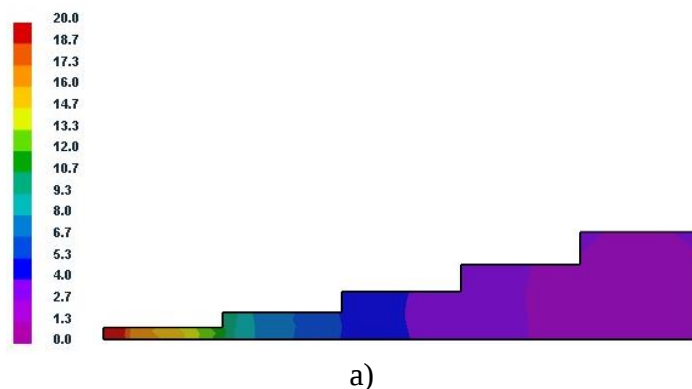


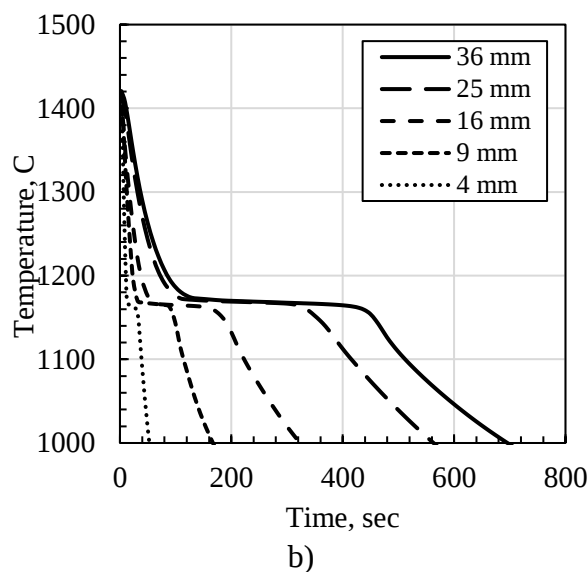
บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองของอิทธิพลของบิสมัทที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียว โดยการทดสอบการหล่อมีสองประเภท การออกแบบแรกคือการหล่อทรงกระบอกสำหรับการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหล่อ 25.4 มิลลิเมตร การทดสอบการหล่อประเภทที่สองคือการหล่อแบบขึ้นบันได ซึ่งมีความหนาที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 4 ถึง 36 มิลลิเมตร ได้รับการออกแบบเพื่อรองรับการศึกษาผลกระทบของอัตราการเย็นตัว และใช้ซอฟต์แวร์จำลองการหล่อเชิงพาณิชย์ เพื่อประมาณอัตราการเย็นตัวที่สอดคล้องกับความหนาของส่วนต่างๆ นอกจากนี้ จากรูปที่ 4.1 อัตราการเย็นตัวและกราฟการเย็นตัวที่จำลองขึ้น ได้นำข้อมูลจากเทอร์โมคัปเปิลเสมือนที่ใส่ไว้ที่จุดศูนย์กลางชิ้นงานของแต่ละความหนานั้น โดยรวมแล้ว อัตราการเย็นตัวที่จำลองได้ มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 1.0 – 18.0 องศาเซลเซียส/วินาที เวลาในการแข็งตัวเฉพาะที่อยู่ระหว่างไม่กี่วินาทีถึงหลายนาที ซึ่งแสดงถึงความหนาของส่วนทั่วไปในการใช้งานทางอุตสาหกรรม



รูปที่ 4.1 ผลจากการจำลองการหล่อจากซอฟต์แวร์; a) อัตราการเย็นตัว; b) กราฟการเย็นตัว



รูปที่ 4.1 ผลจากการจำลองการหล่อจากซอฟต์แวร์; a) อัตราการเย็นตัว; b) กราฟการเย็นตัว (ต่อ)

4.1 องค์ประกอบทางเคมี

เหล็กหล่อเหนียวจำนวน 5 ชุด ถูกผลิตขึ้นโดยใช้เตาหลอมเหนียวนำ โดยแต่ละชุดมีปริมาณ บิสมัทที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 0 ถึง 0.01% โดยน้ำหนัก ตลอดจนการทดลอง ค่าคาร์บอน ซิลิคอน และแมงกานีสยังคงที่ หลังจากการกำจัดออกซิเจน เหล็กหลอมเหลวจะถูกทำให้ร้อนจนถึงอุณหภูมิสูง และถูกเทออกที่ประมาณ 1500°C และ 1450°C ตามลำดับ การทำให้เกิดทรงกลมทำโดยใช้ FeSiMg ที่ประกอบด้วยแร่เอิร์ท (Fe-45Si-5.2Mg-2.0Ca-0.4Al-2.23RE) การทำอินทรีย์คูล์ชั่น (Fe-75Si, 0.2% โดยน้ำหนักของเหล็กหลอมเหลว) ก่อนที่จะเทที่อุณหภูมิประมาณ 1380°C ใช้แบบหล่อทราย โดยมีการหล่อเพื่อทดสอบสองประเภทคือ แบบขึ้นบันไดและแบบทรงกระบอก ค่าความละเอียดของเกรน (Grain Fineness Number, GFN) อยู่ระหว่าง 55-60 องค์ประกอบทางเคมีตรวจสอบด้วยเครื่องตรวจวิเคราะห์หาส่วนผสมทางเคมี (Optical Emission Spectrometer : OES) และปริมาณของบิสมัทและเซเรียมถูกกำหนดโดยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเทคนิค ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry) ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กที่ผลิตในงานวิจัยนี้ มีปริมาณคาร์บอน ซิลิคอน แมงกานีส ฟอสฟอรัส และกำมะถัน ยังคงอยู่ในช่วงของขอบเขตที่จำกัด ค่าคาร์บอนสมมูล ($CE = \%C + 1/3 (\%Si + \%P)$) แสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขทั้งหมดมีแนวโน้มใกล้เคียงกับส่วนประกอบยูเทคติก ส่วนปริมาณแมกนีเซียมนั้นมีค่าเกินอุตสาหกรรมทั่วไป เพื่อการประเมินผลกระทบของแร่เอิร์ทในส่วนที่หนากว่าและอิทธิพลรวมกับบิสมัท

แมกนีเซียมที่สูงขึ้นสามารถนำไปสู่การเกิดคาร์ไบด์ได้ เนื่องจากแมกนีเซียมเพิ่มแนวโน้มการเย็นตัว นอกจากนี้เฟอร์โรซิลิคอนแมกนีเซียม (FeSiMg) ที่ใช้เป็นแหล่งของแมกนีเซียมยังมีซีเรียมที่ทำงานร่วมกับบิสมีท์อีกด้วย ปริมาณบิสมีท์อยู่ระหว่าง 0 ถึง 0.01% โดยมีการสูญเสียบางส่วนระหว่างการเติมในช่วงการหลอม นอกจากนี้อะลูมิเนียมและดีบุกมีปริมาณอยู่ที่ 0.009% และ 0.0024% ตามลำดับ องค์ประกอบอื่นๆ มีอยู่ในปริมาณเล็กน้อย (<0.0004% As, <0.0005% Pb, <0.0004% Sb, <0.00001% Cd) ธาตุแร่เอิร์ทที่ใช้ในการทดลองนี้มีธาตุซีเรียม (Ce) เป็นหลัก เนื่องจากแลนทานัม (La), ตะกั่ว (Pb) และพลวง (Sb) อยู่ในระดับต่ำมาก ดังนั้น อัตราส่วนของ Ce/Bi จึงแสดงไว้ใน ตารางที่ 2.1 เพื่อการวิเคราะห์เพิ่มเติม

ตารางที่ 4.1 ส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นงานเหล็กเหนียวในการศึกษานี้

Heat	Bi	C	Si	Mn	P	S	Mg	CE	Ce	Ce/Bi
1	0.0001	3.41	2.59	0.064	0.037	0.01	0.078	4.27	0.007	70.0
2	0.003	3.42	2.45	0.061	0.041	0.01	0.088	4.24	0.008	2.67
3	0.005	3.40	2.57	0.064	0.040	0.01	0.079	4.26	0.008	1.60
4	0.007	3.41	2.46	0.055	0.046	0.03	0.077	4.23	0.009	1.29
5	0.010	3.47	2.47	0.058	0.044	0.01	0.058	4.29	0.010	1.00

