



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเพิ่มความแข็งแรงของเหล็กหล่อด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยโบรอน

โดย

ผศ. ดร. สิทธิพันธ์ ท่อแก้ว

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์

ทุนจากเงินรายได้มหาวิทยาลัย (เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์)

ประจำปี 2551 ตามสัญญาเลขที่ 091/2551

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของคณะผู้วิจัยอาจไม่ถูกต้องเสมอไป)

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเพิ่มความแข็งแรงของเหล็กหล่อด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยโบรอน



โดย

ผศ. ดร. สิทธิพันธ์ ท่อแก้ว

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์

ทุนจากเงินรายได้มหาวิทยาลัย (เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์)

ประจำปี 2551 ตามสัญญาเลขที่ 091/2551

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของคณะผู้วิจัยอาจไม่ถูกต้องเสมอไป)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเคลือบโบรอนบนชิ้นงานเหล็กหล่อ จากการทดลองพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการอบจะทำให้ความหนาของชั้นเคลือบสารประกอบโบรอนมีค่าเพิ่มขึ้น สารประกอบโบรอนคือ FeB และ Fe₂B ความแข็งของตัวอย่างที่ได้จากการเคลือบที่ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง มีค่าความแข็งประมาณ 1061 HV สำหรับการทดสอบการทนกรด-ด่าง พบว่าการเคลือบโบรอนไม่ได้ช่วยในการทนต่อกรด-ด่าง เนื่องจากกรด-ด่าง สามารถเกิดการแทรกซึมลงไปในชิ้นงานผ่านรูพรุนภายในชั้นเคลือบได้

คำสำคัญ: การเคลือบโบรอน/ เหล็กหล่อ



Abstract

The aim of this research was to coat the boron layer on the iron plain steel. The experimental results show that the increase of temperature and coating time increase the coating thickness of boron compounds. Boron compounds are FeB and Fe₂B phase. The hardness of sample was 1061 HV for coating at 1000 °C for 12 h. The test of an acid-base resistance shows that the boron coating do not improve the acid-base resistance because acid or base can be penetrated though pore in the coating layer.

Keywords: Boron coating/ Plain steel



กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากการสนับสนุนและการร่วมมือเป็นอย่างดีจากบุคคลและเจ้าหน้าที่ภายในภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มศว. องค์กรฯ ตลอดจนขอขอบคุณนิสิตช่วยงานวิจัย ที่ได้ทุ่มเททั้งร่างกายและแรงใจในการทำงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ได้ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัยตลอดจนเจ้าหน้าที่ฝ่ายวิจัยของมหาวิทยาลัยที่ได้ให้ความอนุเคราะห์และให้คำแนะนำในการจัดทำงานวิจัยนี้เป็นอย่างดี

สิทธินันท์ ท่อแก้ว



สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ภูมิหลัง	1
1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	1
1.4 แผนการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 โลหะ	3
2.2 เหล็กหล่อ	6
2.3 การชุบแข็งพื้นผิว	10
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12
บทที่ 3 วิธีดำเนินการศึกษาค้นคว้า	13
3.1 อุปกรณ์	13
3.2 สารเคมี	13
3.3 วิธีการทดลอง	13
3.4 วิธีการวิเคราะห์	14
บทที่ 4 ผลการทดลอง	15
4.1 การวิเคราะห์เฟส	15
4.2 การวิเคราะห์ความแข็ง	17
4.3 การหาของชั้นเคลือบโบรอน	17
4.4 การทดสอบการทนกรด-ด่าง	19
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	21
5.1 สรุปผลการทดลอง	21
5.2 ข้อเสนอแนะ	21
เอกสารอ้างอิง	22

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
ภาคผนวก	23
ประวัติผู้วิจัย	36



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
4.1	การวิเคราะห์เฟสของตัวอย่าง F900-12 (—) และ F1000-12 (—) เมื่อ O FeB และ • Fe ₂ B	15
4.2	ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างก่อนและหลังการเคลือบโบรอนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	16
4.3	ความแข็งแรงของตัวอย่างหลังการเผาที่ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 - 12 ชั่วโมง	18
4.4	ภาพถ่ายตัวอย่างหลังการทดสอบความแข็งแรง	18
4.5	ความหนาของชั้นเคลือบที่เวลาต่างๆ เมื่อเคลือบโบรอนที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส	19
4.6	การทดสอบการทนกรดซัลฟิวริก (ก) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ข) ที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร หลังการแช่ที่เวลาต่างๆ สำหรับตัวอย่างที่เคลือบโบรอนที่เวลาต่าง 0 - 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส	20

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ภูมิหลัง

อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าของไทยเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมพื้นฐานที่มีความสำคัญในการพัฒนาประเทศ ผลผลิตในปี 2548 เท่ากับ 9.409 ล้านเมตริกตัน มูลค่าการส่งออกในปี 2548 ประมาณ 53,006 ล้านบาท คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 2.15 ของ GDP ภาคอุตสาหกรรม สำหรับมูลค่าการนำเข้าประมาณ 278,896 ล้านบาท [1] นอกจากนี้ ผลิตภัณฑ์เหล็กยังถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบ (input) ให้กับอุตสาหกรรมต่อเนื่องอื่นๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมยานยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า เฟอร์นิเจอร์ อาหารกระป๋อง (บรรจุภัณฑ์) ก่อสร้าง และอื่น ๆ เป็นต้น

ในปัจจุบันงานทางวิศวกรรมนิยมให้วัสดุที่ทำจากเหล็กชนิดต่างๆ เป็นส่วนใหญ่ เพื่อใช้เป็นโครงสร้าง วัสดุอุปกรณ์ เครื่องจักรในการผลิต ดังนั้นในการเลือกใช้ชนิดของเหล็กจึงขึ้นกับชนิดของงานที่เลือกใช้ สภาพการใช้งานและลักษณะการใช้งาน ซึ่งปัจจุบันเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นเหล็กที่นิยมใช้งาน เนื่องจากทนกับกรดและด่าง มีความแข็งแรง มีความสวยงาม แต่มีราคาแพง ในขณะที่เหล็กหล่อซึ่งเป็นเหล็กที่มีราคาถูก แต่ไม่ทนต่อกรดและด่าง มีความแข็งแรงปานกลาง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ต้องการประยุกต์การเคลือบโบรอนบนผิวโลหะ เพื่อให้ชิ้นงานมีความคงทน ทนต่อกรดและด่าง ซึ่งสามารถใช้ทดแทนเหล็กกล้าไร้สนิมในอุตสาหกรรมเคมี นอกจากนี้ยังสามารถใช้ทำเป็นแม่พิมพ์สำหรับโรงงานหล่อชิ้นงานอะลูมิเนียม

1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิธีการเคลือบและสภาวะในการเคลือบโบรอนบนผิวเหล็กหล่อ
2. เพื่อทดสอบความทนกรด ด่าง ความแข็งแรงและจุลโครงสร้างของชิ้นงานหลังเคลือบโบรอน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ชนิดของเหล็กหล่อคือ plain steel 1018
2. ตัวแปรที่ศึกษาคือ อุณหภูมิในการเคลือบ และเวลาในการเคลือบ
3. สมบัติทางกายภาพและเคมีที่ศึกษาคือ ความแข็งแรง ความทนกรดและด่าง และจุลโครงสร้างของผิวเคลือบ

1.4 แผนการดำเนินงาน

ขั้นตอนกิจกรรม	ระยะเวลาการดำเนินโครงการวิจัย (เดือน)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	■											
2. ออกแบบและสร้างกล่องบรรจุชิ้นงานสำหรับเผาชิ้นงาน		■	■	■								
3. หาสภาวะในการเคลือบผิวโพรอน			■	■	■	■	■					
4. ทดสอบสมบัติทางกายภาพและเคมี					■	■	■	■	■	■		
5. วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย										■	■	
6. จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์											■	■



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โลหะ

วัสดุในโรงงานอุตสาหกรรมโดยทั่วไปนั้นมีอยู่หลายชนิด แต่ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือ โลหะ ทั้งนี้เนื่องจากโลหะนั้นหาได้ง่าย ราคาไม่แพง แข็งแรง ทนทาน และแปรรูปเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก โลหะดังกล่าวนี้สามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ โลหะจำพวกเหล็ก และโลหะนอกจำพวกเหล็ก

2.1.1 โลหะจำพวกเหล็ก

1. สินแร่เหล็ก (Iron Ore) สามารถแบ่งได้เป็น 4 ชนิด แต่ละชนิดจะอยู่ในสภาพที่รวมตัวอยู่กับออกซิเจนทั้งสิ้น ได้แก่ 1. ฮีมาไทล์ (Fe_2O_3) เป็นแร่เหล็กสีแดง ซึ่งจะมีเนื้อเหล็กอยู่ประมาณร้อยละ 70 และมีสภาพเป็นแม่เหล็ก 2. แมกนีไทล์ (Fe_3O_4) เป็นแร่เหล็กสีดำ ซึ่งจะมีเนื้อเหล็กอยู่ประมาณร้อยละ 72.4 และมีสภาพเป็นแม่เหล็กเช่นเดียวกับสินแร่ฮีมาไทล์ 3. ซิเดอไรต์ (FeCO_3) เป็นแร่เหล็กสีน้ำตาล ซึ่งจะมีเนื้อเหล็กผสมอยู่ไม่มากนักคือ มีประมาณร้อยละ 48.3 และ 4. โลมอไนต์ ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) เป็นแร่เหล็กสีน้ำตาล ซึ่งมีเนื้อเหล็กผสมอยู่ประมาณร้อยละ 60 - 65

2. เหล็กดิบ (Pig Iron) เป็นผลผลิตที่ได้มาจากการถลุงสินแร่เหล็กด้วยเตาเบสสตีเฟอร์เนซ โดยสำหรับวัตถุดิบที่ใช้ถลุงเหล็กดิบนั้น ได้แก่ สินแร่เหล็ก หินปูน ถ่านโค้ก และเหล็กใช้ซ้ำ

3. เหล็กหล่อ (Cast Iron) เหล็กหล่อเป็นเหล็กที่รู้จักกันและใช้กันอย่างแพร่หลายมาเป็นระยะเวลานาน เหล็กหล่อดัดแปลงกับเหล็กกล้า (Steel) เหล็กหล่อโดยทั่วไปจะมีคาร์บอนอยู่ร้อยละ 2.5 - 4.0 ถ้าปริมาณคาร์บอนมากกว่านี้เหล็กจะสูญเสียคุณสมบัติทางด้านความเหนียว คือ เปราะและแตกหักได้ง่ายเมื่อถูกแรงกระแทก การขึ้นรูปเหล็กหล่อทำได้โดยการหลอมเหล็กให้ละลายแล้วเทลงแบบหล่อที่ทำด้วยทรายหรือวัสดุทนความร้อน จึงได้ชื่อตามกรรมวิธีการขึ้นรูปว่า เหล็กหล่อ หลังจากหล่อรูปร่างได้ใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการแล้ว จึงนำมาทำการกลึง ไซ ตัด และเจาะ แม้ว่าเหล็กหล่อส่วนใหญ่จะให้คุณสมบัติความแข็งแรงดิ่งสูงสุดต่ำและขาดคุณสมบัติทางด้านความเหนียว แต่เหล็กหล่อมีราคาถูกกว่า มีจุดหลอมเหลวต่ำสามารถหล่อขึ้นรูปได้รูปร่างง่ายกว่าเหล็กกล้าและยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ โดยการเติมธาตุที่เหมาะสม และการอบชุบ เหล็กหล่อสามารถจำแนกได้ 4 ประเภทใหญ่ คือ

- เหล็กหล่อสีขาว (White Cast Iron) เป็นเหล็กหล่อที่มีคาร์บอนผสมอยู่ตั้งแต่ร้อยละ 1.7 - 2.0 ซึ่งคาร์บอนจะรวมตัวกับเหล็กอยู่ในรูปคาร์ไบด์หรือซีเมนไทต์ (Fe_3C) ทำให้เหล็กมีความแข็งเปราะ เนื้อเหล็กจะมีสีขาว เหล็กหล่อขาวนี้จะมีความแข็งอยู่ระหว่าง 380-550 HB ความแข็งนี้จะแปรเปลี่ยนไปตามธาตุผสมอื่นๆ อีกด้วย เช่น โครเมียม หรือโมลิบดีนัม

- เหล็กหล่อสีเทาหรือเหล็กหล่อดำ (Gray Cast Iron) เหล็กหล่อชนิดนี้จะมีโครงสร้างคล้ายกับเหล็กดิบ ซึ่งในบางครั้งผลิตเหล็กหล่อสีเทาได้จากเหล็กดิบ เหล็กหล่อสีเทาจะมีราคาถูกเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่น ทั้งยังตกแต่งขึ้นรูปได้ง่าย มีจุดหลอมเหลวต่ำ อัตราการขยายตัวมีน้อย ทนต่อแรงอัดและรับแรงสั่น (Damping Capacity)

- เหล็กหล่อเหนียว (Ductile and Malleable Cast Iron) เหล็กหล่อชนิดนี้จะมี ความเค้นแรงดึงสูงทั้งยังมีความเหนียวและทนต่อแรงกระแทกได้ดี ในการทดสอบการดึงเหล็กหล่อเหนียวจะพบว่าคล้ายคลึงกับเหล็กกล้าคือ จะมีความยืดหยุ่นแต่ไม่ปรากฏจุดคราก (Yield Point) นอกจากนั้นยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลโดยวิธีทางความร้อนได้ดีอีกด้วย

- เหล็กหล่อผสมหรือเหล็กหล่อพิเศษ (Alloy or Special Cast Iron) เหล็กหล่อชนิดนี้นอกจากมีคาร์บอนผสมอยู่แล้วยังมีธาตุอื่นๆ ผสมเพิ่มเติมด้วย เช่น โครเมียม นิเกิล และโมลิบดีนัม เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อให้เหล็กหล่อชนิดนี้มีความแข็งแรงขึ้น ทนทานต่อการเสียดสี ต้านทานแรงดึงและแรงกระแทกได้เป็นอย่างดี

4. เหล็กกล้า (Steel) เหล็กกล้าเป็นเหล็กที่ถูกนำไปใช้งานต่างๆ มากมาย ทั้งนี้เนื่องจากเหล็กกล้านั้นมีคุณสมบัติในการรับแรงต่างๆ ได้ดี เช่น แรงกระแทก แรงดึง แรงอัด และแรงเฉือน ซึ่งมีการผสมธาตุทั้งโลหะและอโลหะลงไปในเหล็ก เช่น โมลิบดีนัม ทังสเตน วาเนเดียม และซิลิกอน เป็นต้น และเหล็กกล้ายังแบ่งได้ตามปริมาณของคาร์บอนที่ผสมอยู่ซึ่งสามารถแบ่งได้สองชนิด

- เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel) ประกอบด้วยเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) และเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steel) และเหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steel)

- เหล็กกล้าผสม (Alloys Steel) เหล็กกล้าชนิดนี้ นอกจากจะมีคาร์บอนผสมอยู่แล้วยังมีธาตุอื่นๆ ผสมอยู่ด้วยซึ่งจะกล่าวในลำดับต่อไป เหล็กกล้าผสมนี้ประกอบด้วยเหล็กกล้าผสมต่ำ (Low Alloys Steel) เหล็กกล้าผสมปานกลาง (Medium Alloys Steel) และเหล็กกล้าผสมสูง (High Alloys Steel) ซึ่งธาตุที่ประกอบในเหล็กกล้าได้แก่ ซิลิกอน ซิลิกอนที่ผสมอยู่นั้นจะช่วยให้เกิดการจับตัวของแกรไฟต์ ดังนั้น ปริมาณซิลิกอนที่มีในเหล็กกล้าผสมที่ใช้งานกันอยู่ทั่วไปจะมีอย่างมาไม่เกินร้อยละ 5 โมลิบดีนัม ช่วยให้เกิดการจับตัวของคาร์ไบด์อย่างแน่นหนาและเป็นธาตุที่ช่วยไม่ให้เกิดการแตกร้าวได้ง่ายและ

