



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)

ปริญญญา

วิศวกรรมวัสดุ

สาขา

วิศวกรรมวัสดุ

ภาควิชา

เรื่อง ผลกระทบของระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดและแอโนดที่ส่งผลต่อจลนพลศาสตร์
ของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนชนิด AISI H13 ที่ผ่านการทำบอไรด์

Effects of Distance between Cathode and Anode on Kinetics
of Borided Hot Work Tool Steel AISI H13

นามผู้วิจัย นางสาวธีรภา สุพรรณโรจน์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ปฎิภาณ จุ้ยเจิม, Dr.-Ing.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิศิษฐ์ โล้เจริญรัตน์, M.S.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วัน เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ผลกระทบของระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดและแอโนดที่ส่งผลต่อจลนพลศาสตร์
ของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนชนิด AISI H13 ที่ผ่านการทำบอไรด์

Effects of Distance between Cathode and Anode on Kinetics
of Borided Hot Work Tool Steel AISI H13

โดย

นางสาวธีรภา สุพรรณโรจน์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)

พ.ศ. 2556

ธีรภา สุพรรณโรจน์ 2556: ผลกระทบของระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดและแอโนดที่ส่งผลต่อจลนพลศาสตร์ของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนชนิด AISI H13 ที่ผ่านการทำบอไรด์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ) สาขาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ปฎิภาณ จุ้ยเจิม, Dr.-Ing.
82 หน้า

กระบวนการบอไรดิ้งเป็นกระบวนการชุบแข็งพื้นผิวด้วยความร้อนเชิงเคมี ซึ่งจะช่วย เพิ่มอายุการใช้งานให้กับชิ้นงาน กระบวนการบอไรดิ้งแบบแพคนั้นก็เป็นหนึ่งในวิธีที่ช่วยปรับปรุงผิวของชิ้นงาน แต่เป็นกระบวนการที่ต้องใช้อุณหภูมิสูงและเวลานาน เพื่อจะได้ชั้นบอไรด์ที่มีความหนาตามต้องการ จึงทำให้เป็นกระบวนการที่มีต้นทุนสูง ซึ่งการนำไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาช่วยในกระบวนการบอไรดิ้งแบบแพคนั้นสามารถจะเข้าไปช่วยเพิ่มอัตราการแพร่ของอะตอมโบรอน ทำให้ได้ชั้นความหนาบอไรด์เพิ่มขึ้น และปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการแพร่ของอะตอมโบรอนในการใช้ ไฟฟ้ากระแสตรง นั่นคือ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ดังนั้นวัตถุประสงค์ของ งานวิจัยนี้ คือศึกษาถึงผลกระทบของระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดและแอโนดที่ส่งผลต่อจลนพลศาสตร์ของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนชนิด AISI H13 ที่ผ่านการทำบอไรด์ โดยเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนชนิด AISI H13 จะถูกเคลือบผิวด้วยกระบวนการแพคบอไรดิ้งที่มีทั้งการให้และไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง (ความหนาแน่นกระแสขนาด 80 mA/cm^2) ใช้อุณหภูมิ $850 - 950 \text{ }^\circ\text{C}$ ระยะเวลา 2 - 6 ชั่วโมง และระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 - 45 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและวัดความหนาของชั้นเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง วิเคราะห์ องค์ประกอบทางเคมี ของชั้นเคลือบด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) และวัดความแข็งของชั้นเคลือบด้วยเครื่องไมโครวิกเกอร์ จากผลการทดลองพบว่า ชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้นเป็นชนิดเฟสคู่ (FeB และ Fe_2B) และได้ค่าความแข็งที่ผิวประมาณ 1500 HV โดยชั้นเคลือบบอไรด์มีความหนามากที่สุดที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร มีค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 140.33 กิโลจูล/โมล ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าพลังงานกระตุ้นของกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่าเท่ากับ 185.71 กิโลจูล/โมล

Theerapa Supanaroj 2013: Effects of Distance between Cathode and Anode on Kinetics of Borided Hot Work Tool Steel AISI H13. Master of Engineering (Materials Engineering), Major Field: Materials Engineering, Department of Materials Engineering. Thesis Advisor: Mr. Patiphan Juijerm, Dr.-Ing. 82 pages.

Boriding is a thermochemical surface hardening process that can be increase the service life of parts. Pack boriding is one way that helps to surface treatment of parts but is high processing temperature and long process duration to lead a boriding case with an effective thickness. Therefore, it is a process with high cost. Direct current field (DCF) was employed in pack boriding which can be increased diffusion rate of boron atom. The factors that effected diffusion rate of boron atom in a direct current field is distance between the electrodes. The aim of this research was to investigate the effects of distance between cathode and anode on kinetics of borided hot work tool steel AISI H13. So, the hot work tool steel AISI H13 will be borided using pack boriding with and without direct current field (Current density = 80 mA/cm^2) at temperature of $850 - 950^\circ\text{C}$ for 2 - 6 h and distance between the electrodes 15 - 45 mm. Afterwards, microstructure and thickness value were investigated using optical microscope. Chemical compositions were investigated using X-ray diffraction. And the hardness of boride layer was measured by 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 1500 HV was measured. The boride layer has maximum thickness at the distance between the electrodes 15 mm and the activation energy was 140.33 kJ/mol which is less than the activation energy of pack boriding without direct current field was 185.71 kJ/mol.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ทั้งนี้ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ปฎิภาณ จุ้ยเจิม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และกรรมการทุกๆ ท่าน ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการค้นคว้า และวิจัย รวมไปถึงการตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ และขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้ในด้านวิชาการต่างๆ มากมาย รวมไปถึงการอบรมสั่งสอนในด้านต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินชีวิต

ขอขอบพระคุณ คุณพญูร เสนทองแก้ว และคุณสาคร จันทรขอนแก่น เจ้าหน้าที่ประจำ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลองต่างๆ รวมไปถึงการให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างมาก และขอขอบพระคุณ นางสาวลักข มี อังกูรรัชต์ นักศึกษาปริญญาเอกภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ ที่คอยให้ความช่วยเหลือตลอดจนถึงการให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการวิจัย และรวมถึงการตรวจทานแก้ไข วิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคน สำหรับความช่วยเหลือต่างๆ รวมทั้งคำปรึกษา และกำลังใจที่มีให้เสมอมา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ญาติพี่น้อง ที่คอยให้กำลังใจ และการสนับสนุนช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน

ธีรภา สุพรรณโรจน์

มีนาคม 2556

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(11)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	21
อุปกรณ์	21
วิธีการ	22
ผลและวิจารณ์	25
ผล	25
วิจารณ์	40
สรุปและข้อเสนอแนะ	66
สรุป	66
ข้อเสนอแนะ	67
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	68
ภาคผนวก	70
ภาคผนวก ก ความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์	71
ภาคผนวก ข ค่าความแข็งของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์	78
ภาคผนวก ค รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	80
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	82

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 จุดหลอมเหลวและค่าความแข็งของชั้นเคลือบบอไรด์ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงของวัสดุเนื้อพื้นชนิดต่างๆ	6
2 เปรียบเทียบค่าความแข็งของโลหะที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงกับกระบวนการอบชุบอื่นๆ	8
3 สมบัติของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์	9
4 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13	21
5 ค่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงแบบไม่ให้ไฟฟ้า กระแสตรงที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	30
6 ค่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้า กระแสตรงที่อุณหภูมิ เวลา และระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดต่างๆ	38
7 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของของอะตอมโบรอนที่ใช้ในกระบวนการบอไรดิงแบบไม่ให้ไฟฟ้า กระแสตรงที่อุณหภูมิต่างๆ	52
8 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของของอะตอมโบรอนที่ใช้ในกระบวนการบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้า กระแสตรงที่อุณหภูมิและระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดต่างๆ	56
9 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และค่าพลังงานกระตุ้นของกระบวนการแพคบอไรดิงแบบไม่ให้และให้ไฟฟ้า กระแสตรงที่อุณหภูมิต่างๆ	64
 ตารางผนวกที่	
ก1 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงแบบไม่ให้ไฟฟ้า กระแสตรง ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลาต่างๆ	72
ก2 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงแบบไม่ให้ไฟฟ้า กระแสตรง ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นระยะเวลาต่างๆ	73
ก3 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิงแบบไม่ให้ไฟฟ้า กระแสตรง ที่อุณหภูมิ 950°C เป็นระยะเวลาต่างๆ	74

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก4 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง (ความหนาแน่นกระแสขนาด 80 mA/cm^2) ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลาต่างๆ และมีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดต่างๆ	75
ก5 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง (ความหนาแน่นกระแสขนาด 80 mA/cm^2) ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นระยะเวลาต่างๆ และมีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดต่างๆ	76
ก6 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง (ความหนาแน่นกระแสขนาด 80 mA/cm^2) ที่อุณหภูมิ 950°C เป็นระยะเวลาต่างๆ และมีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดต่างๆ	77
ข1 ค่าความแข็งของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง (ความหนาแน่นกระแสขนาด 80 mA/cm^2) ที่อุณหภูมิ 950°C เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง และมีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร	79

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 องค์ประกอบของวัสดุเนื้อพื้นที่ส่งผลต่อลักษณะโครงสร้างและความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์	10
2 ธาตุผสมในวัสดุเนื้อพื้นที่ส่งผลต่อความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์	11
3 ภาพถ่าย SEM แสดงชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านการบอไรดิ้งที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	13
4 ค่าความแข็ง ณ ตำแหน่งต่างๆ ของชิ้นงานที่ผ่านการบอไรดิ้ง (ก) 1173 เคลวิน (ข) 1273 เคลวิน	14
5 (ก) ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์กับเวลาที่ใช้ ณ เวลาที่แตกต่างกัน (ข) ความหนาของชั้นบอไรด์ยกกำลังสองกับเวลาที่ใช้ ณ เวลาที่แตกต่างกัน	15
6 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการบอไรดิ้งของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13	15
7 ความหนาชั้นเคลือบของกระบวนการแพคคูลูมิในซึ่งที่แตกต่างกัน โดย (ก) 45 steel และ (ข) 20 steel	17
8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบและขนาดไฟฟ้ากระแสตรงของ 45 steel และ 20 steel ที่อุณหภูมิ 973 เคลวิน	18
9 แผนภาพการวางชิ้นงานและติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ	19
10 ความหนาชั้นเคลือบของชิ้นงานที่สัมผัสกับขั้วอิเล็กโทรดและอยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดซึ่งผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 4 แอมแปร์	20
11 การวางชิ้นงานและติดตั้งอุปกรณ์	23
12 แผนภาพขั้นตอนการทำวิจัย	24
13 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร โดยให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาดต่างๆ	25

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
14 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา (ก) 2 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง และ (ค) 6 ชั่วโมง	26
15 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง	27
16 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา (ก) 2 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง และ (ค) 6 ชั่วโมง	28
17 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง	29
18 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา (ก) 2 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง และ (ค) 6 ชั่วโมง	30
19 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง	30
20 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (ก) 15 มิลลิเมตร (ข) 30 มิลลิเมตร และ (ค) 45 มิลลิเมตร	31
21 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (ก) 15 มิลลิเมตร (ข) 30 มิลลิเมตร และ (ค) 45 มิลลิเมตร	32

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
22 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (ก) 15 มิลลิเมตร (ข) 30 มิลลิเมตร และ (ค) 45 มิลลิเมตร	32
23 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร	33
24 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (ก) 15 มิลลิเมตร (ข) 30 มิลลิเมตร และ (ค) 45 มิลลิเมตร	34
25 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (ก) 15 มิลลิเมตร (ข) 30 มิลลิเมตร และ (ค) 45 มิลลิเมตร	34
26 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (ก) 15 มิลลิเมตร (ข) 30 มิลลิเมตร และ (ค) 45 มิลลิเมตร	35
27 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร	35
28 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (ก) 15 มิลลิเมตร (ข) 30 มิลลิเมตร และ (ค) 45 มิลลิเมตร	36

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
29 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (ก) 15 มิลลิเมตร (ข) 30 มิลลิเมตร และ (ค) 45 มิลลิเมตร	36
30 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (ก) 15 มิลลิเมตร (ข) 30 มิลลิเมตร และ (ค) 45 มิลลิเมตร	37
31 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร	37
32 ค่าความแข็ง ณ ตำแหน่งต่างๆ จากผิวลึกเข้าสู่ในเนื้อในของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบให้กระแสไฟฟ้าตรงที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร	39
33 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (ก) แบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง และ (ข) แบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร	41
34 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร	42
35 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (ก) ชิ้นงานที่ไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง (ข) ชิ้นงานที่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร	43
36 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
37 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร	45
38 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 30 มิลลิเมตร	45
39 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 45 มิลลิเมตร	46
40 แผนภาพเฟสของเหล็กกับโบรอนของเฟส (ก) Fe_2B และ (ข) FeB	46
41 เปรียบเทียบความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบไม่ให้และให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ $850^{\circ}C$ ณ เวลา และที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดต่างๆ	48
42 การกระจายตัวและการเคลื่อนที่ของอะตอมโบรอนภายใต้สนามไฟฟ้าในกระบวนการบอไรดิ้งแบบแพค	48
43 กำลังสองของความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์กับเวลาต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการบอไรดิ้งแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง	51
44 ลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ($\ln K$) กับส่วนกลับของอุณหภูมิ ($1/T$) ที่ใช้ในกระบวนการบอไรดิ้งแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง	53
45 ความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในกระบวนการบอไรดิ้งแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง	54
46 กำลังสองของความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์กับเวลาต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร	55

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
47 กำลังสองของความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์กับเวลาต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 30 มิลลิเมตร	55
48 กำลังสองของความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์กับเวลาต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 45 มิลลิเมตร	56
49 ลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ($\ln K$) กับส่วนกลับของอุณหภูมิ ($1/T$) ที่ใช้ในกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร	57
50 ลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ($\ln K$) กับส่วนกลับของอุณหภูมิ ($1/T$) ที่ใช้ในกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 30 มิลลิเมตร	58
51 ลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ($\ln K$) กับส่วนกลับของอุณหภูมิ ($1/T$) ที่ใช้ในกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 45 มิลลิเมตร	58
52 ความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร	59
53 ความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 30 มิลลิเมตร	60
54 ความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 45 มิลลิเมตร	60

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่

หน้า

- | | | |
|----|---|----|
| ค1 | รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง | 81 |
| ค2 | รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร | 81 |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	แอมแปร์
K	=	เคลวิน
°C	=	องศาเซลเซียส
s	=	วินาที
DC	=	Direct Current
HV	=	Hardness of Vickers
d	=	ความหนาชั้นเคลือบ (เมตร)
t	=	เวลาที่ใช้ในการเคลือบ (วินาที)
K	=	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (ตารางเมตร/วินาที)
K_0	=	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ (ตารางเมตร/วินาที)
Q	=	พลังงานกระตุ้น (กิโลจูล/โมล)
R	=	ค่าคงที่ของก๊าส (กิโลจูล/โมล.เคลวิน)
T	=	อุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบ (เคลวิน)
E	=	ขนาดของสนามไฟฟ้า (โวลต์/เมตร)
V	=	ความต่างศักย์ระหว่างแผ่นคู่ขนาน (โวลต์)

**ผลกระทบของระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดและแอโนดที่ส่งผลต่อจลนพลศาสตร์
ของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนชนิด AISI H13 ที่ผ่านการทำบอไรด์**

**Effects of Distance between Cathode and Anode on Kinetics
of Borided Hot Work Tool Steel AISI H13**

คำนำ

เหล็กกล้าเครื่องมือ (Tool Steels) เป็นวัสดุที่สำคัญในการผลิตเครื่องมือ (Tools) ประเภทต่างๆ เช่น แม่พิมพ์ขึ้นรูป (forming Die) แม่พิมพ์กดอัด (Extrusion Die) แม่พิมพ์หล่อฉีด (Die Casting) ลูกกรีด (Roller) แม่พิมพ์ตัด (Punch Die) และมีดตัด (Shear Blade) เป็นต้น เครื่องมือเหล่านี้ก่อนที่จะนำไปใช้งานนั้นต้องผ่านกระบวนการชุบแข็งที่ผิวก่อนเสมอ เพื่อต้องการให้ชิ้นงานทนต่อการสึกหรอ ทนต่อแรงบิดหรือแรงกระแทกอย่างรุนแรงได้ดีโดยไม่เกิดการแตกหัก และช่วยยืดอายุการใช้งานให้ยาวนานขึ้น (มนัส, 2543) โดยเหล็กกล้าเครื่องมือที่งานวิจัยนี้สนใจปรับปรุงพื้นผิวให้มีความแข็งแรงสูงขึ้นและสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้เป็นอย่างดีนั้นคือ เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนชนิด AISI H13 เพราะมักเกิดความเสียหายจากการสึกหรอหรือแตกร้าวระหว่างการใช้งาน เนื่องจากต้องรับแรงทางกลมาก รวมถึงอาจสัมผัสกับสารเคมีต่าง ๆ ในกระบวนการผลิต

กระบวนการบอไรดิ้งแบบแพคเป็นกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวอย่างหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากให้ชั้นเคลือบที่มีความแข็งแรงสูง ต้านทานการขัดสีและต้านทานการกัดกร่อนได้ดี ซึ่งอาศัยการแพร่ของอะตอมโบรอนให้เข้าสู่ชิ้นงานและไปจับตัวกับอะตอมเหล็ก เกิดเป็นชั้นเคลือบของเหล็กบอไรด์ขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน โดยปัจจัยที่มีผลต่อความหนาของชั้นเคลือบได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และความเข้มข้นของอะตอมโบรอนในกระบวนการบอไรดิ้ง (Simha and Division, 1994) ซึ่งปัจจัยเหล่านี้เป็นไปตามหลักของทฤษฎีการแพร่ หากต้องการความหนาของชั้นเคลือบที่มากขึ้น จึงจำเป็นต้องเพิ่มปัจจัยต่างๆ ดังกล่าว แต่ในทางอุตสาหกรรมแล้วนั้นหมายถึง ต้นทุนที่เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ ดังนั้นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจในการแก้ปัญหาดังกล่าว คือ การเพิ่มอัตราการแพร่ของอะตอมโบรอนโดยการนำไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาช่วยในกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นการช่วยลดระยะเวลาของกระบวนการ และปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการแพร่ของอะตอมโบรอนในการนำไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาช่วยในกระบวนการผลิตนั้นคือ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลกระทบของระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่ส่งผล

ต่อจนพลศาสตร์ของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนชนิด AISI H13 ในกระบวนการทำบอโรไดมแบบ
แพค เพื่อช่วยเพิ่มผลและประสิทธิภาพของกระบวนการบอโรไดมแบบแพคให้ดียิ่งขึ้น



วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษากระบวนการเคลือบผิวแบบแพคบอโรดิง (Pack Boriding) ที่มีไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current) มาช่วยบนเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนชนิด AISI H13
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของเวลา อุณหภูมิ และระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดซึ่งมีผลต่อชั้นเคลือบจากกระบวนการเคลือบผิวแบบแพคบอโรดิงด้วยไฟฟ้ากระแสตรงบนเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนชนิด AISI H13
3. เพื่อศึกษาลักษณะและสมบัติของชั้นเคลือบจากกระบวนการเคลือบผิวแบบแพคบอโรดิงด้วยไฟฟ้ากระแสตรงบนเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนชนิด AISI H13
4. เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการเคลือบผิวแบบแพคบอโรดิงด้วยไฟฟ้ากระแสตรงบนเหล็กกล้าเครื่องมือชนิด AISI H13

การตรวจเอกสาร

1. เหล็กกล้าเครื่องมือ (Tool steels)

มณัส (2543) เหล็กกล้าเครื่องมือ คือ เหล็กที่ใช้สำหรับขึ้นรูปโลหะเป็นส่วนใหญ่ ดังเช่น แม่พิมพ์สำหรับตีขึ้นรูป อัดขึ้นรูป หรือดึงขึ้นรูป และบางกรณีอาจจะใช้สำหรับทำแบบหล่อโลหะ ในกระบวนการอัดฉีดโลหะร้อน เมื่อพิจารณาถึงส่วนผสมทางเคมี เหล็กกล้าเครื่องมือจัดเป็นเหล็ก ที่ผสมธาตุคาร์บอน และธาตุผสมอื่นๆอยู่ในเกณฑ์สูง มีความสามารถในการชุบแข็งสูงและ โครงสร้างจะมี คาร์ไบด์ปริมาณสูง เพื่อคุณสมบัติด้านทนต่อการสึกหรอ

เหล็กกล้าเครื่องมือที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรมต่างๆ มีมากมายหลายประเภท แต่การจำแนก ชนิดของเหล็กกล้าเครื่องมือตามลักษณะการใช้งานร่วมกับเทคนิคการชุบแข็งเป็นการจำแนกชนิดที่ ขอมรับกันแพร่หลาย ซึ่งเป็นไปตามลักษณะวิธีการจำแนกของสมาคม AISI (American Iron and Steel Institute) จะแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ได้ 7 กลุ่ม คือ

1. เหล็กกล้าเครื่องมือชุบแข็งโดยการชุบน้ำ
2. เหล็กกล้าเครื่องมือทนต่อแรงกระแทก
3. เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น
4. เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน
5. เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูง
6. เหล็กกล้าเครื่องมือสำหรับแม่พิมพ์พลาสติก
7. เหล็กกล้าเครื่องมือพิเศษ

โดยเหล็กกล้าเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน (Hot working tool steels) โดยหลักการทำงานของเหล็กกล้าเครื่องมือในกลุ่มนี้จะสัมผัสกับโลหะร้อนใน ขบวนการผลิต เช่น การตีขึ้นรูปร้อน (Forging) การอัดขึ้นรูปร้อน (Hot extrusion) และการใช้งาน เป็นแม่พิมพ์ร้อนในขบวนการ Die casting เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนจะต้องประกอบด้วย คุณสมบัติที่สำคัญดังนี้

1. มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Thermal shock)

2. มีความต้านทานต่อแรงกระแทก (Shock resistance)
3. มีความต้านทานต่อการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูง (Resistance to softening by tempering)
4. คงความแข็งไว้ได้ดีที่อุณหภูมิสูง (Red hardness)

เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนตามมาตรฐาน AISI จะใช้สัญลักษณ์ H ซึ่งจะแบ่งออกเป็นหลายชั้นคุณภาพ แต่จะแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มย่อย คือ

กลุ่มที่ 1 เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือที่มีคาร์บอนต่ำ (0.35-0.4%) และผสมโครเมียมไม่น้อยกว่า 3.25% นอกจากนี้ยังผสม วานาเดียม โมลิบดีนัม และทังสเตนอีกเล็กน้อย ตามมาตรฐาน AISI เหล็กในกลุ่มนี้จะมีหลายชั้นคุณภาพ เริ่มตั้งแต่ H₁₀-H₁₉ เป็นเหล็กที่มีความสามารถในการชุบแข็งสูง สามารถชุบแข็งด้วยการเป่าลมและชุบน้ำมันซึ่งจะได้ความแข็งระหว่าง 40-55 HRC

กลุ่มที่ 2 เป็นเหล็กกล้าผสมทังสเตน (Tungsten base) กำหนดโดย AISI คือชั้นคุณภาพ H₂₁-H₂₆ เป็นเหล็กคาร์บอนต่ำ 0.25-0.45% ผสมทังสเตนไม่น้อยกว่า 9% และโครเมียม ตั้งแต่ 2-12% จากการที่ผสมทังสเตนและโครเมียมสูง ทำให้เหล็กมีคุณสมบัติรักษาความแข็งไว้ได้ดีที่อุณหภูมิสูง แต่ความเหนียวที่อุณหภูมิต่ำจะต่ำกว่าเหล็กในกลุ่มแรกโดยมีความแข็งเท่าๆ กัน เหล็กในกลุ่มนี้จะมีความสามารถในการชุบแข็งอยู่ในเกณฑ์ดีสามารถชุบลมและชุบน้ำมันได้ดี