4.2 ผลของบิสมีท์ที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียว

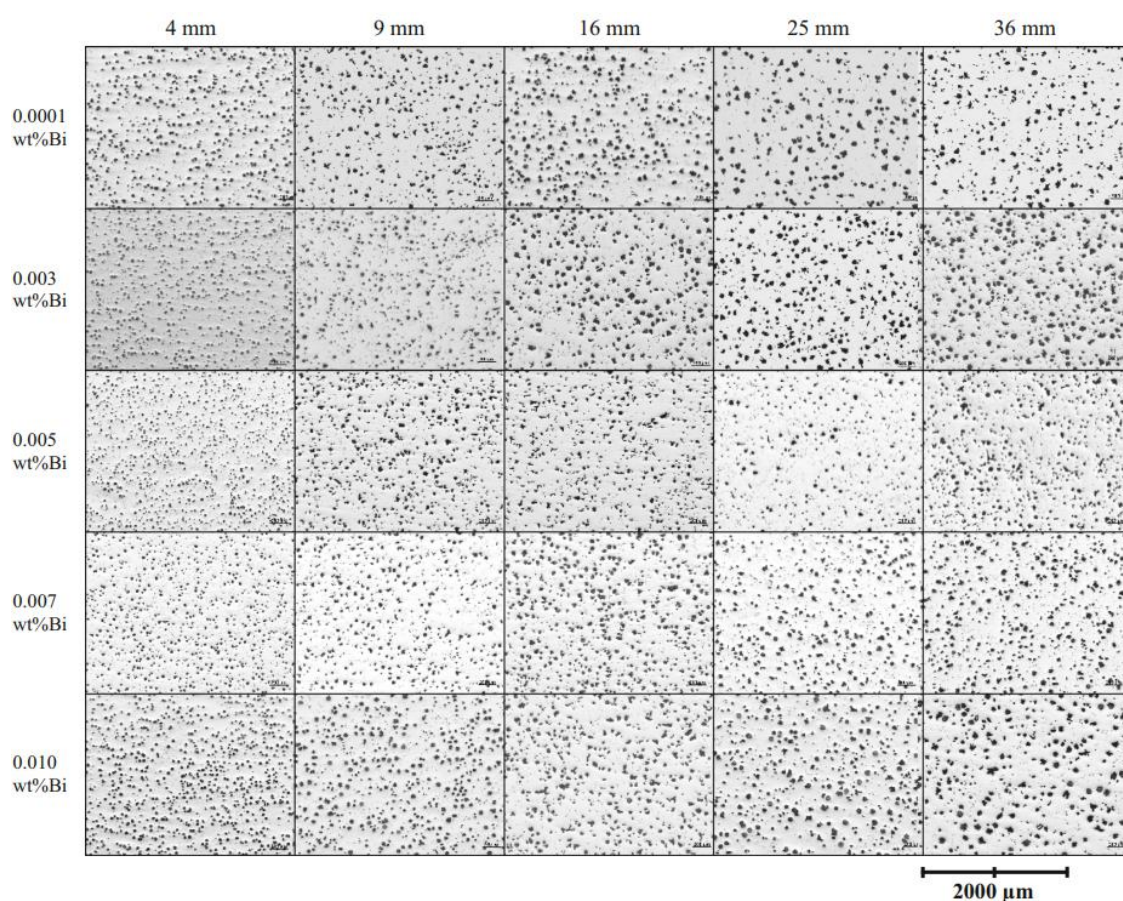
4.2.1 โครงสร้างจุลภาคก่อนกัดกรด

จากรูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างที่ไม่ได้กัดกรด ซึ่งมีความหนาและบิสมีท์ที่แตกต่างกัน โดยรวมแล้วมีค่าความกลม (Circularity) มากกว่า 0.8 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเป็นก้อนกลมที่ยอมรับได้ในทุกตัวอย่าง แม้ในกรณีที่มีความหนาของหน้าตัดที่ใหญ่ที่สุดก็เช่นเดียวกัน พบว่ามีส่วนของซังกีแกรไฟต์ (Chunky graphite) เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ที่พบที่จุดศูนย์กลางความร้อนของความหนา 25 และ 36 มิลลิเมตร

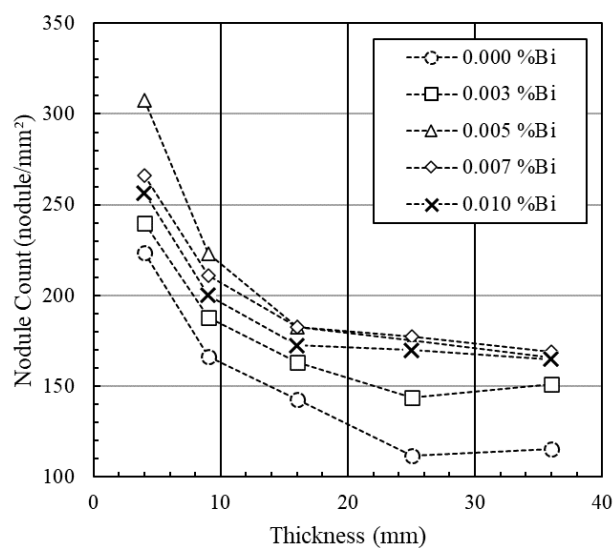
จากรูปที่ 4.3a แสดงอิทธิพลของความหนาท่อจำนวนแกรไฟต์ (Nodule count) จะเห็นได้ว่าส่วนที่หนาขึ้นส่งผลให้จำนวนแกรไฟต์ลดลง เนื่องจากอัตราการเย็นตัวช้าลง การวัดจำนวนแกรไฟต์ที่ได้เทียบกับงานวิจัยในหน้าอ้างอิงลำดับที่ 13 และ 14

จากรูปที่ 4.3b แสดงอิทธิพลของบิสมีท์ต่อจำนวนแกรไฟต์ สำหรับความหนาของหน้าตัด 4 และ 9 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่าจำนวนแกรไฟต์จะเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเพิ่มบิสมีท์ไปจนถึง

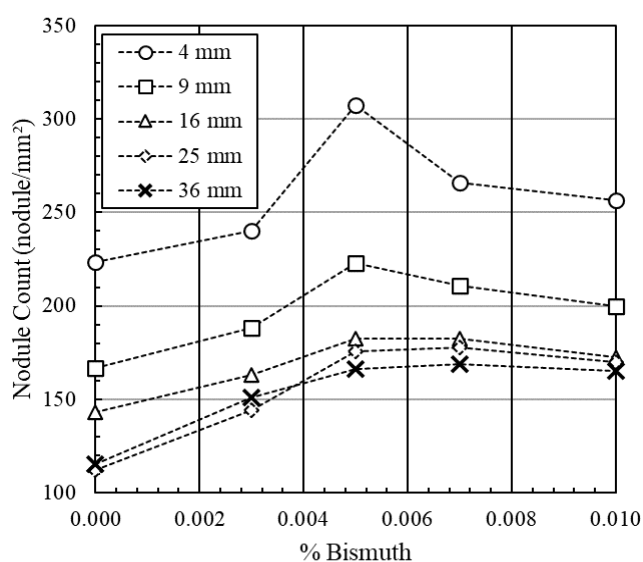
0.005% แต่เมื่อเติมบิสมัทให้มีปริมาณสูงกว่านั้น พบว่าจำนวนแกรไฟต์นั้นลดลง สำหรับความหนาของหน้าตัด 16, 25 และ 36 มิลลิเมตร จำนวนแกรไฟต์จะถึงจุดสูงสุดที่ 0.007%Bi และไม่มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนของจำนวนแกรไฟต์เมื่อบิสมัทสูงขึ้น นี่แสดงให้เห็นว่าความหนาของหน้าตัดที่ใหญ่กว่านั้น ต้องใช้ความเข้มข้นของบิสมัทที่สูงขึ้นเพื่อการปรับแต่งแกรไฟต์เบื้องต้นหลังกลไกของบิสมัทที่มีผลกระทบต่อจำนวนแกรไฟต์ จะมีการหารือในภายหลัง เป็นที่น่าสังเกตว่าตัวอย่างที่มีความหนาของหน้าตัด 4 มิลลิเมตร ที่ไม่มีบิสมัท จะแสดงการเกิดคาร์ไบด์ในโครงสร้างจุลภาค เนื่องจากมีอัตราการเย็นตัวและปริมาณแมกนีเซียมสูง ในความเป็นจริงแมกนีเซียมเป็นที่รู้จักในด้านการส่งเสริมการเกิดซิล (Chill) นั้นมีค่อนข้างสูงในการวิจัยครั้งนี้



รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีความหนาและบิสมัทแตกต่างกัน (ก่อนกัดกรด)



a)



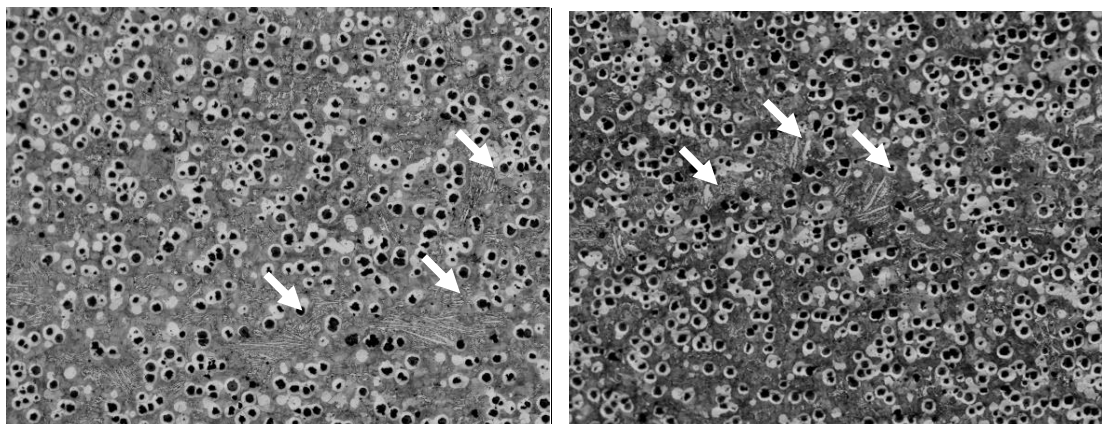
b)

รูปที่ 4.3 ผลของบิสมีทและความหนาต่อจำนวนแกรไฟต์; a) ความหนาของหน้าตัด ; b) บิสมีท

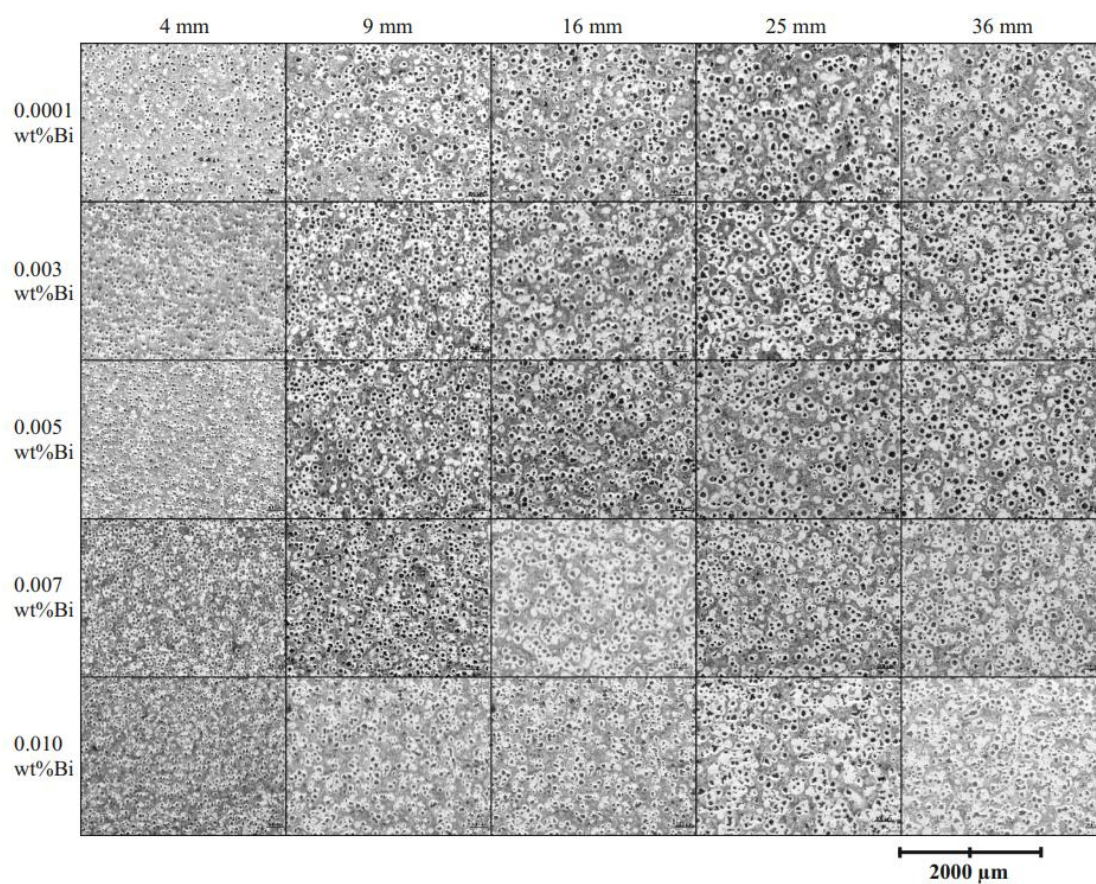
4.2.2 โครงสร้างจุลภาคหลังกัดกรด

จากรูปที่ 4.4 แสดงการก่อตัวของคาร์ไบด์ในตัวอย่างชิ้นงานกัดกรด ที่มีความหนาของหน้าตัด 4 มิลลิเมตร เนื่องจากการเกิดคาร์ไบด์ทำให้จำนวนแกรไฟต์ลดลง โดยพบจำนวนแกรไฟต์ที่ต่ำมากที่ความหนาของหน้าตัด 4 มิลลิเมตร อย่างไรก็ตามผลกระทบนี้จะลดลงเรื่อยๆ เมื่อมีความหนาของหน้าตัดและบิสมีทสูงขึ้น ในการศึกษาครั้งนี้ พบว่าอิทธิพลของบิสมีทมีแนวโน้มช่วยลด

ความสามารถในการเกิดซิลล์ (Chill) หรือคาร์ไบด์เช่นเดียวกันกับที่รายงานไว้ก่อนหน้านี้ [13, 14 และ 18]

