

การศึกษาสมบัติทางกลและส่วนผสมทางเคมีของรอยเชื่อมเหล็กรางรถไฟ

Study of Mechanical Properties and Chemical Composition of Railway Weld Joint

ชนิตรา ดำรงกิจ¹, ใหม่ น้อยพิทักษ์^{2*}, วิบุญ ตั้งวโรตมณกุล¹ และ ไชยา คำคำ¹Chanitra Dumrongkij¹, Mai Noipitak^{2*}, Viboon Tangwarodomnukun¹ and Chaiya Dumkum¹¹ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถนนประชาธิปไตย เขตทุ่งครุ แขวงบางมด จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10140

² หน่วยวิจัยวัสดุและการทดสอบโดยไม่ทำลาย ศูนย์บริการทางการศึกษาราชบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

209 ตำบลรางบัว อำเภอบางแพ จังหวัดราชบุรี 70150

*E-mail: mai.noi@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติทางกล และส่วนผสมทางเคมีของผงเทอร์มิต 2 ยี่ห้อ เพื่อระบุส่วนผสมของผงเทอร์มิตที่เหมาะสมต่อการเชื่อมรางรถไฟในประเทศไทย โดยวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของผงเทอร์มิตด้วยวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยวิธีวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม โดยแบ่งชิ้นงานรอยเชื่อมออกเป็น 2 ส่วน สำหรับวิเคราะห์หลังการเชื่อมและหลังการให้ความร้อน จากนั้นนำชิ้นงานมาทดสอบความแข็ง ความต้านทานแรงดึง และโครงสร้างจุลภาค พบว่ารอยเชื่อมจากผงเทอร์มิตยี่ห้อ A มีค่าความแข็ง ค่าความต้านทานแรงดึงมากกว่ายี่ห้อ B โดยโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมคือเฟสเพิร์ลไลท์ และเฟอร์ไรท์ ซึ่งจากการทดสอบ พบว่าผงเทอร์มิตทั้ง 2 ยี่ห้อ มีสมบัติทางกลผ่านเกณฑ์การยอมรับของการรถไฟแห่งประเทศไทย อย่างไรก็ตาม หากต้องการงานเชื่อมที่มีคุณภาพดี และมีความสามารถในการเชื่อมที่สูงกว่า ควรเลือกผงเทอร์มิตยี่ห้อ A แม้ว่ายี่ห้อ B มีราคาถูกกว่า 100 บาทต่อ 1 กิโลกรัม แต่อาจมีโอกาสการเกิดโพรงอากาศในรอยเชื่อมได้มากกว่า

คำสำคัญ : กระบวนการเชื่อมเทอร์มิต, โครงสร้างจุลภาค, สมบัติทางกล, ส่วนผสมทางเคมี

Abstract

This research compared two brands of thermite powder to determine the most suitable one for use in the welding railway joint. The chemical composition of two thermite powder brands was determined using X-Ray Diffraction and Atomic Absorption Spectrometry. After welding, the specimen joint was cut in half, and one half underwent stress relief treatment while the other was characterized as it was. Hardness, tensile test and metallurgical structures were observed. The results showed that the thermite powder type A provides a harder weld

and greater tensile strength than type B. This analysis showed that perlite and ferrite phases were found in both samples. Overall, our results showed that both thermite powder brands provide mechanical properties, microstructure and chemical composition within the acceptable range of the State Railway of Thailand. The thermite powder brand A was, however, able to provide higher quality and better welding ability than brand B which caused more porosity and cavitation in the weld than brand A. Brand B is 100 baht per kilogram cheaper than A.

Keywords : Thermit Welding, Microstructure, Mechanical Properties, Chemical Composition

1. บทนำ

การคมนาคม และการขนส่งเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาประเทศ และยกระดับคุณภาพชีวิตของประชาชน ซึ่งตามแผนยุทธศาสตร์ของกระทรวงคมนาคม ฉบับที่ 11 มุ่งเน้นการพัฒนาระบบรางในการขนส่งมวลชน การบริหารจัดการระบบการขนส่งสินค้าและบริการ เพื่อการเชื่อมโยงระหว่างภูมิภาคอาเซียน ต้อนรับการเข้าสู่ AEC ทำให้ต้องขยาย และปรับปรุงทางรถไฟเพิ่มขึ้น [1] โดยการก่อสร้างทางรถไฟใช้เหล็กรางรถไฟมาต่อดัดกันโดยวิธีการเชื่อม ซึ่งกระบวนการเชื่อมที่นิยมใช้คือการเชื่อมเทอร์มิต (Thermit welding) โดยมีผงเทอร์มิตเป็นตัวช่วยประสาน จึงทำให้ผงเทอร์มิตเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลถึงสมบัติทางกล และโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม ซึ่งผู้ผลิตมักไม่เปิดเผยข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับส่วนผสมทางเคมีและปริมาณธาตุต่างๆ เนื่องจากเหตุผลทางด้านการค้า ทำให้ไม่มีข้อมูลในการศึกษาเพื่อพัฒนาผงเทอร์มิต

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า Rajanna [2] ได้ศึกษาเกี่ยวกับ ผลกระทบของการเชื่อมรางรถไฟด้วยกระบวนการเชื่อมเทอร์มิตที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล โดยทำการศึกษาเหล็กรางรถไฟที่ใช้งานจริงในประเทศอินเดีย

มาทำการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กรางรถไฟที่ผ่านการเชื่อมเทอร์มิตระหว่างชิ้นงานที่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อมกับชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมพบว่าเหล็กรางรถไฟที่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมมีสมบัติทางกลสูงกว่าเหล็กที่ไม่ได้ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม เนื่องจากการลดความเค้นตกค้างในรอยเชื่อม และในส่วนอื่นๆ ซึ่งชิ้นงานที่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมมีค่าความแข็งโดยรวมต่ำกว่า และมีเกรนที่ละเอียดกว่า ส่วน Sidki และคณะ [3] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเปรียบเทียบสมบัติทางกล และโครงสร้างจุลภาคระหว่างเหล็กรางรถไฟและรอยเชื่อมของเหล็กรางรถไฟ โดยการเชื่อมเทอร์มิต พบว่าความแข็งของโลหะฐานน้อยกว่าความแข็งของบริเวณรอยเชื่อม ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามหลักการการเย็นตัวของวัสดุ เนื่องจากกระบวนการเชื่อม มีการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ทำให้รอยเชื่อมมีความแข็งมากกว่า และเมื่อทดสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่าเกรนของเนื้อเหล็กมีความละเอียด และเกรนของรอยเชื่อมมีความหยาบกว่า ทำให้บริเวณรอยเชื่อมมีความเปราะมากกว่าบริเวณโลหะฐานของเหล็กรางรถไฟ ซึ่งการทดลองนี้ได้ทดสอบเพียงแค่สมบัติความแข็ง แต่ไม่ได้ทดลองสมบัติของโลหะในด้านอื่นๆ ทำให้ผลที่ออกมายังไม่สามารถปรับปรุง

