แนวคิดทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และ งานวิจัยภายในประเทศที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 รัฐบาลได้ลงนามเซ็นสัญญา

โครงการก่อสร้างรถไฟทางคู่ราง 1.435 เมตร วิ่ง 160 กม./ช.ม. เชื่อมจีน นำร่อง 2 สาย จากด่านเชียงของ-หนองคาย ทะลุท่าเรือแหลมฉบัง ลงทุนกว่า 7.4 แสนล้าน คาดตอกเข็มปี 59 สร้างเสร็จปี 64

นางสร้อยทิพย์ ไตรสุทธิ์ ปลัดกระทรวงคมนาคม กล่าวว่า ที่ประชุมคณะรักษาความสงบแห่งชาติ (คสช.) ชุดใหญ่ มีพลเอกประยุทธ์ จันทร์โอชา หัวหน้า คสช. เป็นประธาน ได้เห็นชอบให้กระทรวงคมนาคมศึกษาพัฒนาโครงการรถไฟทางคู่ระบบรางขนาดมาตรฐาน 1.435 เมตร หรือสแตนด์ดาร์ดเกจ ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้า วิ่งด้วยความเร็ว 160 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จำนวน 2 เส้นทาง เพื่อเชื่อมเศรษฐกิจการค้ากับประเทศจีน ระยะทางรวม 1,392 กิโลเมตร วงเงินลงทุนรวม 741,460 ล้านบาท

คาดว่าจะเริ่มดำเนินการในปี 2558-2564 แยกเป็นสายหนองคาย-โคราช-สระบุรี-แหลมฉบัง-มาบตาพุด ระยะทาง 737 กิโลเมตร วงเงิน 392,570 ล้านบาท และสายเชียงของ-เด่นชัย-บ้านภาชี ระยะทาง 655 กิโลเมตร วงเงิน 348,890 ล้านบาท

ทั้งนั้นใน 2 เส้นทางนี้ จะนำผลการศึกษาเดิมของรถไฟความเร็วสูงที่สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร (สนข.) ศึกษาไปแล้วและอยู่ระหว่างเสนอขออนุมัติรายงานผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมหรืออีไอเอมาต่อยอด แต่เปลี่ยนจากใช้ระบบรถไฟความเร็วสูงแบบหัวจรวดมาเป็นรถไฟทางคู่ที่ใช้ไฟฟ้ามาวิ่ง เพื่อประหยัดงบประมาณ แต่จะออกแบบให้สามารถรองรับรถไฟความเร็วสูงที่วิ่งด้วยความเร็วเกิน 200 กิโลเมตรได้ในอนาคต

“สนข.จะเริ่มศึกษาเพิ่มเติมในปี 2558 ก่อสร้างได้ปี 2559 แล้วเสร็จปี 2564 จะเชื่อมการค้าจากจีนใต้ ผ่านลาว ไทย มาเลเซีย และสิงคโปร์”

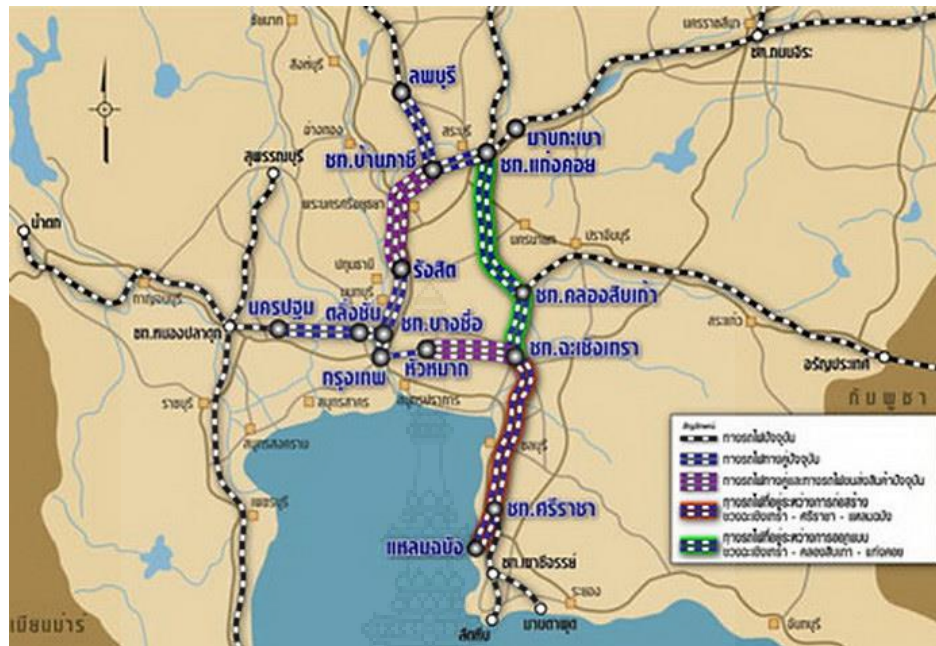


ภาพ 2.1 เส้นทางรถไฟที่ คสช. อนุมัติแล้ว

## 2.2 เส้นทางรถไฟฟ้าทางคู่ ปัจจุบันและอนาคต (ที่อนุมัติแล้ว)

รถไฟทางคู่ใหม่ 8 สาย

- สีดำ : เส้นทางรถไฟเดิมของประเทศไทย ทั้งที่เป็น ทางเดี่ยว ทางคู่ และทางสาม
- สีแดง : เส้นทางรถไฟทางคู่ใหม่ 6 เส้นทาง ที่เป็นระบบ Meter Gauge รากกว้าง 1 ม. รองรับความเร็วประมาณ 90 กม./ชม. (เดิมเป็นทางเดี่ยว อนุมัติให้สร้างเพิ่มอีกบางเส้นทางเป็นทางคู่) แล้วเสร็จ 2563
- สีน้ำเงิน : เส้นทางรถไฟทางคู่ใหม่ 2 เส้นทาง ที่เป็นระบบ Standard Gauge รากกว้าง 1.435 ม. รองรับความเร็วประมาณ 160-250 กม./ชม. โดยรถไฟที่จะนำมาใช้งานจะมีความเร็วประมาณ 160 กม./ชม. ในขั้นแรก ซึ่งต่อไปสามารถเปลี่ยนรถไฟเป็นความเร็วสูงได้ (บางเส้นทางเดิมเป็นทางเดี่ยว บางเส้นทางเป็นทางใหม่ โดยอนุมัติให้สร้างทางคู่ใหม่เพิ่ม) แล้วเสร็จ 2564



ภาพ 2.2 รถไฟทางคู่และทางสามในปัจจุบัน

### 2.2.1 ทางรถไฟทางสามในปัจจุบันได้แก่

- รังสิต-ชุมทางบ้านภาชี- ห้วยหมาก-ชุมทางฉะเชิงเทรา

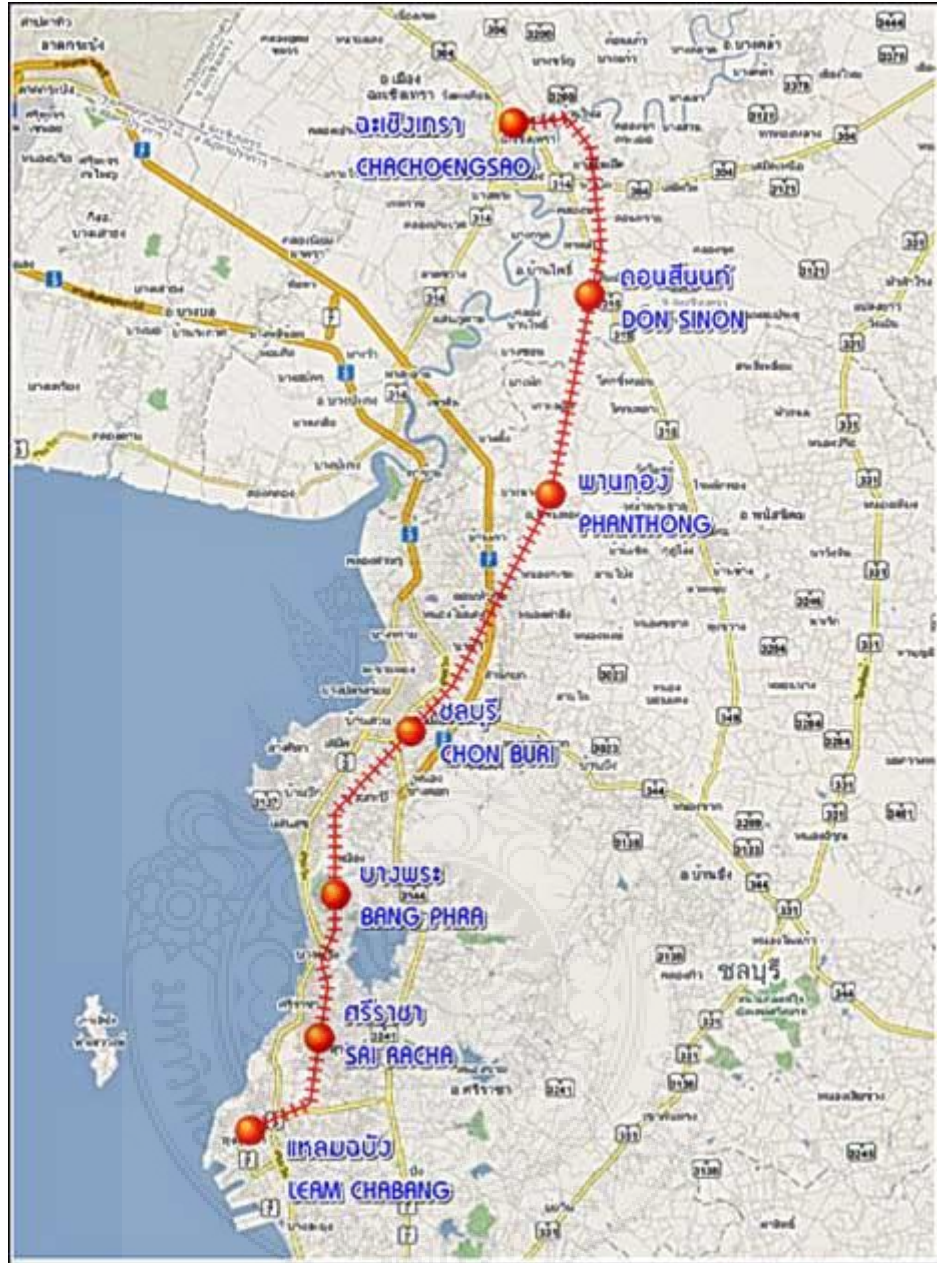
### 2.2.2 ทางรถไฟทางคู่ในปัจจุบันได้แก่

- บางชัน-รังสิต- ชุมทางบ้านภาชี-ลพบุรี- ชุมทางบ้านภาชี-ชุมทางแก่งคอย- ตลิ่งชัน
- นครปฐม- ชุมทางฉะเชิงเทรา-แหลมฉบัง (เพิ่งเปิดให้บริการปี 2555)

### 2.2.3 ทางรถไฟทางคู่ที่ผ่านอีไอเอแล้ว รอประมูลปี 2557

- ชุมทางฉะเชิงเทรา-ชุมทางแก่งคอย

## 2.3 โครงการรถไฟทางคู่ ช่วงฉะเชิงเรอ - ศรีราชา - แหลมฉบัง



ภาพ 2.3 โครงการรถไฟทางคู่ ช่วงฉะเชิงเรอ - ศรีราชา - แหลมฉบัง

### 2.3.1 ข้อมูลเบื้องต้น

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและศักยภาพของการขนส่งทางรถไฟในพื้นที่บริเวณชายฝั่งทะเลตะวันออก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การขนส่งสินค้าบรรจุตู้คอนเทนเนอร์ที่ขนส่งผ่านท่าเรือแหลมฉบังและสถานี ICD ที่ลาดกระบัง

การรถไฟฯ ได้เสนอขออนุมัติดำเนินโครงการก่อสร้างทางคู่ตอนฉะเชิงเทรา -ศรีราชา-แหลมฉบัง ระยะทาง 78 กม. และได้รับความเห็นชอบจากคณะรัฐมนตรีเมื่อวันที่ 20 กรกฎาคม 2547 ให้ดำเนินโครงการดังกล่าวต่อมาได้รับอนุมัติให้ปรับปรุงเงินลงทุนโครงการเป็นวงเงิน 5,850 ล้านบาท เมื่อวันที่ 22 พฤษภาคม 2550 และได้รับการบรรจุไว้ในแผนแม่บทการพัฒนาระบบโลจิสติกส์ของประเทศไทย พ.ศ.2550 – 2554

### 2.3.2 ลักษณะและที่ตั้งโครงการ

ก่อสร้างทางรถไฟใหม่คู่ขนานไปกับทางรถไฟสายชายฝั่งทะเลตะวันออกในปัจจุบัน จากฉะเชิงเทราไปศรีราชาและสุดปลายทางที่สถานีแหลมฉบัง ผ่านสถานีฉะเชิงเทรา ดอนสีนันทน์ พานทองชลบุรี บางพระ ศรีราชา และแหลมฉบัง ในพื้นที่จังหวัดฉะเชิงเทรา และชลบุรี

### 2.3.3 ขอบเขตของงาน

ก่อสร้างทางรถไฟใหม่เพิ่มอีก 1 ทาง คู่ขนานไปกับทางรถไฟปัจจุบันจากสถานีชุมทางฉะเชิงเทรา (กม. 60+993) ไปตามเส้นทางรถไฟสายชายฝั่งทะเลตะวันออกสู่สถานีศรีราชา (กม. 130+605) และสิ้นสุดปลายทางที่สถานีแหลมฉบัง (กม. 140+420) โดยมีการก่อสร้างแผ่นพื้นคสล. วางบนเสาเข็มเพื่อรองรับคันทางดินถมในช่วงที่เป็นดินเหนียวอ่อน (soft clay) จากฉะเชิงเทราถึงสถานีพานทอง ประมาณ 33 กิโลเมตร

- รื้อย้ายระบบอาณัติสัญญาณของทางรถไฟเดิมและติดตั้งระบบอาณัติสัญญาณบังคับสัมพันธ์ด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Based Interlocking :CBI) ทดแทนจำนวน 7 สถานี
- ติดตั้งอุปกรณ์ระบบส่งข้อมูล ความเร็วสูง (SDH) เพื่อเชื่อมต่อระบบโทรคมนาคม
- ปรับปรุงเครื่องกั้นถนนเสมอระดับ จำนวน 59 แห่ง พร้อมระบบควบคุม
- ติดตั้งอุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณ CBI เพื่อเชื่อมต่อกับระบบควบคุมการเดินรถจากศูนย์กลาง (CTC) ให้สามารถควบคุมสั่งการและแสดงผลสถานีให้พื้นที่โครงการ
- ก่อสร้างสะพานรถไฟ ประกอบด้วย สะพานคอนกรีตช่วงยาว 3 แห่ง สะพานเหล็กช่วงยาว 1 แห่ง และสะพานช่วงสั้น 20 แห่ง
- ปรับปรุงโครงสร้างสะพานรถไฟเดิมเพื่อรองรับการขยายถนนของหน่วยงานท้องถิ่น
- ก่อสร้างอาคารบ้านพัก (หลังเดี่ยว) พร้อมทั้งทำการ 3 หลัง บ้านเรือนแถว (6 หน่วย) 3 แห่ง และอาคารที่ทำการบริเวณสถานี 1 แห่ง
- ก่อสร้างรั้วตลอดแนวสองฝั่งของทางคู่เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการขนส่งและโดยสาร
- รื้อย้ายบ้านเรือนที่รูก่อที่ดินของการรถไฟฯ จำนวน 35 หลังไปอยู่ในบริเวณที่จัดเตรียมไว้ให้

### 2.3.4 ปริมาณงานสำคัญ

- งานถมดินคันทาง 730,000 ลูกบาศก์เมตร
- งานชั้นรองพื้นทาง 170,000 ลูกบาศก์เมตร
- สะพานคอนกรีตและสะพาน Viaduct 4,500 เมตร
- สะพานโครงเหล็ก 50 เมตร
- เข็มคอนกรีตหล่อสำเร็จรูป I (0.22 x 0.22 ม.) 1,800,000 เมตร
- เข็มคอนกรีตหล่อสำเร็จ (0.525 x 0.525 ม.) 87,500 เมตร
- เข็มเจาะ ( 0.80 เมตร) 4,000 เมตร สำหรับสะพานข้ามแม่น้ำบางปะกง
- ราง BS 80A (UIC 860) 380 เมตรกีดตัน (ในทางหลัก)
- ราง BS 100A (UIC 860) 8,600 เมตรกีดตัน (ในทางประธาน)
- หมอนคอนกรีตชนิดท่อนเดี่ยว 150,000 ท่อนพร้อมเครื่องยึดเหนี่ยวรางแบบเหล็กสปริง รับแรงบิด (Torsion Type)
  - ประแจ 1 : 12 BS 100A จำนวน 57 ชุด
  - และ 1 : 12 BS 80A จำนวน 7 ชุด พร้อม bearer คอนกรีต
  - หินโรยทาง 180,000 ลูกบาศก์เมตร
  - แผ่นคอนกรีตสำหรับทางผ่านเสมอระดับ ยาวประมาณ 470 เมตร
  - รั้วตาข่ายออบสังกะสี ประมาณ 155,000 เมตร

### 2.3.5 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน

ค่าจ้างที่ปรึกษาจัดการประกวดราคาและควบคุมงานก่อสร้าง 248.118 ล้านบาท  
 ค่าก่อสร้างและติดตั้งระบบอาณัติสัญญาณฯ 3,926.000 ล้านบาทรวมเป็นเงิน 4,174.118 ล้านบาท

### 2.3.6 ระยะเวลาก่อสร้าง

28 เดือน (8 พฤษภาคม 2551 – 7 กันยายน 2553)



## 2.4 เส้นทางรถไฟสายชายฝั่งทะเลตะวันออก ช่วงฉะเชิงเทรา – คลองสิบเก้า – แก่งคอย



ภาพ 2.4 เส้นทางรถไฟสายชายฝั่งทะเลตะวันออก ช่วงฉะเชิงเทรา – คลองสิบเก้า – แก่งคอย

### 2.4.1 ข้อมูลเบื้องต้น

โครงการก่อสร้างทางคู่เส้นนี้ เป็นส่วนหนึ่งของทางคู่ตอนศรีราชา – ฉะเชิงเทรา – คลองสิบเก้า – แก่งคอย ในแผนยุทธศาสตร์การพัฒนาพื้นที่บริเวณชายฝั่งทะเลตะวันออก ระยะที่ 2 เพื่อรองรับการขยายตัวของท่าเรือแหลมฉบัง ขั้นที่ 2 ซึ่งจากผลการออกแบบรายละเอียดและการศึกษาปริมาณความต้องการด้านการขนส่ง เส้นทางดังกล่าวเมื่อปี 2541 และผลการศึกษาทบทวนโครงการเมื่อปี 2544 การรถไฟฯ ได้รับอนุมัติให้ดำเนินโครงการก่อสร้างทางคู่ ตอนฉะเชิงเทรา – ศรีราชา และต่อขยายเข้าสู่แหลมฉบังเป็นลำดับแรก ซึ่งปัจจุบันอยู่ระหว่างดำเนินการก่อสร้าง

### 2.4.2 ลักษณะและที่ตั้งโครงการ

ก่อสร้างทางรถไฟใหม่จำนวน 1 ทาง คู่ขนานไปกับทางเดิม เริ่มจากสถานีฉะเชิงเทรา ไปตามทางรถไฟสายตะวันออกเดิม (สายอรัญประเทศ) ผ่านสถานีบางน้ำเปรี้ยวถึงสถานีคลองสิบเก้า แยกขนานไปกับทางรถไฟสายคลองสิบเก้า – แก่งคอย ผ่านสถานีองครักษ์ วิหารแดง บูใหญ่ สุดปลายทางที่สถานี แก่งคอย ซึ่งผ่านพื้นที่อำเภอเมือง และอำเภอบางน้ำเปรี้ยว จังหวัด ฉะเชิงเทรา พื้นที่อำเภอองครักษ์ และอำเภอบ้านนา จังหวัดนครนายก และพื้นที่อำเภอวิหารแดง อำเภอเมืองและอำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี

### 2.4.3 ขอบเขตของงาน

- ก่อสร้างทางใหม่อีก 1 ทาง เริ่มจากสถานีฉะเชิงเทรา (กม.61+190) ถึงสถานีแก่งคอย (กม.167+800) รวมระยะทางประมาณ 106 กม.

- จัดเตรียมและเวนคืนที่ดินประมาณ 119 ไร่ บริเวณนอกย่านสถานีชุมทางฉะเชิงเทรา ชุมทางบ้านภาชี และชุมทางแก่งคอย เพื่อการก่อสร้างทางคู่เลี้ยงเมือง (Chord Line)

- ก่อสร้างทางคู่เลี้ยงเมือง จำนวน 2 ทาง ในพื้นที่ที่เวนคืนตามข้อที่แล้วบริเวณนอกย่านสถานี เพื่อใช้เป็นทางคู่เลี้ยงเมือง รวม 3 แห่ง ระยะทางประมาณ 7.1 กม. ได้แก่

1) ที่ชุมทางฉะเชิงเทรา ระหว่าง กม.61+190 ถึง กม.62+600 เชื่อมสายคลองสิบเก้า แก่งคอยกับสายฉะเชิงเทรา-สัตหีบ ระยะทาง 1.41 กม

2) ที่ชุมทางบ้านภาชี ระหว่าง กม.92+000 ถึง กม. 93+600 เชื่อมสายเหนือ กับสายตะวันออกเฉียงเหนือ ระยะทาง 1.60 กม.

3) ที่ชุมทางแก่งคอย ระหว่าง กม.163+350 ถึง กม.167+400 เชื่อมสาย ตะวันออกเฉียงเหนือกับสายคลองสิบเก้า-แก่งคอย ระยะทาง 4.05 กม.

- ก่อสร้างอุโมงค์บริเวณเขาพระพุทธราย ขนานไปกับอุโมงค์เดิม กม.147+100 ถึง กม. 148+307 ระยะทางประมาณ 1.2 กม.