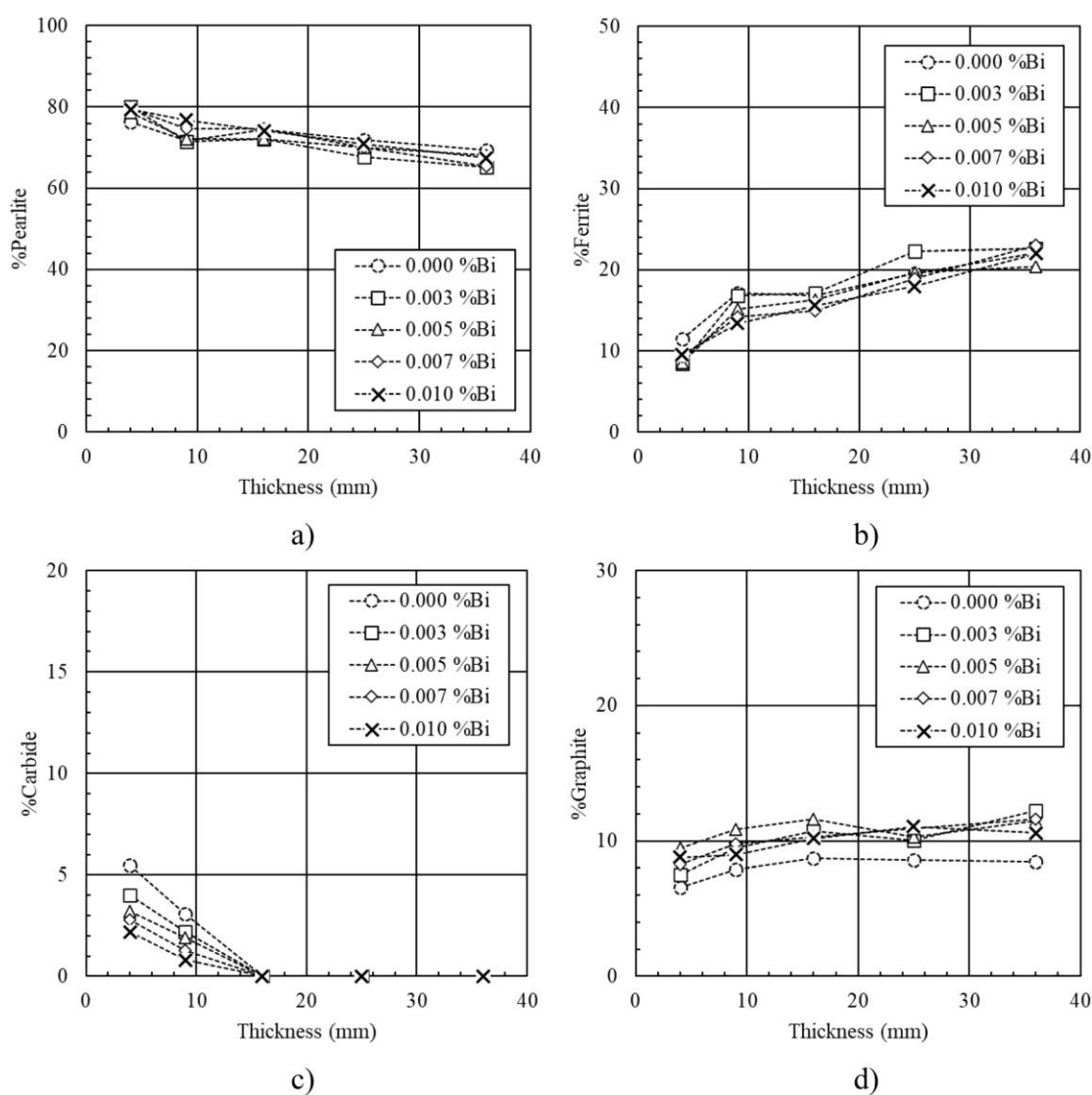


รูปที่ 4.4 Inversed chill ที่พบในตัวอย่างที่มีความหนาของหน้าตัด 4 มิลลิเมตร (ซ้าย) 0.000%B_i ; (ขวา) 0.003%B_i



รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีความหนาและบิสมัทที่แตกต่างกัน (กัดกรดด้วย 3% Nital)

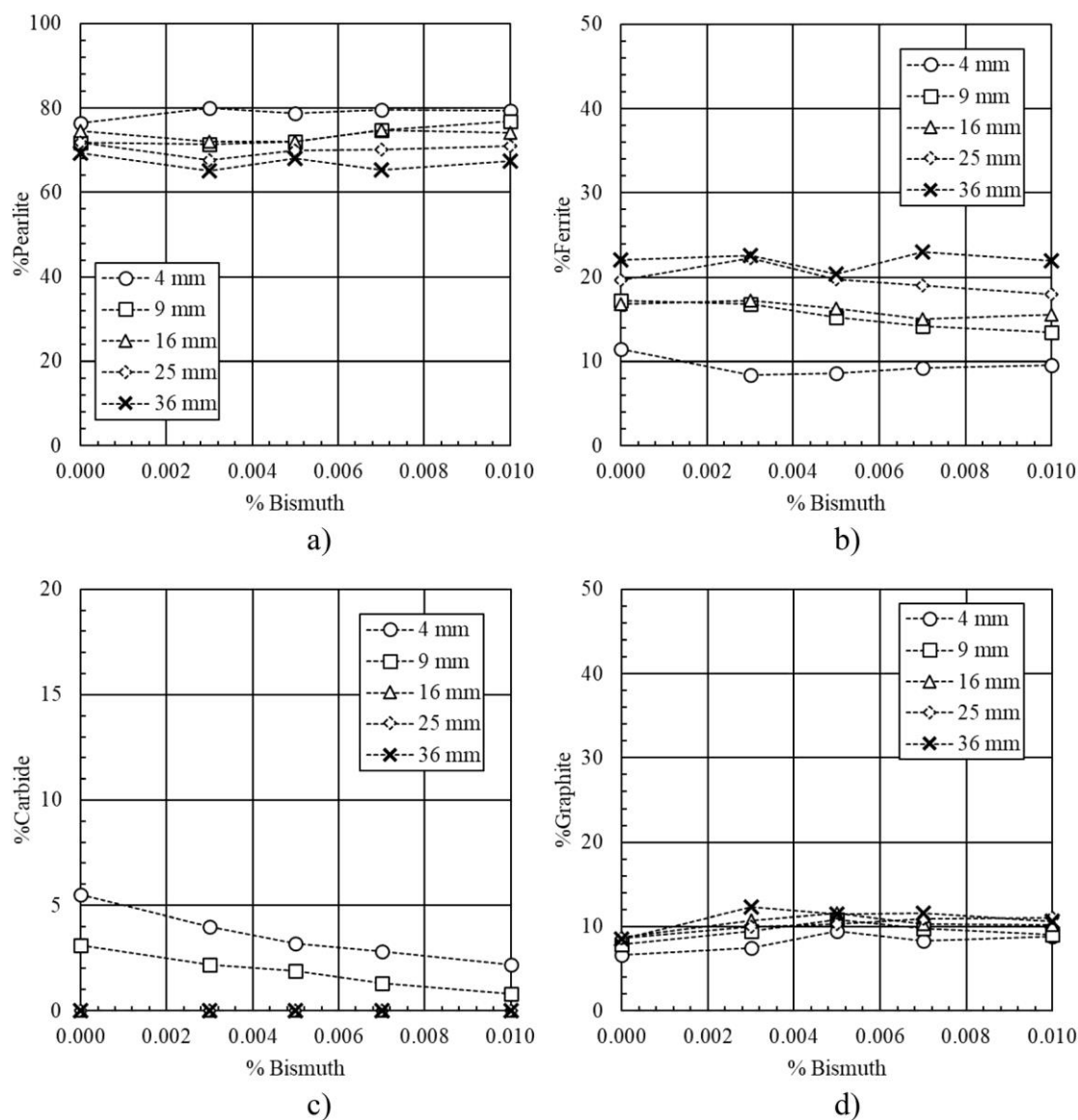
จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างที่ผ่านกัฏกรด โดยรวมแล้ว เพิร์ลไลต์เป็นเฟสที่โดดเด่นในโครงสร้างพื้น การมีเฟอร์ไรต์ ในปริมาณที่สูงขึ้นในส่วนที่มีความหนาเพิ่มขึ้น นั้นเป็นผลมาจากอัตราการเย็นตัวที่ช้าลง อย่างไรก็ตาม ผลของบิสมัทต่อโครงสร้างพื้นยังไม่ชัดเจน



รูปที่ 4.6 พื้นที่ร้อยละของเฟสในโครงสร้างจุลภาคที่สัมพันธ์กับความหนา; (a) เพิร์ลไลต์ (b) เฟอร์ไรต์ (c) คาร์ไบด์ (d) แกรไฟต์