ป้องกันไม่ให้เกิดการขยายตัวของเกรนอีกด้วย โมลิบดีนัมจำนวนร้อยละ 5 ช่วยทำให้เหล็กกล้าผสมนั้นมีความต้านทานต่อการเกิดครีป (Creep) เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงๆ เหล็กกล้าผสมโมลิบดีนัมนี้ใช้ในการทำเครื่องมือต่างๆ ที่มีรอบหมุนด้วยความเร็วสูง และต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดี วาเนเดียมเป็นธาตุที่ช่วยให้เกิดการจับตัวของคาร์ไบด์อย่างแน่นหนา เหล็กกล้าที่ผสมวาเนเดียมจะนำไปใช้ทำเครื่องมือต่างๆ ที่มีรอบหมุนด้วยความเร็วสูง นอกจากนี้ยังเป็นธาตุที่ช่วยให้เหล็กกล้ามีขนาดเกรนละเอียด และเป็นตัวกำจัดออกซิเจนที่ดีมาก ช่วยขจัดการเกิดสนิมและสิ่งเจือปนอื่นๆ ในเนื้อเหล็กทั้งสแตน เป็นธาตุที่ช่วยให้เกิดการจับตัวของคาร์ไบด์อย่างแน่นหนา และคาร์ไบด์เหล่านี้จะไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกับเหล็กทั้งหมดถึงแม้จะที่อุณหภูมิสูงๆ ก็ตาม ดังนั้น เหล็กชนิดนี้จึงใช้ทำเครื่องมือพวกที่มีรอบหมุนด้วยความเร็วสูง อีกทั้งทั้งสแตนยังจะช่วยให้เหล็กกล้าผสมมีขนาดเกรนละเอียด นอกจากนี้ทั้งสแตนที่มีผสมอยู่เล็กน้อยยังช่วยให้เหล็กกล้าผสมนั้นมีความต้านทานต่อความร้อนและการกัดกร่อนทำลายต่างๆ ได้ดี

2.1.2 โลหะนอกจำพวกเหล็ก (Nonferrous Metals) โลหะนอกจำพวกเหล็กสามารถแบ่งได้ 3 ชนิดดังนี้ คือ โลหะหนัก (Heavy Metals) โลหะเบา (Light Metals) และโลหะผสม (Alloy Metals)

1. โลหะหนัก (Heavy Metals) หมายถึงโลหะที่มีความหนาแน่นสูงกว่า 4 กรัมต่อมิลลิลิตร เช่น ทองแดง สังกะสี ดีบุก ตะกั่ว นิกเกิล โครเมียม ทั้งสแตน โมลิบดีนัม วาเนเดียม โคบอลต์ แมงกานีส แทนเทเลียม ไทเทเนียม แคลเดียม บิสมัท พรอท เงิน ทอง

2. โลหะเบา (Light Metals) โลหะเบา หมายถึง โลหะที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า 4 กรัมต่อมิลลิลิตร โดยทั่วไปได้แก่ อะลูมิเนียม แมกนีเซียม และเบริลเลียม

3. โลหะผสม (Alloy Metals) โลหะที่ใช้ในทางด้านวิศวกรรมนั้น จำเป็นต้องมีความเหมาะสมในงานแต่ละด้าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติทางกล คือต้องมีความสามารถในการรับแรงต่างๆ ได้ แต่โดยปกติโลหะบริสุทธิ์มากจะอ่อนและรับแรงได้ไม่มาก เมื่อจะนำไปใช้งานก็ไม่เหมาะสม ฉะนั้น จำเป็นต้องเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะเหล่านั้นโดยการผสมธาตุต่างๆ ลงไป แล้วเรียกโลหะใหม่นี้ว่า “โลหะผสม” สามารถแบ่งได้ 3 ชนิด ดังนี้

- โลหะหนักผสม (Alloy Heavy Metals) เป็นการนำเอาโลหะหนักหลายๆ ชนิดมาผสมกัน ได้แก่ ทองเหลือง เป็นวัสดุผสมระหว่างทองแดงกับสังกะสี โดยทั่วไปจะไม่ทนต่อการผุกร่อน ทองเหลืองหล่อ เป็นวัสดุผสมระหว่าง ทองแดง สังกะสี และดีบุก มีความแข็งแรงมากกว่าทองเหลือง ทั่วๆ ไป สามารถนำไปใช้ทำท่อและข้อต่อต่างๆ ของเครื่องมือวัดที่ต้องการความคงทนสูง ทองเหลืองพิเศษหรือทองเหลืองบัดกรี เป็นวัสดุ

ผสมระหว่าง ทองแดง ตะกั่ว แมงกานีส อะลูมิเนียม ดีบุก และเหล็ก เงินเยอรมันเป็นโลหะผสมของทองแดง โลหะชนิดนี้สามารถดึงและขึ้นรูปเย็นได้ดี คุณสมบัติพิเศษคือทนต่อการกัดกร่อน ใช้ทำเครื่องประดับ เครื่องมือมีคม กรอบรูป เป็นต้น บรอนซ์ เป็นวัสดุผสมระหว่างทองแดงกับโลหะผสมอื่น ซึ่งอาจมีมากกว่า 1 ชนิดก็ได้ สามารถแบ่งแบ่งได้ตามส่วนผสมดังนี้ บรอนซ์ดีบุก เป็นบรอนซ์ที่มีความแข็งแรงมากชนิดหนึ่ง อีกทั้งยังยืดหยุ่นและทนต่อการผุกร่อนได้ดี บรอนซ์อะลูมิเนียม บรอนซ์ชนิดนี้มีความแข็งแรงสูงและทนต่อการกัดกร่อน อีกทั้งยังสามารถทำเชื่อมได้อีกด้วย บรอนซ์ตะกั่ว บรอนซ์ตะกั่วจะมีผิวลื่นตัวได้ดีมาก จึงสามารถรับแรงกดอัดบนผิวตัวมันเองได้ดี บรอนซ์เบริลเลียมมีความยืดหยุ่นสูง อีกทั้งยังชุบแข็งได้ดี เป็นต้น

- โลหะเบาผสม (Alloy Light Metals) ได้แก่ อะลูมิเนียมผสม มี 2 ชนิดคือ ชนิดหล่อ และชนิดรีด โดยปกติอะลูมิเนียมจะมีสีขาว ถ้าผ่านการหล่อจะมีความแข็งแรงน้อยกว่าการรีด และจะนำความร้อนและไฟฟ้าต่ำ แมกนีเซียมผสม มีน้ำหนักเบา แต่แข็งแรง ลักษณะโดยทั่วไปคล้ายกับอะลูมิเนียมผสม แต่ตกแต่งขึ้นรูปได้ง่ายกว่า

- โลหะซินเตอร์ (Sinter Metals) หมายถึงโลหะที่ผลิตจากผงโลหะชนิดที่มีความละเอียดมากนำมาอัดขึ้นรูปและอบด้วยความร้อนสูง โลหะซินเตอร์เมื่อผ่านกรรมวิธีการผลิตเรียบร้อยแล้ว จะมีคุณสมบัติทนความร้อนสูง มีความแข็งแรงและทนต่อการกัดกร่อน มีความเปราะแตกหักง่ายเนื่องจากมีรูพรุนจึงเหมาะสมจะ去做เครื่องมือตัดที่มีความคมมาก ๆ ได้เป็นอย่างดี

2.2 เหล็กหล่อ

เหล็กหล่อนั้นจะมีคาร์บอนอยู่ประมาณร้อยละ 2 - 6.67 และมีธาตุอื่นๆ ผสมอยู่ด้วย เช่น ซิลิคอน แมงกานีส ฟอสฟอรัส และกำมะถัน เป็นต้น ชนิดหล่อเหล็กหล่อแบ่งออกเป็น 4 ประเภทด้วยกัน คือ เหล็กหล่อสีเทา เหล็กหล่อสีขาว เหล็กหล่อมัลลีเบิล และ เหล็กหล่อโนดูลาร์ (Nodular Cast Iron) เหล็กหล่อทั้ง 4 ประเภทนี้ จะมีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ตั้งแต่ร้อยละ 2 - 6.67 ดังนั้น ชนิดของเหล็กหล่อแบ่งตามปริมาณคาร์บอนที่มี ทำให้โครงสร้างของเหล็กหล่อเหล่านั้นมีความแตกต่างกันและส่งผลให้คุณสมบัติทางกลแตกต่างกันด้วย

1. เหล็กหล่อสีเทา (Gray Cast Iron) เป็นเหล็กที่เกิดจากการปล่อยให้เหล็กเกิดการเย็นตัวอย่างช้าๆ ผลึกขนาดใหญ่จะเกิดขึ้น ทำให้คาร์บอนในเหล็กหล่อจะแยกตัวออกมารวมกันอยู่ตามขอบเกรนเป็นจำนวนมากและปรากฏเป็นสีดำอยู่ทั่วไป เราจึงเรียกเหล็กหล่อชนิดนี้ว่า เหล็กหล่อสีเทา และจะทำให้เหล็กหล่อสีเทานั้นมีคุณสมบัติดังนี้ มีความแข็งไม่มาก สามารถปรับแต่งด้วยเครื่องมือตัดได้ง่าย มีจุดหลอมเหลวต่ำ และสามารถเทลงสู่แบบได้โดยง่าย ทั้งนี้เพราะมีคุณสมบัติการไหลตัวที่ดี สามารถนำไปใช้เป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรที่ต้องการรูปร่างและขนาดที่แน่นอน ทั้งนี้ก็เพราะว่า

เหล็กหล่อสีเทานี้มีอัตราการขยายตัวต่ำ มาตรฐานของเหล็กหล่อสีเทาขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเหล็กหล่อ ซึ่งในลำดับต่อไปนี้จะได้นำเสนอตัวอย่างของมาตรฐานเหล็กหล่อในประเทศต่างๆ

มาตรฐานประเทศอังกฤษ (BS 1452: 1961)

ชั้นคุณภาพ	10	12	14	17	20	23	26
ความเค้นแรงดึงต่ำสุด							
(ton/in ²)	10	12	14	17	20	23	26
(kg/mm ²)	15.7	18.9	22	26.8	31.5	36.2	41

มาตรฐานประเทศเยอรมนี (DIN 1691)

ชั้นคุณภาพ (GGL)	10	15	20	25	30	35	40
ความเค้นแรงดึงต่ำสุด							
(ton/in ²)	6.4	9.6	12.7	15.9	19	22.2	25.4
(kg/mm ²)	10	15	20	25	30	25	40

มาตรฐานประเทศฝรั่งเศส (AFNOR A 32 – 10)

ชั้นคุณภาพ (Ft)	14	18	22	26	30
ความเค้นแรงดึงต่ำสุด					
(ton/in ²)	8.9	11.4	14	16.5	19
(kg/mm ²)	14	18	22	26	30

มาตรฐานประเทศอเมริกา (ASTM A 48 – 60 T)

ชั้นคุณภาพ	20	25	30	35	40	45	50	60
ความเค้นแรงดึงต่ำสุด								
(1,000 lb/in ²)	20	25	30	35	40	45	50	60
(ton/in ²)	8.9	11.1	13.4	15.6	17.9	20.1	22.3	26.8
(kg/mm ²)	14	17.5	21.1	24.6	28.2	31.7	35.1	42.2

มาตรฐานประเทศญี่ปุ่น (JIS)

ชั้นคุณภาพ (Fc)	10	15	20	25	30	35
ความเค้นแรงดึงต่ำสุด						
(kg/mm ²)	10	15	20	25	30	35

มาตรฐานประเทศไทย

ชั้นคุณภาพ (GCI)	100	150	200	250	300	350	400
ความเค้นแรงดึงต่ำสุด							
(Mpa)	98	147	196	245	194	343	395
(kg/mm ²)	10	15	20	25	30	35	40

2. เหล็กหล่อสีขาว (White Cast Iron) เป็นเหล็กหล่อที่ถูกหลอมเหลวอยู่ในเตาหล่อแล้ว จะนำน้ำโลหะไปเทลงในแบบหล่อและปล่อยให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว คาร์บอนส่วนใหญ่จะอยู่ในสภาพสารละลายของแข็งที่เรียกว่าคาร์ไบด์และมีเกรไฟต์ขนาดเล็กๆ เกิดขึ้นด้วย สำหรับคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่าความแข็งแรงสูงมาก ดังนั้นจึงเปราะและแตกหักได้โดยง่าย เหล็กหล่อสีขาวนี้ จะมีส่วนผสมของคาร์บอนตั้งแต่ร้อยละ 2 ขึ้นไป ซึ่งจะมีค่าความแข็งอยู่ระหว่าง 380 – 550 HB การที่ความแข็งจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงนั้น ย่อมขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอนและธาตุอื่นๆ ที่ผสมอยู่ กล่าวคือถ้ามีคาร์บอนผสมอยู่มากก็จะเป็นคาร์ไบด์มากส่งผลให้ความแข็งแรงสูงขึ้นด้วย จากปริมาณของคาร์บอนที่ผสมอยู่ในเหล็กหล่อสีขาว ทำให้สามารถแบ่งเหล็กหล่อสีขาวนี้ออกเป็น 3 ประเภท คือ เหล็กหล่อสีขาวไฮโปยูเทกติก เหล็กหล่อสีขาวยูเทกติก และเหล็กหล่อสีขาวไฮเปอร์ยูเทกติก

- เหล็กหล่อสีขาวไฮโปยูเทกติก เป็นเหล็กหล่อที่มีคาร์บอนผสมอยู่ร้อยละ 2 - 4.3 ซึ่งจะประกอบไปด้วยเฟสเฟอไรต์และซีเมนไทต์ ซึ่งรวมเรียกว่าเพิร์ลไลต์ นอกจากนั้น ยังมีโครงสร้างแบบยูเทกติก ซึ่งเรียกว่าเลเดบูไรต์ (Ledeburite)

- เหล็กหล่อสีขาวยูเทกติก สำหรับเหล็กหล่อสีขาวยูเทกติกนั้น จะมีคาร์บอนผสมอยู่โดยปริมาณร้อยละ 4.3 เหล็กหล่อชนิดนี้จะไม่ปรากฏเกรนขนาดใหญ่ของเพิร์ลไลต์ดังที่ปรากฏในเหล็กหล่อสีขาวไฮโปยูเทกติก แต่จะได้โครงสร้างที่อุณหภูมิปกติ ซึ่งประกอบไปด้วยเกรนขนาดเล็กของเพิร์ลไลต์ล้อมรอบด้วยซีเมนไทต์แบบยูเทกติก และไฮโปยูเทกติก

- เหล็กหล่อสีขาวไฮเปอร์ยูเทกติก เมื่อพิจารณาแผนภูมิสมดุลเหล็กกับเหล็กคาร์ไบด์ จะเห็นได้ว่าเหล็กหล่อสีขาวไฮเปอร์ยูเทกติกนั้นจะมีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 4.3 ขึ้นไป และเหล็กหล่อชนิดนี้จะมีค่าความแข็งสูงกว่าเหล็กหล่อสีขาวชนิดอื่นๆ ทั้งนี้ก็เพราะเหล็กหล่อชนิดนี้มีโครงสร้างเป็นซีเมนไทต์แบบโปรยูเทกติก การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหล็กหล่อสีขาวไฮเปอร์ยูเทกติกที่มีคาร์บอนร้อยละ 5

เหล็กหล่อสีขาวนั้น ส่วนมากจะถูกนำไปใช้ทำชิ้นส่วน เครื่องมือ เครื่องจักรและอุปกรณ์ ที่ต้องรับแรงเสียดทาน แต่จะไม่ทนต่อแรงกระแทก ทั้งนี้ก็เพราะเหล็กหล่อชนิดนี้จะให้คาร์ไบด์ที่มีความแข็งแรงสูงมาก แต่ก็เปราะและแตกหักได้โดยง่ายเมื่อรับแรง

กระแทก ดังนั้นจึงนำเอาเหล็กหล่อชนิดนี้ไปใช้ในส่วนที่มีการเสียดสีอย่างรุนแรงเท่านั้น