หรือพัฒนาเกี่ยวกับการเชื่อมรางรถไฟได้อย่างสมบูรณ์

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมรางรถไฟด้วยกระบวนการเชื่อมเทอร์มิตมักทำการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกลของเหล็กรางรถไฟและเหล็กรางรถไฟที่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมเท่านั้น โดยยังไม่ได้มีการนำเสนอถึงส่วนผสมของผงเทอร์มิตซึ่งรอยเชื่อมที่เกิดจากการใช้ผงเทอร์มิตแต่ละยี่ห้ออาจมีส่วนผสมทางเคมีที่แตกต่างกัน อาจทำให้สมบัติของรอยเชื่อมมีความแตกต่างกันด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาส่วนผสมของผงเทอร์มิต เพื่อทราบถึงคุณสมบัติของผงเทอร์มิตที่อาจส่งผลต่อสมบัติของรอยเชื่อมโดยนำผงเทอร์มิต 2 ยี่ห้อที่มีขายอยู่ตามท้องตลาดมาทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบส่วนผสม โดยหวังว่างานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นแนวทางในการเลือกใช้ผงเทอร์มิตที่คุ้มค่ากับการใช้งานมากที่สุด และยังเป็นข้อมูลพื้นฐานให้ผู้สนใจนำไปศึกษาต่อยอดให้เกิดประโยชน์สูงสุด เพื่อปรับปรุงพัฒนาส่วนผสมของผงเทอร์มิตให้มีประสิทธิภาพ และเหมาะสมกับการใช้งานของประเทศไทย

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้ผงเทอร์มิตที่มีขายในท้องตลาด 2 ยี่ห้อ คือ A และ B เตรียมเหล็กรางรถไฟชนิดเดียวกับที่การรถไฟแห่งประเทศไทยใช้คือ BS100 (น้ำหนัก 100 ปอนด์/1 หลา) จากนั้นเชื่อมเหล็กรางรถไฟด้วยกระบวนการเชื่อมเทอร์มิต โดยใช้ผงเทอร์มิต 2 ยี่ห้อ โดยมีรายละเอียดการวิจัยดังนี้

2.1 การวิเคราะห์ส่วนผสมและปริมาณธาตุของผงเทอร์มิต 2 ยี่ห้อ

การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีและโครงสร้างเฟสของผงเทอร์มิตใช้เทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) โดยการแยกสารผสมในผงเทอร์มิตที่มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกัน เช่น ลักษณะเกร็ด และลักษณะผง แล้วนำไปวิเคราะห์ จากนั้นนำข้อมูลรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD pattern) มาเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) และนำผงเทอร์มิตไปวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยวิธีการดูดกลืนแสงของอะตอม (Atomic Absorption Spectrophotometer) โดยทำการย่อยสลายผงเทอร์มิต เพื่อให้อยู่ในสถานะของสารละลาย ด้วยเครื่องย่อยสลายและสกัดสารตัวอย่าง (Microwave digestion) เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ปริมาณธาตุในรูปแบบของสารละลายได้ [4, 5]

จากนั้นวิเคราะห์หาธาตุที่เป็นส่วนผสมทางเคมีของเนื้อโลหะที่ได้จากการหลอมเหลวผงเทอร์มิตบริเวณรู้นจากการเชื่อมด้วยวิธีสเปกโทรสโกปี (Spectroscopy) ซึ่งวิธีนี้มีข้อจำกัดคือไม่สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผงได้ โดยการวิเคราะห์หาธาตุจากบริเวณรู้นทำให้ทราบส่วนผสมทางเคมีของเนื้อโลหะเชื่อม เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการเลือกวิเคราะห์หาปริมาณธาตุของเนื้อโลหะเชื่อมด้วยวิธีการวัดการดูดกลืนแสงของอะตอมซึ่งเป็นวิธีที่สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผงได้ โดยการตัดเนื้อโลหะเชื่อมบางส่วนมาทำการย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายและสกัดสารตัวอย่าง เพื่อทำให้อยู่ในลักษณะของสารละลาย

2.2 การเตรียมชิ้นงานเชื่อมและชิ้นงานทดสอบ

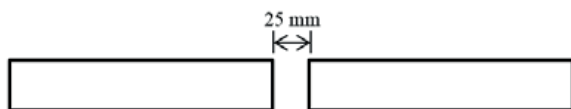
งานวิจัยนี้ใช้เหล็กรางรถไฟที่การรถไฟแห่งประเทศไทยใช้อยู่ในปัจจุบันคือ BS100 ทำการ

ทดสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยวิธีสเปกโทรสโกปีโดยมีส่วนผสมทางเคมีแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กรางรถไฟ BS100

| Rail steel | %Chemical Composition | | | | | | | | | | |
|------------|-----------------------|-------|-------|---|-------|-------|-------|-------|----|-------|--------|
| | C | Mn | Si | P | S | Cr | Mo | Ni | Al | Cu | Fe |
| Avg. | 0.720 | 0.860 | 0.230 | - | 0.010 | 0.040 | 0.001 | 0.022 | - | 0.009 | 97.980 |

จากตารางที่ 1 พบว่า ตรวจไม่พบฟอสฟอรัส (P) และอลูมิเนียม (Al) และเหล็กรางรถไฟดังกล่าว นั้นเป็นไปตามมาตรฐานของเหล็กรางรถไฟ BS100 และมีส่วนผสมทางเคมีเป็นไปตามมาตรฐาน UIC 860 เกรด 900 A จากนั้นเตรียมชิ้นงานสำหรับ กระบวนการเชื่อมเทอร์มิต โดยใช้เหล็กรางรถไฟยาว ท่อนละประมาณ 1 เมตร วางบนหมอนรางรถไฟ เว้น ระยะรอยต่อประมาณ 25 มิลลิเมตร และเผื่อระยะรั้ง กลับไว้ที่ 15 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 1 และรูปที่ 2 เชื่อม



