ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)

ปริญญา

วิศวกรรมวัสดุ — **สาขา**

วิศวกรรมวัสดุ — **ภาควิชา**

เรื่อง อิทธิพลของไฟฟ้ากระแสตรงต่อจลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอไรดิงบนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420

Effects of Direct Current on Kinetics of Boriding Process on Martensitic Stainless Steel AISI 420

นามผู้วิจัย นางสาวลักษมี อังกุรรัชต์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....

(อาจารย์ปฏิภาณ จุ้ยเจิม, Dr.Ing.)

หัวหน้าภาควิชา ....

(อาจารย์ปฏิภาณ จุ้ยเจิม, Dr.Ing.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ .... **เดือน** .... **พ.ศ.** ....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

อิทธิพลของไฟฟ้ากระแสตรงต่อจลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอไรดิงบนเหล็กกล้าไร้สนิม
มาร์เทนซิติก AISI 420

Effects of Direct Current on Kinetics of Boriding Process on Martensitic Stainless Steel AISI 420

โดย

นางสาวลักษมี อังกุรรัชต์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)
พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ลักษมี อังกุรรัชต์ 2554: อิทธิพลของไฟฟ้ากระแสตรงต่อจลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอไรดิงบนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ) สาขาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ปฏิภาณ จุ้ยเจิม, Dr.Ing. 100 หน้า

ในงานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของไฟฟ้ากระแสตรงต่อจลนพลศาสตร์ของกระบวนการแพคบอไรดิงบนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ทดลองที่อุณหภูมิ 850 900 และ 950^{0}C เป็นระยะเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ด้วยไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 170 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้ผง Ekabor I โครงสร้างจุลภาคและชั้นเคลือบบอไรด์ที่ได้ถูกตรวจสอบอย่างละเอียดด้วยกล้องจุลทรรศน์ทั้งแบบแสงและเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยรังสีเอ็กซ์ ความแข็งวัดด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ จากการทดลองพบว่า ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถปรับปรุงการแตกตัวและการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของสารประกอบบอไรดิงและกระตุ้นให้โบรอนไอออนแพร่ไปยังชิ้นงานแคโทดได้ดีกว่าอะตอมโบรอนอิสระ ดังนั้นความเข้มข้นของโบรอนรอบๆชิ้นงานแคโทดจึงมีค่าสูงกว่าชิ้นงานแอโนดและชิ้นงานอ้างอิงเป็นผลทำให้ความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ของกระบวนการบอไรดิงที่ผ่านการให้ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าที่สูง จากกระบวนการบอดิงแบบดั้งเดิมและกระบวนการบอไรดิงที่ผ่านการให้ไฟฟ้ากระแสตรง ชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้นเป็นชนิดเฟสคู่ (FeB และ Fe_2B) ค่าความแข็งของชั้นเคลือบบอไรด์มีค่าประมาณ 1800-2000 HV ส่วนจลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอไรดิงสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการการแพร่และสมการอาร์เรเนียส ค่าพลังงานกระตุ้นของกระบวนการบอไรดิงแบบดั้งเดิมและกระบวนการบอไรดิงที่ผ่านการให้ไฟฟ้ากระแสตรงบนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 สามารถคำนวณได้เท่ากับ 186.04 และ 111.50 กิโลจูล/โมล ตามลำดับ นอกจากนี้ค่าตัวแปรที่ได้จากการทดลองสามารถนำมาสร้างสมการทั่วไปที่ใช้ทำนายค่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ซึ่งสามารถนำไปใช้ได้จริงในอุตสาหกรรม

________________ ____________________________ ___ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Laksamee Angkurarach 2011: Effects of Direct Current on Kinetics of Boriding Process on Martensitic Stainless Steel AISI 420. Master of Engineering (Materials Engineering), Major Field: Materials Engineering, Department of Materials Engineering. Thesis Advisor: Mr. Patipan Juijerm, Dr.Ing. 100 pages.

The effects of direct current field pack boriding process on martensitic stainless steel AISI 420 have been investigated at temperatures 850, 900 and 950^{0}C for about 2, 4 and 6 h by using Ekabor I powders with direct current field of 170 mA/cm^2 The microstructure and the presence of boride layers were chaeacterized using optical microscope and X-ray Diffraction (XRD). The hardness values of the boride layer were measured by Vicker microhardness tester. Experimental results show that the direct current field can enhance the decomposition and chemical reaction in the boriding agents and also drive active force free boron ions as well as atoms to diffuse toward the cathode. Therefore, a boron concentration around the specimen at the cathode is higher than that at the anode and the reference. As a consequence, higher boride layer thickness of direct current field boriding process was detected. The double-phase boride layer (FeB and Fe_2B) was found both conventional boriding process and boriding process with direct current field. The hardness of the boride layer of about 1800-2000 HV can be observed. The kinetics of the boriding process was analyzed by diffusion and Arrhenius equations. An activation energy of conventional boriding process and boriding process with direct current field on martensitic stainless steel AISI 420 is of about 186.04 and 111.50 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

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความปรารถนาดี และความกรุณาของบุคคลต่างๆ หลายท่าน ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร.ปฏิภาณ จุ้ยเจิม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษาและชี้แนะในทุกเรื่อง ไม่ว่าจะเป็นการเรียน การศึกษาค้นคว้า การดำเนินงานวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมวัสดุทุกท่าน ที่ได้กรุณาอบรมสั่งสอนและมอบความรู้ทั้งทางวิชาการและคุณธรรมจริยธรรมอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ธุรการและบุคลากรในภาควิชาวิศวกรรมวัสดุที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และกำลังใจเสมอมา ตลอดจนการอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่และรุ่นน้องในภาควิชาวิศวกรรมวัสดุทุกคน ที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือทั้งกำลังกายและกำลังใจ

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์สำหรับเงินทุนอุดหนุนเพื่อการตีพิมพ์ผลงานในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ ซึ่งทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณบิดามารดาที่ได้ดูแล อบรมสั่งสอน ให้กำลังใจและช่วยเหลือในทุกๆ เรื่องตลอดมา

ท้ายสุดนี้ ขอมอบความดีของวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อเป็นกตเวทิตาคุณแด่บิดา มารดา และคณาจารย์พร้อมกันนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะก่อให้เกิดประโยชน์ต่อสังคมและประเทศโดยส่วนรวมสืบไป

ลักษมี อังกุรรัชต์

กันยายน 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(12)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	27
อุปกรณ์	27
วิธีการ	28
ผลและวิจารณ์	31
ผล	31
วิจารณ์	55
สรุปและข้อเสนอแนะ	74
สรุป	74
ข้อเสนอแนะ	75
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	76
ภาคผนวก	79
ภาคผนวก ก วิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	80
ภาคผนวก ข ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์	82
ภาคผนวก ค ปริมาณไฟฟ้ากับอุณหภูมิจริง	90
ภาคผนวก ง ความแข็งของชั้นเคลือบบอไรด์	92
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	100

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1 สมบัติทั่วไปของเหล็กบอไรด์ (FeB และ Fe_2B) 11

2 การเปรียบเทียบค่าความแข็งของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์และชั้นเคลือบอื่นๆ 12

3 แสดงถึงการเปรียบเทียบค่าพลังงานการกระตุ้นของเหล็ก D2 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงที่แตกต่างกัน 22

4 การเปรียบเทียบความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ของชิ้นงาน DCFPB และCPB (5 % B-Fe, อุณหภูมิเตา 800 องศาเซลเซียส, 4 ชั่วโมง, กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์) 23

5 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ใช้ในการทดลอง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) 27

6 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิต่างๆ 59

7 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิต่างๆ 67

8 อุณหภูมิเฉลี่ยของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในกระบวนการเคลือบผิวที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง 71

9 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการแพคบอไรดิงที่ผ่านและไม่ผ่านการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิต่างๆ 73

ตารางผนวกที่

ข1 ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิง ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ 83

ข2 ความหนาของชั้น FeB บนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิง ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ 84

ข3 ความหนาของชั้น Fe_2B บนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิง ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ 85

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่ | หน้า

ข4 ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรง ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ 86

ข5 ความหนาของชั้น FeB บนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรง ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ 87

ข6 ความหนาของชั้น Fe_2B บนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรง ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ 88

ข7 ความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ของชิ้นงานแคโทดและชิ้นงานแอโนดกับปริมาณกระแสไฟที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 900^{o}C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง 89

ค1 อุณหภูมิจริงของชิ้นงานแคโทดกับปริมาณกระแสไฟของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 900^{o}C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง 91

ง1 ค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 93

ง2 ค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิง ณ อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมงจากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็ก 94

ง3 ค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิง ณ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมงจากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็ก 95

ง4 ค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิง ณ อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมงจากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็ก 96

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่ **หน้า**

ง5	ค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรง ณ อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็ก	97
ง6	ค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรง ณ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็ก	98
ง7	ค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรง ณ อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็ก	99

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่ | หน้า

ภาพที่		หน้า
1	เฟสไดอะแกรมของเหล็กและโครเมียม (Fe-Cr)	5
2	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ซึ่งมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นมาร์เทนไซต์	5
3	ความสัมพันธ์ของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์กับความหนาของผงโบรอนที่บรรจุ	9
4	โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ชนิดเฟสคู่	10
5	ลักษณะของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์เกิดขึ้นอยู่กับธาตุที่ผสมอยู่ในเหล็ก	13
6	โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์ที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงบนเหล็กกล้าไร้สนิม (ก) AISI 304 (ข) AISI 420 และ (ค) AISI 440C	14
7	ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ค่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์กับเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวที่อุณหภูมิต่างกันของเหล็ก AISI W1 (ข) ค่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ยกกำลังสองกับเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวของเหล็ก AISI W1	16
8	อัตราการเปลี่ยนแปลงคงที่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการบอไรดิงเหล็ก AISI W1	17
9	หลักการของการปรับปรุงเฉพาะที่ผิวโดยกระบวนการทางกล (ก.) การเสียรูปอย่างถาวรบริเวณใกล้กับพื้นผิว (ข.) ความเครียดบริเวณใกล้กับพื้นผิว (ค.) ชั้นที่เกิดการเสียรูปที่ติดกับก้อนวัสดุ (ไม่สามารถยืดออกไป)	18
10	ภาพหน้าตัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดและระยะชั้นเคลือบของอัตราส่วนอะตอม Al/Fe ที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	20
11	ความลึกของ Al ในชั้นเคลือบของการยิงด้วยลูกเหล็ก (Peened) และไม่ทำการยิงด้วยลูกเหล็กที่ผิว (Unpeened) ที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	20
12	ภาพตัดขวางของชั้นเคลือบบอไรด์ที่อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน (a1) 5 นาที, (b1) 60 นาทีที่ 850°C, (a2) 5 นาที, (b2) 60 นาทีที่ 900°C, (a3) 5 นาที, (b3) 60 นาที ที่ 1000°C	22
13	ความหนาชั้นเคลือบอลูมิไนซิงของชิ้นงานที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยกระแสไฟเท่ากับ 4 แอมแปร์ (ก.) เหล็กกล้าเกรด 45 (ข.) เหล็กกล้าเกรด 20	23

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
14	อุณหภูมิจริงของชิ้นงานและอุณหภูมิเตาในกระบวนการแพคอลูมิไนซิง ที่อุณหภูมิ 923 -1023 เคลวิน เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้กระแสไฟเท่ากับ 4 แอมแปร์	25
15	แผนภาพจำลองของการกระจายของเส้นไฟฟ้าและอะตอมโบรอนหรืออะตอมอลูมิเนียมที่ถูกกระตุ้นรอบๆขั้วอิเล็กโทรด: (1.) เส้นไฟฟ้า (2.) แอโนด (3.) อะตอมโบรอนหรืออะตอมอลูมิเนียมที่ถูกกระตุ้น (4.) แคโทด	26
16	การวางชิ้นงานในการทำแพคบอไรดิงด้วยไฟฟ้ากระแสตรง	29
17	แผนภาพงานวิจัย	30
18	ภาพตัดขวางของโครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420	31
19	ภาพตัดขวางของโครงสร้างจุลภาคชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิ 850^{o}C เป็นเวลา (ก.) 2 ชั่วโมง (ข.) 4 ชั่วโมง และ (ค.) 6 ชั่วโมง	33
20	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เรย์ของชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิ 850^{o}C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	34
21	ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิ 850^{o}C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง	34
22	ค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิ 850^{o}C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง	35
23	ภาพตัดขวางของโครงสร้างจุลภาคชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิ 900^{o}C เป็นเวลา (ก.) 2 ชั่วโมง (ข.) 4 ชั่วโมง และ (ค.) 6 ชั่วโมง	37
24	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เรย์ของชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทน ซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิ 900^{o}C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	38

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
25	ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง	38
26	ค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง	39
27	ภาพตัดขวางของโครงสร้างจุลภาคชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา (ก.) 2 ชั่วโมง (ข.) 4 ชั่วโมง และ (ค.) 6 ชั่วโมง	41
28	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เรย์ของชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง	42
29	ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง	42
30	ค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง	43
31	ความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ของชิ้นงานแคโทดและชิ้นงานแอโนดกับปริมาณกระแสไฟที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	45
32	อุณหภูมิจริงของชิ้นงานแคโทดกับปริมาณกระแสไฟของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	45
33	ภาพตัดขวางของโครงสร้างจุลภาคชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา (ก.) 2 ชั่วโมง (ข.) 4 ชั่วโมง และ (ค.) 6 ชั่วโมง	47

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

34 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง 48

35 ค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง 48

36 ภาพตัดขวางของโครงสร้างจุลภาคชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา (ก.) 2 ชั่วโมง (ข.) 4 ชั่วโมง และ (ค.) 6 ชั่วโมง 50

37 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง 51

38 ค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง 51

39 ภาพตัดขวางของโครงสร้างจุลภาคชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา (ก.) 2 ชั่วโมง (ข.) 4 ชั่วโมง และ (ค.) 6 ชั่วโมง 53

40 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง 54

41 ค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง 54

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
42	ความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	57
43	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสองของความหนาชั้นเคลือบบอไรด์และเวลาที่ใช้ในการผ่านการเคลือบผิวบนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ด้วยกระบวนการแพคบอไรดิง	59
44	ความสัมพันธ์ระหว่างลอกาลิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (lnK) และส่วนกลับของอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว (1/T) ในกระบวนการแพคบอไรดิงบนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420	60
45	การคำนวณความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ในกระบวนการแพคบอไรดิงบนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	61
46	ความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	65
47	การกระจายตัวของอะตอมโบรอนภายใต้สนามไฟฟ้าในกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรง	65
48	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสองของความหนาชั้นเคลือบบอไรด์และเวลาที่ใช้ในผ่านการเคลือบผิวบนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรง	66
49	ความสัมพันธ์ระหว่างลอกาลิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (ln K) และส่วนกลับของอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว (1/T) ในกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงบนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420	67
50	การคำนวณความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ในกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงบนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	68

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ | หน้า

ภาพที่		หน้า
51	การเปรียบเทียบความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงที่ผ่านและไม่ผ่านการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	70
52	การเปรียบเทียบค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงที่ผ่านและไม่ผ่านการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 950^{0}C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง	72

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่ **หน้า**

ก1	ข้อมูล Diffractrogram ของ Fe_2B	81
ก2	ข้อมูล Diffractrogram ของ FeB	81

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ºC	=	องศาเซลเซียส
A	=	แอมแปร์
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)
AISI	=	American Iron and Steel Institute
HV	=	Hardness of Vicker

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อิทธิพลของไฟฟ้ากระแสตรงต่อจลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอไรดิงบนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420

Effects of Direct Current on Kinetics of Boriding Process on Martensitic Stainless Steel AISI 420

คำนำ

ในปัจจุบัน ได้มีการนำเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติกมาใช้งานหลากหลายเป็นอย่างมาก อาทิเช่น งานโครงสร้าง ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ ชิ้นส่วนในเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ เป็นต้น (Callister, 2000) เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติกมีสมบัติที่โดดเด่นคือ สามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดี และมีความแข็งสูง แต่การนำเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติกนี้ไปใช้งานส่วนใหญ่เน้นไปในงานที่ต้องรับภาระทางกลค่อนข้างสูงจึงทำให้ประสบกับปัญหาต่างๆ ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งคือ มีอายุการใช้งานที่สั้น เนื่องมาจากความทนทานต่อการสึกหรอไม่ดีหรือเกิดการแตกหักในระหว่างการใช้งาน ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมให้มีสมบัติที่ดีขึ้น และมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น

บอไรดิง หรือโบรอนไนซิง เป็นกระบวนการปรับปรุงผิวโลหะประเภทหนึ่ง โดยอะตอมของโบรอนจะแพร่ซึมเข้าไปในเนื้อเหล็ก ทำให้สมบัติที่บริเวณผิวเกิดการเปลี่ยนแปลงและได้รับความหนาชั้นเคลือบของเหล็กบอไรด์ (FeB และ Fe_2B) (Sinha and Bohn, 1994) ซึ่งความหนาชั้นเคลือบนั้นจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอะตอมโบรอนในบรรยากาศภายในเตา อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในกระบวนการตามทฤษฎีการแพร่ของอะตอมในสภาวะของแข็ง (Callister, 2000) ซึ่งก็คือ ถ้าอัตราการแพร่ซึมของอะตอมโบรอนมีค่าสูงขึ้น จะทำให้ชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์มีความหนามากขึ้นด้วย แต่ในกระบวนการบอไรดิงต้องอาศัยปัจจัยต่างๆในการเพิ่มความหนาชั้นเคลือบ ไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มอุณหภูมิ และการใช้ระยะเวลาในการเคลือบที่นานขึ้น ทำให้เป็นการสิ้นเปลืองพลังงานในกระบวนการบอไรดิงเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงได้มีการพิจารณานำไฟฟ้ากระแสตรงมาช่วยให้อัตราการแพร่ซึมของอะตอมมีค่าสูงขึ้นซึ่งอาศัยการเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้า น่าที่จะส่งผลให้ได้ชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถลดต้นทุนในการผลิตชิ้นงานทางวัตถุดิบ พลังงานและเวลา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ในโครงงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาอิทธิพลของไฟฟ้ากระแสตรงต่อจลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอไรดิงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 โดยทำการทดลองหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเพื่อทำการเคลือบผิวด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิ 850 900 และ950 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง เพื่อทำการศึกษาค่าความแข็งโครงสร้างบริเวณผิว ความหนาชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ผ่านและไม่ผ่านการใช้ไฟฟ้ากระแสตรง รวมทั้งศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการแพคบอไรดิงบนชิ้นงานที่ผ่านและไม่ผ่านการใช้ไฟฟ้ากระแสตรง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาอิทธิพลของกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไฟฟ้ากระแสตรงต่อความหนาชั้นเคลือบในกระบวนการแพคบอไรดิงบนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420

2. ศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการแพคบอไรดิงบนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

3. ปรับปรุงและเพิ่มความหนาชั้นเคลือบด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงบนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

1. เหล็กกล้าไร้สนิม

ในปัจจุบัน เหล็กกล้าไร้สนิมนิยมนำไปใช้งานกันอย่างแพร่หลายทั้งในอุตสาหกรรมต่างๆ ไม่ว่าเป็น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเคมี อุตสาหกรรมอาหาร และอุตสาหกรรมทางการแพทย์ เป็นต้น เนื่องมาจากเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นเหล็กกล้าผสมที่มีสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนที่สูงกว่าเหล็กทั่วไป โดยมีธาตุโครเมียม นิกเกิล และคาร์บอน เป็นธาตุหลัก ซึ่งส่วนผสมของธาตุโครเมียมต้องไม่ต่ำกว่า 12 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้เกิดการสร้างแผ่นฟิล์มของโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ที่บางและติดแน่นที่ผิวเหล็กกล้า สามารถปกป้องเหล็กกล้าจากบรรยากาศได้ (Callister, 2000)

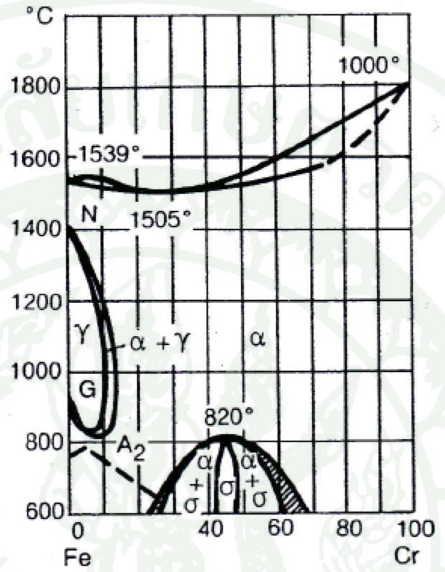
โดยทั่วไป เหล็กกล้าไร้สนิมมีมากมายหลายประเภท แต่สามารถแบ่งตามโครงสร้างได้ 5 ประเภท ดังนี้

1.1 เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก (Martensitic Stainless Steel)

เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก เป็นเหล็กที่มีส่วนผสมของธาตุโครเมียมและคาร์บอนในปริมาณที่พอเหมาะเพื่อสามารถเปลี่ยนโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ (γ) ได้เมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิสูงประมาณ 900-1000 ^{0}C ดังแสดงในภาพที่ 1 และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศจะได้โครงสร้างสุดท้ายเป็นมาร์เทนไซต์ ดังแสดงในภาพที่ 2 โดยทั่วไปส่วนผสมของปริมาณโครเมียมจะอยู่ในช่วงประมาณ 12-18 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณของคาร์บอนอยู่ในช่วงประมาณ 0.15-1 เปอร์เซ็นต์ ทำให้มีสมบัติที่แม่เหล็กดูดติดได้ มีสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนปานกลาง และสามารถชุบแข็งได้ ในด้านสมบัติเชิงกล เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก และความต้านทานแรงดึงสูงมาก แต่จะมีค่าความยืดต่ำ (มนัส, 2542, 2543) เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้จึงนิยมใช้ในงานแม่พิมพ์พลาสติก วาล์ว เครื่องตัด เช่น มีด กรรไกรใบพัดเรือ กังหัน เป็นต้น และอุปกรณ์เครื่องมือทางการแพทย์ที่ต้องการความแข็งแรงสูง ตัวอย่างของเกรดเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก เช่น เกรด AISI 403 410 420 431 และ 440 เป็นต้น (Chandler, 1995)

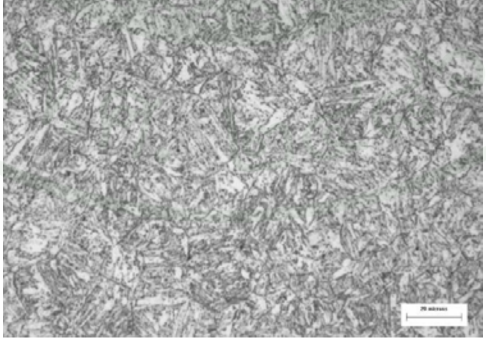
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 จัดเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก ซึ่งสามารถชุบแข็งได้ดี โดยความแข็งหลังชุบแข็งมีค่ามากกว่า 500 HB หลังจากการชุบแข็งและอบคืนไฟจะมีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดี เหมาะสำหรับงานแม่พิมพ์พลาสติก เครื่องมือตัด วาล์ว และหัวฉีดเตา เป็นต้น



ภาพที่ 1 เฟสไดอะแกรมของเหล็กและโครเมียม (Fe-Cr)

ที่มา: มนัส (2542)



ภาพที่ 2 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 ซึ่งมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นมาร์เทนไซต์

ที่มา: สยาม (2554)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.2 เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอริติก (Ferritic Stainless Steel)

เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอริติก เป็นเหล็กที่มีโครงสร้างเป็นเฟอร์ไรท์ ซึ่งโดยส่วนใหญ่มีส่วนผสมของโครเมียมประมาณ 12-17 เปอร์เซ็นต์ มีสมบัติที่แม่เหล็กดูดติดได้ และมีสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนสูง ในด้านสมบัติเชิงกล เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก และค่าความต้านทานแรงดึงปานกลาง มีค่าความสูง เช่น เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 430, 409 เป็นต้น แต่ไม่สามารถชุบแข็งได้และทำการขึ้นรูปได้ยาก ดังนั้น เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอริติกจึงมีราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับกลุ่มออสเทนนิติก แต่อาจพบปัญหาเรื่องเกรนหยาบ (Grain Coarsening) และสูญเสียความแกร่ง (Toughness) หลังการเชื่อม (มนัส, 2542, 2543) ตัวอย่างของเกรดเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอริติก เช่น เกรด AISI 430 409 และ 434 เป็นต้น โดยส่วนใหญ่นิยมนำเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มาทำเป็นชิ้นส่วนเครื่องซักผ้า ชิ้นส่วนระบบท่อไอเสีย ซิงค์น้ำส่วนประกอบของอุปกรณ์ ให้ความร้อน อุปกรณ์เครื่องใช้ภายในบ้าน และเครื่องใช้ภายในครัวเรือน เป็นต้น (Chandler, 1995)

1.3 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic Stainless Steel)

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกกลุ่มนี้เป็นที่นิยมใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม ซึ่งเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีส่วนผสมของโครเมียมประมาณ 14-30 เปอร์เซ็นต์ นิกเกิลประมาณ 8-35 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณของคาร์บอนไม่เกิน 0.15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งการที่ผสมนิกเกิลในเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้จะช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อน และทำให้โครงสร้างจุลภาคเป็นออสเตนไนต์ และบางครั้งก็มีการผสมธาตุอื่นๆอีก เช่น โมลิบดีนัม ซิลิกอน และแมงกานีส เป็นต้น เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านอื่นๆให้ดีขึ้น เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ไม่สามารถเพิ่มความแข็งได้ด้วยกระบวนการทางความร้อน มีสมบัติที่ไม่ดูดติดแม่เหล็ก และมีสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนสูง ในด้านสมบัติเชิงกล เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกจะมีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (Yield Strength) ใกล้เคียงกับของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก แต่จะมีค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) และค่าความยืด (Elongation) สูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก จึงสามารถขึ้นรูปได้ดีมาก (มนัส, 2542, 2543) ตัวอย่างของเกรดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เช่น เกรด AISI 304 316L และ 301 เป็นต้น โดยส่วนใหญ่เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น เครื่องใช้ภายในครัวเรือน ภาชนะบรรจุอาหาร และแท้งค์ขนาดใหญ่ เป็นต้น (Chandler, 1995)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.4 เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (Duplex Stainless Steel)

เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เป็นเหล็กกล้าที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาใหม่ โดยมีโครงสร้างผสมระหว่างออสเทนไนต์และเฟอร์ไรท์ ซึ่งมีปริมาณของโครเมียมผสมประมาณ 21-28 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณของนิกเกิลผสมประมาณ 3-7.5 เปอร์เซ็นต์ เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีความต้านทานแรงดึงที่จุดครากสูงและค่าความยืดสูง จึงเรียกได้ว่ามีทั้งความแข็งแรงและความเหนียว (Ductility) สูง สามารถเชื่อมและหล่อได้ง่าย เนื่องจากมีปริมาณของเฟอร์ไรท์อยู่ในโครงสร้างค่อนข้างมาก แต่ข้อเสียของเหล็กกลุ่มนี้คือขึ้นรูปได้ยากเพราะมีโครงสร้างทั้งสองเฟส และมีสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนดีมาก (มนัส, 2542) ตัวอย่างของเกรดเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เช่น เช่น เกรด 2304 2205 และ 2507 เป็นต้น โดยส่วนใหญ่จะนิยมนำเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มาใช้งานเป็นชิ้นส่วนอุตสาหกรรมที่ต้องการความปลอดภัยสูง หรือใช้กับอุปกรณ์ที่ใช้ในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด หรือใช้ในงานที่ต้องสัมผัสกับบรรยากาศที่กัดกร่อนสูง เช่น นำไปผลิตเป็นถัง และท่อ เป็นต้น (Chandler, 1995)

1.5 เหล็กกล้าไร้สนิมอบชุบแข็งด้วยการตกผลึก (Precipitation Hardening Stainless Steel)

เหล็กกล้าไร้สนิมอบชุบแข็งด้วยการตกผลึก เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่สามารถอบชุบให้มีความแข็งเพิ่มขึ้นโดยอาศัยการตกผลึก โดยที่ความเหนียวของเหล็กไม่ลดลงมาก และไม่สูญเสียสมบัติการต้านทานการกัดกร่อน ซึ่งมีปริมาณของโครเมียมผสมประมาณ 15-18% และปริมาณของนิกเกิลผสมอยู่ประมาณ 3-8% เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้สามารถทำการชุบแข็งได้ จึงเหมาะสำหรับทำแกน ปั๊ม และหัววาล์ว เป็นต้น ตัวอย่างเกรดของเหล็กกล้าไร้สนิมอบชุบแข็งด้วยการตกผลึกนี้ได้แก่ เกรด AISI 630 635 PH13-9Mo และ AM-350 เป็นต้น (มนัส, 2542)

ดังนั้น การนำเหล็กกล้าไร้สนิมมาใช้งานต่างๆที่มีความซับซ้อนและรับภาระทางกลที่สูงเพิ่มมากขึ้น จึงประสบปัญหาด้านการสึกหรอของชิ้นงานหรือเกิดการแตกหักในระหว่างการใช้งาน ทำให้มีอายุการใช้งานที่สั้นและสร้างความเสียหายเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก ซึ่งมีลักษณะการใช้งานที่เน้นงานที่ต้องรับภาระทางกลค่อนข้างสูง ดังนั้น จึงต้องมีการปรับปรุงผิวให้กับเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีสมบัติต้านทานการสึกหรอที่ดีขึ้น มีประสิทธิภาพในการใช้งานสูง และมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. กระบวนการบอไรดิง

กระบวนการบอไรดิง หรือโบรอนไนซิง เป็นกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวทางความร้อนเชิงเคมี โดยอะตอมของโบรอนจะแพร่ซึมเข้าไปในเนื้อเหล็ก ทำให้สมบัติที่บริเวณผิวเกิดการเปลี่ยนแปลงและได้เกิดเป็นความหนาชั้นเคลือบของเหล็กบอไรด์ (Sinha and Bohn, 1994) ซึ่งความหนาชั้นเคลือบนั้นจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอะตอมโบรอนในบรรยากาศภายในเตา อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการตามทฤษฎีการแพร่ของอะตอมในสภาวะของแข็ง (Callister, 2000) กระบวนการนี้เป็นวิธีที่สามารถนำไปใช้กับเหล็กได้หลากหลายประเภท ไม่ว่าจะเป็นโลหะในกลุ่มเหล็กหรือโลหะนอกกลุ่มเหล็ก เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความแข็ง การต้านทานการสึกหรอและความต้านทานการเกิดออกซิเดชันให้สูงขึ้น โดยทั่วไปการทำกระบวนการบอไรดิงจะทำที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 700 – 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-12 ชั่วโมง กระบวนการบอไรดิงสามารถทำได้หลายวิธีโดยใช้สารตัวกลางที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบ ในสภาพของของแข็ง ของเหลว และแก๊ส เป็นต้น ซึ่งวิธีการที่นิยมในปัจจุบัน เช่น กระบวนการแพคบอไรดิง (Pack Boriding) กระบวนการบอไรดิงแบบอ่างเกลือ (Salt Bath) กระบวนการแก๊สบอไรดิง (Gas Boriding) กระบวนการพลาสมาบอไรดิง (Plasma Boriding) และกระบวนการฝังไอออน (Ion Implantation Boriding) เป็นต้น

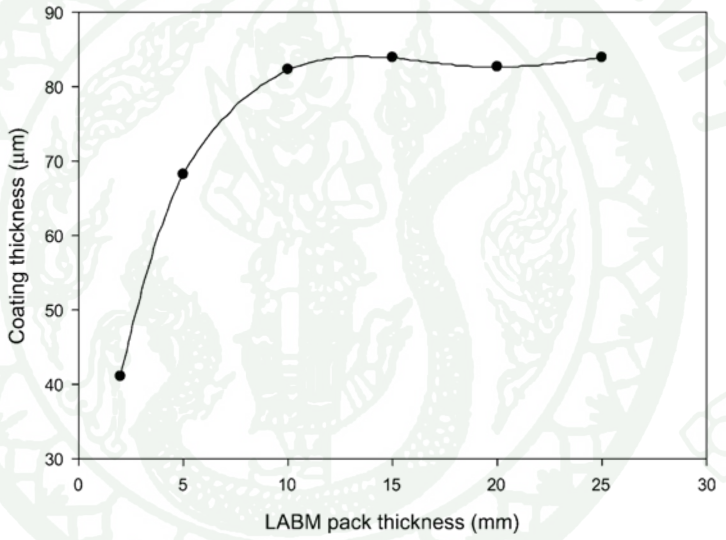
2.1 กระบวนการแพคบอไรดิง

กระบวนการแพคบอไรดิงเป็นวิธีการหนึ่งที่ทำได้ง่ายและเป็นที่นิยมอย่างมาก เนื่องมาจากกระบวนการนี้สามารถเปลี่ยนแปลงส่วนผสมของผงที่ใช้ในการเคลือบได้ตามความต้องการและสามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ ผงที่ใช้ในกระบวนการนี้ มักเป็นผงสำเร็จรูปที่มีส่วนผสมของสารที่ให้กำเนิดอะตอมโบรอนอิสระ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า บอไรดิงเอเจ็นท์ (Boriding Agent) โดยส่วนใหญ่นิยมใช้ผงโบรอนคาร์ไบด์ (Boron Carbide, B_4C) และเฟอร์โรโบรอน (Ferroboron) เป็นต้น สารที่ทำหน้าที่เป็นตัวเจือจาง (Diluent) มักจะใช้เป็นซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon Carbide, SiC) และอลูมินา (Alumina, Al_2O_3) เป็นต้น และสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้น (Activator) ทำให้เกิดการแตกตัวออกมาเป็นอะตอมโบรอนมักใช้เป็นโพแทสเซียมฟลูออโบเรท (Potassium Fluoborate, KBF_4) โซเดียมฟลูออโบเรท (Sodium fluoroborate, $NaBF_4$) และบอแรกซ์ (Borax, $Na_2B_4O_7$) เป็นต้น (Sinha and Bohn, 1994) ในกระบวนการทำแพคบอไรดิง ผงโบรอนสำเร็จรูปทั้งหมดนี้จะถูกบรรจุลงในกล่องหรือภาชนะบรรจุพร้อมทั้งชิ้นงานที่ต้องการเคลือบผิวฝังเข้าไปด้วย ซึ่งความหนาในการบรรจุผงโบรอนรอบๆชิ้นงานต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 10 มิลลิเมตร จึงจะ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สามารถให้ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์และสมบัติที่เหมาะสม (Vipin and Sundararajan, 2002) ดังแสดงในภาพที่ 3 แล้วทำการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการทำแพคบอไรดิง ซึ่งในกระบวนการทำนี้จะทำในสภาวะของแก๊สเฉื่อยเพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันบนผิวชิ้นงาน หลังจากทำการเคลือบผิวเสร็จสิ้นกระบวนการแล้วก็ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในอากาศ

ข้อดีของการทำกระบวนการแพคบอไรดิงมีอยู่มากมายหลายประการ คือ เป็นวิธีการที่มีความปลอดภัย สามารถเคลื่อนย้ายชุดอุปกรณ์ได้สะดวก สามารถเปลี่ยนแปลงส่วนผสมของผงที่ใช้ในการเคลือบได้ตามความต้องการ และยังสามารถใช้ได้กับเตาทุกชนิด เมื่อเทียบกับกระบวนการบอไรดิงแบบอื่นๆ



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์กับความหนาของผงโบรอนที่บรรจุ

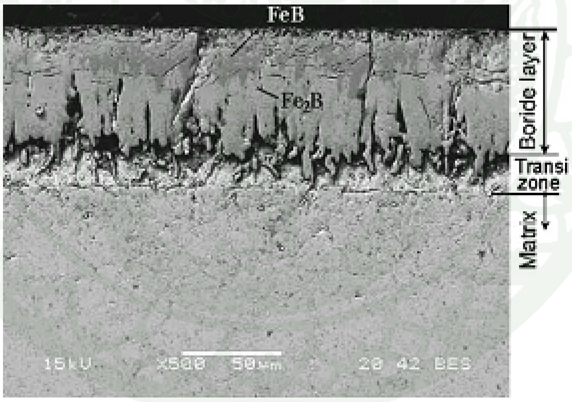
ที่มา: Vipin and Sundararajan (2002)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.2 ชนิด โครงสร้าง และสมบัติของชั้นเคลือบบอไรด์

ในกระบวนการบอไรดิง อะตอมของโบรอนที่มาจากผงสำเร็จรูปจะแพร่เข้าไปรวมตัวกับธาตุเหล็กที่ผิวของเหล็ก รวมกันเกิดเป็นชั้นเหล็กบอไรด์ (FeB แล Fe_2B) ซึ่งชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ในโลหะกลุ่มเหล็กนั้น อาจเกิดชั้นเคลือบได้ 2 ชนิด คือ เฟสเดี่ยว (Single Phase) เป็นชั้นของ Fe_2B และเฟสคู่ (Double Phase) ประกอบด้วยชั้นที่มีสีเข้มกว่า คือ FeB เกิดขึ้นที่ผิว และชั้นที่มีสีอ่อนกว่า คือ Fe_2B เกิดขึ้นระหว่างเนื้อพื้น มีลักษณะคล้ายฟันเลื่อย ดังแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งชั้นเคลือบทั้งสองชนิดที่เกิดขึ้นมีสมบัติที่แตกต่างกันดังตารางที่ 1 (Sinha and Bohn, 1994)

ข้อดีของชั้นเคลือบที่ได้จากกระบวนการบอไรดิง คือ มีความแข็งที่สูงมาก ดังแสดงในตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่า ค่าความแข็งของชั้นเคลือบบอไรด์มีค่ามากกว่าค่าความแข็งของชั้นเคลือบที่ได้จากกระบวนการทางความร้อนอื่นๆ ไม่ว่าจะเป็น กระบวนการคาร์บูไรซิง กระบวนการไนไตรดิง และการชุบแข็ง เป็นต้น



ภาพที่ 4 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ชนิดเฟสคู่

ที่มา: Genel (2005)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 1 สมบัติทั่วไปของเหล็กบอไรด์ (FeB และ Fe_2B)

สมบัติ	FeB	Fe_2B
ค่าความแข็ง	1900 – 2100 HV	1800 – 2000 HV
ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น	590 GPa	285 – 295 GPa
ค่าความหนาแน่น	6.75 g/cm^3	7.43 g/cm^3
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน	23 ppm/°C	7.65 – 9.2 ppm/°C
สัดส่วนของโบรอน	16.23% โดยน้ำหนัก	8.83 % โดยน้ำหนัก
โครงสร้างผลึก	Ortorhombic ซึ่งมี 4 อะตอมของเหล็ก (Fe) และ 4 อะตอมของโบรอนในยูนิตเซลล์	Body – center tetragonal มี 12 อะตอมต่อยูนิตเซลล์
ขนาดผลึก	a = 4.053 A b = 5.495 A c = 2.946 A	a = 5.078 A c = 4.249 A

ที่มา: Sinha and Bohn. (1994)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบค่าความแข็งของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์และชั้นเคลือบอื่นๆ

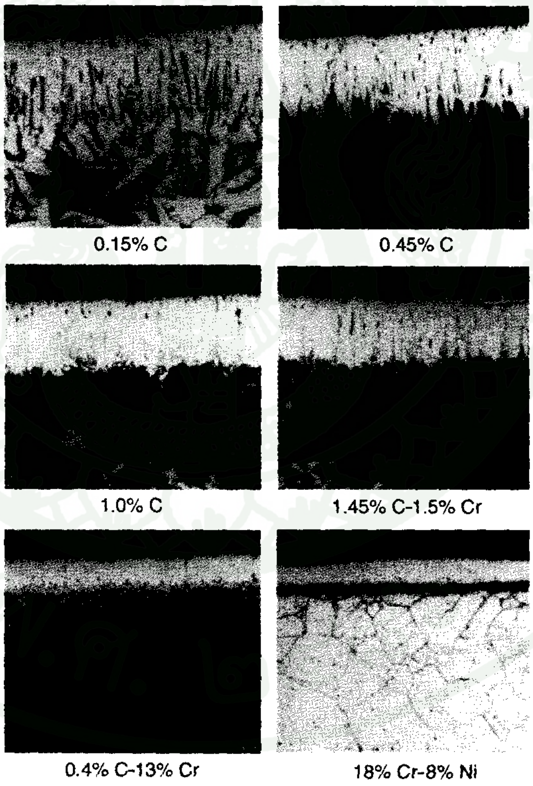
วัสดุ	ค่าความแข็ง (HV)
เหล็กเหนียวผ่านกระบวนการบอไรดิง	1600
เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 ผ่านกระบวนการบอไรดิง	1800
เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น A2 ผ่านกระบวนการบอไรดิง	1900
เหล็กมาร์เทนไซต์	900
เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 ผ่านกระบวนการชุบแข็ง	540 - 600
เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น A2 ผ่านกระบวนการชุบแข็ง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

ที่มา: Davis (2002)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.3 อิทธิพลของธาตุผสมที่มีต่อชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์

ในกระบวนการทำบอไรดิง พบว่า โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่เกิดขึ้นมี 2 ลักษณะ คือ ลักษณะเรียบสม่ำเสมอ และลักษณะคล้ายฟันเลื่อย ดังแสดงในภาพที่ 5 ซึ่งการที่ชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์เกิดขึ้นเช่นนี้ขึ้นอยู่กับธาตุที่ผสมอยู่ในเหล็กนั้นๆ หากชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่เกิดขึ้นในเหล็กบริสุทธิ์หรือมีการเติมธาตุผสมน้อยจะมีลักษณะแบบฟันเลื่อย และชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่เกิดขึ้นในเหล็กที่มีธาตุผสมสูงจะมีลักษณะความหนาแบบเรียบสม่ำเสมอ เนื่องจากธาตุผสมในเหล็กจะเป็นตัวขัดขวางการแพร่ของอะตอมโบรอนและส่งผลในการต้านการเติบโตของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ ส่งผลให้เหล็กที่มีธาตุผสมมากจะมีความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ลดลง (Davis , 2002)

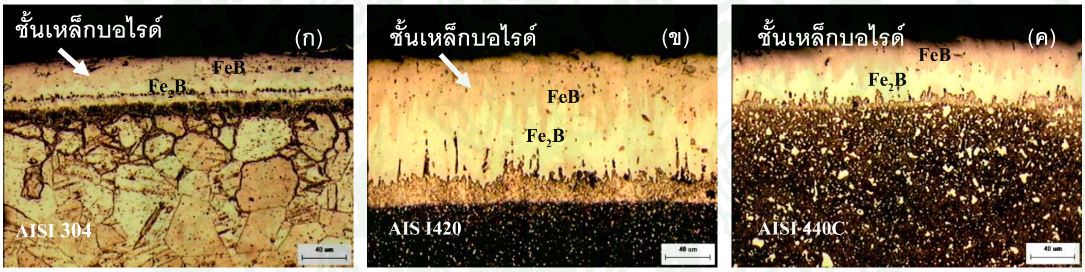


ภาพที่ 5 ลักษณะของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์เกิดขึ้นอยู่กับธาตุที่ผสมอยู่ในเหล็ก

ที่มา: Davis (2002)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากงานวิจัยของรัสรินทร์ (2552) ได้ศึกษากระบวนการบอไรดิงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C ที่อุณหภูมิระหว่าง 850 - 1000^{0}C เป็นเวลา 1 - 9 ชั่วโมง พบว่า ชั้นเคลือบของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 มีลักษณะความหนาที่เรียบและสม่ำเสมอที่สุด ชั้นเคลือบของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C รองลงมา (Ozbek *et al*., 2004) และชั้นเคลือบของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 มีลักษณะเป็นฟันเลื่อยมากที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 6 เนื่องมาจากธาตุผสมที่มีปริมาณสูงในเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งพิจารณาจากองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม โดยที่เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 440C และ AISI 420 มีธาตุผสมรวม 29.041 18.872 และ 13.91 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และธาตุโครเมียมซึ่งเป็นธาตุผสมหลัก 18.26 16.59 และ 12.15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ดังนั้น เมื่อปริมาณของธาตุผสมรวมและธาตุโครเมียมในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 440C และ AISI 420 มีปริมาณมากขึ้นจึงส่งผลต่อลักษณะของชั้นเคลือบบอไรด์ให้ชั้นเคลือบบอไรด์มีลักษณะฟันเลื่อยมากขึ้น



ภาพที่ 6 โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบบอไรด์ที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงบนเหล็กกล้าไร้สนิม (ก) AISI 304 (ข) AISI 420 และ (ค) AISI 440C

ที่มา: รัสรินทร์ (2552)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. จลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอไรดิง

จากกระบวนการบอไรดิง พบว่า เวลาที่ใช้ในการเคลือบมีผลต่อความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ ดังแสดงในภาพที่ 7 (ก) โดยเวลาที่ใช้ในการเคลือบและความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์สัมพันธ์กันแบบพาราโบลิก และเมื่อนำความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ยกกำลังสองจะได้ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ยกกำลังสองแปรผันตรงตามเวลาในการเคลือบผิว ดังแสดงในภาพที่ 7 (ข) ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 1 (Arai *et al*., 1994; Genel *et al.,* 2003; Saduman *et al.*, 2005; Ozdemir *et al,* 2009)

$$K = \frac{d^2}{t} \tag{1}$$

เมื่อ	d	คือ	ความหนาของชั้นเคลือบ (ไมครอน)
และ	K	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ (T) และพลังงานการกระตุ้น (Q) ตามหลักการของจลนพลศาสตร์ตามสมการอาร์เรเนียสดังแสดงในสมการที่ 2

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

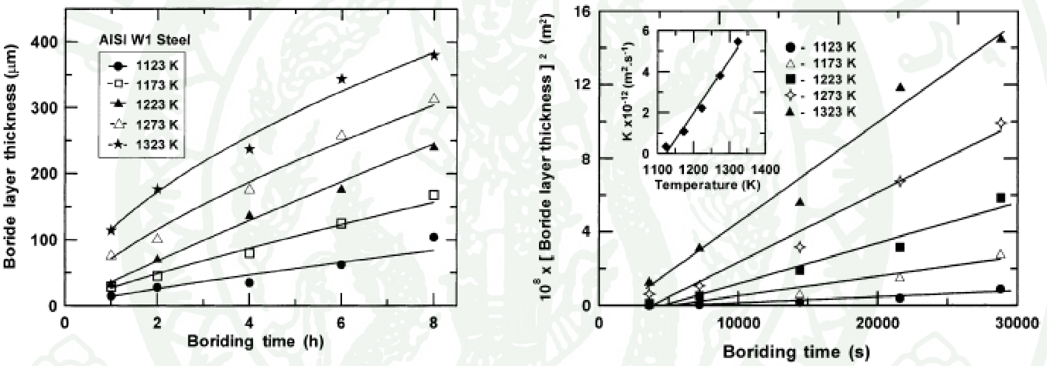
นำล็อกการิทึมคูณเข้าไปในสมการที่ (2) จะได้ดังสมการที่ 3

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

เมื่อ	K	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (ตารางเมตร/วินาที)
	K_0	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ (ตารางเมตร/วินาที)
	Q	คือ	ค่าพลังงานกระตุ้น (จูล/โมล)
	T	คือ	อุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบ (เคลวิน)
	R	คือ	ค่าคงที่ของก๊าซ มีค่าเท่ากับ 8.314 จูล/โมล.เคลวิน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากงานวิจัยของ Genel *et al.* (2003) ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอไรดิงบนเหล็ก AISI W1 โดยทำการทดลองกระบวนการบอไรดิงที่อุณหภูมิ 850-1050 °C เป็นระยะเวลา 1-8 ชั่วโมง พบว่า เวลาที่ใช้ในการเคลือบมีผลต่อความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ ดังแสดงในภาพที่ 7 (ก) โดยเวลาที่ใช้ในการเคลือบและความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์สัมพันธ์กันแบบพาราโบลิก และเมื่อนำความหนาของชั้นเคลือบยกกำลังสองแปรผัน จะได้ความหนาของชั้นเคลือบยกกำลังสองแปรผันตรงตามเวลาในการเคลือบผิว ดังแสดงในภาพที่ 7 (ข) และสามารถคำนวณค่าพลังงานก่อกัมมันต์การแพร่ซึมของกระบวนการนี้ได้ค่าเท่ากับ 171.2±16.6 KJ mol^{-1} ดังแสดงในภาพที่ 8 ดังนั้นในการนำไปใช้จริงในอุตสาหกรรม สามารถหาค่าอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการที่ดีที่สุด ให้ได้ความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ตามที่ต้องการจากค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของกระบวนการนี้ของเหล็ก AISI W1 ได้

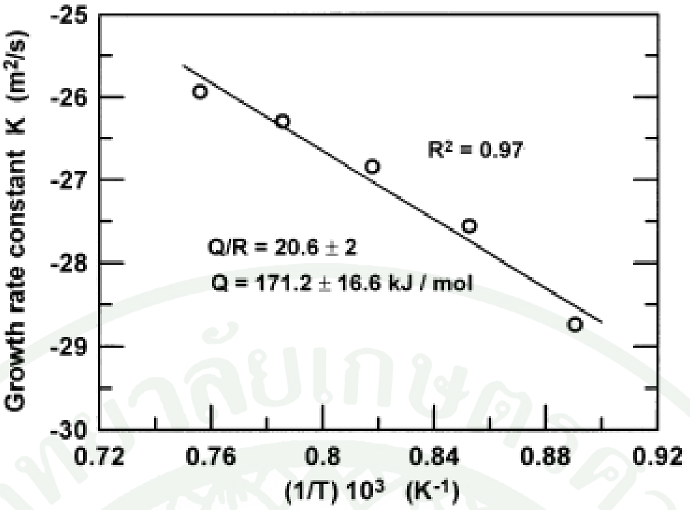


(ก.) (ข.)

ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ค่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์กับเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวที่อุณหภูมิต่างกันของเหล็ก AISI W1 (ข) ค่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ยกกำลังสองกับเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวของเหล็ก AISI W1

ที่มา: Genel *et al.* (2003)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 8 อัตราการเปลี่ยนแปลงคงที่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการบอไรดิงเหล็ก AISI W1

ที่มา: Genel *et al.* (2003)

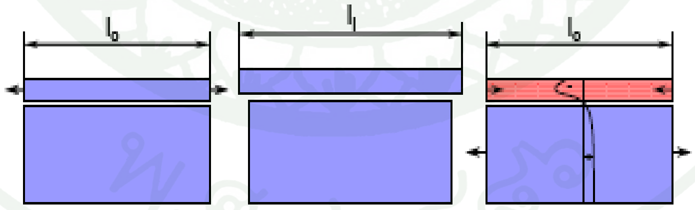
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. การปรับปรุงการแพร่ให้ดีขึ้น

ในการปรับปรุงการแพร่ให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้นสามารถทำได้หลายวิธี อาทิเช่น การยับยั้งการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน การใช้ข้อดีของทิศทางสนามไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะเป็นตัวช่วยในเรื่องของการแพร่และส่งผลให้วัสดุมีความแข็งและแข็งแรงมากขึ้น วิธีการที่สามารถช่วยให้การแพร่ของอะตอมดีขึ้นแบ่งเป็น 2 หัวข้อหลัก ดังนี้

4.1 การปรับปรุงเฉพาะที่ผิวโดยกระบวนการทางกล

การปรับปรุงเฉพาะที่ผิวโดยกระบวนการทางกล (Mechanical surface treatment) เป็นกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวที่นิยมใช้และมีข้อดีมากมาย และเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในเรื่องของการปรับปรุงสมบัติในการต้านทานต่อความล้า รวมถึงการเพิ่มสมบัติการต้านทานการสึกหรอและการสึกกร่อนของวัสดุ ซึ่งหลักการของการปรับปรุงเฉพาะที่ผิวโดยกระบวนการทางกล คือ ทำให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวรในบริเวณเฉพาะที่ใกล้เคียงกับพื้นผิว ทำให้ความยาวที่บริเวณผิวเพิ่มขึ้น แต่ไม่สามารถยืดออกได้เพราะมีเนื้อชิ้นงานยึดติดอยู่ ทำให้เกิดความเค้นกดตกค้างภายใน เกิดดิสโลเคชันเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 9 ซึ่งการปรับปรุงเฉพาะที่ผิวโดยกระบวนการทางกลมีหลายวิธี อาทิเช่น การยิงด้วยเม็ดโลหะ (Shot Peening) การยิงด้วยเลเซอร์ (Laser Shock Peening) และการรีดลึก (Deep Rolling) เป็นต้น (Patiphan *et al.*, 2007)



(ก.) (ข.) (ค.)