3. เหล็กหล่ออบเหนียว (Malleable Cast Iron) ถ้ามีการนำเหล็กหล่อไปหลอมละลายและปล่อยให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว แกรไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้นในเหล็กหล่อสีเทาจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ แต่จะเกิดรูปแบบของแกรไฟต์ในเหล็กหล่อสีขาวขึ้นแทน ซึ่งรูปแบบของแกรไฟต์ในเหล็กหล่อสีขาวที่เกิดขึ้นในเหล็กหล่ออบเหนียวนี้ จะทำให้มีสมบัติความเค้นแรงดึงสูงกว่าเหล็กหล่อทั่วๆ ไป มีความเหนียว และทนต่อแรงกระแทกได้ดี เหล็กหล่อชนิดนี้ออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

- เหล็กหล่ออบเหนียวดำ (Black Heart Malleable) เหล็กหล่อชนิดนี้จะมีส่วนผสมของคาร์บอนร้อยละ 2.10 – 2.75 ซิลิคอนร้อยละ 0.8 – 1.7 กำมะถันร้อยละไม่เกิน 0.12 และฟอสฟอรัสร้อยละไม่เกิน 0.2 สำหรับเหล็กหล่ออบเหนียวดำเป็นการนำเอาเหล็กหล่อสีขาวไปอบความร้อนด้วยเตาที่บรรจุแก๊สเฉื่อย หรือในบางครั้งก็สามารถใช้ทรายปกคลุมชิ้นงานในขณะที่อบอยู่ภายในเตาก็ได้ ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้แก๊สออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยากับเหล็กหล่อที่กำลังอบอยู่ การอบเหล็กดังกล่าวจะใช้อุณหภูมิในการอบประมาณ 900 – 1,000 องศาเซลเซียส และต้องอบให้นานอย่างน้อย 30 ชั่วโมง หรือในบางครั้งอาจใช้เวลาถึง 50 ชั่วโมง การที่ใช้เวลาในการอบนานก็เพราะว่าต้องให้เวลาในการที่ซีเมนไท์จะแยกตัวออกเป็นออสเทนไนต์กับแกรไฟต์ และหลังจากที่ได้อบที่อุณหภูมิดังกล่าวแล้ว จะต้องปล่อยให้เหล็กนั้นเย็นตัวลงอย่างช้าๆ ไปที่อุณหภูมิ 723 องศาเซลเซียส เมื่อถึงอุณหภูมิดังกล่าวแล้ว ต้องปล่อยให้ที่อุณหภูมิดังกล่าวประมาณ 30 ชั่วโมง ทั้งนี้เพื่อให้เฟอไรต์ที่เกิดจากออสเทนไนต์เปลี่ยนแปลงโดยสมบูรณ์ หลังจากนั้นทิ้งไว้จนถึงอุณหภูมิห้อง จะได้โครงสร้างเฟอไรต์และมีแกรไฟต์เป็นกลุ่มกระจุกกระจายอยู่โดยทั่วไปเหล็กหล่ออบเหนียวดำมีสมบัติทั่วไปดังนี้ ความเค้นแรงดึง 28 – 50 kg/mm² ความแข็ง 170 – 240 HB อัตราการยืดตัวร้อยละ 6 – 14 ความถ่วงจำเพาะ 7.25 – 7.45

- เหล็กหล่ออบเหนียวเพิร์ลลิติก (Pearlitic Malleable) เหล็กหล่อชนิดนี้จะมีคุณสมบัติความเค้นแรงดึง 40 – 70 kg/mm² ความแข็ง 140 – 290 HB โดยมีอัตราการยืดตัวร้อยละ 2 – 10 ความถ่วงจำเพาะ 7.25 – 7.45 จะเห็นได้ว่าเหล็กหล่อชนิดนี้มีความเค้นแรงดึงสูง ทั้งนี้ก็เพราะว่าเหล็กหล่อชนิดนี้มีโครงสร้างเป็นเพิร์ลไลต์เป็นส่วนมาก แต่ถ้าผสมธาตุแมงกานีส เทลลูเรียม และบิสมีทลงไป ยิ่งส่งผลให้เกิดเพิร์ลไลต์เป็นไปได้อย่างง่าย ทั้งนี้ก็เพราะว่าธาตุดังกล่าวนี้จะช่วยให้ยูเทคตอยด์ซีเมนไท์ไม่แตกตัวเป็นแกรไฟต์

- เหล็กหล่ออบเหนียวขาว (White Heart Malleable) เหล็กหล่ออบเหนียวขาวนี้จะมีคาร์บอนร้อยละ 2.3 – 3.4 ซิลิคอนร้อยละ 0.5 – 0.75 แมงกานีสร้อยละ 0.4 – 0.7

กำมะถันไม่เกินร้อยละ 0.2 และฟอสฟอรัสไม่เกินร้อยละ 0.15 โดยจะต้องผ่านกรรมวิธีการลดปริมาณคาร์บอนในเหล็กหล่อนั้นขณะอบชิ้นงานหล่อที่อุณหภูมิ 850 – 950 องศาเซลเซียส โดยการใช้ผงสนิมเหล็กปกคลุมชิ้นงานหล่อไว้ จะทำให้ซีเมนไทต์เกิดการแตกตัวได้แก่ไฟต์ที่จับกันเป็นกลุ่ม และในขณะเดียวกันคาร์บอนจะรวมตัวกับออกซิเจนที่อยู่ในสนิมเหล็กกลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ การลดปริมาณคาร์บอนดังกล่าว ถ้าเกิดกับชิ้นงานหล่อที่มีขนาดเล็กจะทำให้คาร์บอนถูกลดลงเป็นจำนวนมากจนทำให้คาร์บอนในเหล็กหล่อนั้นมีปริมาณต่ำลงจนกลายเป็นเหล็กหล่อคาร์บอนต่ำ จึงสามารถนำเหล็กหล่อนี้ไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง เพราะว่ามีคุณสมบัติคล้ายกับเหล็กกล้า คือทนต่อแรงกระแทกและความเหนียวสูง

4. เหล็กหล่อโนดูลาร์ (Nodular Cast Iron) เหล็กหล่อนี้บางครั้งอาจเรียกว่าเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม (Spheroidal Graphite Cast Iron) ทั้งนี้เพราะว่าแกรไฟต์ที่ตกผลึกอยู่นั้นมีรูปร่างกลมนั่นเอง โครงสร้างของเหล็กหล่อนี้มักจะถูกปรับปรุงในขณะที่เป็นโลหะหลอมเหลวอยู่ โดยจะมีส่วนผสมของคาร์บอน ซีเรียม แมกนีเซียม โซเดียม และธาตุอื่นๆผสมอยู่ในเหล็กหล่อนี้ จากรูปร่างลักษณะของแกรไฟต์ที่เป็นทรงกลมนี้เอง จึงทำให้เหล็กหล่อนี้มีคุณสมบัติคล้ายกันกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ จนได้ชื่อว่าเป็น Semi Steel ทั้งนี้ก็เพราะว่ามีความสามารถทนต่อแรงดึงได้ถึง 40 – 70 kg/mm² มีอัตราการยืดตัวร้อยละ 8 – 25

2.3 การชุบแข็งพื้นผิว (Surface Hardening)

การชุบแข็งพื้นผิว เป็นการชุบแข็งเพื่อให้ได้ความแข็งแรงเฉพาะตามบริเวณผิวเท่านั้น ส่วนเนื้อเหล็กภายในผิวแข็งจนถึงใจกลางยังคงเป็นเนื้อเหล็กเดิมซึ่งมีความเหนียวสูง ความมุ่งหมายเพื่อให้เหล็กทนต่อการสึกหรอในขณะที่ใช้งาน ทนต่อแรงบิดหรือแรงกระแทกอย่างรุนแรงได้ดีโดยไม่แตกหัก ดังนั้นการชุบแข็งพื้นผิวจึงนับว่าเป็นกรรมวิธีชุบแข็งที่น่าสนใจมากในด้านของความประหยัด และได้ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่มีคุณภาพดีพร้อมทั้งความแข็งแรงและความเหนียว ตัวอย่างชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่นิยมทำการชุบแข็งผิว ได้แก่ พวกเพลาช้อเหวี่ยง เพลาารวลิ้นเฟืองเกียร์ และอื่นๆ การชุบแข็งพื้นผิวกระทำได้หลายวิธี ดังต่อไปนี้

1. การชุบแข็งพื้นผิวโดยวิธีคาร์เบอร์ไรซิง หรือบางครั้งก็เรียกว่าเคสฮาร์ดเดนนิ่ง เหล็กที่จะชุบผิวแข็งพื้นผิวด้วยกรรมวิธีนี้จะต้องเป็นเหล็กที่มีคาร์บอนต่ำประมาณ 0.1 - 0.2 เปอร์เซ็นต์ และอาจจะมีธาตุบางตัว เช่น นิเกิล โครเมียม หรือ วาเนเดียม ผสมอยู่ในปริมาณเล็กน้อย เพื่อเพิ่มความเหนียวให้กับเหล็ก ปกติเหล็กที่มีคาร์บอนต่ำจะไม่สามารถทำการชุบแข็งด้วยวิธีธรรมดา เพราะมีคาร์บอนน้อย จะไม่มีโอกาสได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ แต่เหล็กชนิดนี้จะมีค่าความเหนียวสูง ทนได้ดีต่อแรงบิดและแรงกระแทกหลักในการชุบด้วยวิธีนี้ใช้หลักการเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้กับบริเวณผิวเหล็กได้สูง

ประมาณ 0.8 เปอร์เซนต์ ซึ่งเป็นเหล็กคาร์บอนที่มีคุณสมบัติชุบแข็งดีที่สุดหลังจากนั้นจะนำเหล็กไปทำการชุบ เพื่อให้ได้ความแข็งและความเหนียวต่อไป

2. การชุบแข็งพื้นผิวโดยวิธีไซยาไนด์ดิ่ง เป็นกรรมวิธีเพิ่มทั้งปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนตามบริเวณผิวเหล็กโดยการใช้อ่างเกลือหลอมเหลว (Salt bath) ของโซเดียมไซยาไนด์ (NaCN) หรือโปแตสเซียมไซยาไนด์ (KCN) หรือบางที่ก็อาจใช้แคลเซียมไซยาไนด์ $[Ca(CN)_2]$ ขึ้นอยู่กับกรรมวิธี การชุบแข็งพื้นผิวโดยวิธีไซยาไนด์ดิ่งใช้วิธีการหลอมเกลือไซยาไนด์ผสมกับเกลือที่เป็นกลางได้แก่ NaCl และ Na_2CO_3 ตามสัดส่วนต่างๆ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเกลือ ตัวภาชนะที่นิยมใช้เป็นอ่างต้องใช้โลหะที่ทนความร้อนและไม่ทำปฏิกิริยากับเกลือ เช่น พวกเหล็กสเตนเลสที่มีครีเมียมและนิกเกิลปริมาณสูง เมื่อเกลือหลอมละลายแล้ว เหล็กจะถูกเผาที่อุณหภูมิ 100 - 400 องศาเซลเซียส ก่อนจะถูกจุ่มลงไปใช้อ่างเกลือตามเวลาที่ต้องการ จากนั้นนำเอาชิ้นเหล็กขึ้นจากอ่างเกลือ แล้วนำไปชุบน้ำ ต่อจากนี้อาจต้องนำชิ้นเหล็กที่มีผิวแข็งไปทำการอบคืนตัว (Temper) อีกชั้นหนึ่ง

3. การชุบแข็งแบบผิวโดยกรรมวิธีคาร์โบไนตรายดิ่ง คือวิธีการชุบแข็งพื้นผิวโดยการเพิ่มปริมาณทั้งคาร์บอนและไนโตรเจนบริเวณผิวเหล็กพร้อมๆกัน สารที่ทำหน้าที่เป็นตัวเพิ่มคาร์บอนและไนโตรเจนจะเป็นแก๊สผสมระหว่างแก๊สคาร์บอนไรซ์ซึ่งประมาณ 70 - 80 เปอร์เซนต์ โดยปริมาตรผสมกับแก๊สแอมโมเนียประมาณ 30 - 20 เปอร์เซนต์ การทำคาร์โบไนตรายดิ่งแบ่งช่วงอุณหภูมิในการทำงานออกเป็น 3 ช่วง คือ

- คาร์โบไนตรายดิ่งที่อุณหภูมิต่ำ (540 - 560 องศาเซลเซียส) เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความแข็งที่ผิวสูงประมาณ 950 - 110 Hv แต่ความหนาของผิวแข็งอยู่ระหว่าง 0.02 - 0.04 มิลลิเมตร และใช้เวลาในการทำงานประมาณ 30 นาที ถึง 3 ชั่วโมง เหมาะสำหรับชุบแข็งผิวอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการตัดที่ทำได้ด้วยเหล็กกล้าความเร็วสูง เช่น มีดตัดโลหะชนิดหมุน ดอกสว่าน และอุปกรณ์สำหรับทำเกลียวเป็นต้น

- คาร์โบไนตรายดิ่งที่อุณหภูมิปานกลาง (840 - 860 องศาเซลเซียส) เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความหนาของผิวแข็งสูงโดยจะต้องใช้เวลาประมาณไม่เกิน 10 ชั่วโมง จะได้ความความหนาของผิวสูงประมาณ 1 มิลลิเมตร จะใช้แก๊สแอมโมเนียผสมประมาณ 30 เปอร์เซนต์ ชิ้นงานที่ใช้ในการชุบแข็งผิวในช่วงอุณหภูมิส่วนใหญ่จะเป็นพวกชิ้นส่วนเครื่องจักรกลทั่วๆ ไป

- คาร์โบไนตรายดิ่งที่อุณหภูมิสูง (900 - 950 องศาเซลเซียส) เป็นวิธีการชุบผิวแข็งที่ต้องการความหนาของผิวแข็งสูงและใช้เวลาสั้น เมื่อเทียบกับการทำคาร์บอนไรซ์ซึ่งด้วยแก๊สเพียงอย่างเดียวจะได้ความหนาของผิวแข็งในอัตราที่ช้ากว่า (ประมาณ 0.1 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง)

การชุบแข็งผิวด้วยกรรมวิธีคาร์โบไนตรายดิง มีข้อดีเมื่อเทียบกับการทำคาร์ไบไรซ์ซึ่งด้วยแก๊สคือ ใช้เวลาในการชุบแข็งผิวสั้นกว่า และได้ความแข็งที่ผิวสูงกว่า และที่สำคัญคือสามารถที่จะใช้อุณหภูมิต่ำได้ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับการทำไซยาไนต์ดิงแล้วข้อที่ดีกว่าก็มีเพียงไม่มีสารพิษเข้ามาเกี่ยวข้องกับผูปฏิบัติงานเท่านั้น

4. การชุบแข็งพื้นผิวโดยวิธีไนตรายดิง เป็นวิธีการเพิ่มในลักษณะที่ทำให้มีตัวตามบริเวณผิวของแท่งเหล็กด้วยอะตอมของไนโตรเจน มีลักษณะคล้ายกับการทำคาร์ไบไรซ์ซึ่ง หรืออาจจะกล่าวได้ว่าการทำคาร์โบไนไรซ์ซึ่งเป็นการเพิ่มธาตุคาร์บอนให้กับเหล็กในสภาพออสเทนไนท์ แต่ในการทำไนตรายดิงเป็นการเพิ่มธาตุไนโตรเจนให้กับเหล็กในสภาพเฟอร์ไรท์ เพราะจะกระทำที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 500 - 590 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิช่วงนี้เหล็กยังคงสภาพเป็นเฟอร์ไรท์ และอุณหภูมิช่วงนี้เป็นช่วงที่เหล็กเฟอร์ไรท์จะยอมให้อะตอมของไนโตรเจนละลายได้สูงที่สุดประมาณ 0.1 เปอร์เซนต์ และถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า 500 องศาเซลเซียส จะปรากฏไนตรายของเหล็กในรูป Fe_4N และ Fe_2N จะทำให้ความแข็งสูงถึงประมาณ 1000 - 1100 Hv

