



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)

ปริญญา

วิศวกรรมวัสดุ

วิศวกรรมวัสดุ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง จลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอโรดิงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C

Kinetics of Boriding Process on Stainless Steels AISI 304 AISI 420 and AISI 440C

นามผู้วิจัย นางสาวสรินทร ชีระชวาลเกียรติ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ปฎิภาณ จุ้ยเจิม, Dr.Ing.)

หัวหน้าภาควิชา

(อาจารย์ปฎิภาณ จุ้ยเจิม, Dr.Ing.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

จลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอโรไดงบนเหล็กกล้าไร้สนิม

AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C

Kinetics of Boriding Process on Stainless Steels

AISI 304 AISI 420 and AISI 440C

โดย

นางสาวรัสรินทร์ ชีระชวาลเกียรติ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รัสรินทร์ ชีระชาลเกียรติ 2553: จลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอโรดิงบนเหล็กกล้า
ไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(วิศวกรรมวัสดุ) สาขาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ปฎิภาณ จุ้ยเจิม, Dr.Eng. 129 หน้า

การด้านทานการกัดกร่อนเป็นสมบัติหลักในการเลือกใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิม อย่างไรก็ตามการด้านทานการสึกหรอยังเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เนื่องจากการใช้งานในปัจจุบันนั้นมีความซับซ้อนและต้องรับภาระทางกลสูงขึ้น การปรับปรุงพื้นผิวโดยกระบวนการทางเคมี – ความร้อน จึงถูกนำมาพิจารณาเพื่อเพิ่มความสามารถในการใช้งานของเหล็กกล้าไร้สนิม เช่น กระบวนการบอโรดิง เป็นการปรับปรุงพื้นผิวโดยการแพร่ซึมของอะตอมของธาตุโบรอน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวให้ชั้นเคลือบบอโรดิงที่มีสมบัติในหลายๆ ด้านดีกว่าชั้นเคลือบจากกระบวนการคาร์บูไรซิงและไนไตรดิง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอโรดิงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ในเตาอ่างเกลือที่สภาวะบรรยากาศปกติ โดยมีเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวและเฟอร์โรซิลิกอน 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นตัวรีดิวเซอร์ ทดลองที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 - 1273 เคลวิน เป็นเวลา 1 - 9 ชั่วโมง ชั้นเคลือบที่ได้ถูกตรวจสอบอย่างละเอียดโดยกล้องจุลทรรศน์ทั้งแบบแสงและอิเล็กตรอนแบบส่องกราดพร้อมด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ และวิธีวิเคราะห์ห่อหุ้มประกอบทางเคมีด้วยรังสีเอ็กซ์ ความหนาของชั้นเคลือบบอโรดิงที่เกิดขึ้นสามารถวัดได้โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพ ความแข็งวัดด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ จากงานวิจัยพบว่าชั้นเคลือบบอโรดิงสามารถเพิ่มความแข็งให้กับผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ได้สูงถึง 2000 HV โดยความหนาของชั้นเคลือบบอโรดิงนั้นมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเคลือบสูงขึ้น จลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอโรดิงสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการการแพร่และสมการ Arrhenius ค่าพลังงานกระตุ้นบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C สามารถคำนวณได้เท่ากับ 292.07 386.35 และ 312.61 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ นอกจากนี้ค่าตัวแปรที่ได้จากงานวิจัยสามารถนำมาสร้างสมการทั่วไปที่ใช้ทำนายค่าความหนาของชั้นเคลือบบอโรดิงซึ่งสามารถนำไปใช้ได้จริงในอุตสาหกรรม

ลายมือชื่อนิพนธ์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Rutsarin Teerachavalkiat 2010: Kinetics of Boriding Process on Stainless Steels
AISI 304 AISI 420 and AISI 440C. Master of Engineering (Materials Engineering),
Major Field: Materials Engineering, Department of Materials Engineering. Thesis
Advisor: Mr. Patipan Juijerm, Dr.Ing. 129 pages.

The main objective of stainless steels is corrosion resistance. However, wear resistance is much more required due to complicated and high - load applications. Thermo - chemical surface treatments such as boriding process are frequently considered to enhance performance of stainless steels. The boriding process involves a diffusion process of active boron atoms into a substrate. A boride layer possesses many outstanding properties as compared to carburized or nitrided layers. Thus, in this research, the boride coating on stainless steels AISI 304 AISI 420 and AISI 440C have been investigated using a salt bath containing borax and ferro - silicon 15 % wt. as a reducer at ambient. The boriding processes were performed at temperature range of 1123 - 1273 K and for about 1 - 9 h. The boride layers were characterized intensively by optical microscopy, Scanning Electron Microscope (SEM) with Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS) and X-ray diffraction (XRD). The thicknesses of boride layers were measured using the optical microscope with image analyzer program. The hardness values of the borided stainless steels AISI 304 AISI 420 and AISI 440C were measured by Vickers microhardness tester. It was found that near - surface hardness value of the borided layer of about 2000 HV was detected. Moreover, the boride layer thickness increase with increasing boriding temperature and time. The kinetics of the boriding process was analyzed by diffusion and Arrhenius equations. An activation energy of the boriding process on stainless steels AISI 304 AISI 420 and AISI 440C is of about 292.07 386.35 and 312.61 kJ/mol. Finally, a general equation using empirical parameters from experiment to predict the thickness of the boride layer was established for industries.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ปฎิภาณ จุ้ยเจิม อาจารย์กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ กรรมการที่ปรึกษาทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำในการเรียน การศึกษา ค้นคว้า และดำเนินงาน ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และกราบขอบพระคุณผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัยและบุคคลที่เกี่ยวข้อง ที่ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้เสร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมวัสดุทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบประสบการณ์ ความรู้ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำมาใช้แก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในการทำวิจัย และนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

ขอขอบพระคุณ คุณพวยร เสนทองแก้ว เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิศวกรรมวัสดุที่ให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์ชิ้นงานด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X - ray Diffraction) รวมไปถึงเจ้าหน้าที่ธุรการ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ และบุคลากรในภาควิชาวิศวกรรมวัสดุทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือและให้คำแนะนำในด้านต่างๆ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่และรุ่นน้องในภาควิชาวิศวกรรมวัสดุทั้งในระดับบัณฑิตและมหาบัณฑิตทุกคน ที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ด้วยความดีหรือประโยชน์อันเนื่องมาจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแต่คุณพ่อ คุณแม่ และญาติๆ ที่ได้ให้การอบรมสั่งสอน ให้กำลังใจและช่วยเหลือในทุกๆ เรื่องตลอดมา

รัสรินทร์ ชีระชาวลเกียรติ

กันยายน 2553

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(14)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	24
อุปกรณ์	24
วิธีการ	25
ผลและวิจารณ์	28
ผล	28
วิจารณ์	46
สรุปและข้อเสนอแนะ	59
สรุป	59
ข้อเสนอแนะ	60
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	61
ภาคผนวก	63
ภาคผนวก ก โครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบ	64
ภาคผนวก ข วิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X - ray diffraction, XRD)	77
ภาคผนวก ค วิเคราะห์ธาตุ (Energy dispersive x - ray spectrometer, EDS)	85
ภาคผนวก ง ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์	102
ภาคผนวก จ ความแข็งของชั้นเคลือบบอไรด์	106
ภาคผนวก ฉ รูปชิ้นงาน	110
ภาคผนวก ช การตีพิมพ์ผลงาน	112
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	129

สารบัญตาราง

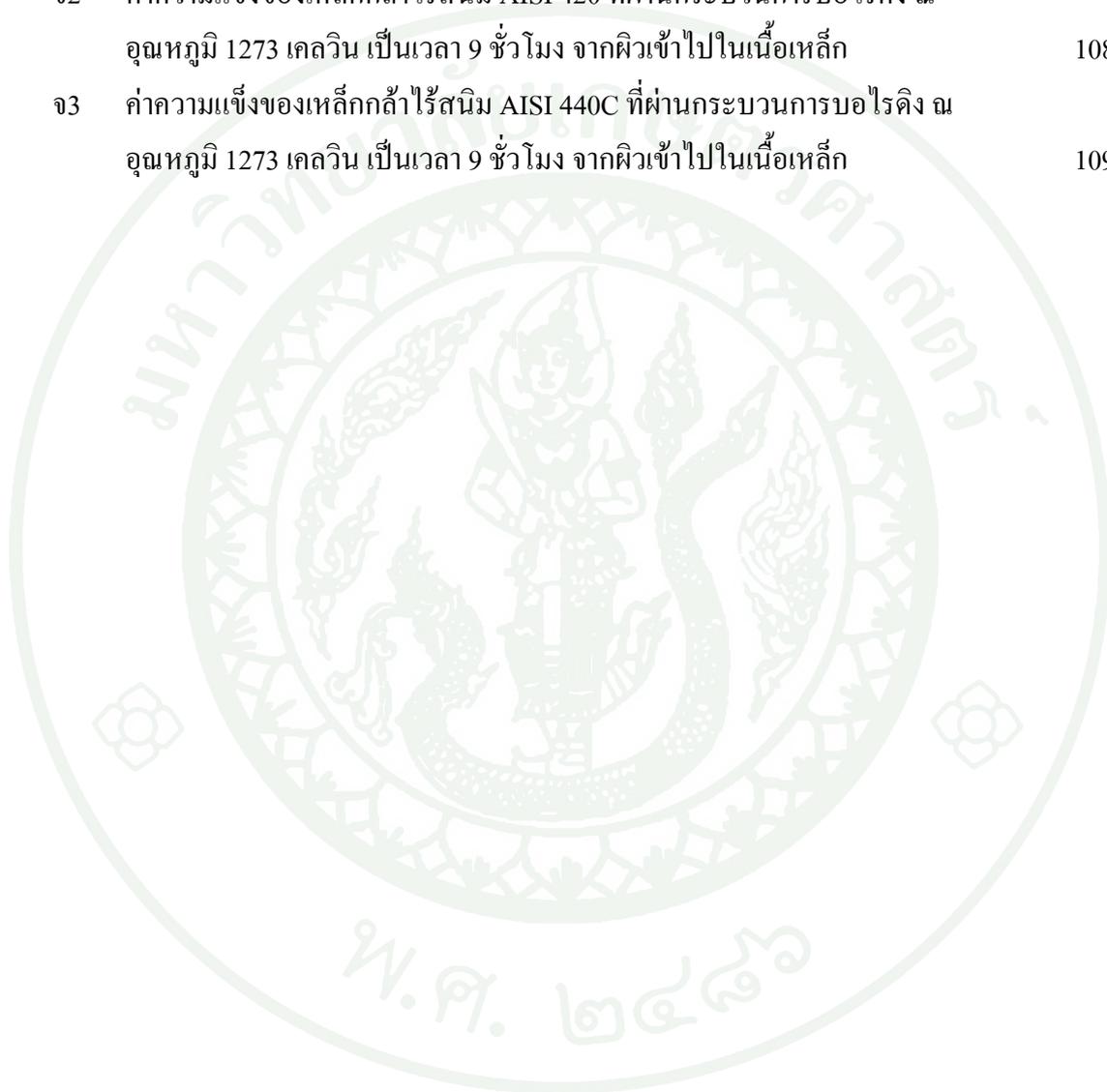
ตารางที่		หน้า
1	สมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304	5
2	สมบัติทั่วไปของเหล็กบอไรด์ (FeB และ Fe ₂ B)	10
3	การเปรียบเทียบความแข็งของเหล็กที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงผิวต่างๆ	14
4	องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ที่ใช้ในการทดลอง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	24
5	องค์ประกอบทางเคมีของเฟอร์โรซิลิกอน (Fe - Si) ที่ใช้ในการทดลอง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	24
6	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในกระบวนการบอไรดิงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304	51
7	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในกระบวนการบอไรดิงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420	52
8	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในกระบวนการบอไรดิงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C	53
9	พลังงานกระตุ้นและสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ของกระบวนการบอไรดิงสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C	56
ตารางผนวกที่		
ค1	ชาตุนบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 1 ในภาพผนวกที่ ค1	87
ค2	ชาตุนบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 2 ในภาพผนวกที่ ค1	88
ค3	ชาตุนบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 3 ในภาพผนวกที่ ค1	89
ค4	ชาตุนบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 4 ในภาพผนวกที่ ค1	90
ค5	ชาตุนบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 5 ในภาพผนวกที่ ค1	91

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ค6	ชาตุดบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 1 ในภาพผนวกที่ ค7	93
ค7	ชาตุดบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 2 ในภาพผนวกที่ ค7	94
ค8	ชาตุดบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 3 ในภาพผนวกที่ ค7	95
ค9	ชาตุดบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 4 ในภาพผนวกที่ ค7	96
ค10	ชาตุดบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 1 ในภาพผนวกที่ ค12	98
ค11	ชาตุดบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 2 ในภาพผนวกที่ ค12	99
ค12	ชาตุดบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 3 ในภาพผนวกที่ ค12	100
ค13	ชาตุดบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 4 ในภาพผนวกที่ ค12	101
ง1	ความหนาของชั้นเคลือบบอโรดิงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิง ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	103
ง2	ความหนาของชั้นเคลือบบอโรดิงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิง ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	104
ง3	ความหนาของชั้นเคลือบบอโรดิงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิง ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	105
จ1	ค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิง ณ อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง จากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็ก	107

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
จ2 ค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิง ณ อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง จากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็ก	108
จ3 ค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิง ณ อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง จากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็ก	109



สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	กลไกของการเกิดชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ด้วยกระบวนการบอไรดิ้งแบบอ่างเกลือ	7
2	ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานอิสระของธาตุในสารประกอบที่เติมในอ่างเกลือบอไรด์กับชนิดของชั้นเคลือบที่เกิดขึ้น ที่อุณหภูมิการเคลือบ 1000 องศาเซลเซียส	8
3	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งที่ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	9
4	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กที่ธาตุผสมต่างๆ	11
5	ผลของการเติมธาตุผสมในเหล็กต่อความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์	12
6	ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ค่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์กับเวลาที่ใช้ในการเคลือบที่อุณหภูมิต่างกัน (ข) ค่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ยกกำลังสองกับเวลาที่ใช้ในการเคลือบ	16
7	อัตราการเปลี่ยนแปลงคงที่กับอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการบอไรดิ้ง	17
8	รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบบอไรด์บน (ก) เหล็ก H13 (ข) เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง	18
9	โครงสร้างจุลภาคของ (ก) เหล็ก H13 (ข) เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งที่ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง	19
10	รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ (ก) 1023 เคลวิน (ข) 1073 เคลวิน (ค) 1123 เคลวิน (ง) 1173 เคลวิน และ (จ) 1223 เคลวิน	20
11	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งที่ 1173 เคลวิน เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	21
12	ค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน ที่เวลาต่างกัน	21
13	ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ค่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์กับเวลาที่ใช้ในการเคลือบเหล็ก AISI 304 (ข) ค่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ยกกำลังสองกับเวลาที่ใช้ในการเคลือบเหล็ก AISI 304	22

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
14	อัตราการเปลี่ยนแปลงคงที่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบบอโรคาร์บอน เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304	22
15	แผนภาพงานวิจัย	27
16	โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอโรคาร์บอนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่าน กระบวนการบอโรดิง ที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง (ค) 6.25 ชั่วโมง และ (ง) 9 ชั่วโมง	28
17	โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอโรคาร์บอนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่าน กระบวนการบอโรดิงเป็นเวลา 9 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ (ก) 1123 เคลวิน (ข) 1173 เคลวิน (ค) 1223 เคลวิน และ (ง) 1273 เคลวิน	29
18	ความหนาของชั้นเคลือบบอโรคาร์บอนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการ บอโรดิงที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 - 1273 เคลวิน เป็นเวลา 1 - 9 ชั่วโมง	30
19	รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบบอโรคาร์บอนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่าน กระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง	31
20	โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอโรคาร์บอนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่าน กระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ด้วย (ก) ก้อนจุลทรรศน์แบบแสง และ (ข) ก้อนจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	31
21	รูปแบบ EDS ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่ อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ที่บริเวณ (ก) นิกเกิลสูง และ (ข) โครเมียมสูง	32
22	รอยกดจากการทดสอบความแข็งบริเวณชั้นเคลือบบอโรคาร์บอนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง จากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็กที่เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 (ก) ก่อนการกัดกรด และ (ข) หลังการกัดกรด	33
23	ค่าความแข็งบริเวณชั้นเคลือบบอโรคาร์บอนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่าน กระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง จากผิวเข้าไปใน เนื้อเหล็ก	34

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอโรคาร์บอนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิง ที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง (ค) 6.25 ชั่วโมง และ (ง) 9 ชั่วโมง	34
25	โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอโรคาร์บอนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงเป็นเวลา 9 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ (ก) 1123 เคลวิน (ข) 1173 เคลวิน (ค) 1223 เคลวิน และ (ง) 1273 เคลวิน	35
26	ความหนาของชั้นเคลือบบอโรคาร์บอนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิตั้งแต่ 1123 - 1273 เคลวิน เป็นเวลา 1 - 9 ชั่วโมง	36
27	รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบบอโรคาร์บอนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง	37
28	โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอโรคาร์บอนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ด้วย (ก) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง และ (ข) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	37
29	รูปแบบ EDS ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ที่บริเวณ (ก) นิกเกิลสูง และ (ข) โครเมียมสูง	38
30	รอยกดจากการทดสอบความแข็งบริเวณชั้นเคลือบบอโรคาร์บอนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง จากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็กที่เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 (ก) ก่อนการกัดกรด และ (ข) หลังการกัดกรด	38
31	ค่าความแข็งบริเวณชั้นเคลือบบอโรคาร์บอนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง จากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็ก	39

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
32	โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบของโรัดบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการอบโรัดที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง (ค) 6.25 ชั่วโมง และ (ง) 9 ชั่วโมง	40
33	โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบของโรัดบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการอบโรัดเป็นเวลา 9 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ (ก) 1123 เคลวิน (ข) 1173 เคลวิน (ค) 1223 เคลวิน และ (ง) 1273 เคลวิน	41
34	ความหนาของชั้นเคลือบของโรัดบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการอบโรัดที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 - 1273 เคลวิน เป็นเวลา 1 - 9 ชั่วโมง	42
35	รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบของโรัดบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการอบโรัดที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง	42
36	โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบของโรัดบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการอบโรัดที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ด้วย (ก) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง และ (ข) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	43
37	รูปแบบ EDS ของเหล็กกล้าไร้สนิม 440C ที่ผ่านกระบวนการอบโรัดที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ที่บริเวณ (ก) นิกเกิลสูง และ (ข) โครเมียมสูง	43
38	รอยกดจากการทดสอบความแข็งบริเวณชั้นเคลือบของโรัดบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการอบโรัดที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง จากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็กที่เหล็กกล้าไร้สนิม 440C (ก) ก่อนการกัดกรด และ (ข) หลังการกัดกรด	44
39	ค่าความแข็งบริเวณชั้นเคลือบของโรัดบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการอบโรัดที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง จากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็ก	45

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
40	โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอโรด์ที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงบนเหล็กกล้าไร้สนิม (ก) AISI 304 (ข) AISI 420 และ (ค) AISI 440C	47
41	ความแข็งบริเวณชั้นเคลือบบอโรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นระยะเวลา 9 ชั่วโมง	48
42	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบบอโรด์และรากที่สองของเวลาที่ใช้ในการเคลือบบอโรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 - 1273 เคลวิน	51
43	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบบอโรด์และรากที่สองของเวลาที่ใช้ในการเคลือบบอโรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 - 1273 เคลวิน	52
44	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบบอโรด์และรากที่สองของเวลาที่ใช้ในการเคลือบบอโรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 - 1273 เคลวิน	53
45	ความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ($\ln K$) และส่วนกลับของอุณหภูมิ ($1/T$) ที่ใช้ในกระบวนการเคลือบบอโรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304	55
46	ความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ($\ln K$) และส่วนกลับของอุณหภูมิ ($1/T$) ที่ใช้ในกระบวนการเคลือบบอโรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420	55
47	ความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ($\ln K$) และส่วนกลับของอุณหภูมิ ($1/T$) ที่ใช้ในกระบวนการเคลือบบอโรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C	56

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า	
ก10	โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบของโรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการอบโรดิงที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง (ค) 6.25 ชั่วโมง และ (ง) 9 ชั่วโมง	74
ก11	โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบของโรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการอบโรดิงที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง (ค) 6.25 ชั่วโมง และ (ง) 9 ชั่วโมง	75
ก12	โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบของโรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการอบโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง (ค) 6.25 ชั่วโมง และ (ง) 9 ชั่วโมง	76
ข1	รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบของโรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการอบโรดิงที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	78
ข2	รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบของโรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการอบโรดิงที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง	78
ข3	รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบของโรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการอบโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	79
ข4	รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบของโรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการอบโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง	79
ข5	รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบของโรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการอบโรดิงที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	80
ข6	รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบของโรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการอบโรดิงที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง	80
ข7	รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบของโรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการอบโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	81
ข8	รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบของโรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการอบโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง	81
ข9	รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบของโรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการอบโรดิงที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	82

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า	
ข10	รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบบอโรคาร์บอนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิ้งที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง	82
ข11	รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบบอโรคาร์บอนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิ้งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	83
ข12	รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบบอโรคาร์บอนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิ้งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง	83
ข 13	ข้อมูล Diffractogram ของ Fe ₂ B	84
ข 14	ข้อมูล Diffractogram ของ FeB	84
ค 1	โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอโรคาร์บอนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิ้งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	86
ค2	รูปแบบ EDS บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิ้งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 1 ในภาพผนวกที่ ค1	87
ค3	รูปแบบ EDS บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิ้งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 2 ในภาพผนวกที่ ค1	88
ค4	รูปแบบ EDS บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิ้งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 3 ในภาพผนวกที่ ค1	89
ค5	รูปแบบ EDS บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิ้งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 4 ในภาพผนวกที่ ค1	90
ค6	รูปแบบ EDS บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิ้งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 5 ในภาพผนวกที่ ค1	91
ค7	โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอโรคาร์บอนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิ้งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	92
ค8	รูปแบบ EDS บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิ้งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 1 ในภาพผนวกที่ ค7	93

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ค9 รูปแบบ EDS บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 2 ในภาพผนวกที่ ค7	94
ค10 รูปแบบ EDS บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 3 ในภาพผนวกที่ ค7	95
ค11 รูปแบบ EDS บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 4 ในภาพผนวกที่ ค7	96
ค12 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอโรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	97
ค13 รูปแบบ EDS บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 1 ในภาพผนวกที่ ค12	98
ค14 รูปแบบ EDS บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 2 ในภาพผนวกที่ ค12	99
ค15 รูปแบบ EDS บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 3 ในภาพผนวกที่ ค12	100
ค16 รูปแบบ EDS บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 4 ในภาพผนวกที่ ค12	101
ฉ1 ผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ก่อนและหลังกระบวนการบอโรดิง ที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา (ก) ก่อนกระบวนการบอโรดิง (ข) 1 ชั่วโมง (ค) 4 ชั่วโมง (ง) 6.25 ชั่วโมง (ง) 9 ชั่วโมง	111
ฉ2 ผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ก่อนและหลังกระบวนการบอโรดิง ที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา (ก) ก่อนกระบวนการบอโรดิง (ข) 1 ชั่วโมง (ค) 4 ชั่วโมง (ง) 6.25 ชั่วโมง (ง) 9 ชั่วโมง	111
ฉ3 ผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ก่อนและหลังกระบวนการบอโรดิง ที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา (ก) ก่อนกระบวนการบอโรดิง (ข) 1 ชั่วโมง (ค) 4 ชั่วโมง (ง) 6.25 ชั่วโมง (ง) 9 ชั่วโมง	111

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

K	=	เคลวิน
°C	=	องศาเซลเซียส
HV	=	Hardness of vicker
d	=	ความหนาของชั้นเคลือบ (ไมโครเมตร)
t	=	เวลาในการแพร่ (วินาที)
K	=	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึม (ตารางเมตร/วินาที)
K_0	=	ค่าคงที่สัมประสิทธิ์การแพร่ซึม (ตารางเมตร/วินาที)
Q	=	พลังงานกระตุ้น (กิโลจูล/โมล)
R	=	ค่าคงที่ของก๊าซ (จูล/โมล·เคลวิน)
T	=	อุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบ (เคลวิน)

จลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอไรดิ้งบนเหล็กกล้าไร้สนิม

AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C

Kinetics of Boriding Process on Stainless Steels

AISI 304 AISI 420 and AISI 440C

คำนำ

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) เป็นเหล็กอัลลอยด์ที่มีสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่าเหล็กทั่วไป จึงนิยมนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายทั้งในงานก่อสร้าง อุตสาหกรรม หรือแม้กระทั่งด้านการแพทย์ ในปัจจุบันการใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิมส่วนใหญ่มีความซับซ้อนและต้องรับภาระทางกลสูงขึ้น แม้ว่าเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีสมบัติการต้านทานต่อการกัดกร่อนที่สูงกว่าเหล็กทั่วไป แต่ก็ยังคงประสบปัญหาการใช้งาน ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งคือการสึกหรอของชิ้นงาน ทำให้อายุการใช้งานสั้นและสร้างความเสียหายให้กับงาน อีกทั้งสิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่ายเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะเหล็กกล้าไร้สนิมในกลุ่มออสเทนนิติกซึ่งเป็นที่นิยมนำมาใช้งานกันมากถึง 70 เปอร์เซ็นต์ของเหล็กกล้าไร้สนิมที่นำมาใช้งานทั้งหมด และเหล็กกล้าไร้สนิมในกลุ่มมาเทนซิติกซึ่งลักษณะการนำไปใช้งานนั้นเน้นไปในงานที่ต้องรับภาระทางกลค่อนข้างสูง เช่น วาล์ว หัวฉีดเตา แม่พิมพ์ หรืออุปกรณ์การตัด (Harry, 1995) ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมให้มีสมบัติที่ดีขึ้น การปรับปรุงเพื่อเพิ่มความแข็ง (Hardness) ความต้านทานต่อการสึกหรอ (Wear resistance) และความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation resistance) ส่งผลให้เหล็กกล้าไร้สนิมสามารถใช้งานได้เหมาะสม มีประสิทธิภาพสูง และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

กระบวนการบอไรดิ้ง (Boriding) หรือ โบรอนไนซิง (Boronizing) เป็นกระบวนการปรับปรุงสมบัติของพื้นผิวเหล็กด้วยกระบวนการทางเคมี - ความร้อน โดยการแพร่อะตอมของธาตุโบรอน (B) เข้าสู่ผิวของเหล็กและเกิดเป็นสารประกอบบอไรด์ขึ้น ซึ่งสารประกอบบอไรด์ที่ได้นั้นมีความแข็งแรงสูง มีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ และทนต่อการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง โดยชั้นความหนาของสารประกอบบอไรด์ที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของเหล็ก ความเข้มข้นของอะตอมโบรอนภายในเตา อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการเคลือบตามทฤษฎีการแพร่ของอะตอมในสภาวะของแข็ง การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการบอไรดิ้งเป็นปัจจัยสำคัญใน

การเพิ่มความหนาของชั้นเคลือบบอโรไซด์ (Sinha and Bohn, 1994) และจากหลักการของ จลนพลศาสตร์ตามสมการการแพร่และสมการ Arrhenius สามารถคำนวณค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy) ของกระบวนการบอโรดิ้ง (Yoon *et al.*, 1999) จากสมการและค่าตัวแปรตั้งที่ กล่าวมานั้น สามารถนำมาสร้างสมการทั่วไปที่ใช้ทำนายค่าความหนาของชั้นเคลือบบอโรไซด์ ซึ่งเป็น สมการที่มีประโยชน์มากในทางปฏิบัติและสามารถนำไปใช้ได้จริงในอุตสาหกรรมเมื่อเราทราบค่า พลังงานกระตุ้นและค่าคงที่จากการทดลอง

ดังนั้นงานวิจัยนี้ศึกษาการเกิดชั้นเคลือบบอโรไซด์บนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ด้วยกระบวนการบอโรดิ้งแบบอ่างเกลือ ศึกษาที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ เพื่อ หาพฤติกรรมความแตกต่างของชั้นเคลือบบอโรไซด์ที่เกิดขึ้น ศึกษาอิทธิพลของธาตุผสมในเหล็กกล้า ไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ที่ส่งผลต่อการเกิดชั้นเคลือบบอโรไซด์ และหา ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบบอโรไซด์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเคลือบ รวมทั้งค่าพลังงานกระตุ้นของกระบวนการบอโรดิ้งบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ตามหลักการของจลนพลศาสตร์ ซึ่งสุดท้ายเราสามารถนำค่าตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากการ ทดลองนำมาสร้างสมการทั่วไปที่ใช้ทำนายค่าความหนาของชั้นเคลือบบอโรไซด์ซึ่งสามารถนำไปใช้ ได้ในอุตสาหกรรมต่อไป

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาอิทธิพลของเวลาและอุณหภูมิที่ส่งผลต่อชั้นเคลือบในกระบวนการบอโรดิงแบบอ่างเกลือบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C

2. ศึกษาอิทธิพลของธาตุผสมในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ที่ส่งผลต่อการเกิดชั้นเคลือบบอโรดิงในกระบวนการบอโรดิงแบบอ่างเกลือ

3. ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ด้วยกระบวนการบอโรดิงแบบอ่างเกลือ เพื่อเพิ่มความแข็งและความต้านทานต่อการสึกหรอให้กับผิวเหล็ก ซึ่งเป็นการยืดอายุการใช้งานให้กับชิ้นงาน

การตรวจเอกสาร

1. เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel)

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) เป็นเหล็กอัลลอยด์ที่มีสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนได้สูงกว่าเหล็กทั่วไป เป็นที่นิยมนำไปใช้งานกันอย่างแพร่หลายทั้งในงานก่อสร้าง อุตสาหกรรม หรือแม้กระทั่งด้านการแพทย์ เหล็กกล้าไร้สนิมนอกจากธาตุเหล็ก (Fe) ที่เป็นธาตุหลักและธาตุผสมอื่นๆ เช่น คาร์บอน (C) แมงกานีส (Mn) ฟอสฟอรัส (P) และกำมะถัน (S) แล้วยังมีการเติมธาตุผสมบางชนิด เช่น โครเมียม (Cr) นิกเกิล (Ni) และ/หรือ วานาเดียม (V) ลงไป เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลและการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม โดยธาตุผสมหลักที่มีการเติมลงในเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อปรับปรุงสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนคือ โครเมียม โครเมียมจะถูกเติมในปริมาณ 10 - 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งโครเมียมในเหล็กกล้าไร้สนิมส่งผลให้เหล็กกล้าไร้สนิมมีสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เมื่อเหล็กกล้าไร้สนิมสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ โครเมียมในเหล็กกล้าไร้สนิมจะเกิดเป็นฟิล์มโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) เคลือบที่ผิวทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมยากที่จะเกิดสนิม นอกจากนี้การเติมธาตุผสมนั้นยังส่งผลต่อโครงสร้างผลึก ซึ่งมีผลต่อสมบัติทางกลของเหล็ก เช่น การต้านทานแรงดึง การยึด ความแข็ง และความเหนียว โดยสิ่งสำคัญที่ทำให้โครงสร้างผลึกของเหล็กมีความแตกต่างกันคือ ลักษณะของแลตทิซ เฟสทรานซิชัน (Phase transition) และองค์ประกอบทางเคมี โดยการเติมโครเมียมทำให้โครงสร้างผลึกเป็นเฟอร์ไรต์ หรือก็คือ โครงสร้างผลึกแบบบอดี - เซ็นเตอร์ - คิวบิก (Body - center - cubic, BCC) และนิกเกิลทำให้โครงสร้างผลึกเป็นออสเทนไนต์ หรือก็คือ โครงสร้างผลึกแบบเฟซ - เซ็นเตอร์ - คิวบิก (Faced - center - cubic, FCC) แต่อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิช่วง 910 - 1400 องศาเซลเซียส โครงสร้างแลตทิซในเหล็กกล้าไร้สนิมนั้นจะเปลี่ยนเป็นแบบ เฟส - เซ็นเตอร์ - คิวบิก ทั้งหมด (Bhadeshia and Honeycombe, 2006)

โดยทั่วไป เหล็กกล้าไร้สนิมสามารถแบ่งออกได้ 5 ประเภท ได้แก่ กลุ่มออสเทนนิติก (Austenitic) กลุ่มมาร์เทนซิติก (Martensitic) กลุ่มเฟอร์ริติก (Ferritic) กลุ่มดูเพล็กซ์ (Duplex) และกลุ่มเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกผลึก (Precipitation hardening) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาใน 2 กลุ่มแรก จึงขอกล่าวถึงเพียงกลุ่มออสเทนนิติกและกลุ่มมาร์เทนซิติกเท่านั้น

1.1 กลุ่มออสเทนนิติก (Austenitic)

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกจัดอยู่ในอนุกรม 2xx และ 3xx เป็นกลุ่มที่มีการใช้งานแพร่หลายมากที่สุดถึง 70 เปอร์เซ็นต์ของเหล็กกล้าไร้สนิมที่นำมาใช้งานทั้งหมด โดยเหล็กในกลุ่มนี้เป็นเหล็กที่มีธาตุโครเมียม - นิกเกิล และ โครเมียม - แมงกานีส - นิกเกิล เป็นธาตุผสมหลัก มีปริมาณของธาตุคาร์บอนไม่เกิน 0.15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เช่น AISI 201 AISI 304 และ AISI 316 ธาตุ นิกเกิล และ แมงกานีส จะทำให้เหล็กมีโครงสร้างเป็นออสเทนไนท์ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเฟส - เซ็นเตอร์ - คิวบิก (Faced - center - cubic, FCC) มีสมบัติที่แม่เหล็กดูไม่ติด (Non - magnetic) ไม่สามารถเพิ่มความแข็งได้ด้วยกระบวนการทางความร้อน มีสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนสูง เหมาะสำหรับการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับความสะอาดและสุขอนามัย มีสมบัติในการทนทานการกัดกร่อนสูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมในกลุ่มมาร์เทนซิติก แต่อย่างไรก็ตาม หากเหล็กกล้าไร้สนิมในกลุ่มออสเทนนิติกถูกเชื่อมด้วยอุณหภูมิสูงและปล่อยให้เย็นตัวลงอย่างช้าๆ อาจทำให้เกิดการกัดกร่อนที่บริเวณขอบเกรน (Intergranular corrosion) เนื่องจากคาร์ไบด์ที่มีโครเมียมอยู่เกิดการตกตะกอนที่บริเวณขอบเกรน โดยสามารถลดปัญหานี้ได้โดยการลดปริมาณคาร์บอน ซึ่งให้มีได้ไม่เกิน 0.03 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หรือโดยการเติมธาตุผสมบางชนิด เช่น โคบอลต์ เพื่อไปรวมกับคาร์บอนในเหล็ก (แม้น, 2546) นอกจากนี้เหล็กกล้าไร้สนิมในกลุ่มนี้ยังมีสัมประสิทธิ์การยึดตัวสูง ขึ้นรูปได้ง่าย อีกทั้งยังสามารถใช้งานได้ที่ทั้งอุณหภูมิต่ำและสูงจนถึง 650 องศาเซลเซียส (Chandler, 1995)

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304

เหล็ก	ความต้านทานแรงดึง (MPa)	เปอร์เซ็นต์การยืด (%Elongation)	ความแข็ง	
			HB	HRB
AISI 304	515	40	201	92

ที่มา: Masteel (2552)

1.2 กลุ่มมาร์เทนซิติก (Martensitic)

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติก มีส่วนผสมของโครเมียม 12 - 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ปานกลาง มีนิกเกิล 0 - 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนปานกลาง ซึ่งสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมในกลุ่ม

มาร์เทนซิติคั้นน้อยกว่าในเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก แต่สามารถปรับความแข็งได้ด้วยกระบวนการทางความร้อน โดยการให้ความร้อนเปลี่ยนโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) ทำให้เกิดโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ สามารถพัฒนาปรับปรุงให้มีความแข็งแรงและปรับระดับความแข็งได้ อีกทั้งยังสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 593 องศาเซลเซียส จึงนิยมนำมาใช้งานในการผลิตเครื่องตัด อุตสาหกรรมเครื่องบินและงานวิศวกรรมทั่วไป

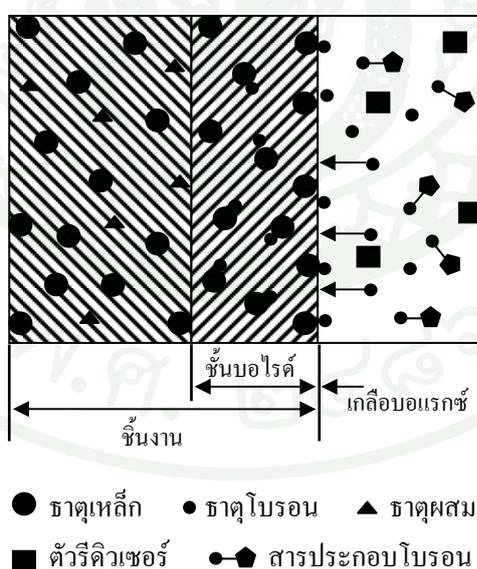
เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่ม AISI 420 จัดเป็นทั้งเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มงานแม่พิมพ์ พลาสติกและเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติค ซึ่งมีความต้านทานแรงดึงสูง มีสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนที่ดี เหมาะสำหรับงานแม่พิมพ์พลาสติกที่มีสภาวะการกัดกร่อนเกิดขึ้น เพลลา สกรู มีด และชิ้นส่วนอะไหล่ที่ต้องการความแข็งแรงสูง สามารถทำการชุบแข็งเพื่อเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงได้จึงทนต่อการสึกหรอได้ดี สามารถชุบแข็งที่อุณหภูมิ 980 - 1050 องศาเซลเซียส ชุบด้วยน้ำหรือน้ำมันให้มีความแข็งสูงได้ถึง 56 HRC (Chandler, 1995)

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่ม AISI 440C เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติคที่สามารถชุบแข็งให้ได้ค่าความแข็งสูงสุดในกลุ่ม มีสมบัติการต้านทานการเสียดสีสูงที่สุด การต้านทานแรงดึงสูง และการต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ดี เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความแข็งและการต้านทานต่อการสึกหรอสูงร่วมกับความต้านทานต่อการกัดกร่อน เช่น แม่พิมพ์ เพลลา สกรู มีด และชิ้นส่วนอะไหล่ที่ต้องเสียดสีสูง สามารถทำการชุบแข็งเพื่อเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงได้จึงมีความต้านทานการสึกหรอที่ดี สามารถชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1010 - 1065 องศาเซลเซียส ชุบด้วยน้ำหรือน้ำมันให้มีความแข็งสูงได้ถึง 60 - 62 HRC (Chandler, 1995)

เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นเหล็กอัลลอยด์ที่มีสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่าเหล็กทั่วไป จึงนิยมนำไปใช้งานกันอย่างแพร่หลายทั้งในงานก่อสร้างและอุตสาหกรรมหรือแม้กระทั่งด้านการแพทย์ อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้งานเหล็กนั้น นอกจากสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กแล้ว ยังต้องคำนึงถึงสมบัติทางกลของเหล็กอีกด้วย การต้านทานการสึกหรอจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น เนื่องจากการใช้งานในปัจจุบันนั้นมีความซับซ้อนและยังต้องรับภาระทางกลที่สูง ดังนั้นจึงนำกระบวนการปรับปรุงผิวโดยกระบวนการเคมี - ความร้อนมาปรับปรุงสมบัติของผิวเหล็ก เช่น กระบวนการบอโรไดมิง ไนตรายดิง และคาร์บูไรซิงเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม เพื่อให้ชิ้นงานสามารถทนทานต่อการสึกหรอ เพิ่มความแข็ง และยืดอายุการใช้งานของเหล็กกล้าไร้สนิมให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กระบวนการบอโรไดมิง ซึ่งสามารถให้ชั้นเคลือบบอโรไดมิงที่มีสมบัติในหลายๆ ด้านดีกว่าชั้นเคลือบจากกระบวนการคาร์บูไรซิงและไนตรายดิง

2. กระบวนการบอโรดิง (Boriding)

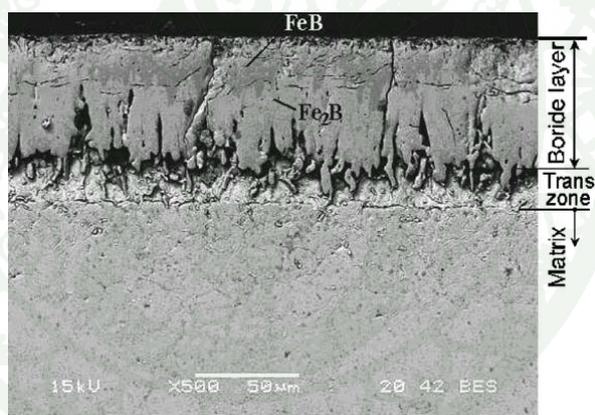
กระบวนการบอโรดิง (Boriding) หรือกระบวนการโบรอนไนซิง (Boronizing) เป็นกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกระบวนการทางเคมี - ความร้อน (Thermo - chemical surface treatment) เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความแข็ง (Hardness) การต้านทานการสึกหรอ (Wear resistance) และการต้านทานการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation resistance) ซึ่งกระบวนการบอโรดิงสามารถทำได้หลากหลายวิธี เช่น บอโรดิงแบบอ่างเกลือ (Salt bath) บอโรดิงโดยเทคนิคการเคลือบด้วยไอเคมี (Chemical vapor deposition, CVD) บอโรดิงแบบพลาสมา (Plasma) และบอโรดิงแบบแพค (Pack boriding) โดยการใช้อ่างเกลือเป็นกรรมวิธีหนึ่งในกระบวนการบอโรดิง ซึ่งจะกระทำในอ่างเกลือที่ประกอบด้วยบอแรกซ์หลอมเหลว ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) และตัวรีดิวเซอร์ ตัวรีดิวเซอร์มีหน้าที่ไปรีดิวซ์สารประกอบของโบรอนที่อยู่ในรูป B_2O_3 ทำให้เกิดอะตอมโบรอนอิสระกระจายอยู่ในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลว และอาศัยการแพร่ของอะตอมของธาตุโบรอน (B) ที่มีขนาดเล็กเคลื่อนที่แพร่ซึมเข้าไปในช่องว่างของเหล็ก แล้วรวมตัวกับอะตอมของธาตุเหล็ก (Fe) ที่ผิวของชิ้นงานเกิดเป็นชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ (FeB และ Fe_2B) ขึ้น (Child *et al.*, 1985) ดังภาพที่ 1 แสดงกลไกของการเกิดชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ด้วยกระบวนการบอโรดิงแบบอ่างเกลือ