ภาพที่ 9 หลักการของการปรับปรุงเฉพาะที่ผิวโดยกระบวนการทางกล (ก.) การเสียรูปอย่างถาวรบริเวณใกล้กับพื้นผิว (ข.) ความเครียดบริเวณใกล้กับพื้นผิว (ค.) ชั้นที่เกิดการเสียรูปที่ติดกับก้อนวัสดุ (ไม่สามารถยืดออกไป)

ที่มา: Patiphan *et al.* (2007)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

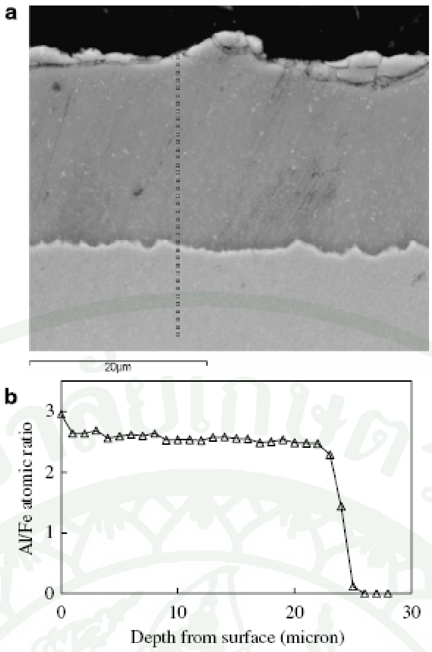
Xiang *et al* (2006) ได้ศึกษาผลของการปรับปรุงของการยิงด้วยเม็ดโลหะบนการเคลื่อนที่ของการแพร่อลูมิไนด์ (Aluminide) เพื่อให้มีการเคลือบพื้นผิวเพิ่มขึ้นบนเหล็กกล้าผสมที่อุณหภูมิต่ำกว่า 675 °C จากการทดลองเหล็กกล้าผสมที่ทำการเคลือบผิวอลูมิไนด์ที่อุณหภูมิ 650 °C เป็นเวลานาน 8 ชั่วโมง บนผิวเหล็กที่ทำการยิงด้วยเม็ดโลหะ (Peened) พบว่า ชั้นเคลือบของอัตราส่วนอะตอม Al/Fe เพิ่มมากขึ้นที่บริเวณผิว ดังภาพที่ 10 จากนั้นนำชิ้นงานไปทำการวัดความหนาของชั้นเคลือบอลูมิไนด์ที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลานาน 8 ชั่วโมงจากการยิงด้วยเม็ดโลหะ และไม่ทำการยิงด้วยเม็ดโลหะ (Unpeened) ดังภาพที่ 11 พบว่า ความหนาที่เคลือบอลูมิไนด์สำหรับผิวที่ไม่ทำการยิงด้วยเม็ดโลหะประมาณ 16 ไมครอน ซึ่งเมื่อเทียบกับการยิงด้วยเม็ดโลหะ แล้วจะมีความหนา 24 ไมครอน ดังนั้นในการยิงด้วยเม็ดโลหะนั้นสามารถทำให้ชั้นเคลือบอลูมิไนด์มีความหนาที่เพิ่มมากขึ้น

ในกระบวนการยิงด้วยเม็ดโลหะ พบว่า ลักษณะโครงสร้างที่ผิวจะต่างจากโครงสร้างของชิ้นงานทั้งหมด ซึ่งโครงสร้างที่ผิวประกอบด้วยขอบเกรนจำนวนมากและตำหนิของโครงสร้าง เช่น ดิสโลเคชัน ซึ่งมีผลต่อการแพร่ที่อุณหภูมิต่ำ

Tao et al. ได้กล่าวว่า ขนาดของเกรนในการเปลี่ยนแปลงของชั้นผิวมีขนาดเล็กกว่าในปริมาณมาก ดังนั้นการอ้างอิงขนาดของเกรนถือว่าเป็นส่วนน้อย ในการปรับปรุงในอัตราการเพิ่มความหนาชั้นเคลือบสำหรับจำนวนที่มากของขอบเกรนหรือความหนาแน่นมากของเกรนในผิวของการยิงด้วยเม็ดโลหะมีมากกว่าผิวที่ไม่ได้ผ่านการยิงด้วยเม็ดโลหะ อย่างไรก็ตามเป็นที่รู้กันดีว่าสาเหตุการเกิดการแปรรูปอย่างถาวรจะเพิ่มขึ้น และความหนาแน่นของดิสโลเคชันในเหล็กจะสามารถปรับปรุงกระบวนการแพร่เชิงปริมาณ เช่น ในขณะการยิงด้วยเม็ดโลหะพร้อมทั้งเคลือบผิวจะเป็นการเพิ่มความหนาแน่นของขอบเกรนและความหนาแน่นของดิสโลเคชันในชั้นผิวของเหล็ก

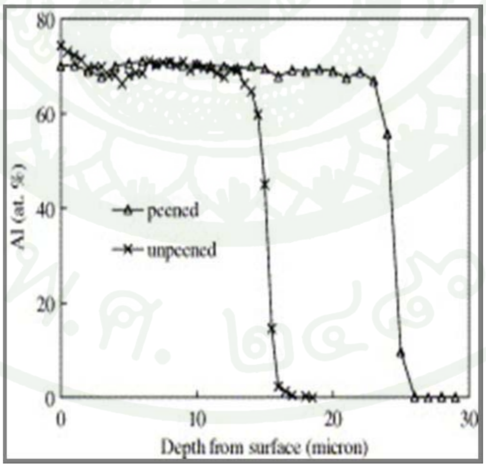
นอกจากนั้นผลของการปรับปรุงจะทำให้ความหนาชั้นเคลือบมากขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ แต่จะทำให้ความหนาชั้นเคลือบลดลงที่อุณหภูมิสูง และพลังงานการกระตุ้นในการเคลือบผิวที่ผ่านการยิงด้วยเม็ดโลหะจะมีค่าต่ำกว่าผิวที่ไม่ผ่านการยิงด้วยเม็ดโลหะ ซึ่งอิทธิพลการแพร่เข้าไปยังขอบเกรนหรือเกิดตำหนิที่โครงสร้างจุลภาคที่มีขนาดใหญ่ในการยิงด้วยเม็ดโลหะที่ผิวมากกว่าผิวที่ไม่ผ่านการยิงด้วยเม็ดโลหะ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 10 ภาพหน้าตัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดและระยะชั้นเคลือบของอัตราส่วนอะตอม Al/Fe ที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ที่มา: Xiang *et al* (2006)



ภาพที่ 11 ความลึกของ Al ในชั้นเคลือบของการยิงด้วยลูกเหล็ก (Peened) และไม่ทำการยิงด้วยลูกเหล็กที่ผิว (Unpeened) ที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ที่มา: Xiang *et al* (2006)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

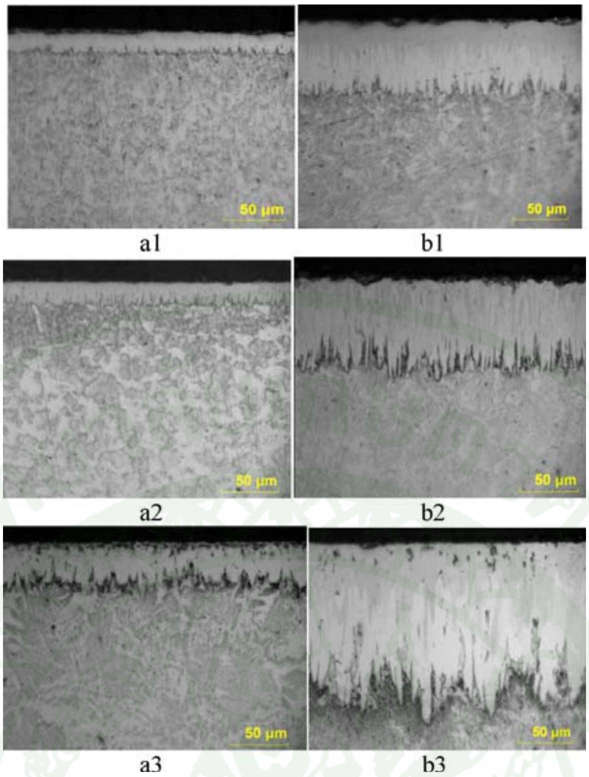
4.2 การเคลือบผิวด้วยวิธีการทางไฟฟ้า

การใช้กระแสไฟฟ้าเข้ามาช่วยในกระบวนการเคลือบผิวเป็นกระบวนการที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย อาทิเช่น กระบวนการชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า (Electroplating) กระบวนการพอกพูนด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition) เป็นต้น ซึ่งกระบวนการทั้งหลายเหล่านี้ที่ใช้ไฟฟ้าเข้ามาช่วยจะเป็นการปรับปรุงสมบัติด้านความแข็ง สมบัติการต้านทานการสึกหรอ การสึกกร่อนของวัสดุบนพื้นผิวและทำให้ผิวมีความสวยงาม ซึ่งระบบการเคลือบผิวด้วยวิธีการทางไฟฟ้า เป็นการอาศัยหลักการของกระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electrochemical) เข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งจะประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply) สารประกอบที่ทำให้เกิดการแตกตัวของไอออนบวก (Electrolyte) ชิ้นงานแอโนด (Anode) และชิ้นงานแคโทด (Cathode) นอกเหนือจากนี้ การที่ใช้กระแสไฟฟ้าเข้ามาช่วยในกระบวนการเคลือบผิวยังสามารถเพิ่มความหนาและขนาดให้กับวัสดุต่างๆได้อีกด้วย

จากงานวิจัยของ Kartal *et al* (2010-2011), Celikkan *et al* (2007) และ Sista *et al* (2011) ได้ศึกษากระบวนการบอไรดิงด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมีบนโลหะกลุ่มเหล็กและนอกกลุ่มเหล็ก พบว่า วิธีการทางไฟฟ้าเคมีจะช่วยในเรื่องของการปรับปรุงการแพร่ของอะตอมโบรอน โดยที่โลหะกลุ่มเหล็กหรือนอกกลุ่มเหล็กจะถูกฝังหรือแช่ในสารละลายของเกลือโบรอน ซึ่งอะตอมของโบรอนจะถูกแยกสลายกลายเป็นไอออนและไปรวมตัวที่บนพื้นผิวเพื่อแพร่เข้าไปสู่โลหะ วิธีการทางไฟฟ้าเคมีในกระบวนการบอไรดิงสามารถทำให้ได้ความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ที่สูงขึ้นภายในระยะเวลาอันสั้น เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการบอไรดิงแบบดั้งเดิม ดังแสดงในภาพที่ 12 และค่าพลังงานการกระตุ้นของกระบวนการบอไรดิงด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมีมีค่าต่ำกว่ากระบวนการแพคบอไรดิงและกระบวนการบอไรดิงแบบอ่างเกลือ ดังแสดงในตารางที่ 3

ในงานวิจัยของ Xie *et al.* (2006, 2011) และ Zhenghua *et al.* (2008) ได้ศึกษาอิทธิพลของไฟฟ้ากระแสตรงที่ส่งผลต่อกระบวนการแพคบอไรดิงและกระบวนการแพคอลูมิไนซิง พบว่าไฟฟ้ากระแสตรงส่งผลให้ความหนาชั้นเคลือบบอไรด์และชั้นเคลือบอลูมิไนซิงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชั้นเคลือบที่เกิดจากบอไรดิงหรืออลูมิไนซิงเพียงอย่างเดียว ดังแสดงในตารางที่ 4 และภาพที่ 13

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 12 ภาพตัดขวางของชั้นเคลือบบอไรด์ที่อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน (a1) 5 นาที, (b1) 60 นาทีที่ 850°C, (a2) 5 นาที, (b2) 60 นาทีที่ 900°C, (a3) 5 นาที, (b3) 60 นาทีที่ 1000°C.

ที่มา: Kartal *et al* (2010)

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบค่าพลังงานการกระตุ้นของเหล็ก D2 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงที่แตกต่างกัน

Boriding technique	Materials	Activation energy values (Q)
Electrochemical	D2	137.86 KJ/mol
Molten Salt (current less)	D2	170 KJ/mol
Powder Pack	D2	176 KJ/mol

ที่มา: Sista *et al* (2011)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ของชิ้นงาน DCFPB และCPB

(5 % B-Fe, อุณหภูมิเตา 800 องศาเซลเซียส, 4 ชั่วโมง, กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์)

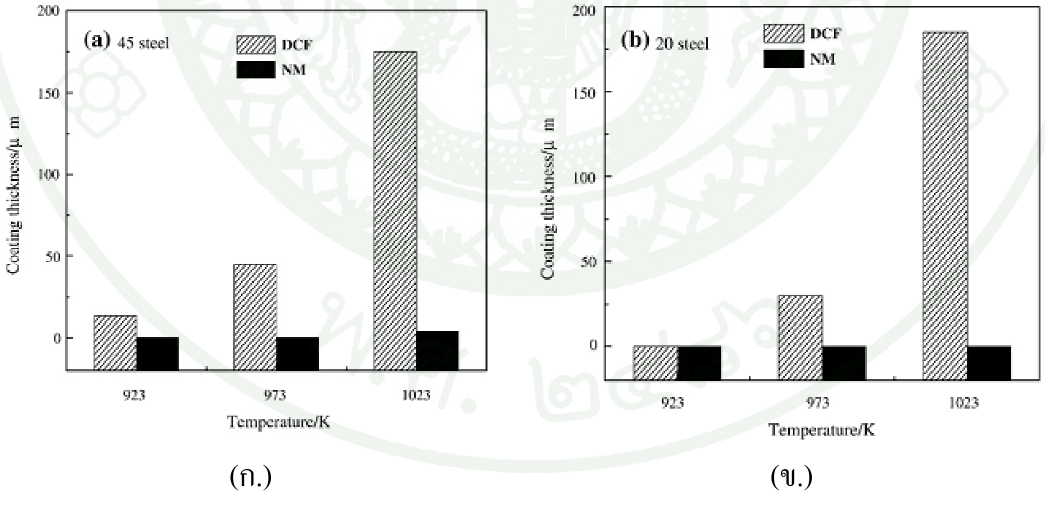
Materials	Boride layer thickness (μm)		
	Opposite side of cathode specimens	Opposite side of anode specimens	CPB specimens
20 steel	105	70	55
45 steel	97	65	42
T12 steel	62.5	50	32

หมายเหตุ DCFPB = กระบวนการแพคบอไรดิงโดยไฟฟ้ากระแสตรง,

CPB = กระบวนการแพคบอไรดิงแบบดั้งเดิม

20 steel ~ 0.20%C, 45 steel ~0.45%C และ T12 steel ~1.20%C

ที่มา: Xie *et al.* (2006)



(ก.) (ข.)

ภาพที่ 13 ความหนาชั้นเคลือบอลูมิไนซิงของชิ้นงานที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันโดยกระแสไฟเท่ากับ 4 แอมแปร์ (ก.) เหล็กกล้าเกรด 45 (ข.) เหล็กกล้าเกรด 20

ที่มา: Zhenghua *et al.* (2008)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

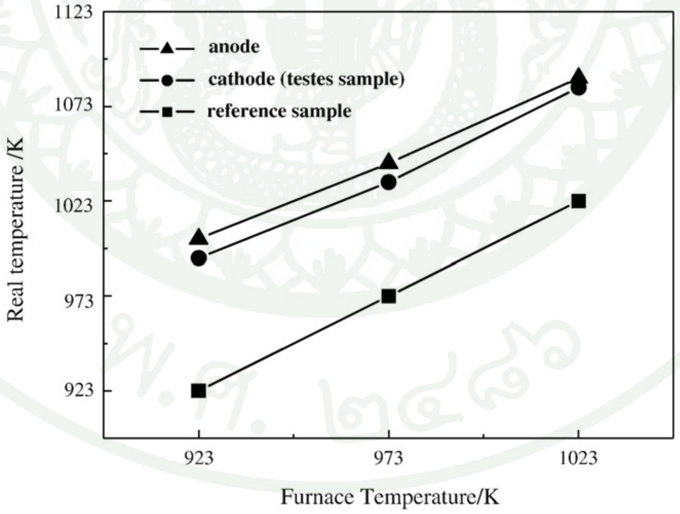
จากวิธีการปรับปรุงการแพร่ให้ดีขึ้นด้วยวิธีการต่างๆ พบว่า การเพิ่มประสิทธิภาพของการปรับปรุงเฉพาะที่ผิวโดยกระบวนการทางกลโดยการแพร่ของอะตอมในกระบวนการเคลือบผิวนั้นมีข้อจำกัด โดยเฉพาะเรื่องของอุณหภูมิในการเคลือบผิว ซึ่งผลของการปรับปรุงเฉพาะที่ผิวโดยกระบวนการทางกลจะทำให้ได้ความหนาชั้นเคลือบเพิ่มมากขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ (< 675^{0}C) และทำให้ได้ความหนาชั้นเคลือบลดลงที่อุณหภูมิสูง (> 870^{0}C) เนื่องมาจากปริมาณดิสโลเคชันที่ผิวมีค่าลดลงหรือหายไป (ลักษมี, 2550) ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการบอไรดิง ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการมีค่าสูงมากประมาณ 850-1000^{0}C ทำให้การปรับปรุงเฉพาะที่ผิวโดยกระบวนการทางกลไม่เหมาะสมในการปรับปรุงการแพร่ของอะตอมโบรอนที่อุณหภูมิสูงได้ แต่สามารถปรับปรุงการแพร่ในกระบวนการอลูมิไนซิงและไนไตรดิงได้ ซึ่งทั้งสองกระบวนการใช้อุณหภูมิเพียง 550-650^{0}C เท่านั้น (Shen *et al*, 2010 และ Xiang *et al*, 2006)

ส่วนวิธีการนำไฟฟ้ากระแสตรงมาช่วยในกระบวนการเคลือบผิวนั้นสามารถนำมาใช้ในกระบวนการเคลือบผิวได้หลากหลายวิธี ไม่ว่าจะเป็น กระบวนการบอไรดิง กระบวนการไนไตรดิง และกระบวนการอลูมิไนซิง เป็นต้น ข้อดีของการนำไฟฟ้ากระแสตรงมาช่วยในกระบวนการนั้นคือ ไม่มีข้อจำกัดในเรื่องอุณหภูมิ สามารถช่วยปรับปรุงการแพร่ของอะตอมให้ดีขึ้นได้ ซึ่งช่วยทำให้ชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นมีความหนาที่เพิ่มขึ้นจากกระบวนการเคลือบผิวปกติ เป็นต้น ดังนั้นในโครงงานวิจัยนี้ จึงได้มีการศึกษาอิทธิพลของไฟฟ้ากระแสตรงที่ส่งผลต่อการเคลือบผิวต่อไป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5. อิทธิพลของไฟฟ้ากระแสตรงที่มีผลต่อการแพร่ของอะตอมเพื่อเพิ่มความหนาชั้นเคลือบ

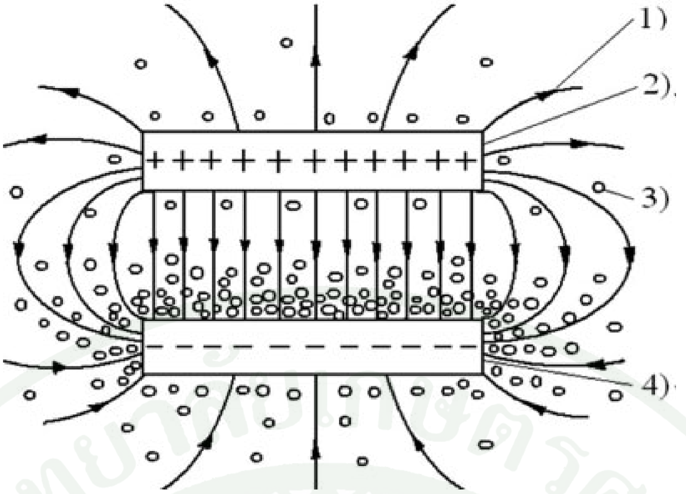
ในกระบวนการแพคบอไรดิงต้องมีการเพิ่มทั้งอุณหภูมิและเวลาในการทำ เพื่อกระตุ้นความร้อนให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่เร็วเพียงพอและเกิดจลนพลศาสตร์ในการแพร่ระหว่างอะตอม ให้ได้ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่มากขึ้น อย่างไรก็ตาม การที่ใช้ระยะเวลาที่ยาวนานในกระบวนการนั้นถือว่าเป็นสิ่งจำเป็นในการเกิดความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ แต่อัตราการก่อตัวของกระบวนการยังไม่สูงมากแม้จะทำที่อุณหภูมิสูงก็ตาม ดังนั้นกระบวนการแพคบอไรดิง จึงถือเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานสูง ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงอัตราการแพร่เพื่อช่วยให้การแพร่ซึมของอะตอมมีค่าสูงขึ้น ซึ่งในงานวิจัยของ Xie *et al.* (2006, 2011) และ Zhenghua *et al.* (2008) ได้ศึกษาอิทธิพลของไฟฟ้ากระแสตรงที่ส่งผลต่อกระบวนการแพคบอไรดิงและกระบวนการแพคอลูมิไนซิงที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้น พบว่า ไฟฟ้ากระแสตรงส่งผลให้ความหนาชั้นเคลือบบอไรด์และชั้นเคลือบอลูมิไนซิงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชั้นเคลือบที่เกิดจากบอไรดิงหรืออลูมิไนซิงเพียงอย่างเดียว เนื่องจากไฟฟ้ากระแสตรงจะช่วยให้ชิ้นงานมีความร้อนเพิ่มสูงขึ้นและแพร่ไปยังทิศทางของสนามไฟฟ้าเพื่อกระตุ้นอะตอมอลูมิเนียมอิสระหรือโบรอนไอออนบวกแพร่เข้าไปยังผิวของชิ้นงานได้มากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 14 และภาพที่ 15



ภาพที่ 14 อุณหภูมิจริงของชิ้นงานและอุณหภูมิเตาในกระบวนการแพคอลูมิไนซิง ที่อุณหภูมิ 923-1023 เคลวิน เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้กระแสไฟเท่ากับ 4 แอมแปร์

ที่มา: Zhenghua *et al.* (2008)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 15 แผนภาพจำลองของการกระจายของเส้นไฟฟ้าและอะตอมโบรอนหรืออะตอมอลูมิเนียมที่ถูกกระตุ้นรอบๆขั้วอิเล็กโทรด: (1.) เส้นไฟฟ้า (2.) แอโนด (3.) อะตอมโบรอนหรืออะตอมอลูมิเนียมที่ถูกกระตุ้น (4.) แคโทด

ที่มา: Xie *et al.* (2006); Zhenghua *et al.* (2008)

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงในกระบวนการแพคบอไรดิงพร้อมทั้งศึกษาจลนศาสตร์ของกระบวนการดังกล่าว เนื่องมาจากในการนำไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาช่วยในกระบวนเคลือบผิว เป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจที่ไม่มีข้อจำกัดในเรื่องอุณหภูมิและยังสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับกระบวนการ อาทิเช่น เป็นการเพิ่มอัตราการแพร่ซึมของอะตอมให้มีค่าสูงขึ้น และช่วยแก้ไขข้อบกพร่องของกระบวนการเคลือบผิวแบบดั้งเดิมได้ ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของระยะเวลา สารประกอบการเคลือบผิว การใช้พลังงาน และค่าใช้จ่าย เป็นต้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุและสารเคมี

1.1 ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 มีส่วนผสมทางเคมีดังรายละเอียดในตารางที่ 5

1.2 ผง Ekabor-I

1.3 กล่องเหล็กบรรจุสำหรับอัดผงและวางชิ้นงาน

1.4 แก๊สอาร์กอน

1.5 มาร์เบิล รีเอเจนต์ (Marble reagent)

ตารางที่ 5 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ใช้ในการทดลอง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

เหล็ก	C	Cr	Si	Mn	P	S	Ni	Fe
AISI 420	0.30	12.15	0.25	0.43	0.018	0.028	0.32	Bal.

2. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

2.1 เตาเผา อุณหภูมิสูงสุด 1400 องศาเซลเซียส

2.2 อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

2.3 เครื่องตัด (High Speed Cutter)

2.4 เครื่องกลึง

2.5 เครื่องขัดผิวชิ้นงาน

2.6 เทอร์โมคัฟเปิล

2.7 กระดาษทรายและผ้าสักหลาด

2.8 อุปกรณ์อื่นๆ เช่น ถุงมือกันความร้อน และถุงมือยางกันสารเคมี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. เครื่องมือวิเคราะห์

3.1 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางโครงสร้าง (X-Ray Diffraction, XRD)

3.2 เครื่องทดสอบความแข็ง (Micro Vickers Hardness Test)

3.3 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM)

3.4 เครื่องวิเคราะห์ภาพ (Image Analyzer)

วิธีการ

1. ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

ตัดชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร ยาว 20 มิลลิเมตร แล้วขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทราย เบอร์ 120 240 400 และ 600 ด้วยเครื่องกลึงเพื่อกำจัดสนิมและสิ่งสกปรกออก ทำความสะอาดผิวหน้าชิ้นงานด้วยแอลกอฮอล์ หลังจากนั้นทำการบรรจุชิ้นงานและผง Ekabor-I ลงในกล่องเหล็กบรรจุ แล้วปิดให้สนิท ดังแสดงในภาพที่ 16

2. ขั้นตอนการหาปริมาณไฟฟ้ากระแสตรงที่เหมาะสม

นำกล่องเหล็กบรรจุชิ้นงานวางลงในเตา ดังแสดงในภาพที่ 16 จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวคือ 4 ชั่วโมง พร้อมทั้งเปิดสวิตซ์อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในช่วง 0-30 โวลต์ โดยใช้ความหนาแน่นของไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 0 60 120 และ 170 mA/cm^2 เมื่อครบตามกำหนดเวลาแล้ว ปิดเตาและปิดสวิตซ์อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรง แล้วนำชิ้นงานออกจากเตาและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ จากนั้นวิเคราะห์สมบัติบนผิวของชิ้นงาน ซึ่งมีการใช้เครื่องทดสอบความแข็ง แล้วนำไปพิจารณาชนิดของชั้นเคลือบ โครงสร้างจุลภาคและความหนาของชั้นเคลือบ ด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางโครงสร้าง กล้องจุลทรรศน์แบบแสง และโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ ดังนั้นจะได้ค่าปริมาณไฟฟ้ากระแสตรงที่เหมาะสมในกระบวนการเคลือบผิวต่อไป ดังแสดงในภาพที่ 17

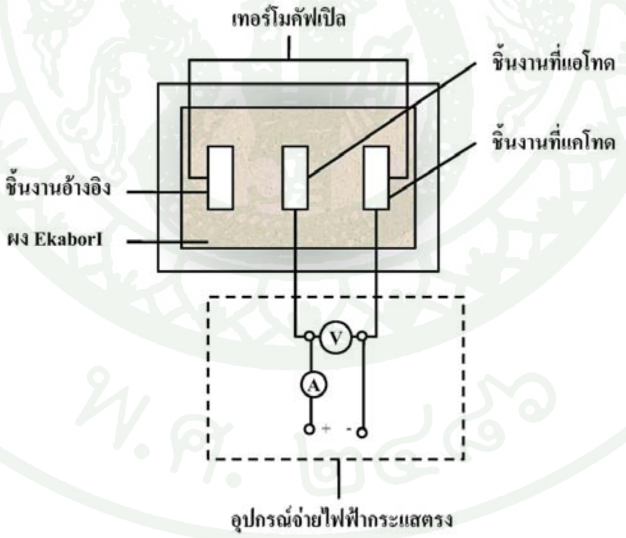
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. ขั้นตอนการเคลือบผิว

นำกล่องเหล็กบรรจุชิ้นงานวางลงในเตา จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียสตามลำดับ เวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวคือ 2 4 และ6 ชั่วโมงตามลำดับ พร้อมทั้งเปิดสวิตซ์อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในช่วง 0 - 30 โวลต์ ด้วยค่าปริมาณไฟฟ้ากระแสตรงที่เหมาะสมเมื่อครบตามกำหนดเวลาแล้ว ปิดเตาและปิดสวิตซ์อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรง แล้วนำชิ้นงานออกจากเตาและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 17

4. ขั้นตอนการวิเคราะห์ผล

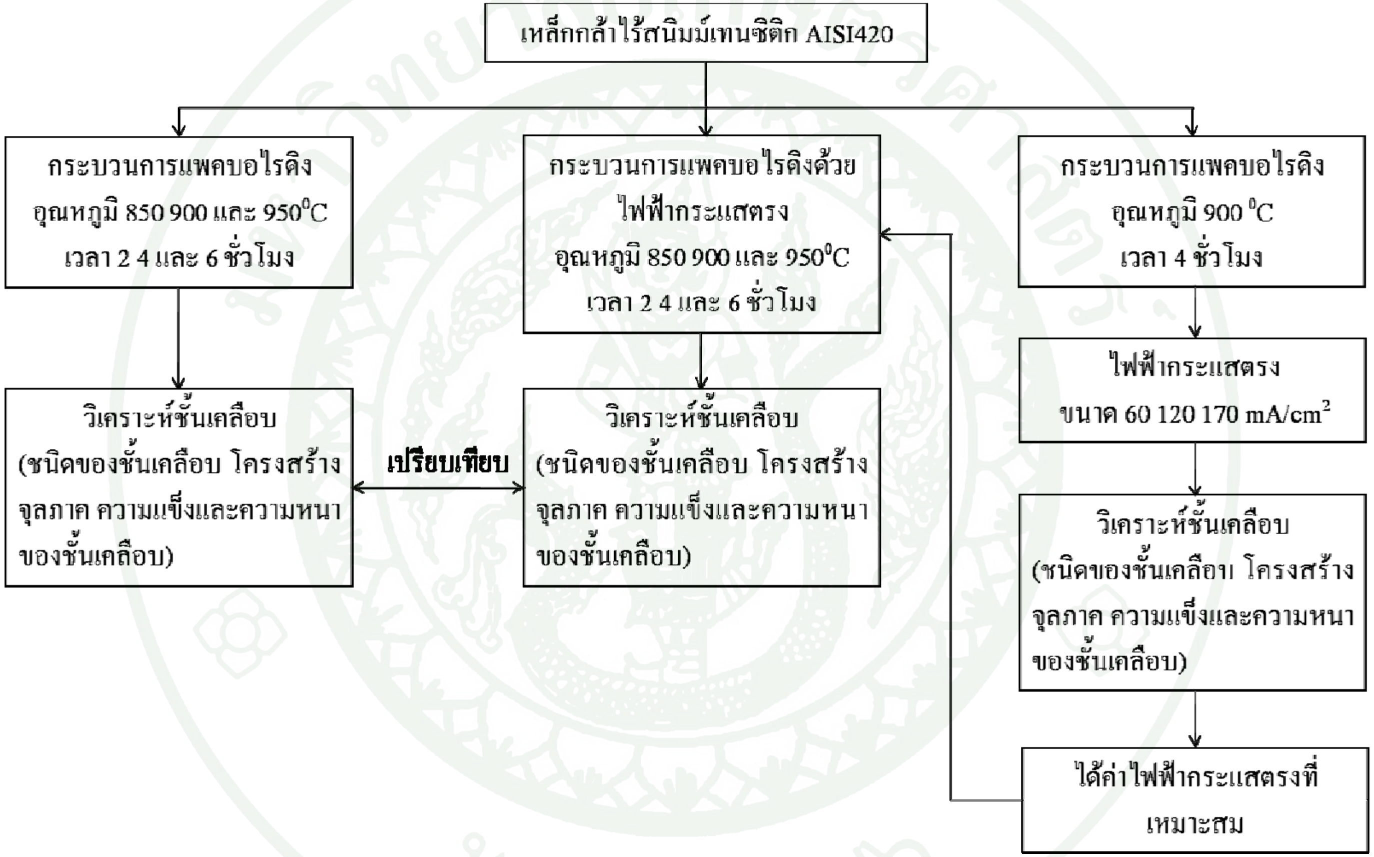
ในขั้นตอนการวิเคราะห์สมบัติบนผิวของชิ้นงาน มีการใช้เครื่องทดสอบความแข็ง แล้วนำไปพิจารณาชนิดของชั้นเคลือบ โครงสร้างจุลภาคและความหนาของชั้นเคลือบ ด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางโครงสร้าง กล้องจุลทรรศน์แบบแสง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ จากนั้นนำผลมาวิเคราะห์ ดังแสดงในภาพที่ 17



ภาพที่ 16 การวางชิ้นงานในการทำแพคบอไรดิงด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

4. แผนภาพงานวิจัย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 17 แผนภาพงานวิจัย

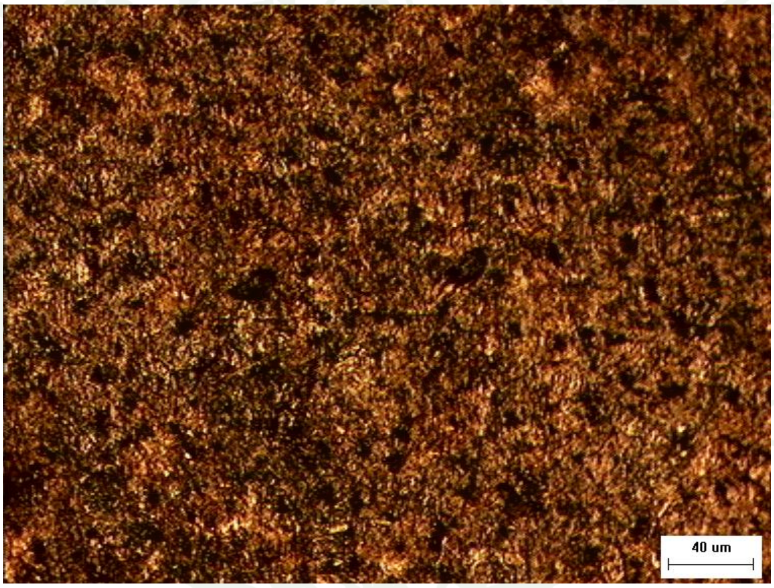
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

ผล

1. โครงสร้างและความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420

เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ประกอบด้วยคาร์บอน 0.30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จึงทำให้เกิดเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ดังแสดงในภาพที่ 18 ค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 วัดค่าได้ประมาณ 310 HV



ภาพที่ 18 ภาพตัดขวางของโครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. การเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ด้วยกระบวนการแพคบอไรดิง (พิจารณาชิ้นงานอ้างอิง)

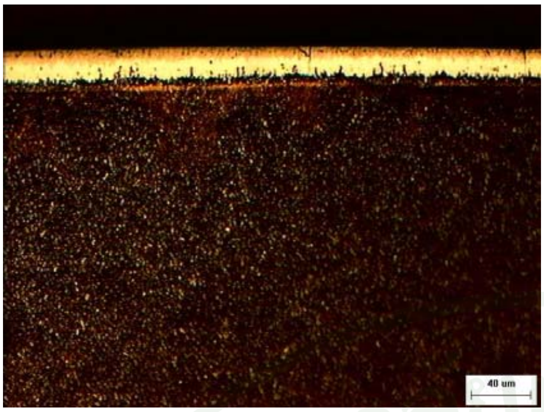
2.1 การเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่อุณหภูมิ 850°C

จากการเคลือบผิวชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ด้วยกระบวนการแพคบอไรดิง ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่าเกิดชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่ผิวของชิ้นงานอ้างอิง ซึ่งโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์มีลักษณะเป็นฟันเลื่อยเล็กน้อย แต่ความหนาของชั้นเคลือบค่อนข้างเรียบสม่ำเสมอและเป็นชนิดเฟสคู่ ที่ประกอบด้วย ชั้น FeB (สีเข้ม) อยู่ชั้นนอกสุดและชั้น Fe_2B (สีอ่อน) อยู่ชั้นถัดเข้ามา ดังแสดงในภาพที่ 19 โดยโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ถูกตรวจสอบจากการวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่า มีสเปกตรัมของสารประกอบ FeB และ Fe_2B ดังแสดงผลของรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เรย์ของชั้นเคลือบบอไรด์บนชิ้นงานอ้างอิงที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงในภาพที่ 20

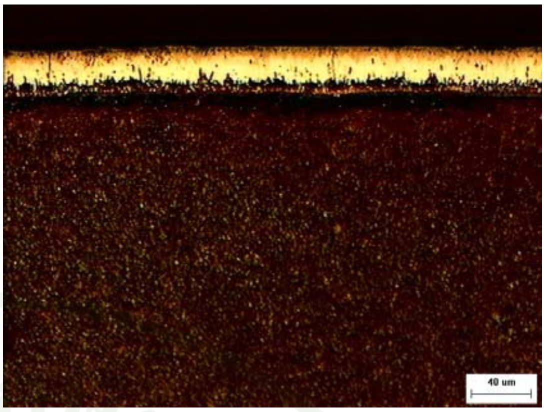
จากการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพสามารถวัดค่าความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ของชิ้นงานอ้างอิงเป็น 17.90 30.86 และ 31.62 ไมโครเมตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าความหนาชั้นเคลือบบอไรด์เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 21 นอกจากนี้สามารถวัดค่าความหนาชั้น FeB ได้เป็น 7.00 17.38 และ 14.00 ไมโครเมตร ตามลำดับ และวัดค่าความหนาชั้น Fe_2B ได้เป็น 10.90 13.48 และ 17.62 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 21

จากการทดสอบค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า บริเวณผิวชิ้นงานมีค่าความแข็งที่สูงถึง 1800 HV และค่าความแข็งจะลดลงไปเรื่อยๆเมื่อลึกลงไปใต้เนื้อชิ้นงานที่ประมาณ 450 HV ดังแสดงในภาพที่ 22

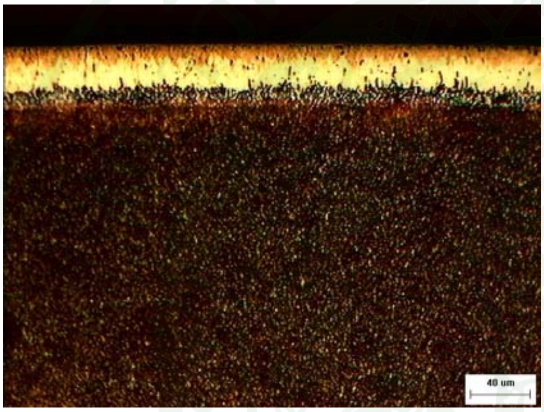
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก.)



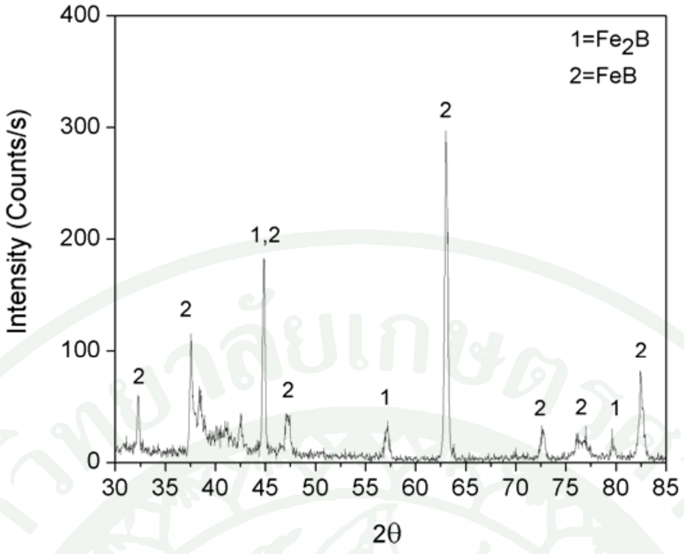
(ข.)



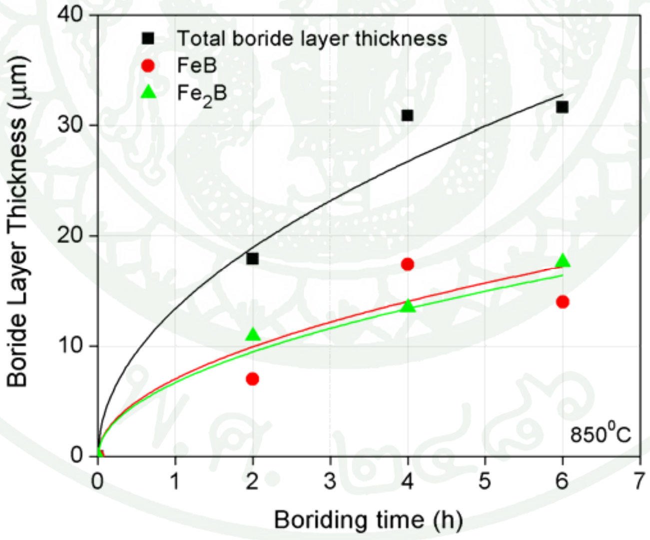
(ค.)

ภาพที่ 19 ภาพตัดขวางของโครงสร้างจุลภาคชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา (ก.) 2 ชั่วโมง (ข.) 4 ชั่วโมง และ (ค.) 6 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

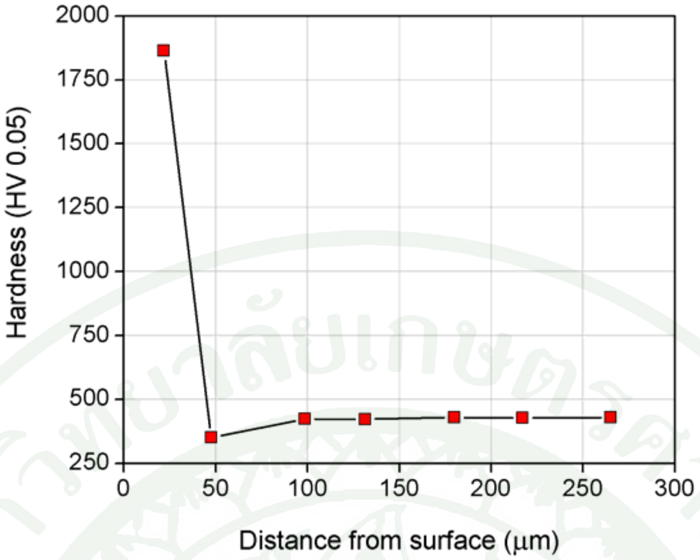


ภาพที่ 20 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เรย์ของชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



ภาพที่ 21 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 22 ค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

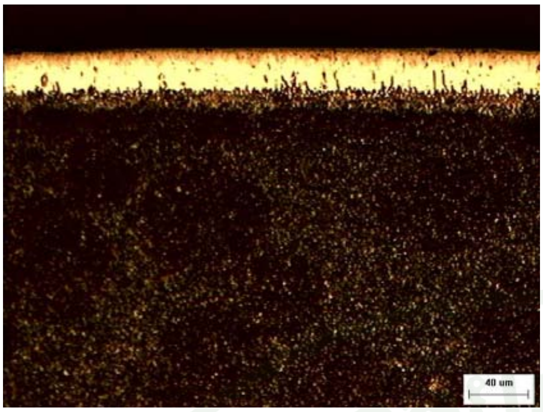
2.2 การเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่อุณหภูมิ 900°C

จากการเคลือบผิวชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ด้วยกระบวนการแพคบอไรดิง ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่าเกิดชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่ผิวของชิ้นงานอ้างอิง ซึ่งโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์มีลักษณะเป็นฟันเลื่อยเล็กน้อย แต่ความหนาของชั้นเคลือบค่อนข้างเรียบสม่ำเสมอและเป็นชนิดเฟสคู่ ที่ประกอบด้วย ชั้น FeB (สีเข้ม) อยู่ชั้นนอกสุดและชั้น Fe_2B (สีอ่อน) อยู่ชั้นถัดเข้ามา ดังแสดงในภาพที่ 23 โดยโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ถูกตรวจสอบจากการวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่า มีสเปกตรัมของสารประกอบ FeB และ Fe_2B ดังแสดงผลของรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เรย์ของชั้นเคลือบบอไรด์บนชิ้นงานอ้างอิงที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงในภาพที่ 24

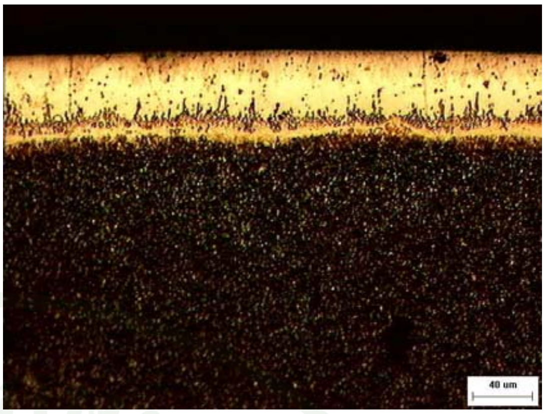
จากการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพสามารถวัดค่าความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ของชิ้นงานอ้างอิงเป็น 26.57 43.78 และ 48.14 ไมโครเมตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าความหนาชั้นเคลือบบอไรด์เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 25 นอกจากนี้สามารถวัดค่าความหนาชั้น FeB ได้เป็น 9.48 20.70 และ 21.14 ไมโครเมตร ตามลำดับ และวัดค่าความหนาชั้น Fe_2B ได้เป็น 17.09 23.08 และ 27.00 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 25

จากการทดสอบค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่า บริเวณผิวชิ้นงานมีค่าความแข็งที่สูงถึง 1600 HV และค่าความแข็งจะลดลงไปเรื่อยๆเมื่อลึกลงไปใต้เนื้อชิ้นงานที่ประมาณ 450 HV ดังแสดงในภาพที่ 26

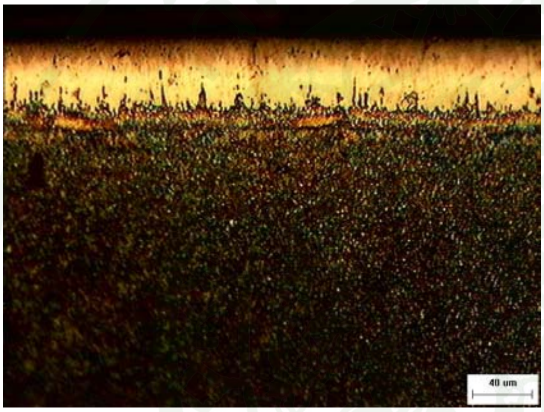
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก.)



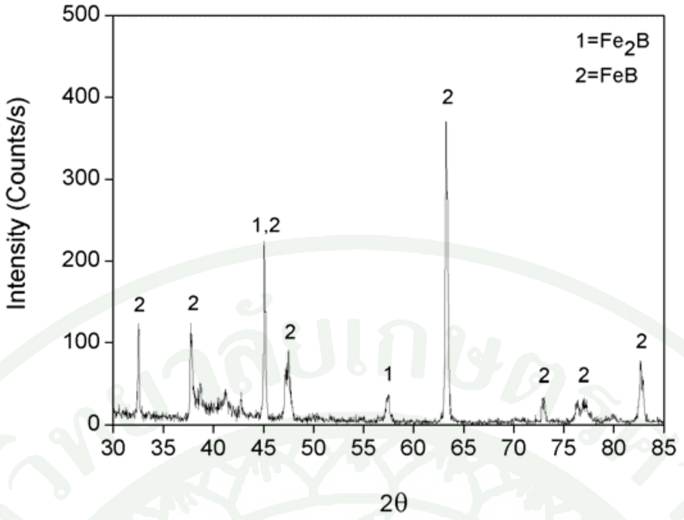
(ข.)



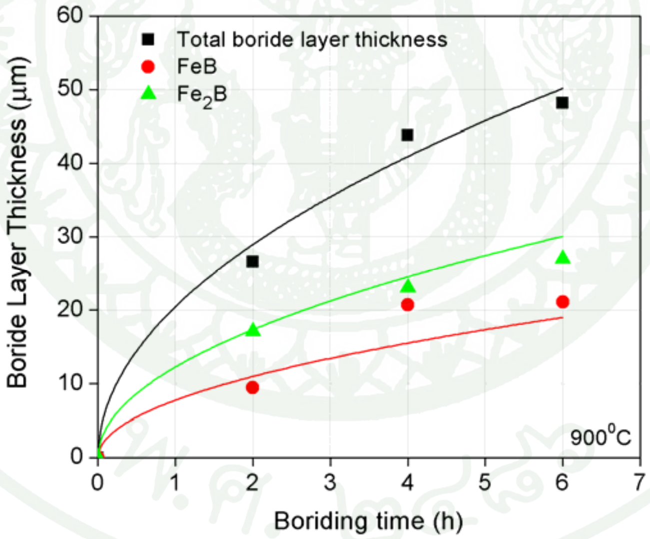
(ค.)