กลุ่มที่ 3 เป็นเหล็กกล้าผสมโมลิบดีนัม (Molybdenum base) อยู่ในชั้นคุณภาพ H₄₁-H₄₃ ตามมาตรฐาน AISI เป็นเหล็กมีคาร์บอน 0.5-0.6% ผสมโมลิบดีนัมประมาณ 8% โครเมียม 4% และทังสเตนและวานาเดียมอีกเล็กน้อย เหล็กกล้าในกลุ่มนี้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเหล็กกล้าในกลุ่มที่ 2 มาก มีข้อแตกต่างตรงที่ความต้านทานต่อการแตกร้าวดีกว่า (Heat cracking) ในขณะที่ใช้งาน ลักษณะร้อนเย็นสลับกันและอีกอย่างคือ ราคาถูกกว่า แต่มีข้อเสียตรงที่จะสูญเสียคาร์บอน (Decarburization) ได้มากกว่าในขณะอบชุบ

งานวิจัยนี้เลือกใช้เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนชนิด AISI H13 ซึ่งมีส่วนผสมของโครเมียม โมลิบดีนัม และวานาเดียม ทำให้มีสมบัติทนต่อผิวแตกถายางได้ดี ทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้ดี คงสภาพความแข็งแรงในอุณหภูมิสูง สามารถชุบแข็งได้ดี บิดตัวน้อย ความแข็งสม่ำเสมอและมีความเหนียวสูง ส่วนใหญ่มักนำไปทำแม่พิมพ์ฉีดงานรีดร้อน แม่พิมพ์ทุบขึ้นรูป มัดตัดบิลเล็ท อินเซอร์ทแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกและใบมีดตัดทางเหล็กในโรงงานอุตสาหกรรม แต่เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนชนิด AISI H13 นั้นมักจะเกิดความเสียหายจากการสึกหรอหรือแตกร้าว

ระหว่างการใช้งาน เนื่องจากต้องรับแรงทางกลที่มาก รวมถึงอาจสัมผัสกับสารเคมีต่าง ๆ ในกระบวนการผลิต จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงพื้นผิวชิ้นงานให้มีความแข็งแรง และทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดียิ่งขึ้น วิธีการปรับปรุงพื้นผิวโลหะนั้นก็มียุ่หลายหลายวิธี เช่น การชุบโรซิง ไนไตรดิง และบอโรดิง เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้สนใจการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกระบวนการบอโรดิง

2. กระบวนการบอโรดิง (Boriding process)

กระบวนการบอโรดิง หรือ บอโรไนซิง (Boronizing) เป็นกระบวนการชุบแข็งพื้นผิวด้วยความร้อนเชิงเคมี ซึ่งสามารถทำได้กับวัสดุหลากหลายประเภท เช่น โลหะในกลุ่มเหล็ก โลหะนอกกลุ่มเหล็ก และวัสดุเซอรัเมต (Cermets materials) โดยอุณหภูมิที่ใช้โดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 700 - 1000 องศาเซลเซียส และใช้เวลาตั้งแต่ 3 - 16 ชั่วโมง

ตารางที่ 1 จุดหลอมเหลวและค่าความแข็งของชั้นเคลือบบอโรดิงที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงของวัสดุเนื้อพื้นชนิดต่างๆ

วัสดุ	ชนิดชั้นเคลือบ	สมบัติ	
		ความแข็ง (HV)	จุดหลอมเหลว (°C)
Fe	FeB	1900-2100	1390
	Fe ₂ B	1800-2000	....
Co	CoB	1850	....
	Co ₂ B	1500-1600	....
	Co ₃ B	700-800	....
Co-27.5Cr	CoB	2200	....
	Co ₂ B	1550	....
	Co ₃ B	700-800	....
Ni	Ni ₄ B ₃	1600	....
	Ni ₂ B	1500	....
	Ni ₃ B	900	....

ตารางที่ 1 (ต่อ)

วัสดุ	ชนิดชั้นเคลือบ	สมบัติ	
		ความแข็ง (HV)	จุดหลอมเหลว (°C)
Mo	Mo ₂ B	1660	2000
	MoB ₂	2330	2100
	Mo ₂ B ₃	2400-2700	2100
W	W ₂ B ₅	2600	2300
Ti	TiB	2500	1900
	TiB ₂	3370	2980
Ti-6Al-4V	TiB		....
	TiB ₂	3000	....
Ta	Ta ₂ B		3200-3500
	TaB ₂	2500	3200

ที่มา: Davis (2002)

ในระหว่างกระบวนการบอโรไดงจะเกิดการแพร่ของอะตอมโบรอนเข้าสู่ผิวชิ้นงานโลหะ และเกิดเป็นชั้นเคลือบของสารประกอบบอไรด์ขึ้น ลักษณะรูปร่าง การเติบโต องค์ประกอบของ เฟสของชั้นเคลือบบอไรด์เป็นผลมาจากธาตุโลหะผสมในวัสดุเนื้อพื้น และค่าความแข็งของชั้นเคลือบบอไรด์นั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและ โครงสร้างของชั้นเคลือบบอไรด์และองค์ประกอบของวัสดุเนื้อพื้น ดังแสดงในตารางที่ 1

ข้อดีของกระบวนการบอโรไดง

1. ชั้นเคลือบบอไรด์มีจุดหลอมเหลวที่สูงและมีค่าความแข็งสูง 1450 - 5000 HV
2. ชั้นเคลือบบอไรด์มีค่าความแข็งมากกว่ากระบวนการอบชุบอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2
3. ชั้นเคลือบบอไรด์มีค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานต่ำ ทำให้สามารถต้านทานต่อการขัดถู
4. ต้านทานต่อการเสียดสี การกัดกร่อน และการเกิดความล้าที่ผิวได้ดี
5. ชั้นเคลือบบอไรด์สามารถคงความแข็งอยู่ได้ที่อุณหภูมิสูง
6. ชั้นเคลือบบอไรด์สามารถเกิดได้กับโลหะหลากหลายชนิด

7. ชั้นเคลือบบอไรด์สามารถต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้ที่อุณหภูมิสูง
8. ชั้นเคลือบบอไรด์สามารถเพิ่มอายุการใช้งานและประสิทธิภาพการใช้งานภายใต้สภาวะการเกิดออกซิเดชันและการกัดกร่อน

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าความแข็งของโลหะที่ผ่านกระบวนการบอไรดิงกับกระบวนการอบชุบอื่นๆ

วัสดุ	ค่าความแข็ง (HV)
เหล็กเหนียวผ่านกระบวนการบอไรดิง	1600
เหล็กกล้าเครื่องมือ AISI H13 ผ่านกระบวนการบอไรดิง	1800
เหล็กกล้าเครื่องมือ AISI A2 ผ่านกระบวนการบอไรดิง	1900
เหล็กโครงสร้างมาร์เทนไซด์	900
เหล็กกล้าเครื่องมือ AISI H13 ผ่านกระบวนการชุบแข็งและอบคืนตัว	540-600
เหล็กกล้าเครื่องมือ AISI A2 ผ่านกระบวนการชุบแข็งและอบคืนตัว	630-700
เหล็กกล้าความเร็วสูง M42	900-910
เหล็กกล้าผ่านกระบวนการไนตรายดิง	650-1700
เหล็กคาร์บอนต่ำผ่านกระบวนการคาร์บูไรซิง	650-950
เหล็กชุบโครเมียม	1000-1200

ที่มา: Davis (2002)

กระบวนการบอไรดิงของโลหะในกลุ่มเหล็กจะสามารถเกิดชั้นเคลือบบอไรด์ได้ 2 ชนิด คือ ชนิดเฟสเดียวหรือชนิดเฟสคู่ ซึ่งชนิดเฟสเดียวจะประกอบไปด้วย Fe_2B ในขณะที่ชนิดเฟสคู่จะประกอบไปด้วย FeB ที่อยู่ชั้นนอกและ Fe_2B ที่อยู่ชั้นใน ชั้นเคลือบบอไรด์จะเป็นชนิดเฟสเดียวหรือเฟสคู่นั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของอะตอมโบรอน โดยสมบัติของชั้นเคลือบบอไรด์แสดงในตารางที่ 3

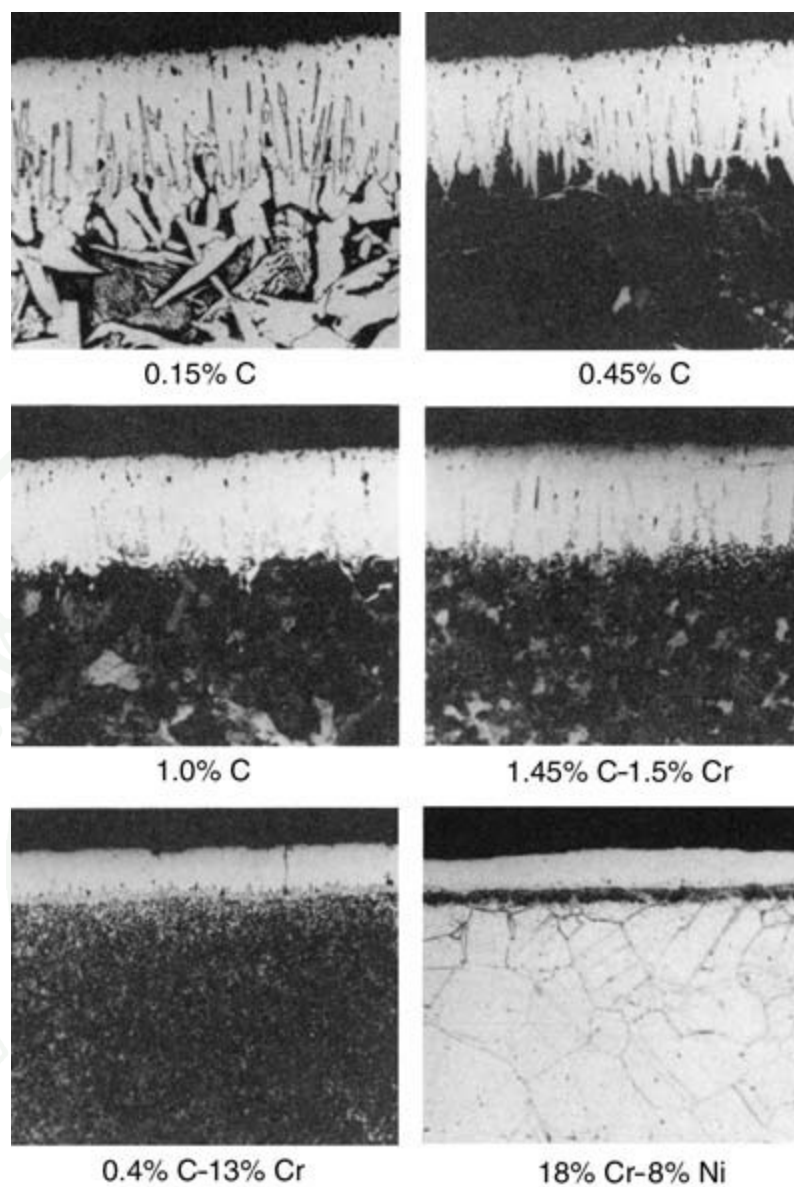
โดยการเกิดชั้นเคลือบบอไรด์ชนิดเฟสเดียวของ Fe_2B นั้นเป็นที่ต้องการมากกว่าชนิดเฟสคู่ที่มี FeB เป็นเฟสร่วม เพราะว่า FeB นั้นไม่เป็นที่ต้องการ เนื่องจาก FeB มีความเปราะมากกว่า Fe_2B ซึ่งอาจก่อให้เกิดรอยแตกร้าวภายในหรือระหว่างชั้นรอยต่อของ FeB และ Fe_2B

ตารางที่ 3 สมบัติของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์

สมบัติ	FeB	Fe ₂ B
ค่าความแข็ง (HV)	1900-2100	1800-2000
โครงสร้างผลึก	Orthorhombic 4 อะตอมของเหล็ก 4 อะตอมของบอรอน	Body-center tetragonal 8 อะตอมของเหล็ก 4 อะตอมของบอรอน
ขนาดผลึก (Å)	a = 4.053 b = 5.495 c = 2.946	a = 5.078 b = 4.249
ความหนาแน่น (g/cm ³)	6.75	7.43
จุดหลอมเหลว (°C)	1540	1390
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทาง		
ความร้อน (ppm/°C)	23	7.65-9.2
ค่ามอดูลัสการยืดหยุ่น (Pascal)	590×10 ⁹	285×10 ⁹ -295×10 ⁹
เปอร์เซ็นต์บอรอน (%wt)	16.23	8.83

ที่มา: Sinha and Division (1994)

สมบัติทางกลของชั้นเคลือบบอไรด์ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของชั้นเคลือบบอไรด์ โดยเป็นผลมาจากส่วนผสมทางเคมีของวัสดุเนื้อพื้นดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งมีธาตุผสมที่แตกต่างกัน เช่น



ภาพที่ 1 องค์ประกอบของวัสดุเนื้อพื้นที่ส่งผลต่อลักษณะ โครงสร้างและความหนาของชั้นเคลือบ
บอไรด์

1. คาร์บอน ไม่สามารถละลายและแพร่ผ่านชั้นบอไรด์ได้ ในระหว่างการทำบอไรดิ้ง คาร์บอนจะถูกอะตอมโบรอนผลักรอกจากชั้นบอไรด์เข้าไปในเนื้อโลหะหรือชิ้นงาน เพื่อรวมตัวกับเหล็กและโบรอนเกิดเป็น $\text{Fe}_3(\text{B,C})$ ซึ่งจะเรียงตัวอยู่ระหว่างชั้นของ Fe_2B และเนื้อพื้นของวัสดุ

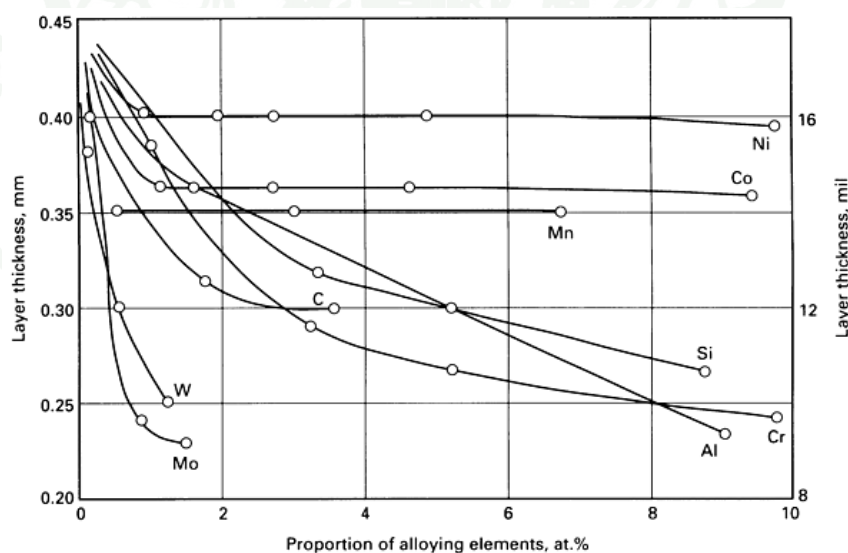
2. ซิลิกอน ไม่สามารถละลายในชั้นบอไรด์ได้เช่นเดียวกับการ์บอน โดยธาตุนี้จะถูกอะตอมโบรอนผลักออกจากบริเวณผิวชั้นงานให้เข้าไปในเนื้อโลหะแล้วรวมตัวเป็น $\text{FeSi}_{0.4}\text{B}_{0.6}$ และ Fe_3SiB_2 ซึ่งมีโครงสร้างเป็นเหล็กเฟอร์ไรท์ที่มีลักษณะที่อ่อนนุ่มเรียงตัวอยู่ใกล้กับชั้นเคลือบบอไรด์ และมีผลทำให้ความต้านทานการเสียดสีของชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้นลดลง

3. นิกเกิล ทำให้การเติบโตของชั้นเคลือบบอไรด์ลดลง โดยนิกเกิลจะเข้าไปรวมตัวกับโบรอนเกิดเป็น Ni_3B เรียงตัวเป็นชั้นแยกออกมาอยู่ใต้ชั้นเคลือบบอไรด์

4. โครเมียม ทำให้การเติบโตของชั้นเคลือบบอไรด์ลดลงเช่นกัน และทำให้ชั้นเคลือบบอไรด์มีความราบเรียบมากขึ้น

5. ทังสเตน โมลิบดีนัม และวานาเดียม ธาตุเหล่านี้มีผลทำให้ชั้นเคลือบบอไรด์มีความหนาและความราบเรียบลดลงหรือมีรูปร่างเป็นลักษณะของฟันปลาในพวกเหล็กกล้าคาร์บอน

นอกจากนี้ปริมาณของธาตุผสมยังมีผลต่อความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่ได้ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ธาตุผสมในวัสดุเนื้อพื้นี่ส่งผลต่อความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์

กระบวนการบอโรไดนิ่งนั้นอาศัยหลักการแพร่เพื่อให้อะตอมโบรอนนั้นแพร่เข้าสู่ผิวชิ้นงาน โลหะเกิดเป็นชั้นเคลือบบอโรได์ ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่ของอะตอมโบรอนมี 3 ปัจจัยสำคัญ ดังนี้ อุณหภูมิ เวลา และความเข้มข้นของอะตอมโบรอนอิสระในการบอโรไดนิ่ง

โดยความหนาของชั้นเคลือบบอโรได์มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ดังสมการที่ (1)

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

โดยที่ d คือ ความหนาของชั้นเคลือบ (ไมโครเมตร)
 t คือ เวลาในการเคลือบ (วินาที)
 K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (ตารางไมโครเมตร/วินาที)

ซึ่งสัมพันธ์กับอุณหภูมิตามสมการที่ (2)

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

โดยที่ K_0 = ค่าคงที่สัมประสิทธิ์การแพร่ (ตารางไมโครเมตร/วินาที)
 Q = พลังงานกระตุ้น (โมล/กิโลจูล)
 T = อุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว (เคลวิน)
 R = ค่าคงที่ของแก๊ส (กิโลจูล/โมล.เคลวิน)

กระบวนการบอโรไดนิ่งนี้มีอยู่หลายวิธี เช่น กระบวนการบอโรไดนิ่งแบบแพค (Pack boriding), กระบวนการบอโรไดนิ่งแบบของเหลว (Liquid boriding), กระบวนการบอโรไดนิ่งแบบใช้แก๊ส (Gas boriding) และกระบวนการบอโรไดนิ่งแบบพลาสมา (Plasma boriding) แต่กระบวนการแพคบอโรไดนิ่งเป็นวิธีนิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรม เพราะเป็นวิธีที่ง่ายและไม่ซับซ้อน ปลอดภัย สามารถปรับส่วนผสมได้ตามต้องการ ลดข้อจำกัดทางเครื่อง และมีความคุ้มค่าสูง ซึ่งวิธีนี้เป็นกระบวนการบอโรไดนิ่งโดยใช้ผงสำเร็จรูปหรือที่เรียกว่า บอโรไดนิ่งเอเจนต์ (Boriding agent) ที่ประกอบไปด้วยส่วนสำคัญดังนี้

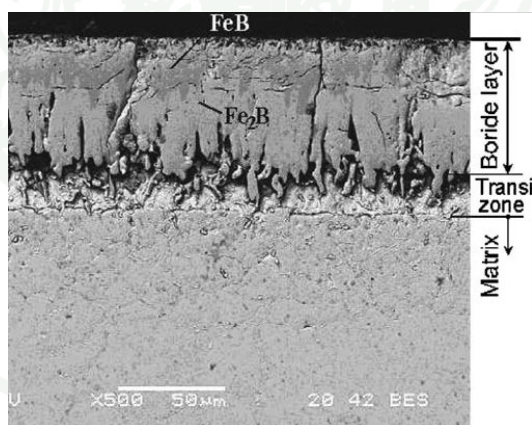
1. สารที่ให้อะตอมโบรอนอิสระ (Boron-yielding substances) เช่น โบรอนคาร์ไบด์ (Borocarbide, B_4C)

2. สารที่ทำหน้าที่เจือจาง (Diluent) เพื่อควบคุมปริมาณอะตอมโบรอนอิสระ เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide, SiC)

3. สารที่ทำหน้าที่กระตุ้น (Activator) เพื่อกระตุ้นการแตกตัวของอะตอมโบรอนอิสระ เช่น โพแทสเซียมฟลูออโบเรต (Potassium fluoborate, KBF_4)

วิธีการทำกระบวนการแพคบอโรดิงจะนำชิ้นงานที่ต้องการเคลือบผิวบรรจุลงในกล่องพร้อมกับผงสำเร็จรูป จากนั้นให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิและเวลาที่ต้องการ เพื่อให้อะตอมโบรอนแพร่เข้าไปในผิวชิ้นงานและเกิดเป็นชั้นเคลือบบอไรด์ เมื่อครบกำหนดที่ต้องการแล้วให้นำชิ้นงานออกจากเตาเพื่อให้เย็นตัวในอากาศที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งระหว่างกระบวนการแพคบอโรดิงควรทำในบรรยากาศของแก๊สเฉื่อยเพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันที่ผิวของชิ้นงาน

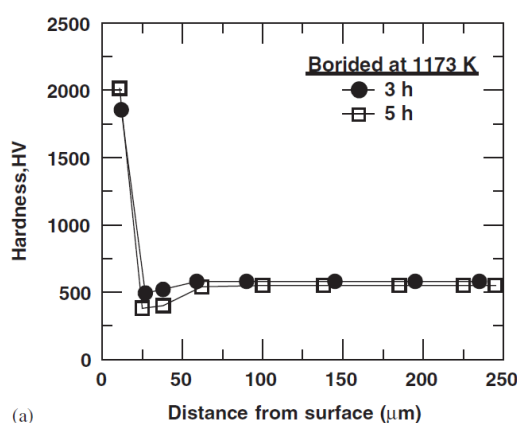
จากงานวิจัยของ Genel (Genel, 2005) ได้ศึกษาสมบัติและจลนพลศาสตร์ของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิงแบบแพคที่อุณหภูมิ 1073-1273 เคลวินเป็นเวลา 1-5 ชั่วโมง พบว่าเกิดชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ชนิดเฟสคู่ ประกอบไปด้วย FeB และ Fe_2B ดังแสดงในภาพ 3



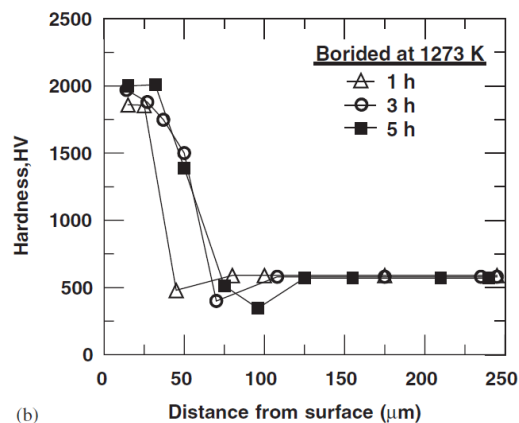
ภาพที่ 3 ภาพถ่าย SEM แสดงชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านการบอโรดิงที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

และพบว่าชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่ได้มีค่าความแข็งที่ผิวสูงสุดอยู่ระหว่าง 1650-2000 HV ในขณะที่เมื่อลึกลงไปเนื้อพื้นของวัสดุมีค่าความแข็งอยู่ที่ 570 HV ดังแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งจะเห็นได้

ว่าค่าความแข็งจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ 1) ช่วงของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ 2) ช่วงของ Transition zone จะมีความอ่อนนุ่มกว่าเนื้อพื้นของวัสดุ และ 3) ช่วงของเนื้อพื้นวัสดุ เป็นส่วนที่ไม่ได้รับผลจากการแพร่ของโบรอน และยังพบว่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์กับเวลาที่มีความสัมพันธ์กันแบบพาราโบลิตตามสมการที่ (1) คือ $d^2 = Kt$ โดย K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการบอไรดิ้ง นอกจากนั้นยังได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จากค่าความชันของเส้นตรงดังแสดงในภาพ 5 ซึ่งพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และอุณหภูมิในการบอไรดิ้งตามสมการที่ (2) ของ Arrhenius คือ $K = K_0 \exp(-Q/RT)$ โดย Q คือ ค่าพลังงานกระตุ้นหรือที่เรียกว่า ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy) (J/mol) และ R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (J/mol.K)