- ก่อสร้างสถานีเพิ่มเติม จำนวน 1 สถานี ได้แก่ สถานีไผ่ نابูญ ที่ กม.162+819 ระหว่าง สถานีบูใหญ่และสถานีแก่งคอย เพื่อใช้เป็นสถานีควบคุมระบบอาณัติสัญญาณฯ (Block Post Station) รวมทั้งอาคารประกอบสถานีอื่นๆ ที่มีอยู่เดิมเพื่อความสมบูรณ์

- ติดตั้งระบบอาณัติสัญญาณและโทรคมนาคมสำหรับทางคู่ช่วงฉะเชิงเทรา – คลองสิบเก้า – แก่งคอย และ ทางคู่เลี้ยงเมือง

### 2.4.4 วงเงินลงทุนโครงการ

จากการศึกษาทบทวนโครงการล่าสุด มีประมาณการค่าก่อสร้าง ประกอบด้วย 128.82 ล้านบาท

ค่าจ้างที่ปรึกษาควบคุมงานก่อสร้าง 414.24 ล้านบาท

ค่าก่อสร้าง / ติดตั้งระบบอาณัติสัญญาณ 10,805.29 ล้านบาท

รวมประมาณราคาค่าก่อสร้าง 11,348.35ล้านบาท

#### 2.4.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ความจุของทางจะเพิ่มขึ้นอย่างน้อย 1 เท่าตัว สามารถเดินทางได้ตรงเวลาโดยไม่ต้องรอหลัก ความเร็วเฉลี่ยของขบวนรถ และความปลอดภัยในการเดินทางเพิ่มมากขึ้น

รองรับการขนส่งสินค้าระหว่างพื้นที่ชายฝั่งทะเลตะวันออกและท่าเรือแหลมฉบัง กับพื้นที่บริเวณภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เช่น น้ำมัน ก๊าซ LPG ปูนซีเมนต์ สินค้าบรรจุตู้คอนเทนเนอร์ เป็นต้น

สนับสนุนให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการขนส่ง (Modal Shift) ไปสู่ระบบรางและสนับสนุน การพัฒนาระบบโลจิสติกส์ของประเทศ

ทำให้ผู้ประกอบการด้านการขนส่งสินค้าหัน มาใช้บริการขนส่งระบบรางมากขึ้น เป็นประโยชน์ ต่อการใช้พลังงานและลดต้นทุนการขนส่งของ ประเทศ

ช่วยแบ่งเบาปริมาณการจราจรบนถนนสายต่างๆ ที่เชื่อมภาคตะวันออกกับภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ลดการใช้น้ำมันสำหรับรถยนต์บรรทุก ลดอุบัติเหตุและลดการสูญเสียต่างๆ บนท้องถนน

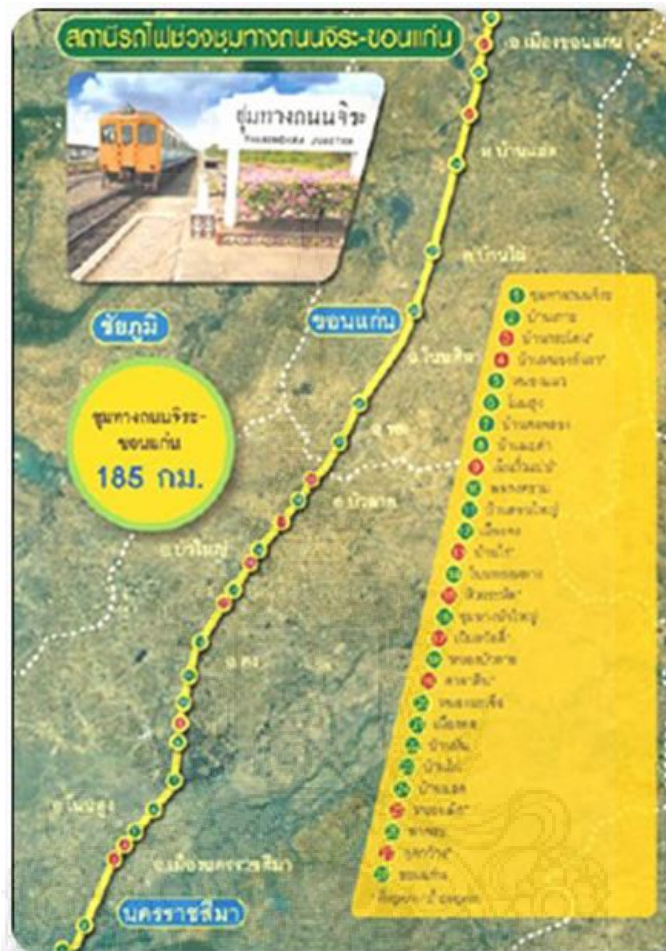
#### 2.4.6 รถไฟทางคู่รวม 8 สายที่อนุมัติโดย คสช.

การพัฒนาโครงข่ายรถไฟระหว่างเมืองจะดำเนินการปรับปรุงระบบอุปกรณ์และโครงสร้างพื้นฐานการขนส่งทางราง และพัฒนาระบบรถไฟทางคู่ที่มีความพร้อมดำเนินการ 6 สายแรก และเร่งผลักดันให้สามารถดำเนินการก่อสร้างทางคู่ขนาดรางมาตรฐาน ( Standard Gauge) เชื่อมโยงกับประเทศเพื่อนบ้าน และสาธารณรัฐประชาชนจีน (จีนตอนใต้) เพื่อให้รถไฟเป็นทางเลือกใหม่ของการเดินทาง และสร้างความได้เปรียบในการแข่งขันของประเทศ

ประโยชน์ที่จะได้รับจากการพัฒนาโครงข่ายรถไฟระหว่างเมือง เช่น

- โครงข่ายรถไฟครอบคลุมขึ้นอีก 6 จังหวัด ทางคู่เพิ่มขึ้นอีก 1,300 กิโลเมตร
- เพิ่มความเร็วในการเดินทาง (รถสินค้าจาก 29 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เป็น 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และรถด่วนพิเศษจาก 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เป็น 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง)
- เพิ่มน้ำหนักลงเพลาทำให้สามารถเพิ่มการขนส่งได้ร้อยละ 25 ต่อขบวน
- สัดส่วนการขนส่งทางรถไฟในประเทศจะเพิ่มขึ้นจากเดิม ร้อยละ 1.5 เป็นร้อยละ 5 ในปี 2563
- ประชาชนเข้าถึงรถไฟได้ง่ายขึ้น การเดินทางและขนส่งด้วยรถไฟตรงเวลา และปลอดภัยมากขึ้น
- โครงข่ายของไทยสามารถเชื่อมโยงกับประเทศเพื่อนบ้านและจีนตอนใต้ได้มากยิ่งขึ้น

## 2.5 โครงการก่อสร้างรถไฟทางคู่ ช่วงชุมทางถนนจิระ – ขอนแก่น



ภาพ 2.5 โครงการก่อสร้างรถไฟทางคู่ ช่วงชุมทางถนนจิระ – ขอนแก่น

### 2.5.1 ลักษณะโครงการ

- เป็นโครงการพัฒนารถไฟทางคู่ใหม่ แนวเส้นทางมีระยะทางโดยประมาณ 185 กิโลเมตร โดยก่อสร้างทางรถไฟใหม่เพิ่ม 1 ทาง ตำแหน่งด้านขวาทาง (ด้านตะวันออก) และขนานไปกับทางรถไฟเดิม เริ่มต้นที่ บริเวณสถานีชุมทางถนนจิระ ถึงสถานีขอนแก่น
- โครงสร้างทางวิ่งรถไฟเป็นทางวิ่งระดับพื้นทั้งหมด ยกเว้นช่วงบริเวณสถานีขอนแก่นจะเป็นทางรถไฟยกระดับ ระยะทางประมาณ 5.4 กิโลเมตร
- ย่านเก็บกองและขนถ่ายตู้สินค้า CY ในโครงการจะมีตำแหน่งของ CY 3 แห่ง ได้แก่ สถานีบ้านกระโดน สถานีบัวใหญ่ และสถานีท่าพระ โดยในส่วนของสถานีบ้านกระโดนจะเป็นตำแหน่งที่ถูกกำหนดให้ก่อสร้างใหม่ ซึ่งย้ายจากจุด CY เดิมจากสถานีบ้านเกาะ เพื่อรองรับการขนส่งที่จะเติบโตในอนาคตและหลีกเลี่ยงพื้นที่ชุมชนเมืองของสถานีบ้านเกาะ
- ระบบรางเป็นทางกว้าง 1.00 เมตร (Meter Gauge) แบบใช้หินโรยทาง (Ballast) ใช้รางชนิด UIC54 และหมอนคอนกรีตแบบ Mono Block

- ติดตั้งระบบอาณัติสัญญาณและโทรคมนาคมสำหรับทางคู่ช่วงชุมทางถนนจิระ -  
ขอนแก่น งบประมาณ 26,152.70 ล้านบาท

### 2.5.2 ประโยชน์

- เพิ่มประสิทธิภาพของการขนส่งทางรถไฟ ลดระยะเวลาการเดินทาง ประหยัดพลังงาน  
เชื้อเพลิงที่ใช้ในการขนส่งของประเทศ และลดปัญหามลพิษที่มีต่อสิ่งแวดล้อม  
- ช่วยให้ประชาชนมีทางเลือกในการเดินทางมากยิ่งขึ้น  
- เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาและกระจายความเจริญสู่ภูมิภาค และท้องถิ่น  
- ประหยัดเวลา และค่าใช้จ่ายในการเดินทาง  
- เชื่อมโยงโครงข่ายการบริหารจัดการขนส่งมวลชน สินค้า และบริการ ทั้งในพื้นที่ชนบท  
เมือง และระหว่างประเทศเข้าด้วยกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 2.5.3 ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจ

FIRR = 5.90 %

EIRR = 24.55 %

### 2.5.4 สถานะปัจจุบัน

ผ่านการพิจารณา EIA แล้ว



## 2.6 โครงการก่อสร้างรถไฟทางคู่ ช่วงนครปฐม – หัวหิน



ภาพ 2.6 โครงการก่อสร้างรถไฟทางคู่ ช่วงนครปฐม – หัวหิน

### 2.6.1 ลักษณะโครงการ

– เป็นโครงการพัฒนารถไฟทางคู่ใหม่ แนวเส้นทางมีระยะทางโดยประมาณ 170 กิโลเมตร โดยก่อสร้างทางรถไฟใหม่เพิ่ม 1 ทาง ขนานไปกับทางรถไฟเดิม เขตทางกว้าง 60 เมตร เส้นทางวิ่งไปตามแนวเส้นทางรถไฟเดิมตลอดสายทาง เริ่มต้นที่ กม.47+700 บริเวณสถานีนครปฐม แนวเส้นทางมุ่งไปทางทิศตะวันตกถึงชุมทางหนองปลาตุ๊ก ระยะทางประมาณ 16.5 กิโลเมตร จากนั้นแนวเส้นทางเลี้ยวซ้ายลงใต้ ผ่านจังหวัดราชบุรี เพชรบุรี สิ้นสุดที่ กม.217+700 เลยสถานีหัวหินไปประมาณ 4 กิโลเมตร

– บริเวณสถานีช่วง กม.211+582.900 ถึง กม.215+872.900 ระยะทาง 4.290 กิโลเมตร เป็นทางวิ่งยกระดับ

– ระบบรางเป็นทางกว้าง 1.00 เมตร (Meter Gauge) แบบใช้หินโรยทาง (Ballast) ใช้รางชนิด UIC54 และหมอนคอนกรีตแบบ Mono Block

– ติดตั้งระบบอาณัติสัญญาณและโทรคมนาคมสำหรับทางคู่ ช่วงนครปฐม-หัวหิน

งบประมาณ 20,145.59 ล้านบาท

## 2.6.2 สถานะปัจจุบัน อยู่ระหว่างการพิจารณา EIA

## 2.6.3 ประโยชน์

- เพิ่มประสิทธิภาพของการขนส่งทางรถไฟ ลดระยะเวลาการเดินทาง ประหยัดพลังงาน เชื้อเพลิงที่ใช้ในการขนส่งของประเทศ และลดปัญหามลพิษที่มีต่อสิ่งแวดล้อม
- ช่วยให้ประชาชนมีทางเลือกในการเดินทางมากยิ่งขึ้น
- เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาและกระจายความเจริญสู่ภูมิภาค และท้องถิ่น
- ประหยัดเวลา และค่าใช้จ่ายในการเดินทาง

## 2.7 โครงการก่อสร้างรถไฟทางคู่ ช่วงประจวบคีรีขันธ์ – ชุมพร



ภาพ 2.7 โครงการก่อสร้างรถไฟทางคู่ ช่วงประจวบคีรีขันธ์ – ชุมพร

### 2.7.1 ลักษณะโครงการ

- ก่อสร้างทางรถไฟความกว้างทาง 1.00 ม.(Meer Gauge) รวมระยะทาง 167 กม.
- สร้างเป็นทางคู่ มีสถานี 21 สถานี (รวมสถานีประจวบฯ และ ชุมพร)
- สร้างที่หยุดรถเพิ่ม 5 จุด และรื้อย้ายอาคารสถานี 14 สถานี
- ครอบคลุมพื้นที่ 2 จังหวัด 6 อำเภอ

### 2.7.2 งบประมาณ

17,452.53 ล้านบาท

### 2.7.3 ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจ

FIRR = 3.21 %

EIRR = 23.53 %

### 2.7.4 สถานะปัจจุบัน

อยู่ระหว่างการพิจารณา EIA

### 2.7.5 ประโยชน์

- ภาคประชาชนในพื้นที่ที่โครงการผ่าน สามารถใช้บริการขนส่งได้สะดวกมากยิ่งขึ้น
- ภาคอุตสาหกรรมในพื้นที่ที่โครงการผ่าน สามารถใช้บริการขนส่งสินค้าได้ ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนทางโลจิสติกส์ของประเทศได้อย่างเป็นระบบ และจะสามารถพัฒนาความสามารถในการแข่งขันของประเทศได้
- ส่งดีต่อระบบเศรษฐกิจและสังคมโดยรวมคุ้มค่ากับต้นทุนของทรัพยากรที่นำมาลงทุน



## 2.8 โครงการก่อสร้างรถไฟทางคู่ ช่วงมาบกะเบา – ชุมทางถนนจิริระ



ภาพ 2.8 โครงการก่อสร้างรถไฟทางคู่ ช่วงมาบกะเบา – ชุมทางถนนจิริระ

### 2.8.1 ลักษณะโครงการ

เป็นโครงการพัฒนารถไฟทางคู่ใหม่ แนวเส้นทางเส้นทางรถไฟทางคู่สายตะวันออกเฉียงเหนือ ช่วงมาบกะเบา-ชุมทางถนนจิริระ มีระยะทางประมาณ 131 กิโลเมตร แบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ

- ช่วงที่ 1 มาบกะเบา-ปางอโศก ระยะทาง 32 กิโลเมตร เริ่มต้นบริเวณสถานีมาบกะเบา จังหวัดสระบุรี กม.134+250 โดยมีโครงสร้างทางรถไฟยกระดับช่วง กม.147+800 ถึง กม.152+650 รวมระยะทาง 4.8 กิโลเมตร และมีอุโมงค์รถไฟ 2 ช่วง ได้แก่ กม.136+250 ถึง กม.141+800 และ กม.144+850 ถึง กม.145+100 รวมระยะทาง 6 กิโลเมตร

- ช่วงที่ 2 จากปางอโศก-ชุมทางถนนจิริระ ระยะทาง 101 กิโลเมตร เริ่มต้นที่สถานีปางอโศก กม.165+199.639 โดยก่อสร้างทางรถไฟเพิ่มอีก 1 ทาง ขนานไปกับแนวทางรถไฟเดิม สิ้นสุดที่สถานีชุมทางถนนจิริระ จังหวัดนครราชสีมา บริเวณ กม.270+000 และจะมีอุโมงค์บริเวณหลังสถานีคลองขานจิตร บริเวณ กม.198+400 ถึง กม.199+550

### 2.8.2 งบประมาณ

29,968.62 ล้านบาท

### 2.8.3 สถานะปัจจุบัน

อยู่ระหว่างการพิจารณา EIA

### 2.8.4 ประโยชน์

- เพิ่มประสิทธิภาพของการขนส่งทางรถไฟ ลดระยะเวลาการเดินทาง ประหยัดพลังงาน เชื้อเพลิงที่ใช้ ในการขนส่งของประเทศ และลดปัญหามลพิษที่มีต่อสิ่งแวดล้อม
- ช่วยให้ประชาชนมีทางเลือกในการเดินทางมากยิ่งขึ้น
- เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาและกระจายความเจริญสู่ภูมิภาค และท้องถิ่น
- ประหยัดเวลา และค่าใช้จ่ายในการเดินทาง

## 2.9 โครงการก่อสร้างรถไฟทางคู่ ช่วงลพบุรี – ปากน้ำโพ



ภาพ 2.9 โครงการก่อสร้างรถไฟทางคู่ ช่วงลพบุรี – ปากน้ำโพ

### 2.9.1 ลักษณะโครงการ

เป็นโครงการพัฒนารถไฟทางคู่ใหม่ เขตทาง 60 เมตร ระยะทางประมาณ 32 กิโลเมตร และการพัฒนาทางรถไฟใหม่เพิ่ม 1 ทาง ขนานไปกับทางรถไฟเดิม (เขตทางกว้าง 80 เมตร) ระยะทางประมาณ 116 กิโลเมตร แบ่งออกเป็น 2 ช่วง

คือช่วงที่ 1 แนวเลี้ยวเมืองลพบุรี ระยะทางประมาณ 32 กิโลเมตร จากสถานีบ้านกล้วย จังหวัดสระบุรี เส้นทางรถไฟมุ่งขึ้นทิศเหนือวิ่งไปตามแนวเส้นทางเดิมประมาณ 4 กิโลเมตร จากนั้น แนวเส้นทางเลี้ยวซ้ายไปทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือ เป็นทางยกระดับ โดยใช้เขตทางของทางหลวงหมายเลข 311 และข้ามทางแยกทางหลวงหมายเลข 311 จากนั้น แนวเส้นทางเลี้ยวขวาไปตามที่ราบทุ่งนา แล้วมุ่งขึ้นทิศเหนือไปบรรจบทางรถไฟเดิม ก่อนถึงสถานีโคกกระเทียม

ช่วงที่ 2 จากสถานีท่าแค-สถานีปากน้ำโพ ระยะทางประมาณ 116 กิโลเมตร เริ่มต้นที่บริเวณสถานีท่าแค เส้นทางมุ่งขึ้นทิศเหนือวิ่งไปตามแนวเส้นทางเดิม สิ้นสุดบริเวณสถานีปากน้ำโพ จังหวัดนครสวรรค์

### 2.9.2 งบประมาณ

24,918.74 ล้านบาท

### 2.9.3 สถานะปัจจุบัน

อยู่ระหว่างการพิจารณา EIA

### 2.9.4 ประโยชน์

- เพิ่มประสิทธิภาพของการขนส่งทางรถไฟ ลดระยะเวลาการเดินทาง ประหยัดพลังงาน เชื้อเพลิงที่ใช้ในการขนส่งของประเทศ และลดปัญหามลพิษที่มีต่อสิ่งแวดล้อม
- ช่วยให้ประชาชนมีทางเลือกในการเดินทางมากยิ่งขึ้น
- เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาและกระจายความเจริญสู่ภูมิภาค และท้องถิ่น
- ประหยัดเวลา และค่าใช้จ่ายในการเดินทาง

## 2.10 แนวคิดทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การพ่วงรถไฟสองคันให้ติดต่อกันนั้นต้องใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าเครื่องพ่วง และนับตั้งแต่ริเริ่มสร้างรถไฟขึ้นมาใช้นั้น เครื่องพ่วงก็ได้ถูกสร้างขึ้นและมีวิวัฒนาการขึ้นมาเป็นลำดับเช่นกัน ด้วยเหตุนี้เครื่องพ่วงจึงมีหลายชนิด และแต่ละชนิดก็มีหลากหลายแบบ สามารถลำดับวิวัฒนาการอย่างคร่าวๆ ได้ดังนี้

### 2.10.1 เครื่องพ่วง

#### 2.10.1.1 ชนิดห้วงและสลักสอด

เครื่องพ่วงแบบนี้อาจมีรูปร่างลักษณะแตกต่างกันได้มากไปตามแบบต่างๆ แต่โดยหลักการแล้ว เหมือนกันทั้งสิ้น คือด้านหนึ่งของรถมีห้วงซึ่งทำด้วยเหล็กโค้งเป็นรูปอักษร U ยื่นออกมา ส่วนที่อีกด้านหนึ่งของรถที่จะพ่วงกันนั้น ทำเป็นเหล็กที่เป็นโพรงไว้ เมื่อนำรถมาพ่วงต่อกัน

เหล็กโค้งรูปอักษร U ของรถคันแรกก็สอดเข้าไปในเหล็กที่เป็นโพรงของคันที่สอง แล้วเจ้าหน้าที่ก็สอดสลักซึ่งทำด้วยเหล็กซึ่งทำด้วยเหล็กท่อนตรงๆ ลงมาขวางไว้ ไม่ให้หลุดออกจากกันได้

ข้อเสียของเครื่องฟ่งชนิดนี้คือ การต่อรถต้องใช้เวลามาก และไม่เป็นการปลอดภัยสำหรับผู้ปฏิบัติงาน เพราะต้องไปยืนขวางอยู่ระหว่างรถ ทำให้การต่อได้ล่าช้า และเวลาปลดก็เช่นเดียวกัน นอกจากนี้เมื่อต่อแล้ว ยังอาจหลุดออกจากกันได้เนื่องจากการสั่นสะเทือนในขณะที่รถทำขบวนไปสลักอาจจะกระดอนหลุดออกมา ซึ่งต่อมาก็ได้มีการปรับแก้ไขข้อบกพร่องนี้โดยการทำส่วนประกอบไปยึดสลักไว้ ไม่ให้กระดอนหลุดได้เช่น แป้นเกลียว เป็นต้น แต่ส่วนประกอบยึดสลักกลับทำให้ใช้เวลาในการต่อและการปลดรถนานขึ้นกว่าเดิม เครื่องฟ่งชนิดห้วงและสลักสอดนี้จึงถูกยกเลิกใช้งาน ยังคงมีเหลืออยู่บ้างในกรณีต่อรถจำนวนน้อย เช่นเพียงแค่สองคัน เป็นต้น เป็นรถเบา ทำขบวนเข้ามา เพื่อให้ง่ายและประหยัดค่าใช้จ่าย

### 2.10.1.2 เครื่องฟ่งชนิดขอเกี่ยวและคาน

เครื่องฟ่งชนิดขอเกี่ยวและคานถูกสร้างขึ้นเพื่อแก้ไขข้อบกพร่องของเครื่องฟ่งชนิดห้วงและสลักสอด โดยออกแบบให้มีลักษณะเป็นขอเกี่ยว โดยเริ่มแรกเครื่องฟ่งประเภทนี้มีลักษณะเป็นขอมมาเกี่ยวกับขออีกอันหนึ่ง เครื่องฟ่งชนิดนี้ได้ถูกเลิกใช้หลังจากที่ได้คิดขึ้นภายในเวลาอันเล็กน้อย เพราะการใช้ขอให้เกี่ยวอยู่กับขออีกอันหนึ่งให้แน่น ไม่เลื่อนหลุดออกจากกันนั้นทำได้ยากมาก ด้วยเหตุนี้จึงได้เปลี่ยนแปลงใหม่ โดยออกแบบให้มีลักษณะเป็นขอเกี่ยวกับส่วนอื่นที่ไม่มีลักษณะเป็นเป็นขอ เช่น เป็นรูปสามเหลี่ยม และต่อมาได้มีการพัฒนาจากรูปสามเหลี่ยมให้เป็นสลักเกลียวซึ่งด้านปลายถูกตีให้แบน และเจาะเป็นรูสี่เหลี่ยมเรียกกันว่า คานต่อ (Link) คานต่อนี้ห้อยอยู่ข้างล่างด้านหลังของขอ รถคันหนึ่งๆ จะมีขอและคานติดอยู่ทั้งสองด้าน เมื่อจะฟ่งรถติดกันก็นำรถมาจกดกัน แล้วยกคานของรถคันหนึ่งไปเกี่ยวกับขอของรถอีกคันหนึ่ง แล้วขันเกลียวให้ขอเกี่ยวแน่นตั้งตัว ส่วนคานของอีกคันหนึ่งไม่ใช่ คงปล่อยไว้เช่นเดิม การที่มีคานที่รถทุกคันก็เพื่อเมื่อเกิดความชำรุดเสียหายจะได้ใช้แทนกันได้ และป้องกันการสึกหรอผิวดัดด้วย