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yu et al. [2] ได้ใช้เทคนิค Spark Plasma Sintering (SPS) ผลิตฟิล์มไบไรต์ในเหล็กเหนียว เมื่อสารตั้งต้นเป็น Silicon carbide (SiC) และ Boron carbide (B_4C) อุณหภูมิที่ใช้ระหว่าง 700 - 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากการทดลองพบว่าเฟสของฟิล์มที่เกิดขึ้นเป็นเฟสของ FeB และ Fe_2B ผลการถ่ายภาพด้วย SEM พบว่า เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิต่ำกว่า 700 องศาเซลเซียส ความหนาของชั้นฟิล์มประมาณ 2 - 5 ไมครอน เมื่อนำผลการหาค่าความหนาของชั้นฟิล์มที่ได้กับอุณหภูมิในการสังเคราะห์เป็นเวลา 30 นาที เป็นไปตามสมการที่ (1)

$$d^2 = t D_0 \exp[-Q/RT] \quad (1)$$

เมื่อ d คือความหนาของชั้นเคลือบ t เวลาในการเคลือบ D_0 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ Q พลังงานกระตุ้น R ค่าคงที่ของแก๊ส และ T อุณหภูมิ จากการทดลองพบว่า ค่าพลังงานกระตุ้นและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 145.84 kJ/mol และ 0.02328 cm^2/s ตามลำดับ

Campos et al. [3] ใช้ $SiC-B_4C$ ในการเคลือบ ซึ่งให้ผลการทดลองเช่นเดียวกับ ซึ่งให้ค่าพลังงานกระตุ้นและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 226.7 kJ/mol และ 0.02328 cm^2/s ตามลำดับ

Campos et al. [4] ศึกษาอายุการใช้งานของหัวตัดที่ทำจากเหล็ก AISI M2 ที่ผ่านการเคลือบด้วยโบรอนด้วยวิธี paste boriding เมื่อทำการเคลือบที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส และความหนาของ paste มีค่าเท่ากับ 4 มิลลิเมตร พบว่า ความหนาของชั้นโบรอน

(เฟส FeB และ เฟส Fe₂B) มีความหนาเท่ากับ 18 ± 1.5 และ 40 ± 4 ไมโครเมตร ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า การเคลือบที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ความพรุนของชั้นโบรอนมีค่าเพิ่มขึ้น จาก 1.54 เป็น 5.46 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเคลือบที่ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส ตามลำดับ สำหรับการทดสอบอายุการใช้งานพบว่า การเคลือบที่ 900 องศาเซลเซียส ที่ความหนาของ paste 4 มิลลิเมตร ทำให้อายุการใช้งานเท่ากับ 103 นาที เมื่อทดสอบที่ความเร็ว 55 เมตรต่อนาที ในขณะที่ไม่ได้เคลือบโบรอนจะมีอายุการใช้งานเท่ากับ 12 นาที

Allaoui et al. [5] ได้ทดสอบการเคลือบชั้นโบรอนบนเหล็ก XC38 การเคลือบโบรอนทำในสารหลอมเหลวของเกลือ ซึ่งประกอบด้วย sodium tetraborate (Na₂B₄O₇, 70 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก) และสารรีดิวซ์ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับสารรีดิวซ์ที่ใช้คือ Boron carbide (B₄C), Aluminium (Al) และ Silicon carbide (SiC) จากการเคลือบโบรอนโดยใช้สารรีดิวซ์ 3 ชนิดพบว่า Na₂B₄O₇-Al และ Na₂B₄O₇-B₄C จะให้เฟสผสมระหว่างเฟส FeB และ เฟส Fe₂B ในขณะที่ Na₂B₄O₇-SiC จะเกิดเฟส Fe₂B เพียงเฟสเดียว เมื่อทำการทดสอบความแข็งพบว่า ความแข็งที่เฟส FeB และ Fe₂B มีค่าเท่ากับ 2130 ± 70 และ 1820 ± 61 HV ตามลำดับ ในขณะที่ชั้นเหล็ก XC38 มีความแข็งเท่ากับ 218 ± 7 HV

บทที่ 3

วิธีดำเนินการศึกษาค้นคว้า

3.1 อุปกรณ์

1. ชุดทดลองการเคลือบ
2. ชุดตัวอย่าง
3. เครื่องชั่งตวงวัด 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ OHAUS
4. เตาอบ รุ่น Lenton Thermal Designs บริษัท Lenton ประเทศอังกฤษ
5. เตาเผา รุ่น Isotemp Muffle Furnace บริษัท Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2 สารเคมี

1. Boron carbide
2. กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) บริษัท Merck KGaA ประเทศ Germany
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ บริษัท Merck KGaA ประเทศ Germany

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเคลือบผิว

การเตรียมตัวอย่างเหล็ก ตัดตัวอย่างเหล็กหล่อบขนาด $1 \times 1 \times 1$ เซนติเมตร นำไปขัดผิวด้วยกระดาษทราย เพื่อให้ผิวหน้าเรียบ ล้างไขมันด้วยเอทานอล

การเตรียมสารเคลือบ ผสม Boron carbide, Alumina, Potassium tetraborate ให้เข้ากัน นำไปบดด้วยหม้อบดเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

การเคลือบผิว นำส่วนผสมสารเคลือบมาใส่ในชุดทดลองการเคลือบ ใส่ตัวอย่างเหล็กที่เตรียมไว้ ให้สารเคลือบคลุมทุกส่วนของตัวอย่างเหล็ก ประกอบชุดทดลองการเคลือบภายในเตาเผา ต่อระบบเข้ากับถังก๊าซอาร์กอน เปิดวาล์วก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที ปิดวาล์วก๊าซอาร์กอน เปิดเครื่องดูดอากาศเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้บรรยากาศภายในชุดเคลือบไม่มีออกซิเจน ปิดเครื่องดูดอากาศ เปิดระบบให้ก๊าซอาร์กอนไหลอีกครั้งเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้บรรยากาศเป็นบรรยากาศก๊าซอาร์กอน เปิดเตาเผา และตั้งค่าอุณหภูมิเป็น 700 800 900 และ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 8 10 และ 12 ชั่วโมง

3.3.2 การทดสอบการย่อย

นำตัวอย่างเหล็กที่ได้หลังเคลือบมาทดสอบการย่อยด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก หรือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร โดยมีวิธีการทดลองดังนี้ นำตัวอย่างมาล้างให้สะอาดด้วยเอทานอล นำตัวอย่างที่สะอาดแล้วมาแช่ในสารละลายกรด-ด่าง จำนวน 100 มิลลิลิตร ทำการชั่งตัวอย่างเหล็กในสารละลายดังกล่าว เพื่อบันทึกไว้เป็นน้ำหนักเริ่มต้น ทำการทดลองโดยอัลตราโซนิกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำตัวอย่างที่ได้ไปชั่งน้ำหนักในสารละลายอีกครั้ง นำตัวอย่างที่ชั่งน้ำหนักในสารละลายเรียบร้อยแล้ว มาทำการอัลตราโซนิกต่ออีก แล้วทำการทดลองชั่งน้ำหนักซ้ำ จนครบตามเวลาที่ต้องการ

3.4 วิธีการวิเคราะห์

จุลโครงสร้างวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ความหนาวัดด้วยกล้อง

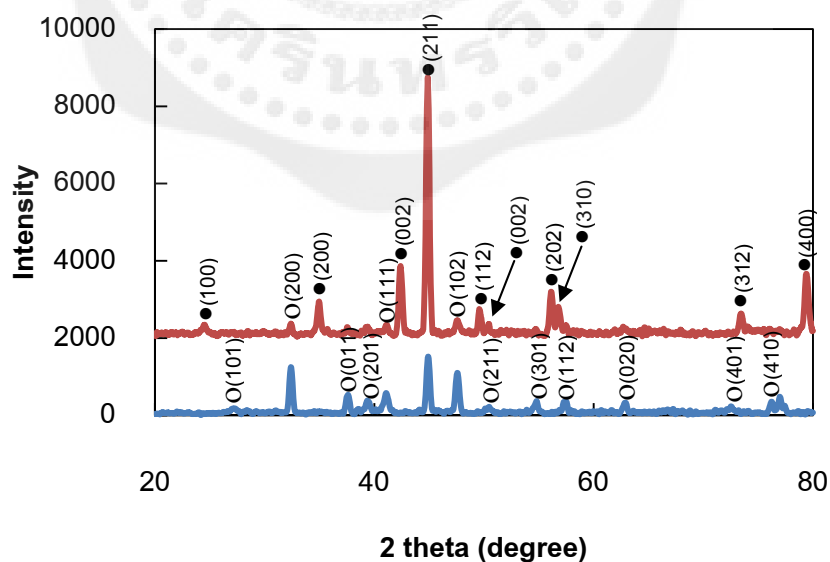


บทที่ 4

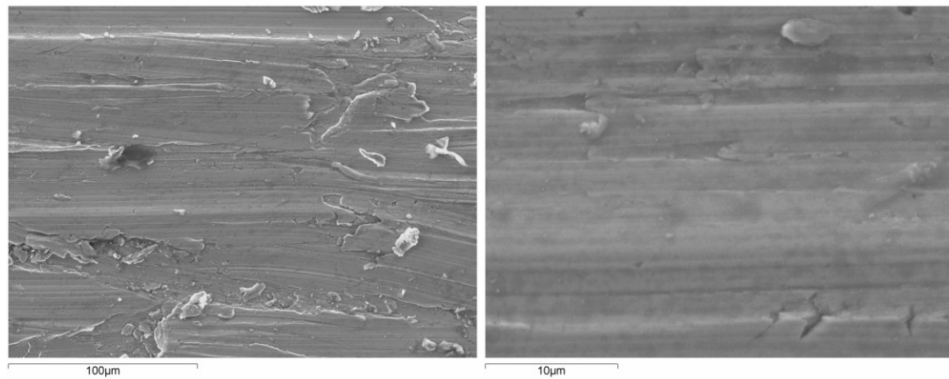
ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์เฟส

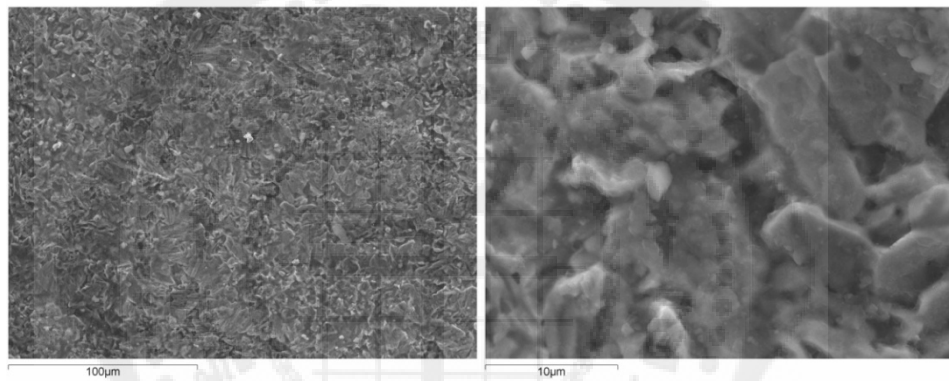
เมื่อนำตัวอย่างเหล็กที่ทำการเคลือบโบรอนไปวิเคราะห์หาเฟสให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1 ซึ่งตัวอย่าง F900-12 และ F1000-12 ที่เตรียมโดยการเคลือบโบรอนที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ตามลำดับ จากรูปที่ 4.1 พบว่า ตัวอย่างทั้งสองมีเฟสของ Fe_2B (JCPDF# 01-089-1993) และ FeB (JCPDF# 03-065-2599) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการเคลือบโบรอนที่ผิวของชิ้นงาน นอกจากนี้ยังพบว่า F900-12 จะพบเฟสของ Fe_2B เป็นส่วนใหญ่ F1000-12 พบว่า เฟสของ FeB เป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเคลือบโบรอนจาก 900 เป็น 1000 องศาเซลเซียส จะทำให้ B_4C เกิดการระเหยได้ดี จึงทำให้ความเข้มข้นของ B_4C ในสถานะก๊าซมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้มีโอกาสดำปฏิกิริยากับ Fe ในชิ้นงานได้มากขึ้น และทำให้เกิดการแพร่ของโบรอนเข้าไปในชิ้นงานได้ดี ซึ่งให้ผลการทดลองเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Allaoui et al. [5] นอกจากนี้ยังพบว่า ชิ้นงานเปลี่ยนจากลักษณะมันวาวเป็นสีเทา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดการเคลือบผิวของโบรอน นอกจากนี้เมื่อนำชิ้นงานที่ได้หลังการเคลือบไปวิเคราะห์ภาพถ่าย SEM ให้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.2



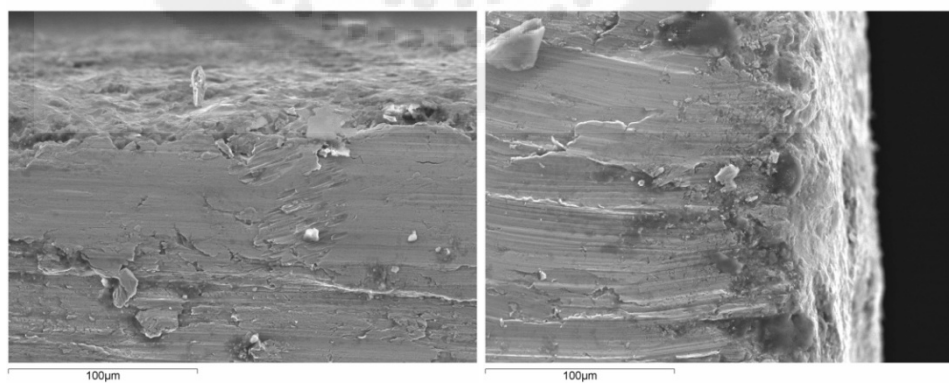
รูปที่ 4.1 การวิเคราะห์เฟสของตัวอย่าง F900-12 (—) และ F1000-12 (—) เมื่อ O FeB และ • Fe_2B



(ก) ตำแหน่งผิวหน้าชิ้นงานก่อนเคลือบ



(ข) ตำแหน่งผิวหน้าชิ้นงานหลังเคลือบ



(ค) ตำแหน่งตัดขวางจากผิวหน้าชิ้นงานหลังเคลือบ

รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างก่อนและหลังการเคลือบโบรอนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

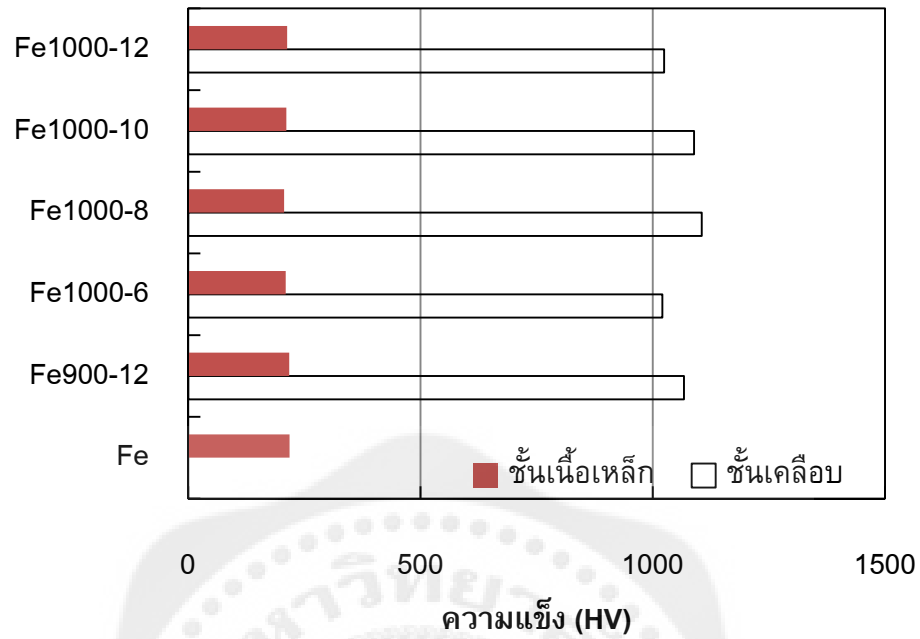
จากรูปที่ 4.2 พบว่า ชิ้นงานก่อนการเคลือบโบรอน (รูปที่ 4.2ก) จะมีลักษณะเป็นพื้นผิวที่เรียบ หลังจากการเคลือบโบรอนเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบว่าผิวหน้าของชิ้นงานมีลักษณะขรุขระ (รูปที่ 4.2ข) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดเฟสของ FeB เกิดขึ้นที่ผิวหน้า ในขณะที่เมื่อทำการถ่ายภาพทางด้านตัดขวาง (รูปที่ 4.2ค) พบว่ามีเฟสของ FeB เกิดขึ้นเป็นชั้นที่มีความหนาประมาณ 2 - 5 ไมโครเมตร และมีการแพร่เป็นแบบฟันปลา ซึ่งให้ผลการทดลองเหมือนกับ Campos et al. [4]