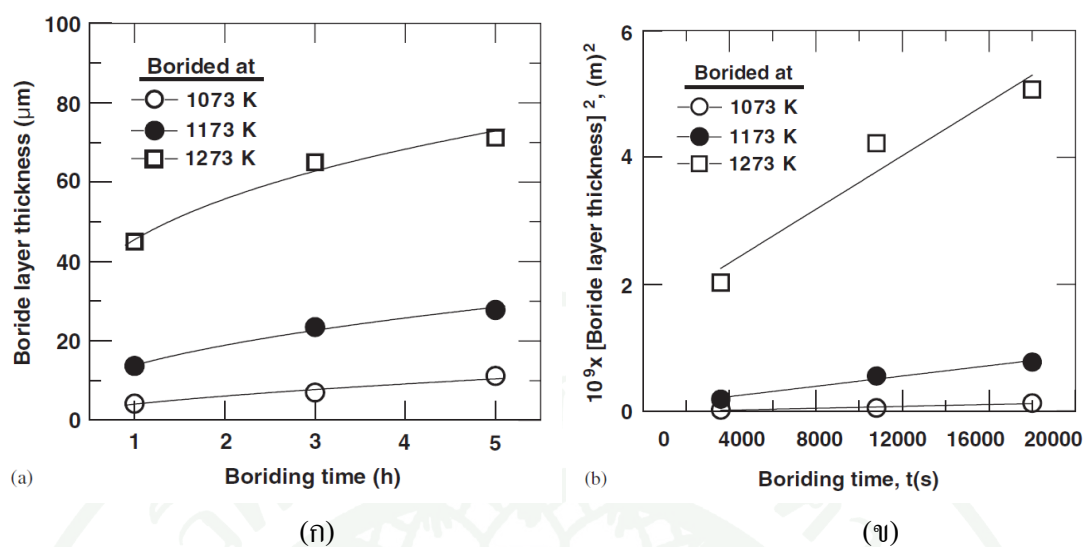


(ก)



(ข)

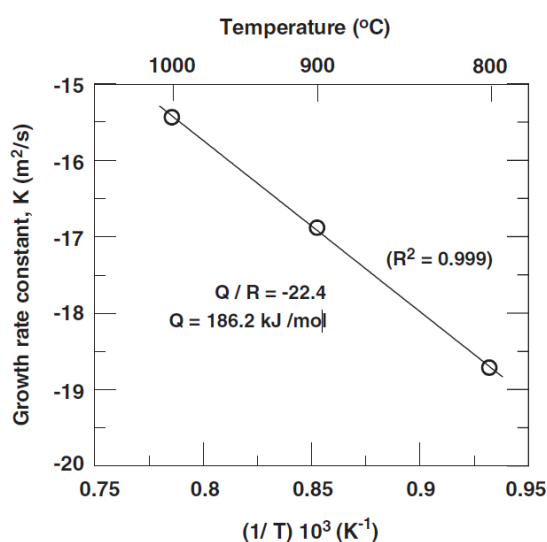
ภาพที่ 4 ค่าความแข็ง ณ ตำแหน่งต่างๆ ของชิ้นงานที่ผ่านการบอไรดิ้ง (ก) 1173 เคลวิน
(ข) 1273 เคลวิน



ภาพที่ 5 (ก) ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์กับเวลาที่ใช้ ณ เวลาที่แตกต่างกัน

(ข) ความหนาของชั้นบอไรด์ยกกำลังสองกับเวลาที่ใช้ ณ เวลาที่แตกต่างกัน

ในภาพที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรงของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และอุณหภูมิที่ใช้ในการบอไรดิ้ง และทำให้สามารถคำนวณค่าพลังงานกระตุ้นของกระบวนการบอไรดิ้งได้เท่ากับ 186.2 kJ/mol



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการบอไรดิ้งของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13

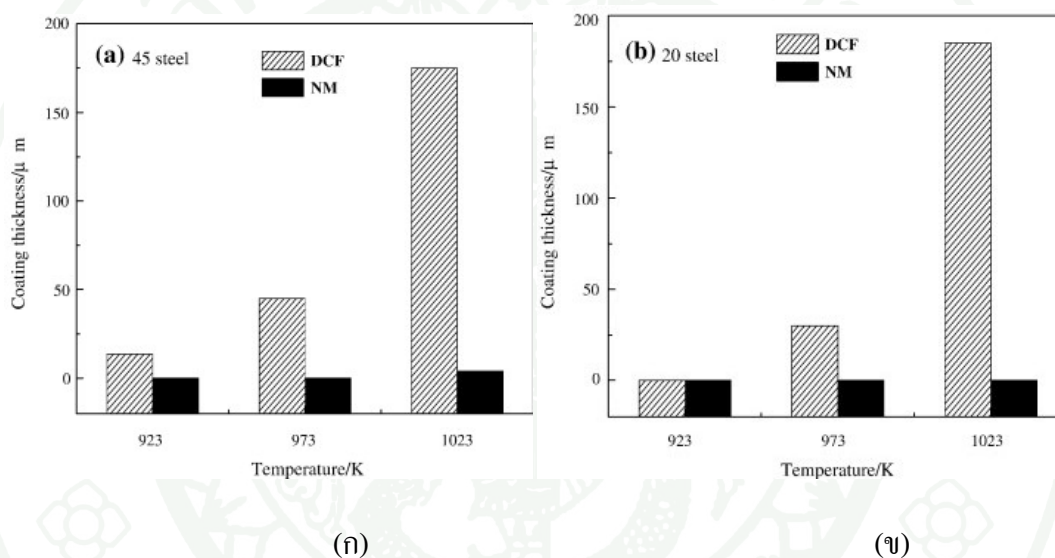
จากงานวิจัยข้างต้นเป็นการยืนยันว่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยของ ทฤษฎีการแพร่ 3 ปัจจัยสำคัญ คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการบอไรดิ้ง เวลาที่ใช้ในการบอไรดิ้ง และความเข้มข้นของอะตอมโบรอนอิสระ โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบและเวลาที่ใช้ เป็นแบบพาราโบลา และมีความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และอุณหภูมิที่ใช้เป็นแบบ เส้นตรง ซึ่งจากทั้ง 2 ความสัมพันธ์จึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการ บอไรดิ้ง จะทำให้ได้ค่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่เพิ่มขึ้นตามเช่นกัน แต่ในทาง อุตสาหกรรมแล้วการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการบอไรดิ้งนั้น จะเป็นการเพิ่มต้นทุนที่สูงขึ้น ให้กับกระบวนการเช่นกัน เพราะฉะนั้นจึงมีงานวิจัยที่มีแนวคิดที่จะช่วยลดต้นทุนและพลังงานของ กระบวนการลง ด้วยการเพิ่มอัตราการแพร่ของอะตอมโบรอนอิสระให้ดีขึ้น โดยวิธี ให้ไฟฟ้า กระแสตรงเข้าช่วยในกระบวนการ

ดังเช่นในงานวิจัยของ Xie และคณะ (Xie *et al.*, 2006) ได้ศึกษาอิทธิพลของไฟฟ้ากระแส ตรงที่ส่งผลต่อกระบวนการแพคบอไรดิ้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการบอไรดิ้ง โดยใช้ ชิ้นงานตัวอย่าง คือ 20 steel 45 steel (0.2 และ 0.45 %C ตามลำดับ) และ AISI T12 ทำที่อุณหภูมิ 550-750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาดตั้งแต่ 0-4 แอมแปร์ พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้เกิดชั้นเคลือบบอไรด์ที่มีความหนาเพิ่มขึ้น และเมื่อคงอุณหภูมิ ไว้ที่ 700°C พบว่าชั้นเคลือบบอไรด์มีความหนาเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการให้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้าช่วยใน กระบวนการ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามขนาดของไฟฟ้ากระแสตรงที่เพิ่มขึ้นตามเช่นกัน

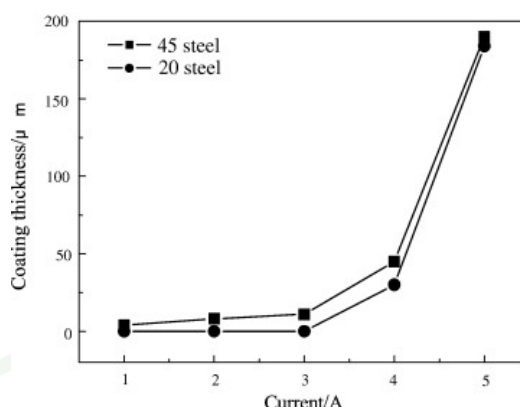
จากงานวิจัยของ Xie และคณะ แสดงให้เห็นว่าไฟฟ้ากระแสตรงนั้นสามารถเข้าไปช่วย เพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการแพคบอไรดิ้งได้ โดยมาจาก 2 สาเหตุคือ 1) ไฟฟ้ากระแสตรงเข้า ไปช่วยให้อะตอมโบรอนเคลื่อนที่แบบมีทิศทางโดยแพร่ไปยังชิ้นงานที่เป็นขั้วแคโทด ทำให้ความเข้มข้นของอะตอมโบรอนรอบๆ ชิ้นงานที่เป็นขั้วแคโทดมีปริมาณมากกว่าชิ้นงานที่เป็นขั้วแอโนด หรือตำแหน่งอื่นๆ และยิ่งมากกว่าเมื่อเทียบกับกระบวนการบอไรดิ้งแบบปกติ และ 2) ไฟฟ้า กระแสตรงเข้าไปช่วยเพิ่มการเกิดปฏิกิริยาเคมี ทำให้เกิดการแตกตัวของอะตอมโบรอนได้ดีขึ้น ความเข้มข้นของอะตอมโบรอนอิสระจึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เพราะฉะนั้นการใช้ไฟฟ้ากระแสตรง เข้าช่วยในกระบวนการแพคบอไรดิ้งจึงเป็นวิธีหนึ่งที่ช่วยเพิ่มความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ได้ และสามารถลดต้นทุนและพลังงานลงได้จริง

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่นำไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปช่วยในกระบวนการอื่นๆ อีก ดังเช่น ในงานวิจัยของ Zhenghua และคณะ (Zhenghua *et al.*, 2008) ได้ศึกษาการทำแพคอะลูมิเนียมในเชิงที่

อุณหภูมิต่ำโดยการนำไฟฟ้ากระแสตรงเข้าช่วย โดยใช้ชิ้นงานตัวอย่าง 2 ชนิด คือ 20 Steel และ 45 Steel (0.2 และ 0.45 %C ตามลำดับ) โดยกำหนดสภาวะการทดลองออกเป็น 2 สภาวะหลัก คือ ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (DCF) และไม่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (NM) อุณหภูมิที่ใช้ 923-1023 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1- 5 แอมแปร์ พบว่าความหนาของชั้นเคลือบมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีการให้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้าช่วยในกระบวนการ ดังแสดงในภาพที่ 7 และพบว่าเมื่อเพิ่มค่าไฟฟ้ากระแสตรงให้สูงขึ้น ทำให้ได้ค่าความหนาของชั้นเคลือบเพิ่มตามขึ้นด้วย ดังแสดงในภาพที่ 8 เนื่องจากไฟฟ้ากระแสตรงนั้นเข้าไปช่วยเพิ่มอัตราการแพร่ของอะตอมอะลูมิเนียมอิสระ ทำให้สามารถลดต้นทุน และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการแพะอะลูมิเนียมในเชิงด้วย



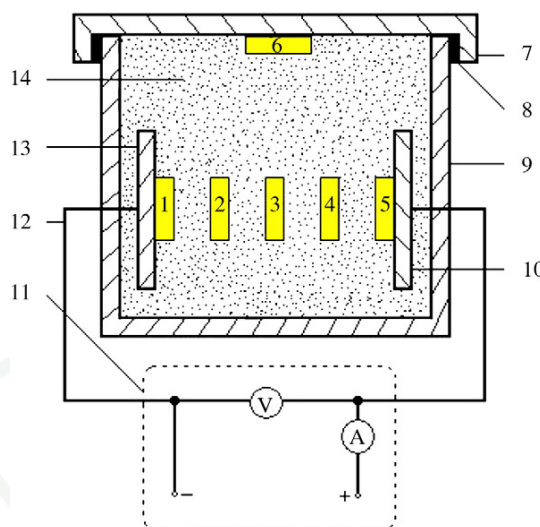
ภาพที่ 7 ความหนาชั้นเคลือบของกระบวนการแพะอะลูมิเนียมในเชิงที่แตกต่างกัน โดย (ก) 45 steel และ (ข) 20 steel



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบและขนาดไฟฟ้ากระแสตรงของ 45 steel และ 20 steel ที่อุณหภูมิ 973 เคลวิน

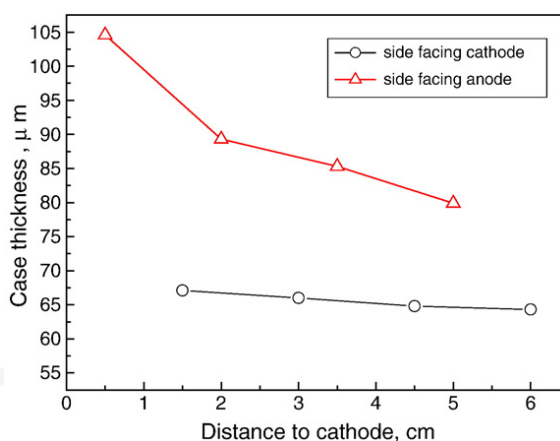
การให้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้าช่วยในกระบวนการแพคบอโรดิงนั้น เป็นแนวทางที่ช่วยเพิ่มอัตราการแพร่ของอะตอมโบรอนได้ และส่งผลให้ประสิทธิภาพในกระบวนการแพคบอโรดิงดียิ่งขึ้น แต่มีข้อสงสัยว่าระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดนั้นมีผลต่ออัตราการแพร่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการแพคบอโรดิงที่มีการให้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้าช่วยในกระบวนการหรือไม่และอย่างไร

ในปี 2011 Xie และคณะ (Xie *et al.*, 2012) ได้ศึกษาลักษณะและกลไกของอัตราการแพร่ในกระบวนการแพคบอโรดิงที่อุณหภูมิต่ำและพอเหมาะโดยให้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้าช่วย ซึ่งในงานวิจัยนี้จะให้ความสนใจระยะห่างของการวางตำแหน่งชิ้นงานที่แตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 9 ชิ้นงานที่ใช้ทดลอง คือ 45 steel ทำที่อุณหภูมิตั้งแต่ 550-800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 0.5-4 แอมแปร์ ระยะห่างระหว่างชิ้นงานหมายเลข 1 ถึง 5 คือ 10 มิลลิเมตร และชิ้นงานหมายเลข 6 จะวางติดกับผนังฝาปิดด้วยระยะห่าง 50 มิลลิเมตรในแนวตั้งฉากกับสนามไฟฟ้ากระแสตรง



ภาพที่ 9 แผนภาพการวางชิ้นงานและติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ (1-6: ชิ้นงาน, 7: ฝาปิด, 8: ปูนยาแนว, 9: ก่อ่งใส่ชิ้นงาน, 10: ขั้วแอโนด, 11: อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรง, 12: สวิตช์ไฟฟ้า, 13: ขั้วแคโทด, 14: ผงบอโรดิงสำเร็จรูป)

พบว่าความหนาชั้นเคลือบของชิ้นงานที่อยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (ชิ้นงานหมายเลข 1 ถึง 5) ที่ทำแพคบอโรดิงโดยให้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้าช่วยที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้านที่หันหน้าเข้าหาขั้วแอโนดนั้น ความหนาจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น เมื่อลดระยะห่างของชิ้นงานกับขั้วแคโทด ดังแสดงในภาพที่ 10 และความหนาชั้นเคลือบของชิ้นงานทั้งหมดมีความหนา มากกว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอโรดิงแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงช่วย และชิ้นงาน หมายเลข 6 ซึ่งติดอยู่กับผนังของฝาปิดมีความหนาชั้นเคลือบประมาณ 40 ไมโครเมตร และมีความ หนาน้อยกว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอโรดิงแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงช่วย เนื่องจาก อะตอมโบรอนอิสระนั้นแพร่เข้าหาผนังของก่องเช่นกัน



ภาพที่ 10 ความหนาชั้นเคลือบของชิ้นงานที่สัมผัสกับขั้วอิเล็กโทรดและอยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งผ่านกระบวนการแพกบอโรดิงที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 4 แอมแปร์

จากงานวิจัยนี้จึงสรุปได้ว่าตำแหน่งของชิ้นงานนั้นมีผลต่อการแพร่ในกระบวนการแพกบอโรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้าช่วย และอัตราการแพร่ของชิ้นงานที่อยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดนั้นจะเพิ่มขึ้นจากขั้วแอโนดไปขั้วแคโทด และจะลดลงเมื่อชิ้นงานอยู่ห่างจากสนามไฟฟ้า

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุและสารเคมี

- 1.1 เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 (ส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 4)
- 1.2 พงสำเร็จรูป Ekabor I จากบริษัท BorTec GmbH
- 1.3 กล่องสำหรับบรรจุชิ้นงานและพงสำเร็จรูป (Container box)
- 1.4 กรดไนตริก (Nitric acid, HNO_3) ความเข้มข้น 1 โมลาร์
- 1.5 แก๊สอาร์กอน (Argon gas)

ตารางที่ 4 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Fe
0.42	0.93	0.39	4.30	1.16	0.75	Bal.

2. อุปกรณ์

- 2.1 เตาอุณหภูมิสูง (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 อุปกรณ์สำหรับแช่แบบเย็น (Cold mount) ใช้เรซินชนิด Epoxy หล่อในเบ้าพลาสติก
- 2.7 กระดาษทราย (Abrasive paper) ผ้าสักหลาด (Alumina cloth) และผงอะลูมินา (Alumina)
- 2.8 ลวดสแตนเลส (Stainless wire) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 9 มิลลิเมตร

3. เครื่องมือวิเคราะห์

3.1 เครื่องมือวิเคราะห์ภาพ (Image Analyzer) โปรแกรม Image-Pro®Plus รุ่น 4.0

3.2 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM) ยี่ห้อ Nikon
รุ่น ECLIPSE ME 600P

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

3.4 เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD) ยี่ห้อ Philips รุ่น X'Pert Pro MPD

วิธีการ

1. การเตรียมชิ้นงาน

นำเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 มาตัดด้วยเครื่องตัดความเร็วสูงให้มีขนาดชิ้นงาน 14 x 25 x 8 มิลลิเมตร และขัดผิวด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 120 180 240 320 400 และ 600 เพื่อทำความสะอาดและปรับระนาบผิวชิ้นงาน แล้วล้างด้วยน้ำสะอาด จากนั้นทำให้แห้งและเก็บในภาชนะกันความชื้น

2. การเคลือบผิว

2.1 นำชิ้นงานทั้งหมดที่เตรียมไว้มาทำความสะอาดผิวด้วยอะซิโตน ร้อยและผูกมัดเข้ากับชิ้นงานโดยแบ่งเป็น 3 กลุ่มดังนี้ 1) ชิ้นงานอ้างอิง 1 ชิ้น 2) ชิ้นงานแอโนด 3 ชิ้น คือชิ้นงานสำหรับระยะห่างระหว่างขั้ว 15 30 และ 45 มิลลิเมตร และ 3) ชิ้นงานแคโทด 3 ชิ้น คือชิ้นงานสำหรับชิ้นงานฝังแอโนด จากนั้นเติมผงสำเร็จรูป Ekabor I ลงในกล่องพร้อมทั้งนำชิ้นงานมาวางให้ได้ระยะที่กำหนดดังแสดงในภาพที่ 11 แล้วอัดผงสำเร็จรูปให้แน่น

2.2 ติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิเข้ากับตัวชิ้นงาน ต่ออุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับชิ้นงานซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง โดยกำหนดให้ชิ้นงานที่ต้องการเคลือบผิวเป็นขั้วแคโทด รวมทั้งต่อท่อของแก๊สอาร์กอนเข้ากับเตาอุณหภูมิสูงด้วยในขณะที่เคลือบผิว

2.3 ปิดฝากล่องบรรจุชิ้นงาน และปิดรอยต่อของกล่องด้วยซีเมนต์ รอสีเมนต์แข็งตัว แล้วนำกล่องเข้าเตา

2.4 เปิดเตาให้อุณหภูมิ จ่ายกระแสไฟฟ้า และคงเวลาการเคลือบผิวตามเงื่อนไขการทดลอง
แต่ละครั้ง เมื่อครบกำหนดเวลาตามเงื่อนไขแล้วนำกล่องบรรจุชิ้นงานออกมาเย็นตัวในอากาศ
จากนั้นนำชิ้นงานไปวิเคราะห์ชั้นเคลือบ

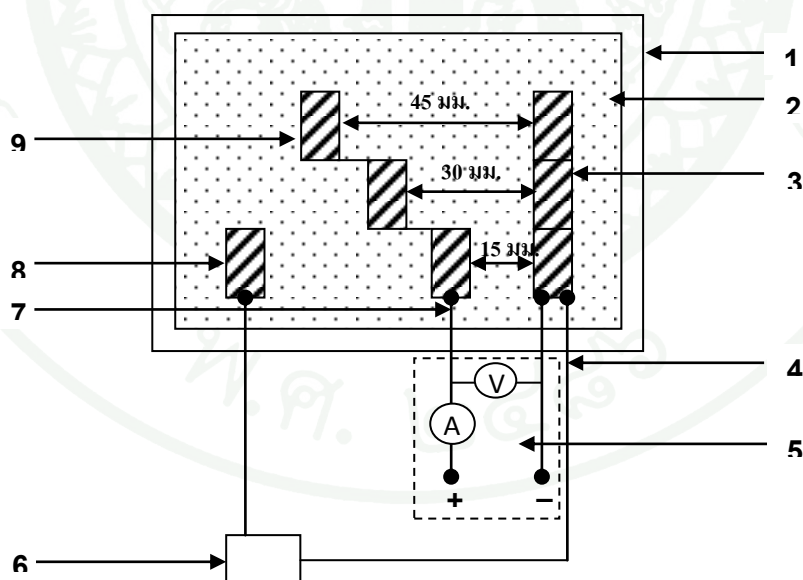
3. การวิเคราะห์ชั้นเคลือบ

3.1 นำชิ้นงานที่ผ่านการบอโรดิงมาวิเคราะห์โครงสร้างของชั้นเคลือบด้วยเครื่องเลี้ยวเบน
รังสีเอกซ์ ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้รังสีเอกซ์ชนิด Cu-K α มีความยาวคลื่นเฉลี่ย 1.541 อังสตรอม

