



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)

ปริญญา

วิศวกรรมวัสดุ

วิศวกรรมวัสดุ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การปรับปรุงกระบวนการบอโรดิงของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

Enhancement of Boriding Process on AISI 440C Stainless Steel Using Direct Current

นามผู้วิจัย นางสาวพัชรินทร์ แนมจันทร์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ปฎิภาณ จุ้ยเจิม, Dr.-Ing.)

หัวหน้าภาควิชา

(อาจารย์ปฎิภาณ จุ้ยเจิม, Dr.-Ing.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การปรับปรุงกระบวนการบอโรไดงของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C
ด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

Enhancement of Boriding Process on AISI 440C Stainless Steel
Using Direct Current

โดย

นางสาวพัชรินทร์ แนมจันทร์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พัชรินทร์ แนมจันทร์ 2554: การปรับปรุงกระบวนการบอโรดิงของเหล็กกล้าไร้
สนิม AISI 440C ด้วยไฟฟ้ากระแสตรง ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรม
วัสดุ) สาขาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
อาจารย์ปฎิภาณ จุ้ยเจิม, Dr.-Ing. 96 หน้า

เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดมาร์เทนซิดิก AISI 440C เป็นเหล็กที่มีการใช้งานมากและต้อง
รับภาระทางกลสูง จึงมีการปรับปรุงพื้นผิวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้งาน กระบวนการบอโร
ดิงเป็นกระบวนการเคลือบผิวชนิดหนึ่งที่สามารถสร้างชั้นเคลือบเหล็กบอโรด์ที่มีความแข็งสูง โดย
ความหนาของชั้นเคลือบของกระบวนการบอโรดิงแปรผันกับเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว ซึ่งปกติ
ต้องการระยะเวลาในการเคลือบผิวที่นาน ดังนั้นการเร่งการแพร่ของอะตอมจึงเป็นแนวทางในการ
ลดเวลาที่ใช้ในกระบวนการเคลือบผิว การใช้กระแสไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาช่วยในการเคลือบผิวจึง
เป็นแนวทางที่น่าสนใจและมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถช่วยลดระยะเวลาของการเคลือบผิวได้
ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาถึงผลของการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีต่อความหนาของชั้นเคลือบของ
กระบวนการบอโรดิง โดยเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C จะถูกทำการเคลือบผิวด้วยกระบวนการบอ
โรดิงแบบแพ็คที่มีทั้งการให้และไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง (กระแสเท่ากับ 5.5 แอมแปร์) โดยอุณหภูมิ
การเคลือบผิวที่ 1123 - 1223 เคลวิน เป็นระยะเวลา 2 - 6 ชั่วโมง ชั้นเคลือบและความหนาถูก
ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงพร้อมด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ และวิเคราะห์ชนิดของ
ชั้นเคลือบด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) วัดความแข็งของชิ้นงานด้วยเครื่องทดสอบความ
แข็งแบบวิกเกอร์ จากการทดลองพบว่าเกิดชั้นเคลือบเหล็กบอโรด์ชนิดเฟสคู่ (FeB และ Fe₂B) มี
ความแข็งประมาณ 2000 HV ทั้งชิ้นงานที่ให้และไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง โดยชั้นเคลือบบอโรด์จะมี
ความหนาเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาของกระบวนการสูงขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่า
กระบวนการบอโรดิงโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาช่วยสามารถเกิดชั้นเคลือบบอโรด์ที่มีความหนา
ชั้นเคลือบมากกว่ากระบวนการบอโรดิงแบบธรรมดา นอกจากนี้เมื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่
ของอะตอมโบรอนและค่าพลังงานกระตุ้นพบว่ากระบวนการบอโรดิงโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้า
มาช่วยมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนสูงขึ้นและมีค่าพลังงานกระตุ้นลดลงเมื่อ
เปรียบเทียบกับกระบวนการบอโรดิงแบบธรรมดา

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Patcharin Naemjan 2011: Enhancement of Boriding Process on AISI 440C Stainless Steel Using Direct Current. Master of Engineering (Materials Engineering), Major Field: Materials Engineering, Department of Materials Engineering. Thesis Advisor: Mr. Patiphan Juijerm, Dr.-Ing. 96 pages.

Martensitic stainless steel AISI 440C is used in a high-loading condition. Thus, its surface should be modified to enhance performance. Boriding process provides a hard iron-boride layer on the surface, however, the layer thickness is related to a coating time. The direct current should be a method to improve the diffusion rate of the boriding process. Therefore, the stainless steel AISI 440C will be borided using pack method with and without direct current ($I = 5.5 \text{ A}$) at temperature range of $1123 - 1223 \text{ K}$ for $2 - 6 \text{ h}$. The coated layers were characterized by optical microscopy with Image analyzer and X-ray diffraction. The hardness values of the layers were measured using Vickers microhardness tester. It was found that double phases (FeB and Fe_2B) boride layer formed on the stainless steel AISI 440C with and without direct current. The hardness of boride layers on this steel were about 2000 HV . At direct current of 5.5 A , the value of boride layer thickness and diffusion coefficient were higher than in the boriding process without direct current. Moreover, the activation energy in boriding process with direct current was lower than that in the convention boriding process.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ปฎิภาณ จุ้ยเจิม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ กรรมการที่ปรึกษาทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำในการศึกษา ค้นคว้าและวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และกราบขอบพระคุณผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัยและบุคคลที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้เสร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

ขอขอบพระคุณ คุณ พยูร เสนทองแก้ว และ คุณ ศาคร จันทร์ขอนแก่น เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิศวกรรมวัสดุที่ให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์ชิ้นงานด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) รวมไปถึงเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมวัสดุที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำในด้านต่างๆ

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคน ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือตลอดจนให้กำลังใจในการทำงานวิจัย

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้อบรมสั่งสอน ดูแล ช่วยเหลือ และให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

พัชรินทร์ แนมจันทร์

พฤษภาคม 2554

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(9)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	21
อุปกรณ์	21
วิธีการ	22
ผลและวิจารณ์	25
ผล	25
วิจารณ์	44
สรุปและข้อเสนอแนะ	63
สรุป	63
ข้อเสนอแนะ	64
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	65
ภาคผนวก	68
ภาคผนวก ก ผลการเลี้ยงเบนของรังสีเอกซ์	69
ภาคผนวก ข ความหนาชั้นเคลือบบอโร	72
ภาคผนวก ค ความแข็งของชั้นเคลือบบอโร	80
ภาคผนวก ง อุณหภูมิชิ้นงาน	87
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	96

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C	6
2	สมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C	6
3	ส่วนผสมโดยทั่วไปของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C	7
4	การปรับปรุงสมบัติของพื้นผิวด้วยกระบวนการบอโรดิงในวัสดุชนิดต่างๆ	8
5	ลักษณะและสมบัติของชั้นเคลือบเหล็กบอโรไต์	13
6	เปรียบเทียบความแข็งของชั้นเคลือบเหล็กบอโรไต์กับชั้นเคลือบจากกระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีอื่น	18
7	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ใช้ในการวิจัย (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	21
8	ส่วนผสมของมาร์เบิล รีเอเจน ที่ใช้ในการวิจัย	21
9	อุณหภูมิชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิต่างๆ	53
10	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการบอโรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ	55
11	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการบอโรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ	58
12	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนที่อุณหภูมิต่างๆ และค่าพลังงานกระตุ้นในกระบวนการบอโรดิงที่ทำการทดลอง	61
ตารางผนวกที่		
ข1	ความหนาของชั้นเคลือบบอโรไต์บนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้า (ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์) ที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลาต่างๆ	73
ข2	ความหนาของชั้นเคลือบบอโรไต์บนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้า (ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์) ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลาต่างๆ	74

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ข3 ความหนาของชั้นเคลือบบอโรคาร์บอนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรไดงแบบให้กระแสไฟฟ้า (ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์) ที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลาต่างๆ	75
ข4 ความหนาของชั้นเคลือบบอโรคาร์บอนแอโนดที่ผ่านกระบวนการบอโรไดงแบบให้กระแสไฟฟ้า (ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์) ที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลาต่างๆ	76
ข5 ความหนาของชั้นเคลือบบอโรคาร์บอนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรไดงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลาต่างๆ	77
ข6 ความหนาของชั้นเคลือบบอโรคาร์บอนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรไดงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลาต่างๆ	78
ข7 ความหนาของชั้นเคลือบบอโรคาร์บอนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรไดงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลาต่างๆ	79
ค1 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรไดงแบบให้กระแสไฟฟ้า (ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์) ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	81
ค2 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรไดงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	82
ค3 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรไดงแบบให้กระแสไฟฟ้า (ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์) ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	83
ค4 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรไดงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	84
ค5 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรไดงแบบให้กระแสไฟฟ้า (ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์) ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลา 6 ชั่วโมง	85
ค6 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรไดงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลา 6 ชั่วโมง	86

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ง1	อุณหภูมิขึ้นงานขณะเคลือบผิวด้วยกระบวนการบอโรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	88
ง2	อุณหภูมิขึ้นงานขณะเคลือบผิวด้วยกระบวนการบอโรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	90
ง3	อุณหภูมิขึ้นงานขณะเคลือบผิวด้วยกระบวนการบอโรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	91
ง4	อุณหภูมิขึ้นงานขณะเคลือบผิวด้วยกระบวนการบอโรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	93
ง5	อุณหภูมิขึ้นงานขณะเคลือบผิวด้วยกระบวนการบอโรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	94

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การปรับเปลี่ยนส่วนผสมของเหล็กกล้าไร้สนิมในเกรดต่าง ๆ	5
2	การติดตั้งอุปกรณ์ในกระบวนการบอโรดิงโดยวิธีแพ็ค	9
3	ความหนาของชั้นบอโรด์จากการบอโรดิงในวัสดุ AISI 4140 และ AISI 316L	10
4	ผลของปริมาณโบรอนคาร์ไบด์ในผงต่อการเกิดเฟส FeB	11
5	ลักษณะของชั้นบอโรด์ที่เกิดขึ้นบนวัสดุชนิดต่างๆ	14
6	การลดลงของความหนาชั้นบอโรด์กับปริมาณการเติมธาตุผสมชนิดต่างๆ	15
7	ลักษณะของชั้นบอโรด์ที่เกิดขึ้นบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และ AISI 440C	16
8	โครงสร้างบริเวณชั้นเคลือบบอโรด์ของเหล็ก SS41 และ SM45C ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1073 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	19
9	แบบจำลองทิศทางการแพร่ของอะตอมภายใต้สนามไฟฟ้า	20
10	ภาพตัดขวางกล้องบรรจุชิ้นงานและการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในงานวิจัย	23
11	ขั้นตอนการวิจัย	24
12	ความหนาชั้นเคลือบบนชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง โดยให้กระแสไฟฟ้ากระแสตรง ขนาดต่างๆ	25
13	โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอโรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 2 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง และ (ค) 6 ชั่วโมง	27
14	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงาน ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	28
15	ความหนาของชั้นเคลือบบอโรด์บนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นระยะเวลาต่างๆ	28
16	โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอโรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 2 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง และ (ค) 6 ชั่วโมง	30

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
17	ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์บนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นระยะเวลาต่างๆ	31
18	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงาน ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	31
19	ค่าความแข็งที่ตำแหน่งต่าง ๆ จากผิวลึกเข้าไปในเนื้อพื้นของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	32
20	โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 2 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง และ (ค) 6 ชั่วโมง	33
21	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงาน ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลา 6 ชั่วโมง	34
22	ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์บนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นระยะเวลาต่างๆ	35
23	โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 2 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง และ (ค) 6 ชั่วโมง	36
24	ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์บนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นระยะเวลาต่างๆ	37
25	โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 2 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง และ (ค) 6 ชั่วโมง	38
26	ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์บนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นระยะเวลาต่างๆ	39
27	ค่าความแข็งที่ตำแหน่งต่าง ๆ จากผิวลึกเข้าไปในเนื้อพื้นของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	40

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
28	โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 2 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง และ (ค) 6 ชั่วโมง	41
29	ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์บนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นระยะเวลาต่างๆ	42
30	โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์ของแอโนดที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 2 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง และ (ค) 6 ชั่วโมง	43
31	ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์บนผิวแอโนดที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นระยะเวลาต่างๆ	43
32	โครงสร้างจุลภาคและลักษณะชั้นเคลือบบอไรด์บนผิวชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้ง (ก) แบบไม่ให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และ (ข) แบบให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	45
33	ชั้นเคลือบบอไรด์ชนิดเฟสคู่บนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้กระแสไฟฟ้า (ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์) ที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	46
34	ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์บนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	48
35	ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์บนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	48
36	แผนภาพการเกิดเฟสของเหล็กกับโบรอนที่ขอบเขตของเฟส (ก) Fe_2B และ (ข) FeB	49
37	ความหนาชั้นเคลือบบอไรด์บนชิ้นงานแยกเป็นเฟสในกระบวนการบอไรดิ้งแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ (ก) 1123 เคลวิน และ (ข) 1223 เคลวิน	50
38	ความหนาชั้นเคลือบบอไรด์บนชิ้นงานแยกเป็นเฟสในกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ (ก) 1123 เคลวิน และ (ข) 1223 เคลวิน	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
39	การแพร่ของอะตอมโบรอนภายใต้สนามไฟฟ้าในกระบวนการบอโรดิง	53
40	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสองของความหนาของชั้นเคลือบบอโรด์และเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยกระบวนการบอโรดิงแบบที่ไม่ให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิต่างๆ	54
41	ความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ($\ln K$) และส่วนกลับของอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว ($1/T$) ด้วยกระบวนการบอโรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า	56
42	การคำนวณความหนาชั้นเคลือบบอโรด์ในกระบวนการบอโรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงในช่วงอุณหภูมิและเวลาต่างๆ ที่ทำการทดลอง	57
43	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสองของความหนาของชั้นเคลือบบอโรด์และเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยกระบวนการบอโรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิต่างๆ	58
44	ความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ($\ln K$) และส่วนกลับของอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว ($1/T$) ด้วยกระบวนการบอโรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้า	59
45	การคำนวณความหนาชั้นเคลือบบอโรด์จากกระบวนการบอโรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงในช่วงอุณหภูมิและเวลาต่างๆ ที่ทำการทดลอง	60
ภาพผนวกที่		
ก1	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงาน ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	70
ก2	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ FeB และ Fe ₂ B	71

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	แอมแปร์
K	=	เคลวิน
$^{\circ}\text{C}$	=	องศาเซลเซียส
s	=	วินาที
DC	=	Direct Current
HV	=	Hardness of Vicker
d	=	ความหนาชั้นเคลือบ หรือ ระยะทางในการแพร่ (เมตร)
t	=	เวลาที่ใช้ในการเคลือบ หรือ เวลาในการแพร่ (วินาที)
K	=	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (ตารางเมตร/วินาที)
K_0	=	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ (ตารางเมตร/วินาที)
Q	=	พลังงานกระตุ้น (จูล/โมล)
R	=	ค่าคงที่ของก๊าส (จูล/โมล·เคลวิน)
T	=	อุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบ (เคลวิน)

การปรับปรุงกระบวนการบอโรดิงของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

Enhancement of Boriding Process on AISI 440C Stainless Steel Using Direct Current

คำนำ

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิดิก (Martensitic Stainless Steel) นิยมนำไปทำชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์เพื่อใช้ในงานที่ต้องการวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงและสามารถทนการกัดกร่อนได้ (Davis, 2000) เช่น แบริ่ง วาล์ว ใบพัดกังหันไอน้ำ เป็นต้น แต่พบปัญหาเรื่องการสึกหรอ มีอายุการใช้งานสั้น ส่งผลให้มีการเปลี่ยนหรือซ่อมแซมชิ้นส่วนเหล่านี้บ่อยครั้ง ดังนั้นเพื่อยืดอายุการใช้งานวิธีการหนึ่งที่สามารถทำได้ในเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ คือ การทำให้ผิวของชิ้นส่วนที่นำไปใช้งานมีความแข็งแรงสูง เพื่อให้ยากแก่การเกิดรอยแตก (Crack) เมื่อชิ้นส่วนเกิดรอยแตกได้ยากขึ้นก็เป็นการเพิ่มเวลาในการใช้งานชิ้นส่วนนั้นให้ยาวนานขึ้น (Taktak, 2006)

บอโรดิง (Boriding) เป็นกระบวนการเคลือบผิวเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและสมบัติอื่นๆ ให้กับผิวชิ้นงานสามารถใช้ได้ทั้งโลหะกลุ่มเหล็กและนอกกลุ่มเหล็ก โดยการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่อุณหภูมิ 700 - 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 - 12 ชั่วโมง เพื่อให้อะตอมโบรอนแพร่เข้าไปในผิวของชิ้นงานแล้วรวมตัวกับอะตอมของธาตุในชิ้นงานเกิดเป็นชั้นเคลือบบอไรด์ที่มีความแข็งแรงสูง ซึ่งการบอโรดิงโดยวิธีแพ็ค (Pack Boriding) เป็นวิธีการที่ใช้กันอย่างกว้างขวางเนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถทำได้ง่ายไม่ซับซ้อน มีความปลอดภัย (Davis, 2002) จลนพลศาสตร์ของกระบวนการที่มีผลต่อการเติบโตของชั้นบอไรด์นั้นขึ้นอยู่กับระยะเวลา อุณหภูมิ และความสามารถในการแพร่ของอะตอมโบรอน (Sinha and Division, 1994)

กระบวนการบอโรดิงเป็นกระบวนการที่ต้องอาศัยระยะเวลาเพื่อให้ได้ความหนาชั้นเคลือบตามที่ต้องการ ซึ่งส่วนใหญ่ใช้เวลานาน ดังนั้นเพื่อลดระยะเวลาในการเคลือบผิวให้สั้นลง แนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ คือ เร่งการแพร่ของอะตอมโบรอนเข้าสู่ผิวชิ้นงาน ซึ่งการใช้กระแสไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current, DC) ก็น่าจะเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถลดเวลาเวลาของกระบวนการบอโรดิงได้ ดังนั้นงานวิจัยในครั้งนี้จึงศึกษาการนำไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาช่วยในกระบวนการบอโรดิง

โดยวิธีแพ็ค เพื่อต้องการให้ชั้นบอไรด์บนผิวชิ้นงานมีอัตราการโตเร็วขึ้นในระหว่างการเคลือบผิว และเพื่อให้ได้ความหนาของชั้นเคลือบที่มากขึ้นด้วย ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการให้สูงขึ้น



วัตถุประสงค์

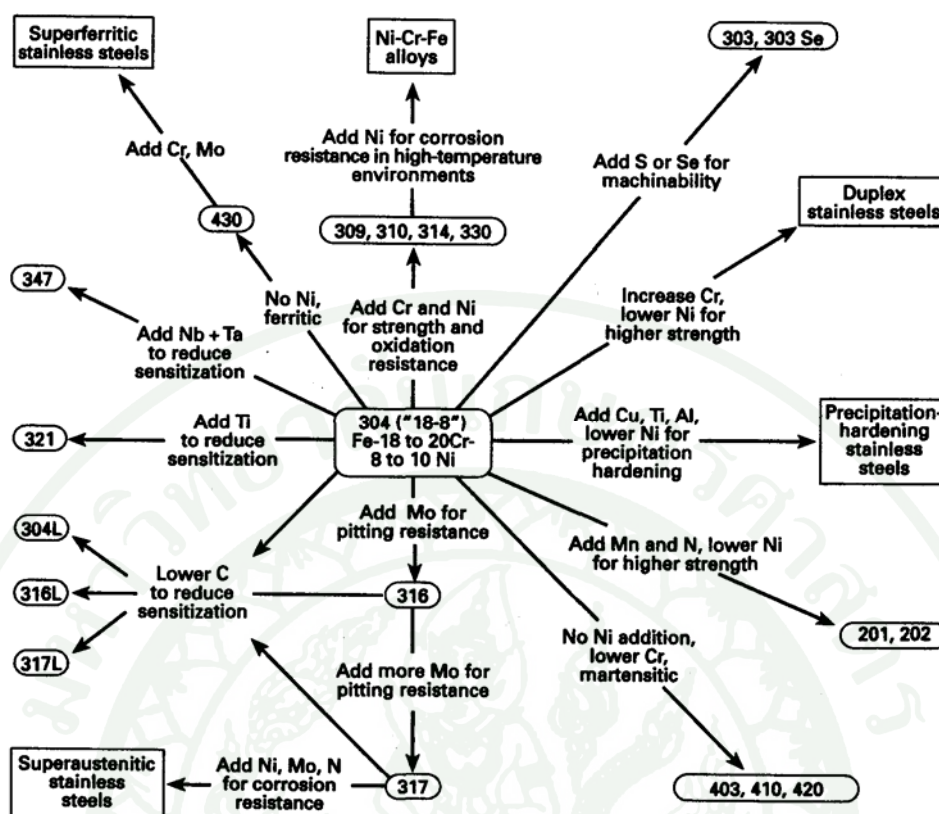
1. เพื่อศึกษาวิธีการเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ด้วยกระบวนการบอโรดิงโดยวิธีแพ็ค (Pack Boriding) ที่มีการนำไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current, DC) มาช่วยในกระบวนการบอโรดิง
2. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการบอโรดิงเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C โดยวิธีแพ็คที่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาช่วย
3. เพื่อศึกษาลักษณะและสมบัติของชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นในกระบวนการบอโรดิงโดยวิธีแพ็คและวิธีแพ็คที่นำไฟฟ้ากระแสตรงมาช่วยในกระบวนการบอโรดิงเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C
4. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ (อุณหภูมิ เวลา ความหนาของชั้นบอโรด์ พลังงานกระตุ้น) ในกระบวนการบอโรดิงเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C โดยวิธีแพ็คและวิธีแพ็คที่นำไฟฟ้ากระแสตรงมาช่วย

การตรวจเอกสาร

1. เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel)

เหล็กกล้าไร้สนิมนิยมนำมาใช้ในงานวิศวกรรมเนื่องจากเป็นโลหะที่มีความแข็งแรงและมีสมบัติเด่นในการทนต่อการกัดกร่อนได้ดีในทุกสภาวะ ในเหล็กกล้าไร้สนิมมีปริมาณ โครเมียมผสมอยู่จำนวนมาก (อย่างน้อย 12%) ทำให้เหล็กชนิดนี้เกิดสนิมได้ยาก ซึ่งโครเมียมที่ผสมอยู่จะเกิดเป็น โลหะออกไซด์ที่ผิวเพื่อป้องกันการกัดกร่อนเมื่อเหล็กถูกวางอยู่ในสภาวะที่มีสารออกซิไดซ์ เหล็กกล้าไร้สนิมนั้นมีมากมายหลายเกรด เพราะมีการเปลี่ยนแปลงธาตุที่ใช้ผสมรวมทั้งปรับปรุง ปริมาณธาตุที่ผสมลงไป (ภาพที่ 1) เพื่อให้ได้สมบัติตามความต้องการใช้งาน โดยทั่วไปสามารถ แบ่งได้เป็น 5 กลุ่ม (Davis, 2000) คือ เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนิติก (Austenitic Stainless Steel) เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก (Ferritic Stainless Steel) เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิก (Martensitic Stainless Steel) เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มพรีซิพิตชัน ฮาร์ดเดนเอเบิล (Precipitation-hardenable Stainless Steel) สำหรับงานวิจัยนี้ใช้เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ซึ่งอยู่ในกลุ่มมาร์เทนซิก

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิกนี้มีโครงสร้างผลึกแบบ บอดี เซ็นเตอร์ เตตระโกนอล (Body Center Tetragonal, BCT) มีโครงสร้างเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ (Martensite) ประกอบด้วยโครเมียม 12 – 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและมีธาตุอื่นผสมบ้างเล็กน้อย เช่น โมลิบดีนัม นิกเกิล ซิลิกอน เป็นต้น เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนและสมบัติเชิงกลอื่นให้ดีขึ้น สามารถชุบแข็งได้ กลุ่มนี้มีการปรับส่วนผสมให้สมบัติทางด้านความแข็งและความแข็งแรงสมดุลกันจึงมีความทนต่อการกัดกร่อนได้น้อยกว่ากลุ่มเฟอร์ริติกและกลุ่มออสเทนิติก โดยจะใช้กับงานที่ต้องการสมบัติหลาย อย่างในเวลาเดียวกัน (สมบัติการทนต่อแรงดึง ทนต่อการคืบ ทนความล้า ทนต่อการกัดกร่อน และการทนความร้อน) ตัวอย่างของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ เช่น AISI 440A, AISI 440B, AISI 440C, AISI 403, AISI 420 เป็นต้น



ภาพที่ 1 การปรับเปลี่ยนส่วนผสมของเหล็กกล้าไร้สนิมในเกรดต่าง ๆ

ที่มา: Davis (2000)

เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีความแข็งและความแข็งแรงสูงที่สุดในกลุ่มมาร์เทนซิก (ตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2) เนื่องจากมีปริมาณของโครเมียมและคาร์บอนในปริมาณสูง (ตารางที่ 3) สามารถชุบแข็งได้ที่อุณหภูมิ 1010 – 1065 องศาเซลเซียส เมื่อให้เย็นตัวในอากาศหรือน้ำมันจะมีความแข็งสูง โดยสามารถเพิ่มความแข็งได้สูงถึง 61 - 63 HRC เหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องการทั้งความแข็งแรงสูงและสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ด้วย จึงนิยมนำมาผลิตเป็นแบริ่ง ลูกบอลที่ใช้ในวาล์ว (Ball Check Valve) แม่พิมพ์ เพลา มีด และชิ้นส่วนอื่นๆ ที่ใช้กับการกัดกร่อนระดับปานกลาง เช่น น้ำเย็น ไขมัน น้ำมันดิบ น้ำมันแก๊สโซลีน กรดหรือด่างที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋องและเครื่องดัด เป็นต้น

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C

สมบัติ	AISI 440C
ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	7.8
ความหนาแน่น (Density)	0.28 lb/cu in.
ความร้อนจำเพาะ (Specific Heat)	0.11 BTU/lb/°F
ความต้านทานทางไฟฟ้า (Electrical Resistance)	361 ohms/cir.mil.ft
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Thermal Coefficient Expansion)	$5.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{F}^{-1}$
การนำความร้อน (Thermal Conductivity)	168 Btu/ft ² /in/hr/°F
มอดุลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)	$29 \times 10^6 \text{ psi}$
โครงสร้าง (Structure)	Martensitic

ที่มา: Davis (2000)

ตารางที่ 2 สมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C

สมบัติเชิงกล	เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกรรมวิธี		
	อบอ่อน	ชุบแข็ง	เย็นตัวปกติ
ความต้านทานแรงดึง (psi)	110000	285000	125000
จุดคราก (psi)	65000	275000	100000
ความยืดหยุ่น (%)	14	2	7
การลดลงของพื้นที่หน้าตัด (%)	25	10	20
ความแข็ง (Brinell)	260	580	260

ที่มา: Davis (2000)

ตารางที่ 3 ส่วนผสมโดยทั่วไปของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C

วัสดุ	ส่วนผสมโดยน้ำหนัก (%)							
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Fe
AISI 440C	0.95 – 1.20	≤ 1.00	≤ 1.00	≤ 0.040	≤ 0.030	16 - 18	≤ 0.75	Bal.