ภาพที่ 1 กลไกของการเกิดชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ด้วยกระบวนการบอโรดิงแบบอ่างเกลือ

ที่มา: ณัฐธิดา (2551)

ทำงานร้อน H13 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงที่ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 3 ชั่วโมง วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งการเกิดขึ้นเคลือบบอไรด์นั้นความหนาและชนิดของชั้นเคลือบเฟสเดียวหรือเฟสคู่ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของการจัดเรียงตัวของอะตอมโบรอน นั่นคือองค์ประกอบทางเคมีของเหล็ก ความเข้มข้นของอะตอมโบรอนภายในเตา อุณหภูมิและเวลาที่ใช้สำหรับกระบวนการบอไรดิงแบบอังกะลิ โดยทั่วไปอุณหภูมิที่ใช้ในการแพร่อยู่ในช่วง 700 – 1000 องศาเซลเซียส ซึ่งชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ (FeB และ Fe_2B) มีสมบัติที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยเหล็กบอไรด์ในชั้นเคลือบที่เป็นชั้นของ FeB มีอัตราส่วนของปริมาณโบรอนสูง (Boron rich) ซึ่งมีสมบัติที่แข็งและเปราะทำให้ไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานเพราะอาจทำให้เกิดความเสียหายขึ้นได้ ในขณะที่เฟสของ Fe_2B ซึ่งมีความเหนียว มีความต้านทานต่อการขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal shock) และความล้า (Fatigue) มากกว่า (Sinha and Bohn, 1994) ชั้นเคลือบที่มีเพียงเฟสเดียวของ Fe_2B จึงเหมาะสมสำหรับนำไปใช้งานมากกว่าการเกิดขึ้นเคลือบเฟสคู่ซึ่งประกอบไปด้วย FeB และ Fe_2B



ภาพที่ 3 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงที่ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ที่มา: Genel (2005)

โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะ 2 แบบ คือลักษณะความหนาที่เรียบสม่ำเสมอและแบบฟันปลาขึ้นกับธาตุผสมภายในเหล็ก ดังภาพที่ 4 แสดงผลขององค์ประกอบทางเคมีของเหล็กต่อโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบบอไรด์ ซึ่งชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นในเหล็กบริสุทธิ์จะมีลักษณะแบบฟันปลา และชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นในเหล็กที่มีธาตุผสมสูงจะมีลักษณะความหนาที่เรียบสม่ำเสมอ เนื่องจากธาตุผสมในเหล็กเป็นตัวขัดขวางการแพร่ของอะตอมโบรอน

ตารางที่ 2 สมบัติทั่วไปของเหล็กบอไรด์ (FeB และ Fe₂B)

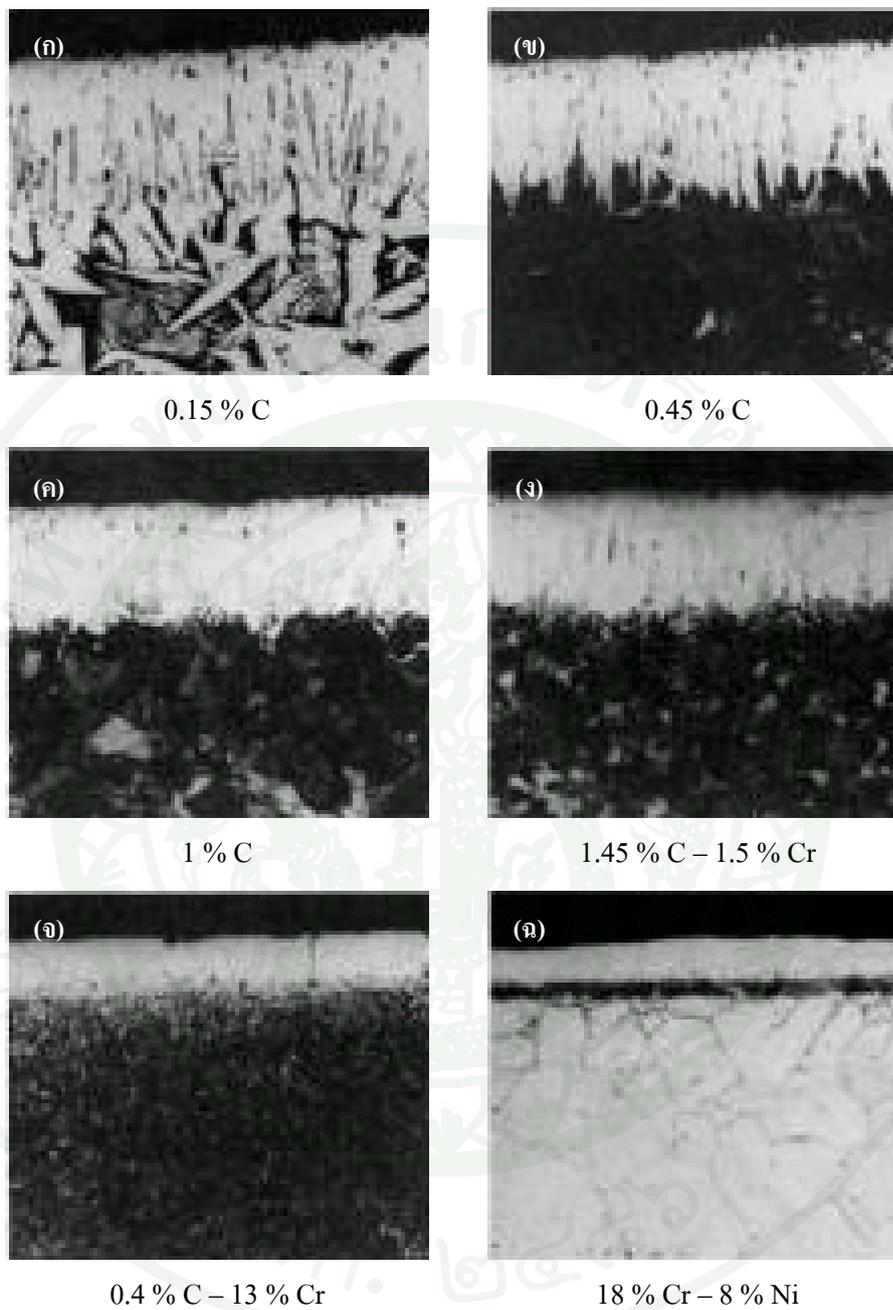
สมบัติ	FeB	Fe ₂ B
ค่าความแข็ง	1900 – 2100 HV	1800 – 2000 HV
ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น	590 GPa	285 – 295 GPa
ค่าความหนาแน่น	6.75 g/cm ³	7.43 g/cm ³
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว- เนื่องจากความร้อน	23 ppm/°C	7.65 – 9.2 ppm/°C
สัดส่วนของโบรอน	16.23% โดยน้ำหนัก	8.83 % โดยน้ำหนัก
โครงสร้างผลึก	Orthorhombic ซึ่งมี 4 อะตอม ของเหล็ก (Fe) และ 4 อะตอม ของโบรอนในยูนิตเซลล์	Body – center tetragonal มี 12 อะตอมต่อยูนิตเซลล์
ขนาดผลึก	a = 4.053 Å b = 5.495 Å c = 2.946 Å	a = 5.078 Å c = 4.249 Å

ที่มา: Sinha and Bohn (1994)

และเป็นตัวจำกัดความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ ส่งผลให้ในเหล็กที่มีธาตุผสมมากความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์จะลดลง ดังภาพที่ 5 แสดงผลของการเติมธาตุผสมในเหล็กต่อความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ โดยธาตุผสมที่เติมในเหล็กส่งผลต่อชั้นเคลือบบอไรด์ดังต่อไปนี้ (Davis , 2002)

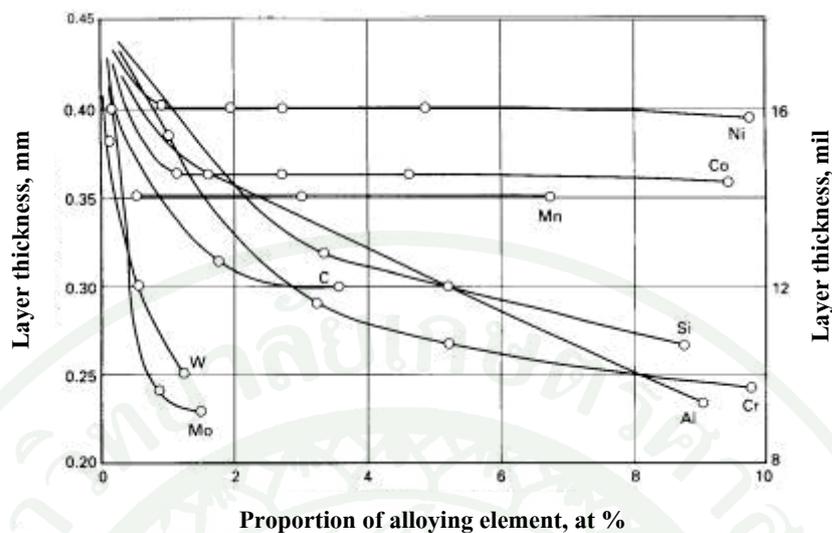
ก. คาร์บอน ในกระบวนการบอไรดิ้ง ธาตุคาร์บอนจะไม่สามารถละลายและแพร่ผ่านในชั้นเคลือบบอไรด์ไปได้ โดยคาร์บอนจะเคลื่อนที่จากบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์เข้าไปในเนื้อเหล็ก รวมตัวกับโบรอนได้เป็นบอโรซิเมนต์ไต์ (Borocementite) Fe₃(B₄C) (หรือ Fe₃(B_{0.67}C_{0.33}) ในกรณีเหล็ก Fe – 0.08 % C) อยู่ระหว่างชั้น Fe₂B และเนื้อเหล็ก

ข. ซิลิกอนและอลูมิเนียม คล้ายคลึงกับธาตุคาร์บอน นั่นคือธาตุซิลิกอนและอลูมิเนียม ไม่สามารถละลายได้ในชั้นเคลือบบอไรด์ โดยธาตุผสมเหล่านี้จะถูกโบรอนผลักดันจากผิวเคลื่อนเข้าไปในเนื้อเหล็กเกิดเป็นเหล็กซิลิโคบอไรด์ (Iron silicoborides) FeSi_{0.4}B_{0.6} และ Fe₅SiB₂ ได้ชั้น Fe₂B ซึ่งกระบวนการบอไรดิ้งไม่ควรนำมาใช้กับเหล็กที่มีสัดส่วนของธาตุผสมที่มีโครงสร้างเฟสไรต์สูง



ภาพที่ 4 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กที่ธาตุผสมต่างๆ

ที่มา: Davis (2002)



ภาพที่ 5 ผลของการเติมธาตุผสมในเหล็กต่อความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์

ที่มา: Davis (2002)

เนื่องจากธาตุผสมที่มีโครงสร้างเฟอไรต์อย่างธาตุซิลิกอนและอลูมิเนียมมีความแข็งที่ต่ำและทำให้สมบัติการต้านทานการสึกหรอของชั้นเคลือบบอไรด์ลดลง โดยโครงสร้างเฟอไรต์ที่นิ่มจะเกิดขึ้นบริเวณใต้ชั้นเคลือบบอไรด์ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้มีลักษณะเป็นแกนที่มีความดันสูงที่บริเวณผิวเรียกว่า เปลือกไข่ (Egg shell) นั่นคือที่ผิวของชิ้นงานจะเป็นชั้นเคลือบบอไรด์ที่แข็งและเปราะมาก ถัดเข้ามาจะเป็นบริเวณเฟอไรต์ที่มีความแข็งต่ำ ทำให้การใช้งานไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร

ค. นิกเกิล ธาตุนี้เกิดในเหล็กจะส่งผลให้โครงสร้างพื้นปลาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่เชื่อมกัน ให้ความหนาของชั้นเคลือบที่สม่ำเสมอและความหนาที่ลดลง โดยจะพบบริเวณที่มีนิกเกิลสูงได้ชั้น Fe_2B และในบางกรณีอาจเกิดการตกผลึกของ Ni_3B ในชั้น FeB ซึ่งบริเวณที่มีนิกเกิลสูงนั้นจะมีสมบัติที่แตกต่างจากชั้นเคลือบบอไรด์และจะปรากฏในกระบวนการบอไรดิงบนเหล็กที่มีนิกเกิลสูงอย่างเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิค

ง. โครเมียม เมื่อพิจารณาโครงสร้างและสมบัติของเหล็กบอไรด์ พบว่าปริมาณธาตุโครเมียมในเนื้อเหล็กนั้นส่งผลต่อปฏิกิริยาการรวมตัวของโบรอน ทำให้ชั้นเคลือบบอไรด์มีลักษณะความหนาที่เรียบและสม่ำเสมอและได้ความหนาของชั้นเคลือบที่ลดลง โดยความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่ได้นั้นจะยิ่งลดลงตามปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย

จ. ทังสเดน โมลิบดีนัม และวานาเดียม ธาตุผสมเหล่านี้จะส่งผลให้ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ลดลงและโครงสร้างจุลภาคจะมีลักษณะเป็นฟีนปลาในเหล็กกล้าคาร์บอน

กระบวนการบอไรดิ้งเป็นกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวทางเคมี – ความร้อนซึ่งให้ชั้นเคลือบที่มีสมบัติดีกว่ากระบวนการปรับปรุงผิวกรรมวิธีอื่น เช่น กระบวนการคาร์บูไรซิง ไนไตรดิ้ง และการอบชุบแข็ง โดยชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่ได้จากกระบวนการบอไรดิ้งบนเหล็กมีค่าความแข็งดังตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบความแข็งของชั้นเคลือบบอไรด์และกระบวนการปรับปรุงความแข็งอื่นๆ โดยข้อดีของชั้นเหล็กเคลือบเหล็กบอไรด์ (FeB และ Fe_2B) ที่ได้จากกระบวนการบอไรดิ้งบนเหล็ก มีดังนี้ (Sinha and Bohn, 1994)

ก. เพิ่มสมบัติการต้านทานการสึกหรอ มีความแข็งสูงถึงประมาณ 1800 – 2100 HV และมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ

ข. มีจุดหลอมเหลวสูงถึงประมาณ 1390 องศาเซลเซียส และสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 850 องศาเซลเซียส

ค. สามารถปรับปรุงสมบัติให้กับเหล็กได้หลากหลาย

ง. ทนต่อการกัดกร่อนทั้งจากสารเคมีและสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในโรงงานอุตสาหกรรม

จ. ด้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงและทนต่อการทำปฏิกิริยากับเหล็กหลอมเหลว

ฉ. ช่วยเพิ่มความทนทานต่อความล้า (Fatigue) และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งาน

แต่อย่างไรก็ตาม ในกระบวนการบอไรดิ้งก็ยังคงมีข้อจำกัดของกระบวนการ ดังต่อไปนี้ (Sinha and Bohn, 1994)

ก. ความซับซ้อนในกระบวนการบอไรดิ้งซึ่งมีมากกว่ากระบวนการเคลือบอื่น แต่สมบัติของชั้นเคลือบที่ได้นั้นก็มีความคุ้มค่า

ข. ความหนาของชั้นเคลือบที่ได้จะจำกัดอยู่ที่เพียง 5 – 25 เปอร์เซ็นต์ของขนาดของชิ้นงาน

ค. ชั้นเคลือบที่ได้อาจเกิดการแตกร้าว

ง. มีขีดจำกัดในการเพิ่มความถี่ในการคดงอ (Bending)

จ. การออกแบบชิ้นงานที่มีความซับซ้อน เช่น เกลียวหรือฟันเฟือง จะได้ชิ้นงานที่มีสมบัติทางกลไม่สม่ำเสมอทุกทิศทาง

ฉ. เพื่อเพิ่มความสมบูรณ์ให้กับผิวเคลือบ จำเป็นต้องนำชิ้นงานไปผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังจากกระบวนการบอโรไดงอีกชั้นตอนหนึ่ง

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบความแข็งของเหล็กที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงผิวต่างๆ

วัสดุ	ค่าความแข็ง (HV)
เหล็กเหนียวผ่านกระบวนการบอโรไดง	1600
เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 ผ่านกระบวนการบอโรไดง	1800
เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น A2 ผ่านกระบวนการบอโรไดง	1900
เหล็กมาร์เทนไซต์	900
เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 ผ่านกระบวนการชุบแข็ง	540 - 600
เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น A2 ผ่านกระบวนการชุบแข็ง	630 - 700
เหล็กไฮสปีด BM42	900 - 910
เหล็กผ่านกระบวนการไนไตรไดง	650 - 950
เหล็กอัลลอยด์ต่ำ ผ่านกระบวนการคาร์บูไรซิง	1000 - 1200
เหล็กชุบโครเมียม	1600

ที่มา: Davis (2002)

กระบวนการบอโรไดงเป็นกระบวนการปรับปรุงสมบัติของพื้นผิวเหล็กทำให้พื้นผิวของเหล็กมีความแข็งเพิ่มขึ้นนับเป็นการยืดอายุการใช้งานให้กับเหล็กอย่างเหล็กกล้าไร้สนิม โดยในกระบวนการบอโรไดง การทำนายความหนาของชั้นเคลือบบอโรไดงจากอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการบอโรไดงนั้นมีความสำคัญและเป็นประโยชน์อย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งต่อการใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากการ

ทำนายความหนาของชั้นเคลือบทำให้สามารถกำหนดเงื่อนไขอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการสร้างชั้นเคลือบให้ได้ความหนาที่ต้องการ ส่งผลถึงการประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการผลิต

3. จลนพลศาสตร์

ในกระบวนการบอโรดิง ความหนาของชั้นเคลือบบอโรด์ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของการจัดเรียงตัวของอะตอมโบรอนอย่างองค์ประกอบทางเคมีของเหล็ก ความเข้มข้นของอะตอมโบรอนภายในเตา อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเคลือบเหล็กบอโรด์ (Sinha and Bohn, 1994) โดยชั้นเคลือบบอโรด์มีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเคลือบสูงขึ้นตามหลักของจลนพลศาสตร์ ซึ่งจากกระบวนการบอโรดิง พบว่าเวลาที่ใช้ในการเคลือบส่งผลต่อความหนาของชั้นเคลือบบอโรด์ ดังแสดงในภาพที่ 6 (ก) โดยเวลาที่ใช้ในการเคลือบและความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอโรด์มีความสัมพันธ์กันแบบพาราโบลา และเมื่อนำความหนาของชั้นเคลือบยกกำลังสองพบว่าความหนาของชั้นเคลือบบอโรด์ยกกำลังสองแปรผันตรงตามเวลาที่ใช้ในการเคลือบซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีการแพร่ ดังแสดงในภาพที่ 6 (ข) ซึ่งสอดคล้องกับสมการการแพร่ ดังแสดงในสมการ (1)

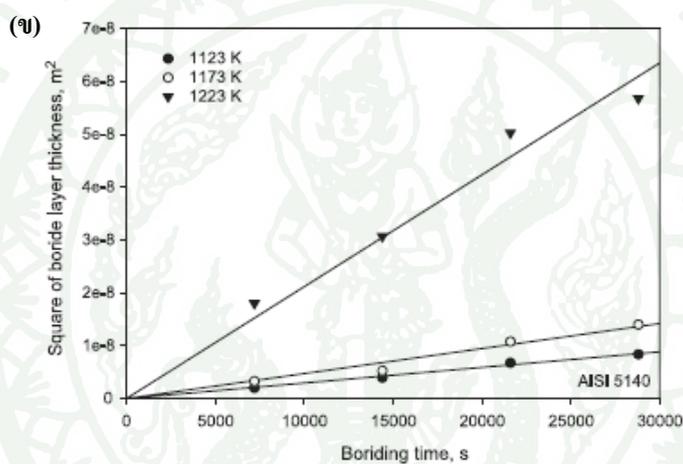
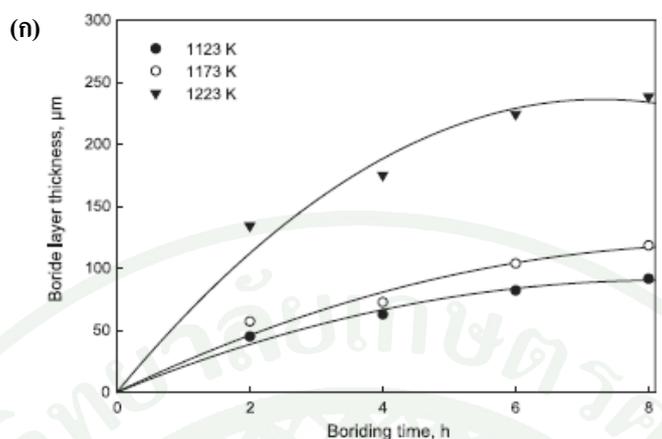
$$K = \frac{d^2}{t} \quad (1)$$

เมื่อ d คือ ความหนาของชั้นเคลือบ (เมตร)

และ K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (ตารางเมตร/วินาที)

เมื่อพิจารณาสมการการแพร่ซึ่งในสมการ (1) เทียบกับสมการเส้นตรง พบว่ามีความสอดคล้องกัน และสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (K) ได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบบอโรด์ยกกำลังสองและเวลาที่ใช้ในการเคลือบ นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (K) ยังมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ (T) และพลังงานกระตุ้น (Activation energy, Q) เป็นไปตามหลักของจลนพลศาสตร์ ซึ่งสอดคล้องกับสมการ Arrhenius ดังแสดงในสมการ (2)

$$K = K_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$



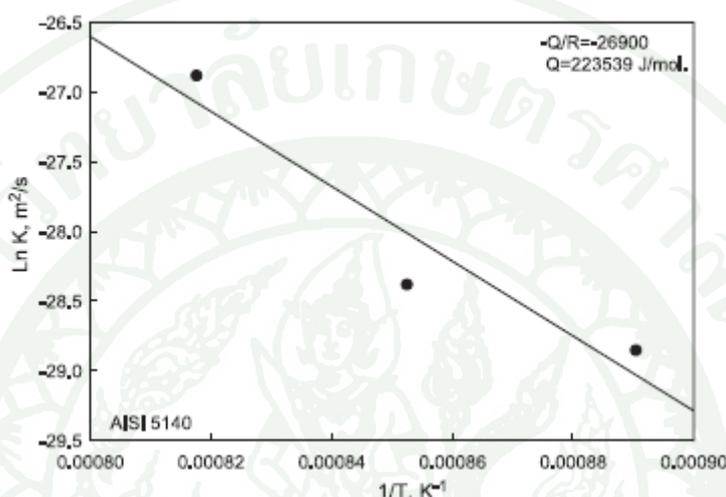
ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ค่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรต์กับเวลาที่ใช้ในการเคลือบที่อุณหภูมิต่างกัน (ข) ค่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรต์ยกกำลังสองกับเวลาที่ใช้ในการเคลือบ

ที่มา: Saduman *et al.* (2004)

จากสมการ (2) สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังสมการ (3)

$$\ln K = \ln K_0 - \frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T} \right) \quad (3)$$

- เมื่อ K_0 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ (ตารางเมตร/วินาที)
 Q คือ ค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy) (จูล/โมล)
 T คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบ (เคลวิน)
 และ R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ มีค่าเท่ากับ 8.3143 จูล/โมล·เคลวิน



ภาพที่ 7 อัตราการเปลี่ยนแปลงคงที่กับอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการบอโรไดง

ที่มา: Saduman *et al.* (2004)

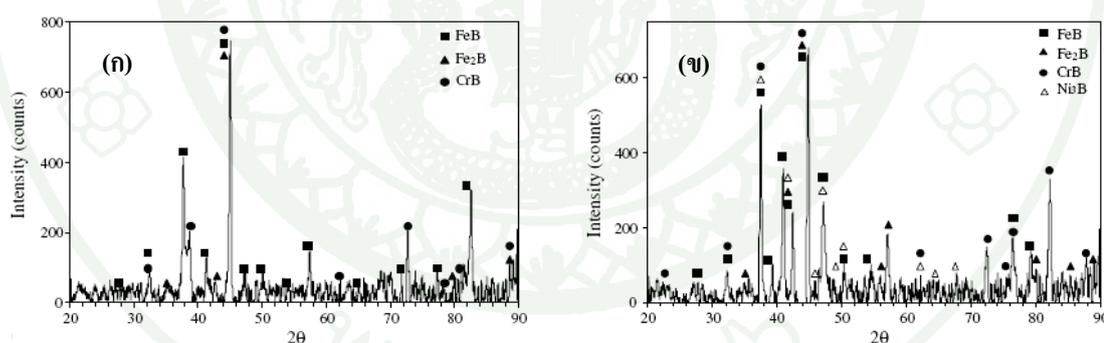
จากสมการ (3) จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกับสมการเส้นตรง ดังนั้นสามารถคำนวณค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy) (Q) และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ (K_0) ของอะตอมโบรอนของชั้นเคลือบบอโรได้ได้จากค่าความชันและจุดตัดแกนของกราฟเส้นตรงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ($\ln K$) และส่วนกลับของอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบ ($1/T$) ดังแสดงในภาพที่ 7 โดยค่าพลังงานกระตุ้นและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ที่ได้จากกราฟสามารถสร้างสมการทั่วไปที่ใช้ในการทำนายความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอโรด์บนผิวเหล็กได้จากหลักจลนพลศาสตร์ ดังสมการ (4) (Saduman *et al.*, 2004)

$$d = a \sqrt{te^{\frac{Q}{RT}}} \quad (4)$$

เมื่อ a คือ รากที่สองของสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ (ตารางเมตร/วินาที)^{1/2}

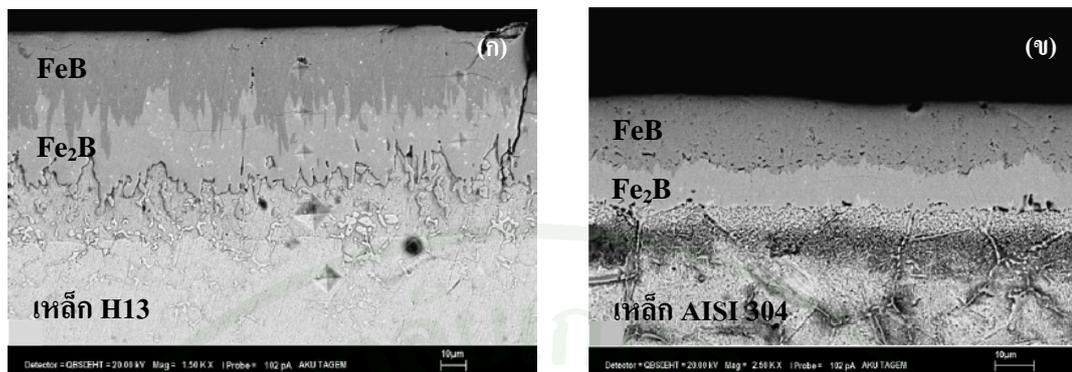
4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Taktak (2007) ได้ศึกษาสมบัติทางกลของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิ้งในอ่างเกลือที่ประกอบไปด้วยบอแร็กซ์ กรดบอริก และเฟอร์โรซิลิกอน ที่อุณหภูมิ 800 - 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 5 และ 7 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ชนิดของชั้นเคลือบด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบ FeB Fe₂B และ CrB บนเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 และ FeB Fe₂B CrB และ NiB บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ดังภาพที่ 8 (ก) และ (ข) แสดงรูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบบอโรดิ้งบนเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิ้งที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเหล็กทั้ง 2 ชนิด ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิ้งที่ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง พบว่าชั้นเคลือบบอโรดิ้งบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 มีลักษณะความหนาที่เรียบและสม่ำเสมอ และชั้นเคลือบบอโรดิ้งบนเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 มีลักษณะเป็นฟืนปลา โดยชั้นเคลือบบอโรดิ้งบนเหล็กทั้ง 2 ชนิดเป็นแบบเฟสคู่ ประกอบไปด้วยชั้นที่มีสีเข้มกว่า คือ FeB ที่พื้นผิวเหล็ก และชั้นที่มีสีอ่อนกว่า คือ Fe₂B ที่ชั้นถัดไป ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 8 รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบบอโรดิ้งบน (ก) เหล็ก H13 (ข) เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิ้งที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

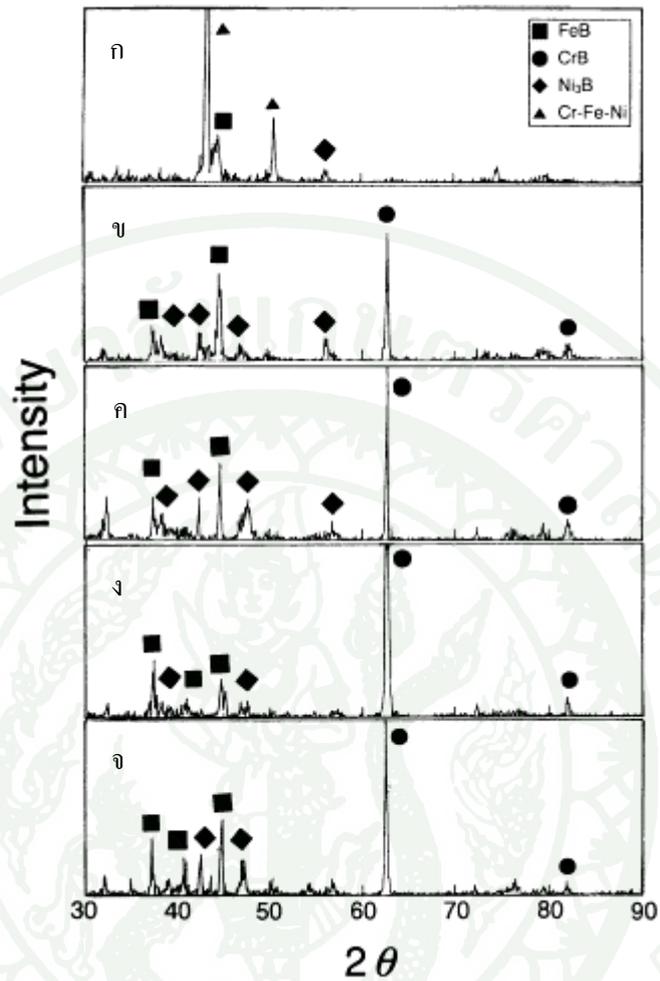
ที่มา: Taktak (2007)



ภาพที่ 9 โครงสร้างจุลภาคของ (ก) เหล็ก H13 (ข) เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

ที่มา: Taktak (2007)

Yoon *et al.* (1999) ได้ศึกษากระบวนการบอโรดิงโดยพลาสมา บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่อุณหภูมิระหว่าง 1023 - 1223 เคลวิน เป็นเวลา 3 5 และ 7 ชั่วโมง วิเคราะห์ชนิดของชั้นเคลือบด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบสเปกตรัมของ FeB CrB และ Ni₃B ดังภาพที่ 10 (ก) - (จ) แสดงรูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบบอโรดิงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิง 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 1023 - 1223 เคลวิน จากการวิเคราะห์องค์ประกอบในแต่ละบริเวณด้วยเครื่องวิเคราะห์อิเล็กตรอน (Electron probe micro - analyzer, EPMA) พบว่าชั้นเคลือบบอโรดิงมีปริมาณธาตุ निकเกิด 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในขณะที่เหล็กเนื้อพื้นมีปริมาณธาตุ निकเกิด 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งได้ชั้นเคลือบบอโรดิงยังพบบริเวณที่มี निकเกิดสูง เนื่องจาก निकเกิดในชั้นเคลือบบอโรดิงแพร่เข้าสู่เหล็กเนื้อพื้น เกิดเป็นชั้น निकเกิดสูงอยู่ระหว่างชั้นเคลือบบอโรดิงและเหล็กเนื้อพื้น นอกจากนี้ได้ชั้น निकเกิดยังพบบริเวณที่มีโครเมียมสูงที่มีปริมาณธาตุโครเมียม 28 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังภาพที่ 11 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงประกอบด้วยชั้นเคลือบบอโรดิง ชั้น निकเกิดสูง ชั้นโครเมียมสูง และเหล็กเนื้อพื้น และจากการทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง พบว่ากระบวนการบอโรดิงสามารถทำให้ผิวของเหล็กมีความแข็งเพิ่มมากขึ้นถึงประมาณ 1800 ~ 2000 HV ดังแสดงในภาพที่ 12 ซึ่งกระบวนการบอโรดิงเป็นการเพิ่มความแข็งให้กับผิวเหล็กจากการแพร่อะตอมโบรอนเข้าสู่ผิวของเหล็ก โดยการแพร่จะเริ่มแพร่จากที่ผิวเข้าสู่เนื้อเหล็ก ทำให้บริเวณผิวของเหล็กที่โบรอนแพร่ไปถึงมีค่าความแข็งที่มากกว่าเหล็กเนื้อพื้น โดยความหนาของชั้นเคลือบบอโรดิงสูงสุดที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงโดยพลาสมาที่ 1223 เคลวิน เป็นเวลา 7 ชั่วโมง มีค่าเป็น 45 ไมโครเมตร

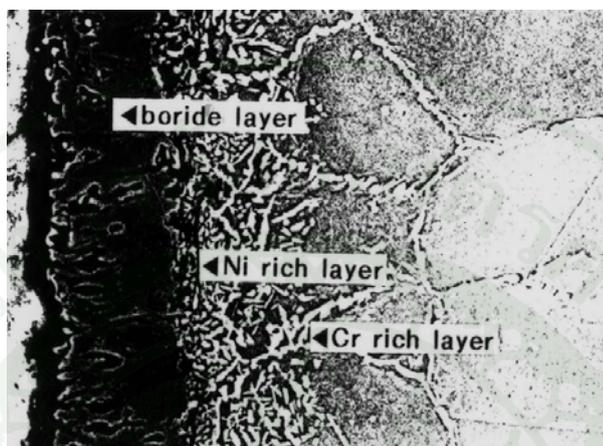


ภาพที่ 10 รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบบนโร้คบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอโรไนตริ่งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ (ก) 1023 เคลวิน (ข) 1073 เคลวิน (ค) 1123 เคลวิน (ง) 1173 เคลวิน และ (จ) 1223 เคลวิน

ที่มา: Yoon *et al.* (1999)

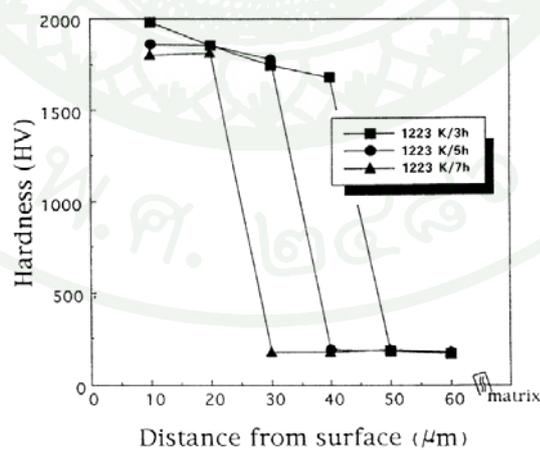
จากงานวิจัยยังพบว่าอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเคลือบส่งผลต่อความหนาของชั้นเคลือบบนโร้ค ดังแสดงในภาพที่ 13 (ก) โดยเวลาที่ใช้ในการเคลือบและความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบนโร้คมีความสัมพันธ์กันแบบพาราโบลา และความหนาของชั้นเคลือบบนโร้คยกกำลังสองแปรผันตรงตามเวลาที่ใช้ในการเคลือบซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีการแพร่ ดังแสดงในภาพที่ 13 (ข) ซึ่งสอดคล้องกับสมการการแพร่ในสมการ (1) และสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (K) ได้จากความชันของกราฟเส้นตรงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบบนโร้คยกกำลังสอง

และเวลาที่ใช้ในการเคลือบ นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (K) ยังมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ (T) และพลังงานกระตุ้น (Activation energy, Q) เป็นไปตามหลักของจลนพลศาสตร์ ซึ่งสอดคล้องกับสมการ Arrhenius ดังแสดงในสมการ (2)



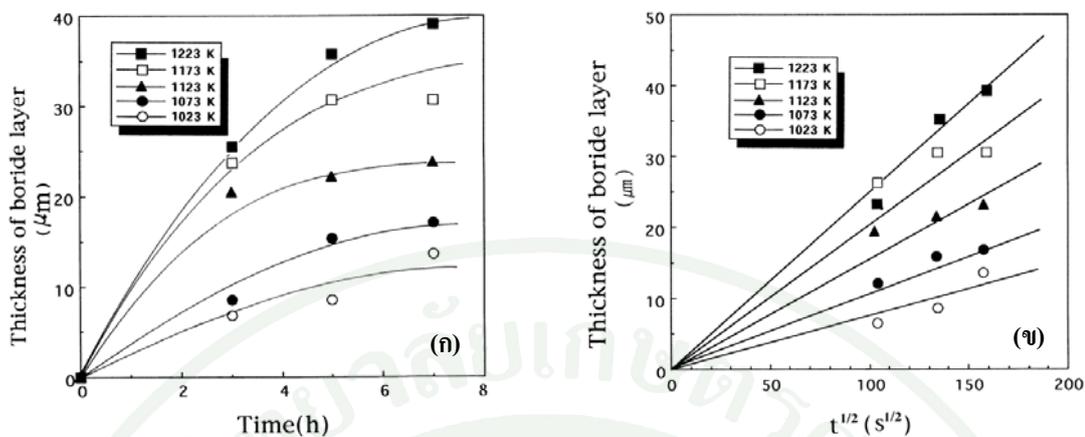
ภาพที่ 11 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงที่ 1173 เคลวิน เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

ที่มา: Yoon *et al.* (1999)



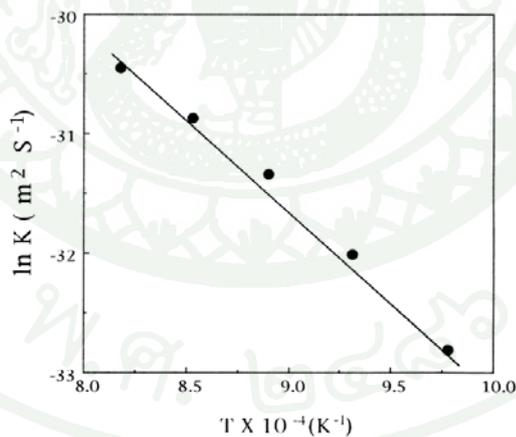
ภาพที่ 12 ค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ผ่านกระบวนการบอไรดิงที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน ที่เวลาต่างกัน

ที่มา: Yoon *et al.* (1999)



ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ค่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์กับเวลาที่ใช้ในการเคลือบเหล็ก AISI 304 (ข) ค่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ยกกำลังสองกับเวลาที่ใช้ในการเคลือบเหล็ก AISI 304

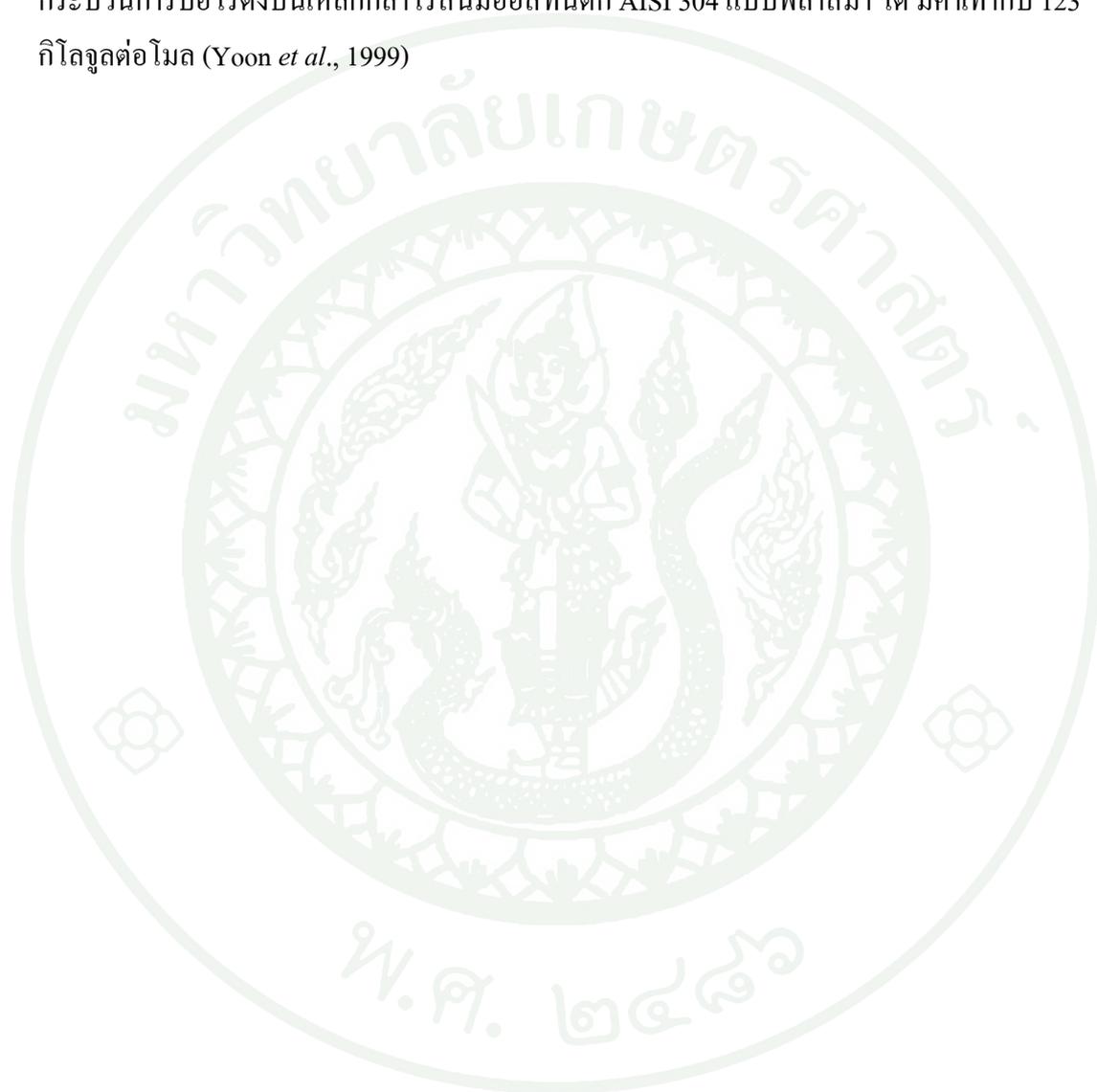
ที่มา: Yoon *et al.* (1999)



ภาพที่ 14 อัตราการเปลี่ยนแปลงคงที่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304

ที่มา: Yoon *et al.* (1999)

จากหลักการจลนพลศาสตร์และสมการ (3) การคำนวณค่าพลังงานกระตุ้นการแพร่ซึมของ โบรอนของชั้นเคลือบบอโรไนต์นั้น สามารถได้จากค่าความชันของกราฟเส้นตรงความสัมพันธ์ ระหว่างลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ($\ln K$) และส่วนกลับของอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบ ($1/T$) ดังแสดงในภาพที่ 14 และ สามารถนำไปหาค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy) (Q) ใน กระบวนการบอโรดิงบนเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 แบบพลาสมา ได้ มีค่าเท่ากับ 123 กิโลจูลต่อ โมล (Yoon *et al.*, 1999)



อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1.1 ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ที่มีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 4

1.2 เฟอร์โรซิลิกอน (Fe - Si) ที่มีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 5

1.3 เกลือบอแรกซ์ ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)

1.4 มาร์เบิล รีเอเจนต์ (Marble reagent)

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ที่ใช้ในการทดลอง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

เหล็ก	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Fe
AISI 304	0.045	1.60	0.031	0.025	0.43	18.26	8.65	-	Bal.
AISI 420	0.30	0.43	0.018	0.028	0.25	12.15	0.32	-	Bal.
AISI 440C	1.04	0.38	0.021	0.001	0.41	16.59	-	0.43	Bal.

ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีของเฟอร์โรซิลิกอน (Fe - Si) ที่ใช้ในการทดลอง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

Si	Al	Ca	Ti	C	P	S	Mn	Cr	N	H ₂ O
77.1	0.06	0.03	0.07	0.017	0.014	0.001	0.03	0.01	0.01	< 1

2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

- 2.1 เตาบอโรดิงแบบอ่างเกลือ (Salt - bath furnace)
- 2.2 เครื่องตัดความเร็วสูง (High speed cutter)
- 2.3 เครื่องกลึง (Lathe machine)
- 2.4 เครื่องขัด (Alumina wheel)
- 2.5 กระดาษทราย (SiC paper) และผ้าสักหลาด (Acrylic felt)
- 2.6 ผงอลูมินา (Alumina)
- 2.7 ลวด (Wire)

3. เครื่องมือวิเคราะห์ผิวเคลือบ

- 3.1 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X - ray diffraction, XRD)
- 3.2 เครื่องทดสอบความแข็ง (Vickers microhardness tester)
- 3.3 เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ (Energy dispersive x - ray spectrometer, EDS)
- 3.4 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope, OM)
- 3.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)
- 3.6 โปรแกรมวิเคราะห์ภาพ (Image analyzer)

วิธีการ

1. ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

ตัดชิ้นงานเหล็กเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร สูง 25 มิลลิเมตร แล้วขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทราย เบอร์ 120 240 400 และ 600 เพื่อกำจัดสนิมและกำจัดสิ่งสกปรกออก

2. ขั้นตอนการเคลือบ

เติมผงบอแรกซ์ 8 กิโลกรัมลงในอ่างเกลือ เมื่อผงบอแรกซ์ทั้งหมดหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 1123 เคลวิน จึงเติมเฟอร์โรซิลิกอนลงไป 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อใช้เป็นตัวรีดิวเซอร์ คนให้สารทั้งหมดหลอมตัวผสมกัน

นำชิ้นงานไปรื้อยเส้นลวด ทำความสะอาดผิวหน้าชิ้นงานด้วยแอลกอฮอล์ แล้วใส่ชิ้นงานลงในอ่างเกลือ อุณหภูมิประมาณ 15 นาที จึงเริ่มจับเวลา ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 1123 1173 1223 และ 1273 เคลวินตามลำดับ เวลาที่ใช้ในการเคลือบคือ 1 4 6.25 และ 9 ชั่วโมง

เมื่อครบกำหนดเวลา นำชิ้นงานออกจากเตาอ่างเกลือปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ แล้วนำไปขัดบอแรกซ์ที่ติดผิวชิ้นงานออกโดยอุณหภูมิในน้ำอุ่น

3. ขั้นตอนการวิเคราะห์ผล

3.1 วิเคราะห์ชนิดของชั้นเคลือบด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พิจารณาสารประกอบ FeB หรือ Fe_2B

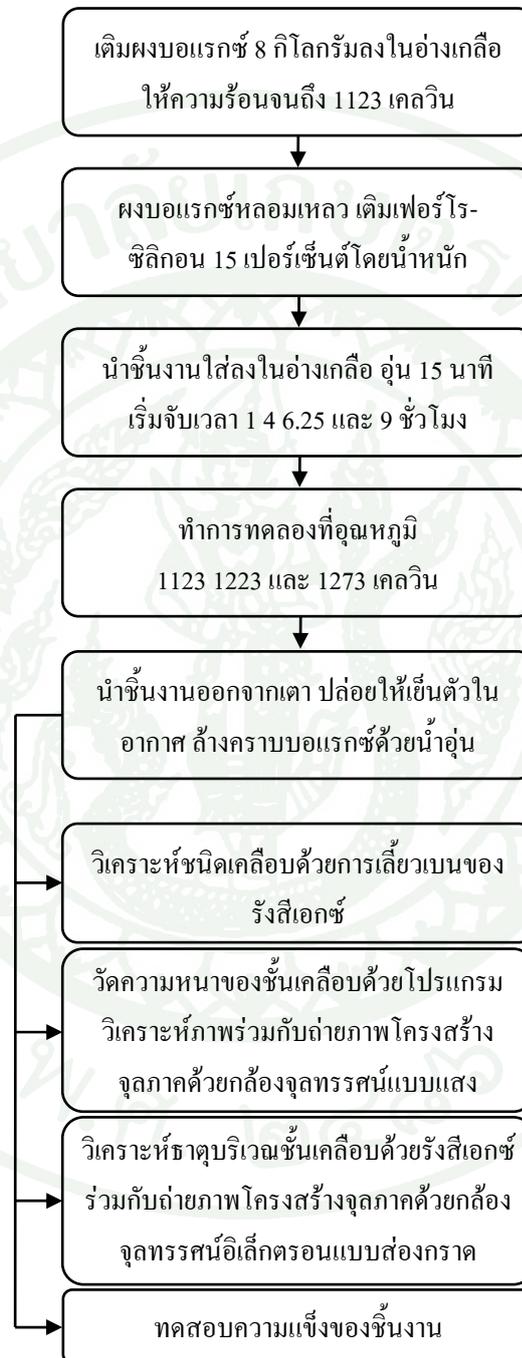
3.2 นำชิ้นงานมาตัดตามขวาง ด้วยเครื่องตัดความเร็วสูง (High speed cutter) หลังจากนั้นนำชิ้นงานมาอัดด้วยวิธีเมทท์แบบเย็น (Cold mount) นำไปขัดหยาบด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 120 จนถึงเบอร์ 1200 ขัดละเอียดด้วยผงอลูมินา

ถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวิเคราะห์ธาตุ

กัดผิวชิ้นงานด้วยมาร์เบิล รีเอเจนต์ ซึ่งมีส่วนผสมของคอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4$) 4 กรัม ไฮโดรคลอริก (HCl) 20 ml และ น้ำ 20 ml ถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง วัดความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ

ทดสอบความแข็งของชิ้นงาน

โดยวิธีการทดลองในงานวิจัยนี้สามารถเขียนสรุปขั้นตอนเป็นแผนภาพงานวิจัยได้ดังแสดง
ในภาพที่ 15



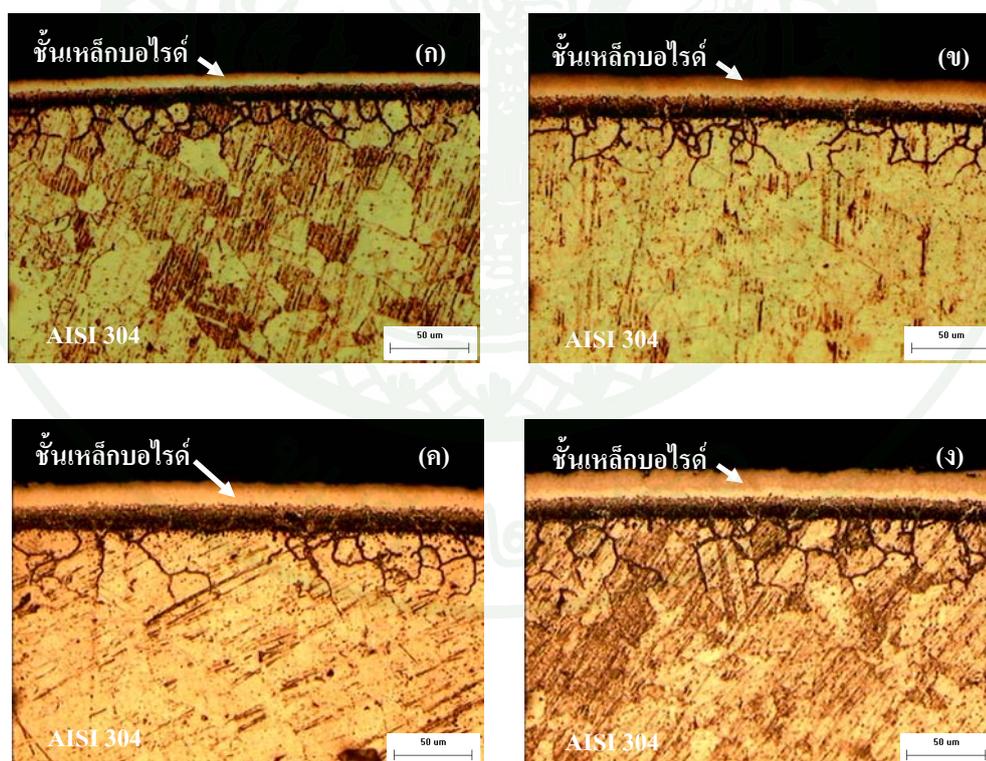
ภาพที่ 15 แผนภาพงานวิจัย

ผลและวิจารณ์

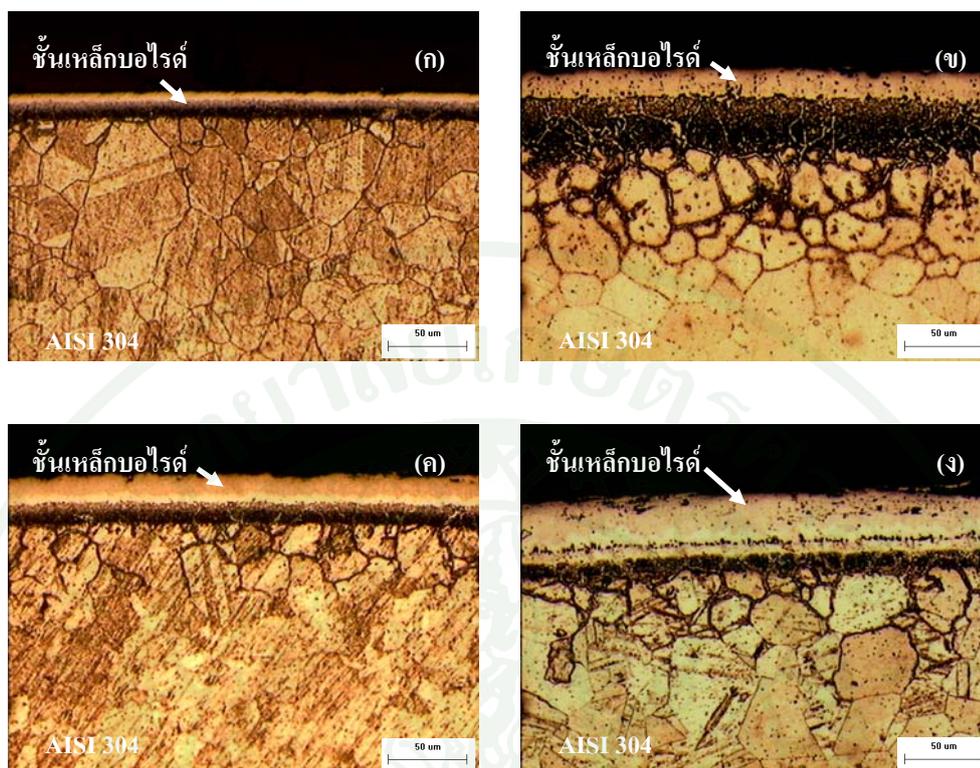
ผล

1. ความหนา โครงสร้างจุลภาค และสมบัติของชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304

จากการทดลองเคลือบบอไรด์บนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ด้วยกระบวนการบอไรดิ้งในอ่างเกลือบอไรด์ที่เติมเฟอร์โรซิลิกอน 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 - 1273 เคลวิน เป็นเวลา 1 - 9 ชั่วโมง วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่าชั้นเคลือบบอไรด์มีความหนาที่เรียบและสม่ำเสมอ โดยความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการเคลือบเพิ่มมากขึ้น ดังภาพที่ 16 (ก) – (ง) แสดง

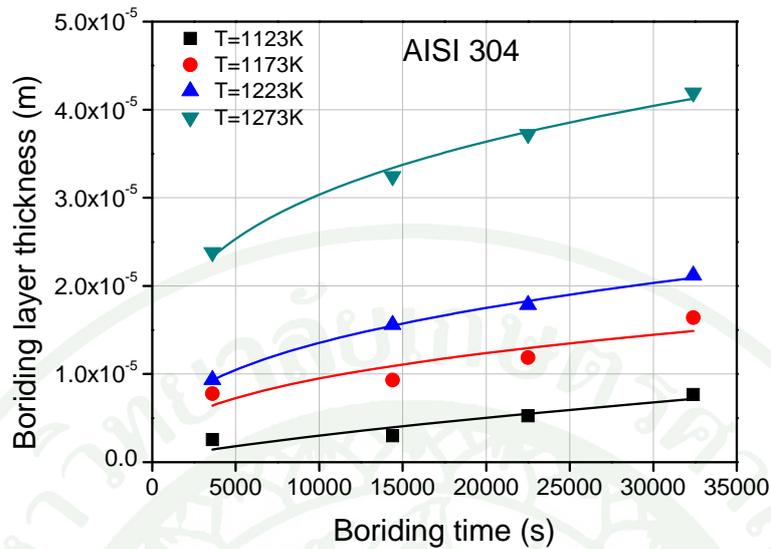


ภาพที่ 16 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้ง ที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง (ค) 6.25 ชั่วโมง และ (ง) 9 ชั่วโมง



ภาพที่ 17 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งเป็นเวลา 9 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ (ก) 1123 เคลวิน (ข) 1173 เคลวิน (ค) 1223 เคลวิน และ (ง) 1273 เคลวิน

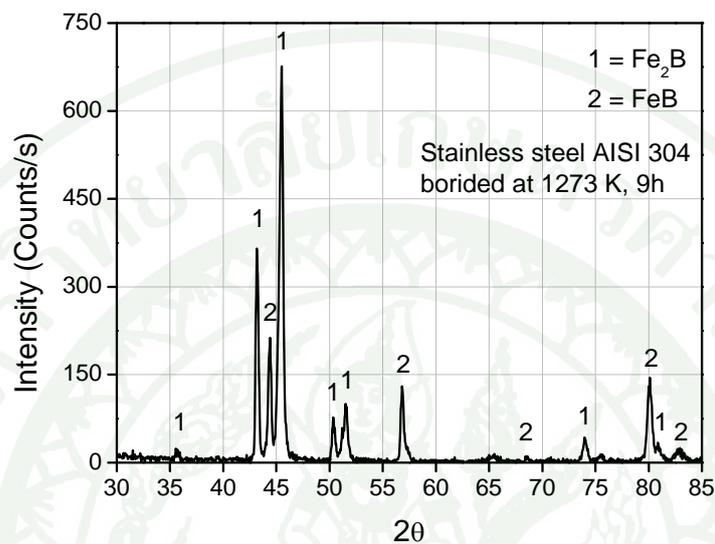
โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลา 1 4 6.25 และ 9 ชั่วโมง สามารถวัดความหนาได้เพิ่มขึ้นจาก 9.4 ไมโครเมตร ไปจนถึง 21.2 ไมโครเมตร เมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการเคลือบจาก 1 ชั่วโมงไปจนถึง 9 ชั่วโมง นอกจากนั้นยังพบว่าชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นมานั้นยังมีความหนาเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบบอไรด์สูงขึ้น ดังภาพที่ 17 (ก) - (ง) แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งที่อุณหภูมิ 1123 1173 1223 และ 1273 เคลวิน เป็นระยะเวลา 9 ชั่วโมง สามารถวัดความหนาได้เพิ่มขึ้นจาก 7.7 ไมโครเมตร ไปจนถึง 41.9 ไมโครเมตร เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบจาก 1123 เคลวินไปจนถึง 1273 เคลวิน โดยชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 - 1273 เคลวิน เป็นเวลา 1 - 9 ชั่วโมง มีความหนาดังแสดงในภาพที่ 18



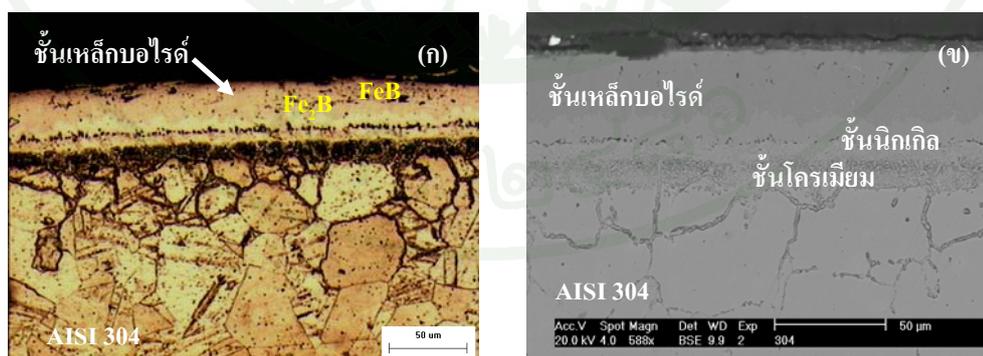
ภาพที่ 18 ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอไรด์ที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 - 1273 เคลวิน เป็นเวลา 1 - 9 ชั่วโมง

จากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่า มีสเปกตรัมของสารประกอบ FeB และ Fe_2B ดังภาพที่ 19 แสดงสเปกตรัมของการตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอไรด์ที่อุณหภูมิ 1273 K เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ซึ่งเป็นการยืนยันว่าชั้นเคลือบที่ได้นั้นเป็นชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ และชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์นั้นเป็นชนิดเฟสคู่ Fe_2B และ FeB โดยชั้นของ FeB (สีเข้ม) อยู่ชั้นนอกสุด และ Fe_2B (สีอ่อน) อยู่ถัดเข้ามา ซึ่งสามารถพิจารณาได้อย่างชัดเจนเมื่อชั้นเคลือบบอไรด์มีความหนามากขึ้น ดังภาพที่ 20 (ก) และ (ข) แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอไรด์ที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นระยะเวลา 9 ชั่วโมง ซึ่งถูกวิเคราะห์อย่างละเอียดโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและอิเล็กตรอนแบบส่องกราด นอกจากนี้ได้ชั้นเคลือบบอไรด์พบว่ามีบริเวณที่มีนิกเกิลและโครเมียมสูง โดยบริเวณที่มีนิกเกิลสูงอยู่ถัดเข้ามาจากชั้น Fe_2B และบริเวณที่มีโครเมียมสูงอยู่ถัดเข้ามาจากบริเวณที่มีนิกเกิลสูง และเมื่อตรวจสอบโดยเครื่องวิเคราะห์ธาตุพบว่า มีสเปกตรัมของธาตุนิกเกิลเด่นชัดในบริเวณที่มีนิกเกิลสูงและสเปกตรัมของธาตุโครเมียมเด่นชัดในบริเวณที่มีโครเมียมสูง ดังภาพที่ 21 (ก) และ (ข) แสดงสเปกตรัมของการวิเคราะห์ธาตุบริเวณที่มีนิกเกิลสูงและบริเวณที่มีโครเมียมสูงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โดยบริเวณที่มี

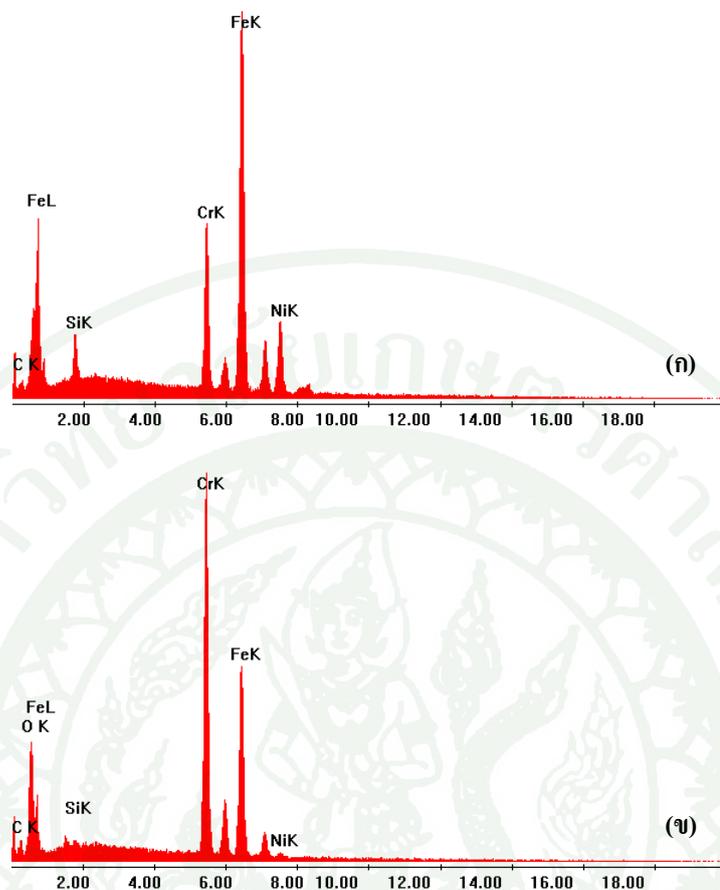
นิกเกิลสูงมีธาตุนิกเกิลผสมปริมาณมากถึง 15.28 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และบริเวณที่มีโครเมียมสูงมีธาตุโครเมียมผสมปริมาณมากถึง 41.13 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 19 รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง



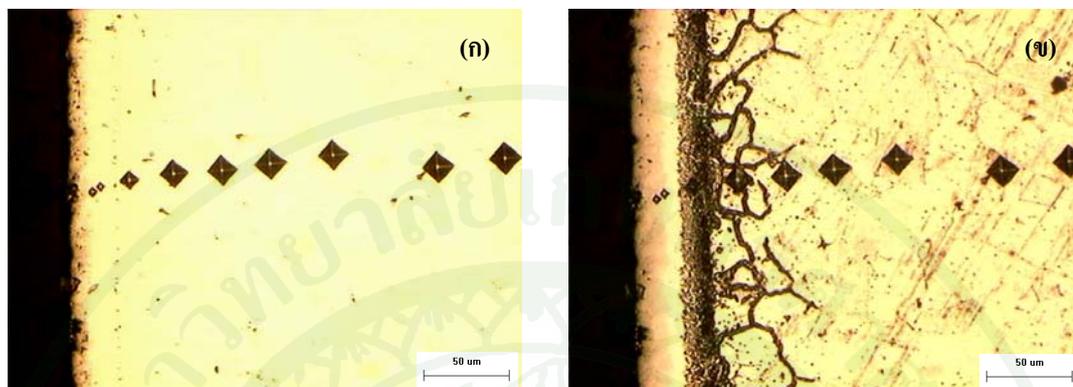
ภาพที่ 20 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ด้วย (ก) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง และ (ข) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



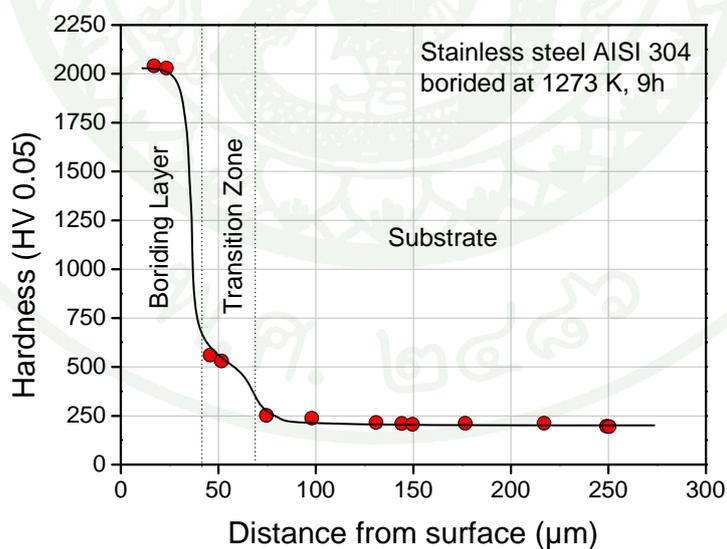
ภาพที่ 21 รูปแบบ EDS ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ที่บริเวณ (ก) นิกเกิลสูง และ (ข) โครเมียมสูง

นอกจากนี้จากการทดสอบความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการเคลือบผิวบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ทดสอบความแข็ง ณ ตำแหน่งจากพื้นผิวเคลือบลึกลงไปเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ดังภาพที่ 22 (ก) และ (ข) แสดงรอยกดจากการทดสอบความแข็งบริเวณชั้นเคลือบบอโรดิงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง จากผิวเข้าไปเนื้อเหล็ก ที่เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ก่อนและหลังการกัดกรอด พบว่าที่ผิวเหล็กมีค่าความแข็งสูงถึงประมาณ 2000 HV ต่อจากนั้นค่าความแข็งลดลงมาที่ประมาณ 550 HV และสุดท้ายเป็นค่าความแข็งของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 มีความแข็งลดลงมาอยู่ที่ประมาณ 230 HV ดังภาพที่ 23 แสดงค่าความแข็งบริเวณ

ชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง จากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็ก



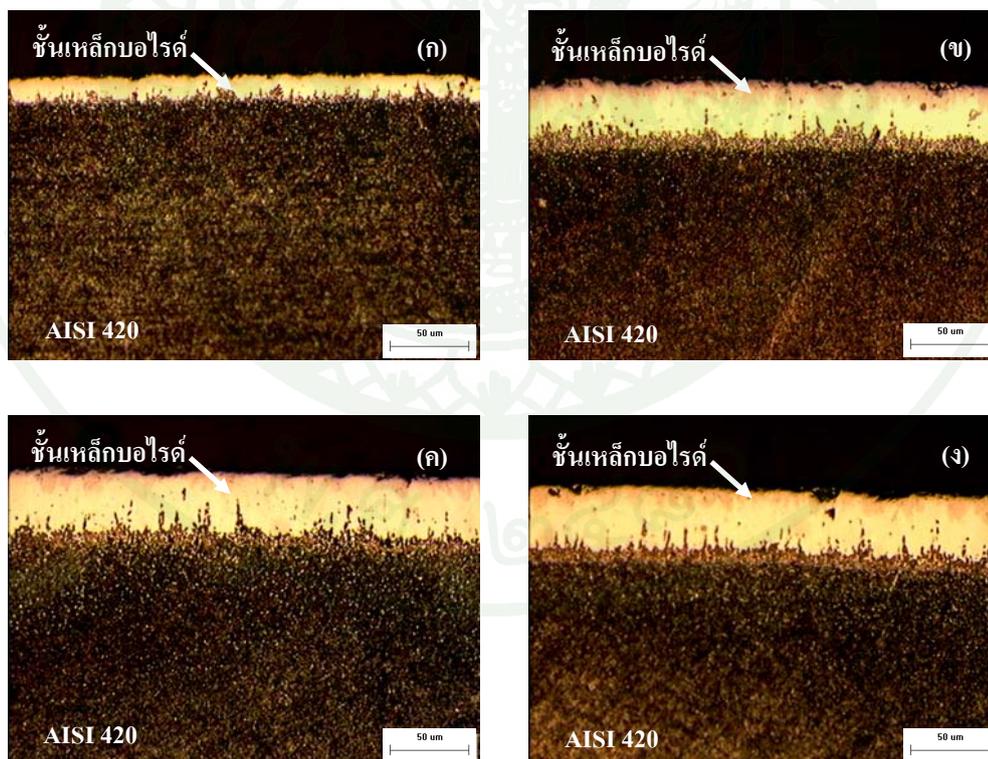
ภาพที่ 22 รอยกดจากการทดสอบความแข็งบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง จากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็กที่เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 (ก) ก่อนการกัดกรด และ (ข) หลังการกัดกรด



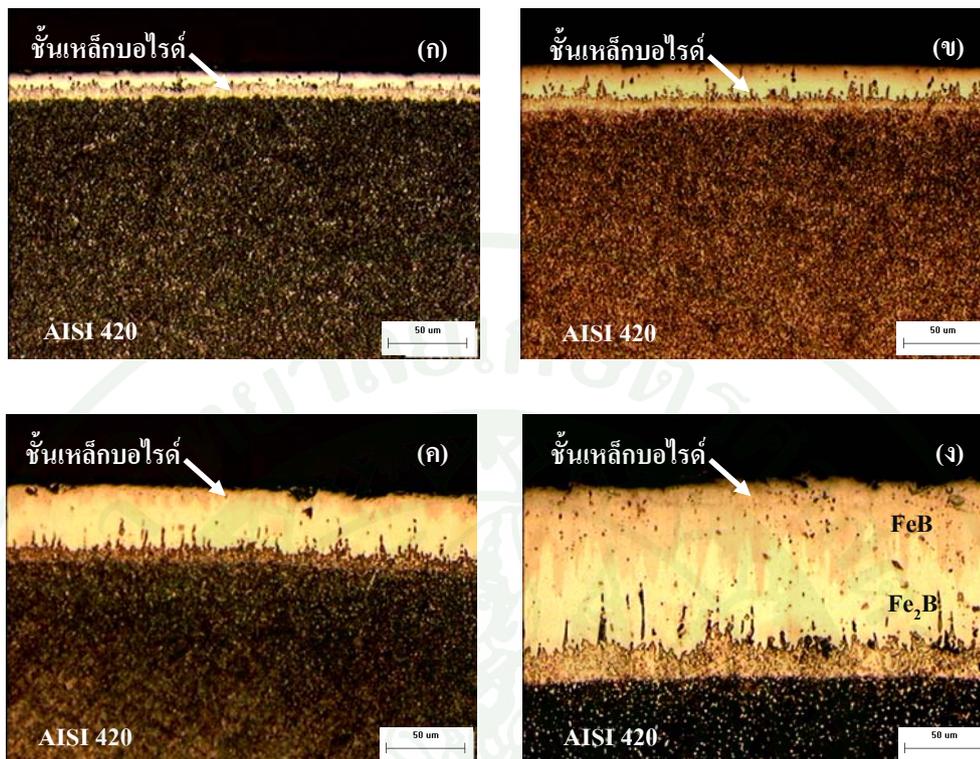
ภาพที่ 23 ค่าความแข็งบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง จากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็ก

2. ความหนา โครงสร้างจุลภาค และสมบัติของชั้นเคลือบบอโรนบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420

จากการทดลองเคลือบบอโรนบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ด้วยกระบวนการบอโรดิ้งในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรซิลิกอน 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 - 1273 เคลวิน เป็นเวลา 1 - 9 ชั่วโมง วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่าชั้นเคลือบบอโรนมีความหนาที่ค่อนข้างเรียบและสม่ำเสมอ โดยความหนาของชั้นเคลือบบอโรนมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการเคลือบเพิ่มมากขึ้น ดังภาพที่ 24 (ก) – (ง) แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอโรนบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิ้งที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลา 1 4 6.25 และ 9 ชั่วโมง สามารถวัดความหนาได้เพิ่มขึ้นจาก 14.7 ไมโครเมตร ไปจนถึง 40.7 ไมโครเมตร เมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการเคลือบจาก 1 ชั่วโมงไปจนถึง 9 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังพบว่าชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นมานั้นยังมีความหนาเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้

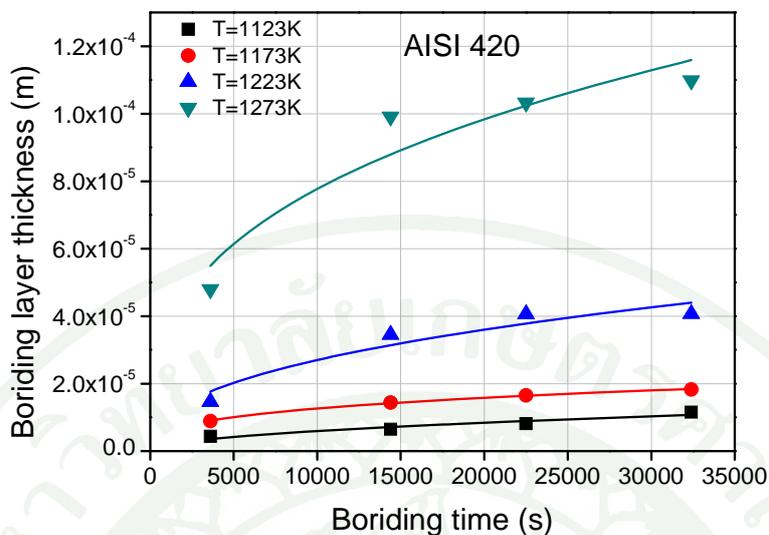


ภาพที่ 24 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอโรนบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิ้งที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง (ค) 6.25 ชั่วโมง และ (ง) 9 ชั่วโมง



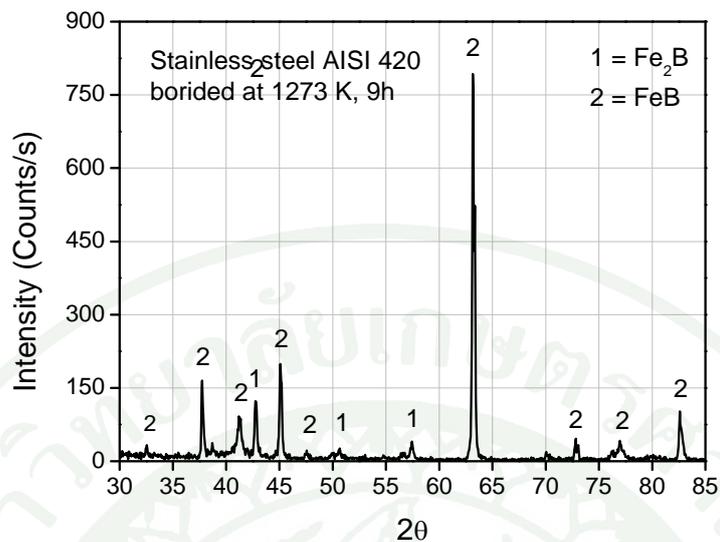
ภาพที่ 25 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งเป็นเวลา 9 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ (ก) 1123 เคลวิน (ข) 1173 เคลวิน (ค) 1223 เคลวิน และ (ง) 1273 เคลวิน

ในการเคลือบบอไรด์สูงขึ้น ดังภาพที่ 25 (ก) - (ง) แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งที่อุณหภูมิ 1123 1173 1223 และ 1273 เคลวิน เป็นระยะเวลา 9 ชั่วโมง สามารถวัดความหนาได้เพิ่มขึ้นจาก 11.5 ไมโครเมตร ไปจนถึง 109.8 ไมโครเมตร เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบจาก 1123 เคลวินไปจนถึง 1273 เคลวิน โดยชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 - 1273 เคลวิน เป็นเวลา 1 - 9 ชั่วโมง มีความหนาดังแสดงในภาพที่ 26

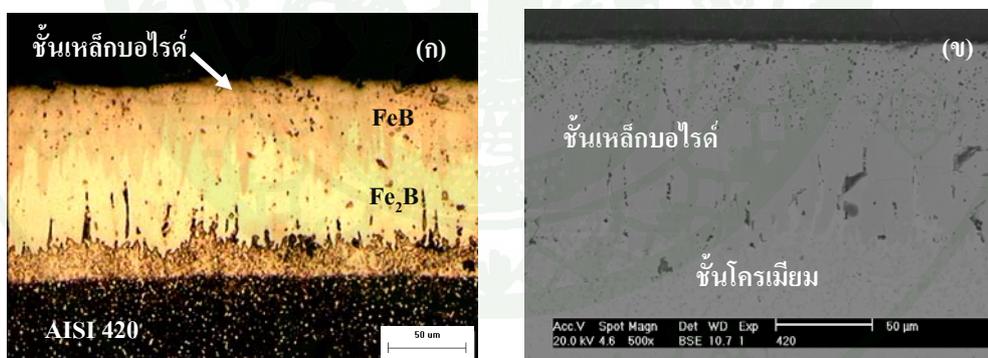


ภาพที่ 26 ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอไรด์ที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 - 1273 เคลวิน เป็นเวลา 1 - 9 ชั่วโมง

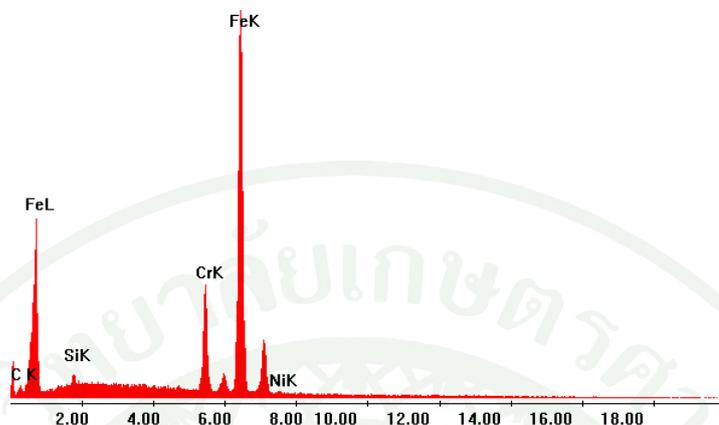
จากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่า มีสเปกตรัมของสารประกอบ FeB และ Fe_2B ดังภาพที่ 27 แสดงสเปกตรัมของการตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอไรด์ที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ซึ่งเป็นการยืนยันว่าชั้นเคลือบที่ได้เป็นชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ และชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์นั้นเป็นชนิดเฟสคู่ Fe_2B และ FeB โดยชั้นของ FeB (สีเข้ม) อยู่ชั้นนอกสุด และ Fe_2B (สีอ่อน) อยู่ถัดเข้ามา ซึ่งสามารถพิจารณาได้อย่างชัดเจนเมื่อชั้นเคลือบบอไรด์มีความหนามากขึ้น ดังภาพที่ 28 (ก) และ (ข) แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอไรด์ที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นระยะเวลา 9 ชั่วโมง ซึ่งถูกวิเคราะห์อย่างละเอียดโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและอิเล็กตรอนแบบส่องกราด นอกจากนี้ได้ชั้นเคลือบบอไรด์พบว่ามีบริเวณที่มีโครเมียมสูง โดยบริเวณที่มีโครเมียมสูงอยู่ถัดเข้ามาจากชั้น Fe_2B หรือก็คืออยู่ระหว่างชั้นเคลือบบอไรด์และเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 และเมื่อตรวจสอบโดยเครื่องวิเคราะห์ธาตุพบว่า มีสเปกตรัมของธาตุโครเมียมเด่นชัดในบริเวณที่มีโครเมียมสูง ดังภาพที่ 29 แสดงสเปกตรัมของการวิเคราะห์ธาตุบริเวณที่มีโครเมียมสูงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 โดยบริเวณที่มีโครเมียมสูงมีธาตุโครเมียมผสมปริมาณมากถึง 21.08 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 27 รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอไรด์ที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง

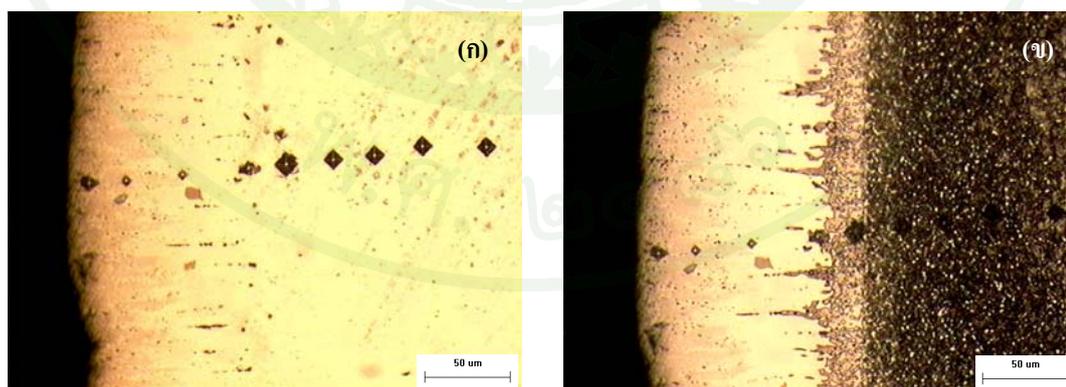


ภาพที่ 28 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอไรด์ที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ด้วย (ก) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง และ (ข) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

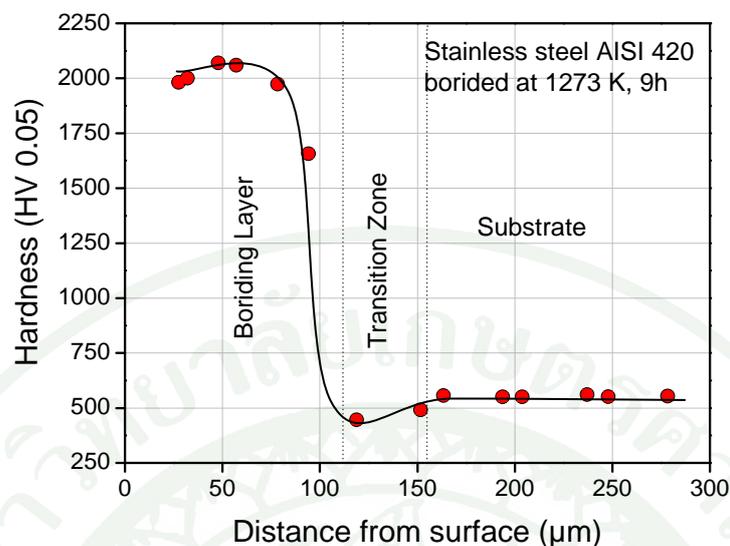


ภาพที่ 29 รูปแบบ EDS ของบริเวณที่มีคาร์บอนสูงในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการอบโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง

นอกจากนี้จากการทดสอบความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการเคลือบผิวอบโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ทดสอบความแข็ง ณ ตำแหน่งจากพื้นผิวเคลือบลึกลงไปเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ดังภาพที่ 30 (ก) และ (ข) แสดงรอยกดจากการทดสอบความแข็งบริเวณชั้นเคลือบอบโรดบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการ



ภาพที่ 30 รอยกดจากการทดสอบความแข็งบริเวณชั้นเคลือบอบโรดบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการอบโรดิง ที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง จากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็กที่เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 (ก) ก่อนการกััดกรด และ (ข) หลังการกััดกรด