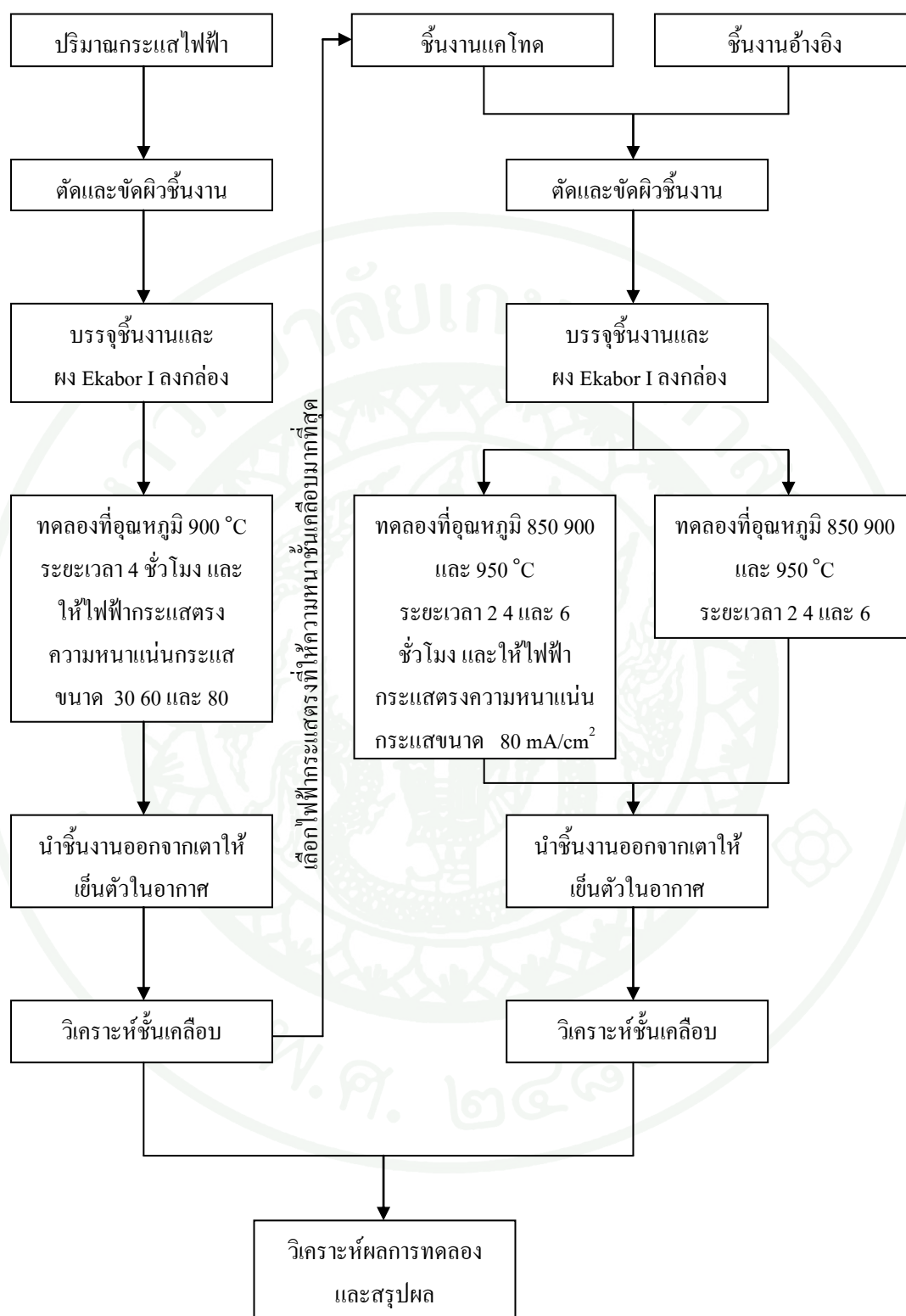
3.2 ตัดชิ้นงานตามขวาง (Cross section) ด้วยเครื่องตัดความเร็วสูง จากนั้นนำชิ้นงานมาอัด
ด้วยวิธีเมทแบบเย็น นำไปขัดหยาบด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 180 จนถึงเบอร์ 1200 แล้วขัด
ละเอียดด้วยผงอะลูมินา และกัดผิวชิ้นงานด้วยกรดไนตริก แล้วเป่าให้แห้ง

3.3 ถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและวัดความหนา
ของชั้นเคลือบบอไรด์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ

3.4 วัดความแข็งชั้นเคลือบของชิ้นงานด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ โดยใช้
แรงในการกด 100 กรัม และกดทิ้งไว้เป็นเวลานาน 10 วินาที



ภาพที่ 11 การวางชิ้นงานและติดตั้งอุปกรณ์ โดย 1. กล่องภาชนะ 2. พงสำเร็จ Ekabor I 3. ชิ้นงาน
แคโทด 4. เทอร์โมคัปเปิล 5. อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า 6. อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ 7. สวิตช์ไฟฟ้า
8. ชิ้นงานอ้างอิง 9. ชิ้นงานแอโนด



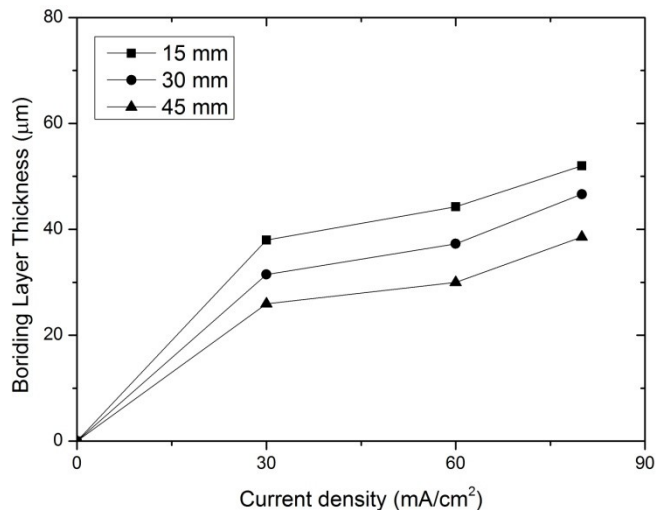
ภาพที่ 12 แผนภาพขั้นตอนการทำวิจัย

ผลและวิจารณ์

ผล

1. ปริมาณของไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำให้ได้ความหนาชั้นเคลือบมากที่สุด

ในการทดลองเพื่อหาขนาดของไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถให้ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์มากที่สุดในการบวนการแพลโคโรดิงที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร โดยจะให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงานขณะการบอไรดิง ซึ่งมีขนาดของกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน คือ 2.4 และ 5.5 แอมแปร์ และเมื่อแปลงค่าให้อยู่ในรูปของความหนาแน่นกระแสแล้วมีค่าเท่ากับ 30 60 และ 80 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (mA/cm^2) ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าการให้ความหนาแน่นกระแสเท่ากับ $80 \text{ mA}/\text{cm}^2$ นั้นได้ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์มากที่สุด และเห็นได้ชัดเจนที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ 52.00 ไมโครเมตร ดังแสดงในภาพที่ 13



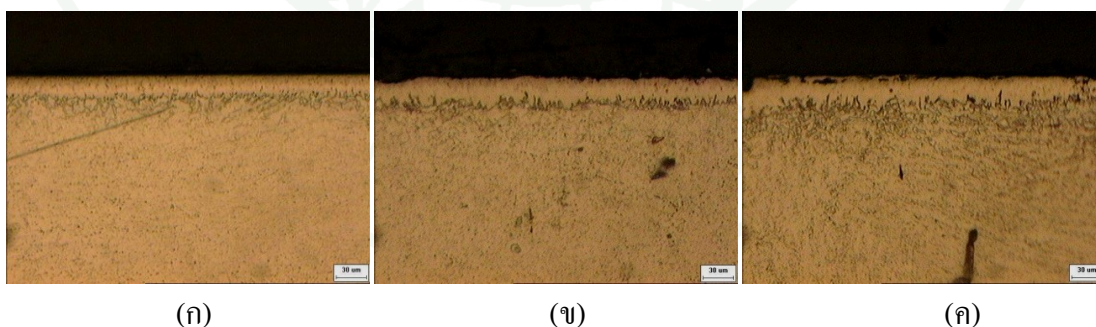
ภาพที่ 13 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพลโคโรดิงที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร โดยให้ความหนาแน่นกระแสน้ำต่าง ๆ

จากผลการทดลองข้างต้นสามารถนำมาเลือกขนาดของไฟฟ้ากระแสตรงที่จะใช้ในการวิจัย เพื่อศึกษาอิทธิพลของการไม่ให้และให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 80 mA/cm^2 ในกระบวนการทำแพคบอโรดิงของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 ที่อุณหภูมิ $850 - 950^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 2 - 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร ซึ่งได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

2. ชั้นเคลือบเหล็กบอโรดิงของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอโรดิงแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ $850 - 950^\circ\text{C}$

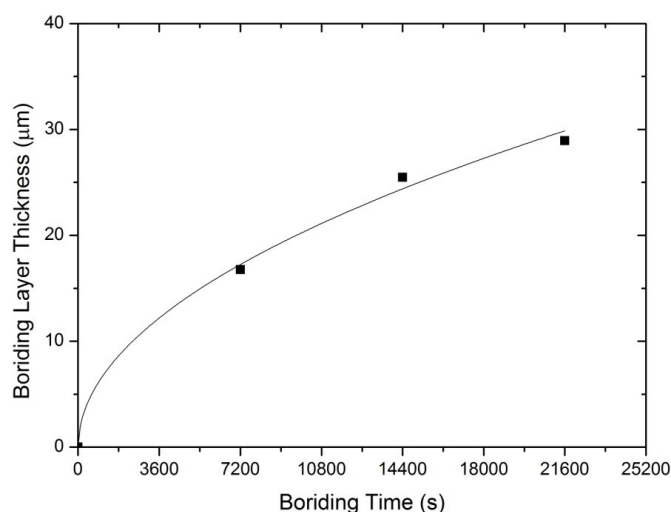
2.1 ชั้นเคลือบเหล็กบอโรดิงของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 ที่อุณหภูมิ 850°C

จากการทดลองกระบวนการทำแพคบอโรดิงของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง โดยไม่มีการให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงาน เมื่อนำชิ้นงานไปถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาค พบว่าเกิดชั้นเคลือบบอโรดิงขึ้นที่ผิวชิ้นงาน ชั้นเคลือบเหล็กบอโรดิงที่เกิดขึ้นนั้นเป็นชนิดเฟสคู่ ประกอบไปด้วย FeB ที่อยู่ชั้นนอกสุด มีสีเข้ม และ Fe_2B ที่อยู่ชั้นในถัดมา มีสีอ่อน (Genel, 2005) ซึ่งสามารถเห็นได้ชัดเจนดังแสดงในภาพที่ 14 ลักษณะของชั้นเคลือบเหล็กบอโรดิงที่เกิดขึ้นนั้นค่อนข้างมีความราบเรียบ ระหว่างรอยต่อของชั้นเคลือบกับผิวชิ้นงานมีความหยักแบบลักษณะฟันเลื่อยเล็กน้อย ไม่เกิดรอยแตกร้าวใดๆ และมีการยึดเกาะกับผิวชิ้นงานเป็นอย่างดี



ภาพที่ 14 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอโรดิงของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอโรดิงแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา (ก) 2 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง และ (ค) 6 ชั่วโมง

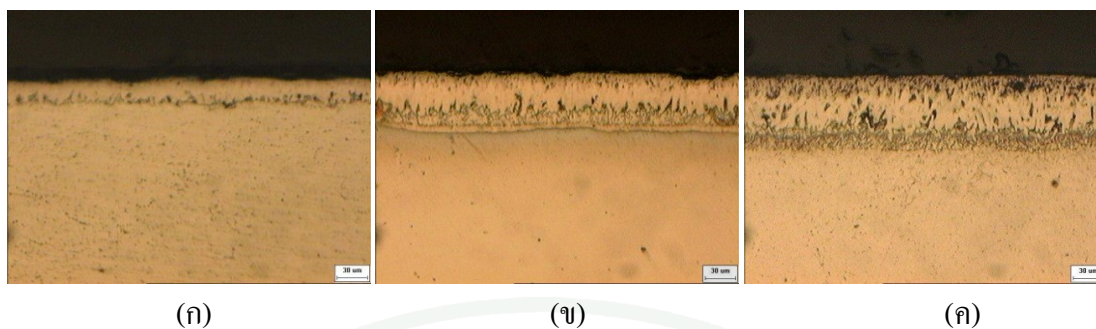
จากภาพที่ 14 แสดงให้เห็นว่าความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ค่อนข้างมีความสม่ำเสมอตลอดทั้งผิวชิ้นงาน และเมื่อนำชิ้นงานไปวัดความหนาของชั้นเคลือบ พบว่าความหนาของชั้นเคลือบจะมากขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำบอไรด์ให้นานขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 15 โดยมีค่าความหนาดังแสดงในตารางที่ 5



ภาพที่ 15 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรด์แบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 850 °C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง

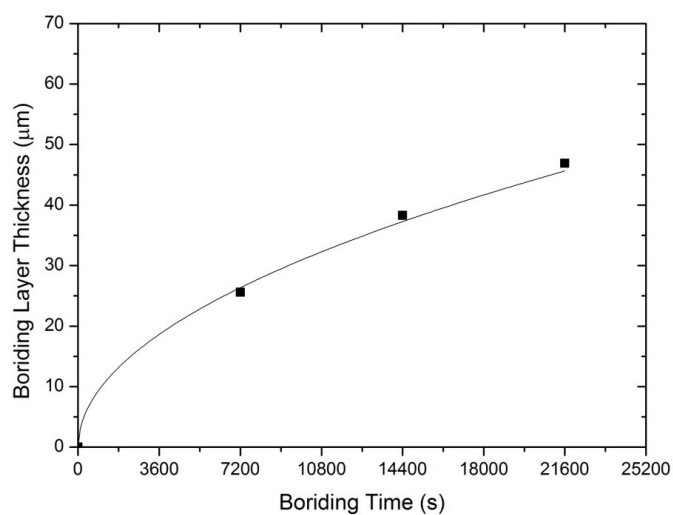
2.2 ชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 ที่อุณหภูมิ 900 °C

จากการทดลองกระบวนการทำแพคบอไรด์ของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง โดยไม่มีการให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงาน เมื่อนำชิ้นงานไปถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาค พบว่าเกิดชั้นเคลือบบอไรด์ขึ้นที่ผิวชิ้นงาน และมีลักษณะเช่นเดียวกันผลการทดลองในหัวข้อ 2.1 ซึ่งสามารถเห็นได้ชัดเจนดังแสดงในภาพที่ 16



ภาพที่ 16 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรด์แบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา (ก) 2 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง และ (ค) 6 ชั่วโมง

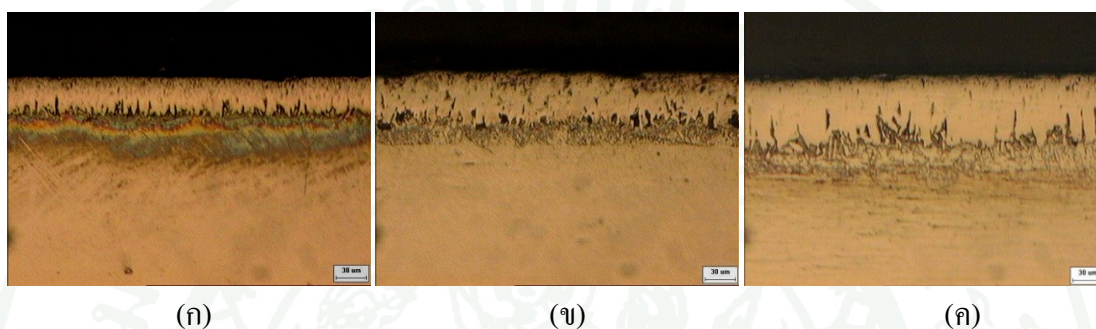
และเมื่อนำชิ้นงานไปวัดความหนาของชั้นเคลือบ พบว่าความหนาของชั้นเคลือบจะมากขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำบอไรด์ให้นานขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 17 โดยมีค่าความหนาดังแสดงในตารางที่ 5



ภาพที่ 17 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรด์แบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง

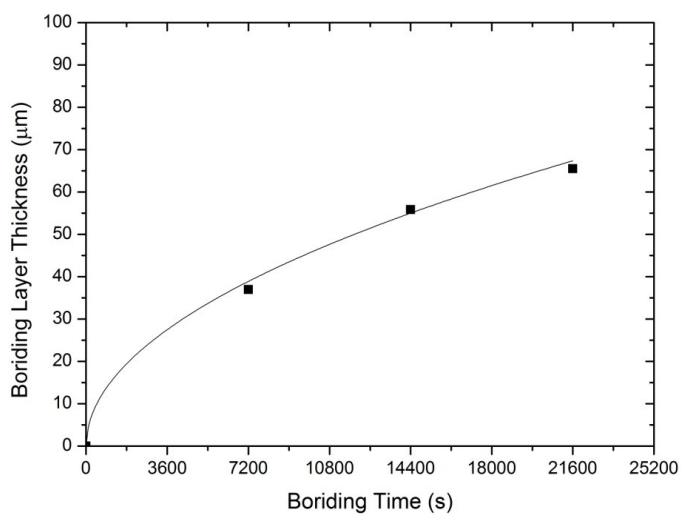
2.3 ชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 ที่อุณหภูมิ 950 °C

จากการทดลองกระบวนการทำแพคบอไรด์ของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 ที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง โดยไม่มีการให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงาน เมื่อนำชิ้นงานไปถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาค พบว่าเกิดชั้นเคลือบบอไรด์ขึ้นที่ผิวชิ้นงาน และมีลักษณะเช่นเดียวกันผลการทดลองในหัวข้อ 2.1 ซึ่งสามารถเห็นได้ชัดเจนดังแสดงในภาพที่ 18



ภาพที่ 18 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรด์แบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา (ก) 2 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมงและ (ค) 6 ชั่วโมง

และเมื่อนำชิ้นงานไปวัดความหนาของชั้นเคลือบ พบว่าความหนาของชั้นเคลือบจะมากขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำบอไรด์ให้นานขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 19 โดยมีค่าความหนาดังแสดงในตารางที่ 5



ภาพที่ 19 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรด์แบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง

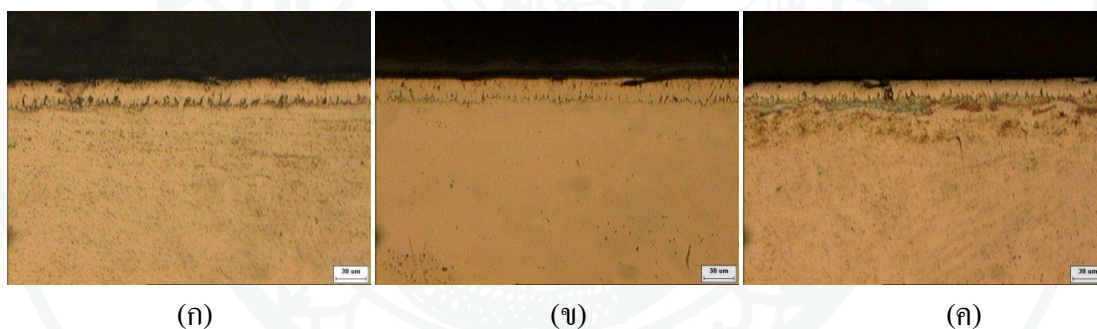
ตารางที่ 5 ค่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรด์แบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ (ไมโครเมตร)		
	อุณหภูมิ (°C)		
	850	900	950
2	16.76	25.62	36.95
4	25.48	38.31	55.86
6	28.95	46.91	65.48

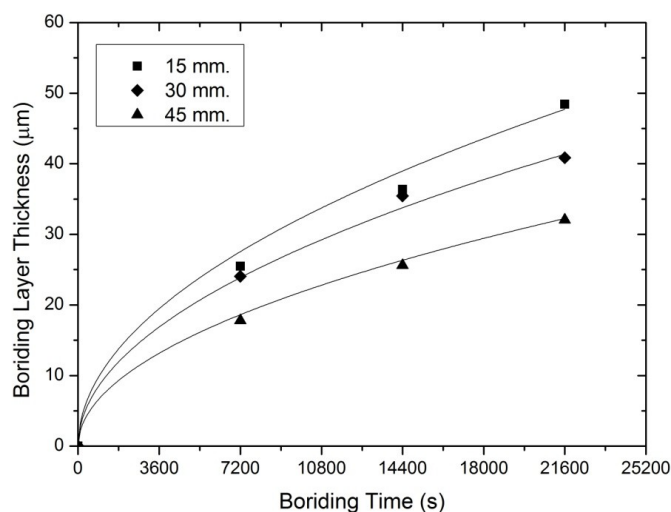
3. ชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 850 - 950 °C

3.1 ชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 ที่อุณหภูมิ 850°C

จากการทดลองกระบวนการทำแพคบอไรดิ้งของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง โดยมีการให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงาน และมีระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรดเท่ากับ 15 30 และ 45 มิลลิเมตร เมื่อนำชิ้นงานไปถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาค พบว่าเกิดชั้นเคลือบบอไรด์ขึ้นที่ผิวชิ้นงาน ชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่เกิดขึ้นนั้นเป็นชนิดเฟสคู่ ประกอบไปด้วย FeB ที่อยู่ชั้นนอกสุด มีสีเข้ม และ Fe₂B ที่อยู่ชั้นในถัดมา มีสีอ่อน ซึ่งสามารถเห็นได้ชัดเจนดังแสดงในภาพที่ 20 21 และ 22 ลักษณะของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่เกิดขึ้นนั้นค่อนข้างมีความราบเรียบ ระหว่างรอยต่อของชั้นเคลือบกับผิวชิ้นงานมีความหยักแบบลักษณะฟันเลื่อยเล็กน้อย ไม่เกิดรอยแตกร้าวใดๆ และมีการยึดเกาะกับผิวชิ้นงานเป็นอย่างดี



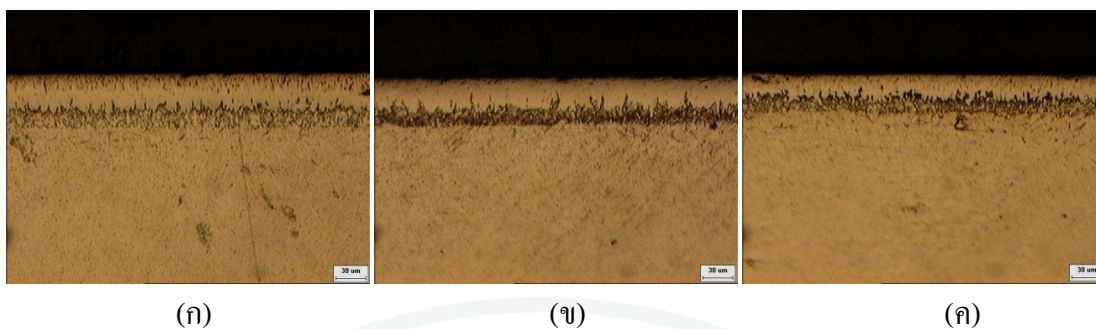
ภาพที่ 20 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (ก) 15 มิลลิเมตร (ข) 30 มิลลิเมตร และ (ค) 45 มิลลิเมตร



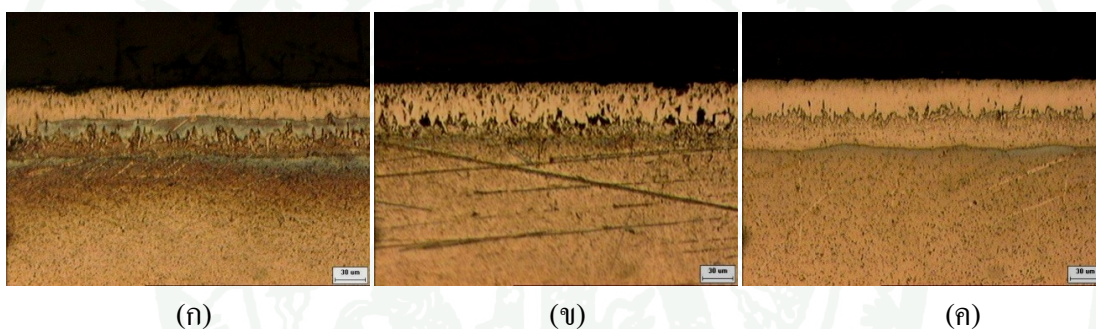
ภาพที่ 23 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรด์แบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร

3.2 ชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 ที่อุณหภูมิ 900°C

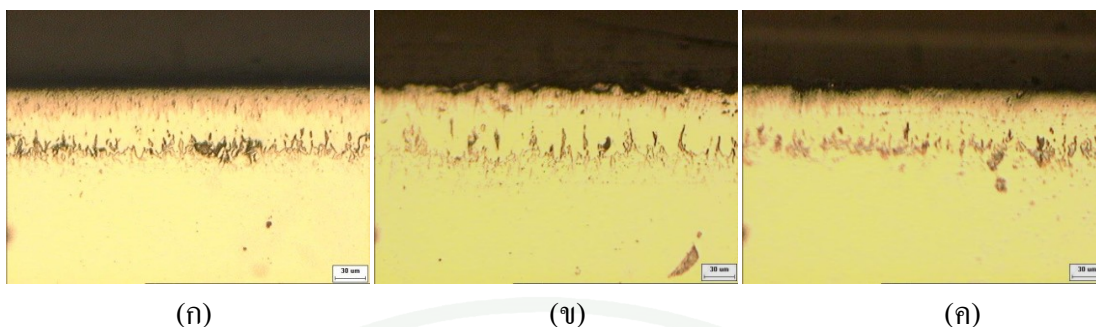
จากการทดลองกระบวนการทำแพคบอไรด์ของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง โดยมีการให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงาน และมีระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรดเท่ากับ 15 30 และ 45 มิลลิเมตร เมื่อนำชิ้นงานไปถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาค พบว่าเกิดชั้นเคลือบบอไรด์ขึ้นที่ผิวชิ้นงาน และมีลักษณะเช่นเดียวกันผลการทดลองในหัวข้อ 3.1 ซึ่งสามารถเห็นได้ชัดเจนดังแสดงในภาพที่ 24 25 และ 26



ภาพที่ 24 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (ก) 15 มิลลิเมตร (ข) 30 มิลลิเมตร และ (ค) 45 มิลลิเมตร

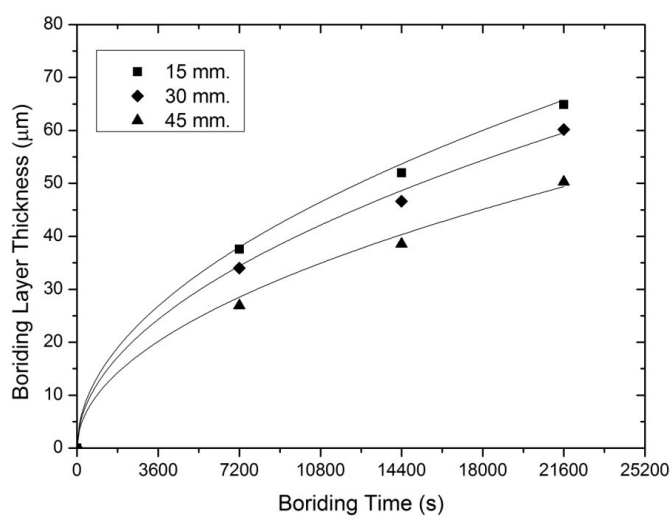


ภาพที่ 25 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (ก) 15 มิลลิเมตร (ข) 30 มิลลิเมตร และ (ค) 45 มิลลิเมตร



ภาพที่ 26 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรด์แบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (ก) 15 มิลลิเมตร (ข) 30 มิลลิเมตร และ (ค) 45 มิลลิเมตร

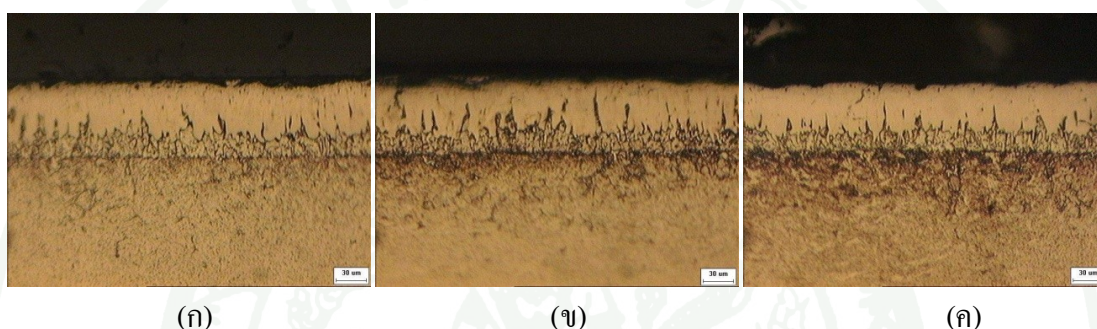
และเมื่อนำชิ้นงานไปวัดความหนาของชั้นเคลือบ พบว่าความหนาของชั้นเคลือบจะมากขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำบอไรด์ให้นานขึ้น และลดระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดให้น้อยลง ดังแสดงในภาพที่ 27 โดยมีค่าความหนาดังแสดงในตารางที่ 6



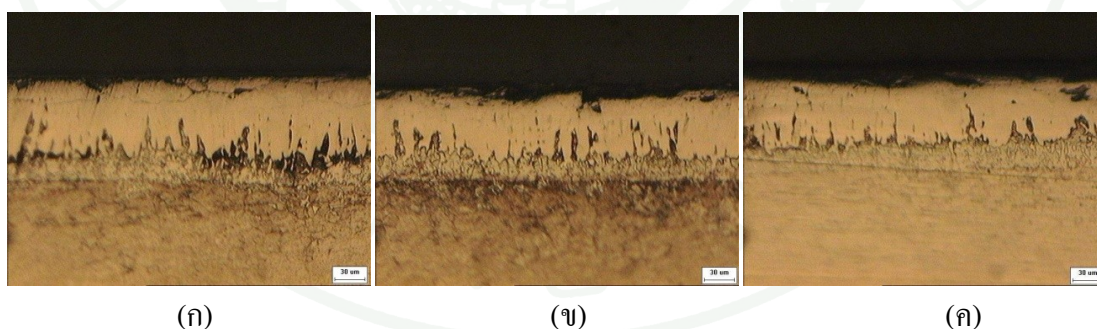
ภาพที่ 27 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรด์แบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร

3.3 ชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 ที่อุณหภูมิ 950°C

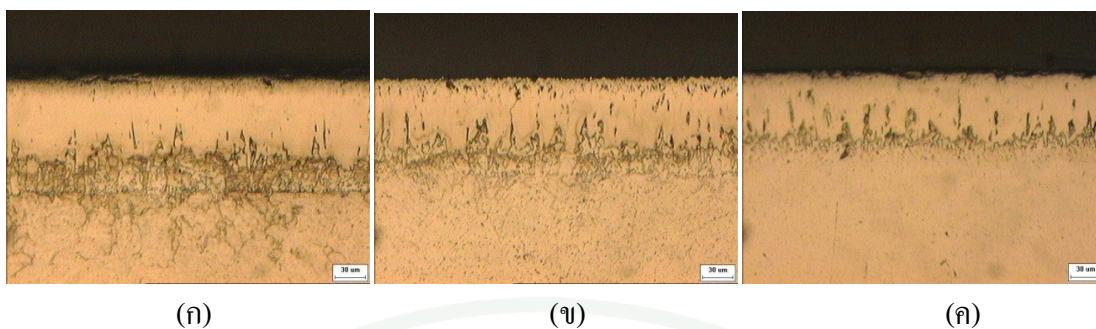
จากการทดลองกระบวนการทำแพคบอไรด์ของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 ที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง โดยมีการให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงาน และมีระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรดเท่ากับ 15 30 และ 45 มิลลิเมตร เมื่อนำชิ้นงานไปถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาค พบว่าเกิดชั้นเคลือบบอไรด์ขึ้นที่ผิวชิ้นงาน และมีลักษณะเช่นเดียวกันผลการทดลองในหัวข้อ 3.1 ซึ่งสามารถเห็นได้ชัดเจนดังแสดงในภาพที่ 28 29 และ 30



ภาพที่ 28 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรด์แบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (ก) 15 มิลลิเมตร (ข) 30 มิลลิเมตร และ (ค) 45 มิลลิเมตร

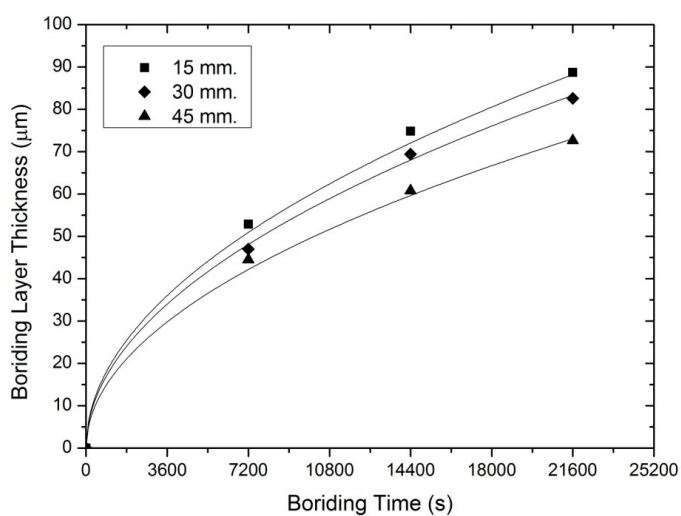


ภาพที่ 29 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรด์แบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (ก) 15 มิลลิเมตร (ข) 30 มิลลิเมตร และ (ค) 45 มิลลิเมตร



ภาพที่ 30 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรด์แบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (ก) 15 มิลลิเมตร (ข) 30 มิลลิเมตร และ (ค) 45 มิลลิเมตร

และเมื่อนำชิ้นงานไปวัดความหนาของชั้นเคลือบ พบว่าความหนาของชั้นเคลือบจะมากขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำบอไรด์ให้นานขึ้น และลดระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดให้น้อยลง ดังแสดงในภาพที่ 31 โดยมีค่าความหนาดังแสดงในตารางที่ 6

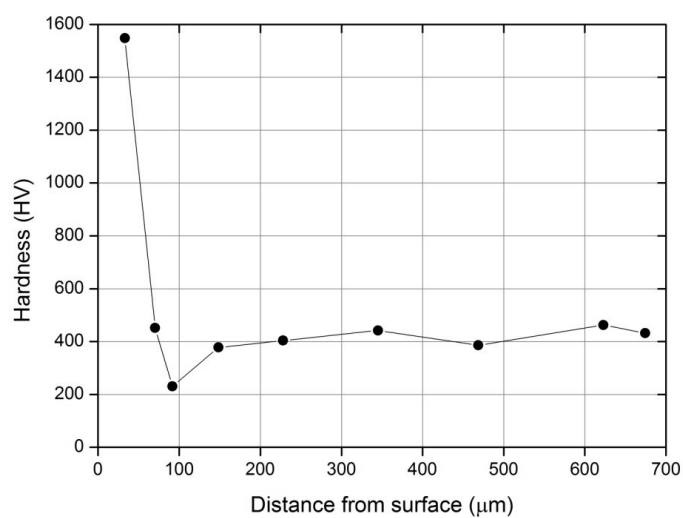


ภาพที่ 31 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรด์แบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร

ตารางที่ 6 ค่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้า
กระแสตรงที่อุณหภูมิ เวลา และระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ (ไมโครเมตร)								
	อุณหภูมิ (°C)								
	850			900			950		
	15 มม.	30 มม.	45 มม.	15 มม.	30 มม.	45 มม.	15 มม.	30 มม.	45 มม.
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

นอกจากนี้เมื่อเลือกชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร มาทดสอบหาค่าความแข็ง ณ ตำแหน่งต่างๆ จากผิวลึกเข้าสู่เนื้อในของชิ้นงาน พบว่าค่าความแข็งที่ผิวมีค่าสูงที่สุดประมาณ 1548 HV ซึ่งเป็นบริเวณของชั้นเคลือบหลักบอไรด์ และค่าความแข็งจะลดลงเมื่อเข้าสู่เนื้อในของชิ้นงาน และจะเริ่มมีค่าคงที่เมื่ออยู่ในบริเวณของเนื้อพื้นของวัสดุ มีค่าความแข็งประมาณ 400 HV แต่จะสังเกตพบจุดที่ค่าความแข็งต่ำสุดประมาณ 200 HV ที่บริเวณระยะห่าง 100 ไมครอนจากผิวของชิ้นงาน ซึ่งบริเวณนั้นเป็นชั้นที่เรียกว่าทรานซิชันโซน (Transition Zone)

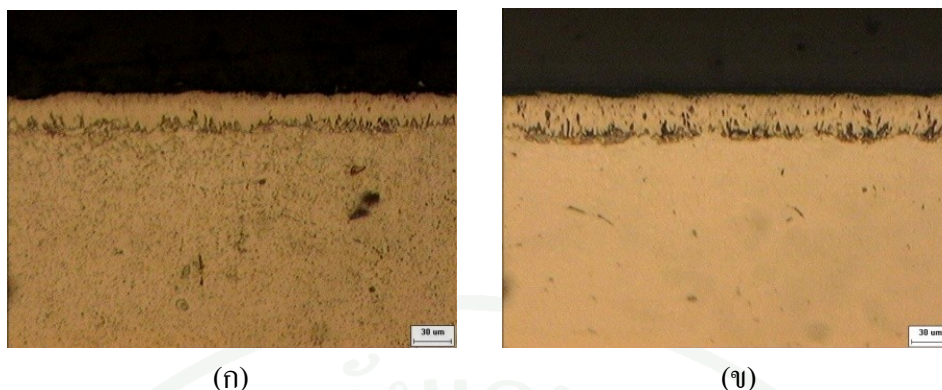


ภาพที่ 32 ค่าความแข็ง ณ ตำแหน่งต่างๆ จากผิวลึกเข้าสู่ในเนื้อในของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพลโคโรดิงแบบให้กระแสไฟฟ้าตรงที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร

วิจารณ์

1. โครงสร้างจุลภาคและลักษณะของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์

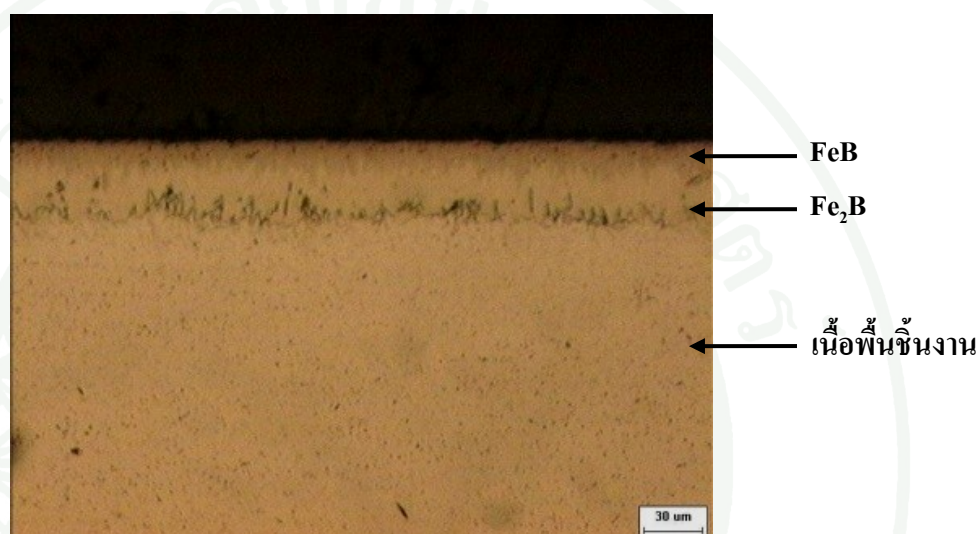
จากผลการทดลองกระบวนการทำแพคบอไรด์ของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 ที่อุณหภูมิ 850 - 950 °C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร ทั้งแบบที่ไม่ให้และให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงาน พบว่าโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์นั้นค่อนข้างราบเรียบ มีรอยหยักหรือลักษณะของพื้นผิวเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจากธาตุผสมที่อยู่ในเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 ซึ่งประกอบไปด้วย คาร์บอน ซิลิกอน แมงกานีส โครเมียม โมลิบดีนัม และวานาเดียม ธาตุผสมเหล่านี้จะเป็นตัวขัดขวางการแพร่ของอะตอมโบรอนไม่ให้เข้าสู่ชิ้นงานในกระบวนการบอไรด์ (Kartal *et. al.*, 2011) ปริมาณของธาตุผสมที่กระจายตัวอยู่ในชิ้นงานนั้นจะทำให้อะตอมโบรอนแพร่เข้าสู่ชิ้นงานได้ยากและช้า เพราะเมื่ออะตอมโบรอนแพร่เข้าสู่ชิ้นงานจะเข้าไปจับตัวกับอะตอมเหล็ก เกิดเป็นโครงสร้างของเหล็กบอไรด์ ในขณะที่อะตอมโบรอนแพร่เข้าไปนั้นก็จะผลักอะตอมของธาตุผสมต่างๆ ให้ลึกลงไปในเนื้อของชิ้นงาน จากนั้นอะตอมโบรอนก็จะแพร่เข้าไปยังเนื้อในของชิ้นงานต่อไป การแพร่อย่างช้าๆ ของอะตอมโบรอนนั้นทำให้ลักษณะของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์มีความราบเรียบและสม่ำเสมอ (Sinha and Division, 1994) และยังพบว่าโครเมียมที่เป็นธาตุผสมหลักนั้นก็ยังมีผลทำให้ชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่ได้มีความราบเรียบเช่นกัน และหากมีปริมาณธาตุผสมของโครเมียมมากขึ้น จะทำให้ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่ได้ลดลงและมีความราบเรียบยิ่งขึ้น (Taktak, 2007) ดังแสดงในภาพที่ 33 นอกจากนี้ธาตุซิลิกอนที่เป็นธาตุผสมนั้นทำให้เกิดชั้น Transition Zone อยู่ถัดเข้ามาจากชั้นเคลือบบอไรด์ ซึ่งมีค่าความแข็งต่ำสุดดังแสดงในภาพที่ 32 เนื่องจากธาตุซิลิกอนนั้นไม่สามารถละลายในชั้นเคลือบบอไรด์ได้ จึงถูกผลักเข้าไปในเนื้อพื้นและรวมตัวกับธาตุเหล็กเกิดเป็นเหล็กโครงสร้างเฟอร์ไรท์ที่มีลักษณะอ่อนนิ่ม



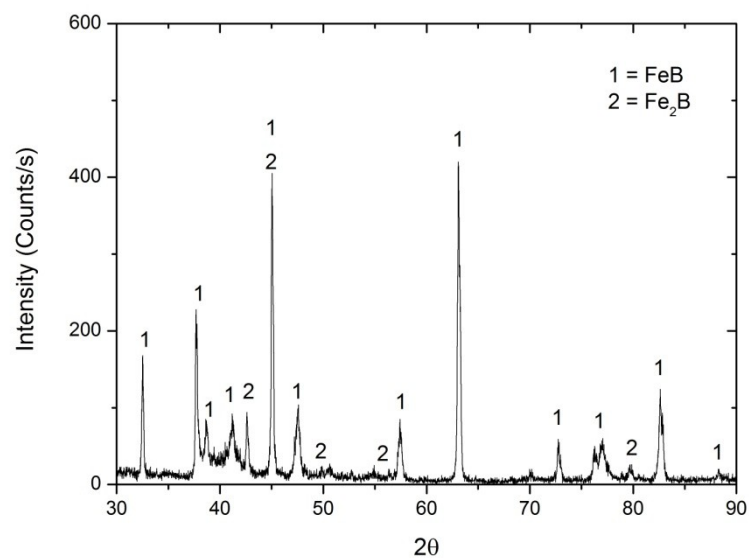
ภาพที่ 33 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพกบอไรดิ้งที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (ก) แบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง และ (ข) แบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร

ชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้นนั้น เป็นชั้นเคลือบของเหล็กบอไรด์ชนิดเฟสคู่ ประกอบไปด้วยเฟสของ FeB อยู่ชั้นนอกสุดบริเวณผิวของชิ้นงาน และเฟสของ Fe_2B อยู่ชั้นในถัดมาติดกับเนื้อพื้นของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 34 และสามารถยืนยันผลนั้นได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชั้นเคลือบด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ โดยจะปรากฏสเปกตรัมของสารประกอบบอไรด์ทั้ง 2 ชนิด คือ FeB และ Fe_2B ดังแสดงในภาพที่ 35 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Genel (Genel, 2005) และ Taktak (Taktak, 2007) ที่ศึกษาการทำบอไรดิ้งในเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนชนิด AISI H13 พบว่าเกิดชั้นเคลือบของเหล็กบอไรด์ชนิดเฟสคู่เช่นเดียวกัน โดยการเกิดเป็นชนิดเฟสคู่นี้เป็นผลมาจากปริมาณของอะตอมโบรอนที่มีอยู่เป็นจำนวนมาก ประกอบกับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการบอไรดิ้งนั้นค่อนข้างมาก โดยกลไกของการเกิดชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ชนิดเฟสคู่มีขั้นตอนดังนี้ 1) ขั้นตอนการเกิดเฟส Fe_2B คือ อะตอมโบรอนจากผง Ekabor I จะเกิดการแตกตัวและแพร่เข้าสู่ชิ้นงานไปจับกับอะตอมเหล็ก เกิดเป็นเฟสของ Fe_2B ขึ้นที่ผิวของชิ้นงานทำให้บริเวณนั้นมีความเข้มข้นของอะตอมโบรอนสูงขึ้น 2) ขั้นตอนการเกิดเฟส FeB คือ เมื่อความเข้มข้นของอะตอมโบรอนที่บริเวณรอยต่อระหว่างผง Ekabor I กับเฟสของ Fe_2B มีค่าสูงขึ้นจนถึง 16.23 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแล้ว จะเกิดเฟสของ FeB ขึ้นที่บริเวณผิวนอกสุดของชิ้นงาน 3) ขั้นตอนการเติบโตของเฟส FeB และ Fe_2B คือ อะตอมโบรอนจะเกิดการแพร่อย่างต่อเนื่องจากบริเวณรอบๆ ชิ้นงานที่มีความเข้มข้นสูงไปยังภายในชิ้นงานที่มีความเข้มข้นต่ำ ทำให้ชั้นของทั้ง 2 เฟสนั้นเกิดการเติบโตขึ้นเรื่อยๆ จนความเข้มข้นของอะตอมโบรอนบริเวณรอบๆ ชิ้นงานนั้นมีค่าต่ำลงจนไม่สามารถเกิดการแพร่ต่อไปได้ และขั้นตอนสุดท้าย 4) ขั้นตอนการลดลงของเฟส FeB คือ เมื่ออะตอมโบรอนรอบๆ ชิ้นงานไม่สามารถแพร่เข้าสู่ชิ้นงานได้ จึงเกิดความแตกต่างของความเข้มข้นของ

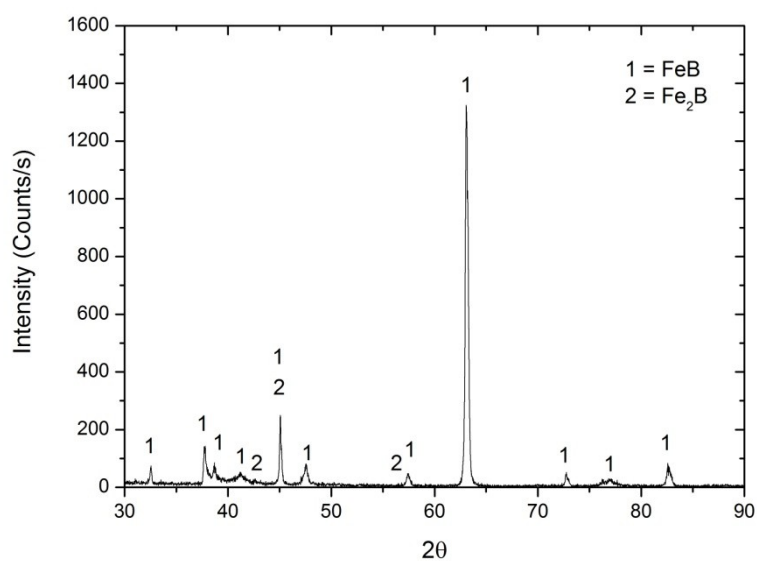
อะตอมโบรอนภายในชิ้นงาน ทำให้อะตอมโบรอนจากเฟสของ FeB ที่มีความเข้มข้นของอะตอมโบรอนสูงนั้นแพร่ไปยังเฟสของ Fe_2B ที่มีความเข้มข้นต่ำ และอะตอมโบรอนในเฟสของ Fe_2B ก็สามารถแพร่เข้าไปยังเนื้อพื้นของชิ้นงานได้ ส่งผลให้ความหนาของเฟส FeB นั้นจะค่อยๆ ลดลง แต่ความหนาของเฟสทั้ง 2 โดยรวมมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และหากกระบวนการแพร่ในขั้นตอนนี้ดำเนินต่อไปเรื่อยๆ เฟสของ FeB ก็จะลดลงไปจนหมด เหลือเพียงแต่เฟสของ Fe_2B เท่านั้น ซึ่งจะเป็นชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ชนิดเฟสเดียว แต่ก็อาจขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ ด้วย