รูปที่ 1 การเว้นระยะห่างของรอยต่อเหล็กรางรถไฟ

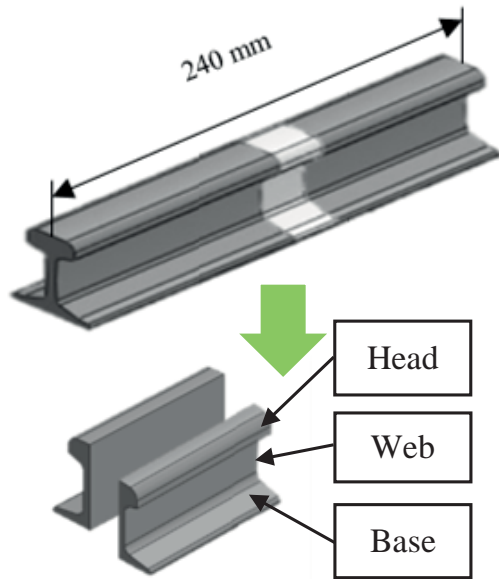
ให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 600 - 650 °C [6] ซึ่งระยะเวลาในการอบขึ้นอยู่กับความหนา ของชิ้นงาน โดยความหนา 1 นิ้ว ใช้เวลาในการอบ 1 ชั่วโมง และทำการทดสอบสมบัติทางกลทั้ง 3 ตำแหน่ง

ชิ้นงานโดยใช้ผงเทอร์มิตยี่ห้อ คือ A และ B จากนั้น เตรียมชิ้นงานทดสอบโดยตัดเหล็กรางรถไฟให้รอย เชื่อมอยู่บริเวณกึ่งกลางให้ชิ้นงานมีความยาว 240 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3 โดยแบ่งชิ้นงานทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 นำไปทดสอบโครงสร้างจุลภาคและ สมบัติทางกลโดยไม่ผ่านการให้ความร้อนหลังการ เชื่อม (As-welded) ส่วนที่ 2 นำไปให้ความร้อนหลัง การเชื่อม (Post weld heat treatment) จากนั้น นำไปทดสอบโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล



รูปที่ 2 การตั้งระยะเผื่อการรั้งตัวกลับของเหล็กรางรถไฟ

ได้แก่ หัวรางรถไฟ (Head) เอวรางรถไฟ (Web) และ ฐานรางรถไฟ (Base) แต่การทดสอบโครงสร้าง จุลภาคนั้นทำการทดสอบเพียง 2 ตำแหน่ง คือ เอว รางรถไฟ และฐานรางรถไฟ



รูปที่ 3 ขนาดของชิ้นงานทดสอบ

2.3 การทดสอบโครงสร้างจุลภาค

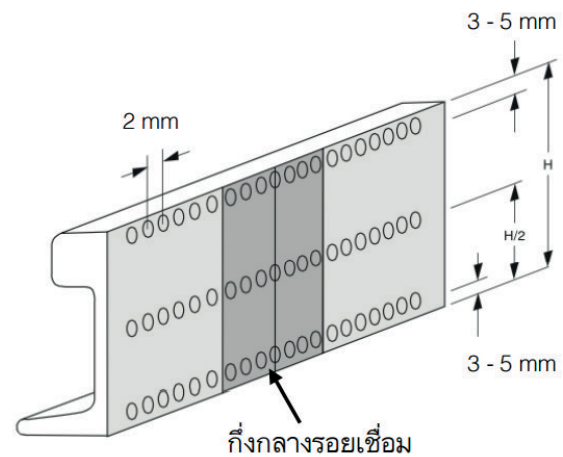
การทดสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม เหล็กรางรถไฟที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมเทอร์มิต เป็นการทดสอบชิ้นงานที่ตำแหน่งเอวรางรถไฟและฐานรางรถไฟ ใช้กรด Nital 4% ในการกัดเพื่อดูโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 100 เท่า ในบริเวณรอยเชื่อม (Weld metal) และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) โดยต้องไม่พบโครงสร้างเบนไนท์ (Bainite) หรือมาร์เทนไซต์ (Martensite) ซึ่งอ้างอิงจากมาตรฐาน EN 14587-2:2009 (E) [7] และเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของเหล็กรางรถไฟที่ผ่านการเชื่อมด้วยผงเทอร์มิตยี่ห้อ A และ B ทั้งที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมและผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม

2.4 การทดสอบสมบัติทางกล

2.4.1 การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็ง (Hardness test) โดยใช้การวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ ใช้หัวกดเพชรรูปปิระมิดฐานสี่เหลี่ยม และใช้โหลดขนาด 30 กิโลกรัม

ตามมาตรฐาน EN ISO 6507-1 [7] กดลงบนบริเวณภาพตัดขวางของชิ้นงานทดสอบ ทำการทดสอบทั้ง 3 ตำแหน่ง ได้แก่ หัวรางรถไฟ เอวรางรถไฟ และฐานรางรถไฟ ซึ่งทั้ง 3 ส่วนจะทำการวัดเปรียบเทียบกับระหว่างชิ้นงานที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม และผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม เป็นระยะทั้งหมด 200 มิลลิเมตร โดยวัดจากกึ่งกลางรอยเชื่อมออกไปข้างละ 100 มิลลิเมตร และมีระยะห่างของจุดกดวัดค่าความแข็งอยู่ที่ 2 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 บริเวณที่ทำการวัดความแข็ง [8]

2.4.2 การทดสอบความต้านแรงดึง

การทดสอบความต้านแรงดึง (Tensile test) อ้างอิงจากมาตรฐาน UIC 860-0 ตัดแบ่งชิ้นงานที่ตำแหน่งหัวรางรถไฟ โดยทดสอบแรงดึงจนกระทั่งชิ้นงานขาดออกจากกัน จากนั้นเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างผงเทอร์มิตยี่ห้อ A และยี่ห้อ B ทั้งที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม และผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม

3. ผลการวิจัย

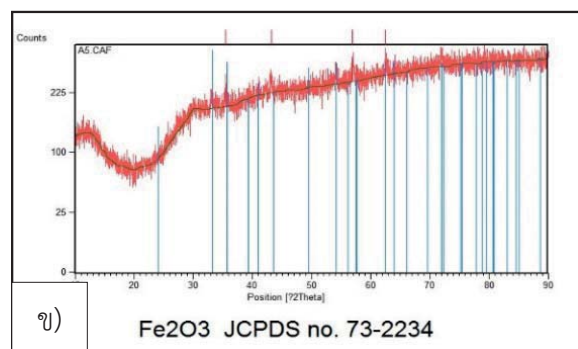
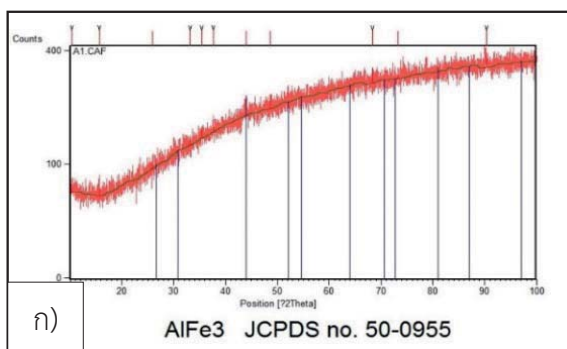
3.1 ผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของธาตุผสมเทอร์มิต 2 ยี่ห้อ

จากการวิเคราะห์ส่วนผสมของผงเทอร์มิต 2 ยี่ห้อ ด้วย 3 วิธีคือ การวิเคราะห์ธาตุผสมด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ วิเคราะห์ปริมาณธาตุผสมด้วยวิธีสเปกโทรสโคปี (จากเนื้อโลหะที่ได้จากการหลอมละลายผงเทอร์มิต) และวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยวิธีการดูดกลืนแสงของอะตอม

3.1.1 ผลการวิเคราะห์ธาตุผสมในผงเทอร์มิตด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction)

จากการวิเคราะห์โครงสร้างเฟสของสารผสม (Mixtures) ในผงเทอร์มิตยี่ห้อ A และ B โดยมีตัวอย่างผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 5 สำหรับผงเทอร์มิตยี่ห้อ A พบว่าประกอบด้วย สารประกอบอลูมิเนียม-

เหล็ก (AlFe_3) เหล็ก (Fe) อลูมิเนียม และสารประกอบเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ส่วนผลการวิเคราะห์โครงสร้างเฟสของสารผสมผงเทอร์มิตยี่ห้อ B พบว่ามีอลูมิเนียมโลหะผสมเหล็ก-นิกเกิล (Fe-Ni) คาร์บอน (C) สารประกอบของเหล็กออกไซด์ ($\text{Mg}_{0.40}\text{Cu}_{0.10}\text{Zn}_{0.50}\text{Fe}_2\text{O}_4$) และเหล็ก ผงเทอร์มิตทั้งสองยี่ห้อ มีโครงสร้างเฟสของสารผสมที่แตกต่างกัน และจากการวิเคราะห์พบว่าโลหะอลูมิเนียมเป็นส่วนผสมสำคัญในผงเทอร์มิตทั้งสองชนิด เนื่องจากอลูมิเนียม ถูกใช้เป็นตัวรีดิวซ์ในการเกิดปฏิกิริยาเทอร์มิต ซึ่งเปลี่ยนสารประกอบเหล็กออกไซด์ให้เป็นเนื้อเชื่อมเหล็กในกระบวนการเชื่อมเทอร์มิต นอกจากนั้นแล้ว โครงสร้างเฟสที่แตกต่างกันของของผสมในผงเทอร์มิตทั้งสองชนิด อาจส่งผลให้ปริมาณเนื้อเชื่อมเหล็กจากการใช้ผงเทอร์มิตทั้งสองมีความแตกต่างกัน



รูปที่ 5 ตัวอย่างวิเคราะห์โครงสร้างเฟสของสารผสมในผงเทอร์มิตด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ก) ผงเทอร์มิตยี่ห้อ A

ข) ผงเทอร์มิตยี่ห้อ B

ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีของรูลันจากการเชื่อมของผงเทอร์มิตยี่ห้อ A และ B

| ยี่ห้อ | %Chemical Composition | | | | | | | | | | | |
|--------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | C | Mn | Si | P | S | Cr | Mo | Ni | Al | Cu | V | Fe |
| A | 0.530 | 1.120 | 0.570 | 0.030 | 0.007 | 0.150 | 0.030 | 0.060 | 0.240 | 0.040 | 0.100 | 97.030 |
| B | 0.560 | 0.620 | 0.270 | 0.050 | 0.207 | 0.020 | 0.150 | 0.010 | 0.010 | 0.010 | 0.010 | 97.980 |

3.1.2 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเนื้อโลหะที่ได้จากการหลอมเหลวผงเทอร์มิตบริเวณรูลันด้วยวิธีสเปกโทรสโคปี

