

การหาคุณลักษณะของเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่ทำในทรายดิงแบบพลาสมา



นางสาวชุลีพรย์ ป่าไร่

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-2810-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHARACTERIZATION OF PLASMA NITRIDED H13 TOOL STEEL

Miss chuleeporn Paa-rai



สถาบันวิทยบริการ

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Metallurgical Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic year 2005

ISBN 974-53-2810-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การหาคุณลักษณะของเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่ทำในทรายดิงแบบ
พลาสมา

โดย

นางสาว ชุติพรย์ ป่าไร่


สาขาวิชา

วิศวกรรมโลหการ

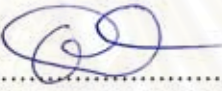
อาจารย์ที่ปรึกษา

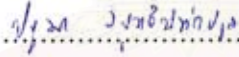
อาจารย์ ดร. ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหาร


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชاکกร จารุพิสิฐธร)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย)

สถาบันนวัตกรรมการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชวลีพรีย์ ปาไร : การหาคุณลักษณะของเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่ทำในทรายดิงแบบพลาสมา.
(CHARACTERIZATION OF PLASMA NITRIDED H13 TOOL STEEL) อ. ที่ปรึกษา :
อ. ดร. ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล, 135 หน้า. ISBN 974-53-2810-3.

เหล็กกล้าเครื่องมือ AISI H13 เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม แต่อย่างไรก็ตามเหล็กกล้าชนิดนี้ยังจำเป็นต้องทำกระบวนการเพิ่มความแข็งผิว เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของ ชิ้นส่วนที่ผลิตด้วยเหล็กกล้าชนิดนี้ ดังนั้นในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาคุณลักษณะของ เหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่ทำในทรายดิงแบบพลาสมา โดยชิ้นงานทดลองถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ปกติ และกลุ่มของเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่มีการสูญเสียคาร์บอนก่อนทำใน ทรายดิงแบบพลาสมา ชิ้นงานทั้งสองกลุ่มถูกทำในทรายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773 และ 823 K เป็น เวลา 10 และ 20 ชั่วโมง ดังนั้นในแต่ละกลุ่มจึงมีชิ้นงานกลุ่มละ 4 ชิ้นงาน ทำการหาคุณลักษณะของชิ้นงาน ทั้งหมดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แสง เครื่อง XRD แบบ GAXD มุม 1 และ 5 องศา และแบบ $\theta=2\theta$, EDS, EPMA และทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ จากการตรวจสอบพบว่าเวลา และอุณหภูมิมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความหนาของชั้นไนไตรด์ที่เกิดขึ้น คือ เมื่อเวลา หรืออุณหภูมิอย่างใด อย่างหนึ่งเพิ่มขึ้น ต่างทำให้ชั้นไนไตรด์หนาขึ้น โครงสร้างจุลภาคของชั้นไนไตรด์ของชิ้นงานปกติ ประกอบด้วยเฟส Fe_4N , Fe_3N และ CrN ทั้งทั้งชั้น ซึ่งแตกต่างจากโครงสร้างจุลภาคของชั้นไนไตรด์ของ ชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวที่สามารถแบ่งได้เป็นสองบริเวณคือ บริเวณใกล้กับผิวโครงสร้างจุลภาค เป็นสีขาว ประกอบด้วยเฟส Fe_4N , Fe_3N และบริเวณต่อมาเป็นบริเวณที่มีสีเทาดำ ประกอบด้วยเฟส Fe_4N , Fe_3N และ CrN บริเวณที่พบ CrN เป็นบริเวณที่มีโครเมียมคาร์ไบด์อยู่ก่อนการทำในทรายดิงแบบพลาสมา จึงเป็นไปได้ว่า CrN เกิดจากการที่อะตอมไนโตรเจนเข้าไปแทนที่อะตอมคาร์บอนในโครเมียมคาร์ไบด์ นอกจากนี้ชั้นไนไตรด์ที่ได้สามารถเพิ่มความแข็งผิวแก่ชิ้นงานได้ โดยทั้งเวลา อุณหภูมิ และการสูญเสีย คาร์บอนที่ผิวต่างมีผลต่อค่าความแข็งของชั้นไนไตรด์ทั้งสิ้น นั่นคือ เมื่อเวลา หรืออุณหภูมิ อย่างใดอย่างหนึ่ง เพิ่มขึ้น ความแข็งชั้นไนไตรด์จะลดลง และชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวทำในทรายดิงแบบพลาสมา ที่ 773K จะให้ค่าความแข็งผิวของชั้นไนไตรด์ต่ำกว่าในชิ้นงานปกติ แต่ชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว ทำในทรายดิงแบบพลาสมาที่ 823K จะให้ค่าความแข็งผิวของชั้นไนไตรด์สูงกว่าในชิ้นงานปกติ

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....

ลายมือชื่อ นิสิต..... *ชวลีพรีย์ ปาไร*.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... *ดร. ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล*.....

ปีการศึกษา2548.....

4670674121: MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORD: AISI H13 TOOL STEEL/ PLASMA NITRIDING/ DECARBURIZING

CHULEEPORN PAA-RAI : CHARACTERIZATION OF PLASMA NITRIDED H13 TOOL STEEL. THESIS ADVISOR : PATAMA VISUTTIPITUKUL, Ph.D., 135 pp. ISBN 974-53-2810-3.

AISI H13 tool steels, are widely used in industries, however, need to improve surface hardness for the performance. Thus the purpose of this study was to characterize plasma nitrided H13 tool steels. The specimens were divided into 2 groups, the group of non-decarburized and the group of decarburized H13 tool steels. Both of them were plasma nitrided at 773 and 823 K for 10 and 20 hours, thus each group has 4 samples. All of them were characterized by optical microscope, GAXD in XRD at 1° , 5° , and $\theta=2\theta$, EDS, EPMA and Vicker's microhardness testing. It was found that time and temperature affect on layer depth increasing, increased either time or temperature, increased layer depth. The microstructure of nitrided layers of non-decarburized group, dark gray, consisted of Fe_4N , Fe_3N and CrN all of the layers different from the others were separated to two areas, closed to the surface was the white area consisted of Fe_4N and Fe_3N , and the next one was the dark gray area consisted of Fe_4N , Fe_3N and CrN. The area, that found CrN, had chromium carbide before plasma nitriding process. It is possible that CrN formed by replacing of nitrogen atom at carbon atom in chromium carbide. Moreover, the surface hardness of both has increased after plasma nitriding, with effect of time, temperature, and decarburizing. Either increasing of time or temperature, the surface hardness has decreased. And at the same nitriding time and temperature, the surface hardness of 773K plasma nitrided decarburizing specimens were lower than the non-decarburizing specimens but the surface hardness of 823K plasma nitrided decarburizing specimens were higher than the non-decarburizing specimens.

Department...Metallurgical Engineering... Student's signature.....

Field of study..Metallurgical Engineering... Advisor's signature.....

Academic year2005.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบ
ขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. ปฐมา วิชาญพิทักษ์กุล ซึ่งได้กรุณาให้ความ
ช่วยเหลือและแนะนำแนวทางที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยด้วยดีมาตลอด

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำและ
ข้อคิดที่เป็นประโยชน์

ขอขอบพระคุณคุณวณกรณ์ คณินันท์รักษ์ ผู้ช่วยผู้จัดการประจำ Development
Thai Technical Center บริษัท ไทยปาร์คเกอร์ไรซิ่ง จำกัด ที่ช่วยอนุเคราะห์ให้ความช่วยเหลือใน
การตรวจสอบชิ้นงานด้วยเครื่อง electron probe microanalysis และบริษัท ไทยปาร์คเกอร์ไรซิ่ง
จำกัด ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

ขอบพระคุณ ดร. ปัญญวัชร วัชยาว สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย ขอบคุณนายทศพล ศรีรุจิราภาพงศ์ และนายกิตติพงษ์ อัครวิเศษ ที่ได้ให้คำปรึกษา
และให้ความช่วยเหลือการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ ขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ท้ายที่สุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และพี่สาว ที่คอยสนับสนุน ให้
กำลังใจมาตลอดจนสำเร็จการศึกษา และขอบคุณเพื่อน ๆ สำหรับความช่วยเหลือ กำลังใจดี ๆ ที่มี
ให้เสมอมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ง
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ท
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ข้อจำกัดของการวิจัย	3
1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 เหล็กกล้าเครื่องมือ AISI H13.....	5
2.2 การเพิ่มความแข็งผิวของเหล็กกล้าเครื่องมือ H13.....	8
2.3 การเคลื่อนไอบางเคมีและกายภาพ (CVD and PVD)	9
2.4 วิธีไนตรายดิง.....	12
2.5 ไนตรายดิงแบบพลาสมา	17
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	29
3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย	30
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	30
3.3 วิธีดำเนินการวิจัย	31
3.3.1 การเตรียมชิ้นงานก่อนทำไนตรายดิงแบบพลาสมา	31

3.3.2	ปรับปรุงผิวด้วยในทรายดิงแบบพลาสติก	31
3.3.4	ตรวจสอบเชิงคุณภาพบริเวณผิวชั้นงาน	34
3.3.5	ตรวจสอบความแข็งผิวชั้นงาน	35
3.3.6	วิเคราะห์ข้อมูล	35
บทที่ 4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผล	36
4.1	ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อชั้นงานที่ทำในทรายดิง	36
4.1.1	โครงสร้างจุลภาคและความหนาของชั้นงานที่ทำในทรายดิงแบบพลาสติก	36
4.1.2	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนาของชั้นในทรายด์	68
4.1.3	ผลของเวลาที่มีต่อความหนาของชั้นในทรายด์	69
4.1.4	กลไกการเกิดชั้นในทรายด์ของเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่ทำในทรายดิงแบบพลาสติก	70
4.2	ผลของคาร์บอนที่มีต่อชั้นงานที่ทำในทรายดิง	74
4.2.1	โครงสร้างจุลภาคและความหนาของชั้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนและทำในทรายดิงแบบพลาสติก	75
4.2.2	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนาของชั้นในทรายด์	109
4.2.3	ผลของเวลาที่มีต่อความหนาของชั้นในทรายด์	110
4.2.4	กลไกการเกิดชั้นในทรายด์ของเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่มีการสูญเสียคาร์บอนและทำในทรายดิงแบบพลาสติก	113
4.3	ผลการตรวจสอบความแข็งผิวชั้นงาน	119
4.3.1	ผลของเวลาในการทำในทรายดิงที่มีต่อความแข็งของชั้นในทรายด์	120
4.3.2	ผลของอุณหภูมิในการทำในทรายดิงที่มีต่อความแข็งของชั้นในทรายด์	122
4.3.3	ผลของปริมาณคาร์บอนที่ผิวที่มีต่อความแข็งของชั้นในทรายด์	123
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	127
5.1	สรุปผลการวิจัย	127
5.2	ข้อเสนอแนะ	128
	รายการอ้างอิง	129

ภาคผนวก.....133

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....135



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.2 ปัจจัยที่มีผลต่ออายุการใช้งานและข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการผลิตและของเหลือกล้า เครื่องมือ H13.....	7
2.3 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการเคลือบไอ	11
3.1 สภาวะในทรายดิงแบบพลาสมาสำหรับชิ้นงานแต่ละชิ้น	33
4.1 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานปกติ ที่ทำในทรายดิงแบบ พลาสมาที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 36ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้มุม $\theta=1^\circ$	38
4.2 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานปกติ ที่ทำในทรายดิงแบบ พลาสมาที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 36ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้มุม $\theta=5^\circ$	40
4.3 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานปกติ ที่ทำในทรายดิงแบบ พลาสมาที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 36ks ด้วย XRD วิธี $\theta=2\theta$	42
4.4 เปรียบเทียบความเข้มสัมพัทธ์ของเฟสต่าง ๆ ที่พบในชั้นผิวแข็งของชิ้นงานปกติที่ทำใน- ทรายดิงแบบพลาสมาที่ 773K เป็นเวลา 36ks เมื่อระยะที่ทำการตรวจสอบแตกต่างกัน	42
4.5 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานปกติ ที่ทำในทรายดิงแบบ พลาสมาที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 72ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้มุม $\theta=1^\circ$	45
4.6 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานปกติ ที่ทำในทรายดิงแบบ พลาสมาที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 72ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้มุม $\theta=5^\circ$	47
4.7 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานปกติ ที่ทำในทรายดิงแบบ พลาสมาที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 72ks ด้วย XRD วิธี $\theta=2\theta$	48
4.8 เปรียบเทียบความเข้มสัมพัทธ์ของเฟสต่าง ๆ ที่พบในชั้นผิวแข็งของชิ้นงานปกติที่ทำใน- ทรายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 72ks เมื่อระยะที่ทำการตรวจสอบแตกต่าง กัน	49
4.9 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานปกติ ที่ทำในทรายดิงแบบ พลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 36ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้มุม $\theta=1^\circ$	52
4.10 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานปกติ ที่ทำในทรายดิงแบบ พลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 36ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้มุม $\theta=5^\circ$	53
4.11 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานปกติ ที่ทำในทรายดิงแบบ พลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 36ks ด้วย XRD วิธี $\theta=2\theta$	55

ตาราง	หน้า
4.12 เปรียบเทียบความเข้มสัมพัทธ์ของเฟสต่าง ๆ ที่พบในชั้นผิวแข็งของชิ้นงานปกติที่ทำใน- ทรายดิงแบบพลาสติกที่ 823K เป็นเวลา 36ks เมื่อระยะที่ทำการตรวจสอบแตกต่างกัน56	
4.13 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานปกติ ที่ทำในทรายดิงแบบ พลาสติกที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้มุม $\theta=1^\circ$59	
4.14 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานปกติ ที่ทำในทรายดิงแบบ พลาสติกที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้มุม $\theta=5^\circ$61	
4.15 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานปกติ ที่ทำในทรายดิงแบบ พลาสติกที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72ks ด้วย XRD แบบ $\theta=2\theta$62	
4.16 เปรียบเทียบความเข้มสัมพัทธ์ของเฟสต่าง ๆ ที่พบในชั้นผิวแข็งของชิ้นงานปกติที่ทำใน- ทรายดิงแบบพลาสติกที่ 823K เป็นเวลา 72ks เมื่อระยะที่ทำการตรวจสอบแตกต่างกัน64	
4.17 ค่าความหนาเฉลี่ยของชั้นผิวแข็งของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ปกติ ทำพลาสติกใน ทรายดิงที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ68	
4.18 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำในทรายดิงแบบพลาสติกที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 36ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้มุม $\theta=1^\circ$79	
4.19 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำในทรายดิงแบบพลาสติกที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 36ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้มุม $\theta=5^\circ$80	
4.20 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำในทรายดิงแบบพลาสติกที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 36ks ด้วย XRD วิธี $\theta=2\theta$82	
4.21 เปรียบเทียบความเข้มสัมพัทธ์ของเฟสต่าง ๆ ที่พบในชั้นผิวแข็งของชิ้นงานที่มีการสูญเสีย คาร์บอน และทำในทรายดิงแบบพลาสติกที่ 773K เป็นเวลา 36ks เมื่อระยะที่ทำการ ตรวจสอบแตกต่างกัน83	
4.22 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน ที่ ทำในทรายดิงแบบพลาสติกที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 72ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้ มุม $\theta=1^\circ$86	
4.23 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำในทรายดิงแบบพลาสติกที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 72ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้มุม $\theta=5^\circ$87	

ตาราง	หน้า
4.24 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำในตรารายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 72ks ด้วย XRD วิธี $\theta=2\theta$	88
4.25 เปรียบเทียบความเข้มสัมพัทธ์ของเฟสต่าง ๆ ที่พบในชั้นผิวแข็งของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำในตรารายดิงแบบพลาสมาที่ 773K เป็นเวลา 72ks เมื่อระยะที่ทำการตรวจสอบแตกต่างกัน	90
4.26 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน ที่ทำในตรารายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 36ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้มุม $\theta=1^\circ$	92
4.27 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำในตรารายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 36ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้มุม $\theta=5^\circ$	94
4.28 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำในตรารายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 36ks ด้วย XRD วิธี $\theta=2\theta$	95
4.29 เปรียบเทียบความเข้มสัมพัทธ์ของเฟสต่าง ๆ ที่พบในชั้นผิวแข็งของชิ้นที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำในตรารายดิงแบบพลาสมาที่ 823K เป็นเวลา 36ks เมื่อระยะที่ทำการตรวจสอบแตกต่างกัน	97
4.30 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน ที่ทำในตรารายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้มุม $\theta=1^\circ$	98
4.31 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำในตรารายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้มุม $\theta=5^\circ$	100
4.32 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำในตรารายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72ks ด้วย XRD วิธี $\theta=2\theta$	103
4.33 เปรียบเทียบความเข้มสัมพัทธ์ของเฟสต่าง ๆ ที่พบในชั้นผิวแข็งของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำในตรารายดิงแบบพลาสมาที่ 823K เป็นเวลา 72ks เมื่อระยะที่ทำการตรวจสอบแตกต่างกัน	104
4.34 ค่าความหนาเฉลี่ยของชั้นผิวแข็งของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำพลาสมาในตรารายดิงที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ	109

