

# การศึกษาการทำบอโรดิ้งแบบแพคบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420

## A study of packed boriding process on stainless steel AISI 420

นางสาวปัทมา ขำของเกษตร

อาจารย์ที่ปรึกษา: อ.ปฏิภาณ จุ้ยเจิม

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โทร. 0-2549-3429, 0-2549-3420 โทรสาร 0-2549-3422 E-mail: [fengppi@ku.ac.th](mailto:fengppi@ku.ac.th)

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเคลือบบอโรดิ้งบนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI420 ด้วยกระบวนการบอโรดิ้งแบบแพคที่อุณหภูมิ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง และทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบบอโรดิ้ง โดยการใช้อัลตร้าไมครอสโคปแบบแสง (Optical microscope) วัดความหนาของชั้นเคลือบด้วยเครื่องวิเคราะห์ภาพ (Image Analyzer) ทดสอบความแข็งของชั้นเคลือบด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง (Micro Vickers Hardness Test) และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD)

ความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอโรดิ้งบนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI420 ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ได้ค่าความหนาชั้นเคลือบเป็น 17.91 30.86 และ 31.62 ไมครอน ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ได้ค่าความหนาชั้นเคลือบเป็น 26.57 43.57 และ 48.14 ไมครอน ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ได้ค่าความหนาชั้นเคลือบเป็น 44.86 55.81 และ 76.24 ไมครอน

จลนพลศาสตร์ของบอโรดิ้งหาได้จากความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างความหนาของชั้นเคลือบบอโรดิ้งกำลังสองและเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว คำนวณค่าพลังงานก่อกัมมันต์ได้เท่ากับ 183.83 kJ/mol

คำสำคัญ : บอโรดิ้งแบบแพค การเคลือบผิวเหล็กบอโรดิ้ง เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI420

### Abstract

In this research aimed at studying of packed boriding process on stainless steel AISI 420 have been investigated using a packed boriding process at temperature 850 900 and 950 °C for about 2, 4 and 6 h. The morphology of the boride layer was characterized by optical microscopy (OM). The thicknesses of boride layer were measured using the optical microscopy (OM) with Image Analyzer

program. The microhardness of boride layer was measured by a Micro Vickers Hardness Test. And characterized by X-ray diffraction (XRD)

The thickness of boride layer on stainless steel AISI 420 at temperature 850 °C for about 2, 4 and 6 h is 17.91 30.86 and 31.62 micron at temperature 900 °C for about 2, 4 and 6 h is 26.57 43.57 and 48.14 micron and at temperature 950 °C for about 2, 4 and 6 h is 44.86 55.81 and 76.24 micron.

The thickness of boride layer increased according to the boriding time and grown up linearly in the function of the thickness square and boriding time. Activation energy for the process is 183.83 kJ/mol.

Keywords: Packed Boriding Coating Boride Stainless steel AISI420

### 1. บทนำ

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) เป็นเหล็กกล้าที่มีสมบัติต้านทานการสึกกร่อนได้สูงกว่าเหล็กทั่วไป ซึ่งมีโครเมียมผสมอย่างน้อย 10.5% ซึ่งการเพิ่มโครเมียมเข้าไปในเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel) ชธรรมดาฯ ให้มีสมบัติต่อต้านการเกิดสนิมได้ดียิ่งขึ้น จึงนิยมนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งในงานก่อสร้างและอุตสาหกรรม แม้ว่าเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีสมบัติต้านทานการสึกกร่อนได้สูงกว่าเหล็กทั่วไป แต่ยังคงประสบปัญหาในการใช้งาน โดยปัญหาที่เกิดขึ้นบ่อยได้แก่ การสึกหรอของชิ้นงาน อายุการใช้งานสั้นและสร้างความเสียหายให้กับ งาน โดยเฉพาะงานที่ได้รับการเสียดสี ความร้อนและแรงดันสูง เช่น แม่พิมพ์ (Mould) หัวฉีดเตา (Burner nozzles) และอุปกรณ์ที่ได้รับแรงดันและความร้อนสูง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าใช้จ่ายเป็นอย่างมาก รวมถึงเวลาที่สิ้นเปลืองเพิ่มขึ้นอีกด้วย ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยกระบวนการบอโรดิ้ง (Boriding) หรือ กระบวนการโบรอนไนซิง (Boronizing) ซึ่งเป็นกระบวนการเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงานโดยการสร้างชั้นเคลือบบอโรดิ้งที่มีความแข็งสูงบนบริเวณผิว โดยการให้อะตอม