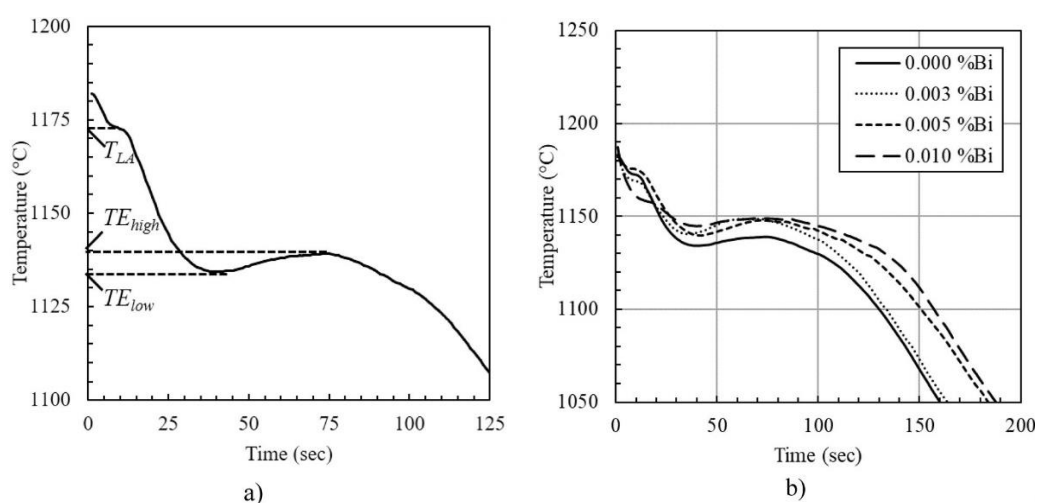
จากรูปที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์ภาพโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างที่กัฏกรดแล้ว ซึ่งแสดงพื้นที่ร้อยละของเฟสในโครงสร้างจุลภาค โดยรวมแล้ว จากรูป 4.6a พบเพิร์ลไลต์เป็นเฟสหลักในโครงสร้างเมทริกซ์ และเปอร์เซ็นต์ของเฟอร์ไรต์เพิ่มขึ้นตามความหนาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการ

เย็นตัวที่ช้าลง (ดังรูป 4.6b) ส่วนคาร์ไบด์ปรากฏในตัวอย่างที่มีความหนา 4 และ 9 มิลลิเมตรทั้งหมด และหายไปหมดที่ความหนา 16 มิลลิเมตรขึ้นไป (ดังรูป 4.6c) ดังนั้น เพอร์เซ็นต์ของแกรไฟต์ในตัวอย่างที่มีความหนา 4 และ 9 มิลลิเมตร จึงต่ำกว่าตัวอย่างอื่นๆ เนื่องมาจากการก่อกำเนิดของคาร์ไบด์ที่แสดงดังรูป 4.6d



รูปที่ 4.7 พื้นที่ร้อยละของเฟสในโครงสร้างจุลภาคที่สัมพันธ์กับบิสมัท ; (a) เพิร์ลไลต์ (b) เพอร์ไรต์ (c) คาร์ไบด์ (d) แกรไฟต์

จากรูปที่ 4.7 แสดงผลกระทบของบิสมัทต่อโครงสร้างจุลภาค พบว่าไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนเกี่ยวกับเปอร์เซ็นต์ของเฟิร์ลไลต์และเฟอร์ไรต์ (ดังรูป 4.7 a และ 4.7 b) ซึ่ง Yicheng และคณะ [14] ได้รายงานผลที่คล้ายกัน จากรูป 4.7c แสดงผลกระทบของบิสมัทที่ชัดเจนมากขึ้น เนื่องจากเปอร์เซ็นต์คาร์ไบด์ลดลงอย่างชัดเจนเมื่อบิสมัทเพิ่มขึ้น ซึ่งก็ยืนยันได้ว่าบิสมัทมีผลของการยับยั้งคาร์ไบด์ในบางส่วน ซึ่งรายงานโดย Takeda และคณะ [2] และ Horie และคณะ [13]

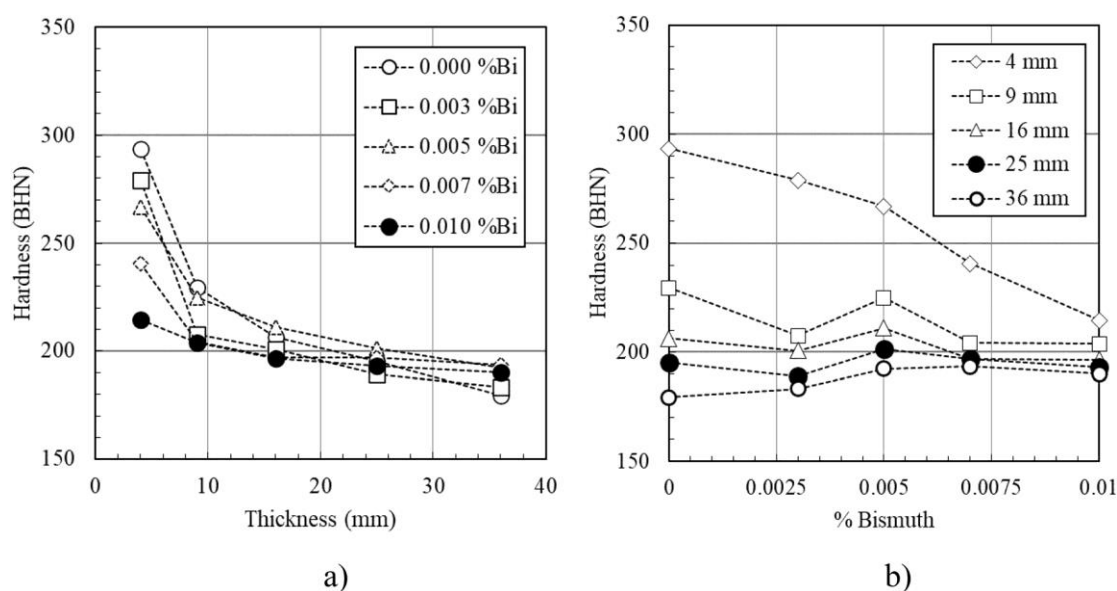


รูปที่ 4.8 กราฟการเย็นตัว (a) นิยามของสัญลักษณ์ (b) จากตัวอย่างเหล็กหล่อเหนียวที่มีบิสมัทตั้งแต่ 0 – 0.01%

จากรูปที่ 4.8 แสดงกราฟการเย็นตัวระหว่างปฏิกิริยายูเทคติกสำหรับตัวอย่างที่มีบิสมัทตั้งแต่ 0.00 ถึง 0.01% กราฟเหล่านี้ได้มาจากถ้วยวิเคราะห์เชิงความร้อน ไม่ใช่จากงานหล่อแบบขึ้นบันไดโดยตรง ซึ่งถ้วยวิเคราะห์เชิงความร้อนมีโมดูลัสการหล่อประมาณ 9.8 มิลลิเมตร ตารางที่ 4.2 รวมอุณหภูมิลิควิดัสอาร์เรส (T_{LA}), อุณหภูมิต่ำสุดของยูเทคติก (TE_{low}) และอุณหภูมิสูงสุดของยูเทคติก (TE_{high}) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการมีอยู่บิสมัททำให้อุณหภูมิต่ำสุดของยูเทคติกและอุณหภูมิสูงสุดของยูเทคติกมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มอุณหภูมิต่ำสุดของยูเทคติก จาก 1133 เป็น 1143 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสูงสุดของยูเทคติกจาก 1140 เป็น 1149 องศาเซลเซียส สำหรับตัวอย่างที่มีบิสมัทตั้งแต่ 0% และ 0.01% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่ำสุดของยูเทคติกและอุณหภูมิสูงสุดของยูเทคติกมีสาเหตุมาจากการทำอินน็อคคูเลชั่น ซึ่งเป็นผลของการเติมบิสมัท สังเกตได้ว่าผลกระทบนี้สามารถสังเกตได้โดยการวิเคราะห์กราฟการเย็นตัว

ตารางที่ 4.2 รวบรวมข้อมูลที่สำคัญที่ได้จากกราฟการเย็นตัว

Heat	Bi	CE	Ce/Bi	T _{LA}	TE _{low}	TE _{high}
1	0.0001	4.27	180	1175	1133	1140
2	0.003	4.24	7.33	1171	1139	1148
3	0.005	4.26	3.20	1176	1140	1149
4	0.007	4.23	2.57	1173	1134	1148
5	0.010	4.29	1.60	1159	1143	1149

