ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)
ปริญญา

วิศวกรรมวัสดุ วิศวกรรมวัสดุ
สาขา **ภาควิชา**

เรื่อง อิทธิพลของระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดของการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คโดยให้ไฟฟ้ากระแสตรง

The Influence of Distance between Electrode on Surface Coating Cold Work Tool Steel AISI D2 using Packed Boriding Process with Applied Direct current

นามผู้วิจัย นายยศพงศ์ บุญปลูก

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....

(อาจารย์ปฏิภาณ จุ้ยเจิม, Dr.-Ing.)

หัวหน้าภาควิชา ....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิศิษฏ์ โล้เจริญรัตน์, M.S.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

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

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

อิทธิพลของระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดของการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คโดยให้ไฟฟ้ากระแสตรง

The Influence of Distance between Electrode on Surface Coating Cold Work Tool Steel AISI D2 using Packed Boriding Process with Applied Direct current

โดย

นายยศพงศ์ บุญปลูก

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)
พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)

ปริญญา

วิศวกรรมวัสดุ	วิศวกรรมวัสดุ
สาขา	**ภาควิชา**

เรื่อง อิทธิพลของระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดของการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คโดยให้ไฟฟ้ากระแสตรง

The Influence of Distance between Electrode on Surface Coating Cold Work Tool Steel AISI D2 using Packed Boriding Process with Applied Direct current

นามผู้วิจัย นายยศพงศ์ บุญปลูก

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....

(อาจารย์ปฏิภาณ จุ้ยเจิม, Dr.-Ing.)

หัวหน้าภาควิชา ....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิศิษฏ์ โล้เจริญรัตน์, M.S.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

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

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ยศพงศ์ บุญปลูก 2556: อิทธิพลของระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดของการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คโดยให้ไฟฟ้ากระแสตรง ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ) สาขาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ปฏิภาณ จุ้ยเจิม, Dr.-Ing. 98 หน้า

ในปัจจุบันมีการใช้เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 เป็นวัสดุเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการขึ้นรูปโลหะ ซึ่งอาจเกิดการชำรุดเสียหาย ดังนั้นจึงต้องมีปรับปรุงพื้นผิวชิ้นงานก่อนนำไปใช้งานเพื่อเพิ่มอายุการใช้งาน กระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คเป็นกระบวนการที่สามารถปรับปรุงพื้นผิวของชิ้นงานสามารถสร้างชั้นเคลือบบอไรด์ที่มีความแข็งสูงขึ้น อย่างไรก็ตามกระบวนการบอไรดิงต้องใช้เวลาและอุณหภูมิในการเคลือบผิวที่สูงเพื่อให้ได้ชั้นเคลือบที่หนาขึ้นตามทฤษฎีการแพร่ การใช้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาร่วมกับกระบวนการบอไรดิง เป็นทางเลือกที่สามารถช่วยเร่งการแพร่ของอะตอมโบรอน ที่มีส่วนช่วยให้มีความหนาของชั้นบอไรด์เพิ่มขึ้นได้ แต่ในอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการผลิตที่มีรูปร่างของชิ้นงานที่ซับซ้อน ส่งผลให้กระบวนการเคลือบผิวในอุตสาหกรรม อาจทำให้ต้องมีการมีการวางขั้วอิเล็กโทรดที่ระยะต่างกันออกไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาการเคลือบผิวบนเหล็กกล้าเครื่องมือทางานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คโดยให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง และระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่ 15 30 และ 45 มิลลิเมตร จากนั้นทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ความหนาชั้นเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและวัดความแข็งด้วยเครื่องไมโครวิกเกอร์ จากการทดลองพบว่า ชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้น เป็นชนิดเฟสคู่ FeB และ Fe_2B และได้ค่าความแข็งที่ผิวอยู่ที่ประมาณ 1600 HV และพบว่ากระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คด้วยไฟฟ้ากระแสตรงสามารถเกิดชั้นเคลือบบอไรด์ที่มีความหนามากกว่าชั้นเคลือบธรรมดา และ ระยะห่างระหว่างขั้วยังมีอิทธิพลต่อความหนาของชั้นเคลือบ โดย ระยะห่างระหว่างขั้วที่ 15 มิลลิเมตรเป็นระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่ดีที่สุดในกระบวนการเคลือบผิว อย่างไรก็ตามพบว่า ระยะห่างระหว่างขั้วที่ 30 มิลลิเมตร ก็ยังให้ความหนาของชั้นเคลือบที่ดีกว่ากระบวนการเคลือบผิวแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง และที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 45 มิลลิเมตร เป็นระยะห่างที่ไฟฟ้ากระแสตรงจะมีผลต่อความหนาเพียงเล็กน้อย

____________________ ____________________________________ ___ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Yossapong Boonplook 2013: The Influence of Distance between Electrode of Surface Coating on Cold Work Tool Steel AISI D2 using Packed Boriding Process with Applied Direct current. Master of Engineering (Materials Engineering), Major Field: Materials Engineering, Department of Materials Engineering. Thesis Advisor: Mr.Patiphan juijerm, Dr.-Ing. 98 pages.

Recently, a cold work tool steel AISI D2 is used normally for metal forming process which surface damage is found frequently. Thus, surface treatments to improve a tool life are performed generally on tool steels before an operating process. A packed boriding process is one of the most well-known thermochemical surface treatments which possess a very high hardness layer at the surface. However, the boriding process has to operate at a high temperature with a prolonged soaking time to create a greater thickness taking into account the diffusion theory. An applied direct current field is a possible method to enhance diffusion rate of boron atom.But the complex model of work piece. Samples were arranged in different positions in a sealed pack boriding container When distance between electrode are more far that can be improve the boriding process. For this reason, in this research, effects of distance between electrode during boring process was investigated on the cold work tool steel AISI D2 by the applied current density in the range of 80 mA/cm^2 at a temperature of 850 900 and 950 ^{o}C with boriding time of 2 4 and 6 hr and distance between electrode 15 30 and 45 mm. Afterwards, microstructure and hardness values were investigated using optical microscope and micro-vicker harness tester, respectively. It was found that a double phase FeB and Fe_2B was detected on the boride layer. The near surface hardness value of about 1600 HV was measured the distance between electrode 15 mm a greatest thickness of boride layer. However distance between electrode 30 is obtained greater thickness than distance between electrode 45 mm.

__________________ ____________________________ ___ / ___ / ___

Student’s signature Thesis Advisor’s signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อ.ดร.ปฏิภาณ จุ้ยเจิม ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่วเสร็จสมบูรณ์และสนับสนุนผู้วิจัยทุกๆด้านด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และบุคลากรของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอน มอบความรู้อันมีค่ายิ่งในการเรียน การทำงาน การดำเนินชีวิต และสนับสนุนการดำเนินโครงงานวิจัยนี้ ด้วยดีตลอดมา รวมถึงพี่น้องภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและผู้เกี่ยวข้องทุกท่านซึ่งมิอาจเอ่ยนามได้อย่างครบถ้วน

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ คอยอบรม ให้โอกาสทางการศึกษา ให้กำลังใจ รวมถึงพี่ๆทุกคนที่ให้ความเอาใจใส่และห่วงใยผู้วิจัยเสมอมา ซึ่งนำมาสู่ความสำเร็จในวันนี้

ยศพงศ์ บุญปลูก

มกราคม 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(13)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	20
อุปกรณ์	20
วิธีการ	22
ผลและวิจารณ์	25
ผล	25
วิจารณ์	43
สรุปและข้อเสนอแนะ	72
สรุป	72
ข้อเสนอแนะ	74
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	75
ภาคผนวก	77
ภาคผนวก ก เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างชั้นเคลือบระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด	78
ภาคผนวก ข ความหนาของชั้นเคลือบที่วัดในแต่ละครั้งและจำนวนครั้ง	90
ภาคผนวก ค รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกส์	95
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	98

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

ตารางที่		หน้า
1	องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2	5
2	วิธีปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ที่สามารถทำได้	5
3	การปรับปรุงสมบัติของพื้นผิวด้วยกระบวนการบอไรดิงในวัสดุชนิดต่างๆ	6
4	แสดงสมบัติทั่วไปของเหล็กบอไรด์ FeB และ Fe_2B	10
5	แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์และชั้นเคลือบอื่นๆ	11
6	ธาตุผสมของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงาน AISI D2 (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	20
7	ส่วนผสมของกรดไนตริกที่ใช้ในการวิจัย	20
8	ความหนาของชั้นเคลือบด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คที่ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง	31
9	ความหนาของชั้นเคลือบด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คที่ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ที่มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร	39
10	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการบอไรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดลอง	53
11	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการบอไรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 มิลลิเมตร	57
12	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการบอไรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 30 มิลลิเมตร	60
13	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการบอไรดิงแบบให้กระแสอุณหภูมิต่างๆ ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 45 มิลลิเมตร	64
14	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนที่อุณหภูมิต่างๆ และค่าพลังงานกระตุ้นในกระบวนการบอไรดิงที่ทำการทดลองของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2	68
15	ความหนาของชั้นเคลือบของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน AISI H13 ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คที่ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง	70

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

16 ความหนาของชั้นเคลือบของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน AISI H13 ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คที่ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ที่มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร 70

17 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนที่อุณหภูมิต่างๆ และค่าพลังงานกระตุ้นในกระบวนการบอไรดิงที่ทำการทดลองของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน AISI H13 71

ตารางผนวกที่

ข1 ความหหนาขอชั้นเคลือบบอไรด์ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่อุณหภูมิ 850 900 และ 950°C ที่ระยะเวลา 2 4 6 ชั่วโมง 91

ข2 ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่อุณหภูมิ 850 °C ที่ระยะเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ที่มีความหนาแน่น กระแส 80 mA/cm^2 และระยะห่างระหว่างขั้ว 15 30 และ 45 มิลลิเมตร 92

ข3 ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่อุณหภูมิ 900 °C ที่ระยะเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ที่มีความหนาแน่น กระแส 80 mA/cm^2 และ ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 30 และ 45 มิลลิเมตร 93

ข4 ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่อุณหภูมิ 950 °C ที่ระยะเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ที่มีความหนาแน่น กระแส 80 mA/cm^2 และ ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 30 และ 45 มิลลิเมตร 94

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงลักษณะโครงสร้างของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ในโลหะเนื้อพื้นที่มีธาตุอัลลอยด์ต่างๆ	9
2	ภาพแสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่สัมประสิทธิ์การแพร่ กับ อุณหภูมิ ของชั้นเคลือบบอไรด์ AISI 5140 ที่มีค่าพลังงานกระตุ้น ที่มีค่าพลังงานกระตุ้นในกระบวนการเคลือบผิวมีค่าเท่ากับ 223 kJ/mol	13
3	ภาพแสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่สัมประสิทธิ์การแพร่ กับ อุณหภูมิ ของชั้นเคลือบบอไรด์ AISI 4340 ที่มีค่าพลังงานกระตุ้นในกระบวนการเคลือบผิวมีค่าเท่ากับ 234 kJ/mol	14
4	ภาพแสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่สัมประสิทธิ์การแพร่ กับ อุณหภูมิ ของชั้นเคลือบบอไรด์ AISI D2 ที่มีค่าพลังงานกระตุ้นในกระบวนการเคลือบผิว มีค่าเท่ากับ170 kJ/mol	15
5	ภาพแสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่สัมประสิทธิ์การแพร่ กับ อุณหภูมิ ของชั้นเคลือบบอไรด์ AISI D2 ที่มีค่าพลังงานกระตุ้นในกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงแบบเชิงไฟฟ้าเคมีมีค่าเท่ากับ 137.86 kJ/mol	16
6	ภาพเอกลักษณ์เฉพาะลักษณะของชั้นเคลือบที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงด้วยการวิเคราะห์ XRD ชั้นเคลือบผิวบอไรดิงของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 เป็นเวลา 60 นาที	17
7	ความหนาของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิง ที่ติดกับขั้วไฟฟ้าและที่อยู่ระหว่างที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 4 แอมแปร์ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	18
8	ภาพจำลองการกระจายตัวของอะตอมโบรอน และการเคลื่อนตัวของอะตอมโบรอนในกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงด้วยไฟฟ้ากระแสตรง 1) เส้นสนามไฟฟ้า 2) อะตอมโบรอนที่แตกตัว 3) ขั้วแคโทด 4) ทิศทางการเคลื่อนตัวของอะตอมโบรอนบริเวณรอบชิ้นงาน 5)ชิ้นงานที่ตำแหน่งระหว่างขั้วอิเล็กโทรด	19

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
9	จำลองการบรรจุผงบอไรด์ ตำแหน่งการวางชิ้นงาน การติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าและอุปกรณ์การวัดอุณหภูมิที่ใช้ในงานวิจัย 1.) ชิ้นงานแคโทด ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 45 มิลลิเมตร 2.) ชิ้นงานแคโทดที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 30 มิลลิเมตร; 3.)ชิ้นงานแคโทดที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 มิลลิเมตร 4.)ชิ้นงานอ้างอิง 5 6 7.)ชิ้นงานขั้วแอโนด 8.) อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ 9.) อุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า 10.) เทอโมคัปเปิล ;11.) กล่องบรรจุ 12.) Ekabor-I	23
10	แผนการดำเนินงานวิจัย	24
11	แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คแบบไม่ใช้กระแสไฟฟ้าที่สภาวะอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง	26
12	แสดงความสัมพันธ์ของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ที่ผ่านกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงแบบแพ็ค แบบไม่ใช้กระแสไฟฟ้าที่สภาวะอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง	27
13	แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็ค แบบไม่ใช้กระแสไฟฟ้าที่สภาวะอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง	28
14	แสดงความสัมพันธ์ของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ที่ผ่านกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงแบบแพ็ค แบบไม่ใช้กระแสไฟฟ้าที่สภาวะอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง	29
15	แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็ค แบบไม่ใช้กระแสไฟฟ้าที่สภาวะอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง	30
16	แสดงความสัมพันธ์ของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ที่ผ่านกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงแบบแพ็ค แบบไม่ใช้กระแสไฟฟ้าที่สภาวะอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง	31

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ | หน้า

17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบหลังผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็ค ที่สภาวะอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 30 60 และ 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร ที่ระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร : 32

18 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็ค ที่มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร ที่สาภาวะอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลาตั้งแต่ 2 4 และ 6 ชั่วโมง โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วตั้งแต่ 15 30และ 45 มิลลิเมตร 33

19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบหลังผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็ค ที่สภาวะอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลาตั้งแต่ 2 4 และ 6 ชั่วโมง แพ็คที่มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร ที่ระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร . 34

20 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็ค แพ็ค ที่มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร ที่สาภาวะอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลาตั้งแต่ 2 4 และ 6 ชั่วโมง โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วตั้งแต่ 15 30 และ 45 มิลลิเมตร 35

21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบหลังผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็ค ที่สภาวะอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลาตั้งแต่ 2 4 และ 6 ชั่วโมง แพ็คที่มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร ที่ระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร 36

22 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็ค แพ็ค ที่มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร ที่สาภาวะอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลาตั้งแต่ 2 4 และ 6 ชั่วโมง โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วตั้งแต่ 15 30 และ 45 มิลลิเมตร 37

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
23	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบหลังผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็ค ที่สภาวะอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลาตั้งแต่ 2 4 และ 6 ชั่วโมง ที่มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร ที่ระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร	38
24	ค่าความแข็งที่ตำแหน่งต่าง ๆ จากผิวลึกเข้าไปในโลหะเนื้อพื้นของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 มิลลิเมตร	40
25	ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบด้วยการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกส์ ของการเคลือบผิวแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่อุณหภูมิ 900 ^{o}C เวลา 4 ชั่วโมง	41
26	ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบด้วยการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกส์ ของการเคลือบผิว ที่ชิ้นงานขั้วแคโทด ที่มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 900 ^{o}C เวลา 4 ชั่วโมง	42
27	ภาพโครงสร้างจุลภาคของ เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็ค ที่มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส	43
28	ภาพโครงสร้างจุลภาคของ เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คโดยไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง	45
29	แผนภาพการเกิดเฟสของเหล็กกับโบรอน (Fe-B Phase diagram) (ก) Fe_2B และ (ข) FeB	47
30	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสองของความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์และเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบที่ไม่ให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส และที่เวลาตั้งแต่ 2 4 และ 6 ชั่วโมง	52
31	ความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (ln K) และส่วนกลับของอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว (1/T) ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า	54

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

32 การคำนวณความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์แบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงเปรียบเทียบกับความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์จากการทดลองจริงในช่วงอุณหภูมิและเวลาที่ทำการทดลอง 55
33 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสองของความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์และเวลาที่ใช้ในการเคลือบโลหะเนื้อพื้นด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 มิลลิเมตร 56
34 ความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (ln K) และส่วนกลับของอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว (1/T) ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 มิลลิเมตร 58
35 การคำนวณความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์จากกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 มิลลิเมตรเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงในช่วงอุณหภูมิและเวลาต่างที่ทำการทดลอง 59
36 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสองของความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์และเวลาที่ใช้ในการเคลือบโลหะเนื้อพื้นด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 30 มิลลิเมตร 60
37 ความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (ln K) และส่วนกลับของอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว (1/T) ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 30 มิลลิเมตร 61
38 การคำนวณความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์จากกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 30 มิลลิเมตร เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงในช่วงอุณหภูมิและเวลาต่างที่ทำการทดลอง 62
39 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสองของความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์และเวลาที่ใช้ในการเคลือบโลหะเนื้อพื้นด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 45 มิลลิเมตร 63

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
40	ความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (ln K) และส่วนกลับของอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว (1/T) ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 45 มิลลิเมตร	65
41	การคำนวณความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์จากกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 45 มิลลิเมตร เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงในช่วงอุณหภูมิและเวลาต่างที่ทำการทดลอง	66
42	โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพ็คบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 850˚C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็คโทรด 15 มิลลิเมตร	69

ภาพผนวกที่

ก1	เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมงที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร	79
ก2	เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมงที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 30 มิลลิเมตร	79
ก3	เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมงที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 45 มิลลิเมตร	80
ก4	เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมงที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร	80
ก5	เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมงที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 30 มิลลิเมตร	81

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่ **หน้า**

ก6 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 45 มิลลิเมตร 81
ก7 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 2 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร 82
ก8 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 2 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 30 มิลลิเมตร 82
ก9 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 2 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 45 มิลลิเมตร 83
ก10 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 4 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร 83
ก11 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 4 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 30 มิลลิเมตร 84
ก12 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 4 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 45 มิลลิเมตร 84
ก13 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร 85

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่ **หน้า**

ก14 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิง แบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 30 มิลลิเมตร 85
ก15 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิง แบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 45 มิลลิเมตร 86
ก16 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิง แบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร 86
ก17 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิง แบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 30 มิลลิเมตร 87
ก18 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิง แบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 45 มิลลิเมตร 87
ก19 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิง แบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร 88
ก20 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิง แบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 30 มิลลิเมตร 88
ก21 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิง แบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 45 มิลลิเมตร 89

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า

ค1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกส์ของชั้นเคลือบผิวบอไรด์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง 96

ค2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกส์ของชั้นเคลือบผิวบอไรด์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความหนาแน่นกระแส 80 mA/cm^2 97

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	แอมแปร์
μm	=	ไมครอน
°C	=	องศาเซลเซียส
K	=	เคลวิน
s	=	วินาที
DC	=	ไฟฟ้ากระแสตรง (แอมแปร์)
CD	=	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า(มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร)
HV	=	Hardness Vickers
E	=	ขนาดสนามไฟฟ้า (โวลท์/เมตรหรือ นิวตัน/คูลอมบ์)
V	=	ความต่างศักย์ระหว่างขั้ว (โวลท์)
D	=	ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (เมตร)
d	=	ความหนาของชั้นเคลือบ (เมตร)
t	=	เวลาที่ใชในการเคลือบ (วินาที)
K	=	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (ซม^2/วินาที)
K_0	=	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ (ซม^2/วินาที)
Q	=	พลังงานกระตุ้น (จูล/โมล)
R	=	ค่าคงที่ของก๊าซ (จูล/โมล•เคลวิน)
T	=	อุณหภูมิ (เคลวิน)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อิทธิพลของระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดของการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คโดยให้ไฟฟ้ากระแสตรง

The Influence of Distance between Electrode on Surface Coating Cold Work Tool Steel AISI D2 using Packed Boriding Process with Applied Direct current

คำนำ

เหล็กกล้าเครื่องมือ (Tool steels) เป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตเครื่องมือ (Tools) ประเภทต่างๆ เช่นแม่พิมพ์ขึ้นรูป (Forning die) แม่พิมพ์กดอัด (Extrusion die) แม่พิมพ์หล่อฉีด (Die casting) ลูกรีด (Roller) แม่พิมพ์ตัด (Punch die) มีดตัด (Shear blade) ฯลฯ และ ชิ้นส่วนและอุปกรณ์ของเครื่องจักรที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมหลายๆ ประเภท ซึ่งส่วนใหญ่เป็น โลหะที่ทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือ (Cold work tool steel) AISI D2 เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้อง จึงมักเกิดความเสียหายจากการสึกหรอหรือแตกร้าวระหว่างการใช้งานเนื่องจากต้องรับแรงทางกลมาก รวมถึงอาจสัมผัสกับสารเคมีต่างๆในกระบวนการผลิต แนวทางหนึ่งที่สามารถเพิ่มอายุการใช้งานให้กับชิ้นส่วนต่างๆได้ คือ การปรับปรุงพื้นผิวให้มีความแข็งสูงขึ้นและต้านทานต่อการกัดกร่อนได้เพิ่มขึ้นด้วยการสร้างผิวเคลือบชิ้นงาน การปรับปรุงพื้นผิว (Surface treatment) การเคลือบผิวคือ การแพร่ธาตุอะตอมเข้าไปในโครงสร้างของโลหะเนื้อพื้นเกิดเป็นชั้นเคลือบเพื่อให้ได้ความแข็งเฉพาะตามบริเวณผิวเท่านั้น กระทำได้หลายๆวิธี เช่น ไนไตรดิง คาร์บูไรซิ่ง คาร์บูไนไตรดิง และ บอไรดิง ซึ่งในงานวิจัยนี้ จะกล่าวถึงกระบวนการบอไรดิง แบบวิธีการแพ็คบอไรดิง (Pack boriding) (สมนึก, 2007)

บอไรดิง (Boriding) หรืออีกชื่อหนึ่งคือบอรอนไนซิง (Boronizing) เป็นการเคลือบผิว ที่ใช้การแพร่อะตอมธาตุโบรอนไปที่ผิวของชิ้นงาน โดยอะตอมของโบรอนที่แพร่เข้าไปจะไปรวมตัวกับเหล็กเนื้อพื้นกลายเป็นชั้นเคลือบบอไรด์โดยความหนาของชั้นบอไรด์ จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอะตอมโบรอนในเตา เวลา อุณหภูมิ ตามทฤษฎีการแพร่อะตอม แต่การเพิ่มปัจจัยเหล่านี้นั้นจะส่งผลไปถึงการเพิ่มต้นทุนในการผลิตมากขึ้นตามไปด้วย การใช้ปัจจัยอื่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพแก่กระบวนการนั้น ถือเป็นแนวทางที่น่าสนใจ เช่นการใช้ไฟฟ้ากระแสตรง เข้ามาช่วยในกระบวนการทำให้กลายเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่น่าสนใจในกระบวนการบอไรดิง (Sinha and Division, 1991)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กระบวนการบอไรดิงที่มีการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นเป็นกระบวนการที่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาช่วยประสิทธิภาพในกระบวนการเคลือบผิว ดังนั้นจึงต้องมีการให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปแก่ชิ้นงานทั้งชิ้นงานแอโนดและแคโทด เพื่อให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าและผลของการไหลของกระแสไฟฟ้าจะส่งผลให้บริเวณขั้วแคโทดมีปริมาณของความเข้มข้นของอะตอมโบรอนที่สูงกว่าบริเวณอื่น ซึ่งในกระบวนการบอไรดิงที่มีในอุตสาหกรรมเป็นกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงแบบแพ็คที่จะต้องวางตำแหน่งชิ้นงานไว้ภายในกล่องบรรจุนั้น โดยทั้งรูปร่างหรือขนาดของชิ้นงานที่เป็นขั้วแคโทดอาจส่งผลให้ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดนั้นมีระยะห่างที่มากเกินไปอาจส่งผลไปถึงกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิง

งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษากระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงแบบแพ็คด้วยไฟฟ้ากระแสตรงของเหล็กกล้าเครื่องมือ AISI D2 โดยศึกษาอิทธิพลของกระบวนการการเคลือบผิวขนาดของไฟฟ้ากระแสตรง อุณหภูมิ เวลา และระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่จะส่งผลต่อความหนาของชั้นเคลือบที่ได้ พร้อมทั้งศึกษาค่าพลังงานกระตุ้นของกระบวนการเคลือบผิวอีกด้วย เพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คด้วยไฟฟ้ากระแสตรงต่อไป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้จึงศึกษาความเป็นไปได้ในการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็ค ด้วยไฟฟ้ากระแสตรงโดยมีขอบเขตงานวิจัยดังนี้

1.เพื่อศึกษากระบวนการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิง แบบแพ็ค ที่มีการนำไฟฟ้ากระแสตรงมาช่วยในกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิง

2.เพื่อศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาช่วยในกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิง

3.ศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดของชิ้นงานที่มีผลต่อความหนาของชั้นเคลือบผิว

4.เพื่อศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คบอไรดิง บนเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็นAISI D2

5.เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คโดยให้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาช่วยและไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง

6.เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิ งแบบ แพ็ค โดยแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาช่วยที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

1. เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น (Cold work tool steel)

การใช้งานเหล็กกล้าเครื่องมือ ทำงานเย็น สามารถใช้กับ การขึ้นรูปโลหะที่อุณหภูมิห้อง ได้ทุกประเภท เช่น แม่พิมพ์เจาะรู (Blanking dies) ใบมีดตัด (Slitting cutters) แม่พิมพ์ขึ้นรูป (Forming dies) แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึก (Deep-drawing dies) แม่พิมพ์ดึงลวด (Wire-drawing dies) แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเย็น (Cold-extrusion dies) ลูกรีดสำหรับดัดโค้งและขึ้นรูป (Bending and forming rolls) ใบมีด (Shear blades) ชิ้นส่วนต่างๆ ที่ทนต่อการสึกหรอ เป็นต้น โดยส่วนใหญ่นิยมใช้งานสำหรับงานแม่พิมพ์ และหัวกดของงานขึ้นรูปเย็น งานเจาะรู (Blanking) เหล็กเกรด AISI D2 จะหาซื้อได้ง่ายและมีการใช้งานมาก (สมนึก, 2007)

เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็นประเภทคาร์บอนสูงและโครเมียมสูง เป็นกลุ่มที่มีการใช้งานกันมากที่สุดในกลุ่มเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น ธาตุผสมหลัก คือ คาร์บอน โครเมียม และโมลิบดีนั่ม โดยมีคุณสมบัติทนต่อการสึกหรอ และการเสียดสีที่ดีเยี่ยม ทำให้สามารถรักษาคมตัดไว้ได้นาน ซึ่งเป็นผลมาจากการมีปริมาณคาร์ไบด์ในระดับสูง และโครงสร้างเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ภายหลังการชุบแข็งและอบคืนไฟ (Tempering) อย่างไรก็ตามข้อจำกัดประการสำคัญของเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้ คือ ความสามารถในการกลึงไสที่ต่ำมาก และมีความเหนียวที่ลดต่ำลงเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็นในกลุ่มอื่น

AISI D2 เป็นกลุ่มที่ใช้ผลิตเครื่องมือสำหรับนำไปใช้ในงานแปรรูปโลหะที่อุณหภูมิห้อง เช่น แม่พิมพ์ตัดแผ่นโลหะเย็น ใบมีดตัดกระดาษ เฟืองกัดไม้ คัดเตอร์ เป็นต้น คุณสมบัติสำคัญที่ต้องการสำหรับเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้ คือ ความสามารถในการกลึงไสดี เปลี่ยนแปลงขนาดน้อยหลังการชุบแข็ง (เนื่องจากการชุบแข็งจะทำโดยการชุบน้ำมันหรือให้เย็นตัวในอากาศ) ต้านทานการสึกหรอสูง (สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย, 2013) ซึ่งเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 จะมีชื่อเรียกตามมาตรฐานและชั้นคุณภาพ ดังนี้ มาตรฐาน: JIS G4404, SKD11; DIN 1.2379/X155CrVMo12-1 ,AISI D2 องค์ประกอบทางเคมีและกรรมวิธีการปรับปรุงสมบัติดังตารางที่ 1 และ 2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
1.50-1.6	0.10-0.40	0.15-0.45	< 0.03	< 0.03	11.0-12.0	0.60-0.80	0.90-1.10

ที่มา : สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย, (2013)

ตารางที่ 2 วิธีปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ที่สามารถทำได้

อุณหภูมิอบ (Austenitizing temperature)	สารที่ใช้ชุบ (Quenching medium)	อุณหภูมิอบคืนไฟ (Tempering temperature)	ความแข็งหลังอบคืนไฟ(Tempering)
1,020-1,050 °C	น้ำมัน อากาศ	200-500 °C	58-61 HRC

ที่มา: บริษัทสินไทย สเปเชียล สตีลจำกัด, (2012)

เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 เป็นเหล็กที่ใช้ผลิตเครื่องมือสำหรับนำไปใช้งานแปรรูปโลหะแต่ที่อุณหภูมิห้องจึงมักมีอายุการใช้งานที่ต่ำอันเนื่องมาจาก การสึกหรอ การเสียดสี หรือการเกิดการแตกร้าวระหว่างการใช้งานความเสียหายให้เหล่านี้ส่งผลเสียต่อกระบวนการผลิต แนวทางที่ช่วยแก้ไขปัญหาเพื่อยืดอายุการใช้งานคือการปรับปรุงบริเวณพื้นผิวให้บริเวณพื้นผิวมีความแข็งที่สูงขึ้น เพื่อให้เกิดรอยแตกร้าวที่ยากขึ้นส่งผลให้เกิดการเสียหายยากตามไปด้วยทำให้มีอายุการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวมีอยู่หลายวิธีหนึ่งในนั้นคือกระบวนการบอไรดิง