4.2 การวิเคราะห์ความแข็ง

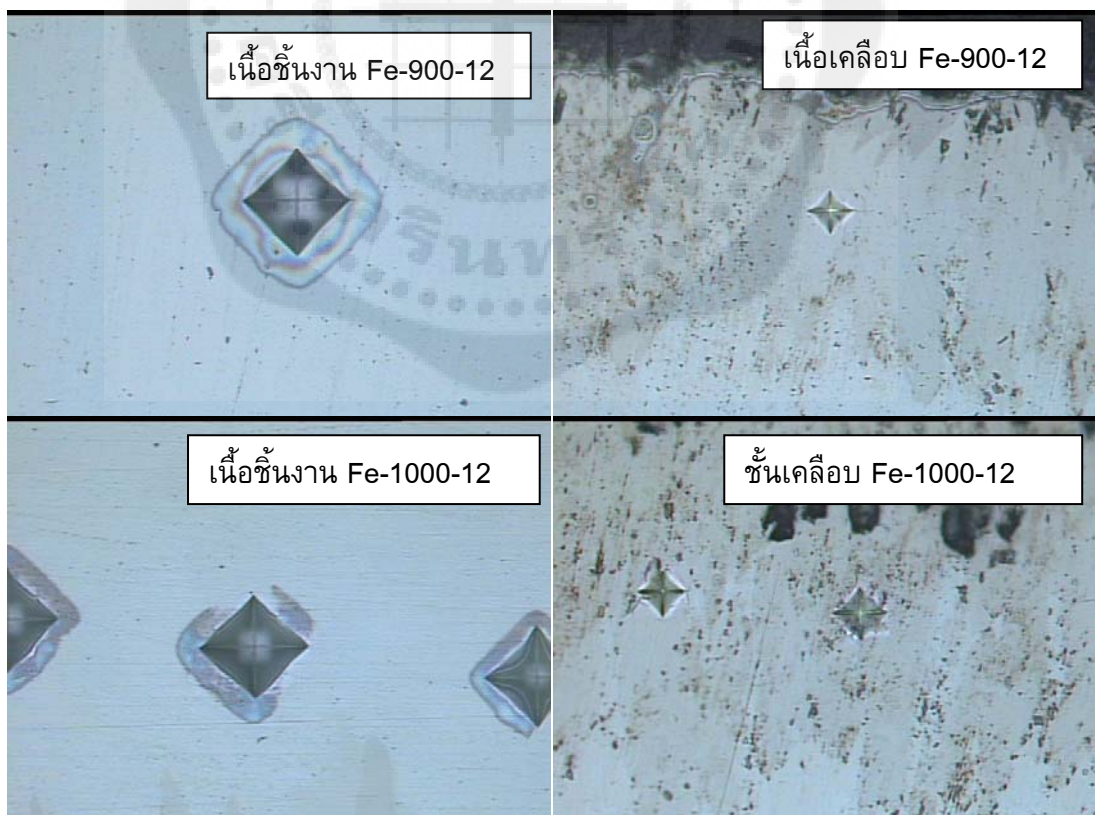
เมื่อนำตัวอย่างเหล็กที่ทำการเคลือบโบรอนไปวิเคราะห์หาความแข็งของชิ้นงานหลังการเคลือบให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.3 ซึ่งตัวอย่างทั้งหมดพบว่า ค่าความแข็งของเหล็กที่ใช้ในการทดลองมีค่าเท่ากับ 212.7 HV (SD 8.13) และยังพบว่าค่าความแข็งของชิ้นงานที่บริเวณผิวเคลือบมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1061.5 HV (SD 67.5) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเคลือบโบรอนสามารถเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานได้ถึง 5 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากเกิดเฟสของ FeB และ Fe₂B ซึ่งเป็นเฟสที่เพิ่มความแข็งให้กับชิ้นงาน โดย เฟส FeB และ Fe₂B มีค่าความแข็งอยู่ประมาณ 2000 และ 1500 HV ตามลำดับ [5] ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Atik et al. [6] โดยพบว่าเหล็กหล่อ SAE 1010 ซึ่งมีเหล็กและคาร์บอนเป็นองค์ประกอบร้อยละโดยน้ำหนัก 98.48 และ 0.177 พบว่า ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่บริเวณผิวเคลือบมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาในการเคลือบ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มเวลาทำให้เกิดการแพร่ของโบรอนภายในเนื้อเหล็กได้ดีขึ้น ในรูปที่ 4.4 แสดงลักษณะของรอยกดที่ได้จากการทดสอบความแข็งกับชิ้นงานต่างๆ

4.3 ความหนาของชั้นเคลือบโบรอน

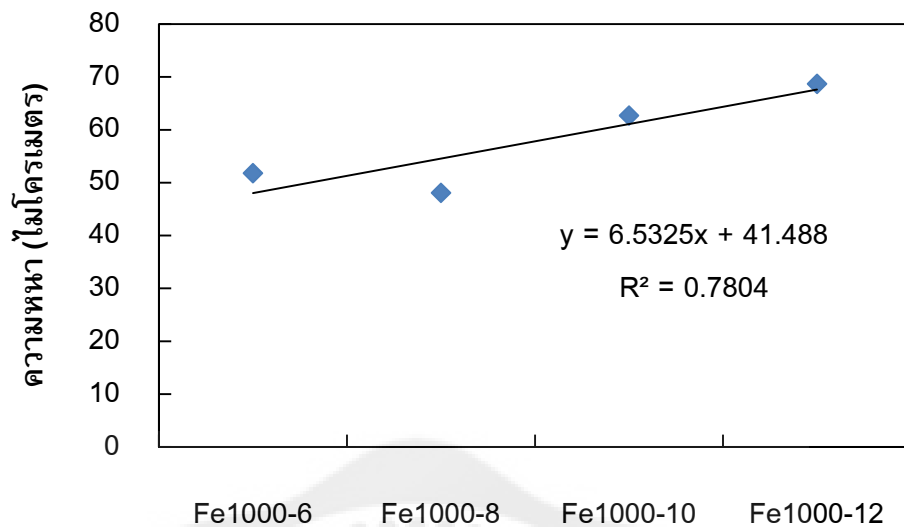
ความหนาของชั้นเคลือบทำได้โดยการเพิ่มเวลาในการเคลือบจาก 6 ถึง 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.5 จากรูปที่ 4.5 พบว่าเมื่อทำการเพิ่มเวลาในการเคลือบ ความหนาของชั้นเคลือบมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถเขียนได้เป็นความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงตามสมการ $y = 6.5325x + 41.488$ เมื่อ y คือความหนาเป็นไมโครเมตร และ x คือเวลาเป็นชั่วโมง



รูปที่ 4.3 ความแข็งแรงของตัวอย่างหลังการเผาที่ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 - 12 ชั่วโมง



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายตัวอย่างหลังการทดสอบความแข็งแรง

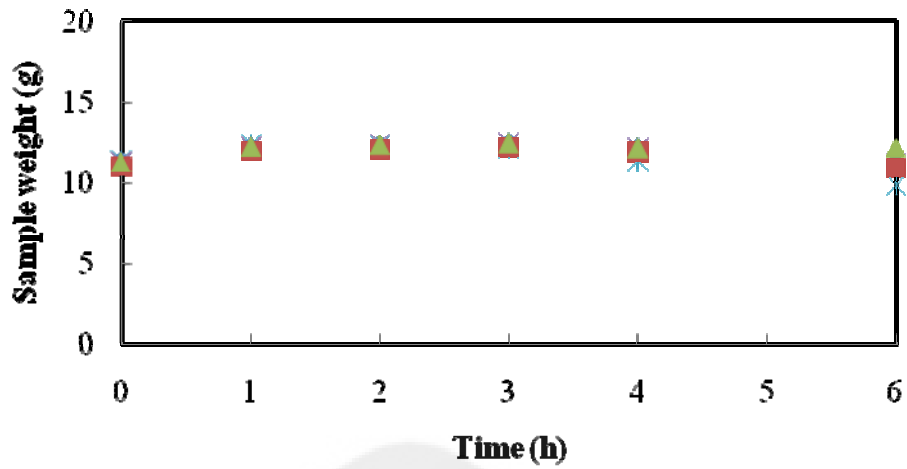


ตัวอย่าง

รูปที่ 4.5 ความหนาของชั้นเคลือบที่เวลาต่างๆ เมื่อเคลือบโบรอนที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

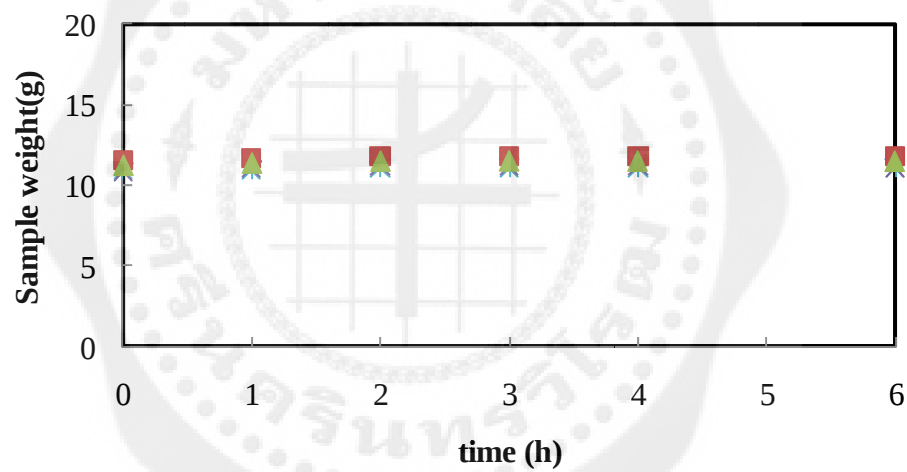
4.4 การทดสอบการทนกรด-ด่าง

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการทนกรด-ด่าง เตรียมโดยการเคลือบตัวอย่างเป็นเวลา 6 ถึง 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.6 จากรูปที่ 4.6 ก แสดงน้ำหนักของตัวอย่างก่อนและหลังเคลือบโบรอนที่เวลาต่างๆ พบว่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างก่อนเคลือบและหลังเคลือบให้ผลการทดลองไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อทำการแช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (รูปที่ 4.6ข) ก็ให้ผลการทดลองเช่นเดียวกัน ซึ่งจากการทดลองแสดงว่าการเคลือบโบรอนไม่ได้ช่วยลดความสามารถในการทนกรด-ด่าง ของชิ้นงานได้ทั้งนี้อาจเกิดจากการเกิดรูพรุนของชั้นเคลือบโบรอน [7] ทำให้ความสามารถในการทนกรด-ด่าง มีค่าไม่แตกต่างจากตัวอย่างที่ไม่ได้เคลือบ



× coated 0 h × coated 6 h ◆ coated 8 h ■ coated 10 h ▲ coated 12 h

(ก)



× coated 0 h × coated 6 h ◆ coated 8 h ■ coated 10 h ▲ coated 12 h

(ข)

รูปที่ 4.6 การทดสอบการทนกรดซัลฟิวริก (ก) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ข) ที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร หลังการแช่ที่เวลาต่างๆ สำหรับตัวอย่างที่เคลือบโพรตอนที่เวลาต่าง 0 - 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในการเคลือบเหล็กหล่อด้วยโบรอน พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการอบจะทำให้ความหนาของชั้นเคลือบสารประกอบโบรอนมีค่าเพิ่มขึ้น สารประกอบโบรอนคือ FeB และ Fe₂B ความแข็งของตัวอย่างที่ได้จากการเคลือบที่ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง พบว่าค่าความแข็งมีค่าประมาณ 1061 HV สำหรับการทดสอบการทนกรด-ด่าง พบว่าการเคลือบโบรอนไม่ได้ช่วยในการทนต่อกรด-ด่าง เนื่องจากการเกิดรูพรุนภายในชั้นเคลือบ ทำให้กรด-ด่างสามารถเกิดการแทรกซึมลงไปในชิ้นงานงาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการเคลือบโบรอน ไม่ได้ช่วยทำให้เกิดความทนต่อกรด-ด่าง จึงควรมีการใช้โลหะชนิดอื่นในการเคลือบ

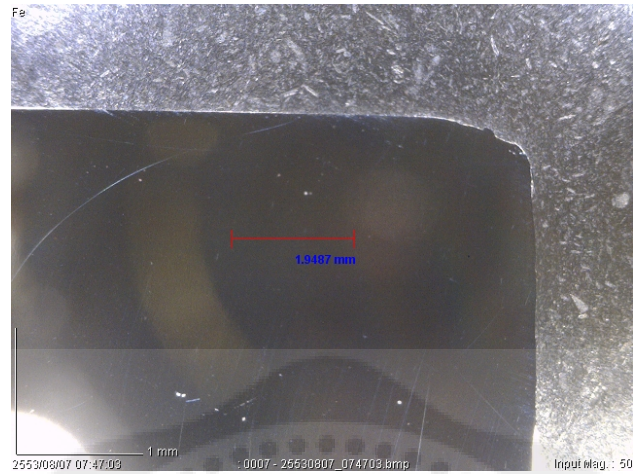
เอกสารอ้างอิง

- [1] http://www.nesdb.go.th/Portals/0/tasks/dev_ability/Profile/industry/อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้า.pdf
- [2] Yu, L.G., Khor, K.A. and Sundararajan, G. (2002) **Boriding of mild steel using the spark plasma sintering (SPS) technique**, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 157, 226–230
- [3] Campos, I., Bautista, O., Ramírez, G., Islas, M., Parra, J. D. L. and Zuniga, L. (2005) **Effect of boron paste thickness on the growth kinetics of Fe₂B boride layers during the boriding process**, *Applied Surface Science*, Vol. 243(1-4), 429-436
- [4] Campos, I., Farah, M., Lopez, N., Bermúdez, G., Rodriguez, G. and VillaVelazquez, C. (2008) **Evaluation of the tool life and fracture toughness of cutting tools boronized by the paste boriding process**, *Applied Surface Science*, Vol. 254(10), 2967-2974
- [5] Allaoui, O., Bouaouadja, N. and Saindernan, G. **Characterization of boronized layers on a XC38 steel**, *Surface and Coatings Technology*, 201(6) 2006, 3475-3482
- [6] Atik, E., Yunker, U. and Meric, C. **The effects of conventional heat treatment and boronizing on abrasive wear and corrosion of SAE 1010, SAE 1040, D2 and 304 steels**, *Tribology International*, 36(3) 2003, 155-161
- [7] Campos, I., Palomar-Pardavé, M., Amador, A., VillaVelázquez, C. and Hadad, J. **Corrosion behavior of boride layers evaluated by the EIS technique**, *Applied Surface Science*, 253(23) 2007, 9061-9066

ภาคผนวก



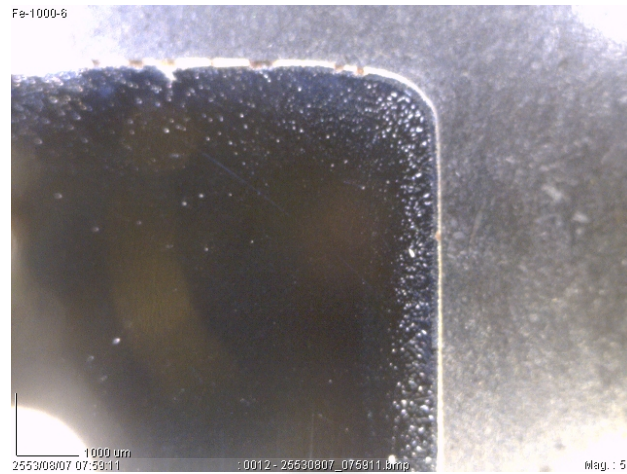
ภาคผนวก ก ภาพถ่ายชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์