ที่มา: Davis (2000)

เหล็กกล้าไร้สนิมนั้นเป็นเหล็กที่มีสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่าเหล็กทั่วไป จึงนิยมนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย แต่เมื่อนำมาใช้งานซึ่งต้องรับภาระทางกลที่สูง ทำให้ต้องมีการปรับปรุงพื้นผิวเพื่อเพิ่มสมบัติของพื้นผิวในด้านต่างๆ ให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น กระบวนการปรับปรุงพื้นผิวที่ใช้กันในปัจจุบันมีหลายวิธีด้วยกัน เช่น การชุบโรซิง ในทรายดิง และบอโรดิง โดยเฉพาะกระบวนการบอโรดิงนั้นสามารถให้ชั้นเคลือบที่มีสมบัติดีกว่ากระบวนการปรับปรุงพื้นผิวแบบอื่นในหลายๆ ด้าน

2. กระบวนการบอโรดิง (Boriding Process)

กระบวนการบอโรดิงเป็นกระบวนการทางความร้อนเชิงเคมีที่ใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติของพื้นผิว โดยการให้อะตอมโบรอนแพร่เข้าสู่ผิวของชิ้นงานแล้วรวมตัวกับอะตอมของธาตุในชิ้นงานเกิดเป็นชั้นบอโรดิงที่ผิวชิ้นงาน สามารถใช้ได้กับโลหะหลากหลายชนิด เพื่อให้พื้นผิวของชิ้นงานมีสมบัติที่ดีขึ้น (ตารางที่ 4) กระบวนการบอโรดิงสามารถทำได้หลายวิธี เช่น กระบวนการบอโรดิงแบบอ่างเกลือ (Salt Bath) กระบวนการบอโรดิงแบบใช้แก๊ส (Gas Boriding) และกระบวนการบอโรดิงแบบแพ็ค (Pack Boriding) แต่กระบวนการบอโรดิงโดยวิธีแพ็คเป็นวิธีที่ทำได้ง่ายและนิยมใช้กันแพร่หลายที่สุด

ตารางที่ 4 การปรับปรุงสมบัติของพื้นผิวด้วยกระบวนการบอโรดิงในวัสดุชนิดต่างๆ

วัสดุ	เฟสในชั้นบอโรดิง	สมบัติ	
		ความแข็ง (HV)	จุดหลอมเหลว (°C)
Fe	FeB	1900-2100	1390
	Fe ₂ B	1800-2000	....
Co	CoB	1850	....
	Co ₂ B	1500-1600	....
Co-27.5Cr	Co ₃ B	700-800	....
	CoB	2200	....
	Co ₂ B	1550	....
	Co ₃ B	700-800	....
Ni	Ni ₄ B ₃	1600	....
	Ni ₂ B	1500	....
	Ni ₃ B	900	....
Mo	Mo ₂ B	1660	2000
	MoB ₂	2330	2100
	Mo ₂ B ₅	2400-2700	2100
W	W ₂ B ₅	2600	2300
Ti	TiB	2500	1900
	TiB ₂	3370	2980
Ti-6Al-4V	TiB		....
	TiB ₂	3000	....
Ta	Ta ₂ B		3200-3500
	TaB ₂	2500	3200
Zr	ZrB ₂	2250	3040
Re	ReB	2700-2900	2100

ที่มา: Davis, (2002)

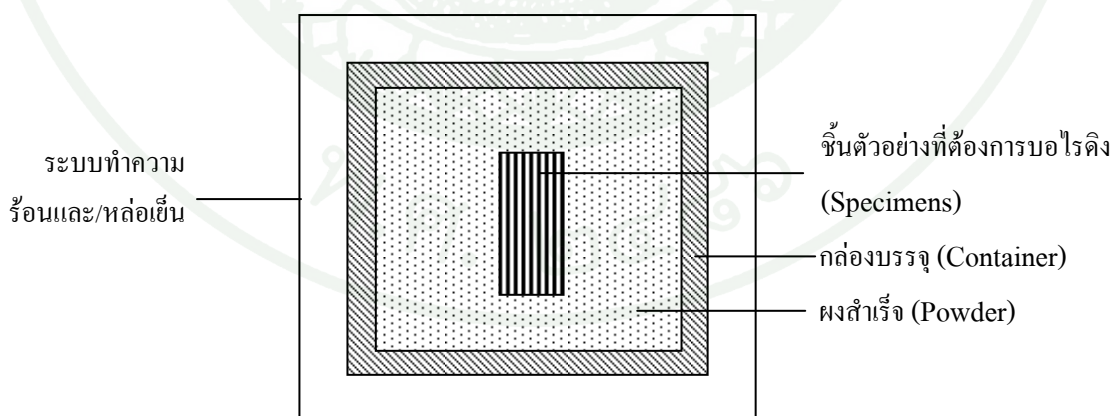
กระบวนการบอโรดิงโดยวิธีแพ็คเป็นวิธีการที่ใช้ผงสำเร็จรูปที่มีส่วนผสมของสารต่างๆ (Sinha and Division, 1994) ดังนี้

ก. สารที่ให้กำเนิดอะตอมโบรอนอิสระ เรียกว่า บอโรดิงเอเจนต์ (Boriding Agent) ส่วนใหญ่ใช้โบรอนคาร์ไบด์ (Boron Carbide, B_4C)

ข. สารที่ทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้น (Activator) เพื่อให้เกิดการแตกตัวออกมาเป็นอะตอมโบรอน ส่วนใหญ่ใช้โพแทสเซียมฟลูออโบเรท (Potassium Fluoborate, KBF_4)

ค. สารที่ทำหน้าที่เป็นตัวเจือจาง (Diluent) เพื่อควบคุมความเข้มข้นของปริมาณอะตอมโบรอนอิสระโดยทั่วไปใช้ซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon Carbide, SiC)

สารทั้งหมดนี้จะถูกผสมรวมกันในรูปแบบผง และผงนี้ก็จะถูกบรรจุลงในกล่องหรือภาชนะบรรจุพร้อมกับชิ้นงานที่ต้องการเคลือบผิวดังภาพที่ 2 แล้วให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการเพื่อให้อะตอมโบรอนอิสระแพร่เข้าไปที่ผิวชิ้นงานและรักษาอุณหภูมิให้คงที่ตามเวลาที่ต้องการบอโรดิง โดยทั้งกระบวนการจะทำในสถานะของแก๊สเฉื่อยเพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันบนผิวชิ้นงาน จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้องและเอาฝุ่นหรือผงที่เกาะอยู่ที่ผิวหน้าของชิ้นงานออกก็จะได้ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรดิง



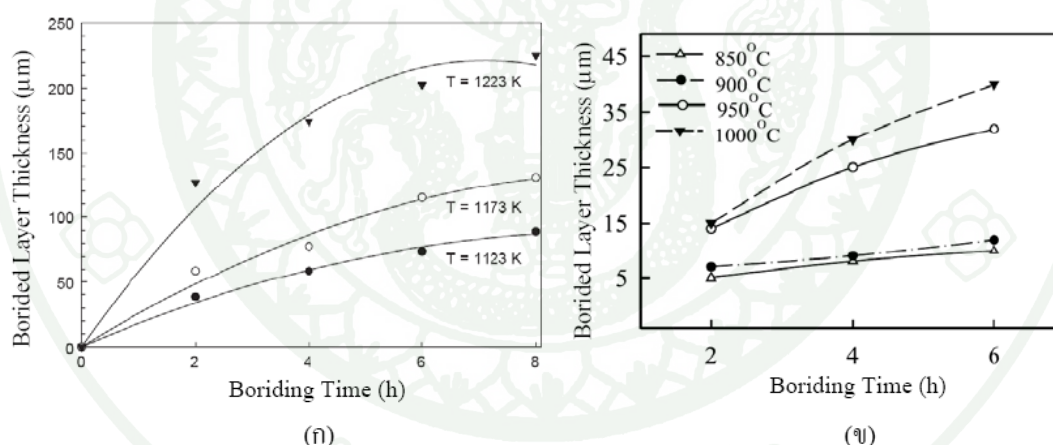
ภาพที่ 2 การติดตั้งอุปกรณ์ในกระบวนการบอโรดิงโดยวิธีแพ็ค

กระบวนการบอโรดิงโดยวิธีแพ็คมีข้อดีหลายประการ คือ เป็นวิธีการที่มีความปลอดภัย สามารถเคลื่อนย้ายชุดอุปกรณ์ได้สะดวก สามารถเปลี่ยนแปลงส่วนผสมของผงที่ใช้ในการเคลือบ

ได้ตามความต้องการ นอกจากนี้วิธีนี้ก็ยังสามารถใช้ได้กับเตาทุกชนิดที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้จึงเป็นวิธีที่ลดข้อจำกัดทางด้านเครื่องมือด้วย มีความคุ้มค่าสูง และเป็นกระบวนการที่ไม่เป็นอันตรายเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการบอโรดิงในแบบอื่นๆ (Davis, 2002; Ozdemir *et al.*, 2009)

กระบวนการบอโรดิงเป็นกระบวนการที่อาศัยการแพร่ของอะตอมโบรอนเข้าสู่ผิวชิ้นงานเพื่อเกิดเป็นชั้นบอโรดิง ดังนั้นจลนพลศาสตร์ของกระบวนการที่ส่งผลต่อการโตของชั้นบอโรดิง หรือความหนาของชั้นบอโรดิงที่ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

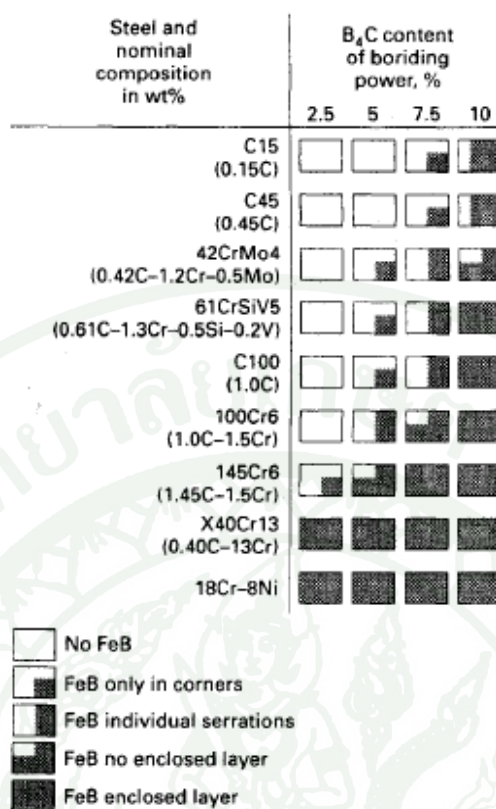
ก. วัสดุที่นำมาทำการเคลือบผิว จากการศึกษางานวิจัยของ Sen *et al.* (2005) และงานวิจัยของ Ozbek *et al.* (2002) ซึ่งได้ศึกษากระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ ระยะเวลา และวิธีการเดียวกัน แต่ใช้วัสดุต่างชนิดกันคือ AISI 4140 และ AISI 316L ซึ่งวัสดุทั้งสองมีส่วนผสมต่างกัน พบว่าความหนาของชั้นบอโรดิงที่ได้ไม่เท่ากัน โดยชั้นบอโรดิงที่เกิดขึ้นบน AISI 316L มีอัตราการการโตช้ากว่า และมีความหนาน้อยกว่าบน AISI 4140 (ภาพที่ 3)



ภาพที่ 3 ความหนาของชั้นบอโรดิงจากการบอโรดิงในวัสดุ (ก) AISI 4140 และ (ข) AISI 316L

ที่มา: Ozbek *et al.* (2002); Sen *et al.* (2005)

ข. ปริมาณของบอโรดิงเอเจนท์ในผงที่ใช้บอโรดิง ซึ่งจะมีผลต่อการเพิ่มปริมาณการเกิดเฟส FeB ในชั้นบอโรดิง สามารถแสดงได้ตามภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ผลของปริมาณโบรอนคาร์ไบด์ในผงต่อการเกิดเฟส FeB

ที่มา: Davis (2002)

ค. อุณหภูมิและเวลาในการบอโรดิ่ง เนื่องจากกระบวนการบอโรดิ่งเป็นกระบวนการที่อาศัยการแพร่ของอะตอมโบรอน จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าความหนาของชั้นบอโรดิ่งที่ได้จากการบอโรดิ่งสัมพันธ์กับอุณหภูมิและเวลาตามสมการที่ (1) (Ozdemir *et al.*, 2009)

$$d^2 = Kt \quad (1)$$

เมื่อ d = ความหนาของชั้นเคลือบ (ไมครอน)
 t = เวลาที่ใช้ในการบอโรดิ่ง (ชั่วโมง)
 K = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (ตารางไมครอน/ชั่วโมง)
 ซึ่งสัมพันธ์กับอุณหภูมิตามสมการที่ (2)

$$K = K_0 \exp (-Q/RT) \quad (2)$$

เมื่อ K_0 = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่(ตารางไมครอน/ชั่วโมง)

Q = ค่าพลังงานกระตุ้น (จูล/โมล)

R = ค่าคงที่ของแก๊ส (จูล/โมล·เคลวิน)

T = อุณหภูมิที่ใช้ในการบอโรดิ้ง (เคลวิน)

โดยทั่วไปการเคลือบผิวด้วยกระบวนการบอโรดิ้งในโลหะกลุ่มเหล็กจะสามารถเกิดขึ้นเคลือบเหล็กบอโรไดซ์ได้ 2 ชนิด คือ

ก. ชนิดเฟสเดี่ยว (Single Phase) ซึ่งจะประกอบด้วยชั้น Fe_2B เป็นชั้นเคลือบที่มีปริมาณของอะตอมเหล็กสูง

ข. ชนิดเฟสคู่ (Double Phase) ซึ่งจะประกอบด้วยชั้น Fe_2B และชั้น FeB เป็นชั้นเคลือบที่มีความแตกต่างกันของปริมาณของอะตอมเหล็ก โดยชั้น FeB จะมีปริมาณของอะตอมเหล็กต่ำกว่าชั้น Fe_2B และมีการเรียงตัวของชั้น FeB อยู่ติดกับเนื้อชิ้นงานส่วนชั้น Fe_2B จะอยู่ที่ผิวนอกของชั้น FeB

ซึ่งชั้นเคลือบเหล็กบอโรไดซ์ที่เกิดขึ้นทั้ง FeB และ Fe_2B มีลักษณะและสมบัติที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 5) โดยที่ FeB จะมีความแข็งสูงจึงเปราะและแตกหักได้ง่ายเมื่อนำไปใช้งาน ส่วน Fe_2B จะมีความแข็งต่ำกว่าเล็กน้อยจึงมีความเหนียวมากกว่า FeB แต่การที่จะเกิดเป็นชั้นเคลือบบอโรไดซ์ชนิดเฟสคู่หรือเฟสเดียวนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

ก. ความสามารถในการแพร่ของอะตอมโบรอน

ข. ส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นงาน

ค. อุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว

ง. เวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว

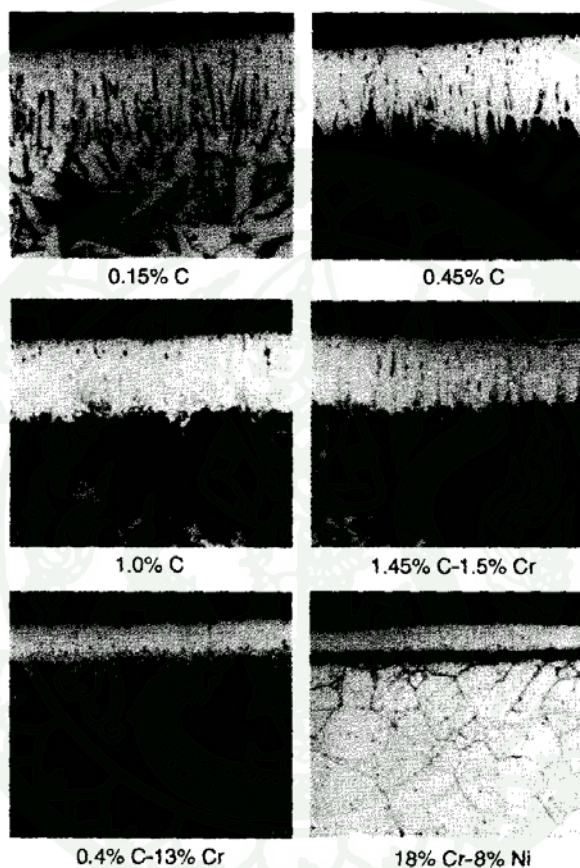
ตารางที่ 5 ลักษณะและสมบัติของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์

ลักษณะ / สมบัติ	ชั้น FeB	ชั้น Fe ₂ B
โครงสร้างผลึก	Orthorhombic (Fe = 4 อะตอม , B = 4 อะตอม)	Body-center tetragonal (Fe = 8 อะตอม , B = 4 อะตอม)
ขนาดผลึก (อัตรอม)	a = 4.053 b = 5.495 c = 2.946	a = 5.078 c = 4.249
ความแข็ง (HV)	1900-2100	1800-2000
ความหนาแน่น (กรัม/เซนติเมตร ³)	6.75	7.43
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	1540	1390
สัมประสิทธิ์การขยายตัว ทางความร้อน (ppm/°C)	23	7.65-9.2
ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (ปาสกาล)	500×10^9	$285 \times 10^9 - 295 \times 10^9$
เปอร์เซ็นต์ของโบรอน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	16.23	8.83

ที่มา: Sinha and Division (1994)

สำหรับรูปร่าง และลักษณะของชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นจากกระบวนการบอไรดิงในโลหะกลุ่มเหล็กก็จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของวัสดุนั้นๆ (ภาพที่ 5) และหากวัสดุนั้นต้องมีการเติมธาตุผสมลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติบางอย่างให้เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งธาตุผสมแต่ละชนิดก็จะมีผลต่อโครงสร้างและสมบัติของชั้นบอไรด์แตกต่างกัน เช่น

ก. คาร์บอน ไม่สามารถละลายในชั้นบอไรต์ได้และไม่สามารถแพร่ผ่านชั้นบอไรต์ได้ ในระหว่างการทำบอไรดิ้งคาร์บอนจะถูกผลักให้ออกไปจากชั้นบอไรต์เข้าไปในเนื้อโลหะหรือชิ้นงาน เพื่อรวมตัวกับเหล็กและโบรอนเกิดเป็น $\text{Fe}_3(\text{B,C})$ ซึ่งจะเรียงตัวอยู่ระหว่างชั้นของ Fe_2B และเนื้อวัสดุ



ภาพที่ 5 ลักษณะของชั้นบอไรต์ที่เกิดขึ้นบนวัสดุชนิดต่างๆ

ที่มา: Davis (2002)

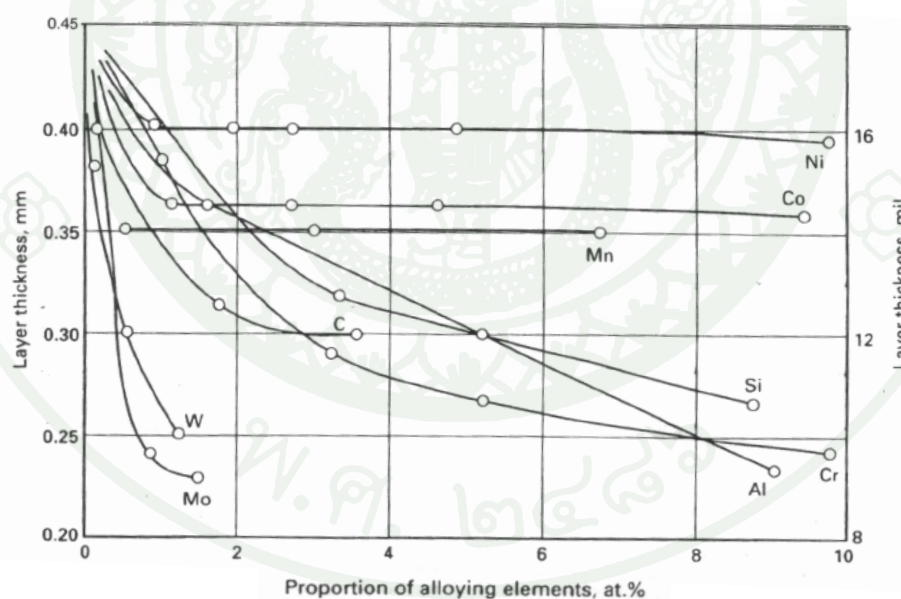
ข. ซิลิกอน ไม่สามารถละลายในชั้นบอไรต์ได้เช่นเดียวกับคาร์บอน โดยธาตุนี้จะถูกอะตอมโบรอนผลักจากบริเวณผิวชิ้นงานให้เข้าไปในเนื้อโลหะแล้วรวมตัวเป็น $\text{FeSi}_{0.4}\text{B}_{0.6}$ และ Fe_5SiB_2 ซึ่งมีโครงสร้างเป็นเหล็กเฟอร์ไรต์ที่มีลักษณะที่อ่อนนุ่มเรียงตัวอยู่ใกล้กับชั้นบอไรต์และมีผลทำให้ความต้านทานการเสียดสีของชั้นบอไรต์ที่เกิดขึ้นลดลง

ค. นิกเกิล มีผลทำให้การเติบโตของชั้นบอไรด์ลดลง โดยนิกเกิลจะเข้าไปรวมตัวกับโบรอนเกิดเป็น Ni_3B เรียงตัวเป็นชั้นแยกออกมาอยู่ใต้ชั้นบอไรด์

ง. โครเมียม มีผลทำให้การเติบโตของชั้นบอไรด์ลดลงเช่นกัน และทำให้ลักษณะของชั้นบอไรด์มีความราบเรียบมากขึ้น

จ. ทังสเตน โมลิบดีนัม และวานาเดียม โดยธาตุเหล่านี้มีผลทำให้ชั้นบอไรด์ที่ได้มีความหนาและความราบเรียบลดลงหรือมีรูปร่างเป็นลักษณะของฟันปลาในพวกเหล็กกล้าคาร์บอน

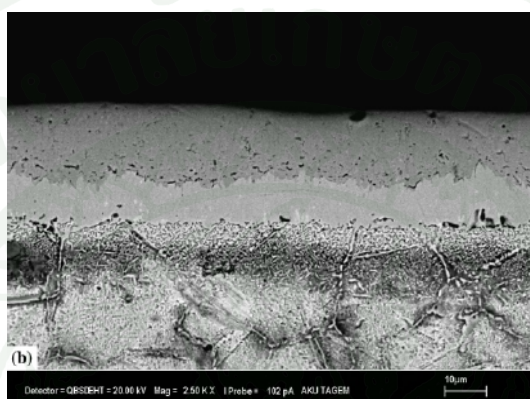
และนอกจากนี้ปริมาณของธาตุผสมที่เติมลงไปก็มีผลต่อความหนาของชั้นบอไรด์ ซึ่งหากมีการเติมธาตุผสมในปริมาณมากก็จะทำให้ชั้นบอไรด์ที่ได้มีความหนาลดลงกว่าการเติมธาตุผสมในปริมาณน้อยกว่า โดยสามารถแสดงการลดลงของความหนาชั้นบอไรด์กับปริมาณการเติมธาตุผสมแต่ละชนิดในภาพที่ 6



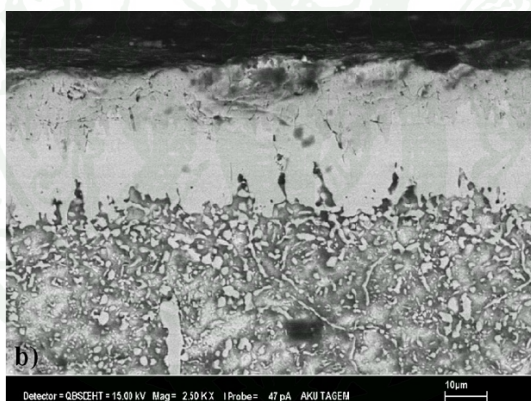
ภาพที่ 6 การลดลงของความหนาชั้นบอไรด์กับปริมาณการเติมธาตุผสมชนิดต่างๆ

ที่มา: Davis (2002)

จากการศึกษาวิจัยพบว่ากระบวนการบอโรดิงในเหล็กกล้าไร้สนิมนั้น ชั้นบอไรด์ที่ได้มีลักษณะราบเรียบเกาะติดกับผิวชิ้นงาน (ภาพที่ 7) เนื่องจากในเหล็กกล้าไร้สนิมมีส่วนผสมของธาตุอื่นๆ ที่นอกเหนือจากธาตุเหล็ก เช่น คาร์บอน โครเมียม แมงกานีส นิกเกิล เป็นต้น โดยส่วนใหญ่ธาตุเหล่านี้จะไปขัดขวางการแพร่เข้าสู่ชิ้นงานของอะตอมโบรอน ทำให้ชั้นบอไรด์มีการโคจาลง เกิดชั้นเคลือบที่ค่อนข้างบางและสม่ำเสมอ



(ก)



(ข)

ภาพที่ 7 ลักษณะของชั้นบอไรด์ที่เกิดขึ้นบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม (ก) AISI 304 และ (ข) AISI 440C

ที่มา: Taktak (2007), Taktak (2006)

กระบวนการบอโรดิงเป็นกระบวนการเคลือบผิวที่เหนือกว่ากระบวนการเคลือบผิวอื่นๆ ตรงที่สามารถให้ชั้นเคลือบบอโรดิง ซึ่งมีสมบัติเด่นในด้านความแข็งที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชั้นเคลือบจากกระบวนการเคลือบแบบอื่นดังแสดงในตารางที่ 6 นอกจากนี้ชั้นเคลือบบอโรดิงยังมีสมบัติที่ดีในด้านอื่นๆ อีกด้วย ดังนี้

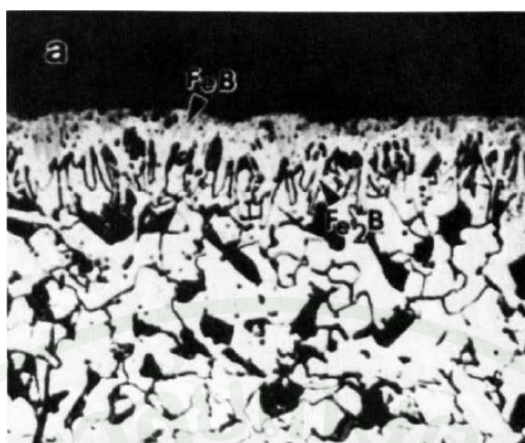
- ก. ชั้นเคลือบบอโรดิงมีค่าความแข็งสูงมาก (ประมาณ 1800-2100 HV)
- ข. ชั้นเคลือบบอโรดิงมีจุดหลอมเหลวสูงมาก (ประมาณ 1390 องศาเซลเซียส)
- ค. ชั้นเคลือบบอโรดิงมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ
- ง. ชั้นเคลือบบอโรดิงมีสมบัติด้านการยึดเกาะ (Adhesive) และการสึกกร่อน (Abrasion) สูง
- จ. ชั้นเคลือบบอโรดิงช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความล้า (Fatigue) ที่ผิวของชิ้นงานให้ดีขึ้น
- ฉ. ชั้นเคลือบบอโรดิงสามารถทนทานต่อการกัดกร่อนทั้งจากสารเคมีและสภาพแวดล้อมได้
- ช. ชั้นเคลือบบอโรดิงมีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงได้
- ซ. ชั้นเคลือบบอโรดิงมีความต้านทานต่อการทำปฏิกิริยากับโลหะหลอมเหลว
- ณ. ชั้นเคลือบบอโรดิงสามารถเกิดขึ้นได้ในโลหะกลุ่มเหล็กหลากหลายชนิด