ตาราง	หน้า
4.35 เปรียบเทียบค่า K_p ของชิ้นงานปกติกับชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน	114
4.36 ค่าแลทธิซพารามิเตอร์ของเฟสสารละลายของแข็งของเหล็กกับโครเมียมระนาบ (220) ในชิ้นงานปกติและชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว ทำในทรายคิงแบบพลาสติกที่ 823K เป็นเวลา 20 ชั่วโมง เทียบกับ JCPDF 06-0696 (Fe) และ 34-0396 (Fe-Cr)	117
4.37 ค่าแลทธิซพารามิเตอร์ของเฟสสารละลายของแข็งของเหล็กกับโครเมียมระนาบ (222) ในชิ้นงานปกติและชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว ทำในทรายคิงแบบพลาสติกที่ 823K เป็นเวลา 20 ชั่วโมง เทียบกับ JCPDF 06-0696 (Fe) และ 34-0396 (Fe-Cr)	117
4.38 ค่าความแข็งที่ผิวและบริเวณใจกลางชิ้นงานของชิ้นงานทั้งหมด	120



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.2 แผนภูมิ IT ของเหล็กกล้าเครื่องมือ H13	9
2.3 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบคืนตัวกับความแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือ H12 และ H13	10
2.4 แผนภูมิสมมูลของเหล็กกับไนโตรเจน	13
2.5 โครงสร้างของชั้นผิวแข็งที่เกิดจากไนไตรดิง	15
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งชั้นผิวแข็ง และระยะห่างจากผิวของชิ้นงานเหล็กกล้าผสมโครเมียมหลังผ่านกระบวนการไนไตรดิงที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 57.6ks (a) Fe-3Cr alloy, (b) Fe-Cr8 alloy, (c) Fe-13Cr alloy และ (d) Fe-19Cr alloy	15
2.7 ผลของไนไตรดิงต่อความแข็งแรงต่อความล้า	16
2.8 กลไกการสึกหรอที่พบในเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อนที่ผ่านและไม่ผ่านการไนไตรดิง ..	16
2.9 ความสัมพันธ์ของความหนาชั้นผิวแข็งและระยะเวลาของกระบวนการไนไตรดิงแต่ละวิธี ..	17
2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอ็อกซิไดซ์และอิเล็กตรอนกับความดันของพลาสมา	19
2.11 ภาพจำลองกระบวนการไนไตรดิงแบบพลาสมา [10]	21
2.12 กลไกการคายประจุของอ็อกซิไดซ์และอิเล็กตรอน	21
2.13 ประเภทของการคายประจุแบ่งตามแรงดันและกระแสไฟฟ้า	22
2.14 การลดลงของแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด	22
2.15 ชิ้นงานภายในเตาสัญญากาศระหว่างการทำไนไตรดิงแบบพลาสมา	23
2.16 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการไนไตรดิงแบบพลาสมา[13]	24
2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นผิวแข็งกับระยะเวลา ของกระบวนการไนไตรดิงแบบพลาสมาและแบบก๊าซ	26
2.18 ความสัมพันธ์ของความหนาชั้นผิวแข็งกับรากที่สองของระยะเวลาการทำไนไตรดิงของชิ้นงานที่ผ่านการทำไนไตรดิงแบบพลาสมาที่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (DC glow discharge plasma)	28
3.1 เครื่องมือไนไตรดิงแบบพลาสมา	29
3.2 ขั้นตอนกระบวนการอบชุบของชิ้นงานก่อนเข้าสู่กระบวนการไนไตรดิงแบบพลาสมา	31
3.3 การวางชิ้นงานในการหล่อเรซินแบบ hot mount	32

ภาพประกอบ	หน้า
3.4 ตัวอย่างการวัดความหนาชั้นในทรายค้ำของชิ้นงาน H13 ปกติ จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 100 เท่า ของชิ้นงานที่ทำในทรายค้ำแบบพลาสติก33	
4.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน H13 ปกติ ที่ทำในทรายค้ำแบบพลาสติกที่อุณหภูมิ 773 K เป็นเวลา 72 ks ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 100 เท่า.....36	
4.2 ผล XRD แบบ GAXD ก) $\theta = 1^\circ$ ข) 5° และ ค) 2θ ของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ปกติที่ทำในทรายค้ำแบบพลาสติกที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 36 ks.....37	
4.3 ผล XRD ที่ GAXD $\theta = 1^\circ, 5^\circ$, และ 2θ ของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ปกติที่ทำในทรายค้ำแบบพลาสติกที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 72 ks44	
4.4 ผล XRD ที่ GAXD $\theta = 1^\circ, 5^\circ$, และ 2θ ของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ปกติที่ทำในทรายค้ำแบบพลาสติกที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 36 ks51	
4.5 ผล XRD ที่ GAXD $\theta = 1^\circ, 5^\circ$, และ 2θ ของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ปกติที่ทำในทรายค้ำแบบพลาสติกที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72 ks58	
4.6 ผลการตรวจสอบด้วย EDS ของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ปกติที่ทำในทรายค้ำแบบพลาสติกที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72 ks ก) ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ข) ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงระยะที่ทำการตรวจสอบ ค) เส้นกราฟแสดงการกระจายของธาตุ Fe Cr และ C.....65	
4.8 เปรียบเทียบความหนาชั้นผิวแข็งของชิ้นงาน H13 ปกติ จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 100 เท่า ระหว่างชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิในทรายค้ำแบบพลาสติก 773K กับ 823K เป็นเวลา 36 ks.....70	
4.9 เปรียบเทียบความหนาชั้นผิวแข็งของชิ้นงาน H13 ปกติ จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 100 เท่า ระหว่างชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิในทรายค้ำแบบพลาสติก 773K กับ 823K เป็นเวลา 72 ks71	
4.10 เปรียบเทียบความหนาชั้นผิวแข็งของชิ้นงาน H13 ปกติ จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 100 เท่า ระหว่างชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิในทรายค้ำแบบพลาสติก 773K เป็นเวลา 36 กับ 72 ks71	
4.11 เปรียบเทียบความหนาชั้นผิวแข็งของชิ้นงาน H13 ปกติ จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 100 เท่า ระหว่างชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิในทรายค้ำแบบพลาสติก 823K เป็นเวลา 36 กับ 72 ks72	

ภาพประกอบ	หน้า
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของเวลากับความหนาของชั้นไนไตรด์ในชิ้นงานปกติที่ได้จากกระบวนการไนไตรดิงแบบพลาสมา	73
4.13 ปริมาณคาร์บอนจากการคำนวณ ที่ผิวจนถึงในกลางชิ้นงานภายหลังการทำให้เป็นออกซิเตนไนท์ที่อุณหภูมิ 1223K เป็นเวลา 2.4 ks.....	75
4.14 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน H13 ที่มีการสูญเสียคาร์บอนบริเวณผิว และทำไนไตรดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823 K เป็นเวลา 36 ks ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 100 เท่า	76
4.15 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นผิวแข็ง ที่ได้จากการทำไนไตรดิงแบบพลาสมาในชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ปกติ กับชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว	77
4.16 ผล XRD ที่ GAXD $\theta = 1^\circ, 5^\circ$, และ 2θ ของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่มีการสูญเสียคาร์บอนและทำไนไตรดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 36 ks.....	78
4.17 ผล XRD ที่ GAXD $\theta = 1^\circ, 5^\circ$, และ 2θ ของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่มีการสูญเสียคาร์บอนและทำไนไตรดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 72 ks.....	85
4.18 ผล XRD ที่ GAXD $\theta = 1^\circ, 5^\circ$, และ 2θ ของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่มีการสูญเสียคาร์บอนและทำไนไตรดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 36 ks.....	91
4.19 ผล XRD ที่ GAXD $\theta = 1^\circ, 5^\circ$, และ 2θ ของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่มีการสูญเสียคาร์บอนและทำไนไตรดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72 ks.....	99
4.20 ผลการตรวจสอบจุดสีดำในชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำไนไตรดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72 ks ด้วย EDS ก) ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ข) ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงระยะที่ทำการตรวจสอบ ค) เส้นกราฟแสดงการกระจายของธาตุ Fe Cr และ C	106
4.22 เปรียบเทียบความหนาชั้นผิวแข็งของชิ้นงาน H13 ที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว ด้วยภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 100 เท่า ระหว่างชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิไนไตรดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773 K กับ 823K เป็นเวลา 36 ks.....	111
4.23 เปรียบเทียบความหนาชั้นผิวแข็งของชิ้นงาน H13 ที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว ด้วยภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 100 เท่า ระหว่างชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิไนไตรดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773K กับ 823K เป็นเวลา 72 ks	112

ภาพประกอบ	หน้า
4.24 เปรียบเทียบความหนาชั้นผิวแข็งของชิ้นงาน H13 ที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว ด้วยภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 100 เท่า ระหว่างชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิในทรายดิงแบบพลาสติก 773K เป็นเวลา 36 และ 72 ks.....	112
4.25 เปรียบเทียบความหนาชั้นผิวแข็งของชิ้นงาน H13 ที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว ด้วยภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 100 เท่า ระหว่างชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิในทรายดิงแบบพลาสติก 823K เป็นเวลา 36 และ 72 ks.....	113
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของเวลากับความหนาของชั้นในทรายดีในชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน ที่ได้จากการบวนการในทรายดิงแบบพลาสติก.....	114
4.27 เปรียบเทียบขดกราฟของเฟสสารละลายของแข็งของเหล็กกับโครเมียม ในชิ้นงานปกติกับชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน ที่ทำพลาสติกในทรายดิงที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72 ks ก) ระบาย 220 ข) ระบาย 222.....	116
4.28 เปรียบเทียบแบบจำลองกลไกระหว่างการทำให้เป็นอสเทนไนท์ที่อุณหภูมิ 1224K เป็นเวลา 40 นาที ของชิ้นงานปกติกับชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน.....	119
4.29 เปรียบเทียบผลระหว่างชิ้นงานที่ทำในทรายดิงแบบพลาสติกที่อุณหภูมิต่างกัน แต่ใช้ระยะเวลาในการกระบวนการเท่ากัน.....	122
4.30 เปรียบเทียบผลระหว่างชิ้นงานที่ใช้ระยะเวลาในการกระบวนการในทรายดิงแบบพลาสติกต่างกัน แต่ใช้อุณหภูมิในการกระบวนการเท่ากัน.....	124
4.31 เปรียบเทียบผลระหว่างชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวกับชิ้นงานปกติ ทำในทรายดิงแบบพลาสติกที่สถานะเดียวกัน.....	126

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เหล็กกล้าเครื่องมือ AISI H13 นิยมใช้ผลิตเป็นเครื่องมือที่ต้องสัมผัสกับโลหะร้อนในขบวนการผลิต เช่น แบบหล่อ โลหะ ใต้แบบ เหล็กแกนแบบ แม่พิมพ์การทุบขึ้นรูป แม่พิมพ์การอัดขึ้นรูป เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 เป็นเหล็กกล้าที่มีธาตุผสมสูงสามารถทำให้แข็งขั้นทุติยภูมิ (secondary hardening) คือสามารถเพิ่มความแข็งภายหลังการขึ้นรูปได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน ทำให้สามารถคงความแข็งแรงและความแข็งที่อุณหภูมิสูงจนถึง 650 องศาเซลเซียส มีสมบัติต้านทานแรงกระแทกได้ดีจนถึงอุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และมีความต้านทานต่อการเกิดการคืนตัว (temper) ที่อุณหภูมิสูง[1,2] แต่โดยทั่วไปเมื่อใช้งานวัสดุภายใต้สภาวะที่มีแรงกระทำและอุณหภูมิสูง รวมทั้งสภาพแวดล้อมที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนได้ดี ผิวของอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนของเครื่องจักรจะเป็นส่วนที่รับแรงเค้นมากกว่าเนื้อวัสดุภายในจึงทำให้ผิวสัมผัสมีแนวโน้มสึกหรอเร็วกว่าส่วนอื่น การเพิ่มความแข็งด้วยกรรมวิธีการอบชุบทางความร้อน (heat treatment) หรือการปรับปรุงผิว (surface modification) ให้กับผิววัสดุซึ่งมีผลให้สมบัติต้านทานการสึกหรอ (wear) ของวัสดุเพิ่มขึ้นตาม เป็นการยืดอายุการใช้งานของเครื่องมือ สำหรับกระบวนการปรับปรุงความแข็งผิวที่นิยมใช้ในเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 นอกจากการอบชุบทางความร้อนแล้วยังมีอีกหลายวิธี ได้แก่ การเคลือบไอทางกายภาพ การเคลือบไอทางเคมี และกระบวนการไนโตรยดิง เป็นต้น[1,3]

การปรับปรุงผิววิธีการหนึ่งที่นิยมใช้งานในอุตสาหกรรม คือ กระบวนการไนโตรยดิง เป็นกระบวนการปรับปรุงผิวที่มีวัตถุประสงค์ เพื่อเพิ่มปริมาณไนโตรเจนบริเวณผิวในโตรเจนที่แพร่เข้าไปในเหล็กจะรวมตัวกับเหล็กและธาตุผสมอื่น ๆ ภายในเหล็กกล้าเป็นสารประกอบไนไตรด์ เช่น เหล็กไนไตรด์ และโครเมียมไนไตรด์ ซึ่งทำให้ความแข็งผิว ความสามารถต้านทานการสึกหรอและการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น รวมทั้งช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานการล้า[4,5] นอกจากนี้ไนโตรยดิงเป็นกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิต่ำจึงพบการบิดเบี้ยวของชิ้นงานน้อย และมีความต้านทานต่อการเกิดการคืนตัวดี [6] ไนโตรยดิงนั้นสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ แก๊สไนโตรยดิง ไนโตรยดิงแบบอ่างเกลือ การฝังตัวของไนโตรเจนอออน และไนโตรยดิงแบบพลาสมาหรืออออนไนโตรยดิงซึ่งเป็นวิธีที่เลือกใช้ในการวิจัยครั้งนี้

ในตรายคิงแบบพลาสมา เป็นกระบวนการที่อาศัยความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้า ทำให้เกิดในโตรเจนที่ถูกปล่อยเข้าไปภายในเตาสุญญากาศแตกตัวเป็นไอออนที่มีประจุบวก และประจุลบหรืออิเล็กตรอน เรียกภาวะนี้ว่า โกลดิสชาร์ต (glow discharge) หรือพลาสมา จากนั้นไอออนประจุบวกจะเคลื่อนที่ไปยังผิวชิ้นงานด้วยพลังงานศักย์ที่สูงมาก ทำให้สิ่งสกปรก อะตอมบริเวณนั้นหลุดออก และถ่ายเทพลังงานให้แก่ผิวชิ้นงานมีผลให้ผิวชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะเดียวกันอะตอมในโตรเจนจะแพร่เข้าไปยังใต้ผิว[7] ภาวะโกลดิสชาร์ตนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีความเข้มกระแสสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน ดังนั้นชิ้นงานที่ทำในตรายคิงแบบพลาสมาจึงมีชั้นผิวแข็งที่ค่อนข้างสม่ำเสมอแม้บนชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน นอกจากนี้ในตรายคิงแบบพลาสมาเป็นกระบวนการที่ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะ ใช้เวลาน้อย และได้ผิวชิ้นงานที่สะอาด ต่างจากกระบวนการในตรายคิงแบบเดิม[6,10,11]

การปรับปรุงผิวเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ด้วยกระบวนการในตรายคิงแบบพลาสมาสามารถเพิ่มความแข็งผิว ความต้านทานการสึกหรอ และความต้านทานการกัดกร่อน ช่วยยืดอายุการใช้งานของเครื่องมือที่ผลิตด้วยเหล็กกล้าชนิดนี้ได้ ทั้งนี้ในตรายคิงแบบพลาสมายังเป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่าย โครงสร้างของชั้นผิวแข็งมีความหลากหลายเพราะมีไอออนหลายแบบและในโตรเจนที่อยู่กันอย่างหนาแน่นบริเวณผิวชิ้นงาน ทำให้การแพร่เข้าไปภายในเนื้อพื้นเร็วกว่าในตรายคิงแบบเดิม นอกจากนี้กระบวนการนี้ยังสามารถใช้งานได้จริงในระดับโรงงานอุตสาหกรรม[3-8] หากมีการศึกษาเทคโนโลยีในการเกิดชั้นผิวแข็งซึ่งได้จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและส่วนผสมทางเคมี จะทำให้การนำในตรายคิงแบบพลาสมาไปใช้งานกับเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางนั้นมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