ภาพที่ 23 ภาพตัดขวางของโครงสร้างจุลภาคชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา (ก.) 2 ชั่วโมง (ข.) 4 ชั่วโมง และ (ค.) 6 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

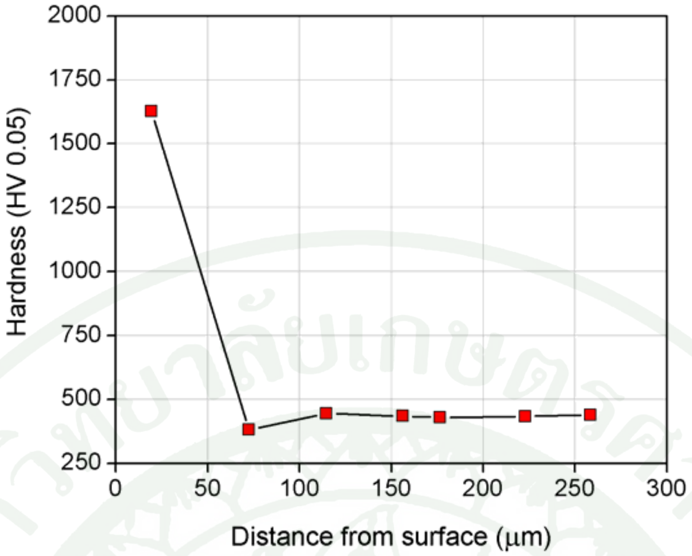


ภาพที่ 24 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เรย์ของชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



ภาพที่ 25 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 26 ค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

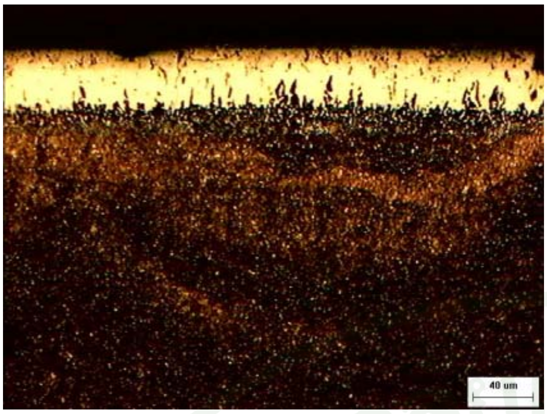
2.3 การเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่อุณหภูมิ 950°C

จากการเคลือบผิวชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ด้วยกระบวนการแพคบอไรดิง ที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่าเกิดชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่ผิวของชิ้นงานอ้างอิง ซึ่งโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์มีลักษณะเป็นฟันเลื่อยเล็กน้อย แต่ความหนาของชั้นเคลือบค่อนข้างเรียบสม่ำเสมอและเป็นชนิดเฟสคู่ ที่ประกอบด้วย ชั้น FeB (สีเข้ม) อยู่ชั้นนอกสุดและชั้น Fe_2B (สีอ่อน) อยู่ชั้นถัดเข้ามา ดังแสดงในภาพที่ 27 โดยโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ถูกตรวจสอบจากการวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่า มีสเปกตรัมของสารประกอบ FeB และ Fe_2B ดังแสดงผลของรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เรย์ของชั้นเคลือบบอไรด์บนชิ้นงานอ้างอิงที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมงในภาพที่ 28

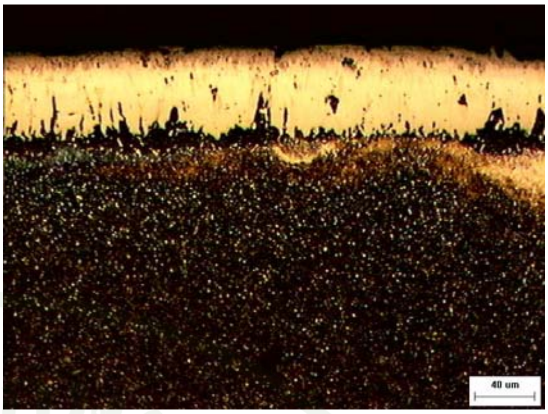
จากการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพสามารถวัดค่าความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ของชิ้นงานอ้างอิงเป็น 44.86 55.81 และ 76.23 ไมโครเมตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าความหนาชั้นเคลือบบอไรด์เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 29 นอกจากนี้สามารถวัดค่าความหนาชั้น FeB ได้เป็น 16.57 10.33 และ 21.48 ไมโครเมตร ตามลำดับ และวัดค่าความหนาชั้น Fe_2B ได้เป็น 28.29 45.48 และ 54.76 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 29

จากการทดสอบค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่า บริเวณผิวชิ้นงานมีค่าความแข็งที่สูงถึง 1900 HV และค่าความแข็งจะลดลงไปเรื่อยๆเมื่อลึกลงไปใต้เนื้อชิ้นงานที่ประมาณ 450 HV ดังแสดงในภาพที่ 30

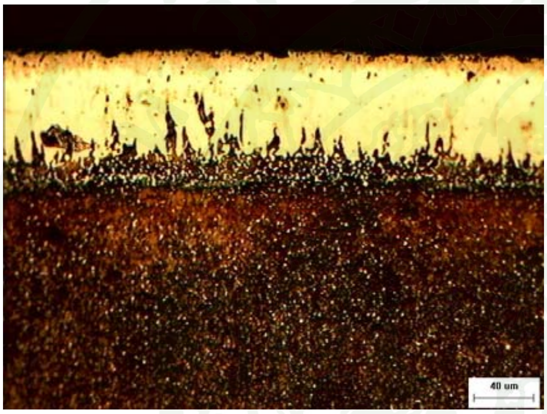
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก.)



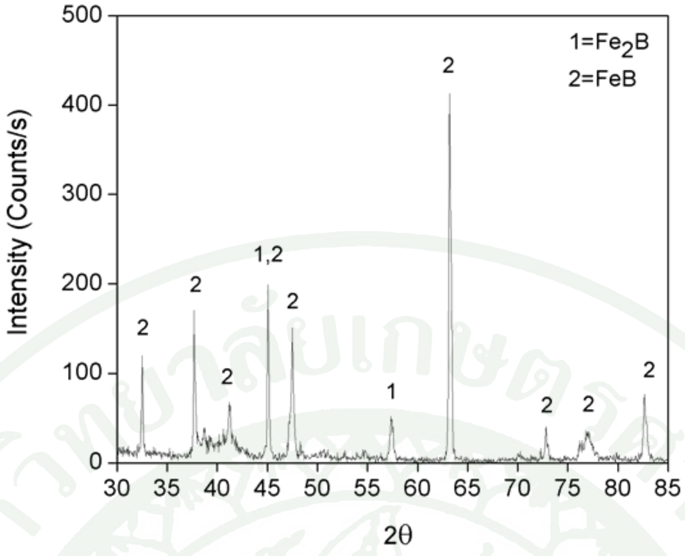
(ข.)



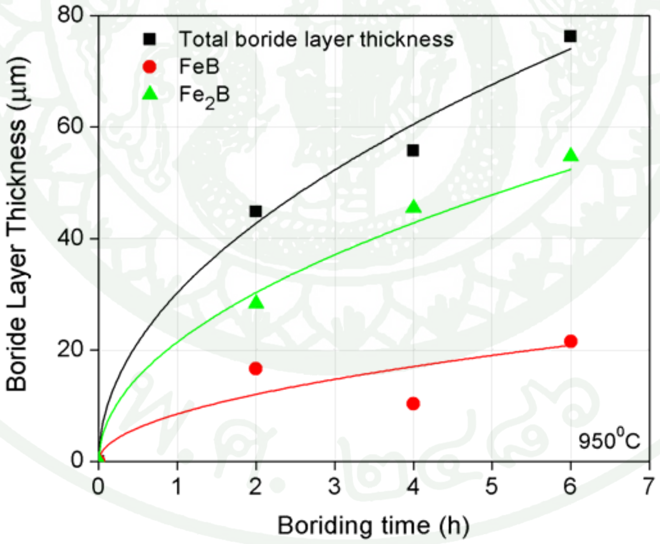
(ค.)

ภาพที่ 27 ภาพตัดขวางของโครงสร้างจุลภาคชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา (ก.) 2 ชั่วโมง (ข.) 4 ชั่วโมง และ (ค.) 6 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

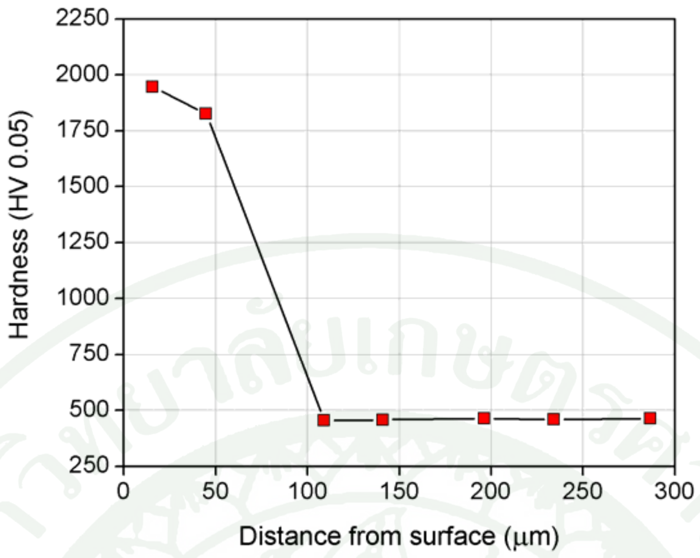


ภาพที่ 28 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เรย์ของชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง



ภาพที่ 29 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 30 ค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

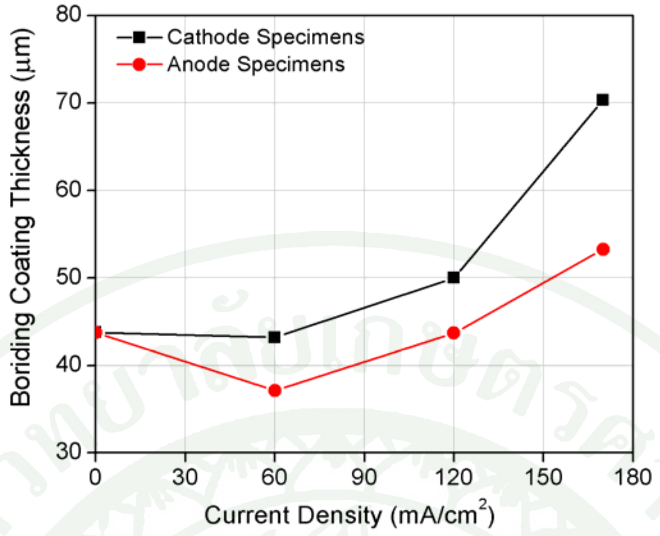
3. การเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงที่ผ่านการให้ไฟฟ้ากระแสตรง (พิจารณาชิ้นงานแคโทด)

3.1 ปริมาณกระแสไฟฟ้าต่อความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์และอุณหภูมิจริงของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

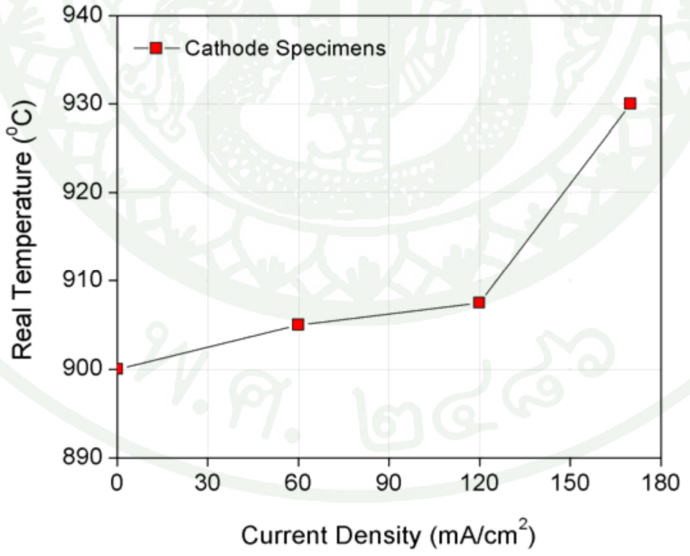
จากการทดลองหาปริมาณไฟฟ้ากระแสตรงที่เหมาะสมในกระบวนการแพคบอไรดิง พบว่า ในการเคลือบผิวชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ด้วยกระบวนการแพคบอไรดิง ที่อุณหภูมิ 900°C เป็น 4 ชั่วโมง ด้วยไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 0 60 120 และ 170 mA/cm^2 จะได้ค่าความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานแคโทดเป็น 43.78 43.21 50.00 และ 70.33 ไมโครเมตร ตามลำดับ และได้ค่าความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ของชิ้นงานแอโนดเป็น 43.78 37.10 43.71 และ 53.29 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 31 และจากการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาช่วยในกระบวนการแพคบอไรดิง ยังพบอีกว่า เมื่อให้ปริมาณไฟฟ้ากระแสตรงเพิ่มมากขึ้น จะทำให้อุณหภูมิชิ้นงานแคโทดเพิ่มสูงขึ้น 0 5 7.5 และ 30 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 32 ดังนั้นในการให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 170 mA/cm^2 เข้ามาช่วยในกระบวนการแพคบอไรดิงทำให้ชิ้นงานเกิดชั้นเคลือบบอไรด์ของชิ้นงานแคโทดหนาที่สุดมากกว่าชิ้นงานแอโนด เนื่องมาจากอิทธิพลของไฟฟ้ากระแสตรงและความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นของชิ้นงานแคโทด ส่งผลให้อัตราการแพร่ของอะตอมโบรอนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

ในงานวิจัยนี้จึงเลือกค่าปริมาณไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 170 mA/cm^2 เข้ามาช่วยในกระบวนการแพคบอไรดิง ที่อุณหภูมิระหว่าง 850 - 950°C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง เนื่องจากไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 170 mA/cm^2 ทำให้ชิ้นงานแคโทดได้ค่าความหนาชั้นเคลือบบอไรด์มากที่สุด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 31 ความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ของชิ้นงานแคโทดและชิ้นงานแอโนดกับปริมาณกระแสไฟที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงอุณหภูมิที่ 900°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



ภาพที่ 32 อุณหภูมิจริงของชิ้นงานแคโทดกับปริมาณกระแสไฟของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.2 การเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่อุณหภูมิ 850°C ด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

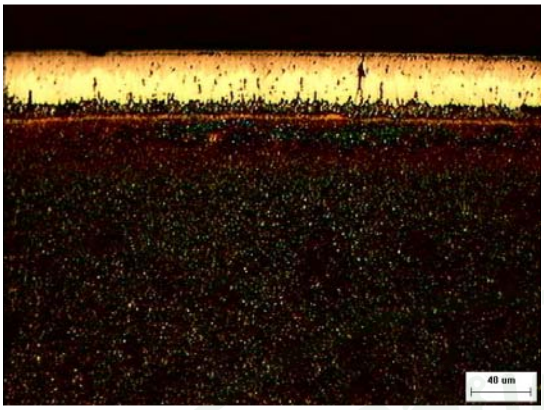
จากการเคลือบผิวชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยไฟฟ้ากระแสตรงปริมาณ 170 mA/cm^2 ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่าเกิดชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่ผิวของชิ้นงานแคโทด ซึ่งโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์มีลักษณะเป็นฟันเลื่อยเล็กน้อย แต่ความหนาของชั้นเคลือบค่อนข้างเรียบสม่ำเสมอและเป็นชนิดเฟสคู่ที่ประกอบด้วย ชั้น FeB (สีเข้ม) อยู่ชั้นนอกสุดและชั้น Fe_2B (สีอ่อน) อยู่ชั้นถัดเข้ามา ดังแสดงในภาพที่ 33

จากการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพสามารถวัดค่าความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ของชิ้นงานแคโทดเป็น 35.33 52.52 และ 60.43 ไมโครเมตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าความหนาชั้นเคลือบบอไรด์เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 34 นอกจากนี้สามารถวัดค่าความหนาชั้น FeB ได้เป็น 18.14 26.57 และ 34.33 ไมโครเมตร ตามลำดับ และวัดค่าความหนาชั้น Fe_2B ได้เป็น 17.19 25.95 และ 26.10 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 34

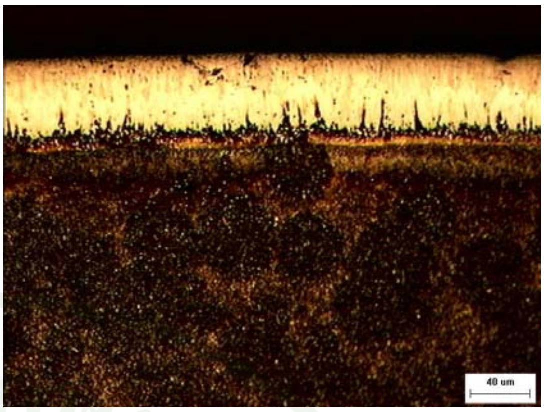
จากการทดสอบค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าบริเวณผิวชิ้นงานมีค่าความแข็งที่สูงถึง 1900 HV และค่าความแข็งจะลดลงไปเรื่อยๆเมื่อลึกลงไปใต้เนื้อชิ้นงานที่ประมาณ 450 HV ดังแสดงในภาพที่ 35

จากการวัดอุณหภูมิของชิ้นงานแคโทดด้วยเทอร์โมคัพเปิลขณะทำการเคลือบผิวโดยที่อุณหภูมิ 850°C พบว่า บริเวณผิวของชิ้นงานแคโทดมีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 880 °C

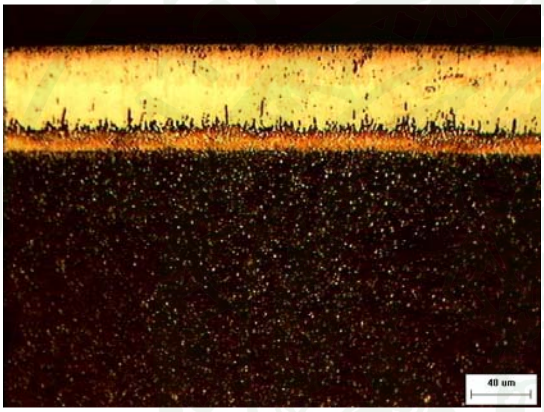
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก.)



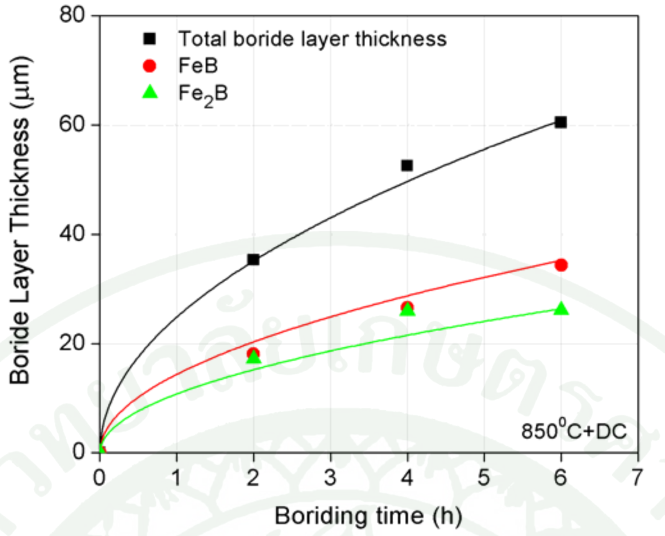
(ข.)



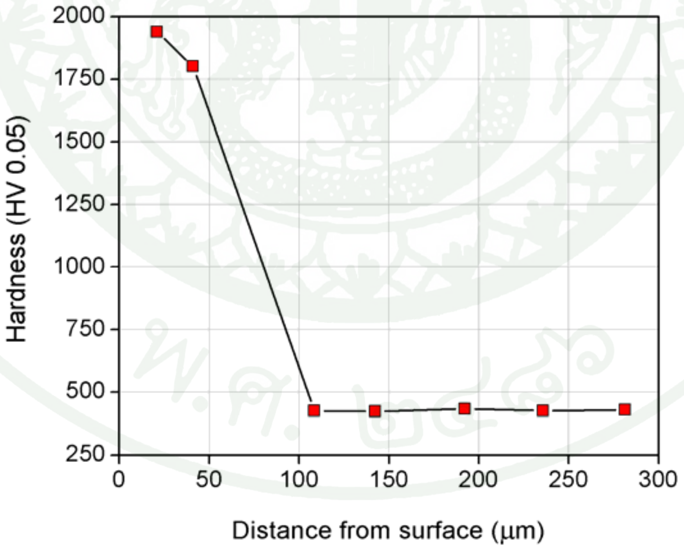
(ค.)

ภาพที่ 33 ภาพตัดขวางของโครงสร้างจุลภาคชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 850^{o}C เป็นเวลา (ก.) 2 ชั่วโมง (ข.) 4 ชั่วโมง และ (ค.) 6 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 34 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง



ภาพที่ 35 ค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 850°C ด้วยไฟฟ้ากระแสตรง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.3 การเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่อุณหภูมิ 900°C ด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

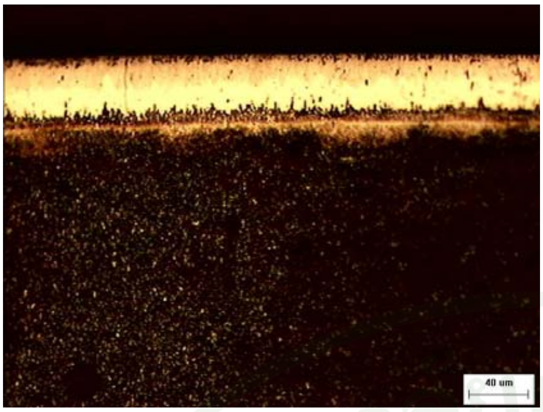
จากการเคลือบผิวชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยไฟฟ้ากระแสตรงปริมาณ 170 mA/cm^2 ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่าเกิดชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่ผิวของชิ้นงานแคโทด ซึ่งโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์มีลักษณะเป็นฟันเลื่อยเล็กน้อย แต่ความหนาของชั้นเคลือบค่อนข้างเรียบสม่ำเสมอและเป็นชนิดเฟสคู่ ที่ประกอบด้วยชั้น FeB (สีเข้ม) อยู่ชั้นนอกสุดและชั้น Fe_2B (สีอ่อน) อยู่ชั้นถัดเข้ามา ดังแสดงในภาพที่ 36

จากการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพสามารถวัดค่าความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ของชิ้นงานแคโทดเป็น 39.57 70.33 และ 74.67 ไมโครเมตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าความหนาชั้นเคลือบบอไรด์เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 37 นอกจากนี้สามารถวัดค่าความหนาชั้น FeB ได้เป็น 23.29 34.19 และ 36.19 ไมโครเมตร ตามลำดับ และวัดค่าความหนาชั้น Fe_2B ได้เป็น 16.28 36.14 และ 38.48 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 37

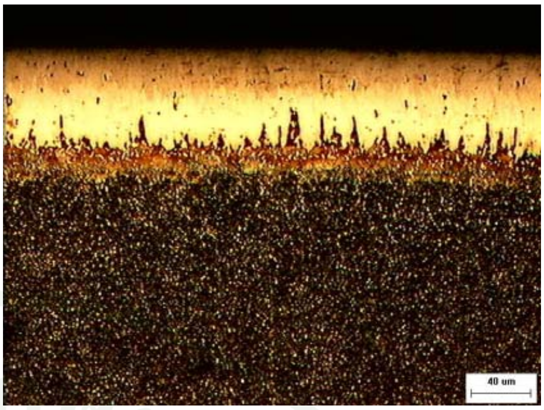
จากการทดสอบค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าบริเวณผิวชิ้นงานมีค่าความแข็งที่สูงถึง 1800 HV และค่าความแข็งจะลดลงไปเรื่อยๆเมื่อลึกลงไปใต้เนื้อชิ้นงานที่ประมาณ 450 HV ดังแสดงในภาพที่ 38

จากการวัดอุณหภูมิของชิ้นงานแคโทดด้วยเทอร์โมคัฟเปิลขณะทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 900°C พบว่า บริเวณผิวของชิ้นงานแคโทดมีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 933°C

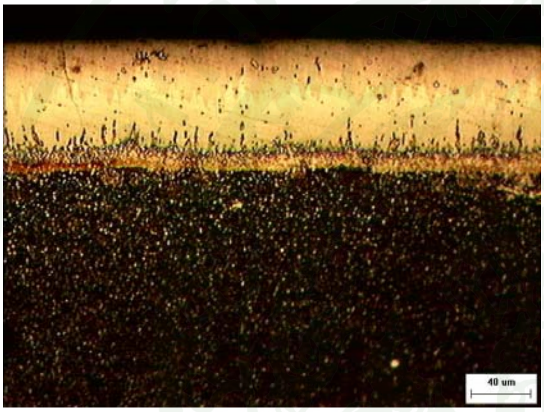
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก.)



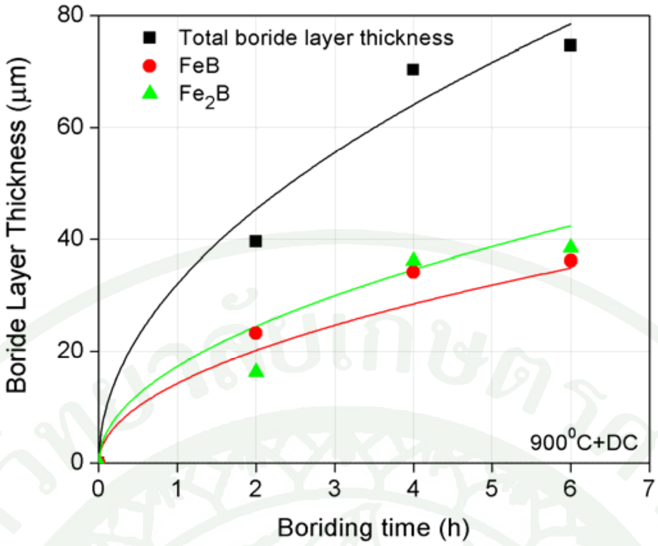
(ข.)



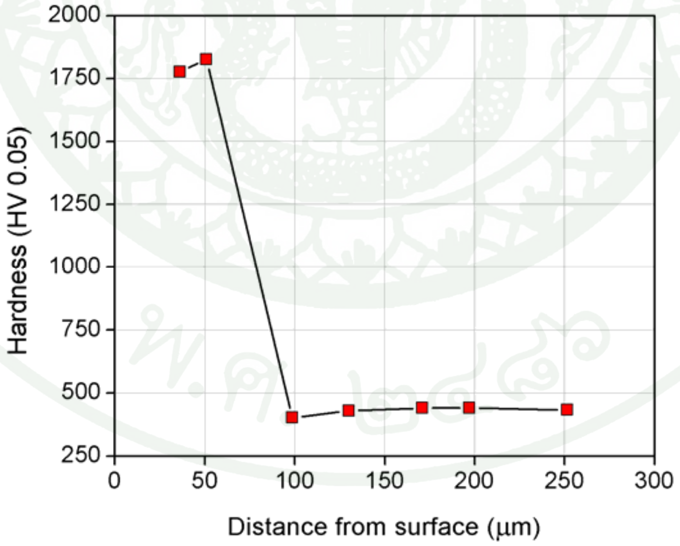
(ค.)