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบความแข็งของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์กับชั้นเคลือบจากกระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีอื่น

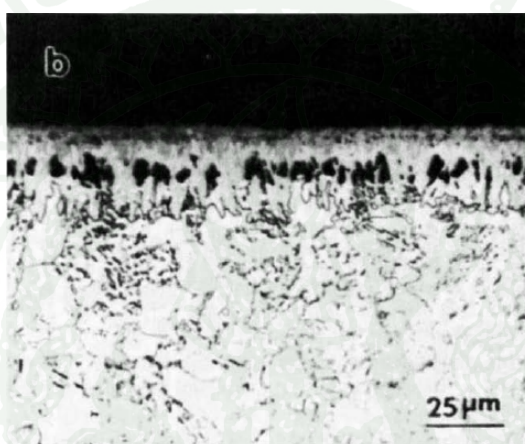
วัสดุ	ความแข็ง (HV)
เหล็กเหนียวผ่านกระบวนการบอไรดิ้ง	1600
เหล็กกล้าเครื่องมือ AISI H13 ผ่านกระบวนการบอไรดิ้ง	1800
เหล็กกล้าเครื่องมือ AISI A2 ผ่านกระบวนการบอไรดิ้ง	1900
เหล็กโครงสร้างมาร์เทนไซด์	900
เหล็กกล้าเครื่องมือ AISI H13 ผ่านกระบวนการชุบแข็งและอบคืนตัว	540-600
เหล็กกล้าเครื่องมือ AISI A2 ผ่านกระบวนการชุบแข็งและอบคืนตัว	630-700
เหล็กไฮสปีด M42	900-910
เหล็กกล้าผ่านกระบวนการไนไตรดิ้ง	650-1700
เหล็กคาร์บอนต่ำผ่านกระบวนการคาร์บูไรซิง	650-950
เหล็กชุบโครเมียม	1000-1200

ที่มา: Davis (2002)

อย่างไรก็ตามแม้ว่ากระบวนการบอไรดิ้งจะเป็นกระบวนการที่มีข้อได้เปรียบกว่ากระบวนการเคลือบผิวอื่นๆ แต่เนื่องจากกระบวนการนี้ต้องอาศัยการแพร่ของอะตอมโบรอนเข้าสู่ชิ้นงานเพื่อเกิดเป็นชั้นบอไรด์ขึ้นที่ผิวชิ้นงาน และความหนาชั้นเคลือบที่ได้ก็ขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวด้วย จึงเป็นกระบวนการที่ต้องอาศัยเวลาเพื่อให้ได้ความหนาชั้นเคลือบตามที่ต้องการ ดังนั้นถ้าสามารถปรับปรุงกระบวนการบอไรดิ้งให้ใช้เวลาในการเคลือบผิวสั้นลงได้ ก็จะเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการบอไรดิ้งให้สูงขึ้นอีก ซึ่งเป็นเรื่องที่น่าสนใจและมีประโยชน์มากสำหรับวงการอุตสาหกรรมเพราะจะสามารถลดระยะเวลา ประหยัดต้นทุน และเพิ่มกำลังการผลิตให้สูงขึ้นได้ จากการศึกษางานวิจัยต่างๆ พบว่ามีนักวิจัยบางส่วนที่เห็นความสำคัญตรงจุดนี้ และทำการศึกษาด้วยการหาวิธีการต่างๆ มาช่วยในกระบวนการบอไรดิ้ง เช่น งานวิจัยของ Nam *et al.* (1998) ที่มีการนำพลาสมาช่วยในกระบวนการบอไรดิ้งแบบใช้แก๊สผสมของ $\text{BCl}_3\text{-H}_2\text{-Ar}$ โดยทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1073 เคลวิน เป็นเวลา 1-4 ชั่วโมง พบว่าสามารถทำให้เกิดชั้นเคลือบบอไรด์ได้ (ภาพที่ 8) แต่การเติบโตของชั้นเคลือบที่ได้จะช้าและมีความแข็งต่ำกว่าชั้นเคลือบบอไรด์ที่ได้จากกระบวนการบอไรดิ้งด้วยวิธีปกติ



(ก)



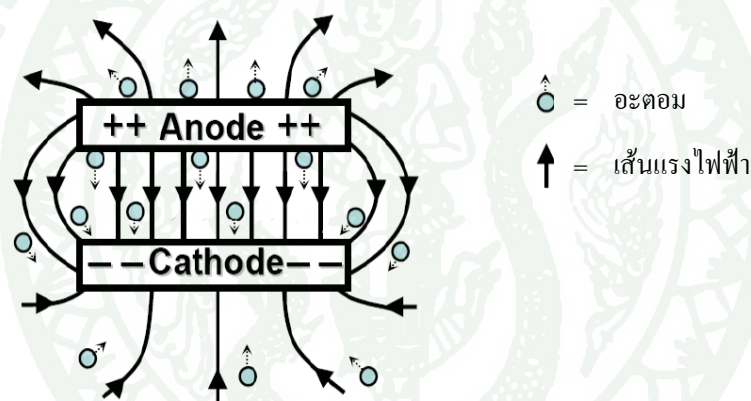
(ข)

ภาพที่ 8 โครงสร้างบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์ของเหล็ก (ก) SS41 และ (ข) SM45C ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งที่อุณหภูมิ 1073 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ที่มา: Nam *et al.* (1998)

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Davis *et al.* (1998) ที่มีการนำเทคนิคการทำไอออนนิมเพลน เทชันมาช่วยในกระบวนการบอไรดิ้ง ซึ่งพบว่าสามารถทำให้เกิดชั้นเคลือบบอไรด์ได้ในเวลาอันสั้น (ประมาณ 15 นาที) แต่วิธีการนี้ค่อนข้างจะมีข้อจำกัดทางด้านเครื่องมือเพราะต้องใช้ระบบการทำ ไอออนนิมเพลนที่ต้องใช้ระบบสุญญากาศ ดังนั้นเมื่อกลับมาพิจารณากระบวนการบอไรดิ้งแล้ว ทางเลือกหนึ่งที่เป็นไปได้สำหรับการลดเวลาในการเคลือบผิวให้น้อยลง คือ การเร่งการแพร่ของ อะตอมโบรอน และการให้กระแสไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงานในการเคลือบผิวก็สามารถเพิ่มความหนาของชั้นเคลือบได้ในงานวิจัยของ Zhou *et al.* (2008) ซึ่งได้มีการให้กระแสไฟฟ้ากระแสตรงแก่ ชิ้นงานที่ต้องการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยอะลูมิเนียมโดยกระบวนการอะลูมิเนียมไนซิง (Aluminizing

Process) พบว่าชิ้นงานที่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นสามารถเกิดชั้นเคลือบที่หนากว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ให้กระแสไฟฟ้า ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าไฟฟ้ากระแสตรงที่ให้แก่ชิ้นงานน่าจะมีส่วนช่วยให้การแพร่ของอะตอมอะลูมิเนียมสามารถแพร่ได้ดีขึ้น เพราะเมื่อมีกระแสไฟฟ้าในวงจรที่ต่อเข้ากับชิ้นงานที่ต้องการเคลือบผิว โดยที่กำหนดให้ชิ้นงานเป็นขั้วคาโทด ดังนั้นในขณะที่กระแสไฟฟ้าไหลก็จะเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นรอบบริเวณชิ้นงานและมีทิศทางของเส้นแรงไฟฟ้าออกจากขั้วแอโนดไปยังขั้วคาโทดตามทิศทางของกระแสไฟฟ้า จากการที่ชิ้นงานอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้านั้นน่าจะมีผลต่อทิศทางการแพร่ของอะตอมในกระบวนการเคลือบผิว ซึ่งอาจทำให้อะตอมถูกควบคุมให้แพร่ไปยังขั้วคาโทดตามทิศทางของสนามไฟฟ้า (ภาพที่ 9) จนบริเวณรอบชิ้นงานที่เป็นขั้วคาโทดมีความเข้มข้นของอะตอมที่แพร่เข้าไปมากกว่าบริเวณอื่น ทำให้ชิ้นงานที่เป็นขั้วคาโทดเกิดชั้นเคลือบที่หนากว่าเพราะอะตอมสามารถแพร่เข้าสู่ชิ้นงานได้ในปริมาณมากนั่นเอง



ภาพที่ 9 แบบจำลองทิศทางการแพร่ของอะตอมภายใต้สนามไฟฟ้า

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

- ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่มีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 7
- ผง Ekabor-I จากบริษัท BorTec GmbH
- กล่องบรรจุ (Container Box) สำหรับใส่ชิ้นงานและผง
- มาร์เบิล รีเอเจนต์ (Marble Reagent) ที่มีส่วนผสมตามตารางที่ 8

ตารางที่ 7 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ใช้ในการวิจัย (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Fe
1.04	0.38	0.41	0.021	0.001	16.59	0.43	Bal.

ตารางที่ 8 ส่วนผสมของมาร์เบิล รีเอเจนต์ ที่ใช้ในการวิจัย

คอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4)	ไฮโดรคลอริก (HCl)	น้ำกลั่น (H_2O)
4 กรัม	20 มิลลิลิตร	20 มิลลิลิตร

2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

- เตาอุณหภูมิสูงสำหรับอบโรดิง (Furnace) ยี่ห้อ ModuTemp รุ่น WW51A
- อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply) ยี่ห้อ GOODWILL รุ่น GPR3060D
- อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple) ชนิด Type-K
- เครื่องตัด (High Speed Cutter) ยี่ห้อ IMPTECH รุ่น C10
- เครื่องขัด (Alumina Wheel) ยี่ห้อ IMPTECH รุ่น 101
- อุปกรณ์สำหรับเมาท์แบบเย็น (Cold Mount) ใช้เรซินชนิด Epoxy หล่อในเบ้าพลาสติก
- กระดาษทราย ฝาสักหลาด และผงอะลูมินา

3. เครื่องมือวิเคราะห์ชั้นเคลือบ

- 3.1 เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD) ยี่ห้อ Philips รุ่น X'Pert Pro MPD
- 3.2 เครื่องมือวิเคราะห์ภาพ (Image Analyzer) โปรแกรม Image-Pro[®] Plus รุ่น 4.0
- 3.3 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM) ยี่ห้อ Nikon รุ่น ECLIPSE ME 600P
- 3.4 เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (Micro Vickers Hardness Tester) ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น MVK-H1

วิธีการ

1. การเตรียมชิ้นงาน

ตัดแท่งเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องตัดความเร็วสูงให้มีขนาดความยาวชิ้นละ 25 มิลลิเมตร แล้วขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทราย เบอร์ 120 240 400 600 เพื่อกำจัดสนิมหรือสิ่งสกปรกออกและล้างทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาด

2. การเคลือบผิว

เช็ดทำความสะอาดแล้วบรรจุชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C จำนวนสามชิ้น ดังนี้ 1. ชิ้นงานอ้างอิง 2. แอโนด 3. ชิ้นงานแคโทด และผง Ekabor-I ลงในกล่องบรรจุ พร้อมทั้งติดตั้งตัววัดอุณหภูมิชิ้นงาน ต่ออุปกรณ์สำหรับจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับขั้วอิเล็กโทดทั้งสอง โดยให้ชิ้นงานที่ต้องการเคลือบผิวเป็นขั้วคาโทดดังภาพที่ 10 ปิดฝากล่องและปิดรอยต่อรอบกล่องด้วยซีเมนต์ให้สนิท รอจนซีเมนต์บ่มตัวและแข็งตัวแล้วนำเข้าเตาไฟฟ้า เปิดเตาให้ความร้อนและเปิดสวิตช์อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์ จนอุณหภูมิชิ้นงานเพิ่มขึ้นถึงอุณหภูมิที่ต้องการเคลือบผิวแล้วรักษาอุณหภูมิในการเคลือบผิวตามเวลาที่ต้องการ เมื่อครบตามกำหนดเวลาแล้วปิดเตาและปิดสวิตช์อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรง นำกล่องบรรจุออกจากเตาปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปวิเคราะห์ชั้นเคลือบ

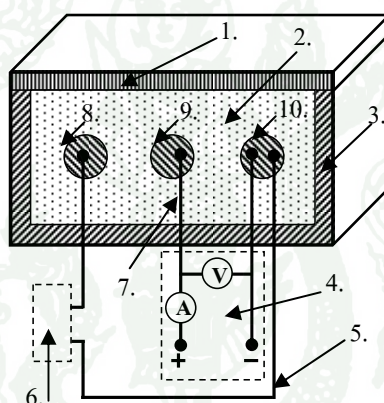
3. การวิเคราะห์ชั้นเคลือบ

3.1 นำชิ้นงานที่ผ่านการบอโรไดงมาวิเคราะห์โครงสร้างของชั้นเคลือบด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้รังสีเอกซ์ชนิด $\text{Cu-K}\alpha$ มีความยาวคลื่นเฉลี่ย 1.541 อังสตรอม

3.2 ตัดชิ้นงานตามขวางด้วยเครื่องตัดความเร็วสูงหลังจากนั้นนำชิ้นงานมาอัดด้วยวิธีแมน-ทแบบเย็น นำไปขัดหยาบด้วยกระดาษทรายจนถึงเบอร์ 1200 ขัดละเอียดด้วยผงอะลูมินา และกัดผิวชิ้นงานด้วยมาร์เบิล รีเอเจน แล้วเป่าให้แห้ง

3.3 ถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและวัดความหนาของชั้นเคลือบบอโรไดงด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ

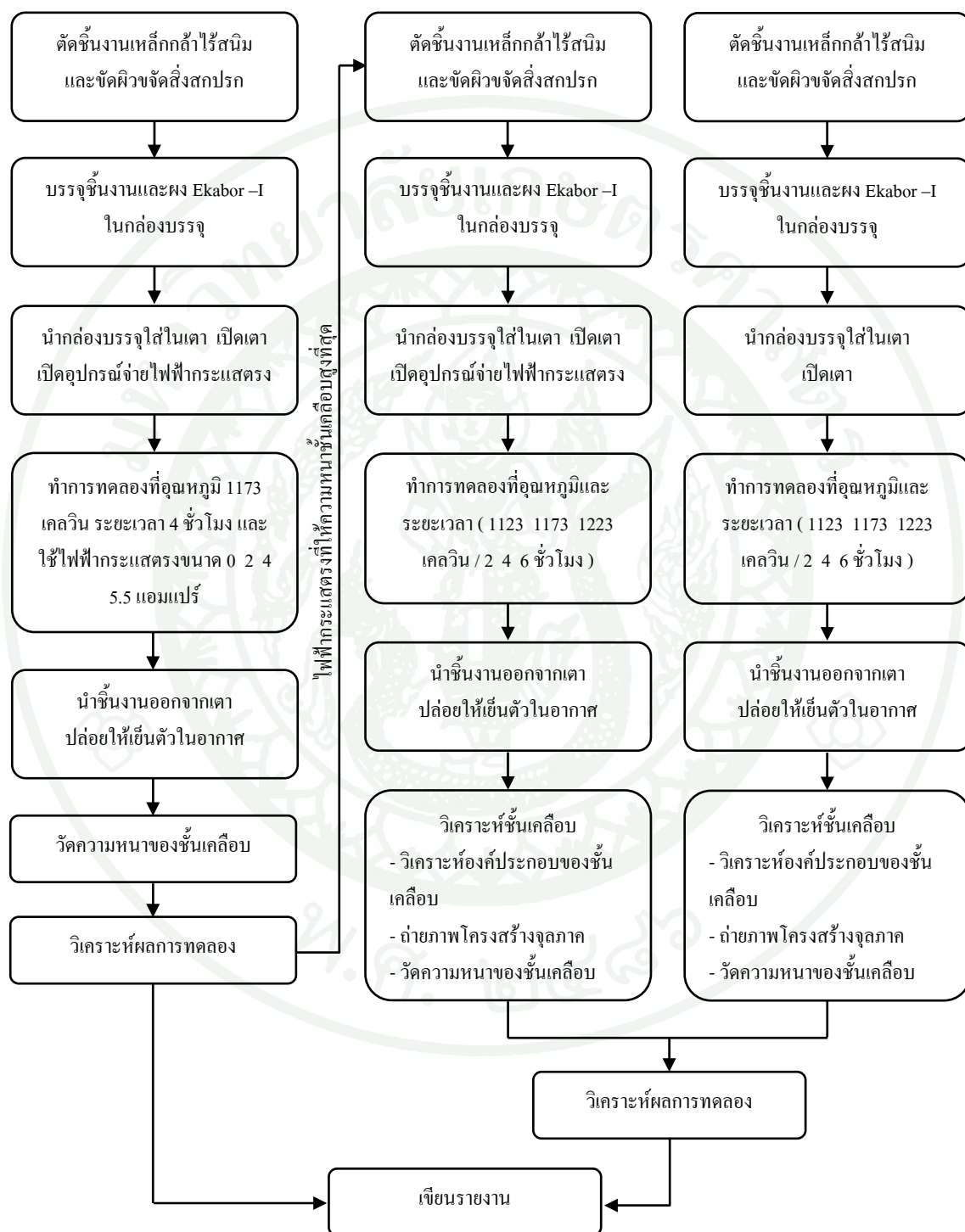
3.4 วัดความแข็งของชิ้นงานด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์



ภาพที่ 10 ภาพตัดขวางกล้องบรรจุชิ้นงานและการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในงานวิจัย : 1) ฝา; 2) ผง Ekabor-I; 3) กล้องบรรจุ; 4) เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง; 5) เทอร์โมคัทเปิด; 6) อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ; 7) ลวดนำไฟฟ้า; 8) ชิ้นงานอ้างอิง; 9) แอโนด; 10) ชิ้นงานที่เป็นคาโทด

นอกจากนี้ในงานวิจัยมีการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาขนาดกระแสไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำให้ความหนาชั้นเคลือบมากที่สุด โดยใช้วิธีการในเตรียมผิวชิ้นงานและการเคลือบผิวแบบเดียวกันแต่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้าระหว่าง 0 – 5.5 แอมแปร์ แล้วนำชิ้นงานไปวัดความหนาชั้นเคลือบ

โดยการดำเนินงานในการวิจัยครั้งนี้สามารถสรุปขั้นตอนเป็นแผนภาพงานวิจัยได้ดังแสดง
ในภาพที่ 11

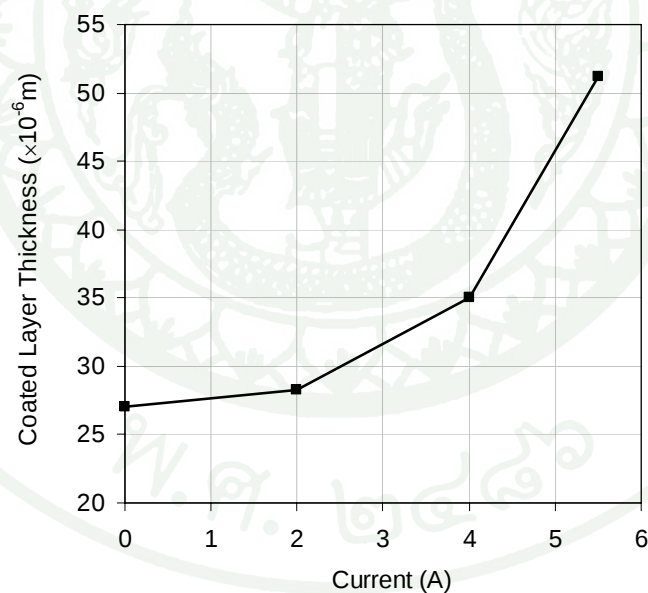


ภาพที่ 11 ขั้นตอนการวิจัย

ผลและวิจารณ์

ผล

จากการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาขนาดของกระแสไฟฟ้ากระแสตรงที่ให้ชั้นเคลือบหนามากที่สุดของการเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยกระบวนการบอโรดิงโดยวิธีแพ็ค ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสไฟฟ้าที่ให้แก่ชิ้นงาน ในการทดลองนี้ให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 0 2 4 และ 5.5 แอมแปร์ แก่ชิ้นงานในขณะที่เคลือบผิว หลังจากนั้นนำชิ้นงานมาวัดความหนาชั้นเคลือบ พบว่าการให้กระแสไฟฟ้าขนาด 5.5 แอมแปร์ แก่ชิ้นงานทำให้เกิดชั้นเคลือบบนผิวชิ้นงานมีความหนามากที่สุดดังแสดงผลการทดลองในภาพที่ 12 ซึ่งกระแสไฟฟ้าขนาด 5.5 แอมแปร์ ที่ให้แก่ชิ้นงานทรงกระบอกตันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร สูง 25 มิลลิเมตร นั้นสามารถคำนวณเป็นค่าความหนาแน่นกระแส (Current Density) มีค่าเท่ากับ 0.49 แอมแปร์/ตารางเซนติเมตร



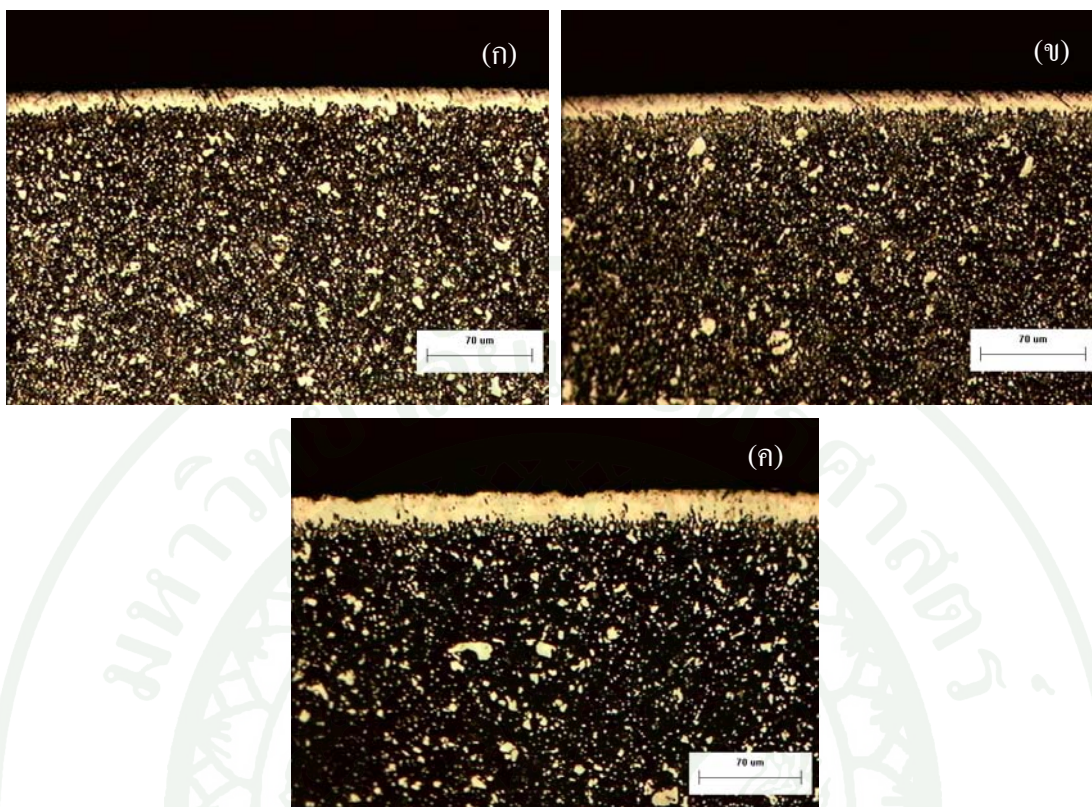
ภาพที่ 12 ความหนาชั้นเคลือบบนชิ้นงานหลังจากกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง โดยให้กระแสไฟฟ้ากระแสตรงขนาดต่างๆ

จากผลการทดลองเบื้องต้นสามารถนำมาประกอบเพื่อศึกษาการเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 - 1223 เคลวิน เป็นระยะเวลา 2 - 6 ชั่วโมง ด้วยกระบวนการบอโรไดมด้วยวิธีแพ็คทั้งสองแบบ คือ แบบที่ไม่ให้กระแสไฟฟ้าแก่ชิ้นงาน และแบบที่มีการให้กระแสไฟฟ้าแก่ชิ้นงานโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์ หลังจากนำชิ้นงานมาวิเคราะห์ชั้นเคลือบได้ผลการทดลองดังนี้

1. การเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 - 1223 เคลวิน ด้วยกระบวนการบอโรไดมแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้าแก่ชิ้นงาน

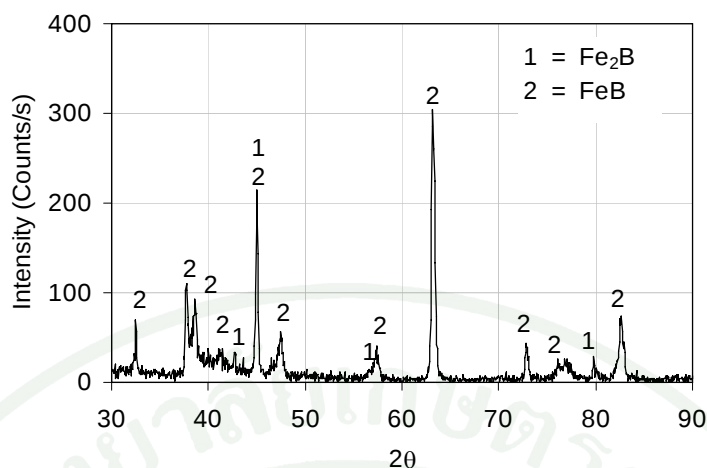
1.1 การเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน

จากการทดลองเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นระยะเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ด้วยกระบวนการบอโรไดมด้วยวิธีแพ็คที่ไม่มีการให้กระแสไฟฟ้าแก่ชิ้นงาน เมื่อวิเคราะห์ชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการบอโรไดมโดยการถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง พบว่าเกิดชั้นเคลือบขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน สามารถมองเห็นการแยกออกเป็นชั้นๆ ของชิ้นงานและชั้นเคลือบได้อย่างชัดเจน ลักษณะของชั้นเคลือบจะอัดแน่น มีความราบเรียบ เกาะติดอยู่กับผิวชิ้นงาน ความหนาของชั้นเคลือบจะค่อนข้างมีความสม่ำเสมอ รอยต่อระหว่างผิวชิ้นงานกับชั้นเคลือบมีความหยักเล็กน้อยคล้ายลักษณะของฟันเลื่อยเล็กๆ ที่มีความสูงของฟันเพียงเล็กน้อย โดยความหนาของชั้นเคลือบจะแตกต่างกันเมื่อใช้เวลาการเคลือบผิวไม่เท่ากัน ความหนาของชั้นเคลือบจะมากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการเคลือบผิวให้นานขึ้น ดังแสดงโครงสร้างจุลภาคและลักษณะของชั้นเคลือบบนผิวชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรไดมที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นระยะเวลาต่างๆ ในภาพที่ 13