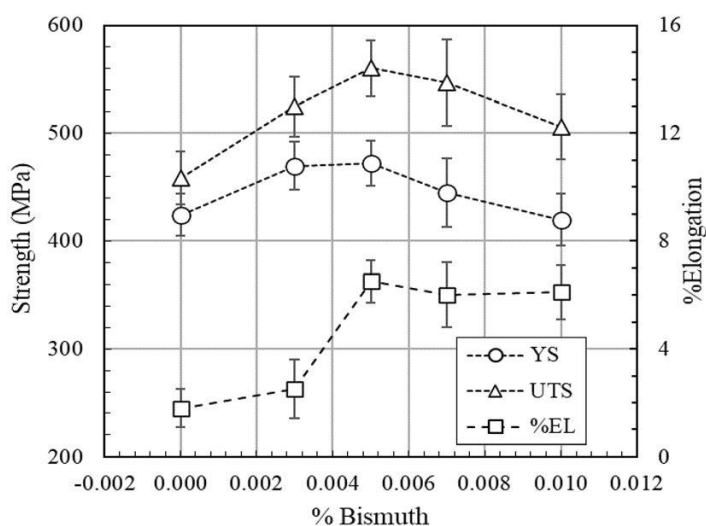


รูปที่ 4.9 ผลกระทบของบิสมัทและความหนาของหน้าตัดต่อความแข็ง a) ความหนา b) บิสมัท

จากรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของบิสมัทและความหนาต่อความแข็ง โดยความแข็งของเหล็กเหนียวเฟอร์ริติกล้วน (ASTM A536 เกรด 60-40-18) และเฟอร์ริลไลติกล้วน (ASTM A536 เกรด 100-70-03) คือ 143–187 และ 240–300 BHN ตามลำดับ ค่าความแข็งในการทดลองนี้อยู่ในช่วงปกติสำหรับเหล็กเหนียวเฟอร์ริลไลโต-เฟอร์ไรต์ โดยแนวโน้มที่เห็นชัดคือความแข็งลดลงเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการเย็นตัวที่ช้าลง ส่งผลให้จำนวนเกรนไฟต์ลดลงและมีเฟอร์ไรต์ในเมทริกซ์มากขึ้น สังเกตได้ว่าการก่อตัวของคาร์ไบด์ที่พบในตัวอย่างที่มีความหนา 4 มิลลิเมตรทั้งหมด ทำให้ความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งผลกระทบนี้สะท้อนให้เห็นในรูปที่ 4.7b ความแข็งของชิ้นงานที่มีความหนา 4 มิลลิเมตรที่ไม่มีบิสมัท จะมีค่าสูงอย่างเห็นได้ชัด แต่เมื่อเพิ่มบิสมัทเป็น 0.003% ทำให้ความ

แข็งมีค่าลดลง ความแข็งของชิ้นงานที่มีความหนา 4 มิลลิเมตรที่ไม่มีบิสมัทนั้นมีค่าสูง เนื่องจากการก่อตัวของคาร์ไบด์ ผลกระทบที่คล้ายกันของการก่อตัวของคาร์ไบด์ต่อความแข็งนั้นพบเห็นได้ในความหนา 9 และ 16 มิลลิเมตร แต่ในระดับที่น้อยกว่า ในส่วนที่มีความหนามาก ความแข็งจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมบิสมัท โดยสูงสุดที่ 0.005 – 0.007% ดังนั้นปริมาณบิสมัทที่สูงขึ้นมีแนวโน้มที่จะช่วยเพิ่มความแข็งในส่วนที่มีความหนามากขึ้น นอกจากนี้ ความแข็งจะลดลงตามความหนาที่เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการเย็นตัวที่ช้าลงและอัตราส่วนเฟอร์ไรต์/เพิร์ลไลต์ที่สูงขึ้นที่ปริมาณบิสมัทเท่ากันดังแสดงในรูปที่ 4.6

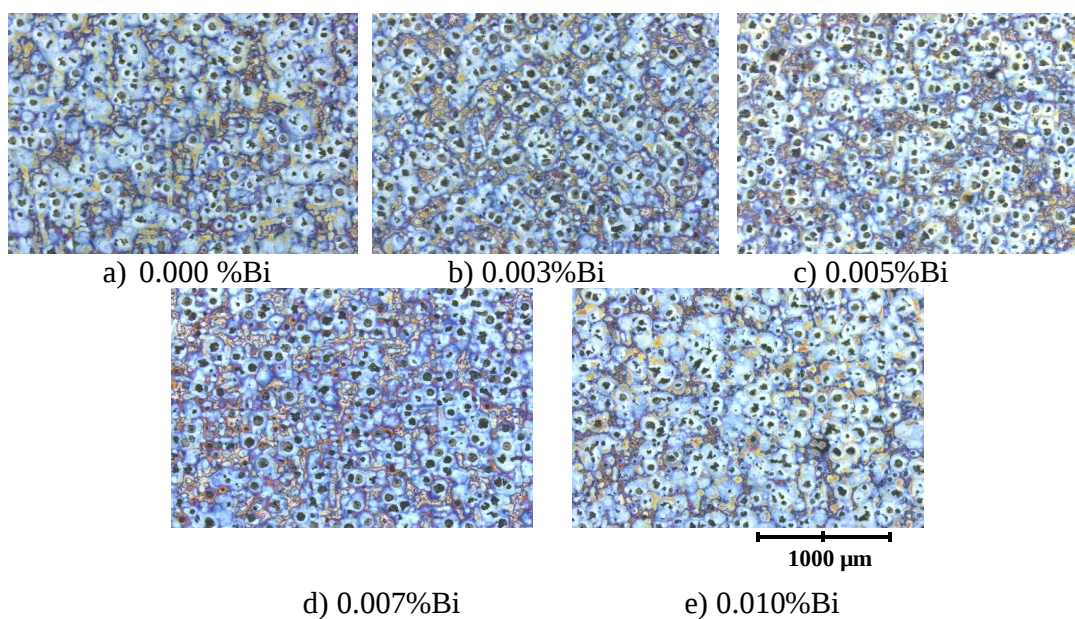
จากรูปที่ 4.10 แสดงอิทธิพลของบิสมัทต่อความต้านทานแรงดึงสูงสุด ความแข็งแรงของจุดครากและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว แนวโน้มดังกล่าวบ่งชี้ว่าปริมาณบิสมัทที่ลดลงส่งผลให้มีความแข็งแรงและการยืดตัวลดลง เนื่องจากจำนวนเกรนไฟต์ลดลงและการเกิดคาร์ไบด์ การยืดตัวดีขึ้นเมื่อปริมาณบิสมัทมีค่า 0.005% ขึ้นไป เนื่องจากบิสมัทสามารถยับยั้งการก่อตัวของคาร์ไบด์ได้ ซึ่งตัวอย่างที่มีปริมาณบิสมัท 0.005% ให้ความแข็งแรงสูงสุดในงานวิจัยนี้ ทั้งนี้ตัวอย่างมีโมดูลัสการหล่อที่ 6.35 มิลลิเมตร ใกล้เคียงกับส่วนที่มีความหนา 16 มิลลิเมตรในงานหล่อแบบขึ้นบันได ซึ่งทำให้พฤติกรรมสังเกตได้สอดคล้องกับแนวโน้มความแข็งที่แสดงในรูปที่ 4.9