### 2.10.1.3 เครื่องฟ่งแบบ A.B.C.

สำหรับเครื่องฟ่งชนิดที่ 1 และ 2 จะสังเกตได้ว่าการต่อรถและการปลดรถให้แยกออกจากกัน จำเป็นจะต้องมีพนักงานเข้าไปปฏิบัติงานอยู่ระหว่างสองคันเสมอ และบางครั้งในเวลาที่รถกำลังเข้ามาสัมผัสกัน ซึ่งอันตรายอย่างยิ่ง ทั้งนี้ เพราะมีการต้องเกี่ยวขอและการทำให้ขอเกี่ยวกันอย่างตั้งตัวพอสมควร นอกจากการผู้ปฏิบัติงานอาจได้รับอันตรายแล้ว ยังใช้เวลาอีกด้วย อีกทั้งในแต่ละวันต้องมีการสับเปลี่ยนรถเป็นหลายพันคัน การเสียเวลาเพียงคันละ 2-3 นาที จะทำให้เสียเวลาโดยรวมไปหลายชั่วโมง หรืออาจไม่สามารถจัดขบวนรถได้ตามจำนวนที่ต้องการก็เป็นได้

เครื่องฟ่งชนิด A.B.C. นี้ โดยมากที่ด้านหนึ่งของรถทำเป็นขอยื่นออกมา ส่วนที่อีกด้านหนึ่งของรถทำเป็นที่เกี่ยวขอยื่นออกมา รถคันหนึ่งๆ จึงมีเครื่องฟ่งที่ทั้งสองด้านของรถไม่เหมือนกัน เราเรียกด้านที่ทำเป็นขอว่า “ด้านตัวผู้” และด้านที่เป็นที่เกี่ยวขอว่า “ด้านตัวเมีย”

ในการเกี่ยวฟ่งรถให้ติดกันนั้น ต้องนำรถสองคันให้เข้ามาสัมผัสกันโดยแรงพอสมควรเท่านั้น ด้านหน้าของขอจะมากกระทบกับคานเกี่ยวขอ ทำให้ขอยกตัวกระดกขึ้นแล้วก็ตกลงมาเกี่ยวกับคานพอดี ทำให้การสับเปลี่ยนรถเร็วขึ้นมาก พนักงานสับเปลี่ยนฝ้ออันตรายน้อย เพราะไม่ต้องเข้าไปยืนอยู่ระหว่างรถสองคันที่กำลังแล่นเข้ามากระทบกัน ส่วนที่จะทำให้ขอเกี่ยวกันแน่นตั้ง

พอสมควรและการปลดขอ พนักงานสับเปลี่ยนก็ยังคงต้องลอดเข้าไประหว่างรถ จึงทำให้เสียเวลาเล็กน้อย การทำงานของเครื่องฟ่วงชนิด A.B.C. นี้ เรียกได้ว่าเป็นชนิดที่เกือบจะเป็นอัตโนมัติ (Semi – Automatic)

#### 2.10.1.4 เครื่องฟ่วงชนิด M.C.B.

ถึงแม้ว่าวิศวกรชาวอังกฤษจะคิดค้นสร้างเครื่องฟ่วงชนิด A.B.C. ขึ้นเป็นแบบกึ่งอัตโนมัติแล้วก็ตาม แต่การขอพนักงานยังคงต้องเข้าไปปลด ด้วยเหตุนี้ วิศวกรชาวอเมริกันจึงได้ร่วมกันคิดค้นและสร้างเครื่องฟ่วงชนิด M.C.B. ขึ้นเพื่อให้ทำงานได้อย่างอัตโนมัติ โดยหลักการทั่วไปของการออกแบบเครื่องฟ่วงชนิดอัตโนมัติ คือ การสร้างขอให้มาเกี่ยวกันตามแกนสัมผัสที่เป็นแกนตั้ง การปลดขอและการเกี่ยวขอใช้การบังคับโดยพนักงานสับเปลี่ยนตั้งหรือหันคานที่บังคับติดอยู่ข้างรถไม่ต้องฝ่าอันตรายลอดเข้าไประหว่างที่รถกำลังแล่นอยู่

ต่อมาภายหลัง ได้มีการออกแบบพัฒนาอยู่ประมาณ 35 ปี สถาบันการรถไฟแห่งสหรัฐอเมริกา (The Association of American Railroads (A.A.R.) ได้ประกาศใช้มาตรฐานแจ้งรายการละเอียดของข้อจำกัดของเกณฑ์ลักษณะจำเพาะต่างๆ ออกมาใช้เป็นทางการเมื่อปี ค.ศ. 1899 และเรียกเครื่องฟ่วงชนิดนี้ว่าชนิด M.C.B. ซึ่งย่อมาจากบริษัทที่สร้างเครื่องฟ่วงชนิดนี้สำเร็จใช้การได้ผลดีจนได้รับการรับรองขอสถาบันเป็นบริษัทแรก ได้แก่บริษัท The Master Car Builder และต่อมา ตัวอักษรย่อ M.C.B. นี้ก็เป็นชื่อของชนิดเครื่องฟ่วงที่สร้างขึ้นตามหลักการที่กล่าวมาแล้วทั้งหมดไม่ว่าจะถูกสร้างขึ้นโดยบริษัท M.C.B. หรือไม่ก็ตาม

ประโยชน์ของเครื่องฟ่วง ชนิด M.C.B. ที่ไม่ต้องมีพนักงานลอดเข้าไปปฏิบัติงานเลยไม่ว่าจะเป็นเวลาเกี่ยวขอหรือปลดขอก็ตาม เครื่องฟ่วงชนิดนี้ยังเพิ่มแรงต้านทานได้มากกว่าเครื่องฟ่วงแบบเดิมถึง 3 เท่า ทำให้มีกำลังดึงรถในขบวนได้จำนวนมากขึ้น

### 2.11 เครื่องฟ่วงอัตโนมัติที่มีใช้งานอยู่ในการรถไฟมี 4 ประเภท

2.11.1 เครื่องฟ่วงอัตโนมัติแบบแนทมอลล์ (NATMALL-National Malleable and Steel Casting Co., Ltd) หรือแบบอเมริกัน เป็นเครื่องฟ่วงแบบลิ้มตั้ง ใช้แนบจุดลากแบบยาง มีทั้งชนิดปลดขอฟ่วงด้านบนและด้านล่าง



ภาพ 2.10 เครื่องพ่วงอัตโนมัติแบบแนทมอลล์ (ทำปิด)



ภาพ 2.11 เครื่องพ่วงอัตโนมัติแบบแนทมอลล์ (ทำเปิด)

### 2.11.2 เครื่องพ่วงอัตโนมัติแบบญี่ปุ่น มี 2 รุ่น

- รุ่นชิบัตต้า (Shibata Type) เป็นเครื่องพ่วงแบบลิมนอน ใช้แทนขลุกลากแบบแหวน
- รุ่นสุมิโตโม (Sumitomo Type) เป็นเครื่องพ่วงแบบลิ้มตั้ง ใช้แทนขลุกลากแบบยาง ทั้งชนิดปลดขอฟังด้านบน และด้านล่าง



ภาพ 2.12 เครื่องฟ่วงอัตโนมัติแบบญี่ปุ่น

### 2.11.3 เครื่องฟ่วงอัตโนมัติแบบเบลเยียม

เป็นเครื่องฟ่วงแบบใช้ลิ้มตั้ง ใช้แหนบจุดลากแบบยาง มีทั้งชนิดปลดขอฟ่วงด้านบนและปลดขอฟ่วงด้านล่าง



ภาพ 2.13 เครื่องฟ่วงอัตโนมัติแบบเบลเยียม

### 2.11.4 เครื่องฟ่วงอัตโนมัติแบบอินเดีย

ประเทศอินเดียเป็นผู้ผลิต เป็นเครื่องฟ่วงแบบใช้ลิ้มตั้ง และใช้แหนบจุดลากแบบแหนบยาง มีทั้งชนิดปลดขอฟ่วงด้านบนและปลดขอฟ่วงด้านล่าง



ภาพ 2.14 เครื่องฟ่วงอัตโนมัติแบบอินเดีย

#### 2.11.5 เครื่องฟ่วงอัตโนมัติแบบ Controlled slack ติดตั้งทั้งรถโดยสารและรถสินค้า



ภาพ 2.15 เครื่องฟ่วงอัตโนมัติแบบ Controlled slack



### 2.11.6 เครื่องพ่วงอัตโนมัติแบบ Tight Lock เป็นเครื่องพ่วงที่ใช้สำหรับรถดีเซลราง



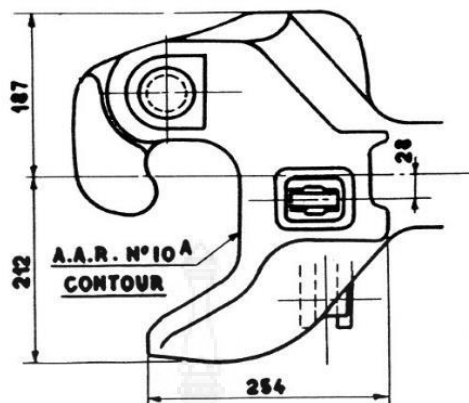
ภาพ 2.16 เครื่องพ่วงอัตโนมัติแบบ Tight Lock (ท่าเปิด)



ภาพ 2.17 เครื่องพ่วงอัตโนมัติแบบ Tight Lock (ท่าปิด)

## 2.12 มาตรฐานของเครื่องพ่วง SRT

- 2.12.1 เส้นโอบรอบปากขอพ่วง AAR-10A Contour
- 2.12.2 ความสูงจากระดับเส้นรางถึงกึ่งกลางปากขอพ่วง 850 mm
- 2.12.3 ระยะจากหน้าอูตถึงแนวพ่วงต่อ 400 mm
- 2.12.4 ระดับความสูงปากขอพ่วงไม่ควรต่างกันเกินกว่า 50 mm



ภาพ 2.18 มาตรฐาน AAR-10A Contour

## 2.13 มาตรฐานและการทดสอบ

2.13.1 Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry ที่สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย

2.13.2 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials ที่สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย

2.13.3 การทดสอบโครงสร้างจุลภาคเป็นการใช้กล้องจุลทรรศน์ (Microscope)

2.13.4 การทดสอบความแข็งใช้วิธีการทดสอบแบบร็อคเวลล์ (Hardness Testing Machine)

2.13.5 Failure Mode and Effect Analysis การวิเคราะห์ความชำรุดด้วยแผนภูมิแกงปลา

## 2.14 มาตรฐานและสติกปากขอพ่วงที่ใช้ในต่างประเทศ

2.14.1 มาตรฐานและสติกปากขอพ่วงที่ใช้ในการรถไฟประเทศอังกฤษ ตามมาตรฐาน UIC

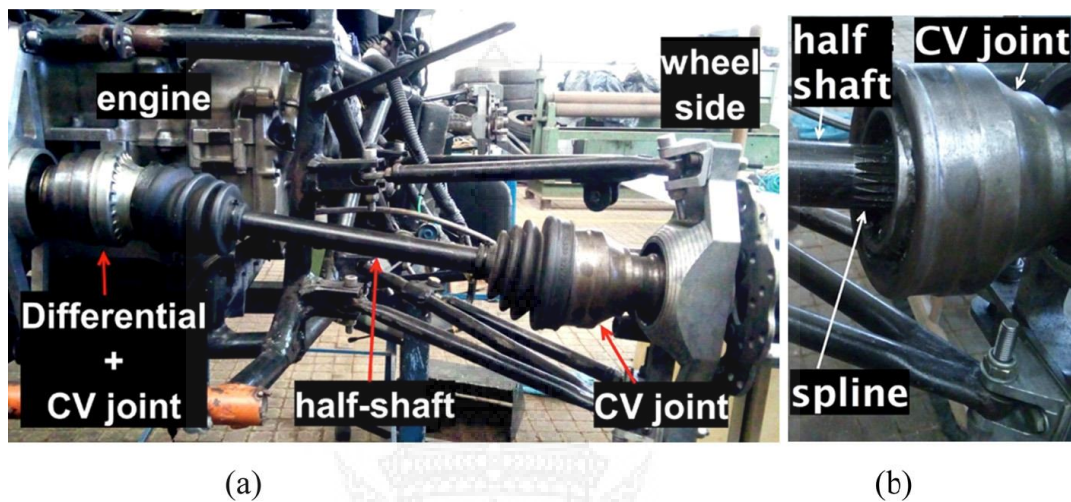
2.14.2 มาตรฐานและสติกปากขอพ่วงที่ใช้ในการรถไฟประเทศสหรัฐอเมริกา

2.14.3 มาตรฐานและสติกปากขอพ่วงที่ใช้ในการรถไฟประเทศญี่ปุ่น

## 2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

A.V. Guimaraes ศึกษาคุณสมบัติของ Half-shaft ซึ่งเป็นส่วนประกอบของรถแข่งสูตรเล็กในการแข่งขันของสมาคมวิศวกรรมยานยนต์ (SAE) ซึ่งเป็นการแข่งขันที่นักเรียนจากทั่วโลกเข้าร่วมแข่งขันการออกแบบ การสร้าง และทดสอบสมรรถนะรถแข่งสูตรเล็กตามข้อกำหนดของสมาคมฯ โดยมีต้นแบบคือ tubular-structure ล้อหลัง และขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ของรถจักรยานยนต์ขนาด 600 ซีซี กำลังที่ผลิตโดยเครื่องยนต์ถูกส่งผ่านไปยังล้อโดย Half-shaft ซึ่งเป็นตัวเชื่อมต่อกับข้อต่อที่แตกต่างกันที่ปลายด้านในและกับล้อที่ปลายด้านนอก ข้อต่อ CV (Constant-velocity joints) ของเพลาล้อหน้าถูกใช้สำหรับปลายทั้งสองข้างของ half-shaft ในการที่จะสร้างมุมที่แน่นอนของการเคลื่อนที่เชิงมุม แรงบิดจะถูกส่งผ่านไปมาและจาก half-shaft โดยร่องฟันบนปลายทั้งสองด้าน ดังนั้นเพลาส่งกำลังได้รับความเค้นจากการโค้งและบิด

ภาพ 2.19 แสดงการประกอบกันของ Half-shaft เข้ากับส่วนประกอบต่างๆ และล้อ และลักษณะที่ปลายด้านนอก และการต่อข้อต่อ CV เข้ากับล้อ เฟลาแบบมีร่องฟันมักส่งต่อโหลดขึ้นๆ ลงๆ หรือการสั่น ความล้าจึงเป็นสาเหตุหลักของการแตกหักโดยเฉพาะอย่างยิ่งความเค้นที่เพิ่มมากขึ้นที่ร่องฟัน แรงกระแทกหรือโหลดในช่วงเปลี่ยนผ่านทำให้เกิดการรับน้ำหนักมากเกินไปจนเกินขนาดและเกิดการแตกหัก



ภาพ 2.19 (a) การเชื่อมต่อของ Half-shaft และข้อต่อ CV กับล้อ และ  
(b) ร่องฟันที่ปลายของเฟลา

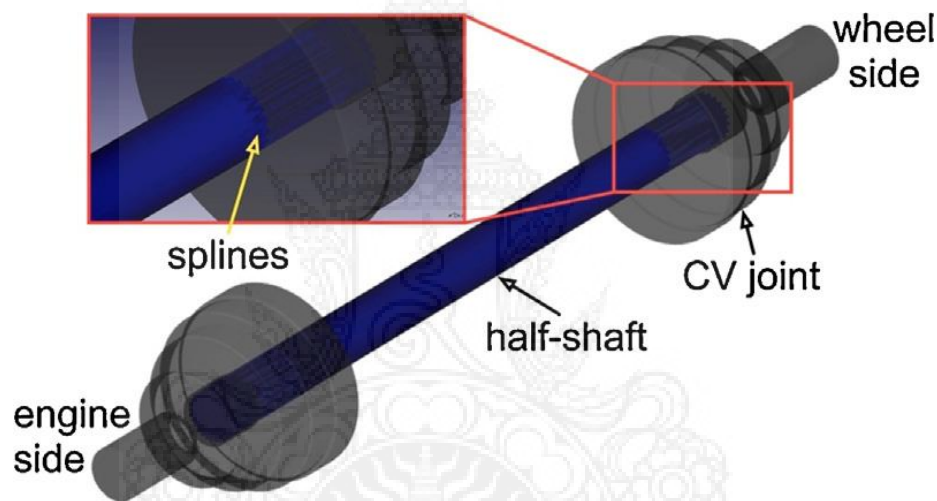
การศึกษาค้นคว้านี้มุ่งศึกษาการแตกหักของ half-shaft โดยการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของโครงสร้างจุลภาคและลักษณะเชิงกล และวิเคราะห์การแตกของผิวหน้า และวิเคราะห์การกระจายความเค้นตาม half-shaft ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element (FE) Analysis) half-shaft แตกในระหว่างการทดสอบที่ระยะทางทดสอบประมาณ 100 กิโลเมตร ในขณะที่ระยะคาดหวังคือ 500 กิโลเมตร การแตกหักเกิดขึ้นเมื่อรถผ่านทางโค้งและเริ่มเข้าทางตรงของแทร็ค ในสถานการณ์แบบนี้จะมีแรงบิดเพิ่มขึ้นเพื่อเพิ่มความเร็วของรถ

วิธีการทดสอบทำโดยรวบรวมลักษณะการแตกหักของ half-shaft เพื่อการวิเคราะห์ด้วยสายตา พื้นผิวที่แตกหักบนส่วนใดส่วนหนึ่งของ half-shaft จะได้รับการป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหาย และนำมาตัดที่ระยะ 10 มิลลิเมตรห่างจากร่องฟัน ส่วนพื้นผิวของ half-shaft ที่ติดอยู่ภายในข้อต่อ CV และเกิดความเสียหายในระหว่างถอดออกจากข้อต่อก็นำมาวิเคราะห์เช่นกัน ก่อนวิเคราะห์ให้ทำความสะอาดตัวอย่างโดยแช่ในแอลกอฮอล์ภายใต้การสั่นสะเทือนด้วยความถี่เหนือเสียง และจุ่มลงในสารละลาย Clarke (Clarke's solution) เพื่อดึงออกซิเดชันออกจากผิวแตกหัก และนำมาขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ด้วยอิเล็กตรอนทุติยภูมิและแรงดันไฟฟ้า 20 kV

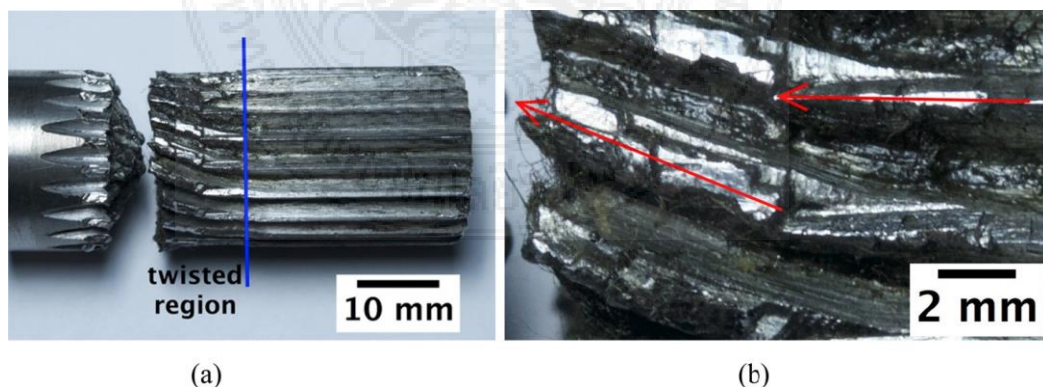
ตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและลักษณะเชิงกล และการวิเคราะห์ทางเคมี จะตัดจากส่วนที่เหลือของ half-shaft การเตรียมโลหะเพื่อศึกษาโครงสร้างของโลหะจากภาพถ่ายทำโดยขัดด้วยกระดาษทราย 1,200 ตาข่าย จากนั้นขัดมันด้วยผงเพชรเหลว 1 มิลลิเมตร และนำมาทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และวิเคราะห์ทางกลโดยการทดสอบความแข็งแรงด้วย

วิธี Rockwell และทดสอบแรงดึง ส่วนการวิเคราะห์ทางเคมีทำโดยใช้เครื่องตรวจวิเคราะห์หาส่วนผสมทางเคมี

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นการวิเคราะห์การกระจายตัวของความเค้นในบริเวณรอบๆ บริเวณที่แตกหักของ half-shaft รูปเรขาคณิตของ half-shaft ข้อต่อ CV และส่วนประกอบถูกสร้างขึ้นโดยใช้ซอฟต์แวร์ FreeCad1 และการวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์โดย Deform-3D1 ตาข่ายถูกสร้างโดย Gmsh โดยใช้องค์ประกอบโครงสร้างปริมาตรฐานสามเหลี่ยมและกับการประมาณเชิงเส้น The mesh at the spline region, where the failure occurred, was refined. Contact and friction stresses were taken into account, as well as the friction coefficient considered lubrication of the contact between the half-shaft and the CV joint. ภาพที่ 2.20 แสดงส่วนประกอบและการเชื่อมต่อกันของ half-shaft กับข้อต่อ CV ที่ล้อ



ภาพ 2.20 ส่วนประกอบและการเชื่อมต่อกันของ half-shaft กับข้อต่อ CV ที่ล้อ



ภาพ 2.21 (a) การแตกของร่องฟันบน half-shaft การแตกหักเป็นปกติกับแกนตามยาวของชิ้นส่วน ภาพการบิดในรูป (b) โดยที่มีลูกศรสีแดงแสดงตำแหน่งส่วนบนของร่องฟันของเส้นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

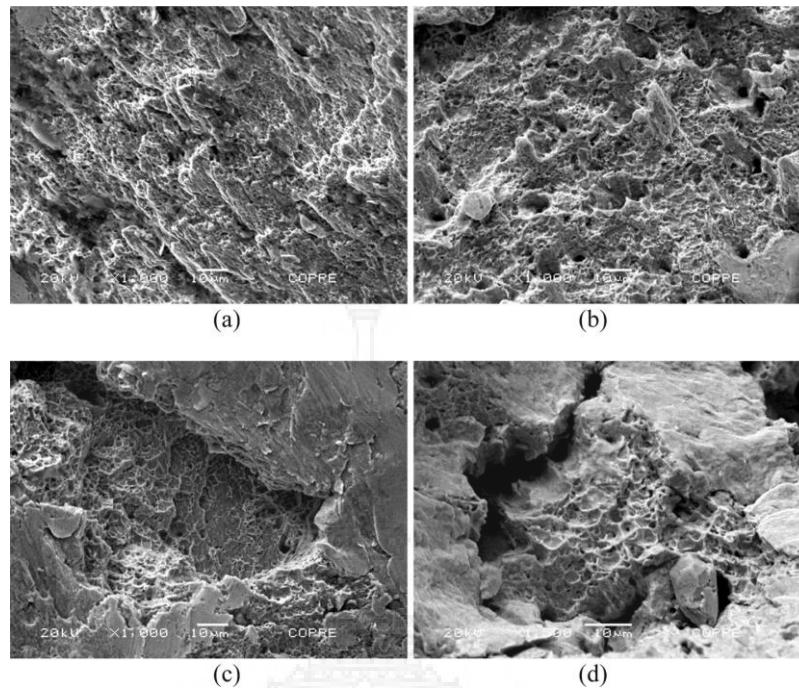
การวิเคราะห์ด้วยสายนตา ภาพ 2.21 a แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงานที่เสียหาย โดยปกติแล้ว ส่วนใหญ่พื้นผิวที่เสียหายเกิดตามแนวแกนยาวของเพลลาซึ่งเป็นศูนย์กลางรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและกรวยข้อสังเกตร่องฟันของ half-shaft ส่วนที่ดึงออกจากข้อต่อ CV เผยให้เห็นการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของร่องฟัน ลักษณะสัญญาณและรูปแบบปกติของการแตกหักที่พื้นผิวของ half-shaft ตามแนวยาวพบใน และมีความสัมพันธ์กับการแตกหักแบบเหนียว นอกจากนี้ในบริเวณที่มีลักษณะบิดเบี้ยวพบสัญญาณ 2 แบบที่แตกต่างกัน ส่วนที่อยู่ติดกับพื้นผิวการแตกหัก ร่องฟันถูกบิดอย่างเต็มที่จากด้านบนลงด้านล่าง ในขณะที่ที่ระยะประมาณ 5 มิลลิเมตรจากส่วนแตกหักจากด้านบนของร่องฟันขนานไปกับแกนตามยาว แต่ส่วนล่างนั้นบิดไปตามส่วนก่อนหน้านั้น ลักษณะสัญญาณแสดงตามภาพ 2.21b มุมบิดอยู่ที่ประมาณ 208 ลักษณะสัญญาณแบบ twisted double อาจสัมพันธ์กับความจริงที่ว่า half-shaft เคลื่อนที่อย่างอิสระตามการเคลื่อนที่ของแกนภายในของข้อต่อ CV