ภาพที่ 34 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรด์แบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร



(ก)

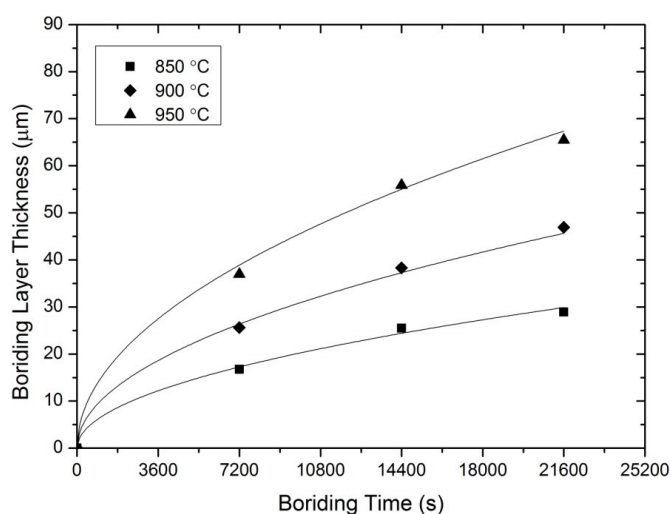


(ข)

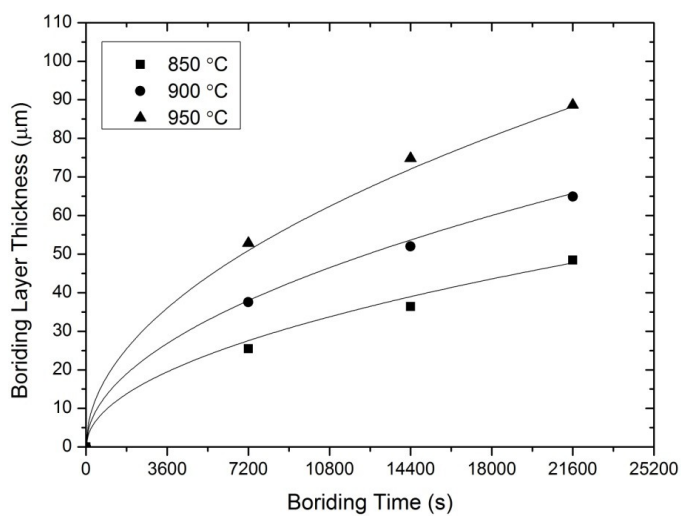
ภาพที่ 35 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอโรดิงที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (ก) ชิ้นงานที่ไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง (ข) ชิ้นงานที่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร

2. อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาที่มีผลต่อความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์

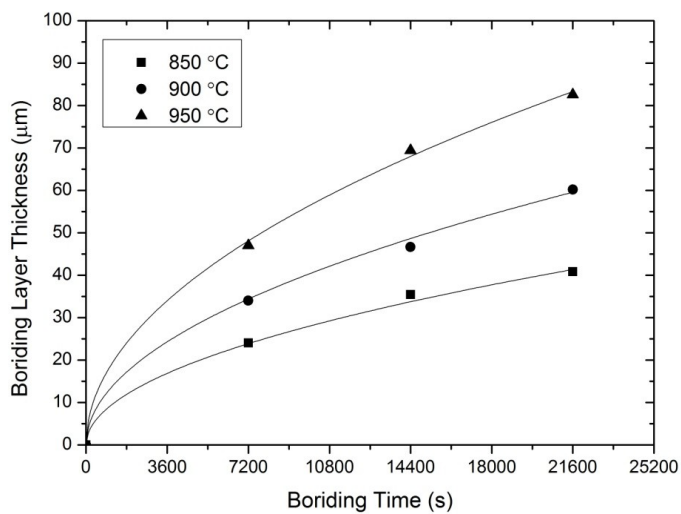
จากผลการทดลองกระบวนการทำแพคบอไรด์ของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 ที่อุณหภูมิ 850 - 950 °C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร ทั้งแบบที่ไม่ให้และให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงาน พบว่าชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่เกิดขึ้นนั้นมีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการทำบอไรด์ ในทุกๆ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ดังแสดงในภาพที่ 36-39 ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อพิจารณาแผนภาพเฟสของเหล็กและโบรอน (Fe-B Phase diagram) ดังแสดงในภาพที่ 40 พบว่าที่อุณหภูมิสูงนั้นเปอร์เซ็นต์โบรอนที่ใช้ในการเกิดชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์มีค่าน้อยกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งหมายถึงหากใช้อุณหภูมิสูงในกระบวนการบอไรด์ จะทำให้เกิดชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ได้ในระยะเวลาที่น้อยกว่าการใช้อุณหภูมิต่ำ และหากเปรียบเทียบในระยะเวลาที่เท่ากันการใช้อุณหภูมิสูงจะทำให้ได้ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่มากกว่าการใช้อุณหภูมิต่ำ



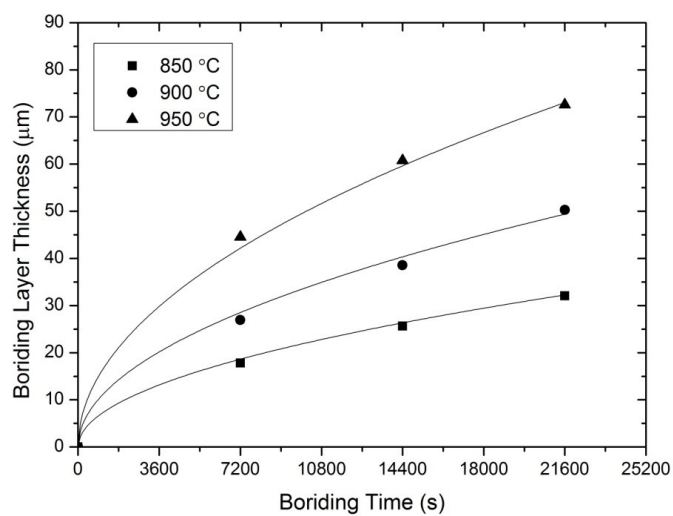
ภาพที่ 36 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรด์แบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ



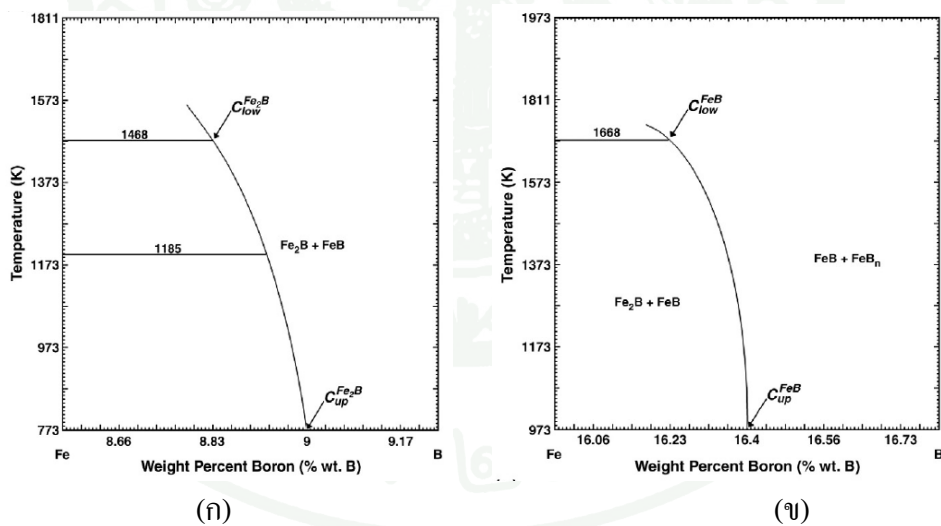
ภาพที่ 37 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร



ภาพที่ 38 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 30 มิลลิเมตร



ภาพที่ 39 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 45 มิลลิเมตร



ภาพที่ 40 แผนภาพเฟสของเหล็กกับโบรอนของเฟส (ก) Fe_2B และ (ข) FeB

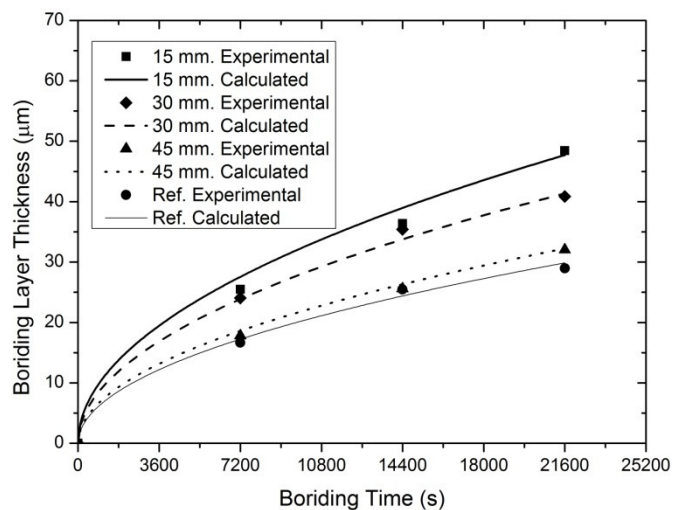
ที่มา : Campos-Silva *et al.* (2010)

จากทฤษฎีการแพร่ แสดงให้เห็นว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอะตอมโบรอนจะสามารถแพร่ได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากอะตอมมีพลังงานในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นทำให้สามารถแพร่ได้เร็วยิ่งขึ้น (Keddarn and Chentouf., 2005) ดังนั้นเมื่อใช้ระยะเวลาในการทำบอโรไดนาขึ้น ทำให้อะตอมโบรอนสามารถแพร่เข้าสู่ชิ้นงานได้ในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ได้ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอโรมากขึ้นจากการใช้อุณหภูมิและเวลาที่เพิ่มขึ้น

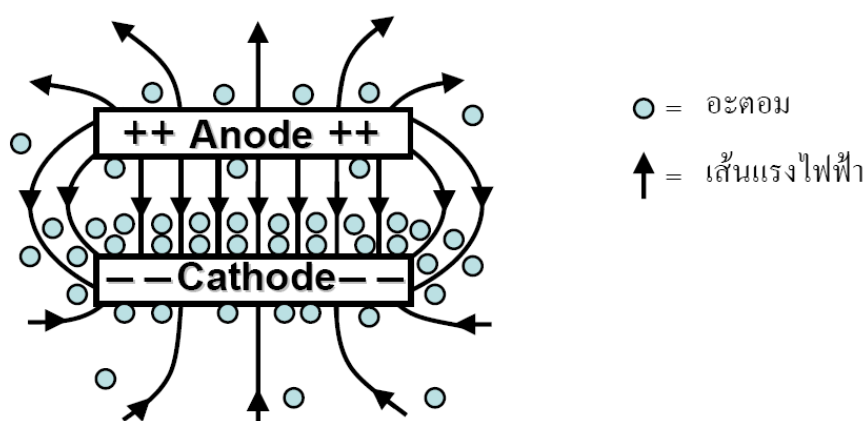
3. อิทธิพลของไฟฟ้ากระแสตรงที่มีผลต่อความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอโร

จากผลการทดลองกระบวนการทำแพคบอโรไดนาของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 ที่อุณหภูมิ 850 - 950 °C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร ทั้งแบบที่ไม่ให้และให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงาน พบว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอโรไดนาแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเท่ากับ 15 และ 30 มิลลิเมตรในทุกๆ อุณหภูมิและเวลา (ภาพที่ 37 และ 38) มีความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอโรที่มากกว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอโรไดนาแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง (ภาพที่ 36) แต่ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอโรไดนาแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเท่ากับ 45 มิลลิเมตรในทุกๆ อุณหภูมิและเวลา (ภาพที่ 39) นั้นมีความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอโรใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอโรไดนาแบบไม่ให้ไฟฟ้า ซึ่งจะเห็นการเปรียบเทียบที่ชัดเจนดังแสดงในภาพที่ 41 โดยจะเกี่ยวข้องกับผลจากอิทธิพลของระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่จะกล่าวในหัวข้อต่อไป แต่ทั้งนี้เนื่องมาจากไฟฟ้ากระแสตรงที่ให้กับกระบวนการแพคบอโรไดนนั้นเข้าไปช่วยเพิ่มอัตราการแพร่ของอะตอมโบรอน ซึ่งทำให้มีผลต่อความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอโรที่เกิดขึ้น โดยมาจาก 2 สาเหตุ ดังนี้ 1) ไฟฟ้ากระแสตรงช่วยให้อะตอมโบรอนนั้นเคลื่อนที่แบบมีทิศทางและแพร่ไปยังชิ้นงานได้มากขึ้น เพราะเมื่อให้ไฟฟ้ากระแสตรงกับกระบวนการบอโรไดนาแบบแพคแล้ว ชิ้นงานจะเปรียบเสมือนขั้วอิเล็กโทรด และมีทิศทางของกระแสไฟฟ้าไหลจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด ส่งผลให้อะตอมโบรอนที่อยู่รอบ ๆ ชิ้นงานขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้า และมีทิศทางการแพร่ไปในทางเดียวกันกับการไหลของกระแสไฟฟ้า ทำให้บริเวณรอบ ๆ ชิ้นงานที่เป็นขั้วแคโทดมีปริมาณอะตอมโบรอนจำนวนมากเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่เป็นขั้วแอโนดดังแสดงในภาพที่ 42 ซึ่งการให้ไฟฟ้ากระแสตรงกับกระบวนการแพคบอโรไดนนี้จะอะตอมโบรอนจะถูกควบคุมให้แพร่ไปยังชิ้นงานที่เป็นขั้วแคโทด ทำให้อะตอมโบรอนในกระบวนการบอโรไดนาแบบแพคที่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นสามารถแพร่ได้ดีกว่าการแพร่แบบสุ่มในกระบวนการบอโรไดนาแบบแพคที่ไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง เพราะการแพร่แบบสุ่มนั้นอะตอมโบรอน

จะเคลื่อนที่อย่างอิสระ ไม่มีทิศทางแน่นอนทำให้มีโอกาสน้อยกว่าที่จะเคลื่อนที่ไปยังชิ้นงานที่ต้องการเคลือบผิว



ภาพที่ 41 เปรียบเทียบความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพลงบอไรดิ้งแบบไม่ให้และให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 850 °C ณ เวลา และที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดต่างๆ



ภาพที่ 42 การกระจายตัวและการเคลื่อนที่ของอะตอมโบรอนภายใต้สนามไฟฟ้าในกระบวนการบอไรดิ้งแบบแพลง

2) ไฟฟ้ากระแสตรงช่วยเพิ่มพลังงานให้กับโมเลกุลของสารที่ให้อะตอมโบรอน ส่งผลให้อะตอมโบรอนภายในโมเลกุลเกิดการสั่นและแตกตัวได้ดีขึ้น เพราะเมื่อให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่กระบวนการแล้ว ไฟฟ้ากระแสตรงจะเข้าไปช่วยเพิ่มการเกิดปฏิกิริยาเคมีของสารที่ให้อะตอมโบรอนให้แตกตัวได้ดีขึ้น และส่งผลให้ความเข้มข้นของอะตอมโบรอนอิสระรอบๆ ชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งจะสามารถช่วยลดข้อบกพร่องของกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบปกติที่ไม่สามารถให้อะตอมโบรอนอิสระได้เพียงพอเนื่องจากความร้อนที่ได้จากเตาเพียงอย่างเดียว (Xie *et al.*, 2006)

4. อิทธิพลของระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่มีผลต่อความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์

จากผลการทดลองกระบวนการทำแพคบอไรดิ้งของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 ที่อุณหภูมิ 850 - 950 °C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร ทั้งแบบที่ไม่ให้และให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงาน พบว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเท่ากับ 15 และ 30 มิลลิเมตรในทุกๆ อุณหภูมิและเวลา (ภาพที่ 37 และ 38) มีความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่มากกว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง (ภาพที่ 36) แต่ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเท่ากับ 45 มิลลิเมตรในทุกๆ อุณหภูมิและเวลา (ภาพที่ 39) นั้นมีความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง เป็นผลเนื่องมาจากระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด เพราะเมื่อให้ไฟฟ้ากระแสตรงกับกระบวนการบอไรดิ้งแล้ว ชิ้นงานจะเปรียบเสมือนเป็นขั้วอิเล็กโทรด และมีทิศทางของกระแสไฟฟ้าไหลจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นระหว่างชิ้นงานทั้งสองฝั่ง ส่งผลให้อะตอมโบรอนที่อยู่บริเวณนั้นถูกควบคุมการแพร่ให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้า โดยสนามไฟฟ้าในกรณีนี้เปรียบเสมือนสนามไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างแผ่นโลหะคู่ขนาน ซึ่งขนาดของสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะคู่ขนานนั้นจะมีค่าสม่ำเสมอ โดยขนาดของสนามไฟฟ้านั้นมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างความต่างศักย์ระหว่างแผ่นโลหะคู่ขนานกับระยะห่างระหว่างแผ่นคู่ขนานหรือขั้วอิเล็กโทรดนั่นเอง ดังแสดงในสมการดังนี้

$$E = V/d \quad (1)$$

เมื่อ E คือ ขนาดของสนามไฟฟ้า (โวลต์/เมตร)

V คือ ความต่างศักย์ระหว่างแผ่นคู่ขนาน (โวลต์)

d คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นคู่ขนาน (เมตร)

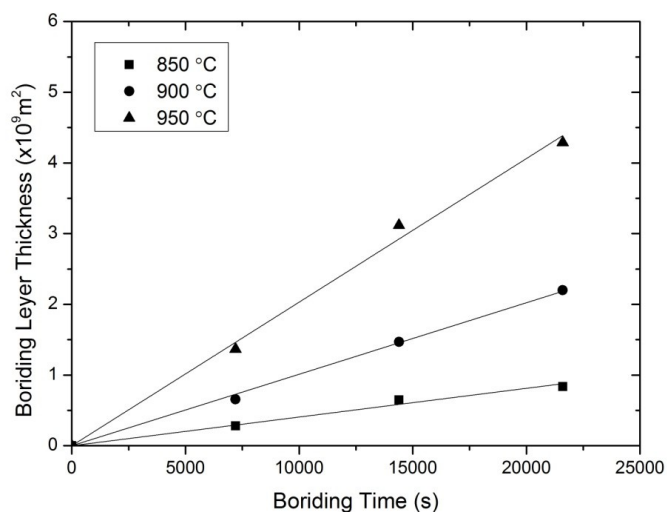
จากสมการที่ 1 พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดมีค่ามากขึ้น จะทำให้ค่าของขนาดสนามไฟฟ้ามีค่าลดลง ส่งผลให้เส้นแรงของสนามไฟฟ้าที่เป็นตัวควบคุมทิศทางการแพร่ของอะตอมโบรอนมีค่าความหนาแน่นลดน้อยลงตามไปด้วยเช่นกัน เนื่องจากค่าความหนาแน่นหรือจำนวนของเส้นแรงไฟฟ้านั้นแปรผันตรงกับขนาดของสนามไฟฟ้า (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำนักวิทยาศาสตร์ สาขาวิชาฟิสิกส์, 2546) และหากระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดยังมีค่ามากๆ จะทำให้ค่าของขนาดสนามไฟฟ้ามีค่าน้อยมาก ทำให้เส้นแรงของสนามไฟฟ้ามีค่าความหนาแน่นน้อยมาก นั่นหมายถึงอะตอมโบรอนจะมีทิศทางการแพร่แบบอิสระหรือมีการเคลื่อนที่แบบสุ่มมากขึ้นนั่นเอง ทำให้ชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่เกิดขึ้นมีความหนาที่น้อยลงตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น จากสาเหตุที่กล่าวมาสามารถสรุปได้ว่า หากให้ไฟฟ้ากระแสตรงกับกระบวนการบอไรดิงแบบแพคแล้ว ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดนั้นมีผลต่อทิศทางการแพร่ของอะตอมโบรอน ซึ่งเป็นผลมาจากความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการในทุกๆ อุณหภูมิและเวลา ทำให้อะตอมโบรอนนั้นมีทิศทางการแพร่ที่แน่นอนตามเส้นแรงของสนามไฟฟ้า โดยมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xie และคณะ (Xie *et.al.*, 2012) ว่าการกระจายตัวของอะตอมโบรอนอิสระในกระบวนการแพคบอไรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นมีลักษณะเช่นเดียวกับการกระจายตัวของความเข้มสนามไฟฟ้า

5. จลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอไรดิง

5.1 จลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอไรดิงแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง

จากการทดลองกระบวนการทำแพคบอไรดิงของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 ที่อุณหภูมิ 850 - 950 °C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง โดยไม่มีการให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงาน พบว่าชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่เกิดขึ้นนั้นมีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการทำบอไรดิง ซึ่งความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์กับเวลาที่ใช้ในการทำบอไรดิงนั้นมีความสัมพันธ์กันเป็นแบบพาราโบลา (ภาพที่ 36) และเมื่อนำความหนาที่ได้มาเขียนกราฟระหว่าง

กำลังสองของความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์กับเวลาต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการบอไรดิง ดังแสดงในภาพที่ 43 พบว่ากราฟนั้นมีความสัมพันธ์กันแบบเส้นตรง ซึ่งสามารถอธิบายได้จากทฤษฎีการแพร่ ดังแสดงในสมการที่ 2



ภาพที่ 43 กำลังสองของความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์กับเวลาต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการบอไรดิงแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง

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

เมื่อ d คือ ความหนาของชั้นเคลือบ (เมตร)

K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (ตารางเมตร/วินาที)

t คือ เวลาที่ใช้ในกระบวนการบอไรดิง (วินาที)

โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (K) นั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการบอไรดิง (T) และยังสัมพันธ์กับพลังงานกระตุ้น (Activation energy, Q) ซึ่งมีความสัมพันธ์กันตามหลักจลนพลศาสตร์ ตามสมการของ Arrhenius ดังแสดงดังสมการที่ 3

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

เมื่อ K_0 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ (ตารางเมตร/วินาที)

Q คือ ค่าพลังงานกระตุ้น (กิโลจูล/โมล)

T คือ อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการบอโรดิง (เคลวิน)

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ มีค่าเท่ากับ 8.3143 (กิโลจูล/โมล.เคลวิน)

จากภาพที่ 43 ผลการทดลองนั้นเป็นไปตามทฤษฎีการแพร่ ดังสมการที่ 2 ซึ่งทำให้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนได้จากค่าความชันของกราฟระหว่างกำลังสองของความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอโรดิงกับเวลาที่ใช้ในกระบวนการบอโรดิงที่อุณหภูมิต่างๆ ได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 7

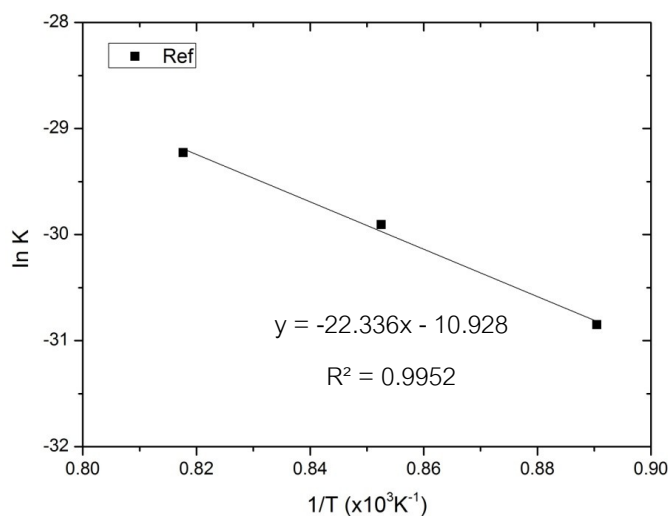
ตารางที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนที่ใช้ในกระบวนการบอโรดิงแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการบอโรดิง ($^{\circ}\text{C}$)	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่, K (ตารางเมตร/วินาที)
850	4.00×10^{-14}
900	1.03×10^{-13}
950	2.03×10^{-13}