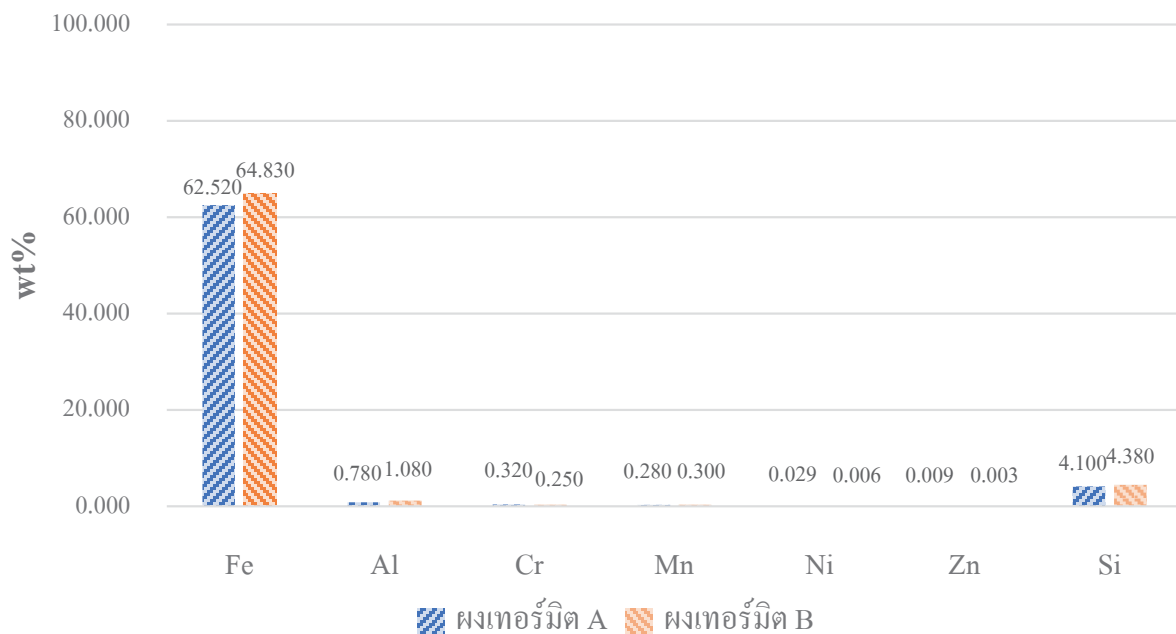
จากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเนื้อโลหะที่ได้จากการหลอมเหลวผงเทอร์มิตบริเวณรูลันโดยใช้ผงเทอร์มิต 2 ยี่ห้อ ด้วยวิธีสเปกโทรสโคปีพบว่ามีส่วนผสมทางเคมี ดังตารางที่ 2 ซึ่งในหลักตารางไฟไม่พบธาตุฟอสฟอรัส และอลูมิเนียม แต่ส่วนผสมทางเคมีที่ได้จากรอยเชื่อมนี้ตรวจพบธาตุฟอสฟอรัส และอลูมิเนียม และมีปริมาณของธาตุซิลเฟอร์ (S) อลูมิเนียม และวานาเดียม (V) ที่แตกต่างกัน

ซึ่งผงเทอร์มิตยี่ห้อ B ให้การเติมเนื้อโลหะเชื่อมที่ดีกว่าผงเทอร์มิตยี่ห้อ A เนื่องจากมีปริมาณเหล็กมากกว่าผงเทอร์มิตยี่ห้อ A อยู่เล็กน้อย และผง

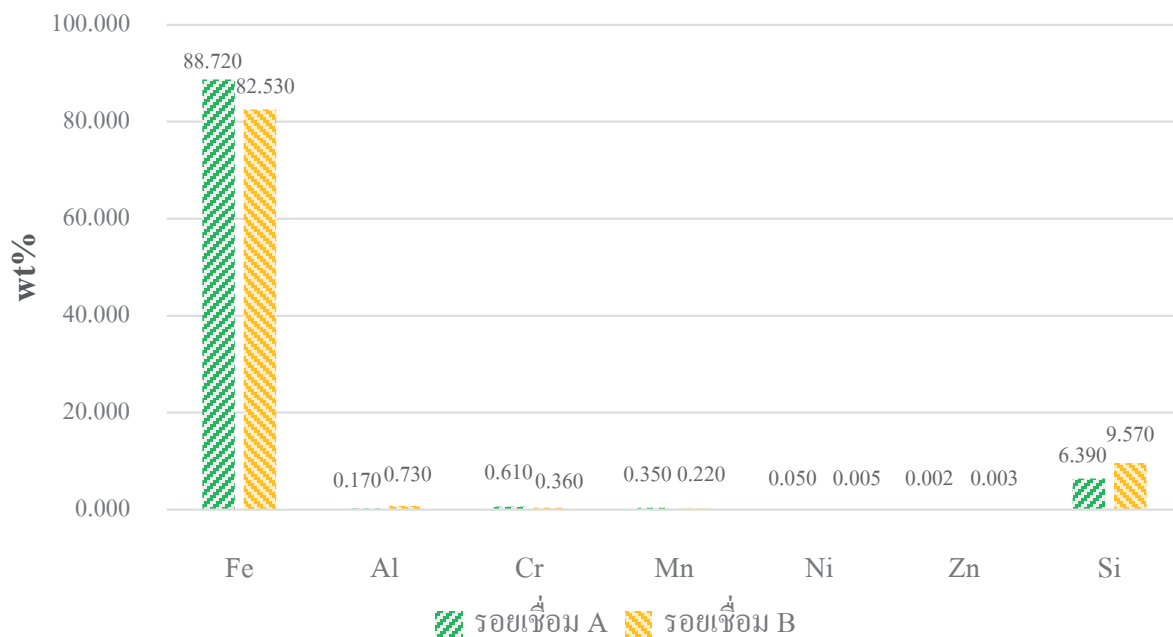
เทอร์มิตยี่ห้อ A มีปริมาณของโครเมียม (Cr) และวานาเดียมมากกว่าผงเทอร์มิตยี่ห้อ B ซึ่งธาตุโครเมียม ช่วยเพิ่มความต้านทานแรงดึง ส่วนธาตุวานาเดียม ช่วยให้เกรนมีความละเอียดมากขึ้น ส่งผลให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันผงเทอร์มิตยี่ห้อ B มีปริมาณซิลเฟอร์อยู่สูง ซึ่งเป็นสารมลทินส่งผลต่อสมบัติทางกลของรอยเชื่อมให้มีคุณภาพแย่ ทำให้ชิ้นงานเปราะและหักง่าย

3.1.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุผสมด้วยวิธีการวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม

จากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของผงเทอร์มิต 2 ยี่ห้อ ด้วยวิธีการวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม พบว่ามีปริมาณธาตุผสมในผงเทอร์มิตและปริมาณธาตุผสมในรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมเทอร์มิตดังรูปที่ 7 และรูปที่ 8



รูปที่ 7 wt% ของปริมาณธาตุที่อยู่ในผงเทอร์มิตยี่ห้อ A และ B



รูปที่ 8 wt% ของปริมาณธาตุที่อยู่ในรอยเชื่อมที่ใช้ผงเทอร์มิตยี่ห้อ A และ B

เมื่อวิเคราะห์ปริมาณธาตุ พบว่าหลังการเชื่อม ปริมาณธาตุของผงเทอร์มิตยี่ห้อ A มี เหล็ก โครเมียม แมงกานีส (Mn) นิกเกิล (Ni) และซิลิกอน (Si) ที่อยู่ในรอยเชื่อมเพิ่มขึ้น และมีปริมาณธาตุอลูมิเนียม และสังกะสี (Zn) ในรอยเชื่อมลดลง ส่วนปริมาณของผงเทอร์มิตยี่ห้อ B เมื่อทำการเชื่อมแล้วพบว่าปริมาณธาตุเหล็ก โครเมียม และซิลิกอน ที่อยู่ในรอยเชื่อมเพิ่มมากขึ้น แต่มีปริมาณธาตุอลูมิเนียม แมงกานีส และนิกเกิล ลดลง และมีปริมาณธาตุสังกะสีเท่าเดิม แสดงว่าปริมาณธาตุที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการแพร่เข้ามาของธาตุที่อยู่ในเหล็กรางรถไฟ ส่วนสาเหตุที่ทำการเชื่อมแล้วทำให้ปริมาณของธาตุลดลงเนื่องจากธาตุรวมตัวกับสารมลทินเป็นตะกั่วลอยขึ้นสู่บริเวณเหนือแนวเชื่อม

จากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยวิธีต่างๆ พบว่าผงเทอร์มิตยี่ห้อ A มีปริมาณธาตุโครเมียม และวาเนเดียม มากกว่าผงเทอร์มิตยี่ห้อ B ส่งผลให้รอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยผงเทอร์มิตยี่ห้อ A มีความ

ต้านทานแรงดึง และมีเกรนที่ละเอียดมากกว่า ส่วนผงเทอร์มิตยี่ห้อ B มีปริมาณธาตุซิลิกอนมากกว่าผงเทอร์มิตยี่ห้อ A ค่อนข้างสูง หากบริเวณโลหะฐานมีปริมาณซิลิกอนมากทำให้มีเกรนที่หยาบ [9] ซึ่งเมื่อดูจากผลการทดลอง เกรนของรอยเชื่อมผงเทอร์มิตยี่ห้อ A ที่มีความละเอียด ส่งผลให้ความแข็งแรงสูงกว่ารอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยผงเทอร์มิตยี่ห้อ B

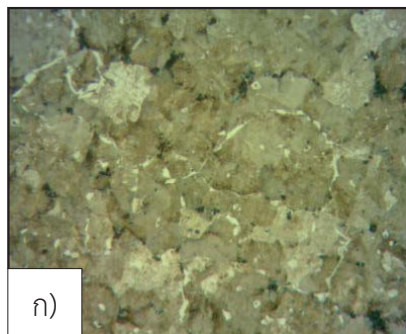
3.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมจากผงเทอร์มิต 2 ยี่ห้อ

ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการเชื่อมด้วยผงเทอร์มิตยี่ห้อ A และยี่ห้อ B มีโครงสร้างเพิร์ลไลท์เป็นส่วนใหญ่ และมีโครงสร้างเป็นเฟอร์ไรต์อยู่ตามขอบเกรน ดังรูปที่ 9 เนื่องจากมีอัตราการเย็นตัวต่ำ [6] ซึ่งเป็นผลมาจากการให้ความร้อนก่อนเชื่อมที่ค่อนข้างนาน ทำให้เกิดการแข็งตัวก่อนที่จะเป็นโครงสร้างเบนไนท์ และมาร์เทนไซด์ โดยโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน

ของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการเชื่อมด้วยผงเทอร์มิตทั้ง ยี่ห้อ A และยี่ห้อ B นั้นไม่พบโครงสร้างเบนไนท์ หรือ มาร์เทนไซต์ที่กำลังขยาย 100 เท่า ซึ่งเป็นไปตาม มาตรฐาน EN 14587-2:2009 (E) [7] ที่ได้กำหนดไว้ โดยชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยผงเทอร์มิตยี่ห้อ A นั้น มีเกรนที่ละเอียดกว่าชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยผง เทอร์มิตยี่ห้อ B อีกทั้งยังมีเฟอร์ไรต์ตามขอบเกรนที่ น้อยกว่าซึ่งเป็นผลให้ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยผง เทอร์มิตยี่ห้อ A มีค่าความแข็งที่มากกว่า และเมื่อ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคร่วมกับส่วนผสมในผง เทอร์มิต พบว่าผงเทอร์มิตยี่ห้อ A นั้นมีปริมาณ ซิลิกอนที่ต่ำกว่า ส่งผลให้ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วย ผงเทอร์มิตยี่ห้อ B มีเกรนที่หยาบและมีความแข็ง น้อยกว่า

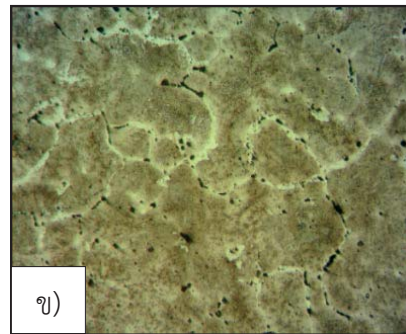
สำหรับการให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่ อุณหภูมิ 650 °C นั้นมีสมมติฐานมาจากการคาดว่า บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนมีโครงสร้าง

เป็นมาร์เทนไซต์ แต่จากการทดลองพบว่าโครงสร้าง จุลภาคไม่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากบริเวณที่ได้รับ ผลกระทบจากความร้อนไม่ได้มีโครงสร้างเป็น มาร์เทนไซต์แต่มีโครงสร้างเป็นเพิร์ลไลต์ปกติ การให้ ความร้อนหลังการเชื่อมนั้นไม่มีผลต่อโครงสร้าง จุลภาคของเหล็กแรงกล้าไฟที่ผ่านการเชื่อมด้วยผง เทอร์มิตทั้งยี่ห้อ A และ B แต่ส่งผลต่อความเค้น ภายในชิ้นงานที่ลดลงโดยดูได้จากความแข็งที่ลดลง โดยในบริเวณโลหะฐานและบริเวณที่ได้รับผลกระทบ ทางความร้อนมีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกันแต่ใน บริเวณรอยเชื่อมของผงเทอร์มิตยี่ห้อ A มีความแข็ง มากกว่าผงเทอร์มิตยี่ห้อ B เล็กน้อย ดังนั้นการให้ ความร้อนหลังการเชื่อมจึงเพียงช่วยให้โครงสร้างมี รายละเอียดและความชัดเจนที่มากขึ้น โดยมีเกรนที่ ใหญ่และหยาบมากขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งสัมพันธ์กับ ค่าความแข็งที่มีค่าลดลงที่วัดได้หลังการให้ความร้อน หลังการเชื่อม