ภาพ 2.22 แสดงให้เห็นภาพตัดตามขวางของพื้นผิวที่แตกหัก พบสัญญาณที่ไม่สม่ำเสมอ ลักษณะทางสัญญาณที่คล้ายคลึงกันนั้นพบโดย Brown และส่วนที่เกี่ยวกับการแตกหักจากความล้า

การวิเคราะห์พื้นผิวหน้าแตกหักตามภาพ 2.22 จะนำมาวิเคราะห์ด้วย SEM แสดงในภาพ 2.23 ซึ่งเป็นภาพถ่ายเฉพาะจุดที่บริเวณที่ใกล้กับขอบ, ที่ระยะหนึ่งในสี่ของรัศมีจากขอบ, ที่ระยะครึ่งรัศมีจากขอบ, และที่จุดศูนย์กลาง The elongated dimples close to the surface ตามภาพ 2.23 ถูกพบโดย Varin

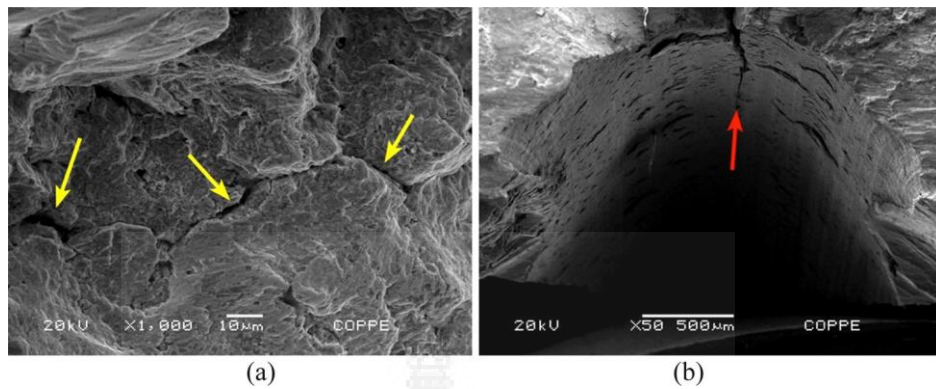


ภาพ 2.22 ภาพตัดขวางของส่วนที่แตกหัก



ภาพ 2.23 (a) โกล้ขอบ, (b) ที่ระยะหนึ่งในสี่ของรัศมีจากขอบ, (c) ที่ระยะครึ่งหนึ่งจากรัศมีจากขอบ, (d) ที่ระยะศูนย์กลาง

นอกจากนี้ยังพบ elongated dimples และรอยแตกทุติยภูมิ ภาพ 2.24 แสดงภาพด้านข้างของรอยฟัน เฝยให้เห็นรอยแตกตามแนวขวางเล็กๆ และรอยแตกขนาดใหญ่ตามยาวจากโคนร่องฟัน สังเกตได้ว่า half-shaft ส่วนที่ใกล้กับรอยแตกหักยืนยันได้ว่าการแตกหักขนาดใหญ่มาจากบริเวณร่องฟัน นอกจากนี้ ยังพบรอยแตกทุติยภูมิ อีกด้วยซึ่งแสดงในภาพ 2.25 In the same figure, it is possible to see that the tips of the spline treads were worn away from the component. Sinha et al. also evidenced cracks emanating from the spline roots, and associated them to a fatigue process due to torsional loading. ลักษณะสัญญาณที่คล้ายกันนี้ได้ถูกตรวจสอบโดย Thielen และ Fine เช่นกัน หลังจากการทดสอบความล้าในตัวอย่างเหล็กด้วย AISI/SAE 4140



ภาพ 2.24 (a) รอยแตกทุติยภูมิ บริเวณที่ใกล้กับขอบ (ลูกศรสีเหลือง), (b) บริเวณรอยฟันกับการแตกร้าตามแนวขวางและการแตกหักตามยาวที่โคนร่องฟัน (ลูกศรสีแดง)



(a)



(b)

ภาพ 2.25 ภาพด้านขวางของ half-shaft ส่วนที่ใกล้กับพื้นผิวที่แตก (a) รอยแตกขนาดใหญ่จากโคนร่องฟันและการสึกหรอของร่องฟัน (ลูกศรสีเหลือง), (b) รอยแตกทุติยภูมิ (ลูกศรสีแดง)

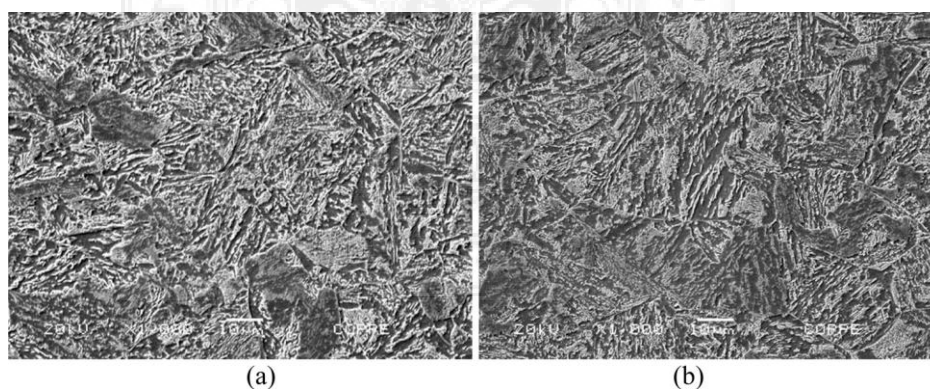
การวิเคราะห์ทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคของ half-shaft แสดงได้ดังตาราง 2.1 อัลลอยด์ถูกจำแนกด้วย AISI/SAE 4140 steel อย่างไรก็ตาม ข้อกำหนดของโครงการและความแข็งที่ต้องการคือเทียบเท่าเหล็กกล้า 4340 และทำให้เย็นลงในสภาวะที่กำหนด

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของส่วนตัดขวางของ half-shaft ด้วย SEM พบโครงสร้างจุลภาค Bainitic No evidence of surface treatment of the spline threads was observed. ภาพ 2.26 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างของวัสดุในระดับจุลภาคของ half-shaft

ตาราง 2.1 chemical composition of the material

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb	Cu	Al	Fe
This work	0.410	0.238	0.810	0.038	0.022	0.950	0.051	0.128	0.020	0.011	0.018	Bal.
AISI/SAE 4140 [11]	0.38	0.15	0.75	0.035	0.040	0.80	-	0.15	-	-	-	Bal.
	0.43	0.35	1.00	max.	max.	1.10		0.25				

คุณสมบัติทางกลถูกวัดด้วยวิธีการทดสอบความแข็งด้วยวิธี Rockwell และการทดสอบแรงดึง จุดวัดความแข็งอยู่ที่ส่วนขวางของแถบที่บริเวณใกล้กับขอบและที่ตรงกลาง ตารางที่ 2.2 แสดงค่าความแข็งของ Rockwell เมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและความแข็งผ่านส่วนขวาง เพื่อให้ข้อมูลที่แม่นยำมากขึ้นสำหรับการวิเคราะห์ที่ไฟไนต์เอลิเมนต์ การทดสอบแรงดึงจะใช้ทดสอบชิ้นงานทดสอบจากบริเวณศูนย์กลางของแถบ ตามมาตรฐาน ASTM E8 ข้อจำกัดที่สำคัญคือวัสดุที่ใช้ทดสอบแรงดึงมีเพียงชิ้นเดียวที่ได้รับการประเมินด้วยอัตราความเครียดทางวิศวกรรมเท่ากับ  $4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  ตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติเชิงกลจากการทดสอบแรงดึงและเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของเหล็กกล้า AISI/SAE 4340 และทำให้เย็นภายใต้สภาวะที่กำหนด (austenitized ที่  $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 30 min และทำให้เย็นลงในน้ำมันที่มีอุณหภูมิ  $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง)



ภาพ 2.26 โครงสร้างจุลภาคของ half-shaft (a) ใกล้กับพื้นผิว; (b) ที่ตำแหน่งกึ่งกลาง ทั้งสองลักษณะเป็นโครงสร้างจุลภาคแบบ Bainitic



จากการสังเกตโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกลที่วัดได้พบว่า half-shaft อยู่ในสภาวะปกติ ในขณะที่สภาวะที่กำหนดคือต้องการ quenched and tempered microstructure เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ต้องการ It is important to remark, as described in the previous section, that not only the microstructure was different from the necessary, as the alloy composition itself. The AISI/SAE 4340 steel presents higher strength and hardenability than the AISI/SAE 4140 steel.

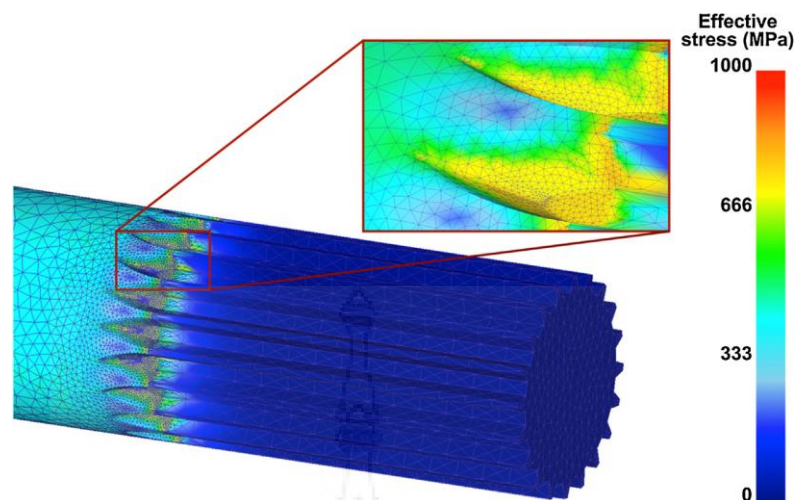
**ตาราง 2.2** Rockwell C (HRC) hardness measurements on the transverse section of The half-shaft

Position	HRC
Center	36.9 ± 0.1
Edge	37.7 ± 0.3

**ตาราง 2.3** Mechanical properties from tensile test

Property	Specimen from the half-shaft	AISI/SAE 4340, quenched and tempered [15]
Yield strength	665 MPa	1110 MPa
Ultimate tensile strength	916 MPa	1294 MPa
Elongation	12.8%	14%
Reduction of area	52.6%	50%

การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้ทดสอบกับ half-shaft บริเวณที่ต่อกับข้อต่อ CV ดังแสดงในภาพ 2.27 ว่าความเข้มข้นของความเค้นสูงอยู่บริเวณ spline filet ซึ่งสอดคล้องกับพื้นที่แตกหักที่สังเกตได้จากภาพที่ 2.21 (a) และผลงานของ Leen et al. เมื่อเทียบค่าความเค้นที่คำนวณกับความแข็งแรงของเหล็กกล้าตาม AISI/SAE 4140 ที่บริเวณ spline filet ความแข็งแรงของ half-shaft (665 MPa) ซึ่งมากกว่าค่าแรงประสิทธิภาพซึ่งสัมพันธ์กับแรงบิด 590 นิวตันเมตร (65% of the 950 Nm design requirement) และมีความเค้นสูงสุดที่ร่องฟันซึ่งต่อกับข้อต่อ CV. The value achieved was higher than the yield strength (665 MPa) ผลการทดสอบนี้ยืนยันได้จากการสีกหอบบน the face of the spline teeth ดังภาพ 2.25 (a) และการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกตามภาพ 2.21 (a) และ (b)



ภาพ 2.27 แรงประสิทธิผลบนพื้นผิวของ half-shaft Stresses higher than the yield strength of the alloy were observed at the fillet region of the spline (in detail)

การศึกษาของ A.V. Guimaraes สรุปได้ว่า

- The use of a AISI/SAE 4140 steel instead of the specified AISI/SAE 4340 steel had a decisive influence on the premature failure of the component, as the lower hardenability and strength resulted in a microstructure with insufficient mechanical properties for the requisites of the half-shaft.

- การแตกหักของของ half-shaft เกิดจากผลรวมของความล้าจากการบิดและรับแรงเกินกำลัง โดยรอยแตกเริ่มเกิดจากโคนของข้อต่อ CV ซึ่ง reduced the loading capacity of the component การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกที่เกิดจากการรับแรงเกินกำลังเกิดขึ้นจากหลายเหตุการณ์ โดยมีรอยบิดและรอยแตกที่ผิว

- The finite element analysis has shown that the higher stresses were observed at the fillet at the spline region, especially at the face of the spline teeth, corroborated by the wear observed in these regions.

WenJing Chen ศึกษาสมบัติของเหล็ก EA4T ซึ่งถูกใช้มาทำเพลารถไฟซึ่งเป็นโครงสร้างที่สำคัญที่สุดโครงสร้างหนึ่งของระบบรถไฟซึ่งได้ถูกนำมาใช้รับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบไดนามิกและรับน้ำหนักทั้งหมดของรถ ดังนั้น จึงต้องทนต่อลักษณะโหดที่หลากหลาย ทั้งแรงตามแนวแกน แรงตามแนวรัศมี แรงเฉือน แรงดัด และแรงบิด ดังนั้น ความแตกหักหลักของเพล่าในระหว่างใช้งานคือความล้าจากความล้าโดยการดัดหมุนของแกนเพล่า และความเสียหายจาก fretting fatigue ที่พื้นผิวของแรงกดที่เพล่า ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดอายุการใช้งานของเพล่า การออกแบบเพล่าและข้อต่อที่รับแรงกดได้อย่างเหมาะสมรวมถึงขนาดที่เหมาะสม การคัดเลือกวัสดุ และการดูแลรักษาพื้นผิว มีผลต่อการปรับปรุงความปลอดภัยและการขนส่งที่สะดวกสบาย เพล่าจะถูกทดสอบโดยการตรวจอัลตราโซนิกและการตรวจอนุภาคแม่เหล็ก มีการใช้การอบชุบโดยการให้ความร้อนผิวชิ้นงานอย่างรวดเร็วเพื่อ

ปรับปรุงความเค้นตกค้างและการกระจายความแข็ง วิธีการทั้งหมดข้างต้นมุ่งที่จะเพิ่มอายุการใช้งานของเพลารถไฟ วิธีการเชื่อมแซมหลักที่ใช้คือการเชื่อมทิก (Tungsten Inert Gas Welding (TIG) อย่างไรก็ตามค่าใช้จ่ายในการเชื่อมแซมค่อนข้างสูง ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา ได้มีวิธีการเชื่อมแซมแบบใหม่เรียกว่าการเชื่อมซ่อมงานด้วยเลเซอร์ โดยใช้ชิ้นส่วนที่เสียหายและเก่าเป็นเมทริกซ์สำหรับการผลิตใหม่และให้ความร้อนผงอัลลอยด์ด้วยเลเซอร์เพื่อเชื่อมแซมอุปกรณ์ ผงโลหะผสมมีคุณสมบัติเชิงกลสูงมีผลกระทบต่อเมทริกซ์และมีสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยมต่อชั้นเคลือบ เช่นความต้านทานความร้อน ความทนต่อการกัดกร่อน ความต้านทานการสึกหรอ และความทนต่อความล้า L. Sexton พบว่าการเชื่อมซ่อมวัสดุการบินด้วยเลเซอร์ให้ผลดีกว่าการเชื่อมแซมโลหะผสมนิกเกิลด้วยการเชื่อมแบบทิก งานวิจัยของ Jian Zhang พบว่าการเชื่อมซ่อมงานด้วยเลเซอร์ที่เคลือบด้วย Ni60A จะทำให้เกิดค่าความเสียหายที่สูงขึ้นและมีอัตราการสึกหรอที่ต่ำกว่าพื้นผิวเหล็ก 45 ที่อยู่ในสภาพการไหลเดียวกัน J.Sampedroa et al. investigated the TiGr2 and Ti6Al4V surfaces, which deposited defect free coatings of Ti6Al4V and the mixture Ti6Al4V + TiC using laser cladding process. ผลการทดลองพบว่าชิ้นงาน Ti6Al4V มีผิวหน้าที่แข็งแรงขึ้น มีความต้านทานการสึกหรอมากขึ้น รวมทั้งมีค่าสัมประสิทธิ์การเสียดสีมากขึ้นด้วย จากปัจจัยข้างต้น จึงสามารถบอกได้ว่า การเชื่อมซ่อมงานด้วยเลเซอร์เป็นเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมแซมชิ้นส่วนอุตสาหกรรม รวมถึงการปรับปรุงคุณภาพเชิงกล

เหล็ก EA4T เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนและอัลลอยด์ต่ำ เนื่องจากความสมดุลของความแข็งแรง ความเหนียว และความต้านทานต่อการสึกหรอในสภาพแวดล้อมการทำงานสุดขีด เหล็ก EA4T จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นเพลากลางของรถไฟความเร็วสูง (the high-speed train hollow shaft) งานวิจัยนี้ได้ปรับการเชื่อมซ่อมงานด้วยเลเซอร์ไปสู่การใช้ในการผลิตเพลากล็ก EA4T และศึกษาโครงสร้างจุลภาค การขยายตัวของรอยร้าวของเหล็ก EA4T หลังจากเชื่อมด้วยเลเซอร์

เหล็กกล้า EA4T ซึ่งทำเพลาไฟอย่างแพร่หลายและใช้เป็นวัสดุพื้นฐานสำหรับการเชื่อมด้วยเลเซอร์ มันจะถูกกลดและควบคุมอุณหภูมิก่อนจะนำมาเชื่อมด้วยเลเซอร์ โครงสร้างจุลภาคหลักๆ ประกอบด้วย tartensite และ bainite

ผงโลหะ kf311 ใช้สำหรับเป็นโลหะเชื่อมขนาด 45-150  $\mu\text{m}$  และมันมีรูปร่างทรงกลมขนาดสม่ำเสมอ เพื่อที่จะกำจัดไอน้ำและก๊าซดูดซับอื่นๆ วัสดุเชื่อมจึงต้องทำให้แห้งในกล่องสุญญากาศที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 40 นาที

ก่อนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ต้องขัดคราบน้ำมัน สนิมออกก่อน หลังจากนั้นทำความสะอาดด้วยอะซิโตนและแอลกอฮอล์ เครื่องเลเซอร์เซมิคอนดักเตอร์ DISTA-3000, หุ่นยนต์ KUKA KR-30 และระบบป้อน FHPH-20 จะนำมาใช้สำหรับการเชื่อมด้วยเลเซอร์ หลังจากเชื่อมซ่อมด้วยแสงเลเซอร์ ชิ้นงานจะถูกอบที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และทำให้เย็นลงในเตาเผา

ชิ้นทดสอบถูกตัดเป็นชิ้นส่วนขนาด 110 x 16 x 8 มิลลิเมตร และตัดสามจุด เพื่อทดสอบอัตราการขยายตัวของรอยร้าวของเหล็ก EA4T ก่อนและหลังการเชื่อมด้วยเลเซอร์ The crack tip notch was processed by line cuffing. ตัวอย่างมาตรฐาน SE (B) ถูกนำมาใช้ในการทดสอบการขยายตัวของรอยร้าวแตก โดยทดสอบโดยใช้เครื่อง WD-E precision micro control electronic universal testing machine ตามมาตรฐาน China National Standard “Standard Test Method

for Fatigue Crack Growth Rates of Metallic Materials” (Standard No. GB/T 6398-2000). Peripheral area of preset crack on sample surfaces จะถูกขัดมันก่อนที่จะทดสอบ เพื่อให้สังเกตเห็นรอยแตกได้อย่างชัดเจน

The size of plastic zone at crack tip is difference due to mechanical process crack length and so on. It leads to great deviation of experimental results. In order to ensure the same size of plastic zone at crack tip, the fatigue crack was preset on fatigue testing machine. The fatigue crack with 2.5mm length was preset at stress ratio  $R=0.1$ , applied load  $F=4.8\text{KN}$  and frequency  $f=10\text{HZ}$ .