อย่างไรก็ตามการแพร่ยังคงเป็นกลไกสำคัญที่ควบคุมการเกิดชั้นผิวแข็ง ที่ได้จากกระบวนการในตรายคิงแบบพลาสมา ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการแพร่ ได้แก่ เวลา และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามชนิดของวัสดุและอุณหภูมิ นอกจากนี้แม้ว่าจะมีหลายงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่ทำในตรายคิง [3,12,25,34] แต่ยังไม่พบงานวิจัยใดที่ทำการศึกษาผลของการสูญเสียคาร์บอนที่มีต่อชั้นผิวแข็งที่เกิดขึ้น ดังนั้นเวลา อุณหภูมิ และการสูญเสียคาร์บอนจึงเป็นปัจจัยที่งานวิจัยนี้เลือกศึกษา

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาโครงสร้างบริเวณผิวของเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่ทำในทรายดิงแบบพลาสติก
- 1.2.2 ศึกษาผลของอุณหภูมิ เวลา และการสูญเสียคาร์บอน (decarburizing) ที่มีต่อโครงสร้างและความหนาของชั้นผิวแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่ทำในทรายดิงแบบพลาสติก
- 1.2.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิ เวลา และการสูญเสียคาร์บอนที่มีต่อความแข็งของชั้นผิวแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่ทำในทรายดิงแบบพลาสติก

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 วิเคราะห์โครงสร้างบริเวณผิวของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่ทำในทรายดิงแบบพลาสติก
- 1.3.2 วัดความแข็ง และความลึกของชั้นผิวแข็งของชิ้นงานที่ทำในทรายดิงแบบพลาสติก
- 1.3.3 เปรียบเทียบโครงสร้าง ความแข็งและความลึกชั้นผิวแข็งของชิ้นงานที่ทำในทรายดิงแบบพลาสติกที่อุณหภูมิระหว่าง 773 ถึง 823 K เป็นเวลา 36 ถึง 72 ks
- 1.3.4 เปรียบเทียบโครงสร้าง ความแข็ง และความลึกชั้นผิวแข็งของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำในทรายดิงแบบพลาสติก

1.4 ข้อยกเว้นของการวิจัย

เนื่องด้วยข้อจำกัดในด้านเครื่องมือเกี่ยวกับในทรายดิงแบบพลาสติกในประเทศ ดังนั้นขั้นตอนการทำในทรายดิงแบบพลาสติกสำหรับทุกชิ้นงานในการวิจัยนี้ จึงได้ดำเนินการที่ประเทศญี่ปุ่น

1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

เหล็กกล้าเครื่องมือ AISI H13 ในทรายดิงแบบพลาสติกหรืออออนในทรายดิง และการสูญเสียคาร์บอน

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างของชั้นผิวแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่ทำในทรายดิงแบบพลาสติก
- 1.6.2 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิและเวลา ที่มีต่อโครงสร้างชั้นผิวแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่ทำในทรายดิงแบบพลาสติก
- 1.6.3 ผลของการสูญเสียคาร์บอนที่มีต่อ โครงสร้าง ความแข็ง และความลึกชั้นผิวแข็งของชิ้นงานที่ทำในทรายดิงแบบพลาสติก
- 1.6.4 ผลวิเคราะห์ที่ได้สามารถนำไปออกแบบกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรมได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เหล็กกล้าเครื่องมือ AISI H13

เหล็กกล้าสำหรับการทำงานร้อนจัดอยู่ในเหล็กกล้ากลุ่ม H ตามการแบ่งกลุ่มของ AISI เป็นเหล็กกล้าที่มีประสิทธิภาพในการต้านทานการอ่อนตัว (Softening) ระหว่างการใช้งาน หรือการให้ความร้อนซ้ำ ๆ ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจัดเป็นสมบัติที่จำเป็นของวัสดุที่ใช้ในงานร้อนหรือเป็นแม่พิมพ์งานหล่อวัสดุอื่น ๆ ทั้งนี้เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อนควรมีสมบัติที่สำคัญ ดังนี้

- 1) สามารถต้านทานการเปลี่ยนรูปที่อุณหภูมิการทำงานร้อน
- 2) สามารถรับการเปลี่ยนแปลงทางกลและอุณหภูมิอย่างรุนแรงได้ (โดยเฉพาะถ้ามีการใช้น้ำในการหล่อเย็น) เพื่อเพิ่มสมบัตินี้เหล็กกล้าควรมีคาร์บอนน้อยลง
- 3) สามารถต้านทานการกัดเซาะ (Erosion) และการสึกหรอที่อุณหภูมิสูง
- 4) สามารถต้านทานการเปลี่ยนรูปเนื่องจากความร้อน หรือการบิดตัว

เหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่ม H สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มย่อยตามธาตุผสมที่ใช้เพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิสูง นั่นคือ

- กลุ่มเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อนผสมโครเมียม(Cr)

เป็นเหล็กกล้าที่ผสมโครเมียมไม่น้อยกว่า 3.25% มีคาร์บอนต่ำ (0.35-0.4%) และผสมธาตุอื่น ๆ ที่สำคัญคือ ซิลิกอน (Si) โมลิบดีนัม (Mo) และ วาเนเนียม (V) อีกเล็กน้อย เหล็กในกลุ่มนี้มีหลายชั้นคุณภาพ ตั้งแต่ H10-H19 เป็นเหล็กที่มีความสามารถในการชุบแข็งสูง สามารถชุบแข็งด้วยการเป่าลมและน้ำมัน โดยขนาดของชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยและได้ความแข็งระหว่าง 40-55 HRC

- กลุ่มเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อนผสมทังสแตน(W)(Tungsten base)

คือเหล็กกล้าเครื่องมือในชั้นคุณภาพ H21-H26 เป็นเหล็กคาร์บอนต่ำ 0.25-0.45% ผสมทังสแตนไม่น้อยกว่า 9% และโครเมียมตั้งแต่ 2-12% ทำให้สามารถรักษาความแข็งไว้ได้ดีที่

อุณหภูมิสูง แต่ความเหนียวที่อุณหภูมิห้องจะต่ำกว่าเหล็กในกลุ่มแรกโดยมีความแข็งเท่า ๆ กัน มีความสามารถในการชุบแข็งอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถชุบคมและน้ำมันได้ดี

- *กลุ่มเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อนผสม โมลิบดีนัม (Mo) (Molybdenum base)*

เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือที่อยู่ในชั้นคุณภาพ H41-H43 มีคาร์บอนผสม 0.5-0.6% ผสม โมลิบดีนัมประมาณ 8% โครเมียม 4% รวมทั้งทั้งสแตนเลสและวานาเดียมอีกเล็กน้อย มีสมบัติใกล้เคียงกับกลุ่มที่สองแต่เหล็กกลุ่มนี้มีความต้านทานต่อการแตกร้าวในขณะที่ใช้งานร้อนเย็น สลับกันดีกว่า ราคาถูกกว่า แต่มีข้อเสียที่มีการสูญเสียคาร์บอนในขณะที่อบชุบได้มากกว่า [2,14,15]

ตารางที่ 2.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของตัวอย่างเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 และ ตารางที่ 2.2 แสดงปัจจัยที่มีผลต่ออายุการใช้งานและข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการผลิตของเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 [15]

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมือ H13

AISI Type	UNS No.	Composition (a), %								
		C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V	Co
H13	T20813	0.32-0.45	0.20-0.50	0.80-1.20	4.75-5.50	0.30max	1.10-1.75	...	0.80-1.20	...

(a) 0.25%max Cu, 0.03%max P, and 0.03%max S; where specified, sulfur may be increased to 0.06 to 0.15% to improve machinability.

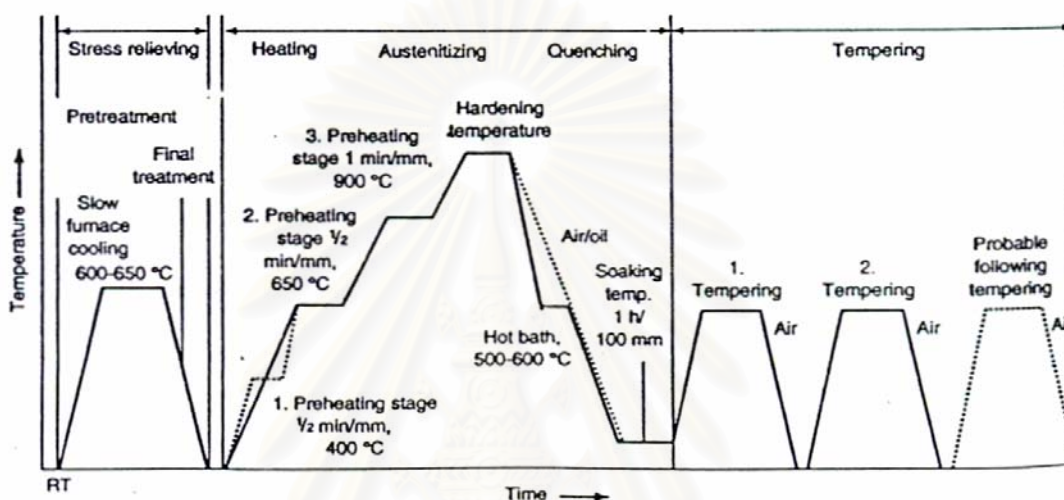
เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อนผสมโครเมียมเช่น H11 H12 และ H13 มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในงานทุบขึ้นรูปและแบบหล่อโลหะ การพัฒนาระยะแรกมีจุดประสงค์เพื่อใช้เป็นแบบหล่อโลหะอะลูมิเนียม ดังนั้นธาตุผสมที่เติมในเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อนกลุ่มนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อเพิ่มความแข็งได้ด้วยการเย็นตัวในอากาศจากอุณหภูมิออสเทนไนท์ซิง โดยขนาดมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เกิดสเกลระหว่างการเย็นตัวในอากาศน้อย มีความต้านทานการกัดเซาะซึ่งเกิดจากการเติมอะลูมิเนียม มีความต้านทานต่อความล้าทางความร้อน สำหรับเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ซึ่งมีปริมาณ Si สูง ช่วยปรับปรุงความต้านทานต่อออกซิเดชันที่อุณหภูมิออสเทนไนท์ซิง (1010 °C) และลักษณะเด่นจากการมีโครเมียมผสมอยู่คือ มีความแกร่งและความต้านทานต่อแรงกระแทก (Shock resistance) สูง ทำให้เหมาะกับการใช้ทำงานร้อนส่วนใหญ่มากกว่าเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มอื่น โดยเฉพาะเมื่อแม่พิมพ์ต้องหล่อเย็นด้วยน้ำหรือสารหล่อเย็นอื่นๆ (flushing media)

ตารางที่ 2.2 ปัจจัยที่มีผลต่ออายุการใช้งานและข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการผลิตและของเหล็กกล้า
เครื่องมือ H13

Factor	H13
Major factors	
Wear resistance	3
Toughness	9
Hot hardness	6
Minor factors	
Usual working hardness, HRC	40-53
Depth of hardening	D
Finest grain size at full hardness, Shepherd standard	8
Surface hardness as-quenched, HRC	51-54
Core hardness (25mm, or 1 in., Diam round), HRC	51-54
Manufacturing factors	
Availability	4
Cost	1
Machinability	8
Quenching medium	A
Hardening temperature, °C	995-1040
Dimensional change on hardening	L
Safety on hardening	H
Susceptibility to decarburization	H
Approximate hardness as rolled or forged, HB	500
Annealed hardness, HB	192-229
Annealing temperature, °C	870-900
Tempering range, °C	540-650
Forging temperature, °C	1065-1150

2.2 การเพิ่มความแข็งผิวของเหล็กกล้าเครื่องมือ H13

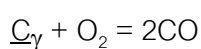
การอบชุบทางความร้อนก่อนนำเหล็กกล้าเครื่องมือไปใช้งาน เป็นสิ่งที่จำเป็น ทั้งนี้เพื่อให้ได้สมบัติหลายประการตามความต้องการอยู่ร่วมกัน รูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างขั้นตอนการอบชุบทางความร้อนของเหล็กเครื่องมือทำงานร้อน



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการอบชุบทางความร้อนเพื่อเพิ่มความแข็งของเหล็กกล้าทำงานร้อน

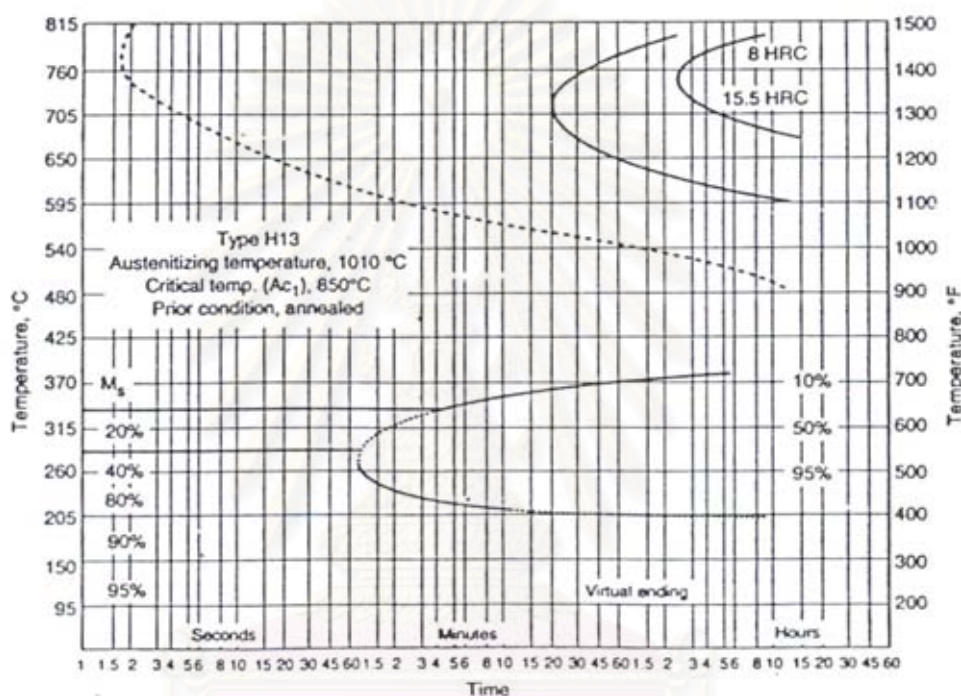
รูปที่ 2.2 แสดงแผนภูมิ: IT (Isothermal diagram) ของเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 และนอกจากนี้ Smith [14] ยังได้กล่าวถึงเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่ทำการอบคืนตัวสองครั้งจะสามารถคงรูปร่าง และขนาดได้สูงที่สุด ดังกราฟในรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับอุณหภูมิการอบคืนตัวของเหล็กกล้าเครื่องมือ H12 และ H13 จะสังเกตได้ว่าเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 มีความต้านทานต่อการอ่อนตัวดีกว่าเล็กน้อย เพราะสามารถคงความแข็ง 45 Rockwell C หลังการทำเทมเปอร์ที่ 130 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

การอบชุบทางความร้อนหากไม่มีการควบคุมบรรยากาศภายในเตาให้เหมาะสม อาจทำให้เกิดการสูญเสียคาร์บอนได้ โดยคาร์บอนจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนภายในบรรยากาศในเตาตามปฏิกิริยาเคมี



เมื่อปริมาณคาร์บอนในเนื้อเหล็กลดลงจะมีผลให้ปริมาณเฟอร์ไรต์บริเวณนั้นเพิ่มขึ้น ความแข็งผิวลดลง [4]

แม้ว่าเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน จะได้รับการเพิ่มความแข็งด้วยวิธีการชุบแข็งแบบต่าง ๆ ดังที่กล่าวไปแล้ว แต่การนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมเป็นแม่พิมพ์ และแบบในการขึ้นรูปบางกรณีต้องการความแข็งผิวที่มากยิ่งขึ้น รวมทั้งต้องการความทนทานต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นการเพิ่มความแข็งผิวด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การสร้างชั้นผิวแข็งบนผิวชิ้นงาน จึงเป็นสิ่งที่จำเป็น ปัจจุบันมีหลากหลายกระบวนการทั้ง การเคลือบไอทางเคมี การเคลือบไอทางกายภาพ และไนไตรดิง เป็นต้น