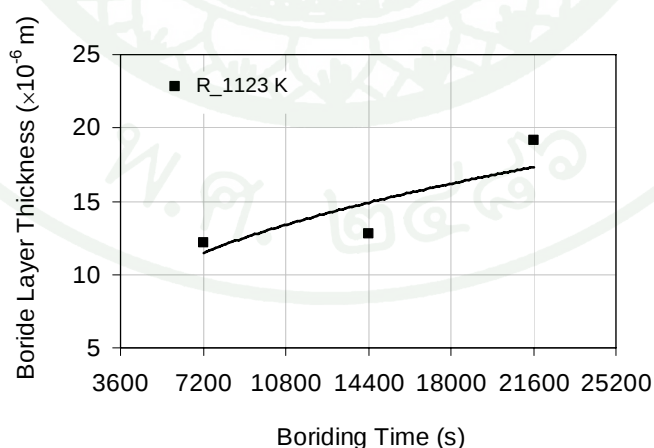
ภาพที่ 13 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 2 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง และ (ค) 6 ชั่วโมง

จากภาพโครงสร้างจุลภาควัดกล่าวจะเห็นได้ว่าบริเวณชั้นเคลือบมีสีแตกต่างกันเล็กน้อย แสดงได้ว่าชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่เกิดขึ้นเป็นชนิดเฟสคู่ (FeB , Fe_2B) ประกอบด้วยชั้นของ FeB (สีเข้ม) อยู่บนสุดและชั้นถัดมาเป็นชั้นของ Fe_2B (สีอ่อน) และสามารถยืนยันผลดังกล่าวได้จากการตรวจสอบชั้นเคลือบด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่ามีสเปกตรัมของสารประกอบเหล็กบอไรด์ทั้งสองชนิด คือ FeB และ Fe_2B อยู่ในชั้นเคลือบบอไรด์ ดังแสดงผลการวิเคราะห์ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในภาพที่ 13



ภาพที่ 14 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงาน ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

จากการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพสามารถวัดความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานได้ พบว่าชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดจากกระบวนการบอโรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นระยะเวลา 2 – 6 ชั่วโมง มีความหนาในช่วง 12.19 – 19.14 ไมโครเมตร ดังแสดงความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้นจากการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นระยะเวลาต่างๆ ในภาพที่ 15 และชั้นเคลือบบอไรด์นี้มีความหนาของชั้น FeB ในช่วง 4.63 – 8.92 ไมโครเมตร

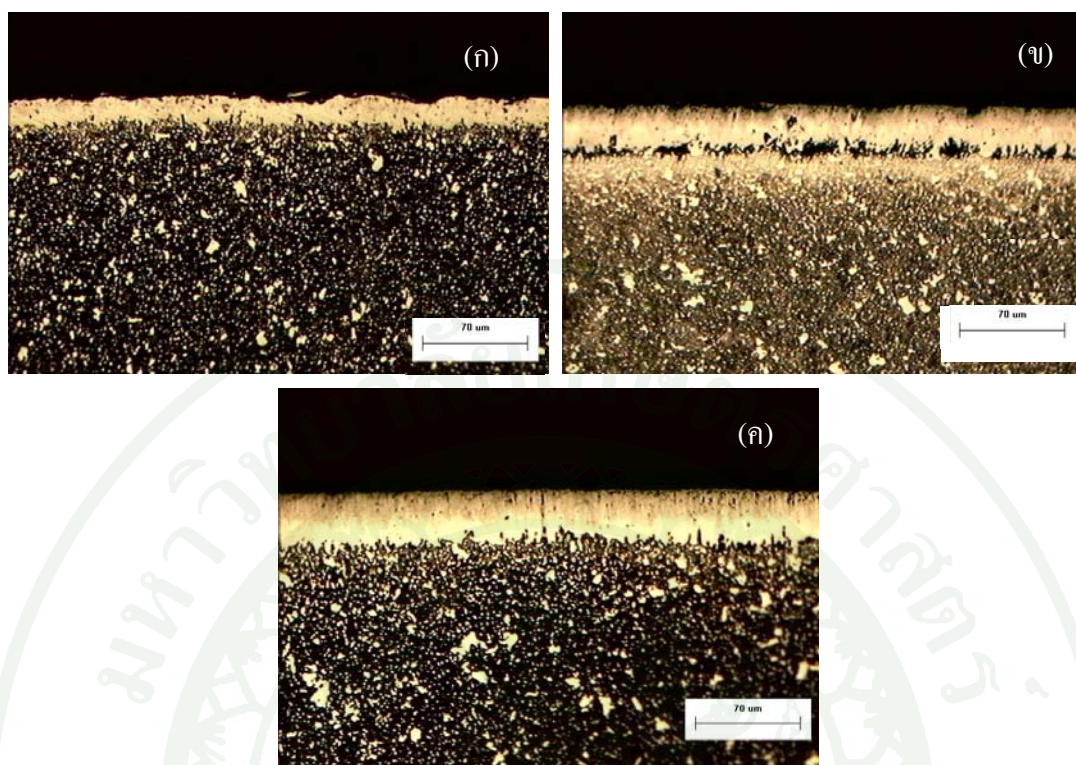


ภาพที่ 15 ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์บนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นระยะเวลาต่างๆ

นอกจากนี้จากการวัดอุณหภูมิของชิ้นงาน โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลสัมผัสกับชิ้นงานและอ่านค่าอุณหภูมิผ่านตัวแสดงค่า ซึ่งเป็นค่าของอุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานจริงๆ ในช่วงระยะเวลาที่ทำการเคลือบผิว พบว่าขณะทำการเคลือบผิวโดยใช้อุณหภูมิในการเคลือบผิวเท่ากับ 1123 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานค่อนข้างคงที่และมีค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานเท่ากับ 1124 เคลวิน

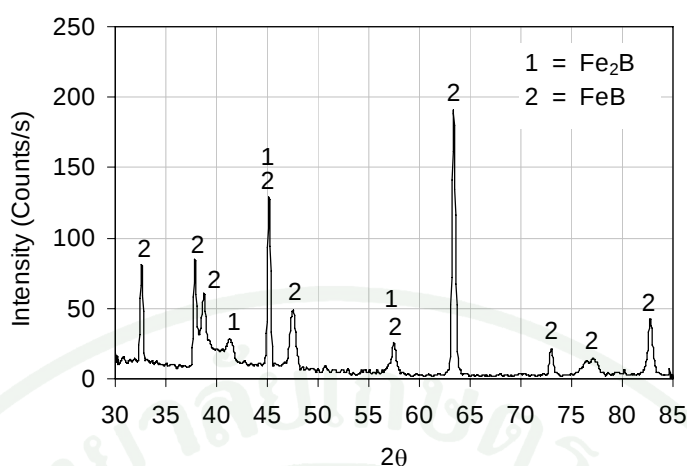
1.2 การเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน

จากการทดลองเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นระยะเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ด้วยกระบวนการบอโรดิงโดยวิธีแพ็คที่ไม่มีการให้กระแสไฟฟ้าแก่ชิ้นงาน เมื่อวิเคราะห์ชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการบอโรดิงโดยการถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง พบว่าเกิดชั้นเคลือบขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน สามารถมองเห็นการแยกออกเป็นชั้นๆ ของชิ้นงานและชั้นเคลือบได้อย่างชัดเจน ลักษณะของชั้นเคลือบจะอัดแน่น มีความราบเรียบ เกาะติดอยู่กับผิวชิ้นงาน ความหนาของชั้นเคลือบจะค่อนข้างมีความสม่ำเสมอ รอยต่อระหว่างผิวชิ้นงานกับชั้นเคลือบมีความหยักเล็กน้อยคล้ายลักษณะของฟันเลื่อยเล็กๆ ที่มีความสูงของฟันเพียงเล็กน้อย โดยความหนาของชั้นเคลือบจะแตกต่างกันเมื่อใช้เวลาการเคลือบผิวไม่เท่ากัน ความหนาของชั้นเคลือบจะมากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการเคลือบผิวให้นานขึ้น ดังแสดงโครงสร้างจุลภาคและลักษณะของชั้นเคลือบบนผิวชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นระยะเวลาต่างๆ ในภาพที่ 16



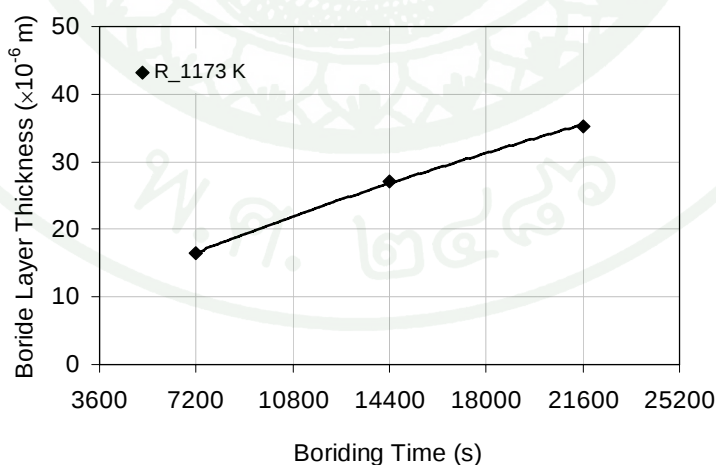
ภาพที่ 16 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 2 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง และ (ค) 6 ชั่วโมง

จากภาพ โครงสร้างจุลภาควัดกล่าวจะเห็นได้ว่าบริเวณชั้นเคลือบมีสีแตกต่างกันเล็กน้อย แสดงได้ว่าชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่เกิดขึ้นเป็นชนิดเฟสคู่ (FeB , Fe_2B) ประกอบด้วยชั้นของ FeB (สีเข้ม) อยู่บนสุดและชั้นถัดมาเป็นชั้นของ Fe_2B (สีอ่อน) และสามารถยืนยันผลดังกล่าวได้จากการตรวจสอบชั้นเคลือบด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่ามีสเปกตรัมของสารประกอบเหล็กบอไรด์ทั้งสองชนิด คือ FeB และ Fe_2B อยู่ในชั้นเคลือบบอไรด์ ดังแสดงผลการวิเคราะห์ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในภาพที่ 17



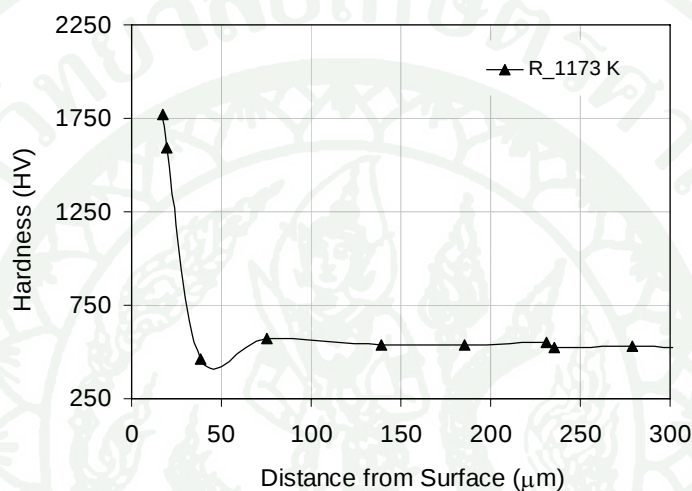
ภาพที่ 17 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงาน ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

จากการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพสามารถวัดความหนาของชั้นเคลือบบอโรดิงที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานได้ พบว่าชั้นเคลือบบอโรดิงที่เกิดจากกระบวนการบอโรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นระยะเวลา 2 – 6 ชั่วโมง มีความหนาในช่วง 16.45 – 35.24 ไมโครเมตร ดังแสดงความหนาของชั้นเคลือบบอโรดิงที่เกิดขึ้นจากการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นระยะเวลาต่างๆ ในภาพที่ 18 และชั้นเคลือบบอโรดิงนี้มีความหนาของชั้น FeB ในช่วง 9.27 – 18.19 ไมโครเมตร



ภาพที่ 18 ความหนาของชั้นเคลือบบอโรดิงบนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นระยะเวลาต่างๆ

นอกจากนี้เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า มาทดสอบความแข็งที่ตำแหน่งต่างๆ จากผิวลึกเข้าไปในเนื้อชิ้นงาน พบว่าชิ้นงานมีความแข็งที่ผิวสูงประมาณ 1800 HV ซึ่งเป็นความแข็งของชั้นเคลือบบอโร (FeB, Fe₂B) และค่าความแข็งจะมีค่าลดลงเมื่อทดสอบที่ระยะลึกเข้าไปในชิ้นงานมากขึ้นและค่าความแข็งจะค่อนข้างคงที่เมื่อถึงระยะความลึกที่เป็นเนื้อพื้นของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ซึ่งมีค่าความแข็งประมาณ 640 HV ดังแสดงผลการทดสอบความแข็งในภาพที่ 19



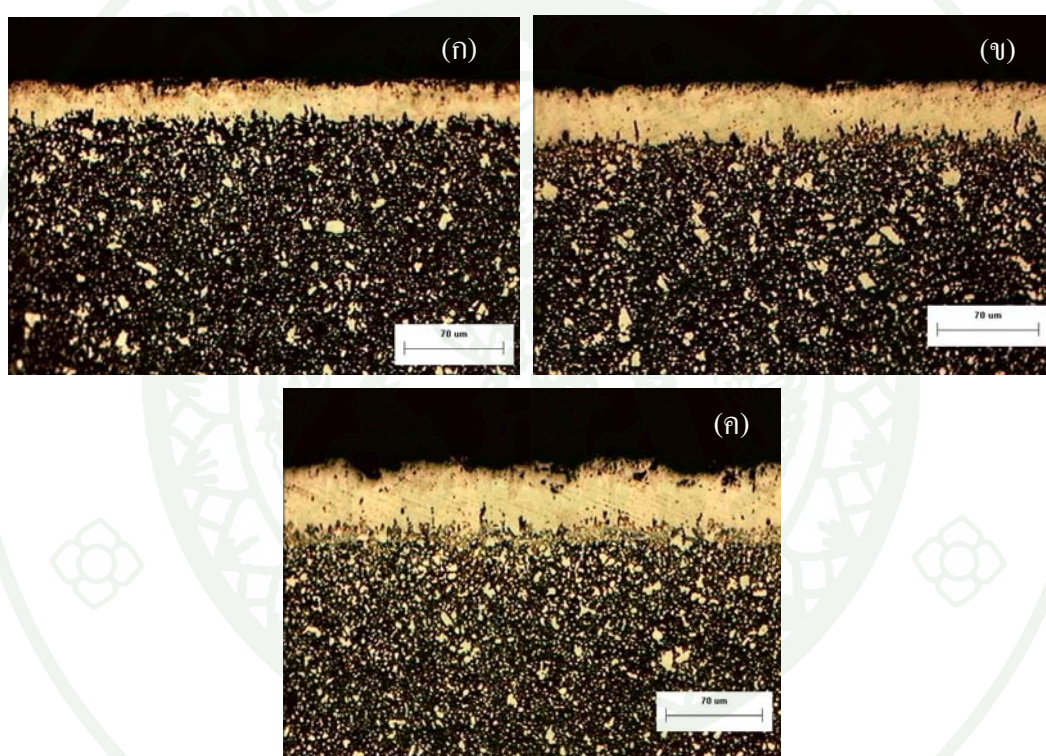
ภาพที่ 19 ค่าความแข็งที่ตำแหน่งต่าง ๆ จากผิวลึกเข้าไปในเนื้อพื้นของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

จากการวัดอุณหภูมิของชิ้นงานโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลสัมผัสกับชิ้นงานและอ่านค่าอุณหภูมิผ่านตัวแสดงค่า ซึ่งเป็นค่าของอุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานจริงๆ ในช่วงระยะเวลาที่ทำการเคลือบผิว พบว่าขณะทำการเคลือบผิวโดยใช้อุณหภูมิในการเคลือบผิวเท่ากับ 1173 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานค่อนข้างคงที่และมีค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานเท่ากับ 1174 เคลวิน

1.3 การเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน

จากการทดลองเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นระยะเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ด้วยกระบวนการบอโรดิงโดยวิธีแพ็คที่ไม่มีการให้กระแสไฟฟ้าแก่ชิ้นงาน เมื่อวิเคราะห์ชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการบอโรดิงโดยการถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง พบว่าเกิดชั้นเคลือบขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน สามารถมองเห็นการแยกออกเป็น

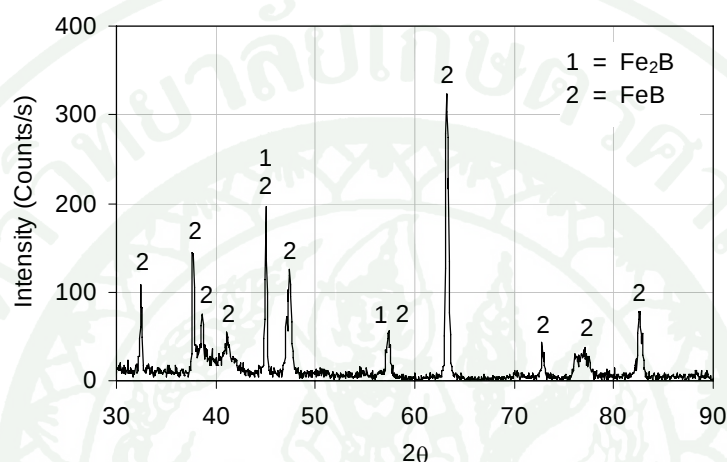
ชั้นๆ ของชิ้นงานและชั้นเคลือบได้อย่างชัดเจน ลักษณะของชั้นเคลือบจะอัดแน่น มีความราบเรียบ เกาะติดอยู่กับผิวชิ้นงาน ความหนาของชั้นเคลือบจะค่อนข้างมีความสม่ำเสมอ รอยต่อระหว่างผิวชิ้นงานกับชั้นเคลือบมีความหยักเล็กน้อยคล้ายลักษณะของฟันเลื่อยเล็กๆ ที่มีความสูงของฟันเพียงเล็กน้อย โดยความหนาของชั้นเคลือบจะแตกต่างกันเมื่อใช้เวลาการเคลือบผิวไม่เท่ากัน ความหนาของชั้นเคลือบจะมากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการเคลือบผิวให้นานขึ้น ดังแสดงโครงสร้างจุลภาค และลักษณะของชั้นเคลือบบนผิวชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นระยะเวลาต่างๆ ในภาพที่ 20



ภาพที่ 20 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอโรดิงของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 2 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง และ (ค) 6 ชั่วโมง

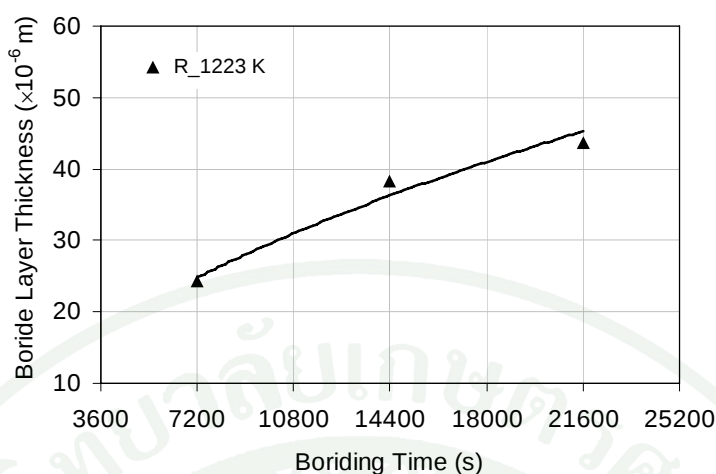
จากภาพโครงสร้างจุลภากดังกล่าวจะเห็นได้ว่าบริเวณชั้นเคลือบมีสีแตกต่างกันเล็กน้อย แสดงได้ว่าชั้นเคลือบเหล็กบอโรดิงที่เกิดขึ้นเป็นชนิดเฟสคู่ (FeB , Fe_2B) ประกอบด้วยชั้นของ FeB

(สีเข้ม) อยู่บนสุดและชั้นถัดมาเป็นชั้นของ Fe_2B (สีอ่อน) และสามารถยืนยันผลดังกล่าวได้จากการตรวจสอบชั้นเคลือบด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่ามีสเปกตรัมของสารประกอบหลักบอไรด์ทั้งสองชนิด คือ FeB และ Fe_2B อยู่ในชั้นเคลือบบอไรด์ ดังแสดงผลการวิเคราะห์ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในภาพที่ 21



ภาพที่ 21 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงาน ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

จากการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพสามารถวัดความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานได้ พบว่าชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดจากกระบวนการบอไรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นระยะเวลา 2 – 6 ชั่วโมง มีความหนาในช่วง 24.60 – 43.78 ไมโครเมตร ดังแสดงความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้นจากการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยกระบวนการบอไรดิงที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นระยะเวลาต่างๆ ในภาพที่ 22 และชั้นเคลือบบอไรด์นี้มีความหนาของชั้น FeB ในช่วง 11.46 – 17.08 ไมโครเมตร



ภาพที่ 22 ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์บนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นระยะเวลาต่างๆ

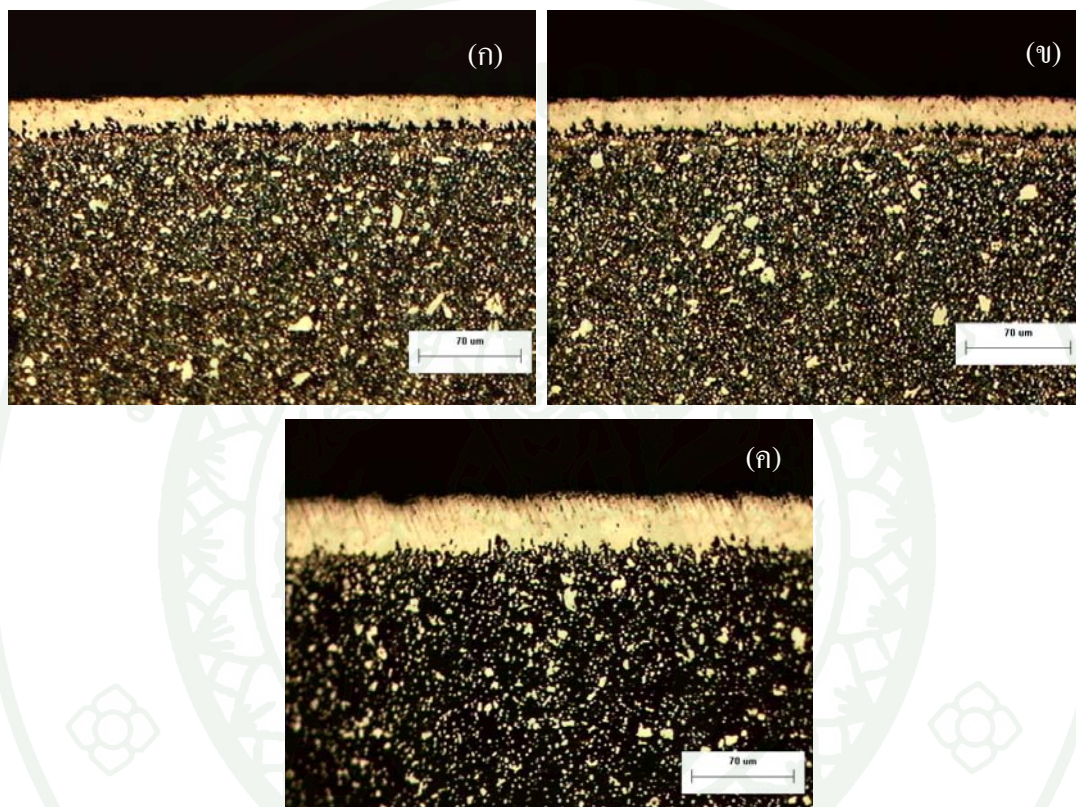
นอกจากนี้จากการวัดอุณหภูมิของชิ้นงานโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลสัมผัสกับชิ้นงานและอ่านค่าอุณหภูมิผ่านตัวแสดงค่า ซึ่งเป็นค่าของอุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานจริงๆ ในช่วงระยะเวลาที่ทำการเคลือบผิว พบว่าขณะทำการเคลือบผิวโดยใช้อุณหภูมิในการเคลือบผิวเท่ากับ 1223 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานค่อนข้างคงที่และมีค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานเท่ากับ 1223 เคลวิน

2. การเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 - 1223 เคลวิน ด้วยกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้กระแสไฟฟ้าแก่ชิ้นงาน

2.1 การเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน

จากการทดลองเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นระยะเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ด้วยกระบวนการบอไรดิ้งโดยวิธีแพ็คที่มีการให้กระแสไฟฟ้าแก่ชิ้นงาน (ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์) เมื่อวิเคราะห์ชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการบอไรดิ้งโดยการถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง พบว่าเกิดชั้นเคลือบขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน สามารถมองเห็นการแยกออกเป็นชั้นๆ ของชิ้นงานและชั้นเคลือบได้อย่างชัดเจน ลักษณะของชั้นเคลือบจะอัดแน่น มีความราบเรียบเกาะติดอยู่กับผิวชิ้นงาน ความหนาของชั้นเคลือบจะค่อนข้างมีความสม่ำเสมอ รอยต่อระหว่างผิวชิ้นงานกับชั้นเคลือบมีความหยักเล็กน้อยคล้ายลักษณะ

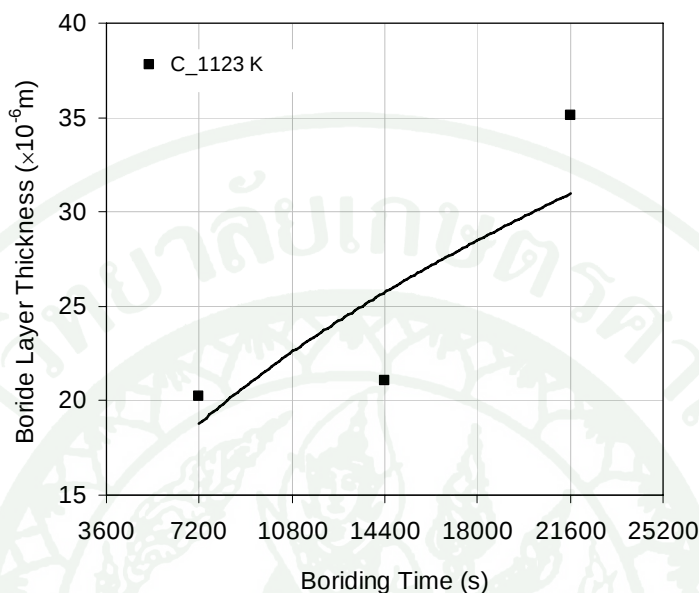
ของพื้นเลื้อยเล็กๆ ที่มีความสูงของพื้นเพียงเล็กน้อย โดยความหนาของชั้นเคลือบจะแตกต่างกันเมื่อใช้เวลาการเคลือบผิวไม่เท่ากัน ความหนาของชั้นเคลือบจะมากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการเคลือบผิวให้นานขึ้น ดังแสดงโครงสร้างจุลภาคและลักษณะของชั้นเคลือบบนผิวชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นระยะเวลาต่างๆ ในภาพที่ 23