ภาพที่ 36 ภาพตัดขวางของโครงสร้างจุลภาคชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา (ก.) 2 ชั่วโมง (ข.) 4 ชั่วโมง และ (ค.) 6 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 37 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง



ภาพที่ 38 ค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 900°C เป็น 6 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.4 การเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่อุณหภูมิ 950^{o}C ด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

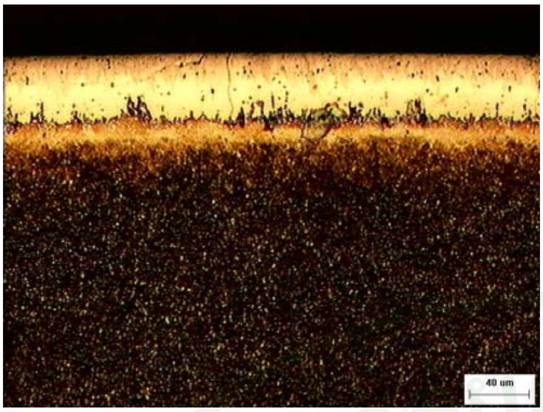
จากการเคลือบผิวชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยไฟฟ้ากระแสตรงปริมาณ 170 mA/cm^2 ที่อุณหภูมิ 950^{o}C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่าเกิดชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่ผิวของชิ้นงานแคโทด ซึ่งโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์มีลักษณะเป็นฟันเลื่อยเล็กน้อย แต่ความหนาของชั้นเคลือบค่อนข้างเรียบสม่ำเสมอและเป็นชนิดเฟสคู่ ที่ประกอบด้วย ชั้น FeB (สีเข้ม) อยู่ชั้นนอกสุดและชั้น Fe_2B (สีอ่อน) อยู่ชั้นถัดเข้ามา ดังแสดงในภาพที่ 39

จากการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพสามารถวัดค่าความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ของชิ้นงานแคโทดเป็น 57.49 78.57 และ 100.43 ไมโครเมตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าความหนาชั้นเคลือบบอไรด์เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 40 นอกจากนี้สามารถวัดค่าความหนาชั้น FeB ได้เป็น 21.68 37.14 และ 30.81 ไมโครเมตร ตามลำดับ และวัดค่าความหนาชั้น Fe_2B ได้เป็น 35.81 41.43 และ 69.62ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 40

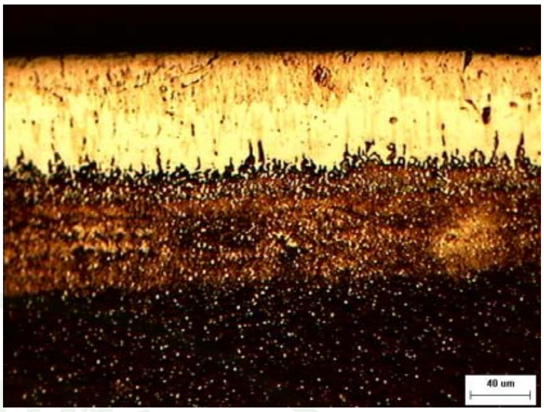
จากการทดสอบค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 950^{o}C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าบริเวณผิวชิ้นงานมีค่าความแข็งที่สูงถึง 1900 HV และค่าความแข็งจะลดลงไปเรื่อยๆเมื่อลึกลงไปใต้เนื้อชิ้นงานที่ประมาณ 450 HV ดังแสดงในภาพที่ 41

จากการวัดอุณหภูมิของชิ้นงานแคโทดด้วยเทอร์โมคัฟเปิลขณะทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 950^{o}C พบว่า บริเวณผิวของชิ้นงานแคโทดมีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 980^{o}C

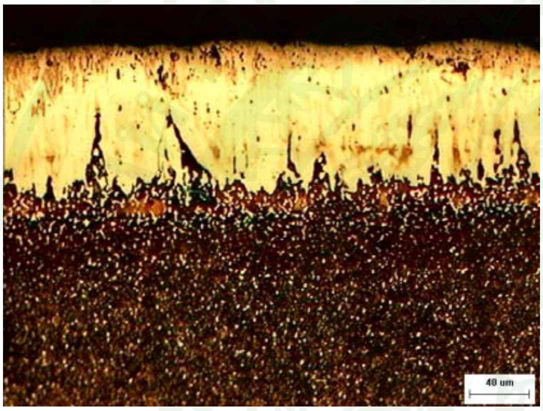
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก.)



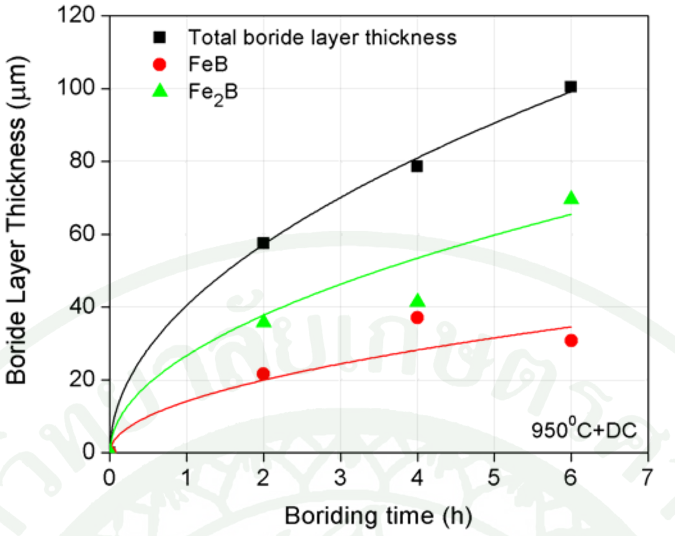
(ข.)



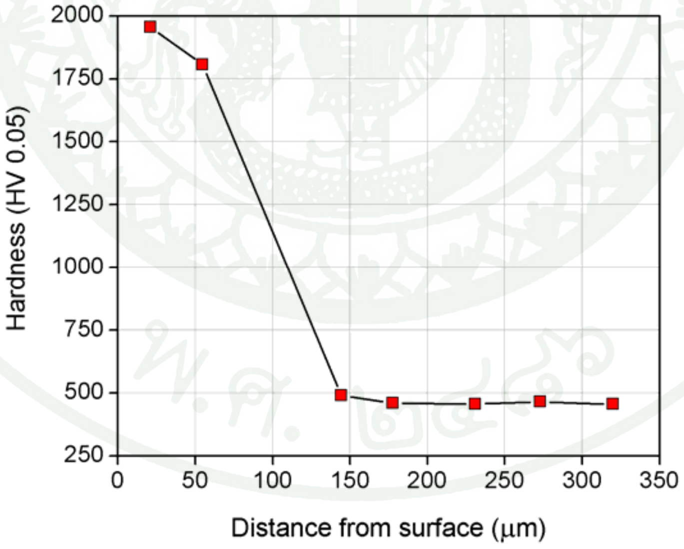
(ค.)

ภาพที่ 39 ภาพตัดขวางของโครงสร้างจุลภาคชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา (ก.) 2 ชั่วโมง (ข.) 4 ชั่วโมง และ (ค.) 6 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 40 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง



ภาพที่ 41 ค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 950°C ด้วยไฟฟ้ากระแสตรง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิจารณ์

1. การเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ด้วยกระบวนการแพคบอไรดิง

1.1 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบบอไรด์

โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 หลังจากการเคลือบผิวด้วยกระบวนการแพคบอไรดิง ที่อุณหภูมิระหว่าง 850-950^{o}C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่า ชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะค่อนข้างเรียบและมีลักษณะของฟันเลื่อยเล็กน้อย เพราะว่าเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 มีการเติมธาตุผสมในปริมาณที่สูง เมื่อพิจารณาจากองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้ พบว่ามีปริมาณธาตุผสมรวมเป็น 13.91 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ประกอบด้วยธาตุผสมโครเมียมเป็นธาตุหลักถึง 12.15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก คาร์บอน ซิลิคอน แมงกานีส ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ และนิกเกิล ดังแสดงในตารางที่ 5 ธาตุผสมเหล่านี้จึงเป็นตัวขัดขวางการแพร่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการเคลือบผิว ทำให้อะตอมโบรอนแพร่เข้าไปได้ยากขึ้น เมื่ออะตอมโบรอนเกิดการแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างเพื่อจับกับอะตอมเหล็กเกิดเป็นโครงสร้างเหล็กบอไรด์ ในขณะที่อะตอมโบรอนแพร่เข้าไปในโครงสร้างทำให้ธาตุผสมตัวอื่นถูกผลักให้ออกจากโครงสร้างเดิมแล้วแพร่ลึกเข้าไปในเนื้อชิ้นงานต่อไป ดังนั้นจากการแพร่ของอะตอมโบรอนทำให้ชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะค่อนข้างเรียบสม่ำเสมอ นอกจากนี้ธาตุผสมโครเมียมที่เป็นธาตุหลักของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้ยังทำให้ชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะค่อนข้างเรียบสม่ำเสมอ

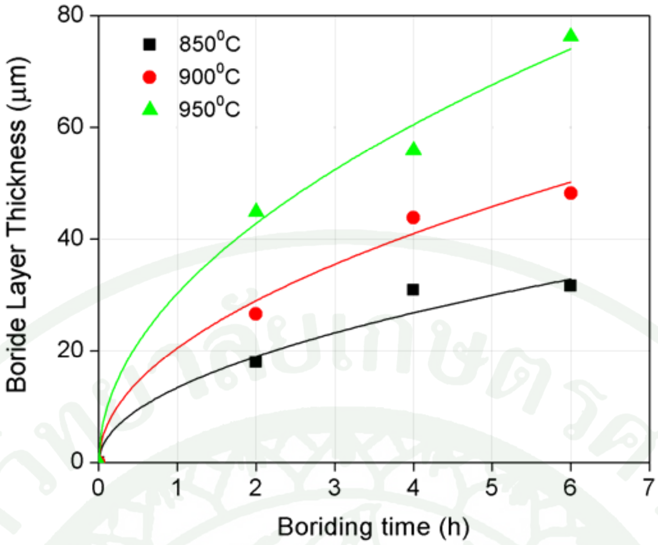
ชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่ได้จากการเคลือบผิวเป็นชนิดเฟสคู่ ที่ประกอบด้วย เฟส FeB และเฟส Fe_2B ซึ่งถูกตรวจสอบด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าการเกิดชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ชนิดเฟสคู่ได้รับอิทธิพลมาจากตัวแปรในกระบวนการเคลือบผิว ไม่ว่าจะเป็น อุณหภูมิ เวลาในกระบวนการเคลือบผิว และความเข้มข้นของอะตอมโบรอนบริเวณรอบชิ้นงาน โดยที่กลไกการเกิดชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ในกระบวนการเคลือบผิว ขั้นแรกเมื่ออะตอมโบรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาการแตกตัวของผงEkabor I แพร่เข้าไปในชิ้นงานเพื่อจับกับอะตอมเหล็ก เกิดเป็นชั้นของ Fe_2B ที่บริเวณผิวชิ้นงาน ดังนั้นจึงทำให้ที่บริเวณผิวของชิ้นงานมีความเข้มข้นของอะตอมโบรอนสูงขึ้น หลังจากนั้นในขั้นที่สองเมื่อบริเวณรอยต่อระหว่างชั้น Fe_2B กับผงEkabor I มีความเข้มข้นของอะตอมโบรอนสูงถึง 16.23 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จึงทำให้บริเวณผิวของชิ้นงานเกิดชั้นของ FeB เพิ่มขึ้น

อีกด้วย การเติบโตของชั้น Fe_2B และ FeB ที่เกิดขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอะตอมโบรอนบริเวณรอบชิ้นงานในแต่ละชั้น และในขั้นตอนสุดท้ายเมื่อความเข้มข้นของอะตอมโบรอนบริเวณรอบชิ้นงานมีค่าต่ำลง อะตอมโบรอนของชั้น FeB จะแพร่ไปยังชั้น Fe_2B โดยที่อะตอมโบรอนจะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นของอะตอมโบรอนต่ำ ดังนั้นในชั้น Fe_2B ทำให้อะตอมโบรอนแพร่เข้าไปจับกับอะตอมเหล็กในชิ้นงานได้ลึกขึ้นส่งผลให้ความหนาในชั้นนี้เพิ่มสูงขึ้น ในทางกลับกันความหนาของชั้น FeB จะค่อยๆลดลงจนหายไปซึ่งขึ้นอยู่กับตัวแปรของกระบวนการ

1.2 ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์

จากการเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ด้วยกระบวนการแพคบอไรดิง ที่อุณหภูมิระหว่าง 850-950^{0}C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่า ชั้นเคลือบบอไรด์มีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาในกระบวนการเคลือบผิวสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 42 ทั้งนี้เนื่องมาจากที่อุณหภูมิสูงทำให้อะตอมโบรอนที่มีอยู่ปริมาณมากในผง Ekabor I สามารถเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวได้ดีและสามารถแพร่ได้อย่างรวดเร็ว และระยะเวลาการเคลือบผิวก็มีผลต่อการแพร่ของอะตอมโบรอนเช่นเดียวกัน ซึ่งจะทำให้อะตอมโบรอนมีเวลาที่ใช้ในการแพร่เพิ่มมากขึ้นและนานขึ้นอีกแล้วยังส่งผลต่อการเกิดชั้นเคลือบบอไรด์ชนิดเฟสคู่ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการเคลือบผิวที่สูงขึ้นมีอิทธิพลต่อการเกิดความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความหนาในแต่ละชั้น พบว่าในชั้นของ Fe_2B จะมีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาในกระบวนการเคลือบผิวสูงขึ้น ส่วนในชั้น FeB จะพบว่า ความหนาในชั้นนี้มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เนื่องมาจากอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการเคลือบผิวมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอะตอมโบรอนในการแพร่เข้าสู่ชิ้นงาน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 42 ความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

1.3 ความแข็งของชั้นเคลือบบอไรด์

จากผลการทดสอบค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิระหว่าง 850-950°C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่า กระบวนการแพคบอไรดิงสามารถเพิ่มความแข็งให้กับผิวเหล็กกล้าไร้สนิม จากการแพร่ของอะตอมโบรอนเข้าสู่ผิวของชิ้นงาน ทำให้บริเวณผิวของชิ้นงานที่อะตอมโบรอนแพร่ไปถึงมีค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้บริเวณผิวชิ้นงานที่เป็นชั้นของเหล็กบอไรด์ Fe_2B และ FeB มีค่าความแข็งเฉลี่ยประมาณ 1800 HV และค่าความแข็งจะลดลงไปเรื่อยๆเมื่อลึกลงไปใต้เนื้อชิ้นงานที่เฉลี่ยประมาณ 450 HV

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.4 จลนพลศาสตร์ของกระบวนการแพคบอไรดิง

จากการเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ด้วยกระบวนการแพคบอไรดิง ที่อุณหภูมิระหว่าง 850-950°C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่า ความหนาชั้นเคลือบบอไรด์มีความสัมพันธ์กับเวลาในการเคลือบผิวเป็นแบบพาราโบลิกตามสมการการแพร่ซึม ดังสมการที่ 1 และเมื่อนำความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ยกกำลังสองจะได้ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ยกกำลังสองแปรผันตรงตามเวลาในการเคลือบผิว ดังแสดงในภาพที่ 43

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

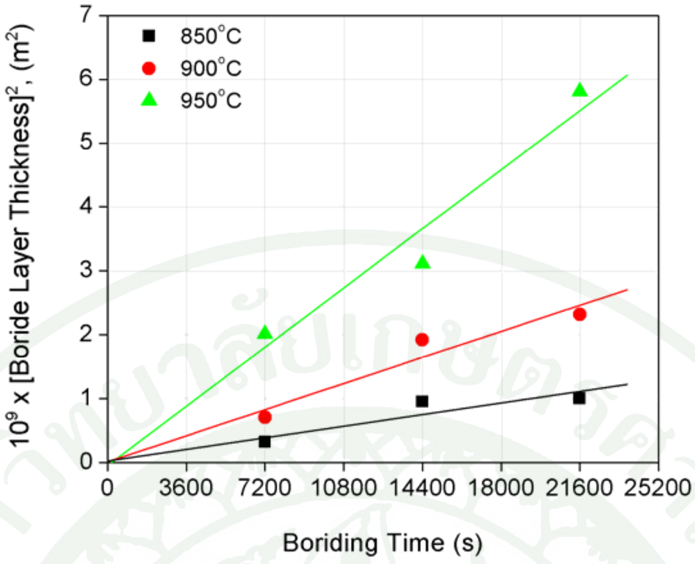
เมื่อ	d	คือ	ความหนาของชั้นเคลือบ (เมตร)
	K	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (ตารางเมตร/วินาที)
	t	คือ	เวลาในการเคลือบผิว (วินาที)

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ (T) และพลังงานกระตุ้น (Q) ตามหลักการของจลนพลศาสตร์ตามสมการอาร์เรเนียส ดังแสดงในสมการที่ 2

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

ดังนั้น สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนที่อุณหภูมิต่างๆ ได้ ดังตารางที่ 6 และพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แสดงว่าที่อุณหภูมิสูงทำให้อะตอมโบรอนสามารถแพร่ได้ดีขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสองของความหนาชั้นเคลือบบอไรด์และเวลาที่ใช้ในการผ่านการเคลือบผิวบนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ด้วยกระบวนการแพคบอไดิง

ตารางที่ 6 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิต่างๆ

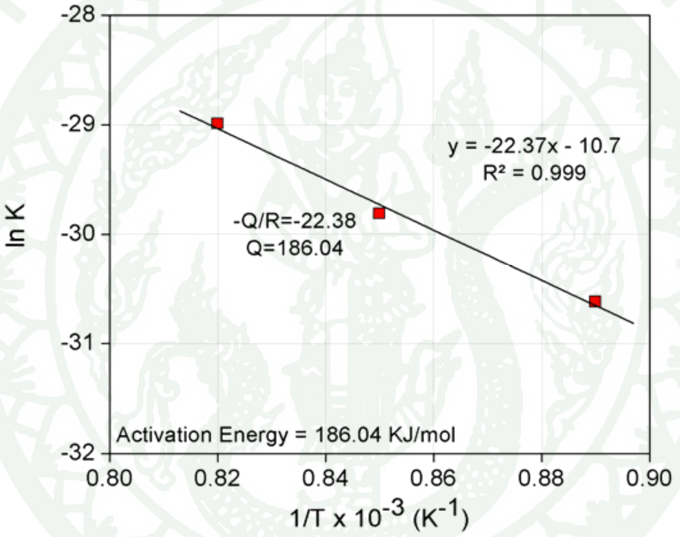
อุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว (องศาเซลเซียส)	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่, K (ตารางเมตร/วินาที)
850	5.04×10^{-14}
900	1.13×10^{-14}
950	2.57×10^{-14}

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากสมการที่ (2) สามารถจัดรูปได้เป็นสมการที่ 3

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

เมื่อ	K_0	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ (ตารางเมตร/วินาที)
	Q	คือ	ค่าพลังงานกระตุ้น (จูล/โมล)
	T	คือ	อุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบ (เคลวิน)
	R	คือ	ค่าคงที่ของก๊าซ มีค่าเท่ากับ 8.314 จูล/โมล.เคลวิน



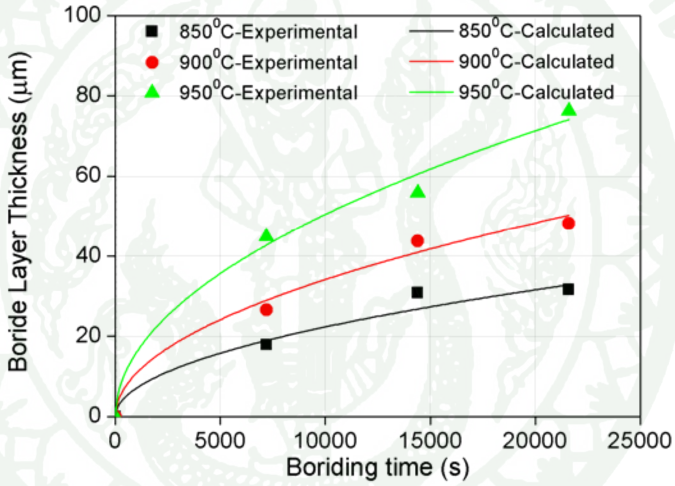
ภาพที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างลอกาลิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (ln K) และส่วนกลับของอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว (1/T) ในกระบวนการแพคบอไรดิงบนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420

จากสมการที่ 3 จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกับสมการเส้นตรง ดังนั้นการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่และค่าพลังงานกระตุ้นของการแพร่ซึมของอะตอมโบรอนนั้น สามารถคำนวณได้จากค่าความชันของกราฟเส้นตรงดังแสดงในภาพที่ 44 โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ของอะตอมโบรอนและค่าพลังงานกระตุ้นของกระบวนการเคลือบผิวบนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ด้วยกระบวนการแพคบอไรดิง มีค่าเท่ากับ 2.24×10^{-5} ตารางเมตร/วินาที และ 186.04 กิโลจูล/โมล ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อนำค่าตัวแปรต่างๆที่ได้จากการคำนวณในการทดลอง ไม่ว่าจะเป็นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ และค่าพลังงานกระตุ้น รวมทั้งค่าคงที่ของก๊าซมาแทนกลับลงไปในสมการที่ 1 ก็จะสามารถสร้างสมการทั่วไปในการทำนายความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆในการเคลือบผิวด้วยกระบวนการแพคบอไรดิง ดังแสดงในสมการที่ 4 และเมื่อนำสมการที่ 4 มาคำนวณหาค่าความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ที่อุณหภูมิและเวลาในการทดลองแล้วมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง พบว่า ความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ที่ได้จากการทดลองจริง ดังแสดงในภาพที่ 45

$$d = \{(2.24 \times 10^{-5} t) \exp(-22373/T)\}^{0.5} \qquad (4)$$



ภาพที่ 45 การคำนวณความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ในกระบวนการแพคบอไรดิงบนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. การเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงที่ผ่านการให้ไฟฟ้ากระแสตรง

2.1 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบบอไรด์

โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานแคโทดเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 หลังจากการเคลือบผิวด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงที่ผ่านการให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 170 mA/cm^2 ที่อุณหภูมิระหว่าง 850-950^{0}C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่า ชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะค่อนข้างเรียบและมีลักษณะของฟันเลื่อยเล็กน้อยเช่นเดียวกับชิ้นงานอ้างอิง (ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยกระบวนการแพคบอไรดิง) เพราะว่าเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 มีการเติมธาตุผสมในปริมาณที่สูง เมื่อพิจารณาจากองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้ พบว่ามีปริมาณธาตุผสมรวมเป็น 13.91 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ประกอบด้วยธาตุผสมโครเมียมเป็นธาตุหลักประมาณ 12.15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก คาร์บอน ซิลิคอน แมงกานีส ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ และนิกเกิล ดังแสดงในตารางที่ 5 ธาตุผสมเหล่านี้จึงเป็นตัวขัดขวางการแพร่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการเคลือบผิว ทำให้อะตอมโบรอนแพร่เข้าไปได้ยากขึ้น เมื่ออะตอมโบรอนเกิดการแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างเพื่อจับกับอะตอมเหล็กเกิดเป็นโครงสร้างเหล็กบอไรด์ ในขณะที่อะตอมโบรอนแพร่เข้าไปในโครงสร้างทำให้ธาตุผสมตัวอื่นถูกผลักให้ออกจากโครงสร้างเดิมแล้วแพร่ลึกเข้าไปในเนื้อชิ้นงานต่อไป ดังนั้นจากการแพร่ของอะตอมโบรอนทำให้ชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะค่อนข้างเรียบสม่ำเสมอ นอกจากนี้ธาตุผสมโครเมียมที่เป็นธาตุหลักของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้ยังทำให้ชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะค่อนข้างเรียบสม่ำเสมอ

ชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่ได้จากการเคลือบผิวเป็นชนิดเฟสคู่ ที่ประกอบด้วย เฟส FeB และเฟส Fe_2B ซึ่งถูกตรวจสอบด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่า การเกิดชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ชนิดเฟสคู่ได้รับอิทธิพลมาจากตัวแปรในกระบวนการเคลือบผิว ไม่ว่าจะเป็น อุณหภูมิ เวลาในกระบวนการเคลือบผิว และความเข้มข้นของอะตอมโบรอนบริเวณรอบชิ้นงาน โดยที่กลไกการเกิดชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ในกระบวนการเคลือบผิว ขั้นแรกเมื่ออะตอมโบรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาการแตกตัวของผง Ekabor I แพร่เข้าไปในชิ้นงานเพื่อจับกับอะตอมเหล็ก เกิดเป็นชั้นของ Fe_2B ที่บริเวณผิวชิ้นงาน ดังนั้นจึงทำให้ที่บริเวณผิวของชิ้นงานมีความเข้มข้นของอะตอมโบรอนสูงขึ้น หลังจากนั้นในขั้นที่สองเมื่อบริเวณรอยต่อระหว่างชั้น Fe_2B กับผงEkabor I มีความเข้มข้นของอะตอมโบรอนสูงถึง 16.23 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จึงทำให้บริเวณผิวของชิ้นงานเกิดชั้นของ FeB

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพิ่มขึ้นอีก การเติบโตของชั้น Fe_2B และ FeB ที่เกิดขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอะตอมโบรอนบริเวณรอบชิ้นงานในแต่ละชั้น และในขั้นตอนสุดท้ายเมื่อความเข้มข้นของอะตอมโบรอนบริเวณรอบชิ้นงานมีค่าต่ำลง อะตอมโบรอนของชั้น FeB จะแพร่ไปยังชั้น Fe_2B โดยที่อะตอมโบรอนจะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นของอะตอมโบรอนต่ำ ดังนั้นในชั้น Fe_2B ทำให้อะตอมโบรอนแพร่เข้าไปจับกับอะตอมเหล็กในชิ้นงานได้ลึกขึ้นส่งผลให้ความหนาในชั้นนี้เพิ่มสูงขึ้น ในทางกลับกันความหนาของชั้น FeB จะค่อยๆลดลงจนหายไปซึ่งขึ้นอยู่กับตัวแปรของกระบวนการ