รูปที่ 9 โครงสร้างจุลภาคที่ของผงเทอร์มิตบริเวณรอยเชื่อมที่กำลังขยาย 100 เท่า

ก) ผงเทอร์มิตยี่ห้อ A



ข) ผงเทอร์มิตยี่ห้อ B

3.3 ผลการทดสอบทางกล

3.3.1 การทดสอบวัดความแข็งวิกเกอร์ (Vickers hardness test)

ค่าความแข็งทั้ง 3 ส่วนของรางรถไฟคือส่วน หัวรางรถไฟ เอวรางรถไฟ และฐานรางรถไฟ ที่ผ่าน

การเชื่อมด้วยผงเทอร์มิตยี่ห้อ A พบว่าบริเวณที่ได้รับ ผลกระทบจากความร้อนมีความแข็งมากกว่าบริเวณ รอยเชื่อมและโลหะฐาน และเมื่อผ่านการให้ความ ร้อนหลังการเชื่อมจะส่งผลให้ความแข็งทั้ง 3 ส่วนลด ลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการให้ความร้อนหลังการ

เชื่อมส่งผลให้ความเค้นตกค้างภายในชิ้นงานถูกขจัดออกไป และจากมาตรฐาน EN ISO 6507-1 [7] ที่การรถไฟแห่งประเทศไทยใช้ มีข้อกำหนดว่าความแข็งของรอยเชื่อมกับโลหะฐานต้องต่างกันไม่เกิน 30 เปอร์เซ็นต์

โดยเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมกับโลหะฐานของผงดัดขึ้นที่ A ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 3 ซึ่งพบว่าไม่เกิน 30 เปอร์เซ็นต์ตามที่มาตรฐานกำหนด

ส่วนค่าความแข็งของรางรถไฟที่ผ่านการเชื่อมด้วยผงดัดขึ้นที่ B พบว่าบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนมีความแข็งมากกว่าบริเวณรอยเชื่อมและโลหะฐาน และเมื่อผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมจะส่งผลให้ความแข็งทั้ง 3 ส่วนลดลงเช่นเดียวกันกับชิ้นงานที่เชื่อมด้วยผงดัดขึ้นที่ A โดยเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมกับโลหะฐานของผงดัดขึ้นที่ B ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 4 ซึ่งพบว่าไม่เกิน 30 เปอร์เซ็นต์ตามที่มาตรฐานกำหนด

ตารางที่ 3 ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมกับโลหะฐานของผงดัดขึ้นที่ A

| ชิ้นงานที่เชื่อมด้วยผงดัดขึ้นที่ A | | | โลหะฐาน | รอยเชื่อม | ความต่างของความแข็ง (%) |
|------------------------------------|------|-----------------|---------|-----------|-------------------------|
| ค่าเฉลี่ยความแข็ง (HV30) | Head | ก่อนให้ความร้อน | 278.60 | 278.10 | 0.17% |
| | | หลังให้ความร้อน | 255.30 | 269.90 | 5.40% |
| | Web | ก่อนให้ความร้อน | 288.40 | 292.80 | 1.50% |
| | | หลังให้ความร้อน | 251.10 | 285.10 | 11.90% |
| | Base | ก่อนให้ความร้อน | 281.55 | 297.30 | 5.30% |
| | | หลังให้ความร้อน | 254.05 | 261.20 | 2.70% |

ตารางที่ 4 ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมกับโลหะฐานของผงดัดขึ้นที่ B

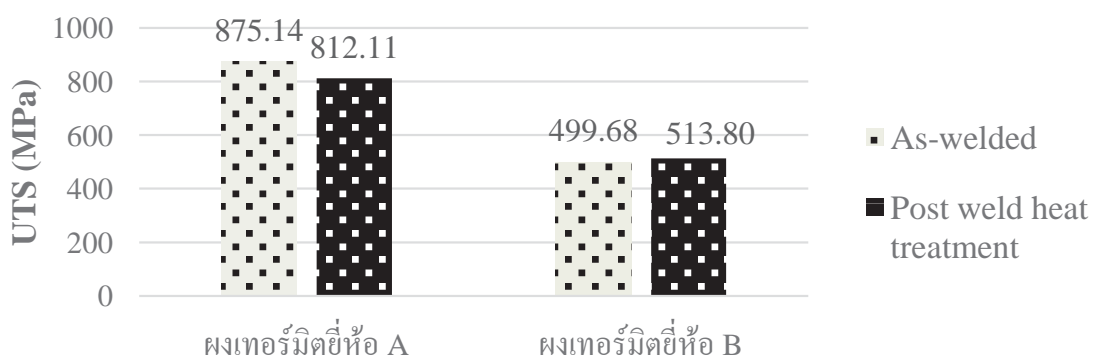
| ชิ้นงานที่เชื่อมด้วยผงดัดขึ้นที่ B | | | โลหะฐาน | รอยเชื่อม | ความต่างของความแข็ง (%) |
|------------------------------------|------|-----------------|---------|-----------|-------------------------|
| ค่าเฉลี่ยความแข็ง (HV30) | Head | ก่อนให้ความร้อน | 268.10 | 244.90 | 8.65% |
| | | หลังให้ความร้อน | 249.65 | 221.00 | 11.47% |
| | Web | ก่อนให้ความร้อน | 282.10 | 212.80 | 24.56% |
| | | หลังให้ความร้อน | 252.50 | 204.30 | 19.10% |
| | Base | ก่อนให้ความร้อน | 302.25 | 257.30 | 14.87% |
| | | หลังให้ความร้อน | 258.35 | 207.90 | 19.52% |

ความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยผงเทอร์มิตยี่ห้อ A และ B พบว่าค่าความแข็งแรงในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน และบริเวณโลหะฐาน มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ในบริเวณรอยเชื่อมของทั้ง 3 บริเวณมีความแตกต่างกันโดยเฉลี่ย 17.50% โดยส่วนของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยผงเทอร์มิตยี่ห้อ A มีความแข็งแรงมากกว่าผงเทอร์มิตยี่ห้อ B ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะความแตกต่างกันของปริมาณธาตุที่อยู่ในผงเทอร์มิตและอัตราการเย็นตัวของรอยเชื่อมในกระบวนการเชื่อม เช่น ปริมาณธาตุ หากมีการผสมในเนื้อเหล็กมากจะส่งผลให้เกรนมีความหยาบ จึงส่งผลถึงค่าความแข็งแรงของชิ้นงาน เพราะจากผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยวิธีวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม พบว่าในบริเวณรอยเชื่อมของผง