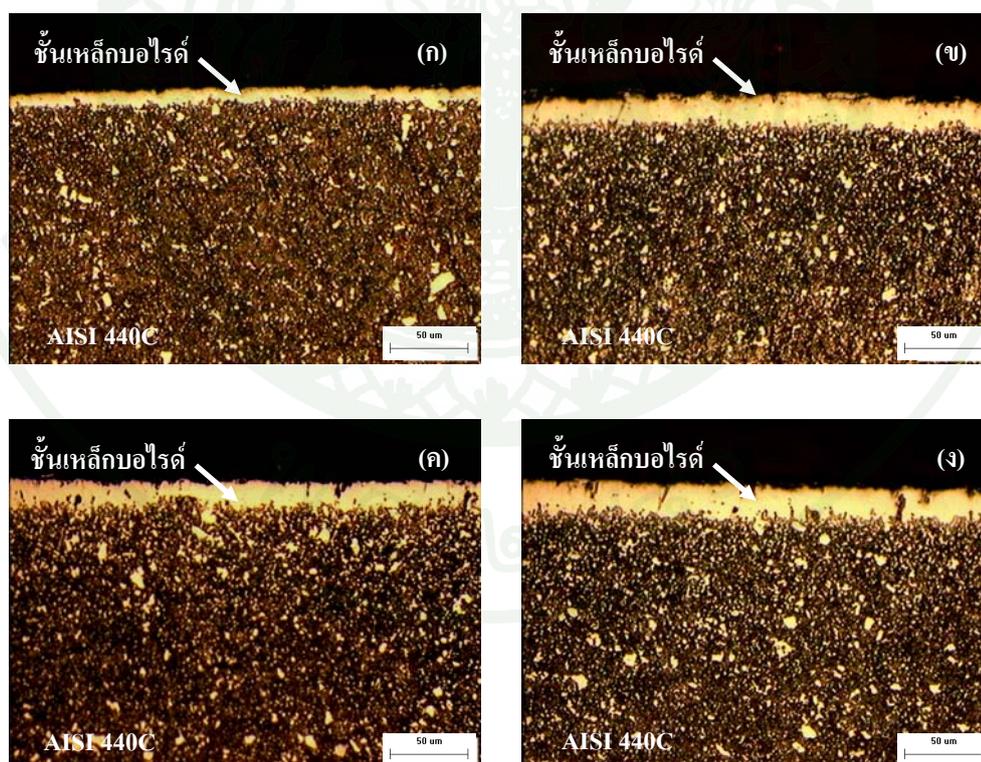
ภาพที่ 31 ค่าความแข็งบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอไรด์ที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง จากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็ก

บอไรด์ที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง จากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็ก ที่เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ก่อนและหลังการกัดกรด พบว่าที่ผิวเหล็กมีความแข็งสูงถึงประมาณ 2000 HV ต่อจากนั้นค่าความแข็งลดลงมาที่ประมาณ 450 HV และสุดท้ายเป็นค่าความแข็งของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 มีความแข็งที่ประมาณ 560 HV ดังภาพที่ 31 แสดงค่าความแข็งบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอไรด์ที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง จากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็ก

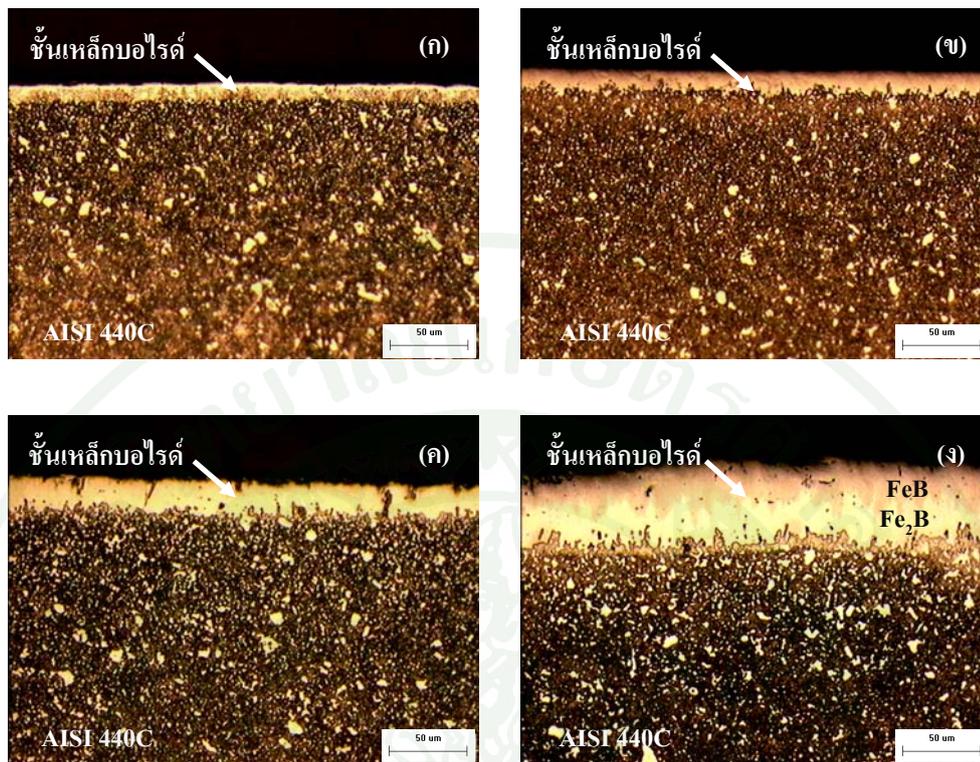
3. ความหนา โครงสร้างจุลภาค และสมบัติของชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420

จากการทดลองเคลือบบอไรด์บนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ด้วยกระบวนการบอไรด์ ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรซิลิกอน 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ ระหว่าง 1123 - 1273 เคลวิน เป็นเวลา 1 - 9 ชั่วโมง วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่าชั้นเคลือบบอไรด์มีความหนาที่ค่อนข้างเรียบและสม่ำเสมอ โดยความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการเคลือบเพิ่มมากขึ้น ดังภาพที่ 32 (ก) – (ง) แสดง

จาก 11.5 ไมโครเมตร ไปจนถึง 29.0 ไมโครเมตร เมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวจาก 1 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอโรคาร์บที่เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลา 1 4 6.25 และ 9 ชั่วโมง สามารถวัดความหนาได้เพิ่มขึ้น ไปจนถึง 9 ชั่วโมง นอกจากนั้นยังพบว่าชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นมานั้นยังมีความหนาเพิ่มมากขึ้นเมื่อ อุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบบอโรดิงสูงขึ้น ดังภาพที่ 33 (ก) - (ง) แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอโรคาร์บที่เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1123 1173 1223 และ 1273 เคลวิน เป็นระยะเวลา 9 ชั่วโมง สามารถวัดความหนาได้เพิ่มขึ้นจาก 9.0 ไมโครเมตร ไปจนถึง 59.2 ไมโครเมตร เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบบอโรดิงจาก 1123 เคลวิน ไปจนถึง 1273 เคลวิน โดยชั้นเคลือบบอโรคาร์บที่เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 - 1273 เคลวิน เป็นเวลา 1 - 9 ชั่วโมง มีความหนาดังแสดงในภาพที่ 34

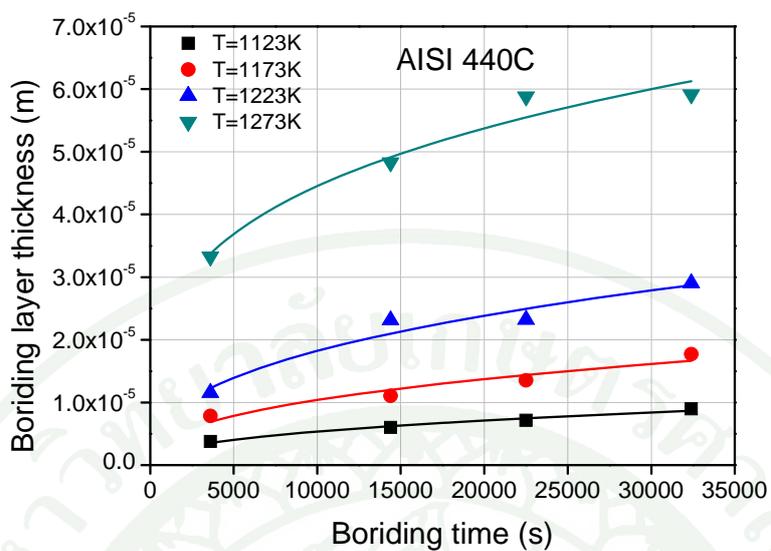


ภาพที่ 32 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอโรคาร์บที่เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิง ที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง (ค) 6.25 ชั่วโมง และ (ง) 9 ชั่วโมง

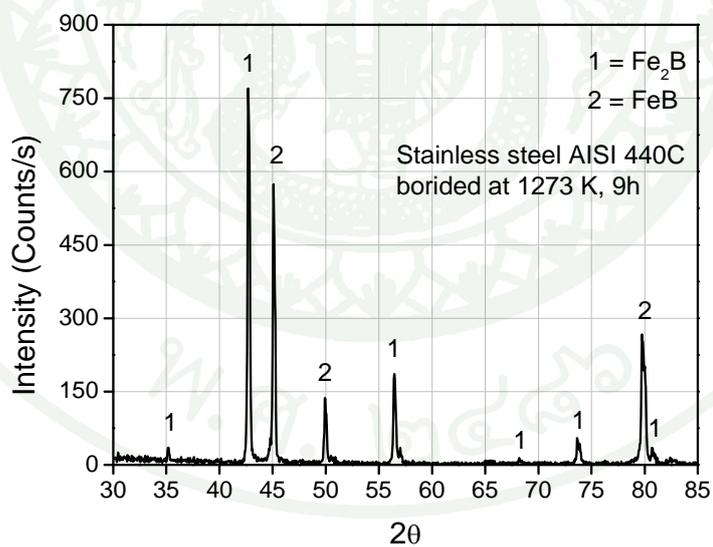


ภาพที่ 33 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้ง เป็นเวลา 9 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ (ก) 1123 เคลวิน (ข) 1173 เคลวิน (ค) 1223 เคลวิน และ (ง) 1273 เคลวิน

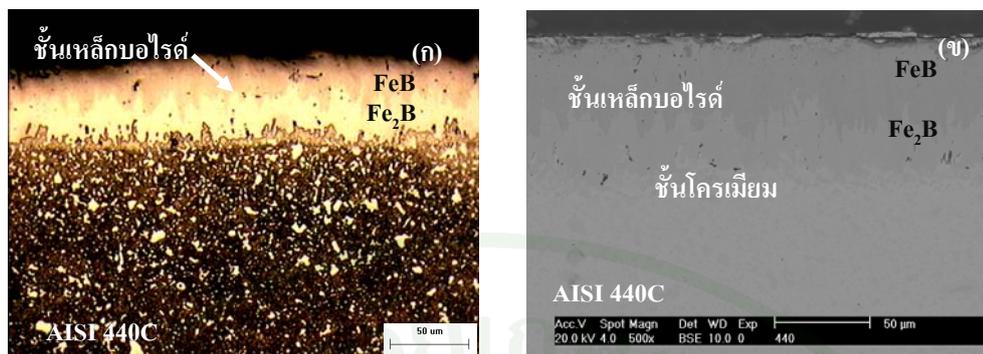
จากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่า มีสเปกตรัมของสารประกอบ FeB และ Fe_2B ดังภาพที่ 35 แสดงสเปกตรัมของการตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ซึ่งเป็นการยืนยันว่าชั้นเคลือบที่ได้นั้นเป็นชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ และชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์นั้นเป็นชนิดเฟสคู่ Fe_2B และ FeB โดยชั้นของ FeB (สีเข้ม) อยู่ชั้นนอกสุด และ Fe_2B (สีอ่อน) อยู่ถัดเข้ามา ซึ่งสามารถพิจารณาได้อย่างชัดเจนเมื่อชั้นเคลือบบอไรด์มีความหนามากขึ้น ดังภาพที่ 36 (ก) และ (ข) แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นระยะเวลา 9 ชั่วโมง ซึ่งถูกวิเคราะห์อย่างละเอียดโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและอิเล็กตรอนแบบส่องกราด นอกจากนี้ได้ชั้นเคลือบบอไรด์พบว่ามีบริเวณที่มีโครเมียมสูง โดยบริเวณที่มีโครเมียมสูงอยู่ถัดเข้ามาจากชั้น Fe_2B หรือก็คืออยู่



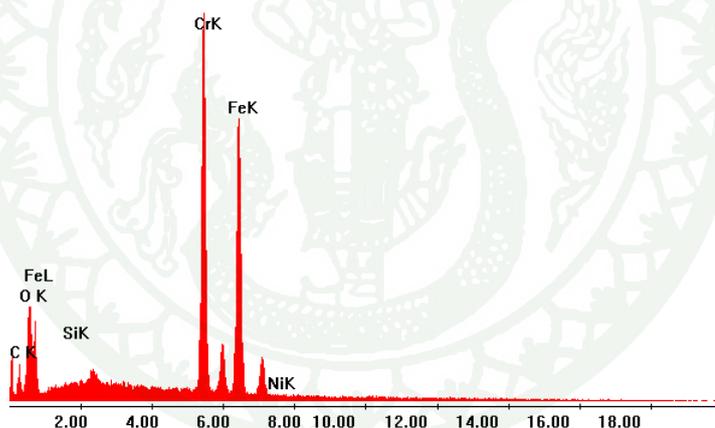
ภาพที่ 34 ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอไรด์ที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 - 1273 เคลวิน เป็นเวลา 1 - 9 ชั่วโมง



ภาพที่ 35 รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอไรด์ที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง



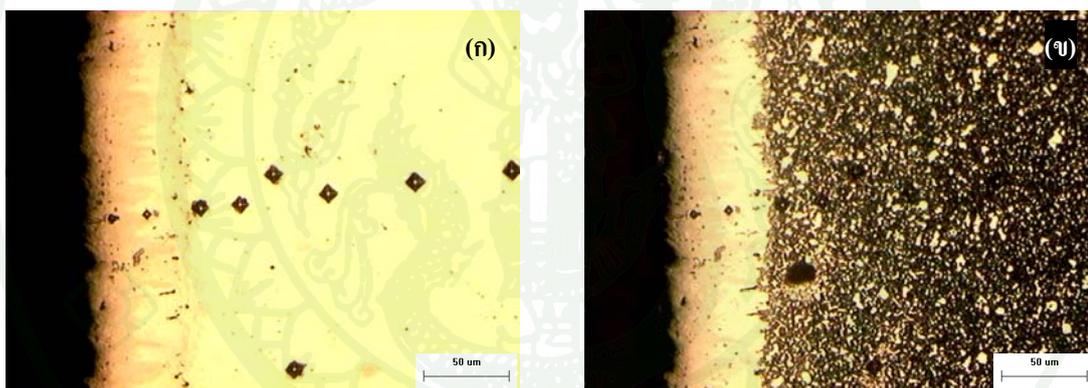
ภาพที่ 36 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ด้วย (ก) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง และ (ข) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



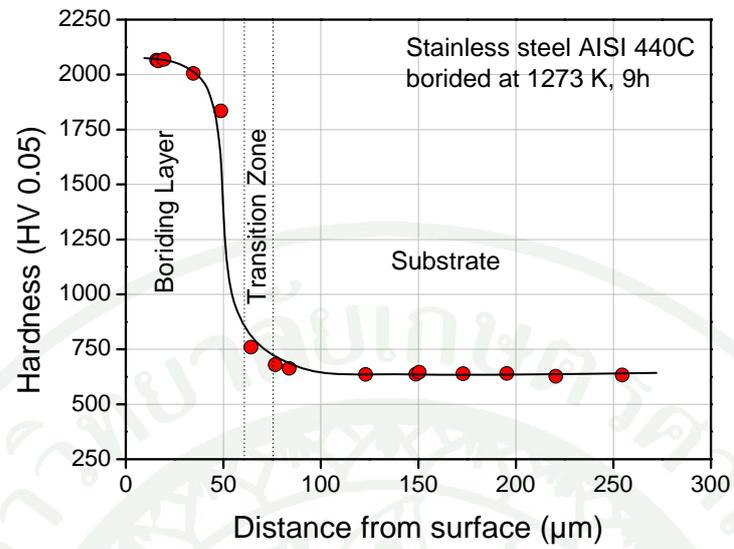
ภาพที่ 37 รูปแบบ EDS ของบริเวณที่มีโครเมียมสูงในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง

ระหว่างชั้นเคลือบบอไรด์และเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C และเมื่อตรวจสอบโดยเครื่องวิเคราะห์ธาตุพบว่ามีสเปกตรัมของธาตุโครเมียมเด่นชัดในบริเวณที่มีโครเมียมสูง ดังภาพที่ 37 แสดงสเปกตรัมของการวิเคราะห์ธาตุบริเวณที่มีโครเมียมสูงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C โดยบริเวณที่มีโครเมียมสูงมีธาตุโครเมียมผสมปริมาณมากถึง 35.21 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

นอกจากนี้จากการทดสอบความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการเคลือบผิวบอโรไนต์ที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ทดสอบความแข็ง ณ ตำแหน่งจากพื้นผิวเคลือบลึกกลงไปในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ดังภาพที่ 38 (ก) และ (ข) แสดงรอยกดจากการทดสอบความแข็งบริเวณชั้นเคลือบบอโรไนต์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI40C ที่ผ่านกระบวนการบอโรไนต์ที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง จากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็กที่เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ก่อนและหลังการกัดกรด พบว่าที่ผิวเหล็กมีค่าความแข็งสูงถึงประมาณ 2000 HV ต่อจากนั้นค่าความแข็งลดลงมาที่ประมาณ 700 HV และสุดท้ายเป็นค่าความแข็งของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C มีความแข็งลดลงมาอยู่ที่ประมาณ 640 HV ดังภาพที่ 39 แสดงค่าความแข็งบริเวณชั้นเคลือบบอโรไนต์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอโรไนต์ที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง จากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็ก



ภาพที่ 38 รอยกดจากการทดสอบความแข็งบริเวณชั้นเคลือบบอโรไนต์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอโรไนต์ที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง จากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็กที่เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C (ก) ก่อนการกัดกรด และ (ข) หลังการกัดกรด



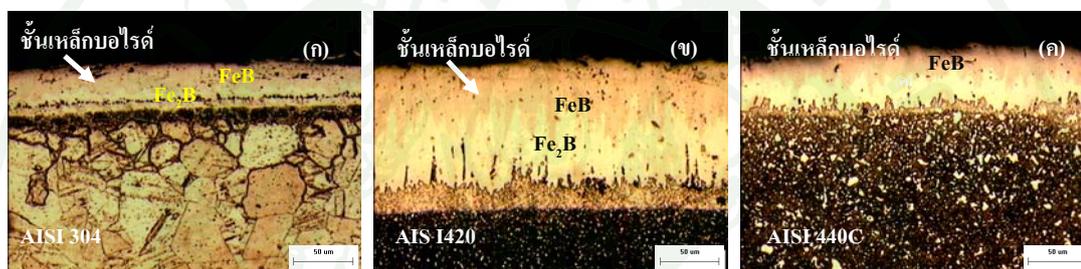
ภาพที่ 39 ค่าความแข็งบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้ง ที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง จากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็ก

วิจารณ์

1. โครงสร้างจุลภาคและสมบัติของชั้นเคลือบบอไรด์

จากการทดลองเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ด้วยกระบวนการบอไรดิ้งในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรซิลิกอน 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 - 1273 เคลวิน เป็นเวลา 1 - 9 ชั่วโมง เกิดการแพร่อะตอมของธาตุโบรอนเข้าสู่ผิวเหล็ก รวมตัวกับอะตอมของธาตุเหล็กเกิดเป็นเหล็กสารประกอบเหล็กบอไรด์ชั้น (Child *et al.*, 1985) เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างชั้นเคลือบบอไรด์ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่า มีสเปกตรัมของสารประกอบ FeB และ Fe₂B บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ดังแสดงในภาพที่ 19 27 และ 35 ตามลำดับ และเมื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในภาพที่ 20 28 และ 36 ตามลำดับ พบว่าชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมทั้ง 3 ชนิด เป็นชนิดเฟสคู่ของ FeB และ Fe₂B โดยชั้นของ FeB (สีเข้ม) จะอยู่ชั้นนอกสุด และ Fe₂B (สีอ่อน) อยู่ถัดเข้ามา ซึ่งสามารถพิจารณาได้อย่างชัดเจนเมื่อชั้นเคลือบบอไรด์มีความหนาเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 40 (ก) (ข) และ (ค) แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์ที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง โดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ซึ่งชั้นเคลือบบอไรด์ที่ได้มีลักษณะความหนาที่ค่อนข้างเรียบและสม่ำเสมอ โดยเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ได้ชั้นเคลือบบอไรด์ที่มีลักษณะความหนาที่เรียบและสม่ำเสมอที่สุด เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C รองลงมา และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 มีลักษณะฟันปลามากที่สุด เนื่องจากธาตุโครเมียมที่มีปริมาณสูงในเหล็กกล้าไร้สนิมทั้ง 3 ชนิด โดยธาตุโครเมียมไม่สามารถละลายในชั้นเหล็กบอไรด์และส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยารวมตัวของโบรอน ทำให้ชั้นเคลือบบอไรด์มีลักษณะความหนาที่เรียบและสม่ำเสมอ อีกทั้งธาตุนิกเกิลในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ส่งผลให้โครงสร้างฟันปลาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่เชื่อมกันและให้ความหนาของชั้นเคลือบที่สม่ำเสมอ (Davis, 2002) โดยเมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม พบว่าเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 AISI 440C และ AISI 304 มีปริมาณธาตุโครเมียมซึ่งเป็นธาตุผสมหลัก 12.15 16.59 และ 18.26 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ นอกจากนี้

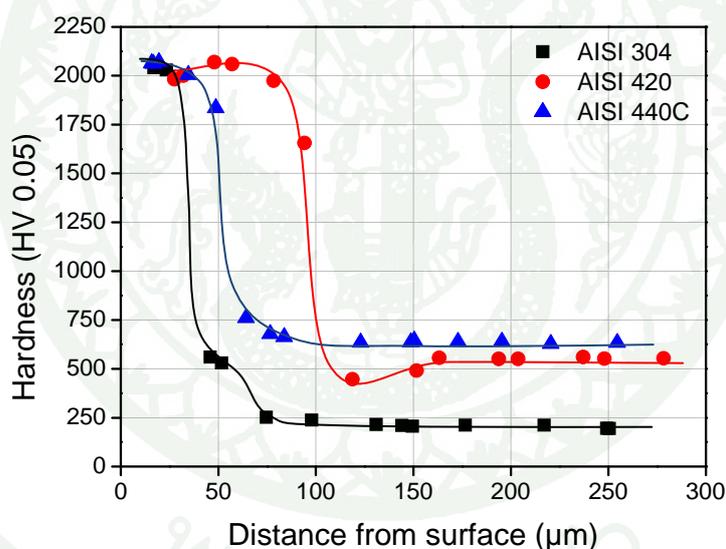
ในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ยังมีนิกเกิลเป็นธาตุผสมรองถึง 8.65 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งธาตุผสมเหล่านี้ส่งผลต่อลักษณะของชั้นเคลือบบอไรด์ให้มีความหนาที่เรียบและสม่ำเสมอ ส่งผลต่อลักษณะของชั้นเคลือบบอไรด์ให้ชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 AISI 440C และ AISI 304 มีลักษณะความหนาที่เรียบและสม่ำเสมอมากขึ้น ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามในเหล็กกล้าไร้สนิมทั้ง 3 ชนิด ล้วนแล้วแต่มีธาตุโครเมียมผสมในปริมาณมาก จึงส่งผลให้ชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมทั้ง 3 ชนิด มีลักษณะชั้นเคลือบบอไรด์ที่ได้มีลักษณะความหนาที่ค่อนข้างเรียบและสม่ำเสมอ



ภาพที่ 40 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์ที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงบนเหล็กกล้าไร้สนิม (ก) AISI 304 (ข) AISI 420 และ (ค) AISI 440C

นอกจากนี้ได้ชั้นเคลือบบอไรด์ยังพบบริเวณที่มีธาตุผสมสะสมในปริมาณสูง โดยในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 มีบริเวณที่มีนิกเกิลสูงอยู่ติดเข้ามาจากชั้น Fe_2B และบริเวณที่มีโครเมียมสูงอยู่ระหว่างบริเวณที่มีนิกเกิลสูงและเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ในขณะที่ในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 และ AISI 440C พบบริเวณที่มีโครเมียมสูงอยู่ติดเข้ามาจากชั้น Fe_2B หรือก็คืออยู่ระหว่างชั้น Fe_2B และเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม แต่ไม่พบบริเวณที่มีนิกเกิลสูงดังเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 และ AISI 440C ไม่มีนิกเกิลเป็นส่วนผสม ซึ่งวิเคราะห์โดยเครื่องวิเคราะห์ธาตุพบสเปกตรัมของธาตุนิกเกิลเด่นชัดในบริเวณที่มีนิกเกิลสูงในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ดังแสดงในภาพที่ 21 (ก) และสเปกตรัมของธาตุโครเมียมเด่นชัดในบริเวณที่มีโครเมียมสูงในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ดังแสดงในภาพที่ 21 (ข) 29 และ 37 ตามลำดับ นั่นคือในบริเวณที่มีนิกเกิลสูงมีปริมาณธาตุนิกเกิลผสมมาก

ถึง 15.28 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และในบริเวณที่มีโครเมียมสูงมีปริมาณธาตุโครเมียมผสมมากถึง 41.13 35.21 และ 21.08 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 440C และ AISI 420 ตามลำดับ เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมทั้ง 3 ชนิด มีโครเมียมเป็นธาตุผสมหลัก และในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 มีนิกเกิลเป็นธาตุผสมรอง อีกทั้งธาตุผสมอย่างนิกเกิลและโครเมียมไม่สามารถละลายในชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้น ธาตุนิกเกิลและธาตุโครเมียมในชั้นบอไรด์จึงถูกดันเข้ามาในเนื้อเหล็ก ส่งผลให้สามารถพบบริเวณที่มีนิกเกิลและโครเมียมสูงในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 (Yoon *et al.*, 1999) และพบบริเวณที่มีโครเมียมสูงในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 และ AISI 440C โดยปริมาณโครเมียมที่พบในบริเวณโครเมียมสูงนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณโครเมียมเดิมในเหล็กเนื้อพื้น



ภาพที่ 41 ความแข็งบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นระยะเวลา 9 ชั่วโมง

จากการทดสอบความแข็งบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการเคลือบผิวบอไรด์ในอ่างเกลือบอแรกซ์ ที่เติมเฟอร์โรซิลิกอน 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่ากระบวนการบอไรด์สามารถเพิ่มความแข็งให้กับผิวเหล็กกล้าไร้สนิม จากการแพร่อะตอมโบรอนเข้าสู่ผิวของเหล็ก โดยเริ่มแพร่จากที่ผิวเข้าสู่เนื้อเหล็ก

ทำให้บริเวณผิวของเหล็กที่โบรอนแพร่ไปถึงมีค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น (Sinha and Bohn, 1994) โดยชั้นเคลือบบอไรด์ FeB และ Fe₂B บนเหล็กกล้าไร้สนิมทั้ง 3 ชนิด ที่เกิดขึ้นมีค่าความแข็งที่สูงมากถึง 2000 HV ต่อจากนั้นค่าความแข็งจะลดลงเมื่อทดสอบลึกจากผิวเข้ามาบริเวณที่มีธาตุผสมสะสมจากการแพร่ (Transition zone) ค่าความแข็งจะลดลงมาที่ประมาณ 550 HV ซึ่งเป็นบริเวณที่มีธาตุ निकเกิดสูงและบริเวณที่มีธาตุโครเมียมสูง เนื่องมาจากธาตุ निकเกิดและโครเมียมไม่สามารถละลายในชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้น ธาตุ निकเกิดและโครเมียมในชั้นเคลือบบอไรด์จึงถูกดันเข้ามาในเนื้อเหล็กทำให้เกิดเป็นบริเวณที่มีธาตุ निकเกิดสูงและบริเวณที่มีธาตุโครเมียมสูงในบริเวณใต้ชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และบริเวณที่มีธาตุโครเมียมสูงในบริเวณใต้ชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 และ AISI 440C และท้ายที่สุดเป็นค่าความแข็งของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C มีความแข็งประมาณ 230 560 และ 640 HV ดังภาพที่ 39 แสดงค่าความแข็งบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นระยะเวลา 9 ชั่วโมง เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 มีโครงสร้างเป็นออสเทนไนท์ มีค่าความแข็งที่ต่ำ และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 และ AISI 440C มีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ มีค่าความแข็งสูง โดยปริมาณคาร์บอนในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C สูงกว่าในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ส่งผลให้เนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C มีค่าความแข็งที่มากกว่าเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420

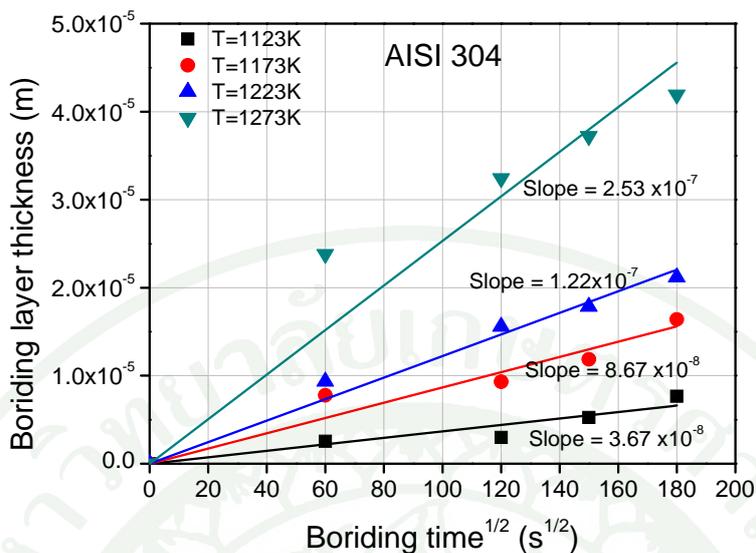
2. อิทธิพลขององค์ประกอบทางเคมีของเหล็กต่อความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์

จากการทดลองเคลือบบอไรด์บนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ด้วยกระบวนการบอไรดิ้ง ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรซิลิกอน 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 - 1273 เคลวิน เป็นเวลา 1 - 9 ชั่วโมง เมื่อพิจารณาความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่อุณหภูมิและเวลาเดียวกันของเหล็กกล้าไร้สนิมทั้ง 3 ชนิด พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กส่งผลต่อความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ โดยองค์ประกอบทางเคมีที่มีธาตุผสมมากส่งผลให้ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์บาง เนื่องจากธาตุผสมจะขัดขวางการแพร่ของอะตอมโบรอนเข้าสู่ผิวเหล็กทำให้แพร่ได้ยาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งธาตุโครเมียมที่เป็นธาตุผสมหลักในเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งธาตุโครเมียมนี้ไม่สามารถละลายได้ในชั้นเคลือบบอไรด์และมีผลต่อ

ปฏิกิริยารวมตัวของโบรอน จึงเป็นธาตุหลักที่มีผลให้ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ลดลง โดยโครเมียมในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 AISI 440C และ AISI 304 มีปริมาณมากขึ้นตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีธาตุผสมอื่นที่มีปริมาณมากพอที่จะส่งผลให้ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ลดลง เช่น ในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 มีธาตุ निकิลและแมงกานีส และในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C มีธาตุคาร์บอนและโมลิบดีนัม ซึ่งธาตุผสมเหล่านี้ไม่สามารถละลายได้ในชั้นเคลือบบอไรด์ และส่งผลให้ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ลดลงอีกด้วย (Davis, 2002) จากปริมาณธาตุโครเมียม และธาตุผสมผสมดังกล่าวนี้ส่งผลให้ที่เงื่อนไขอุณหภูมิและเวลาเดียวกันได้ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 AISI 440C และ AISI 304 ลดลงตามลำดับ ดังภาพที่ 18 26 และ 34 แสดงความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 - 1273 เคลวิน เป็นเวลา 1 - 9 ชั่วโมง และภาพที่ 38 (ก) (ข) และ (ค) แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์ที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง โดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C โดยสามารถวัดความหนาได้ มีค่า 41.9 59.2 และ 109.8 ไมโครเมตร ตามลำดับ

3. อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเคลือบต่อความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์

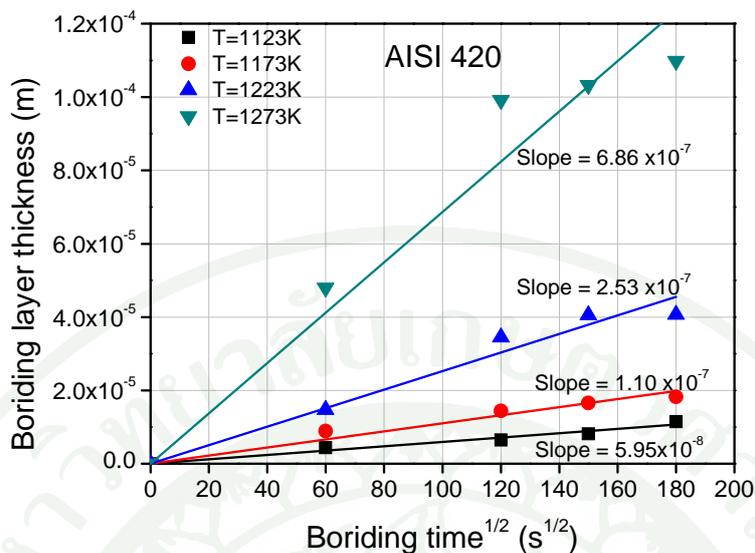
จากการทดลองเคลือบบอไรด์บนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ด้วยกระบวนการบอไรดิ้ง ในอ่างเคลือบบอไรด์ที่เติมเฟอร์โรซิลิกอน 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 - 1273 เคลวิน เป็นเวลา 1 - 9 ชั่วโมง พบว่าชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมทั้ง 3 ชนิด มีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเคลือบสูงขึ้น ดังภาพที่ 18 26 และ 34 แสดงความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ ที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 - 1273 เคลวิน เป็นเวลา 1 - 9 ชั่วโมง บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C เนื่องจากอะตอมโบรอนมีเวลาและพลังงานในการแพร่ซึมมากขึ้น โดยเวลาที่ใช้ในการเคลือบและความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์มีความสัมพันธ์กันแบบพาราโบลา และความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่เพิ่มขึ้นนั้นมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับรากที่สองของเวลาที่ใช้ในการเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ดังแสดงในภาพที่ 42 - 44 โดยความ



ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์และรากที่สองของเวลาที่ใช้ในการเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 - 1273 เคลวิน

ตารางที่ 6 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในกระบวนการบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304

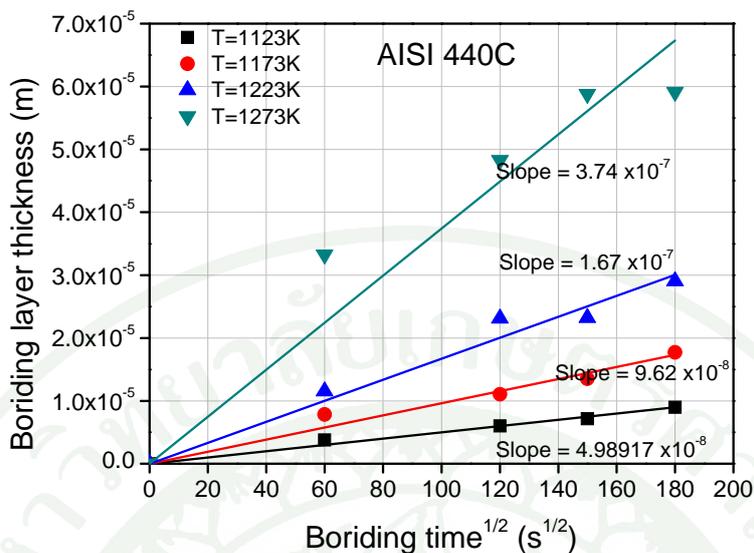
อุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบ (เคลวิน)	อัตราการเปลี่ยนแปลงคงที่ของชั้นเคลือบ ; k (ความชัน) (เมตร/รากที่สองของวินาที)	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ; K (ตารางเมตร/วินาที)
1123	3.67×10^{-8}	1.35×10^{-15}
1173	8.67×10^{-8}	7.50×10^{-15}
1223	1.22×10^{-7}	1.50×10^{-14}
1273	2.53×10^{-7}	6.41×10^{-14}



ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์และรากที่สองของเวลาที่ใช้ในการเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 - 1273 เคลวิน

ตารางที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในกระบวนการบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420

อุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบ (เคลวิน)	อัตราการเปลี่ยนแปลงคงที่ของชั้นเคลือบ ; k (ความชัน) (เมตร/รากที่สองของวินาที)	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ; K (ตารางเมตร/วินาที)
1123	5.95×10^{-8}	3.54×10^{-15}
1173	1.10×10^{-7}	1.22×10^{-14}
1223	2.53×10^{-7}	6.39×10^{-14}
1273	6.86×10^{-7}	4.71×10^{-13}



ภาพที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์และรากที่สองของเวลาที่ใช้ในการเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 - 1273 เคลวิน

ตารางที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในกระบวนการบอไรดิ้งบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C

อุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบ (เคลวิน)	อัตราการเปลี่ยนแปลงคงที่ของชั้นเคลือบ ; k (ความชัน) (เมตร/รากที่สองของวินาที)	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ; K (ตารางเมตร/วินาที)
1123	4.99×10^{-8}	2.49×10^{-15}
1173	9.62×10^{-8}	9.25×10^{-15}
1223	1.67×10^{-7}	2.79×10^{-14}
1273	3.74×10^{-7}	1.40×10^{-13}

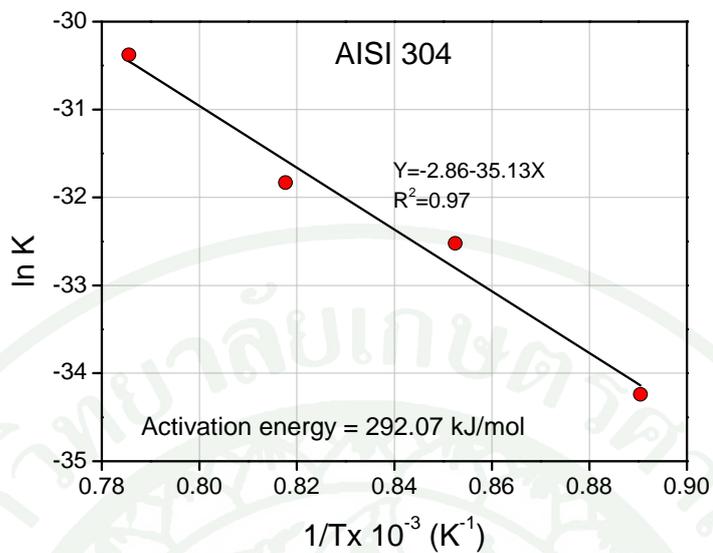
หนาที่เพิ่มขึ้นของชั้นเคลือบนั้นเป็นไปตามทฤษฎีการแพร่ซิม (Diffusion theory) ซึ่งสอดคล้องกับสมการการแพร่ซิม ดังแสดงในสมการ (1) และสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (K) ได้จากความชันยกกำลังสองของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์และรากที่สองของเวลาที่ใช้ในการเคลือบ ดังตารางที่ 6 – 8 แสดงค่าคำนวณหาค่า สัมประสิทธิ์การแพร่ (K) ในการเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 - 1273 เคลวิน นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ (T) ซึ่งสอดคล้องกับสมการ Arrhenius ดังแสดงในสมการ (2) โดยความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ขึ้นกับ

อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเคลือบสูงซึ่งเป็นไปตามหลักของจลนพลศาสตร์ (Saduman et al., 2004)

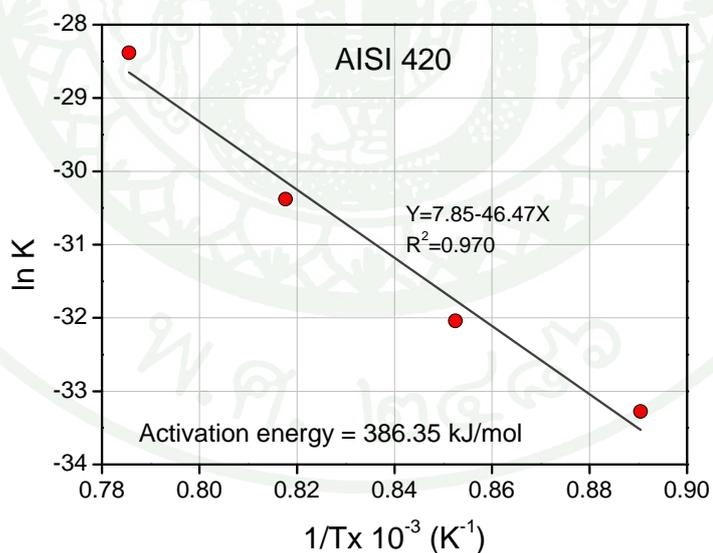
4. จลนพลศาสตร์

จากการทดลองเคลือบบอโรคาร์บอนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ด้วยกระบวนการบอโรดิ้งในอ่างเคลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรซิลิกอน 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 - 1273 เคลวิน เป็นเวลา 1 - 9 ชั่วโมง พบว่าจลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอโรดิ้งสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการการแพร่ ดังสมการ (1) และสมการ Arrhenius ดังสมการ (2) โดยเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบส่งผลต่อความหนาของชั้นเคลือบบอโรคาร์บอนเหล็กกล้าไร้สนิมทั้ง 3 ชนิด ซึ่งความหนาของชั้นเคลือบบอโรคาร์บอนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวเพิ่มขึ้น เนื่องจากอะตอมโบรอนมีเวลาและพลังงานในการแพร่ซึมมากขึ้น

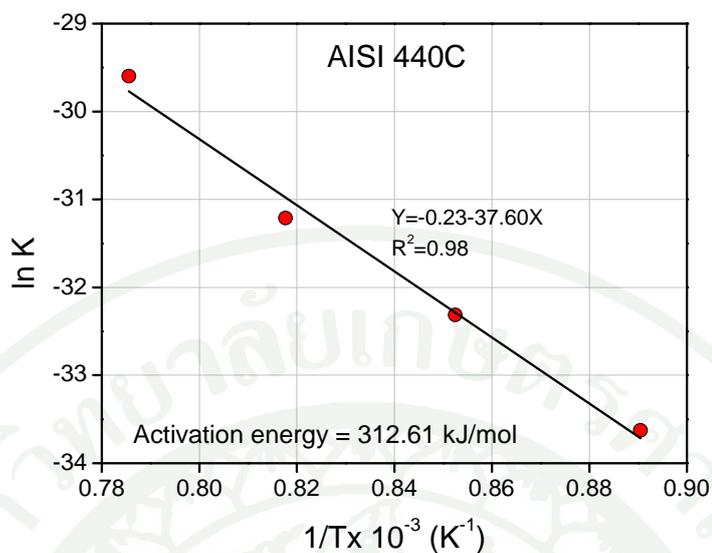
นอกจากนี้สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ดังแสดงในตารางที่ 6 - 8 จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบบอโรคาร์บอนและรากที่สองของเวลาที่ใช้ในการเคลือบบอโรคาร์บอนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 - 1273 เคลวิน ดังแสดงในภาพที่ 42 - 44 และจากการจัดรูปของสมการ Arrhenius ดังสมการ (3) พบว่าสามารถคำนวณค่าพลังงานกระตุ้นการแพร่และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ได้จากค่าความชันและจุดตัดแกนของกราฟเส้นตรงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ($\ln K$) และส่วนกลับของอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบเหล็กบอโรคาร์บอน ($1/T$) บนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ดังแสดงในภาพที่ 45 - 47 โดยในกระบวนการเคลือบเหล็กบอโรคาร์บอนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ด้วยกระบวนการบอโรดิ้งในอ่างเคลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรซิลิกอน 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 - 1273 เคลวิน เป็นเวลา 1 - 9 ชั่วโมง สามารถคำนวณค่าพลังงานกระตุ้นและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ได้มีค่าดังแสดงในตารางที่ 9 ซึ่งจากหลักการจลนพลศาสตร์และสมการทั่วไปที่ใช้ในการทำนายความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอโรคาร์บอน ดังสมการ (4) จะเห็นได้ว่าค่าพลังงานกระตุ้นการแพร่