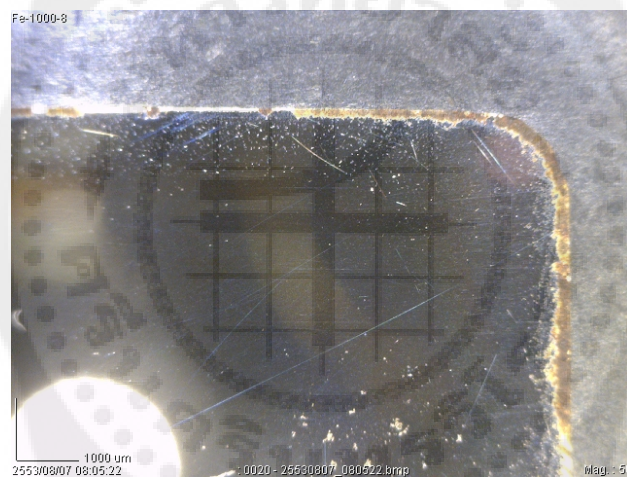
รูปภาคผนวกที่ 1 ชิ้นงานก่อนเคลือบ



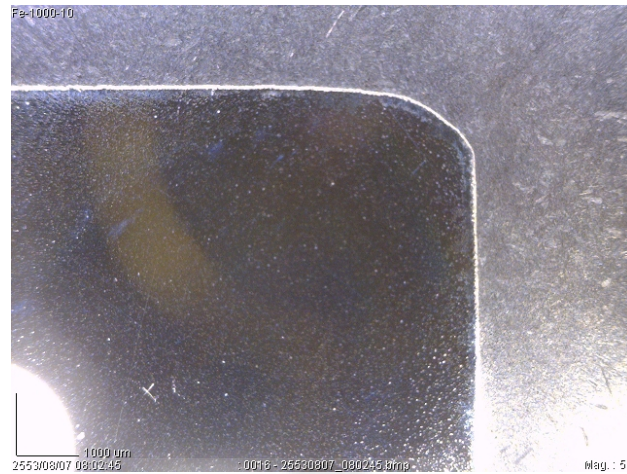
รูปภาคผนวกที่ 2 ชิ้นงานหลังเคลือบที่ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง



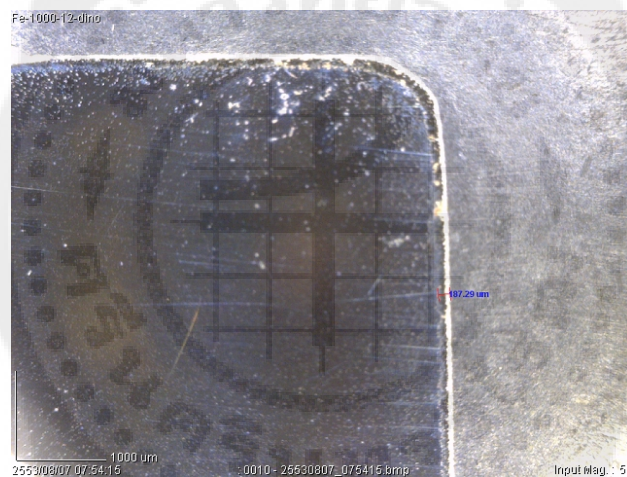
รูปภาคผนวกที่ 3 ชิ้นงานหลังเคลือบที่ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง



รูปภาคผนวกที่ 4 ชิ้นงานหลังเคลือบที่ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง

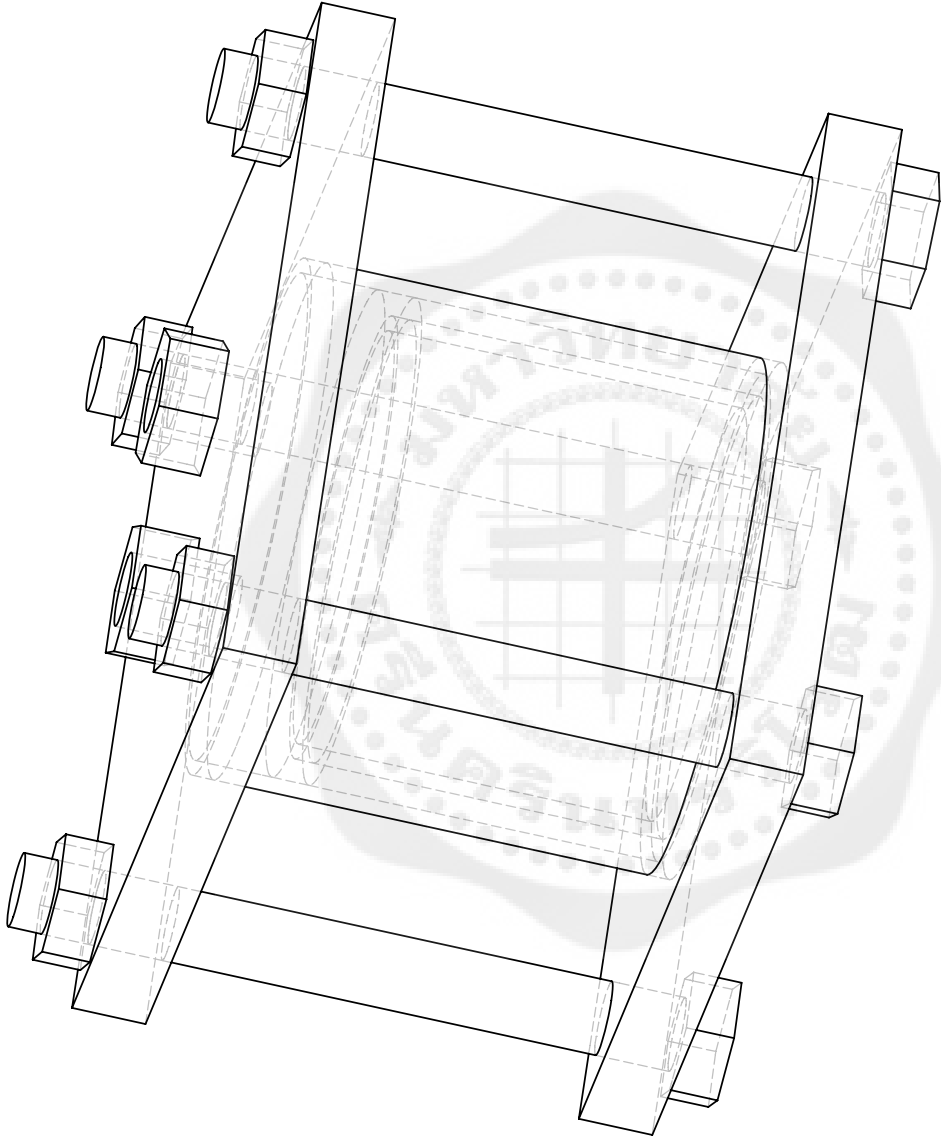


รูปภาคผนวกที่ 5 ชั้นงานหลังเคลือบที่ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 ชั่วโมง

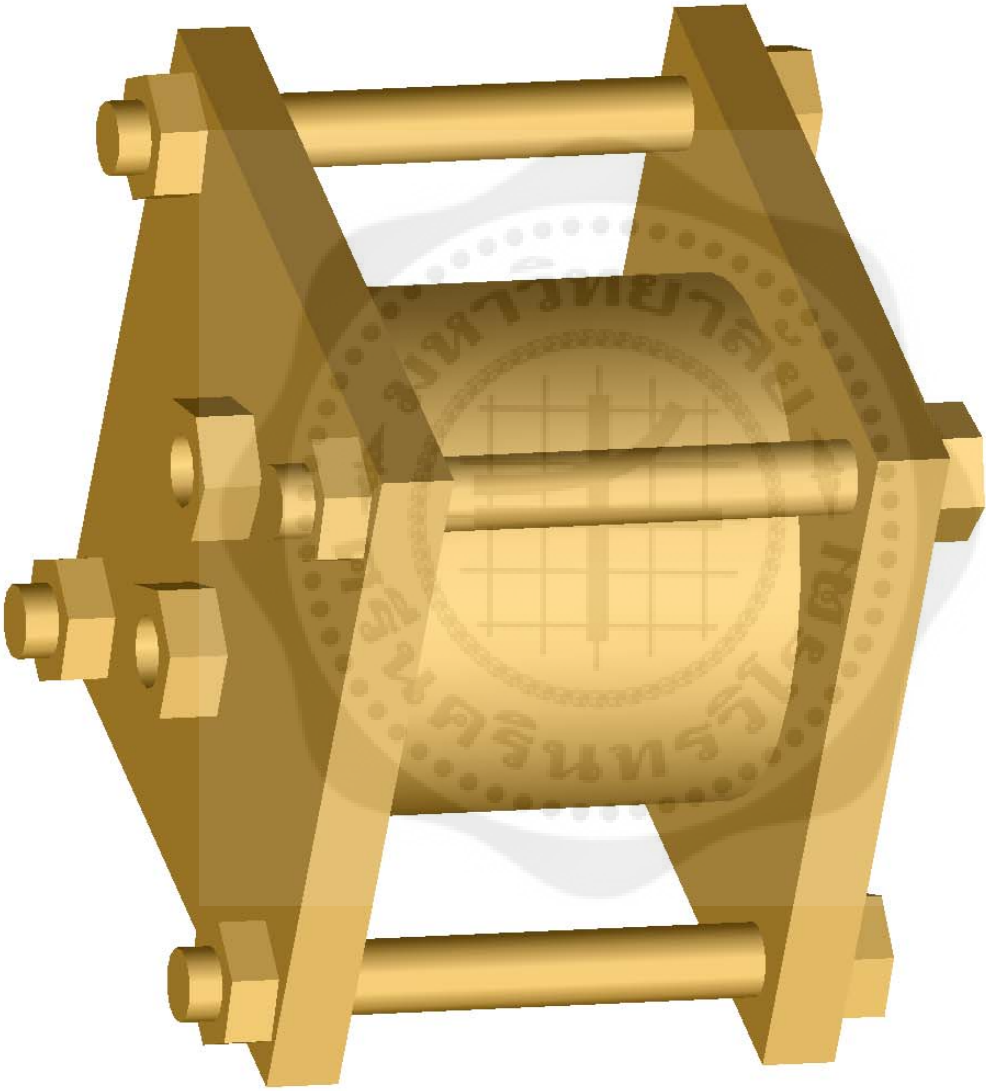


รูปภาคผนวกที่ 6 ชั้นงานหลังเคลือบที่ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

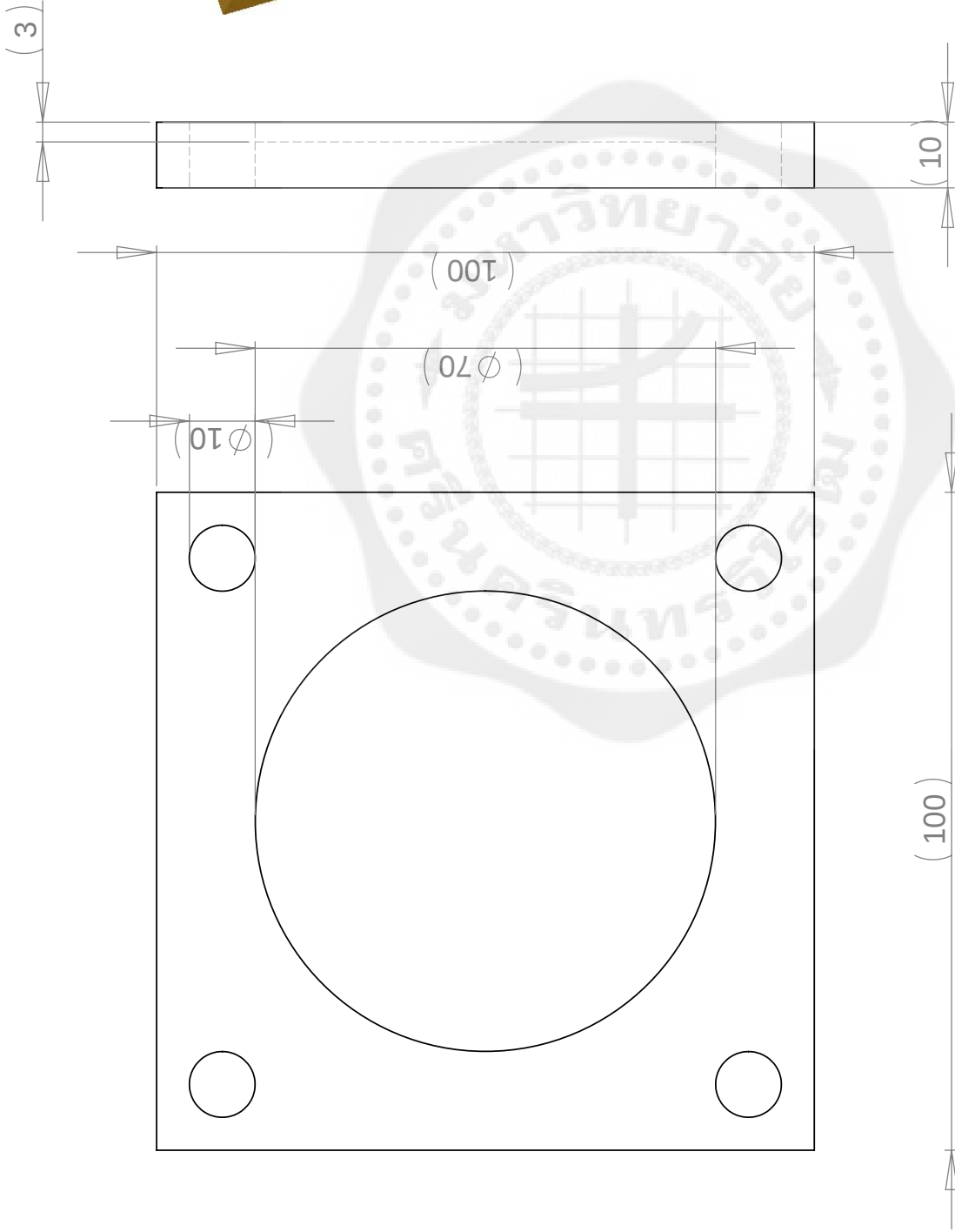
PDF#03-065-2599: QM=Calculated; d=Calculated; l=(Unknown)												PDF Card	
Boron Iron													
BFe													
Radiation=CuKa1				Lambda=1.5406				Filter=					
Calibration=				2T=27.265-149.968				I/Ic(RIR)=2.28					
Ref: Level-1 PDF													
Orthorhombic, Pnma (62)								Z=4		mp=			
CELL: 5.506 x 2.952 x 4.061 <90.0 x 90.0 x 90.0>								P.S=					
Density(c)=6.708		Density(m)=		Mwt=		Vol=66.0							
Ref: Ibid.													
Strong Lines: 2.19/X 1.91/7 2.39/7 2.01/6 2.28/4 1.80/4 2.75/4 1.67/3													
73 Lines, Wavelength to Compute Theta = 1.54059?(Cu), l%-Type = (Unknown)													
#	d(?)	l(f)	(hkl)	2-Theta	Theta	1/(2d)	#	d(?)	l(f)	(hkl)	2-Theta	Theta	1/(2d)
1	3.2682	16.9	(101)	27.265	13.632	0.1530	38	1.0000	2.6	(511)	100.763	50.382	0.5000
2	2.7530	35.1	(200)	32.497	16.248	0.1816	39	1.0000	2.6	(322)	100.763	50.382	0.5000
3	2.3878	66.2	(011)	37.640	18.820	0.2094	40	0.9817	0.5	(123)	103.384	51.692	0.5093
4	2.2787	38.7	(201)	39.514	19.757	0.2194	41	0.9771	5.5	(421)	104.063	52.031	0.5117
5	2.1907	100.0	(111)	41.174	20.587	0.2282	42	0.9680	1.1	(502)	105.453	52.726	0.5165
6	2.0133	64.9	(210)	44.989	22.495	0.2483	43	0.9652	2.9	(403)	105.899	52.949	0.5180
7	1.9051	67.7	(102)	47.699	23.850	0.2625	44	0.9563	1.7	(031)	107.312	53.656	0.5228
8	1.8038	35.6	(211)	50.559	25.279	0.2772	45	0.9525	1.2	(204)	107.933	53.966	0.5249
9	1.6725	27.0	(301)	54.849	27.424	0.2990	46	0.9422	3.3	(131)	109.677	54.839	0.5307
10	1.6341	0.1	(202)	56.248	28.124	0.3060	47	0.9380	2.2	(223)	110.421	55.211	0.5331
11	1.6007	23.3	(112)	57.531	28.765	0.3124	48	0.9266	2.8	(230)	112.470	56.235	0.5396
12	1.4760	17.3	(020)	62.917	31.458	0.3388	49	0.9198	6.4	(512)	113.743	56.871	0.5436
13	1.4552	2.6	(311)	63.924	31.962	0.3436	50	0.9177	5.1	(600)	114.155	57.077	0.5449
14	1.3765	0.1	(400)	68.057	34.028	0.3632	51	0.9177	5.1	(413)	114.155	57.077	0.5449
15	1.3616	0.6	(302)	68.908	34.454	0.3672	52	0.9065	5.3	(214)	116.365	58.182	0.5516
16	1.3452	1.6	(121)	69.868	34.934	0.3717	53	0.9034	2.6	(231)	117.010	58.505	0.5535
17	1.3145	0.9	(103)	71.746	35.873	0.3804	54	0.8951	0.3	(601)	118.761	59.381	0.5586
18	1.3037	9.1	(401)	72.438	36.219	0.3835	55	0.8884	0.1	(304)	120.240	60.120	0.5628
19	1.3008	8.3	(220)	72.620	36.310	0.3844	56	0.8765	5.3	(610)	123.000	61.500	0.5704
20	1.2475	10.4	(410)	76.260	38.130	0.4008	57	0.8765	5.3	(323)	123.000	61.500	0.5704
21	1.2388	7.6	(221)	76.894	38.447	0.4036	58	0.8743	5.0	(132)	123.545	61.772	0.5719
22	1.2364	20.4	(312)	77.074	38.537	0.4044	59	0.8625	1.9	(521)	126.533	63.267	0.5797
23	1.2305	5.0	(013)	77.514	38.757	0.4063	60	0.8566	2.4	(611)	128.122	64.061	0.5837
24	1.2148	3.0	(203)	78.708	39.354	0.4116	61	0.8542	1.9	(503)	128.773	64.386	0.5853
25	1.2008	8.5	(113)	79.802	39.901	0.4164	62	0.8481	0.4	(331)	130.532	65.266	0.5896
26	1.1925	0.9	(411)	80.471	40.235	0.4193	63	0.8430	0.1	(232)	132.069	66.035	0.5931
27	1.1668	16.6	(122)	82.629	41.314	0.4285	64	0.8365	4.4	(024)	134.111	67.055	0.5977
28	1.1394	0.1	(402)	85.075	42.537	0.4388	65	0.8365	4.4	(602)	134.111	67.055	0.5977
29	1.1234	4.8	(213)	86.582	43.291	0.4451	66	0.8206	1.6	(513)	139.678	69.839	0.6093
30	1.1067	8.9	(321)	88.223	44.111	0.4518	67	0.8171	0.1	(404)	141.045	70.522	0.6120
31	1.0953	0.1	(222)	89.377	44.689	0.4565	68	0.8095	1.5	(522)	144.210	72.105	0.6177
32	1.0894	4.0	(303)	89.996	44.998	0.4590	69	0.8078	4.3	(423)	144.950	72.475	0.6190
33	1.0628	1.7	(501)	92.899	46.449	0.4704	70	0.8035	0.2	(105)	146.939	73.470	0.6223
34	1.0628	1.7	(412)	92.899	46.449	0.4704	71	0.8005	4.0	(430)	148.422	74.211	0.6246
35	1.0220	0.6	(313)	97.822	48.911	0.4892	72	0.8005	4.0	(224)	148.422	74.211	0.6246
36	1.0153	3.5	(004)	98.704	49.352	0.4925	73	0.7975	4.9	(332)	149.968	74.984	0.6269
37	1.0067	0.1	(420)	99.848	49.924	0.4967							