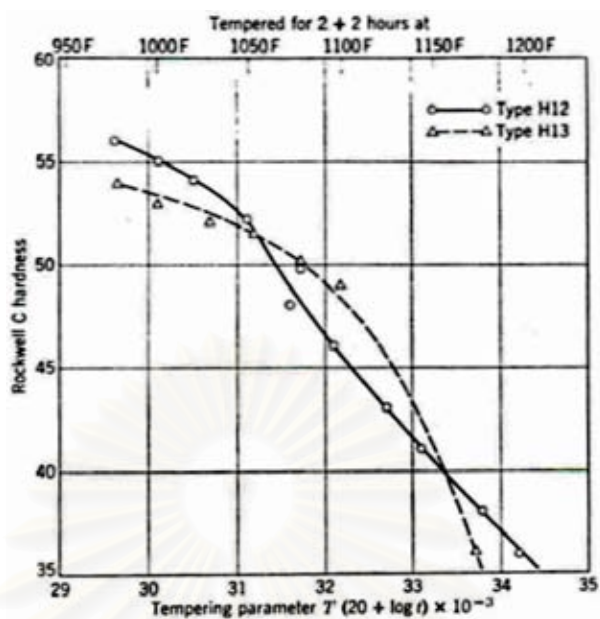


รูปที่ 2.2 แผนภูมิ IT ของเหล็กกล้าเครื่องมือ H13

2.3 การเคลือบไอทางเคมีและกายภาพ (CVD and PVD)

การเคลือบไอ เป็นกระบวนการหนึ่งที่น่าสนใจใช้ปรับปรุงความแข็งผิวสำหรับเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 การเคลือบไอสามารถได้เป็น 2 ประเภทหลัก [6] คือ

- การเคลือบไอทางเคมี (Chemical Vapor Deposition: CVD) เป็นการเคลือบวัสดุของแข็งลงบนวัสดุที่มีอุณหภูมิสูง โดยเริ่มจากสถานะแก๊สและอาศัยปฏิกิริยาเคมี
- การเคลือบไอทางกายภาพ (Physical Vapor Deposition: PVD) ต้องมีการสร้างไอของวัสดุโดยการระเหย หรือสปัตเตอริง จากนั้นจึงเกิดการกลั่นตัวของไอดกลงมาบนวัสดุพื้น



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบคืนตัวกับความแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือ H12 และ H13

ทั้งกระบวนการ CVD และ PVD ต่างมีทั้งข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป ดังตารางที่ 2.3 นอกจากนี้กระบวนการทั้งสองยังมีข้อจำกัดในการใช้งาน เช่น ไม่สามารถเคลือบชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ (Line of sight) ความแข็งของชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นแตกต่างจากความแข็งของเนื้อพื้นมาก ชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นมีรูพรุน และด้วยข้อจำกัดของการแพร่ในกระบวนการที่อาศัยการตกกระทบของไอ ทำให้การเกาะติดของชั้นเคลือบแข็งแรงน้อยกว่าการปรับปรุงผิวที่อาศัยการแพร่เป็นหลัก [20-22]

งานวิจัยจำนวนมากไม่น้อยได้ศึกษาเกี่ยวกับ การประยุกต์ใช้การเคลือบไอกับเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ได้แก่ งานวิจัยของ M.B. Karami[§] และ H. Sert [21] ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเคลือบ TiN บนแม่พิมพ์การดึงขึ้นรูปของอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการ PVD พบว่าชั้นเคลือบดังกล่าวช่วยปรับปรุงความสามารถด้านทานการสึกหรอ สมบัติทางกล (เช่น ความสามารถในการรับแรงแบบแบริง (load-bearing capacity) ความแข็งแรง) และช่วยรักษาเสถียรภาพของความสามารถด้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน แต่การสร้างชั้นเคลือบ TiN บนผิวชิ้นงานที่ทำในทรายดิ่งมาก่อนทำให้เกิดพันธะระหว่างชั้นเคลือบที่ไม่แข็งแรงเนื่องจากชั้นสารประกอบ ชั้นเคลือบมีรูพรุนทั้งภายในชั้นเคลือบ และระหว่างรอยต่อ

ตารางที่ 2.3 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการเคลือบไอ

	ข้อดี	ข้อเสีย
CVD	ได้ผิวเคลือบเรียบสม่ำเสมอ ชั้นเคลือบมีการยึดเกาะดีโดยตลอด มีอุปกรณ์ที่ไม่ยุ่งยาก [30]	ใช้อุณหภูมิสูง 970 – 1470 K (700 – 1200 °C) เมื่อใช้งานกับเหล็กกล้าทำให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างที่อบชุบมาแล้ว ชิ้นงานอาจเกิดปัญหาบิดเบี้ยวได้ อัตราการเคลือบต่ำ
PVD	ใช้อุณหภูมิต่ำ 470 – 770 K (200 – 500 °C)	มีค่าใช้จ่ายสูง อุปกรณ์มีความยุ่งยาก

เทคนิค Laser injection มีการศึกษาโดย S.W. Huang, M. Samandi, และ M. Brandt [26] ซึ่งทำการศึกษาลำดับชั้นเคลือบทั้งสแตนเลสหรือนิกเกิลคาร์ไบด์ ในขณะที่ S.V. Shah และ N.B. Dahotre [27] ศึกษาชั้นเคลือบของวานาเดียมคาร์ไบด์ซึ่งสร้างขึ้นด้วยเทคนิค Laser injection บนผิวของเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 พวกเขาพบว่าเทคนิค Laser injection เป็นวิธีที่ก่อให้เกิดความร้อนแก่ชิ้นงานน้อยและสามารถควบคุมได้ มีอัตราการเย็นตัวเร็ว ชิ้นงานมีการบิดตัวน้อยเพราะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้อย สามารถเลือกเคลือบเฉพาะจุดได้ เกิดพันธะโลหะระหว่างชั้นเคลือบกับเนื้อพื้น แต่ความหนาของชั้นเคลือบที่ได้จากเทคนิคนี้ค่อนข้างบาง มักต้องมีการเคลือบสารที่ช่วยการดูดซับพลังงาน เช่น กราฟไฟท์ ก่อนทำ laser injection และมีค่าใช้จ่ายสูง[4]

เทคนิค ion implantation มีการศึกษาโดย J. Yang และ T. Zhang [28] ศึกษาชั้นเคลือบทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์ที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิค ion implantation บนผิวของเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 พบว่าชั้นเคลือบที่ได้มีความหนามากกว่าไมครอน ขนาดเกรนของเนื้อพื้นบริเวณผิวเล็กน้อยจนบางครั้งเกิดเกรนที่มีรูปร่างแบบออสเทนไนต์ และด้วยเทคนิคเดียวกัน K.G. Kostov และคณะ [29] ได้ใช้สภาวะพลาสมาช่วยในกระบวนการ เรียกกระบวนการนี้ว่า Plasma immersion ion implantation: PIII เพื่อสร้างชั้นเคลือบในตารางบนโลหะผสมต่าง ๆ จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปผ่านกระบวนการในตารางแบบพลาสมาที่อุณหภูมิต่ำ ผลการทดลองพบว่าสำหรับเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 การใช้กระบวนการทั้งสองร่วมกันความแข็งของชิ้นงานเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่ไม่เพิ่มขึ้นหากใช้กระบวนการ PIII เพียงกระบวนการเดียว

และกรรมวิธีบอแรกซ์หลอมเหลวมีการศึกษาโดย C. K. N. Oliverira, R. M. Muñoz Riofano, และ L. C. Casteletti [31] ทำการศึกษาการสร้างขึ้นของคาร์ไบด์บนเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 และ D2 ด้วยกรรมวิธีบอแรกซ์หลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1020°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าชั้นเคลือบบนผิวของเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 มีความหนา 9 ไมครอน และมีความแข็ง 2600 HV_{0.05}

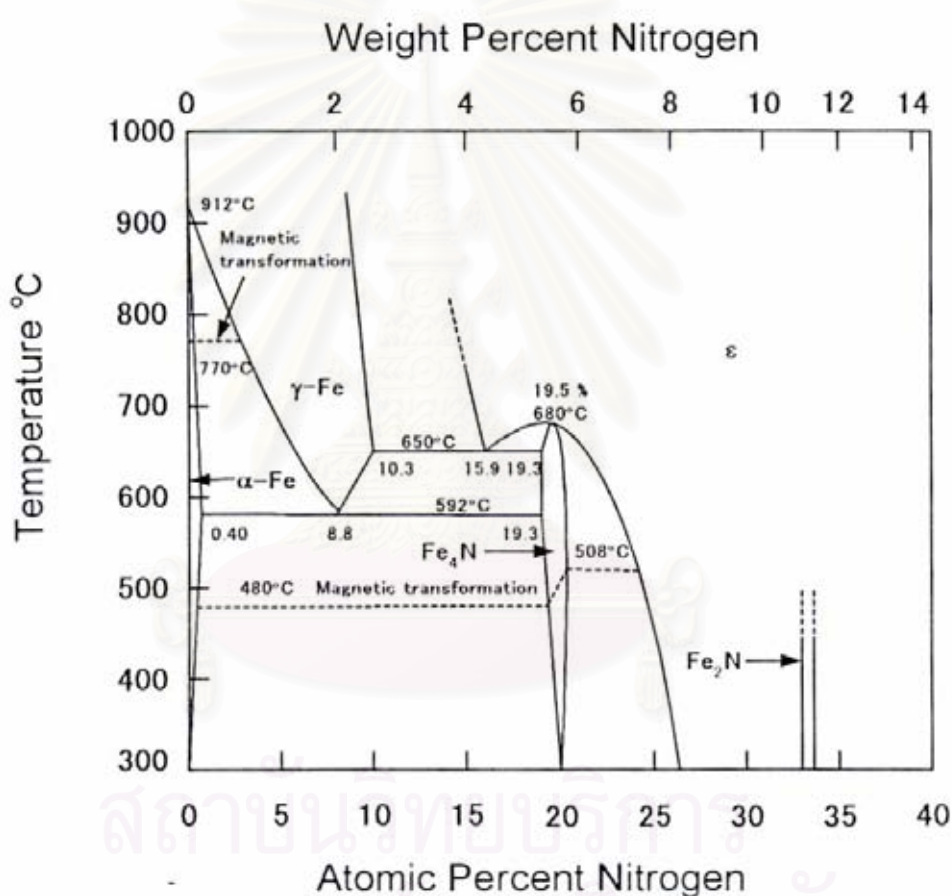
2.4 วิธีในทรายดิ่ง

ในทรายดิ่ง เป็นกระบวนการปรับปรุงผิวด้วยการเปลี่ยนส่วนผสมทางเคมีโดยอาศัยความร้อน ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มปริมาณไนโตรเจนบริเวณผิวของวัสดุในช่วงเฟอร์ไรท์หรือเทมเปอร์มาเทนไซต์ เนื่องจากอัตราการแพร่ของไนโตรเจนในออสเทนไนท์ต่ำกว่าในเฟอร์ไรท์มาก[16] การเพิ่มไนโตรเจนจะทำให้เกิดสารประกอบไนไตรด์และมีไนโตรเจนละลายในเหล็ก ซึ่งเป็นไปตามแผนภูมิสมดุลของเหล็กในไนโตรเจน (รูปที่ 2.4) จากรูปจะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 865K (592°C) ความสามารถในการละลายของไนโตรเจนในเหล็กเฟอร์ไรท์มีค่าประมาณ 0.1% โดยน้ำหนัก ค่านี้มีค่าลดลงตามอุณหภูมิ เมื่อถึงอุณหภูมิห้องจึงมีไนโตรเจนละลายในเหล็กได้น้อยมาก ปริมาณไนโตรเจนที่ไม่สามารถละลายได้จะตกตะกอนเป็น Fe₄N หรือกรณีที่มีไนโตรเจนมากพออาจเกิดเป็น Fe₂N [17] ต่างจากการบูนซึ่งที่นำคาร์บอนเข้าสู่ออสเทนไนท์และบังคับให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วเพื่อให้ได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ จึงต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าในทรายดิ่งมาก เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ในทรายดิ่งเป็นวิธีที่ทำให้เกิดการบิดตัว และมีขนาดเปลี่ยนแปลงน้อยมาก โดยทั่วไปในทรายดิ่งเป็นวิธีที่ใช้กับเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนปานกลาง มีส่วนผสมของธาตุที่สามารถก่อให้เกิดไนไตรด์ได้ง่าย เช่น โครเมียม (Cr) อะลูมิเนียม (Al) วานาเดียม (V) ทังสแตน (W) และ โมลิบดีนัม (Mo) ซึ่งเป็นธาตุผสมหลักของเหล็กกล้าเครื่องมือ ดังนั้นเหล็กกล้าเครื่องมือจึงสามารถทำในทรายดิ่งได้ โดยทั่วไปใช้ในทรายดิ่งแบบก๊าซ และแบบพลาสมาหรืออ็อกซิออน (เริ่มใช้เมื่อประมาณ 10 กว่าปีที่ผ่านมา)

สำหรับวิธีในทรายดิ่งแบบก๊าซ เหล็กกล้าจะถูกให้ความร้อนในบรรยากาศที่มีปริมาณไนโตรเจนสูง ซึ่งส่วนใหญ่ทำภายใต้บรรยากาศแอมโมเนีย ที่อุณหภูมิระหว่าง 780-830K (495-565 °C) โดยประมาณ แอมโมเนียจะแตกตัวที่ผิวโลหะเกิดปฏิกิริยา ดังสมการที่ 2.1 จากนั้นไนโตรเจนอะตอมที่ได้จึงแพร่เข้าสู่เนื้อวัสดุ



การอบชุบในอ่างเกลือ เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้สำหรับทำไนไตรดิงเหล็กกล้าเครื่องมือ ในอ่างเกลือหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 780-850K (510-580°C) เกลือที่ใช้อาจเป็นไซยานาย หรือไซยานต หรือใช้ร่วมกัน บ่อยครั้งที่ส่วนประกอบของเกลือหลอมเหลวถูกใช้เป็นตัวนำคาร์บอน เท่า ๆ กับไนโตรเจนเข้าสู่ผิวชิ้นงานจึงเรียกว่า ไนไตรคาร์บูไรซิ่ง ไนไตรดิงแบบของเหลวมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง ในการปรับปรุงผิวของชิ้นส่วนยานยนต์ที่ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ แต่ทั้งนี้ยังสามารถใช้กับเหล็กกล้าเครื่องมือหลายประเภท เช่น เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูง เป็นต้น



รูปที่ 2.4 แผนภูมิสมดุลของเหล็กกับไนโตรเจน

ระหว่างกระบวนการไนไตรดิงไนโตรเจนแพร่เข้าสู่เนื้อวัสดุร่วมกับธาตุผสม เกิดเป็นผลึกของไนไตรด์ ขนาดเล็กละเอียด หรือเกิดบริเวณที่ประกอบด้วยชั้นของอะตอมธาตุผสมแบบแทนที่และอะตอมไนโตรเจนซึ่งเป็นอะตอมที่ละลายแบบแทรกที่ การกระจายตัวของผลึกไนไตรด์ที่อยู่ชิดกัน กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วไปภายในเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ ทำให้ได้ความแข็งค่าสูงมาก (>1000HV) เมื่อเทียบกับเหล็กกล้าที่ทำการเพิ่มความแข็งแบบเดิมและทำการอบคืนตัว

ไนไตรต์ของธาตุผสมก่อนข้างเสถียรและช่วยด้านทานการโตขึ้นของเกรนที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ 500°C) จากการเสียดทานหรือการใช้งาน ไนไตรต์จึงเป็นวิธีที่ก่อให้เกิดความต้านทานต่อการสึกหรอ การหลุดล่อน และการยึดติดกัน (Seizing) ระหว่างผิวสัมผัสของโลหะกับโลหะ [13,15]

โครงสร้างชั้นผิวแข็งจากกระบวนการไนไตรต์

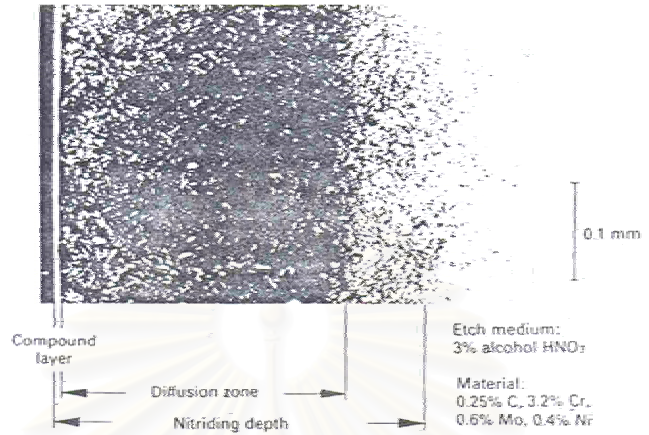
ประกอบด้วยชั้นการแพร่และชั้นสารประกอบที่อาจเกิดหรือไม่เกิดขึ้นก็ได้ ดังรูปที่ 2.5 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิด ส่วนผสมของธาตุผสม และเวลา-อุณหภูมิของกระบวนการไนไตรต์ นอกจากนี้การเกิดชั้นทั้งสองยังขึ้นอยู่กับส่วนผสมของไนโตรเจน และกลไกที่ทำให้เกิดการแตกตัวของไนโตรเจนที่ผิวชิ้นงาน