ภาพที่ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ($\ln K$) และส่วนกลับของอุณหภูมิ ($1/T$) ที่ใช้ในกระบวนการเคลือบบอโรนบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304



ภาพที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ($\ln K$) และส่วนกลับของอุณหภูมิ ($1/T$) ที่ใช้ในกระบวนการเคลือบบอโรนบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420



ภาพที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ($\ln K$) และส่วนกลับของอุณหภูมิ ($1/T$) ที่ใช้ในกระบวนการเคลือบอบโร้ดบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C

ตารางที่ 9 พลังงานกระตุ้นและสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ของกระบวนการอบโร้ดสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C

เหล็ก	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ ; K_0 (ตารางเมตร/วินาที)	ค่าพลังงานกระตุ้น; Q (กิโลจูล/โมล)
AISI 304	0.057	292.07
AISI 420	2565.73	386.35
AISI 440C	0.79	312.61

แปรผกผันกับความหนาของชั้นเคลือบอบโร้ด โดยค่าพลังงานกระตุ้นน้อยจะส่งผลให้ชั้นเคลือบอบโร้ดมีความหนามาก แต่จากการทดลองพบว่าค่าพลังงานกระตุ้นการแพร่ในกระบวนการเคลือบอบโร้ดบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 440C และ AISI 420 นั้นมีค่าเพิ่มขึ้น ตามลำดับ ในขณะที่ความหนาของชั้นเคลือบอบโร้ดกลับมีค่าลดลง เนื่องจากตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าความหนาของชั้นเคลือบอบโร้ดนั้นมีได้มีเพียงค่าพลังงานกระตุ้นเท่านั้น แต่ยังคงพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์

การแพร่กระจายที่ซึ่งนับเป็นอีกตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อความหนาของชั้นเคลือบบอโรไซด์และสมการทั่วไปที่ใช้ในการทำนายความหนาของชั้นเคลือบบอโรไซด์

อย่างไรก็ตามปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนาของชั้นเคลือบบอโรไซด์ที่เกิดขึ้นนั้นมีได้มีเพียงอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเคลือบตามทฤษฎีการแพร่ของอะตอมเท่านั้น แต่ยังคงขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอะตอมโบรอนภายในเตาและองค์ประกอบทางเคมีของเหล็ก โดยเนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมทั้ง 3 ชนิด เป็นเหล็กอัลลอยด์ที่มีโครเมียมเป็นธาตุผสมหลักและอะตอมของธาตุโครเมียมอยู่ในโครงสร้างอะตอมแบบแทนที่ในอะตอมของธาตุเหล็ก แต่ธาตุโครเมียมมีขนาดอะตอมที่เล็กกว่าธาตุเหล็ก ได้โครงสร้างอะตอมที่มีขนาดช่องว่างอะตอมที่ใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ค่าพลังงานกระตุ้นในการเคลื่อนที่ของอะตอมโบรอน (อะตอมของธาตุโบรอนแพร่เข้าไปแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างอะตอม) แพร่ไปยังช่องว่างถัดไปมีค่าลดลง นอกจากนี้ธาตุโครเมียมไม่สามารถละลายได้ในชั้นเคลือบบอโรไซด์และยังเป็นตัวขัดขวางการแพร่ของอะตอมโบรอน ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายที่มีค่าลดลงและอะตอมโบรอนแพร่เข้าสู่ชิ้นงานได้ช้าลง โดยคาดว่าในการแพร่ของอะตอมโบรอนเข้าสู่ผิวเหล็กนั้น เหล็กที่มีองค์ประกอบของธาตุที่มีธาตุผสมอย่างโครเมียมในปริมาณมากจะส่งผลให้ค่าพลังงานกระตุ้นและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายที่มีค่าลดลง และจากการทดลองพบว่าค่าพลังงานกระตุ้นและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายที่ในกระบวนการเคลือบบอโรไซด์บนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 440C และ AISI 420 มีค่าพลังงานกระตุ้นและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายที่ลดลงตามปริมาณโครเมียมในเหล็กที่มากขึ้น ตามลำดับ ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กส่งผลต่อค่าพลังงานกระตุ้นและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายที่ใช้ในการทำนายความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอโรไซด์บนผิวเหล็กต่างชนิดกัน

ดังนั้นการสามารถสร้างสมการทั่วไปที่ใช้ในการทำนายความหนาของชั้นเคลือบบอโรไซด์ต้องพิจารณาจากค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy, Q) และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (K_0) และสามารถสร้างสมการทั่วไปที่ใช้ในการทำนายความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอโรไซด์บนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ด้วยกระบวนการบอโรดิ้งในอ่างเกลือบอ-แรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรซิลิกอน 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 - 1273 เคลวิน เป็นเวลา 1 - 9 ชั่วโมง ได้ดังสมการ (5) – (7)

$$\text{AISI 304 ;} \quad d = \left\{ 0.057t \exp \left[-35.13 \left(\frac{1000}{T} \right) \right] \right\}^{1/2} \quad (5)$$

$$\text{AISI 420 ;} \quad d = \left\{ 2562.73t \exp \left[-46.47 \left(\frac{1000}{T} \right) \right] \right\}^{1/2} \quad (6)$$

$$\text{AISI 440C ;} \quad d = \left\{ 0.79t \exp \left[-37.60 \left(\frac{1000}{T} \right) \right] \right\}^{1/2} \quad (7)$$

เมื่อ d คือ ความหนาของชั้นเคลือบ (เมตร)
 t คือ เวลาที่ใช้ในการเคลือบ (วินาที)
 และ T คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบ (เคลวิน)

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากงานวิจัยจลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอโรไดงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ในเตาอ่งเกลือที่สภาวะบรรยากาศปกติ โดยมีเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวและเฟอร์โรซิลิกอน 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นตัวรีดิวเซอร์ ทดลองที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 – 1273 เคลวิน เป็นเวลา 1 – 9 ชั่วโมง สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C สามารถทำการเคลือบผิวเหล็กบอโรได้ ในกระบวนการบอโรไดงแบบอ่งเกลือโดยใช้เฟอร์โรซิลิกอน 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นรีดิวเซอร์ ซึ่งชั้นเคลือบบอโรที่ที่เกิดขึ้นเป็นชนิดเฟสคู่ FeB และ Fe₂B และมีลักษณะความหนาที่เรียบและสม่ำเสมอโดยมีความแข็งสูงถึง 2000 HV
2. ชั้นเคลือบบอโรที่เกิดขึ้นบนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C มีความหนาของชั้นเคลือบเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามหลักการของการแพร่ของอะตอมในสถานะของแข็ง
3. องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กส่งผลต่อลักษณะและความหนาของชั้นเคลือบบอโร โดยธาตุผสมส่วนใหญ่ในเหล็กไม่สามารถละลายได้ในชั้นเคลือบบอโรที่เกิดขึ้นและจะขัดขวางการแพร่ของอะตอมโบรอน ส่งผลให้ความหนาของชั้นเคลือบบอโรน้อยลงและเกิดบริเวณที่มีธาตุผสมอย่างนิเกิลและโครเมียมสูง นอกจากนี้ยังเป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลให้ลักษณะของชั้นเคลือบบอโรมีความหนาที่เรียบและสม่ำเสมอ
4. จากการทดลองสามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นและสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ของกระบวนการบอโรไดงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 – 1273 เคลวิน เป็นเวลา 1 – 9 ชั่วโมง ได้โดยใช้หลักการทางจลนพลศาสตร์และสมการของ

Arrhenius มีค่าดังตารางที่ 9 ซึ่งในกระบวนการบอโรดิงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C มีค่าพลังงานกระตุ้นการแพร่เท่ากับ 292.07 386.35 และ 312.61 กิโลจูล/โมล ตามลำดับ และมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 0.057 2565.73 และ 0.79 ตารางเมตร/วินาที ตามลำดับ ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการสร้างสมการทั่วไปที่ใช้ในการทำนายความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอโรด์

ข้อเสนอแนะ

ควรทำการวิจัยเปรียบเทียบกระบวนการบอโรดิงด้วยกระบวนการวิธีต่างๆ ในเหล็กชนิดเดียวกัน เพื่อทดสอบหากระบวนการบอโรดิงที่สะดวก เหมาะสม มีประสิทธิภาพต่อการใช้งานมากที่สุด และสามารถลดความหนาของชั้น FeB ซึ่งมีความเปราะและไม่เหมาะสมกับการใช้งานให้บางลงหรือหมดไป เช่น เปลี่ยนสารเคมีที่ใส่ในอ่างเกลือเพื่อให้เกิดการแพร่ซึมสูงสุด และ/หรือ ลดอุณหภูมิของกระบวนการบอโรดิง เพื่อลดการบิดเบี้ยวของชิ้นงานเนื่องจากอุณหภูมิ เปลี่ยนกระบวนการบอโรดิงจากแบบอ่างเกลือไปเป็นแบบแพคเกจและแบบแพคเกจที่มีการใช้กระแสไฟเสริมเพื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิ เวลา ความหนา และการแพร่ของอะตอม โดยศึกษาค่าพลังงานกระตุ้นและสัมประสิทธิ์การแพร่ของกระบวนการเคลือบบอโรด์บนเหล็กนั้นๆ ในแต่ละกระบวนการเพื่อเพิ่มเติมข้อมูล วิเคราะห์ และเปรียบเทียบต่อไป

นอกจากนี้ ในกระบวนการบอโรดิงบนเหล็กกล้าไร้สนิมในกลุ่มออสเทนนิติก พบบริเวณที่มีธาตุผสมอย่างโครเมียมสะสมสูง ซึ่งในการใช้งานที่อุณหภูมิสูงและปล่อยให้เย็นตัวลงอย่างช้าๆ อาจทำให้เกิดการกัดกร่อน เนื่องจากคาร์ไบด์ที่มีโครเมียมอยู่เกิดการตกตะกอนได้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

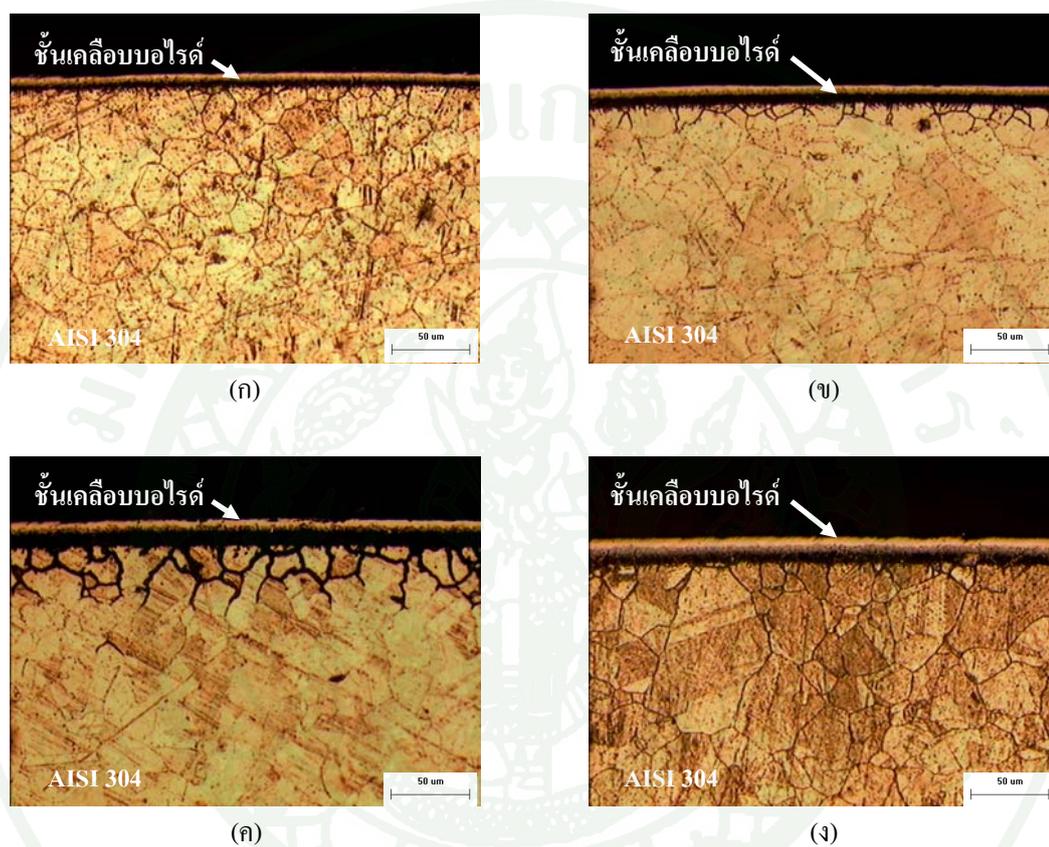
- ณัฐธิดา กลิ่นเกลา. 2551. จลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอไรดิ้งของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 โดยใช้เฟอร์โรซิลิกอนเป็นตัวรีดิวเซอร์. ปรินญาณพนธ์. ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ
- แม่น อมรสิทธิ์ และ สมชัย อัครทิวา. 2546. วัสดุวิศวกรรม. สำนักพิมพ์ท็อป, กรุงเทพฯ. แปลจาก W.F. Smith. **Principles of Materials Science and Engineering**. 3rd ed. McGraw-Hill, New York City
- Arai, T. 1981. Carbide coating process by use of molten borax bath in Japan. **Heat Treating**. 1(2) : 15-22
- Bhadeshia, H.K.D.H. and R.W.K. Honeycombe. 2006. **Steels Microstructure and Properties**. Elsevier Ltd., USA.
- Chandler, H. 1995. Heat treater's guide: practices and procedures for irons and steels. **ASM International**. (2) : 27 - 810.
- Child, H.C., S.A. Plumb and J.J. Mcdermott. 1985. Carbide layer formation on steel in fused borax baths. **Proceeding of Heat Treatment' 84**.
- Davis, J.R. 2002. Boriding. **Surface Hardening of steels**. 10: 213 - 229
- Genel, K. 2005. Boriding kinetics of H13 steel. **Vacuum**. 80: 451 – 457.
- Genel, K., I. Ozbek and C. Bindal. 2003. Kinetics of boriding of AISI W1 steel. **Materials Science and Engineering**. 347: 311 - 314.
- Lingyun, X., W. Xiaochun and W. Hongbin. 2007. Influence of Surface Nano - structured Treatment on Pack Boriding of H13 Steel. **J. Mater. Sci. Technol**. 23: 525 - 528.

- Masteel. 2009. **Stainless Steel – Grade 304**, materials. แหล่งที่มา:
<http://www.azom.com/Details.asp?ArticleID=5046>, 15 มกราคม 2010
- Ozbek, I., S. Sen, M. Ipek and C. Bindal. 2004. A mechanical aspect of borides formed on the AISI 440C stainless – steel. **Vacuum**. 73: 643-648
- Petrova, R.S., N. Suwattananont and V. Samardzic. 2008. The Effect of Boronizing on Metallic Alloys for Automotive Application. **Journal of Materials Engineering and Performance**. 17(3): 304 - 345.
- Porter, D.E. and K.E. Easterling. 1997. **Phase Transformations in Metals in Metals and Alloys**. Chapman & Hall, UK.
- Rouby, M. and P. Blanchard. 1993. Physical and Mechanical Properties of Stainless Steel and Alloys. **Stainless Steel**. 4: 109 - 160
- Saduman, S., S. Ugur and B. Cuma. 2004. An approach to kinetic study of borided steels. **Surface & Coatings Technology**. 191: 274 – 285.
- Sinha, A.K. and P.D. Bohn. 1994. Boriding (Boronizing). **ASM Handbook**. 4: 437 - 447.
- Taktak, S. 2007. Some mechanical properties of borided AISI H13 and 304 steels. **Materials and Design**. 28: 1836 - 1843.
- Ugur, S. 2004. Kinetics of titanium nitride coating deposited by thermo - reactive deposition technique. **Vacuum**. 75: 339 - 345.
- Yoon, J.H., Y.K. Jee and S.Y. Lee. 1999. Plasma paste boronizing treatment of the stainless steel AISI 304. **Surface and Coatings Technology**. 112: 71–75.

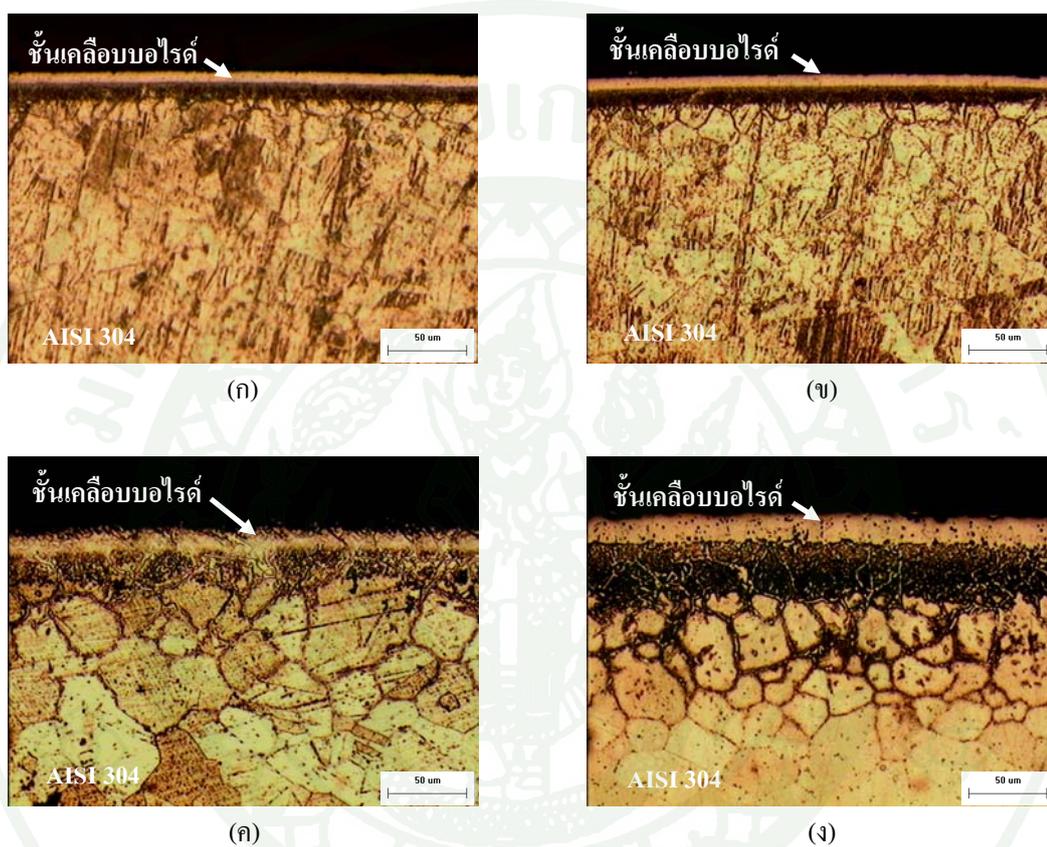


ภาคผนวก

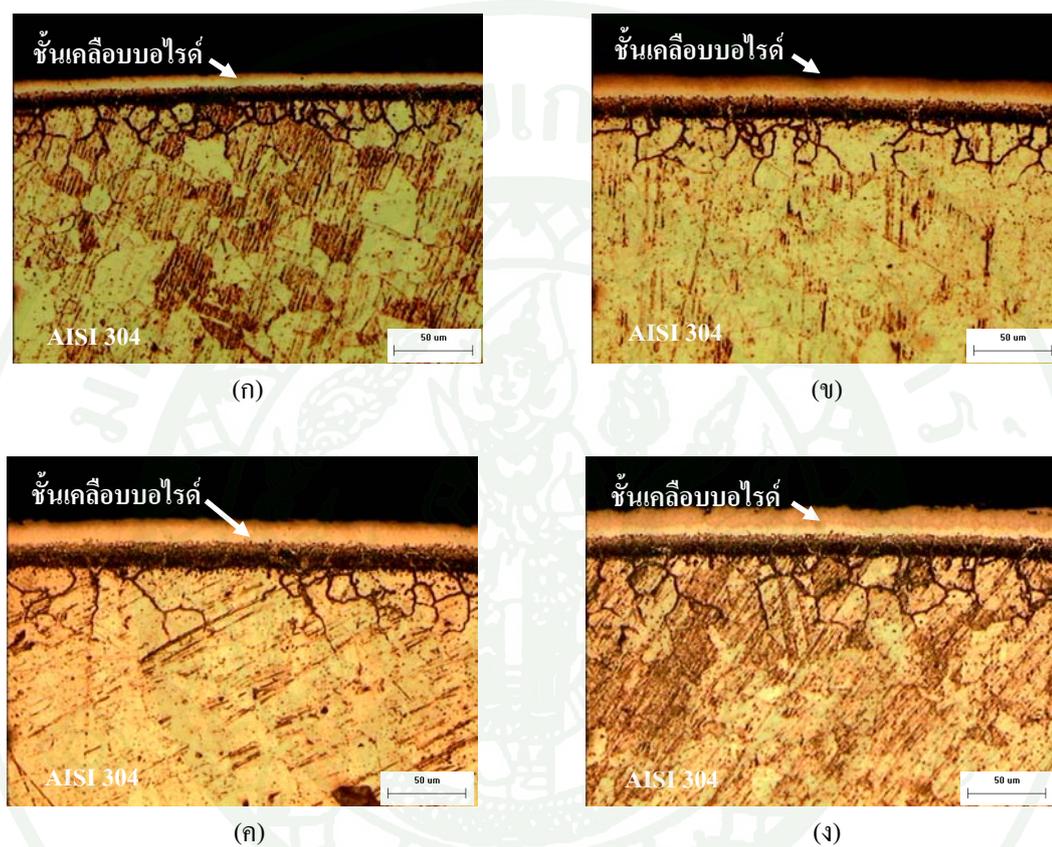




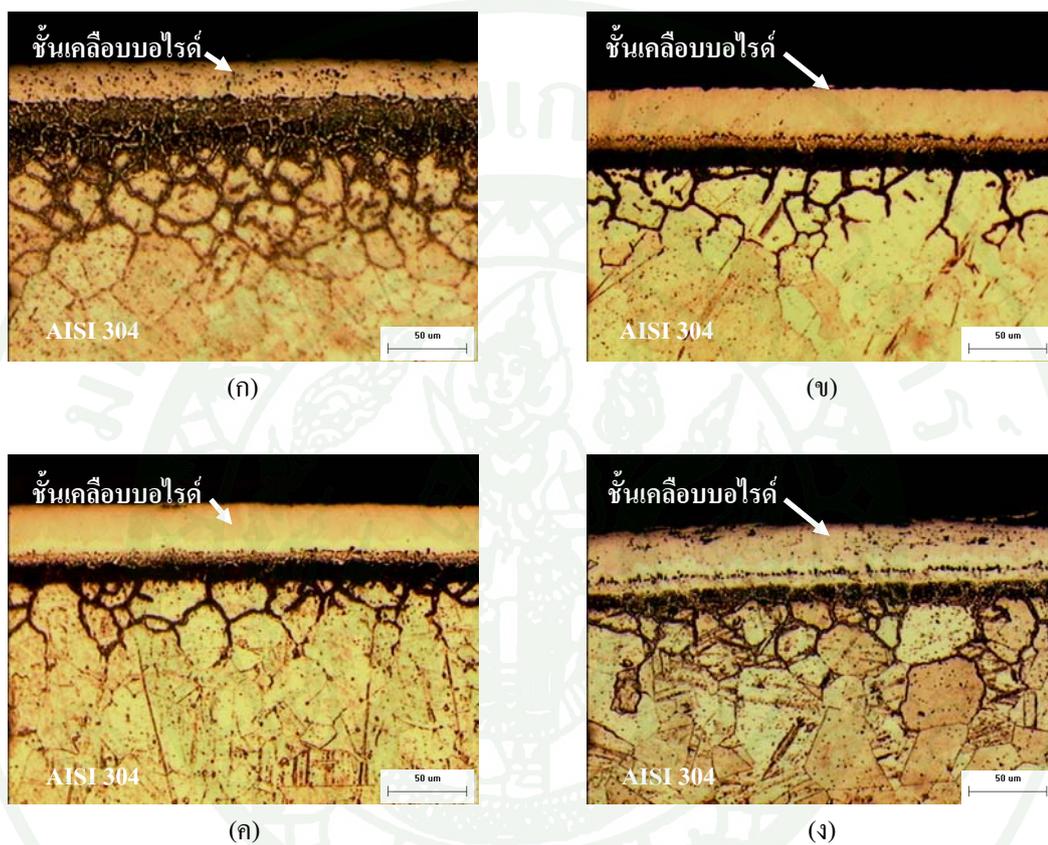
ภาพผนวกที่ ก1 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง (ค) 6.25 ชั่วโมง และ (ง) 9 ชั่วโมง



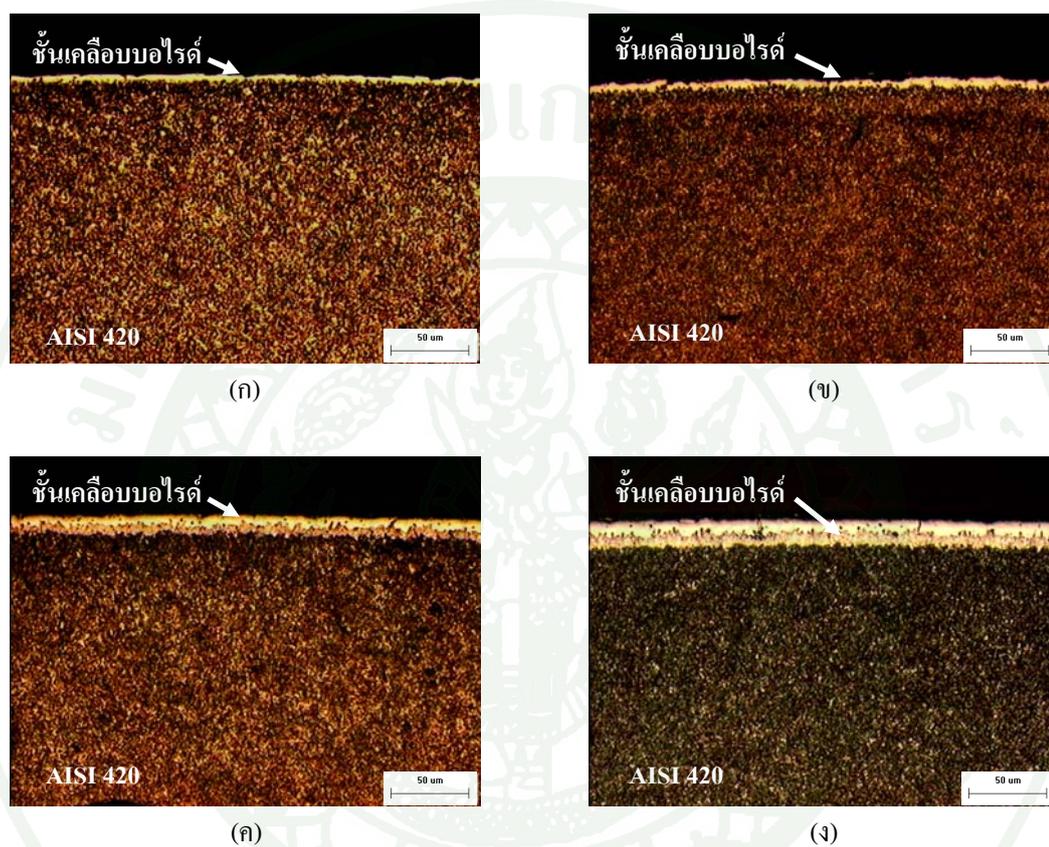
ภาพผนวกที่ ก2 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง (ค) 6.25 ชั่วโมง และ (ง) 9 ชั่วโมง



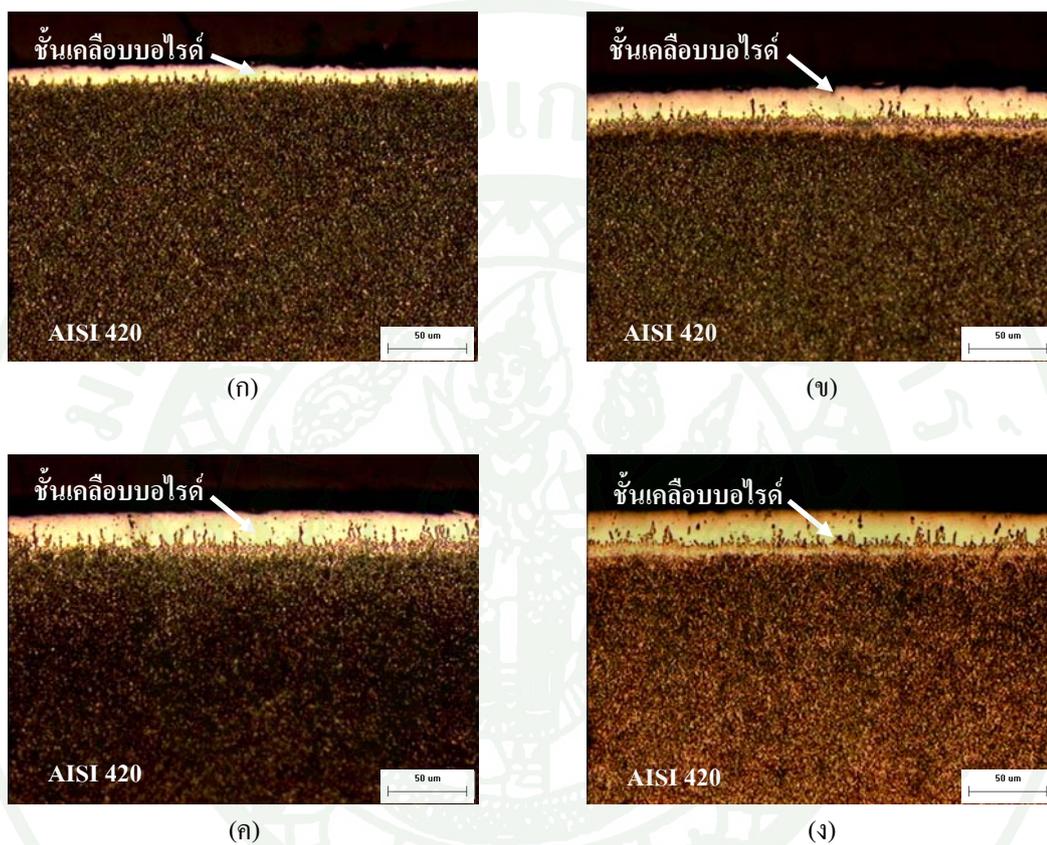
ภาพผนวกที่ ก3 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง (ค) 6.25 ชั่วโมง และ (ง) 9 ชั่วโมง



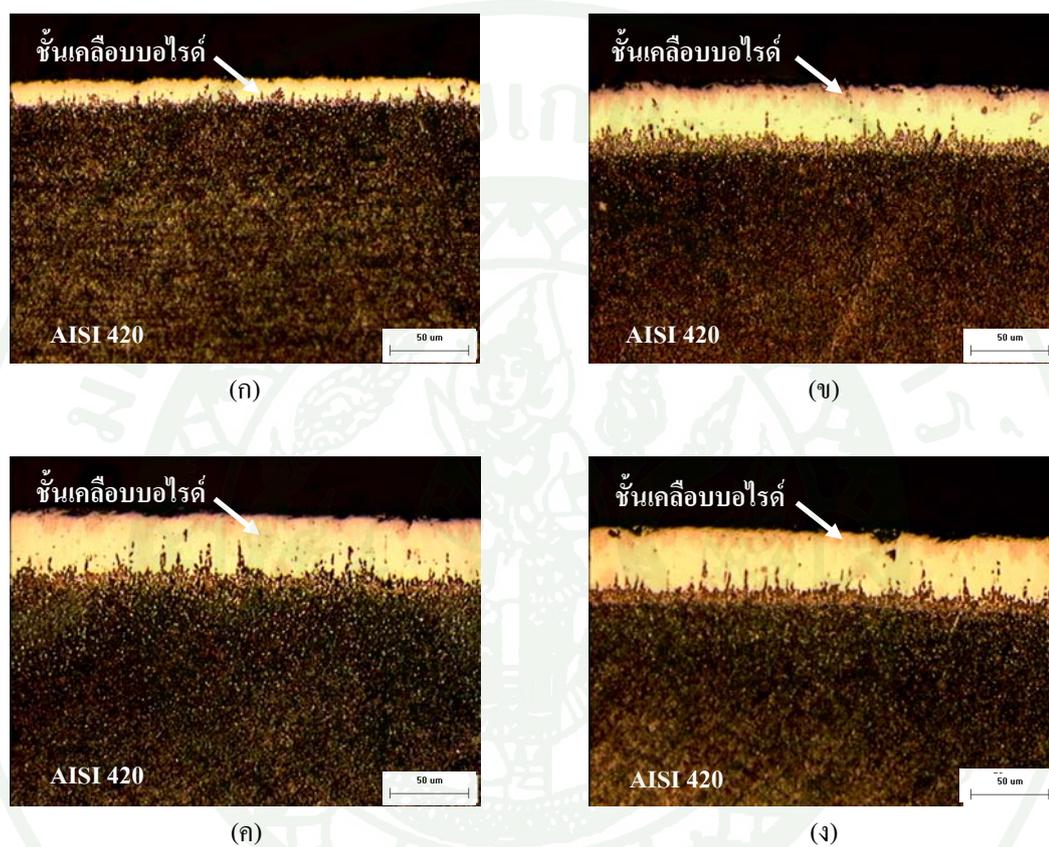
ภาพผนวกที่ ก4 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง (ค) 6.25 ชั่วโมง และ (ง) 9 ชั่วโมง



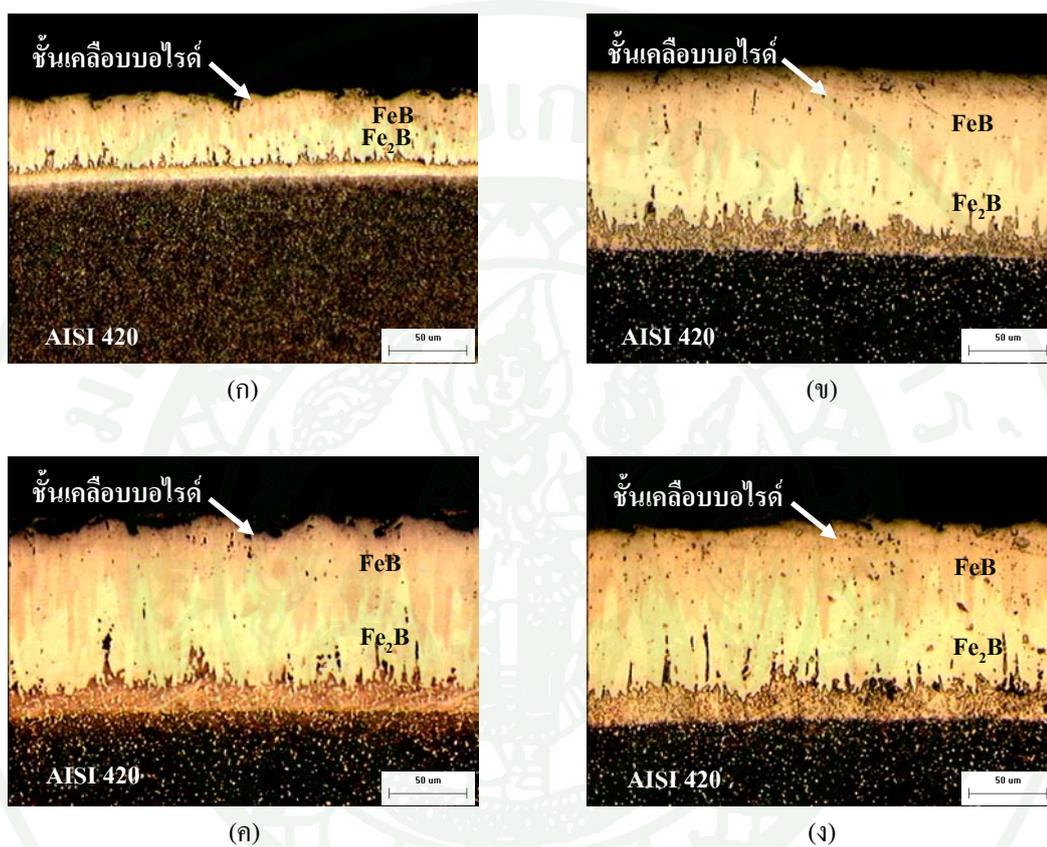
ภาพผนวกที่ ก5 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง (ค) 6.25 ชั่วโมง และ (ง) 9 ชั่วโมง



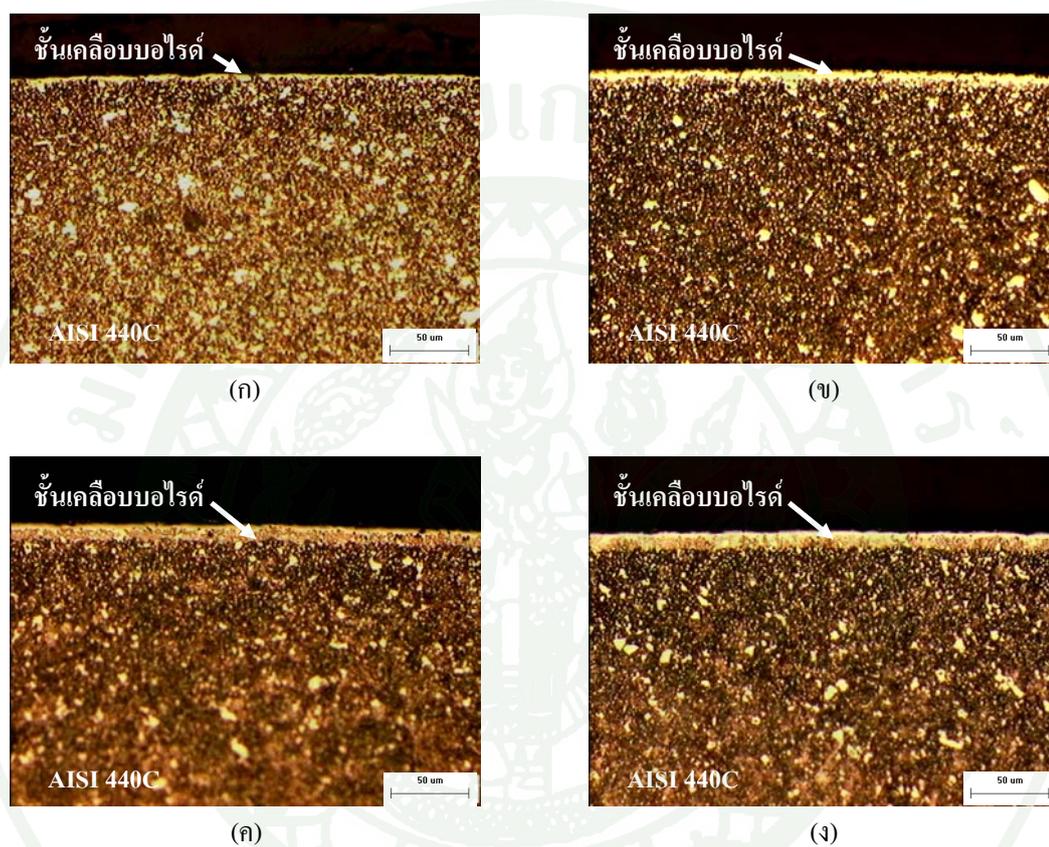
ภาพผนวกที่ 6 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง (ค) 6.25 ชั่วโมง และ (ง) 9 ชั่วโมง



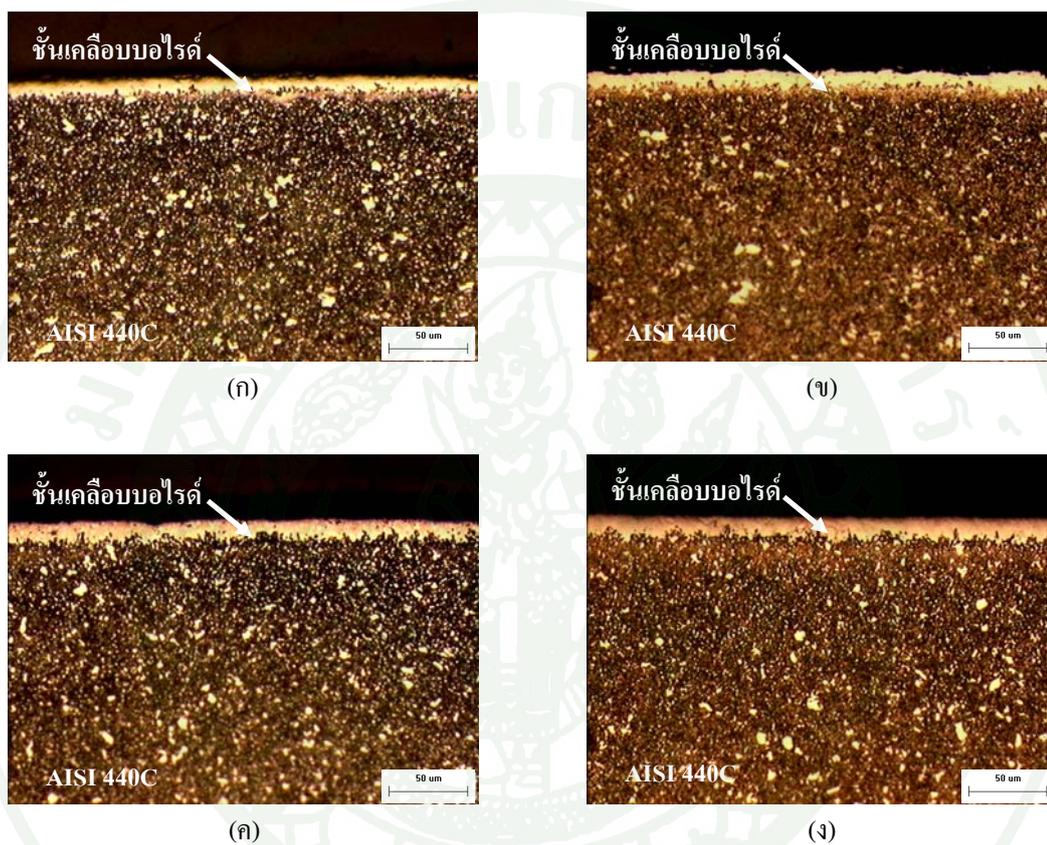
ภาพผนวกที่ ๓7 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง (ค) 6.25 ชั่วโมง และ (ง) 9 ชั่วโมง