2. **กระบวนการบอไรดิง (Boriding process)**

บอไรดิง หรืออีกชื่อหนึ่งคือ บอรอนไนซิง เป็นกระบวนกา รเคลือบผิว ใช้การแพร่อะตอมธาตุโบรอนไปที่ผิวของชิ้นงาน โดยอะตอมของโบรอนที่แพร่เข้าไปจะไปรวมตัวกับเหล็กเนื้อพื้นกลายเป็นชั้นเคลือบบอไรด์โดยความหนาของชั้นบอไรด์ขึ้นกับความเข้มข้นของอะตอมโบรอนในเตา เวลา อุณหภูมิ กระบวนการบอไรดิงสามารถทำได้หลายวิธี เช่น กระบวนการบอไรดิง แบบอ่าง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เกลือ (Salt bath) กระบวนการบอไรดิงแบบพลาสมา (Plasma boriding) กระบวนการบอไรดิงแบบใช้แก๊สหรือของเหลว (Gas or liquid boriding) และกระบวนการบอไรดิงโดยวิธีแพ็ค ซึ่งเป็นวิธีที่ทำได้ง่ายและนิยมใช้กันแพร่หลายที่สุด กระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ได้รับความนิยมมากเนื่องมาจากมีหลักการที่ง่าย โดยกระบวนการบอไรดิงด้วยวิธีแพ็คบอไรดิงจะใช้ผงสำเร็จรูปที่มีส่วนผสมของสารที่ให้กำเนิด อะตอมโบรอนอิสระ หรือบอไรดิงเอเจ็นท์ (Boriding agent) สารที่ทำหน้าที่เป็นตัวเจือจาง (Diluent) และสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้น (Activator) ทำให้เกิดการแตกตัวออกมาเป็นอะตอม โบรอน แล้วแพร่เข้าไปรวมตัวกับธาตุเหล็กที่ผิวของเหล็ก รวมกันเกิดเป็นชั้นเหล็กบอไรด์ FeB และ Fe_2B การปรับปรุงพื้นผิวด้วยกระบวนการบอไรดิงสามารถทำได้กับวัสดุประเภทโลหะหลายชนิดและมีโครงสร้างของชั้นเคลือบแตกต่างกันตามโครงสร้างของวัสดุโลหะเนื้อพื้นนั้นๆ (Sinha and Division, 1991) ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การปรับปรุงสมบัติของพื้นผิวด้วยกระบวนการบอไรดิงในวัสดุชนิดต่างๆ

วัสดุ	เฟสที่เกิดในชั้นเคลือบ	สมบัติ	
		ความแข็ง (HV)	จุดหลอมเหลว (°C)
Fe	FeB	1900-2100	1390
	Fe_2B	1800-2000	-
Co	CoB	1850	-
	Co_2B	1500-1600	-
	Co_3B	700-800	-
	CoB	2200	-
Co-27.5Cr	Co_2B	1550	-
	Co_3B	700-800	-
Ni	Ni_4B_3	1600	-
	Ni_2B	1500	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 3 (ต่อ)

วัสดุ	เฟสที่เกิดในชั้นเคลือบ	สมบัติ	
		ความแข็ง (HV)	จุดหลอมเหลว (°C)
Mo	Mo_2B	1660	2000
	MoB_2	2330	2100
	Mo_2B_5	2400-2700	2100
W	W_2B_5	2600	2300
Ti	TiB	2500	1900
	TiB_2	3370	2980
Ti-6Al-4V	TiB	-	-
	TiB_2	3000	-
Ta	Ta_2B	3200-3500	-
	TaB_2	2500	3200
Zr	ZrB_2	2250	3040

ที่มา : Sinha and Division (1991)

กระบวนการบอไรดิงโดยวิธีแพ็คเป็นวิธีการที่ใช้ผงสำเร็จรูปที่มีส่วนผสมของสารต่างดังนี้

ก.สารที่เป็นตัวให้กำเนิดอะตอมของโบรออิสระ ที่เรียกว่า บอไรดิงเอเจนท์ (Boriding agent) ส่วนใหญ่ใช้โบรอนคาร์ไบด์ (Boron Carbide ,B_4C)

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

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

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารทั้งหมดนี้จะถูกผสมกันอยู่ในรูปแบบของผงสำเร็จรูป โดยผงสำเร็จรูปนี้จะใช้ในการบรรจุลงในกล่องบรรจุ (Container box) พร้อมกับชิ้นงานที่ต้องการเคลือบผิวจากนั้นจะให้อุณหภูมิคงที่เพื่อให้เกิดการแตกตัวของอะตอมโบรอนแพร่เข้าไปในโลหะเนื้อพื้นตามเวลาที่ต้องการ โดยในระหว่างกระบวนการจะทำในสภาวะใกล้เคียงกับสภาวะเฉื่อยโดยฉีดแก็สเฉื่อยเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผิวของชิ้นงานจากนั้นและเมื่อสิ้นสุดกระบวนการเคลือบผิวก็จะปล่อยให้เย็นตัวในอากาศจนอยู่ที่อุณหภูมิห้องและเอาเศษผงบอไรด์ที่ติดอยู่ที่ผิวชิ้นงานออก

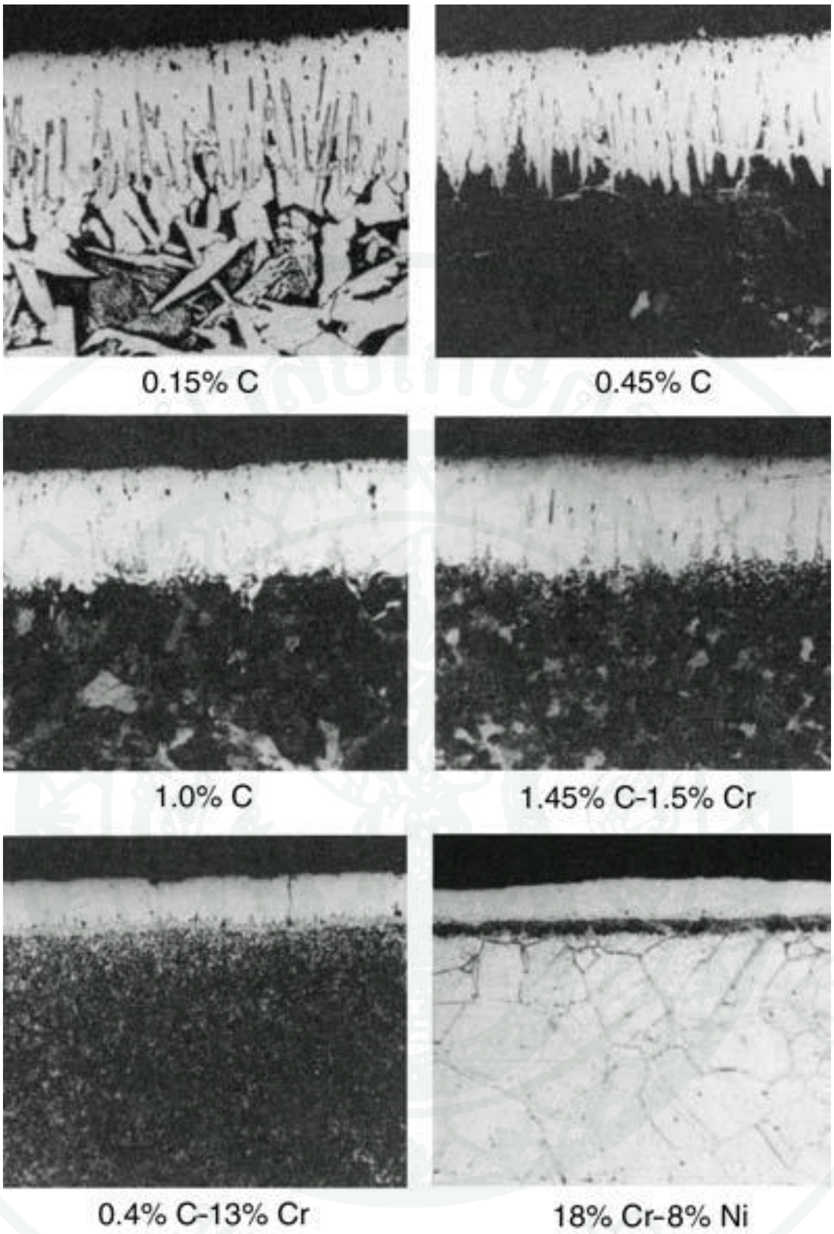
3. ลักษณะของชั้นเคลือบบอไรด์

การทำกระบวนการบอไรดิงด้วยวิธี แพ็คบอไรดิง ของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 จะเกิดเป็นชั้นเคลือบผิว 2 ชนิดคือ เฟสเดี่ยว (Single phase) และ เฟสคู่ (Double phase) โดยที่เฟสเดี่ยว จะเกิดเป็นชั้นเคลือบชนิดเดี่ยว คือ Fe_2B และเฟสคู่ จะเกิดเป็นชั้นเคลือบสองชนิด FeB และ Fe_2B บริเวณด้านใน จะเป็นชั้นเคลือบ Fe_2B และบริเวณด้านนอกเป็นชั้นเคลือบ FeB ที่มีความแข็งแต่เปราะกว่าเมื่อเทียบกับ Fe_2B โดยสังเกตได้จากสีว่าชั้นด้านนอก FeB จะมีสีที่เข้มกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ Fe_2B (Davis *et al.* 2002)ลักษณะชั้นเคลือบที่มีปริมาณอัลลอยด์ต่ำจะพบว่ามีลักษณะชั้นเคลือบเป็นฟันเลื่อยตามภาพถ่ายที่ 1 การเกิดเฟสของชั้นเคลือบผิวบอไรด์นั้นมีข้อดีดังนี้

ข้อดีของชั้นเคลือบบอไรด์

1. มีค่าความแข็งสูงมากประมาณ 1800-2100 HV
2. มีจุดหลอมเหลวสูงประมาณ 1390 องศาเซลเซียส
3. สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ
4. ช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลทางด้านความทนทาน คือ การเกาะติดAdhesive,การสึกกร่อน (Abrasion) และความล้าที่ผิว (Surface fatigue)
5. ใช้ได้กับโลหะกลุ่มเหล็กหลากหลายชนิดรวมถึงโลหะผสม
6. ทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมีและการกัดเซาะ (กรดอ่อนหรือเบสอ่อน)
7. สามารถต้านการเกิดออกซิเดชั่นได้ถึงที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสและทนต่อการทำปฏิกิริยากับโลหะหลอมเหลว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 1 แสดงลักษณะโครงสร้างของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ในโลหะเนื้อพื้นที่มีธาตุอัลลอยด์ต่างๆ

ที่มา : Davis *et al*. (2002)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ลักษณะชั้นเคลือบบอไรด์ FeB และ Fe_2B มีสมบัติทางกลที่แตกต่างกันดังตารางที่ 4 โดยชั้นเคลือบ FeB จะมีค่าความแข็งที่สูงส่งผลให้ FeB มีความแข็งและเปราะ และ Fe_2B จะมีค่าความแข็งที่น้อยกว่า FeB ทำให้มีความเหนียวที่มากกว่า

ตารางที่ 4 แสดงสมบัติทั่วไปของเหล็กบอไรด์ 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
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อน	23 ppm/^{o}C	7.65 – 9.2 ppm/^{o}C
สัดส่วนของโบรอน	16.23% โดยน้ำหนัก	8.83 % โดยน้ำหนัก
โครงสร้างผลึก	Ortorhombic ซึ่งมี 4 อะตอม ของเหล็ก (Fe) และ 4 อะตอม ของโบรอนในยูนิตเซลล์	Body – center tetragonal มี 12 อะตอมต่อ ยูนิตเซลล์
ขนาดผลึก	a = 4.053 A b = 5.495 A c = 2.946 A	a = 5.078 A c = 4.249 A

ที่มา : Sinha and Division (1991)

กระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงเป็นกระบวนการที่ค่อนข้างจะให้คุณสมบัติเด่นทางด้านความแข็งขอชั้นเคลือบผิวที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชั้นเคลือบผิวจากกระบวนการเคลือบผิวหรือกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวอื่นๆ ดังตารางที่ 5 รวมไปถึงคุณสมบัติอื่นๆที่ช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลให้กับชิ้นงาน จึงทำให้เป็นกระบวนการที่มีความน่าสนใจในด้านงานวิจัยอื่นเป็นอย่างมาก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์และชั้นเคลือบอื่นๆ

วัสดุ	ค่าความแข็ง(HV)
เหล็กเหนียวผ่านกระบวนการบอไรดิง	1600
เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 ผ่านกระบวนการบอไรดิง	1800
เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น A2 ผ่านกระบวนการบอไรดิง	1900
เหล็กมาร์เทนไซต์	900
เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H 13ผ่านกระบวนการชุบแข็ง	540 – 600
เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น A 2ผ่านกระบวนการชุบแข็ง	630 – 700
เหล็กไฮสปีด BM42	900 – 910
เหล็กผ่านกระบวนการไนไตรดิง	650 – 1700
เหล็กอัลลอยด์ต่ำ ผ่านกระบวนการคาร์บูไรซิง	650 – 950
เหล็กชุบโครเมียม	1000 - 1200

ที่มา :Sinha and Division (1991)

ธาตุผสมที่มีอิทธิพลต่อความหนาของชั้นเคลือบหรือลักษณะโครงสร้างของชั้นเคลือบ

ก.คาร์บอนไม่สามารถละลายในชั้นบอไรด์ได้และไม่สามารถแพร่ผ่านชั้นบอไรด์ได้ ดังนั้น เมื่อใช้กระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงเมื่ออะตอมโบรอนแพร่เข้าสู่โลหะเนื้อพื้น อะตอมของคาร์บอนจะถูกผลักจากชั้นบอไรด์ลึกเข้าไปยังโลหะเนื้อพื้นเกิดเป็นสารประกอบ (Fe_3B,C)

ข.ซิลิกอนไม่สามารถละลายอยู่ในชั้นเคลือบบอไรด์และมีพฤติกรรมเหมือนกับอะตอมของคาร์บอน คือจะถูกดันลึกเข้าไปในโลหะเนื้อพื้นเมื่อเกิดกระบวนการบอไรดิง และจะเกิดเป็นสารประกอบ $FeSi_{0.4}B_{0.6}$ และ Fe_5SiB_2 ซึ่งสารประกอบนี้มีสมบัติทางกลที่ไม่ดี ส่งผลให้อาจเกิด (Eggshell effect) ขึ้นที่บริเวณทรานซิชันโซนได้ (Trnsition zone)

ค.นิกเกิลมีผลให้อัตราการเกิดชั้นเคลือบบอไรด์ลดลงโดยนิกเกิลจะเข้าไปรวมตัวกับโบรอนเกิดเป็น สารประกอบ Ni_3B

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ง.โครเมียมมีผลทำให้การเติบโตของชั้นเคลือบบอไรด์ลดลงและทำให้ลักษณะของชั้นเคลือบที่ค่อนข้างเรียบไม่มีลักษณะของฟันเลื่อย (Saw tooth) เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของชั้นเคลือบ

จ.ทังสเตน โมลิบดีนัม และวานาเดียม นี้โดยธาตุเหล่านี้มีผลทำให้ความหนาของชั้นเคลือบลดลงและทำให้เกิดลักษณะของฟันเลื่อยเกิดขึ้น

จากกระบวนการบอไรดิง พบว่าความสัมพันธ์ความหนาชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นนั้น อยู่กับอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวซึ่งเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการแพร่ ดังนั้นความหนาของชั้นเคลือบบอไรดิงที่เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับทฤษฏีการแพร่ในเรื่องของจลนพลศาสตร์

4.จลนศาสตร์ของกระบวนการบอไรดิง

จากกระบวนการบอไรดิง พบว่าความสัมพันธ์ความหนาชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นนั้น อยู่กับอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว ซึ่งสอดคล้องกับสมการ

$$\mathbf{d^2/t = K} \qquad \textbf{(1)}$$

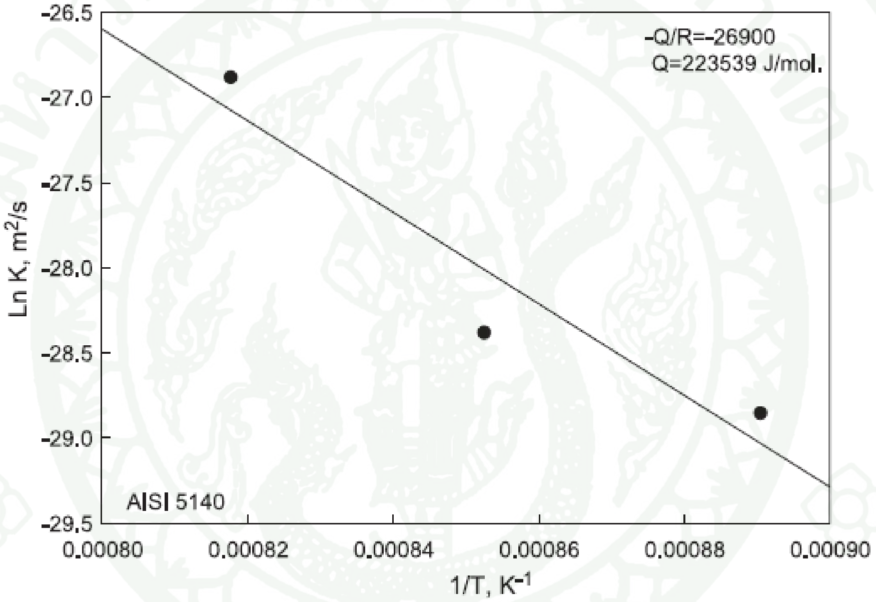
$$\mathbf{K = K_0 exp(-Q/RT)} \qquad \textbf{(2)}$$

โดยมีค่าคงที่	d	=	ความหนาของชั้นเคลือบ(ซม.)
	t	=	เวลาในการเคลือบ (วินาที)
	K	=	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึม (ซม^2/วินาที)
	K_0	=	ค่าคงที่สัมประสิทธิ์การแพร่ซึม (ซม^2/วินาที)
	Q	=	พลังงานกระตุ้น (กิโลจูล/โมล)
	T	=	อุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว (องศาเคลวิน)

ที่มา : Davis *et al*. (2002)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

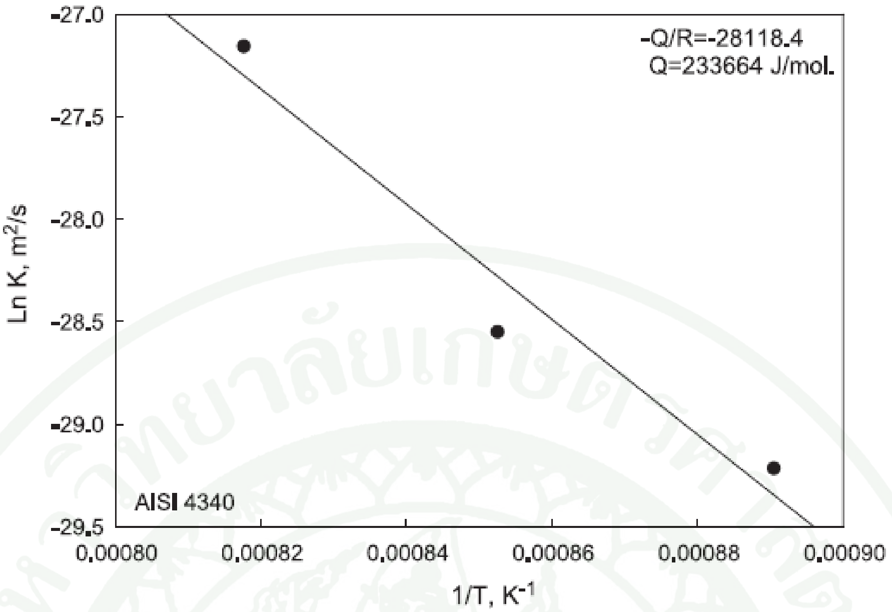
Sen and Bindal (2005)ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการเคลือบผิวเหล็กกล้าโครเมี่ยมต่ำและเหล็กกล้าโครเมี่ยมสูง AISI 5140 AISI 4340 และ AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบอ่างเกลือที่อุณหภูมิ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 6 และ 8 ชั่วโมงและจากจลนพลศาสตร์ ดังนั้นจะสามารถหาค่า K ได้จากอุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกันผลที่ได้คือค่า K จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิหรือเวลาที่เพิ่มมากขึ้น และค่าพลังงานกระตุ้นที่ได้จากการศึกษาการเคลือบผิว AISI 5140 AISI 4340 และ AISI D2 สามารถหาพลังงานกระตุ้นมีค่าเท่ากับ 223 234 และ170 kJ/mol ตามภาพที่ 2 3และ 4 ตามลำดับ



ภาพที่ 2 ภาพแสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่สัมประสิทธิ์การแพร่ กับ อุณหภูมิ ของชั้นเคลือบบอไรด์ AISI 5140 ที่มีค่าพลังงานกระตุ้น ที่มีค่าพลังงานกระตุ้นในกระบวนการเคลือบผิวมีค่าเท่ากับ 223 kJ/mol

ที่มา Sen *et al*. (2005)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

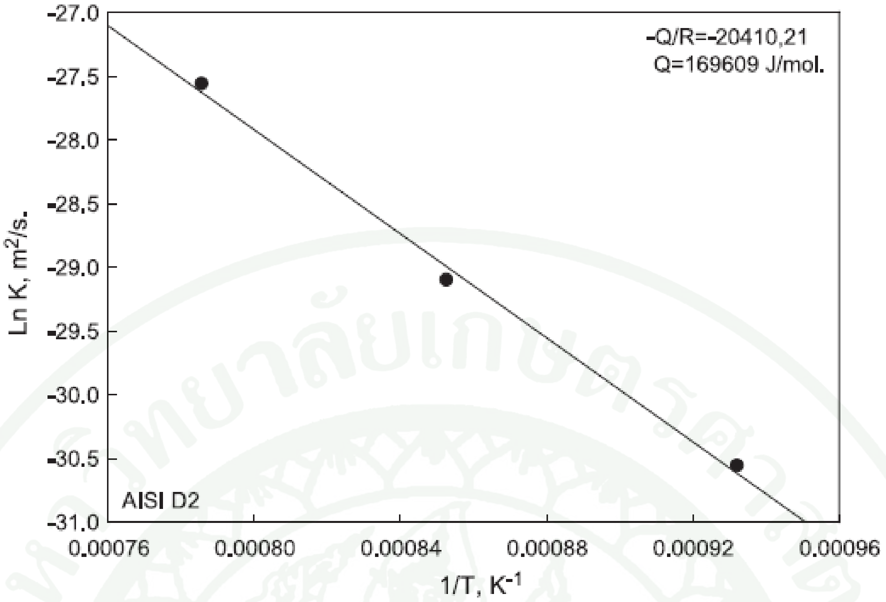


ภาพที่ 3 ภาพแสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่สัมประสิทธิ์การแพร่ กับ อุณหภูมิ ของชั้นเคลือบบอไรด์ AISI 4340 ที่มีค่าพลังงานกระตุ้นในกระบวนการเคลือบผิวมีค่าเท่ากับ 234 kJ/mol

ที่มา Sen *et al*. (2005)

จากการศึกษาของ Sen and Bindal (2005) พบว่าโครงสร้างของโลหะเนื้อพื้นที่แตกต่างกันและอิทธิพลของธาตุผสมที่อยู่ในโลหะเนื้อพื้นจะพบว่าทำให้เกิดชั้นเคลือบที่มีความหนาที่แตกต่างกันและส่งผลให้เมื่อศึกษาไปถึงจลนพลศาสตร์ของกระบวนการ ค่าพลังงานกระตุ้นและอัตราการแพร่ที่แตกต่างกันของแต่ละวัสดุดังนั้นอิทธิพลของ ซึ่งก่อให้เกิดการทำนายอัตราการแพร่หรือความเร็วที่ก่อให้เกิดชั้นเคลือบบอไรด์ที่ได้จากการใช้สมการ Arrhenius และสมการการแพร่ นั้นมีการคำนวณในได้ค่าที่แตกต่างกันออกไปในแต่โครงสร้างโลหะเนื้อพื้นแต่ละชนิด

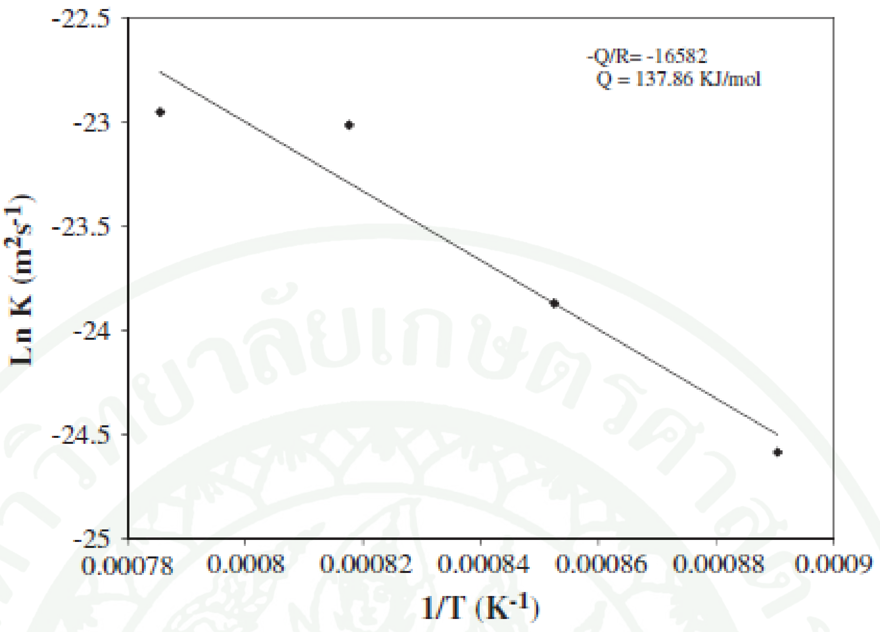
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 4 ภาพแสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่สัมประสิทธิ์การแพร่ กับ อุณหภูมิ ของชั้นเคลือบบอไรด์ AISI D2 ที่มีค่าพลังงานกระตุ้นในกระบวนการเคลือบผิว มีค่าเท่ากับ170 kJ/mol

ที่มา Sen *et al,* (2005)

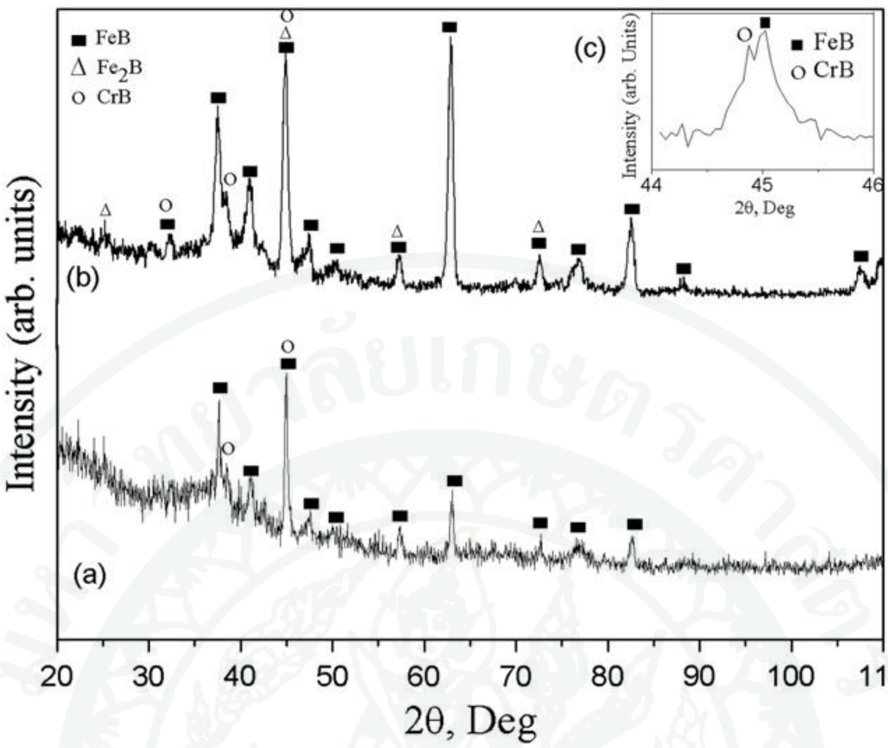
Sista and kahvecioglu (2011) ได้ศึกษาการเร่งกระบวนการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยไฟฟ้ากระแสตรงของกระบวนการบอไรดิงแบบไฟฟ้าเชิงเคมี ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงเมื่อเปรียบเทียบกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิง แบบอ่างเกลือและแบบแพ็คโดยทั่วไปและมีค่าความแข็งอยู่ที่ประมาณ 1714 HV และมีการศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงดิงแบบเคมีเชิงไฟฟ้าเปรียบเทียบกับกระบวนการบอไรดิงแบบอ่างเกลือและแบบแพ็คโดยทั่วไป ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 850 900 950 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 30 45 และ 60 นาที ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นได้เท่ากับ 137.86 170 และ 176 kJ/mol ตามลำดับและมีความสัมพันธ์ระหว่าง ln K กับ 1/T ตามภาพที่ 5 อีกทั้งในงานวิจัยนี้ยังสามารถวิเคราะห์เอกลักษณ์ลักษณะของชั้นเคลือบสามารถยืนยันได้ว่ามีชั้นเคลือบของ FeB และ Fe_2B เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการบอไรดิง ตามภาพที่ 6



ภาพที่ 5 ภาพแสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่สัมประสิทธิ์การแพร่ กับ อุณหภูมิ ของชั้นเคลือบบอไรด์ AISI D2 ที่มีค่าพลังงานกระตุ้นในกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงแบบเชิงไฟฟ้าเคมีมีค่าเท่ากับ 137.86 kJ/mol