ภาพที่ 23 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอโรดิงของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 2 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง และ (ค) 6 ชั่วโมง

จากภาพโครงสร้างจุลภาคดังกล่าวจะเห็นได้ว่าบริเวณชั้นเคลือบมีสีแตกต่างกันเล็กน้อย แสดงได้ว่าชั้นเคลือบหลักบอโรดิงที่เกิดขึ้นเป็นชนิดเฟสคู่ (FeB , Fe_2B) ประกอบด้วยชั้นของ FeB (สีเข้ม) อยู่บนสุดและชั้นถัดมาเป็นชั้นของ Fe_2B (สีอ่อน) และจากการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพสามารถวัดความหนาของชั้นเคลือบบอโรดิงที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานได้ พบว่าชั้นเคลือบบอโรดิงที่เกิดจากกระบวนการบอโรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นระยะเวลา 2 – 6 ชั่วโมง มีความหนาในช่วง 20.22 – 35.14 ไมโครเมตร ดังแสดงความหนาของชั้นเคลือบบอโรดิงที่เกิดขึ้น

จากการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นระยะเวลาต่างๆ ในภาพที่ 24 และชั้นเคลือบบอโรไค์นี้มีความหนาของชั้น FeB ในช่วง 8.03 – 21.43 ไมโครเมตร



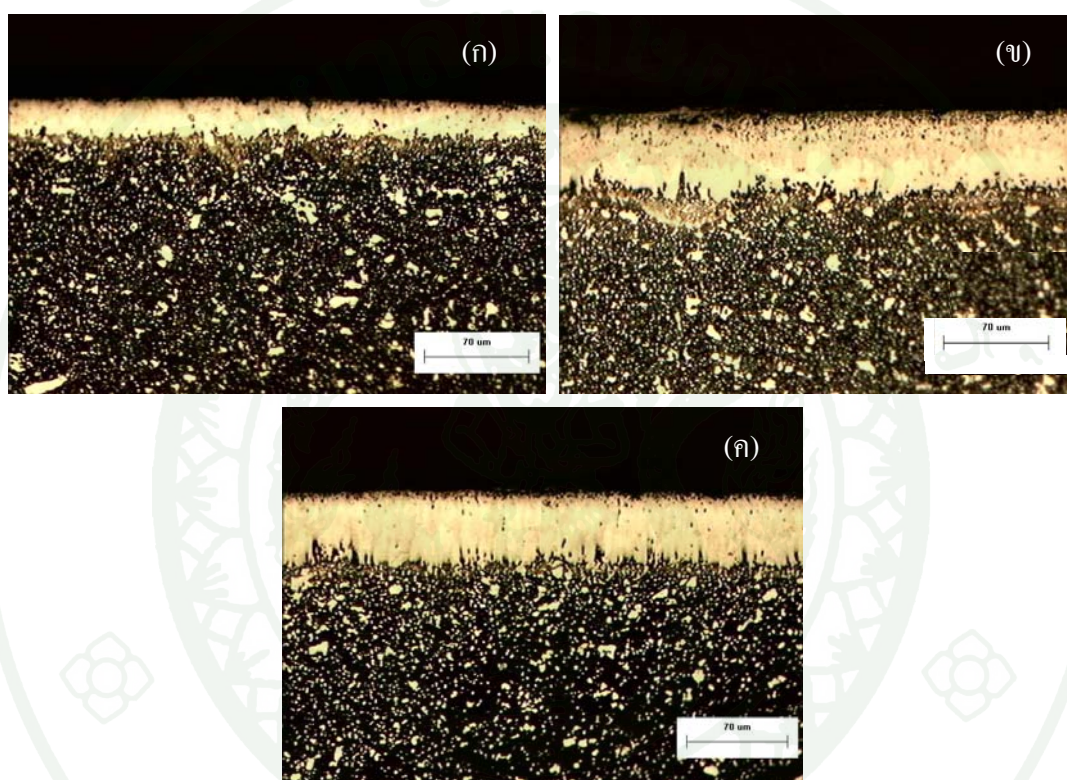
ภาพที่ 24 ความหนาของชั้นเคลือบบอโรไค์บนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นระยะเวลาต่างๆ

นอกจากนี้จากการวัดอุณหภูมิของชิ้นงานโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลสัมผัสกับชิ้นงานและอ่านค่าอุณหภูมิผ่านตัวแสดงค่าซึ่งเป็นค่าของอุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานจริงๆ ในช่วงระยะเวลาที่ทำการเคลือบผิว พบว่าขณะทำการเคลือบผิวด้วยกระบวนการบอโรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์แก่ชิ้นงานโดยใช้อุณหภูมิในการเคลือบผิวเท่ากับ 1123 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานค่อนข้างคงที่และมีค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานเท่ากับ 1147 เคลวิน

2.2 การเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน

จากการทดลองเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นระยะเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ด้วยกระบวนการบอโรดิงโดยวิธีแพ็คที่มีการให้กระแสไฟฟ้าแก่ชิ้นงาน (ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์) เมื่อวิเคราะห์ชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการบอโรดิงโดยการถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง พบว่าเกิดชั้นเคลือบขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน สามารถมองเห็นการแยกออกเป็นชั้นๆ ของชิ้นงานและชั้นเคลือบได้อย่างชัดเจน ลักษณะของชั้นเคลือบจะอัดแน่น มีความราบเรียบเกาะติดอยู่กับผิวชิ้นงาน ความหนาของชั้นเคลือบจะ

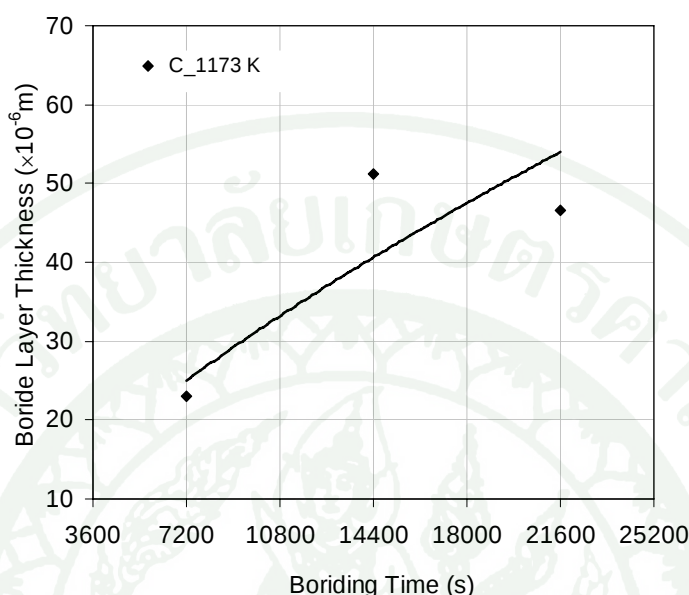
ค่อนข้างมีความสม่ำเสมอ รอยต่อระหว่างผิวชิ้นงานกับชั้นเคลือบมีความหยักเล็กน้อยคล้ายลักษณะของฟันเลื่อยเล็กๆ ที่มีความสูงของฟันเพียงเล็กน้อย โดยความหนาของชั้นเคลือบจะแตกต่างกันเมื่อใช้เวลาการเคลือบผิวไม่เท่ากัน ความหนาของชั้นเคลือบจะมากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการเคลือบผิวให้นานขึ้น ดังแสดงโครงสร้างจุลภาคและลักษณะของชั้นเคลือบบนผิวชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นระยะเวลาต่างๆ ในภาพที่ 25



ภาพที่ 25 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอโรดิงของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 2 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง และ (ค) 6 ชั่วโมง

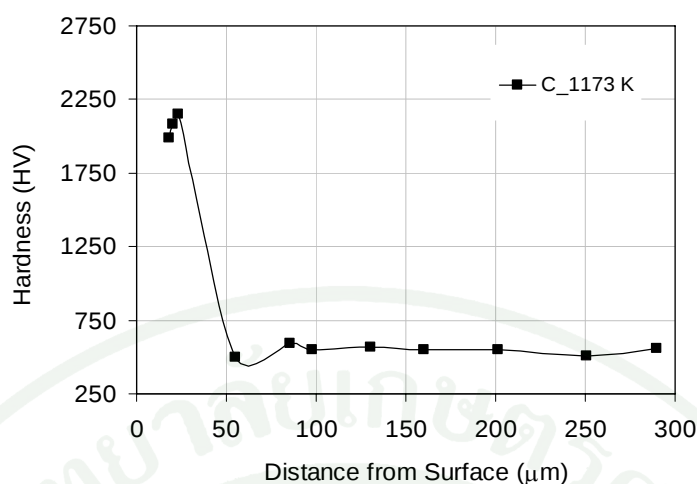
จากภาพ โครงสร้างจุลภาควัดแล้วจะเห็นได้ว่าบริเวณชั้นเคลือบมีสีแตกต่างกันเล็กน้อย แสดงได้ว่าชั้นเคลือบเหล็กบอโรดิงที่เกิดขึ้นเป็นชนิดเฟสคู่ (FeB , Fe_2B) ประกอบด้วยชั้นของ FeB (สีเข้ม) อยู่บนสุดและชั้นถัดมาเป็นชั้นของ Fe_2B (สีอ่อน) และจากการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพสามารถวัดความหนาของชั้นเคลือบบอโรดิงที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานได้ พบว่าชั้นเคลือบบอโรดิงที่เกิดขึ้นจากกระบวนการบอโรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นระยะเวลา 2 – 6 ชั่วโมง มีความหนาในช่วง 22.95 – 51.17 ไมโครเมตร ดังแสดงความหนาของชั้นเคลือบบอโรดิงที่เกิดขึ้น

จากการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นระยะเวลาต่างๆ ใน ภาพที่ 26 และชั้นเคลือบบอโรดิงนี้มีความหนาของชั้น FeB ในช่วง 11.30 – 29.68 ไมโครเมตร



ภาพที่ 26 ความหนาของชั้นเคลือบบอโรดิงบนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงแบบให้ กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นระยะเวลาต่างๆ

นอกจากนี้เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้า มาทดสอบความแข็งที่ตำแหน่งต่างๆ จาก ผิวลึกเข้าไปในเนื้อชิ้นงาน พบว่าชิ้นงานมีความแข็งที่ผิวสูงประมาณ 2000 HV ซึ่งเป็นความแข็ง ของชั้นเคลือบบอโรดิง (FeB , Fe_2B) และค่าความแข็งจะมีค่าลดลงเมื่อทดสอบที่ระยะลึกเข้าไปใน ชิ้นงานมากขึ้นและค่าความแข็งจะค่อนข้างคงที่เมื่อถึงระยะความลึกที่เป็นเนื้อพื้นของเหล็กกล้าไร้ สนิม AISI 440C ซึ่งมีค่าความแข็งประมาณ 640 HV ดังแสดงผลการทดสอบความแข็งในภาพที่ 27

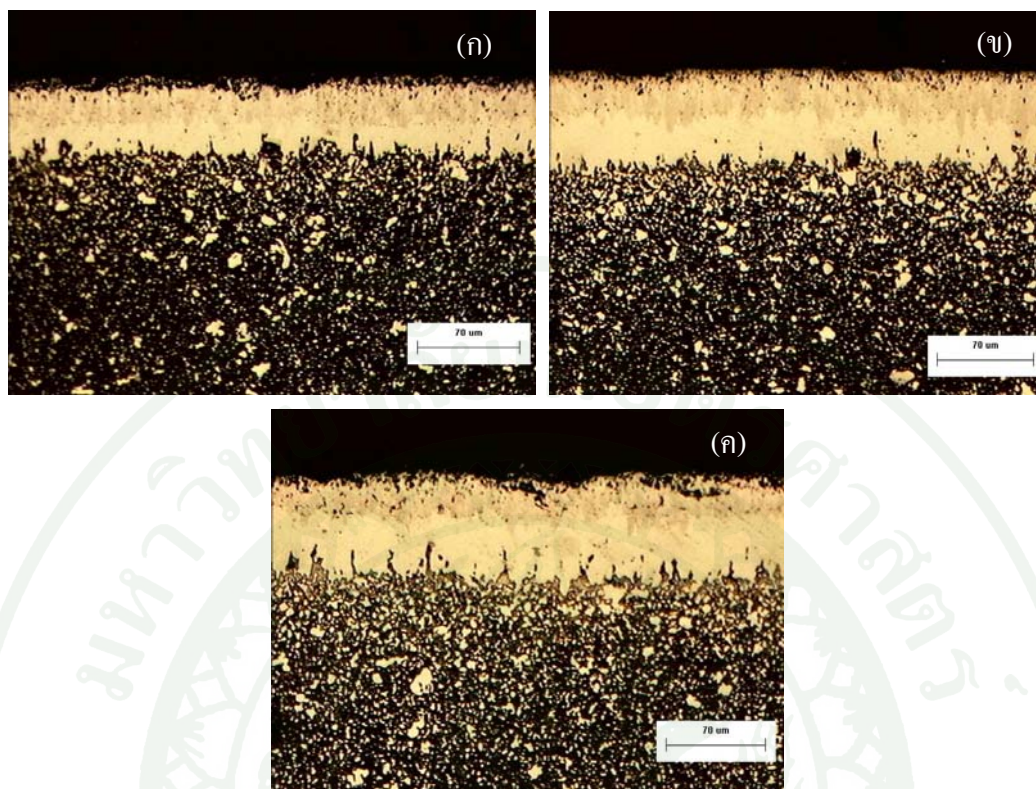


ภาพที่ 27 ค่าความแข็งที่ตำแหน่งต่าง ๆ จากผิวลึกเข้าไปในเนื้อพื้นของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรไดมแบบให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

จากการวัดอุณหภูมิของชิ้นงานโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลสัมผัสกับชิ้นงานและอ่านค่าอุณหภูมิผ่านตัวแสดงค่า ซึ่งเป็นค่าของอุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานจริงๆ ในช่วงระยะเวลาที่ทำการเคลือบผิว พบว่าขณะทำการเคลือบผิวด้วยกระบวนการบอโรไดมแบบให้กระแสไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์แก่ชิ้นงานโดยใช้อุณหภูมิในการเคลือบผิวเท่ากับ 1173 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานค่อนข้างคงที่และมีค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานเท่ากับ 1202 เคลวิน

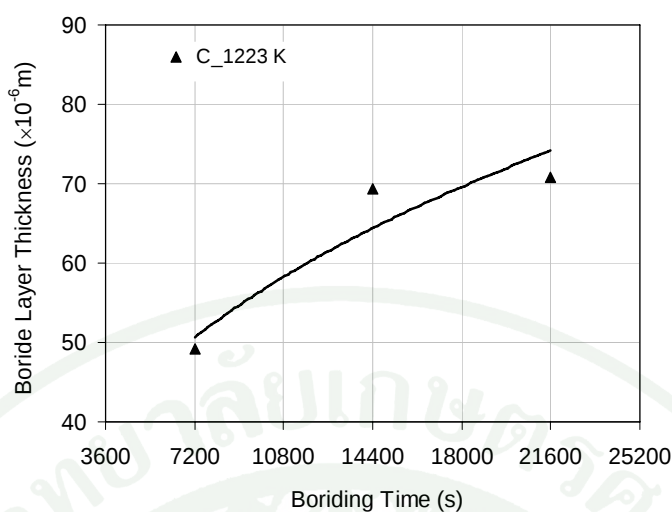
2.3 การเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน

จากการทดลองเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นระยะเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ด้วยกระบวนการบอโรไดมโดยวิธีแฟลคที่มีการให้กระแสไฟฟ้าแก่ชิ้นงาน (ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์) เมื่อวิเคราะห์ชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการบอโรไดมโดยการถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง พบว่าเกิดชั้นเคลือบขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน สามารถมองเห็นการแยกออกเป็นชั้นๆ ของชิ้นงานและชั้นเคลือบได้อย่างชัดเจน ลักษณะของชั้นเคลือบจะอัดแน่น มีความราบเรียบเกาะติดอยู่กับผิวชิ้นงาน ความหนาของชั้นเคลือบจะค่อนข้างมีความสม่ำเสมอ รอยต่อระหว่างผิวชิ้นงานกับชั้นเคลือบมีความหยักเล็กน้อยคล้ายลักษณะของฟันเลื่อยเล็กๆ ที่มีความสูงของฟันเพียงเล็กน้อย โดยความหนาของชั้นเคลือบจะแตกต่างกันเมื่อใช้เวลากการเคลือบผิวไม่เท่ากัน ความหนาของชั้นเคลือบจะมากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการเคลือบผิวให้นานขึ้น ดังแสดงโครงสร้างจุลภาคและลักษณะของชั้นเคลือบบนผิวชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรไดมที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นระยะเวลาต่างๆ ในภาพที่ 28



ภาพที่ 28 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 2 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง และ (ค) 6 ชั่วโมง

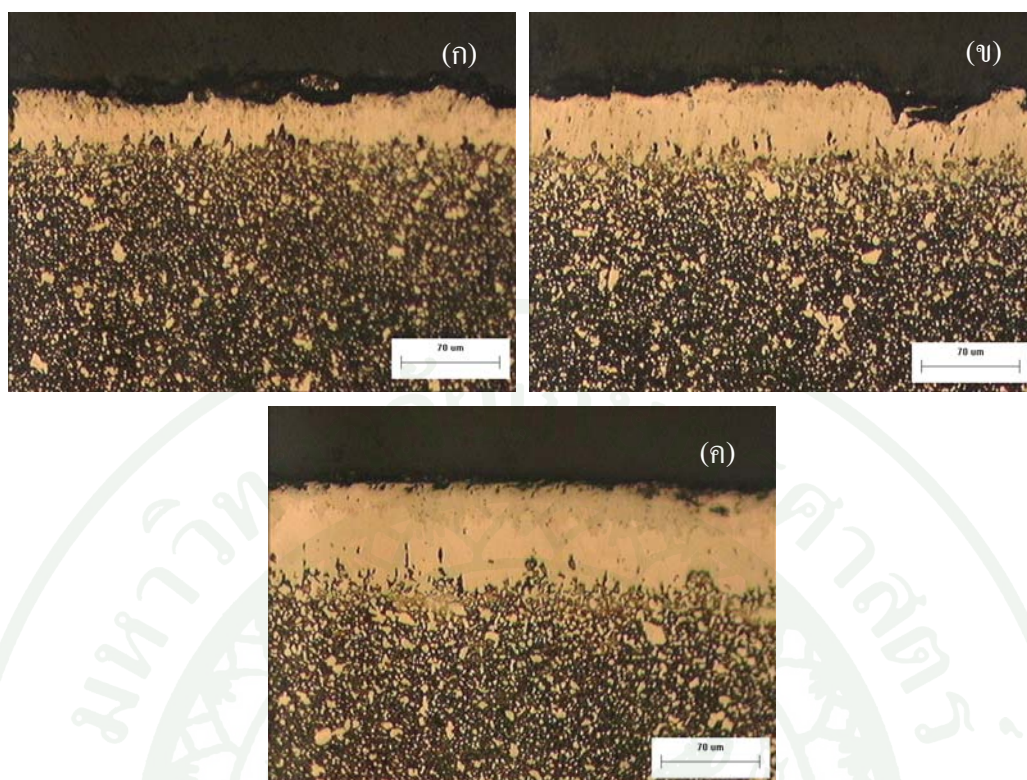
จากภาพโครงสร้างจุลภาคดังกล่าวจะเห็นได้ว่าบริเวณชั้นเคลือบมีสีแตกต่างกันเล็กน้อย แสดงได้ว่าชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่เกิดขึ้นเป็นชนิดเฟสคู่ (FeB , Fe_2B) ประกอบด้วยชั้นของ FeB (สีเข้ม) อยู่บนสุดและชั้นถัดมาเป็นชั้นของ Fe_2B (สีอ่อน) และจากการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพ สามารถวัดความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานได้ พบว่าชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดจากกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นระยะเวลา 2 – 6 ชั่วโมง มีความหนาในช่วง 49.24 – 70.76 ไมโครเมตร ดังแสดงความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้นจากการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยกระบวนการบอไรดิ้งที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นระยะเวลาต่างๆ ในภาพที่ 29 และชั้นเคลือบบอไรด์นี้มีความหนาของชั้น FeB ในช่วง 23.14 – 41.49 ไมโครเมตร



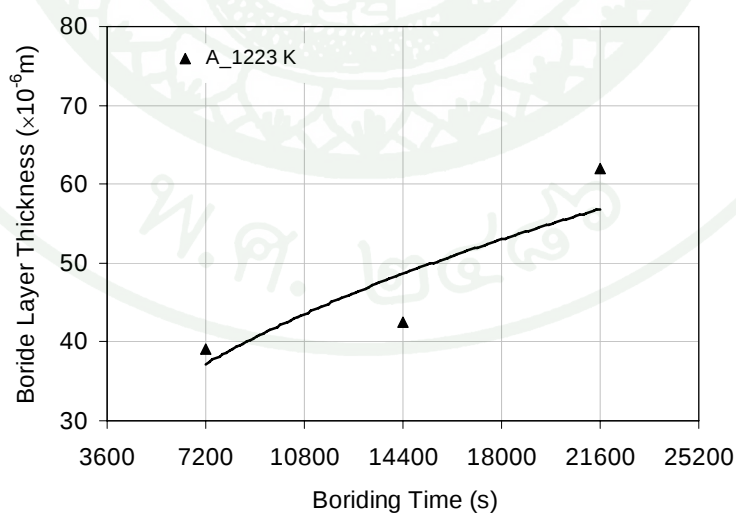
ภาพที่ 29 ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์บนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นระยะเวลาต่างๆ

จากการวัดอุณหภูมิของชิ้นงานโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลสัมผัสกับชิ้นงานและอ่านค่าอุณหภูมิผ่านตัวแสดงค่า ซึ่งเป็นค่าของอุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานจริงๆ ในช่วงระยะเวลาที่ทำการเคลือบผิว พบว่าขณะทำการเคลือบผิวด้วยกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้กระแสไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์แก่ชิ้นงานโดยใช้อุณหภูมิในการเคลือบผิวเท่ากับ 1223 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานค่อนข้างคงที่และมีค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานเท่ากับ 1249 เคลวิน

นอกจากนี้จากการนำเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่เป็นเอนโดมาถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง พบว่าเกิดชั้นเคลือบบอไรด์ขึ้นที่ผิวเช่นเดียวกันดังแสดงในภาพที่ 30 โดยลักษณะของชั้นเคลือบค่อนข้างราบเรียบแต่มีความหนาไม่สม่ำเสมอเมื่อเปรียบเทียบกับชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานคาโทด ซึ่งจากการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพสามารถวัดความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้นบนผิวเอนโดนั้น พบว่าชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้นบนผิวเอนโดจากกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นระยะเวลา 2 – 6 ชั่วโมง มีความหนาในช่วง 39.14 – 61.94 ไมโครเมตร ดังแสดงความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้นจากการเคลือบผิวเอนโดด้วยกระบวนการบอไรดิ้งที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นระยะเวลาต่างๆ ในภาพที่ 31 และชั้นเคลือบบอไรด์นี้มีความหนาของชั้น FeB ในช่วง 13.97 – 24.16 ไมโครเมตร



ภาพที่ 30 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์ของแอโนดที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 2 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง และ (ค) 6 ชั่วโมง

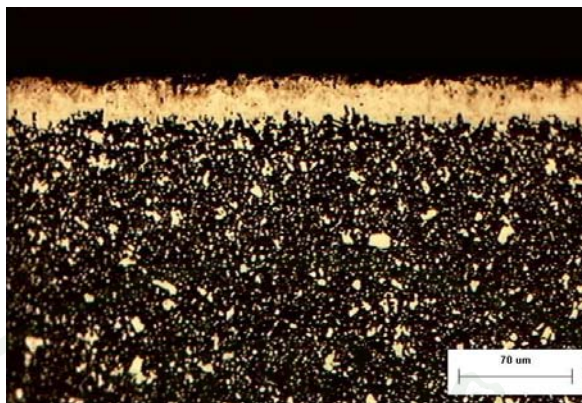


ภาพที่ 31 ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์บนผิวแอโนดที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นระยะเวลาต่างๆ

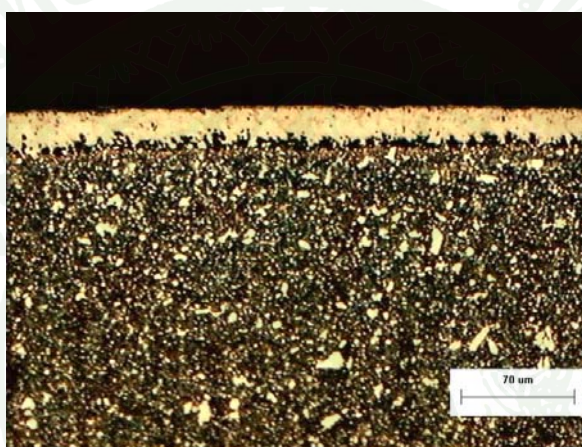
วิจารณ์

1. โครงสร้างจุลภาคและลักษณะของชั้นเคลือบบอไรด์

จากการทดลองเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 – 1223 เคลวิน เป็นระยะเวลา 2 - 6 ชั่วโมง ด้วยกระบวนการบอไรดิงโดยวิธีแพ็คทั้งแบบที่ให้และไม่ให้กระแสไฟฟ้า (ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์) เมื่อถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการบอไรดิงพบว่า มีลักษณะค่อนข้างราบเรียบมีรอยหยักหรือฟันเลื่อยเพียงเล็กน้อยนั้น เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้มีการเติมธาตุผสมในปริมาณสูง (ปริมาณธาตุผสมรวม 18.87 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ประกอบด้วย คาร์บอน ซิลิกอน แมงกานีส โฟสเฟอรัส เซลเฟอรัส โครเมียม โมลิบดีนัม) ซึ่งธาตุผสมเหล่านี้จะเป็นตัวขัดขวางการแพร่ของอะตอมโบรอนเข้าสู่ชิ้นงานในระหว่างกระบวนการบอไรดิง เมื่อชิ้นงานมีปริมาณของธาตุผสมจำนวนมากซึ่งกระจายตัวอยู่ในเนื้อชิ้นงานอย่างหนาแน่น อะตอมโบรอนจึงแพร่เข้าสู่ชิ้นงานได้ยากขึ้นและแพร่ได้อย่างช้าๆ อะตอมโบรอนแต่ละอะตอมจะแพร่เข้าไปในชิ้นงานแล้วพยายามแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างเพื่อจับกับอะตอมเหล็กเกิดเป็นโครงสร้างเหล็กบอไรด์ที่ประกอบด้วยอะตอมของเหล็กและอะตอมโบรอน เพราะในขณะที่มีการแพร่ของอะตอมโบรอนเข้าไปนั้นธาตุผสมตัวอื่นก็จะถูกผลักให้ออกไปจากโครงสร้างเดิมแล้วแพร่ลึกเข้าไปในเนื้อชิ้นงานต่อไป จากการแพร่ที่เคลื่อนที่อย่างช้าๆ ของอะตอมโบรอนนั้นทำให้มองเห็นลักษณะของชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นตามทิศทางการแพร่เข้าไปของอะตอมโบรอนเป็นลักษณะของชั้นเคลือบที่ค่อนข้างมีความสม่ำเสมอ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากธาตุผสมที่เติมในชิ้นงานทั้งหมดพบว่ามีโครเมียมเป็นธาตุผสมหลักในปริมาณสูงถึง 16.59 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หรือประมาณ 87 เปอร์เซ็นต์ของธาตุผสมทั้งหมด ซึ่งผลของการเติมธาตุโครเมียมนี้จะทำให้ชั้นเคลือบบอไรด์มีลักษณะราบเรียบนั่นเอง ดังนั้นจากเหตุผลที่กล่าวมาทั้งหมดจึงส่งผลให้รอยต่อระหว่างชั้นเคลือบบอไรด์กับชิ้นงานมีลักษณะค่อนข้างเรียบ (Sinha and Division, 1994) ดังแสดงในภาพที่ 32