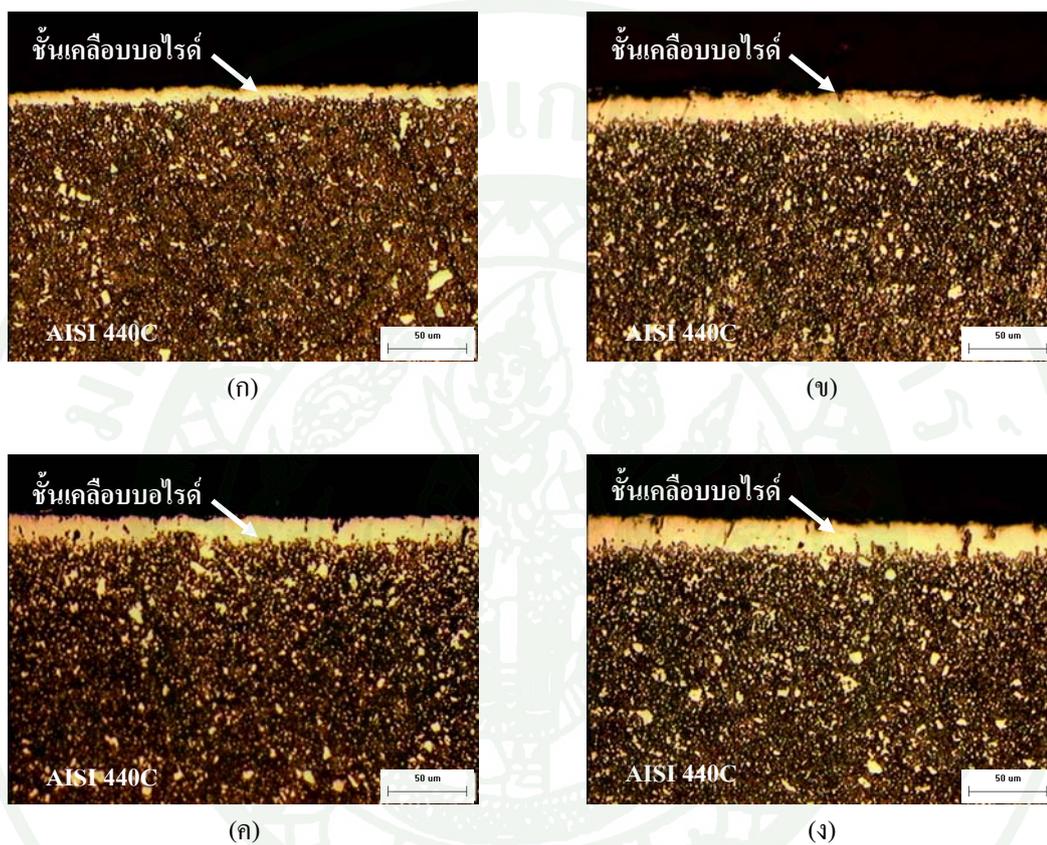
ภาพผนวกที่ 8 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง (ค) 6.25 ชั่วโมง และ (ง) 9 ชั่วโมง



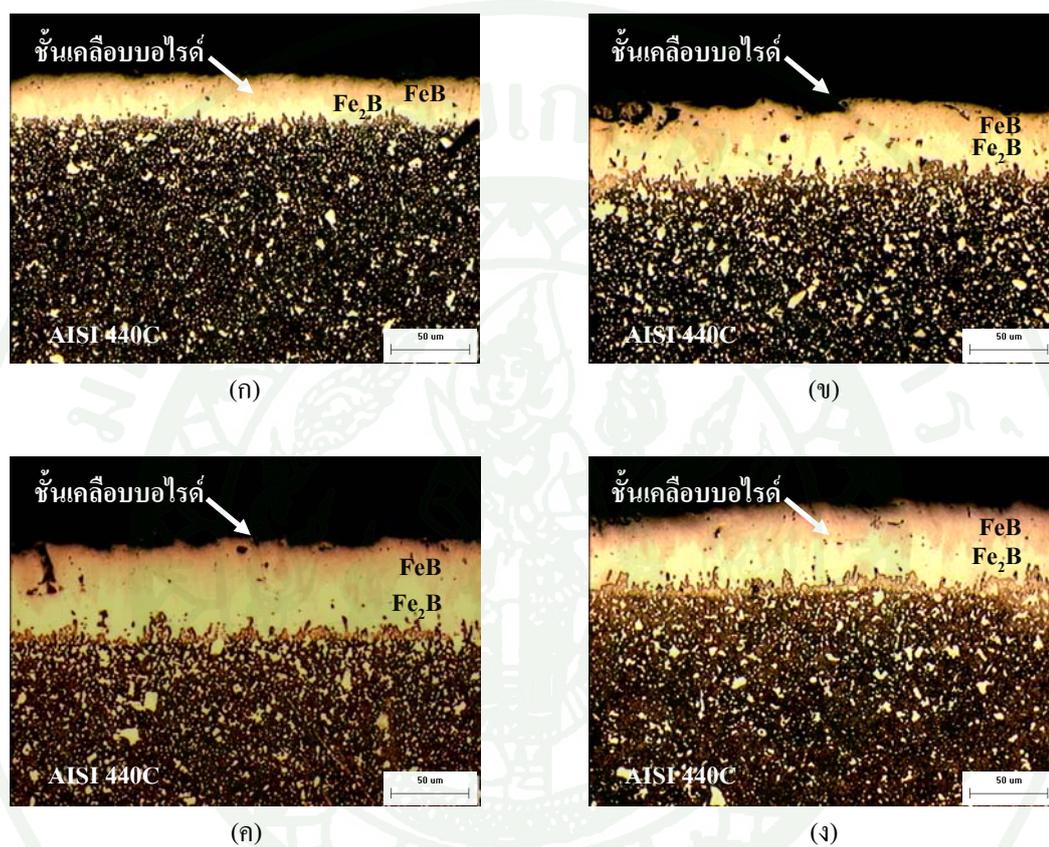
ภาพผนวกที่ ก9 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรต์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง (ค) 6.25 ชั่วโมง และ (ง) 9 ชั่วโมง



ภาพผนวกที่ 10 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรต์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง (ค) 6.25 ชั่วโมง และ (ง) 9 ชั่วโมง



ภาพผนวกที่ ก11 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง (ค) 6.25 ชั่วโมง และ (ง) 9 ชั่วโมง

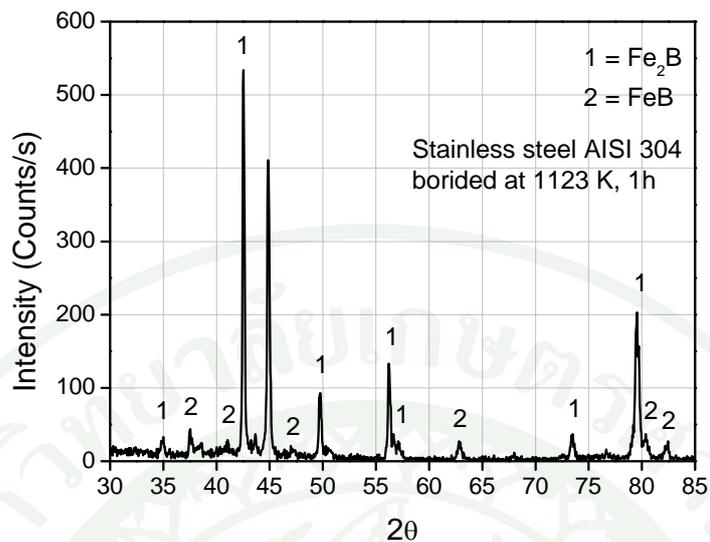


ภาพผนวกที่ ก12 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง (ค) 6.25 ชั่วโมง และ (ง) 9 ชั่วโมง

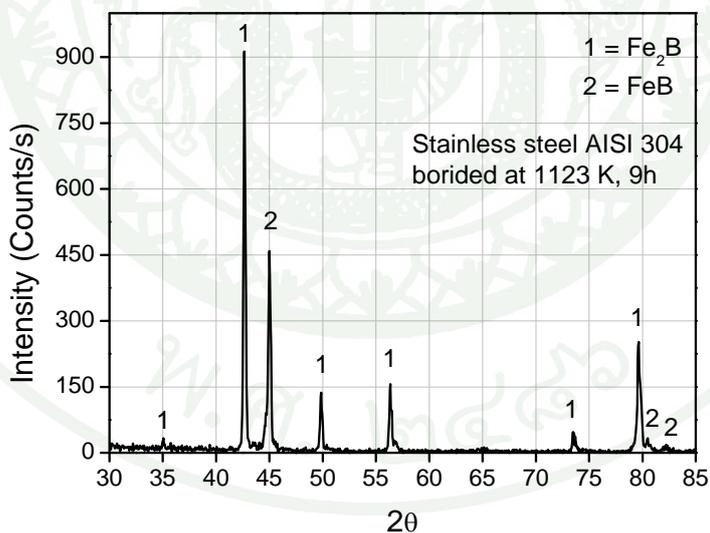


ภาคผนวก ข

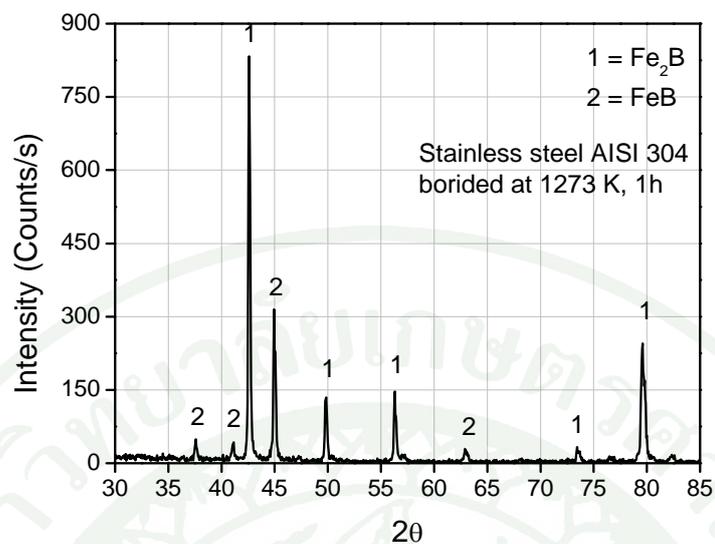
วิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X - ray diffraction, XRD)



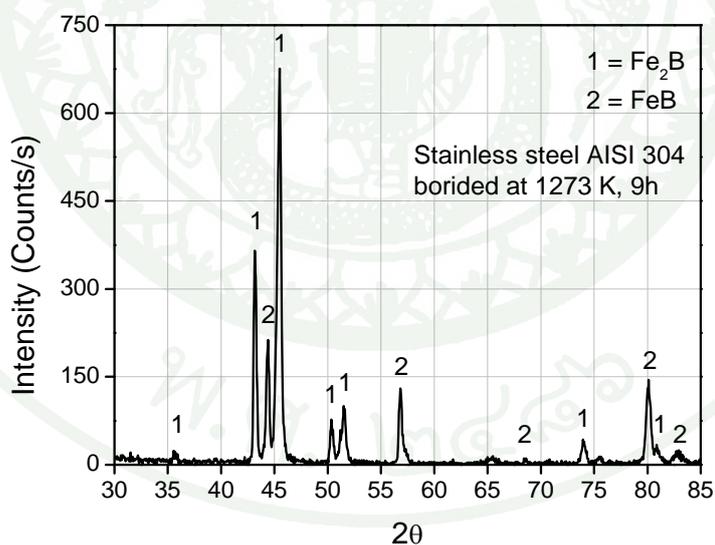
ภาพผนวกที่ ข1 รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



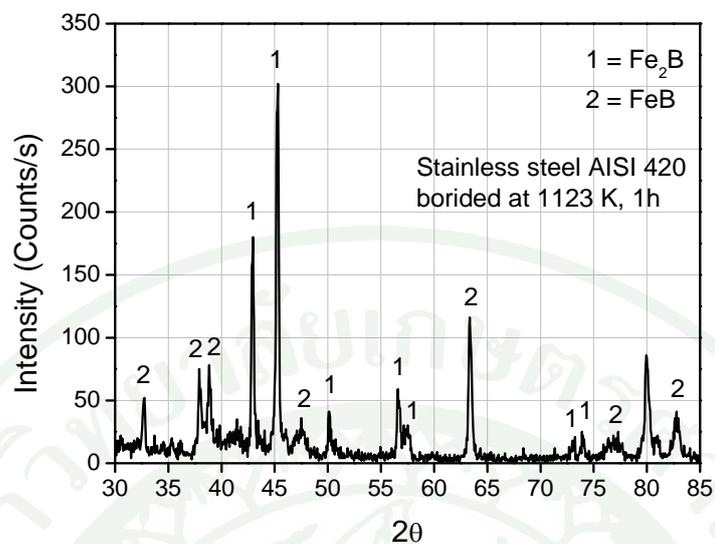
ภาพผนวกที่ ข2 รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง



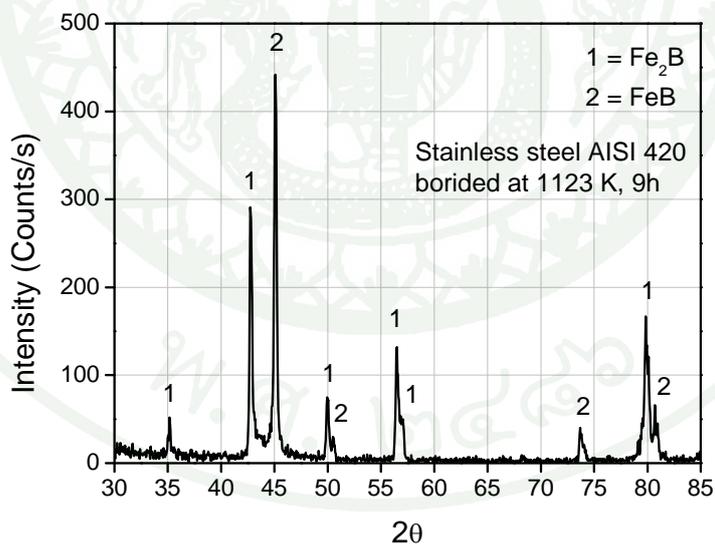
ภาพผนวกที่ ข3 รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอไรด์ที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



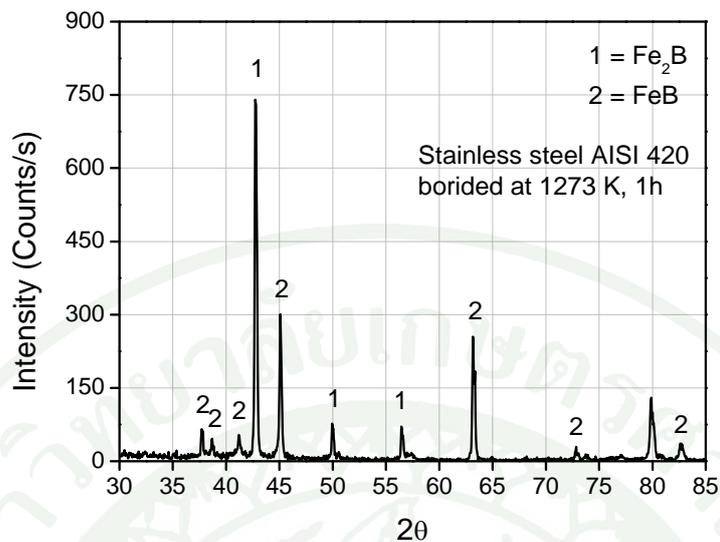
ภาพผนวกที่ ข4 รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอไรด์ที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง



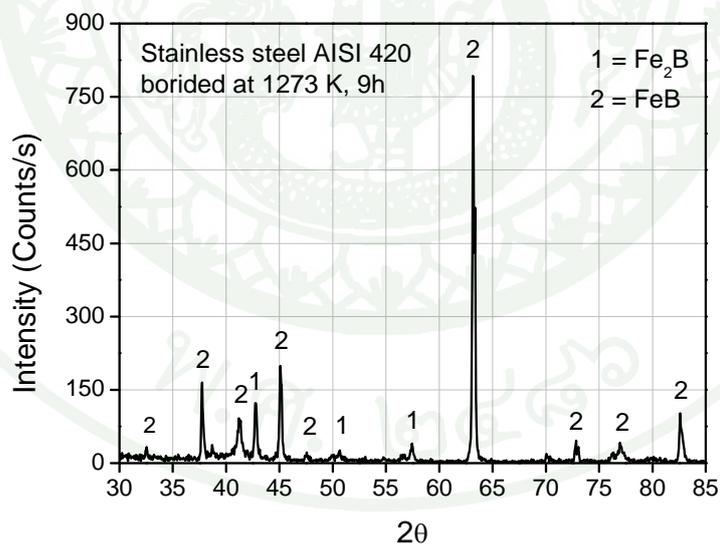
ภาพผนวกที่ ข5 รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอไรด์ที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



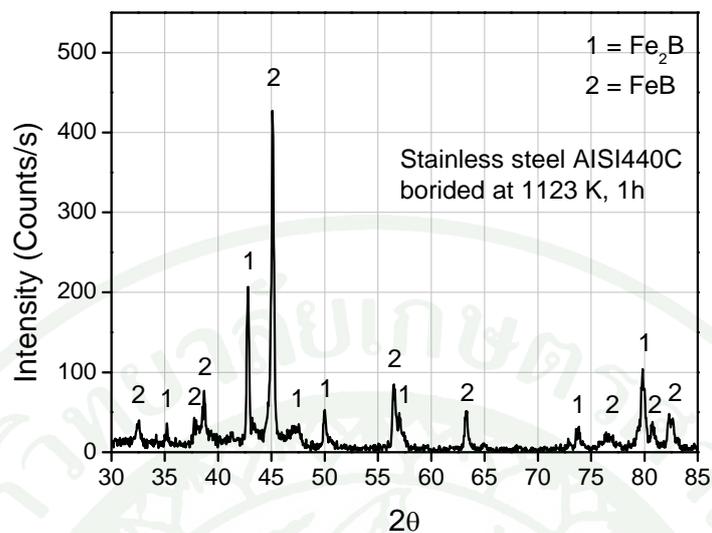
ภาพผนวกที่ ข6 รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอไรด์ที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง



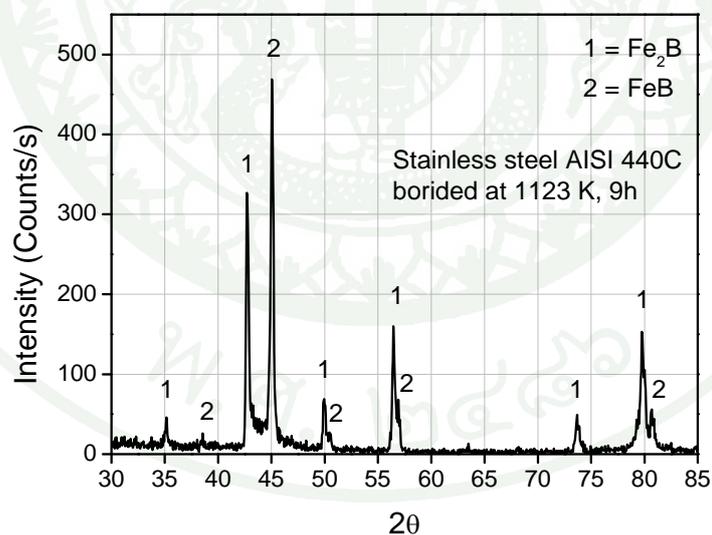
ภาพผนวกที่ ข7 รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอไรด์ที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



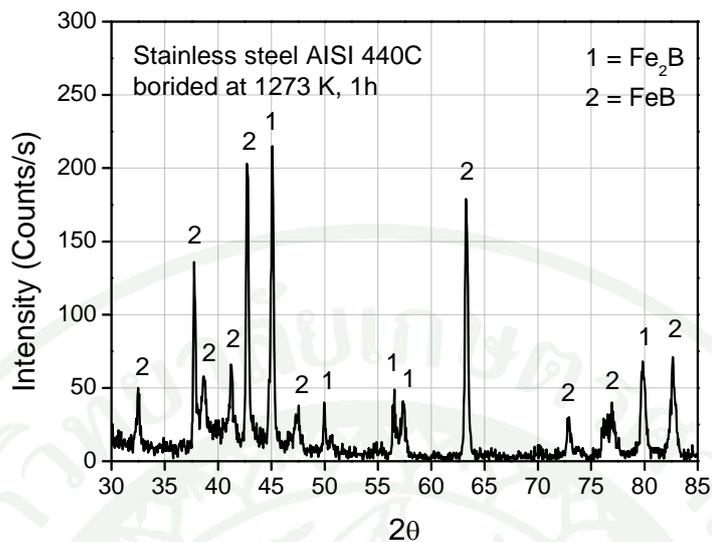
ภาพผนวกที่ ข8 รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอไรด์ที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง



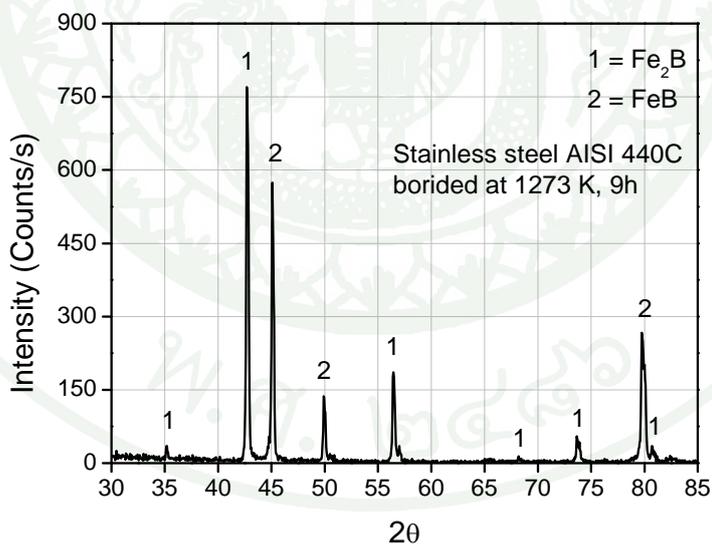
ภาพผนวกที่ ข9 รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบของโรัดบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิ้งที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



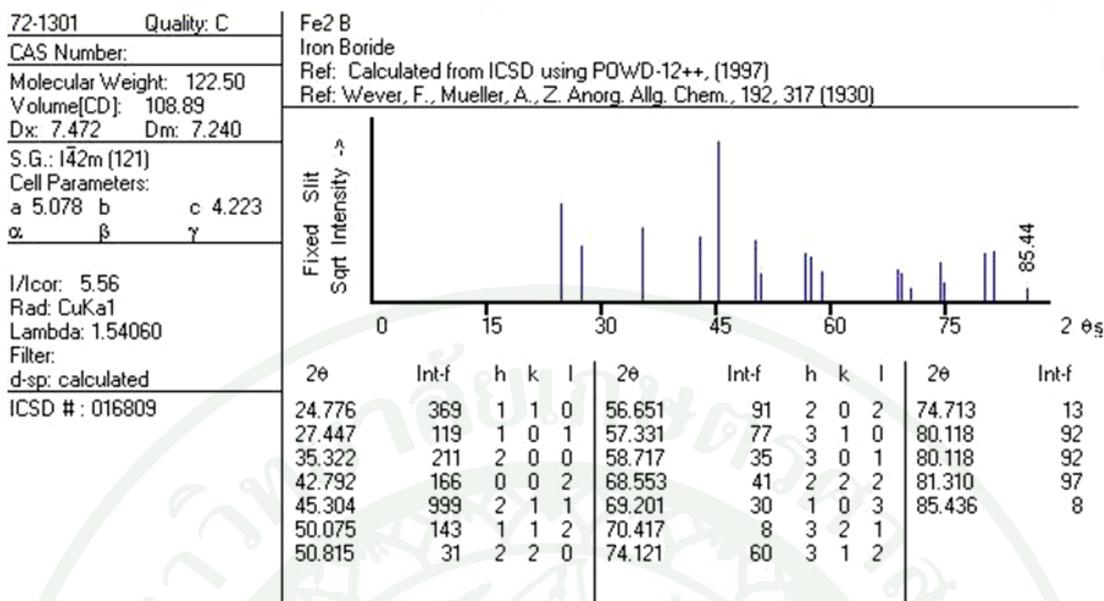
ภาพผนวกที่ ข10 รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบของโรัดบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิ้งที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง



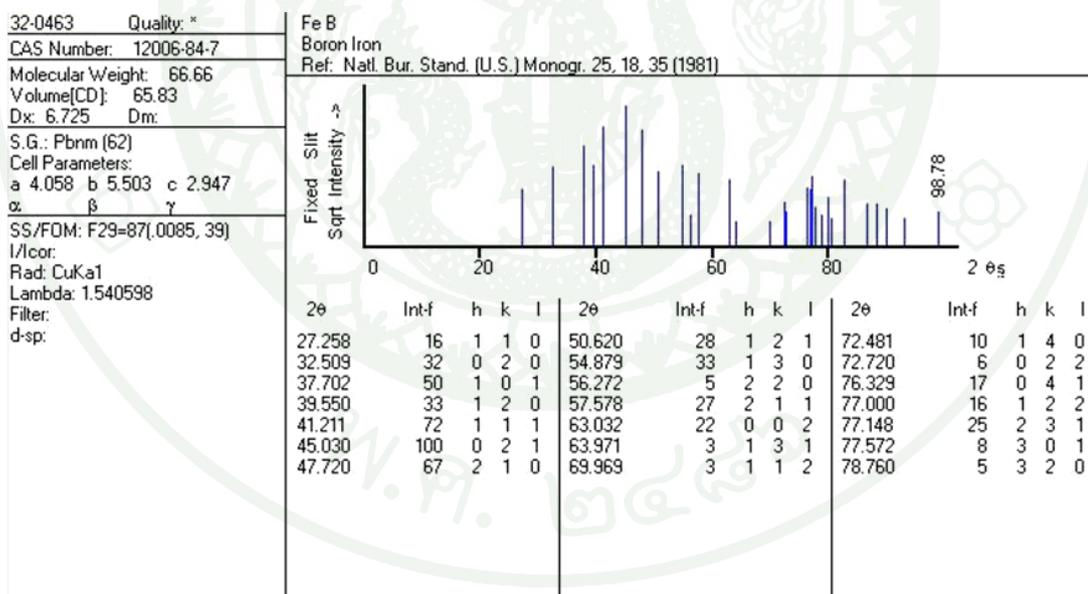
ภาพผนวกที่ ข11 รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอไรด์ที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



ภาพผนวกที่ ข12 รูปแบบ XRD ของชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอไรด์ที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง



ภาพผนวกที่ ข13 ข้อมูล Diffractogram ของ Fe₂B

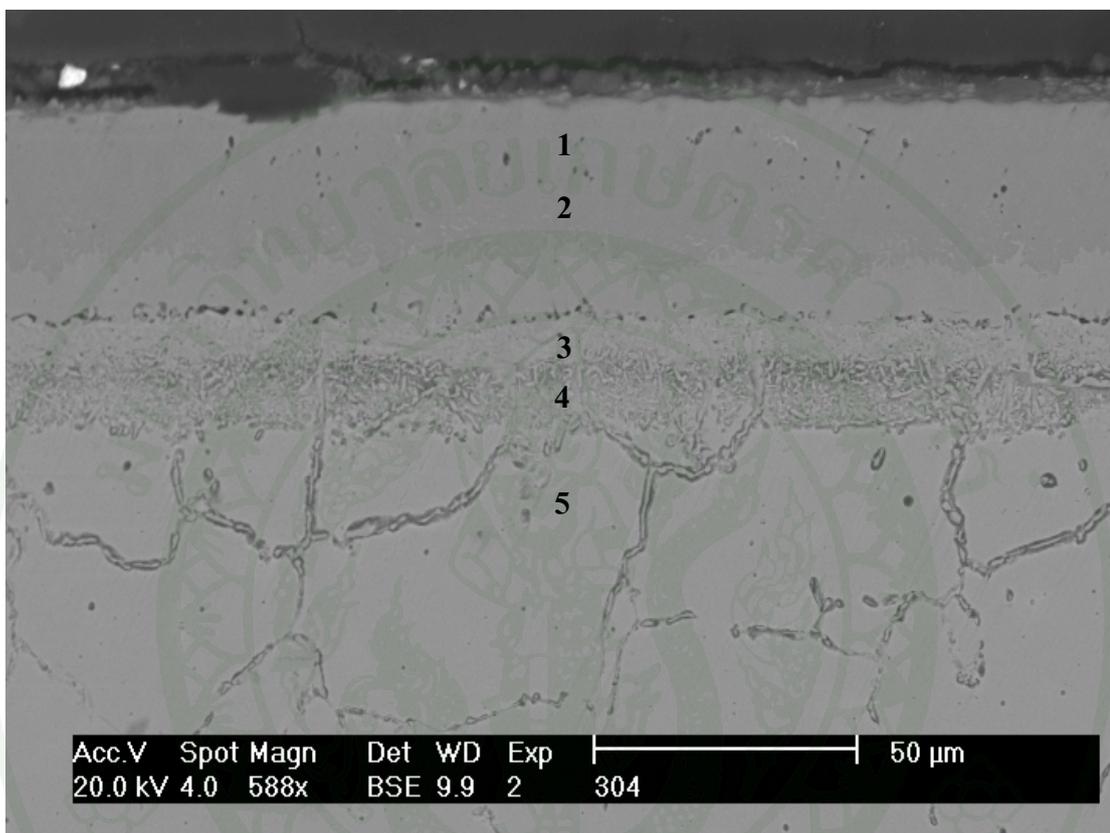


ภาพผนวกที่ ข14 ข้อมูล Diffractogram ของ FeB

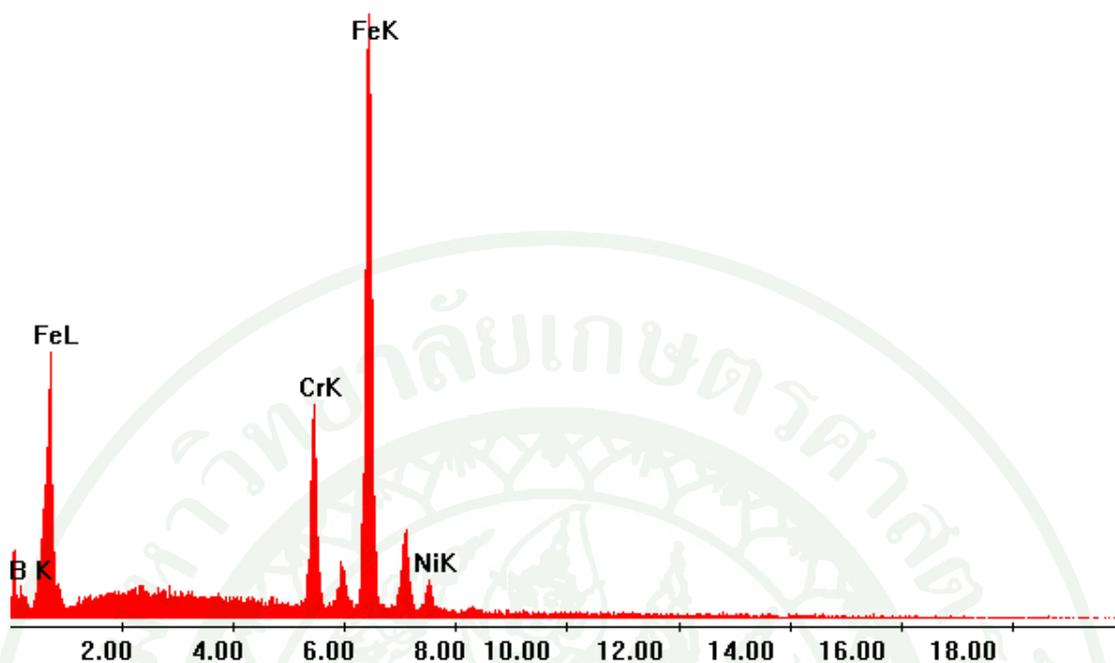


ภาคผนวก ค

วิเคราะห์ธาตุ (Energy dispersive x - ray spectrometer, EDS)



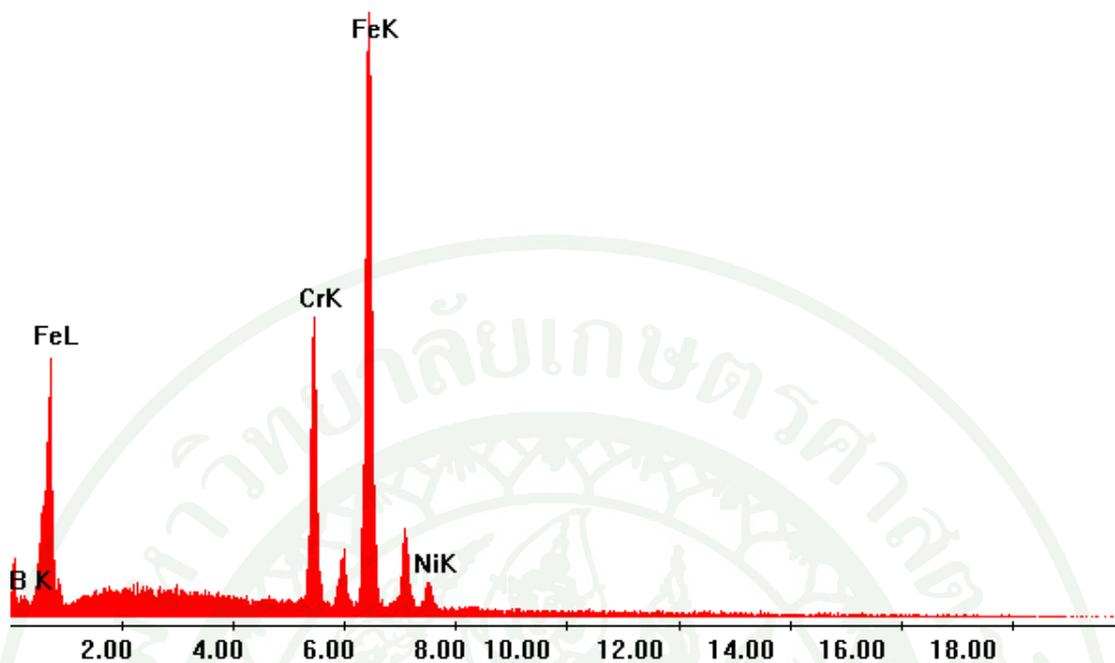
ภาพผนวกที่ ค1 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอโรไนต์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอโรไนต์ที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



ภาพผนวกที่ ค2 รูปแบบ EDS บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอโรไดมิ่งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 1 ในภาพผนวกที่ ค1

ตารางผนวกที่ ค1 ธาตุบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอโรไดมิ่งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 1 ในภาพผนวกที่ ค1

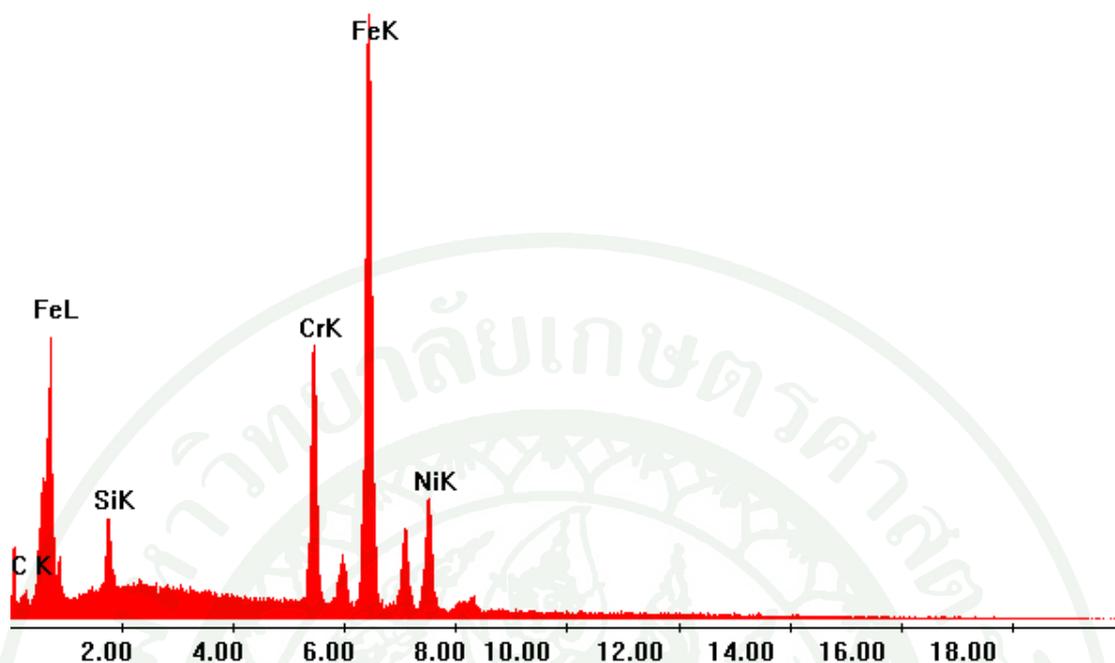
ธาตุ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt %)	เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม (At %)	K - Ratio	Z	A	F
B K	45.47	81.03	0.0915	1.0528	0.1911	1.0001
CrK	8.10	3.00	0.0902	0.9396	1.0107	1.1717
FeK	43.20	14.90	0.4081	0.9397	0.9987	1.0065
NiK	3.23	1.06	0.0291	0.9542	0.9464	1.0000



ภาพผนวกที่ ค3 รูปแบบ EDS บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอโรไดมิ่งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 2 ในภาพผนวกที่ ค1

ตารางผนวกที่ ค2 ธาตุบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอโรไดมิ่งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 2 ในภาพผนวกที่ ค1

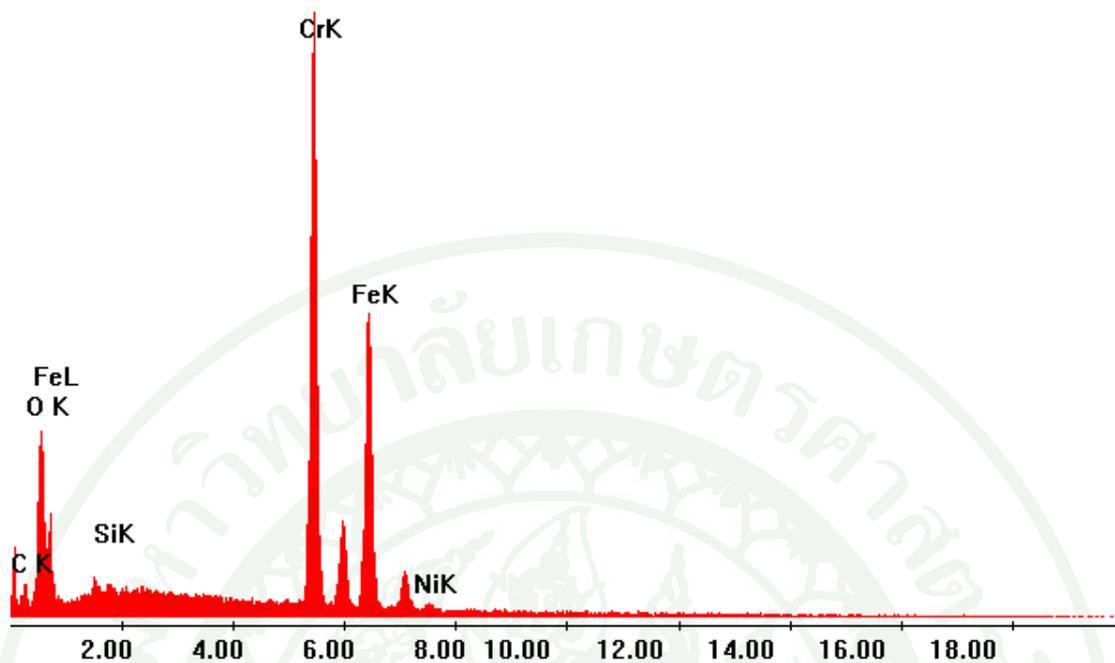
ธาตุ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt %)	เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม (At %)	K - Ratio	Z	A	F
B K	36.63	74.68	0.0671	1.0629	0.1722	1.0001
CrK	12.84	5.44	0.1414	0.9498	1.0069	1.1517
FeK	46.95	18.53	0.4436	0.9503	0.9881	1.0063
NiK	3.59	1.35	0.0324	0.9653	0.9356	1.0000



ภาพผนวกที่ ค4 รูปแบบ EDS บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่
อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 3 ในภาพผนวกที่ ค1

ตารางผนวกที่ ค3 ธาตุบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273
เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 3 ในภาพผนวกที่ ค1

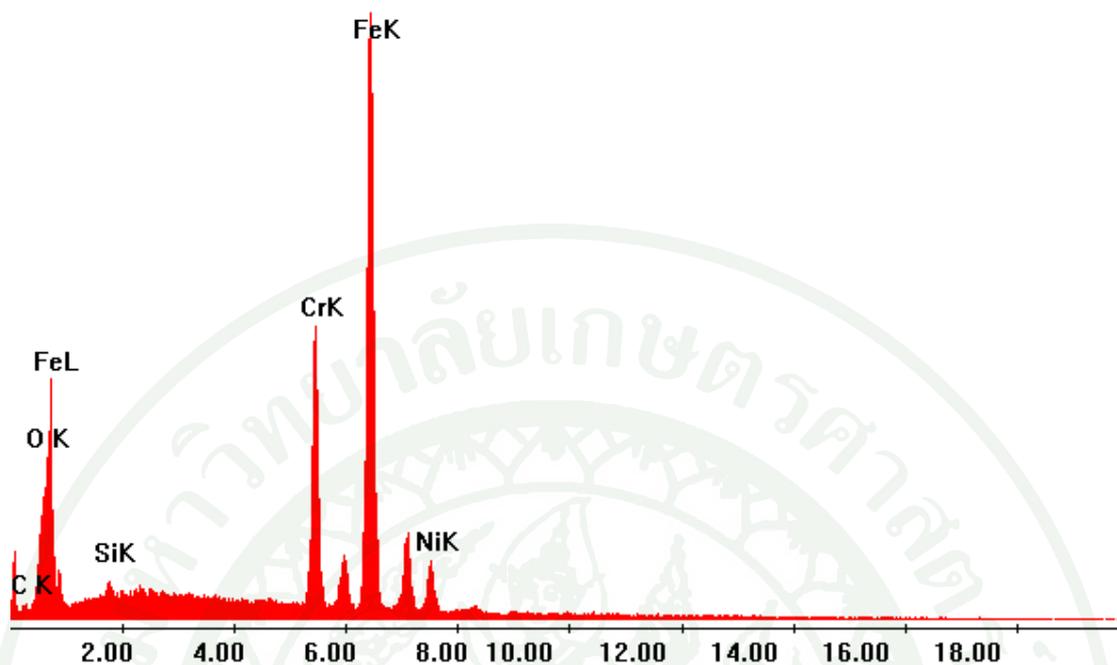
ธาตุ	เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก (wt %)	เปอร์เซ็นต์โดย อะตอม (At %)	K - Ratio	Z	A	F
C K	8.26	24.69	0.0183	1.1586	0.1780	1.0004
O K	6.87	15.38	0.0312	1.1304	0.3729	1.0029
SiK	2.43	3.04	0.0130	1.0891	0.4555	1.0011
CrK	13.73	10.20	0.1633	0.9722	0.9913	1.1498
FeK	53.43	36.85	0.5582	0.9739	0.9762	1.0235
NiK	15.28	9.84	0.1491	0.9905	0.9174	1.0000