1.) **ชั้นการแพร่** เป็นชั้นที่มีโครงสร้างเช่นเดียวกับส่วนกลางชิ้นงาน แต่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากสารละลายของแข็ง และการตกตะกอน สำหรับโลหะที่มีเหล็กเป็นส่วนประกอบหลักจะปรากฏอะตอมของไนโตรเจนในตำแหน่งสารละลายของแข็งของโครงผลึก (Lattice) หรือตำแหน่งการแทรกที่ จนกระทั่งเต็มความสามารถละลายของไนโตรเจนในเหล็ก ($\approx 0.4\% \text{ wt N}$) ดังนั้นความแข็งที่เพิ่มขึ้นจากส่วนนี้จึงน้อยมาก เมื่อไนโตรเจนละลายเข้าไปจนเกินความสามารถในการละลายจะเกิดการตกตะกอนได้ผลึกแบบอาพันธ์ (Coherent) ขนาดเล็ก ตามขอบและภายในเกรนจัดเป็นกลไกที่เพิ่มความแข็งได้มาก ความลึกชั้นการแพร่ขึ้นอยู่กับเกรเดียนต์ (Gradient) ของความเข้มข้นของไนโตรเจนในเนื้อวัสดุ เวลา อุณหภูมิ และส่วนผสมของชิ้นงาน ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 2.6 เมื่อปริมาณโครเมียมในเหล็กเพิ่มมากขึ้นชั้นผิวแข็งกลับมีความหนาลดลง[19]

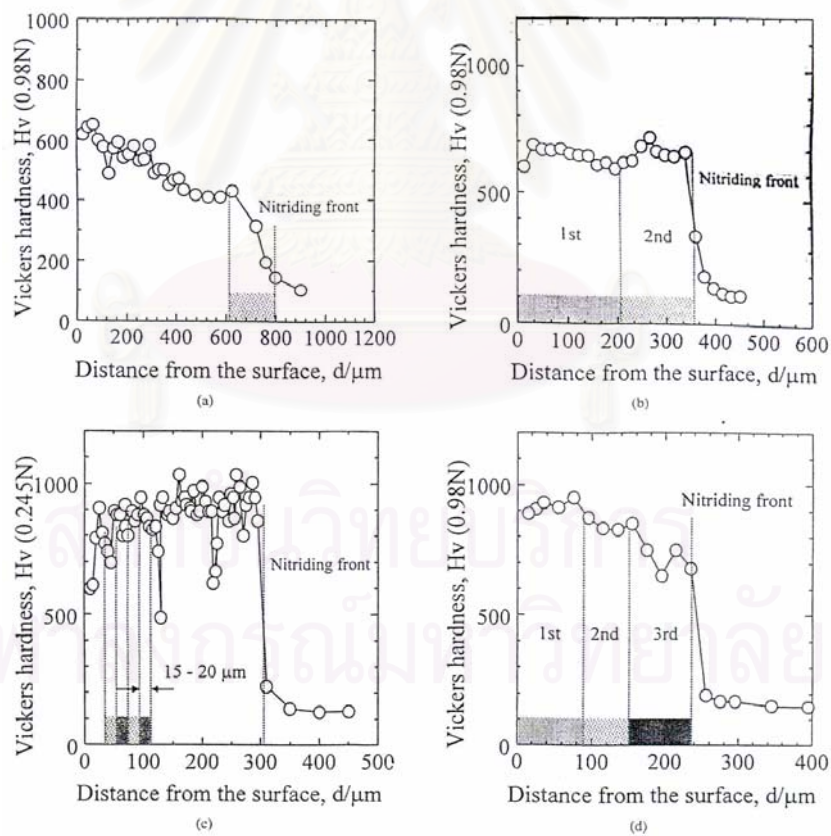
2.) **ชั้นสารประกอบ** ประกอบด้วยสารประกอบเชิงโลหะ γ' (Fe_4N) และ ϵ (Fe_2_3N) ชั้น ϵ ให้สมบัติด้านทานการสึกหรอและการล้าได้ดีที่สุดในภาวะที่ไม่รับแรงกระแทก ชั้น γ' มีสมบัตินิ่มและด้านทานการสึกหรอได้น้อยกว่า แต่มีความแกร่งสูงกว่าและเหมาะสำหรับการรับแรงกระแทก ชั้นสารประกอบช่วยเพิ่มความหล่อลื่น และด้านทานการกัดกร่อนให้แก่เนื้อวัสดุ

ดังนั้นไนไตรต์จึงช่วยเพิ่มความแข็งแรงต่อการล้าให้แก่วัสดุได้มาก เนื่องจากการตกตะกอนในชั้นการแพร่ส่งผลให้โครงผลึกขยายตัว ในขณะที่เนื้อวัสดุในส่วนกลางพยายามรักษาขนาดเดิม ทำให้ชั้นผิวแข็งอยู่ในสภาวะรับแรงอัดที่มีค่าน้อยกว่าแรงดึงจากภายนอกจึงเป็นการเพิ่มขีดจำกัดความทนทาน (Endurance limit) ให้แก่วัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังที่ปรากฏในรูปที่ 2.7 ทำให้ไนไตรต์เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ปรับปรุงผิวของเหล็กกล้าเครื่องมือ

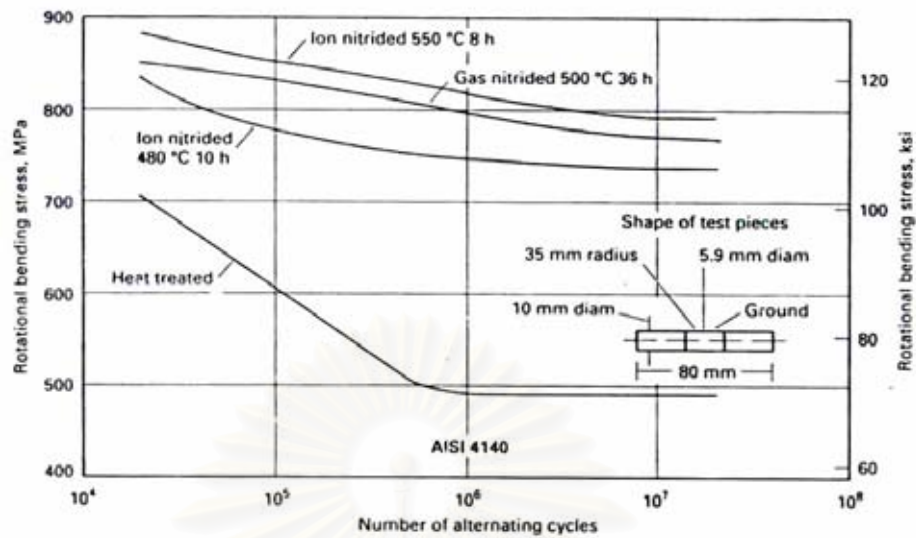
ชนิดต่าง ๆ นอกจากนี้สมบัติความต้านทานการสึกหรอของวัสดุยังดีขึ้น หลังการทำไนไตรดิง ดังรายงานการวิจัยของ M. Uma Devi, T.K. Chakraborty, and O.N. Mohanty [25] ในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของชั้นผิวแข็งที่เกิดจากไนไตรดิง



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งชั้นผิวแข็ง และระยะห่างจากผิวของชิ้นงานเหล็กกล้าผสมโครเมียมหลังผ่านกระบวนการไนไตรดิงที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 57.6ks (a) Fe-3Cr alloy, (b) Fe-Cr8 alloy, (c) Fe-13Cr alloy และ (d) Fe-19Cr alloy



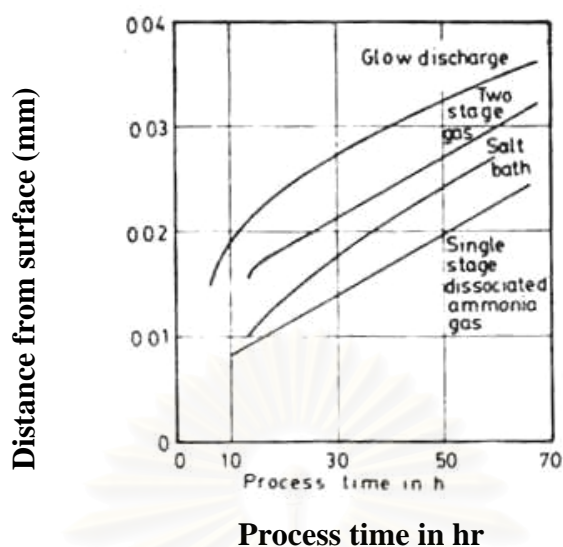
รูปที่ 2.7 ผลของไนตรายิ่งต่อความแข็งแรงต่อความล้า

Role played by the mechanism indicated

Major Medium Minor

Wear Mechanisms	Ad-Adhesion			Ad		
	DI-Delamination			DI		
	MC-Micro-cutting		DI	DI	Ab	OW
	Ab-Abrasive				CP	Ad
	OW-oxidative wear	Ad	Ad	MC	CP	Ad
	CP-matrix wear off & carbide pull out	DI	MC	CP	Ad	MC
Service life tonnes	250	580	350-400	> 795	600-700	160
Case Characteristics	Case depth, μm	-	215	-	70	-
	Compound layer, μm	-	10-20	-	5-12	-
	$H_{V0.1}$ Surface	-	1402	-	1277	-
	$H_{V0.1}$ Core	-	550	-	540	-
	Phases	-	$\gamma'+\epsilon$	-	$\epsilon+\gamma'$	-
Nitriding	no	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
	yes	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Substrate	Steel ASI/UNS	H13	D2	L7		
	Hardness $H_{V0.1}$	570	550	560		
	Wear Resistance	Fair	best	good		
	Toughness	good	fair	fair		
	Alloying Elements	medium	high	low		

รูปที่ 2.8 กลไกการสึกหรอที่พบในเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อนที่ผ่านและไม่ผ่านการไนตรายิ่ง



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของความหนาชั้นผิวแข็งและระยะเวลาของกระบวนการในไตรายดิ้งแต่ละวิธี[13]

2.5 ไนตรายดิ้งแบบพลาสมา

วิธีการไนตรายดิ้งแบบพลาสมา เป็นวิธีที่อาศัยสภาวะพลาสมาของไนโตรเจนหรือก๊าซที่มีไนโตรเจนผสมอยู่เป็นตัวกลางในการเพิ่มปริมาณไนโตรเจนให้แก่ชิ้นงาน ซึ่งแตกต่างจากวิธีการไนตรายดิ้งแบบก๊าซ หรือแบบอ่างเกลือที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ 2.4 ไนตรายดิ้งแบบพลาสมามีข้อดีคือเป็นวิธีที่ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะ ใช้ระยะเวลาสั้นกว่าไนตรายดิ้งแบบอื่น ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 2.9 เปรียบเทียบความหนาชั้นผิวแข็งที่ได้จากไนตรายดิ้งวิธีต่าง ๆ สัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในกระบวนการนั้น ๆ จะเห็นได้ว่าวิธีการไนตรายดิ้งแบบพลาสมาให้ความหนาชั้นผิวแข็งสูงสุดที่ระยะเวลาเท่า ๆ กัน

2.5.1 ความหมายและชนิดของพลาสมา

จากนิยาม สสาร คือ สิ่งที่มีตัวตนและต้องการที่อยู่ โดยทั่วไปแบ่งตามระดับพลังงานจลน์ของโมเลกุลหรืออะตอมของสสาร สามารถแบ่งได้เป็น 4 สถานะ ได้แก่ ของแข็ง (Solid) ของเหลว (Liquid) ก๊าซ (Gas) และพลาสมา (Plasma) พลังงานจลน์ดังกล่าวอาจเปลี่ยนแปลงหากมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความต่างศักย์ทางไฟฟ้า หรือการเคลื่อนที่ของอะตอมหรือโมเลกุล ความสัมพันธ์ระหว่างสถานะของสสารและพลังงานจลน์แสดงในรูปของสัญลักษณ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

	$E < E_b$	สสารมีสถานะ ของแข็ง
	$E_b < E < E_v$	สสารมีสถานะ ของเหลว
	$E_v < E < E_i$	สสารมีสถานะ ก๊าซ
	$E_i < E$	สสารมีสถานะ พลาสมา
โดย	E	คือ พลังงานจลน์ของอะตอมหรือโมเลกุลของสสาร
	E_b	คือ พลังงานพันธะระหว่างผลึก
	E_v	คือ พลังงานพันธะแบบแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals)
	E_i	คือ ศักย์ในการแตกตัวเป็นไอออน (Ionizing potential)

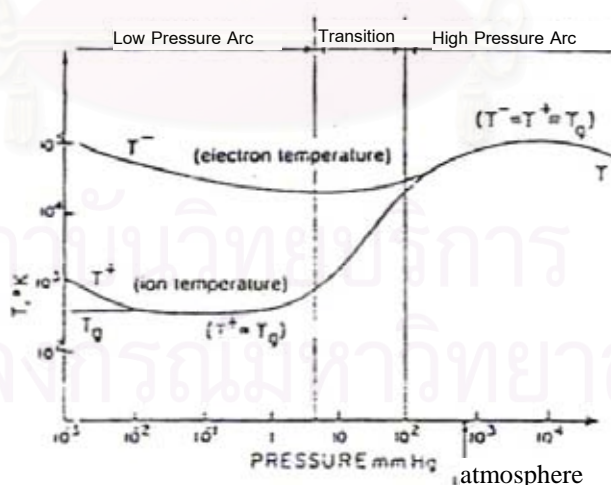
ดังนั้นจึงให้นิยามความหมายของพลาสมาจากความสัมพันธ์ข้างต้น ได้ดังนี้ พลาสมา คือ สถานะหนึ่งของสสารที่เกิดขึ้นเมื่อก๊าซมีพลังงานมากกว่าศักย์ในการแตกตัวเป็นไอออน ทำให้ก๊าซในสภาวะนี้พยายามแตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอน (ionize) จึงเป็นสาเหตุให้สถานะพลาสมาสามารถนำไฟฟ้าได้ พลาสมาที่เกิดขึ้นนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

- 1.) *Completely ionized plasma* หรือ พลาสมาร้อน (Hot plasma) คือ พลาสมาที่เกิดจากก๊าซทั้งหมดแตกตัวเป็นไอออนบวก และอิเล็กตรอน ในการเกิดพลาสมาประเภทนี้ต้องใช้พลังงานสูงมาก ใช้งานในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบฟิวชัน (Fusion) ซึ่งเป็นพลังงานในอนาคต ใช้งานแทนเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบฟิชชันในปัจจุบัน หรือใช้งานในเครื่องยนต์พลาสมา (Plasma engines) สำหรับงานวิศวกรรมทางอวกาศ เครื่องยนต์ขับเคลื่อนด้วยฟลักซ์ (Flux) ของพลาสมา โดยการเคลื่อนที่ของเครื่องยนต์จะเป็นไปในทิศทางตรงข้ามกับฟลักซ์ ตามกฎข้อที่สามของนิวตัน มีความเร็วเป็น 2-3 เท่าของเครื่องยนต์เชื้อเพลิง [9-10]
- 2.) *Partially ionized plasma* หรือ พลาสมาเย็น (Cold plasma) คือ พลาสมาที่เกิดจากก๊าซเพียงบางส่วนแตกตัวเป็นไอออน ทำให้พลาสมาชนิดนี้ประกอบด้วย ไอออนบวก อิเล็กตรอน

อะตอมและโมเลกุล พลาสมาชนิดนี้อุณหภูมิต่ำไม่สูงมาก ปัจจุบันถูกนำมาใช้ในงานด้านโลหกรรม

Apelian แบ่งการใช้งานทางโลหกรรมของ Partially ionized plasma ออกตามลักษณะของพลาสมาเป็น 2 ชนิด [10] ดังนี้