(ก)

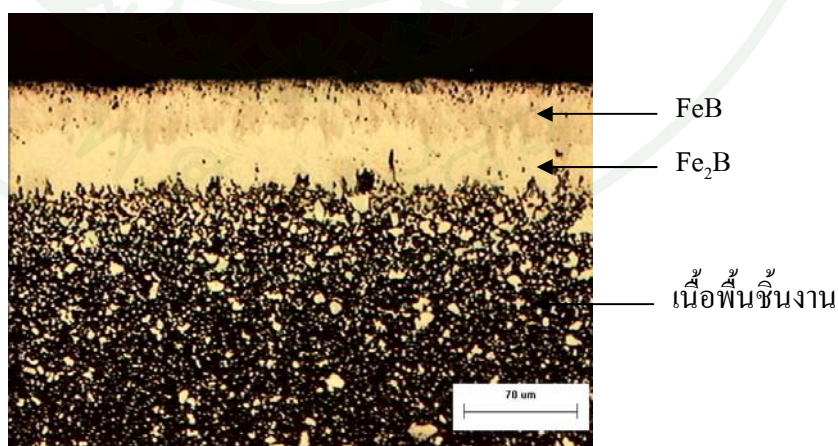


(ข)

ภาพที่ 32 โครงสร้างจุลภาคและลักษณะชั้นเคลือบบอไรด์บนผิวชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิง (ก) แบบไม่ให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และ (ข) แบบให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

จากผลการวิเคราะห์ชั้นเคลือบบอไรด์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ที่พบว่าชั้นเคลือบบอไรด์เป็นชนิดเฟสคู่ประกอบด้วยเฟสของ Fe_2B , Fe_3B โดยการเกิดเฟสคู่นี้มีอิทธิพลมาจากอุณหภูมิและเวลาในการทำบอไรดิงที่มาก รวมทั้งความเข้มข้นของอะตอมโบรอนรอบชิ้นงานที่สูง เพราะในระหว่างกระบวนการบอไรดิงนั้นกลไกการเกิดชั้นเคลือบบอไรด์ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 การเกิด Fe_2B คือ การที่อะตอมโบรอนจากปฏิกิริยาการแตกตัวของผงแพร่เข้าไปในโครงสร้างของชิ้นงานแล้วจับตัวกับอะตอมเหล็กเกิดเป็น Fe_2B ขึ้นที่ผิวชิ้นงาน ทำให้บนผิวชิ้นงานมีความเข้มข้นของอะตอมโบรอนเพิ่มขึ้น ขั้นตอนที่ 2 การเกิด Fe_3B เมื่อความเข้มข้นของอะตอมโบรอนบริเวณรอยต่อระหว่าง Fe_2B กับผงมีค่าสูงกว่า 16.23 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ก็จะเกิด Fe_3B ขึ้นที่ผิวนอกของ Fe_2B ขั้นตอนที่ 3 การเติบโตของชั้น Fe_2B หรือ Fe_3B โดยอะตอมโบรอนจะยัง

เกิดการแพร่จากบริเวณความเข้มข้นของอะตอมโบรอนสูงไปยังบริเวณความเข้มข้นของอะตอมโบรอนต่ำ เมื่ออะตอมโบรอนแพร่เข้าไปในชิ้นงานซึ่งต้องแพร่ผ่านชั้น FeB หรือ Fe_2B เพื่อจับกับอะตอมเหล็กแล้วเกิดเป็น Fe_2B หรือ FeB นั้นจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอะตอมโบรอนในแต่ละชั้น โดยชั้นที่ความเข้มข้นของอะตอมโบรอนถึงค่าที่สามารถเกิดเป็นเหล็กบอไรด์ในแต่ละเฟสได้ก็จะเกิดเฟสนั้นขึ้นส่งผลให้มีการเติบโตของชั้นนั้น โดยที่ความหนาแน่นของชั้นเคลือบก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น และจะเกิดลักษณะเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนความเข้มข้นของอะตอมโบรอนบริเวณรอบชิ้นงานลดต่ำลงมากจนไม่สามารถเกิดการแพร่ของอะตอมโบรอนจากบริเวณรอบชิ้นงานเข้าสู่ชิ้นงานได้อีก และขั้นตอนที่ 4 การลดลงของ FeB เกิดจากอะตอมโบรอนในชิ้นงานเกิดการแพร่เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของอะตอมโบรอนในชิ้นงาน โดยอะตอมโบรอนจะแพร่จากบริเวณความเข้มข้นของอะตอมโบรอนสูงไปยังบริเวณความเข้มข้นของอะตอมโบรอนต่ำ ทำให้อะตอมโบรอนบริเวณชั้น FeB สามารถแพร่ไปยังชั้น Fe_2B และอะตอมโบรอนบริเวณชั้น Fe_2B สามารถแพร่ลึกเข้าไปในชิ้นงานได้ ซึ่งในขั้นตอนนี้ความหนาของชั้น FeB จะค่อยๆ ลดลง แต่ความหนาแน่นของชั้นเคลือบจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจนเกือบคงที่ และถ้ากระบวนการยังดำเนินต่อไปเรื่อยๆ FeB จะหายไปจนหมดเหลือเพียงชั้นของ Fe_2B ซึ่งเป็นชั้นเคลือบบอไรด์ชนิดเฟสเดียว ดังนั้นในการทดลองนี้เมื่อทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิสูง ความเข้มข้นของอะตอมโบรอนบริเวณรอบๆ ชิ้นงานก็มีมากขึ้น เพราะผงที่ใช้ในกระบวนการบอไรดิงเกิดปฏิกิริยาได้ดีสามารถแตกตัวให้อะตอมโบรอนออกมามากขึ้น จึงเกิดชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ชนิดเฟสคู่ที่ประกอบด้วยเฟสของ Fe_2B อยู่ติดกับเนื้อพื้นชิ้นงาน และเฟสของ FeB อยู่นอกสุดโดยจะมองเห็นได้ชัดเจนเมื่อชั้นเคลือบบอไรด์มีความหนามากดังแสดงในภาพที่ 33



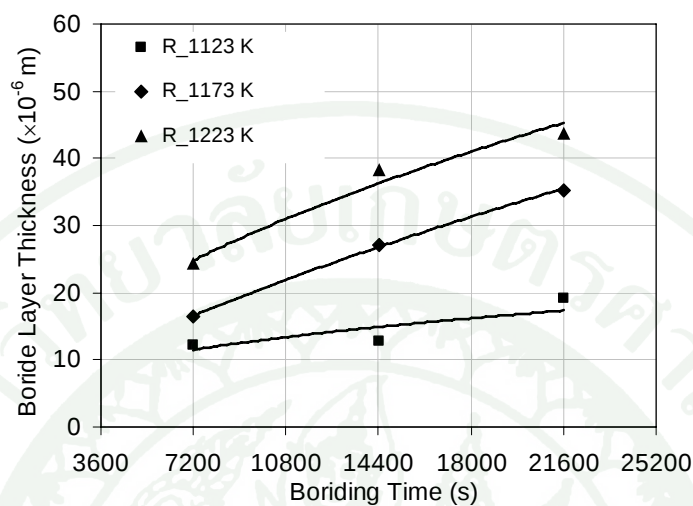
ภาพที่ 33 ชั้นเคลือบบอไรด์ชนิดเฟสคู่บนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้า (ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์) ที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

จากลักษณะและโครงสร้างของชั้นเคลือบดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ozbek *et.al.* (2004) และ Lee *et al.* (2004) ที่ศึกษาการบอโรดิงเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิกแล้วพบว่าเกิดชั้นเคลือบบอไรด์ชนิดเฟสคู่เช่นเดียวกัน

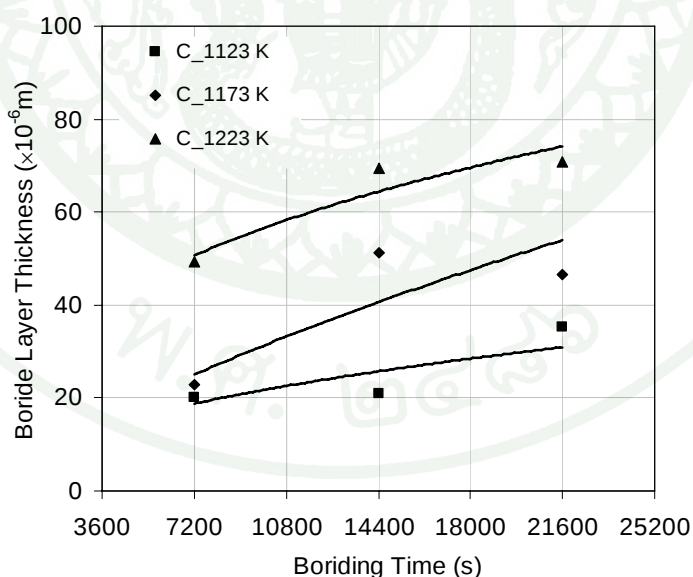
2. อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการบอโรดิงต่อความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์

จากการทดลองเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 – 1223 เคลวิน เป็นระยะเวลา 2 - 6 ชั่วโมง ด้วยกระบวนการบอโรดิงโดยวิธีแพ็คทั้งแบบที่ให้และไม่ให้กระแสไฟฟ้า (ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์) พบว่าชั้นเคลือบบอไรด์ทั้งสองกระบวนการมีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาในกระบวนการบอโรดิงสูงขึ้น (ภาพที่ 34 - 35) ซึ่งจากการพิจารณาแผนภาพการเกิดเฟสของเหล็กกับโบรอน (Fe-B Phase Diagram) (ภาพที่ 36) จะเห็นได้ว่าการเกิดเหล็กบอไรด์ (Fe_2B , FeB) ที่อุณหภูมิสูงขึ้นนั้นจะสามารถเกิดเป็นเหล็กบอไรด์ได้ในสัดส่วนของเปอร์เซ็นต์โบรอนที่น้อยลงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ นั่นแสดงได้ว่า ในการเคลือบผิวเหล็กด้วยกระบวนการบอโรดิงเพื่อให้เกิดชั้นเคลือบบอไรด์หรือชั้นเคลือบที่มีโครงสร้างเป็นเฟส Fe_2B หรือ FeB นั้น หากในกระบวนการใช้อุณหภูมิสูงก็จะสามารถเกิดชั้นเคลือบขึ้นได้เร็วกว่าการใช้อุณหภูมิต่ำ ทำให้ได้ความหนาชั้นเคลือบที่มากกว่าเมื่อใช้เวลาในการเคลือบผิวเท่ากัน ตามทฤษฎีการแพร่ ที่อุณหภูมิสูงอะตอมโบรอนก็จะสามารถแพร่ได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำเพราะมีพลังงานในการเคลื่อนที่มากขึ้นทำให้สามารถแพร่ซึมได้เร็วขึ้น และเมื่อให้เวลาในการเคลือบผิวนานขึ้นอะตอมโบรอนก็จะสามารถแพร่เข้าสู่ชิ้นงานได้จำนวนมากขึ้นเพราะมีเวลาในการแพร่นานขึ้น ทำให้ความหนาของชั้นเคลือบที่ได้มากขึ้นตามเวลาและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความหนาในแต่ละเฟสพบว่าเฟสของ Fe_2B จะมีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการบอโรดิงให้สูงขึ้นในทุกช่วงเวลาและอุณหภูมิที่ทำการทดลอง ส่วนเฟสของ FeB นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงความหนาโดยจะมีความหนาเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาแต่เมื่ออุณหภูมิของกระบวนการสูงและใช้เวลาในการเคลือบผิวนานจะมีการลดลงของความหนาของชั้น FeB (ภาพที่ 37 - 38) ซึ่งจากลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนาของเหล็กบอไรด์ดังกล่าวนี้เป็นไปตามกลไกการเกิดชั้นเคลือบบอไรด์ เนื่องจากเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและเวลาของกระบวนการก็จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอะตอมโบรอนด้วย ดังนั้นเมื่อทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิสูงและใช้เวลานานขึ้นของ FeB ก็จะมีการลดลง เพราะความแตกต่างของความเข้มข้นของอะตอมโบรอนจากปฏิกิริยาการแตกตัวของผงกับความเข้มข้นของอะตอมโบรอนในชิ้นงานมีน้อยลง ทำให้ไม่เกิดการแพร่ของอะตอมโบรอนจากบริเวณรอบชิ้นงานเข้าสู่ผิวชิ้นงาน แต่ยังคงมีการแพร่ของอะตอมโบรอนในชิ้นงานเกิดขึ้นตรงบริเวณรอยต่อระหว่างชั้น FeB กับ Fe_2B และ

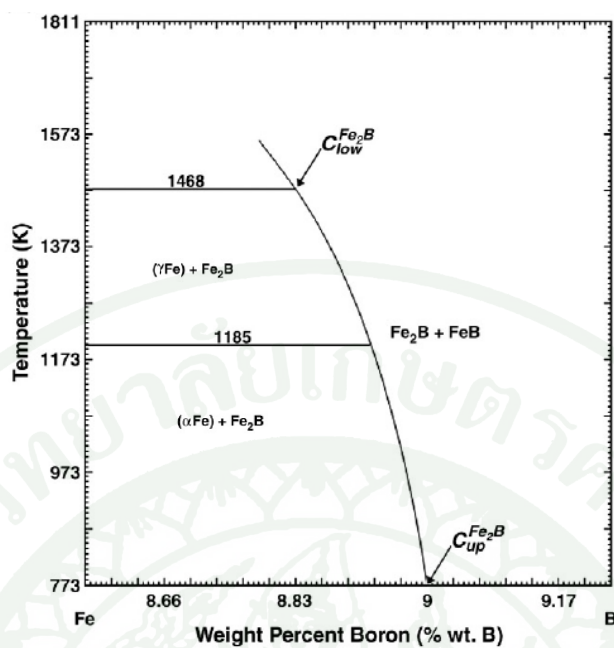
บริเวณรอยต่อระหว่างชั้น Fe_2B กับเนื้อชิ้นงาน ส่งผลให้ความหนาของชั้น Fe_2B และความหนารวมของชั้นเคลือบบอไรด์เพิ่มขึ้น แต่ความหนาของชั้น FeB ลดลงนั่นเอง



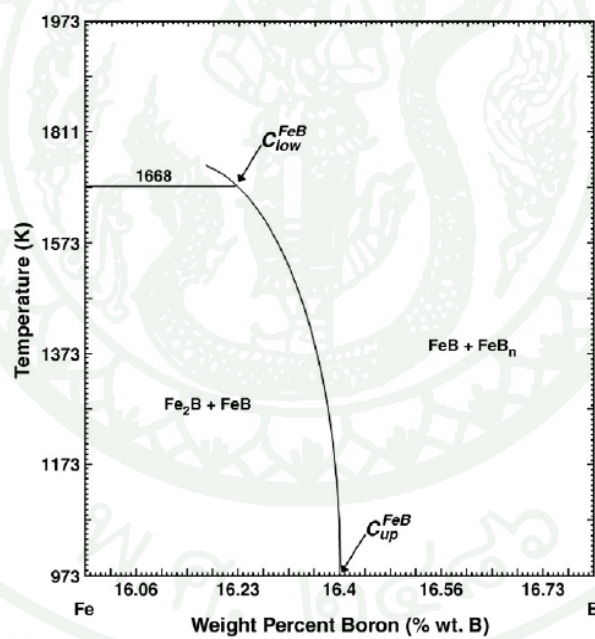
ภาพที่ 34 ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์บนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรด์แบบไม่ให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ



ภาพที่ 35 ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์บนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรด์แบบให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ



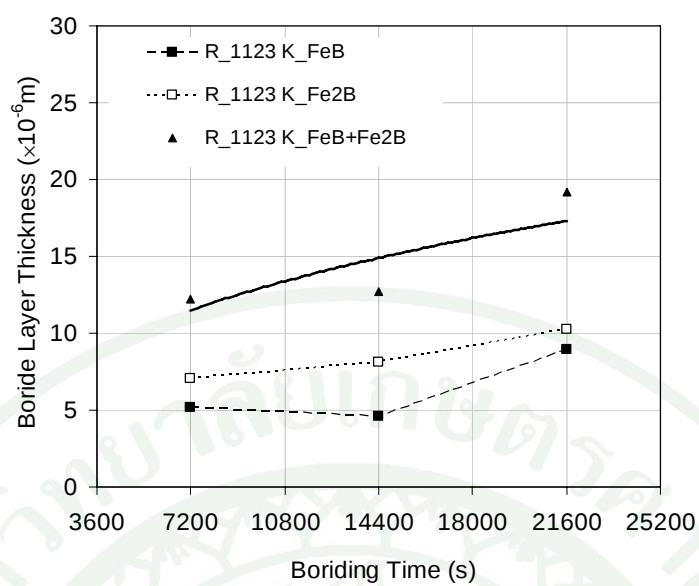
(ก)



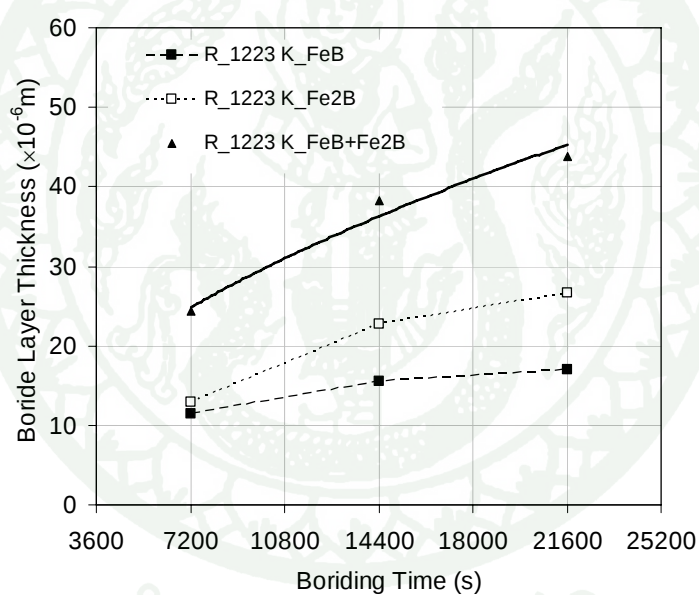
(ข)

ภาพที่ 36 แผนภาพการเกิดเฟสของเหล็กกับโบรอนที่ขอบเขตของเฟส (ก) Fe₂B และ (ข) FeB

ที่มา: Campos-Silva *et al.* (2010)

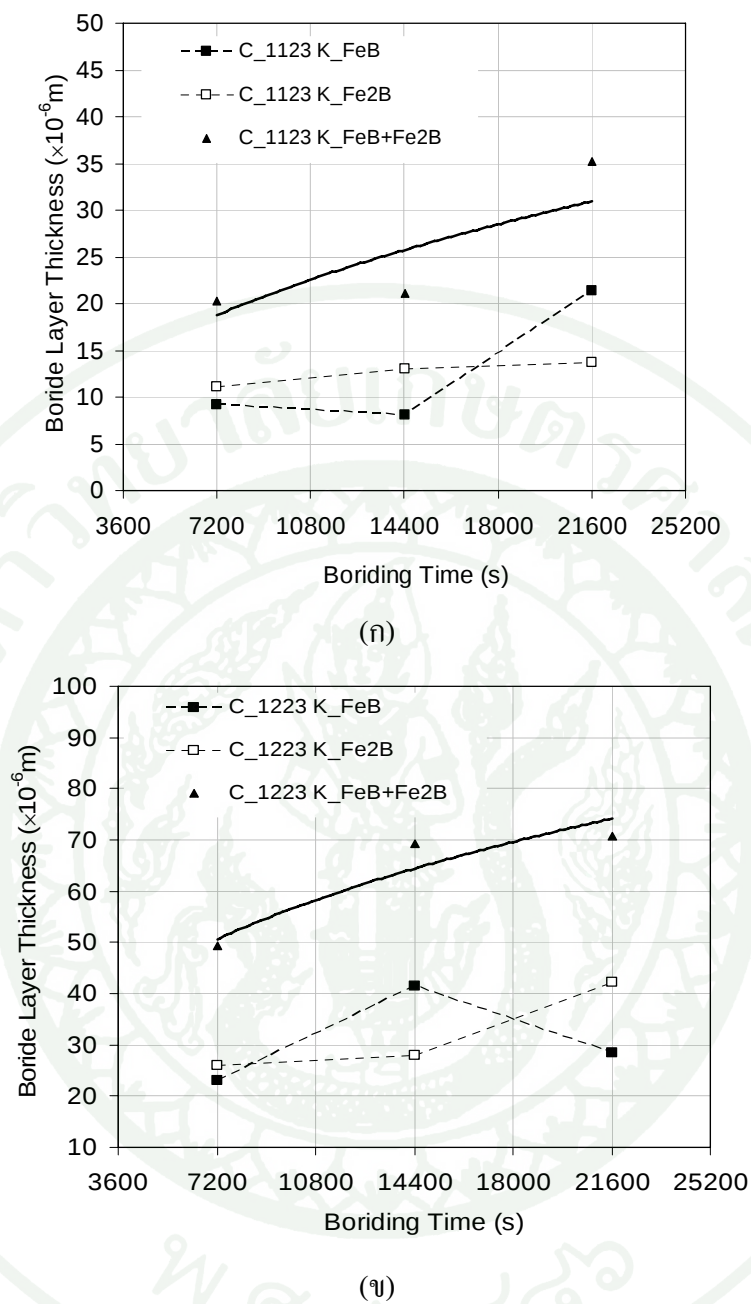


(ก)



(ข)

ภาพที่ 37 ความหนาชั้นเคลือบบอไรด์บนชิ้นงานแยกเป็นเฟสในกระบวนการบอไรดิ้งแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ (ก) 1123 เคลวิน และ (ข) 1223 เคลวิน

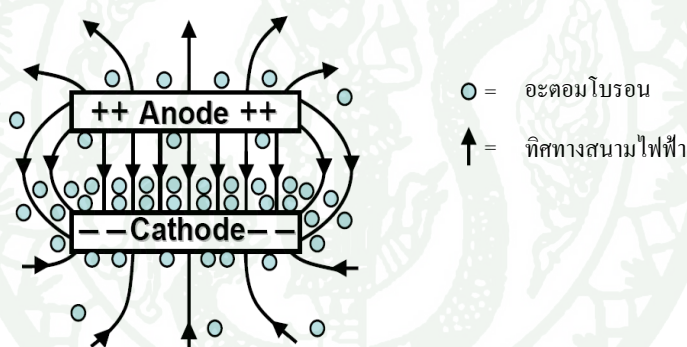


ภาพที่ 38 ความหนาชั้นเคลือบบอไรด์บนชิ้นงานแยกเป็นเฟสในกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ (ก) 1123 เคลวิน และ (ข) 1223 เคลวิน

3. อิทธิพลของไฟฟ้ากระแสตรงต่อความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์

จากการทดลองเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 – 1223 เคลวิน เป็นระยะเวลา 2 - 6 ชั่วโมง ด้วยกระบวนการบอไรดิงโดยวิธีแพ็คทั้งแบบที่ให้และไม่ให้กระแสไฟฟ้า (ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์) เมื่อพิจารณาความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานทั้งสองแบบ จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงโดยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงาน (ชิ้นงานคาโทด) (ภาพที่ 35) เกิดชั้นเคลือบบอไรด์ที่หนากว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า (ชิ้นงานแอโนด) (ภาพที่ 34) ในทุกอุณหภูมิและทุกระยะเวลาที่ทำการทดลอง เนื่องจากไฟฟ้ากระแสตรงที่ให้แก่ชิ้นงานในกระบวนการบอไรดิงนั้น มีผลต่อการเกิดชั้นเคลือบบอไรด์ในสองส่วน ดังนี้ ส่วนที่หนึ่ง คือ ไฟฟ้ากระแสตรงช่วยให้อะตอมโบรอนแพร่ไปยังชิ้นงานได้มากขึ้น เพราะในกระบวนการบอไรดิงที่มีการให้กระแสไฟฟ้าแก่ชิ้นงานที่ทำหน้าที่เป็นขั้วคาโทด เมื่อครบวงจรก็จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านชิ้นงานได้ ซึ่งทิศทางของกระแสไฟฟ้าจะไหลออกจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด โดยที่อะตอมโบรอนที่อยู่รอบๆ ขั้วอิเล็กโทดทั้งสองก็เป็นส่วนหนึ่งของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายใต้ขั้วอิเล็กโทดทั้งสองด้วย ส่งผลให้การแพร่ของอะตอมโบรอนบริเวณรอบขั้วอิเล็กโทดทั้งสองถูกควบคุมทิศทางด้วยสนามไฟฟ้าให้แพร่ไปในทิศทางเดียวกันกับการไหลของกระแสไฟฟ้า ทำให้มีอะตอมโบรอนกระจายตัวอยู่บริเวณขั้วคาโทดเป็นจำนวนมากดังภาพที่ 39 ซึ่งลักษณะการแพร่ของอะตอมโบรอนที่ถูกควบคุมให้มีทิศทางไปยังขั้วคาโทดซึ่งเป็นชิ้นงานที่ต้องการเคลือบผิวนั้นจะสามารถแพร่ได้ดีกว่าการแพร่ในกระบวนการบอไรดิงแบบปกติที่ไม่ให้กระแสไฟฟ้า เพราะการแพร่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการบอไรดิงแบบปกติจะแพร่แบบสุ่มสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระในทุกทิศทางจึงมีโอกาสน้อยกว่าที่อะตอมโบรอนจะเคลื่อนที่ไปยังชิ้นงานที่ต้องการเคลือบผิว ส่วนที่สอง คือ ไฟฟ้ากระแสตรงช่วยให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงขึ้น เพราะจากการวัดอุณหภูมิชิ้นงานพบว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงทั้งสองแบบมีอุณหภูมิที่ชิ้นงานไม่เท่ากัน โดยชิ้นงานแอโนดมีอุณหภูมิที่ชิ้นงานเท่ากับอุณหภูมิของกระบวนการ ส่วนชิ้นงานคาโทดมีอุณหภูมิที่ชิ้นงานสูงกว่าอุณหภูมิของกระบวนการ (ตารางที่ 9) แนวโน้มผลการทดลองเป็นเช่นเดียวกันในทุกอุณหภูมิที่ทำการทดลอง โดยอุณหภูมิที่ชิ้นงานคาโทดจะสูงกว่าชิ้นงานแอโนดประมาณ 2 เฟอร์เซนต์ ส่วนต่างของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนั้นน่าจะมีผลมาจากกระแสไฟฟ้าที่ให้แก่ชิ้นงาน เพราะโดยทั่วไปขณะที่กระแสไฟฟ้าไหลในวงจรนั้นจะมีความร้อนเกิดขึ้นด้วย ดังนั้นในกระบวนการบอไรดิงที่มีการนำอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงมาเชื่อมต่อ เมื่อครบวงจรจะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วอิเล็กโทดทั้งสอง ซึ่งชิ้นงานที่อยู่ขั้วคาโทดก็จะได้รับความร้อนนี้ด้วยทำให้มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น แต่สำหรับกระบวนการบอไรดิงที่ไม่มีการให้กระแสไฟฟ้าแก่ชิ้นงานจึงไม่ได้รับผลของความร้อนจากกระแสไฟฟ้า ชิ้นงานแอโนดจึงมี