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Olympus GX-51) ถูกนำมาใช้ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมด้วยเลเซอร์ พื้นที่ที่ได้รับความร้อน และโลหะพื้นฐาน ขัดเงาชิ้นงานและแช่ใน  $5\text{mlHNO}_3 + 15\text{mlHCL}$  และ 4% nital และใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด S3400N (SEM) ตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของรอยร้าว และวิเคราะห์โครงสร้างเฟสของการเชื่อมด้วยเลเซอร์ด้วยรังสีเอ็กซ์เรย์ (XRD: D2500) กับรังสี Cu-K $\alpha$  และ  $0.03^\circ/\text{S}$  ความแข็งของเหล็กกล้า EA4T หลังจากเชื่อมด้วยเลเซอร์ทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบความแข็ง HVS-1000 Vickers ด้วยแรง 1.96N เป็นเวลา 20วินาที

ภาพตัดขวางของภาพระดับจุลภาคของ EA4T ที่พื้นผิวด้านบนตรงกลาง และด้านล่างของชั้นที่เชื่อมบ่งชี้ถึงการให้ความร้อนที่เพียงพอและ powder ถูกหลอมละลายอย่างสมบูรณ์ แถบสว่างสีขาวที่มีความกว้าง  $9\ \mu\text{m}$  อยู่ในช่วง interface หมายความว่า การเชื่อมโลหะเกิดขึ้นระหว่างชั้นเชื่อมและ substrate โครงสร้างจุลภาคของโซนพันธะประกอบด้วยคริสตัลแบบระนาบ, คริสตัลแบบคอลัมน์ และ dendrite ที่ด้านล่างและตรงกลางของชั้นเชื่อม the dendrite develops directionally ในขณะที่มีการขยายความเสียหายเข้าไปในพื้นที่ที่ซ้อนกัน ในระหว่างกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ อุณหภูมิลดลงและระยะห่างจาก laser melted zone จะเพิ่มขึ้น อัตราการตกผลึกเพิ่มขึ้น และ constitutional super-cooling จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากผลึกไปเป็น dendrite เพื่อทดสอบการกระจายเฟสของชั้นเชื่อมเชื่อมด้วยเลเซอร์ ความหนาของชั้นมีค่า 1.5 มิลลิเมตร ชั้นเชื่อมถูกแบ่งออกเท่าๆ กัน เป็น 5 ชั้น สำหรับการทดสอบ XRD รูปแบบการวิเคราะห์แบบ XRD จะวิเคราะห์ชั้นเชื่อมที่ระยะ  $20\ \mu\text{m}$  ห่างจากด้านบนไปยัง substrate ดังแสดงในรูป 5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชั้นเชื่อมด้วยเลเซอร์ประกอบด้วย austenite และ Fe<sub>2</sub>B phases โดย 2-theta และความเข้มของเฟสมีความคล้ายคลึงกันในแต่ละที่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า austenite และ Fe<sub>2</sub>B มีการกระจายตัวสม่ำเสมอ

การทดสอบความแข็ง (microhardness test) ทำกับพื้นที่ 3 พื้นที่ คือ cladding layer, transition zone และ substrate ค่าความแข็งของตัวอย่างหลังจากเชื่อมด้วยเลเซอร์แล้วมีความไม่สม่ำเสมอ ความแข็งของชั้นเชื่อมสูงกว่าพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนและ substrate. The uneven distribution of solute atoms by non-equilibrium solidification during the laser cladding process and short-range internal stress by elastic modulus difference between solute atoms lead to elastic stress at cladding layers. Solute atoms hinder the movement of boundaries and dislocation. นอกจากนี้ การหลอมและการตกผลึกซ้ำของผงอัล

ลดยด์ทำให้มีขนาดเล็กกว่าและเกิดการตกตะกอนของเฟส Fe<sub>2</sub>B ดังนั้นความแข็งของชั้นเชื่อมจะเพิ่มขึ้นเป็น 360-380HV ในขณะที่ค่าความแข็งเฉลี่ยของ substrate เท่ากับ 260HV อย่างไรก็ตาม โครงสร้างจุลภาคที่ได้รับความร้อนสูงจะเกิดจาก thermal cycling ในระหว่างการเชื่อมด้วยเลเซอร์ ระหว่าง bone zone และ บริเวณที่ได้รับความร้อน ซึ่งจะส่งผลต่อความผันผวนของค่าความแข็งระหว่าง 275HV ถึง 360HV

ความสัมพันธ์ระหว่าง stress intensity factor range และ fatigue crack growth rate (da/dN VS.  $\Delta K$ ) ใช้สำหรับทดสอบพฤติกรรมการแตก ซึ่งสามารถแยกออกเป็น 2 ชั้น โดยในชั้นแรก ความยาวของการร้าวค่อยๆ เพิ่มขึ้น และ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในชั้นที่ 2 stress intensity factor range จะมีค่าน้อยในระยะแรกของการขยายรอยร้าว parameter LgC มีบทบาทสำคัญในการขยายรอยร้าว parameter LgC ของเหล็ก EA4T หลังจากการเชื่อมด้วยเลเซอร์จะมีค่ามากที่สุด ในขณะที่ EA4T มีค่าน้อยที่สุด ดังนั้น อัตราการขยายของรอยแตก EA4T หลังจากการเชื่อมด้วยเลเซอร์จึงเป็นไปอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม ชั้นท้ายๆ ของการขยายรอยแตก stress intensity factor range จะเพิ่มขึ้นพร้อมๆ กับรอยแตกที่ใหญ่ขึ้น The slope of double logarithmic coordinate (namely parameter n) affects the crack growth rate. At the final stage of crack growth, the slope, namely, parameter n of EA4T steel is maximum. So the crack growth rate is fastest.

da/dN- $\Delta K$  curve ของเหล็ก EA4T แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกของการขยายรอยแตก, ส่วนที่มีการขยายตัวอย่างคงที่แล้ว, และส่วนที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ da/dN- $\Delta K$  curve ของเหล็ก EA4T หลังจากการเชื่อมด้วยเลเซอร์ประกอบด้วยส่วนที่ขยายตัวอย่างช้าๆ เป็นหลัก และมีส่วนที่ขยายตัวอย่างคงที่ ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยเลเซอร์จะแตกเมื่อทดสอบด้วยเครื่อง universal test machine threshold stress intensity factor range ( $\Delta K_{th}$ ) ของเหล็ก EA4T มีค่าประมาณ 20.5 MPa.m<sup>1/2</sup> ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าของเหล็กที่ผ่านการเชื่อมด้วยเลเซอร์ที่มีค่าเท่ากับ 23MPa.m<sup>1/2</sup> เล็กน้อย ในช่วงเริ่มต้นของการขยายรอยแตก ความต้านทานการขยายการแตกขึ้นอยู่กับค่าของ  $\Delta K_{th}$  The higher the value of  $\Delta K_{th}$  is, the lower the fatigue crack growth rate is. อย่างไรก็ตาม การต้านทานการขยายตัวการแตกหักขึ้นอยู่กับ the effective fracture strength ของวัสดุ Due to the higher microhardness, higher cooling speed during laser cladding and fine dendrite at cladding layers, the fracture strength and the resistance of fatigue crack propagation of EA4T steel after laser cladding increase. ดังนั้น อัตราการขยายตัวของการแตกของเหล็ก EA4T หลังจากการเชื่อมด้วยเลเซอร์จึงมีค่าต่ำกว่าเหล็ก EA4T ในสถานะเดียวกัน The whole curves show that the fatigue crack growth rate da/dN of EA4T steel is higher than that of EA4T steel with cladding layers when  $\Delta K$  value is the same, which indicates that the fatigue life of EA4T steel is improved by laser cladding.

การร้าวแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ pre-crack zone, crack initiation zone, crack propagation zone, และ forced break zone. ส่วน crack initiation สามารถสังเกตได้จากทิศทางการขยายตัวของรอยแตก ลายเส้นการแตกของ crack initiation จะไม่เป็นเส้นตรง The crack

initiation is delayed by the cladding layers. เนื่องจากความร้อนที่ใส่เข้าไปและความเร็วในการเย็นตัวลงที่สูงในระหว่างการเชื่อมด้วยเลเซอร์ ทำให้ grain size of cladding layers มีลักษณะละเอียด ซึ่งจะเป็นการเพิ่มการ ductility in cladding layers ดังนั้นอัตราการขยายของรอยแตกของเหล็ก EA4T ที่เชื่อมด้วยเลเซอร์มีค่าต่ำกว่าเหล็ก EA4T. During the fatigue crack propagation, the fatigue fracture presents typical quasi-cleavage crack and rock candy cleavage fractures at lower  $\Delta K$  value. With the increase of  $\Delta K$  value, some fatigue stripes can be observed in the second stage of crack growth. The fatigue fracture of EA4T steel after laser cladding changes to mixed fracture with quasi-cleavage crack due to the austenite structure of cladding laser.

การศึกษาของ WenJing Chen ซึ่งศึกษาโครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรมการแตกหักของเหล็ก EA4T หลังจากการเชื่อมด้วยเลเซอร์ โดยผลการศึกษารูปได้ดังนี้

(1) เนื่องจากมีการป้องกันความร้อนอย่างเพียงพอและทำให้เกิดการหลอมละลายอย่างสมบูรณ์ ทำให้พันธะระหว่างชั้นที่เชื่อมด้วยเลเซอร์และเหล็ก EA4T was metallurgical. โครงสร้างจุลภาคของชั้นเชื่อมประกอบด้วยคอลลิมน์, คริสตัล, และ fine dendrites. Austenite และเฟส Fe2B กระจายในชั้นเชื่อมอย่างสม่ำเสมอ

(2) smaller grain size และตะกอนของเฟส Fe2B เกิดจากการหลอมและการตกผลึกซ้ำของผงอัลลอยด์ ซึ่งทำให้เกิดค่าความแข็งสูงสุดของชั้นเชื่อม

(3) ความสัมพันธ์ระหว่าง stress intensity factor range และอัตราการขยายตัวของรอยแตก (da/dN VS.  $\Delta K$ ) แสดงให้เห็นอัตราการขยายตัวของรอยร้าว da/dN ของเหล็ก EA4T ว่าสูงกว่าเหล็ก EA4T with cladding layers, which indicated that the fatigue life of EA4T steel was improved by laser cladding at lower loading stress.

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เริ่มต้นจากปัญหาในการทำงานที่สลักปากขอพวงไม่สามารถใช้งานได้เต็มประสิทธิภาพ จากข้อสังเกตว่ามีอายุการใช้งานเพียงครั้งเดียวเท่านั้น ทำให้การรถไฟแห่งประเทศไทย สิ้นเปลืองงบประมาณในการบำรุงรักษา และซื้อสลักใหม่ทดแทน ก่อนเวลาอันสมควร การวิจัยนี้จึงทดสอบและนำผลการทดสอบไปเปรียบเทียบกับมาตรฐาน A.A.R. และมาตรฐาน ASTM และนำไปวิเคราะห์และประเมินคุณภาพของสลักปากขอพวงรุ่น Nat Mall สำหรับรถสินค้าในการรถไฟแห่งประเทศไทย และปรับปรุงคุณภาพให้เป็นไปตามมาตรฐาน และเพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน

#### 3.1 วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินการวิจัย สามารถสรุปขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

- 3.1.1 ศึกษาคุณลักษณะของปากขอพวง
- 3.1.2 ออกแบบงานวิจัย
- 3.1.3 นำชิ้นงานไปทดสอบ 4 การทดสอบ ได้แก่

3.1.3.1 ทดสอบแรงดึงด้วยวิธี Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials เพื่อหาค่า

- ก) แรงดึงที่จุดคราก
- ข) ความต้านแรงดึงที่จุดคราก
- ค) แรงดึงสูงสุด
- ง) ความต้านแรงดึงสูงสุด
- จ) เปอร์เซ็นต์ความยืด

3.1.3.2 ทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry เพื่อหาอัตราส่วนองค์ประกอบธาตุ C, Si, Mn, P, S, Cr, Mo, Ni, Al

3.1.3.3 ทดสอบความแข็ง (แบบร็อคเวลล์)

3.1.3.4 ทดสอบโครงสร้างจุลภาค

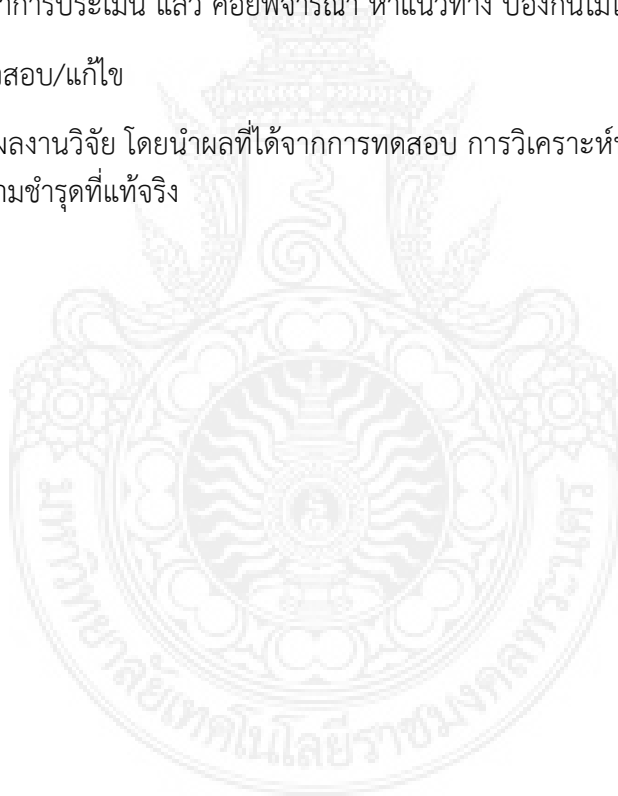
3.1.4 สรุปผลการทดสอบ

3.1.5 วิเคราะห์หาสาเหตุความชำรุดด้วยวิธี FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) เป็นการระบุถึงอันตรายด้วยการวิเคราะห์ถึงแต่ละส่วนของอุปกรณ์จะมีการทำงานผิดพลาดได้อย่างไร Failure Mode และมีผลกระทบต่องั่งระบบอย่างไร Effect Analysis ซึ่งอาจใช้ WHY – WHY Analysis เข้ามาช่วยด้วย

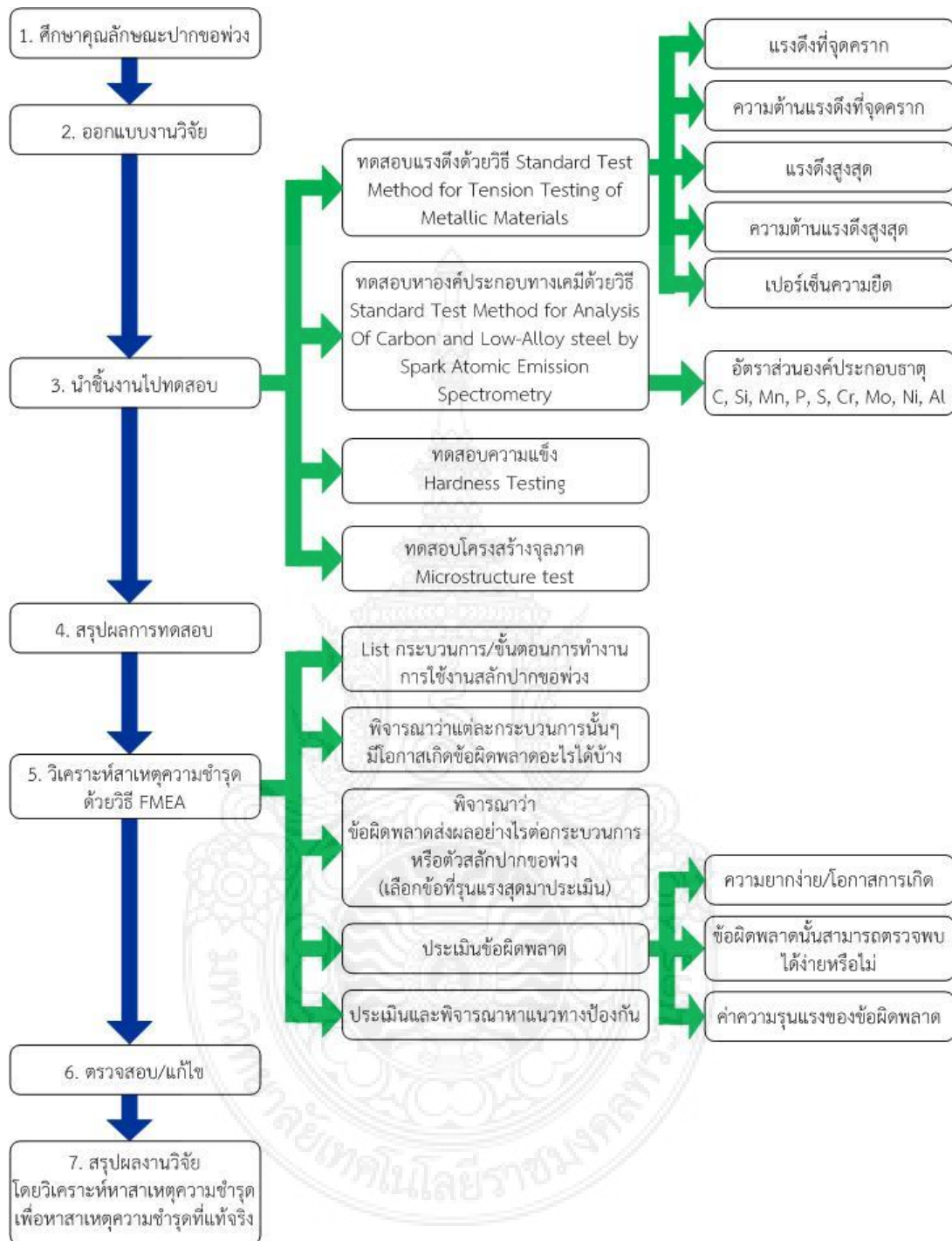
- ก) List กระบวนการหรือขั้นตอนการทำงาน การใช้งานสลักปากขอพ่วง เป็นข้อพิจารณาว่าแต่ละกระบวนการนั้นๆ มีโอกาสเกิดข้อผิดพลาดอะไรได้บ้าง
- ค) พิจารณาว่า ข้อผิดพลาดนั้นๆ ส่งผลอย่างไรต่อกระบวนการหรือตัวสลักปากขอพ่วง ถ้ามีหลายเรื่องให้เลือกข้อที่รุนแรงสุดมาทำการประเมินต่อข้อเดียว
- ง) ประเมินข้อผิดพลาด โดยพิจารณา ใน 3 เรื่อง
  - ความยากง่ายในการเกิด โอกาสการเกิด
  - ข้อผิดพลาดนั้นเกิดแล้วสามารถตรวจพบได้ง่ายหรือไม่
  - ค่าความรุนแรงของข้อผิดพลาด เช่น ผิดกฎหมาย หรือ อันตราย
- จ) ทำการประเมิน แล้ว ค่อยพิจารณา หาแนวทาง ป้องกันไม่ให้เกิด

3.1.6 ตรวจสอบ/แก้ไข

3.1.7 สรุปผลงานวิจัย โดยนำผลที่ได้จากการทดสอบ การวิเคราะห์หาสาเหตุความชำรุด นำมาสรุปหาสาเหตุความชำรุดที่แท้จริง







ภาพ 3.1 วิธีดำเนินการวิจัย

## บทที่ 4

### วิธีการทดสอบ

การทดสอบคุณสมบัติของสลักปากขอพวงรูน Nat Mall ทดสอบด้วย 4 วิธี ได้แก่ การทดสอบแรงดึง การทดสอบหาค่าประกอบทางเคมี การทดสอบความแข็ง การทดสอบโครงสร้างจุลภาค

#### 4.1 ทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึงทำด้วยวิธี Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials เพื่อหาค่า

- ก) แรงดึงที่จุดคราก
- ข) ความต้านแรงดึงที่จุดคราก
- ค) แรงดึงสูงสุด
- ง) ความต้านแรงดึงสูงสุด
- จ) เปอร์เซนต์ความยืด

สมการที่ใช้เป็นสมการทดสอบชิ้นงาน มีดังนี้

$$A = \left[ \frac{w}{4} \times \sqrt{D^2 - w^2} \right] + \left[ \frac{D^2}{4} \times \arcsin \left( \frac{w}{D} \right) \right] - \left[ \frac{W}{4} \times \sqrt{(D-2T)^2 - W^2} \right] - \left[ \frac{(D-2T)^2}{2} \times \arcsin \left( \frac{W}{D-2T} \right) \right] \quad (1)$$

เมื่อ

A = พื้นที่หน้าตัดแนวนอน, mm<sup>2</sup> [in.<sup>2</sup>],

W = ความกว้างของชิ้นงานที่ลดลง, mm [in.],

D = การวัดเส้นผ่าศูนย์กลางกลางกายของท่อ, mm [in.<sup>2</sup>], and

T = การวัดความหนาของชิ้นงาน, mm [in.<sup>2</sup>], ค่า arcsin อยู่ใน radians

ถ้า D/W > 6, ซึ่งสมการอาจจะใช้สมการที่ (2) ได้ด้วย โดยมีรายละเอียดดังนี้:

$$A = W \times T \quad (2)$$

เมื่อ:

A = พื้นที่หน้าตัด, mm<sup>2</sup> [in.<sup>2</sup>],

W = ความกว้างของชิ้นงานที่ลดลง, mm [in.], และ T = การวัดความหนาของชิ้นงาน, mm [in.]

## 4.2 ทดสอบหาค่าประกอบทางเคมี

ทดสอบหาค่าประกอบทางเคมีทำด้วยวิธี Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry เพื่อหาอัตราส่วนองค์ประกอบธาตุ C, Si, Mn, P, S, Cr, Mo, Ni, Al

## 4.3 ทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งใช้วิธีการทดสอบแบบร็อคเวลล์เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางที่สุดใน การทดสอบความแข็งของโลหะในแวดวงอุตสาหกรรม การทดสอบทำได้อย่างรวดเร็ว และอ่านค่าได้ โดยตรงทันที โดยไม่ต้องวัดขนาดรอยกดบวม อีกทั้งยังทดสอบวัสดุที่มีขนาดเล็ก และแข็งมากได้ หัวกดทดสอบร็อคเวลล์มีอยู่ 2 ชนิด คือ หัวกดเพชรทรงกรวย (Diamond cone) และ หัวกดแบบลูกบอลกลม การทดสอบกับสลักปากขอพ่วงนี้ ใช้เครื่อง Hardness Testing Machine Type HB No.85365 ภายใต้สภาพแวดล้อม อุณหภูมิ 23°C ความชื้นสัมพัทธ์ 48%RH วิธีการทดสอบเป็นดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 นำชิ้นงานวางบนทั้งวางงานทดสอบ

ขั้นตอนที่ 2 หมุนทั้งชิ้นงานขึ้นงานสัมผัสกับหัวกด ป้อนแรงรอง (Minor load) ให้กับหัวกด ประมาณ 10 กิโลกรัม

ขั้นตอนที่ 3 ป้อนแรงหลัก (Major load) โดยใช้แรงกด 50, 90, 140 กิโลกรัม (บวกเพิ่มจากแรงรอง เป็น 10+50, 10+90, 10+140)

ขั้นตอนที่ 4 อ่านค่าความแข็งจากหน้าจอเครื่อง

ขั้นตอนที่ 5 ปลดแรงออก แล้วนำชิ้นงานออกมาจากทั้งวางชิ้นงาน เสร็จสิ้นการทดสอบ

## 4.4 ทดสอบโครงสร้างจุลภาค

การทดสอบโครงสร้างจุลภาคเป็นการใช้กล้องจุลทรรศน์ (Microscope) ดูโครงสร้างซึ่งทำให้สามารถมองเห็นภาพที่มีขนาดเล็กมากให้ได้ใหญ่ชัดเจนขึ้น ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างภาพจากการมองด้วยกล้องจุลทรรศน์ เราเรียกภาพเหล่านั้นว่า ภาพจุลภาค (Photomicrography)

## บทที่ 5

### ผลการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้ทดสอบสลักปากขอพ่วงรุ่น Nat Mall ที่ใช้สำหรับรถสินค้าในการรถไฟแห่งประเทศไทย โดยทดสอบคุณสมบัติ ณ สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย Iron and Steel Institute of Thailand

#### 5.1 ผลการทดลอง



ภาพ 5.1 รูปสลักปากขอพ่วงที่ยังไม่ได้ใช้งาน

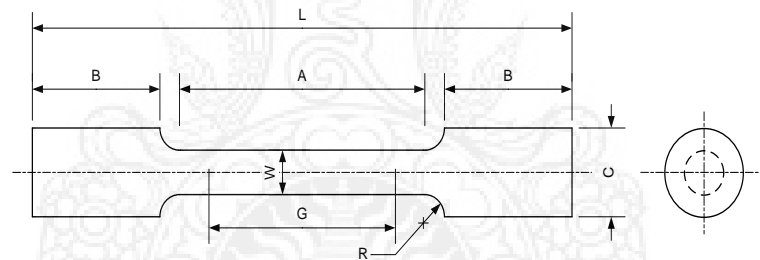


ภาพ 5.2 รูปสลักปากขอพ่วงที่ประกอบกับลำตัวเครื่องพ่วง



ภาพ 5.3 รูปสลักปากขอพ่วงที่ชำรุด

5.1.1 การทดสอบแรงดึงด้วยวิธี Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials



ภาพ 5.4 รูปการเตรียมชิ้นงานก่อนการทดสอบ

ผลการทดสอบคุณสมบัติของสลักปากขอพ่วงด้วยวิธี Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials แสดงผลได้ดังตารางต่อไปนี้

ตาราง 5.1 การทดสอบชิ้นงานโดยวิธี Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials

ชื่อตัวอย่าง	สลักปากขอพ่วง
หมายเลขปฏิบัติการ	TC 5813997
รายการทดสอบ	ผล
แรงดึงที่จุดคราก (kN)	50.08
ความต้านแรงดึงที่จุดคราก (MPa)	408.12
แรงดึงสูงสุด (kN)	83.54
ความต้านแรงดึงสูงสุด (MPa)	680.78
ความยืด (%)	26.3



ภาพ 5.5 การทดสอบโดยวิธี Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry



ภาพ 5.6 การทดสอบแรงดึงโดยวิธี Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials

5.1.2 ทดสอบหาค่าประกอบทางเคมีด้วยวิธี Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry

ผลการทดสอบคุณสมบัติของสลักปากขอพ่วงด้วยวิธี Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry แสดงผลได้ดังตารางต่อไปนี้

ตาราง 5.2 การทดสอบชิ้นงานโดยวิธี Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry

ชื่อตัวอย่าง	สลักปากขอพ่วง
หมายเลขปฏิบัติการ	TC5813996
ธาตุ	ผล
C	0.4583
Si	0.2251
Mn	0.6309
P	0.0127
S	0.0115
Cr	0.3078
Mo	0.0117
Ni	0.0202
Al	0.0095
Cu	0.0104
Nb	0.0014
Ti	0.0037
V	0.0019
B	0.0002

This test method covers the simultaneous determination of 20 alloying and residual elements in carbon and low-alloy steels by spark atomic emission vacuum spectrometry in the mass fraction ranges shown

5.1.3 ทดสอบความแข็ง (แบบร็อคเวลล์) ผลการทดสอบความแข็งใช้วิธีการทดสอบแบบร็อคเวลล์ แสดงผลได้ดังตารางต่อไปนี้

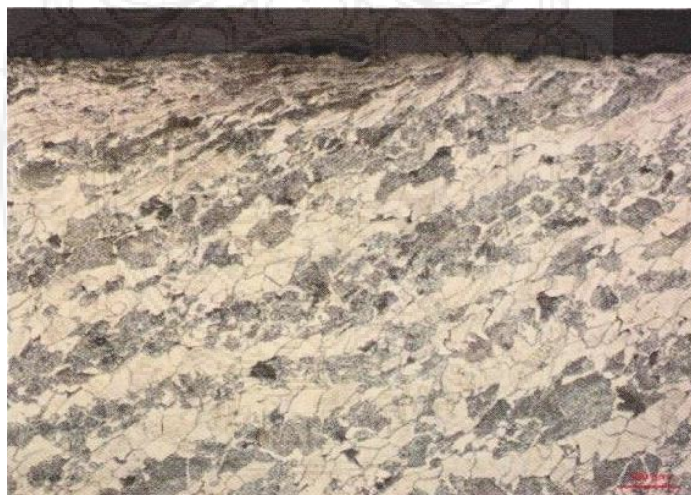
**ตาราง 5.3** การทดสอบความแข็งใช้วิธีการทดสอบแบบร็อคเวลล์ หน่วย : HRBW

ชื่อตัวอย่าง	สลักปากขอพวง(สั้น)	สลักปากขอพวง(ยาว)
หมายเลขปฏิบัติการ	TC 6009487	TC 6009488
ตำแหน่งที่ทดสอบ	ผล	ผล
1	89.0	84.1
2	88.1	87.6
3	86.2	87.9
4	86.2	83.4
5	84.5	85.4
เฉลี่ย	86.1	85.7

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยจาก 3 ค่าโดยตัดค่าสูงสุดและต่ำสุด

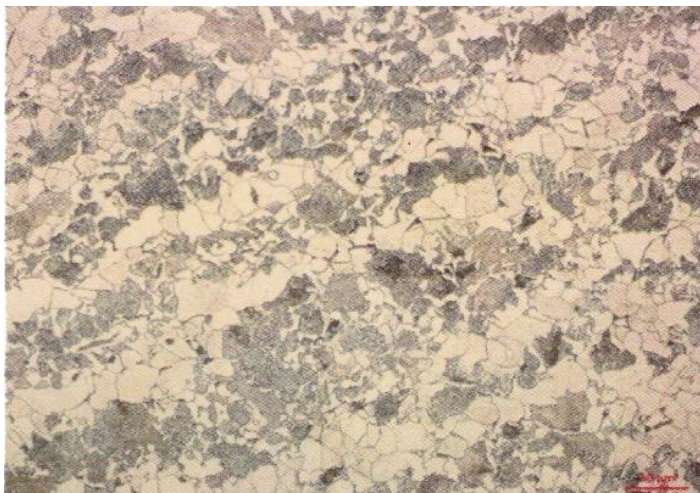
5.1.4 ทดสอบโครงสร้างจุลภาค

ผลการขยายภาพโครงสร้างสลักปากขอพวงที่กำลังขยาย 200 เท่า (200X) แสดงได้ดังนี้

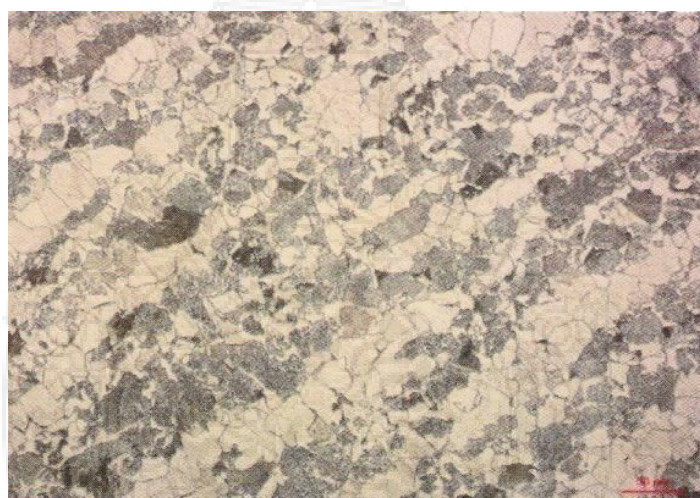


ภาพ 5.7 โครงสร้างจุลภาคของสลักปากขอพวง (สั้น) ตำแหน่งที่ 1 ที่กำลังขยาย 200X





ภาพ 5.8 โครงสร้างจุลภาคของสลักปากขอพวง (สั๊น) ตำแหน่งที่ 2  
ที่กำลังขยาย 200X



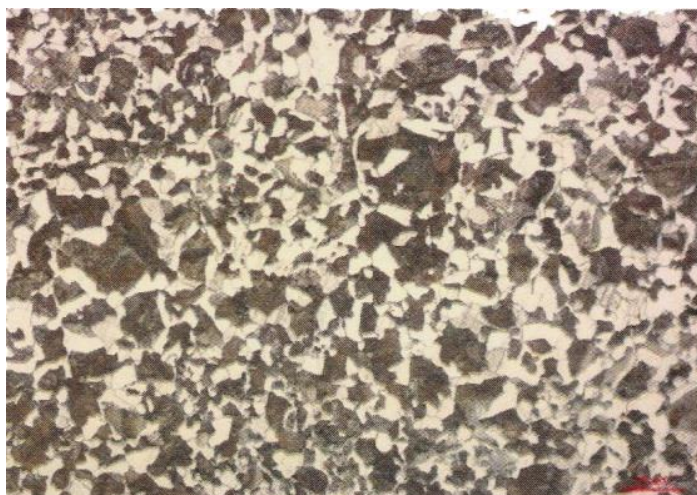
ภาพ 5.9 โครงสร้างจุลภาคของสลักปากขอพวง (สั๊น) ตำแหน่งที่ 3  
ที่กำลังขยาย 200X



ภาพ 5.10 โครงสร้างจุลภาคของสลักปากขอพวง (ยาว) ตำแหน่งที่ 1  
ที่กำลังขยาย 200X



ภาพ 5.11 โครงสร้างจุลภาคของสลักปากขอพวง (ยาว) ตำแหน่งที่ 2  
ที่กำลังขยาย 200X



ภาพ 5.12 โครงสร้างจุลภาคของสลักปากขอพวง (ยาว) ตำแหน่งที่ 3 ที่กำลังขยาย 200X

## 5.2 วิเคราะห์เปรียบเทียบกับมาตรฐาน

ตาราง 5.4 Internal Standard and Analytical Lines Element Wavelength, nm Line Possible Interference

Aluminum	394.4	I	V, Mn, Mo, Ni
	308.22	I	V, Mn
Arsenic	197.2	I	Mo, W
	193.76	I	Mn
Boron	182.64	I	S, Mn, Mo
	182.59	I	W, Mn, Cu
Calcium	396.85	II	Nb
Carbon	193.09	I	Al
Chromium	298.92	II	Mn, V, Ni, Nb, Mo
	267.72	II	Mn, Mo,
Cobalt	345.35	I	Cr, Mo
	228.62	II	Ni, Cr
Copper	327.4	I	Nb

ตาราง 5.4 Internal Standard and Analytical Lines Element Wavelength, nm Line Possible Interference (ต่อ)

	213.6	II	Mo, Cr
<b>Iron(si)</b>	271.44	II	
	273.07	II	Co
<b>Manganese</b>	293.31	II	Cr, Mo, Ni
	255.86	II	Zr
<b>Molybdenum</b>	379.83	II	Mn
	277.54	I	Cu, V, Co, Mn
	386.41	I	V, Cr
<b>Nickel</b>	231.6	II	Co, Ti
	227.02	II	Nb, W
<b>Niobium</b>	319.5	II	Mo, Al, V
<b>Nitrogen</b>	149.26	I	Fe, Ti, Si, Mn, Cu, Ni and nitride forming Elements such as Ti
<b>Phosphorus</b>	178.29	I	Mo
<b>Silicon</b>	288.16	I	Mo, Cr, W
	251.61	I	Fe, V
<b>Sulfur</b>	180.73	I	Mn
<b>Tin</b>	189.99	II	Mn, Mo, Al
<b>Titanium</b>	337.28	II	Nb
	324.2	II	Nb
<b>Vanadium</b>	310.23	II	Fe, Mo, Nb, Ni
	311.07	II	Mn, Ti, Fe
<b>Zirconium</b>	343.82	II	W

## บทที่ 6

### อภิปรายผล

การวิเคราะห์ผลการศึกษานี้ได้ใช้วิธีการวิเคราะห์อาการขัดข้องและผลกระทบ และแผนผังสาเหตุและผล (แผนผังก้างปลา) มาใช้ในการวิเคราะห์หาสาเหตุความชำรุด เพื่อให้ทราบถึงตัวแปรสาเหตุ และเหตุผลที่เกี่ยวข้อง อันนำไปสู่ปัญหาความชำรุดก่อนเวลาที่ได้ประเมินไว้ของสลักปากขอพวง

#### 6.1 การวิเคราะห์อาการขัดข้องและผลกระทบ

การวิเคราะห์อาการขัดข้องและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis: FMEA) เป็นเทคนิคสำหรับการเพิ่มความไว้วางใจแก่ผลิตภัณฑ์ ลดอัตราขัดข้องของผลิตภัณฑ์ในระยะเริ่มแรกและระยะการใช้งานปกติ โดยเน้นการคาดการณ์ปัญหาโดยวิธีการวิเคราะห์หน้าที่ของกระบวนการในทุกขั้นตอน เพื่อการพิจารณาว่ากระบวนการมีหน้าที่ประการใด แล้วคาดการณ์ถึงปัญหา หรือลักษณะข้อบกพร่อง (Failure Mode)

##### 6.1.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA)

- กำหนดลำดับขั้นตอนของการวิเคราะห์
- ศึกษาลำดับขั้นตอนของแต่ละกระบวนการ
- อธิบายลักษณะของงานหรือหน้าที่ของแต่ละขั้นตอน
- ระบุข้อบกพร่องที่มีโอกาสเกิดขึ้นทั้งหมด
- ทบทวนหน้าที่หลักและข้อบกพร่องที่มีโอกาสเกิดขึ้น
- ระบุผลกระทบที่เกิดขึ้นแต่ละข้อบกพร่อง
- ระบุสาเหตุของแต่ละข้อบกพร่องที่มีโอกาสเกิดขึ้น
- ระบุการป้องกันในปัจจุบัน
- ให้คะแนนความรุนแรง โอกาสในการเกิด ความสามารถในการตรวจจับ
- จัดลำดับความสำคัญและข้อบกพร่องตามตัวเลขกำหนด ก่อนหลังความเสี่ยง

(Risk Priority Number-RPN) ซึ่งพิจารณาจากความถี่ในการเกิดความรุนแรงและแนวโน้มที่ข้อบกพร่องจะเกิด

- กำหนดค่า RPN ที่ต้องแก้ไข
- ระบุวิธีการในการแก้ไขปรับปรุง ผู้รับผิดชอบ พร้อมวันกำหนดเสร็จ
- ทบทวนค่า RPN ใหม่หลังจากเสร็จสิ้นการแก้ไข

### 6.1.2 ประเภทการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA)

○ งานระบบใช้ในการวิเคราะห์ระบบและระบบย่อยต่างๆ ในขั้นตอนการออกแบบแนวคิด

(Concept Design) โดย FMEA ในงานจะเน้นที่การวิเคราะห์หาข้อบกพร่องแนวโน้มที่ เกิดกับการทำงาน (Function) ของระบบเนื่องจากไม่มีประสิทธิภาพของระบบ ทั้งนี้จะครอบคลุมถึง การศึกษาอิทธิพลร่วมระหว่างระบบกับองค์ประกอบต่างๆ ของระบบด้วย

○ การออกแบบใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ออกแบบได้ก่อน ให้ฝ่ายผลิตดำเนินการ ผลิตในเชิงพาณิชย์ต่อไป ซึ่งจะเน้นข้อบกพร่องเนื่องจากไม่มีประสิทธิภาพของการออกแบบ

○ กระบวนการผลิตใช้การวิเคราะห์การผลิตและกระบวนการประกอบ ประเภทนี้เน้น ข้อบกพร่องอันเนื่องจากไม่มีประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตและการประกอบ

○ งานบริการใช้ในการวิเคราะห์ต้นทุนการบริการก่อนที่จะส่งมอบ ประเภทนี้เน้น ข้อบกพร่อง ความผิดพลาด หรือความคลาดเคลื่อน อันเนื่องจากไม่มีประสิทธิภาพของระบบ กระบวนการ

### 6.1.3 ประโยชน์ของการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ

○ สามารถแยกแยะและลำดับความสำคัญของข้อผิดพลาด รวมทั้งผลกระทบที่เกี่ยวข้อง

○ เป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์หาแนวทางในการแก้ไขล่วงหน้า เพื่อป้องกันไม่ให้เกิด ปัญหาหรือลดปัญหาลง

○ เก็บหลักฐานเชิงประวัติศาสตร์สำหรับอ้างอิงในอนาคต เมื่อมีความต้องการที่จะ ปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงระบบการผลิตหรือผลิตภัณฑ์

○ สร้างความมั่นใจให้ทีมงานในการวิธีป้องกันปัญหาและของเสียต่างๆ

○ ใช้ในการเสนอผลงานที่มีระบบระเบียบและขั้นตอนที่ดีให้ฝ่ายบริหารได้รับทราบและ พิจารณาแนวทางในการดำเนินการต่อไป

○ มีการนำปัญหาข้อบกพร่องที่เกี่ยวข้องหรือเกิดขึ้นในอดีตมาเป็นข้อมูลในการปรับปรุง คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ทำการผลิตหรือออกแบบ

○ ใช้แสดงสาเหตุหรือกลไกของปัญหา ข้อบกพร่อง ที่มีโอกาสเกิดขึ้น

○ ลดเวลาในการพัฒนาสินค้า ค่าใช้จ่าย

○ เป็นระบบป้องกันที่สร้างขึ้นเพื่อการสร้างความพึงพอใจให้กับลูกค้า

การวิเคราะห์อาการขัดข้องและผลกระทบของขอฟ่วงรถสินค้า บทค. แบบ Automatic Coupling แสดงได้ดังตารางต่อไปนี้

ตาราง 6.1 การวิเคราะห์อาการขัดข้องและผลกระทบของขอฟังรถสินค้าระบบ

ลักษณะ ของส่วน อุปกรณ์	ความผิดพลาด	ผล	ระดับความเสี่ยง		วิธีป้องกัน
			โอกาสเกิด	ความรุนแรง	
3 สลัก ปากขอฟัง	1. สลักปากขอ ฟังขาดคา	1. ปากขอ ฟังหลุด	1. สูง	รุนแรงมาก	1. ใช้ ผลิตภัณฑ์ให้ ได้มาตรฐาน
	2. สลักปากขอ ฟังหลุดหาย	2. เหมือน ข้อ 1	2. สูง	รุนแรงมาก	2. เหมือน ข้อ 1
	3. สลักปากขอ ฟังเสียรูป	3. เกิดการ ติดขัดของ ปากขอฟัง	3. ไม่น่าเกิด	รุนแรงมาก	3. ติดตั้ง อุปกรณ์ เตือนภัย

#### 6.1.4 แผนผังสาเหตุและผล (แผนผังก้างปลา)

แผนผังสาเหตุและผล (Ishikawa diagram) หรือที่เรียกกันว่าแผนผังก้างปลา (Fish bone diagram) เป็นแผนผังที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัญหา (Problem) กับสาเหตุทั้งหมดที่เป็นไปได้ที่อาจก่อให้เกิดปัญหานั้น (Possible Cause) ได้รับการพัฒนาครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1943 โดยศาสตราจารย์คาโอรุ อิชิกาวา แห่งมหาวิทยาลัยโตเกียว

#### 6.1.5 วิธีการสร้างแผนผังสาเหตุและผล

- กำหนดปัญหาที่หัวปลา
- กำหนดกลุ่มปัจจัยที่จะทำให้เกิดปัญหานั้นๆ
- ระดมสมองเพื่อหาสาเหตุในแต่ละปัจจัย
- หาสาเหตุหลักของปัญหา
- จัดลำดับความสำคัญของสาเหตุ
- ใช้แนวทางการปรับปรุงที่จำเป็น

#### 6.1.6 โครงสร้างของแผนผังสาเหตุและผล

แผนผังสาเหตุและผลประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ส่วนปัญหาหรือผลลัพธ์ (Problem or Effect) ซึ่งจะแสดงอยู่ที่หัวปลา
- ส่วนสาเหตุ (Causes) จะเขียนไว้ในก้างปลาแต่ละก้าง สามารถแยกย่อยออกเป็นปัจจัย (Factors) ที่ส่งผลกระทบต่อปัญหา สาเหตุหลัก และ สาเหตุย่อย โดยก้างย่อยเป็นสาเหตุของก้างรอง และก้างรองเป็นสาเหตุของก้างหลัก

## 6.2 การกำหนดปัจจัยบนก้างปลา

การกำหนดหัวข้อปัญหาควรกำหนดให้ชัดเจนและมีความเป็นไปได้ ส่วนการกำหนดปัจจัยบนก้างปลานั้น สามารถที่จะกำหนดกลุ่มปัจจัยอะไรก็ได้ แต่ต้องมั่นใจว่ากลุ่มที่กำหนดนั้นๆ เป็นปัจจัยนั้นสามารถที่จะช่วยให้แยกแยะและกำหนดสาเหตุต่างๆ ได้อย่างเป็นระบบ และเป็นเหตุเป็นผล ดังนั้นโดยส่วนมากจึงมักใช้หลักการ 4M 1E เป็นกลุ่มปัจจัย (Factors) เพื่อจะนำไปสู่การแยกแยะสาเหตุต่างๆ

- M Man คนงาน หรือพนักงาน หรือบุคลากร
- M Machine เครื่องจักรหรืออุปกรณ์อำนวยความสะดวก
- M Material วัตถุดิบหรืออะไหล่ อุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ในกระบวนการ
- M Method กระบวนการทำงาน
- E Environment อากาศ สถานที่ ความสว่าง และบรรยากาศการทำงาน

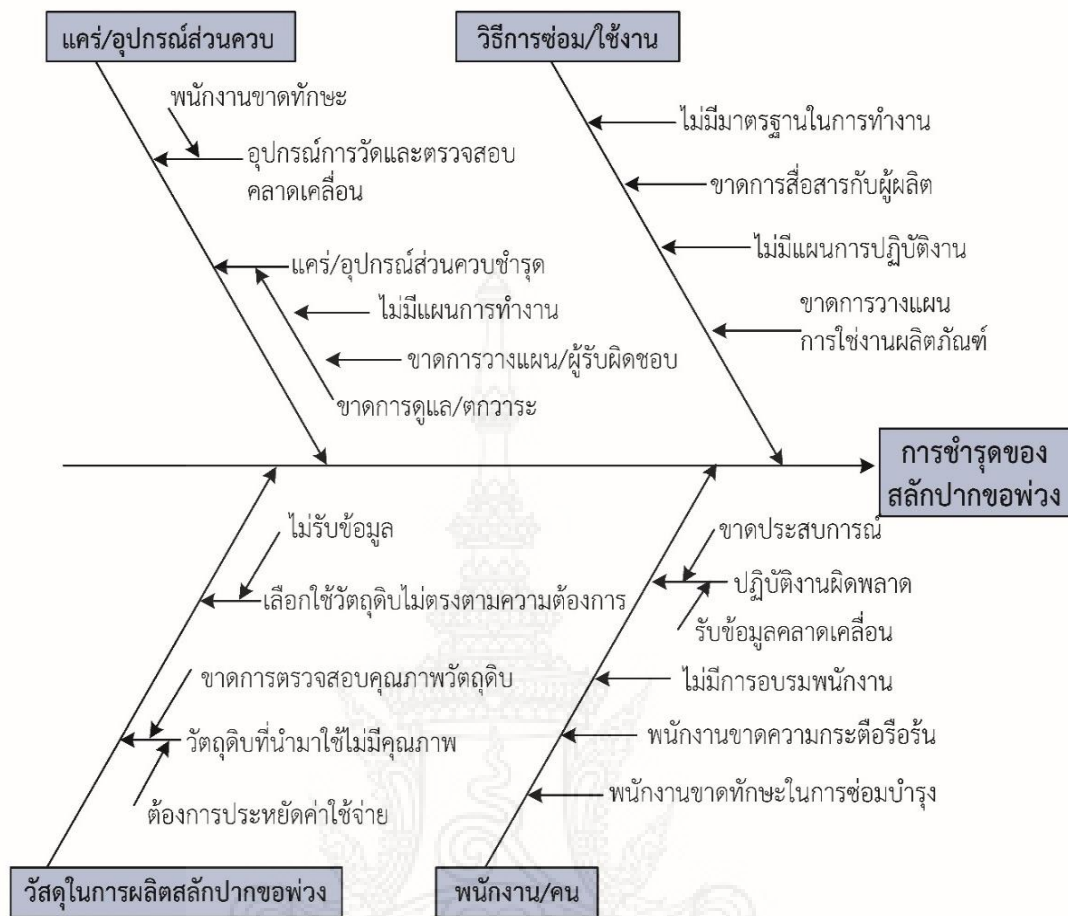
แต่อย่างไรก็ตาม ไม่มีกฎตายตัวว่าต้องกำหนด 4M 1E เสมอไป เพราะหากไม่ได้อยู่ในกระบวนการผลิตแล้วปัจจัยนำเข้า (Input) ในกระบวนการก็จะเปลี่ยนไป เช่น ปัจจัยการนำเข้าเป็น 4P ได้แก่ Place , Procedure, People และ Policy หรือเป็น 4S Surrounding, Supplier, System และ Skill หรืออาจจะเป็น MILK Management, Information, Leadership, Knowledge เป็นต้น

## 6.3 ประโยชน์ของแผนผังสาเหตุและผล

- เพื่อค้นหาสาเหตุแห่งปัญหา
- เพื่อศึกษา ทำความเข้าใจ หรือทำความรู้จักกับกระบวนการอื่นๆ เพราะโดยส่วนใหญ่แล้วเราจะทราบถึงปัญหาเพียงเฉพาะส่วนงานที่เราเกี่ยวข้องเท่านั้น การทำผังก้างปลาจะทำให้ทราบกระบวนการของส่วนอื่นได้ง่ายขึ้น