- 1) พลาสมาความดันสูง (High pressure plasma) หรือพลาสมาแบบสมดุล (Equilibrium plasma) พลาสมาชนิดนี้มีอุณหภูมิสูงและนำมาใช้งานเกี่ยวกับการเชื่อมแบบอาร์ค (Arc welding) เตาอาร์ค (Arc furnace) พลาสมาชนิดนี้มีความสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์คือ อุณหภูมิของอิเล็กตรอนและไอออนเท่ากัน
- 2) พลาสมาความดันต่ำ (Low pressure plasma) หรือพลาสมาไม่สมดุล (Non equilibrium plasma) เป็นพลาสมาที่ใช้งานในด้านปรับปรุงผิวชิ้นงาน เช่น การเคลือบไอทางกายภาพแบบพลาสมา (Plasma assisted PVD) พลาสมาแบบโกลดิสชาร์ต (Glow discharge) ที่ใช้ในวิธีในทรายคิงแบบพลาสมา เป็นต้น พลาสมาความดันต่ำมีอัตราการชนต่ำกว่าพลาสมาความดันสูง และมีค่าพลังงานของไอออนกับอิเล็กตรอนในรูปแบบต่างๆ เช่น ความร้อนไม่เท่ากัน โดยพลังงานของอิเล็กตรอนมีค่าสูงกว่าพลังงานของไอออน รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของไอออนและอิเล็กตรอนกับความดันของพลาสมา



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของไอออนและอิเล็กตรอนกับความดันของพลาสมา

2.5.2 กระบวนการในทรายดิงแบบพลาสมา

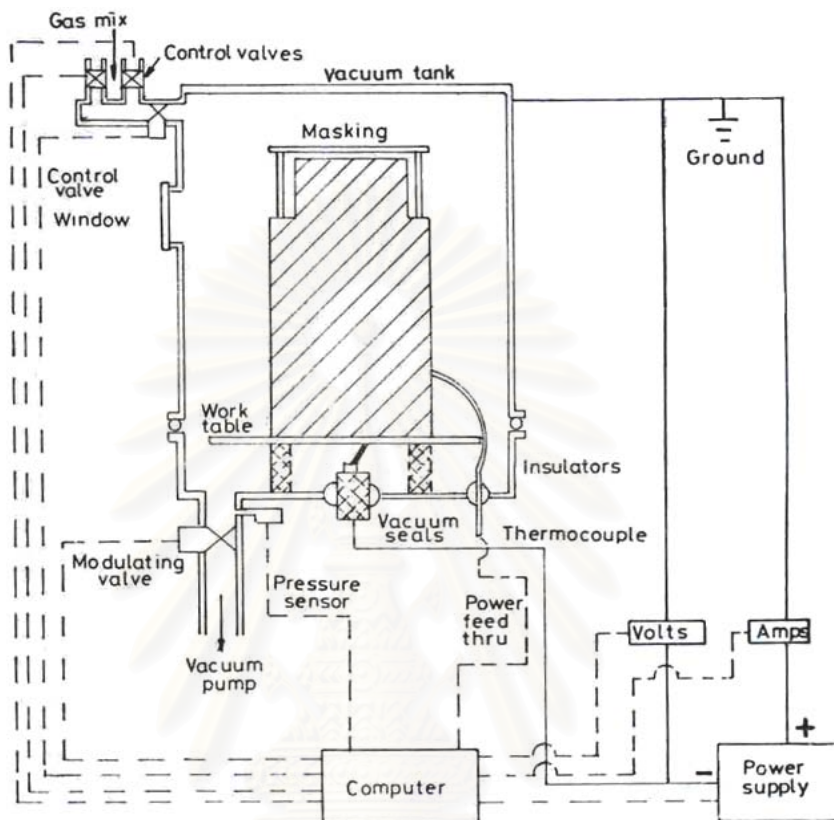
ชิ้นงานที่ทำในทรายดิงแบบพลาสมาจะถูกวางไว้ในเตาสุญญากาศ (ดังรูปที่ 2.11) และเชื่อมเข้ากับระบบไฟฟ้า (Electrical unit) ขณะเดียวกันปั๊มสุญญากาศและระบบจ่ายก๊าซจะสูบลำอากาศออก พร้อมทั้งปล่อยก๊าซที่ใช้ในกระบวนการ และควบคุมให้ได้สุญญากาศที่ต้องการ ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0.1 ถึง 10 ทอร์ จากนั้นแรงดันไฟฟ้ามีค่าตั้งแต่ 100 ถึง 1500 โวลต์ จะถูกจ่ายให้กับชิ้นงานและผนังเตาที่ทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด และแอโนด ตามลำดับ ภายใต้แรงดันไฟฟ้าที่มีความแตกต่างสูงและสถานะสุญญากาศนี้ โมเลกุลและอะตอมของก๊าซผสมจะถูกกระตุ้นให้แตกตัวออกเป็นไอออนเกิดปรากฏการณ์เรืองแสงที่เรียกว่า โกลดิสชาร์ต มีกระแสไฟฟ้าไหลระหว่างขั้วทั้งสอง โดยกระแสไฟฟ้านี้จะประกอบด้วยอิเล็กตรอนประจุลบวิ่งเข้าสู่ขั้วบวก(แอโนด) และไอออนประจุบวกวิ่งเข้าสู่ขั้วลบ (แคโทด ดังรูปที่ 2.12) ไอออนประจุบวกวิ่งเข้าชนผิวชิ้นงานด้วยพลังงานจลน์มีค่าสูงมาก เป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า บอมบาร์ด (Bombard) นอกจากนี้พลังงานดังกล่าวยังถ่ายเทเป็นความร้อนให้แก่ชิ้นงาน และแพร่เข้าสู่ผิวในขณะเดียวกัน

โกลดิสชาร์ต จะเกิดขึ้นได้ก๊าซต้องมีความดันต่ำ (เป็นสุญญากาศปานกลาง – มาก) และแรงดันไฟฟ้ามีค่าอย่างน้อย 300 โวลต์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความดันก๊าซ รูปที่ 2.13 แสดงการคายประจุ (Discharge) ชนิดต่าง ๆ แบ่งตามแรงดันและกระแสไฟฟ้าดังชื่อที่ปรากฏในภาพ ในทรายดิงแบบพลาสมานั้นใช้งานอยู่ในช่วงที่เรียกว่า แอบนอร์มอล (Abnormal) เป็นช่วงที่ความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเนื่องจากความหนาแน่นของกำลัง (Power densities) เพิ่มขึ้น แต่เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเกินจากช่วง การคายประจุแบบแอบนอร์มอล เพียงเล็กน้อยจะเริ่มเกิดการอาร์ค (Arc discharge) ดังนั้นในระหว่างในทรายดิงแบบพลาสมาจึงจำเป็นต้องจัดอุปกรณ์ควบคุมความต่างศักย์ให้อยู่ในช่วงการคายประจุแบบแอบนอร์มอล[7,9,10] นอกจากนี้เนื่องจากช่วงแอบนอร์มอล เป็นลักษณะที่เกิดเมื่อความเข้มของกระแสไฟฟ้า (Current density) มีความสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน จึงทำให้ความร้อน และชั้นในทรายดิงที่เกิดขึ้นมีความสม่ำเสมอ[10]

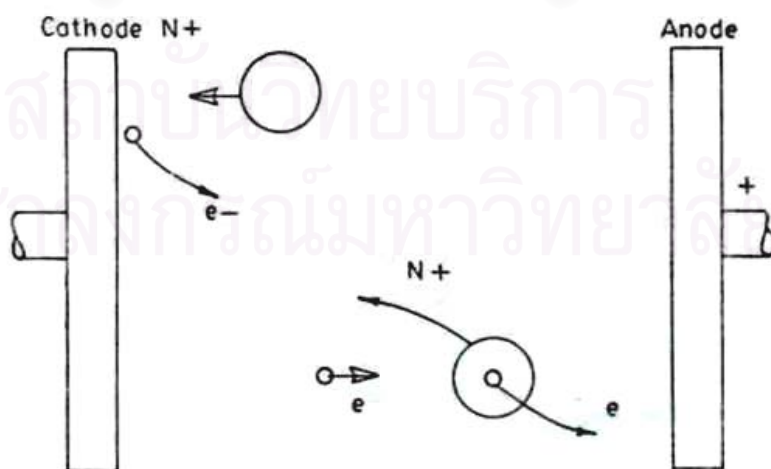
2.5.3 การเกิดพลาสมา

B. Edenhofer [7] กล่าวในรายงานว่า ระหว่างขั้วแอโนด และแคโทด ณ บริเวณที่แรงดันไฟฟ้าลดลง ตัวนำประจุ (Charge carrier) จำนวนไม่มากที่อยู่ในก๊าซจะถูกกระตุ้น นอกจากนี้ตัวนำประจุจะถูกสร้างขึ้นอย่างต่อเนื่องจากการชน (Collision) ของอนุภาคอื่น

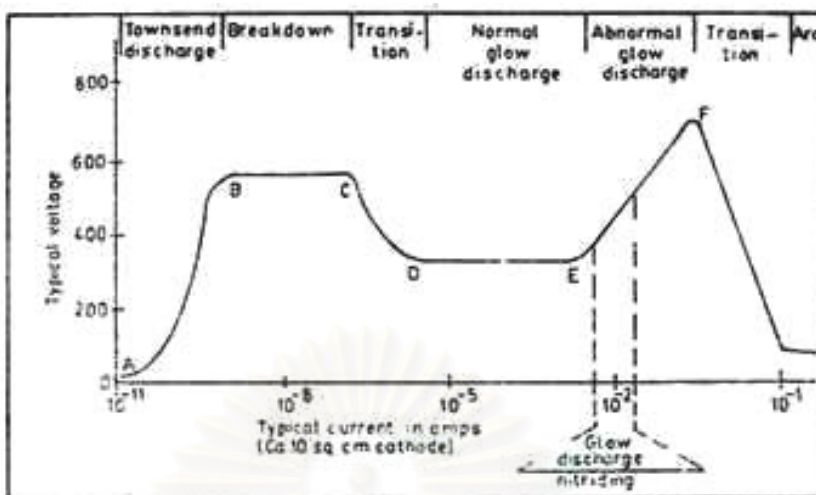
ภายในก๊าซ ทำให้อะตอมและโมเลกุลของก๊าซแตกตัวกลายเป็นอะตอมและโมเลกุลในสภาวะถูกกระตุ้น (Excited atom and molecule) และไอออน



รูปที่ 2.11 ภาพจำลองกระบวนการในตรายดิงแบบพลาสมา [10]

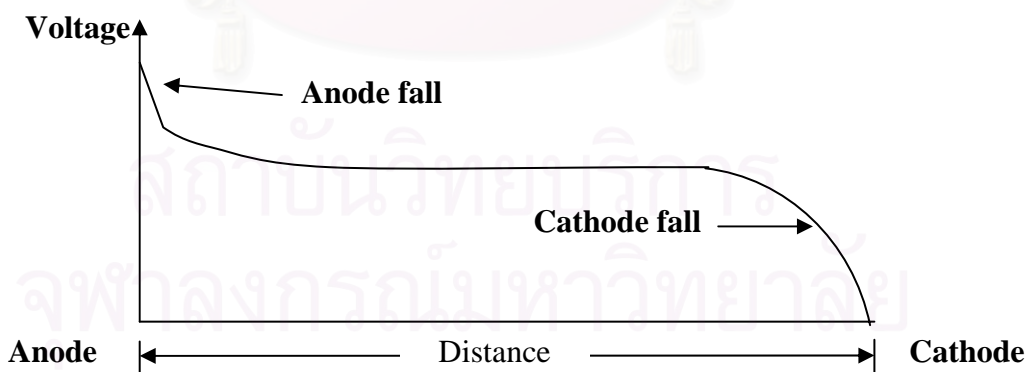


รูปที่ 2.12 กลไกการคายประจุของไอออนและอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.13 ประเภทของการคายประจุแบ่งตามแรงดันและกระแสไฟฟ้า

การลดลงของแรงดันไฟฟ้าระหว่างผนังเตาและชิ้นงานเป็นไปอย่างไม่เป็นเส้นตรง (รูปที่ 2.14) ส่วนใหญ่การลดลงของแรงดันไฟฟ้าจะพบเพียงระยะไม่กี่มิลลิเมตรก่อนถึงขั้วแคโทด (ชิ้นงาน) จึงเรียกว่า “Cathode fall” ทั้งกระบวนการชนและการกลายเป็นไอออนที่เป็นลักษณะเด่นของการปรับปรุงผิวด้วยวิธีนี้ทั้งหมดเกิดขึ้นภายในช่วง Cathode fall ดังนั้นภาวะพลาสมาที่สมบูรณ์จะเกิดขึ้นทันทีเหนือผิวหน้าชิ้นงานเพียงเล็กน้อย เกิดเป็นปรากฏการณ์เรืองแสงของแคโทด เรียกว่า “Glow seam” ดังรูปที่ 2.15 ซึ่งเป็นภาพของชิ้นงานภายในเตาสูดอากาศระหว่างการทำไนโตรรายดิงแบบพลาสมา

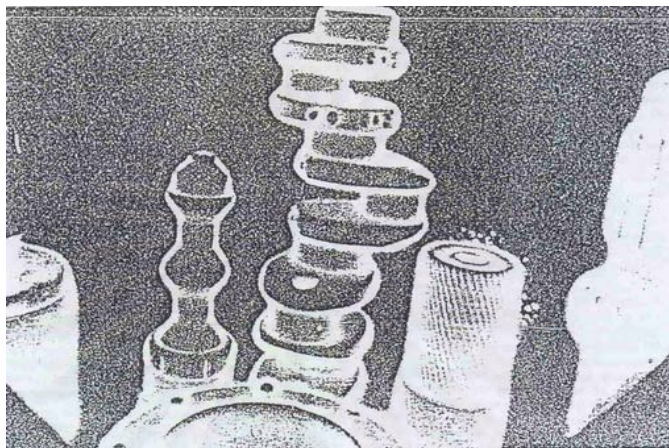


รูปที่ 2.14 การลดลงของแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด

2.5.4 ปฏิกริยาของพลาสมาที่มีต่อผิวชิ้นงาน

ภายในช่วง Cathode fall ไนโตรเจนไอออนประจุบวกที่ถูกสร้างขึ้นจากการชนจะถูกกระตุ้นอย่างรุนแรงให้วิ่งเข้าสู่ผิวชิ้นงาน เกิดพลังงานจลน์ตั้งแต่ขนาดน้อยจนถึงหลายร้อย

อิเล็กตรอนโวลต์ ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้และจำนวนอนุภาคที่เหมาะสม นอกจากนี้พลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นยังมีผลต่ออุณหภูมิของอะตอมภายในพลาสติกทำให้มีค่าสูงถึง 10,000-100,000 ดีกรี ภายหลังจากการที่ไอออนวิ่งชนผิวชิ้นงานด้วยพลังงานจลน์แน่นอนค่าหนึ่ง (E_{ion}) เป็นผลให้เกิดกระบวนการดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.15 ชิ้นงานภายในเตาสัญญากาศระหว่างการทำไนตรายดิงแบบพลาสติก[6]

1) สปีดเตอริง (sputtering)

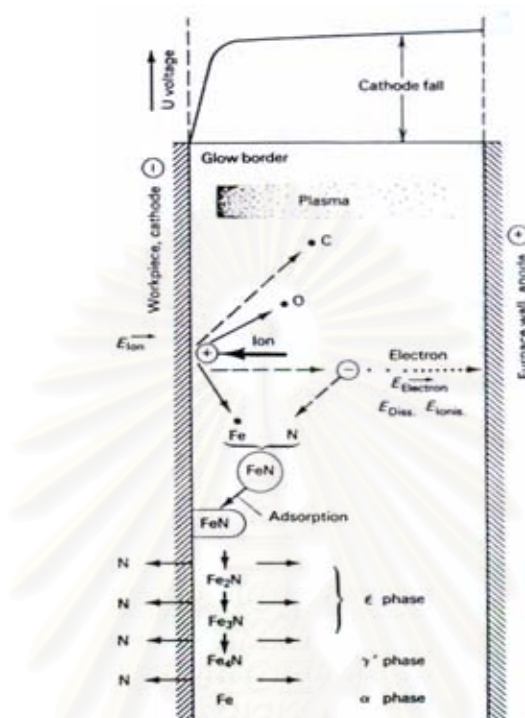
เมื่อไอออนวิ่งชนผิวชิ้นงาน อะตอมโลหะ(ทั้งเหล็กและธาตุผสม) จะแตกตัว ดังรูปที่ 2.16 กระบวนการสปีดเตอริงนั้นอาจพิจารณาให้เป็นกระบวนการการกลายเป็นไอได้ เพราะการที่ไอออนที่มีความร้อนสูงมากชนพื้นผิว จะคายความร้อนหลายพันดีกรีให้แก่พื้นผิวบริเวณนั้น แต่ไม่ส่งผลกับชิ้นงานทั้งหมด ทำให้อะตอมบริเวณดังกล่าวกลายเป็นไอ ทั้งนี้อุณหภูมิเฉลี่ยยังคงเท่ากับอุณหภูมิทั้งชิ้นงานซึ่งคืออุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไนตรายดิง

ในระหว่างการสปีดเตอริงพลังงานของไอออนบางส่วนจะเปลี่ยนเป็นงานในการแยกอะตอมและอิเล็กตรอนออกจากผิวชิ้นงาน(A) และเป็นพลังงานจลน์ของอนุภาคที่แตกตัว (E_{kin}) ดังสมการ 2.2

$$E_{ion} \rightarrow A + E_{kin} \quad (2.2)$$

ทั้งอะตอมของโลหะและอโลหะ เช่น คาร์บอน(C) ออกซิเจน(O) และไนโตรเจน(N) เป็นต้น จะถูกทำให้หลุดออก ทำให้ผิวชิ้นงานสะอาด และประโยชน์ของกระบวนการ

สปีดเตอริงที่สำคัญคือทำให้โลหะที่เก็ดออกไซด์ได้ง่ายสามารถปรับปรุงผิวแข็งได้ด้วยกระบวนการไนตรายดิงแบบพลาสมา



รูปที่ 2.16 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการไนตรายดิงแบบพลาสมา[13]

2) การให้ความร้อน (heating)

เมื่อไอออนของไนโตรเจนหรือธาตุอื่นที่อยู่ในก๊าซพลาสมา และแทรกเข้าไปในชั้นอะตอมชั้นบนสุดของผิวชิ้นงานจะยังคงมีพลังงานของไอออนที่เปลี่ยนเป็นความร้อน(Q) ให้แก่ชิ้นงานดังสมการ 2.3 ดังนั้นชิ้นงานในกระบวนการไนตรายดิงจึงไม่ต้องให้ความร้อนจากภายนอก

$$E_{ion} = A + E_{kin} + Q \tag{2.3}$$

3) การควบแน่น (condensation)

ไนโตรเจนในพลาสมาจะเคลื่อนที่เข้าไปในผิวชิ้นงานได้เพียงเล็กน้อย ถ้าหากมีไอออนที่คั่งขวางอยู่ (ไอออนที่เกิดจากการบอมบาร์ด) ปัจจัยที่สำคัญที่สุดต่อการดูดซึมไนโตรเจนคือกระบวนการสปีดเตอริง อะตอมของเหล็กที่แตกตัวออกจากผิวชิ้นงานสามารถรวมตัวกับอะตอมไนโตรเจนที่ไวต่อการทำปฏิกิริยามากในพลาสมาใกล้กับผิวชิ้นงาน เกิดเป็น

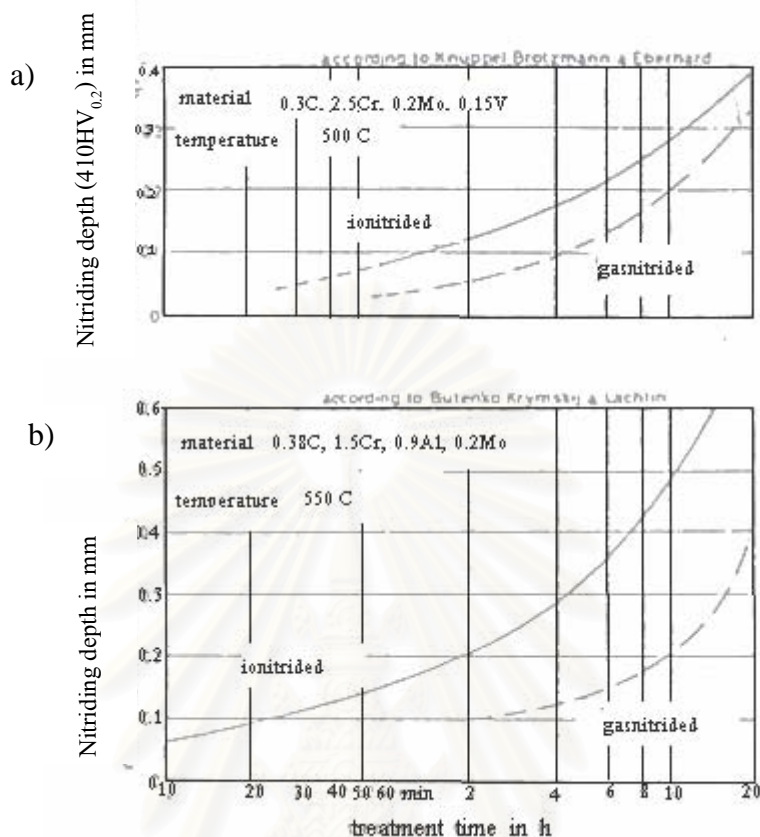
สารประกอบ เหล็กไนไตรด์ และตกลงบนผิวชิ้นงาน อะตอมอิสระของไนโตรเจนในกระบวนการไนไตรดิงแบบพลาสมาจะแพร่เข้าสู่ชิ้นงาน และบางส่วนจะกลับเข้าไปในพลาสมาจึงกล่าวได้ว่ากระบวนการควมแน่นเป็นผลมาจากการสปีดเตอริง

ทั้งกระบวนการสปีดเตอริง และการรวมตัวกันของไอขึ้นอยู่กับขนาดของก๊าซส่วนใหญ่ที่เลือกใช้ (แอมโมเนีย ไนโตรเจน และไฮโดรเจน เป็นต้น) นอกจากนี้ยังสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงความดันไฟฟ้า เช่น ความดันก๊าซต่ำกว่า(ลดความหนาแน่นของอนุภาค) จะมีระยะห่างที่อะตอมจะชนกัน(Free path) ยาวกว่า ทำให้โอกาสที่อะตอมจะชนกันมีน้อยลง อะตอมที่หลุดออกจากผิวชิ้นงานจึงเคลื่อนที่ไปได้ไกลจากผิวมาก และลดโอกาสการแพร่กลับเข้าไปในพลาสมา

2.5.5 การแพร่ของไนโตรเจน

การแพร่ของไนโตรเจนส่วนใหญ่ในกระบวนการไนไตรดิงแบบพลาสมา เป็นการแพร่แบบผ่านเกรน ต่างจากกระบวนการไนไตรดิงแบบก๊าซที่เป็นการแพร่ตามขอบเกรน ซึ่งมีผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการทั้งสองเพื่อให้ได้ความหนาชั้นผิวแข็งเท่ากันนั้นต่างกันมาก ดังจะสังเกตได้จากรูปที่ 2.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นผิวแข็งกับระยะเวลา ของเหล็กกล้า 30CrMoV9 พบว่าตั้งแต่เริ่มจนกระทั่ง 20 ชั่วโมงชั้นผิวแข็งที่ได้จากไนไตรดิงแบบพลาสมามีความหนามากกว่าที่ได้จากไนไตรดิงแบบก๊าซ ต่อจากนั้นความหนาจะมีความแตกต่างกันไม่มาก นอกจากนี้จากรูป 2.17b ที่ความหนาชั้นผิวแข็ง 0.55 มิลลิเมตร ไนไตรดิงแบบพลาสมาใช้เวลา 14 ชั่วโมง แต่ไนไตรดิงแบบก๊าซใช้เวลาถึง 30-35 ชั่วโมง

ไนโตรเจนในกระบวนการไนไตรดิงแบบก๊าซ เริ่มแรกการแพร่หลักเป็นไปตามขอบเกรน เมื่อพิจารณาการแตกตัวของก๊าซแอมโมเนียที่เป็นการเร่งปฏิกิริยาบนผิวของเหล็กกล้าบริเวณที่มีพลังงานสูง ไนโตรเจนที่แพร่ไประหว่างผลึกซึ่งมีคาร์ไบด์ ไนโตรเจนจะรวมตัวกับคาร์ไบด์โตขึ้น และเป็นคาร์โบไนไตรด์ที่ขอบเกรนขัดขวางการแพร่ตามขอบเกรน และผ่านเกรน



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นผิวแข็งกับระยะเวลา ของกระบวนการไนตรายิ่งแบบพลาสมาและแบบก๊าซ

ส่วนไนตรายิ่งแบบพลาสมา พบว่าส่วนใหญ่ไนโตรเจนแพร่แบบผ่านเกรนตั้งแต่เริ่มกระบวนการ โดยไนโตรเจนรวมตัวกับเหล็กเกิดเป็นสารประกอบไนตรายิ่งของเหล็ก (FeN) ตกลงบนผิวของเหล็ก (กระบวนการสปัตเตอริงและการควบแน่น) และสลายตัวในทันทีที่ปล่อยไนโตรเจนอิสระแพร่เข้าสู่ชิ้นงานแบบผ่านเกรน ทั้งนี้เพราะสังเกตพบการแพร่เข้าสู่เนื้อวัสดุเป็นระนาบ นอกจากนี้การสปัตเตอริงคาร์บอนออกจากผิวยังเป็นเสมือนการสูญเสียปริมาณคาร์บอนที่ขอบเกรนบริเวณใกล้กับผิวชิ้นงาน ไนโตรเจนจึงสามารถแพร่ผ่านขอบเกรนได้โดยไม่เกิดคาร์โบไนตรายิ่งช่วยลดความเปราะของชั้นผิวแข็ง[7]

นอกจากนี้การแพร่ของไนโตรเจนเข้าสู่ผิวโลหะในกระบวนการไนตรายิ่งแบบพลาสมาอาจพิจารณาให้เป็นการแพร่ในทิศทางเดียว ซึ่งเป็นไปตามกฎข้อที่ 1 ของ Fick ดังสมการที่ 2.4 [18]

$$J = -D_1 \frac{\partial C}{\partial X} \quad (2.4)$$

โดย	J	คือ	Flux ของอะตอมที่แพร่
	D_1	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในผลึก
	C	คือ	ความเข้มข้นของอะตอม
	X	คือ	ระยะห่างจากผิว

และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ภายในเกรน เป็นไปตามสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius-type equation) ดังสมการที่ 2.5 ซึ่งแสดงถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ภายในเกรนและส่งผลถึงอัตราการแพร่หรือค่า J ในสมการที่ 2.4

$$D_1 = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2.5)$$

โดย	D_0	คือ	ค่าคงที่ของการแพร่
	Q	คือ	พลังงานในการแพร่
	R	คือ	ค่าคงที่ของแก๊ส
	T	คือ	อุณหภูมิ

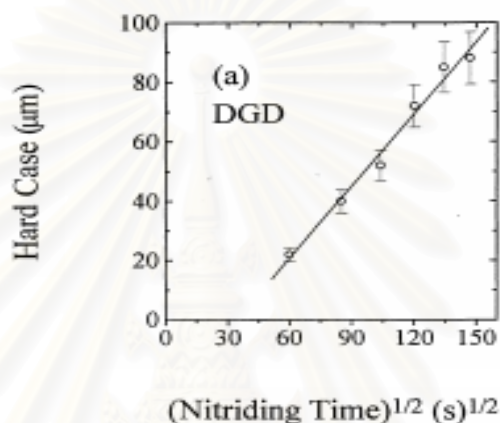
เมื่อพิจารณาความหนาที่เพิ่มขึ้นของชั้นไนไตรด์ โดยพิจารณาจากขอบเขตของชั้นไนไตรด์ (Nitriding front) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นไนไตรด์ (X) และระยะเวลาของไนไตรดิง (t) เป็นไปแบบพาราโบลา [19] ดังสมการของ Wagner (สมการที่ 2.6)

$$X^2 = K_p \cdot t \quad (2.6)$$

โดย K_p คือ ค่าคงที่ของอัตราการเพิ่มขึ้นของชั้นไนไตรด์ (The growth rate constant of nitriding)

ซึ่งแสดงว่าการโตขึ้นของชั้นไนไตรด์ถูกควบคุมด้วยอัตราการแพร่ของไนโตรเจน ดังรายงานในงานวิจัยของ N. Granito [19] ซึ่งแสดงว่าชั้นความหนาโตขึ้น โดยมีค่า

อัตราการไนตรายดิงดงที่ และจากการศึกษาของ E.J. Miola and et al. [23] พบว่าเหล็กกล้า เครื่องมือ H12 ที่ทำไนตรายดิงแบบพลาสมา โดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง ชั้นผิวแข็งที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาและถูกควบคุมโดยการแปรดังสมการที่ 2.6 มีผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.18



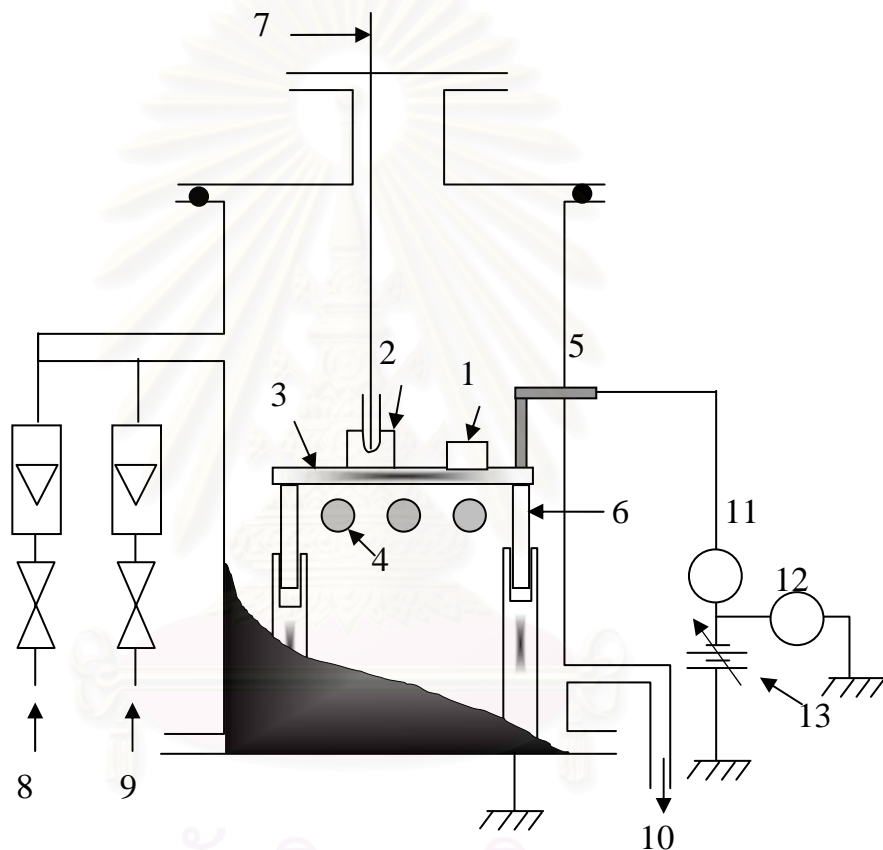
รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ของความหนาชั้นผิวแข็งกับรากที่สองของระยะเวลาการทำไนตรายดิงของชิ้นงานที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาที่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (DC glow discharge plasma) [23-24]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ด้วยข้อจำกัดด้านเครื่องมือเกี่ยวกับกระบวนการไนตรายดิงแบบพลาสมาในประเทศไทยตามที่กล่าวในบทที่ 1 ทำให้ในขั้นตอนไนตรายดิงแบบพลาสมามีการดำเนินการที่ประเทศญี่ปุ่นทั้งหมด โดยใช้เครื่องมือลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.1



- | | |
|---------------------------|--|
| 1. Specimen, | 8. Nitrogen gas inlet, |
| 2. Dummy specimen, | 9. Hydrogen gas inlet, |
| 3. Specimen table, | 10. To Mechanical booster and rotary pump, |
| 4. Heater in quartz tube, | 11. Ampere Meter, |
| 5. Cathode, | 12. Voltage meter, |
| 6. Insulator, | 13. DC power su |
| 7. Thermocouple, | |

รูปที่ 3.1 เครื่องมือไนตรายดิงแบบพลาสมา

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

- 3.1.1 เหล็กกล้าเครื่องมือ AISI H13 มีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.8 เซนติเมตร และหนา 0.8 เซนติเมตร
- 3.1.2 แก๊สไนโตรเจน และแก๊สไฮโดรเจน
- 3.1.3 พงซ์อะลูมิเนียมขนาด 1.0 และ 0.3 ไมครอน
- 3.1.4 สารละลายกรดไนตริก 5%