เทอร์มิต A มีปริมาณซิลิกอน อยู่ที่ 6.39% ส่วนบริเวณรอยเชื่อมของผงเทอร์มิตยี่ห้อ B มีปริมาณซิลิกอนอยู่ที่ 9.57% ซึ่งแตกต่างกันมากจึงเป็นสาเหตุให้ลักษณะเกรนของรอยเชื่อมของผงเทอร์มิตยี่ห้อ B มีความหยาบกว่ารอยเชื่อมของผงเทอร์มิตยี่ห้อ A

3.3.2 การทดสอบแรงดึง

สำหรับการใช้งานจริงไม่ได้มีการระบุถึงค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบแรงดึงเพื่อต้องการศึกษาถึงค่าความต้านแรงดึงเฉลี่ยของเหล็กแรงกล้าไฟที่ผ่านการเชื่อมด้วยผงเทอร์มิต 2 ยี่ห้อ ทั้งที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมและผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมแสดงดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ค่าความต้านแรงดึงเฉลี่ยของเหล็กแรงกล้าไฟที่ผ่านการเชื่อมด้วยผงเทอร์มิต 2 ยี่ห้อ

จากรูปที่ 10 พบว่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยผงเทอร์มิต B มีค่าต่ำกว่าของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยผงเทอร์มิต A ค่อนข้างมากที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อทำการทดสอบและตรวจสอบรอยความเสียหายพบว่าในชิ้นงานที่เชื่อมด้วยผงเทอร์มิต B มีโพรงอากาศขนาดเล็กอยู่ภายในเนื้อโลหะ จึงเป็นสาเหตุทำให้ค่าที่ได้เกิดความคลาดเคลื่อน และเมื่อนำไปพิจารณาร่วมกับส่วนผสมทาง

เคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีสเปกโตรสโคปีพบว่าผงเทอร์มิตยี่ห้อ B มีปริมาณซิลเฟอร์ ที่มากกว่าผงเทอร์มิตยี่ห้อ A อยู่มาก ซึ่งเป็นสารมลทินส่งผลให้ชิ้นงานเปราะและหักง่าย

4. อภิปรายผลและสรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาและเปรียบเทียบส่วนผสมของผงเทอร์มิตและสมบัติทางกลของรอยเชื่อมเหล็กแรง

รถไฟที่ผ่านการเชื่อมด้วยผงเทอร์มิตทั้ง 2 ยี่ห้อ พบว่ามีสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ของมาตรฐานการรถไฟ โดยพบว่าค่าความแข็งของบริเวณรอบเชื่อมกับโลหะฐานนั้นแตกต่างกันไม่เกิน 30 เปอร์เซ็นต์ และในบริเวณรอยเชื่อมและบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนนั้นไม่พบโครงสร้างเบนไนท์และมาร์เทนไซต์ [7] ซึ่งผงเทอร์มิตยี่ห้อ A นั้นให้สมบัติทางกลที่สูงกว่า ส่วนผงเทอร์มิตยี่ห้อ B นั้นแม้มีสมบัติทางกลที่ต่ำกว่าแต่จากผลการทดสอบนั้นผ่านขั้นต่ำของมาตรฐานการรถไฟ ดังนั้นการใช้ผงเทอร์มิตจึงขึ้นอยู่กับผู้ใช้งาน หากต้องการรอยเชื่อมที่มีคุณภาพและเชื่อมง่าย ควรเลือกผงเทอร์มิตยี่ห้อ A หรือเลือกใช้ผงเทอร์มิตยี่ห้อ B ที่มีราคาถูกกว่า 500 บาทต่อ 5 กิโลกรัม แต่มีการเชื่อมที่ค่อนข้างยากกว่าเนื่องจากการใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเทอร์มิตที่ยากกว่า และเสี่ยงต่อการเกิดโพรงอากาศง่ายกว่า

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ และหน่วยวิจัยวัสดุและการทดสอบโดยไม่ทำลาย ศูนย์บริการทางการศึกษาราชบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ในการทำงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักนโยบายและยุทธศาสตร์ และ สำนักงานปลัดกระทรวงคมนาคม. แผนยุทธศาสตร์กระทรวงคมนาคม พ.ศ.2559. [Internet]. (2558). [cited 2016 Oct 1]. available from: http://www.mot.go.th/file_upload/2559/mot_strategic2559.pdf
- [2] S. Rajanna. Evaluation of Microstructure and Mechanical response of thermite welded rail, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology 2013; Vol. 2, Issue 9: 4775-4782.
- [3] F. Sidki, I. Mouallif, A. El Amri, M. Boudlal, et al. Experimental Study of Mechanical Behavior and Microstructural Benchmarking between the Rail and the Thermite weld, International Journal of Engineering Research and Development 2013; Vol. 6, Issue 9: 53-58.
- [4] ชัญญิตา สายชุมดี. การวิเคราะห์โลหะหนักในน้ำเสียโดยการใช้เครื่อง AAS. [Internet]. [cited 2017 Jul 9]. available from: <http://www2.diw.go.th/Research/เอกสารเผยแพร่/เครื่องAAS.pdf>
- [5] ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์เพื่อมาตรฐานและอุตสาหกรรม. การวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์. [Internet]. [cited 2016 Feb 26]. available from: <http://science.kmutt.ac.th/sic/index.php/physiccs/16-x-ray-diffraction>
- [6] บทเรียนออนไลน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. กรรมวิธีทางความร้อนเหล็กกล้า. [Internet]. [cited 2016 Dec 4]. available from: <http://www.rmutphysics.com/char>

- ud/PDF-learning/2/material/ie2302_ch8.pdf
- [7] British Standard. BS EN 14730-1:2006+A1:2010 Railway applications - Track - Aluminothermic welding of rails. 2010.
- [8] AWS D15 Committee on Railroad Welding and Subcommittee on Track Welding. Recommended Practices for the Welding of Rails and Related Rail Components for Use by Rail Vehicles, AWS D15. 2:2003, American Welding Society. United States of America; 2005.
- [9] เอกรัตน์ ไวยนิตย, สยาม แก้วคำไสย์ และศิริวรรณ อ่วมปาน. โลหะวิทยากับรางวิ่งในรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน. บทความศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ 2557; 54.