การวิเคราะห์แผนผังสาเหตุและผลของข้อพ่วงรถสินค้า บทค. แบบ Automatic Coupling แสดงได้ดังตารางรูปต่อไปนี้





ภาพ 6.1 แผนผังสาเหตุและผล

จากการวิเคราะห์โดยวิธี FMEA (แผนภูมิแก๊งปลา) พบว่ามีปัจจัยหลายอย่างส่งผลต่ออายุการใช้งานสลักปากขอพ่วง

1 พนักงาน/คน ช่างฝีมือที่ทำการซ่อมวาระหนักรถสินค้า ขาดประสบการณ์ รับข้อมูลในการซ่อมคลาดเคลื่อน เนื่องจากปัจจุบันการรถไฟฯขาดแคลนช่างฝีมือ ด้วยเหตุการณ์จำกัดการรับพนักงานใหม่ตามมติ ครม.ปี พ.ศ. 2541 ทำให้การรถไฟต้องแก้ไขปัญหาด้วยการ เปิดรับสมัครลูกจ้างชั่วคราวเข้ามาทดแทนอัตรากำลังที่หายไป หรือการว่าจ้างแรงงานเข้ามาช่วยในการซ่อมบำรุงรถจักรและล้อเลื่อน นำมาซึ่งการขาดความต่อเนื่องในการถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์ทำงานที่ถูกต้อง พนักงานขาดความกระตือรือร้น เพราะไม่มีความก้าวหน้าในการเจริญเติบโตตามสายงาน และขาดแผนการอบรมพนักงาน

2 วัสดุในการผลิตปากขอพ่วง โดยที่ผ่านมา การรถไฟฯประสบปัญหาพบหาความชำรุดของสลักปากขอพ่วงเป็นจำนวนมาก งานวิจัยนี้จึงตั้งสมมุติฐานเพื่อวิเคราะห์สาเหตุความชำรุดหลักคือการจัดหาไม่ตรงตามมาตรฐานที่ทางการกำหนด และไม่ปฏิบัติตามมาตรฐาน AAR ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่า ที่ผ่านมาผู้ผลิตสลักปากขอพ่วงมีปัจจัยที่ส่งผลต่อการชำรุดดังนี้ การเลือกใช้วัสดุดิบไม่

ตรงความต้องการ, วัสดุที่ใช้ไม่มีคุณภาพเพราะต้องการประหยัดค่าใช้จ่าย, และขาดการตรวจสอบคุณภาพวัตถุดิบ ผลที่ได้จากการนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ ทดสอบแรงดึงด้วยวิธี Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, วิเคราะห์ค่าส่วนผสมของวัสดุ Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry, ทดสอบความแข็ง (แบบร็อคเวลล์), และทดสอบโครงสร้างจุลภาค เป็นการยืนยันสมมุติฐานที่ตั้งไว้เป็นอย่างดีว่า สลักปากขอพ่วงที่ทางการจัดหาไม่เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด

3 วิธีการซ่อม/ใช้งาน จากการพบความชำรุดของสลักปากขอพ่วงมาเป็นระยะเวลา ยาวนาน นั้นทางการรถไฟฯ ไม่ได้ทำการวิเคราะห์หาสาเหตุที่แท้จริง ปัจจัยและตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อความชำรุดในระหว่างการใช้งาน ขาดการสื่อสารกับผู้ผลิต เพื่อพัฒนาหรือแก้ไขผลิตภัณฑ์ร่วมกัน ไม่มีแผนการปฏิบัติงานที่แน่นอน ขาดการวางแผนในการใช้งานผลิตภัณฑ์ ไม่มีมาตรฐานในการทำงาน ขั้นตอนในการขนส่ง, การเก็บรักษาและการประกอบใช้งานที่ถูกต้อง

4 แคร่/อุปกรณ์ส่วนควบ แคร่ (Bogie) คือ เป็นอุปกรณ์ส่วนล่าง มีหน้าที่รองรับน้ำหนักทั้งหมดของตัวรถและยังมีหน้าที่พาตัวรถให้เคลื่อนที่ไปบนรางในทิศทางที่ต้องการ ประกอบด้วยส่วนรับน้ำหนัก (Suspension) และ ส่วนลากจูงหรือขอพ่วง (Coupler) อาทิเช่น Spring, Bolter, Side Frame, Brake beam, River Support, Friction มีส่วนประกอบของแคร่จำนวนมากขึ้นอยู่กับชนิดแคร่และการใช้งาน ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าสภาพหรือคุณลักษณะของอุปกรณ์อื่นๆจะส่งผลถึงความชำรุดของสลักปากขอพ่วงได้ การติดตามความชำรุด การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) พนักงานขาดทักษะ ในการใช้อุปกรณ์การวัด เพื่อวัดผลและตรวจสอบคลาดเคลื่อน แคร่และอุปกรณ์ส่วนควบชำรุด ไม่มีแผนการทำงานในการติดตาม ขาดการวางแผนผู้รับผิดชอบ ขาดการดูแล/ตรวจระ ไม่สามารถทำวาระรถพ่วงได้ตามแผนที่วางไว้ มีการใช้งานรถที่ไม่ได้บำรุงรักษา ส่งผลให้อุปกรณ์ส่วนควบต่างๆ ชำรุด เพราะขาดการบำรุงรักษา ปัจจัยทั้งหมดนี้อาจส่งผลกระทบต่อความชำรุดของสลักปากขอพ่วงได้

#### 6.4 สรุปการอภิปรายผล

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษา และวิเคราะห์สาเหตุความชำรุดของสลักปากขอพ่วง โดยการทดสอบแรงดึงด้วยวิธี Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, วิเคราะห์ค่าส่วนผสมของวัสดุ Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry, ทดสอบความแข็ง (แบบร็อคเวลล์), และทดสอบโครงสร้างจุลภาค และศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

A.V. Guimaraes ศึกษาคุณสมบัติของ Half-shaft ซึ่งเป็นส่วนประกอบของรถแข่งสูตรเล็กในการแข่งขันของสมาคมวิศวกรรมยานยนต์ (SAE) ด้วยการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและลักษณะเชิงกล และวิเคราะห์การแตกของผิวหน้า และวิเคราะห์การกระจายความเค้นตาม half-shaft ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element (FE) Analysis) การศึกษาพบว่า ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า alloy steel bar ที่ใช้สำหรับทำ half-shaft ไม่มีคุณสมบัติตามกำหนด มีความแข็งแรงน้อยและเป็นผลให้วัสดุมีความสามารถในการรับโหลดและความต้านทานต่อความล้าไม่เพียงพอสำหรับการใช้งาน จากผล

การศึกษาพบว่ากระบวนการแตกหักเกิดจากการขยายตัวของ torsional fatigue crack ร่วมกับ overload ductile fracture จากส่วนของร่อนฟันของ half-shaft

WenJing Chen ศึกษาสมบัติของเหล็ก EA4T ซึ่งถูกใช้มาทำเพลารถไฟอย่างแพร่หลาย โดยศึกษาโครงสร้างจุลภาคและการขยายการแตกหักของเหล็ก EA4T ที่ผ่านการเชื่อมเชื่อมด้วยเลเซอร์ เพลารถไฟเป็นโครงสร้างที่สำคัญที่สุดโครงสร้างหนึ่งของระบบรถไฟซึ่งได้ถูกนำมาใช้รับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบไดนามิกและรับน้ำหนักทั้งหมดของรถ ดังนั้น จึงต้องทนต่อลักษณะโหลดที่หลากหลาย ทั้งแรงตามแนวแกน แรงตามแนวรัศมี แรงเฉือน แรงดัด และแรงบิด เหล็ก EA4T เป็นเหล็กที่มีคุณสมบัติสำหรับใช้เป็นเพลารถไฟเนื่องจากเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนและอัลลอยด์ต่ำ เนื่องจากความสมดุลของความแข็งแรง ความเหนียว และความต้านทานต่อการสึกหรอในสภาพแวดล้อมการทำงานสุดขีด

ความแตกหักหลักของเพลารถไฟในระหว่างใช้งานคือความล้าจากความล้าจากการดัดหมุนของแกนเพล่า และความเสียหายจาก fretting fatigue ที่พื้นผิวของแรงกดที่เพล่า ซึ่งจะเป็ตัวกำหนดอายุการใช้งานของเพล่า การออกแบบเพล่าและข้อต่อที่รับแรงกดได้อย่างเหมาะสมรวมถึงขนาดที่เหมาะสม การคัดเลือกวัสดุ และการดูแลรักษาพื้นผิว มีผลต่อการปรับปรุงความปลอดภัยและการขนส่งที่สะดวกสบาย

การศึกษานี้จะทดสอบด้วยทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคัล (OM), กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และ X-ray diffraction (XRD) ซึ่งพบว่า

(1) เนื่องจากมีการป้อนความร้อนอย่างเพียงพอและทำให้เกิดการหลอมละลายอย่างสมบูรณ์ ทำให้พันธะระหว่างชั้นที่เชื่อมด้วยเลเซอร์และเหล็ก EA4T was metallurgical. โครงสร้างจุลภาคของชั้นเชื่อมประกอบด้วยคอลัมน์, คริสตัล, และ fine dendrites. Austenite และเฟส Fe<sub>2</sub>B กระจายในชั้นเชื่อมอย่างสม่ำเสมอ

(2) smaller grain size และตะกอนของเฟส Fe<sub>2</sub>B เกิดจากการหลอมและการตกผลึกซ้ำของผงอัลลอยด์ ซึ่งทำให้เกิดค่าความแข็งแรงสูงสุดของชั้นเชื่อม

(3) ความสัมพันธ์ระหว่าง stress intensity factor range และอัตราการขยายตัวของการแตกร้าว (da/dN VS.  $\Delta K$ ) แสดงให้เห็นถึงอัตราการขยายตัวของรอยร้าว da/dN ของเหล็ก EA4T ว่าสูงกว่าเหล็ก EA4T with cladding layers, which indicated that the fatigue life of EA4T steel was improved by laser cladding at lower loading stress.

พบว่าความแข็งแรงและความทนทาน ของสลักปากขอพวงมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้คือ

คุณสมบัติของวัสดุที่นำมาผลิตสลักปากขอพวง ด้วยการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและลักษณะเชิงกล และวิเคราะห์การแตกของผิวหน้า และวิเคราะห์การกระจายความเค้น

ความล้าและความเสียหายจาก fretting fatigue ที่พื้นผิวของแรงกดซึ่งจะเป็นตัวกำหนดอายุการใช้งานของสลัก การออกแบบและข้อต่อที่รับแรงกดได้อย่างเหมาะสมรวมถึงขนาดที่เหมาะสม การคัดเลือกวัสดุ และการดูแลรักษาพื้นผิว มีผลต่อการปรับปรุงความปลอดภัย

ความสัมพันธ์ระหว่าง stress intensity factor range และอัตราการขยายตัวของการแตกร้าว (da/dN VS.  $\Delta K$ )

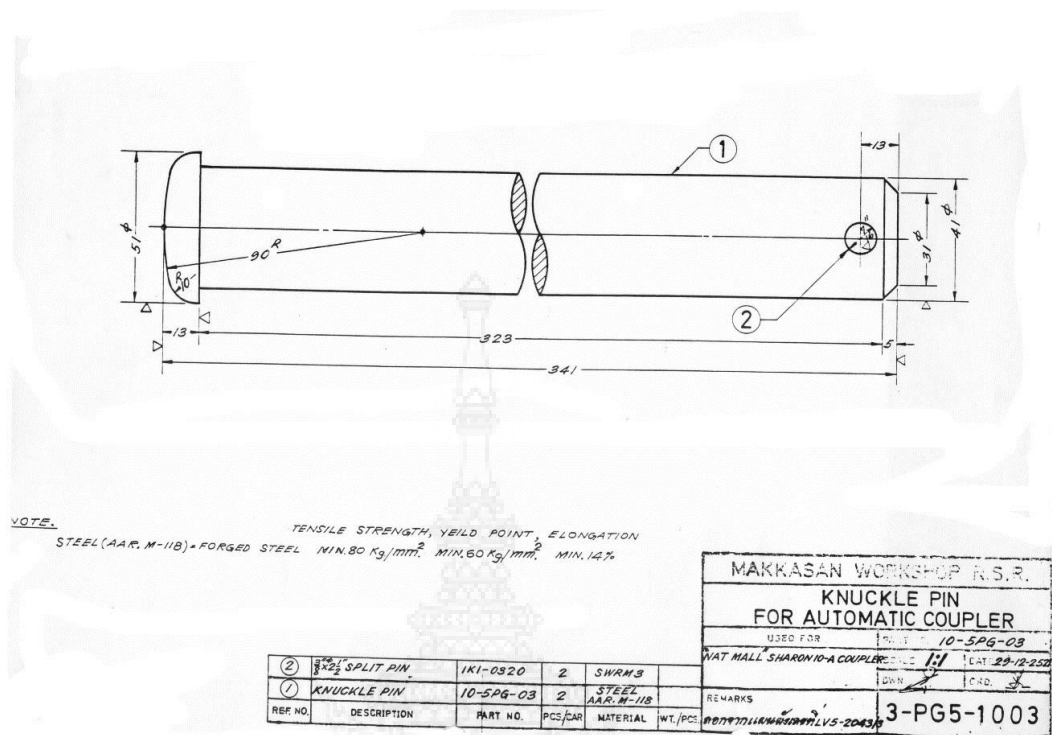
## บทที่ 7

### สรุปผล

จากการศึกษาการวิเคราะห์ความชำรุดของสลักปากขอพ่วง ด้วยการนำชิ้นงานสลักปากขอพ่วงไปทดสอบแรงดึงด้วยวิธี Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials , ทดสอบหาค่าประกอบทางเคมีด้วยวิธี Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry , ทดสอบความแข็ง (แบบร็อคเวลล์) , ทดสอบโครงสร้างจุลภาค และ วิเคราะห์หาสาเหตุความชำรุดด้วยวิธี FMEA (Failure Mode and Effect Analysis)

ตาราง 7.1 ค่าความแข็งของสลักปากขอพ่วง จากการทดสอบ

Tensile Strength (ksi)	Yield Strength (ksi)	Elongation (%)	Reduction in Area (%)
146	90	16.5	46.2
Tensile Strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Yield Strength (kg/mm <sup>2</sup> )		
113.75	85.32		



ภาพ 7.1 แผนผังสลักปากขอพ่วง Knuckle Pin For Automatic Coupler เลขที่ 3-PG5-1003

ตามแผนผังของทางการเพื่อประกอบการจัดซื้อ สลักปากขอพ่วง และใช้อ้างอิง เลขที่ 3 - PG5-1003 ซึ่งระบุมาตรฐาน Steel AAR.M-118 ซึ่งมีค่าความ Tensile Strength , Yield Strength , Elongation (%) , Hardness Value (ภาคผนวก AAR Manual of Standard and Recommended Practices Couplers And Freight Car Draft Components M-118) ระบุค่าตามตาราง 7.1 แต่ในแผนผังของทางการ ได้ระบุค่าดังนี้คือ

ตาราง 7.2 ค่าที่ทางการกำหนด เป็นค่า Minimum ของคุณสมบัติของสลักปากขอพ่วง

Tensile Strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Yield Strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
80	60	14

และค่าความแข็งที่ทดสอบได้ผลในบทที่ 5 ตามตารางที่ 5.3 และได้ทำการศึกษาสลักปากขอพ่วงทั้งตัวสั้นและตัวยาว โดยเมื่อทดสอบสมมติฐานแล้วพบว่า ค่าที่ได้กำหนดในแผนผังของทางการ โดยการอ้างถึงมาตรฐาน Steel AAR.M-118 ไม่ตรงกับค่าที่ทางการกำหนด ที่ค่า Tensile Strength (kg/mm<sup>2</sup>) ต้องไม่น้อยกว่า 80 (kg/mm<sup>2</sup>) ค่า Yield Strength ต้องไม่น้อยกว่า 60 (kg/mm<sup>2</sup>) และค่า Elongation (%) ต้องไม่น้อยกว่า 14 % ค่าทั้งสามต่ำกว่า ค่าที่ยอมรับได้ของมาตรฐาน AAR.M-118

ในส่วนของชิ้นงานที่นำมาทดสอบ ผลตามตาราง 5.3 นั้น พบว่า ค่า Yield Strength ต่ำกว่า ค่าที่ทางการกำหนดขั้นต่ำอีกด้วย

ตาราง 7.3 ตารางเปรียบเทียบค่าที่ทางการกำหนด ,ค่าทดสอบ , ค่าตามมาตรฐาน AAR.M - 118

	Tensile Strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Yield Strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation(%)	Hardness
แผนผังการ รถไฟ	80	60	14	
AAR.M-118	102.68	63.29	16.5	228 Brinell (20 Rockwell C)
ค่าการทดสอบ	83.54	50.08	26.3	169 Brinell (5 Rockwell C)

จากตารางเปรียบเทียบพบว่า สลักปากขอพ่วงที่ทางการใช้งานมีค่าคุณลักษณะ จากการทดสอบชิ้นงานโดยวิธี Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials ต่ำกว่าที่กำหนดในมาตรฐาน AAR.M-118 ทุกตัว และมีค่าความแข็ง ที่ทำการทดสอบความแข็งใช้วิธีการทดสอบแบบบร็อคเวลล์ ต่ำกว่าเช่นเดียวกัน อีกทั้ง ในค่า Yield Strength ยังมีค่าต่ำกว่าแผนผังที่ทางการกำหนด ด้วยที่  $50.08 \text{ (kg/mm}^2\text{)} < 60 \text{ (kg/mm}^2\text{)}$

จากผลการศึกษาทำให้พบว่า การทราบถึงสภาพทางกายภาพของสลักปากขอพ่วง และการทราบสาเหตุความชำรุดที่แท้จริง นำไปสู่การปรับปรุงคุณภาพ การจัดหาสิ่งของที่ได้มาตรฐาน สอดคล้องกับการใช้งาน ช่วยลดระยะเวลา ขั้นตอนการซ่อมบำรุง ส่งผลให้สามารถช่วยลดต้นทุนจากการซ่อมบำรุงในกระบวนการซ่อมวาระหนักรถสินค้าและรถโดยสาร ที่มีลักษณะเป็นขั้นตอนและแบบแผนที่ชัดเจน นั้นแสดงให้เห็นถึงการดำเนินงานแก้ไขปัญหาที่เป็นไปอย่างมีขั้นตอนและมีเหตุมีผลซึ่งกันและกันได้อย่างละเอียดและได้ผลสำเร็จในการลดต้นทุนในการซ่อมบำรุงได้ตามเป้าหมายที่ตั้ง ดังนั้นจึงมองเห็นว่าการวิเคราะห์ความชำรุดในอุปกรณ์ส่วนควบอื่นๆของอุปกรณ์แคร่รถไฟ ยังสามารถใช้เป็นการเสนอแนะแนวทางช่วยในการตัดสินใจเชิงเศรษฐศาสตร์ต่อการพิจารณาลงทุนจัดหาเครื่องมือ และวางแผนการซ่อมบำรุงรถจักรและล้อเลื่อนให้เกิดขึ้นได้ในอนาคต

## บทที่ 8

### การนำไปใช้ประโยชน์อย่างยั่งยืน

#### 8.1 แนวคิดการใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม

จากการศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาดังกล่าว ยังพบอีกว่าภายในการรถไฟมีแนวโน้มของต้นทุน และค่าใช้จ่ายสูงขึ้นต่อเนื่อง หากไม่มีการควบคุมกระบวนการที่เป็นปัญหา และเพื่อเพิ่มขีดความสามารถของเครื่องจักร เครื่องมือวัด คุณภาพของอะไหล่ และประสิทธิภาพในการทำงาน ผู้ทำการวิจัยจึงได้รวบรวมข้อมูลในการเสนอขอสั่งซื้อสลักปากขอพ่วง ให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด ลดตัวแปรภายนอกอันเกิดจากการชำรุดของอุปกรณ์ตัวอื่น โดยทำการศึกษาหาความเป็นไปได้ในเชิงเศรษฐศาสตร์ เพื่อการตัดสินใจทดลองติดตั้งลงบนรถสินค้า บทต. และ รถขนส่งน้ำมัน บทค. เพื่อใช้ในการทดลองวิ่งในเส้นทางต่างๆ ซึ่งจะประกอบด้วยการศึกษาความเป็นไปได้ทางดานการเงิน จากการประเมินค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงล้อเลื่อน โดยพิจารณาจากเกณฑ์ดัชนีชี้วัดผลความเป็นไปได้ทางด้าน คือมูลค่าเทียบเท่าปัจจุบันสุทธิ(Net Present Value) ระยะเวลาคืนทุน(Payback Period) และอัตราผลตอบแทนของโครงการ(Internal rate of Return) โดยกำหนดอายุโครงการ 6 ปี ตามรอบการซ่อมบำรุงวาระหนัก มีรายละเอียดดังนี้

#### 8.2 แผนการดำเนินงาน

##### 8.2.1 การวิเคราะห์ด้านการเงิน (Financial Analysis)

การวิเคราะห์ในส่วนนี้เพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจสำหรับโครงการที่จะลงทุนทำการเก็บข้อมูลค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง ข้อมูลทางการเงินอยู่ภายใต้เงื่อนไขต่อไปนี้

8.2.1.1 กำหนดต้นทุนที่เกิดจากของเสียเฉลี่ย 8,000,00บาทต่อปีจาก ราคาสลักปากขอพ่วง ราคาชิ้นละ 4,000 บาท จำนวน 6,000 ชิ้น ต่อการใช้งานทุก 3 ปี

8.2.1.2 กำหนดราคาค่าระวางขนส่งสินค้า เป็นจำนวนเงินเท่ากับ 80,198 บาท/คัน

**ตาราง 8.1** รายละเอียดประมาณการผลประโยชน์ในการลงทุน หน่วย : บาท

รายการ	ปีที่ 0	ปีที่ 1	ปีที่ 2	ปีที่ 3	ปีที่ 4	ปีที่ 5	ปีที่ 6
ต้นทุนของเสีย (เพิ่ม 2% ปี)	-	2,281,348	2,326,975	2,373,515	2,420,985	2,469,405	2,518,793
รายจ่ายสุทธิ	1,228,500	652,127	652,127	652,127	652,127	652,127	648,032
ลดต้นทุน ของเสีย	-	1,629,221	1,674,848	1,721,388	1,768,858	1,817,277	1,870,761
กำไรสุทธิ	-	977,094	1,022,721	1,069,260	1,116,731	1,165,150	1,222,728

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{ค่าใช้จ่ายในการลงทุน}}{\text{ผลตอบแทน}} \text{----- (1)}$$

**ตาราง 8.2** สรุปผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าการลงทุนทางเศรษฐศาสตร์โครงการ

โครงการติดตั้งสลักปากขอพวงใหม่	จำนวน	หน่วย
ต้นทุนของเสีย (เพิ่มขึ้น 2% ทุกปี)	-	บาท/ปี
ต้นทุนเริ่มแรกติดตั้งอุปกรณ์	8,000,000	บาท
มูลค่าอุปกรณ์เสื่อมราคา 5 ปี	400,000	บาท/ปี
อายุโครงการ	6	ปี
อัตราเงินเฟ้อ	2.5	เปอร์เซ็นต์/ปี
อัตราดอกเบี้ยเงินกู้(MLR)	4	เปอร์เซ็นต์/ปี
มูลค่าปัจจุบัน (NPV) 6.60 %	-	บาท
อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR)	85	เปอร์เซ็นต์
ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)	1.24	ปี