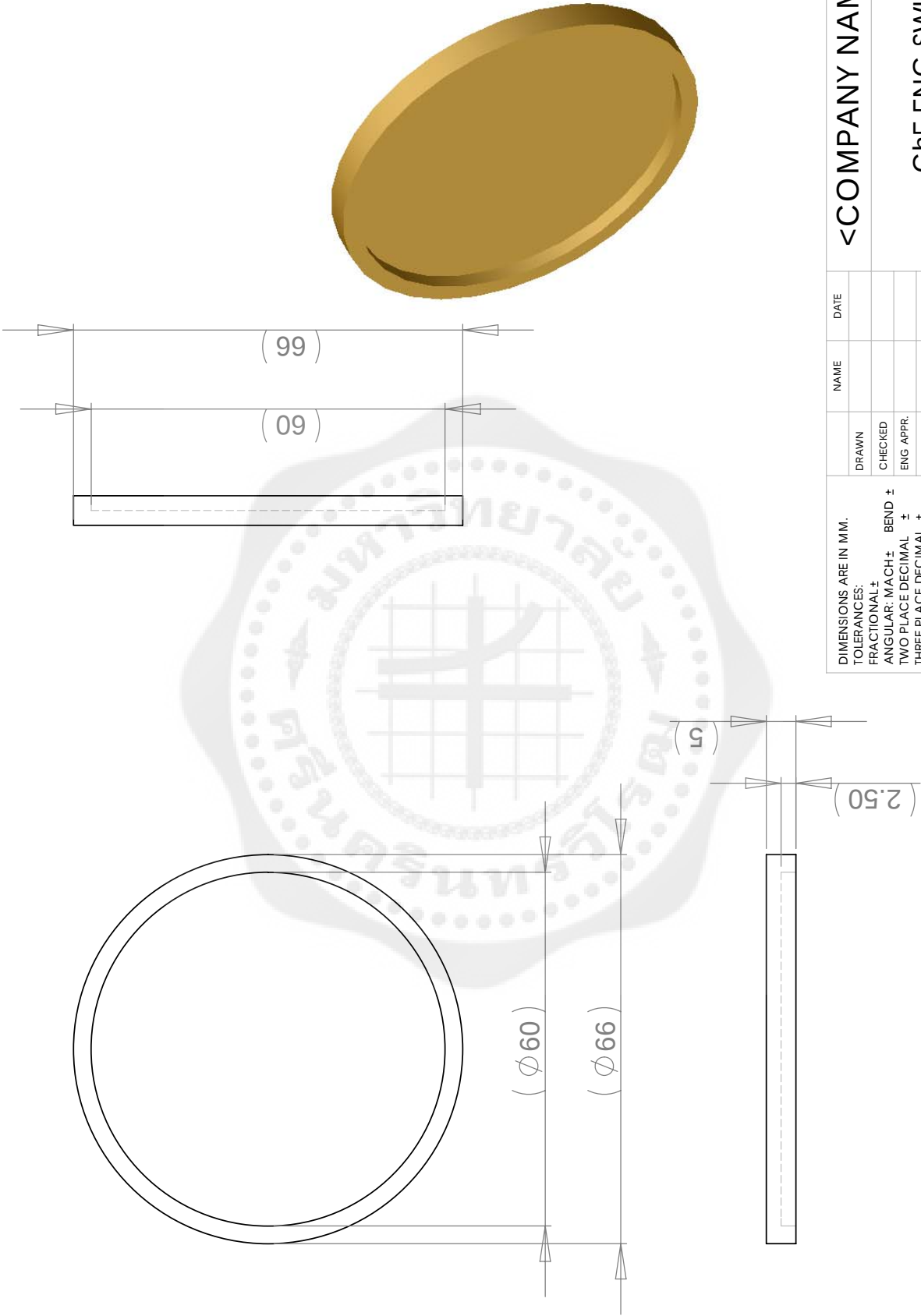
DIMENSIONS ARE IN MM.		NAME		DATE		<COMPANY NAME>	
TOLERANCES:		DRAWN					
FRACTIONAL ±		CHECKED					
ANGULAR: MACH ±		ENG APPR.					
TWO PLACE DECIMAL ±		MFG APPR.					
THREE PLACE DECIMAL ±		Q.A.					
MATERIAL		COMMENTS:				ChE.ENG.SWU	
FINISH						SIZE DWG BY: A REV.	
DO NOT SCALE DRAWING						Sittinan tawkaew	
						SCALE: WEIGHT: SHEET 1 OF 1	



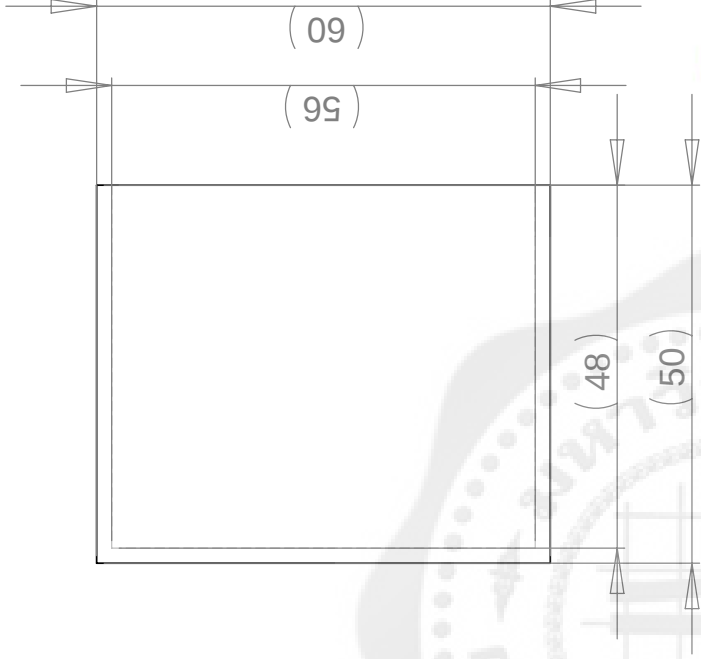
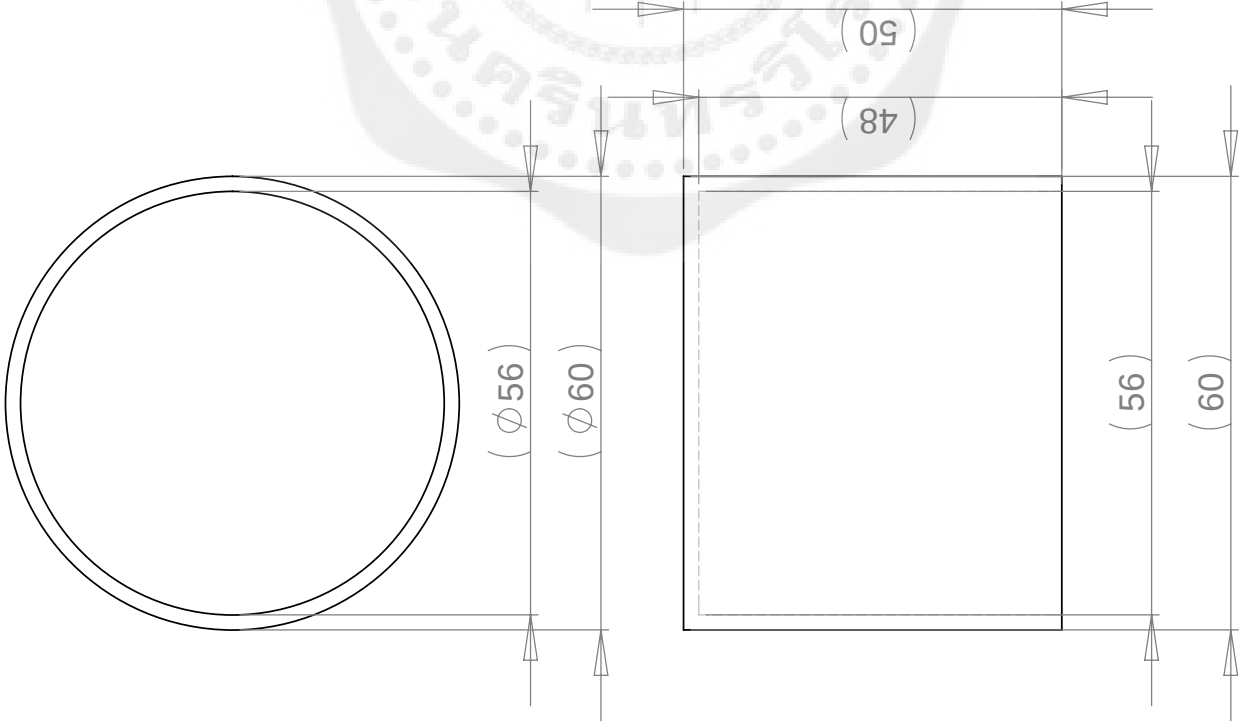
DIMENSIONS ARE IN MM. TOLERANCES: FRACTIONAL ± ANGULAR: MACH ± BEND ± TWO PLACE DECIMAL ± THREE PLACE DECIMAL ±		DRAWN	NAME	DATE	<COMPANY NAME> ChE.ENG.SWU
		CHECKED			
		ENG APPR.			
		MFG APPR.			
		Q.A.			
MATERIAL Stainless		COMMENTS:			SIZE DWG.BY. REV. A Sittinan tawkaew SCALE: WEIGHT: SHEET 1 OF 1
FINISH --					
DO NOT SCALE DRAWING					



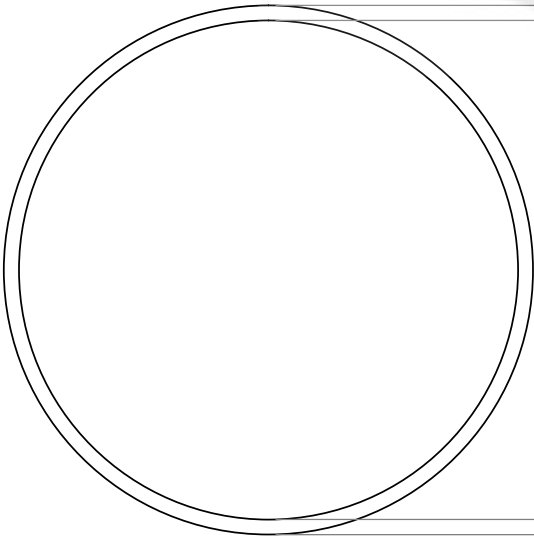
DIMENSIONS ARE IN MM. TOLERANCES: FRACTIONAL ± ANGULAR: MACH ± BEND ± TWO PLACE DECIMAL ± THREE PLACE DECIMAL ±			NAME	DATE	<COMPANY NAME>	
		DRAWN				
		CHECKED				
		ENG APPR.				
		MFG APPR.				
MATERIAL Stainless			Q.A.		ChE.ENG.SWU	
		COMMENTS:				
FINISH --						
DO NOT SCALE DRAWING						
SIZE	DWG BY:	REV.				
A		Sittinan tawkaew				
SCALE:	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1				



DIMENSIONS ARE IN MM. TOLERANCES: FRACTIONAL ± ANGULAR: MACH ± BEND ± TWO PLACE DECIMAL ± THREE PLACE DECIMAL ±		NAME		DATE		<COMPANY NAME>	
		DRAWN					
		CHECKED					
		ENG APPR.					
		MFG APPR.					
MATERIAL Stainless		Q.A.				ChE.ENG.SWU	
		COMMENTS:					
FINISH --							
DO NOT SCALE DRAWING							



DIMENSIONS ARE IN MM. TOLERANCES: FRACTIONAL: BEND ± ANGULAR: MACH ± TWO PLACE DECIMAL ± THREE PLACE DECIMAL ±			NAME	DATE	<COMPANY NAME>			
		DRAWN						
		CHECKED						
		ENG APPR.						
		MFG APPR.			ChE.ENG.SWU			
MATERIAL Stainless		Q.A.						
		COMMENTS:						
FINISH --					SIZE	DWG.BY.	REV.	
DO NOT SCALE DRAWING					A	Sittinan tawkaew		
		SCALE:	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1				



(φ 66)

(φ 70)

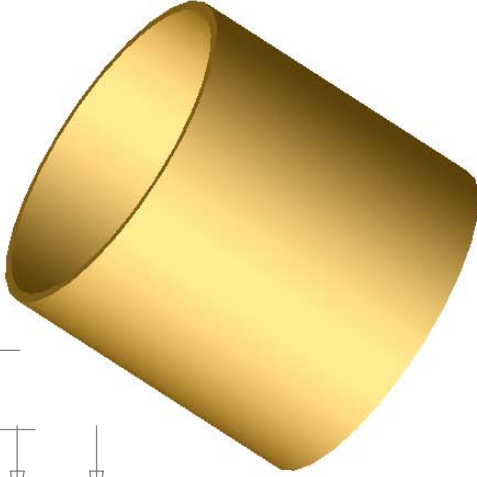


(63)

(65)

(φ 66)

(70)



DIMENSIONS ARE IN MM.
TOLERANCES:
FRACTIONAL ±
ANGULAR: MACH ± BEND ±
TWO PLACE DECIMAL ±
THREE PLACE DECIMAL ±

DRAWN
CHECKED
ENG APPR.
MFG APPR.