2.2 ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์

จากการเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงที่ผ่านการให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 170 mA/cm^2 ที่อุณหภูมิระหว่าง 850-950^{0}C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่า ชั้นเคลือบบอไรด์ของชิ้นงานแคโทดมีความหนามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาในกระบวนการเคลือบผิวสูงขึ้น ดังแสดงในภาพ 46 ทั้งนี้เนื่องมาจากที่อุณหภูมิสูงทำให้อะตอมโบรอนที่มีอยู่ปริมาณมากในผง Ekabor I สามารถเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวได้ดีและสามารถแพร่ได้อย่างรวดเร็ว และระยะเวลาการเคลือบผิวก็มีผลต่อการแพร่ของอะตอมโบรอนเช่นเดียวกัน ซึ่งจะทำให้อะตอมโบรอนมีเวลาที่ใช้ในการแพร่เพิ่มมากขึ้นและนานขึ้นอีก แล้วยังส่งผลต่อการเกิดชั้นเคลือบบอไรด์ชนิดเฟสคู่ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการเคลือบผิวที่สูงขึ้นมีอิทธิพลต่อการเกิดความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความหนาในแต่ละชั้น พบว่าในชั้นของ Fe_2B จะมีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาในกระบวนการเคลือบผิวสูงขึ้น ส่วนในชั้น FeB จะพบว่า ความหนาในชั้นนี้มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เนื่องมาจากอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการเคลือบผิวมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอะตอมโบรอนในการแพร่เข้าสู่ชิ้นงาน

แล้วยังพบอีกว่าการที่นำไฟฟ้ากระแสตรงมาช่วยในกระบวนการเคลือบผิวมีอิทธิพลต่อการเกิดชั้นเคลือบบอไรด์เป็นสองส่วน ส่วนที่หนึ่ง ก็คือไฟฟ้ากระแสตรงช่วยให้อะตอมโบรอนแพร่ไปยังชิ้นงานแคโทดได้มากขึ้น เนื่องมาจากในกระบวนการแพคบอไรดิงที่ผ่านการให้ไฟฟ้ากระแสตรง ประกอบด้วย ขั้วแคโทดและขั้วแอโนดซึ่งเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 และผง Ekabor I ซึ่งประกอบด้วยอะตอมโบรอน เมื่อเกิดการครบวงจรจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านชิ้นงานได้ ซึ่งทิศทางของกระแสไฟฟ้าจะไหลจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด โดยที่อะตอมโบรอนที่อยู่รอบๆขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง (แอโนดและแคโทด) เป็นส่วนหนึ่งของสนามไฟฟ้าที่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

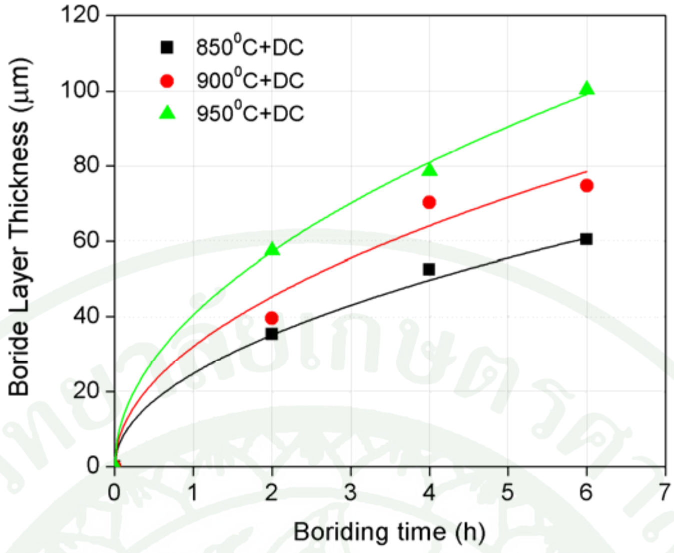
เกิดขึ้น ส่งผลให้การแพร่ของอะตอมโบรอนแพร่ไปทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า ทำให้บริเวณรอบๆ ชิ้นงานแคโทดมีอะตอมโบรอนมีความเข้มข้นสูงกว่าในบริเวณอื่นๆ ดังแสดงในภาพที่ 47 และยังเกิดการแตกตัวของอะตอมโบรอนในผง Ekabor I เป็นโบรอนไอออนบวก (Xie *et al.*, 2010) แล้วแพร่ไปยังชิ้นงานแคโทด ซึ่งการแพร่แบบนี้จะแพร่ได้ดีและเร็วกว่าการแพร่แบบอิสระโดยความร้อน ซึ่งอะตอมสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในทุกทิศทุกทาง ส่วนที่สอง คือ ไฟฟ้ากระแสตรงช่วยทำให้ชิ้นงานแคโทดมีอุณหภูมิสูงขึ้น เพราะจากการทดลองได้ทำการวัดอุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานแคโทด ปรากฏว่า อุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานแคโทดมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของกระบวนการเคลือบผิว ซึ่งเป็นผลมาจากกระแสไฟฟ้าเกิดการไหลในวงจรจึงเกิดความร้อนขึ้น ผลของความร้อนที่เพิ่มขึ้นจึงไปช่วยในการแตกตัวของผง Ekabor I เพื่อให้เกิดอะตอมโบรอนบริเวณรอบชิ้นงานแคโทดเป็นจำนวนมากขึ้น สามารถแพร่เข้าสู่บริเวณชิ้นงานแคโทดได้เพิ่มขึ้น ดังนั้นอิทธิพลของการเกิดชั้นเคลือบบอไรด์ที่กล่าวมาทั้งสองส่วนจึงช่วยให้ชิ้นงานแคโทดมีความหนาที่มากขึ้น

ส่วนความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ของชิ้นงานแอโนด พบว่า มีความหนาชั้นเคลือบบอไรด์มากกว่าชิ้นงานอ้างอิง แต่มีความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ที่น้อยกว่าชิ้นงานแคโทด เมื่อพิจารณาการให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 170 mA/cm^2 ดังแสดงในภาพที่ 31 แสดงให้เห็นว่า ความร้อนที่เพิ่มมากขึ้นจากการให้ไฟฟ้ากระแสตรงยังช่วยส่งผลให้ชิ้นงานแอโนดมีอุณหภูมิสูงขึ้น จึงทำให้อะตอมโบรอนบริเวณรอบชิ้นงานแอโนดมีจำนวนมากขึ้นสามารถแพร่เข้าสู่บริเวณชิ้นงานแอโนดได้เพิ่มขึ้น (Xie *et al.*, 2010) แต่ทิศทางของการแพร่อะตอมโบรอนจะมีทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้าจึงทำให้อะตอมโบรอนรอบๆชิ้นงานแอโนดเคลื่อนที่ไปยังชิ้นงานแคโทดได้มากขึ้น ส่งผลให้บริเวณรอบๆชิ้นงานแคโทดมีอะตอมโบรอนรอบๆชิ้นงานที่สูงขึ้น ทำให้ความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ของชิ้นงานแคโทดหนาที่สุด

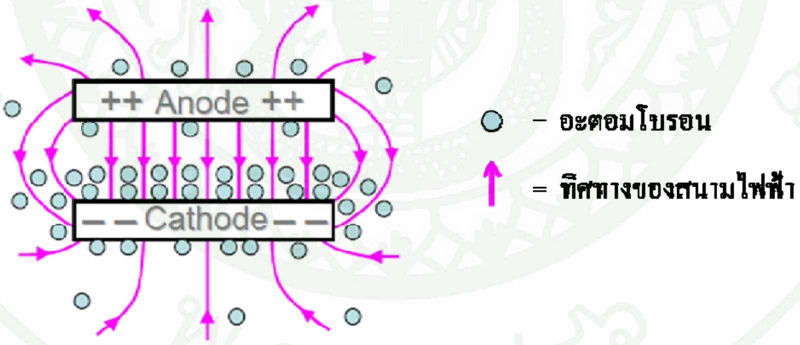
2.3 ความแข็งของชั้นเคลือบบอไรด์

จากผลการทดสอบค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงที่ผ่านการให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 170 mA/cm^2 ที่อุณหภูมิระหว่าง 850-950°C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่า กระบวนการแพคบอไรดิงสามารถเพิ่มความแข็งให้กับผิวเหล็กกล้าไร้สนิม จากการแพร่ของอะตอมโบรอนเข้าสู่ผิวของชิ้นงาน ทำให้บริเวณผิวของชิ้นงานที่อะตอมโบรอนแพร่ไปถึงมีค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้บริเวณผิวชิ้นงานที่เป็นชั้นของเหล็กบอไรด์ Fe_2B และ FeB มีค่าความแข็งเฉลี่ยประมาณ 1800 HV และค่าความแข็งจะลดลงไปเรื่อยๆเมื่อลึกลงไปใต้เนื้อชิ้นงานที่เฉลี่ยประมาณ 450 HV

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 46 ความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

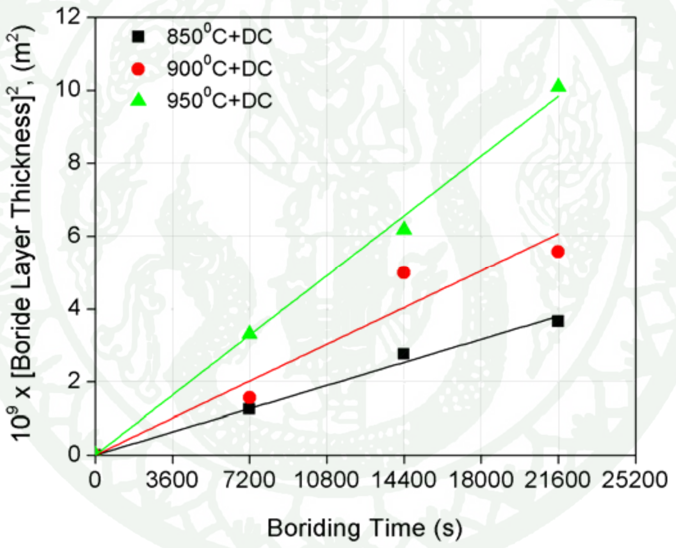


ภาพที่ 47 การกระจายตัวของอะตอมโบรอนภายใต้สนามไฟฟ้าในกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.4 จลนพลศาสตร์ของกระบวนการแพคบอไรดิงที่ผ่านการให้ไฟฟ้ากระแสตรง

จากการเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงที่ผ่านการให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 170 mA/cm^2 ที่อุณหภูมิ 850-950^{o}C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่า ความหนาชั้นเคลือบบอไรด์มีความสัมพันธ์กับเวลาในการเคลือบผิวเป็นแบบพาราโบลิกตาม สมการการแพร่ซึม ดังสมการที่ 1 และเมื่อนำความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ยกกำลังสองจะได้ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ยกกำลังสองแปรผันตรงตามเวลาในการเคลือบผิว ดังแสดงในภาพที่ 48 และสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนที่อุณหภูมิต่างๆได้ ดังตารางที่ 7 ซึ่งพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แสดงว่าที่อุณหภูมิสูงทำให้อะตอมโบรอนสามารถแพร่ได้ดีขึ้น

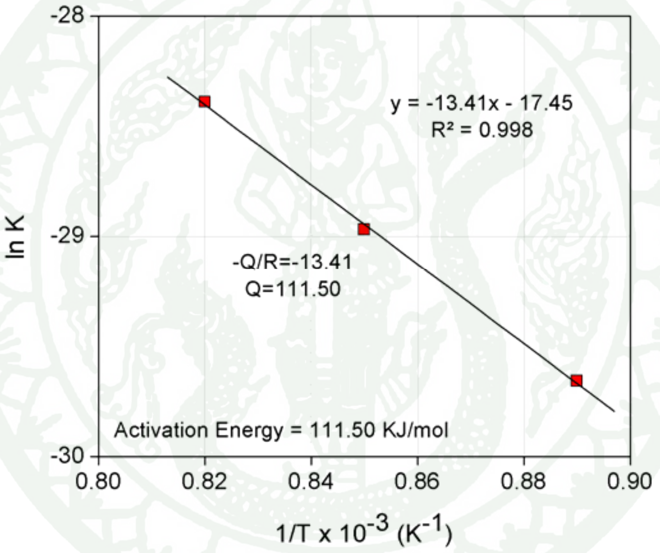


ภาพที่ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสองของความหนาชั้นเคลือบบอไรด์และเวลาที่ใช้ในการผ่านการเคลือบผิวบนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว (องศาเซลเซียส)	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่, K (ตารางเมตร/วินาที)
850	1.73×10^{-13}
900	2.80×10^{-13}
950	4.60×10^{-13}



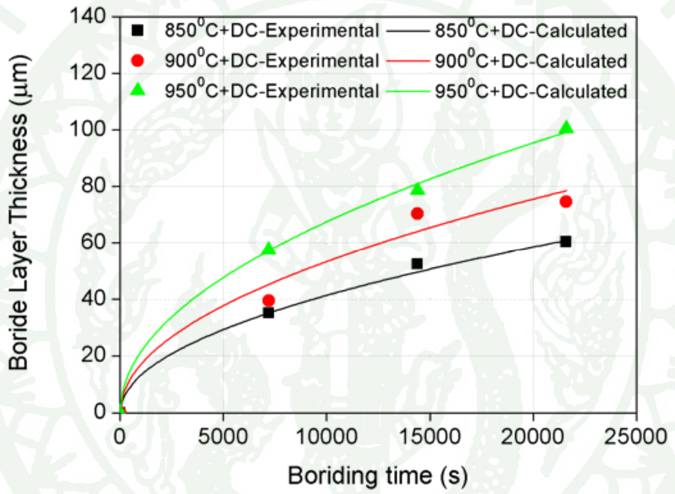
ภาพที่ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างลอกาลิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (ln K) และส่วนกลับของอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว (1/T) ในกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงบนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420

จากสมการที่ 3 จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกับสมการเส้นตรง ดังนั้นการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่และค่าพลังงานกระตุ้นของการแพร่ซึมของอะตอมโบรอนนั้น สามารถคำนวณได้จากค่าความชันของกราฟเส้นตรงดังแสดงในภาพที่ 49 โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ของอะตอมโบรอนและค่าพลังงานกระตุ้นของกระบวนการเคลือบผิวบนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงที่ผ่านการให้ไฟฟ้ากระแสตรง มีค่าเท่ากับ 2.64×10^{-8} ตารางเมตร/วินาที และ 111.50 กิโลจูล/โมล ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อนำค่าตัวแปรต่างๆที่ได้จากการคำนวณในการทดลอง ไม่ว่าจะเป็นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ และค่าพลังงานกระตุ้น รวมทั้งค่าคงที่ของก๊าซมาแทนกลับลงไปในสมการที่ 1 ก็จะสามารถสร้างสมการทั่วไปในการทำนายความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆในการเคลือบผิวด้วยกระบวนการแพคบอไรดิง ดังแสดงในสมการที่ 5 และเมื่อนำสมการที่ 5 มาคำนวณหาค่าความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ที่อุณหภูมิและเวลาในการทดลอง แล้วมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง พบว่า ความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ที่ได้จากการทดลองจริง ดังแสดงในภาพที่ 50

$$d = \{(2.64 \times 10^{-8} t) \exp(-13412/T)\}^{0.5} \quad (5)$$



ภาพที่ 50 การคำนวณความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ในกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงบนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

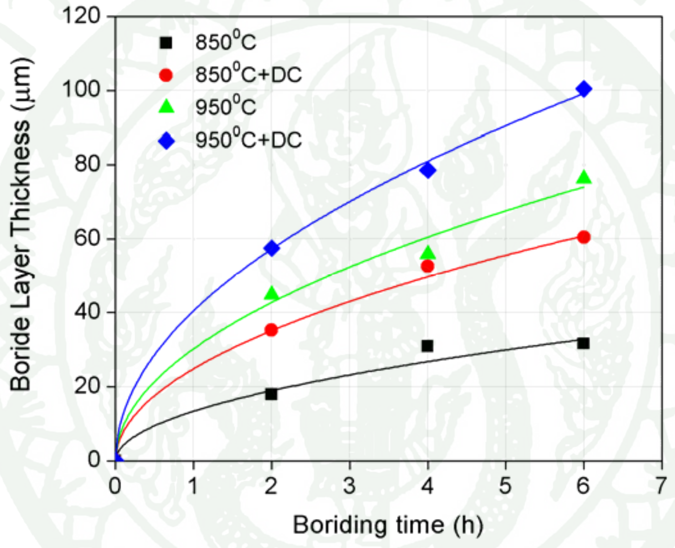
3. ความแตกต่างระหว่างการเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงที่ผ่านและไม่ผ่านการให้ไฟฟ้ากระแสตรง

โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 หลังจากการเคลือบผิวด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการให้ไฟฟ้ากระแสตรง พบว่า ชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้นของทั้งสองกระบวนการมีลักษณะเช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นชนิดเฟสคู่ที่ประกอบด้วย เฟส FeB และเฟส Fe_2B มีลักษณะค่อนข้างเรียบและเป็นฟันเลื่อยเล็กน้อย เพราะว่าเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 มีการเติมธาตุผสมในปริมาณที่สูง จึงทำให้ธาตุผสมเหล่านี้จึงเป็นตัวขัดขวางการแพร่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการเคลือบผิว ทำให้อะตอมโบรอนแพร่เข้าไปได้ยากขึ้น เมื่ออะตอมโบรอนเกิดการแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างเพื่อจับกับอะตอมเหล็กเกิดเป็นโครงสร้างเหล็กบอไรด์ ในขณะที่อะตอมโบรอนแพร่เข้าไปในโครงสร้างทำให้ธาตุผสมตัวอื่นถูกผลักให้ออกจากโครงสร้างเดิมแล้วแพร่ลึกเข้าไปในเนื้อชิ้นงานต่อไป ดังนั้นจากการแพร่ของอะตอมโบรอนทำให้ชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะค่อนข้างเรียบสม่ำเสมอ นอกจากนี้ธาตุผสมโครเมียมที่เป็นธาตุหลักของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้ยังทำให้ชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะค่อนข้างเรียบสม่ำเสมอ

ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 หลังจากการเคลือบผิวด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการให้ไฟฟ้ากระแสตรง พบว่า ชั้นเคลือบบอไรด์ของชิ้นงานแคโทดซึ่งได้จากกระบวนการแพคบอไรดิงที่ผ่านการให้ไฟฟ้ากระแสตรง และชิ้นงานอ้างอิงซึ่งได้จากกระบวนการแพคบอไรดิงจะมีความหนามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาในกระบวนการเคลือบผิวสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากที่อุณหภูมิสูงทำให้อะตอมโบรอนที่มีอยู่ปริมาณมากในผง Ekabor I สามารถเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวได้ดีและสามารถแพร่ได้อย่างรวดเร็ว และระยะเวลาการเคลือบผิวก็มีผลต่อการแพร่ของอะตอมโบรอนเช่นเดียวกัน ซึ่งจะทำให้อะตอมโบรอนมีเวลาที่ใช้ในการแพร่เพิ่มมากขึ้นและนานขึ้นอีก แล้วยังส่งผลต่อการเกิดชั้นเคลือบบอไรด์ชนิดเฟสคู่ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการเคลือบผิวที่สูงขึ้นมีอิทธิพลต่อการเกิดความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่เพิ่มขึ้น แต่ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์เกิดขึ้นบนชิ้นงานแคโทด จะมีค่าความหนามากกว่าชิ้นงานอ้างอิง ดังแสดงในภาพที่ 51 การที่ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์บนชิ้นงานแคโทดมีความหนามากกว่าชิ้นงานอ้างอิง เนื่องมาจากอิทธิพลของไฟฟ้ากระแสตรงสองส่วน ซึ่งส่วนที่หนึ่ง ก็คือไฟฟ้ากระแสตรงช่วยให้อะตอมโบรอนแพร่ไปยังชิ้นงานแคโทดได้มากขึ้น กล่าวคือ เมื่อเกิดการครบวงจรจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านชิ้นงานโดยที่ทิศทางของกระแสไฟฟ้าจะไหลจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด จึงทำให้อะตอม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โบรอนแพร่ไปยังชิ้นงานแคโทดได้มากขึ้น ส่วนที่สอง คือ ไฟฟ้ากระแสตรงช่วยทำให้ชิ้นงานแคโทดมีอุณหภูมิสูงขึ้นกว่าอุณหภูมิของกระบวนการเคลือบผิวขึ้นดังแสดงในตารางที่ 8 ซึ่งเป็นผลมาจากกระแสไฟฟ้าเกิดการไหลในวงจรจึงเกิดความร้อน ผลของความร้อนที่เพิ่มขึ้นจึงไปช่วยในการแตกตัวของผง Ekabor I เพื่อให้เกิดอะตอมโบรอนบริเวณรอบชิ้นงานแคโทดเป็นจำนวนมากขึ้น สามารถแพร่เข้าสู่บริเวณชิ้นงานแคโทดได้เพิ่มขึ้น ดังนั้นอิทธิพลของการเกิดชั้นเคลือบบอไรด์บนชิ้นงานแคโทดที่กล่าวมาทั้งสองส่วนจึงช่วยให้ชิ้นงานแคโทดมีความหนาที่มากขึ้น ส่วนความหนาชั้นเคลือบบอไรด์เกิดขึ้นบนชิ้นงานอ้างอิงจะได้รับมาจากการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการเคลือบผิวเท่านั้น ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น



ภาพที่ 51 การเปรียบเทียบความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงที่ผ่านและไม่ผ่านการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 8 อุณหภูมิเฉลี่ยของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในกระบวนการเคลือบผิวที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง

อุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิเฉลี่ยของชิ้นงาน (องศาเซลเซียส)		ความแตกต่างของอุณหภูมิ (เปอร์เซ็นต์)
	ชิ้นงานอ้างอิง	ชิ้นงานแคโทด	
850	850	880	3.5
900	900	933	3.6
950	950	980	3.2

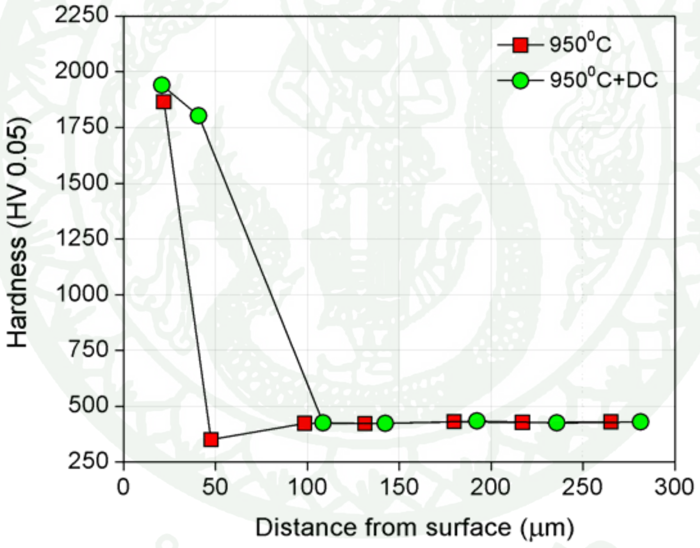
จากค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวชิ้นงานแคโทดและชิ้นงานอ้างอิง พบว่า บริเวณผิวของชิ้นงานทั้งสองที่เป็นชั้นของเหล็กบอไรด์ FeB และ Fe_2B มีค่าความแข็งที่สูงประมาณ 1800 HV ดังแสดงในภาพที่ 52 เนื่องมาจากการแพร่ของอะตอมโบรอนเข้าสู่ผิวของชิ้นงานจึงทำให้บริเวณผิวของชิ้นงานที่อะตอมโบรอนแพร่ไปถึงมีค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น และค่าความแข็งจะลดลงไปเรื่อยๆ เมื่อลึกลงไปใต้เนื้อชิ้นงานที่เฉลี่ยประมาณ 450 HV ดังนั้นค่าความแข็งบริเวณผิวชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ในกระบวนการเคลือบผิวด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการให้ไฟฟ้ากระแสตรงทำให้จึงมีความแข็งประมาณใกล้เคียงกัน

จากการเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่อุณหภูมิระหว่าง 850-950^{0}C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่า จลนพลศาสตร์ของกระบวนการทั้งสองสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการการแพร่และสมการอาร์เรเนียส โดยเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิวส่งผลต่อความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์บนชิ้นงานทั้งสองกระบวนการ โดยความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการเคลือบผิวเพิ่มขึ้น เนื่องจากอะตอมโบรอนมีเวลาและพลังงานในการแพร่ซึมมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงานแคโทดมีผลทำให้อัตราการแพร่ของอะตอมโบรอนสูงขึ้น ซึ่งพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอน ดังแสดงในตารางที่ 9 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนจากการเคลือบผิวด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงที่ผ่านการให้ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าสูงกว่าการเคลือบผิวด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงปกติเมื่อ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เปรียบเทียบกระบวนการแพคบอไรดิงที่อุณหภูมิและเวลาเท่ากัน นอกจากนั้นสามารถคำนวณค่าพลังงานกระตุ้นในกระบวนการเคลือบผิวของทั้งสองกระบวนการ โดยที่ค่าพลังงานกระตุ้นของการเคลือบผิวด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงที่ผ่านการให้ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าที่ต่ำกว่าพลังงานกระตุ้นของการเคลือบผิวด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงปกติ ดังแสดงในตารางที่ 9 ซึ่งการที่ค่าพลังงานกระตุ้นของการเคลือบผิวมีค่าที่ต่ำสามารถแสดงถึงการเกิดชั้นเคลือบบอไรด์ได้ง่ายกว่าและได้ชั้นเคลือบบอไรด์ที่หนากว่ากระบวนการที่มีค่าพลังงานกระตุ้นที่สูงกว่า

ดังนั้น การเคลือบผิวด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงที่ผ่านการให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 170 mA/cm^2 สามารถทำให้เกิดความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการเคลือบผิวด้วยกระบวนการแพคบอไรดิงปกติ แสดงให้เห็นว่า ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถช่วยปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพให้กับกระบวนการแพคบอไรดิง และยังสามารถลดเวลาในการเคลือบผิวได้