**ตาราง 8.3** ผลการศึกษามูลค่าทางเศรษฐศาสตร์

ค่าทางเศรษฐศาสตร์	ผลการวิจัย	เกณฑ์การตัดสินใจ	การตัดสินใจ
NPV	9,164,029.56 บาท	NPV > 0	นำลงทุน
IRR	85 %	IRR > ค่าเสียโอกาส	นำลงทุน
PB	1 ปี 3 เดือน	ค่ายิ่งน้อยยิ่งดี	นำลงทุน

### 8.3 สรุปผลการดำเนินงานอย่างยั่งยืน

การวิเคราะห์อุตสาหกรรมของกรณีศึกษาครั้งนี้ เป็นการศึกษารายละเอียดของอุตสาหกรรม กระบวนการซ่อมบำรุงรถสินค้า การรถไฟฯ โดยการวิเคราะห์หลักปากขอพ่วง เพื่อเพิ่มขีดความสามารถของเครื่องจักรและประสิทธิภาพในการทำงาน ลดต้นทุนในการซ่อมบำรุงจึงมีการเสนอขอทดลองติดตั้งหลักปากขอพ่วงที่ทดสอบแล้วว่าเป็นไปตามมาตรฐาน ตามการวางแผนซ่อมบำรุงในระยะเวลา 6 ปี จากผลการศึกษาหาความเป็นไปได้ในเชิงเศรษฐศาสตร์ เพื่อการตัดสินใจลงทุนติดตั้งทดลองวิ่งจริง ใช้งานจริง และประเมินค่าแรง ค่าอะไหล่ในการซ่อมบำรุง พบว่าหากมีการติดตั้งหลักปากขอพ่วงที่ได้มาตรฐาน มีอายุการใช้งานที่นานขึ้น จะสามารถลดต้นทุนของเสียได้ทุกปี โดยกำหนดอายุโครงการ 6 ปี มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ(NPV) ที่ 9,164,029.56 บาท ค่าอัตราผลตอบแทนภายในโครงการ(IRR) ที่ 85 % และระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 3ปี ดังนั้นการทราบสาเหตุที่แท้จริงของความชำรุด ของหลักปากขอพ่วงจะช่วยยืดอายุ และ ลดต้นทุนของการซ่อมบำรุงได้

### 8.4 ความคุ้มค่า

ในการซ่อมรถสินค้าวาระหนัก ของการรถไฟฯ มีระยะเวลาระหว่างการทำวาระแต่ละครั้งเป็นระยะเวลา 72 เดือน ต้องใช้แรงงานและอะไหล่ ตัวอย่างตามตาราง 8.4

และในการซ่อมรถโดยสารวาระหนัก ของการรถไฟฯ มีระยะเวลาระหว่างการทำวาระแต่ละครั้งเป็นระยะเวลา 40 เดือน ต้องใช้แรงงานและอะไหล่ ตัวอย่างตามตาราง 8.5

**ตาราง 8.4** แสดงรายการค่าใช้จ่ายในการซ่อมรถสินค้าวาระหนักของการรถไฟฯ ค่าใช้จ่ายซ่อมรถประจำเดือนธันวาคม พ.ศ. 2558 สังกัดแขวงโรงงานอุตสาหกรรม ประเภทการซ่อมซ่อมวาระรถสินค้า(วาระ 8 เดือน)

ลำดับที่	ชนิดรถ / หมายเลขรถ	วันส่งเข้าซ่อม	วันมอบใช้การ	ค่าใช้จ่าย (บาท)			รวมเงินทั้งสิ้น
				ค่าจ้างเหมา	ค่าของ	ค่าแรง	
1	บพค. 43370	2 ธค.58	9 ธค.58		25,905.06	45,983.13	71,888.19
2	บพค. 44511	27 พย.58	9 ธค.58		33,429.58	12,206.54	45,636.12
3	บพค. 44210	27 พย.58	21 ธค.58		38,504.54	60,793.07	99,297.61
4	บพค. 41335	15 ธค.58	22 ธค.58		72,658.00	26,725.55	99,383.55
5	บพค. 41226	18 ธค.58	29 ธค.58		78,872.80	58,756.17	137,628.97
รวมรถมอบใช้การ 5 คัน			เป็นเงิน		249,369.98	204,464.46	453833.98

**ตาราง 8.5** แสดงรายการค่าใช้จ่ายในการซ่อมรถโดยสารวาระหนักของการรถไฟฯ ค่าใช้จ่ายซ่อมรถประจำเดือน ตุลาคม พ.ศ. 2559 สังกัดแขวงโรงงานอุตสาหกรรม ประเภทการซ่อมซ่อมหนักโดยสาร (วาระ 40 เดือน)

ลำดับที่	ชนิดรถ / หมายเลขรถ	วันส่งเข้าซ่อม	วันมอบใช้การ	ค่าใช้จ่าย (บาท)			รวมเงินทั้งสิ้น
				ค่าจ้างเหมา	ค่าของ	ค่าแรง	
1	บชส. 185	24 ส.ค. 58	9 ต.ค. 58	594,440.00	699,054.56	71,542.63	1,365,037.19
2	บชส. 1184	30 มิ.ย. 58	13 ต.ค. 58	990340.00	764,776.93	537,320.88	1,302,097.81
3	บชส. 1111	27 ก.ค. 58	20 ต.ค. 58	990,340.00	901,848.87	5,213.51	1,897,402.38
4	บชส. 1171	24 ส.ค. 58	30 ต.ค. 57	594,440.00	680,248.21	108,999.27	1,383,687.48
รวมรถมอบใช้การ 4 คัน			เป็นเงิน	2,179,220.00	3,045,928.57	723,076.29	5,948,224.86

ตาราง 8.6 แสดงรายการค่าใช้จ่ายในการซ่อมรถสินค้านอกวาระของการรถไฟฟ้าค่าใช้จ่าย  
ในการซ่อมรถสินค้าของแขวงบำรุงรถสินค้าบางซื่อ ประจำเดือน กุมภาพันธ์ 2560

ประเภทรถ	ซ่อมนอกวาระ			รวม
	ผลงาน	ค่าของ	ค่าแรง	
บตค.	14	143,825.60	26,279.96	170,105.56
บทก.	2	7,842.12	3,754.28	11,596.40
บตต.	1	202.88	1,877.14	2,080
รวม	17	151,870.6	31,911.83	183,782.16

ตาราง 8.7 แสดงรายการค่าใช้จ่ายในการซ่อมรถสินค้า วาระ 8 เดือนของการรถไฟฟ้า

ประเภทรถ	ซ่อมวาระ 8 เดือน			รวม
	ผลงาน	ค่าของ	ค่าแรง	
บตค.	13	7,062.09	40,671.28	47,733.37
บทก.	10	45,141.92	31,285.60	76,427.52
บตต.	5	92,107.88	1,5642.80	107,750.68
รวม	28	144,311.89	87,599.68	231,911.57

ตาราง 8.8 แสดงรายการค่าใช้จ่ายในการซ่อมรถสินค้า นวาระปานกลางของการรถไฟฟ้า

ประเภทรถ	ซ่อมวาระ ปานกลาง			รวม
	ผลงาน	ค่าของ	ค่าแรง	
บตค.	4	42,999.72	40,045.60	83,045.32
บทก.	3	14,758.22	30,034.20	44,792.42
บตต.	5	8,749.69	50,057.00	58,806.69
รวม	12	66,507.63	120,136.80	186,644.43

ตาราง 8.9 แสดงรายการค่าใช้จ่ายในการซ่อมรถสินค้า วาระหนักของการรถไฟฟ้า

ประเภทรถ	ซ่อมวาระ หนัก			รวม
	ผลงาน	ค่าของ	ค่าแรง	
บตค.	11	1,107,202	206,485.18	1,313,688.01
บทก.	2	228,932.06	37,542.76	266,474.82
บตต.	1	41,761.57	18,771.38	60,432.95
รวม	14	1,377,897.00	262,799.32	1,640,969.32

คิดเป็น ชม. ทำงาน (กำหนดให้ทำเครื่องหมายถูกหน้าช่องที่ทำการตรวจซ่อม และกรอกข้อมูลลงช่องหมายเหตุ(บอกสาเหตุข้อขัดข้องงานซ่อม)

รายการที่ 1.1-1.6 ไม่ได้เอามาคำนวณเวลาในการทำซ่อมหนัก(ส่วนมากจะชำรุด)แต่ถ้ามีการเปลี่ยนจะต้องนำมาคำนวณเวลาเพิ่ม

โดยในตาราง 8.4 แสดงรายการค่าใช้จ่ายในการซ่อมวาระรถสินค้าชนิด 8 ล้อของการรถไฟฯ ประจำปี 2559 ซึ่งในส่วนของค่าของ คือ ค่าอะไหล่ที่ทางการต้องจัดหาเพื่อใช้ในการซ่อม จำแนกอะไหล่ ออกได้ 18 ชนิดครุ่ โดยในส่วนของสลักปากขอพวงที่ ผู้ทำการวิจัยได้ทำการวิเคราะห์หาสาเหตุความชำรุด มีใช้อยู่ในปากขอพวง ชนิด Natmal จำนวนกว่า 6,000 ชิ้น อายุการใช้งานที่คาดหวัง ควรจะสามารถใช้งานได้ 1 รอบการซ่อมหนัก หรือไม่น้อยกว่า 6 ปี ดังนั้นเมื่อมีการชำรุด ในระหว่างวาระ และ นอกวาระ Un-plan Maintenance ทำให้ทางการต้องเสียค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงเพิ่มมากขึ้น กว่าที่ได้วางแผนไว้

รวมเวลาทำงานแต่ละประเภทวาระ/คัน/นาที โดยค่าใช้จ่ายในส่วนของแรงในการถอดประกอบสลักปากขอพวง เป็นดังนี้

**ตาราง 8.10** ค่าใช้จ่ายในส่วนของแรงในการถอดประกอบสลักปากขอพวง

การคิดค่าแรง (Manday) 3 คน		
เงินเดือนรวม	632600	บาท
แรงงาน	3	คน
เท่ากับ	15429.27	บาท
จำนวนวันทำงานปกติ	22	วัน
เท่ากับค่าแรง 1 MD	701.33	บาท/คน

$$\begin{aligned}
 \text{M/D ละ } 701.3 \times \text{จำนวนคน} &= \text{ค่าแรง} \\
 \text{ค่าแรง} &= 701.3 \times 3 = 2103.9 \text{ บาท/คัน} \\
 \text{ค่าของ} &= 400 \text{ บาท ไม่รวมค่าล้อและค่ากึ่งล้อ} \\
 \text{รวมค่าแรงค่าของ} &= 2503.9 \text{ บาท}
 \end{aligned}$$

ในส่วนของการเปลี่ยนและตรวจสอบเครื่องพวงใช้เวลา 240 นาที

นี่คือค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นมาในกรณีที่ สลักปากขอพวงมีความชำรุดก่อนการเปลี่ยนตามวาระ เมื่อทำการเปลี่ยนทุกคันเมื่อพบความชำรุดที่ระยะเวลา 3 ปี ไม่รวมการชำรุดนอกวาระ อีก ปีละเฉลี่ย 3 คัน

## ฝ่ายบริการสินค้า

สรุปผลการเดินขบวนรถสินค้า (ไป-กลับ) ประจำวันพฤหัสบดีที่ 11 พฤษภาคม 2560

ประเภทขบวนรถสินค้า	ขบวนรถ			รายได้ (บาท)	หมายเหตุ
	ตามแผน	เดินจริง	งดเดิน		
น้ำมันดิบ	10	9	1	1,358,560.00	บริษัทฯ ปรับแผนการขนส่ง (1)
น้ำมันใส	4	4	-	512,550.00	-
ก๊าซ LPG	5	4	1	683,990.00	บริษัทฯ คลังปลายทางเต็ม (1)
ปูนซิเมนต์	20	15	5	594,820.00	บริษัทฯ ปรับแผนการขนส่ง (5)
สินค้าทั่วไป	8	7	1	256,260.00	การรถไฟฯ จำนวนรถพ่วงน้อย (1)
คอนเทนเนอร์ (ทั่วไป)	13	5	8	422,820.00	-บริษัทฯ ปรับแผนการขนส่ง (6) -บริษัทฯ ปริมาณสินค้าน้อย (2)
คอนเทนเนอร์ (อบ.-าพ.)	6	4	2	124,500.00	บริษัทฯ ปรับแผนการขนส่ง (2)
คอนเทนเนอร์ (ICD)	28	20	8	1,500,000.00	การรถไฟฯ ขบวนรถล่าช้าสะสม (8)
<b>รวม</b>	<b>94</b>	<b>68</b>	<b>26</b>	<b>5,453,500.00</b>	

หมายเหตุ. รายได้เฉลี่ยคอนเทนเนอร์ ICD และแหลมฉบัง เป็นรายได้ประมาณ

ภาพ 8.1 แสดงรายได้การเดินขบวนรถสินค้า ประจำวัน ที่มา : ฝ่ายบริการสินค้า การรถไฟฯ

จากภาพ 8.11 จะเห็นได้ว่าค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากความชำรุดของสลักปากขอพ่วงจะทำให้การรถไฟฯ มีค่าเสียโอกาส เป็นค่าระวาง ในการขนส่งสินค้า ถึงวันละ 2,085,148 บาท ซึ่งคำนวณจากรายได้ของรถเศรษฐกิจหลัก

### 8.5 ความเป็นไปได้

ผลสรุปที่ได้จากงานวิจัยนี้ เพื่อยืนยันในคุณภาพของสลักปากขอพ่วง และทราบสาเหตุการชำรุดที่แท้จริงอันนำไปสู่การกำหนดคุณสมบัติวัสดุที่เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM และ AAR และดำเนินการตัดปัจจัยภายนอกต่าง ๆ อันนำมาซึ่งความชำรุดของสลักปากขอพ่วง เพื่อให้ทางการนำไปใช้อ้างอิงในการจัดหาเพื่อทดแทน โดยทางผู้ทำการวิจัยจะทำรายงานเป็นบันทึกข้อความนำเสนอฝ่ายการพัสดุต่อไป อันนำไปสู่การลดต้นทุนการซ่อมบำรุงที่ยั่งยืนต่อไป

## 8.6 ข้อเสนอ

ในการซ่อมรถสินค้าและรถโดยสารของการรถไฟแห่งประเทศไทย มีส่วนประกอบหรืออะไหล่ที่ต้องจัดหาหลายรายการ ทั้งอะไหล่ซ่อมหมุนเวียน Unit Replacement และ อะไหล่ใช้แล้วหมดไป Consumable Parts คุณภาพของผลิตภัณฑ์ มีผลต่อระยะเวลาในการใช้งาน ไม่เกิดการ Breakdown ก่อนระยะเวลาวาระ ทั้งสิ้น ดังนั้น ในส่วนของอุปกรณ์ความปลอดภัยส่วนล่างของตัวรถหรือ แคร่ Bogie อื่นๆ จึงมีความจำเป็นต้องทำการหาจุดอ่อน จุดบกพร่อง ทั้งที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า Visual Check และ ที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าได้ เช่นเดียวกัน จึงจะทำให้การควบคุมค่าใช้จ่าย หรือ แม้แต่ลดค่าใช้จ่ายโดยการยืดระยะเวลาการซ่อมบำรุงออกไป โดยการนำเทคโนโลยีใหม่ๆ เข้ามาใช้ในการตรวจสอบ เพื่อยืนยันได้ว่าตัวรถระบบ Rolling Stock ต่าง ๆ ยังคงมีความสมบูรณ์ปลอดภัย และทำให้ผู้โดยสารเชื่อมั่น ในบริการของการรถไฟฯ



## เอกสารอ้างอิง

ดร.พลเทพ เวงสูงเนิน, กลศาสตร์วัสดุ (Mechanics of Materials), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

รศ.ดร.ชาวสวน กาญจน์รัมย์, 2550, กลศาสตร์ของแข็ง 2

ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ, 2555, กลศาสตร์ของวัสดุ, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สมชัย เถาสมบัติ, 2527, กลศาสตร์ของแข็ง (Mechanics of solids)

ชนะ กสิภาร, 2527, ความแข็งแรงของวัสดุ (Strength of Materials) พิมพ์ครั้งที่ 7

ศ.ดร. วรวิทย์ อึ้งภากรณ์, รศ.ชาญ ถนัดงาน, 2532, การออกแบบเครื่องจักรกล

น.อ.รศ.ภานุฤทธิ์ ยุกตะทัต, 2554, การออกแบบเครื่องจักรกล Mechanical Engineering Design

นคร จันทศร, หนังสือช่างรถไฟ

หนังสือคู่มือเทคนิครถไฟ การรถไฟแห่งประเทศไทย, 2538

แผนผังเลขที่ 3-PG5-1003 KNUCKLE PIN FOR AUTOMATIC COUPLER

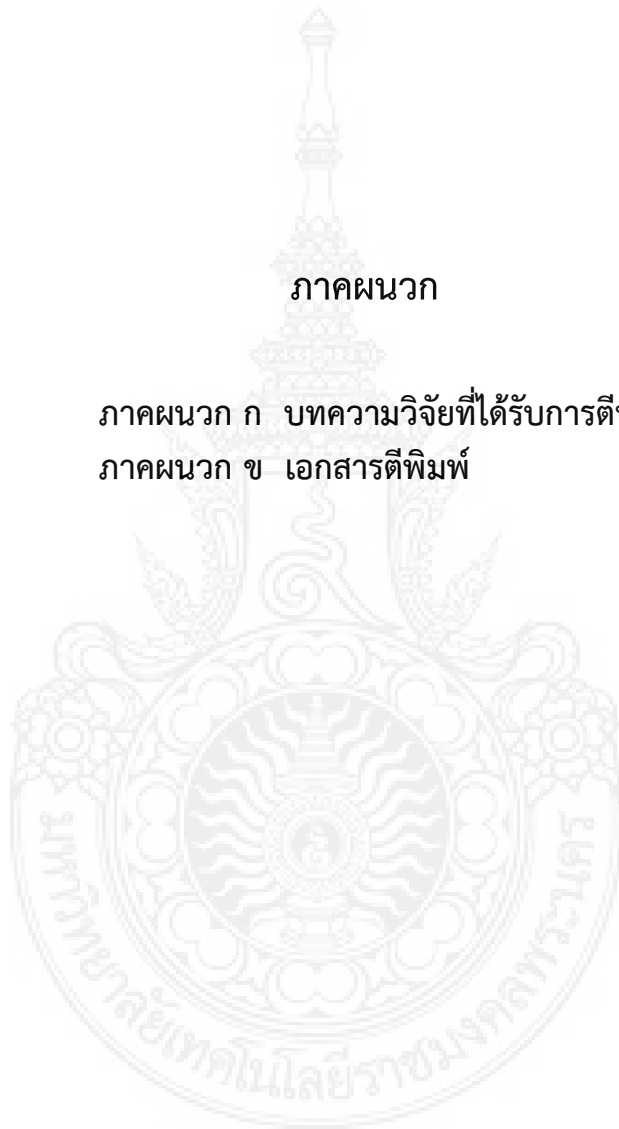
ASTM INTERNATIONAL Designation: E415-14 Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry

ASTM INTERNATIONAL Designation: E8/E 8M -08 Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials

AAR Manual of Standards and Recommended Practices Couplers and Freight Car Draft Components

ภาคผนวก

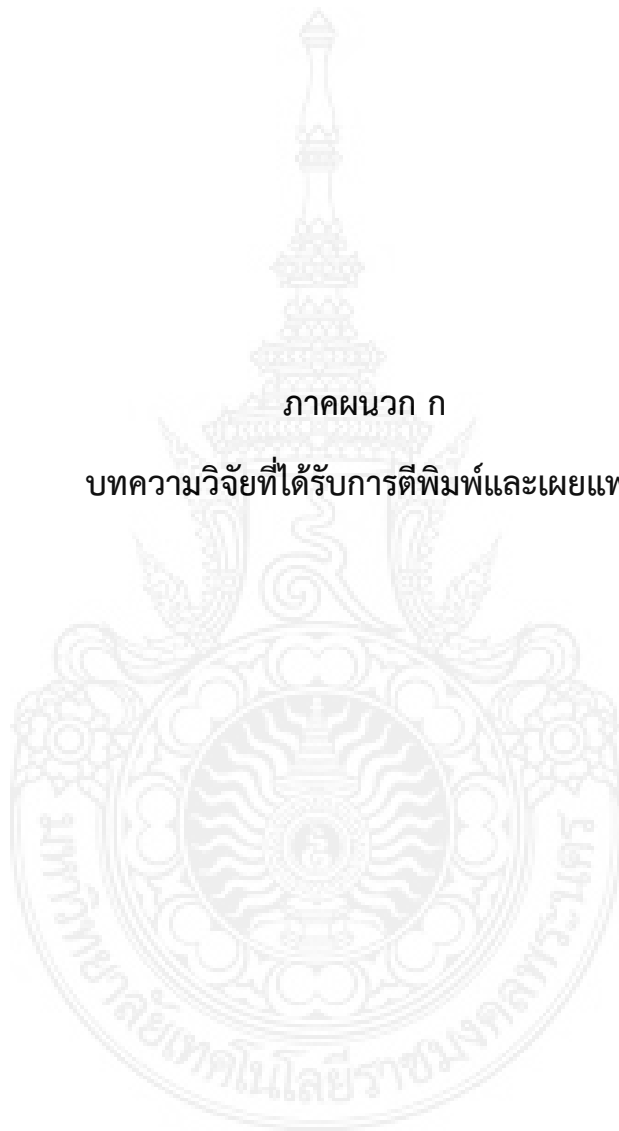
ภาคผนวก ก บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่  
ภาคผนวก ข เอกสารตีพิมพ์





ภาคผนวก ก

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่





ภาพ ก-1 เกียรติบัตร In The 5<sup>th</sup> Sustainable Industrial Innovation and Management Conference 2016 Held at Bangkok International Trade & Exhibition Centre

October 4<sup>th</sup>, 2016



ภาพ ก-2 หน้าปกเอกสารตีพิมพ์ The 5th Sustainable Industrial Innovation and Management Conference 2016

การประชุมวิชาการและการนำเสนอผลงานทางวิศวกรรม  
 นวัตกรรม และการจัดการอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืน  
 ครั้งที่ 5 ประจำปี 2559 ระหว่างวันที่ 3-4 ตุลาคม 2559  
 ณ ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทค บางนา กรุงเทพฯ

ภาคผนวก ข  
เอกสารตีพิมพ์



## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ นามสกุล นายอัศวิน มุ่งนากลาง

วัน เดือน ปีเกิด 20 เมษายน 2522

ภูมิลำเนา เลขที่ 858/3 ถนน นิคมมักกะสัน แขวง มักกะสัน เขต ราชเทวี  
จังหวัด กรุงเทพมหานคร 10400

### ประวัติการศึกษา

วุฒิการศึกษา	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ	เทคโนโลยีบางกะปิ	2541
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	วิทยาลัยเทคนิคดอนบอสโก	2543
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2555

### ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน

วิศวกรระดับ 6 กองซ่อมบำรุงรถสินค้าเขตบางซื่อ ศูนย์ซ่อมบำรุง ฝ่ายการช่างกล การรถไฟแห่งประเทศไทยเลขที่ 1 ถนน รongเมือง แขวง รongเมือง เขต ปทุมวัน จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10330

### ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ

The 5 Sustainable industrial Innovation and Management Conference 2016

การประชุมวิชาการและการนำเสนอผลงานทางวิศวกรรม นวัตกรรมและการจัดการอุตสาหกรรม  
อย่างยั่งยืน ครั้งที่ 5 ประจำปี 2559 ระหว่างวันที่ 3-4 ตุลาคม 2559 ณ ศูนย์นิทรรศการและการ  
ประชุมไบเทค บางนา กรุงเทพ ภายในงาน Eco Innovation and Solution 2016