ภาพผนวกที่ ค5 รูปแบบ EDS บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอโรไดมิ่งที่
อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 4 ในภาพผนวกที่ ค1

ตารางผนวกที่ ค4 ธาตุบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอโรไดมิ่งที่อุณหภูมิ 1273
เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 4 ในภาพผนวกที่ ค1

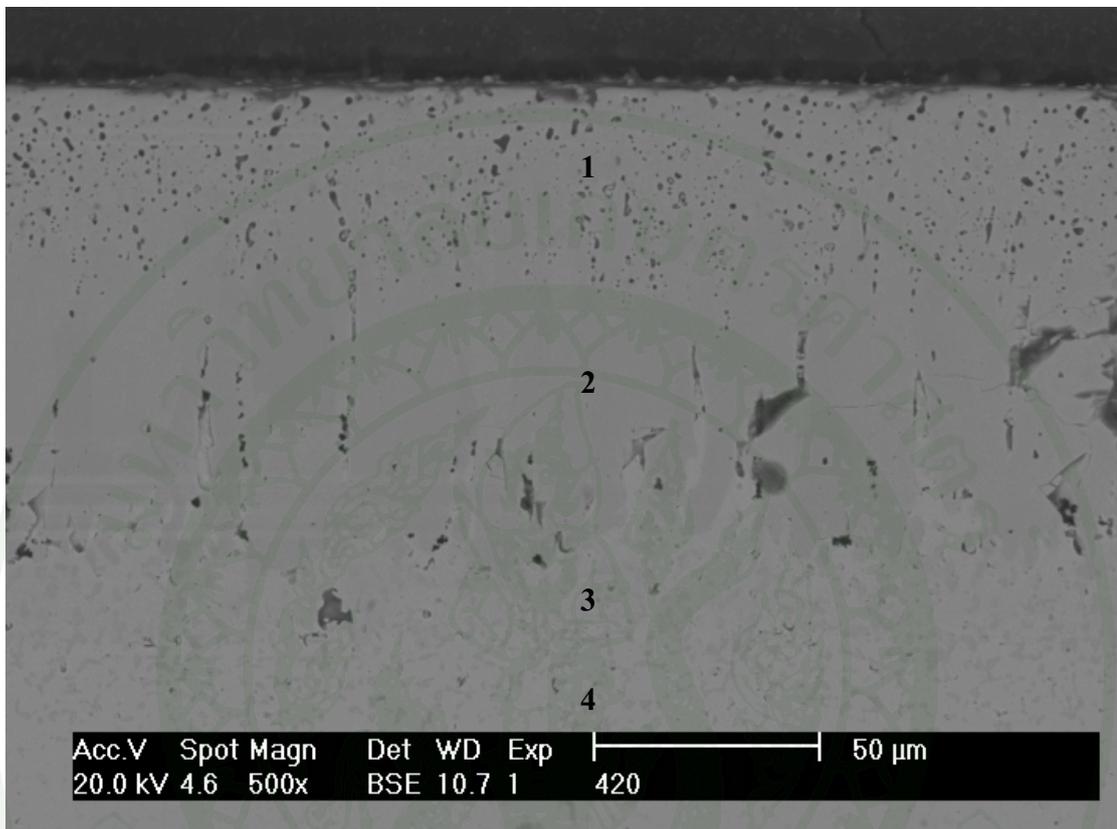
ธาตุ	เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก (wt %)	เปอร์เซ็นต์ โดย อะตอม (At %)	K - Ratio	Z	A	F
C K	9.21	25.75	0.0232	1.1414	0.2205	1.0005
O K	11.73	24.62	0.0522	1.1219	0.3959	1.0029
SiK	0.49	0.59	0.0027	1.0735	0.5124	1.0017
CrK	41.13	26.57	0.4195	0.9560	1.0014	1.0654
FeK	35.83	21.55	0.3223	0.9571	0.9378	1.0021
NiK	1.61	0.92	0.0144	0.9727	0.9196	1.0000



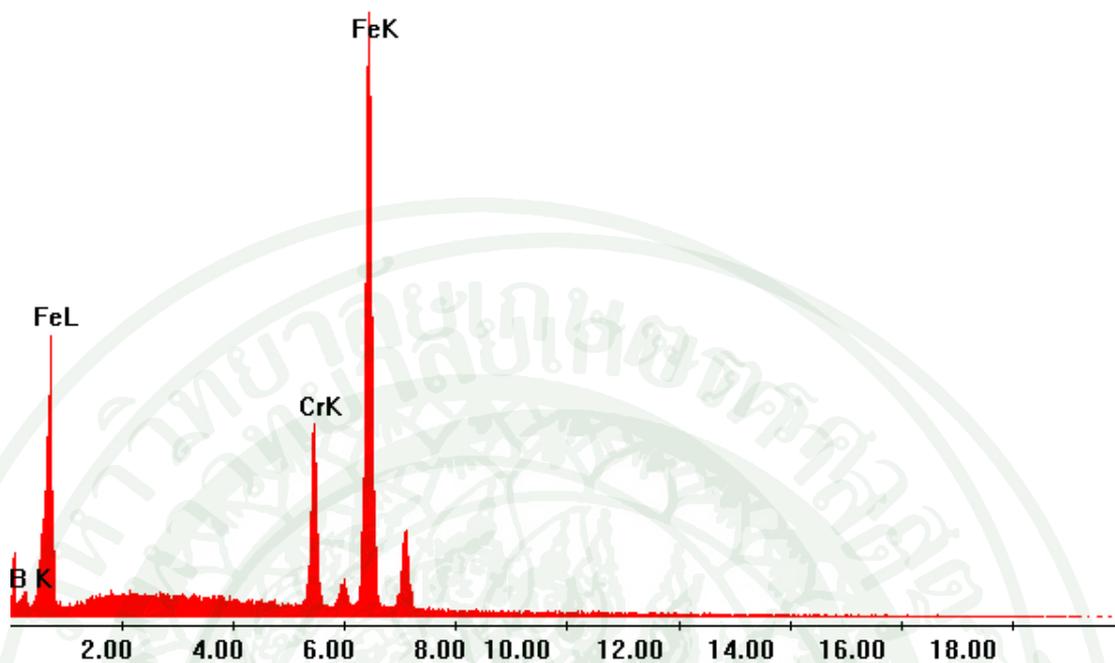
ภาพผนวกที่ ค6 รูปแบบ EDS บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 5 ในภาพผนวกที่ ค1

ตารางผนวกที่ ค5 ธาตุบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 5 ในภาพผนวกที่ ค1

ธาตุ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt %)	เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม (At %)	K - Ratio	Z	A	F
C K	4.64	16.19	0.0101	1.1611	0.1877	1.0004
O K	5.90	15.46	0.0265	1.1411	0.3920	1.0032
SiK	0.68	1.02	0.0034	1.0914	0.4576	1.0013
CrK	16.75	13.51	0.1879	0.9741	0.9936	1.1585
FeK	64.33	48.31	0.6177	0.9758	0.9740	1.0103
NiK	7.70	5.50	0.0693	0.9924	0.9075	1.0000



ภาพผนวกที่ ค7 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบของโรัดบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



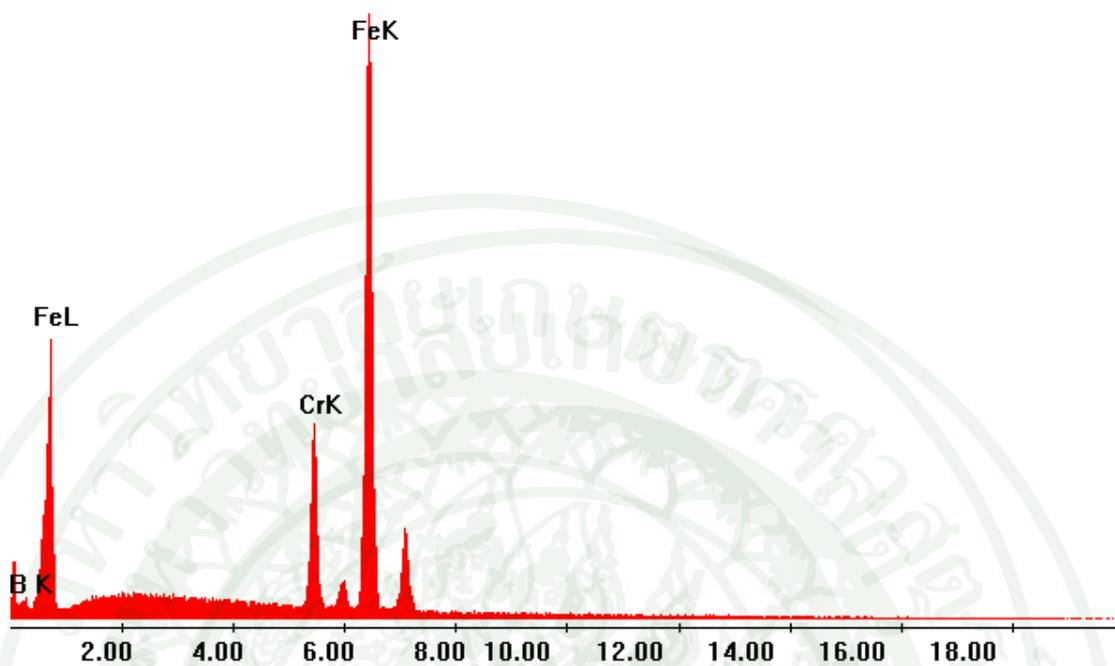
ภาพผนวกที่ ค8 รูปแบบ EDS บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรไดมที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 1 ในภาพผนวกที่ ค7

ตารางผนวกที่ ค6 ธาตุบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรไดมที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 1 ในภาพผนวกที่ ค7

ธาตุ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt %)	เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม (At %)	K - Ratio	Z	A	F
B K	40.30	77.53	0.0770	1.0592	0.1804	1.0001
CrK	8.52	3.41	0.0967	0.9460	1.0087	1.1887
FeK	51.17	19.06	0.4827	0.9463	0.9968	1.0000

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



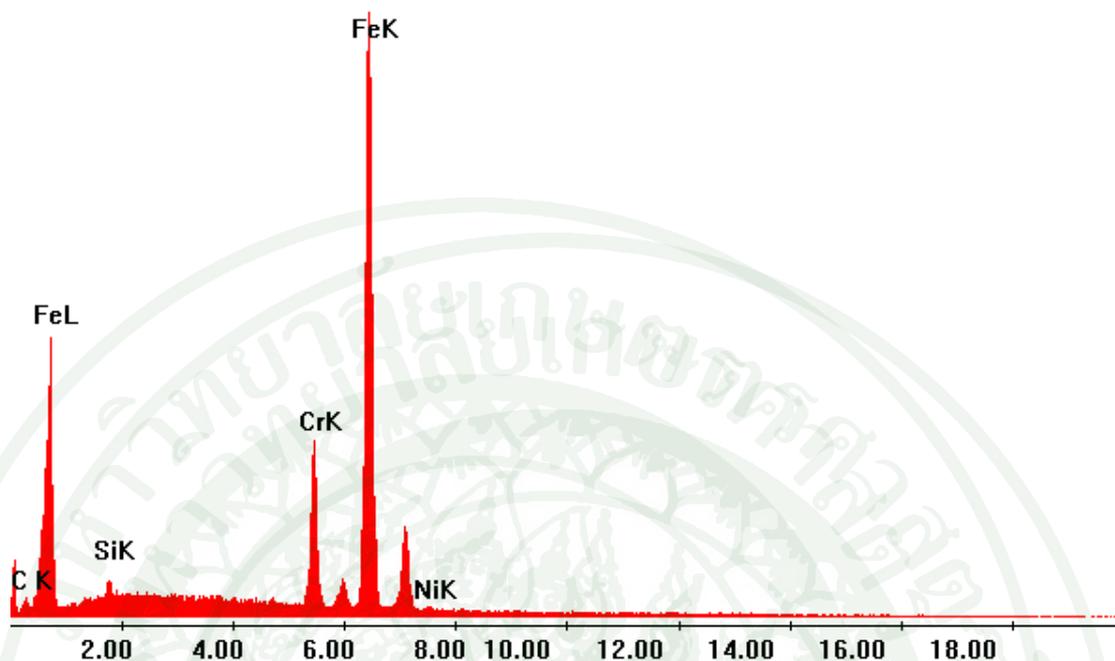
ภาพผนวกที่ ค9 รูปแบบ EDS บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรไดมิ่งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 2 ในภาพผนวกที่ ค7

ตารางผนวกที่ ค7 ธาตุบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรไดมิ่งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 2 ในภาพผนวกที่ ค7

ธาตุ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt %)	เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม (At %)	K - Ratio	Z	A	F
B K	37.09	75.09	0.0683	1.0629	0.1733	1.0001
CrK	8.97	3.77	0.1021	0.9498	1.0072	1.1906
FeK	53.94	21.14	0.5101	0.9502	0.9951	1.0000

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

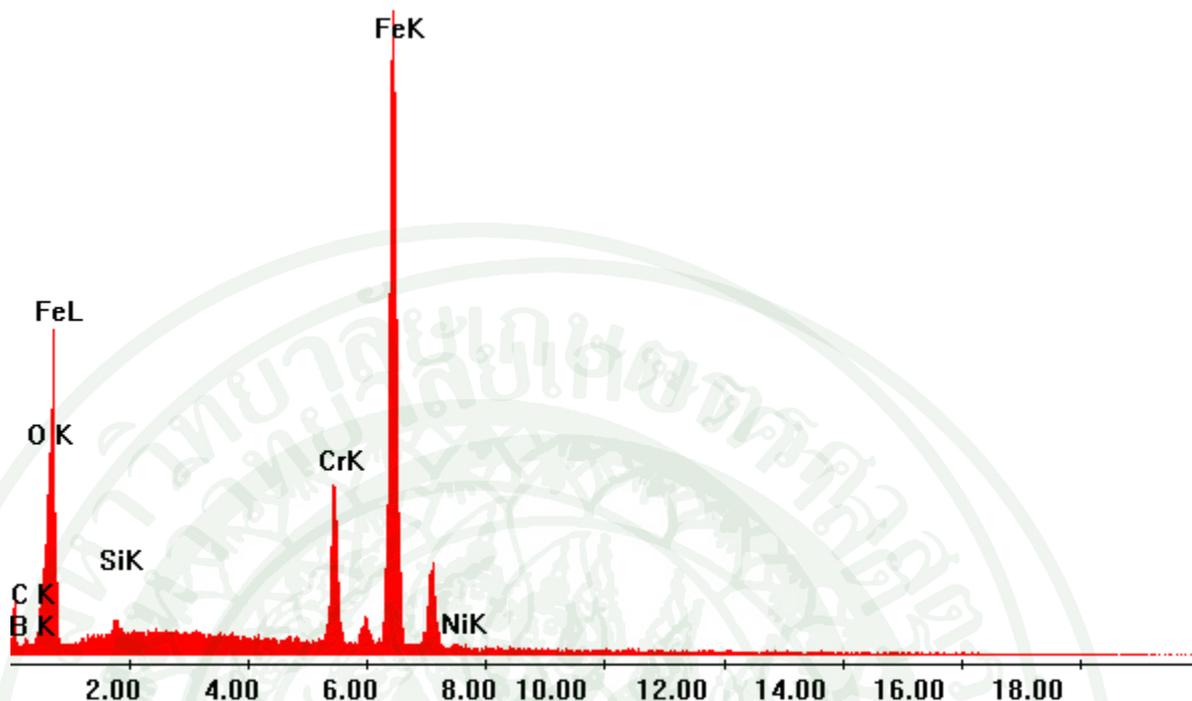
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพผนวกที่ ค10 รูปแบบ EDS บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรไดงที่
อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 3 ในภาพผนวกที่ ค7

ตารางผนวกที่ ค8 ธาตุบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรไดงที่อุณหภูมิ 1273
เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 3 ในภาพผนวกที่ ค7

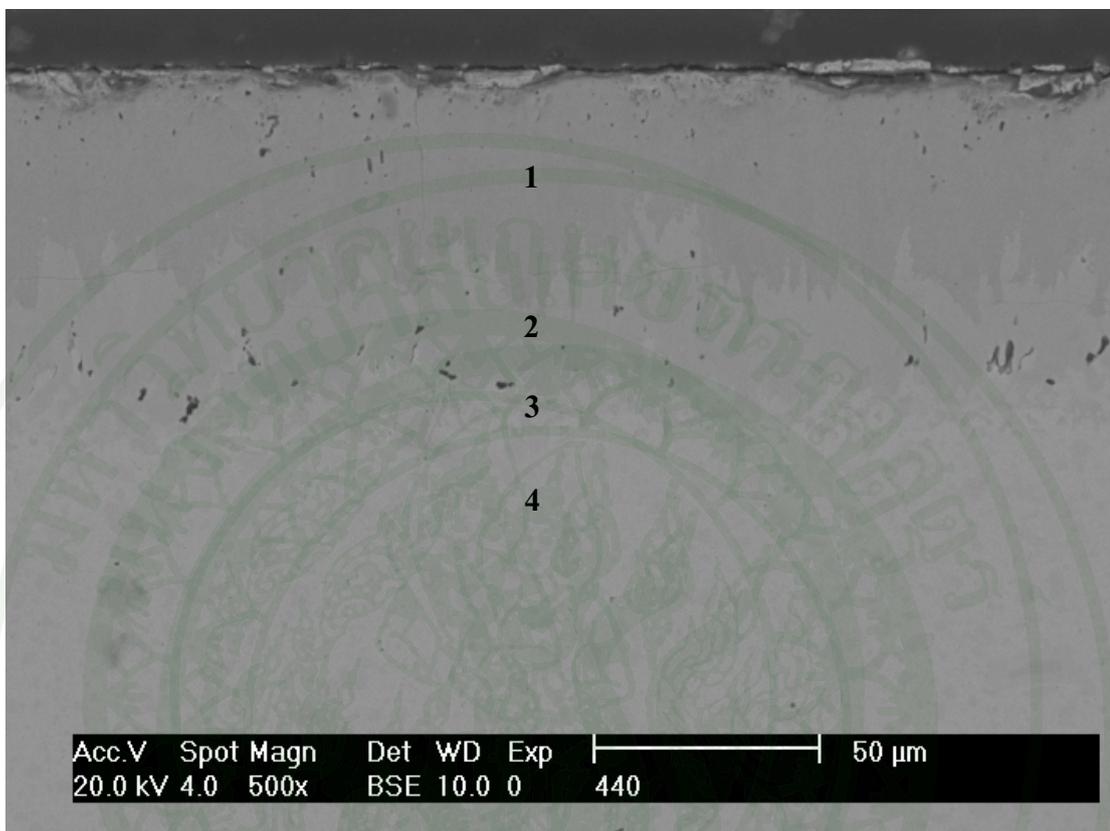
ธาตุ	เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก (wt %)	เปอร์เซ็นต์โดย อะตอม (At %)	K - Ratio	Z	A	F
C K	6.31	20.40	0.0143	1.1699	0.1853	1.0004
O K	4.66	11.27	0.0172	1.1137	0.3140	1.0026
SiK	0.89	1.24	0.0047	1.0995	0.4545	1.0014
CrK	21.08	17.09	0.1370	0.9819	0.9928	1.2096
FeK	66.68	49.73	0.7776	0.9837	0.9822	1.0005
NiK	0.38	0.27	0.0036	1.0006	0.8931	1.0000



ภาพผนวกที่ ค11 รูปแบบ EDS บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรไดมิ่งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 4 ในภาพผนวกที่ ค7

ตารางผนวกที่ ค9 ธาตุบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรไดมิ่งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 4 ในภาพผนวกที่ ค7

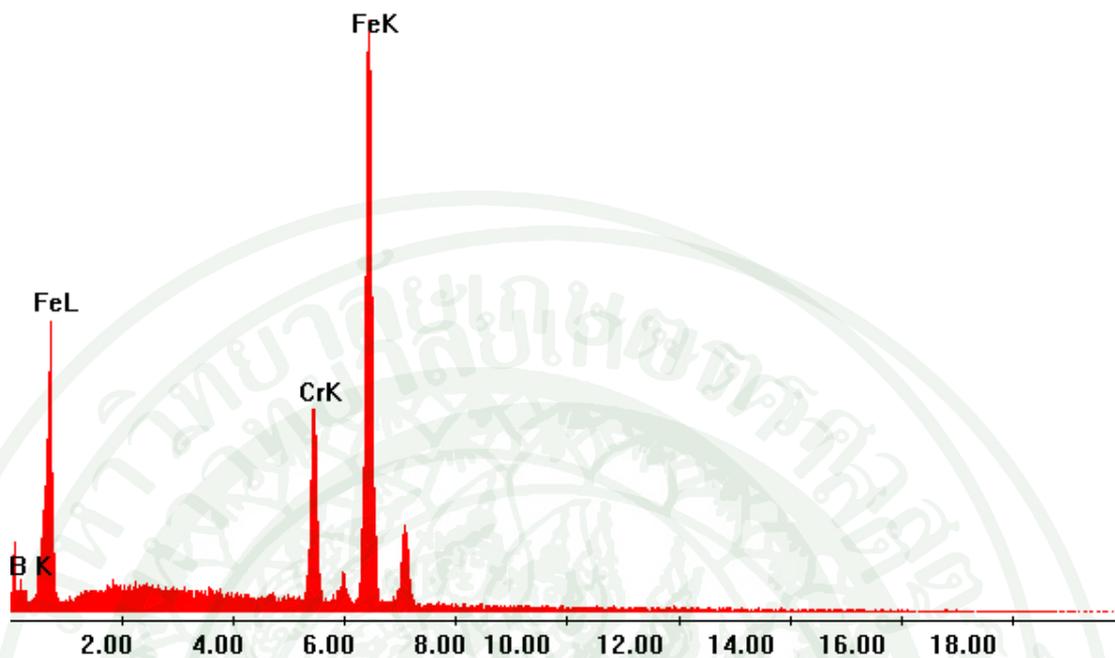
ธาตุ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt %)	เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม (At %)	K - Ratio	Z	A	F
C K	7.40	23.90	0.0084	1.1329	0.1286	1.0003
O K	6.27	15.20	0.0172	1.1137	0.3140	1.0026
SiK	0.72	0.99	0.0032	1.0662	0.5392	1.0012
CrK	10.70	7.97	0.0949	0.9473	1.0041	1.1959
FeK	74.22	51.50	0.5460	0.9480	0.9946	1.0009
NiK	0.69	0.46	0.0048	0.9632	0.9264	1.0000



ภาพผนวกที่ ค12 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบของโรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการอบโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



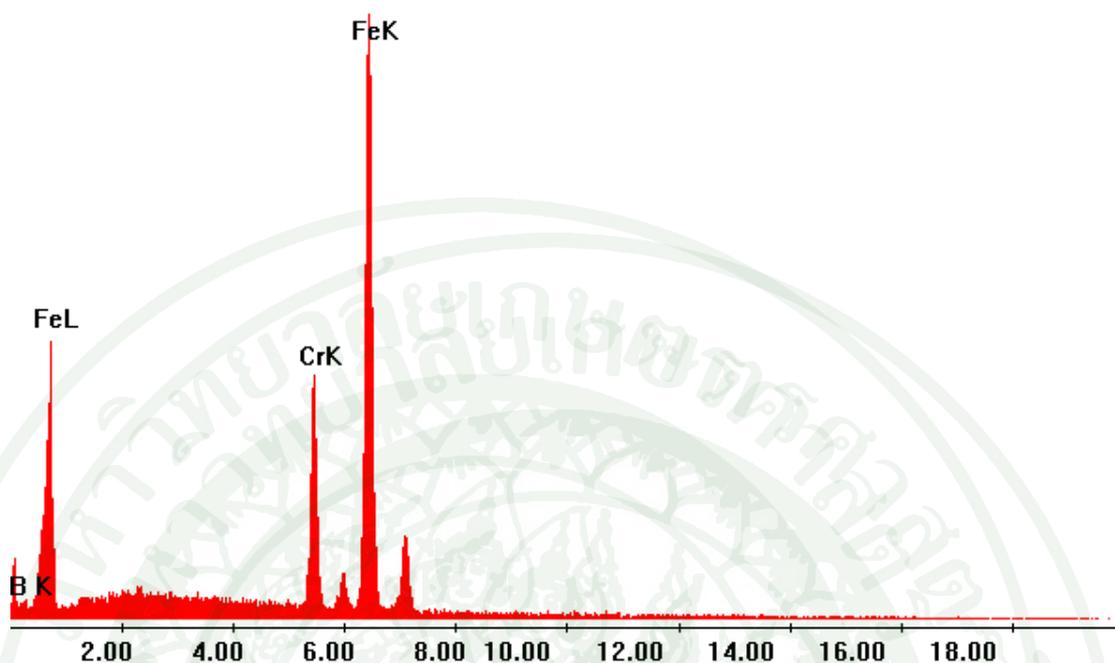
ภาพผนวกที่ ค13 รูปแบบ EDS บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการอบโรดิ้งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 1 ในภาพผนวกที่ ค12

ตารางผนวกที่ ค10 ธาตุบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการอบโรดิ้งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 1 ในภาพผนวกที่ ค12

ธาตุ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt %)	เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม (At %)	K - Ratio	Z	A	F
B K	46.41	81.56	0.0959	1.0524	0.1964	1.0001
CrK	8.55	3.12	0.0956	0.9390	1.0117	1.1767
FeK	45.04	15.32	0.4223	0.9391	0.9985	1.0000

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



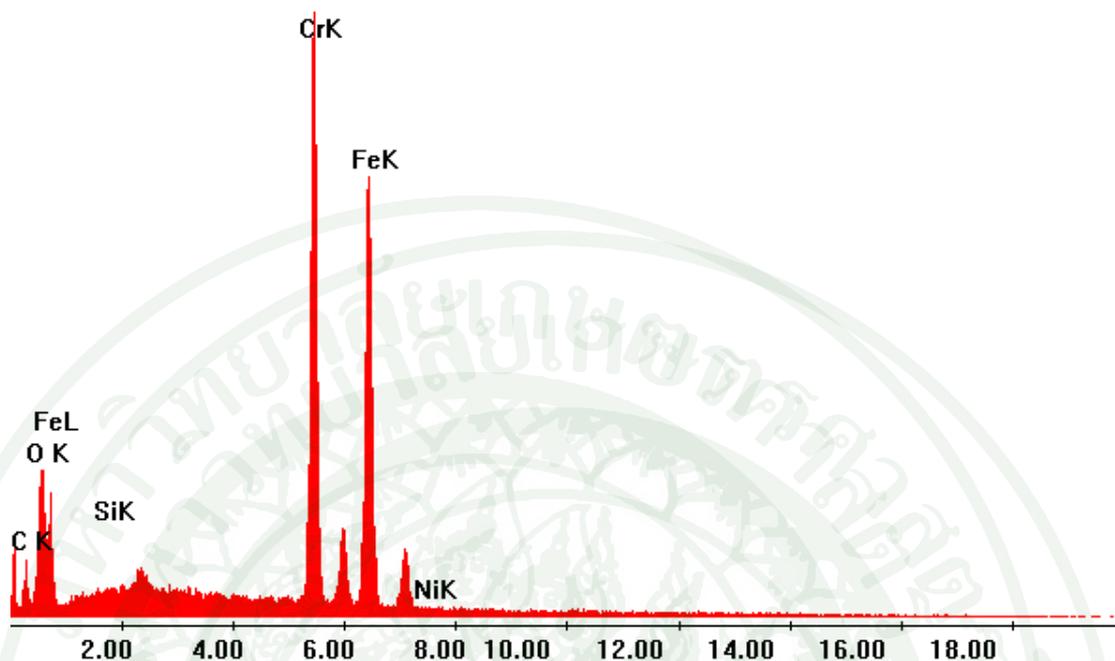
ภาพผนวกที่ ค14 รูปแบบ EDS บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอโรไดมที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 2 ในภาพผนวกที่ ค12

ตารางผนวกที่ ค11 ธาตุบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอโรไดมที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 2 ในภาพผนวกที่ ค12

ธาตุ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt %)	เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม (At %)	K - Ratio	Z	A	F
B K	35.17	73.45	0.0639	1.0653	0.1704	1.0001
CrK	11.54	5.01	0.1298	0.9521	1.0066	1.1732
FeK	53.29	21.54	0.5027	0.9526	0.9902	1.0000

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

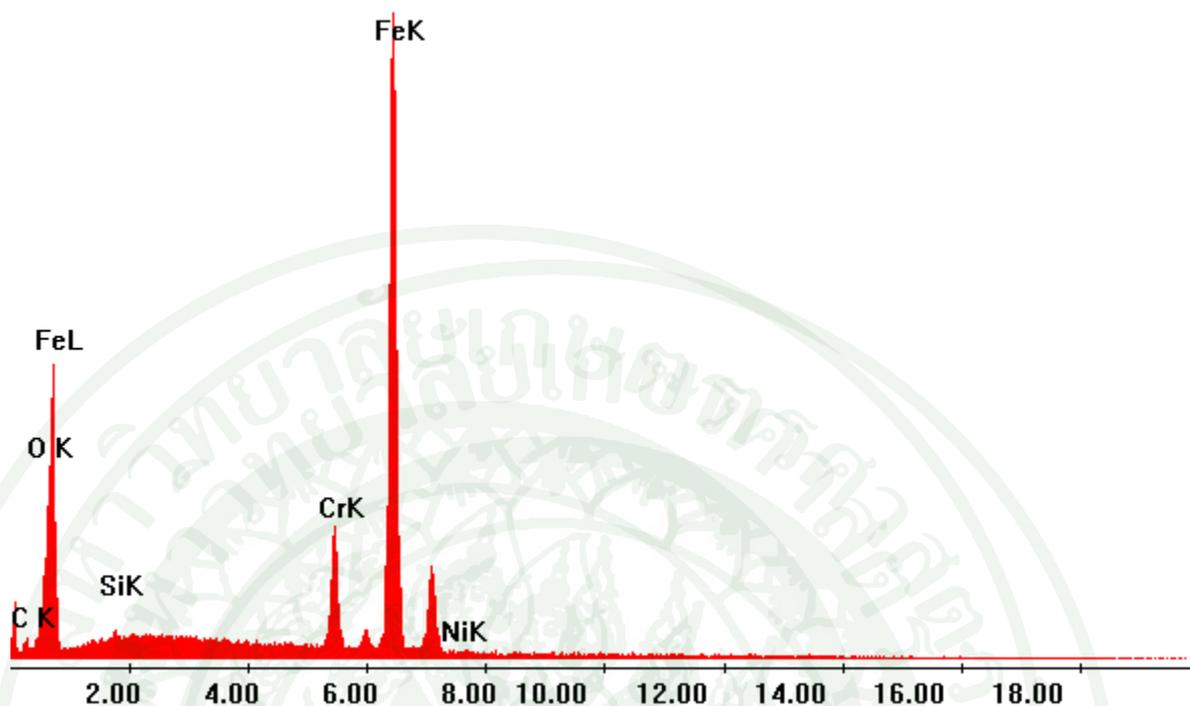
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพผนวกที่ ค15 รูปแบบ EDS บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอโรไดมิ่งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 3 ในภาพผนวกที่ ค12

ตารางผนวกที่ ค12 ธาตุบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอโรไดมิ่งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 3 ในภาพผนวกที่ ค12

ธาตุ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt %)	เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม (At %)	K - Ratio	Z	A	F
C K	12.02	33.43	0.0304	1.1425	0.2212	1.0004
O K	8.28	17.29	0.0343	1.1229	0.3681	1.0029
SiK	0.08	0.09	0.0004	1.0745	0.5087	1.0016
CrK	35.21	22.62	0.3662	0.9570	1.0012	1.0855
FeK	44.25	26.47	0.4017	0.9582	0.9474	1.0002
NiK	0.17	0.10	0.0015	0.9739	0.9154	1.0000



ภาพผนวกที่ ค16 รูปแบบ EDS บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอโรไดมิ่งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 4 ในภาพผนวกที่ ค12

ตารางผนวกที่ ค13 ธาตุบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอโรไดมิ่งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ณ ตำแหน่งที่ 4 ในภาพผนวกที่ ค12

ธาตุ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt %)	เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม (At %)	K - Ratio	Z	A	F
C K	6.59	22.34	0.0146	1.1602	0.1909	1.0005
O K	4.87	12.40	0.211	1.1403	0.3781	1.0037
SiK	0.42	0.62	0.0021	1.0907	0.4608	1.0013
CrK	12.11	9.48	0.0960	0.9733	0.9943	1.2293
FeK	75.71	54.97	0.7695	0.9750	0.9893	1.0004
NiK	0.29	0.20	0.0026	0.9915	0.8980	1.0000



ภาคผนวก ง
ความหมายของชั้นเคลือบบอไรด์

สิขสิทธิ์ มทาวิตยาลัยเกษตรศาสตร์

สิขสิทธิ์ มทาวิตยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ๑1 ความหนาของชั้นเคลือบของโร้ดบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิง ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

อุณหภูมิ การเคลือบ (เคลวิน)	เวลาการ เคลือบ (ชั่วโมง)	ความหนาของชั้นเคลือบ (ไมโครเมตร)															ความหนาของ ชั้นเคลือบเฉลี่ย (ไมโครเมตร)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1123	1	2.80	2.87	2.73	2.87	2.93	2.07	2.60	2.53	2.33	2.40	2.60	1.93	2.53	2.40	2.67	2.55
	4	2.87	3.40	3.40	2.93	2.73	2.87	3.53	3.00	3.87	3.13	3.80	2.13	3.33	1.53	2.33	2.99
	6.25	5.95	4.39	5.95	3.33	5.54	5.47	5.42	6.02	6.40	4.82	4.95	4.21	4.95	5.42	5.82	5.24
	9	7.77	6.95	7.19	8.25	8.25	8.12	6.95	7.77	8.12	8.30	7.72	7.42	7.37	6.95	7.77	7.66
1173	1	7.76	8.33	7.75	7.58	8.34	6.75	7.50	7.17	7.33	7.75	8.00	8.83	7.58	7.58	8.25	7.77
	4	8.42	9.18	9.58	9.25	10.00	10.02	8.75	8.83	9.42	9.58	8.83	8.83	9.08	10.00	10.00	9.32
	6.25	10.88	12.04	12.53	11.61	12.54	12.56	11.16	11.44	12.37	12.46	12.44	10.81	11.18	11.44	12.79	11.88
	9	17.50	17.92	16.33	17.00	16.25	16.84	17.19	17.02	15.60	15.72	13.33	15.98	15.86	16.23	17.16	16.40
1223	1	8.42	9.12	9.12	8.60	8.42	10.00	10.18	9.47	10.00	10.53	9.30	8.60	10.35	9.12	9.12	9.36
	4	16.25	15.00	15.83	16.25	15.44	15.42	16.25	15.42	15.83	15.00	15.00	15.42	15.83	15.42	15.44	15.59
	6.25	18.34	17.50	18.09	18.08	17.67	17.50	17.50	18.67	17.50	17.92	18.08	17.67	18.08	17.67	17.50	17.85
	9	20.83	21.67	22.50	21.67	21.25	21.17	20.42	20.75	21.58	21.17	20.75	21.33	20.00	22.08	20.75	21.20
1273	1	23.50	22.00	25.42	23.92	24.00	23.75	24.25	24.67	21.83	23.92	24.50	23.50	23.92	23.58	24.67	23.83
	4	31.67	31.25	29.58	30.00	31.67	33.33	33.33	33.75	34.58	33.75	32.08	30.83	33.33	33.75	33.75	32.44
	6.25	37.92	38.17	35.42	39.58	38.17	37.08	38.33	36.25	37.08	38.75	34.17	38.75	35.08	37.92	35.42	37.21
	9	46.5	43.7	44.17	42.92	40.0	43.3	37.9	40.42	41.25	43.33	41.25	42.08	42.50	39.17	40.83	41.94

ตารางผนวกที่ ๒ ความหนาของชั้นเคลือบของโร้ดบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรไดง ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

อุณหภูมิ การเคลือบ (เคลวิน)	เวลาการ เคลือบ (ชั่วโมง)	ความหนาของชั้นเคลือบ (ไมโครเมตร)															ความหนาของ ชั้นเคลือบเฉลี่ย (ไมโครเมตร)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1123	1	5.27	5.33	3.53	3.60	4.80	5.00	5.00	4.53	3.73	5.20	4.53	3.67	1.87	4.20	5.27	4.37
	4	6.67	8.00	4.13	7.27	4.67	5.13	8.27	5.87	4.87	6.67	10.67	4.93	8.07	7.20	5.27	6.51
	6.25	7.13	9.53	7.38	6.93	8.53	6.40	9.20	8.91	11.73	7.87	7.40	9.20	8.00	7.73	6.13	8.14
	9	14.21	11.23	11.93	12.77	10.18	12.07	10.20	12.80	7.73	10.53	12.87	9.60	12.27	13.80	10.47	11.51
1173	1	4.17	10.42	12.08	6.25	10.43	9.58	10.43	7.92	11.25	7.08	8.75	5.00	10.83	8.75	10.83	8.92
	4	15.42	8.75	18.34	18.34	13.75	7.92	17.50	11.26	17.92	10.84	15.00	12.92	19.59	10.42	18.33	14.42
	6.25	15.01	19.60	16.67	9.58	22.08	19.17	19.59	14.58	20.42	9.58	23.33	15.00	15.42	8.33	20.00	16.56
	9	24.17	21.27	12.08	22.50	13.75	17.50	24.17	13.75	23.33	18.33	9.17	24.58	15.83	12.92	20.83	18.28
1223	1	12.92	18.33	10.00	17.08	17.08	17.08	16.67	14.58	8.33	16.67	15.00	10.83	15.00	13.75	16.67	14.67
	4	30.00	30.00	28.33	33.33	35.83	30.83	36.67	41.25	37.08	39.58	35.42	36.67	36.25	25.83	40.42	34.50
	6.25	42.92	41.67	32.50	45.00	44.17	44.17	42.92	45.83	24.58	40.83	42.92	45.00	42.92	30.83	42.08	40.56
	9	39.17	39.58	44.17	22.08	43.33	46.67	43.33	43.33	42.92	28.33	42.08	42.92	43.75	45.42	42.92	40.67
1273	1	47.09	50.42	46.67	50.00	51.67	49.58	45.83	49.58	47.08	49.17	49.17	46.67	44.17	47.50	45.00	47.97
	4	109.58	89.58	104.17	107.50	99.58	84.58	98.33	105.42	102.08	84.17	98.33	101.67	99.59	100.00	102.92	99.17
	6.25	100.00	97.50	87.92	102.50	113.75	115.83	115.00	115.42	107.50	114.17	104.17	80.00	100.00	95.00	100.42	103.28
	9	105.00	87.08	120.42	115.42	112.92	116.25	117.92	112.08	120.42	113.33	119.17	95.00	91.67	107.50	113.34	109.83

ตารางผนวกที่ 3 ความหนาของชั้นเคลือบบอโรคาร์บเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิ้ง ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

อุณหภูมิ การเคลือบ (เคลวิน)	เวลาการ เคลือบ (ชั่วโมง)	ความหนาของชั้นเคลือบ (ไมโครเมตร)															ความหนาของ ชั้นเคลือบเฉลี่ย (ไมโครเมตร)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1123	1	4.53	4.13	4.93	3.87	5.07	2.93	3.40	5.20	4.27	2.87	3.47	4.53	1.47	3.00	3.13	3.79
	4	5.80	6.20	5.87	5.60	6.20	6.47	5.60	4.67	6.27	7.53	7.80	5.13	6.60	5.13	5.20	6.00
	6.25	7.02	7.37	6.47	3.86	7.23	8.07	5.44	7.35	8.25	7.37	8.60	8.77	7.37	7.53	6.49	7.15
	9	7.47	6.60	7.20	14.60	7.20	9.60	10.07	9.07	9.00	8.13	9.60	10.07	9.07	9.00	8.13	8.99
1173	1	10.33	9.58	7.92	8.25	10.75	9.17	7.25	9.43	8.92	7.50	8.75	10.42	6.83	8.75	9.92	8.92
	4	8.76	12.08	11.26	9.17	13.33	12.08	13.33	9.58	11.67	9.17	7.92	12.92	13.76	7.92	12.92	11.06
	6.25	17.50	9.18	17.92	17.50	12.50	16.26	17.50	8.75	18.33	9.17	7.92	13.75	11.25	18.33	7.10	13.53
	9	12.50	21.67	19.17	15.00	13.33	20.00	13.33	22.50	9.58	20.42	20.00	25.00	18.33	12.08	22.50	17.69
1223	1	11.23	10.70	11.93	8.95	13.86	12.46	8.42	15.44	7.54	11.93	18.42	8.95	10.53	6.49	15.96	11.52
	4	24.74	17.37	22.28	25.44	20.88	22.81	19.65	25.61	26.84	18.60	21.93	28.07	28.25	24.91	19.47	23.12
	6.25	26.67	22.98	24.91	18.60	25.96	21.40	31.75	22.46	33.86	17.37	26.14	17.54	20.70	23.51	14.04	23.19
	9	18.95	25.44	24.56	22.28	27.19	35.00	24.58	37.09	43.75	29.17	21.25	32.50	36.25	25.00	32.50	29.03
1273	1	27.92	34.58	33.75	32.50	34.58	40.83	26.25	34.58	35.42	29.17	33.75	32.92	34.58	35.42	32.92	33.28
	4	49.59	38.75	49.17	46.67	56.25	57.08	49.17	46.67	50.42	47.92	52.08	38.33	50.42	37.92	54.17	48.31
	6.25	59.17	60.00	56.67	39.17	60.00	52.92	53.33	60.00	45.42	57.50	72.92	65.83	60.83	67.92	70.83	58.83
	9	70.83	51.25	54.17	68.75	64.58	65.42	46.25	62.08	53.75	65.00	70.00	50.00	63.75	48.75	52.92	59.17