และจากสมการที่ 3 สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังแสดงในสมการที่ 4

$$\ln K = \ln K_0 - Q/(RT) \quad (4)$$

จากสมการที่ 4 จะสังเกตได้ว่าสมการนั้นมีความสอดคล้องกับสมการเส้นตรง ทำให้สามารถหาค่าพลังงานกระตุ้นและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ได้จากค่าความชันและจุดตัดแกนของกราฟระหว่างลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ($\ln K$) กับส่วนกลับของอุณหภูมิ ($1/T$) ที่ใช้ในกระบวนการบอโรดิงดังแสดงในภาพที่ 44 โดยค่าพลังงานกระตุ้นและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ของกระบวนการบอโรดิงแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นมีค่าเท่ากับ 185.71 กิโลจูล/โมล และ 1.80×10^{-5} ตารางเมตร/วินาที ตามลำดับ ซึ่งค่าพลังงานกระตุ้นนี้สอดคล้องกับผลจากงานวิจัยของ Genel (2005) ที่คำนวณค่าพลังงานกระตุ้นได้ 186.2 กิโลจูล/โมล

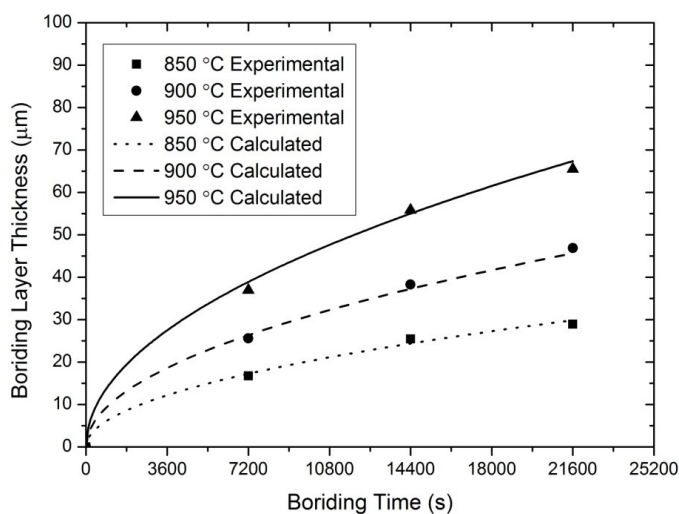


ภาพที่ 44 ลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ($\ln K$) กับส่วนกลับของอุณหภูมิ ($1/T$) ที่ใช้ในกระบวนการบอโรดิงแบบไม่ให้อิเล็กตรอน

เมื่อได้ค่าตัวแปรต่างๆ ทั้งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ ค่าพลังงานกระตุ้น และค่าคงที่ของก๊าซ ทำให้สามารถทำนายความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอโรดิงที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ได้จากการคำนวณโดยการนำค่าทั้งหมดมาแทนกลับลงในสมการที่ 2 จึงได้สมการใหม่ดังแสดงในสมการที่ 5

$$d = (1.80 \times 10^{-5} t \exp(-22336/T))^{0.5} \quad (5)$$

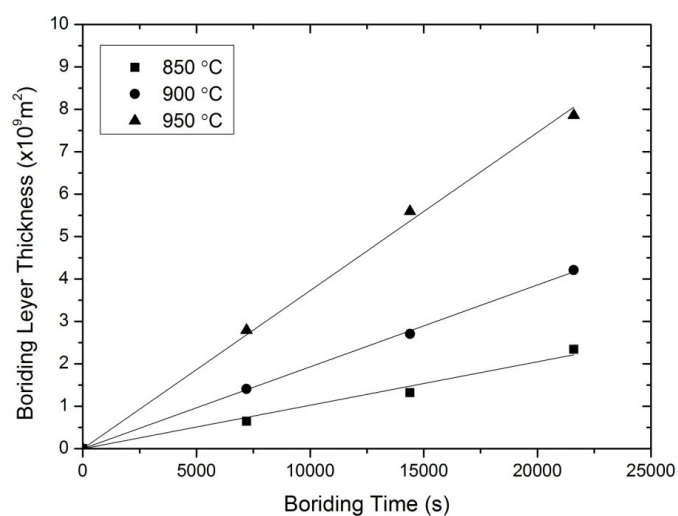
จากสมการที่ 5 เมื่อนำมาอุณหภูมิและเวลาที่ทำการทดลองมาแทนค่าเพื่อทำนายผลความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอโรดิงที่เกิดขึ้นและนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองจริง พบว่าค่าความหนาของชั้นเคลือบเหล็กที่ได้จากการคำนวณนั้นมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองจริง ดังแสดงในภาพที่ 45



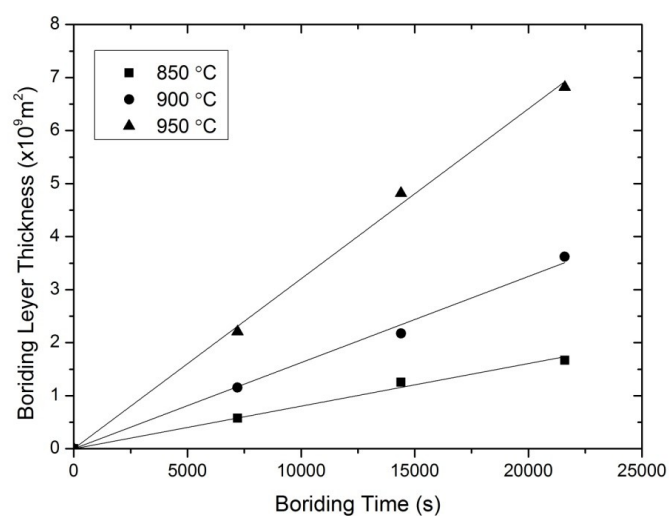
ภาพที่ 45 ความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในกระบวนการบอไรดิ้งแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง

5.2 จลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอไรดิ้งแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง

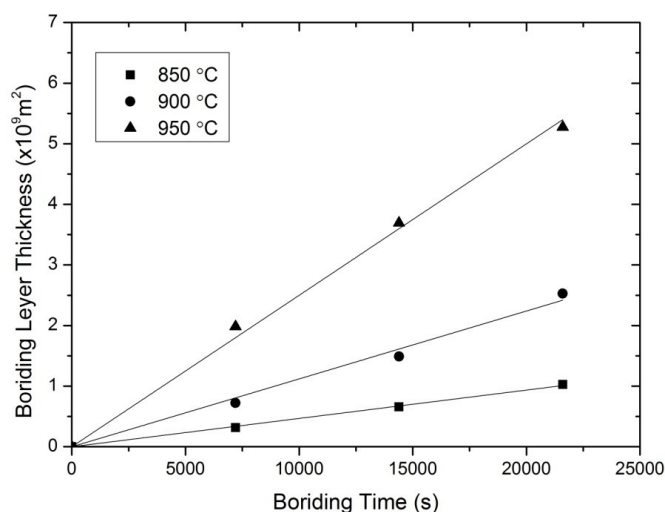
จากการทดลองกระบวนการทำแพคบอไรดิ้งของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 ที่อุณหภูมิ 850 - 950 °C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง โดยมีการให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงาน และมีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร พบว่าชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่เกิดขึ้นนั้นมีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการทำบอไรดิ้ง ซึ่งความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์กับเวลาที่ใช้ในการทำบอไรดิ้งนั้นมีความสัมพันธ์กันเป็นแบบพาราโบลา (ภาพที่ 37-39) และเมื่อนำความหนาที่ได้มาเขียนกราฟระหว่างกำลังสองของความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์กับเวลาต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการบอไรดิ้งดังแสดงในภาพที่ 46 47 และ 48 พบว่ากราฟนั้นมีความสัมพันธ์กันแบบเส้นตรง ซึ่งสามารถอธิบายได้จากทฤษฎีการแพร่ ดังแสดงในสมการที่ 2 เช่นเดียวกับกระบวนการทำแพคบอไรดิ้งโดยไม่มีการให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงาน



ภาพที่ 46 กำลังสองของความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์กับเวลาต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร



ภาพที่ 47 กำลังสองของความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์กับเวลาต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 30 มิลลิเมตร



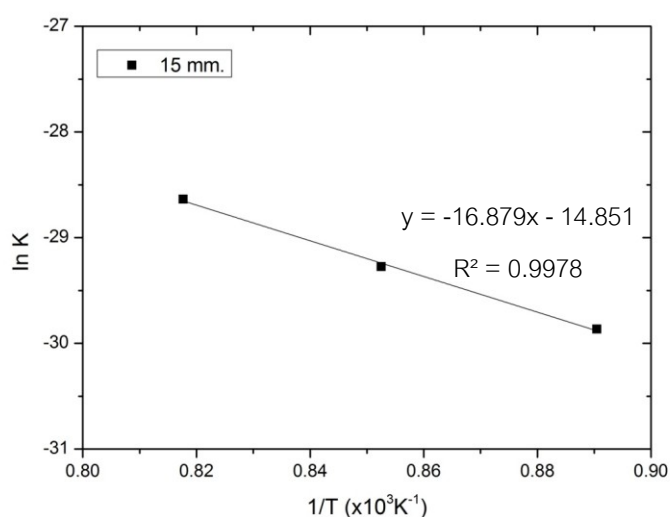
ภาพที่ 48 กำลังสองของความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์กับเวลาต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 45 มิลลิเมตร

จากภาพที่ 46 47 และ 48 ผลการทดลองนั้นเป็นไปตามทฤษฎีการแพร่ ดังสมการที่ 2 ซึ่งทำให้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนได้จากค่าความชันของกราฟระหว่างกำลังสองของความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์กับเวลาที่ใช้ในกระบวนการบอไรดิ้งที่อุณหภูมิต่างๆ ได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 8

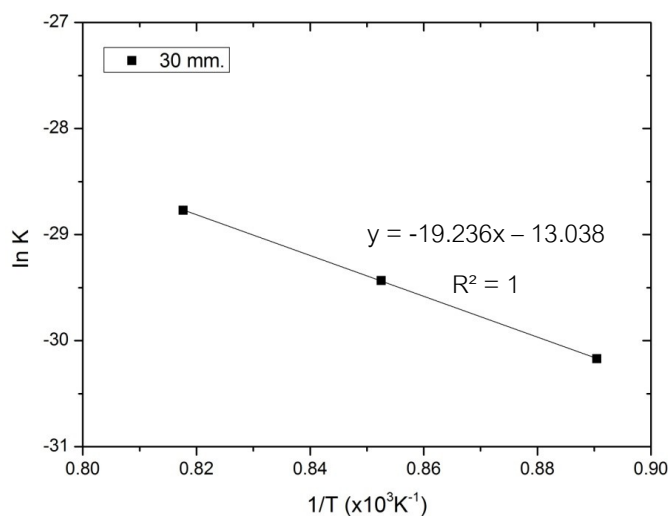
ตารางที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนที่ใช้ในกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิและระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดต่างๆ

อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการบอไรดิ้ง (°C)	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่, K (ตารางเมตร/วินาที) ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (มิลลิเมตร)		
	15	30	45
850	1.07×10^{-14}	7.90×10^{-14}	4.75×10^{-14}
900	1.94×10^{-13}	1.65×10^{-13}	1.16×10^{-13}
950	3.67×10^{-13}	3.20×10^{-13}	2.43×10^{-13}

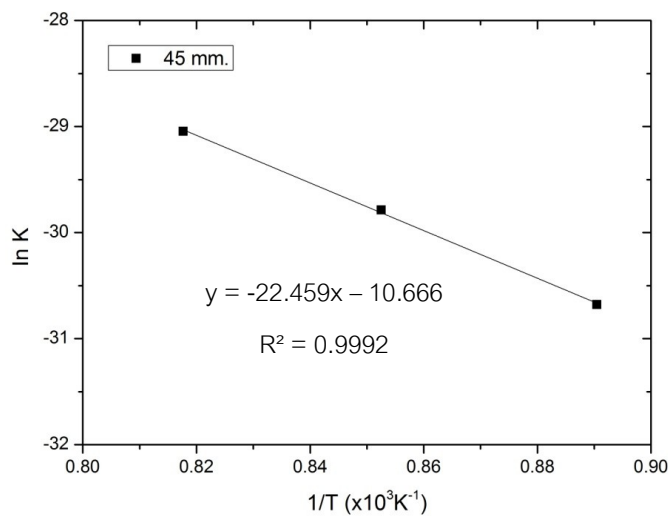
จากสมการที่ 4 จะสังเกตได้ว่าสมการนั้นมีความสอดคล้องกับสมการเส้นตรง ทำให้สามารถหาค่าพลังงานกระตุ้นและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้จากค่าความชันและจุดตัดแกนของกราฟระหว่างลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ($\ln K$) กับส่วนกลับของอุณหภูมิ ($1/T$) ที่ใช้ในกระบวนการบอโรดิงดังแสดงในภาพที่ 49 50 และ 51 โดยค่าพลังงานกระตุ้นและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของกระบวนการบอโรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร มีค่าเท่ากับ 140.23 กิโลจูล/โมล และ 3.55×10^{-7} ตารางเมตร/วินาที ตามลำดับ ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 30 มิลลิเมตร มีค่าเท่ากับ 159.93 กิโลจูล/โมล และ 2.18×10^{-5} ตารางเมตร/วินาที ตามลำดับ และที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 45 มิลลิเมตร มีค่าเท่ากับ 186.81 กิโลจูล/โมล และ 2.33×10^{-5} ตารางเมตร/วินาที ตามลำดับ



ภาพที่ 49 ลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ($\ln K$) กับส่วนกลับของอุณหภูมิ ($1/T$) ที่ใช้ในกระบวนการบอโรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร



ภาพที่ 50 ลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ($\ln K$) กับส่วนกลับของอุณหภูมิ ($1/T$) ที่ใช้ในกระบวนการบอโรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 30 มิลลิเมตร



ภาพที่ 51 ลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ($\ln K$) กับส่วนกลับของอุณหภูมิ ($1/T$) ที่ใช้ในกระบวนการบอโรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 45 มิลลิเมตร

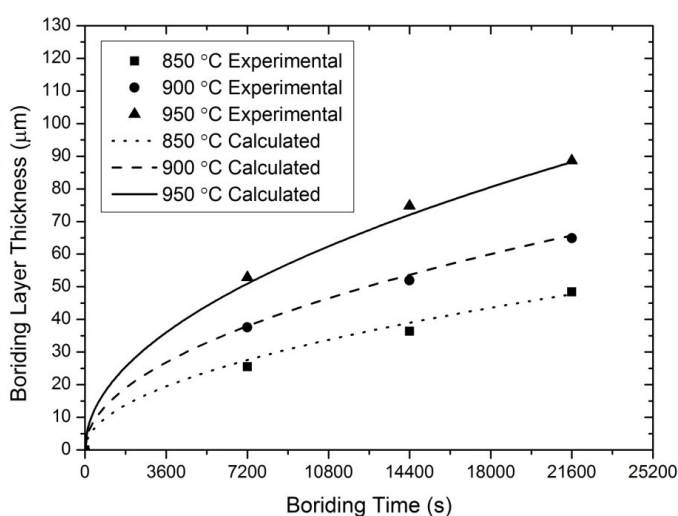
เมื่อได้ค่าตัวแปรต่างๆ ทั้งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ ค่าพลังงานกระตุ้น และค่าคงที่ของก๊าซ ทำให้สามารถทำนายความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ได้จากการคำนวณโดยการนำค่าทั้งหมดมาแทนกลับลงไปในสมการที่ 2 จึงได้สมการใหม่ดังแสดงในสมการที่ 6 7 และ 8 ซึ่งมีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร ตามลำดับ

$$d = (3.55 \times 10^{-7} t \exp(-16879/T))^{0.5} \quad (6)$$

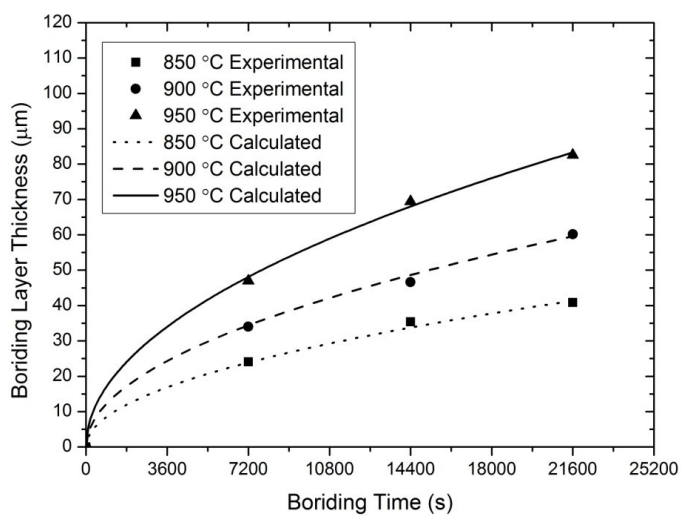
$$d = (2.18 \times 10^{-5} t \exp(-19236/T))^{0.5} \quad (7)$$

$$d = (2.33 \times 10^{-3} t \exp(-22459/T))^{0.5} \quad (8)$$

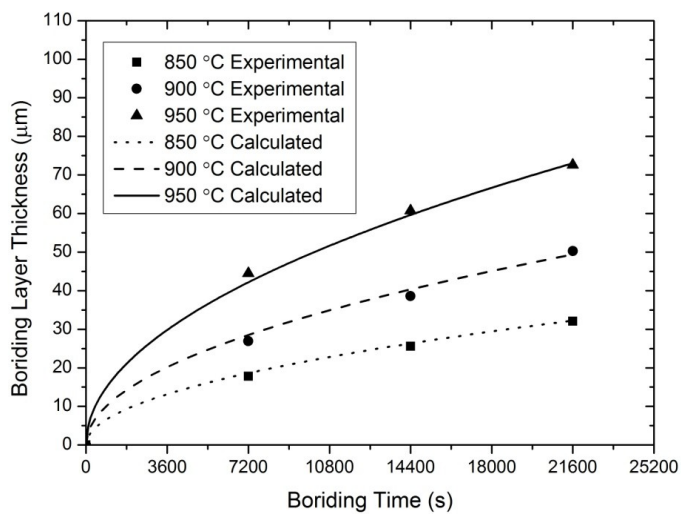
จากสมการที่ 7 8 และ 9 ซึ่งมีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร ตามลำดับ เมื่อนำมาอุณหภูมิและเวลาที่ทำการทดลองมาแทนค่าเพื่อทำนายผลความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่จะเกิดขึ้นและนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองจริง พบว่าค่าความหนาของชั้นเคลือบเหล็กที่ได้จากการคำนวณนั้นมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองจริง ดังแสดงในภาพที่ 52 53 และ 54 ตามลำดับ



ภาพที่ 52 ความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร



ภาพที่ 53 ความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 30 มิลลิเมตร



ภาพที่ 54 ความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในกระบวนการบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 45 มิลลิเมตร

5.3 เปรียบเทียบจลนพลศาสตร์ของกระบวนการบอโรดิงแบบไม่ให้และแบบให้ไฟฟ้า กระแสตรง

จากการทดลองกระบวนการทำแพคบอโรดิงของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 ที่อุณหภูมิ 850 - 950 °C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ทั้งแบบที่ไม่ให้และให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงาน ซึ่งมีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร พบว่าจลนพลศาสตร์ของทั้ง 2 กระบวนการนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีการแพร่และสมการของ Arrhenius และยังพบว่าการให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงานในกระบวนการแพคบอโรดิงนั้นสามารถเข้าไปช่วยเพิ่มอัตราการแพร่ให้กับอะตอมโบรอน ทำให้ชั้นเคลือบเหล็กบอโรดิงที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าความหนามากกว่ากระบวนการแพคบอโรดิงแบบที่ไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงาน สามารถสังเกตได้จากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนดังแสดงในตารางที่ 9 โดยจะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของกระบวนการแพคบอโรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงานนั้นมีค่ามากกว่ากระบวนการแพคบอโรดิงแบบที่ไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงานที่อุณหภูมิและเวลาเท่ากัน นอกจากนี้ยังพบว่าค่าพลังงานกระตุ้นที่คำนวณได้นั้นในกระบวนการแพคบอโรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงานนั้นมีค่าน้อยกว่ากระบวนการแพคบอโรดิงแบบที่ไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงาน นอกจากนี้ยังพบว่าค่าพลังงานกระตุ้นของกระบวนการแพคบอโรดิงแบบที่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงาน ซึ่งมีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่แตกต่างกันนั้น จะสังเกตได้ว่าสำหรับชิ้นงานที่มีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเท่ากับ 15 มิลลิเมตร นั้นมีค่าพลังงานกระตุ้นน้อยที่สุด และค่าพลังงานกระตุ้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดจนถึงที่ระยะ 45 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าพลังงานกระตุ้นใกล้เคียงกับชิ้นงานอ้างอิงในกระบวนการแพคบอโรดิงแบบที่ไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงาน ทั้งนี้เนื่องมาจากอิทธิพลของไฟฟ้ากระแสตรงและระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้

ซึ่งนั่นอาจกล่าวได้ว่าในกระบวนการแพคบอโรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงานและมีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร นั้นสามารถเกิดชั้นเคลือบเหล็กบอโรดิงได้ง่ายกว่า จึงทำให้ได้ค่าความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอโรดิงที่มากกว่ากระบวนการแพคบอโรดิงแบบที่ไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงานในอุณหภูมิและเวลาเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับหลักการทางจลนพลศาสตร์ เนื่องจากพลังงานกระตุ้นนั้นเป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณพลังงานที่อะตอมต้องการเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่หรือเกิดการแพร่

ตารางที่ 9 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ และค่าพลังงานกระตุ้นของกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบที่
ไม่ให้และให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิต่างๆ

ชนิดชิ้นงาน	อุณหภูมิ (°C)	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (ตารางเมตร/วินาที)	ค่าพลังงานกระตุ้น (กิโลจูล/โมล)
อ้างอิง	850	4.00×10^{-14}	185.71
	900	1.03×10^{-13}	
	950	2.03×10^{-13}	
15 มิลลิเมตร	850	1.07×10^{-14}	140.33
	900	1.94×10^{-13}	
	950	3.67×10^{-13}	
30 มิลลิเมตร	850	7.90×10^{-14}	159.93
	900	1.65×10^{-13}	
	950	3.20×10^{-13}	
45 มิลลิเมตร	850	4.75×10^{-14}	186.72
	900	1.16×10^{-13}	
	950	2.43×10^{-13}	

ดังนั้นจากการทดลองทำกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบที่ไม่ให้และให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงานซึ่งมีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดต่างๆ นั้น พบว่าการให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงานและมีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดน้อยๆ นั้นสามารถเข้าไปช่วยเพิ่มอัตราการแพร่ของอะตอมโบรอนได้ ส่งผลให้ความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์นั้นมีค่ามากกว่าการไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงานในทุกๆ อุณหภูมิและเวลาที่เท่ากัน และระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่ทำให้ได้ชั้นเคลือบหนามากที่สุดสำหรับการทดลองนี้คือ 15 มิลลิเมตร จึงสรุปได้ว่าไฟฟ้ากระแสตรงนั้นสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ และยังช่วยลดอุณหภูมิและเวลาให้แก่กระบวนการแพคบอไรดิ้งได้ แต่ทั้งนี้ก็ควรมีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่เหมาะสมด้วย จึงจะเป็นแนวทางสำคัญแนวทางหนึ่งที่จะสามารถช่วยลดต้นทุนและพลังงานให้แก่ผู้ผลิตได้ และนอกจากนี้การให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงานก็ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการเคลือบผิวอื่นๆ ที่อาศัยการแพร่ของอะตอมได้อีกด้วย

6. เปรียบเทียบกระบวนการแพคบอโรดิงของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 กับเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น AISI D2 (ยศพงศ์, 2555)