ของธาตุโบรอนแพร่เข้าไปที่ผิวของชิ้นงานแล้วรวมตัวกับเหล็กเกิดเป็นเหล็กบอไรด์ (FeB และ Fe<sub>2</sub>B) ขึ้น ซึ่งความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์นั้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอะตอมโบรอนภายในเตา อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว

งานวิจัยนี้จึงศึกษาการเกิดชั้นเคลือบบอไรด์บน ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ด้วยกระบวนการบอไรดิ้งแบบ แพลด โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิและเวลาต่างกันเพื่อหาความแตกต่างของชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้นและหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้นกับค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation Energy) ตามสมการ  $K = K_0 \exp(-Q/RT)$  เพื่อนำไปคำนวณว่าควรจะใช้อุณหภูมิ และเวลาในกระบวนการเท่าใด จึงจะทำให้ได้ค่าความหนาตามที่กำหนดไว้ได้

## 2. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำโครงการ

### 2.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทำโครงการ

- 1) ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 1
- 2) ผง Ekabor-I
- 3) ก่อ้งบรรจุสำหรับอัดผงและวางชิ้นงาน
- 4) มาร์เบิล รีเอเจนต์ (Marble Reagent)
- 5) แอลกอฮอล์
- 6) ผงอลูมินา
- 7) แก๊สอาร์กอน

ตารางที่ 1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก

AISI 420 (%WT)

C	Si	Mn	P	S
0.30	0.25	0.43	0.18	0.28
Cr	Ni	Fe		
12.15	0.32	Bal		

### 2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำโครงการ

- 1) เตเผา อุณหภูมิสูงสุด 1400 องศาเซลเซียส
- 2) เครื่องตัด (High speed cutter)
- 3) เครื่องกลึง (Lathe Machine)
- 4) เครื่องขัดผิวชิ้นงาน (Grinder polisher)
- 5) เทอร์โมคัพเปิล
- 6) กระจกทรายและผ้าสักหลาด
- 7) อุปกรณ์อื่นๆ เช่น ถุงมือกันความร้อนและถุงมือยางกันสารเคมี

## 2.3 เครื่องมือวิเคราะห์ผิวเคลือบ

- 1) เครื่องทดสอบความแข็ง (Micro Vickers Hardness Test)
- 2) เครื่องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM)
- 3) เครื่องวิเคราะห์ภาพ (Image Analyzer)
- 4) เครื่องวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมี (X-Ray Diffraction, XRD)

## 3. ขั้นตอนการทดลอง

### 3.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

- 1) ตัดชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร ยาว 20 มิลลิเมตร
- 2) ขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทราย เบอร์ 120 240 400 และ 600 ด้วยเครื่องกลึงเพื่อกำจัดสนิมและสิ่งสกปรกออก
- 3) ทำความสะอาดผิวหน้าชิ้นงานด้วยแอลกอฮอล์
- 4) ทำการบรรจุชิ้นงานและผง Ekabor-I ลงในกล่องบรรจุ แล้วปิดให้สนิท

### 3.2 ขั้นตอนการเคลือบผิว

- 1) นำกล่องบรรจุชิ้นงานวางลงในเตาจากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวคือ 2, 4 และ 6 ชั่วโมง
- 2) เมื่อครบตามกำหนดเวลาแล้ว ทำการปิดเตาแล้วนำชิ้นงานออกจากเตาและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

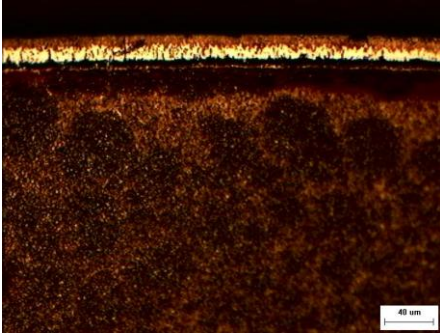
### 3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผล

- 1) วิเคราะห์สมบัติบนผิวของชิ้นงานโดยใช้เครื่องทดสอบความแข็ง
- 2) วิเคราะห์ชนิด ของชั้นเคลือบ โครงสร้างจุลภาคและความหนาของชั้นเคลือบ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ และวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD)

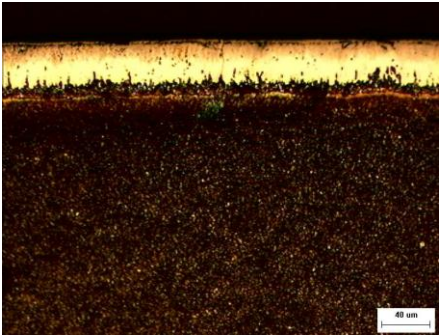
## 4. ผลการทดลอง

### 4.1 ลักษณะของชั้นเคลือบบอไรด์ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง

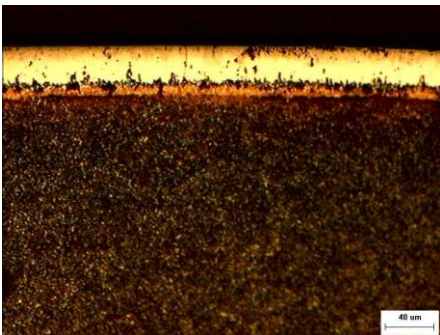
พบว่า ได้ค่าความหนาชั้นเคลือบเป็น 17.91 30.86 และ 31.62 ไมครอน ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 1



(ก)



(ข)



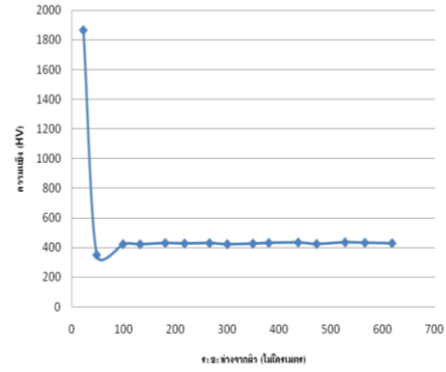
(ค)

ภาพที่ 1 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบบอไรด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ทำการเคลือบที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ก) 2 ชั่วโมง ข) 4 ชั่วโมง ค) 6 ชั่วโมง

จากภาพที่ 1 เมื่อส่องกล้องจุลทรรศน์แบบแสง แสดงโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบบอไรด์ พบว่าชั้นเคลือบบอไรด์เกิดเฟสคู่ของ FeB และ Fe<sub>2</sub>B โดยชั้นของเหล็กบอไรด์ (FeB และ Fe<sub>2</sub>B) อยู่ชั้นนอกสุด

#### 4.4 ความแข็งของชั้นเคลือบ บอไรด์ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

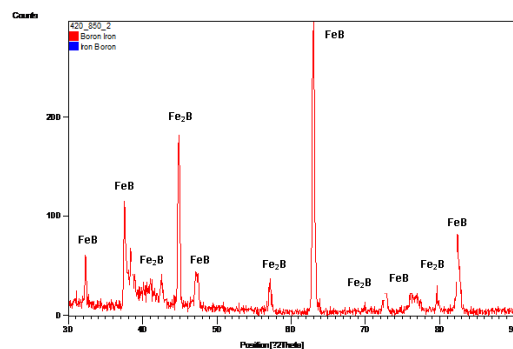
พบว่าโดยที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 เป็นชั้นของเหล็กบอไรด์ มีค่าความแข็งประมาณ 1900 HV ถัดเข้ามาเป็นชั้นของอัลลอยด์ในเหล็กที่ถูกผลิตเข้ามาจากการแปรของโบรอน มีค่าความแข็งประมาณ 350 HV และสุดท้ายคือเนื้อเหล็ก AISI 420 มีค่าความแข็งประมาณ 420 HV ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบแพค ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากพื้นผิวเคลือบลดลงไปในเนื้อเหล็ก

#### 4.5 ชนิดของชั้นเคลือบที่เกิดขึ้น เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการทางโครงสร้าง )X-Ray Diffraction, XRD(

จากการทดลองเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI420 ด้วยกระบวนการบอไรดิ้งแบบแพค ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อส่องกล้องจุลทรรศน์แบบแสง แสดงโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบบอไรด์ พบว่าชั้นเคลือบบอไรด์เกิดเฟสคู่ของ FeB และ Fe<sub>2</sub>B และเมื่อนำชิ้นงานไปวิเคราะห์ชั้นเคลือบด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี พบว่ามีสเปกตรัมของสารประกอบ FeB และ Fe<sub>2</sub>B เป็นส่วนประกอบของชั้นเคลือบบอไรด์ที่เกิดขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 3



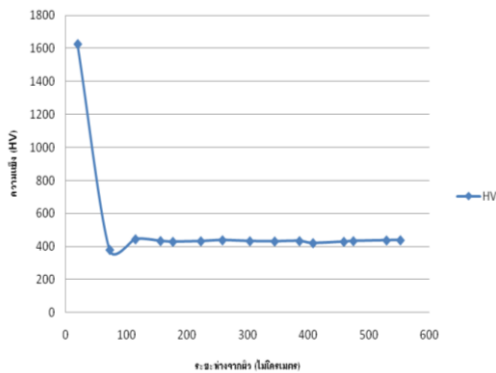
ภาพที่ 3 แสดงองค์ประกอบทางโครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบแพค ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

#### 4.6 ลักษณะของชั้นเคลือบบอไรด์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง

พบว่าได้ค่าความหนาชั้นเคลือบเป็น 26.57 43.57 และ 48.14 ไมครอนตามลำดับ ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการเคลือบผิวเพิ่มขึ้น และชั้นเคลือบที่ได้มีลักษณะเดิม ยกเว้นกับชั้นเคลือบที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส แต่ชั้นเคลือบบอไรด์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสมีความหนามากกว่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส

#### 4.7 ความแข็งของชั้นเคลือบบอไรด์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

พบว่าที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 เป็นชั้นของเหล็กบอไรด์ มีค่าความแข็งประมาณ 1600 HV ถัดเข้ามาเป็นชั้นของอัลลอยด์ในเหล็กที่ถูกผลึกเข้ามาจากการแพร่ของโบรอน มีค่าความแข็งประมาณ 380 HV และสุดท้ายคือนี้อเหล็ก AISI 420 มีค่าความแข็งประมาณ 445 HV ดังแสดงในภาพที่ 4



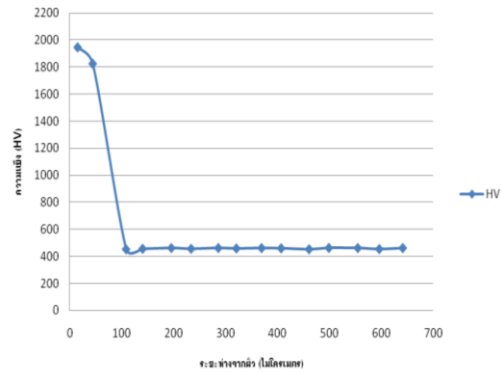
ภาพที่ 4 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบแพค ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากพื้นผิวเคลือบลึกลงไปเนื้อเหล็ก

#### 4.8 ลักษณะของชั้นเคลือบบอไรด์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง

พบว่าได้ค่าความหนาชั้นเคลือบเป็น 44.86 55.81 และ 76.24 ไมครอนตามลำดับ ความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการเคลือบผิวเพิ่มขึ้น และชั้นเคลือบที่ได้มีลักษณะเดียวกันกับชั้นเคลือบที่อุณหภูมิ 850 และ 900 องศาเซลเซียส แต่ชั้นเคลือบบอไรด์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียสมีความหนามากกว่าความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ที่อุณหภูมิ 850 และ 900 องศาเซลเซียส

#### 4.9 ความแข็งของชั้นเคลือบบอไรด์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

พบว่าที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 เป็นชั้นของเหล็กบอไรด์ มีค่าความแข็งประมาณ 1950 HV ถัดเข้ามาเป็นชั้นของอัลลอยด์ในเหล็กที่ถูกผลึกเข้ามาจากการแพร่ของโบรอน มีค่าความแข็งประมาณ 450 HV และสุดท้ายคือนี้อเหล็ก AISI 420 มีค่าความแข็งประมาณ 460 HV ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอไรดิ้งแบบแพค ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากพื้นผิวเคลือบลึกลงไปเนื้อเหล็ก