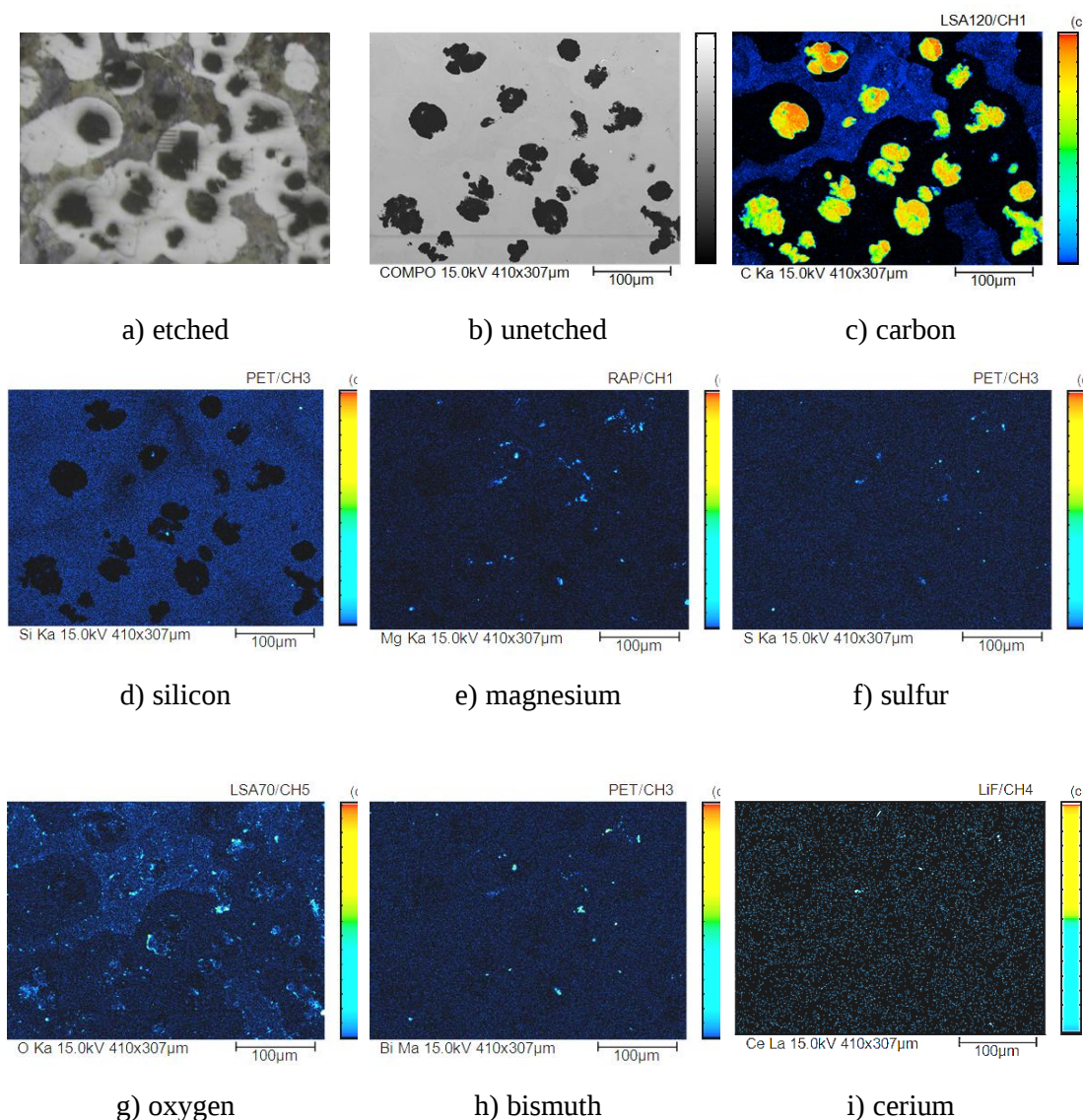
รูปที่ 4.10 สมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียวที่มีบิสมัทตั้งแต่ 0 – 0.01% ; ความแข็งแรงของจุดคราก (Yield Strength, YS) , ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength, UTS) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percent Elongation, %EL)

โดยสรุป ปริมาณบิสมีทที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับความหนาของหน้าตัด สำหรับความหนา 4, 9 และ 16 มิลลิเมตร บิสมีท 0.005% (อัตราส่วน Ce/Bi = 1.60) เหมาะสมที่สุดในแง่ของจำนวนแกรไฟต์ ความแข็ง และความต้านทานแรงดึง อย่างไรก็ตาม สำหรับส่วนที่มีความหนา 25 และ 36 มิลลิเมตร บิสมีท 0.007% (อัตราส่วน Ce/Bi = 1.29) เหมาะสมกว่า ทั้งนี้ หากมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณซีเรียม การกำหนดปริมาณบิสมีทที่เหมาะสมจะต้องพิจารณาตามอัตราส่วน Ce/Bi ผลการวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าบิสมีทมีประโยชน์มากกว่าเมื่อมีความหนาเพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยป้องกันเกิดซังก์แกรไฟต์ (Chunky graphite) และทำให้อนุภาคแกรไฟต์ละเอียดขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วน Ce/Bi ที่เหมาะสมที่สุดกับตารางที่ 2.1 จะเห็นว่าอัตราส่วน Ce/Si ที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้สูงกว่าในตารางแสดงไวต์ เนื่องจากความหนาในงานวิจัยนี้มีขนาดเล็กกว่า ซึ่ง Pan และ Chen [16] พบว่าอัตราส่วน Ce/Si ที่เหมาะสมสำหรับชิ้นงานที่บางครั้งมีค่ามากกว่า 1.1

จากรูปที่ 4.11 แสดงภาพโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีบิสมีทตั้งแต่ 0 ถึง 0.01% ที่มีความหนา 36 มิลลิเมตร การวิเคราะห์โลหะวิทยาด้วยสียเผยให้เห็นว่ามีการแยกตัวของธาตุผสม โดยเฉพาะซิลิคอน (Si) และแมงกานีส (Mn) ภายในโครงสร้างจุลภาค ซึ่งทำให้สามารถสังเกตโครงสร้างเดนไดรต์ (Dendritic) และผลกระทบของบิสมีทต่อระยะห่างของแกนเดนไดรต์ได้ อย่างไรก็ตาม ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในระยะห่างของแกนเดนไดรต์ เมื่อบิสมีทมีค่าเปลี่ยนแปลง



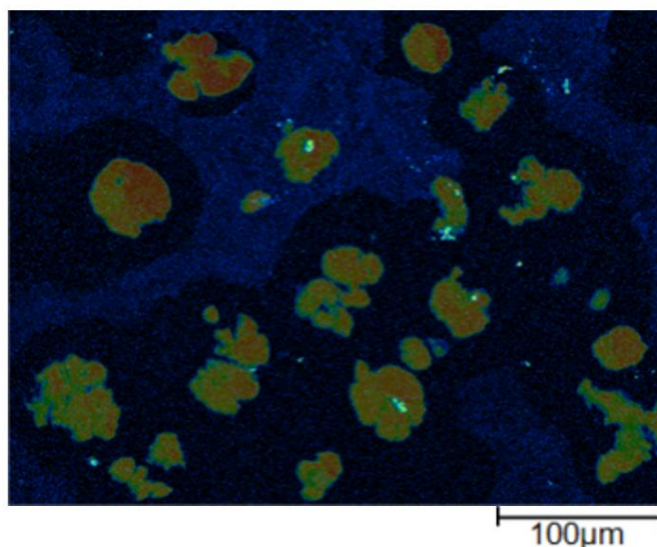
รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีบิสมีทตั้งแต่ 0 – 0.01% ที่ความหนา 36 มิลลิเมตร



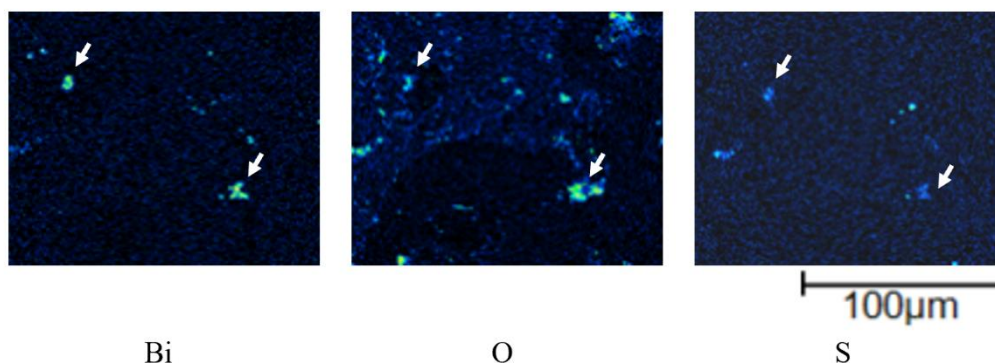
รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคและการทำแผนที่ด้วย EPMA