6.1 โครงสร้างจุลภาคและลักษณะของชั้นเคลือบเหล็กบอโรด์

จากผลการทดลองกระบวนการทำแพคบอโรดิงของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 และเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น AISI D2 ที่อุณหภูมิ 850 - 950 °C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร ทั้งแบบที่ไม่ให้และให้ไฟฟ้ากระแสตรง แก่ชิ้นงาน พบว่าเหล็กกล้าเครื่องมือทั้ง 2 ชนิดนั้นเกิดชั้นเคลือบบอโรด์ชนิดเดียวกัน คือ ชั้นเคลือบของเหล็กบอโรด์ชนิดเฟสคู่ ประกอบไปด้วยเฟส FeB และ Fe₂B โดยมีชั้นของเฟส FeB ซึ่งมีสีเข้ม อยู่ชั้นนอกสุดที่บริเวณผิวชิ้นงาน และชั้นของเฟส Fe₂B ที่มีสีอ่อนอยู่ชั้นในถัดเข้ามา โดยลักษณะชั้นเคลือบบอโรด์ของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 นั้นมีความหยาบลักษณะแบบฟันเลื่อย มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชั้นเคลือบบอโรด์ของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI D2 ทั้งนี้ เนื่องมาจากส่วนผสมหรือองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 ที่มี ปริมาณของธาตุผสมต่างๆ รวมทั้งปริมาณของโครเมียมซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวขัดขวางการแพร่ของ อะตอมโบรอนนั้นน้อยกว่าในเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI D2 เพราะเมื่อปริมาณของธาตุผสม ต่างๆ รวมทั้งปริมาณของโครเมียมเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ลักษณะของชั้นเคลือบมีความราบเรียบมากขึ้นและความหนาของชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นก็จะลดลงด้วย

6.2 ความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอโรด์

จากผลการทดลองกระบวนการทำแพคบอโรดิงของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 และเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น AISI D2 ที่อุณหภูมิ 850 - 950 °C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร ทั้งแบบที่ไม่ให้และให้ไฟฟ้ากระแสตรง แก่ชิ้นงาน พบว่าในแบบที่ไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอโรด์ที่เกิดขึ้นมี ค่าในช่วง 16 – 65 ไมโครเมตรสำหรับเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 และ 16 – 69 ไมโครเมตรสำหรับเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น AISI D2 ส่วนในแบบที่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงความ หนาของชั้นเคลือบเหล็กบอโรด์ที่เกิดขึ้นมีค่าในช่วง 17 – 88 ไมโครเมตรสำหรับเหล็กกล้า เครื่องมืองานร้อน AISI H13 และ 19 – 99 ไมโครเมตรสำหรับเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น AISI D2 ซึ่งสังเกตได้ว่าความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอโรด์ที่เกิดขึ้นในเหล็กกล้าทั้ง 2 ชนิดนั้นมีความ ใกล้เคียงกันทั้งแบบที่ไม่ให้และให้ไฟฟ้ากระแสตรง ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าความหนาของชั้นเคลือบ

ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการบอโรไดมิงเป็นหลักตามทฤษฎีการแพร่ แต่นอกจากนี้ยังมีปัจจัยของส่วนผสมและองค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานด้วย ซึ่งในงานวิจัยของ Taktak (Taktak S., 2007) ได้กล่าวว่ค่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์จะลดลงเมื่อจำนวนของธาตุผสมมีมากขึ้น (โดยเฉพาะธาตุโครเมียม)

6.3 ความแข็งของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์

จากผลการทดลองกระบวนการทำแพกบอโรไดมิงแบบที่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงานของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 และเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น AISI D2 ที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร เมื่อนำชิ้นงานไปวัดค่าความแข็งของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ พบว่าได้ค่าความแข็งของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ 1548 HV และ 1600 HV ตามลำดับ โดยค่าความแข็งที่ได้นั้นเป็นผลมาจากเฟสของ FeB และ Fe₂B ที่เป็นชั้นเคลือบบนชิ้นงาน ซึ่งจะสังเกตได้ว่าค่าความแข็งของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 มีค่าน้อยกว่าเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น AISI D2 เพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าความแข็งของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการทำบอโรไดมิง ดังเช่นในงานวิจัยของ Bektes และคณะ (Bektes *et.al.*, 2010) ได้กล่าวว่ค่าความแข็งของชั้นเคลือบจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการบอโรไดมิง เนื่องจากการช่วยเพิ่มการแพร่ของอะตอมโบรอน และนอกจากนี้ในงานวิจัยของ Badini และคณะ (Badini *et.al.*, 1987) ได้กล่าวว่ธาตุโครเมียมสามารถช่วยเพิ่มค่าความแข็งให้แก่ชั้นเคลือบบอไรด์ได้

6.4 ค่าพลังงานกระตุ้นของกระบวนการบอโรไดมิง

จากผลการทดลองกระบวนการทำแพกบอโรไดมิงของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 และเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น AISI D2 ที่อุณหภูมิ 850 - 950 °C เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 30 และ 45 มิลลิเมตร ทั้งแบบที่ไม่ให้และให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงาน พบว่าในแบบที่ไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงค่าพลังงานกระตุ้นมีค่าเท่ากับ 185.71 kJ/mol สำหรับเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 และ 177.42 kJ/mol สำหรับเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น AISI D2 ส่วนในแบบที่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 30 และ 45 มิลลิเมตรค่าพลังงานกระตุ้นมีค่าเท่ากับ 140.33, 159.93 และ 186.72 kJ/mol ตามลำดับสำหรับเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 และ 156.81, 165.04 และ 175.69 kJ/mol ตามลำดับสำหรับ

เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น AISI D2 ซึ่งจะสังเกตได้ว่าค่าพลังงานกระตุ้นของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 นั้นมีค่าน้อยกว่าเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น AISI D2 ทั้งแบบที่ไม่ให้และให้ไฟฟ้ากระแสตรง ทั้งนี้เนื่องมาจากในงานวิจัยของ Genel (Genel K., 2005) ได้กล่าวว่าค่าพลังงานกระตุ้นแตกต่างกันเพราะความสามารถของโบรอนในตัวกลาง (ชนิดของสารที่ให้โบรอน) และส่วนผสมหรือองค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงาน ดังเช่นในงานวิจัยของ Kartal และคณะ (Kartal et. al., 2011) ได้กล่าวว่าค่าพลังงานกระตุ้นของกระบวนการ electrochemical boriding มีค่าน้อยกว่าประมาณ 24 % เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพลังงานกระตุ้นของกระบวนการแพคบอไรดิง ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่าการเลือกกระบวนการในการทำบอไรดิงนั้นมีผลต่อการคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ของชั้นเคลือบบอไรด์ เพราะฉะนั้นความแตกต่างของค่าพลังงานกระตุ้นของเหล็กกล้าทั้ง 2 งานวิจัยนี้ อธิบายได้จากปริมาณของธาตุผสมโครเมียมที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าพลังงานกระตุ้นมีค่ามากตามไปด้วย และในงานวิจัยของ Bektes และคณะ (Bektes et.al., 2010) ได้พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณของธาตุผสมแมงกานีสเพิ่มขึ้นด้วย

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากผลการทดลองการศึกษากระบวนการแพคบอโรดิงจากของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 ทั้งแบบที่ไม่ให้และให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความหนาแน่นกระแสขนาด 80 mA/cm^2 ที่อุณหภูมิ $850 - 950^\circ\text{C}$ เป็นระยะเวลา 2 - 6 ชั่วโมง และมีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 - 45 มิลลิเมตร สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ชั้นเคลือบบอโรดิงที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแพคบอโรดิงทั้งแบบที่ไม่ให้และให้ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นเป็นชั้นเคลือบเหล็กบอโรดิงชนิดเฟสคู่ คือ ประกอบด้วย FeB และ Fe_2B โดยมีความแข็งที่ผิวสูงสุดประมาณ 1500 - 1600 HV
2. ความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอโรดิงที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแพคบอโรดิงทั้งแบบที่ไม่ให้และให้ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการ แต่ในกระบวนการแพคบอโรดิงแบบที่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นค่าความหนาจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อลดระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดให้มีย่าน้อยลง โดยระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่ได้ความหนามากที่สุดคือ 15 มิลลิเมตร
3. ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการแพคบอโรดิงแบบที่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นมีค่าสูงกว่ากระบวนการแพคบอโรดิงแบบที่ไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง และจะมีเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดลดลง โดยที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตรนั้นมีค่าสูงที่สุด
4. ค่าพลังงานกระตุ้นในกระบวนการแพคบอโรดิงแบบที่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นมีค่าน้อยกว่ากระบวนการแพคบอโรดิงแบบที่ไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง และจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ เมื่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดลดลง โดยที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตรนั้นมีค่าน้อยที่สุด

5. ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการเคลือบโรดิงแบบที่ ให้ไฟฟ้ากระแสตรง คือ 15 มิลลิเมตร เนื่องจากทำให้ได้ค่าความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ มากที่สุดในทุกๆ อุณหภูมิและเวลาเท่ากัน

6. ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดมีผลต่อความเข้มของขนาดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ระหว่างกระบวนการ เนื่องจากอะตอมโบรอนนั้นมีทิศทางการแพร่ตามเส้นแรงของสนามไฟฟ้าที่มี ค่าความหนาแน่นแปรผันตรงกับขนาดของสนามไฟฟ้า

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงช่วยในกระบวนการชุบแข็งพื้นผิวแบบอื่นๆ เช่น กระบวนการบอไรดิงแบบอื่นๆ หรือ กระบวนการอะลูมิไนซิง เป็นต้น
2. ควรมีการนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเคลือบโรดิงแล้ว ไปศึกษาสมบัติในด้านอื่นๆ ต่อไป เช่น สมบัติทางด้านการต้านทานการกัดกร่อน เป็นต้น
3. ควรมีการนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเคลือบโรดิงแล้ว ไปอบด้วยความร้อนอีกครั้ง เพื่อศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวให้เหลือเพียงเฟสที่ต้องการเท่านั้น ในที่นี้หมายถึงการทำให้เหลือเพียง เฟส Fe_2B เพราะเฟส FeB เป็นเฟสที่ไม่พึงประสงค์ เนื่องจากมีความเปราะ
4. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงช่วยในกระบวนการเคลือบโรดิง โดยให้ค่าความหนาแน่นกระแสที่มากกว่า 80 mA/cm^2 เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดในเรื่อง เครื่องมือที่ไม่สามารถทำได้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

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

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ สาขาวิชาฟิสิกส์. 2546. **ประมวลสาระวิชาฟิสิกส์ 2**. สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.

ยศพงศ์ บุญปลูก. 2555. : **อิทธิพลของระยะห่างระหว่างขั้วของการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอไรดิ้งแบบแพ็คโดยให้ไฟฟ้ากระแสตรง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Badini, C., C. Gianoglio and G. Pradelli. 1987. The effect of carbon, chromium and nickel on the hardness of borided layers. **Surface & Coatings Technology** 30(2): 157-170.

Bektes, M., A. Calik, N. Ucar and M. Kaddam. 2010. Pack-boriding of Fe-Mn binary alloys: Characterization and kinetics of the boride layers. **Materials Characterization** 61: 233-239.

Campos-Silva, I., M. Ortiz-Dominguez, M.A. Donu-Ruiz, D. Bravo-Barcenas, C. Tapia-Quintero and M.Y. Jimenez-Reyes. 2010. Formation and kinetics of FeB/Fe₂B layers and diffusion zone at the surface of AISI 316 borided steels. **Surface & Coatings Technology** 205: 403-412.

Davis, J.R. 2002. **Surface Hardening of Steels Understanding the Basics**. ASM International, USA.

Genel, K. 2005. Boriding kinetics of H13 steel. **Vacuum** 80: 451-457.

Kartal, G., O. L. Eryilmaz, et al. 2011. Kinetics of electrochemical boriding of low carbon steel. **Applied Surface Science** 257(15): 6928-6934.

- Keddarn, M. and S. M. Chentouf . 2005. A diffusion model for describing the bilayer growth (FeB/Fe₂B) during the iron powder-pack boriding. **Applied Surface Science** 252(2): 393
- Sinha, A.K. and B.P. Division. 1994. Boriding. **ASM Handbook**. Vol. 4. ASM International. Ohio, USA.
- Taktak, S. 2007. Some mechanical properties of borided AISI H13 and 304 steels. **Materials & Design** 28: 1836-1843.
- Xie, F., Q. Zhu and J. Lu. 2006. Influence of direct current field on Powder-pack boriding. **Solid State Phenomena** 118: 167-171.
- Xie, F., Sun, L., and Pan, J.W. 2012. Characteristics and mechanisms of accelerating pack boriding by direct current field at low and moderate temperatures. **Surface & Coating Technology** 206: 2839–2844.
- Zhenghua, Z., F.Xie. and J.Hu. 2008. A novel powder aluminizing technology assisted by direct current field at low temperature. **Surface & Coating Technology** 203: 23-27.



ภาคผนวก



ตารางผนวกที่ ก1 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพลงบอไรด์
แบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่อุณหภูมิ 850 °C เป็นระยะเวลาต่างๆ

วัดครั้งที่	ความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ (ไมโครเมตร)		
	2 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง
1	17.00	27.62	29.05
2	17.48	22.86	24.76
3	15.10	26.19	29.52
4	18.90	25.24	29.05
5	16.05	24.76	25.71
6	14.62	23.33	30.95
7	19.38	27.14	29.05
8	19.38	33.33	27.62
9	15.57	22.86	31.43
10	14.14	21.43	32.38
เฉลี่ย	16.76	25.48	28.95

ตารางผนวกที่ ก2 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเคลือบไรดิ้งแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นระยะเวลาต่างๆ

วัดครั้งที่	ความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ (ไมโครเมตร)		
	2 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง
1	25.52	40.95	47.86
2	22.19	39.54	50.71
3	27.90	37.62	38.33
4	23.62	37.15	54.52
5	24.57	40.49	46.43
6	31.71	37.14	50.71
7	31.24	37.14	46.43
8	25.52	37.62	46.91
9	22.20	37.14	45.95
10	21.71	*	34.05
เฉลี่ย	25.62	38.31	46.19

* คือ จุดที่ไม่สามารถเห็นขอบเขตวัดที่แน่นอน

ตารางผนวกที่ ก3 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรด์
แบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรง ที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นระยะเวลาต่างๆ

วัดครั้งที่	ความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ (ไมโครเมตร)		
	2 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง
1	38.86	53.33	71.52
2	36.00	56.05	62.48
3	24.10	61.76	62.95
4	38.38	57.95	70.57
5	38.86	64.14	68.67
6	36.95	44.14	67.24
7	43.14	57.48	59.14
8	41.24	45.57	68.19
9	39.81	61.76	53.43
10	32.19	59.38	70.57
เฉลี่ย	36.95	55.86	65.48

ตารางผนวกที่ ก4 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเคลือบโรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง (ความหนาแน่นกระแสขนาด 80 mA/cm^2) ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลาต่างๆ และมีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดต่างๆ

วัดครั้งที่	ความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ (ไมโครเมตร)								
	2 ชั่วโมง			4 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง		
	15 มม.	30 มม.	45 มม.	15 มม.	30 มม.	45 มม.	15 มม.	30 มม.	45 มม.
1	26.00	22.95	17.29	33.90	29.24	23.00	45.00	46.10	29.43
2	25.05	23.90	18.71	42.00	38.29	23.48	54.05	41.81	37.52
3	27.90	24.38	18.71	41.05	36.38	24.90	45.48	43.24	29.90
4	24.57	18.67	14.43	36.76	38.29	23.95	45.95	35.14	30.38
5	25.52	22.96	16.81	33.90	33.52	30.14	42.62	39.43	37.05
6	24.10	25.33	18.24	29.62	35.90	19.67	52.14	38.95	30.38
7	23.14	19.62	20.15	31.52	35.90	23.00	52.15	34.19	27.05
8	25.52	26.29	22.05	34.86	38.29	31.10	48.81	43.71	33.71
9	26.00	26.76	14.00	37.24	36.86	28.24	43.10	42.29	33.24
10	26.95	29.62	18.71	42.95	31.62	28.71	55.00	43.71	31.81
เฉลี่ย	25.48	24.05	17.81	36.38	35.43	25.62	48.43	40.86	32.05

ตารางผนวกที่ ก5 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเคลือบโรดิงแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง (ความหนาแน่นกระแสขนาด 80 mA/cm^2) ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นระยะเวลาต่างๆ และมีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดต่างๆ

วัดครั้งที่	ความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ (ไมโครเมตร)								
	2 ชั่วโมง			4 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง		
	15 มม.	30 มม.	45 มม.	15 มม.	30 มม.	45 มม.	15 มม.	30 มม.	45 มม.
1	36.76	31.95	25.38	53.90	47.86	38.91	67.57	65.81	48.71
2	33.43	35.29	25.86	53.90	48.81	43.67	66.14	53.43	48.71
3	36.76	27.19	26.33	52.00	47.38	37.48	60.43	60.57	52.52
4	41.52	37.19	25.86	48.67	50.24	39.38	59.95	58.67	55.38
5	39.62	38.14	29.21	49.14	46.43	41.29	69.00	60.57	53.95
6	36.76	31.01	30.62	52.95	44.52	36.05	67.10	62.48	38.24
7	31.52	39.11	27.29	49.14	43.57	38.90	69.00	63.43	46.81
8	39.15	29.58	22.07	49.62	45.00	35.10	62.81	59.62	51.10
9	39.62	37.19	28.71	52.48	45.95	37.95	61.86	*	55.86
10	40.57	33.38	27.76	58.19	*	37.00	65.19	*	51.57
เฉลี่ย	37.57	34.00	26.91	52.00	46.64	38.57	64.91	60.57	50.29

* คือ จุดที่ไม่สามารถเห็นขอบเขตวัดที่แน่นอน

ตารางผนวกที่ ก6 ความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพลงบอไรด์
แบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง (ความหนาแน่นกระแสขนาด 80 mA/cm^2) ที่อุณหภูมิ
 950°C เป็นระยะเวลาต่างๆ และมีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดต่างๆ

วัดครั้งที่	ความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ (ไมโครเมตร)								
	2 ชั่วโมง			4 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง		
	15 มม.	30 มม.	45 มม.	15 มม.	30 มม.	45 มม.	15 มม.	30 มม.	45 มม.
1	36.62	53.05	39.62	73.81	70.71	56.05	85.90	87.62	73.86
2	50.90	45.90	45.81	75.71	74.53	67.48	89.24	84.76	79.10
3	44.71	55.43	42.48	77.14	67.86	63.67	86.38	80.00	74.81
4	59.48	44.95	43.90	70.95	72.14	59.38	84.95	82.86	72.43
5	60.43	37.33	47.24	72.86	68.81	65.10	87.81	83.33	70.52
6	53.76	44.00	43.90	74.29	78.33	69.38	96.86	84.29	80.05
7	54.24	44.95	45.81	74.76	72.62	59.86	97.33	84.76	74.81
8	53.76	44.95	43.43	80.48	72.62	56.52	83.05	75.71	69.57
9	59.00	49.71	42.95	77.62	57.86	63.20	90.67	80.00	58.62
10	55.67	49.71	50.10	70.48	58.81	57.00	84.48	82.38	72.43
เฉลี่ย	52.86	47.00	44.52	74.81	69.43	60.76	88.67	82.57	72.62

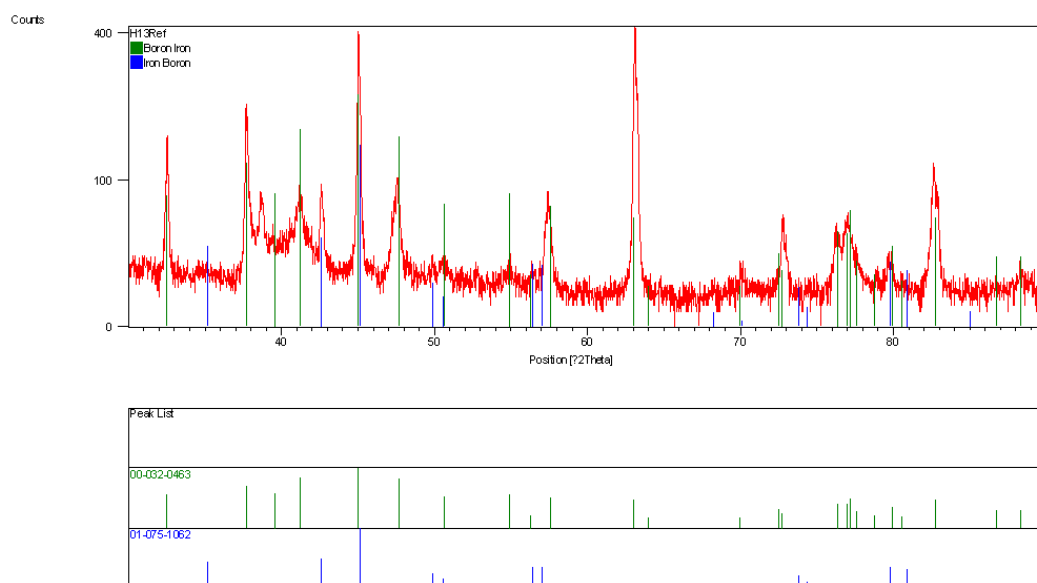


ตารางผนวกที่ ข1 ค่าความแข็งของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพค
บอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรง (ความหนาแน่นกระแสขนาด 80 mA/cm^2) ที่
อุณหภูมิ 950°C เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง และมีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด
15 มิลลิเมตร

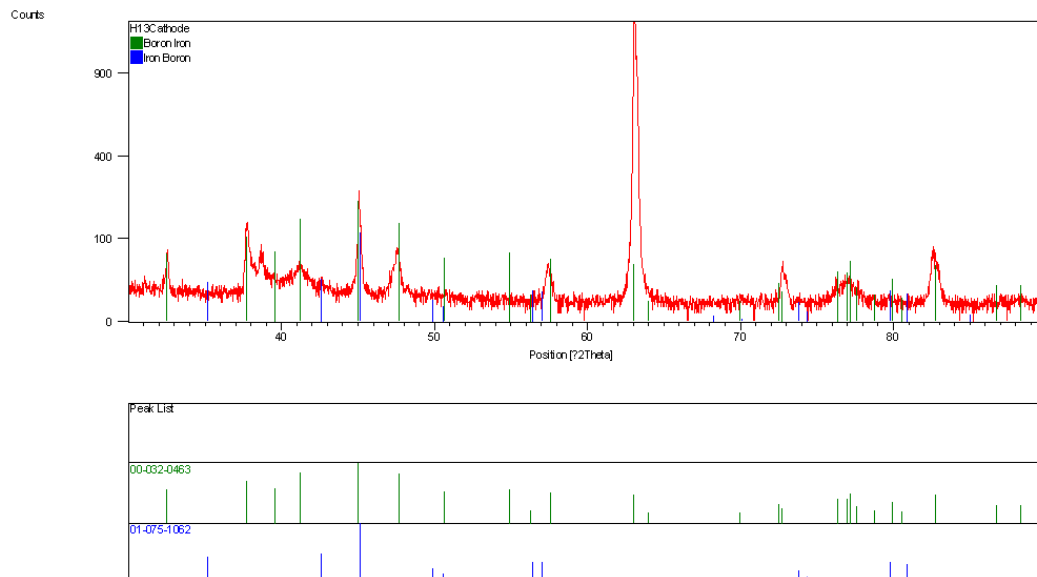
ค่าความแข็ง ($\text{HV}_{0.05}$)	ระยะห่างจากผิว (ไมโครเมตร)
1548.00	33.05
452.89	70.34
231.13	91.52
378.48	148.31
404.17	227.97
442.34	344.92
386.65	468.64
463.60	622.92
432.36	674.42



ภาคผนวก ค
รูปแบบการเกี่ยวเบนของรังสีเอกซ์



ภาพผนวกที่ ค1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



ภาพผนวกที่ ค2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพคบอไรดิ้งแบบให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาวธีรภา สุพรรณโรจน์
เกิดวันที่	18 เมษายน 2530
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมวัสดุ) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-