ที่มา : Sista *et al.* (2011)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

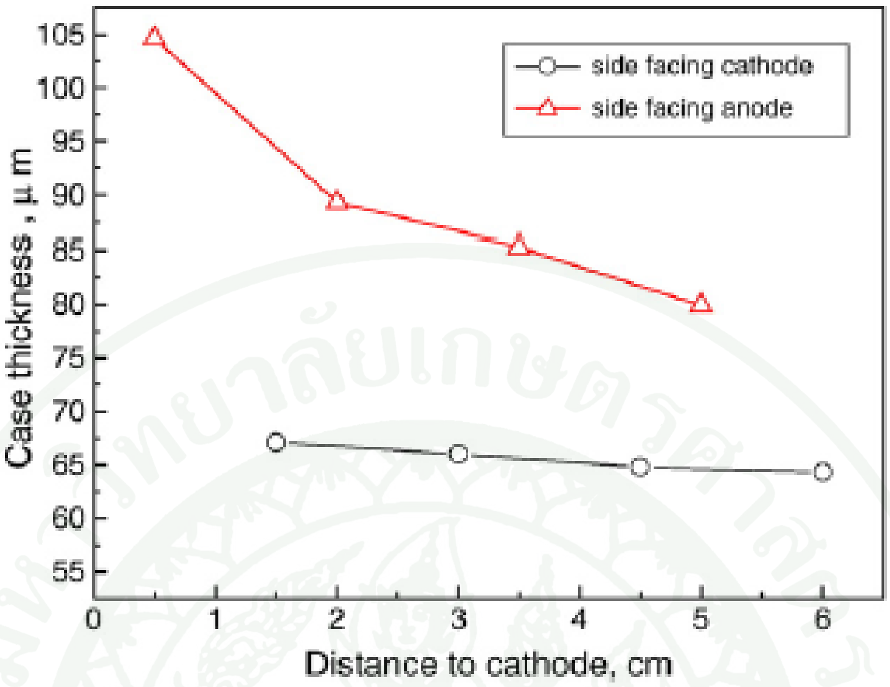


ภาพที่ 6 ภาพเอกลักษณ์เฉพาะลักษณะของชั้นเคลือบที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงด้วยการวิเคราะห์ XRD ชั้นเคลือบผิวบอไรดิงของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 เป็นเวลา 60 นาที

ที่มา : Sista *et al.* (2011)

Xie and Sun (2012) ศึกษาอิทธิพลของสนามไฟฟ้ากระแสตรงของกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงด้วยไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิปานกลาง โดยวางชิ้นงานที่ตำแหน่งต่างๆ บริเวณระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเพื่อศึกษาลักษณะของสนามไฟฟ้ากระแสตรงที่ช่วยในกระบวนการเคลือบผิวและศึกษากลไกการเร่งการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้ากระแสตรง ผลที่ได้คือ สนามไฟฟ้ากระแสตรงไม่ได้เพิ่มประสิทธิภาพแค่ขั้วแคโทด แต่ยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับชิ้นงานที่อยู่บริเวณระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด ของเขตของการเพิ่มประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับ ที่ตั้งของชิ้นงานโดยการเพิ่มประสิทธิภาพที่มากที่สุดจะขึ้นกับด้านที่หันหน้าให้กับขั้วแอโนด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสนามไฟฟ้ากระแสตรง มีอิทธิพลทางกายภาพในการเพิ่มปริมาณของโบรอน สนามไฟฟ้ากระแสตรง จะทำให้เกิดความเข้มข้นของอะตอมโบรอนที่สูงบริเวณที่ขั้วแคโทดมากกว่าบริเวณอื่น

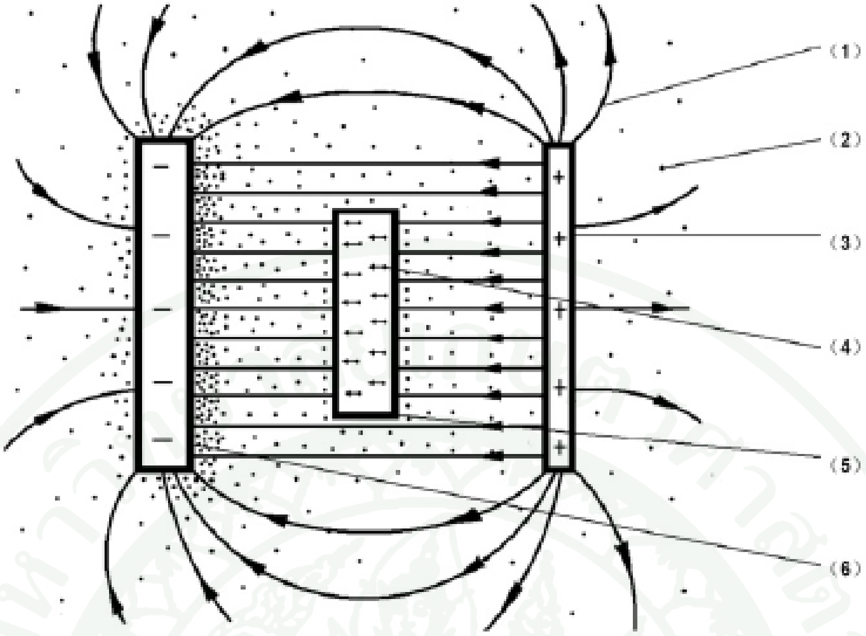
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 7 ความหนาของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิง ที่ติดกับขั้วไฟฟ้าและที่อยู่ระหว่างที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 4 แอมแปร์ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ที่มา : Xie *et al.* (2012)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 8 ภาพจำลองการกระจายตัวของอะตอมโบรอน และการเคลื่อนตัวของอะตอมโบรอนในกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงด้วยไฟฟ้ากระแสตรง 1) เส้นสนามไฟฟ้า 2) อะตอมโบรอนที่แตกตัว 3) ขั้วแคโทด 4) ทิศทางการเคลื่อนตัวของอะตอมโบรอนบริเวณรอบชิ้นงาน 5)ชิ้นงานที่ตำแหน่งระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

ที่มา : Xie *et al.* (2012)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

1.1 เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ที่มีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 6

1.2 ผงบอไรด์ Ekabor I (BorTec GmbH ,Germamy)

1.3 กล่องเหล็กที่บรรจุชิ้นงานและผงบอไรด์ (Container Box)

1.4 กรดไนตริก 69 – 70% (Baker Analyzed® A.C.S. Reagent) ความเข้มข้น 1 โมลาร์

1.5 แก็สอาร์กอน (UN1066 CGA580) บริษัทแพรกซ์แอร์ประเทศไทยจำกัด

1.6 Acetone (CH_3COCH_3)

ตารางที่ 6 ธาตุผสมของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงาน AISI D2 (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	Co	Cu	P	S
1.47	0.4	0.2	11.63	0.16	0.83	0.24	1.00	0.13	0.017	0.02

ตารางที่ 7 ส่วนผสมของกรดไนตริกที่ใช้ในการวิจัย

Nitric Acid (HNO_3)	น้ำกลั่น (H_2O)
1 มิลลิลิตร	100 มิลลิลิตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานและกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

2.1 เตาอุณหภูมิสูงสำหรับบอไรดิง (Furnace) ยี่ห้อ ModuTemp รุ่น WW51A

2.2 อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply) ยี่ห้อ GOODWILL รุ่น GPR3060D

2.3 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple) ชนิด Type-K

2.4 เครื่องตัด (High Speed Cutter) ยี่ห้อ IMPTECH รุ่น C10

2.5 เครื่องขัด (Alumina Wheel) ยี่ห้อ IMPTECH รุ่น 101

2.6 อุปกรณ์เมาท์แบบเย็น (Cold Mount) ใช้ เรซิ่นชนิด Epoxy หล่อในเบ้าพลาสติก

2.7 กระดาษทราย ผ้าสักหลาด และผงอะลูมินา 1 และ 0.3 ไมครอน

2.8 ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9 มิลลิเมตร(ห้างหุ้นส่วนจากัด เตาปูนค้าเหล็ก)

2.9 ท่อ insulator

3. เครื่องมือสาหรับวิเคราะห์ผิวเคลือบและตรวจสอบวัสดุ

3.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope)

3.2 Image Analyzer ซอฟแวร์ Image-Pro Plus Versio 4.0 และ Material-ProAnalyzer Version

3.3 เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (Micro Vickers Hardness Tester) ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น MVK-H1

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิธีการ

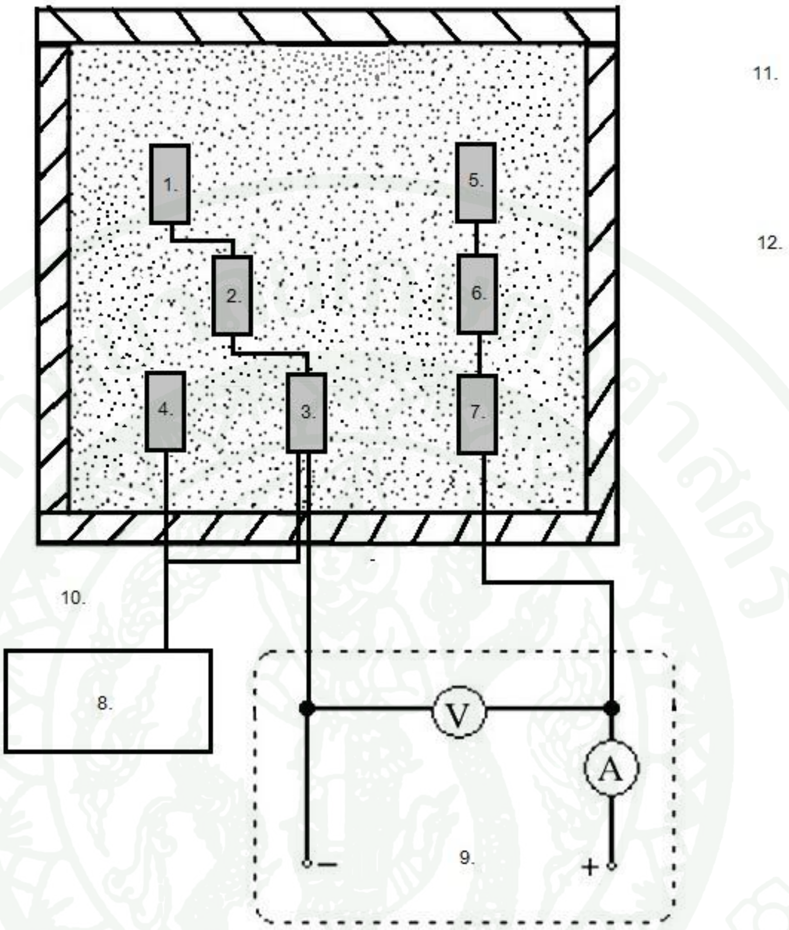
1. ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

ตัดแท่งเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ขนาด 25x14x8 มิลลิเมตร เตรียมชิ้นงานด้วยการขัดเปิดผิวด้วยกระดาษทรายตั้งแต่ 120 180 240 320 400 และ 600 ตามลำดับเพื่อขจัดสิ่งสกปรกและสนิม เป่าให้แห้ง จากนั้นเจาะรูที่ชิ้นงานด้วยดอกสว่านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร บริเวณด้านข้างของชิ้นงานทั้งสองข้าง เก็บไว้ในที่แห้งไม่มีอากาศป้องกันการเกิดสนิมรอการนำไปใช้เคลือบผิว ล้างด้วยอะซิโตนเพื่อกำจัดคราบไขมันก่อนนำไปเคลือบผิวเสมอ

2. ขั้นตอนการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิง

เช็ดทำความสะอาดชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องเครื่องมือทำงาน AISI D2 ด้วยอะซิโตน แล้วบรรจุจำนวนชิ้นดังนี้ ชิ้นงานอ้างอิง 1 ชิ้น ฝั่งแอโนด 3 ชิ้น และฝั่งแคโทด 3 ชิ้น โดยแต่ละฝั่งมีระยะห่างที่ 15 30 และ 45 มิลลิเมตรมัดลวดที่บริเวณชิ้นงานแคโทดโดยร้อยล วดต่อกัน จากนั้นนำผง Ekabor-I ลงในกล่องบรรจุพร้อมทั้งติดตั้งตัววัดอุณหภูมิชิ้นงาน ต่ออุปกรณ์สำหรับจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับขั้วอิเล็กโท รดทั้งสอง โดยให้ชิ้นงานที่ต้องการเคลือบผิวเป็นขั้วแคโทด ตามภาพที่ 9 ปิดฝากล่องและปิดรอยต่อของกล่องด้วยปูนซีเมนต์ให้สนิท รอจนซีเมนต์บ่มตัวและแข็งตัวแล้วนำเข้าเตาอุณหภูมิสูง เปิดเตาให้ความร้อนและเปิดสวิตซ์อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรง จนอุณหภูมิชิ้นงานเพิ่มขึ้นถึงอุณหภูมิที่ต้องการเคลือบผิวแล้วรักษาอุณหภูมิในการเคลือบผิวตามเวลาที่ต้องการ เมื่อครบตามกำหนดเวลาแล้วปิดเตาและปิดสวิตซ์อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรง นำกล่องบรรจุออกจากเตาปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ จากนั้นนำชิ้นงานไปวิเคราะห์ชั้นเคลือบ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 9 จำลองการบรรจุผงบอไรด์ ตำแหน่งการวางชิ้นงาน การติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าและอุปกรณ์การวัดอุณหภูมิที่ใช้ในงานวิจัย 1.) ชิ้นงานแคโทด ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 45 มิลลิเมตร 2.) ชิ้นงานแคโทดที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 30 มิลลิเมตร; 3.)ชิ้นงานแคโทดที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 มิลลิเมตร 4.)ชิ้นงานอ้างอิง 5 6 7.)ชิ้นงานขั้วแอโนด 8.) อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ 9.) อุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า 10.) เทอโมคัปเปิล ;11.) กล่องบรรจุ 12.) Ekabor-I

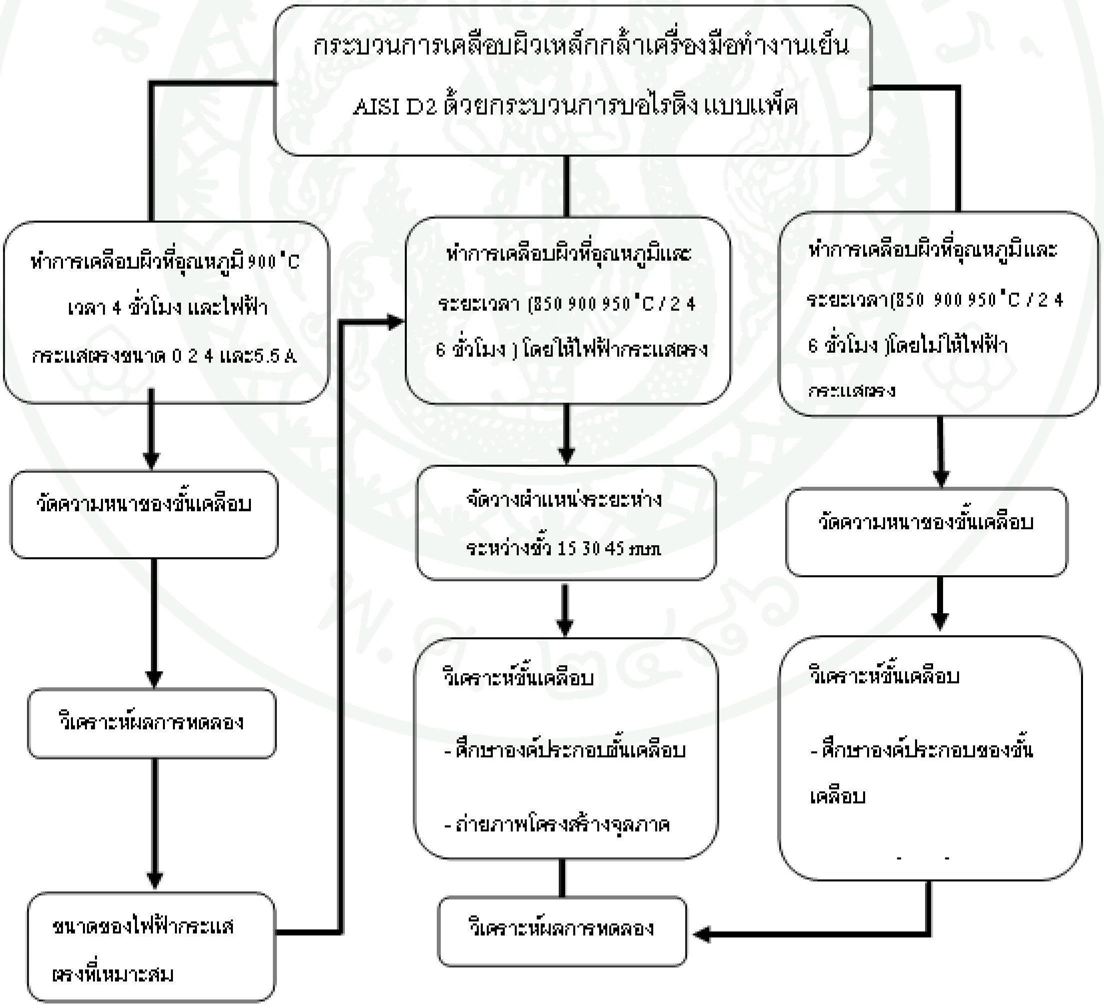
3. การวิเคราะห์ชั้นเคลือบ

3.1 ตัดชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเคลือบผิวแบบภาคตัดขวางด้วยเครื่องตัดความเร็วสูง หลังจากนั้นนำชิ้นงานมาอัดด้วยวิธีเมาท์แบบเย็น นำไปขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 120 240 320 400 600 800 และ 1200 ตามลำดับ ขัดละเอียดด้วยผงอะลูมินา และกัดผิวชิ้นงานด้วยกรดไนตริกเจือจาง 1:100 แล้วเป่าให้แห้ง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.2 ถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและวัดความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ Image Analyzer ซอฟแวร์

3.3 วัดความแข็งของชิ้นงานด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์นอกจากนี้ในงานวิจัยมีการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาขนาดของไฟฟ้ากระแสตรงที่ให้สามารถความหนาชั้นเคลือบมากที่สุดในการทดลอง โดยใช้วิธีการในเตรียมผิวชิ้นงานและการเคลือบผิวแบบเดียวกันแต่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดไฟฟ้ากระแสตรงที่ขนาดตั้งแต่ 0 2 4 และ 5.5 แอมแปร์ และสามารถวัดความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าได้ 30 60 และ 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร แล้วนำชิ้นงานไปวัดความหนาชั้นเคลือบ โดยการดำเนินงานในการวิจัยครั้งนี้สามารถสรุปขั้นตอนเป็นแผนภาพงานวิจัยได้ดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 แผนการดำเนินงานวิจัย

ผลและวิจารณ์

ผล

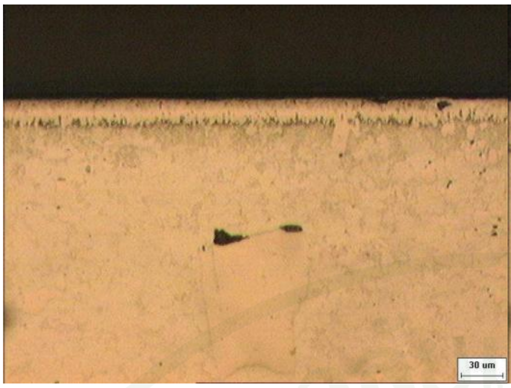
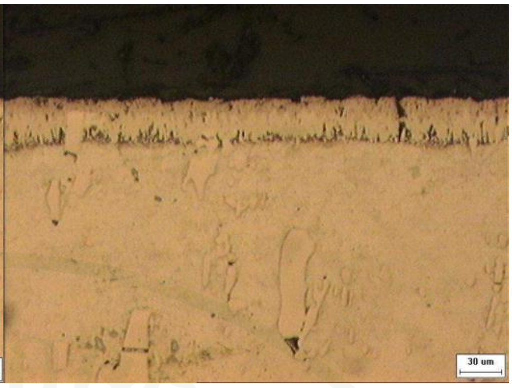
1. การเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คที่ไม่มีการให้ไฟฟ้ากระแสตรง (พิจารณาจากชิ้นงานอ้างอิง)

จากการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ที่สภาวะอุณหภูมิ และ เวลา ต่างๆ จะพบว่าในทุกสภาวะเมื่อทำการตัดแบบภาคตัดขวางและทำการถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง เมื่อพิจารณาชั้นเคลือบจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจะมีลักษณะโครงสร้างของชั้นเคลือบเป็น เฟสคู่ (Double phase) ประกอบไปด้วย FeB และ Fe_2B สังเกตได้จากสีของชั้นเคลือบที่มีสีที่เข้มกว่าอย่างเห็นได้ชัดจะเป็นสีของ FeB ที่ตำแหน่งบริเวณผิวชั้นนอกสุด และที่ตำแหน่งชั้นถัดมาคือ Fe_2B จะมีสีที่อ่อนกว่าเมื่อทำการพิจารณาจากภาพ นอกจากนี้ยังพบชั้นของธาตุของธาตุผสมที่ถูกดันเข้าเข้ามาภายในชิ้นงาน

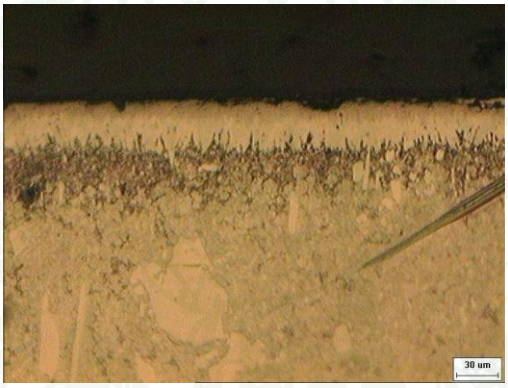
1.1 การเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็ค โดยไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง

จากการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ที่สภาวะอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง โดยไม่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง พบว่า โครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นชั้นเคลือบเป็นเฟสคู่ประกอบไปด้วยชั้น FeB และ Fe_2B ส่วนตำแหน่งตำแหน่งชั้นถัดมาคือ Fe_2B ที่จะมีสีที่อ่อนกว่า นอกจากนี้ยังพบชั้นของธาตุผสมที่ถูกดันเข้ามาภายในชิ้นงาน ตามภาพที่ 11

เมื่อพิจารณาจะพบว่าชั้นเคลือบมีแนวโน้มความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเวลาที่เพิ่มมากขึ้นที่จากสภาวะอุณหภูมิเดียวกัน และค่าความหนาของชั้นเคลือบเท่ากับ 16.83 24.51 และ 32.095 ไมครอน ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 12

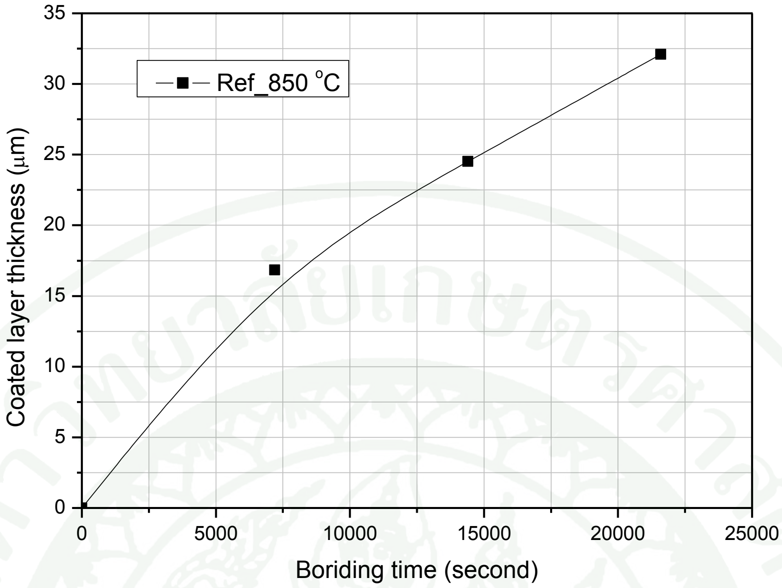
(ก) (ข)



(ง)

ภาพที่ 11 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็นAISI D2 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คแบบไม่ใช้กระแสไฟฟ้าที่สภาวะอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

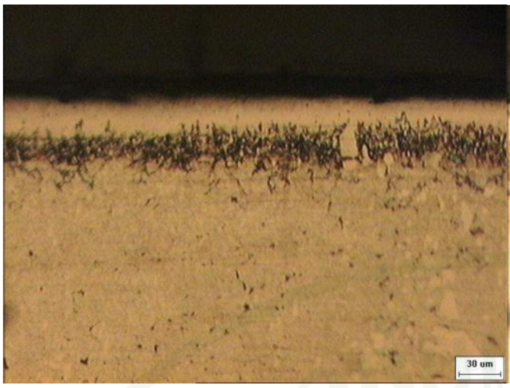


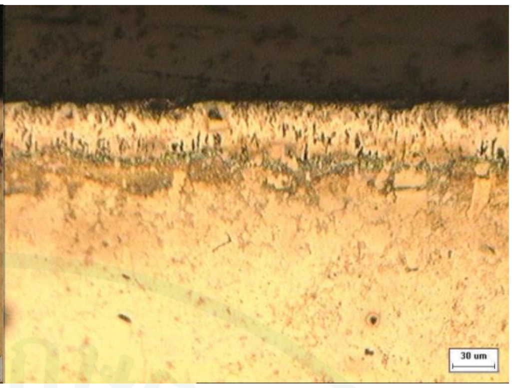
ภาพที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ที่ผ่านกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงแบบแพ็ค แบบไม่ใช้กระแสไฟฟ้าที่สภาวะอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง

1.2 การเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็ค โดยไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่สภาวะอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ6 ชั่วโมง

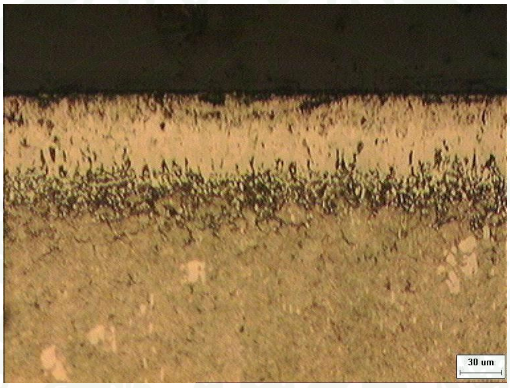
จากการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ที่สภาวะอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง โดยไม่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง พบว่า โครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นชั้นเคลือบเป็นเฟสคู่ประกอบไปด้วยชั้น FeB และ Fe_2B ตามภาพถ่ายที่ 13

เมื่อพิจารณาจะพบว่าชั้นเคลือบมีแนวโน้มความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเวลาที่เพิ่มมากขึ้นที่จากสภาวะอุณหภูมิเดียวกัน และค่าความหนาของชั้นเคลือบเท่ากับ 26.28 37.9 8 และ 51.90 ไมครอน ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 14





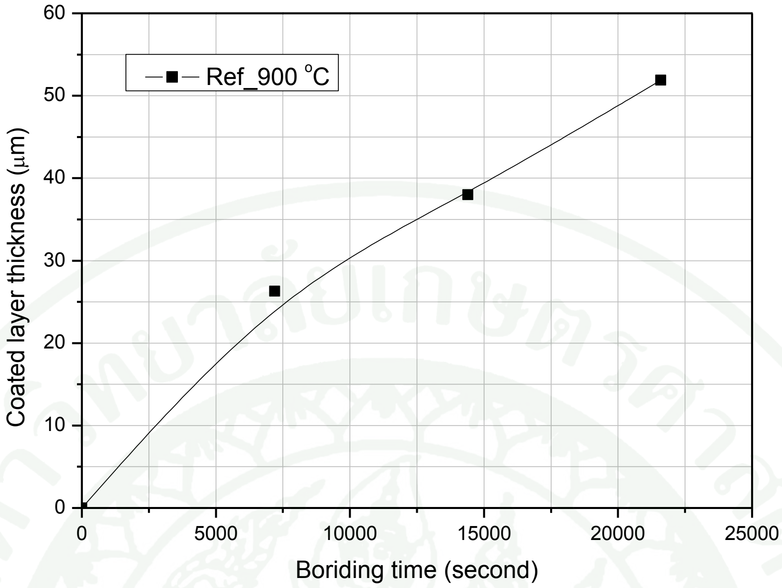
(ก) (ข)



(ค)

ภาพที่ 13 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็นAISI D2 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็ค แบบไม่ใช้กระแสไฟฟ้าที่สภาวะอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



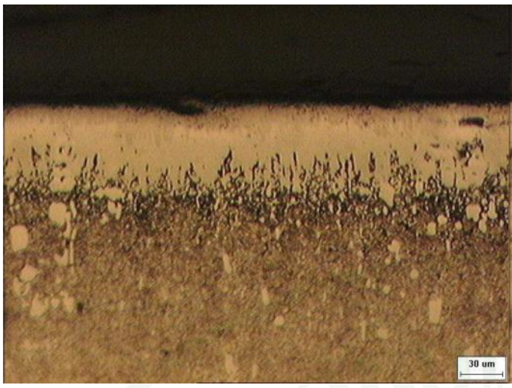
ภาพที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ที่ผ่านกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงแบบแพ็ค แบบไม่ใช้กระแสไฟฟ้าที่สภาวะอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง

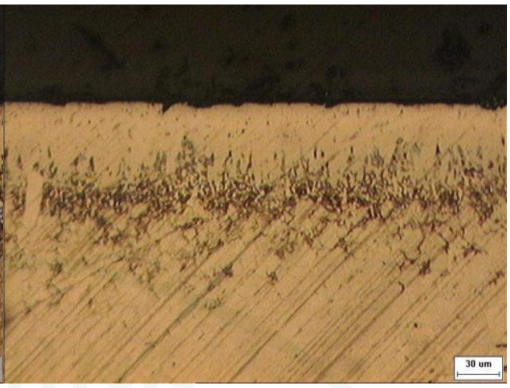
1.3 การเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็ค โดยไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่สภาวะอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง

จากการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ที่สภาวะอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง โดยไม่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง พบว่า โครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นชั้นเคลือบเป็นเฟสคู่ ประกอบไปด้วยชั้น FeB และ Fe_2B ตามภาพถ่ายที่ 15

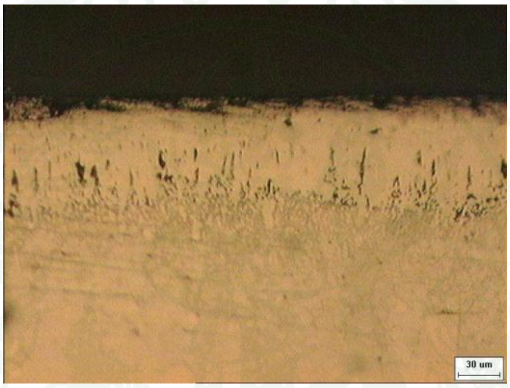
เมื่อพิจารณาจะพบว่าชั้นเคลือบมีแนวโน้มความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเวลาที่เพิ่มมากขึ้นที่จากสภาวะอุณหภูมิเดียวกัน และค่าความหนาของชั้นเคลือบเท่ากับ 41.56 59.12 และ 69.00 ไมครอน ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 16

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์





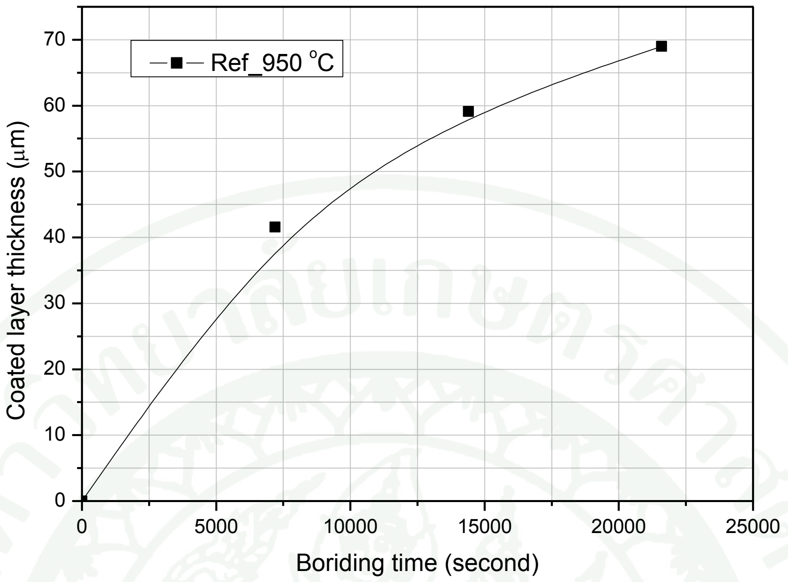
(ก)　(ข)



(ค)

ภาพที่ 15 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็นAISI D2 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็ค แบบไม่ใช้กระแสไฟฟ้าที่สภาวะอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 16 แสดงความสัมพันธ์ของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ที่ผ่านกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงแบบแพ็ค แบบไม่ใช้กระแสไฟฟ้าที่สภาวะอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง

เมื่อสรุปความหนาของชั้นเคลือบจะได้ว่าของการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็ค แบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่สภาวะอุณหภูมิ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมงดังตารางที่ 8

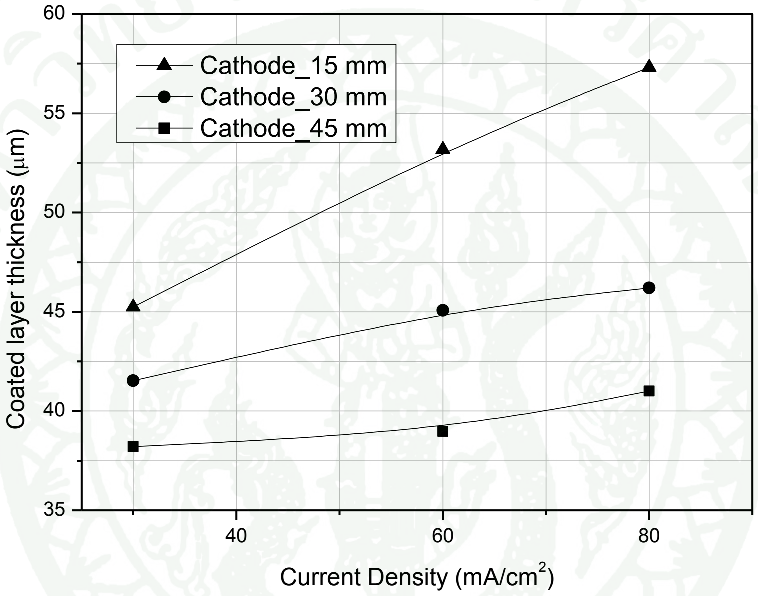
ตารางที่ 8 ความหนาของชั้นเคลือบด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คที่ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง

เวลา(Hr)	ความหนาชั้นเคลือบบอไรด์(μm)		
	850°C	900°C	950°C
2	16.83	26.28	41.56
4	24.51	37.97	59.12
6	32.10	51.90	69.00

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. การเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็ค ที่มีการให้ไฟฟ้ากระแสตรง(พิจารณาจากชิ้นงานแคโทดและระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด)

2.1 ผลของขนาดไฟฟ้ากระแสตรงต่อความหนาชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ที่สภาวะอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



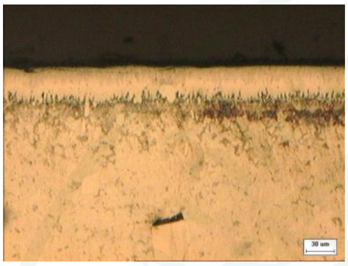
ภาพที่ 17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบหลังผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็ค ที่สภาวะอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 30 60 และ 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร ที่ระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร **:**

เมื่อพิจารณาจะพบว่าเมื่อ มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ตั้งแต่ 30 60 และ 80 แอมแปร์ ความหนาของชั้นเคลือบมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามขนาดของไฟฟ้ากระแสตรงที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร จึงเป็นชั้นเคลือบที่มีความหนามากที่สุดในทุกๆสภาวะการทดลองและพบว่าระยะห่างระหว่างขั้วที่ 15 มิลลิเมตรสามารถให้ความหนาที่สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาที่ระยะห่างระหว่างขั้วที่ 30 และ 45 มิลลิเมตร ดังนั้นในการทดลองการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิงด้วยวิธี

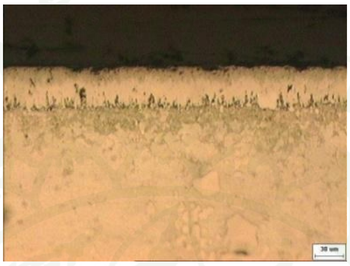
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แพ็ค ที่มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร ในระหว่างกระบวนการเคลือบผิวในสภาวะการทดลองต่อไปตามภาพที่ 17

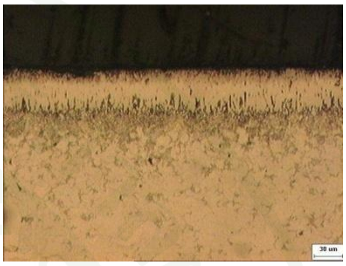
2.2 ผลของการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คที่สภาวะอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส



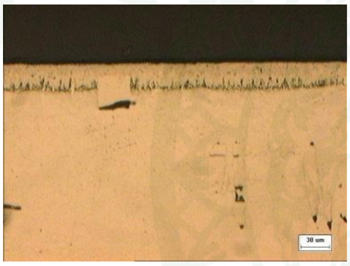
850 °C 2 Hr (15mm)



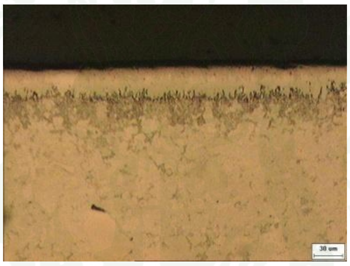
850 °C 4 Hr (15mm)



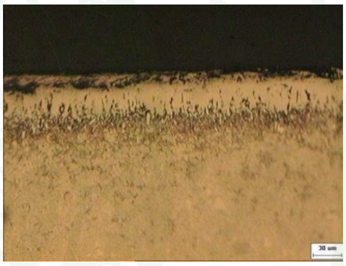
850 °C 6 Hr (15mm)



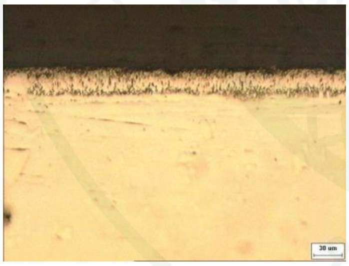
850 °C 2 Hr (30mm)



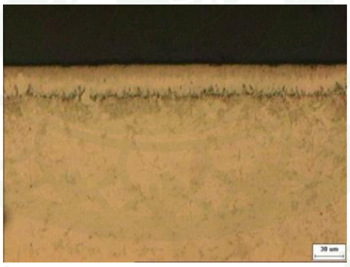
850 °C 4 Hr (30mm)



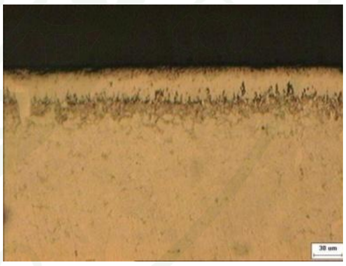
850 °C 6 Hr (30mm)



850 °C 2 Hr (45mm)



850 °C 4 Hr (45mm)

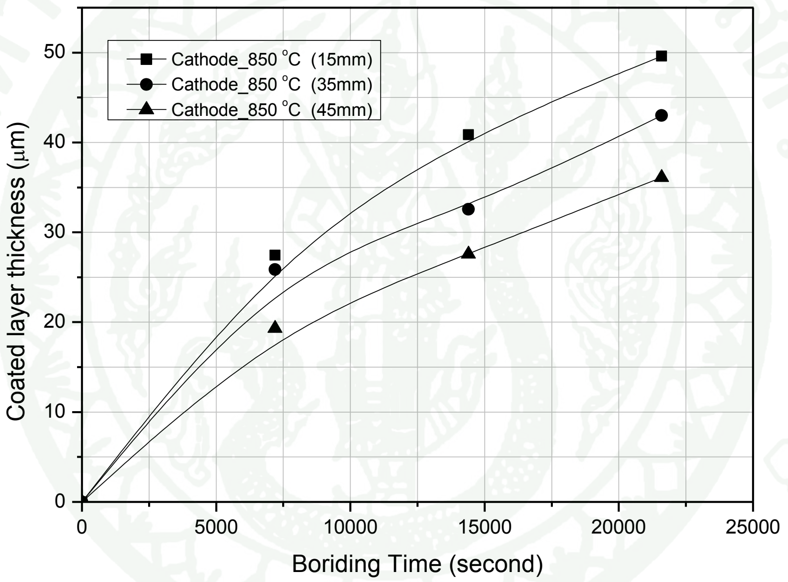


850 °C 6 Hr (45mm)

ภาพที่ 18 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็ค ที่มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร ที่สาภาวะอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลาตั้งแต่ 2 4 และ 6 ชั่วโมง โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วตั้งแต่ 15 30และ 45 มิลลิเมตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพชั้นเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ที่ สภาวะอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง โดยให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร ในขณะเคลือบผิวมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคและความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาตามภาพที่ 18 และ 19 พบว่า โครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นชั้นเคลือบเป็น เฟสคู่ ประกอบไปด้วยชั้น FeB และ Fe_2B เมื่อพิจารณาชั้นเคลือบ FeB จะมีสีที่เข้มกว่าและจะพบที่ตำแหน่งบริเวณผิวชั้นนอกสุด ส่วนตำแหน่งตำแหน่งชั้นถัดมาคือ Fe_2B ที่จะมีสีที่อ่อนกว่า นอกจากนี้ยังพบชั้นของธาตุผสมที่ถูกดันเข้ามาภายในชิ้นงาน



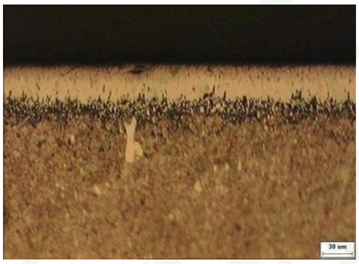
ภาพที่ 19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบหลังผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็ค ที่สภาวะอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลาตั้งแต่ 2 4 และ 6 ชั่วโมง แพ็ค ที่มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร ที่ระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร .

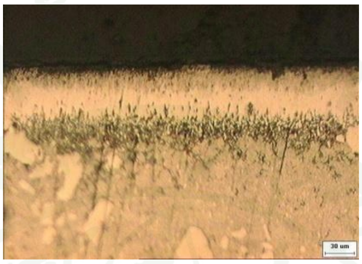
เมื่อพิจารณาความหนา ของชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานได้ พบว่าชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดจากกระบวนการบอไรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 มิลลิเมตร มีความหนา 27.46 40.87 49.59 ไมครอน ตามลำดับ ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 30 มิลลิเมตร มีความหนา 25.85 32.55 และ 43.01

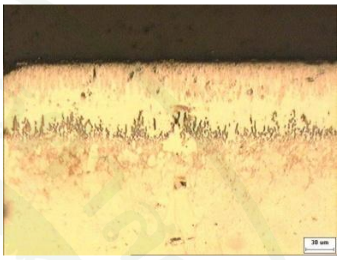
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

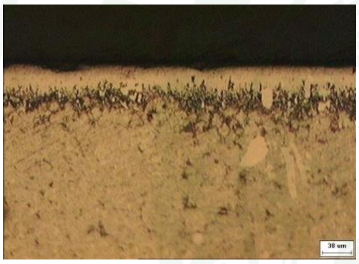
ไมครอนตามลำดับ และที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 45 มิลลิเมตร มีความหนา 19.31 27.57 และ 36.09 ไมครอน ตามลำดับ

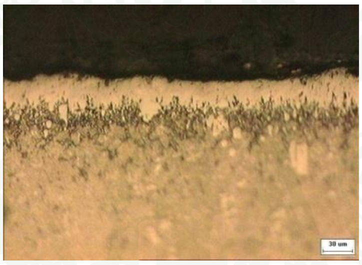
2.3 ผลของการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คที่สภาวะอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

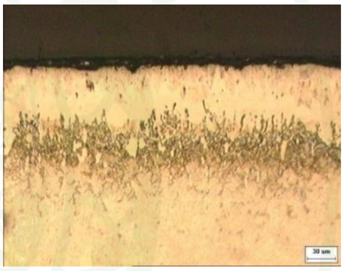

900 ^{o}C 2 Hr (15mm)

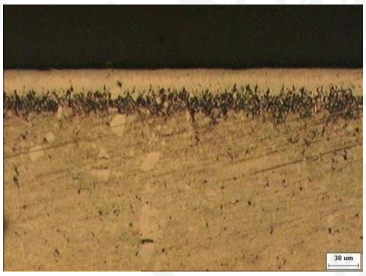

900 ^{o}C 4 Hr (15mm)

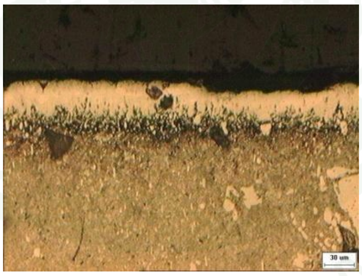

900 ^{o}C 6 Hr (15mm)

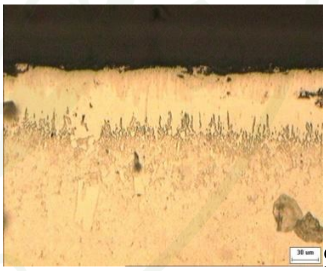

900 ^{o}C 2 Hr (30mm)


900 ^{o}C 4 Hr (30mm)


900 ^{o}C 6 Hr (30mm)


900 ^{o}C 2 Hr (45mm)

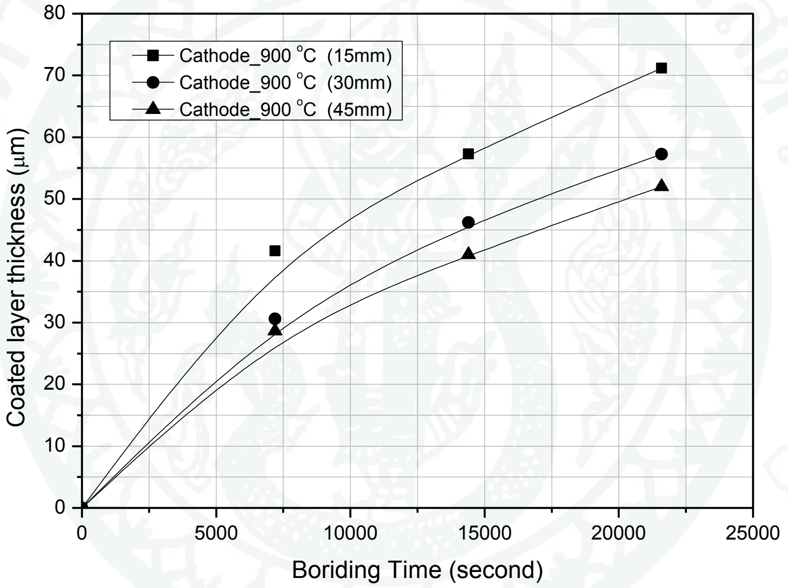

900 ^{o}C 4 Hr (45mm)


9

00 ^{o}C 6 Hr (45mm)

ภาพที่ 20 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็ค แพ็ค ที่มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร ที่สาภาวะอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลาตั้งแต่ 2 4 และ 6 ชั่วโมง โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วตั้งแต่ 15 30 และ 45 มิลลิเมตร

ภาพชั้นเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ที่สภาวะอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง โดยให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร ในขณะเคลือบผิวมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคและความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาตามภาพที่ 20 และ 21 พบว่า โครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นชั้นเคลือบเป็นเฟสคู่ ประกอบไปด้วยชั้น FeB และ Fe_2B เมื่อพิจารณาชั้นเคลือบ FeB จะมีสีที่เข้มกว่าและจะพบที่ตำแหน่งบริเวณผิวชั้นนอกสุด ส่วนตำแหน่งตำแหน่งชั้นถัดมาคือ Fe_2B ที่จะมีสีที่อ่อนกว่า นอกจากนี้ยังพบชั้นของธาตุผสมที่ถูกดันเข้ามาภายในชิ้นงาน

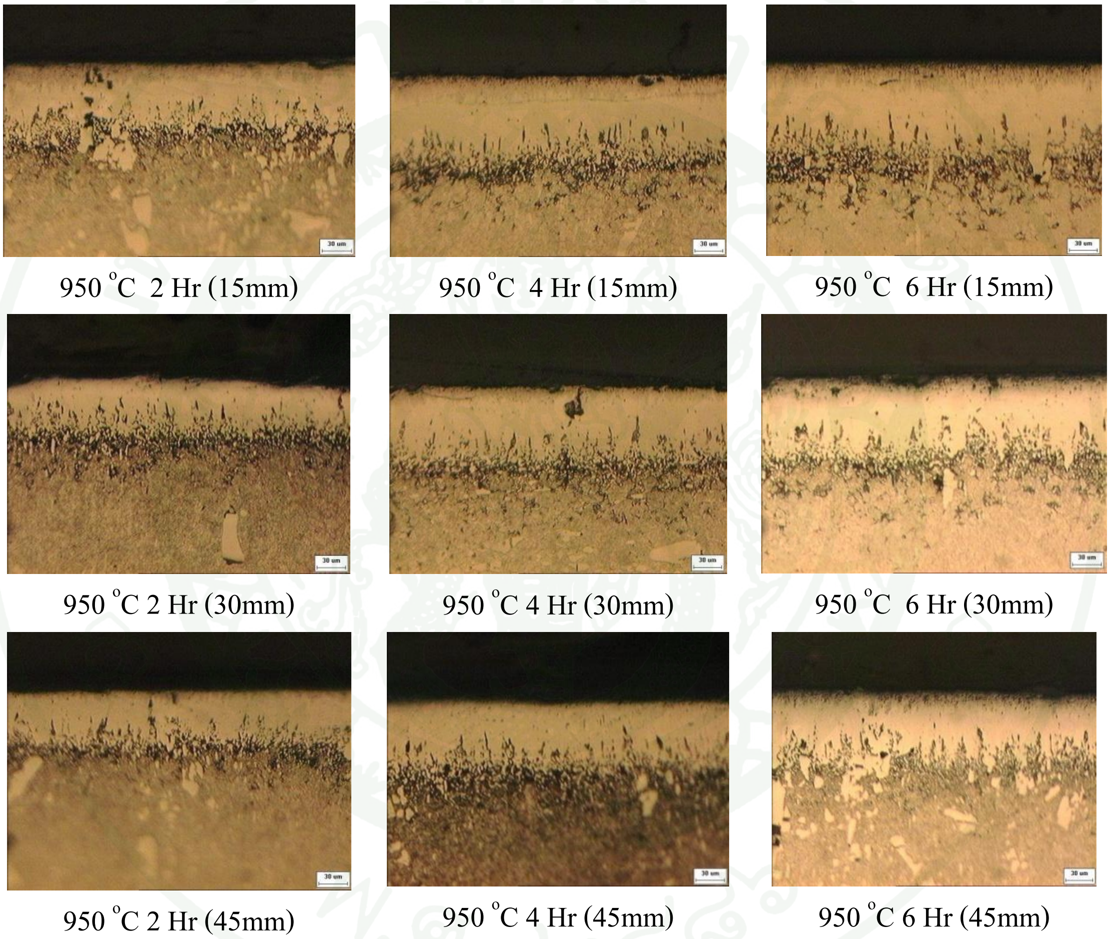


ภาพที่ 21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบหลังผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็ค ที่สภาวะอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลาตั้งแต่ 2 4 และ 6 ชั่วโมง แพ็ค ที่มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร ที่ระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร

เมื่อพิจารณาความหนา ของชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานได้ พบว่าชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดจากกระบวนการบอไรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 มิลลิเมตร มีความหนา 41.60 57.31 และ 71.16ไมครอน ตามลำดับ ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 30 มิลลิเมตร มีความหนา 30.61 46.20 และ 57.27

ไมครอนตามลำดับ และที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 45 มิลลิเมตร มีความหนา 28.67 41.00 และ 52.00 ไมครอน ตามลำดับ

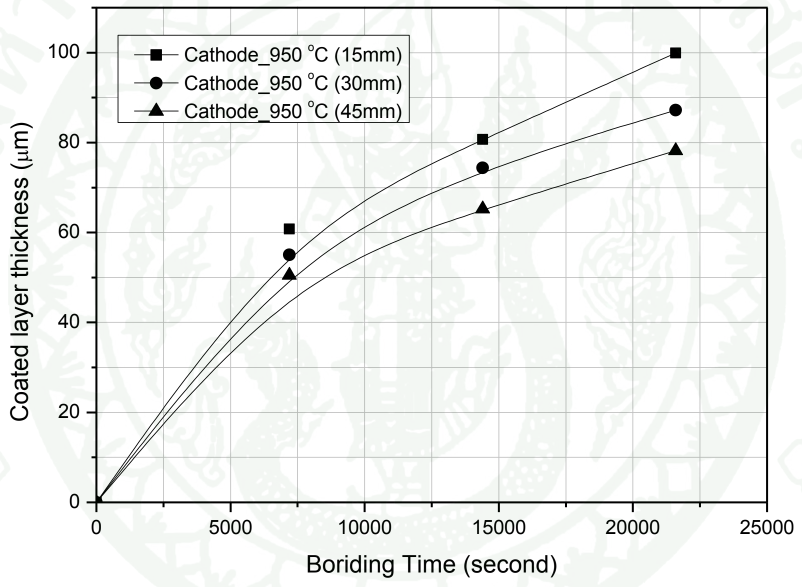
2.4 ผลของการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คที่สภาวะอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 22 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็ค แพ็ค ที่มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร ที่สาภาวะอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลาตั้งแต่ 2 4 และ 6 ชั่วโมง โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วตั้งแต่ 15 30 และ 45 มิลลิเมตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพชั้นเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ที่ สภาวะอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง โดยให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร ในขณะเคลือบผิวมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคและความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาตามภาพที่ 22 และ 23 พบว่า โครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นชั้นเคลือบเป็นเฟสคู่ ประกอบไปด้วยชั้น FeB และ Fe_2B เมื่อพิจารณาชั้นเคลือบ FeB จะมีสีที่เข้มกว่าและจะพบที่ตำแหน่งบริเวณผิวชั้นนอกสุด ส่วนตำแหน่งตำแหน่งชั้นถัดมาคือ Fe_2B ที่จะมีสีที่อ่อนกว่า นอกจากนี้ยังพบชั้นของธาตุผสมที่ถูกดันเข้ามาภายในชิ้นงาน



ภาพที่ 23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบหลังผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็ค ที่สภาวะอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลาตั้งแต่ 2 4 และ 6 ชั่วโมง ที่มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร ที่ระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร

เมื่อพิจารณาความหนา ของชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานได้ พบว่าชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดจากกระบวนการบอไรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 มิลลิเมตร มีความหนา 60.80 80.72และ 99.90 ไมครอน ตามลำดับ ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 30 มิลลิเมตร มีความหนา 55.03 74.35 และ 87.19

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ไมครอนตามลำดับ และที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 45 มิลลิเมตร มีความหนา 50.47 65.24 78.19 ตามลำดับ

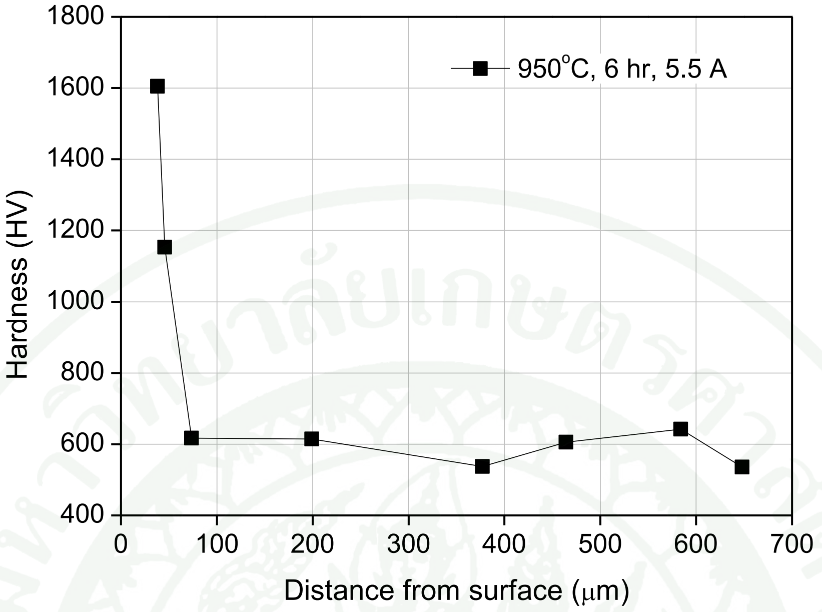
ตารางที่ 9 ความหนาของชั้นเคลือบด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คที่ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ที่มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร

เวลา (hr)	ความหนาชั้นเคลือบ(μm)								
	$850^{\circ}C$			$900^{\circ}C$			$950^{\circ}C$		
	15mm	30mm	45mm	15mm	30mm	45mm	15mm	30mm	45mm
2	27.46	25.85	19.31	41.60	30.61	28.67	60.80	55.03	50.47
4	40.87	32.55	27.57	57.31	46.20	41.00	80.72	74.35	65.24
6	49.59	43.01	36.09	71.16	57.27	52.00	99.90	87.19	78.19

3 **ลักษณะความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิง**

เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และมีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตรมาทดสอบความแข็งที่ตำแหน่งต่างๆจากบริเวณผิวลึกเข้าไปในเนื้อชิ้นงาน พบว่าชิ้นงานมีความแข็งที่ผิวสูง ประมาณ 1600 HV ซึ่งเป็นความแข็งของชั้นเคลือบบอไรด์ FeB และ Fe_2B และค่าความแข็งจะลดลงมาเมื่อทดสอบความแข็งในระยะที่ลึกเข้าไปในชิ้นงานมากขึ้นและค่าความแข็งจะค่อนข้างคงที่เมื่อถึงระยะความลึกที่เป็นโลหะเนื้อพื้นของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ซึ่งมีค่าความแข็งประมาณ 600 HVดังแสดงตามภาพที่ 24

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

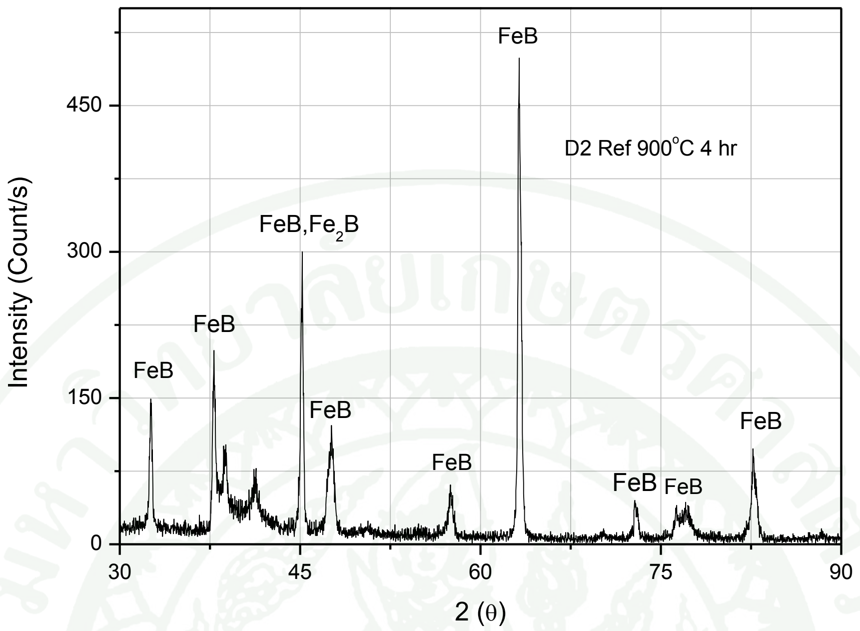


ภาพที่ 24 ค่าความแข็งที่ตำแหน่งต่าง ๆ จากผิวลึกเข้าไปใน โลหะ เนื้อพื้นของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 มิลลิเมตร

4. ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบผิวด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

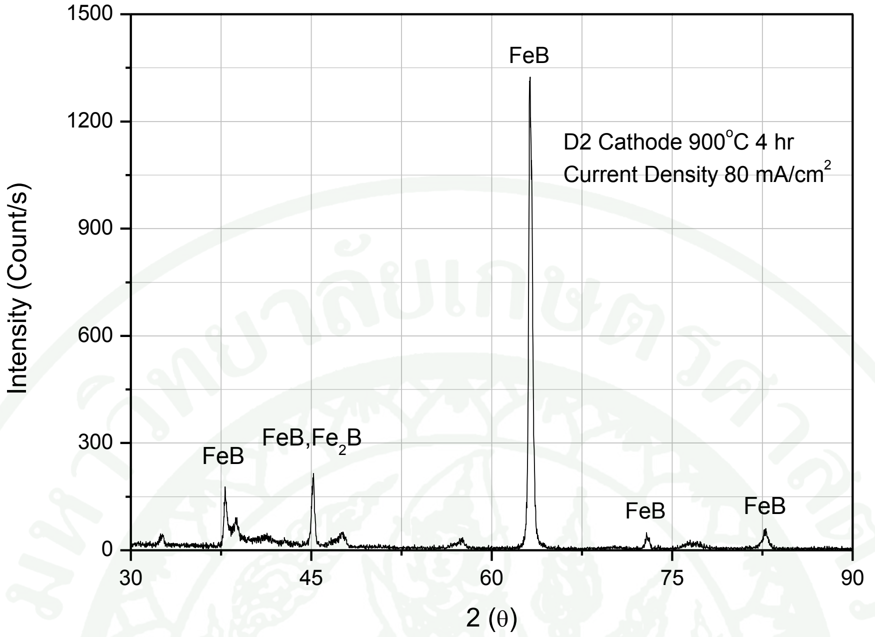
เมื่อพิจารณาจากสีของชั้นเคลือบผิวที่ต่างกันแสดงให้เห็นว่ามีชั้นเคลือบเป็นแบบเฟสคู่ ประกอบไปด้วยชั้น FeB และ Fe_2B อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องมีการยืนยันผลดังกล่าว โดยใช้การพิจารณาจากผลของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยพิจารณาที่มุม 2 θ ตั้งแต่ 30-90 เมื่อตรวจสอบชั้นเคลือบแล้วพบว่าชั้นเคลือบมีสารประกอบของเหล็กบอไรด์ทั้งสองชนิด คือ FeB และ Fe_2B ดังแสดงผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของชั้นเคลือบดังภาพที่ 25 และ 26

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 25 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบด้วยการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของการเคลือบผิวแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่อุณหภูมิ 900 °C เวลา 4 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

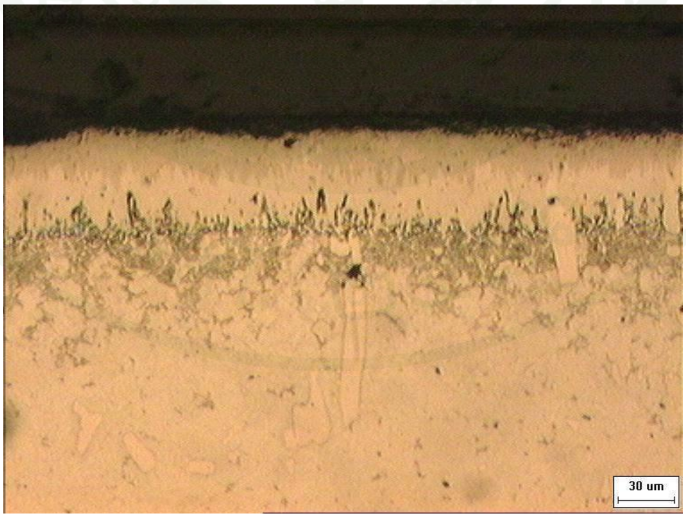


ภาพที่ 26 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบด้วยการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกส์ ของการเคลือบผิว ที่ชิ้นงานขั้วแคโทด ที่มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 900 °C เวลา 4 ชั่วโมง

วิจารณ์

1. ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบบอไรด์ของเล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2

จะพบว่าในทุกสภาวะของการทดลองเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยวิธีบอไรดิงแบบแพ็ค ทั้งอุณหภูมิตั้งแต่ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส และ เวลาตั้งแต่ 2 4 และ 6 ชั่วโมง และแบบที่ไม่ให้กระแสไฟฟ้า และให้กระแสไฟฟ้า ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าตั้งแต่ 15 30 และ 45 มิลลิเมตร ในแต่ละสภาวะเมื่อทำการตัดแบบ ภาคตัดขวาง แล้วทำการถ่ายภาพเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคแล้วพิจารณาพบว่ามีลักษณะของชั้นเคลือบเป็น เฟสคู่ (Double phase) ประกอบไปด้วย FeB และ Fe_2B ทุกสภาวะ สังเกตจากสีจะพบว่า FeB จะอยู่ชั้นนอกสุดและมีสีที่ค่อนข้างเข้ม เมื่อเปรียบเทียบกับ Fe_2B สามารถยืนยันได้จากการตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ตามภาพถ่ายที่ 25 และ 26 ที่อยู่ในชั้นถัดมา ชั้นเคลือบจะมีลักษณะค่อนข้างเรียบ และสม่ำเสมอ เป็นฟันเลื่อยเล็กน้อยโดยจะอธิบายพฤติกรรมลักษณะของการเกิดชั้นเคลือบที่ได้ตามภาพที่ 27 เมื่อสังเกตจะพบว่าบริเวณรอยต่อของชั้นเคลือบ มี ลักษณะค่อนข้างเรียบ ไม่มีลักษณะเป็นฟันเลื่อย มีลักษณะค่อนข้างเรียบและสม่ำเสมอ และมีลักษณะของชั้นเคลือบเป็นเฟสคู่ ประกอบไปด้วย FeB และ Fe_2B ในทุกๆสภาวะ

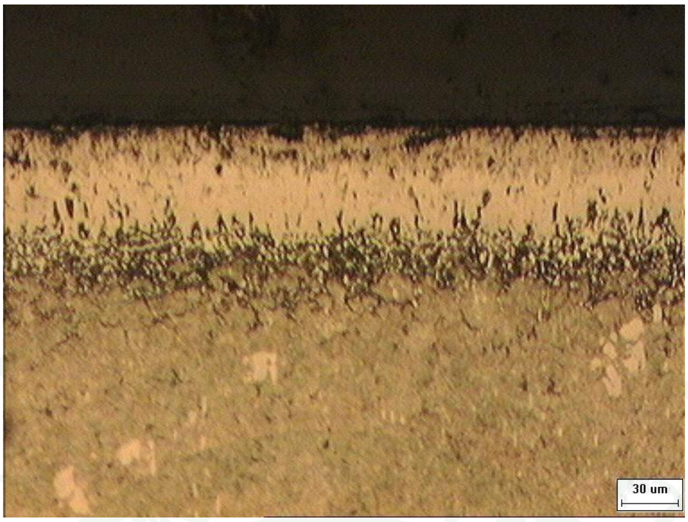


ภาพที่ 27 ภาพโครงสร้างจุลภาคของ เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็ค ที่มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 เป็นเหล็กกล้าผสมสูง ดังนั้นจึงเป็นเหล็กที่ค่อนข้างจะมีธาตุผสมสูงมาก มีธาตุผสมมากกว่า 10 %ได้แก่ ธาตุโครเมี่ยม โมลิบดีนัม และวานาเดียม โดยมีธาตุโครเมี่ยมคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสูงถึง 10 - 12% ธาตุพวกนี้มีผลเป็นอย่างมากต่อชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นและเป็นตัวหลักในการชะลอการเกิดชั้นเคลือบเนื่องมาจากการ ก่อตัวของธาตุผสมส่งผลให้ธาตุผสมขัดขวางการแพร่ของอะตอมโบรอน นอกจากนี้ลักษณะของชั้นเคลือบบอไรด์ของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 พบว่าเมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงมาทำการตัดแบบภาคตัดขวางแล้วทำการถ่ายภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง พบว่าบริเวณระหว่างชั้นเคลือบและโลหะเนื้อพื้นมีลักษณะที่ค่อนข้างเรียบและสม่ำเสมอ เนื่องมากจากการที่มีธาตุผสมโครเมี่ยมที่สูงจะส่งผลให้อะตอมธาตุเหล่านี้จะขัดขวางหรือชะลอการแพร่ของอะตอมโบรอนให้ช้าลงและทำให้ชั้นเคลือบบอไรด์ที่ได้มีลักษณะที่ค่อนข้างเรียบและสม่ำเสมอ เช่นเดียวกับ โมลิบดีนัมและวานาเดียม นอกจากธาตุผสมเหล่านี้จะทำให้ลักษณะของชั้นเคลือบค่อนข้างเรียบและสม่ำเสมอแล้วเมื่ออะตอมของโบรอนแพร่เข้ามาในโลหะเนื้อพื้นแล้วจะพยายามแทรกตัวผ่านธาตุผสมที่กระจายตัวอยู่ในโลหะเนื้อพื้นเพื่อเกิดเป็นชั้นเคลือบบอไรด์ เพราะเหตุนี้จึงทำให้ธาตุผสมที่อยู่ในโลหะเนื้อพื้นที่ถูกแทนที่ด้วยอะตอมโบรอนก็จะถูกดันลึกเข้ามาภายในโลหะเนื้อพื้น เกิดเป็นบริเวณที่เรียกว่า ทรานซิชันโซน (Transition zone) ที่เป็นบริเวณที่อยู่ของธาตุผสมที่ถูกดันเข้าภายในโลหะเนื้อพื้น (Davis, 2002)ตามภาพที่ 28

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 28 ภาพโครงสร้างจุลภาคของ เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คโดยไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

ชั้นเคลือบชนิด เฟสคู่ (Double phase) ที่ประกอบไปด้วย FeB และ Fe_2B และจะพบชั้นเคลือบแบบชนิดเฟสคู่นี้ อยู่ทุกๆสภาวะของการทดลองจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้ในระหว่างกระบวนการบอไรดิงมีจะส่งผลไปถึงลักษณะของชั้นเคลือบที่ได้เป็นเฟสคู่(Double phase) ประกอบไปด้วย FeB และ Fe_2B อิทธิพลนี้สามารถอธิบายได้จากขั้นตอนของการเกิดชั้นเคลือบบอไรด์ดังต่อไปนี้

ระยะที่ 1 คือช่วงที่เมื่อให้พลังงานความร้อนไปจนถึงจุดที่ผงบอไรด์ทำปฏิกิริยาและสามารถที่จะแตกตัวเป็นอะตอมโบรอน แล้วแพร่เข้าไปในโลหะเนื้อพื้น จับกับเหล็กที่เป็นโลหะเนื้อพื้นในช่วงนี้จะเกิดเป็น ชั้นเคลือบ Fe_2B เนื่องมาจากการที่สามารถจับกับอะตอมของโลหะเนื้อพื้นที่มีอยู่จำนวนมากได้ง่ายแบบ 2 :1 (อะตอมโบรอน 1 อะตอม สามารถจับกับอะตอมของโลหะเนื้อพื้นได้ถึง 2 อะตอม) จึงทำให้เกิดเป็นลักษณะชั้นเคลือบ Fe_2B

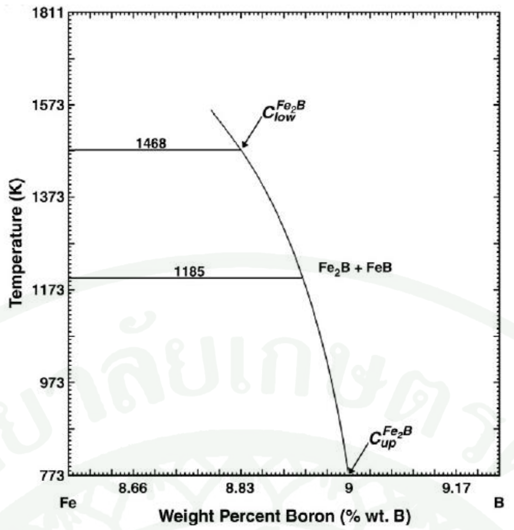
ระยะที่ 2 จะเริ่มเกิด ชั้นเคลือบ FeB เป็นผลมากจากการที่ อะตอมโบรอนบริเวณรอบโลหะเนื้อพื้นมีความเข้มข้นสูง และภายในโลหะเนื้อพื้นมีชั้นเคลือบของ Fe_2B จึงทำให้เริ่มมีการจับของอะตอมโบรอนแบบ 1 :1 (อะตอมโบรอน 1 อะตอมสามารถจับกับโลหะเนื้อพื้นได้ 1 อะตอม) บริเวณที่ผิวของชิ้นงานจึงเกิดเป็นชั้นเคลือบ FeB และชั้นถัดลึกเข้ามาคือชั้นของ Fe_2B

ระยะที่ 3 เป็นช่วงที่จะเกิดทั้งชั้น FeB และ Fe_2B จะมีความหนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจากการที่ความเข้มข้นของอะตอมโบรอนที่สูงจะแพร่เข้าไปในบริเวณที่ความเข้มขนของอะตอมโบรอนต่ำ โดยอัตราส่วนของชั้น FeB และ Fe_2B จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอะตอมโบรอน

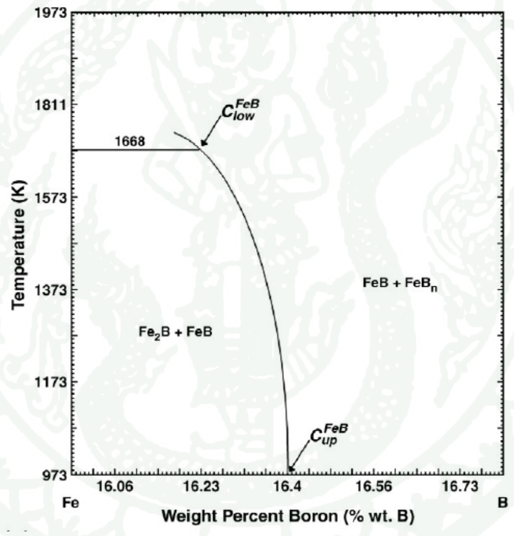
2. อิทธิพลของอุณหภูมิการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็ค ที่มีผลต่อลักษณะและความหนาของชั้นเคลือบและเวลา

จากผลการทดลอง พบว่าในทุกสภาวะของการทดลองเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยวิธีบอไรดิงแบบแพ็ค ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส ที่เวลาตั้งแต่ 2 4 และ 6 ชั่วโมง ทั้งแบบที่ไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงและให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าตั้งแต่ 15 30 และ 45มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาชั้นเคลือบผิวจะพบว่าอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในระหว่างกระบวนการบอไรดิงจะส่งผลไปถึงลักษณะของชั้นเคลือบที่ได้เป็น เฟสคู่ (Double phase) ประกอบไปด้วย FeB และ Fe_2B ที่มีอัตราส่วนของ FeB และ Fe_2B ที่ไม่เท่ากันเมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาในกระบวนการเคลือบผิวที่แตกต่างไป เมื่อพิจารณาจากแผนภาพ การเกิดเฟสของเหล็กกับโบรอน ตามภาพที่ 28 (Fe-B Phase diagram) การเคลือบผิวบอไรดิงเพื่อให้เกิดชั้นเคลือบบอไรด์ FeB และ Fe_2B หากเราใช้อุณหภูมิที่สูงจะสามารถเกิดชั้นเคลือบได้เร็วกว่ากระบวนการที่ใช้อุณหภูมิต่ำ ทำให้ได้ชั้นเคลือบที่มี ความหนามากว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ระยะเวลาในกระบวนการเคลือบผิวที่เท่ากัน และตามหลักของทฤษฎีการแพร่แล้วยิ่งใช้อุณหภูมิที่สูงจะส่งผลให้อะตอมโบรอนแพร่เข้าสู่โลหะเนื้อพื้นได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำเนื่องมาจากที่อุณหภูมิสูงจะทำให้มีพลังงานในการเคลื่อนที่ของอะตอมโบรอนเพิ่มมากขึ้นทำให้สามารถแพร่เข้าสู่โลหะเนื้อพื้นได้เร็วกว่าและเมื่อใช้ระยะเวลาในกระบวนการเคลือบผิวที่มากขึ้น อะตอมโบรอนก็จะแพร่เข้าสู่ชิ้นงานได้มากขึ้นเพราะมีเวลาที่จะใช้ในกระบวนการแพร่เพิ่มมากขึ้นดังนั้นความหนาของชั้นเคลือบจึงเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและเวลาที่เพิ่มมากขึ้น ตามภาพที่ 29

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก)



(ข)

ภาพที่ 29 แผนภาพการเกิดเฟสของเหล็กกับโบรอน (Fe-B Phase diagram) (ก) Fe_2B และ (ข) FeB

ที่มา: Campos-Silva *et al*. (2010)

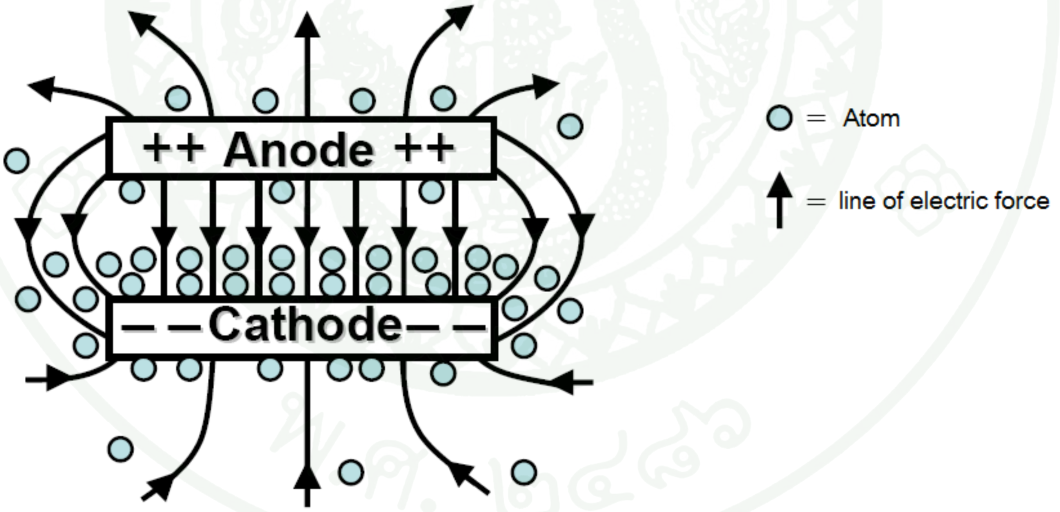
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. อิทธิพลของไฟฟ้ากระแสตรงต่อกระบวนการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็ค

การทดลองเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยวิธีบอไรดิงแบบแพ็ค ทั้งอุณหภูมิตั้งแต่ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส และ เวลาตั้งแต่ 2 4 และ 6 ชั่วโมง และแบบที่ให้กระแสไฟฟ้าและไม่ให้กระแสไฟฟ้า รวมไปถึงระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าตั้งแต่ 15 30 และ 45 มิลลิเมตร (ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร) เนื่องจากไฟฟ้ากระแสตรงที่ให้แก่ชิ้นงานในกระบวนการบอไรดิงนั้น มีผลต่อการเกิดชั้นเคลือบบอไรด์ในสามส่วน คือ ไฟฟ้ากระแสตรงช่วยให้อะตอมโบรอนแพร่ไปยังชิ้นงานได้มากขึ้น เพราะในกระบวนการบอไรดิงที่มีการให้ไฟฟ้าแก่ชิ้นงานที่ทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด เพราะในกระบวนการบอไรดิงที่มีการให้กระแสไฟฟ้าแก่ชิ้นงานที่ทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทดและการทำปฏิกิริยากันของผงบอไรด์ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นอะตอมโบรอนก็จะทำให้ครบวงจรและมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านชิ้นงานได้ซึ่งทิศทางของกระแสไฟฟ้าจะไหลออกจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด โดยที่อะตอมโบรอนที่อยู่รอบบริเวณขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองก็เป็นส่วนหนึ่งของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายใต้ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองด้วยส่งผลให้การแพร่ของอะตอมโบรอนบริเวณรอบขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองถูกควบคุมทิศทางด้วยสนามไฟฟ้าให้แพร่ไปในทิศทางเดียวกันกับการไหลของกระแสไฟฟ้าตามเส้นแรงทางไฟฟ้าของสนามไฟฟ้า (Xie, 2012) และ ทำให้ความเข้มข้นของอะตอมโบรอนที่บริเวณขั้วแคโทดสูงกว่าบริเวณอื่น ตามภาพที่ 30 ซึ่งลักษณะการแพร่ของอะตอมโบรอนที่ถูกควบคุมให้มีทิศทางไปยังขั้วแคโทดซึ่งเป็นชิ้นงานที่ต้องการเคลือบผิวนั้นจะสามารถแพร่ได้ดีกว่าการแพร่ในกระบวนการบอไรดิงแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง เพราะการแพร่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการบอไรดิงแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นการแพร่แบบไร้ทิศทางหรอแบบสุ่มสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในทุกทิศทางจึงมีโอกาสน้อยกว่าที่อะตอมโบรอนจะเคลื่อนที่ไปยังชิ้นงานที่ต้องการเคลือบผิว ส่วนที่สองคือ เมื่อให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่กระบวนการ หลังจากที่ครบวงจรกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดส่งผลให้บริเวณที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านพลังงานเพิ่มขึ้นจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน พลังงานเสริมนี้เองทำให้ที่บริเวณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเกิดการสั่นของโมเลกุลเกิดปฏิกิริยาทางเคมีให้มีการแตกตัวของอะตอมโบรอนที่ดีขึ้นกว่าบริเวณอื่น แต่สำหรับกระบวนการบอไรดิงแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงจะอาศัยเพียงพลังงานจากความร้อนเพียงอย่างเดียวในการแตกตัวเป็นอะตอมโบรอน จึงไม่ได้รับผมขอพลังงานเสริมนี้ ต่างจากชิ้นงานแคโทดที่ได้รับพลังงานจากความร้อนในเตาและได้พลังงานเสริมจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านทำให้การแตกตัวของอะตอมโบรอนดีกว่าและในส่วนสุดท้ายคือส่วนที่สามเนื่องมาจากการที่อุณหภูมิที่วัดได้ของ

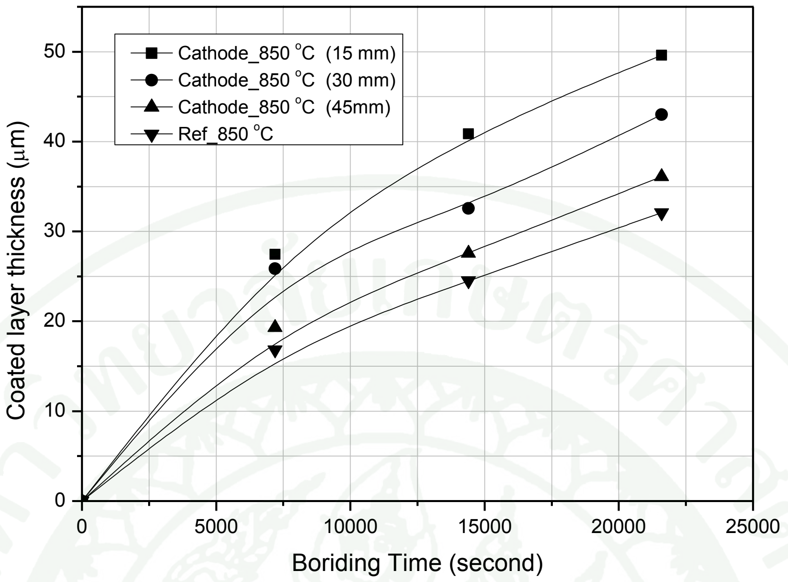
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ชิ้นงานแคโทด และอุณหภูมิของชิ้นงานอ้างอิงในระหว่างกระบวนการเคลือบผิวนั้นมีความแตกต่างไม่มากนัก จึงไม่ควรใช้เป็นประเด็นหลักในการอนุมาน แต่อาจอธิบายได้ว่าอิทธิพลของไฟฟ้ากระแสตรงยังส่งผลไปถึงการสั่นของอะตอมภายในชิ้นงาน (Thermal vibration) ผลกระทบนี้จะส่งผลให้เกิดช่องว่างมากขึ้นภายในชิ้นงาน ตำหนิแบบช่องว่าง (vaccncy defect) ลักษณะจะคล้ายกับการเกิด defect ใน crystal lattice defect ซึ่งตำหนิแบบช่องว่างจะขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ซึ่งการเกิด defect เหล่านี้จะขึ้นอยู่กับพลังงานรวมที่ใช้เพื่อเอาชนะ Barrier energy ให้เกิดเป็น vacancy defect ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและโครงสร้างผลึกของโลหะ (Philip D. Rack, 2013) เมื่อพิจารณาความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้นบนโลหะเนื้อพื้นที่เคลือบผิวด้วยกระบวนการบอไรดิงทั้งแบบให้และไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงโดยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงาน (ชิ้นงานแคโทด) เกิดชั้นเคลือบบอไรด์ที่หนากว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า (ชิ้นงานพื้นอ้างอิง) ในทุกอุณหภูมิและทุกระยะเวลาในการทดลองดังภาพที่ 31



ภาพที่ 30 แสดงการจำลอง เส้นแรงไฟฟ้าระหว่าง ขั้วแคโทดและแอโนดและทิศทางการเคลื่อนที่ของอะตอมโบรอนที่เกิดขึ้นในกระบวนการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 โดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาช่วย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบผิวบอไรดิงแบบแพ็ค ที่สภาวะอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร ที่ระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด 15 30 และ 45 มิลลิเมตรเปรียบเทียบกับ ชิ้นงานอ้างอิงที่ไม่มีการให้กระแสไฟฟ้า

4. อิทธิพลของระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด ต่อกระบวนการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาช่วย

จากผลการทดลองการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาช่วยที่มีระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดและแคโทดต่างกัน โดยมีขนาดของระยะห่างตั้งแต่ขนาด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความหนาของชั้นเคลือบของกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ระยะห่างระหว่างขั้วที่ 15 มิลลิเมตร มีความหนามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาของชั้นเคลือบผิวบอไรด์ที่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ระยะห่างระหว่างขั้วที่มากกว่า (30 และ45 มิลลิเมตร) ในสภาวะการทดลองอุณหภูมิ เวลา และ ขนาดของไฟฟ้ากระแสตรงที่เท่ากัน ดังนั้นระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดของกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงจึงมีอิทธิพลต่อชั้นเคลือบผิวบอไรด์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ที่เกิดขึ้นในการทดลอง เนื่องมาจากทฤษฎีทางไฟฟ้าเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจากขั้วแอโนดไปยังเข้าแคโทดจะส่งผลให้เกิดสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นบริเวณขั้วอิเล็กโทรดตามทฤษฎี สนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นขนาน (ประเจียด ปฐมภาค, 2013) ตามสมการที่ 2

$$E = \frac{V}{D} \tag{2}$$

เมื่อ Vคือความต่างศักย์ระหว่าง ขั้วอิเล็กโทรด เป็น (V) D คือระยะห่างระหว่าง ขั้วอิเล็กโทรดเป็น (m) E คือสนามไฟฟ้ามีหน่วยเป็น V/m หรือ N/C

สมการที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด พบว่ายิ่งมีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดมาก จะส่งผลให้มีขนาดของสนามไฟฟ้าที่น้อยลงทำให้แรงทางไฟฟ้าลดลงตามไปด้วยส่งผลให้อะตอมโบรอนที่เป็นประจุบวกนั้น จะมีแรงกระทำต่อประจุที่น้อยลงตามสมการที่ 3 ชิ้นงานแคโทดที่มีขั้วไฟฟ้าเป็นลบจึงมีแรงกระทำต่อประจุบวก (อะตอมโบรอน) น้อยลง ดังนั้นการเคลื่อนที่ของอะตอมโบรอนที่มีทิศทางเข้าหาขั้วแคโทดตามเส้นแรงทางไฟฟ้าจึงน้อยลงตามไปด้วย ดังนั้นที่ระยะห่างระหว่างขั้วที่ใกล้กว่าการเคลื่อนที่ของอะตอมโบรอนจึงเคลื่อนที่ได้ง่ายกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะห่างระหว่างขั้วที่มากกว่า ในสภาวะการทดลองที่อุณหภูมิ เวลา และ ขนาดของไฟฟ้ากระแสตรงที่เท่ากัน

$$F = qE \tag{3}$$

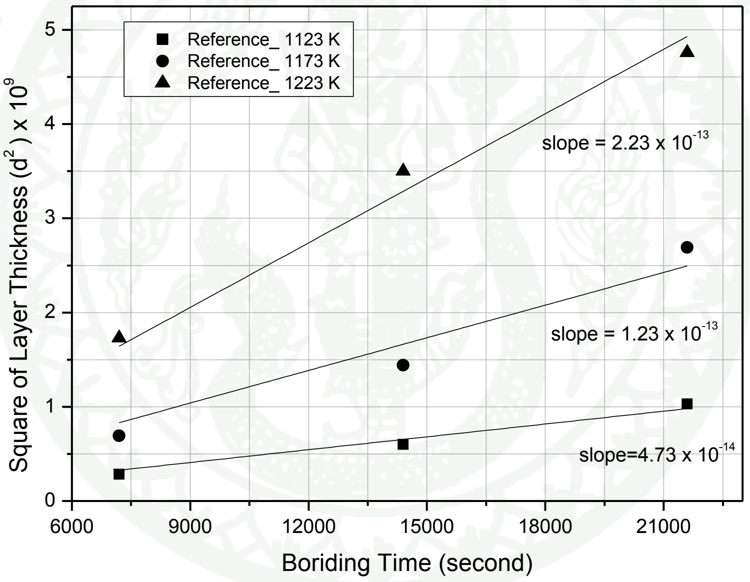
สมการแสดงความสัมพันธ์ของแรงทางไฟฟ้ากับสนามไฟฟฟ้า E คือ สนามไฟฟ้า มีหน่วยเป็น นิวตัน/คูลอมบ์ q คือ ประจุไฟฟ้ามีหน่วยเป็น คูลอมบ์ F คือ แรง มีหน่วยเป็น นิวตัน

อิทธิพลของระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่ส่งผลต่อความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์นั้น สามารถกล่าวได้ว่าเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหนาของชั้นเคลือบเป็นอย่างมากดังนั้นในกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงจึงต้องมีการออกแบบระยะห่างระหว่างขั้วในกระบวนการให้เหมาะสมเพื่อให้ได้ความหนาของชั้นเคลือบที่มากที่สุดในกระบวนการเคลือบผิว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5. จลนพลศาสตร์ของการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิงด้วยวิธีแพ็คแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาช่วย

จากการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็ค โดยไม่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาช่วย ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส ตั้งแต่เวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง เมื่อวัดความหนาของชั้นเคลือบแล้วพิจารณาความหนาของชั้นเคลือบจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาและอุณหภูมิในกระบวนการเพิ่มมากขึ้น เมื่อแสดงความสัมพันธ์กำลังสองของความหนาชั้นเคลือบ



ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสองของความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์และเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบที่ไม่ให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส และที่เวลาตั้งแต่ 2 4 และ 6 ชั่วโมง

ในกลไกการของกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงที่อาศัยหลักการแพร่ของอะตอมโบรอนเข้าไปจับกับโลหะเนื้อพื้น เพื่อเกิดเป็นชั้นเคลือบบอไรด์ ดังนั้นทฤษฎีการแพร่ซึม (Diffusion theory) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบหรือระยะทางการแพร่กับเวลาและ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ความสามารถในการแพร่หรือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในรูปแบบของสมการการแพร่ ดังแสดงในสมการที่ (1)

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (K) จะสัมพันธ์กับอุณหภูมิ (T) และพลังงานกระตุ้น (ActivationEnergy, Q) ตามสมการการแพร่ของ Arrhenius ดังแสดงในสมการ (2)

เมื่อพิจารณาผลการทดลองจาก ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสองของความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์และเวลา ในภาพที่ 32 ซึ่งมีความสอดคล้องกับสมการที่ 1 ทำให้สามารถหาค่าของสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนที่อุณหภูมิต่างๆของกระบวนการบอไรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้าในช่วงของอุณหภูมิที่ทำการทดลองได้ตามตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการบอไรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดลอง

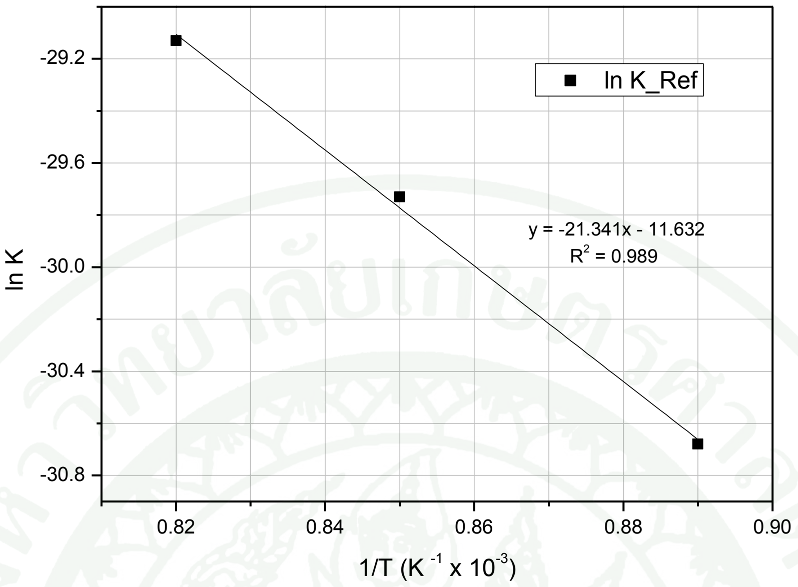
อุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว (เคลวิน)	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่, K (ตารางเมตร/วินาที)
1123 *K*	4.73×10^{-14}
1173 *K*	1.23×10^{-13}
1223 *K*	2.23×10^{-13}

เมื่อจัดรูปสมการที่ (2) ใหม่เกิดเป็นสมการที่ (3) ดังนี้

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

จากสมการที่ 3 สามารถพิจารณาหาค่าพลังงานกระตุ้นและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการบอไรดิงได้จากค่าความชันและจุดตัดแกนของกราฟเส้นตรงที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และส่วนกลับของอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิวของกระบวนการบอไรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้าได้ (ภาพที่ 33) โดยสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ของอะตอมโบรอนและค่าพลังงานกระตุ้นในกระบวนการบอไรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้าได้ 8.87×10^{-6} ตารางเมตร/วินาที และ 177.4 3x 10^{3} จูล/โมล ตามลำดับ ตามตารางที่ 10

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



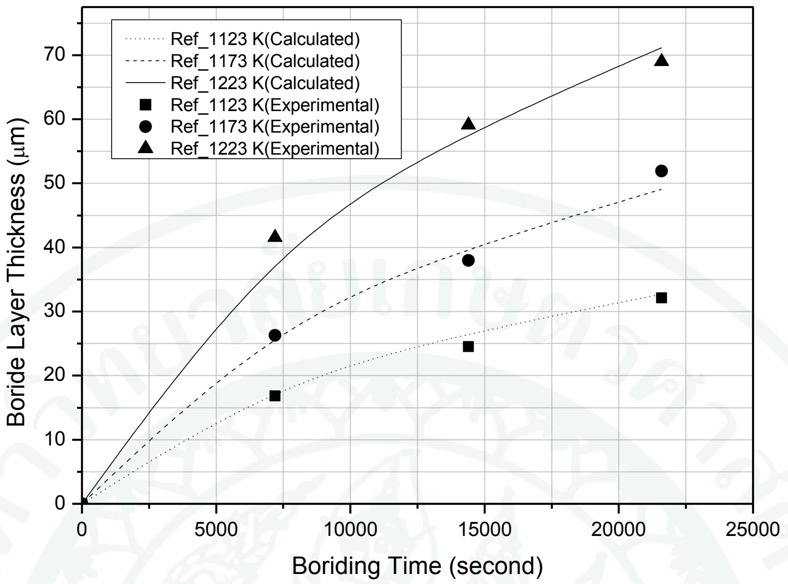
ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (ln K) และส่วนกลับของอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว (1/T) ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบไม่ให้กระแสไฟฟ้า

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่และค่าพลังงานกระตุ้นที่ได้จากการคำนวณ รวมทั้งค่าคงที่ของก๊าซมาแทนลงไปในสมการการแพร่ สมการที่ (3) จะสามารถสร้างสมการทั่วไปที่สามารถทำนายความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่อุณหภูมิและเวลา ต่างๆในกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงแบบไมให้ไฟฟ้ากระแสตรงตามสมการที่ (4)

$$d = (8.87408 \times 10^{-6} t \exp(-21340.5/T))^{0.5} \quad (4)$$

เมื่อสร้างสมการทั่วไปสมการที่ (7) จะสามารถนำมาทำนายค่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ ที่อุณหภูมิและเวลาต่าง เมื่อนำสมการดังกล่าวมาคำนวณจำลองเพื่อหาค่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ในช่วงอุณหภูมิและเวลาที่ทำการทดลองแล้ว นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง พบว่าความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ที่คำนวณได้จากสมการทั่วไปมีค่าใกล้เคียงกับค่าความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ที่ได้จากการทดลองจริงดังแสดงในภาพที่ 34

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 32 การคำนวณความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์แบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงเปรียบเทียบกับความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์จากการทดลองจริงในช่วงอุณหภูมิและเวลาที่ทำการทดลอง

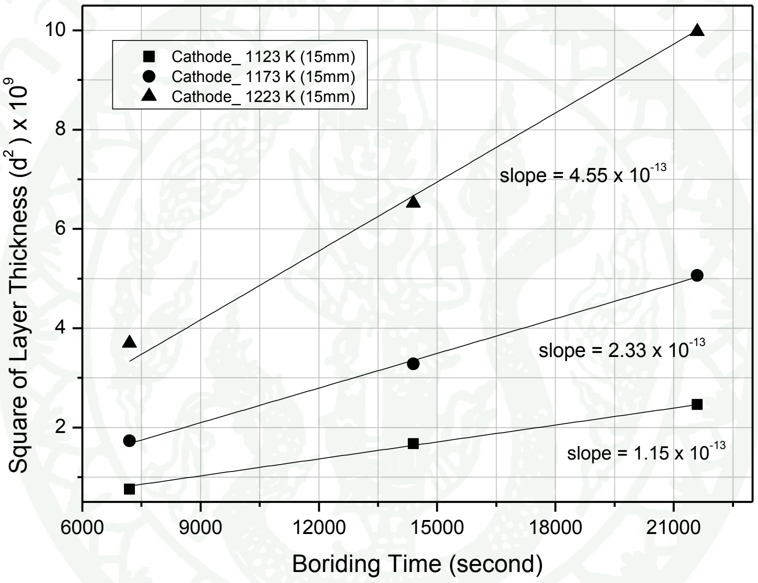
จากสมการทั่วไปที่ (4) จะสามารถนำมาใช้เพื่อทำนายค่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่จะเกิดขึ้นได้นั้น เมื่อนำสมการดังกล่าวมาคำนวณหาค่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ในช่วงอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทดลองแล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองจริง พบว่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่คำนวณได้จากสมการทั่วไปมีค่าใกล้เคียงกับค่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่ได้จากการทดลองดังแสดงในภาพที่ 34

6.จลนพลศาสตร์ของการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิงด้วยวิธีแพ็คแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาช่วย

6.1 จลนพลศาสตร์ของกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 มิลลิเมตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็ค ที่มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร เข้ามาช่วย ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส ตั้งแต่เวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 มิลลิเมตร พบว่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาและอุณหภูมิของกระบวนการเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสองของความหนาชั้นเคลือบบอไรด์กับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆของกระบวนการนี้ พบว่ามีความสัมพันธ์กันเชิงเส้นตรงดังแสดงในภาพที่ 35



ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสองของความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์และเวลาที่ใช้ในการเคลือบโลหะเนื้อพื้นด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 มิลลิเมตร

เมื่อพิจารณาผลการทดลองในภาพที่ 35 ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 4 จึงสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนที่อุณหภูมิต่างๆของกระบวนการบอไรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้าได้จากความชันของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสองของความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์และเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว ดังแสดงค่าสัมประสิทธิ์แพร่ของอะตอมโบรอนที่อุณหภูมิต่างๆ ดังตารางที่ 11

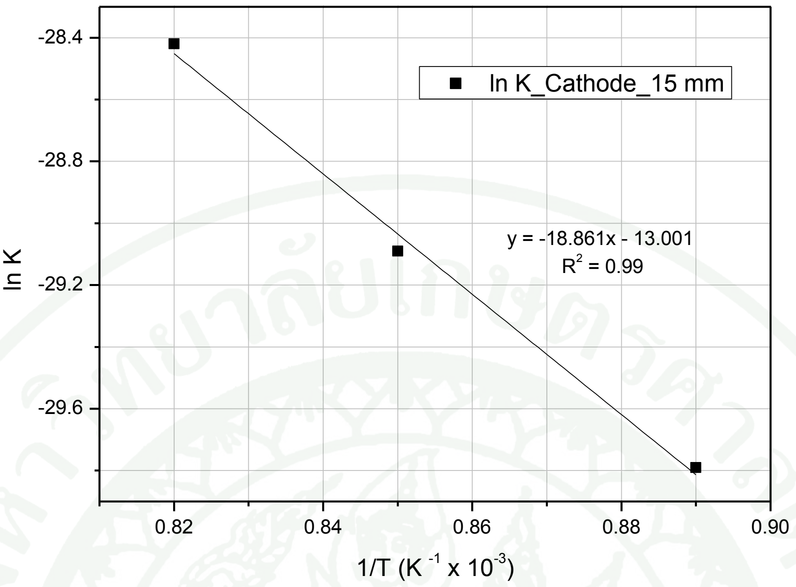
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 11 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการบอไรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 มิลลิเมตร

อุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว (เคลวิน)	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่, K (ตารางเมตร/วินาที)
1123 *K*	1.15×10^{-13}
1173 *K*	2.33×10^{-13}
1223 *K*	4.55×10^{-13}

จากสมการที่ 3 สามารถพิจารณาค่าพลังงานกระตุ้นและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 มิลลิเมตร ได้จากค่าความชันและจุดตัดแกนของกราฟเส้นตรงที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และส่วนกลับของอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการเคลือบผิวได้ โดยสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ของอะตอมโบรอนและค่าพลังงานกระตุ้นในกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงได้เท่ากับ 2.25767×10^{-6} ตารางเมตร/วินาที และ 156.8115×10^{3} จูล/โมล ตามลำดับ ตามภาพที่ 36

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



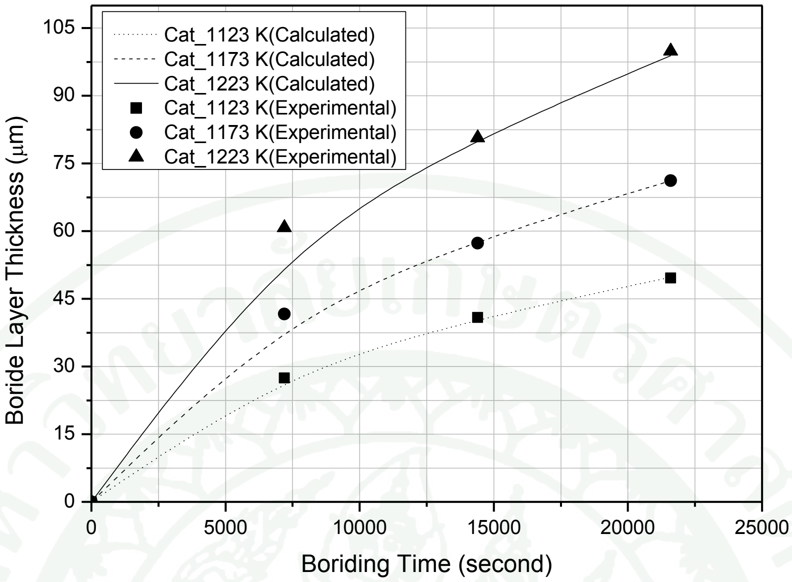
ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (ln K) และส่วนกลับของอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว (1/ T) ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้า ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 มิลลิเมตร

เมื่อนำค่าต่างๆทั้งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอน ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่และค่าพลังงานกระตุ้นที่ได้จากการคำนวณ รวมทั้งค่าคงที่ของก๊าซมาแทนลงไปในสมการการแพร่ก็สามารถสร้างสมการทั่วไปที่ใช้สำหรับการทำนายความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในการเคลือบผิวด้วยกระบวนการบอไรดิงโดยวิธีแพ็คแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 มิลลิเมตร ดังสมการที่ 5

$$d = (2.25767 \times 10^{-6} t \exp(-18861.1 / T))^{0.5} \qquad (5)$$

จากการสร้างสมการทั่วไป (สมการที่ 5) ที่สามารถสร้างนำมาใช้ทำนายความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่จะเกิดขึ้นได้นั้น เมื่อนำสมการดังกล่าวมาคำนวณหาค่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ในช่วงอุณหภูมิและเวลาที่ทำการทดลองแล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงพบว่าความหนาเคลือบบอไรด์ที่คำนวณได้จากสมการทั่วไปมีค่าใกล้เคียงกับค่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่ได้จากการทดลองจริงดังแสดงในภาพที่ 37

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

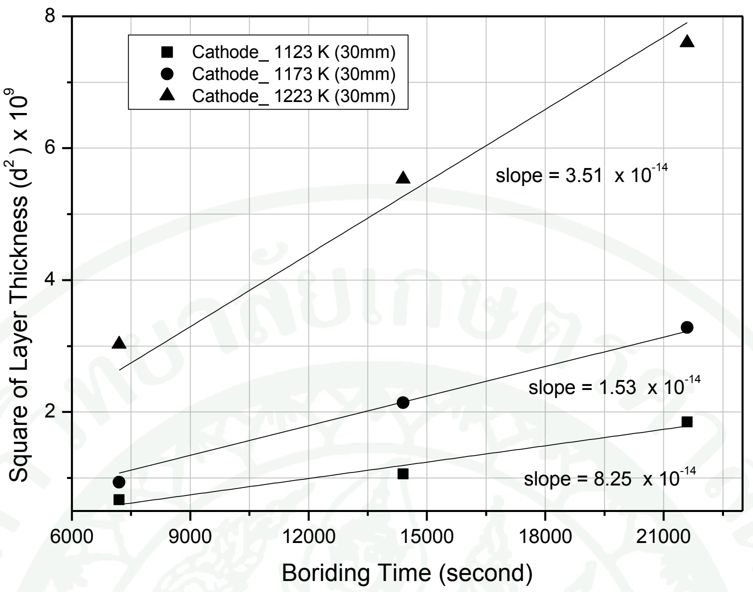


ภาพที่ 35 การคำนวณความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์จากกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 มิลลิเมตรเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงในช่วงอุณหภูมิและเวลาต่างที่ทำการทดลอง

6.2 จลนพลศาสตร์ของกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 30 มิลลิเมตร

จากการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็ค ที่มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร เข้ามาช่วย ที่อุณหภูมิ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส ตั้งแต่เวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 30 มิลลิเมตร พบว่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาและอุณหภูมิของกระบวนการเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสองของความหนาชั้นเคลือบบอไรด์กับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ ของกระบวนการนี้ พบว่ามีความสัมพันธ์กันเชิงเส้นตรงดังแสดงในภาพที่ 38

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสองของความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์และเวลาที่ใช้ในการเคลือบ โลหะเนื้อพื้น ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 30 มิลลิเมตร

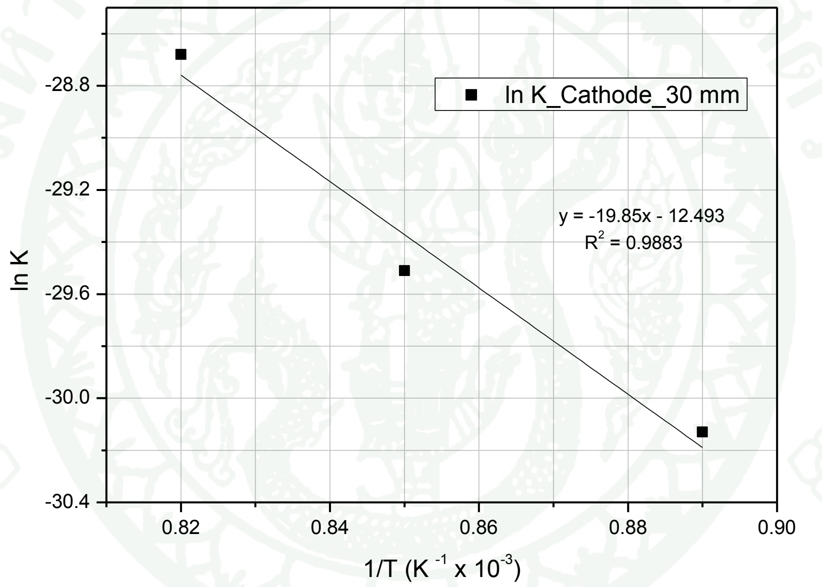
เมื่อพิจารณาผลการทดลองในภาพที่ 38 ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 1 จึงสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนที่อุณหภูมิต่างๆของกระบวนการบอไรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้าได้จากความชันของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสองของความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์และเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว ดังแสดงค่าสัมประสิทธิ์แพร่ของอะตอมโบรอนที่อุณหภูมิต่างๆ ดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการบอไรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 30 มิลลิเมตร

อุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว (เคลวิน)	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่, K (ตารางเมตร/วินาที)
1123 *K*	8.25×10^{-14}
1173 *K*	1.53×10^{-13}
1223 *K*	3.51×10^{-13}

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากสมการที่ 3 สามารถพิจารณาค่าพลังงานกระตุ้นและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 30 มิลลิเมตร ได้จากค่าความชันและจุดตัดแกนของกราฟเส้นตรงที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และส่วนกลับของอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการเคลือบผิวได้ โดยสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ของอะตอมโบรอนและค่าพลังงานกระตุ้นในกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงได้เท่ากับ 3.75307×10^{-6} ตารางเมตร/วินาที และ 165.0367×10^{3} จูล/โมล ตามลำดับ ตามภาพที่ 39



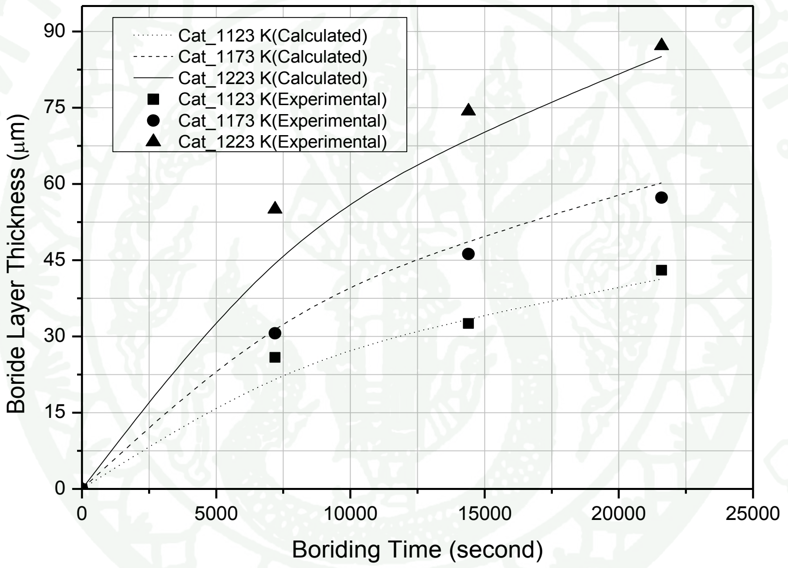
ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (ln K) และส่วนกลับของอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว (1/T) ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 30 มิลลิเมตร

เมื่อนำค่าต่างๆทั้งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอน ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่และค่าพลังงานกระตุ้นที่ได้จากการคำนวณ รวมทั้งค่าคงที่ของก๊าซมาแทนลงไปในสมการการแพร่ ก็สามารถสร้างสมการทั่วไปที่ใช้สำหรับการทำนายความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในการเคลือบผิวด้วยกระบวนการบอไรดิงโดยวิธีแพ็คแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 30 มิลลิเมตร ดังสมการที่ 6

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$d = 3.75307 \times 10^{-6}\, t \exp(-19853.704 / T))^{0.5} \quad (6)$$

จากการสร้างสมการทั่วไป (สมการที่ 6) ที่สามารถสร้างนำมาใช้ทำนายความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่จะเกิดขึ้นได้นั้น เมื่อนำสมการดังกล่าวมาคำนวณหาค่าความหนาของชั้นเคลือบยอไรด์ในช่วงอุณหภูมิและเวลาที่ทำการทดลองแล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงพบว่า ความหนาเคลือบบอไรด์ที่คำนวณได้จากสมการทั่วไปมีค่าใกล้เคียงกับค่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่ได้จากการทดลองจริงดังแสดงในภาพที่ 40

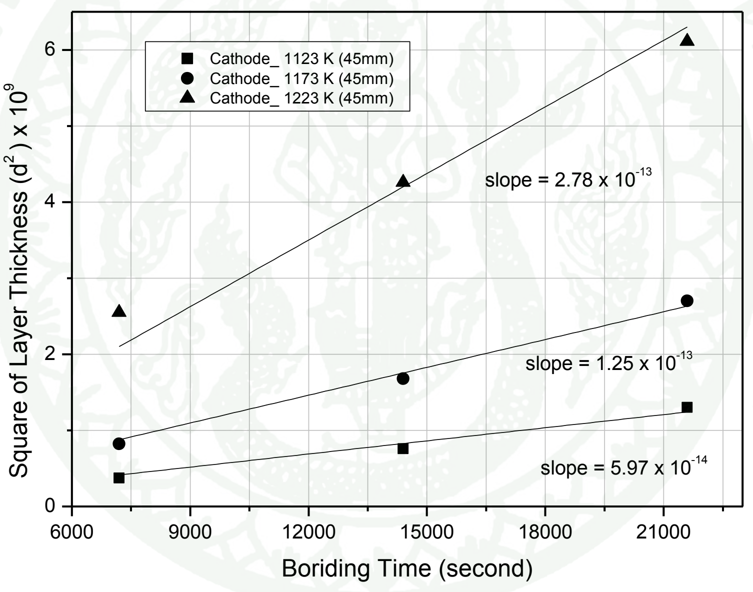


ภาพที่ 38 การคำนวณความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์จากกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 30 มิลลิเมตร เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงในช่วงอุณหภูมิและเวลาต่างที่ทำการทดลอง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6.3 จลนพลศาสตร์ของกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 45 มิลลิเมตร

จากการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็ค ที่มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร เข้ามาช่วย ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส ตั้งแต่เวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 45 มิลลิเมตร พบว่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาและอุณหภูมิของกระบวนการเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสองของความหนาชั้นเคลือบบอไรด์กับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆของกระบวนการนี้ พบว่ามีความสัมพันธ์กันเชิงเส้นตรงดังแสดงในภาพที่ 41



ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสองของความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์และเวลาที่ใช้ในการเคลือบโลหะเนื้อพื้นด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 45 มิลลิเมตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

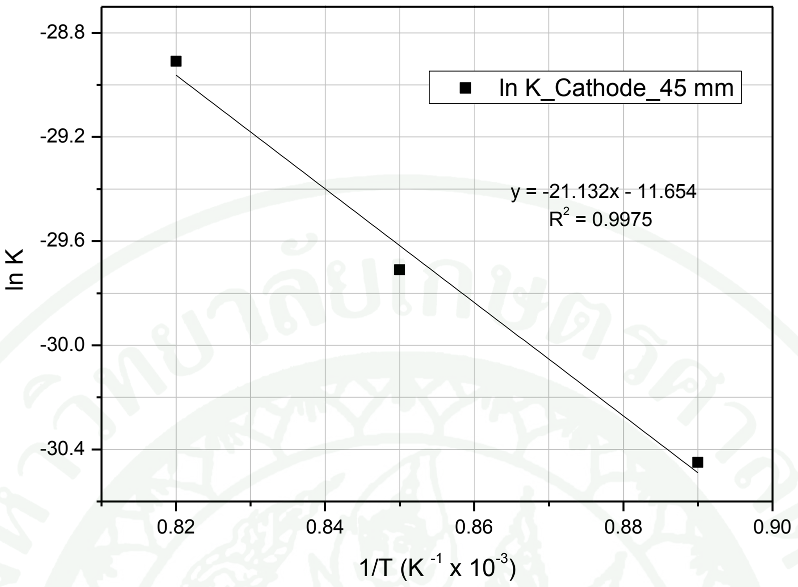
เมื่อพิจารณาผลการทดลองในภาพที่ 41 ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 1 จึงสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนที่อุณหภูมิต่างๆของกระบวนการบอไรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้าได้จากความชันของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสองของความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์และเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว ดังแสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนที่อุณหภูมิต่างๆ ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการบอไรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 45 มิลลิเมตร

อุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว (เคลวิน)	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่, K (ตารางเมตร/วินาที)
1123 *K*	5.97×10^{-14}
1173 *K*	1.25×10^{-13}
1223 *K*	2.78×10^{-13}

จากสมการที่ 3 สามารถพิจารณาค่าพลังงานกระตุ้นและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 45 มิลลิเมตรได้จากค่าความชันและจุดตัดแกนของกราฟเส้นตรงที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และส่วนกลับของอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการเคลือบผิวได้ โดยสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ของอะตอมโบรอนและค่าพลังงานกระตุ้นในกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงได้เท่ากับ 8.69×10^{-6} ตารางเมตร/วินาที และ 175.69×10^{3} จูล/โมล ตามลำดับ ตามภาพที่ 42

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



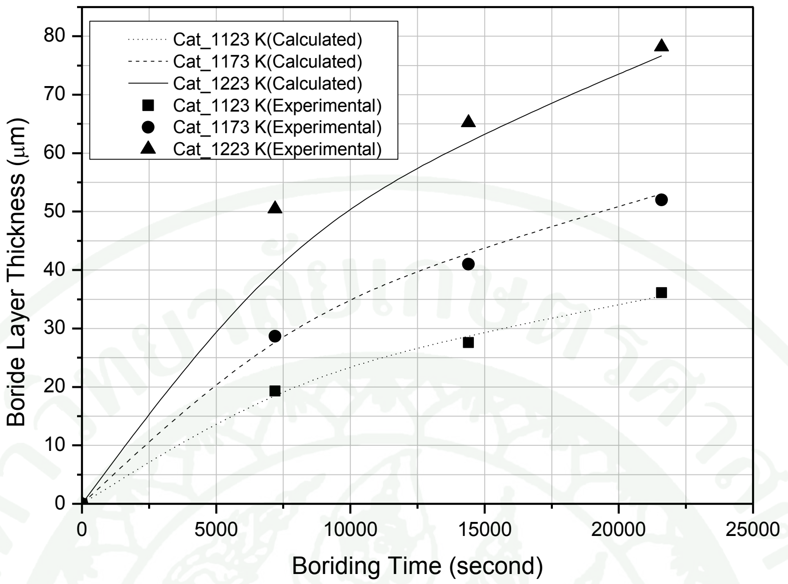
ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (ln K) และส่วนกลับของอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว (1/T) ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 45 มิลลิเมตร