### 5. การอภิปรายการทดลอง

#### 5.1 อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาที่มีผลต่อความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420

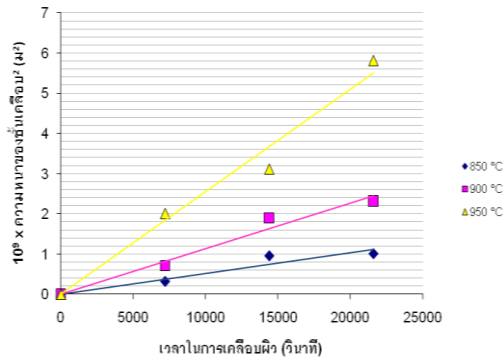
พบว่าเวลาที่ใช้ในการเคลือบส่งผลต่อความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ ชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์มีความหนาเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการเคลือบสูงขึ้น ความหนาชั้นเคลือบบอไรด์ที่เพิ่มขึ้นนั้นมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับเวลาในการเคลือบผิว ดังแสดงในภาพที่ 6 แสดงให้เห็นว่าความหนาที่เพิ่มขึ้นของชั้นเคลือบเป็นกระบวนการที่ถูกควบคุมด้วยการแพร่ซึม (diffusion control) ซึ่งสอดคล้องกับสมการ

$$d^2/t = K \quad (1)$$

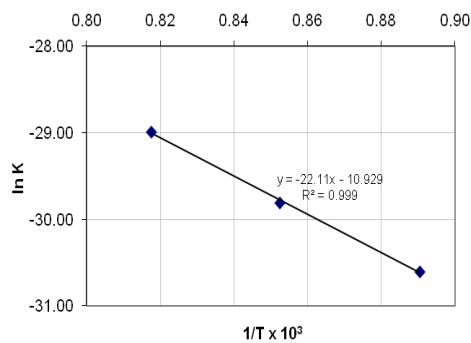
เมื่อทราบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึม (K) แล้ว สามารถนำไปหาค่าคงที่สัมประสิทธิ์การแพร่ซึม ( $K_0$ ) ได้จากสมการ

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

จากกราฟระหว่าง  $\ln K$  และอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว ( $1/T$ ) พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นตรง ดังแสดงในภาพที่ 7 สามารถนำไปหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation Energy) (Q) ได้ มีค่าเท่ากับ 183.83 kJ/mol



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ของค่าความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอโรด์ยกับกำลังสองและเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวบนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 ที่ผ่านกระบวนการบอโรดิ้งแบบแพค ที่อุณหภูมิ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (ln K) และส่วนกลับของอุณหภูมิ (1/T) ที่ใช้ในกระบวนการการเคลือบเหล็กบอโรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420

## 5.2 อิทธิพลของการทำบอโรดิ้งแบบแพคที่มีผลต่อค่า

### ความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420

พบว่า กระบวนการบอโรดิ้งแบบแพคเป็นกระบวนการที่สามารถเพิ่มความแข็งให้กับผิวโลหะ จากการแพร่ของอะตอมโบรอนเข้าสู่ผิวของโลหะ โดยการแพร่เริ่มจากที่ผิวเข้าไปในเนื้อของโลหะ ทำให้บริเวณผิวของโลหะที่โบรอนแพร่เข้าไปมีค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น ซึ่งค่าความแข็งจะมีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว โดยที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 จะเป็นชั้นของเหล็กบอโรด์ มีค่าความแข็งประมาณ 1600-2000 HV ถัดเข้ามา เป็นชั้นของออสโลยด์ที่มีเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งไม่สามารถละลายในชั้นของเหล็กบอโรด์ จึงถูกผลักเข้ามาในเนื้อเหล็กจากการแพร่ของโบรอน ให้ค่าความแข็งที่แตกต่างจากชั้นเหล็กบอโรด์และเนื้อเหล็ก โดยมีค่าความแข็งประมาณ 350-500 HV และสุดท้ายคือเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 420 มีค่าความแข็งประมาณ 420 445 และ 460 HV