ภาพที่ 52 การเปรียบเทียบค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงที่ผ่านและไม่ผ่านการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 950^0C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการแพคบอไรดิงที่ผ่านและไม่ผ่านการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว (องศาเซลเซียส)	กระบวนการแพคบอไรดิง		กระบวนการแพคบอไรดิงที่ผ่านการให้ไฟฟ้ากระแสตรง	
	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่, K (ตารางเมตร/วินาที)	ค่าพลังงานกระตุ้น, Q (กิโลจูล/โมล)	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่, K (ตารางเมตร/วินาที)	ค่าพลังงานกระตุ้น, Q (กิโลจูล/โมล)
850	5.04×10^{-14}	186.04	1.73×10^{-13}	111.50
900	1.13×10^{-14}		2.80×10^{-13}	
950	2.57×10^{-14}		4.60×10^{-13}	

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาอิทธิพลของไฟฟ้ากระแสตรงต่อจลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอไรดิงบนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่อุณหภูมิระหว่าง 850-950^{0}C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง โดยให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 170 mA/cm^2 สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. กระบวนการแพคบอไรดิงโดยนำไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาช่วยทำให้ได้ชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์หนากว่ากระบวนการแพคบอไรดิงปกติ เนื่องจากไฟฟ้ากระแสตรงมีผลทำให้เกิดความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นและทำให้อะตอมเคลื่อนที่ไปตามทิศทางของสนามไฟฟ้าจึงเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดอะตอมโบรอนเพิ่มมากขึ้นและมีประสิทธิภาพในการแพร่ได้ดีกว่ากระบวนการบอไรดิงปกติ

2. ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์จะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามหลักการของการแพร่ของอะตอมในสถานะของแข็ง และปริมาณไฟฟ้ากระแสตรงก็มีผลต่อความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ ยิ่งปริมาณไฟฟ้ากระแสตรงมีค่ามากกว่า 120 mA/cm^2 จะทำให้ได้ชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่หนาเพิ่มขึ้น และจะมีความหนามากที่สุดเมื่อไฟฟ้ากระแสตรงมีค่า 170 mA/cm^2

3. ชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงที่ผ่านและไม่ผ่านไฟฟ้ากระแสตรงเป็นชนิดเฟสคู่ ประกอบด้วย FeB และ Fe_2B ซึ่งมีลักษณะเป็นฟันเลื่อยเล็กน้อย แต่ค่อนข้างเรียบ และมีความแข็งที่สูงถึง 1800-2000 HV

4. ค่าพลังงานกระตุ้นของกระบวนแพคบอไรดิงที่ผ่านและไม่ผ่านไฟฟ้ากระแสตรงสามารถคำนวณได้โดยใช้หลักการทางจลนพลศาสตร์และสมการของอาร์เรเนียสมีค่าเท่ากับ 111.50 และ 186.04 kJ/mol ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษา/วิจัยเพิ่มเติมในเรื่องของกระบวนการบอไรดิงแบบต่างๆในเหล็กชนิดเดียวกัน ไม่ว่าจะเป็นกระบวนบอไรดิงแบบอ่างเกลือ กระบวนการแพคบอไรดิง รวมทั้งการนำไฟฟ้ากระแสตรงมาใช้ในกระบวนการบอไรดิงแต่ละวิธี เป็นต้น เพื่อเปรียบเทียบจลนพลศาสตร์ของแต่ละกระบวนการ เป็นการเพิ่มเติมข้อมูล วิเคราะห์ และเปรียบเทียบต่อไป

ในการศึกษากระบวนการบอไรดิงโดยการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาช่วยในกระบวนการนั้น ยังมีตัวแปรต่างๆของไฟฟ้ากระแสตรง ไม่ว่าจะเป็น ชนิดของวัสดุที่เป็นขั้วแอโนด ระยะระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด เป็นต้น ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นเรื่องที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก

นอกจากนี้ในกระบวนการบอไรดิงที่นำไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาช่วย สามารถทำให้อัตราการแพร่ซึมของอะตอมโบรอนมีค่าสูงขึ้นได้นั้น สามารถลดพลังงานในการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงได้อีกถ้าหากใช้วิธีแบบพัลส์ (Pulse D.C.) เป็นการให้ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นจังหวะและเป็นวิธีที่ไม่สิ้นเปลืองพลังงาน ซึ่งสามารถลดต้นทุนในกระบวนการเคลือบผิวได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

มนัส สถิรจินดา. 2542. **เหล็กกล้า.** โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

มนัส สถิรจินดา. 2543. **วิศวกรรมการอบชุบ.** โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

รัสรินทร์ ธีระชวาลเกียรติ. 2552. **จลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอไรดิงบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 AISI 420 และ AISI 440C**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ลักษมี อังกุรรัชต์. 2550. **อิทธิพลของการแปรรูปที่ผิวโดยกระบวนการทางกลต่อความหนาชั้นเคลือบของกระบวนการคาร์บูไรซิง**. ปริญญานิพนธ์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สยาม แก้วคำไสย์. 2554. **เหล็กกล้าไร้สนิม (ตอนที่ 17) เหล็กกล้าไร้สนิมเกรดซุปเปอร์มาร์เทนซิติก (Supermartensitic stainless steel).** แหล่งที่มา:http:// siamkaewkumsai.blogspot.com /2011/03/16-supermartensitic-stainless-steel.html, 5 ตุลาคม 2554

Arai, T. and S. Harper. 1994. Thremoreactive Deposition/Diffusion Process. **ASM Handbook** 4: 448-453.

Callister, William D. Jr. 2000. **Materials science and Engineering an Introduction**. John Wiley & Sons, Inc, New York.

Celikkan, H., M. K. Öztürk, H. Aydin and M. L. Aksu. 2007. Boriding titanium alloys temperatures using electrochemical methodes. **Thin solid film** 515: 5348-5352.

Chandler, H. 1995. Heat treater's guide: practices and procedures for irons and steels. **ASM International** 2: 27 - 810.

Davis, J.R. 2002. Boriding. **Surface Hardening of steels** 10: 213 – 229

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

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.

Kartal, G., O.L. Eryilmaz, G. Krumdickb, A. Erdmir and S. Timur. 2010. Electrochemical boriding of titanium for improved mechanical properties. **Surface & Coating Technology** 204: 3935-3939

Kartal, G., O.L. Eryilmaz, G. Krumdickb, A. Erdmir and S. Timur. 2011. Kinetics of electrochemical boriding of low carbon steel. **Applied Surface Science**

Ozbek, I., S. Sen, M. Ipek, C. Bindal, S. Zeytin and A.H. Ucisik. 2004. A mechanical aspect of borides formed on the AISI 440C stainless-steel. **Vacuum** 73: 643-648.

Ozdemir, O.,M.A. Omar, M. Usta, S. Zeytin. C. Bindal and A.H. Ucisik. 2009. An investigation on boriding kinetics of AISI 316 stainless steel. **Vacuum** 83: 175-179.

Patiphan J., 2007. Fatigue Performance Enhancement of Steel using Mechanical Surface Treatment. **Journal of Metals, Materials and Minerals** 17: 59-65.

Saduman, S., S. Ugur and B. Cuma. 2005. An approach to kinetic study of borided steels. **Surface & Coatings Technology** 191: 274 – 285.

Shen, L., L. Wang, Y. Wang and C. Wang. 2010. Plasma nitriding of AISI 304 austenitic stainless steel with pre-shot peening. **Surface & Coating Technology** 204: 3222-3227

Sinha, A.K. and P.D. Bohn. 1994. Boriding (Boronizing). **ASM Handbook** 4: 437 - 447.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Sista, V., O. Kahvecioglu, O.L. Eryilmaz, A. Erdemir and S. Timur. 2011. Electrochemical boriding and characterization of AISI D2 tool steel. **Thin Solid Film**

Vipin J. and G. Sundararajan. 2002. Influence of the pack thickness of the boronizing mixture on the boriding of steel. **Surface & Coating Technology** 149: 21-26.

Xiang Z.D. and P.K. Datta. 2006**.** Shot Peening Effect on Aluminide Diffusion Coating Formationon Alloy Steel at Low Temperatures. **Scripta Materialia** 55: 1151-1154**.**

Xie, F., Q. Zhu and J. Lu. 2006. Effect of direct current field on Powder-pack boriding**. Solid State Phenomena** 118: 167-171.

Xie, F., J.Hu,Z.H. Zhu, H.B. Hu, J.H. Li and J.W. Pan. 2011. Effect of direct current field on powder pack aluminizing**. Surface Engineering** 27: 134-138

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

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

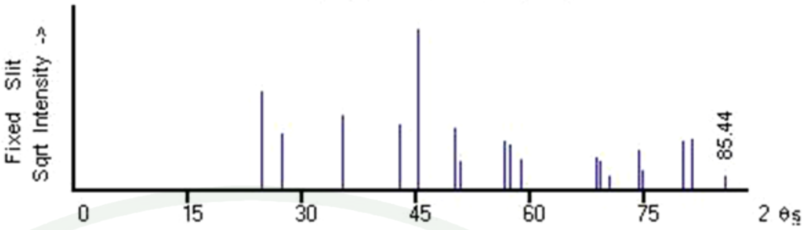
ภาคผนวก ก

วิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X - ray diffraction, XRD)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

72-1301 Quality: C
CAS Number:
Molecular Weight: 122.50
Volume[CD]: 108.89
Dx: 7.472 Dm: 7.240
S.G.: I$\bar{4}$2m (121)
Cell Parameters:
a 5.078 b c 4.223
α β γ
I/Icor: 5.56
Rad: CuKa1
Lambda: 1.54060
Filter:
d-sp: calculated
ICSD # : 016809

Fe2 B
Iron Boride
Ref: Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997)
Ref: Wever, F., Mueller, A., Z. Anorg. Allg. Chem., 192, 317 (1930)

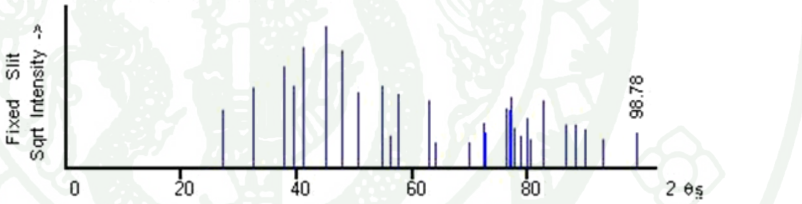


2θ	Int-f	h	k	l	2θ	Int-f	h	k	l	2θ	Int-f
24.776	369	1	1	0	56.651	91	2	0	2	74.713	13
27.447	119	1	0	1	57.331	77	3	1	0	80.118	92
35.322	211	2	0	0	58.717	35	3	0	1	80.118	92
42.792	166	0	0	2	68.553	41	2	2	2	81.310	97
45.304	999	2	1	1	69.201	30	1	0	3	85.436	8
50.075	143	1	1	2	70.417	8	3	2	1		
50.815	31	2	2	0	74.121	60	3	1	2		

ภาพผนวกที่ ก1 ข้อมูล Diffractrogram ของ Fe_2B

32-0463 Quality: *
CAS Number: 12006-84-7
Molecular Weight: 66.66
Volume[CD]: 65.83
Dx: 6.725 Dm:
S.G.: Pbnm (62)
Cell Parameters:
a 4.058 b 5.503 c 2.947
α β γ
SS/FOM: F29=87(.0085, 39)
I/Icor:
Rad: CuKa1
Lambda: 1.540598
Filter:
d-sp:

Fe B
Boron Iron
Ref: Natl. Bur. Stand. (U.S.) Monogr. 25, 18, 35 (1981)



2θ	Int-f	h	k	l	2θ	Int-f	h	k	l	2θ	Int-f	h	k	l
27.258	16	1	1	0	50.620	28	1	2	1	72.481	10	1	4	0
32.509	32	0	2	0	54.879	33	1	3	0	72.720	6	0	2	2
37.702	50	1	0	1	56.272	5	2	2	0	76.329	17	0	4	1
39.550	33	1	2	0	57.578	27	2	1	1	77.000	16	1	2	2
41.211	72	1	1	1	63.032	22	0	0	2	77.148	25	2	3	1
45.030	100	0	2	1	63.971	3	1	3	1	77.572	8	3	0	1
47.720	67	2	1	0	69.969	3	1	1	2	78.760	5	3	2	0

ภาพผนวกที่ ก2 ข้อมูล Diffractrogram ของ FeB

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ข

ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข1 ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิง ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

อุณหภูมิการเคลือบผิว (องศาเซลเซียส)	เวลาการเคลือบผิว (ชั่วโมง)	ความหนาของชั้นเคลือบ (ไมโครเมตร)										ความหนาของชั้นเคลือบเฉลี่ย (ไมโครเมตร)
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	
850	2	17.62	17.62	16.67	17.62	17.62	15.71	17.14	20.95	19.05	19.05	17.90
	4	30.48	31.90	31.90	30.00	30.48	30.95	30.48	30.48	30.43	30.48	30.86
	6	30.00	31.90	32.38	30.95	31.90	29.52	30.95	32.38	34.29	31.90	31.62
900	2	28.10	25.71	26.19	27.62	27.62	25.24	26.19	27.14	26.19	25.72	26.57
	4	44.29	44.76	42.38	41.90	44.76	43.81	44.26	43.53	42.86	45.26	43.78
	6	45.71	45.71	48.57	50.95	43.33	48.10	49.05	49.05	50.48	50.48	48.14
950	2	46.19	45.24	42.38	45.71	43.81	44.76	45.24	42.86	46.67	45.71	44.86
	4	57.14	57.14	54.29	53.33	53.33	60.00	55.24	53.81	58.57	55.24	55.81
	6	75.24	76.67	75.71	75.71	80.00	76.67	72.38	77.62	76.67	75.71	76.24

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข2 ความหนาของชั้น FeB บนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิง ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

อุณหภูมิการเคลือบผิว (องศาเซลเซียส)	เวลาการเคลือบผิว (ชั่วโมง)	ความหนาของชั้นเคลือบ (ไมโครเมตร)										ความหนาของชั้นเคลือบเฉลี่ย (ไมโครเมตร)
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	
850	2	8.57	9.05	6.19	6.67	7.62	6.67	7.14	5.71	6.67	5.71	7.00
	4	18.10	18.57	20.00	16.67	14.29	17.14	17.61	17.10	17.32	17.00	17.38
	6	17.14	14.29	10.95	12.38	14.29	14.29	15.24	16.67	11.90	12.86	14.00
900	2	10.48	7.62	9.52	10.48	9.05	11.90	10.95	7.62	8.57	8.57	9.48
	4	21.42	23.33	20.48	19.05	20.00	21.43	19.52	18.10	21.43	22.25	20.70
	6	20.95	23.81	23.33	22.38	18.10	19.52	20.00	19.50	23.81	20.00	21.14
950	2	18.10	16.19	18.57	17.14	18.10	15.24	15.24	18.10	14.76	14.29	16.57
	4	9.52	11.43	10.95	12.86	9.05	8.10	11.90	11.90	8.57	9.06	10.33
	6	16.19	24.76	22.86	18.57	17.62	19.05	20.00	28.10	23.80	23.78	21.47

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข3 ความหนาของชั้น Fe_2B บนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิง ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

อุณหภูมิการเคลือบผิว (องศาเซลเซียส)	เวลาการเคลือบผิว (ชั่วโมง)	ความหนาของชั้นเคลือบ (ไมโครเมตร)										ความหนาของชั้นเคลือบเฉลี่ย (ไมโครเมตร)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
850	2	9.05	8.57	10.48	10.95	10.00	10.48	8.55	15.24	12.38	13.33	10.90
	4	12.38	13.33	11.90	13.33	16.19	13.81	12.86	13.33	14.29	13.33	13.48
	6	12.86	17.62	21.43	18.57	17.62	15.24	15.71	15.71	22.38	19.05	17.62
900	2	17.62	18.10	16.67	17.14	18.57	13.33	15.24	19.52	17.62	17.12	17.09
	4	22.38	19.05	21.90	23.81	24.76	23.74	22.32	25.24	23.33	24.29	23.08
	6	24.76	21.90	25.24	28.57	25.24	28.57	29.05	29.52	26.67	30.48	27.00
950	2	28.10	29.05	23.81	28.57	25.71	29.52	30.00	24.76	31.90	31.43	28.29
	4	47.62	45.71	43.33	40.48	44.29	51.90	43.33	41.90	50.00	46.18	45.48
	6	59.05	51.90	52.86	57.14	62.38	57.62	52.38	49.52	52.86	51.90	54.76

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข4 ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรง ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

อุณหภูมิการเคลือบผิว (องศาเซลเซียส)	เวลาการเคลือบผิว (ชั่วโมง)	ความหนาของชั้นเคลือบ (ไมโครเมตร)										ความหนาของชั้นเคลือบเฉลี่ย (ไมโครเมตร)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
850	2	32.86	33.33	33.81	37.14	35.24	34.76	37.62	35.24	36.67	36.67	35.33
	4	51.43	52.86	53.81	53.81	52.86	52.38	51.90	49.52	52.86	53.81	52.52
	6	59.52	60.00	59.05	62.38	61.43	60.48	59.52	62.86	59.05	60.00	60.43
900	2	39.05	39.52	38.57	40.00	40.48	38.10	40.95	38.57	40.00	40.48	39.57
	4	69.05	70.00	69.05	71.43	67.62	68.57	72.86	74.76	70.48	69.52	70.33
	6	66.67	75.24	76.67	77.62	75.71	76.20	74.29	75.71	72.86	75.71	74.67
950	2	55.82	58.75	59.05	56.67	57.46	58.84	56.67	58.15	57.10	56.35	57.49
	4	76.67	80.95	79.05	80.48	82.38	80.00	73.33	78.57	81.90	72.38	78.57
	6	103.81	101.43	95.24	105.71	100.00	102.38	97.62	102.86	92.38	102.86	100.43

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข5 ความหนาของชั้น FeB บนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

อุณหภูมิการเคลือบผิว (องศาเซลเซียส)	เวลาการเคลือบผิว (ชั่วโมง)	ความหนาของชั้นเคลือบ (ไมโครเมตร)										ความหนาของชั้นเคลือบเฉลี่ย (ไมโครเมตร)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
850	2	14.76	17.62	19.52	16.19	18.57	20.48	19.52	19.05	18.10	17.62	18.14
	4	29.52	32.86	23.81	25.71	29.05	27.14	26.19	21.43	24.76	25.24	26.57
	6	34.29	33.81	34.29	33.33	32.38	38.57	37.62	33.81	32.38	32.86	34.33
900	2	24.76	20.00	25.24	26.19	25.24	19.52	20.95	25.71	22.86	22.38	23.29
	4	35.24	33.81	33.81	35.71	34.29	29.52	36.67	31.43	34.76	36.67	34.19
	6	37.14	33.81	38.10	38.10	34.29	36.67	34.76	30.00	40.00	39.05	36.19
950	2	23.35	22.86	20.95	22.57	19.86	19.67	21.86	22.46	21.85	21.33	21.68
	4	39.52	31.43	33.33	33.33	36.67	37.14	42.38	42.38	41.90	33.33	37.14
	6	26.19	36.67	31.43	27.62	28.57	30.00	34.76	37.62	26.67	28.57	30.81

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข6 ความหนาของชั้น Fe_2B บนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

อุณหภูมิการเคลือบผิว (องศาเซลเซียส)	เวลาการเคลือบผิว (ชั่วโมง)	ความหนาของชั้นเคลือบ (ไมโครเมตร)										ความหนาของชั้นเคลือบเฉลี่ย (ไมโครเมตร)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
850	2	18.10	15.71	14.29	20.95	16.67	14.29	18.10	16.19	18.57	19.05	17.19
	4	21.90	20.00	30.00	28.10	23.81	25.24	25.71	28.10	28.10	28.57	25.95
	6	25.24	26.20	24.76	29.05	29.05	21.90	21.90	29.05	26.67	27.14	26.10
900	2	14.29	19.52	13.33	13.81	15.24	18.57	20.00	12.86	17.14	18.10	16.28
	4	33.81	35.24	36.19	35.71	33.33	39.05	36.20	38.10	35.71	38.10	36.14
	6	29.52	37.14	38.57	43.81	41.43	40.95	39.52	44.28	35.71	33.83	38.48
950	2	34.76	41.05	32.58	39.15	36.52	32.67	35.81	36.67	36.45	32.47	35.81
	4	37.14	49.52	45.71	45.71	42.86	30.95	36.19	40.00	39.05	47.14	41.43
	6	77.62	64.76	63.80	78.10	71.43	72.38	62.86	65.24	65.71	74.29	69.62

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข7 ความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ของชิ้นงานแคโทดและชิ้นงานแอโนดกับปริมาณกระแสไฟที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ขั้วไฟฟ้า	ปริมาณของไฟฟ้ากระแสตรง (mA/cm^2)	ความหนาของชั้นเคลือบ (ไมโครเมตร)										ความหนาของชั้นเคลือบเฉลี่ย (ไมโครเมตร)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
แคโทด	0	44.29	44.76	42.38	41.90	44.76	43.81	44.26	43.53	42.86	45.26	43.78
	60	42.38	43.65	41.90	46.67	43.81	44.12	40.00	43.33	44.06	42.21	43.21
	120	50.00	50.00	49.52	51.90	49.05	50.95	50.00	49.52	48.10	50.95	50.00
	170	69.05	70.00	69.05	71.43	67.62	68.57	72.86	74.76	70.48	69.52	70.33
แอโนด	0	44.29	44.76	42.38	41.90	44.76	43.81	44.26	43.53	42.86	45.26	43.78
	60	37.14	38.10	34.29	38.10	40.48	39.05	37.62	32.86	38.57	34.76	37.10
	120	43.81	41.90	44.29	43.33	43.81	44.29	44.76	44.29	45.23	41.43	43.71
	170	51.90	54.76	57.15	50.95	51.90	57.14	51.43	52.86	54.29	50.48	53.29

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ค

ปริมาณกระแสไฟฟ้าต่ออุณหภูมิจริง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค1 อุณหภูมิจริงของชิ้นงานแคโทดกับปริมาณกระแสไฟของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 900^{0}C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ปริมาณของไฟฟ้ากระแสตรง (mA/cm^2)	อุณหภูมิจริง (องศาเซลเซียส)
0	900.0
60	905.0
120	907.5
170	930.0

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ง

ความแข็งของชั้นเคลือบบอไรด์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ง1 ค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420

ลำดับ	ความแข็ง (0.05HV)	ลำดับ	ความแข็ง (0.05HV)
1	303.0	16	309.2
2	309.2	17	309.9
3	310.4	18	310.1
4	313.3	19	310.6
5	313.0	20	306.9
6	311.7	21	313.9
7	306.0	22	308.1
8	313.5	23	309.1
9	310.0	24	308.2
10	308.2	25	310.1
11	301.7	26	312.3
12	310.4	27	313.5
13	310.8	28	306.8
14	313.9	29	312.2
15	313.5	30	311.9
		ค่าเฉลี่ย	310.0

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ง2 ค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ่ง ณ อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็ก

ระยะห่างจากผิว (ไมโครเมตร)	ความแข็ง (HV 0.05)
21.90	1864.0
47.62	350.0
98.57	422.6
131.43	422.2
180.00	430.0
217.14	427.4
265.24	429.8
299.52	422.6
349.05	426.4
379.52	430.9
436.19	433.9
471.90	424.4
526.67	435.0
564.76	432.0
617.14	428.7

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ง3 ค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิง ณ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็ก

ระยะห่างจากผิว (ไมโครเมตร)	ความแข็ง (HV 0.05)
19.52	1627.0
72.38	381.0
114.76	445.2
156.19	434.8
176.67	430.0
222.86	433.3
258.57	439.3
303.81	433.5
344.76	432.2
385.71	434.2
408.10	421.9
459.05	430.2
474.76	434.2
529.52	438.3
552.38	439.3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ง4 ค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิง ณ อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็ก

ระยะห่างจากผิว (ไมโครเมตร)	ความแข็ง (HV 0.05)
15.71	1946.0
44.76	1825.0
109.05	454.4
140.95	457.6
196.19	463.5
234.29	458.2
286.67	463.7
321.43	460.6
370.00	463.1
407.62	461.6
461.43	454.6
499.53	464.3
555.24	463.5
596.67	455.8
641.91	463.3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ง5 ค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยไฟฟ้ากระแสตรง ณ อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็ก

ระยะห่างจากผิว (ไมโครเมตร)	ความแข็ง (HV 0.05)
20.95	1939.0
40.95	1801.0
108.57	426.0
142.38	422.6
192.38	433.1
235.71	426.1
281.43	429.8
317.62	424.2
365.24	426.2
400.00	428.5
445.71	431.8
483.33	429.4
541.43	428.3
580.00	428.9
631.43	425.1

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ง6 ค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยไฟฟ้ากระแสตรง ณ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็ก

ระยะห่างจากผิว (ไมโครเมตร)	ความแข็ง (HV 0.05)
36.19	1776.0
50.95	1826.0
98.57	402.1
130.00	429.3
170.95	441.4
197.14	440.6
251.43	432.4
282.38	443.3
331.90	438.5
355.24	435.3
416.19	431.3
447.14	435.5
493.33	433.9
506.67	432.4
575.24	432.7

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ง7 ค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงด้วยไฟฟ้ากระแสตรง ณ อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากผิวเข้าไปในเนื้อเหล็ก

ระยะห่างจากผิว (ไมโครเมตร)	ความแข็ง (HV 0.05)
20.95	1956.0
54.76	1806.0
144.29	490.0
177.62	459.6
230.95	456.6
272.86	465.1
320.00	455.2
357.14	461.2
405.24	462.3
436.19	463.7
489.52	469.1
526.67	468.9
580.95	469.5
623.33	463.5
672.8571	467.4

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาวลักษมี อังกุรรัชต์
เกิดวันที่	26 กุมภาพันธ์ 2529
สถานที่เกิด	อำเภอเมืองนครปฐม จังหวัดนครปฐม
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมวัสดุ) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	งานวิจัยเรื่องอิทธิพลของไฟฟ้ากระแสตรงต่อจลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอไรดิงบนเหล็กกล้าไร้สนิม มาร์เทนซิติก AISI 420
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนวิจัยระดับบัณฑิตวิทยาลัย เพื่อการตีพิมพ์ผลงานในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ (พ.ศ. 2552)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์