เมื่อนำค่าต่างๆทั้งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอน ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่และค่าพลังงานกระตุ้นที่ได้จากการคำนวณ รวมทั้งค่าคงที่ของก๊าซมาแทนลงไปในสมการการแพร่ก็สามารถสร้างสมการทั่วไปที่ใช้สำหรับการทำนายความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในการเคลือบผิวด้วยกระบวนการบอไรดิงโดยวิธีแพ็คแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 45 มิลลิเมตร ดังสมการที่ 7

$$d = (8.69 \times 10^{-6} t \exp(-21132.3 / T))^{0.5} \quad (7)$$

จากการสร้างสมการทั่วไป (สมการที่ 7) ที่สามารถสร้างนำมาใช้ทำนายความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่จะเกิดขึ้นได้นั้น เมื่อนำสมการดังกล่าวมาคำนวณหาค่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ในช่วงอุณหภูมิและเวลาที่ทำการทดลองแล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงพบว่าความหนาเคลือบบอไรด์ที่คำนวณได้จากสมการทั่วไปมีค่าใกล้เคียงกับค่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่ได้จากการทดลองจริงดังแสดงในภาพที่ 43

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 41 การคำนวณความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์จากกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 45 มิลลิเมตร เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงในช่วงอุณหภูมิและเวลาต่างที่ทำการทดลอง

จากการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ที่อุณหภูมิ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ด้วยกระบวนการบอไรดิงโดยวิธีแพ็คทั้งแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง และให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 30 และ 45 มิลลิเมตร (ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร) พบว่าจลนพลศาสตร์ ของกระบวนการบอไรดิงในการทดลองนี้ สามารถวิเคราะห์ได้จากการแพร่ซึมตามทฤษฎีการแพร่ และสมการของ Arrhenius ซึ่งแสดงได้ว่ากระบวนการแพร่ในการทดลองนี้เป็นกระบวนการที่ถูกควบคุมการแพร่ด้วยการแพร่เช่นเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่กระบวนการเคลือบผิวที่ระยะขั้ว 15 30 และ 45 มิลลิเมตร จะทำให้ให้อัตราการแพร่ของอะตอมโบรอนดีขึ้นเมื่อเราให้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปเมื่อเปรียบเทียบกับการเคลือบผิวที่ไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง อีกทั้งเมื่อที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 มิลลิเมตร จะมีการแพร่ที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระยะห่างระหว่างขั้ว 30 และ 45 มิลลิเมตร ที่มีอัตราการแพร่ที่ลดลงตามลำดับ ซึ่งดูได้จากผลการคำนวณผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนจากการทดลอง (ตารางที่ 14) ที่พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการบอไรดิงแบบที่ให้ไฟฟ้ากระแส

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตรงที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 มิลลิเมตรจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่สูงที่สุด และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะลดลงมาเมื่อมีระยะห่างระหว่างขั้วที่เพิ่มขึ้น 30 และ 45 มิลลิเมตรตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่าพลังงานกระตุ้นในกระบวนการบอไรดิง แบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 มิลลิเมตร จะมีค่าพลังงานกระตุ้นที่ต่ำที่สุด และพลังงานกระตุ้นจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีระยะห่างระหว่างขั้วที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งกระบวนการบอไรดิงที่มีค่าพลังงานกระตุ้นต่ำจะสามารถเกิดชั้นเคลือบบอไรด์ได้ง่ายกว่าและให้ชั้นเคลือบบอไรด์ที่หนากว่ากระบวนการบอไรดิงที่มีค่าพลังงานกระตุ้นในกระบวนการที่สูง ซึ่งสอดคล้องค่าพลังงานกระตุ้นนี้จะสอดคล้องกับหลักการทางจลนพลศาสตร์เนื่องจากค่าพลังงานกระตุ้นฝนกระบวนการบอไรดิงเป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณพลังงานที่อะตอมโบรอนต้องการเพื่อให้สามารถเคลื่อนที่หรือแพร่เข้าสู่ชิ้นงานแล้วรวมตัวกับอะตอมโลหะเนื้อพื้นเป็นชั้นเคลือบบอไรด์ ดังนั้นเมื่อกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 มิลลิเมตร ค่าพลังงานกระตุ้นที่น้อยที่สุด และกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 30 และ 45 มิลลิเมตร และแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงจะเพิ่มขึ้นตามลำดับ นั่นหมายความว่าอะตอมโบรอนในกระบวนการเคลือบผิวแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ระยะห่างระหว่างขั้วที่ใกล้ที่สุดจะแพร่ได้ง่ายที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับอะตอมโบรอนในกระบวนการเคลือบผิวแบบให้กระแสไฟฟ้า ที่ระยะห่างระหว่างขั้วที่ห่างออกไป และกระบวนการเคลือบผิวที่ไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง จากการที่การเคลือบผิวแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ระยะห่างระหว่างขั้วที่ใกล้ที่สุด ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนสูงขึ้นและค่าพลังงานกระตุ้นในกระบวนการที่ลดลงทำให้กระบวนการการบอไรดิงแบบที่ให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 มิลลิเมตร เกิดชั้นเคลือบบอไรด์บนโลหะเนื้อพื้นได้หนากว่ากระบวนการบอไรดิงที่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ขนาด 30 และ 45 มิลลิเมตร ที่ห่างออกไป

จากงานวิจัยครั้งนี้ที่ทำการทดลองเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิงโดยวิธีแพ็คโดยมี ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร ที่มีระยะห่างระหว่างขั้ว 15 30 และ 45 มิลลิเมตร เมื่อให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่กระบวนการซึ่งสามารถทำให้เกิดชั้นชั้นเคลือบบอไรด์บนผิวชิ้นงานได้ความหนาชั้นเคลือบมากขึ้นในทุกอุณหภูมิและทุกระยะเวลาที่ทำการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับการเคลือบผิวบอไรดิงแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง แต่เมื่อมีการเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าในกระบวนการเคลือบผิวที่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง ชั้นเคลือบบอไรด์ที่ได้จะมีความหนาที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงที่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระยะห่างระหว่างขั้วที่มากกว่า จึงกล่าวได้ว่าการผิวเคลือบด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คที่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กระบวนการได้และ ระยะห่างระหว่างขั้วที่ใช้ในกระบวนการที่ระยะใกล้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่กระบวนการบอไรดิงได้ และเป็นอีกหนึ่งแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่การออกแบบกระบวนการเคลือบผิวได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำวิธีการให้กระแสไฟฟ้าแก่ชิ้นงานไปประยุกต์ใช้ได้กับกระบวนการเคลือบผิวกระบวนการอื่นที่อาศัยการแพร่ของอะตอม เช่น กระบวนการคาร์บูไรซิ่ง ไนไตรดิง หรือคาร์บูไนไตรด์ เป็นต้น ซึ่งล้วนเป็นกระบวนการที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเคลือบผิวของประเทศไทยเพื่อพัฒนากระบวนการกระบวนการเคลือบผิวเหล่านี้ให้มีประสิทธิภาพสูงมากขึ้น อีกทั้งเป็นการยกระดับความสามารถในการเคลือบผิวและเพิ่มการออกแบบลำกษณะของกระบวนการให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นได้

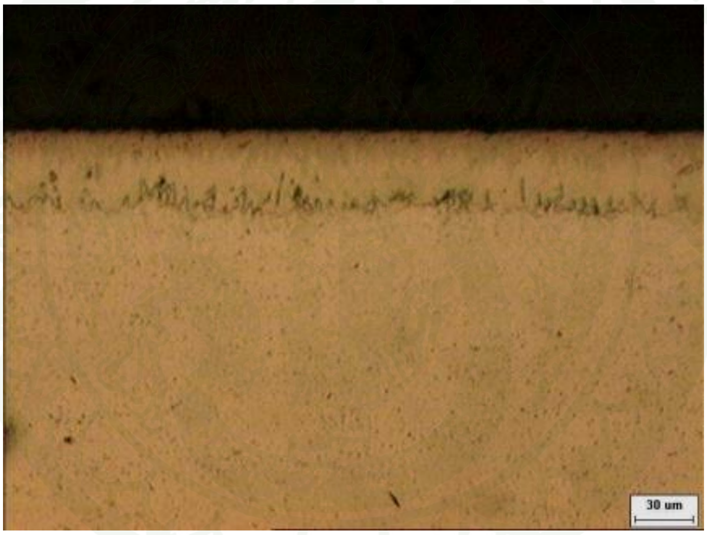
ตารางที่ 14 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนที่อุณหภูมิต่างๆ และค่าพลังงานกระตุ้นในกระบวนการบอไรดิงที่ทำการทดลองของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2

กระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงแบบแพ็ค	อุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว (เคลวิน)	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (ตารางเมตร/วินาที)	ค่าพลังงานกระตุ้น (กิโลจูล/โมล)
บอไรดิงแบบไม่ให้ไฟฟ้า	1123	4.73×10^{-14}	
กระแสตรง	1173	1.23×10^{-13}	177.422
	1223	2.23×10^{-13}	
บอไรดิงแบบให้ไฟฟ้า	1123	1.15×10^{-13}	
กระแสตรงที่ระยะห่างขั้ว	1173	2.33×10^{-13}	156.8115
15 มิลลิเมตร	1223	4.55×10^{-13}	
บอไรดิง แบบให้ไฟฟ้า	1123	8.25×10^{-14}	
กระแสตรงที่ระยะห่างขั้ว	1173	1.53×10^{-13}	165.036
30 มิลลิเมตร	1223	3.51×10^{-13}	
บอไรดิงแบบให้ไฟฟ้า	1123	5.97×10^{-14}	
กระแสตรงที่ระยะห่างขั้ว	1173	1.25×10^{-13}	175.694
45 มิลลิเมตร	1223	2.78×10^{-13}	

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

7. อิทธิพลของธาตุผสมในโลหะเนื้อพื้นที่มีผลต่อลักษณะและความหนาขอชั้นเคลือบ

คุณธีราภาและคณะ (2013) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดและแอโนดที่ส่งผลต่อจลนพลศาสตร์ของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนชนิด AISI H13 ที่ผ่านการทำบอไรด์ ลักษณะของชั้นเคลือบผิวบอไรด์ของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน AISI H13 มีลักษณะค่อนข้างคล้ายกับชั้นเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 คือมีลักษณะค่อนข้างเรียบมีรอยหยักหรือฟันเลื่อยเล็กน้อย เป็นชั้นเคลือบชนิดเฟสคู่ ประกอบไปด้วย FeB และ Fe_2B ดังภาพที่ 42 เนื่องมาจากเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน AISI H13 มีปริมาณธาตุผสมที่ค่อนข้างจะน้อยกว่าเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 แต่ก็ยังมีลักษณะโครงสร้างชั้นเคลือบที่เป็นเฟสคู่



ภาพที่ 42 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพ็คบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็คโทรด 15 มิลลิเมตร

และจากการพิจารณาความหนาชั้นเคลือบผิวในกระบวนการเคลือบผิว พบว่ามีค่าความหนาของชั้นเคลือบผิวที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับการชั้นเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ทั้งแบบไม่ให้และให้ไฟฟ้ากระแสตรง ดังตารางที่ 15 และ 16

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 15 ความหนาของชั้นเคลือบของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน AISI H13 ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คที่ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง

เวลา(Hr)	ความหนาชั้นเคลือบบอไรด์(μm)		
	$850^{o}C$	$900^{o}C$	$950^{o}C$
2	16.76	25.62	36.95
4	25.48	38.31	55.86
6	28.95	46.91	65.48

ตารางที่ 16 ความหนาของชั้นเคลือบของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน AISI H13 ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คที่ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ที่มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร

เวลา (hr)	ความหนาชั้นเคลือบ(μm)								
	$850^{o}C$			$900^{o}C$			$950^{o}C$		
	15mm	30mm	45mm	15mm	30mm	45mm	15mm	30mm	45mm
2	25.48	24.05	17.81	37.57	34.00	26.91	52.86	47.00	44.52
4	36.38	35.43	25.62	52.00	46.64	38.57	74.81	69.43	60.76
6	48.43	40.86	32.05	64.91	60.19	50.29	88.67	82.57	72.62

8. อิทธิพลของธาตุผสมในโลหะเนื้อพื้นที่มีต่อจลนพลศาสตร์ของกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิง

จลนพลศาสตร์ของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนชนิด AISI H13 ที่ผ่านการทำบอไรด์ พบว่าการเคลือบผิวแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาช่วยนั้นให้ค่าพลังงานกระตุ้นที่ 186.72 กิโลจูล/โมล สอดคล้องกับค่าพลังงานกระตุ้นของการศึกษาจลนพลศาสตร์ของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน AISI H13 ด้วยกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิง (K.Genel *et al.* 2006) มีค่าพลังงานกระตุ้น 186.2 กิโลจูล/โมล เช่นเดียวกับการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 แบบแพ็คโดยไม่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงของงานวิจัยนี้ เมื่อศึกษาจลนพลศาสตร์จะมีค่าพลังงานกระตุ้น 177.42 กิโล

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จูล/โมล สอดคล้องกับพลังงานกระตุ้นของการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 กระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คที่มีค่าพลังกระตุ้น 176 กิโลจูล/โมล และเมื่อพิจารณาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิง แบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ของโลหะทั้งสองชนิดเปรียบเทียบกัน ดังตารางที่ 14 และ 17 พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นของกระบวนการเคลือบผิวแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร ของโลหะทั้งสองชนิดจะมีค่าพลังงานกระตุ้นลดลงโดย เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน AISI H13 มีค่าพลังงานกระตุ้นที่ลดลงมากกว่าในระยะห่างระหว่างขั้ว 15 และ 30 มิลลิเมตร อาจเนื่องมาจากการที่ โลหะ AISI D2 นั้นมีปริมาณธาตุผสมที่สูงกว่าส่งผลให้มีอัตราการแพร่ที่ลดลง และค่าพลังงานกระตุ้นที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 45 มิลลิเมตรของโลหะทั้งสองนั้น มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าพลังงานกระตุ้นของการเคลือบผิวแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นระยะห่างระหว่างขั้วที่ 45 มิลลิเมตรของการเคลือบผิว

ตารางที่ 17 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนที่อุณหภูมิต่างๆ และค่าพลังงานกระตุ้นในกระบวนการบอไรดิงที่ทำการทดลองของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน AISI H13

กระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงแบบแพ็ค	อุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว (เคลวิน)	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (ตารางเมตร/วินาที)	ค่าพลังงานกระตุ้น (กิโลจูล/โมล)
บอไรดิงแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง	1123	4.00×10^{-14}	185.71
	1173	1.03×10^{-13}	
	1223	2.03×10^{-13}	
บอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ระยะห่างขั้ว 15 มิลลิเมตร	1123	1.07×10^{-14}	140.33
	1173	1.94×10^{-13}	
	1223	3.67×10^{-13}	
บอไรดิง แบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ระยะห่างขั้ว 30 มิลลิเมตร	1123	7.90×10^{-14}	159.93
	1173	1.65×10^{-13}	
	1223	3.20×10^{-13}	
บอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ระยะห่างขั้ว 45 มิลลิเมตร	1123	4.75×10^{-14}	186.72
	1173	1.16×10^{-13}	
	1223	2.43×10^{-13}	

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและพัฒนากระบวนการ เคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คด้วยไฟฟ้ากระแสตรง โดยมีจุดมุ่งหมายในการศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดของกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงแบบแพ็คด้วยไฟฟ้ากระแสตรงพบว่า ระยะห่างระหว่างขั้วของอิเล็กโทรด มีผลต่อค่าเฉลี่ยความหนาของชั้นเคลือบ ที่บริเวณขั้วแคโทด กล่าวคือ สำหรับระยะห่างระหว่างขั้วที่มีระยะห่างใกล้กันจะทำให้มีความหนาของชั้นเคลือบที่สูง ในขณะที่การการเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดจะทำให้มีความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่ชิ้นงาน แคโทดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่ขั้วแคโทดที่มีระยะห่างระหว่างขั้วที่ใกล้กว่า กับระยะห่างระหว่างขั้วที่เพิ่มมากขึ้น

นอกจากนี้งานวิจัยนี้พบว่าชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้นบนผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 จากกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็ค ด้วยไฟฟ้ากระแสตรงและไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ระยะห่างระหว่างขั้วที่ต่างกันจะพบว่าสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ในทุกๆสภาพวะการทดลองจะมีลักษณะของชั้นเคลือบเป็นเฟสคู่ FeB และ Fe_2B มีลักษณะที่ค่อนข้างเรียบสามารถยืนยันได้จากการตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกส์ และมีความแข็งโดยประมาณประมาณ 1600 HV ซึ่งมากกว่าความแข็งของโลหะหะเนื้อพื้นที่เป็นวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ที่มีความแข็งโดยประมาณอยู่ที่ 600 HV

2. ชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดจากกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงแบบแพ็คด้วยไฟฟ้ากระแสตรงและไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง จะมีความหนาของชั้นเคลือบที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการเพิ่มขึ้น

3. ชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดจากกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คด้วยไฟฟ้ากระแสตรงจะมีความหนาของชั้นเคลือบเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีขนาดของไฟฟ้ากระแสตรงที่เพิ่มมากขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. กระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คที่มีการให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่กระบวนการจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และค่าพลังงานกระตุ้นที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คโดยทั่วไป

5. กระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงแบบแพ็คด้วยไฟฟ้ากระแสตรง ที่มีการวัด อุณหภูมิที่ชิ้นงานแคโทด และอุณหภูมิ ที่วัดได้ที่ชิ้นงานอ้างอิงในระหว่างกระบวนการเคลือบผิวนั้นมีความแตกต่างกันไม่มากนัก อาจเนื่องมาจากขนาดและจำนวนชิ้นงานที่มีมากส่งผลให้มีขนาดของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่น้อย

6. งานวิจัยนี้ยังพบว่าเงื่อนไขที่สามารถ เพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงด้วยไฟฟ้ากระแสตรง ได้อย่างชัดเจนคือระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่ 15 มิลลิเมตร และมีขนาดของไฟฟ้ากระแสตรง 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร ให้อุณหภูมิที่ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมงพบว่า ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 มิลลิเมตร มีค่าความหนาของชั้นเคลือบ 99.9 ไมครอน ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 30 มิลลิเมตร มีค่าความหนาของชั้นเคลือบ 87.19 ไมครอน ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 45 มิลลิเมตร มีค่าความหนาของชั้นเคลือบ 78.19 ไมครอน ซึ่งค่าความหนาของชั้นเคลือบของทั้งสามระยะ ก็ยังมีค่ามากกว่า กระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คที่ใช้โดยทั่วไปที่มีค่าความหนา 69 ไมครอน และที่ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 มิลลิเมตร ก็ยังมีค่าความหนาที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่มากกว่า นั่นหมายความว่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ในกระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงด้วยไฟฟ้ากระแสตรงจะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของไฟฟ้ากระแสตรงเพียงอย่างเดียวแต่ยังขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดซึ่งจะเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่จะเข้ามาช่วยในการพัฒนากระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงด้วยไฟฟ้ากระแสตรงต่อไปในอนาคต

7. จากการศึกษาการเคลือบผิวบอไรดิงที่มีการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาช่วยนั้น ในความเป็นจริงที่อาจมีการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาช่วยในกระบวนการเคลือบผิว ชิ้นงานที่ใช้ในกระบวนการเคลือบผิวอาจจะมีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อนส่งผลไปถึงปัจจัยในเรื่องของระยะห่างระหว่างขั้วที่ห่างออกไปจากระยะห่างระหว่างขั้วที่เหมาะสมแต่ถึงกระนั้นแม้ไม่ใช่ระยะห่างระหว่างขั้วที่ห่างไปจากระยะห่างที่เหมาะสมไฟฟ้ากระแสตรงก็ยังมีอิทธิพลต่อการช่วยในกระบวนการเคลือบผิว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

8.จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 80 มิลลแอมป์/ตารางเซนติเมตรที่เกี่ยวข้องกับระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดพบว่า ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 มิลลิเมตรสามารถลดค่าพลังงานกระตุ้นลงได้ประมาณ 11 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 30 มิลลิเมตรลดลงได้ 7 เปอร์เซ็นต์ และที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 45 มิลลิเมตร จะลดได้ 1 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับการเคลือบผิวแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้น การเคลือบผิวบอไรดิงแบบแพ็คด้วยไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความหนาแน่นกระแส 80 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 45 มิลลิเมตร น่าจะไม่มีอิทธิพลต่อการเคลือบผิวด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษา เกี่ยวกับขนาดของกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อขนาดของชิ้นงานเพื่อหาความเหมาะสมของการนำไปใช้งานเมื่อมีเงื่อนไขของขนาดชิ้นงานเข้ามาเกี่ยวข้อง

2. ควรศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มปัจจัยอื่นนอกเหนือจากการให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่กระบวนการ เช่น กระบวนการเคลือบผิวบอไรดิงที่อุณหภูมิต่ำ หรือการเคลือบผิวบอไรดิงแบบต่างๆ โดยมีการให้ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ที่เกิดขึ้น

3. ควรมีศึกษาการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกระบวนการทางกล ก่อนทำการเคลือบผิวบอไรดิงที่อุณหภูมิต่ำด้วยไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นและศึกษาลักษณะของชั้นเคลือบที่เกิดขึ้น

4. ควรศึกษากระบวนการทางความร้อนหลังจากกระบวนการบอไรดิงแบบแพ็คเพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างชั้นเคลือบว่ามีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่อย่างไร

5.ควรศึกษาความเค้นตกค้างที่อยู่ภายในชั้นเคลือบเพื่อดูว่าความเค้นตกค้างที่อยู่ภายในชั้นเคลือบผิวชนิดเฟสคู่ ที่ประกอบไปด้วย FeB และ Fe_2B นั้นมีผลอย่างไรต่อชั้นเคลือบและมีลักษณะความเค้นตกค้างแบบดึงหรือแบบกด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ธีราภา สุพรรณโรจน์. 2556 **ผลกระทบของระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดและแอโนดที่ส่งผลต่อจลนพลศาสตร์ของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนชนิด AISI H13 ที่ผ่านการทำบอไรด์.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ประเจียด ปฐมภาค 2556 การเรียนการสอนฟิสิกส์ 2, **สนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะขนาน** คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล แหล่งที่มา: http://www.rmutphysics.com, 3 มกราคม 2556

สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย. 2013 **มาตรฐานและสมบัติของเหล็กกล้าที่ใช้งานในงานอุตสาหกรรม.** แหล่งที่มา: http://www.isit.or.th, 11 มกราคม 2556

บริษัท สินไทย สเปเชียล สตีลจำกัด. 2013. **HIGH-PERFORMANCE BLANKING TOOL STEEL.** แหล่งที่มา: www.sinthai.co.th, 14 มกราคม 2556

รศ. สมนึก วัฒนศรียกุล. 2007. โรงงานรับจ้างชุบแข็งเหล็กกล้าเครื่องมือในประเทศไทย. ในการประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 22 กุมภาพันธ์ 2556

Sinha,A. and B. Division. 1991. Heat Treating Volume 4 of the ASM Inter National Handbook. **The Materials Information Company.**: 978-998

Xie,F. and L. Sun. 2012. Characteristics and mechanisms of accelerating pack boriding by direct current field at low and moderate temperatures. **Surface & Coatings Technology.** 206: 2839–2844.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Campos-Silva,I.. and M. Ortiz-Domınguez. 2012. Kinetics and Boron Diffusion in the FeB/Fe_2B Layers Formed at the Surface of Borided High-Alloy Steel. **JMEPEG.** 21: 1714–1723.

Genel, K. 2006. Boriding kinetics of H13 steel. **Vacuum** 80: 451–457.

Philip, D. 2012. **Introduction To Materials Science FOR ENGINEERS. Ch. 5** University of Tennessee,Knoxville. Dept. of Materials Science and Engineering.: 10-10.

Davis, J.R. 2002 Surface Hardening of Steels Copyright © 2002 ASM International.: 213-226.

Sen,S. and C. Bindal. 2005. An approach to kinetic study of borided steels. **Surface & Coatings Technology.** 191: 274– 285.

Sista,V. and O. Kahvecioglu 2011. Electrochemical boriding and characterization of AISI D2 tool steel. **Thin Solid Films.** 520: 1582–1588

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

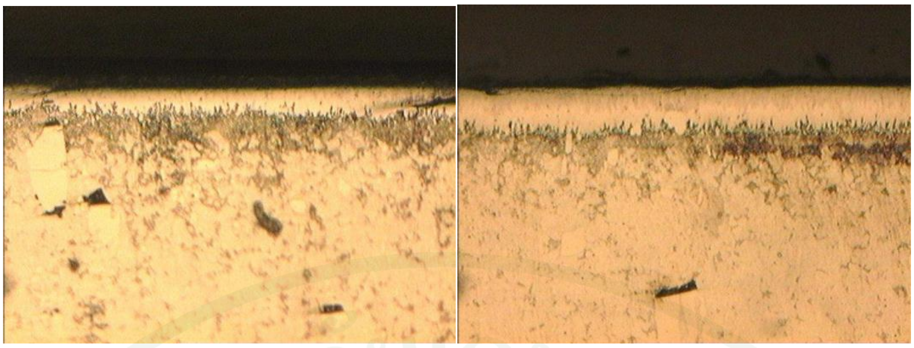
ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ก

เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างชั้นเคลือบระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด

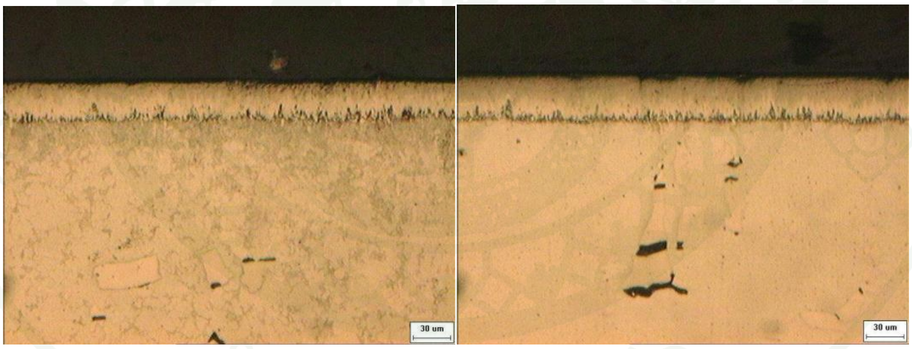
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก) (ข)

ภาพผนวกที่ ก1 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร

(ก) ชิ้นงานแอโนด
(ข)ชิ้นงานแคโทด

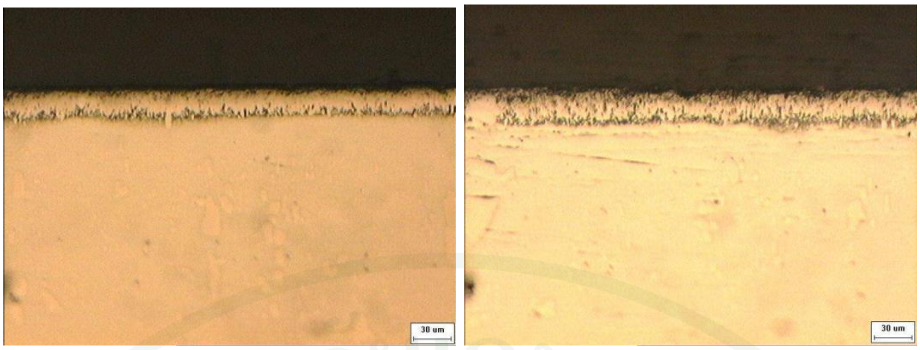


(ก) (ข)

ภาพผนวกที่ ก2 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 30 มิลลิเมตร

(ก) ชิ้นงานแอโนด
(ข)ชิ้นงานแคโทด

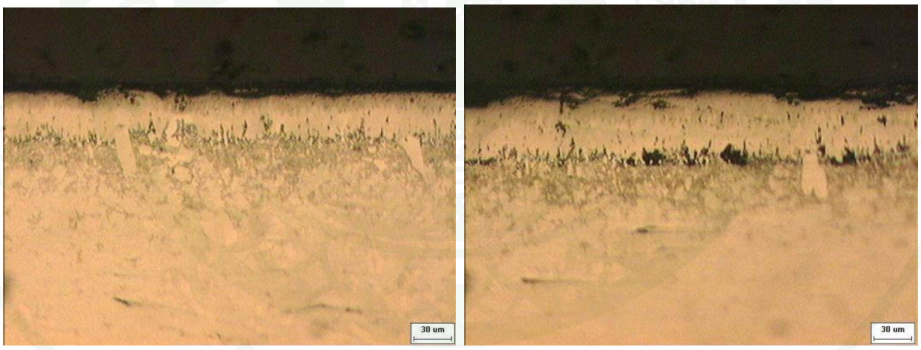
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก) (ข)

ภาพผนวกที่ ก3 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 45 มิลลิเมตร

(ก) ชิ้นงานแอโนด
(ข)ชิ้นงานแคโทด

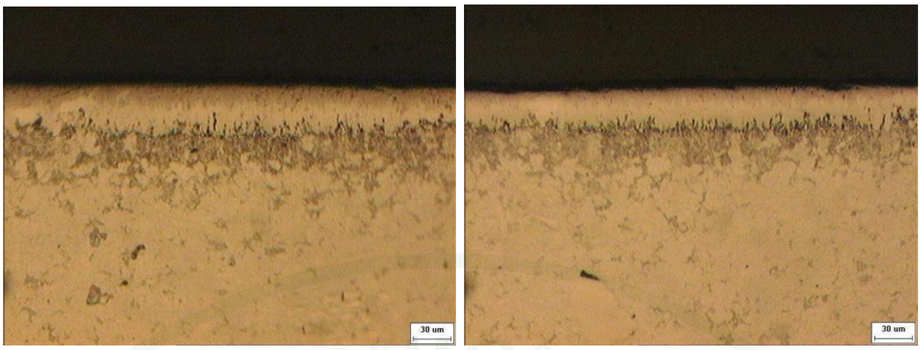


(ก) (ข)