## 6. สรุปผลการทดลอง

- 1) เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI420 สามารถทำการเคลือบผิวเหล็กบอโรด์ได้ในกระบวนการบอโรดิ้งแบบแพค ที่อุณหภูมิการเคลือบผิว 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง
- 2) ความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอโรด์ที่เกิดขึ้นบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI420 ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว โดยความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอโรด์มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับความหนาของกำลังสองและเวลาในการเคลือบผิว
- 3) ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของ กระบวนการเคลือบเหล็กบอโรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 420 สามารถหาได้จากค่าความชันของกราฟเส้นตรงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln K$  และส่วนกลับของอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิว ( $1/T$ ) มีค่าเท่ากับ 183.83 kJ/mol

## 7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากความกรุณาและความช่วยเหลือจากหลายๆท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ปฎิภาณ จุ้ยเจิม อาจารย์ที่ปรึกษาทางวิทย กรรมการที่ปรึกษาทุกท่าน ที่ให้ความรู้ แนะนำแนวทางและแนวคิดใน การดำเนินงาน ตลอดจนการแก้ปัญหาต่างๆ ในงานวิจัย รวมไปถึงประสบการณ์ต่างๆที่อาจารย์ ถ่ายทอดมาสู่ผู้วิจัย ทำให้สามารถนำไปใช้ในชีวิตประจำวันได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมวัสดุทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้ ทางด้านวิชาการอันเป็นประโยชน์ ซึ่งสามารถนำมาแก้ไข้ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทำวิจัยครั้งนี้ได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่และอาจารย์ปฏิบัติการประจำภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ ที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆในการใช้เครื่องมือปฏิบัติการ อีกทั้งขอขอบพระคุณ นางสาวลักขมมี อังกรวิธต์ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษาตลอดการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆและรุ่นพี่ ในภาควิชาวิศวกรรมวัสดุทุกคน เป็นกำลังใจและให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ บิดามารดา พี่ๆ ที่คอยให้กำลังใจ และช่วยเหลือในด้านต่างๆ ตลอดมา

## 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] William D.Callister,Jr. 2548. Materials science and Engineering an introduction. Bangkok: Top Publishing Co., Ltd. And John Wiley & Sons, Inc.752p.
- [2] C. Harry. 1995. Heat treater's guide: practices and procedures for irons and steels. ASM International. (2) : 719-810.

- [3] บริษัท ไทยเยอรมันสเปเชียลตีลเซ็นเตอร์ จำกัด. Plastic Mould Steel 2083. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์
- [4] ดวงฤดี ศุกดิ์มีสโร โลหะวิทยาฟิสิกส์.. ส เอเชียเพรส.: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2553
- [5] Jain.V, Sundararajan.G. 2002. Influence of the pack thickness of the boronizing mixture on the boriding of steel. *Surface and Coatings Technology* (149) : 21–26
- [6] Sinha, A.K. and P.D. Bohn. 1994. Boriding (Boronizing). **ASM Handbook** 4: 437 - 447.
- [7] Ozbek, I., S. Sen, M. Ipek, C. Bindal, S. Zeytin and A.H. Ucisik. 2004. A mechanical aspect of borides formed on the AISI 440C stainless-steel. **Vacuum** 73: 643-648.
- [8] Ozdemir, O.,M.A. Omar, M. Usta, S. Zeytin. C. Bindal and A.H. Ucisik. 2009.An investigation on boriding kinetics of AISI 316 stainless steel. **Vacuum** 83: 175-179.
- [9] Vipin J. and G. Sundararajan. 2002. Influence of the pack thickness of the boronizing mixture on the boriding of steel. **Surface & Coating Technology** 149: 21-26.
- [10] Arai. T. and S. Harper. 1994. Thermoreactive Deposition/Diffusion Process. **ASM Handbook** 4: 448-453.
- [11] Genel, K., Ozbek, I. and Bindal, C. 2003. Kinetics of boriding of AISI W1 steel. **Materials Science and Engineering** 347: 311 - 314.