อุณหภูมิที่ขึ้นงานเท่ากับอุณหภูมิของกระบวนการซึ่งเป็นความร้อนจากเตาเพียงอย่างเดียว ต่างจาก
 ขึ้นงานคาโทดที่ได้รับความร้อนจากสองแหล่ง คือ จากเตาด้วย และจากการไหลผ่านของ
 กระแสไฟฟ้าด้วย จึงทำให้ขึ้นงานคาโทดมีอุณหภูมิสูงกว่าขึ้นงานอ้างอิง ทั้งๆ ที่ขึ้นงานทั้งสองผ่าน
 กระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ เวลา และอยู่ในกล่องบรรจุเดียวกัน ซึ่งการที่ขึ้นงานมีอุณหภูมิ
 สูงขึ้นมีผลต่อกระบวนการบอโรดิงในสองข้อ คือ ข้อที่หนึ่ง ช่วยให้การแตกตัวของอะตอมโบรอน
 บริเวณรอบขึ้นงานดีขึ้น เพราะเมื่ออุณหภูมิที่ขึ้นงานสูงขึ้นก็จะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาของผงดีซีน
 ทำให้มีอะตอมโบรอนอิสระอยู่รอบๆ ขึ้นงานเป็นจำนวนมากขึ้น ข้อที่สอง ช่วยเสริมให้การแพร่
 ของอะตอมโบรอนดีซีนทั้งการแพร่เข้าสู่ขึ้นงานและการแพร่มายังบริเวณรอบขึ้นงาน จากผลของ
 ไฟฟ้ากระแสตรงตามที่กล่าวมาทำให้บริเวณรอบขึ้นงานคาโทดมีความหนาแน่นของอะตอมโบรอน
 ในปริมาณสูง ส่งผลให้อะตอมโบรอนสามารถแพร่เข้าสู่ผิวขึ้นงานคาโทดได้มากกว่าขึ้นงานอ้างอิง
 ทำให้ขึ้นงานคาโทดเกิดชั้นเคลือบบอโรดที่หนากว่าขึ้นงานอ้างอิงเมื่อทำการเคลือบผิวด้วย
 กระบวนการบอโรดิงในสภาวะอุณหภูมิและเวลาเท่ากัน



ภาพที่ 39 การกระจายตัวของอะตอมโบรอนภายใต้สนามไฟฟ้าในกระบวนการบอโรดิง

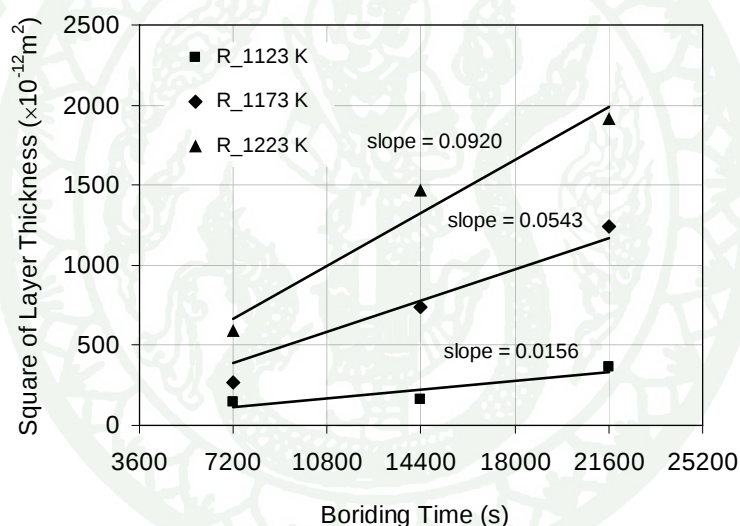
ตารางที่ 9 อุณหภูมิขึ้นงานที่ทำการเคลือบผิวเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยกระบวนการบอโรดิงที่
 อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิกระบวนการ (เคลวิน)	อุณหภูมิเฉลี่ยของขึ้นงาน (เคลวิน)		ความแตกต่างของ อุณหภูมิ (เปอร์เซ็นต์)
	ขึ้นงานคาโทด	ขึ้นงานอ้างอิง	
1123	1147	1124	2
1173	1202	1174	2
1223	1249	1223	2

4. จลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอโรไดง

4.1 จลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอโรไดงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า

จากการทดลองเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ด้วยกระบวนการบอโรไดง ที่อุณหภูมิในการเคลือบผิวระหว่าง 1123 – 1223 เคลวิน เป็นระยะเวลา 2 - 6 ชั่วโมง โดยวิธีแพ็คแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า พบว่าความหนาของชั้นเคลือบบอโรไดงเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาและอุณหภูมิของกระบวนการบอโรไดงเพิ่มสูงขึ้น (ดูภาพที่ 34) และเมื่อเขียนกราฟระหว่างกำลังสองของความหนาของชั้นเคลือบบอโรไดงกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ ของกระบวนการนี้ พบว่ามีความสัมพันธ์กันเชิงเส้นตรงดังแสดงในภาพที่ 40



ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสองของความหนาของชั้นเคลือบบอโรไดงและเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยกระบวนการบอโรไดงแบบที่ไม่ให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากกลไกของกระบวนการบอโรไดงที่อาศัยการแพร่ของอะตอมโบรอนเข้าไปจับกับอะตอมของธาตุเหล็กในชิ้นงานเพื่อเกิดเป็นชั้นเคลือบบอโรไดง ดังนั้นจากทฤษฎีการแพร่ซึม (Diffusion Theory) ซึ่งได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบหรือระยะทางของการแพร่กับเวลาและความสามารถในการแพร่หรือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในรูปของสมการการแพร่ซึม ดังแสดงในสมการที่ 1

$$d^2 = Kt \quad (1)$$

เมื่อ d คือ ความหนาของชั้นเคลือบ (เมตร)

K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (ตารางเมตร/วินาที)

t คือ เวลาในการเคลือบผิว (วินาที)

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (K) จะสัมพันธ์กับอุณหภูมิ (T) และพลังงานกระตุ้น (Activation Energy, Q) ตามสมการของ Arrhenius ดังแสดงในสมการ (2)

$$K = K_0 \exp (-Q/RT) \quad (2)$$

เมื่อ K_0 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ (ตารางเมตร/วินาที)

Q คือ ค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy) (จูล/โมล)

T คือ อุณหภูมิในการเคลือบผิว (เคลวิน)

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ มีค่าเท่ากับ 8.3143 จูล/โมล·เคลวิน

เมื่อพิจารณาผลการทดลองในภาพที่ 40 ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 1 จึงสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนที่อุณหภูมิต่างๆ ของกระบวนการบอโรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้าได้จากค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสองของความหนาของชั้นเคลือบบอโรด์และเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวชิ้นงาน ดังแสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนที่อุณหภูมิต่างๆ ในตารางที่ 10

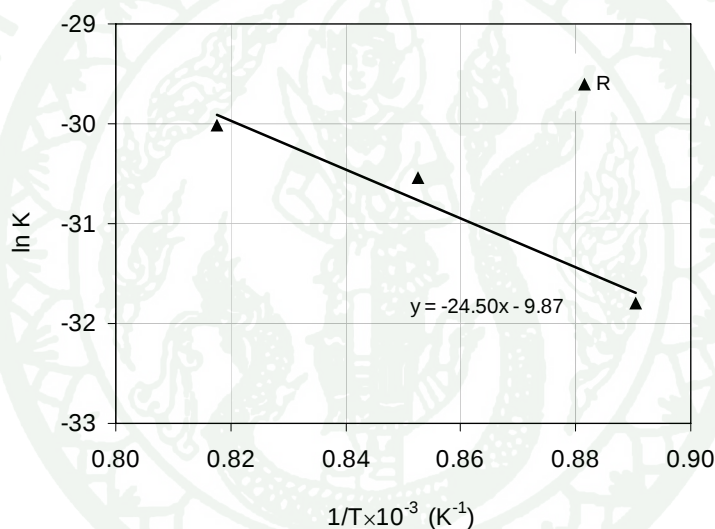
ตารางที่ 10 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการบอโรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว (เคลวิน)	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่, K (ตารางเมตร/วินาที)
1123	1.56×10^{-14}
1173	5.43×10^{-14}
1223	9.20×10^{-14}

และจัดรูปสมการที่ 2 ใหม่ได้ดังสมการที่ 3

$$\ln K = \ln K_0 - Q/(RT) \quad (3)$$

จากสมการที่ 3 สามารถพิจารณาหาค่าพลังงานกระตุ้นและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการบอโรดิงได้จากค่าความชันและจุดตัดแกนของกราฟเส้นตรงที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และส่วนกลับของอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิวของกระบวนการบอโรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้าได้ (ภาพที่ 41) โดยสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ของอะตอมโบรอนและค่าพลังงานกระตุ้นในกระบวนการบอโรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้าได้เท่ากับ 5.17×10^{-5} ตารางเมตร/วินาที และ 203.70×10^3 จูล/โมล ตามลำดับ

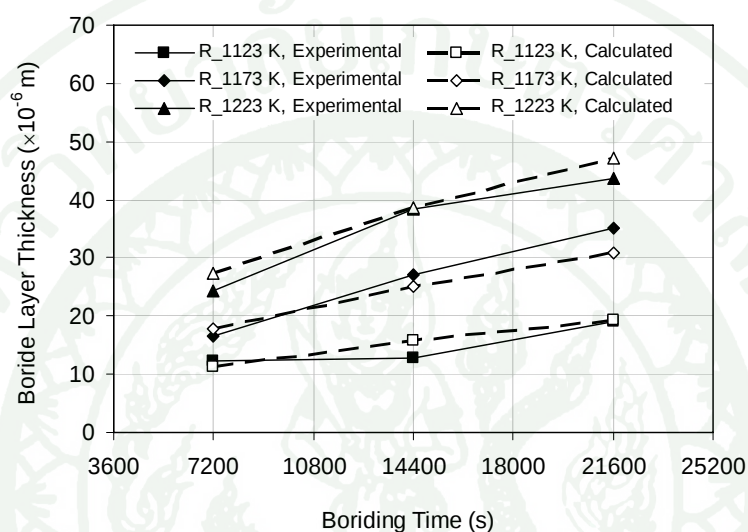


ภาพที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ($\ln K$) และส่วนกลับของอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว ($1/T$) ด้วยกระบวนการบอโรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า

เมื่อนำค่าต่างๆ ทั้งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอน ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ และค่าพลังงานกระตุ้นที่ได้จากการคำนวณ รวมทั้งค่าคงที่ของก๊าซ มาแทนลงในสมการการแพร่ซึม (สมการที่ 1) ก็สามารถสร้างสมการทั่วไปที่ใช้สำหรับการทำนายความหนาของชั้นเคลือบบอโรดิงที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในการเคลือบผิวด้วยกระบวนการบอโรดิงโดยวิธีแพ็คแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้าได้ดังสมการที่ 4

$$d = (5.17 \times 10^{-5} t \exp(-24500/T))^{0.5} \quad (4)$$

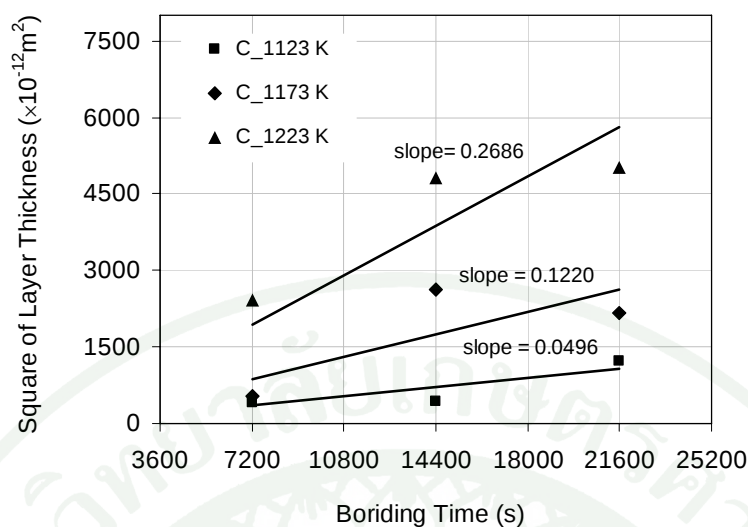
จากการสร้างสมการทั่วไป (สมการที่ 4) ที่สามารถนำมาใช้ทำนายความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่จะเกิดขึ้นได้นั้น เมื่อนำสมการดังกล่าวมาคำนวณหาค่าความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ในช่วงอุณหภูมิและเวลาที่ทำการศึกษาแล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงพบว่าความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ที่คำนวณได้จากสมการทั่วไปมีค่าใกล้เคียงกับค่าความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ที่ได้จากการทดลองจริงดังแสดงในภาพที่ 42



ภาพที่ 42 การคำนวณความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ในกระบวนการบอไรดิ้งแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงในช่วงอุณหภูมิและเวลาต่างๆ ที่ทำการทดลอง

4.2 จลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้กระแสไฟฟ้า

จากการทดลองเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ด้วยกระบวนการบอไรดิ้ง ที่อุณหภูมิในการเคลือบผิวระหว่าง 1123 – 1223 เคลวิน เป็นระยะเวลา 2 - 6 ชั่วโมง โดยวิธีแพ็คแบบให้กระแสไฟฟ้า (กระแสไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์) พบว่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาและอุณหภูมิของกระบวนการบอไรดิ้งเพิ่มสูงขึ้น (ดูภาพที่ 35) และเมื่อเขียนกราฟระหว่างกำลังสองของความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์กับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ ของกระบวนการนี้ พบว่ามีความสัมพันธ์กันเชิงเส้นตรงดังแสดงในภาพที่ 43



ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสองของความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์และเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิต่างๆ

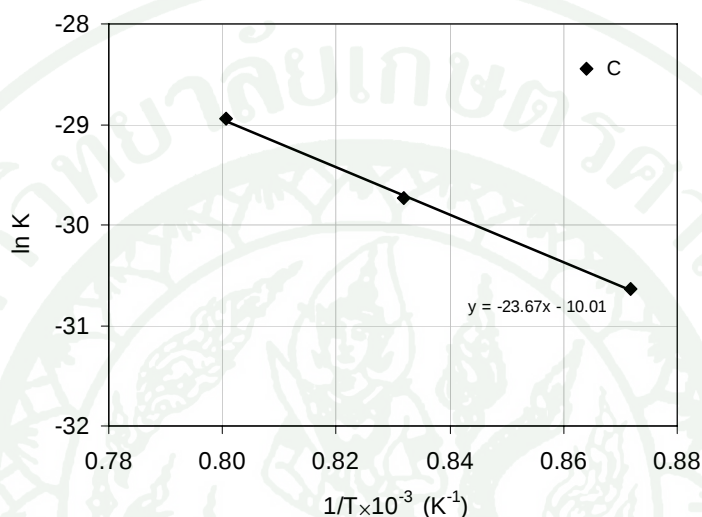
เมื่อพิจารณาผลการทดลองในภาพที่ 43 ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 1 เช่นเดียวกับกระบวนการบอไรดิ้งแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า จึงสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนที่อุณหภูมิต่างๆ ของกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้กระแสไฟฟ้าได้จากค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสองของความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์และเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวชิ้นงาน ดังแสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนที่อุณหภูมิต่างๆ ในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว (เคลวิน)	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่, K (ตารางเมตร/วินาที)
1123	4.96×10^{-14}
1173	12.20×10^{-14}
1223	26.86×10^{-14}

จากสมการที่ 3 สามารถพิจารณาค่าพลังงานกระตุ้นและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้กระแสไฟฟ้าได้จากค่าความชันและจุดตัดแกน

ของกราฟเส้นตรงที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และส่วนกลับของอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว (อุณหภูมิชิ้นงาน) ได้ (ภาพที่ 44) โดยสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ของอะตอมโบรอนและค่าพลังงานกระตุ้นในกระบวนการบอโรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้าได้เท่ากับ 4.49×10^{-5} ตารางเมตร/วินาที และ 196.97×10^3 จูล/โมล ตามลำดับ



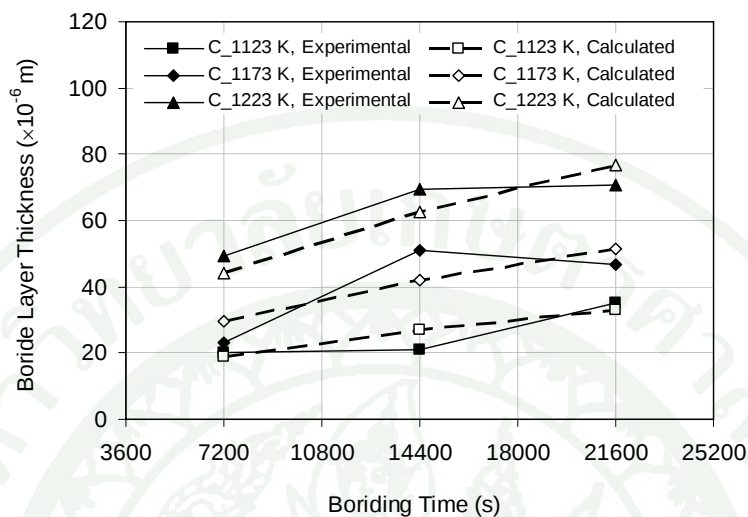
ภาพที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ($\ln K$) และส่วนกลับของอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว ($1/T$) ด้วยกระบวนการบอโรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้า

เมื่อนำค่าต่างๆ ทั้งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอน ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ และค่าพลังงานกระตุ้นที่ได้จากการคำนวณ รวมทั้งค่าคงที่ของก๊าซ มาแทนลงในสมการการแพร่ซึม (สมการที่ 1) ก็สามารถสร้างสมการทั่วไปที่ใช้สำหรับการทำนายความหนาของชั้นเคลือบบอโรด์ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในการเคลือบผิวด้วยกระบวนการบอโรดิงโดยวิธีแพ็คแบบให้กระแสไฟฟ้าได้ดังสมการที่ 5

$$d = (4.49 \times 10^{-5} t \exp(-23670/T))^{0.5} \quad (5)$$

จากการสร้างสมการทั่วไป (สมการที่ 5) ที่สามารถนำมาใช้ทำนายความหนาของชั้นเคลือบบอโรด์ที่จะเกิดขึ้นได้นั้น เมื่อนำสมการดังกล่าวมาคำนวณหาความหนาชั้นเคลือบบอโรด์ในช่วงอุณหภูมิและเวลาที่ทำการทดลองแล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงพบว่าความ

หนาชั้นเคลือบบอไรด์ที่คำนวณได้จากสมการทั่วไปมีค่าใกล้เคียงกับค่าความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ที่ได้จากการทดลองจริงดังแสดงในภาพที่ 45



ภาพที่ 45 การคำนวณความหนาชั้นเคลือบบอไรด์จากกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้กระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงในช่วงอุณหภูมิและเวลาต่างๆ ที่ทำการทดลอง

จากการทดลองเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 – 1223 เคลวิน เป็นระยะเวลา 2 - 6 ชั่วโมง ด้วยกระบวนการบอไรดิ้งโดยวิธีแพ็คทั้งแบบที่ให้และไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง (ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์) พบว่าจลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอไรดิ้งทั้งสองแบบสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการการแพร่ซึมตามทฤษฎีการแพร่ และสมการของ Arrhenius ซึ่งแสดงได้ว่ากระบวนการบอไรดิ้งทั้งสองแบบนี้เป็นกระบวนการที่ถูกควบคุมด้วยการแพร่เช่นเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบว่า การให้กระแสไฟฟ้าแก่ชิ้นงานในการเคลือบผิวมีผลทำให้อัตราการแพร่ของอะตอมโบรอนดีขึ้น ซึ่งดูได้จากผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนจากการทดลอง (ตารางที่ 12) ที่พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการบอไรดิ้งแบบที่ให้กระแสไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าในกระบวนการบอไรดิ้งแบบที่ไม่ให้กระแสไฟฟ้าเมื่อเปรียบเทียบกระบวนการบอไรดิ้งที่อุณหภูมิและเวลาเท่ากัน และเมื่อพิจารณาถึงค่าพลังงานกระตุ้นในกระบวนการยังพบว่า การให้กระแสไฟฟ้าแก่ชิ้นงานในกระบวนการบอไรดิ้งส่งผลให้ค่าพลังงานกระตุ้นในกระบวนการบอไรดิ้งแบบที่ให้กระแสไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่าในกระบวนการบอไรดิ้งแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า จากงานวิจัยที่ผ่านมา (Yoon *et al.*, 1999) ที่แสดงว่ากระบวนการบอไรดิ้งที่มีค่าพลังงานกระตุ้นในกระบวนการต่ำจะสามารถเกิดชั้นเคลือบบอไรด์ได้ง่ายกว่าและให้ชั้นเคลือบบอไรด์ที่หนากว่ากระบวนการบอไรดิ้งที่มีค่าพลังงานกระตุ้นใน

กระบวนการที่สูง ซึ่งสอดคล้องกับหลักการทางจลนพลศาสตร์เนื่องจากค่าพลังงานกระตุ้นในกระบวนการบอโรดิงเป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณพลังงานที่อะตอมโบรอนต้องการเพื่อให้สามารถเคลื่อนที่หรือแพร่เข้าสู่ชิ้นงานแล้วรวมตัวกับอะตอมเหล็กเป็นชั้นเคลือบบอโรได้ ดังนั้นเมื่อในกระบวนการบอโรดิงแบบที่มีการให้กระแสไฟฟ้ามีค่าพลังงานกระตุ้นน้อยกว่า นั้นหมายความว่าอะตอมโบรอนในกระบวนการนี้แพร่ได้ง่ายกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอะตอมโบรอนในกระบวนการบอโรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า จากการที่ไฟฟ้ากระแสตรงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนสูงขึ้นและค่าพลังงานกระตุ้นในกระบวนการลดลงทำให้กระบวนการบอโรดิงแบบที่ให้กระแสไฟฟ้าเกิดชั้นเคลือบบอโรได้บนชิ้นงานได้หนากว่ากระบวนการบอโรดิงแบบที่ไม่ให้กระแสไฟฟ้า

ตารางที่ 12 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนที่อุณหภูมิต่างๆ และค่าพลังงานกระตุ้นในกระบวนการบอโรดิงที่ทำการทดลอง

อุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว (เคลวิน)	กระบวนการบอโรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้า		กระบวนการบอโรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า	
	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (ตารางเมตร/วินาที)	ค่าพลังงานกระตุ้น (จูล/โมล)	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (ตารางเมตร/วินาที)	ค่าพลังงานกระตุ้น (จูล/โมล)
1123	4.96×10^{-14}	196.97×10^3	1.56×10^{-14}	203.70×10^3
1173	12.20×10^{-14}		5.43×10^{-14}	
1223	26.86×10^{-14}		9.20×10^{-14}	

จากงานวิจัยในครั้งนี้ที่ทำการทดลองเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ด้วยกระบวนการบอโรดิงโดยวิธีแพ็คที่มีการนำไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์ มาใช้ในกระบวนการ โดยการให้กระแสไฟฟ้าแก่ชิ้นงานซึ่งสามารถทำให้เกิดชั้นเคลือบบอโรได้บนผิวชิ้นงานได้ความหนาชั้นเคลือบมากขึ้นในทุกอุณหภูมิและทุกระยะเวลาที่ทำการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเคลือบผิวชิ้นงานชนิดเดียวกันด้วยกระบวนการบอโรดิงที่ไม่ให้กระแสไฟฟ้าแก่ชิ้นงาน จึงกล่าวได้ว่า ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถช่วยปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพให้กับกระบวนการบอโรดิงได้ และเป็นอีกหนึ่งแนวทางในการลดเวลาของการเคลือบผิวลงได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำวิธีการให้กระแสไฟฟ้าแก่ชิ้นงานไปประยุกต์ใช้ได้กับกระบวนการเคลือบผิวแบบอื่นที่อาศัยการแพร่ของอะตอม เช่น กระบวนการคาร์บูไรซิ่ง ในทรายดิง หรือ คาร์บูไนทรายดิง เป็นต้น

ซึ่งล้วนเป็นกระบวนการที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเคลือบผิวของประเทศไทย เพื่อพัฒนากระบวนการเคลือบผิวเหล่านี้ให้มีประสิทธิภาพสูงมากขึ้น และเป็นการยกระดับขีดความสามารถของการเคลือบผิวให้สูงขึ้นได้



สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษากระบวนการบอโรไดมด้วยวิธีแพ็คของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ทั้งแบบที่ให้และไม่ให้กระแสไฟฟ้า (กระแสไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์) ที่อุณหภูมิในการเคลือบผิวระหว่าง 1123 – 1223 เคลวิน เป็นระยะเวลา 2 - 6 ชั่วโมง สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้นบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C จากกระบวนการบอโรไดมด้วยวิธีแพ็คทั้งแบบที่ให้และไม่ให้กระแสไฟฟ้ามีลักษณะราบเรียบเป็นชนิดเฟสคู่ (FeB และ Fe_2B) มีความแข็งสูงประมาณ 2000 HV
2. ชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้นบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C จากกระบวนการบอโรไดมด้วยวิธีแพ็คทั้งแบบที่ให้และไม่ให้กระแสไฟฟ้ามีความหนาชั้นเคลือบเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการบอโรไดมเพิ่มขึ้น
3. กระบวนการบอโรไดมแบบให้กระแสไฟฟ้ามีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนสูงขึ้น และมีค่าพลังงานกระตุ้นลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการบอโรไดมแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า
4. ไฟฟ้ากระแสตรงที่ให้แก่งานในกระบวนการบอโรไดมมีผลทำให้อุณหภูมิชิ้นงานเพิ่มขึ้น โดยชิ้นงานที่อยู่ที่ยั่วคาโทดจะมีอุณหภูมิสูงกว่าชิ้นงานอ้างอิง
5. ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถช่วยปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพให้กับกระบวนการเคลือบผิวแบบบอโรไดมได้ โดยชิ้นงานที่อยู่ที่ยั่วคาโทดจะมีความหนาของชั้นเคลือบมากกว่าชิ้นงานอ้างอิงในทุกช่วงเวลาและอุณหภูมิที่ทำการทดลอง

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลของกระแสไฟฟ้ากระแสตรงต่อกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิต่ำ หรือ ช่วงอุณหภูมิที่ไม่สามารถเกิดขึ้นเคลือบบอโรได้จากกระบวนการบอโรดิงแบบปกติ เช่น อุณหภูมิประมาณ 773 - 1073 เคลวิน เพื่อจะได้พัฒนาเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ และสามารถประหยัดพลังงานให้ได้มากขึ้น

2. ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลของไฟฟ้ากระแสตรงที่มีต่อความหนาชั้นเคลือบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดและลักษณะของชิ้นงานที่ใช้เคลือบผิว เช่น ลดขนาดชิ้นงานลง หรือเปลี่ยนเป็นชิ้นงานแบบแผ่นสี่เหลี่ยม เป็นต้น แล้วเปรียบเทียบว่ามีความแตกต่างกันอย่างไรบ้าง เพื่อเป็นการลดข้อจำกัดของขนาดอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และนอกจากนี้ควรศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าในหน่วยของกระแสไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เพื่อง่ายต่อการเปรียบเทียบผลการทดลอง และการนำไปใช้งานจริงในอุตสาหกรรม

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- Atik, E., U. Yunker and C. Meric. 2003. The effects of conversional heat treatment and boronizing on abrasive wear and corrosion of SAE 1010, SAE 1040, D2 and 304 steels. **Tribology International** 36: 155-161.
- Bartch, K., and A. Leonhardt. 1999. Formation of iron boride layers on steel by d.c.-plasma boriding and deposition processes. **Surface & Coatings Technology** 116-119: 386-390.
- Campos-Silva, I., M. Ortiz-Dominguez, M.A. Donu-Ruiz, D. Bravo-Barcenas, C. Tapia-Quintero and M.Y. Jimenez-Reyes. 2010. Formation and kinetics of FeB/Fe₂B layers and diffusion zone at the surface of AISI 316 borided steels. **Surface & Coatings Technology** 205: 403-412.
- Campos, I., M. Palomar, A. Amador, R. Ganem and J. Martinez. 2006. Evaluation of the corrosion resistance of iron boride coatings obtained by paste boriding process. **Surface & Coatings Technology** 201: 2438-2442.
- Davis, J.R. 2002. **Surface Hardening of Steels Understanding the Basics**. ASM International, USA.
- Davis, J.R. 2000. **Alloy digest sourcebook: stainless steels**. ASM International, USA.
- Davis, J.A., P.J. Wilbur, D.L. Williamson, R. Wei and J.J. Vajo. 1998. Ion implantation boriding of iron and AISI M2 steel using a high-current density, low energy, broad-beam ion source. **Surface & Coatings Technology** 103-104: 52-57.
- Genel, K. 2006. Boriding kinetics of H13 steel. **Vacuum** 80: 451-457.