ภาพผนวกที่ ก4 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร

(ก) ชิ้นงานแอโนด
(ข)ชิ้นงานแคโทด

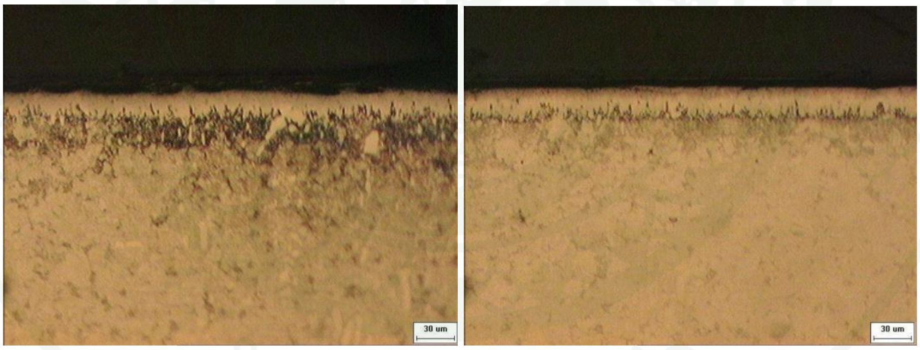
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก) (ข)

ภาพผนวกที่ ก5 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 30 มิลลิเมตร

(ก) ชิ้นงานแอโนด
(ข)ชิ้นงานแคโทด

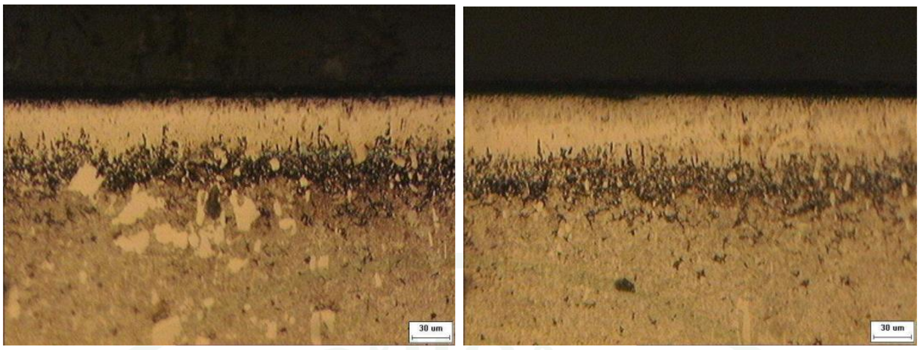


(ก) (ข)

ภาพผนวกที่ ก6 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 45 มิลลิเมตร

(ก) ชิ้นงานแอโนด
(ข)ชิ้นงานแคโทด

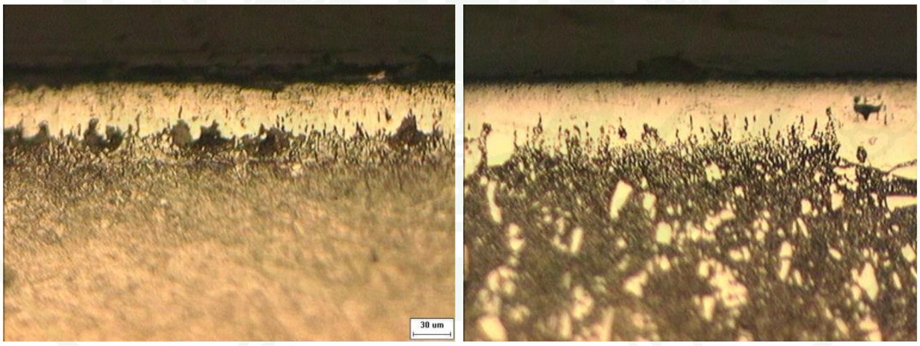
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก) (ข)

ภาพผนวกที่ ก7 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 2 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร

(ก) ชิ้นงานแอโนด
(ข)ชิ้นงานแคโทด

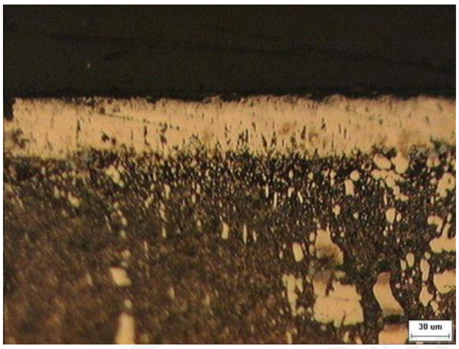
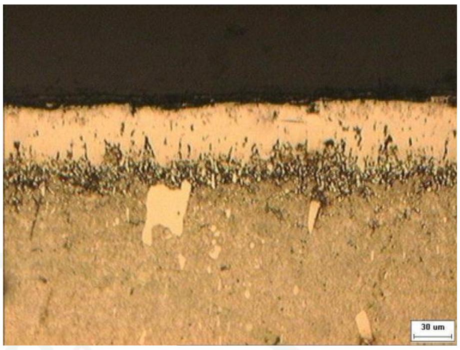


(ก) (ข)

ภาพผนวกที่ ก8 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 2 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 30 มิลลิเมตร

(ก) ชิ้นงานแอโนด
(ข)ชิ้นงานแคโทด

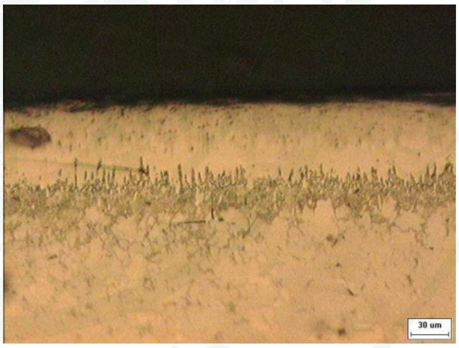
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

(ก) (ข)

ภาพผนวกที่ ก9 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 2 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 45 มิลลิเมตร

(ก) ชิ้นงานแอโนด
(ข)ชิ้นงานแคโทด

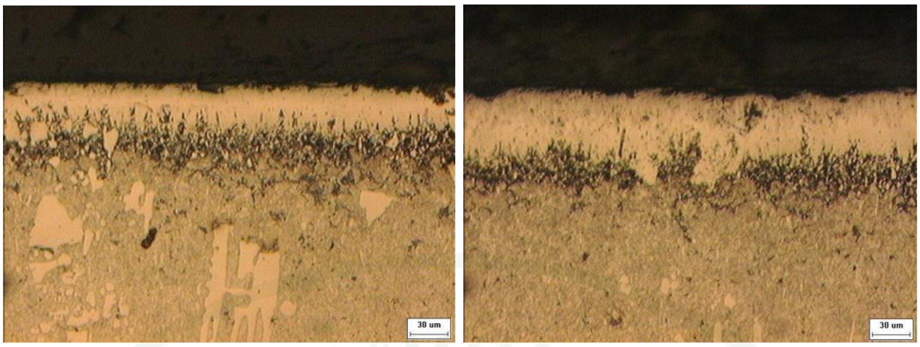


(ก) (ข)

ภาพผนวกที่ ก10 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 4 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร

(ก) ชิ้นงานแอโนด
(ข)ชิ้นงานแคโทด

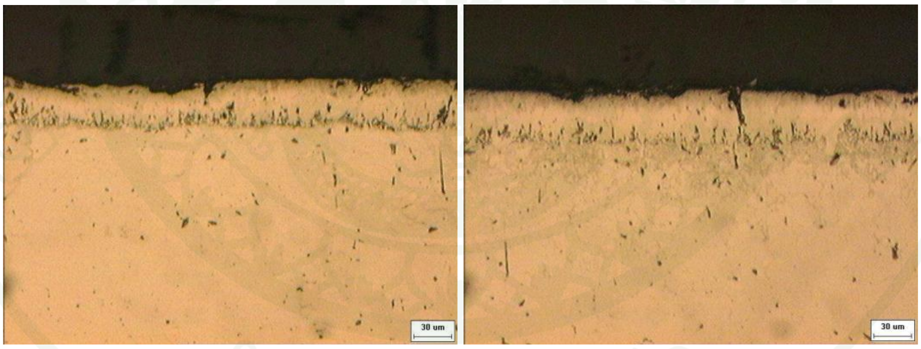
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก) (ข)

ภาพผนวกที่ ก11 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 4 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 30 มิลลิเมตร

(ก) ชิ้นงานแอโนด
(ข)ชิ้นงานแคโทด

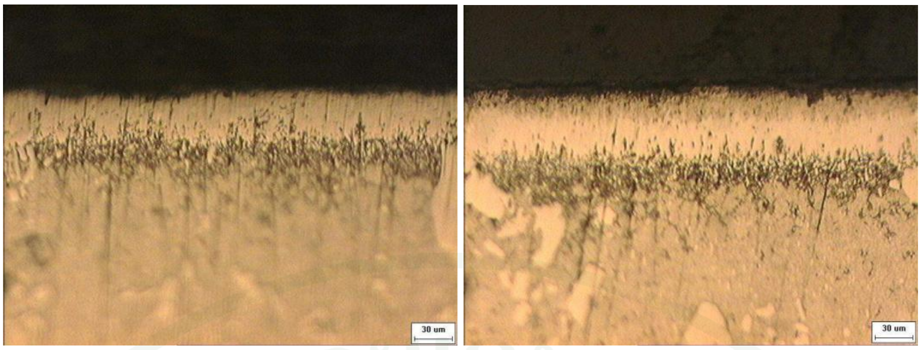


(ก) (ข)

ภาพผนวกที่ ก12 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 4 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 45 มิลลิเมตร

(ก) ชิ้นงานแอโนด
(ข)ชิ้นงานแคโทด

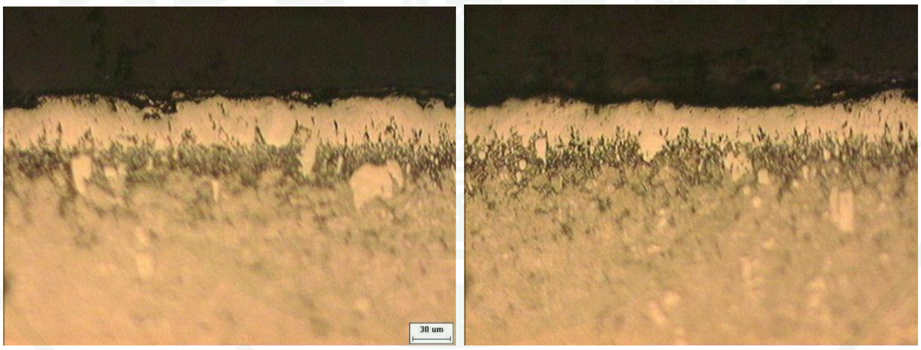
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก) (ข)

ภาพผนวกที่ ก13 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร

(ก) ชิ้นงานแอโนด
(ข)ชิ้นงานแคโทด

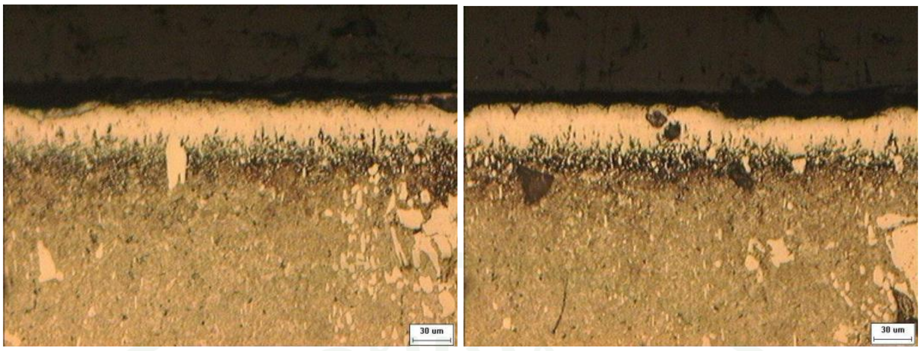


(ก) (ข)

ภาพผนวกที่ ก14 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 30 มิลลิเมตร

(ก) ชิ้นงานแอโนด
(ข)ชิ้นงานแคโทด

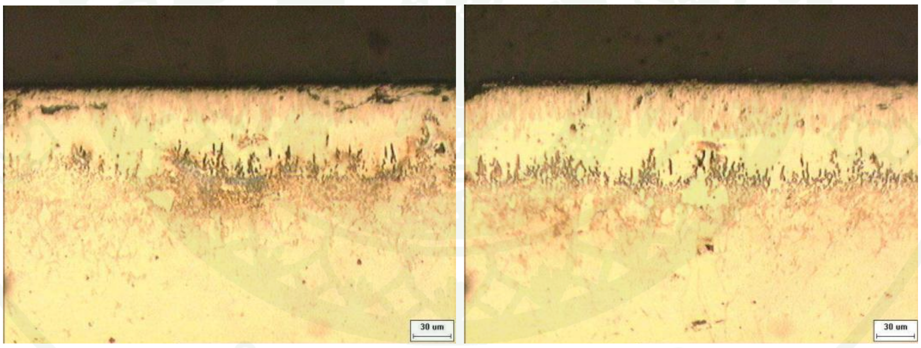
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก) (ข)

ภาพผนวกที่ ก15 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 45 มิลลิเมตร

(ก) ชิ้นงานแอโนด
(ข)ชิ้นงานแคโทด

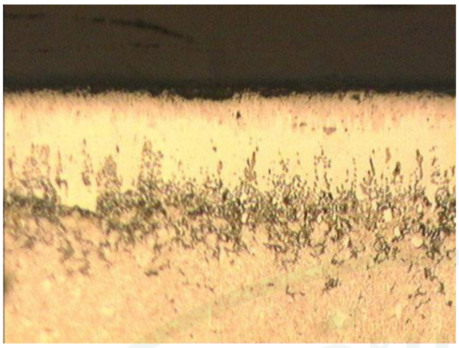
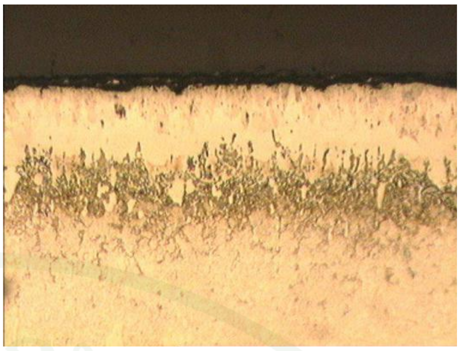


(ก) (ข)

ภาพผนวกที่ ก16 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร

(ก) ชิ้นงานแอโนด
(ข)ชิ้นงานแคโทด

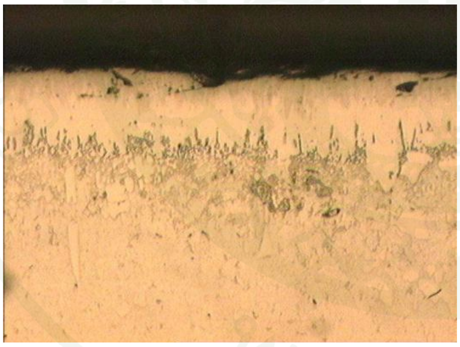
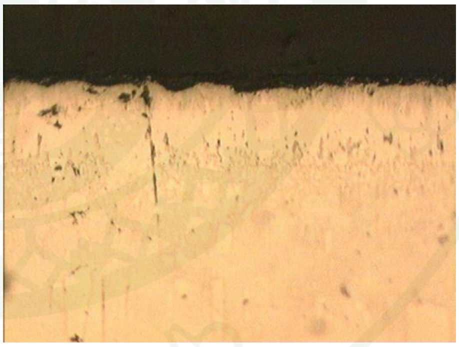
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

(ก) (ข)

ภาพผนวกที่ ก17 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 30 มิลลิเมตร

(ก) ชิ้นงานแอโนด
(ข)ชิ้นงานแคโทด

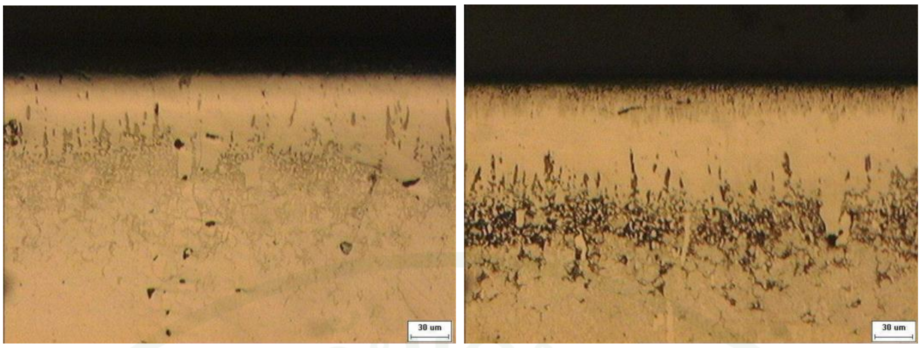



(ก) (ข)

ภาพผนวกที่ ก18 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 45 มิลลิเมตร

(ก) ชิ้นงานแอโนด
(ข)ชิ้นงานแคโทด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

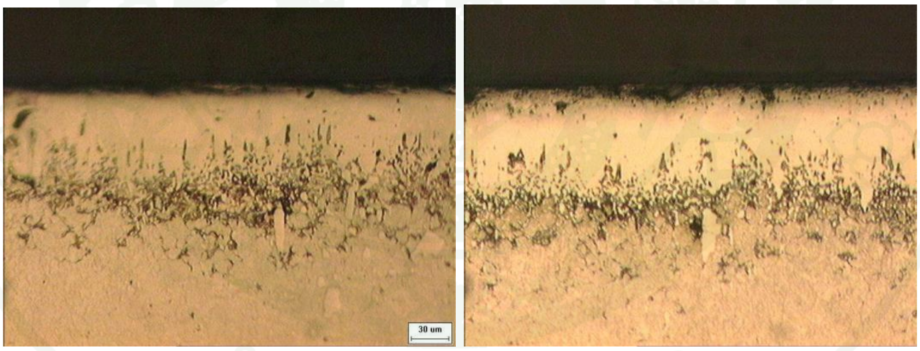


(ก) (ข)

ภาพผนวกที่ ก19 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร

(ก) ชิ้นงานแอโนด

(ข)ชิ้นงานแคโทด



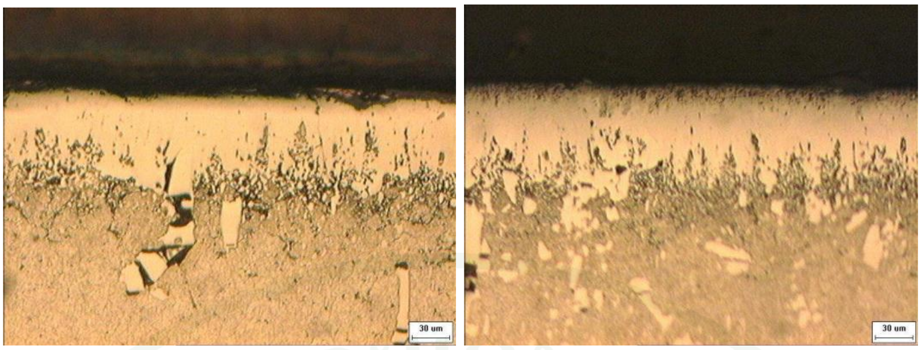
(ก) (ข)

ภาพผนวกที่ ก20 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 30 มิลลิเมตร

(ก) ชิ้นงานแอโนด

(ข)ชิ้นงานแคโทด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก) (ข)

ภาพผนวกที่ ก21 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบผิวที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5.5 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 45 มิลลิเมตร

(ก) ชิ้นงานแอโนด
(ข)ชิ้นงานแคโทด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ข

ความหนาของชั้นเคลือบที่วัดในแต่ละครั้งและจำนวนครั้ง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข1 ความหหนาขอชั้นเคลือบบอไรด์ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่อุณหภูมิ 850 900 และ 950°C ที่ระยะเวลา 2 4 6 ชั่วโมง

จำนวนครั้งที่วัด	ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ (μm)								
	850°C			900°C			950°C		
	2 Hr.	4 Hr.	6 Hr.	2 Hr.	4 Hr.	6 Hr.	2 Hr.	4 Hr.	6 Hr.
1	17.14	21.23	30	22.53	33.46	49.45	43.33	58.15	71.37
2	18.12	25.53	34.19	25.43	37.14	51.42	40.61	62.90	65.79
3	14.29	25.90	37.61	30.13	37.61	50.75	41.27	58.39	72.25
4	16.53	20.49	32.38	27.65	38.66	57.09	42.56	59.52	65.84
5	13.43	28.57	29.62	25.30	40.00	53.52	31.71	52.85	71.72
6	19.52	29.04	30.55	24.93	39.04	49.50	41.90	65.33	69.95
7	18.57	22.95	34.47	29.52	41.97	48.04	38.00	52.95	68.30
8	19.64	23.95	24.06	25.22	36.66	56.57	49.52	59.71	67.11
9	15.04	24.48	33.28	22.42	39.04	51.87	42.41	61.42	69.70
10	15.97	22.95	34.71	29.63	36.14	50.76	44.64	59.93	68.13
เฉลี่ย	16.82	24.50	32.09	26.28	37.97	51.90	41.59	59.12	69.02

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข2 ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่อุณหภูมิ 850 °C ที่ระยะเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ที่มีความหนาแน่นกระแส 80 mA/cm^2 และระยะห่างระหว่างขั้ว 15 30 และ 45 มิลลิเมตร

จำนวนครั้งที่วัด	ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ (μm)								
	2 Hr			4 Hr			6 Hr		
	15	30	45	15	30	45	15	30	45
1	28.09	26.19	14.88	36.90	36.66	26.66	53.76	47.81	39.04
2	29.52	22.34	23.80	47.61	34.23	28.87	52.96	40.95	35.28
3	28.42	28.55	21.71	38.60	33.56	26.66	49.18	42.85	38.89
4	21.42	26.36	26.39	35.71	33.33	29.83	49.61	40.47	37.61
5	26.67	27.14	19.51	43.81	31.74	23.33	48.09	41.90	32.85
6	23.07	25.63	14.81	44.08	33.90	26.23	45.75	41.42	34.76
7	31.52	22.09	18.81	43.73	30.42	26.71	46.89	43.33	36.67
8	27.24	27.89	15.62	42.30	35.23	25.91	48.29	42.90	34.28
9	29.52	26.56	19.70	40.22	33.10	31.23	48.57	40.75	33.33
10	29.09	25.71	17.81	35.71	23.29	30.23	52.76	47.67	38.19
เฉลี่ย	27.46	25.84	19.31	40.87	32.55	27.57	49.59	43.01	36.09

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข3 ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่อุณหภูมิ 900 °C ที่ระยะเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ที่มีความหนาแน่นกระแส 80 mA/cm^2 และ ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 30 และ 45 มิลลิเมตร

จำนวนครั้งที่วัด	ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ (μm)								
	2 Hr			4 Hr			6 Hr		
	15	30	45	15	30	45	15	30	45
1	45.40	26.23	27.14	52.85	53.33	41.42	69.56	58.80	50.87
2	41.90	28.09	27.14	54.76	41.42	44.28	72.38	56.47	52.43
3	41.90	30.80	31.82	57.61	39.34	40.47	63.20	52.33	70
4	40.95	33.57	30.66	62.85	51.97	45.19	71.42	56.19	48.60
5	40.95	30.47	25.61	63.80	41.42	40.55	74.28	53.80	49.52
6	40.81	30.57	29.34	61.90	45.23	36.14	72.38	65.23	53.80
7	39.04	29.52	27.77	56.13	47.19	39.52	76.29	46.19	49.04
8	43.76	30.99	28.51	50.47	53.38	40.47	70.14	58.14	48.57
9	39.33	32.38	29.62	59.52	41.42	39.52	72.38	65.71	52.38
10	41.90	33.42	29.05	53.15	47.33	42.45	69.52	59.80	44.76
เฉลี่ย	41.60	30.61	28.67	57.31	46.20	41.00	71.16	57.27	52.00

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข4 ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ด้วยกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่อุณหภูมิ 950 °C ที่ระยะเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ที่มีความหนาแน่นกระแส 80 mA/cm^2 และ ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 30 และ 45 มิลลิเมตร

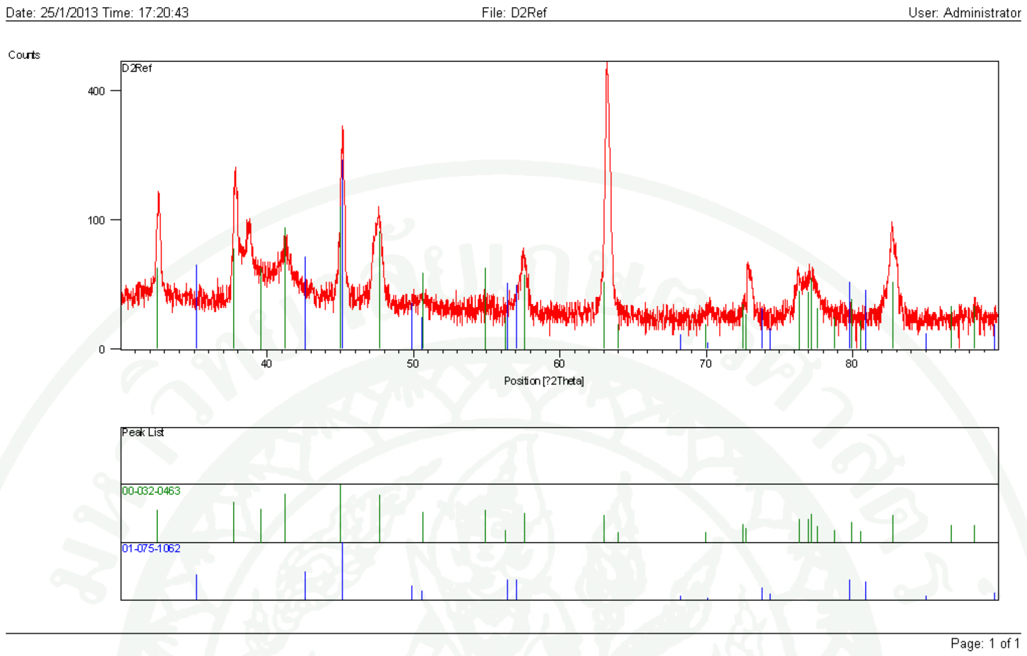
จำนวนครั้งที่วัด	ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ (μm)								
	2 Hr			4 Hr			6 Hr		
	15	30	45	15	30	45	15	30	45
1	67.61	55.57	53.33	85.71	69.52	63.33	95.85	86.66	87.142
2	65.78	51.76	47.66	85.23	67.51	61.42	90.42	84.16	75.23
3	51.42	55.71	52.35	83.81	74.28	65.61	101.62	93.80	80.90
4	69.54	60.55	52.81	86.17	72.37	61.77	104.38	92.85	78.07
5	53.33	55.07	55.72	96.66	80.48	71.42	100	87.71	74.27
6	64.68	55.57	51.17	77.14	79.52	64.57	103.33	88.80	77.61
7	60.36	60.85	48.56	75.70	79.52	60.95	110	85.71	80.15
8	53.33	51.43	49.72	70.45	80	74.76	101.90	84.28	74.76
9	68.57	48.04	45.71	72.48	70.12	66.66	96.19	88.38	76.19
10	53.33	55.71	47.62	73.81	70.12	61.90	95.29	79.52	77.54
เฉลี่ย	60.8	55.03	50.47	80.72	74.34	65.24	99.90	87.19	78.19

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ค

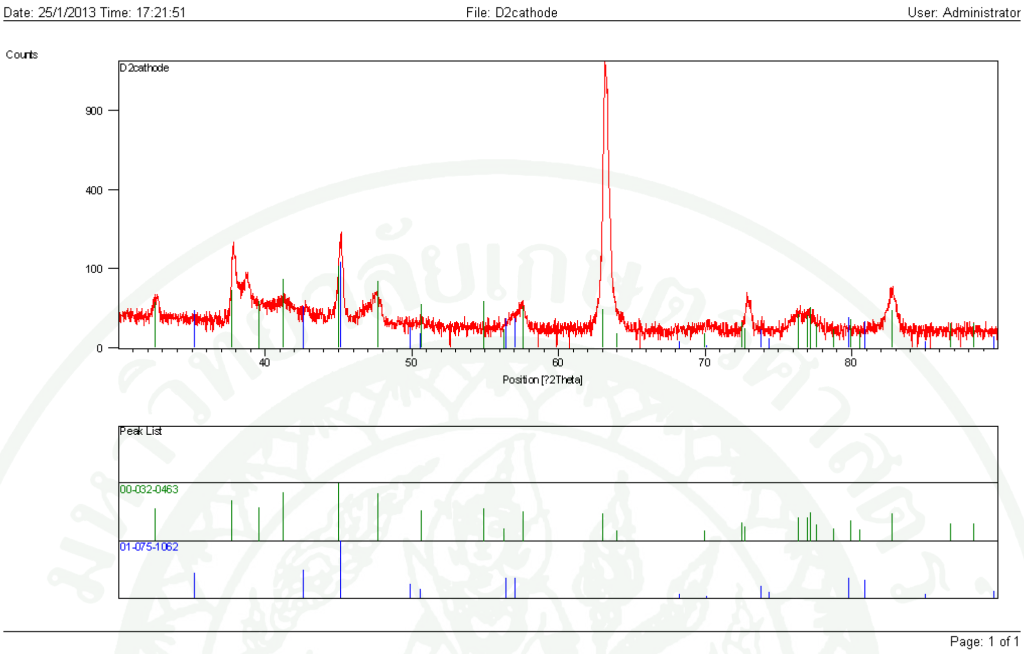
รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกส์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพผนวกที่ ค1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชั้นเคลือบผิวบอไรด์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพผนวกที่ ค2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชั้นเคลือบผิวบอไรด์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความหนาแน่นกระแส 80 mA/cm^2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ นายยศพงศ์ บุญปลูก

เกิดวันที่ 12 ธันวาคม 2531

สถานที่เกิด อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี

ประวัติการศึกษา วท.บ. (เคมีอุตสาหกรรม) มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ตำแหน่งปัจจุบัน -

สถานที่ทำงานปัจจุบัน -

ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ -

ทุนการศึกษาที่ได้รับ -

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์