จากรูปที่ 4.12 แสดงผลการทดสอบด้วย EPMA ของตัวอย่างที่มีความหนาของหน้าตัด 36 มิลลิเมตร บริเวณทดสอบมีอนุภาคแกรไฟต์หลายอนุภาคพร้อมกับพื้นที่ระหว่างอนุภาคเพื่อสังเกตการแยกตัวของธาตุผสม รูปที่ 4.12a และ 4.12b แสดงรูปแบบเฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรต์ และตำแหน่งของแกรไฟต์ในโครงสร้างจุลภาค ซึ่งสอดคล้องกับการทำแผนที่คาร์บอน (รูปที่ 4.12c) แผนที่ซิลิคอนในรูปที่ 4.12d แสดงให้เห็นว่าซิลิคอนมีแนวโน้มที่จะอยู่ในเมทริกซ์รอบๆ แกรไฟต์มากกว่า และน้อยกว่าระหว่างแกรไฟต์ นอกจากนี้ แมกนีเซียม ซัลเฟอร์ ออกซิเจน และบิสมัทในบริเวณเดียวกัน ซึ่งบ่งบอกถึงการเกิดสารประกอบกึ่งโลหะ ซีเรียมีรูปแบบคล้ายกันแต่สัญญาณอ่อนกว่า

เพื่อสังเกตการแยกตัวของบิสมีทในระดับไมโคร จึงสร้างภาพที่ซ้อนทับระหว่างแผนที่คาร์บอนและบิสมีท (รูปที่ 4.13) โดยบิสมีทมีแนวโน้มที่จะอยู่ที่ศูนย์กลางของอนุภาคแกรไฟต์สิ่งนี้บ่งชี้ว่าบิสมีทเกี่ยวข้องกับการเกิดนิวเคลียสของแกรไฟต์นอกจากนี้ ยังพบออกซิเจนและกำมะถันในแกนแกรไฟต์ซึ่งมีบิสมีทอยู่ด้วย



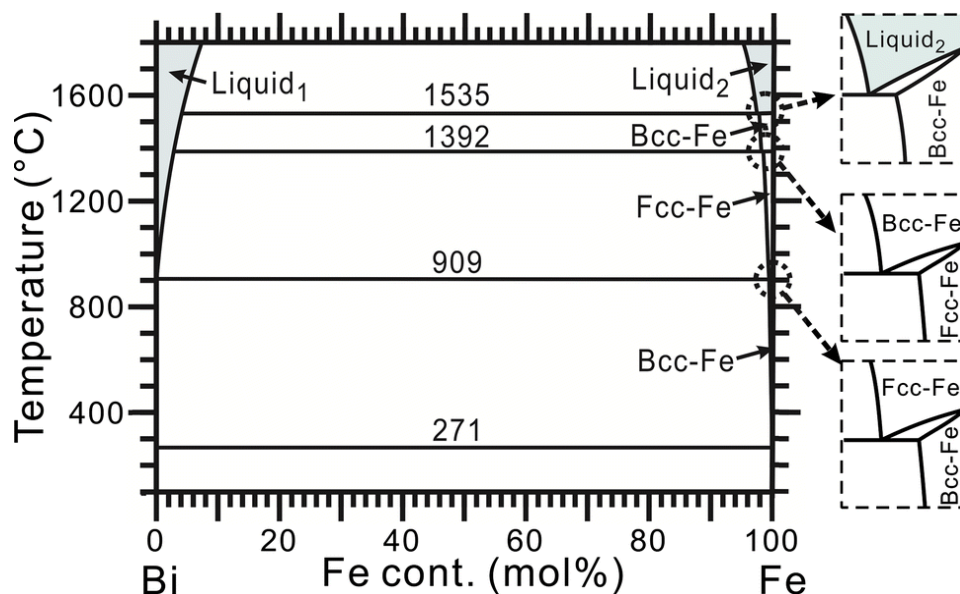
รูปที่ 4.13 ภาพรวมแผนที่ EPMA ของคาร์บอนและบิสมีท



รูปที่ 4.14 แผนที่ EPMA ของบิสมีท ออกซิเจน และกำมะถันที่แกนแกรไฟต์

จากรูปที่ 4.14 แสดงแผนที่ EPMA ของบิสมีท ออกซิเจน และกำมะถันที่แกนแกรไฟต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าบริเวณนิวเคลียสประกอบด้วยธาตุเหล่านี้ในรูปแบบของสารประกอบ เช่น บิสมีทออกไซด์ และซัลไฟด์ การค้นพบนี้สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Takeda และคณะ [2] และ Horie และคณะ [12]. กลไกการทำให้แกรไฟต์ละเอียดขึ้นโดยการเติมบิสมีทสามารถอธิบายได้ดังนี้:

บิสมีทปรากฏตัวเป็นเม็ดเล็ก ๆ ในเหล็กหลอมเหลว เนื่องจากเหล็กและบิสมีทก่อให้เกิดปฏิกิริยาโมโนเทคติก (Monotectic reaction) ตามแผนภาพเฟสของบิสมีท-เหล็ก (รูปที่ 4.15) พบว่าปฏิกิริยาโมโนเทคติกคือ $L_2 = L_1 + \delta$ เฟอร์ไรต์ ของเหลวสองประเภทนี้มีความสามารถในการละลายจำกัดมาก ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะมีเม็ดที่อุดมด้วยบิสมีทที่กระจายตัวในเหล็กหลอมเหลว



รูปที่ 4.15 แผนภูมิสมดุลของเฟสบิสมีทและเหล็ก [21]

ในระหว่างการแข็งตัว เม็ดที่อุดมด้วยบิสมีทจะกลายเป็นออกไซด์และซิลไฟด์ โดยการรวมกับออกซิเจนและกำมะถันที่มีอยู่ในเหล็กหลอมเหลว ตารางที่ 4.3 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของบิสมีทและสารประกอบที่เกี่ยวข้อง จะเห็นได้ว่าบิสมีทออกไซด์ (Bi_2O_3) และบิสมีทซิลไฟด์ (Bi_2S_3) มีพลังงานอิสระมาตรฐานติดลบ ที่อุณหภูมิ 1,500 °C ซึ่งบ่งชี้ว่าสารประกอบเหล่านี้เกิดขึ้นได้เอง ซึ่งต่อมาสารประกอบเหล่านี้จะกลายเป็นนิวเคลียสสำหรับแกรไฟต์ต่อไป

ในระหว่างแมกนีเซียมทรिटเมนต์ แมกนีเซียมจะถูกเพิ่มทำปฏิกิริยากับ Bi_2O_3 และ Bi_2S_3 ที่มีอยู่ ทำให้เกิดสารประกอบที่เสถียรมากขึ้น เช่น แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และซิลไฟด์ (MgS) ซึ่งพบว่าแมกนีเซียมในพื้นที่เดียวกันกับบิสมีท ออกซิเจน และกำมะถันในแผนที่ EPMA นอกจากนี้ซิลิคอนยังสามารถรวมตัวกับแมกนีเซียมเป็นแมกนีเซียมซิลิไซด์ (Mg_2Si) จึงเป็นไปได้ที่จะพบการอยู่ร่วมกันของ Bi_2O_3 , Bi_2S_3 , MgO , MgS และ Mg_2Si

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติทางกายภาพและพลังงานอิสระมาตรฐานของการเกิดสารประกอบที่เกี่ยวข้อง

สารประกอบ	จุดหลอมเหลว , °C	จุดเดือด, °C	ความหนาแน่น, g/cm ³	พลังงานอิสระมาตรฐาน ติดลบที่อุณหภูมิ 1500 °C, kJ/mol [2]	อ้างอิง
Bi	271	1564	9.79	-	[29]
Bi ₂ O ₃	817	1890	8.90	-136.5*	[30]
Bi ₂ S ₃	850	-	6.78	-64.35	[31]
MgO	2852	3600	3.60	-733.7	[32]
MgS	2000	-	2.84	-395.2	[33]
Mg ₂ Si	1102	-	1.99	-8552.5	[32]

$$*\Delta G_f^\circ, \text{Bi}_2\text{O}_3 = -584235 + 289.28(T/K) \text{ [34]}$$