- Lee, S.Y., G.S. Kim and B. Kim. 2004. Mechanical properties of duplex layer formed on AISI 403 stainless steel by chromizing and boronizing treatment. **Surface & Coatings Technology** 177-178: 178-184.
- Nam, K.S., K.H. Lee, S.R. Lee and S.C. Kwon. 1998. A study on plasma-assisted boriding of steels. **Surface & Coatings Technology** 98: 886-890.
- Ozdemir, O., M.A. Omar, M. Usta, S. Zeytin, C. Bindal and A.H. Ucisik. 2009. An investigation on boriding kinetics of AISI 316 stainless steel. **Vacuum** 83: 175-179.
- Ozbek, I., S. Sen, M. Ipek, C. Bindal, S. Zeytin and A. Ucisik. 2004. A mechanical aspect of borides formed on the AISI 440C stainless-steel. **Vacuum** 73: 643-648.
- Ozbek, I., B.A. Konduk, C. Bindal and A.H. Ucisik. 2002. Characterization of borided AISI 316L stainless steel implant. **Vacuum** 65: 521-525.
- Prabhudev, K.H. 1988. **Handbook of Heat Treatment of steels**. Tata McGraw-Hill Publishing, New Delhi.
- Peckner, D. and I. M. Bernstein. 1977. **Handbook of stainless steels**. McGraw-Hill, USA.
- Rie, K.T. and E. Broszeit. 1995. Plasma diffusion treatment and duplex treatment - recent development and new applications. **Surface & Coatings Technology** 76-77: 425-436.
- Sen, S., U. Sen and C. Bindal. 2005. The growth kinetics of borides on boronized AISI 4140 steel. **Vacuum** 77: 195-202.
- Sinha, A.K. and B.P. Division. 1994. Boriding. **ASM Handbook**. Vol. 4. ASM International. Ohio, USA.

Taktak, S. 2007. Some mechanical properties of borided AISI H13 and 304 steels. **Materials & Design** 28: 1836-1843.

Taktak, S. 2006. Tribological behaviour of borided bearing steels at elevated temperatures. **Surface & Coatings Technology** 201: 2230-2239.

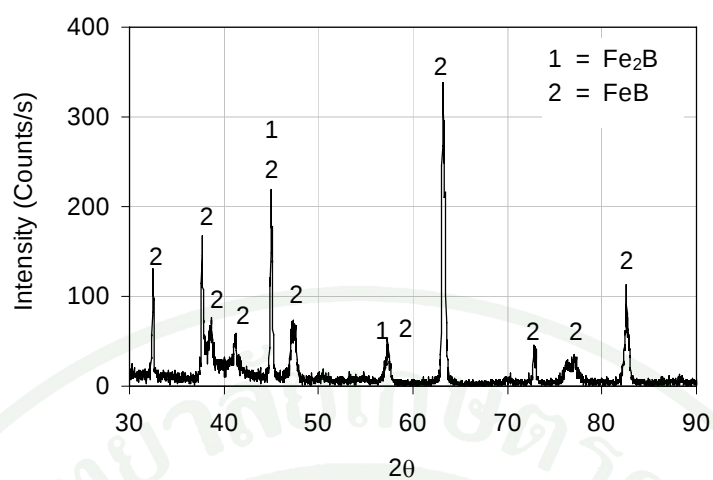
Yoon, J.H., Y.K. Jee and S.Y. Lee. 1999. Plasma paste boronizing treatment of the stainless steel AISI 304. **Surface & Coatings Technology** 112: 71-75.

Zhou, Z., F. Xie and J. Hu. 2008. A novel powder aluminizing technology assisted by direct current field at low temperatures. **Surface & Coatings Technology** 203: 23-27.



ภาคผนวก



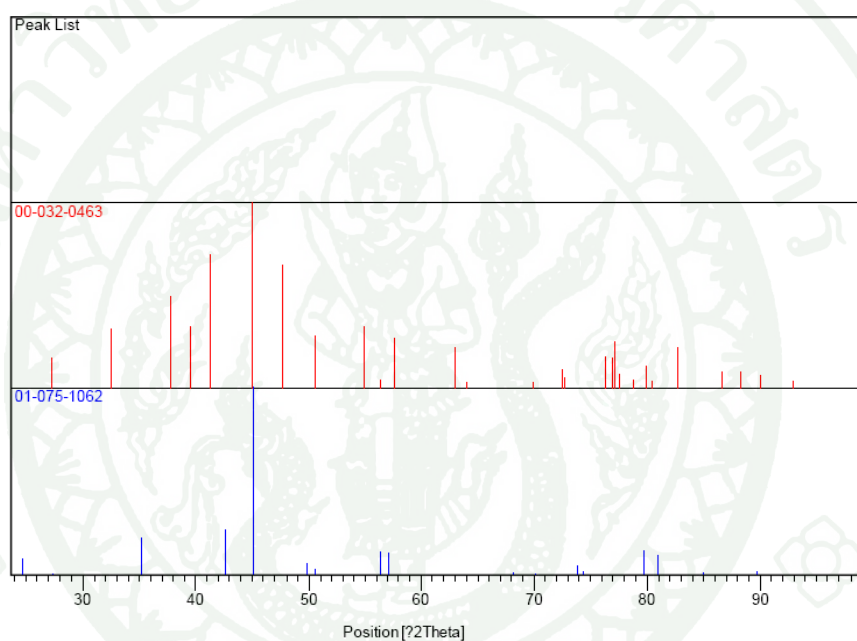


ภาพผนวกที่ ก1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงาน ที่ผ่านกระบวนการบอโรไดนิงแบบ
ไม่ให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

Identified Patterns List: (Bookmark4)

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	00-032-0463	32	Boron Iron	0.000	0.386	Fe B
*	01-075-1062	17	Iron Boron	0.000	0.161	Fe ₂ B

Plot of Identified Phases: (Bookmark 5)



ภาพผนวกที่ ก2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ FeB และ Fe₂B



ตารางผนวกที่ ข1 ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์บนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้กระแสไฟฟ้า (ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์) ที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลาต่างๆ

การวัดครั้งที่	ความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ (ไมโครเมตร)					
	2 ชั่วโมง		4 ชั่วโมง		6 ชั่วโมง	
	FeB + Fe ₂ B	FeB	FeB + Fe ₂ B	FeB	FeB + Fe ₂ B	FeB
1	19.52	6.67	17.62	8.57	36.19	25.71
2	22.90	8.57	14.76	5.24	32.38	21.90
3	18.10	10.48	21.90	6.19	42.86	23.33
4	19.10	12.86	21.43	4.76	37.14	25.71
5	21.05	10.48	22.38	7.62	34.76	25.24
6	19.52	10.95	19.52	8.57	36.19	15.24
7	21.43	10.48	22.38	7.14	34.76	28.10
8	19.05	5.24	23.33	8.57	37.14	19.05
9	21.58	8.10	22.86	9.52	32.86	21.43
10	20.08	11.43	19.05	7.14	31.43	18.57
11	20.02	8.10	22.86	8.10	32.38	21.43
12	20.00	10.48	22.38	10.48	34.29	23.33
13	19.81	9.06	20.00	8.57	33.81	12.38
14	21.10	6.67	21.90	11.43	36.67	21.90
15	20.11	7.62	23.33	8.57	34.29	21.43
เฉลี่ย	20.22	9.14	21.05	8.03	35.14	21.43

ตารางผนวกที่ ข2 ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์บนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้กระแสไฟฟ้า (ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์) ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลาต่างๆ

การวัดครั้งที่	ความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ (ไมโครเมตร)					
	2 ชั่วโมง		4 ชั่วโมง		6 ชั่วโมง	
	FeB + Fe ₂ B	FeB	FeB + Fe ₂ B	FeB	FeB + Fe ₂ B	FeB
1	19.52	12.38	50.00	29.05	47.15	24.29
2	24.29	13.33	55.71	30.00	36.67	21.43
3	28.57	11.43	51.90	31.43	47.14	26.67
4	25.71	8.57	51.43	29.52	48.10	35.24
5	23.81	10.95	54.29	27.14	50.95	21.43
6	26.19	11.90	52.86	39.05	47.14	32.38
7	24.29	11.90	51.43	36.19	40.00	30.48
8	21.43	14.76	49.05	28.57	50.48	26.67
9	23.33	9.05	51.90	21.43	43.81	34.29
10	23.33	9.52	54.29	33.34	41.90	29.05
11	21.90	9.52	53.81	30.48	45.71	27.62
12	21.90	8.10	42.86	30.95	51.43	25.24
13	23.81	15.24	48.57	22.86	47.62	32.38
14	18.10	12.86	47.62	26.67	50.00	17.62
15	18.10	10.00	51.90	28.57	51.90	25.24
เฉลี่ย	22.95	11.30	51.17	29.68	46.67	27.33

ตารางผนวกที่ ข3 ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์บนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้กระแสไฟฟ้า (ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์) ที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลาต่างๆ

การวัดครั้งที่	ความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ (ไมโครเมตร)					
	2 ชั่วโมง		4 ชั่วโมง		6 ชั่วโมง	
	FeB + Fe ₂ B	FeB	FeB + Fe ₂ B	FeB	FeB + Fe ₂ B	FeB
1	49.05	28.10	65.24	38.57	68.10	31.90
2	47.62	18.57	70.48	37.62	73.81	30.48
3	50.95	22.38	70.48	44.76	69.05	25.71
4	48.57	20.95	71.90	41.43	71.90	34.29
5	49.05	23.81	70.00	28.10	74.76	33.33
6	46.67	21.43	65.71	47.14	66.67	17.62
7	47.14	23.33	72.86	52.38	70.95	31.90
8	50.00	26.19	69.52	43.81	71.43	24.29
9	50.00	24.29	63.81	38.10	70.00	18.10
10	52.38	21.43	71.90	52.86	70.95	29.05
11	49.52	26.19	72.38	39.52	67.62	32.38
12	52.86	22.38	73.33	42.86	71.90	24.76
13	42.86	20.48	65.24	34.76	70.00	36.67
14	51.90	23.33	67.14	41.90	74.76	29.52
15	50.00	24.29	70.48	38.57	69.52	27.62
เฉลี่ย	49.24	23.14	69.37	41.49	70.76	28.51

ตารางผนวกที่ ข4 ความหนาของชั้นเคลือบบอโรไนด์บนแอโนดที่ผ่านกระบวนการบอโรดิ้งแบบให้กระแสไฟฟ้า (ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์) ที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลาต่างๆ

การวัดครั้งที่	ความหนาชั้นเคลือบบอโรไนด์ (ไมโครเมตร)					
	2 ชั่วโมง		4 ชั่วโมง		6 ชั่วโมง	
	FeB + Fe ₂ B	FeB	FeB + Fe ₂ B	FeB	FeB + Fe ₂ B	FeB
1	43.81	24.29	41.90	19.05	61.43	21.43
2	41.90	20.95	41.43	11.91	67.14	29.05
3	42.38	22.86	39.52	15.71	65.24	27.62
4	35.71	18.10	35.71	9.05	67.14	24.76
5	40.48	25.24	43.33	8.10	64.76	25.24
6	36.19	16.19	40.95	18.10	67.62	31.43
7	37.14	17.14	42.38	12.38	63.81	24.76
8	35.24	20.00	42.38	12.38	61.90	23.81
9	38.57	18.10	38.10	12.38	68.57	27.14
10	38.10	16.19	49.05	16.69	63.33	20.95
11	38.57	18.10	48.10	12.86	53.81	23.33
12	38.57	17.14	40.48	19.05	60.48	23.33
13	43.33	13.33	41.43	13.33	50.95	18.10
14	37.14	19.52	46.67	12.86	57.14	24.29
15	40.00	12.86	45.24	15.74	55.71	17.14
เฉลี่ย	39.14	18.67	42.44	13.97	61.94	24.16

ตารางผนวกที่ ข5 ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์บนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบ
ไม่ใช้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลาต่างๆ

การวัดครั้งที่	ความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ (ไมโครเมตร)					
	2 ชั่วโมง		4 ชั่วโมง		6 ชั่วโมง	
	FeB + Fe ₂ B	FeB	FeB + Fe ₂ B	FeB	FeB + Fe ₂ B	FeB
1	14.29	3.81	13.81	5.24	15.71	9.05
2	10.48	3.81	12.86	5.71	14.76	10.48
3	12.38	5.71	12.38	7.14	19.05	10.48
4	11.43	4.76	12.38	6.19	19.52	8.10
5	10.95	3.84	12.38	4.29	19.05	8.57
6	10.95	4.76	13.81	4.29	20.95	12.86
7	12.86	5.71	13.33	5.71	21.43	11.90
8	11.43	6.68	10.48	4.29	20.48	7.14
9	13.81	6.67	11.90	3.81	22.38	10.95
10	10.95	6.19	12.86	4.29	19.05	8.10
11	14.29	4.29	13.81	3.81	16.20	6.19
12	11.90	6.19	11.90	2.86	20.00	6.19
13	11.90	5.71	11.90	3.81	16.19	10.00
14	12.86	4.29	13.33	3.81	22.38	7.14
15	12.38	5.24	13.81	4.29	20.00	6.67
เฉลี่ย	12.19	5.18	12.73	4.63	19.14	8.92

ตารางผนวกที่ ข6 ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์บนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบ
ไม่ใช้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลาต่างๆ

การวัดครั้งที่	ความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ (ไมโครเมตร)					
	2 ชั่วโมง		4 ชั่วโมง		6 ชั่วโมง	
	FeB + Fe ₂ B	FeB	FeB + Fe ₂ B	FeB	FeB + Fe ₂ B	FeB
1	16.19	8.57	30.00	12.86	35.24	16.67
2	18.10	7.14	28.10	10.95	33.33	19.05
3	19.05	6.67	24.29	13.81	38.10	16.67
4	12.86	10.00	20.95	15.24	36.67	21.90
5	15.72	6.67	24.76	14.76	38.10	17.62
6	18.57	9.05	23.33	15.71	31.43	15.71
7	15.24	9.52	27.14	16.19	36.67	15.71
8	14.29	9.52	30.00	17.14	35.24	17.14
9	12.86	10.48	30.48	17.62	28.57	19.05
10	17.14	9.52	27.62	17.62	31.43	22.86
11	19.52	9.52	24.76	10.95	33.81	19.52
12	15.71	9.05	29.05	12.38	35.71	18.57
13	15.71	15.71	31.43	14.29	39.52	18.57
14	17.62	7.14	26.67	9.54	37.62	20.00
15	18.10	10.48	28.57	14.29	37.14	13.81
เฉลี่ย	16.45	9.27	27.14	14.22	35.24	18.19

ตารางผนวกที่ ข7 ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์บนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบ
ไม่ใช้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลาต่างๆ

การวัดครั้งที่	ความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ (ไมโครเมตร)					
	2 ชั่วโมง		4 ชั่วโมง		6 ชั่วโมง	
	FeB + Fe ₂ B	FeB	FeB + Fe ₂ B	FeB	FeB + Fe ₂ B	FeB
1	26.19	12.38	40.00	16.19	50.48	12.38
2	28.57	14.29	36.67	10.00	46.19	8.10
3	24.76	12.38	34.29	14.29	44.29	20.95
4	23.81	14.29	41.90	11.43	43.33	20.95
5	22.86	13.33	40.00	16.67	45.71	14.76
6	22.86	15.71	41.43	18.57	40.95	22.86
7	19.52	9.05	41.90	19.05	43.81	19.52
8	20.48	11.90	41.90	15.71	46.67	18.12
9	27.62	11.43	34.29	17.14	38.10	22.38
10	32.86	10.48	31.90	18.57	48.10	10.48
11	26.67	10.96	37.14	18.57	44.77	20.95
12	23.33	9.54	34.29	17.14	32.38	12.86
13	22.86	8.58	40.00	14.29	46.67	11.44
14	25.72	8.57	36.67	13.33	43.81	20.00
15	20.95	9.05	41.90	12.38	41.43	20.48
เฉลี่ย	24.60	11.46	38.29	15.56	43.78	17.08



ตารางผนวกที่ 1 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้า (ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์) ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ความแข็ง ($HV_{0.05}$)	ระยะห่างจากผิว (ไมโครเมตร)
2038.00	10.10
2222.00	11.05
1885.00	12.42
537.00	51.94
574.30	84.29
591.90	107.66
538.20	166.23
524.20	183.81
546.00	230.04
522.20	275.71
564.50	298.13
570.10	354.29
569.20	359.09
560.70	385.24
494.20	426.70
549.70	469.52
582.00	494.80

ตารางผนวกที่ ค2 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ความแข็ง ($HV_{0.05}$)	ระยะห่างจากผิว (ไมโครเมตร)
2281.00	10.48
2089.00	13.81
1885.00	14.29
476.20	25.73
576.00	49.52
557.70	86.69
549.20	110.95
522.70	149.07
562.10	176.19
537.70	216.69
555.50	254.29
541.80	277.64
589.00	314.77
548.60	330.02
587.20	366.20
576.60	388.12
592.50	420.21
553.10	465.35
592.70	489.04

ตารางผนวกที่ ค3 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้า (ไฟฟ้า กระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์) ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ความแข็ง (HV _{0.05})	ระยะห่างจากผิว (ไมโครเมตร)
1984.00	18.32
2085.00	20.11
2153.00	23.33
499.10	55.11
593.10	85.72
551.80	97.69
562.60	130.23
550.00	160.48
548.60	201.20
507.10	250.48
556.10	290.10
538.20	330.58
537.00	399.39
534.20	452.50
527.60	490.33

ตารางผนวกที่ ค4 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ความแข็ง ($HV_{0.05}$)	ระยะห่างจากผิว (ไมโครเมตร)
1773.00	17.37
1592.00	19.52
462.20	38.11
574.50	75.24
539.80	139.06
537.10	185.24
548.50	231.43
523.40	235.73
530.30	279.01
521.00	301.48
537.50	348.10
512.30	356.20
543.10	412.03
500.30	474.29
522.20	482.87

ตารางผนวกที่ ค5 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้า (ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์) ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

ความแข็ง (HV _{0.05})	ระยะห่างจากผิว (ไมโครเมตร)
2135.00	3.67
2286.00	6.08
521.70	14.00
607.00	25.83
632.60	46.58
653.00	62.92
607.60	94.00
653.40	152.27
634.60	197.02
564.50	230.43
551.30	267.42
617.60	301.26
533.40	342.86
567.20	389.16
652.60	412.54
569.90	451.96
631.40	487.13

ตารางผนวกที่ ๑๖ ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

ความแข็ง ($HV_{0.05}$)	ระยะห่างจากผิว (ไมโครเมตร)
2161.00	3.60
2293.00	5.91
2135.00	6.76
637.90	53.48
570.40	75.12
657.90	97.16
569.20	125.95
550.50	168.57
588.40	217.46
534.70	245.85
592.20	272.96
692.40	299.10
570.10	332.15
583.10	376.75
617.50	420.32
526.60	451.68
554.20	496.25



ตารางผนวกที่ ง1 อุณหภูมิขึ้นงานขณะเคลือบผิวด้วยกระบวนการบอโรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า
ที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

เวลาในการเคลือบผิว (นาทีก)	อุณหภูมิขึ้นงาน (องศาเซลเซียส)
5	850.6
10	850.2
15	851.6
20	852.5
25	851.6
30	850.5
35	850.0
40	849.6
45	849.7
50	849.7
55	849.7
60	849.8
65	849.7
70	849.8
75	850.3
80	850.1
85	850.2
90	850.3
95	850.2
100	850.2
105	849.7
110	849.9
115	849.8
120	849.9
125	850.2
130	851.1

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

เวลาในการเคลือบผิว (นาทีก)	อุณหภูมิชิ้นงาน (องศาเซลเซียส)
135	850.8
140	850.7
145	850.7
150	850.6
155	850.7
160	850.7
165	850.7
170	850.8
175	850.9
180	850.9
185	850.7
190	850.8
195	850.8
200	851.0
205	851.1
210	851.0
215	851.0
220	851.6
225	852.1
230	851.8
235	851.5
240	851.2

ตารางผนวกที่ ๖2 อุณหภูมิชิ้นงานขณะเคลือบผิวด้วยกระบวนการบอโรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า
ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

เวลาในการเคลือบผิว (นาทีก)	อุณหภูมิชิ้นงาน (องศาเซลเซียส)
5	901.2
10	901.4
15	901.0
20	901.5
25	901.2
30	901.2
40	901.2
50	901.3
60	899.9
80	900.2
100	901.2
120	902.1
140	901.7
150	901.6
160	901.3
170	901.5
180	901.5
190	901.6
200	901.1
210	901.2
220	901.5
230	900.9
240	901.2

ตารางผนวกที่ 33 อุณหภูมิชิ้นงานขณะเคลือบผิวด้วยกระบวนการบอโรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้า ที่
อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

เวลาในการเคลือบผิว (นาทีก)	อุณหภูมิชิ้นงาน (องศาเซลเซียส)
5	869.3
10	869.0
15	870.8
20	871.8
25	871.1
30	870.3
35	870.7
40	871.2
45	871.8
50	872.4
55	872.6
60	872.8
65	872.9
70	873.8
75	875.2
80	875.4
85	875.7
90	875.3
95	875.2
100	875.3
105	874.8
110	875.0
115	875.0
120	875.1
125	875.5
130	876.4

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

เวลาในการเคลือบผิว (นาทีก)	อุณหภูมิชิ้นงาน (องศาเซลเซียส)
135	876.2
140	876.1
145	876.1
150	876.1
155	876.3
160	876.4
165	876.6
170	876.7
175	876.8
180	876.9
185	876.8
190	876.9
195	877.0
200	877.2
205	877.3
210	877.3
215	877.2
220	876.1
225	873.6
230	872.5
235	871.9
240	871.4

ตารางผนวกที่ 4 อุณหภูมิชิ้นงานขณะเคลือบผิวด้วยกระบวนการบอโรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้า ที่
อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

เวลาในการเคลือบผิว (นาทีก)	อุณหภูมิชิ้นงาน (องศาเซลเซียส)
5	932.5
10	932.9
15	932.9
20	933.3
25	933.0
30	932.9
40	932.9
50	932.9
60	930.0
80	932.5
100	932.9
120	931.5
140	930.4
150	929.3
160	927.5
170	926.4
180	924.4
190	923.1
200	921.2
210	920.0
220	919.8
230	920.0
240	919.5

ตารางผนวกที่ ๕ อุณหภูมิชิ้นงานขณะเคลือบผิวด้วยกระบวนการบอโรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้า ที่
อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

เวลาในการเคลือบผิว (นาทื)	อุณหภูมิชิ้นงาน (องศาเซลเซียส)
5	978.2
10	977.4
15	972.7
20	970.9
25	972.2
30	973.3
35	973.9
40	974.2
45	974.6
50	974.6
55	974.8
60	975.2
65	975.1
70	975.3
75	975.5
80	975.6
85	975.7
90	976.0
95	976.2
100	976.2
105	976.3
110	976.6
115	976.5
120	976.5
125	976.5
130	976.6

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ)

เวลาในการเคลือบผิว (นาทีก)	อุณหภูมิชิ้นงาน (องศาเซลเซียส)
135	976.6
140	976.5
145	976.6
150	976.7
155	976.8
160	976.7
165	976.7
170	976.6
175	976.8
180	976.8
185	976.8
190	976.9
195	976.8
200	976.9
205	976.7
210	976.9
215	976.8
220	977.1
225	977.2
230	977.5
235	977.6
240	977.6
245	977.7
250	977.8

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ นางสาวพัชรินทร์ แนมจันทร์
เกิดวันที่ 25 กันยายน 2526
สถานที่เกิด จังหวัดนครศรีธรรมราช
ประวัติการศึกษา วศ.บ. (วิศวกรรมวัสดุ) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ตำแหน่งปัจจุบัน -
สถานที่ทำงานปัจจุบัน -
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ -
ทุนการศึกษาที่ได้รับ ได้รับทุนเรียนดีเยี่ยมจากคณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2553)