NAME

DATE

MATERIAL
Stainless

FINISH

--

DO NOT SCALE DRAWING

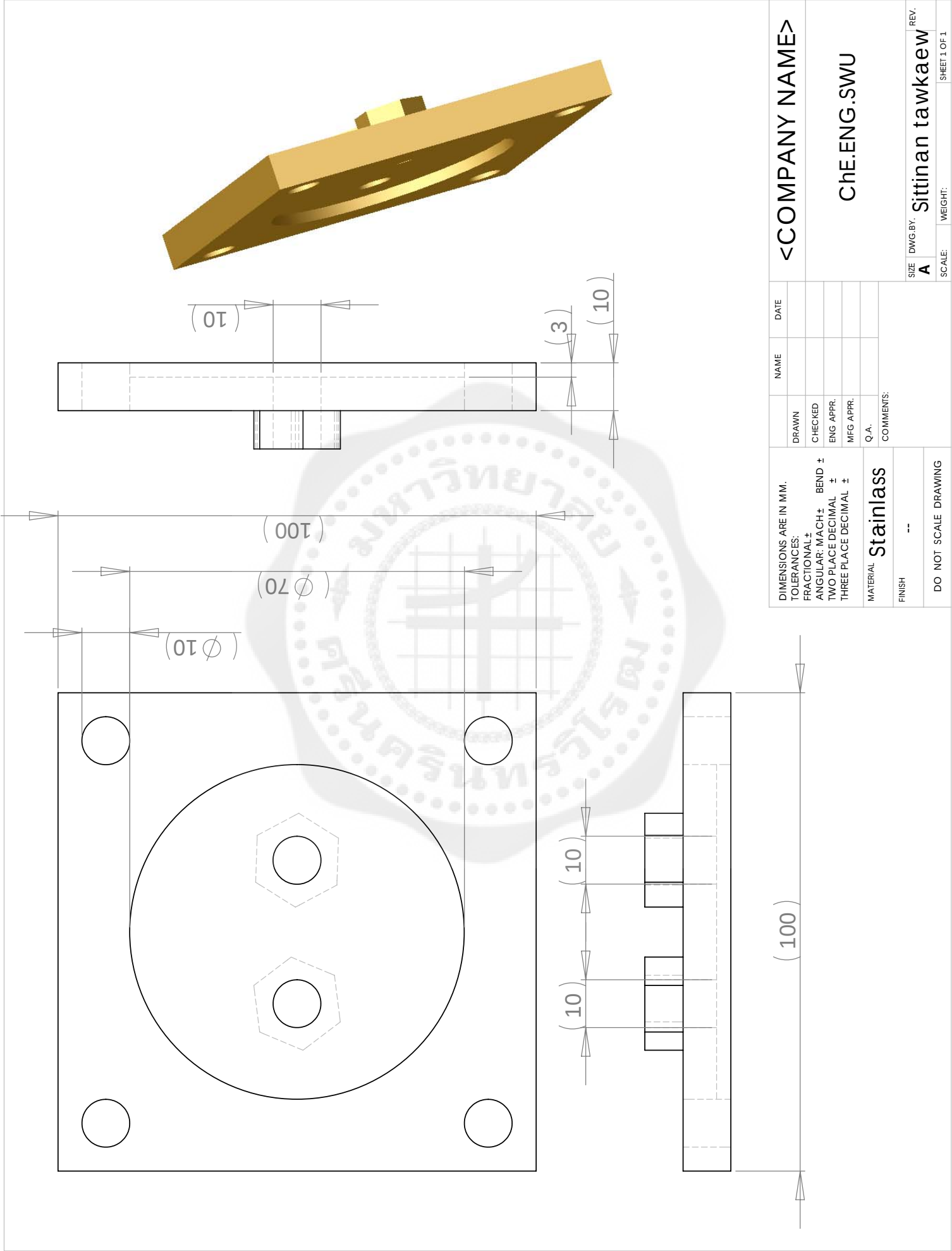
Q.A.
COMMENTS:

<COMPANY NAME>

ChE.ENG.SWU

SIZE DWG BY: **A** Sittinan tawkaew REV.

SCALE: WEIGHT: SHEET 1 OF 1



DIMENSIONS ARE IN MM. TOLERANCES: FRACTIONAL ± ANGULAR: MACH ± BEND ± TWO PLACE DECIMAL ± THREE PLACE DECIMAL ±		NAME		DATE	<COMPANY NAME>
		DRAWN			
		CHECKED			
		ENG APPR.			
		MFG APPR.			
MATERIAL		Q. A.			ChE.ENG.SWU
COMMENTS:					
FINISH		--			
DO NOT SCALE		DRAWING			
SIZE		DWG. BY.		REV.	
A		Sittinan tawkaew			
SCALE:		WEIGHT:		SHEET 1 OF 1	

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล (ภาษาไทย) นาย สิทธินันท์ ท่อแก้ว

(ภาษาอังกฤษ) Mr Sittinun Tawkaew

รหัสประจำตัวนักวิจัยแห่งชาติ (ถ้ามี)

ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ระดับ 8

หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้สะดวกพร้อมโทรศัพท์ โทรสาร และ E-mail

ผศ. ดร. สิทธินันท์ ท่อแก้ว ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ถนน รังสิต-นครนายก อำเภอ องครักษ์ จังหวัด นครนายก 26120 โทรศัพท์ 037-322-608 โทรสาร 037-322-608 e-mail: sittinun@swu.ac.th

ประวัติการศึกษา

ปริญญาตรี สาขาวิชา วท.บ. (เคมี) สถาบัน มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ปี ที่สำเร็จ 2535

ปริญญาโท สาขาวิชา วศ.ม. (วิศวกรรมเคมี) สถาบัน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปี ที่สำเร็จ 2539

หัวข้อวิทยานิพนธ์ที่ทำ A High Alumina Ceramic Filter for Bioseparation

ปริญญาเอก สาขาวิชา PhD (Applied Chemistry) Tohoku University, Sendai Japan
ปี ที่สำเร็จ 2545

หัวข้อวิทยานิพนธ์ที่ทำ Preparation of Semiconductor/Layered Compound
Nanocomposites and Their Photocatalytic Activity for Water Pollution Control

สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ

Photocatalytic Reaction, Hydrothermal Synthesis, Kinetic Modeling, Ceramic membrane,
Solid-Liquid Separation, Ethanol Fermentation

ผลงานการตีพิมพ์บทความวิจัยในวารสารต่างประเทศ

1. Tawkaew S., Sooknoi T., Jaroenworuluck A., Panyathanmaporn T., Supothina S.,
A Textile Waste Water Treatment System Using Photocatalytic Reactor and
Catalyst Recycle Unit, Materials Science Forum, 544-545, 2007, 5-8
2. A. Jaroenworuluck, T. Panyathanmaporn, B. Soontornworajit, S. Supothina, S.
Tawkaew, S. Jiamsakul, T. Sooknoi, Synthesis, Preparation and Catalytic Activities

- of V-Doped TiO₂ Gel Coating on Porous α -Al₂O₃ Beads, Materials Science Forum, 544-545, 2007, 13-16
3. Thackthay J., Supothina S., Tawkaew S. Preparation and Characterization of Immobilized Titanium Dioxide on Glass Powder, Journal of Solid mechanics and Material Engineering, 1(6), 2007, 806-814
 4. Sittinun Tawkaew and Sitthisuntorn Supothina, Preparation of agglomerated particles of TiO₂ and silica-coated magnetic particle, Materials Chemistry and Physics, 108(1), 2008, 147-153
 5. Sittinun Tawkaew, Metta Chareonpanich, Sitthisuntorn Supothina, Preparation and photocatalytic study of fibrous K_{0.3}Ti₄O_{7.3}(OH)_{1.7}-anatase TiO₂ nanocomposite photocatalyst, Materials Chemistry and Physics, 111(2-3), 2008, 232-237
 6. Phongnakhorn YANG-NGARM, Sitthisuntorn SUPOTHINA, and Sittinun TAWKEAW, **Preparation and Photoactivity of α - K₂Ti₆O₁₃ from Anatase TiO₂ Powder by Hydrothermal Treatment**, *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 18(2) 2008, 1-5
 7. Juthathip SINTHAO, Sitthisuntorn SUPOTHINA and Sittinun TAWKEAW, **Adsorption Isotherm of Methylene Blue on KNbO₃ Compound**, *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 20(3) 2010, 77-79
 8. Juthathip SINTHAO, Onuma SANTAWITEE, Sitthisuntorn SUPOTHINA and Sittinun TAWKEAW, **Adsorption Isotherm of Cr(VI) on KNb₃O₈ Compound**, *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 20(3) 2010, 133-136

ผลงานการตีพิมพ์บทความวิจัยในวารสารในประเทศ

1. สิทธิพันธ์ ท่อแก้ว, การเตรียมซีโอไลต์และโซดาไลต์จากดินขาว, วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง ปีที่ 1 ฉบับที่ 3 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2547, 56-60
2. ดวงมณี เรืองสุข, วิวิริยะ มะเดชะ, สิทธิพันธ์ ท่อแก้ว, การตกตะกอนอนุภาคอะลูมินาในชุดตกตะกอน, วารสารวิชาการวิศวกรรม พลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ฉบับที่ 1 พฤษภาคม 2548 ถึง ตุลาคม พ.ศ. 2548, 73-78
3. สิทธิพันธ์ ท่อแก้ว, อภิวัฒน์ พิทักษ์วงศ์, ศักดิ์ศิริ วงษ์ตั้ง, การเตรียมซีโอไลต์เอบนตัวรองรับดินขาว, วารสารวิชาการวิศวกรรม พลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ฉบับที่ 2 พฤศจิกายน 2548 ถึง เมษายน พ.ศ. 2549, 52-58
- 4.ชาญชัย อนันตปัญญสุทธิ, กานดิส สุดสาคร, เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ และ สิทธิพันธ์ ท่อแก้ว, การสลายสีย้อมชิบาร์ครอนเรดในเครื่องปฏิกรณ์แบบใช้แสงที่มีไทเทเนียมได

ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา, วิศวกรรมสาร มก. ฉบับที่ 56, 19 สิงหาคม – พฤศจิกายน 2548 หน้า 54-63

5. สุมิตรา นาคเครือ , สินศุภา จัยจุลเจิม, สิทธิพันธ์ ท่อแก้ว, การเตรียมตัวกรองเซรามิกจากดินดำและดินขาว, วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยรังสิต (RSU JET) ฉบับที่ 3 ปีที่ 9/2549
6. ปิยพงษ์ พรหมสาลี, มนัสชัย เพชรเมือง, จริญญา จัตรมานพ, สิทธิพันธ์ ท่อแก้ว, การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่มีแกนกลางเป็นแม่เหล็ก, วิศวกรรมสาร มก. ฉบับที่ 61, เมษายน – กรกฎาคม 2550
7. ผ่องศรี ศิวราศักดิ์, สิทธิพันธ์ ท่อแก้ว, การศึกษาการหมักแบบต่อเนื่องสำหรับการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาล, วารสารวิจัยและฝึกอบรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ฉบับที่ 1, 10(1), 1-12

การนำเสนอผลงานผลงานวิจัยระดับนานาชาติ

1. Sittinun Tawkaew, Watchara Weangkaew, Chirakarn Muangnapoh, **Preparation and Characterization of Ceramic Filter for Bioseparation**, *1st international Conference on Ferment technology for valued added agriculture products*, 22 – 25th March 2005, Khon Kaen, THAILAND
2. Chuachuensuk A., Pemakiti J., Supothina S., Tawkaew S. **Preparation and Characterization of Silver Loading Titanate Layer Compounds**, *Proceeding of Asian Symposium on Materials and Processing 2006 (ASMP2006)*, 9-10 Nov, Sofitel Central Plaza, Bangkok, THAILAND
3. Thackthay J., Supothina S., Tawkaew S. **Preparation and Characterization of Immobilized Titanium Dioxide on Glass Powder**, *Proceeding of Asian Symposium on Materials and Processing 2006 (ASMP2006)*, 9-10 Nov, Sofitel Central Plaza, Bangkok, THAILAND
4. Tawkaew S., Sooknoi T., Jaroenworuluck A., Panyathanmaporn T., Supothina S. **A Textile Waste Water Treatment System Using Photocatalytic Reactor and Catalyst Recycle Unit**, *Proceeding of The international symposium on eco-materials processing and design 2007 (ISEPD 2007)*, 10-13 Jan 2007, Kitakyushu , JAPAN
5. Jitlada Thackthay, Sitthisuntorn Supothina, Sittinun Tawkaew, **Preparation of titanium dioxide-silicon oxide photocatalyst by dispersion of TiO₂ powder in silica gel**, 24th annual conference the microscopy society of THAILAND, 14-16 Feb 2007, The Golden Jubilee Building, Kasetsart University, Bangkok, THAILAND

6. Anon Chuachuensuk, Sitthisuntorn Supothina, Sittinun Tawkaew, **Morphological Change and Photoactivity of $\text{H}_2\text{Ti}_4\text{O}_9$ Layer Compound under Hydrothermal Treatment**, 24th annual conference the microscopy society of THAILAND, 14-16 Feb 2007, The Golden Jubilee Building, Kasetsart University, Bangkok, THAILAND
7. Sinsupha Chuichulcherm, Sittinun Tawkaew, Pichai Asadamongkon, **Butanol Separation from a Model Fermented Broth Using Simplified Pervaporation Process**, PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment ICEE-2007, May 10-11, 2007 : Phuket Graceland Resort & Spa, Phuket, THAILAND
8. Sittinun Tawkaew, Sirikul Chunsawang, Sitthisuntorn Supothina, **Improvement of TiO_2 by Microwave Treatment**, PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment ICEE-2007, May 10-11, 2007 : Phuket Graceland Resort & Spa, Phuket, Thailand
9. S. Tawkaew, S. Supothina, **Adsorption Isotherms of Cr(VI) ion on the Niobate Layer Compounds**, 5th International Conference on Surfaces, Coatings and Nanostructured Materials, NANOSMAT-5, 19-21 October 2010, Reims (France)
10. S. Tawkaew, S. Supothina, **Intercalation of Fe_2O_3 into Potassium Titanate Layered Compounds and Their Photocatalytic Activity**, 5th International Conference on Surfaces, Coatings and Nanostructured Materials, NANOSMAT-5, 19-21 October 2010, Reims (France)
11. Sittinun Tawkaew, Sitthisuntorn Supothina, Onuma Santawitee, **Photooxidation of Reactive Red 3 Using Nanofibrous $\text{K}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$** , 12th International Symposium on Eco-materials Processing and Design to be from January 8 -11, 2011, Chiang Mai, Thailand.