ตารางผนวกที่ จ1 ค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิง ณ อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง จากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็ก

ระยะห่างจากผิว (ไมโครเมตร)	ความแข็ง (HV 0.05)
17.08	2041.00
23.33	2029.00
45.84	560.40
51.67	529.83
57.92	378.00
74.59	251.47
97.92	238.10
130.88	214.93
144.17	210.87
149.58	205.80
176.68	211.97
217.08	212.10
249.17	195.40
250.42	194.77

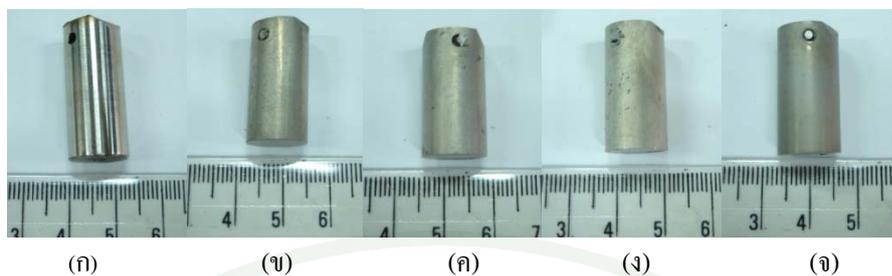
ตารางผนวกที่ จ2 ค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิง ณ อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง จากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็ก

ระยะห่างจากผิว (ไมโครเมตร)	ความแข็ง (HV 0.05)
27.50	1982.00
32.09	2000.00
47.92	2069.67
57.08	2059.50
78.33	1974.00
94.17	1656.33
118.75	446.40
151.67	491.50
163.33	555.87
193.75	550.50
203.75	550.93
237.08	560.77
247.92	551.87
278.34	553.56

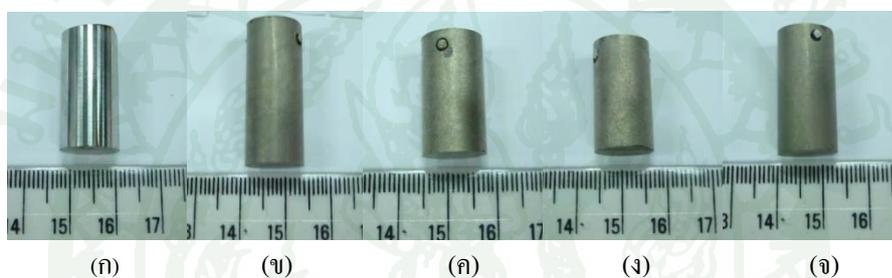
ตารางผนวกที่ จ3 ค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ผ่านกระบวนการบอโรไดมิ่ง ณ อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง จากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็ก

ระยะห่างจากผิว (ไมโครเมตร)	ความแข็ง (HV 0.05)
15.83	2065.00
16.67	2062.00
19.58	2069.33
34.58	2005.00
48.75	1834.67
64.17	759.40
76.67	679.30
83.75	663.80
122.92	635.03
148.75	636.60
150.42	645.57
172.92	638.30
195.42	639.50
220.42	627.57
254.59	632.89

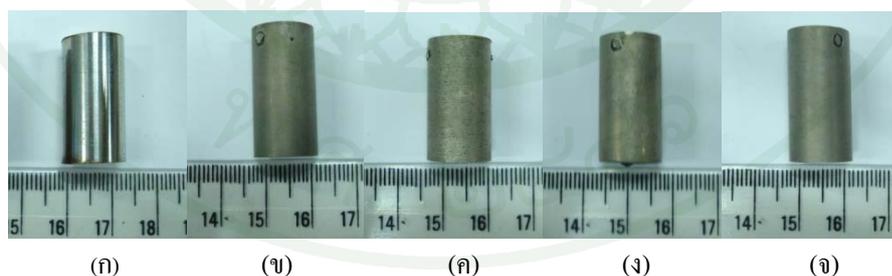




ภาพผนวกที่ ๑1 ผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ก่อนและหลังกระบวนการบอโรดิง ที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา (ก) ก่อนกระบวนการบอโรดิง (ข) 1 ชั่วโมง (ค) 4 ชั่วโมง (ง) 6.25 ชั่วโมง และ (จ) 9 ชั่วโมง



ภาพผนวกที่ ๑2 ผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ก่อนและหลังกระบวนการบอโรดิง ที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา (ก) ก่อนกระบวนการบอโรดิง (ข) 1 ชั่วโมง (ค) 4 ชั่วโมง (ง) 6.25 ชั่วโมง และ (จ) 9 ชั่วโมง



ภาพผนวกที่ ๑3 ผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ที่ก่อนและหลังกระบวนการบอโรดิง ที่อุณหภูมิ 1123 เคลวิน เป็นเวลา (ก) ก่อนกระบวนการบอโรดิง (ข) 1 ชั่วโมง (ค) 4 ชั่วโมง (ง) 6.25 ชั่วโมง และ (จ) 9 ชั่วโมง



ภาคผนวก ข
การตีพิมพ์ผลงาน



สารบัญ

กลุ่มวิจัยด้านวิทยาศาสตร์กายภาพและเทคโนโลยี

หน้า

◆ Automatic early wildfire detection via region based active contours technique	3
◆ จลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอโรดิ่งของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420	10
◆ The Program Development of Information Service via Mobile Phone of Students at King Mongkut's University of Technology North Bangkok	18
การพัฒนาโปรแกรมการบริการข้อมูลสารสนเทศผ่านโทรศัพท์มือถือสำหรับนักศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	
◆ Performance Evaluation of Spam Filter by E-Mail Owners Framework	30
กระบวนการวิธีประเมินประสิทธิภาพระบบคัดกรองอีเมลขยะโดยเจ้าของอีเมล	
◆ High efficiency industrial rubberwood lumber production	39
กระบวนการผลิตไม้ยางพาราแปรรูปประสิทธิภาพสูงในโรงงานอุตสาหกรรม	
◆ Simulation of single phase forced flow	41
การคำนวณความเร็วในการจำลองการไหลสถานะเดียวแบบพาสังคับ	
◆ Dendrochronology and Sunspot Cycle : Determining Effects of Global Warming on Climate change in Udon Thani Province in the Period of 30 Surrounding years (A.D.1979-2008)	42
กาลานุกรมต้นไม้และวัฏจักรของจุดดำบนดวงอาทิตย์ : ปัจจัยชี้วัดภาวะโลกร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพลมฟ้าอากาศจังหวัดอุดรธานีในรอบ 30 ปี (พ.ศ. 2522-2551)	
◆ Treatment of Textile Wastewater by Continuous Electrocoagulation Process	54
การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง	

การประชุมระดมสมองการสร้างเครือข่ายความร่วมมือด้านวิจัย ทอมก : วิจัยและพัฒนาประเทศ ประจำปี พ.ศ.2553
โรงแรมเอเชีย ราชเทวี กรุงเทพฯ

จลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอโรไดงของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420

รัสรินทร์ ชีระชวาลเกียรติ และ ปฏิภาณ จุ้ยเจิม*

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 พหลโยธิน ลาดยาว

จดจักร กรุงเทพฯ 10900

*ผู้เขียนที่เป็นชื่อหลัก: fengppj@ku.ac.th

บทคัดย่อ: ในปัจจุบัน การใช้งานที่ต้องการสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนนิยมนำเหล็กกล้าไร้สนิมมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตามการต้านทานการสึกหรอยังเป็นสิ่งที่จำเป็นเนื่องจากการใช้งานในปัจจุบันนั้นมีความซับซ้อนและยังต้องรับภาระทางกลที่สูง กระบวนการปรับปรุงผิวโดยกระบวนการเคมีความร้อน เช่น กระบวนการบอโรไดง ในไตรไดง และคาร์บูไรซิงเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม กระบวนการปรับปรุงผิวโดยกระบวนการเคมีความร้อนเป็นกระบวนการที่เกี่ยวกับกระบวนการแพร่ ซึ่งจลนพลศาสตร์ของกระบวนการปรับปรุงผิวโดยกระบวนการเคมีความร้อนนั้นเป็นสิ่งสำคัญ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอโรไดงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI420 โดยใช้เตาอ่างเกลือในสภาวะบรรยากาศปกติ ซึ่งเติมเกลือบอแรกซ์และเฟอร์โรซิลิกอนเป็นรีดิวเซอร์ ทำการทดลองที่อุณหภูมิระหว่าง 1123 – 1273 เคลวิน เป็นเวลา 1 - 9 ชั่วโมง โครงสร้างทางจุลภาคและชั้นเคลือบบอโรไดงถูกตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์และการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) ความหนาของชั้นเคลือบบอโรไดงที่เกิดขึ้น สามารถวัดได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ร่วมกับโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ (Image Pro) จากงานวิจัยพบว่าชั้นเคลือบบอโรไดงมีความหนามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการเคลือบสูงขึ้น จลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอโรไดงสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการการแพร่และสมการ Arrhenius ค่าพลังงานก่อกัมมันต์สามารถคำนวณได้เท่ากับ 377.788 kJ/mol นอกจากนี้ ค่าตัวแปรที่ได้จากงานวิจัยสามารถนำมาสร้างสมการทั่วไปที่ใช้ทำนายค่าความหนาของชั้นเคลือบบอโรไดงซึ่งสามารถนำไปใช้ได้จริงในอุตสาหกรรม

คำสำคัญ: เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420, การปรับปรุงพื้นผิว, กระบวนการบอโรไดง, จลนพลศาสตร์

Abstract: Recently, stainless steels are used mainly for corrosion resistant applications. However, wear resistance is much more required due to complicated and high-load applications. Thermochemical surface treatments such as boriding, nitriding as well as carburizing, are frequently mentioned. Thermochemical surface treatments involve a diffusion process. Consequently, the kinetics of the thermochemical surface treatment is important. Therefore, in this research, the kinetics of boriding process on stainless steel AISI420 have been investigated using a salt bath containing borax and ferro-silicon as a reducer at ambient. The boriding processes were performed at temperature range of 1123 – 1273 K and for about 1 – 9 h. The morphology of the boride layer was characterized by

optical microscopy and X-ray diffraction (XRD). The thicknesses of boride layer were measured using the optical microscope with Image Pro program. It was found that the boride layer thickness increase with increasing boriding temperature and time. The kinetics of the boriding process was analyzed by diffusion and Arrhenius equations. An activation energy of the boriding process of 377.788 kJ/mol was calculated. Finally, a general equation using empirical parameters from experiment to predict the thickness of the boride layer was established for industries.

Key words: Stainless steel AISI 420, Surface treatment, Boriding, Kinetics

1. บทนำ

เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นเหล็กอัลลอยด์ที่มีสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่าเหล็กทั่วไป จึงนิยมนำไปใช้งานกันอย่างแพร่หลายทั้งในงานทางด้านวิศวกรรมหรือแม้กระทั่งทางการแพทย์ แต่ในปัจจุบันนั้นมีการใช้งานที่มีความซับซ้อนและยังต้องรับภาระทางกลที่สูงเพิ่มมากขึ้นจึงมักประสบปัญหาด้านการสึกหรอของชิ้นงานทำให้อายุการใช้งานสั้นและสร้างความเสียหายเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีโครงสร้างแบบมาเทนไซต์ ซึ่งมีลักษณะการนำไปใช้งานที่เน้นงานที่ต้องรับภาระทางกลค่อนข้างสูง เช่น วาล์ว หัวฉีดเตา แม่พิมพ์ หรืออุปกรณ์การตัด [1] ดังนั้นการปรับปรุงพื้นผิวให้กับเหล็กกล้าไร้สนิมโดยเฉพาะเหล็กกล้าไร้สนิมแบบมาเทนไซด์ จึงเป็นทางเลือกทางหนึ่งที่สามารถจะทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมให้มีสมบัติการต้านทานการสึกหรอที่ดีขึ้นได้ ส่งผลต่ออายุการใช้งานต่างๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิมให้สามารถใช้งานได้อย่างเหมาะสม มีประสิทธิภาพสูง และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น กระบวนการบอโรได้นั้นเป็นกระบวนการปรับปรุงผิวกระบวนการหนึ่งที่เป็นกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวทางเคมีความร้อน โดยทำการแพร่อะตอมโบรอนเข้าสู่ผิวของโลหะและเกิดเป็นสารประกอบบอโรได้นซึ่งเป็นสารประกอบบอโรได้นที่เกิดขึ้นมานั้นมีความแข็งสูง มีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ และทนต่อการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง [2] โดยความหนาของชั้นสารประกอบบอโรได้นที่เกิดขึ้นมานั้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอะตอมโบรอนภายในเตา อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการเคลือบซึ่งเป็นไปตามตามทฤษฎีการแพร่ของอะตอมในสภาวะของแข็ง [3, 4] นอกจากตัวแปรดังกล่าวแล้วนั้นค่าพลังงานกระตุ้นของของกระบวนการบอโรได้นจากหลักการของจลนพลศาสตร์ตามสมการของ Arrhenius [5-9] ซึ่งจะเป็นสมการที่มีประโยชน์มากในทางปฏิบัติเนื่องจากสามารถใช้ทำนายความหนาของชั้นเคลือบบอโรได้นได้เมื่อเราทราบค่าพลังงานกระตุ้นและค่าคงที่จากการทดลอง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการเคลือบผิวบอโรได้นบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI420 ด้วยกระบวนการบอโรได้นแบบอ่างเกลือ โดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบบอโรได้นที่เกิดขึ้นรวมทั้งค่าพลังงานกระตุ้นของของกระบวนการบอโรได้นตามหลักการของจลนพลศาสตร์ ซึ่งสุดท้ายเราสามารถนำค่าตัวแปรต่างๆที่ได้จากการทดลองนำมาสร้างสมการทั่วไปที่ใช้ทำนายค่าความหนาของชั้นเคลือบบอโรได้นซึ่งสามารถนำไปใช้ได้ในอนาคตต่อไป

2. วิธีการทดลอง

เหล็กที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 (ส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 มม. สูง 25 มม. และผ่านการเตรียมพื้นผิวโดยการขัดด้วยกระดาษทรายจนถึงเบอร์ 600 เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ผิวชิ้นงานออก กระบวนการบอโรได้งกระทำในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวโดยเติมเฟอร์โรซิลิกอน 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นตัวรีดิวเซอร์ อุณหภูมิในการเคลือบผิวในช่วง 1123 – 1273 K และเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว 1 – 9 ชั่วโมง

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมมาเทนซิดิค AISI 420 (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
wt. %	0.30	0.25	0.43	0.018	0.028	0.32	12.15	Bal.

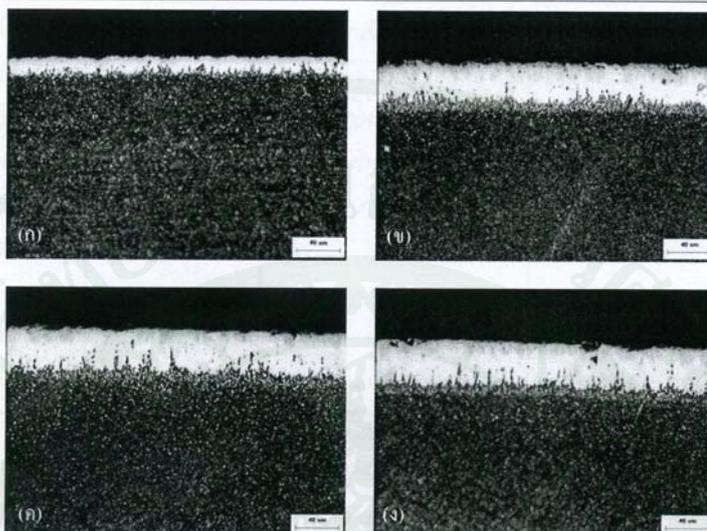
ชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นจะถูกวิเคราะห์อย่างละเอียดด้วยกล้องจุลทรรศน์ และการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD) ค่าความเข้มของชั้นเคลือบจะถูกตรวจสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ ความหนาของชั้นเคลือบถูกวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์ร่วมกับโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ (Image analyzer) ผลการทดลองที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยสมการการแพร่และจลนพลศาสตร์เพื่อหาค่าตัวแปรต่างๆจากการทดลอง

3. ผลการทดลองและอภิปราย

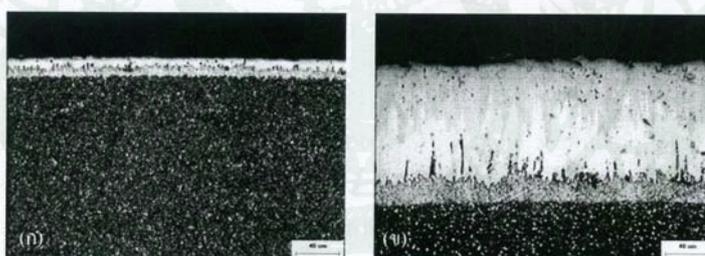
3.1 ชนิด โครงสร้าง และสมบัติของชั้นเคลือบ

จากการทดลองพบว่าเกิดชั้นเคลือบขึ้นบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 หลังจากกระบวนการบอโรได้ง โดยชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นมีความหนาเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาในการเคลือบผิวเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) – (ง) ที่แสดงถึงโครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบที่ผ่านกระบวนการบอโรได้งที่อุณหภูมิ 1223 K เป็นเวลา 1 – 9 ชั่วโมง จากรูปพบว่าความหนาเพิ่มขึ้นจาก 14.6 μm ไปจนถึง 40.6 μm เมื่อเพิ่มเวลาในการเคลือบผิวจาก 1 ชั่วโมงไปจนถึง 9 ชั่วโมง นอกจากนั้นยังพบว่าชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นมานั้นยังมีความหนาเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2 (ก) และ (ข) ที่แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบที่ผ่านกระบวนการบอโรได้งที่อุณหภูมิ 1123 และ 1223 K เป็นระยะเวลา 9 ชั่วโมง โดยสามารถวัดความหนาได้เท่ากับ 11.5 และ 109.8 μm ตามลำดับ จากการตรวจสอบโครงสร้างด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่ามีส่วนประกอบของสารประกอบ FeB และ Fe₂B ดังแสดงในรูปที่ 3 ที่แสดงสเปกตรัมของการตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรได้งที่อุณหภูมิ 1273 K เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ซึ่งเป็นการยืนยันว่าชั้นเคลือบที่ได้เป็นชั้นเคลือบบอโรได้ง และเป็นชั้นเคลือบบอโรได้งชนิด

การประชุมระดมสมองการสร้างเครือข่ายความร่วมมือด้านวิจัย ทอมก : วิจัยวิจัยและการพัฒนาประเทศ ประจำปี พ.ศ.2553
โรงแรมเอเชีย ราชเทวี กรุงเทพฯ



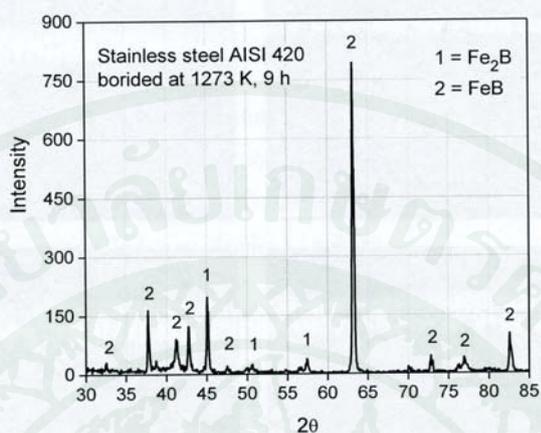
รูปที่ 1 (ก) – (ง) โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบของโรดีนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการอบโรดิ่งที่อุณหภูมิ 1223 K เป็นเวลา 1 4 6.25 และ 9 ชั่วโมง ตามลำดับ



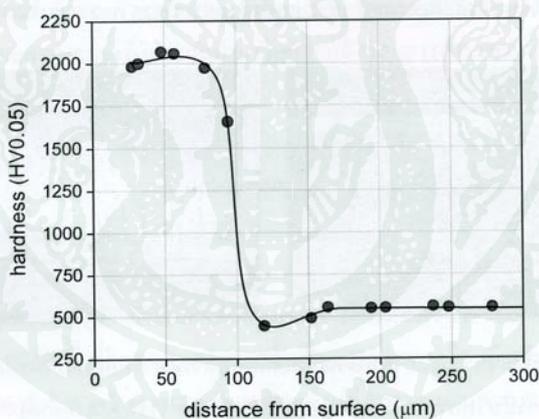
รูปที่ 2 (ก) และ (ข) โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบของโรดีนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการอบโรดิ่งที่อุณหภูมิ 1173 และ 1273 K ตามลำดับ

เฟสคู่คือ Fe_2B และ FeB โดยชั้นของ FeB (สีเข้ม) จะอยู่ชั้นนอกสุด และ Fe_2B (สีอ่อน) อยู่ถัดเข้ามา ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อชั้นเคลือบของโรดีนมีความหนาอย่างชัดเจน เช่น ชั้นเคลือบของโรดีนที่อุณหภูมิ 1223 K เป็นระยะเวลา 9 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 2 (ข) ชั้นเคลือบของโรดีนที่ได้มีลักษณะชั้นเคลือบที่ค่อนข้างราบเรียบเนื่องมาจากธาตุผสมที่มีปริมาณสูงในเหล็กกล้าไร้สนิมเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าคาร์บอน

การประชุมระดมสมองการสร้างเครือข่ายความร่วมมือด้านวิจัย ทอมก : วิจัยวิจัยและการพัฒนาประเทศ ประจำปี พ.ศ.2553
โรงแรมเอเชีย ราชเทวี กรุงเทพฯ



รูปที่ 3 สเปกตรัมของการตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 K เป็นเวลา 9 ชั่วโมง



รูปที่ 4 ความแข็งบริเวณชั้นเคลือบบอโรดิงที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 K เป็นระยะเวลา 9 ชั่วโมง

ธรรมดาที่มีธาตุผสมในปริมาณไม่สูงจะได้ชั้นเคลือบบอโรดิงที่มีลักษณะเป็นพื้นปลา [2] ชั้นเคลือบบอโรดิงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่เกิดขึ้นจะมีค่าความแข็งที่สูงมากถึง 2000 HV และค่าความแข็งจะลดลงเมื่อลึกลงมา ดังตัวอย่างในรูปที่ 4 ที่แสดงค่าความแข็งบริเวณชั้นเคลือบบอโรดิงที่ได้จากกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 K เป็นระยะเวลา 9 ชั่วโมง พบว่าที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI420

เป็นชั้นของเหล็กบอไรด์ Fe_2B และ FeB มีค่าความแข็งประมาณ 2000 HV ต่อจากนั้นค่าความแข็งลดลงมาที่ประมาณ 450 HV ซึ่งเป็นบริเวณที่มีปริมาณธาตุโครเมียมสูงเนื่องจากธาตุโครเมียมไม่สามารถละลายในชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่เกิดขึ้นมาได้จึงถูกดันเข้ามาในชั้นงานทำให้มีปริมาณธาตุโครเมียมสูงบริเวณใต้ชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์และมีแนวโน้มที่ค่าความแข็งจะลดลงเนื่องจากโครงสร้างมีแนวโน้มที่จะเกิดเป็นเฟสเฟอร์ไรต์ สุดท้ายเป็นค่าความแข็งของเนื้อพื้นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่เป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์มีความแข็งประมาณ 560 HV

3.2 จลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอไรดิ้ง

ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆกัน พบว่าความหนาชั้นเคลือบบอไรด์มีความสัมพันธ์กับเวลาในการเคลือบผิวตามสมการการแพร่ในสมการที่ 1 [2] ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์เส้นตรงระหว่างค่าความหนาของชั้นบอไรด์กับรากที่สองของเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว

$$K = \frac{d^2}{t} \quad (1)$$

โดยที่ d = ความหนาของชั้นเคลือบ (เมตร)

K = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (เมตร²/วินาที)

t = เวลาในการทำบอไรดิ้ง (วินาที)

จากรูปที่ 5 สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของการทำบอไรดิ้งที่อุณหภูมิต่างๆได้จากสมการที่ (1) และค่าความชันของกราฟ นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ และพลังงานกระตุ้นตามหลักของจลนพลศาสตร์ดังแสดงในสมการ Arrhenius [5-9] ดังสมการ (2)

$$K = K_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

โดยที่ K_0 = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ (เมตร²/วินาที)

Q = ค่าพลังงานกระตุ้น (จูล/โมล)

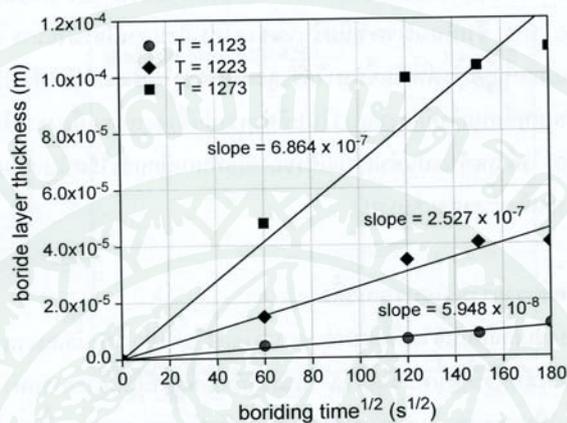
T = อุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบ (เคลวิน)

R = ค่าคงที่ของแก๊สมีค่าเท่ากับ 8.3143 จูล/โมล·เคลวิน

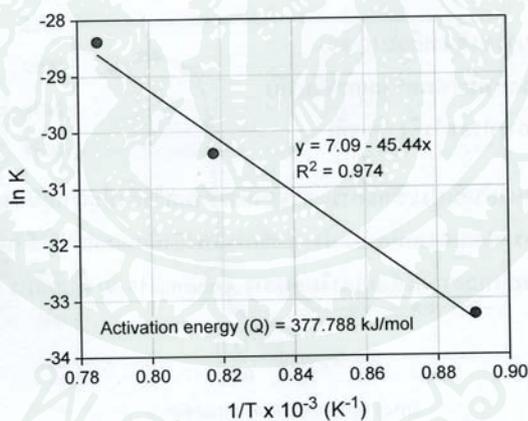
จากสมการที่ (2) สามารถจัดรูปได้เป็นสมการที่ (3)

$$\ln K = \ln K_0 - \frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T}\right) \quad (3)$$

การประชุมระดับนานาชาติของวิศวกรรมเครื่องกลเรื่องความร่วมมือด้านวิจัย ทอมก : วิจัยวิจัยและการพัฒนาประเทศ ประจำปี พ.ศ.2553
 โรงแรมเอเชีย ราชเทวี กรุงเทพฯ



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์กับรากที่สองของเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (ln K) และส่วนกลับของอุณหภูมิ

จากสมการ 3 จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกับสมการเส้นตรง ดังนั้นการคำนวณค่าพลังงานกระตุ้นของการแพร่ซึมของโบรอนนั้น สามารถคำนวณหาได้จากค่าความชันของกราฟเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 6 โดยค่าพลังงานกระตุ้นของกระบวนการเคลือบเหล็กบอไรด์บนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ในอ่างเคลือบบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรซิลิกอน 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 377.788 kJ/mol

4. สรุปผลการทดลอง

จากงานวิจัยจลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอโรไดซิงของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่อุณหภูมิ 1123 – 1273 K สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 สามารถทำการเคลือบผิวเหล็กบอโรไดซิงได้ในกระบวนการบอโรไดซิงแบบอ่างเกลือโดยใช้เฟอร์โรซิลิกอน 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นรีดิคเซอร์ ซึ่งชั้นเคลือบบอโรไดซิงที่เกิดขึ้นเป็นชนิดเฟส FeB และ Fe₂B และมีลักษณะราบเรียบโดยมีความแข็งสูงถึง 2000 HV
2. ชั้นเคลือบบอโรไดซิงที่เกิดขึ้นบนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 มีความหนาของชั้นเคลือบเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามหลักการของการแพร่ของอะตอมในสถานะของแข็ง
3. ค่าพลังงานกระตุ้นของกระบวนการบอโรไดซิงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ที่อุณหภูมิ 1123 – 1273 K สามารถคำนวณออกมาได้โดยใช้หลักการทางจลนพลศาสตร์และสมการของ Arrhenius มีค่าเท่ากับ 377.788 kJ/mol

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Chandler, H (Ed.). (1995) Heat Treater's Guide, *ASM International*, OH, USA.
 - [2] Sinha, A.K. and Bohn, P.D. (1994) Boriding (Boronizing), *ASM Handbook*, **4**, pp. 437-447.
 - [3] Davis, J.R. (2002) Boriding, *Surface Hardening of Steels*, **8**, pp. 213-216.
 - [4] Yoon, J.H., Jee, Y.K. and Lee, S.Y. (1999) Plasma paste boronizing treatment of the stainless steel AISI 304, *Surface and Coatings Technology*, **112**, pp. 71-75.
 - [5] Genel, K. (2005) Boriding kinetics of H13 steel, *Vacuum*, **80**, pp. 451 – 457.
 - [6] Genel, K., Ozbek, I. and Bindal, C. (2003) Kinetics of boriding of AISI W1 steel, *Materials Science and Engineering*, **347**, pp. 311-314.
 - [7] Lingyun, X., Xiaochun, W and Hongbin, W. (2007) Influence of Surface Nanostructured Treatment on Pack Boriding of H13 Steel, *J. Mater. Sci. Technol*, **23**, 525-528.
 - [8] Taktak, S. (2007) Some mechanical properties of borided AISI H13 and 304 steels, *Materials and Design*, **28**, pp. 1836-1843.
- Saduman, S., Ugur, S. and Cuma, B. (2004) An approach to kinetic study of borided steels, *Surface & Coatings Technology*, **191**, pp. 274 – 285.



PROCEEDINGS

The *Sixth* Thailand Materials Science and Technology Conference



In conjunction with
 The Sixth National Chitin - Chitosan Conference
 Thailand Textile Symposium 2010

August 26-27, 2010
Miracle Grand Convention Hotel,
Bangkok, Thailand

Organized by



Conference Sponsors



*Oral Presentations:
Materials for Automotive Session*



CONTENTS

Keynote Lectures

KL-01	Multiscale Engineering Solutions for Biomedicine <i>James Goh</i>	1
KL-02	Corrosion Analysis and Protection of Metals in Asia Pacific Area <i>Tadashi Shinohara</i>	2

Invited Lectures

IL-01	Sheet Metal Forming with Automotive Sector in Thailand <i>Dilok Sriprapai</i>	3
IL-02	Low-Cost Adsorbents for Heavy Metals Removal <i>Sandhya Babel</i>	4
IL-03	Optimized Binder System for Concrete Application in Thailand <i>Somnuk Tangtermsirikul and Krittiya Kaewmanee</i>	5
IL-04	Role of Multi-Functional and Sustainable Fiber Reinforced Concrete in Structural Rehabilitation, Repair and Sensing <i>Nemy Banthia</i>	6
IL-05	Material Technology for Artificial Heart <i>Phornphop Naiyanetr</i>	7
IL-06	Leadfree Manufacturing in Integrated Circuit <i>Anocha Sriyarunya, Jiraporn Tondtan and Witoon Kittidecha</i>	8
IL-07	Designed, Natural Texturisers from Agro-based Sustainable Sources <i>L. Bialek, C. Carin-Cuissinat, S. Regismont and S. Schumm</i>	9

Oral Presentations

Materials for Automotive

AO-01	Sintered Binary Fe-(Cu, Sn, C) Materials <i>Thanyaporn Yodkaew, Monnapas Morakotjinda, Nattaya Tosangthum, Rungtip Krataitong, Bhanu Vetayanugul and Ruangdaj Tongsi</i>	10
AO-02	During Welding Investigation of Phase Transformations of Weld Metal by Using Single Sensor Differential Thermal Analysis (SS-DTA) <i>Wutipong Niumpradit, Anupon Kanarak, Sarawan Wongsas and Isaratat Phung-on</i>	13
AO-03	Investigation of Chromium Carbide Precipitation on Post-Heat Treatment of Stainless Steel AISI 304 <i>Nakarin Srisuwan and Manoon Lertvijitphun</i>	16
AO-04	Boride Coating on Stainless Steel AISI 440C and its Characterization <i>Rutsarin Teerachavalkiat and Patiphan Juijerm</i>	19
AO-05	Effects of Heat Treatment on Pulse-Reverse Electrodeposited Ni-W Alloy Coatings <i>Narasak Sunwang, Panyawat Wangyao and Yuttanant Boonyongmaneerat</i>	22
AO-06	AlCrSiTiN Nanocomposite Coatings Developed by Cathodic Arc: Evaluation of Mechanical Properties <i>Nurot Panich, D.A. Karpov and Surasak Surinphong</i>	26

Boride Coating on Stainless Steel AISI 440C and its Characterization

Rutsarin Teerachavalkiat and Patiphan Juijerm*

Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

*Corresponding Author: Tel. (02) 942-8555 ext 2103, 2109, Fax. (02) 955-1811, E-mail: fengppj@ku.ac.th

Abstract

Nowadays, there are many complicated and high-load applications for stainless steels, especially for martensitic stainless steel. Therefore, wear resistance is much more important. Boride layer possesses many outstanding properties as compared to carburized or nitrided layers, e.g. high hardness, oxidation resistance and low friction coefficient. Therefore, in this research, the boride coating on martensitic stainless steel AISI 440C have been investigated using a salt bath at ambient. The boriding processes were performed at 1000 °C and for about 1 – 9 h. Afterwards, an optical microscope, Scanning Electron Microscope (SEM) with Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS) and X-ray diffraction (XRD) were used to characterize the boride layers. The hardness values were measured using Vickers microhardness tester. It was found that the boride layer can be produced on a stainless steel AISI 440C using a salt bath containing melt borax with ferro-silicon 15 % wt. as a reducer at ambient. Near-surface hardness value of the borided layer more than 2000 HV was detected. Double phases (Fe₂B and FeB) boride layer including chromium rich regions beneath the borided layer were observed. Finally, a diffusion coefficient of $1.42 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ can be calculated using the diffusion equation.

Keywords: Surface treatment; Diffusion; Boriding; Wear resistance; Stainless steel AISI 440C

1. Introduction

Stainless steels are well known as corrosion resistant steels which are well established in various industries for a long time. However, for martensitic stainless steels, the main applications are high-load applications, such as industrial tooling, ball-bearing, pump parts, cutlery, high temperature component, etc. [1, 2]. Recently, there are many problems about wear of stainless steels not only martensitic stainless

steels but also austenitic and ferritic stainless steels. To enhance their operating or service times, a surface treatment is an excellent method. Boriding or boronizing process involving a diffusion of boron atom into ferrous or non ferrous substrates is a thermo chemical surface treatment improving the hardness, wear resistance and oxidation resistance [3 – 6]. Therefore, boride coating on martensitic stainless steel and its characterization are of particular interest. Thus, this paper investigated and discussed the boride coating on martensitic Stainless Steel AISI 440C using a salt bath boriding at 1000 °C with varied boriding times of 1 – 9 h. The characterization of boride layer was investigated and discussed. Moreover, a diffusion coefficient of boron atoms into the stainless steel AISI 440C at 1000 °C will be calculated and shown in this paper.

2. Experimental Procedures

The rolled stainless steel AISI 440C was delivered as annealed bars with a diameter of 13 mm. The chemical compositions of Stainless Steel AISI 440C are given in Table 1. Cylindrical specimens with diameter of 13 mm and height of 25 mm were prepared. Before boriding process, specimens were ground up to 600 mesh emery paper. Boriding process was carried out using the salt bath consisting of borax as a boron source and 15 wt% ferrosilicon as a reducer. Boriding process was performed in an electrical resistant furnace at a temperature of 1000 °C for holding time of 1, 4, 6.25 and 9 h. Having completed the boriding process, test materials were removed from the bath and quenched in air. The microstructures of polished and etched cross-sections of the specimens were observed by an optical microscope and scanning electron microscope. The presence of borides formed in the coating layer was confirmed by means of X-ray diffraction using Cu K_α radiation. The thicknesses of borides were measured

by means of an image analyzer program attached to an optical microscope. The hardness values were measured using Vickers microhardness tester.

Table 1. The chemical compositions of stainless steels AISI440C (all in wt%)

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

3. Results and Discussion

3.1. Microstructure and Characterization

Fig. 1 shows the near-surface microstructure of the martensitic Stainless Steel AISI 440C borided at 1000 °C for 9 h taking from scanning electron microscope with electron backscatter (SEM-BE). As can be observed the double-phase layers formed on the stainless steel substrate have smooth and flat morphology as compared to the layers formed on the surface of high alloy steels [3]. The X-ray diffraction pattern of the borided stainless steels at 1000 °C for 1 h is illustrated in Fig. 2. The phases on the borided stainless steel AISI 440C are Fe₂B and FeB. It is confirmed that the layer formed by the boriding process on the stainless steel AISI 440C in this research is a double-phase boride layer, Fe₂B (light color in Fig. 1) and FeB (dark color in Fig. 1). MnB is not found in this research due to possibly amount of Mn in this steel is only about 0.38 wt%. Accordingly, the low volume fraction of the MnB cannot be detected by the XRD measurement. Moreover, chromium-rich regions beneath the double-phase boride layers were detected by EDS at point "X" in Fig. 1 as shown in Fig. 3. It can be mentioned that chromium dissolves slightly in the boride layers, as a consequence, chromium atoms are pushed into the stainless steel substrate and then form the chromium-rich regions containing Cr approximately 35 wt% beneath the boride layers (transition zones between the boride layer and the substrate). As expected, hardness values of boride layers (about 2,000 HV) are much higher than that of the stainless steel substrates (about 640 HV), whereas other well-known coating processes such as carburizing and nitriding provide the hardness values only 550 – 850 and 550 – 1150 HV, respectively [3]. The hardness depth profile of stainless

steel AISI 440C borided at 1000 °C for 9 h is shown in Fig.

4.

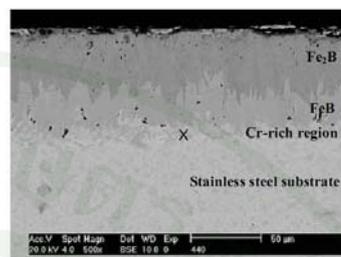


Fig. 1. SEM-BE of the stainless steel AISI 440C borided at 1000 °C for 9 h.

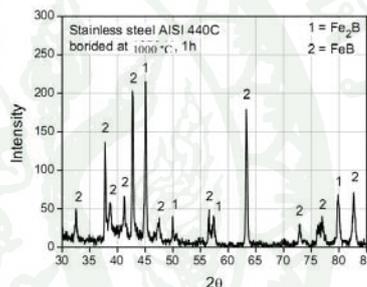


Fig. 2. XRD pattern of the stainless steel AISI 440C borided at 1000 °C for 1 h.

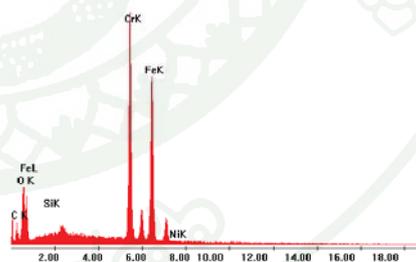


Fig. 3. EDS pattern of the Cr-rich region at the point "X" in Fig. 1.

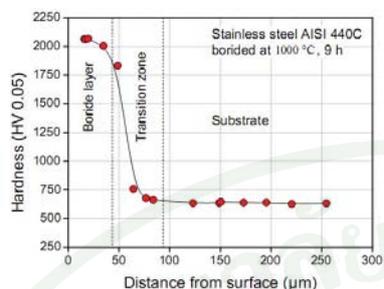


Fig. 4. Hardness depth profile of the near-surface stainless steel AISI 440C borided at 1000 °C for 9 h.

3.2 Diffusion coefficient

In the section 3.1, it can be concluded that an appropriate boriding process can produce a boride layer on a stainless steel AISI 440C. Moreover, it was found that the boride layer thickness increases with increasing boriding times. The boride layer thickness of 32.3 µm was detected after boriding time of 1 h, whereas the boride layer thickness of 65.2 µm was measured after boriding time of 9 h. Additionally, the growth of the boride layer takes into account a diffusion control describing by diffusion equation in Eq. 1 [6].

$$K = \frac{d^2}{t} \quad (1)$$

where d is a thickness of a boride layer (m), t is boriding time (s), K is a diffusion coefficient (m^2/s). Therefore, a diffusion coefficient, K can be determined by a slope of a plot graph of a power of 2 of the boride layer thickness (d^2) versus boriding time (t) as depicted in Fig. 5. Finally, the diffusion coefficient of $1.42 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ was calculated.

4. Conclusion

In this research, the boride coating on martensitic stainless steel AISI 440C was investigated and characterized. It can be concluded as follows.

- 1) The Stainless Steel AISI 440C can be borided using an appropriate salt bath at ambient (for this research, a salt bath contains borax and 15 wt% ferrosilicon).

- 2) The formed boride layers on stainless steel AISI 440C have smooth and flat morphology with high hardness value of 2000 HV.
- 3) The boride layer thickness increases with increasing boriding times taking into account a diffusion theory.
- 4) A diffusion coefficient of $1.42 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ was determined for the stainless steel AISI 440C borided at a temperature of 1000 °C for 1 – 9 h.

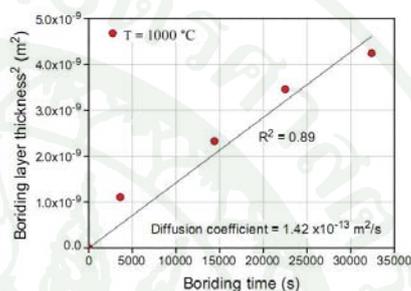


Fig. 5. Plot of the boride layer thickness² (d^2) versus boriding time (t).

References

- [1] Chandler, H., "Heat treater's guide: practices and procedures for irons and steels", *ASM International*, 2: 42 – 810 (1995).
- [2] Ozbek, I., Sen, S. and Ipek, M., "A mechanical aspect of borides formed on the AISI 440C stainless-steel", *Vacuum*, 73: 643–648 (2004).
- [3] Sinha, A.K. and Bohn, P.D., "Boriding (Boronizing)", *ASM Handbook*, 4: 437 – 447 (1994).
- [4] Davis, J.R., "Boriding", *Surface Hardening of Steels*, 8: 213 – 216 (2002).
- [5] Yoon, J.H., Jee, Y.K. and Lee, S.Y., "Plasma paste boronizing treatment of the stainless steel AISI304", *Surface and Coatings Technology*, 112: 71 – 75 (1999).
- [6] Saduman, S., Ugur, S. and Cuma, B., "An approach to kinetic study of borided steels" *Surface & Coatings Technology*, 191: 274 – 285 (2004).

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวรัศรินทร์ ชีระชวาลเกียรติ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	13 เมษายน 2528
สถานที่เกิด	จังหวัดสุรินทร์
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	งานวิจัยเรื่องจลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอโรดิงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ได้รับทุนผู้ช่วยสอนจากภาควิชาวิศวกรรมวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ.2552) ได้รับทุนวิจัยจากศูนย์เทคโนโลยีเหล็กและวัสดุแห่งชาติ (National Metal and Materials Technology Center, MTEC) (พ.ศ.2552)