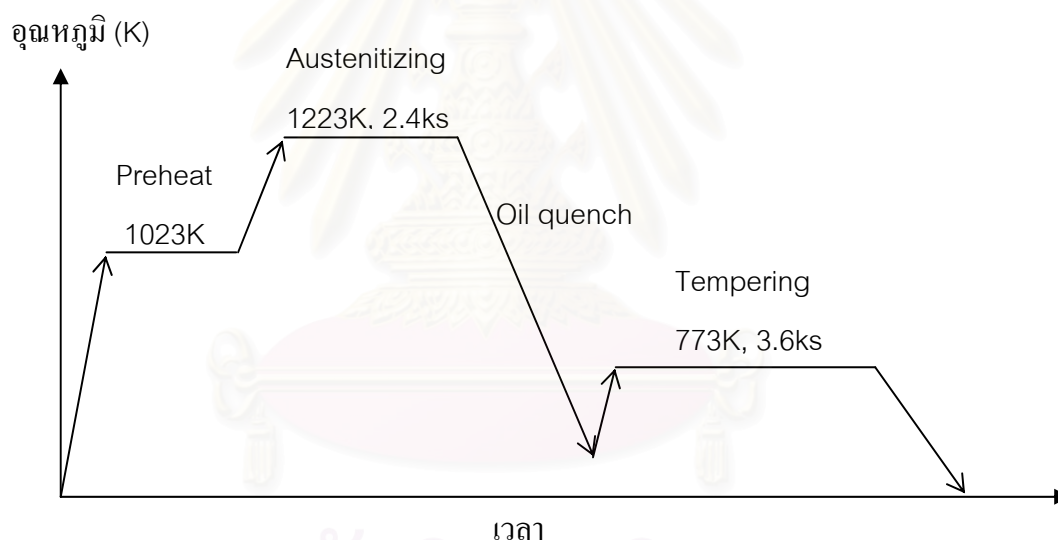
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 3.2.1 กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical microscope) ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นผิวแข็ง
- 3.2.2 เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (Microhardness Vickers) ใช้ในการตรวจสอบความแข็งที่ระดับความลึกต่าง ๆ ของชิ้นผิวแข็ง
- 3.2.3 X-ray Diffractometer แบบ Glancing Angle X-ray Diffraction (GAXD) ของ Philips X'Pert-MPD ใช้ในการวิเคราะห์สารประกอบที่ผิวชิ้นงานหลังทำไนโตรดิงแบบพลาสมา
- 3.2.4 กล้องอิเล็กตรอนแบบกวาด (Scanning Electron Microscope: SEM) พร้อม Energy Dispersive Spectrometry (EDS) ใช้เพื่อตรวจสอบขนาดและส่วนผสมของชิ้นงานทั้งที่ผิวและระยะต่าง ๆ ในภาคตัดขวาง
- 3.2.5 Electron Probe Microanalysis (EPMA) ใช้เพื่อตรวจสอบชนิดและปริมาณธาตุบริเวณชิ้นผิวแข็งของชิ้นงาน
- 3.2.6 เครื่องเตรียมเรซินแบบ Hot mount ใช้ทำเรซินจับชิ้นงาน
- 3.2.7 เครื่องตัดแบบ Discotom ใช้ตัดชิ้นงานเพื่อเตรียมชิ้นงานสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างและความแข็ง
- 3.2.8 เครื่องขัด ใช้ในการเตรียมชิ้นงานสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างและความแข็ง

3.3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.3.1 การเตรียมชิ้นงานก่อนทำไนตรายดิงแบบพลาสมา

เนื่องจากเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 เป็นเหล็กกล้าที่ต้องการทำการอบชุบทางความร้อนก่อนนำไปใช้งาน ดังนั้นก่อนการปรับปรุงผิวชิ้นงานด้วยกระบวนการไนตรายดิงแบบพลาสมาจึงมีการอบชุบทางความร้อนชิ้นงานตามขั้นตอนในรูปที่ 3.2 คือ ทำการอบ preheat ที่อุณหภูมิ 1023K เป็นเวลา 30 นาที (1.8ks) และอบให้โครงสร้างเป็นออสเทนไนท์ (Austenitizing) ที่อุณหภูมิ 1223K เป็นเวลา 40 นาที (2.4ks) ทำให้เย็นตัวในน้ำมัน จากนั้นทำการอบคืนตัว (tempering) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (3.6ks) ที่ 773 K



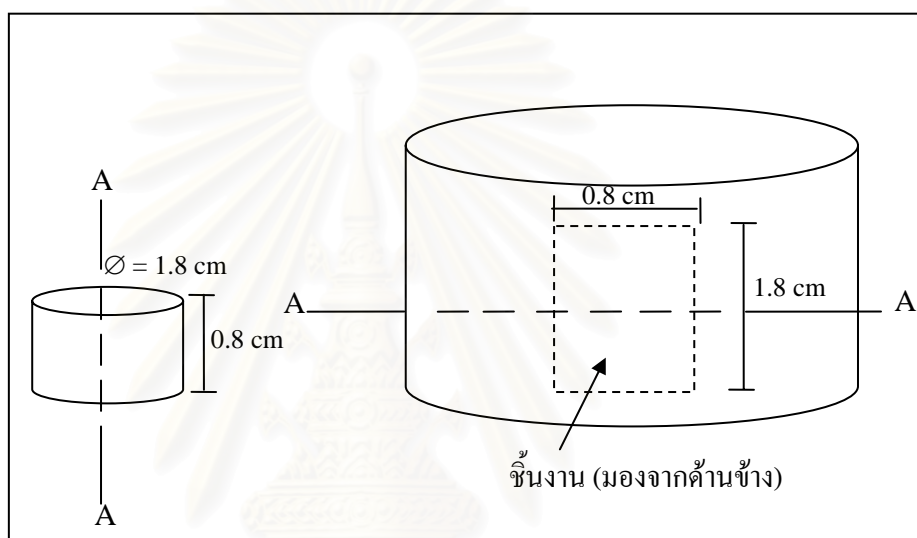
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนกระบวนการอบชุบของชิ้นงานก่อนเข้าสู่กระบวนการไนตรายดิงแบบพลาสมา

3.3.2 การปรับปรุงผิวด้วยไนตรายดิงแบบพลาสมา

เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิ และเวลาที่มีต่อโครงสร้าง และความหนาของชั้นผิวแข็ง จึงทำไนตรายดิงแบบพลาสมาชิ้นงานทั้ง 8 ชิ้น โดยกำหนดอุณหภูมิ ระยะเวลา และสภาวะของกระบวนการให้แต่ละชิ้นงานแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 3.1 สำหรับการทดลองนี้จะเริ่มทำไนตรายดิงแบบพลาสมาโดยไม่มีการสปิตเตอริงชิ้นงานด้วยอาร์กอนพลาสมา แต่จะเริ่มจากการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานด้วยไฮโดรเจนพลาสมา จนกระทั่งชิ้นงานมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิ

ไนโตรยดิงซึ่งในการทดลองนี้คือ 773-823K แล้วจึงปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าไปในเตาจนได้ความดันตามต้องการ โดยความดันของก๊าซไนโตรเจนต่อไฮโดรเจนมีอัตราส่วนเป็น 1:3 ใช้ความดันไฟฟ้าสำหรับสร้างพลาสมา 200 โวลต์ และกระแสไฟประมาณ 0.1-0.2 แอมแปร์

3.3.3 การตรวจสอบโครงสร้างชั้นผิวแข็งของชิ้นงานทั้งหมด

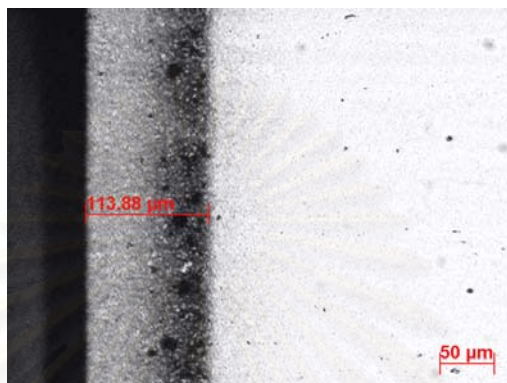


รูปที่ 3.3 การวางชิ้นงานในการหล่อเรซินแบบ hot mount

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นผิวแข็งของชิ้นงานทั้งหมด โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical microscope) มีขั้นตอนในการทดสอบแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

- 3.3.3.1 หล่อชิ้นงานในเรซินแบบ Hot mount ตามรูปที่ 3.3 เพื่อความสะดวกในการตัดและขัดชิ้นงาน
- 3.3.3.2 ตัดชิ้นงานตามทิศทาง A-A ในรูปที่ 3.3 ด้วยเครื่องตัด Discotom เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคในภาคตัดขวาง
- 3.3.3.3 ขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400, 600, 800, 1000, 1200 และ 4000 ตามลำดับ
- 3.3.3.4 ขัดชิ้นงานด้วยอะลูมินาขนาด 1.0 และ 0.3 ไมครอน กัดด้วยสารละลายกรดไนตริก 5%

- 3.3.3.5 ตรวจสอบความหนาของชั้นผิวแข็ง จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 100 เท่า ดังรูปที่ 3.4 ทำการวัดตลอดผิวหน้าที่ทำในตรายดิงอย่างน้อย 30 จุด
- 3.3.3.6 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง และ SEM



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างการวัดความหนาชั้นในตรายดิงของชิ้นงาน H13 ปกติ จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 100 เท่า ของชิ้นงานที่ทำในตรายดิงแบบพลาสติก

ตารางที่ 3.1 สภาวะในตรายดิงแบบพลาสติกสำหรับชิ้นงานแต่ชิ้น

ชิ้นงาน ที่	อุณหภูมิ, T เคลวิน (K)	เวลา, t ks	N ₂ , P _{N₂}		H ₂ , P _{H₂}		แรงดันไฟฟ้า a (Volt.), E V	กระแสไฟฟ้า a A	หมายเหตุ
			ทอร์ (Torr)	ทอร์ (Torr)	ทอร์ (Torr)	ทอร์ (Torr)			
1	773	36 (10hr)	1.5	4.5	200	0.1-0.2			
2		72(20hr)	1	3					
3	823	36	1	3					
4		72	1.5	4.5					
5	773	36	1.5	4.5					
6		72	1	3					
7	823	36	1	3					
8		72	1.5	4.5					

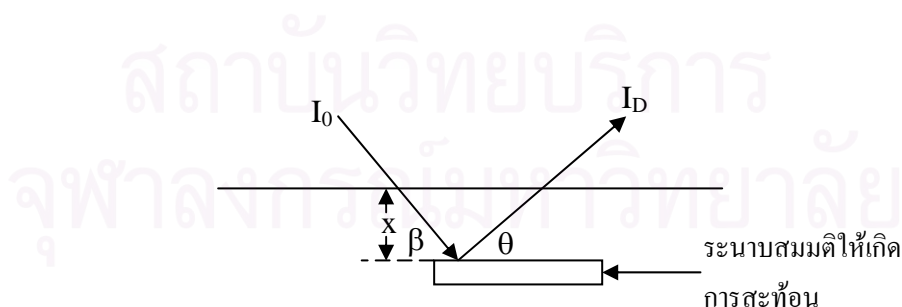
ลดปริมาณ
คาร์บอนที่
ผิว

3.3.4 ตรวจสอบเชิงคุณภาพบริเวณผิวชิ้นงาน

ทำการตรวจสอบชั้นผิวแข็งของชิ้นงานที่ทำในทรายคิงแบบพลาสมา ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ธาตุและสารประกอบ อันได้แก่ เครื่อง Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS) ในกล้องอิเล็กตรอนแบบกวาด เครื่อง Electron Probe Microanalysis (EPMA) และเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) แบบ $\theta=2\theta$ และแบบ Glancing Angle X-ray Diffraction (GAXD) ที่มุมตั้งแต่ 1-5 องศา เพื่อตรวจสอบสารประกอบที่ความลึกต่าง ๆ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างมุมของลำอิเล็กตรอนที่ใช้ตรวจสอบกับความลึกที่สามารถตรวจสอบได้ เป็นไปตามสมการที่ 3.1 [35]

$$\frac{dI_D(x=0)}{dI_D(x=\infty)} = e^{2\mu p/\sin\theta} \quad (3.1)$$

โดย	I_D	คือ	ความเข้มของเอ็กซ์เรย์ที่สะท้อนกลับ (count/sec)
	X	คือ	ระยะลึกจากผิว (m)
	μ	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนคลื่น (absorption coefficient, cm^{-1}) ของวัตถุ
	θ	คือ	มุมระหว่างรังสีสะท้อนกับระนาบที่สะท้อน ดังรูปที่ 3.5
	p	คือ	ระยะลึกจากผิวที่รังสีเกิดการสะท้อนกลับ



รูปที่ 3.5 จำลองการตกกระทบและการสะท้อนของลำอิเล็กตรอน

การคำนวณระยะที่สามารถตรวจสอบได้ มีการกำหนดให้ระยะที่ลำอิเล็กตรอน ผ่านลงไปในตัวและเกิดการสะท้อนที่ระยะ $x=p$ และความเข้มของเอ็กซ์เรย์ที่ตรวจวัดได้มีค่า เป็น $1/1000$ เท่าของ I_D ที่ $x = 0$ เมื่อแทนค่าในสมการที่ 3.1 จะได้

$$\frac{dI_D(x=0)}{dI_D(x=\infty)} = e^{2\mu p/\sin\theta} = 1000$$

และ
$$p = \frac{3.45 \sin \theta}{\mu} \quad (3.2)$$

สำหรับการทดลองนี้พิจารณาความสัมพันธ์การดูดกลืนของธาตุอื่น ๆ ในเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 มีค่าน้อยมาก จึงคิดเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนอิเล็กตรอน K_α ของ Cu ในเหล็ก เท่านั้นซึ่งมีค่าเป็น 38.68cm^{-1} [35] มุมของลำอิเล็กตรอนที่ใช้ตรวจสอบมี 1° และ 5° แทนค่า ในสมการที่ 3.2 จะได้ระยะที่สามารถตรวจสอบได้ของมุม 1° เป็น 25.16 ไมครอน มุม 5° เป็น 125.66 ไมครอน และ $\theta=2\theta$ เป็น 1.25 มิลลิเมตร

3.3.5 การตรวจสอบความแข็งผิวชิ้นงาน

การตรวจสอบความแข็งชั้นผิวแข็งของชิ้นงาน ทำโดยวิธีการทดสอบความแข็ง แบบ Vickers ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ โดยใช้น้ำหนักกด 50 กรัม เริ่ม วัดความแข็งที่ตำแหน่งห่างจากผิว 25 ไมครอน และจุดต่อไปที่ตำแหน่งห่างจากจุดก่อน 10 ไมครอนจนกระทั่งที่ระยะประมาณ 100 ไมครอน ตำแหน่งที่วัดความแข็งต่อจากนี้แต่ละ ตำแหน่งมีระยะห่างกัน 20 ไมครอน วัดความแข็งจนกระทั่งค่าความแข็งที่ได้มีค่าคงที่

3.3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบตามขั้นตอนในข้อ 3.3.3-3.3.5 วิเคราะห์ผลของ อุณหภูมิ และเวลาในการทำในทรายดิงแบบพลาสติกที่มีต่อโครงสร้าง และความหนาของชั้นผิว แข็ง ผลของการสูญเสียปริมาณคาร์บอนที่มีต่อโครงสร้างและความแข็งผิว เพื่อให้มีความเข้าใจ และข้อมูลพื้นฐานที่นำไปใช้ออกแบบชิ้นตอนในทรายดิงแบบพลาสติกของเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ให้มีความหนาผิวแข็งและโครงสร้างตามต้องการ

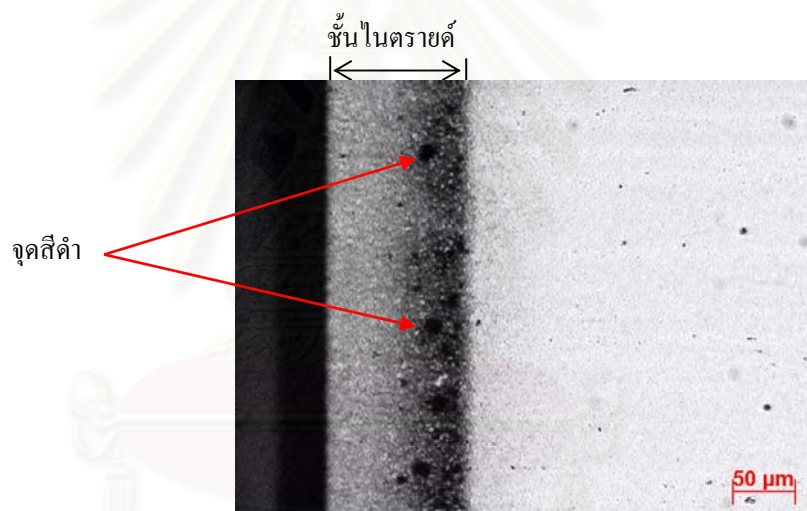
บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผล

4.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อชิ้นงานที่ทำในทรายดิง

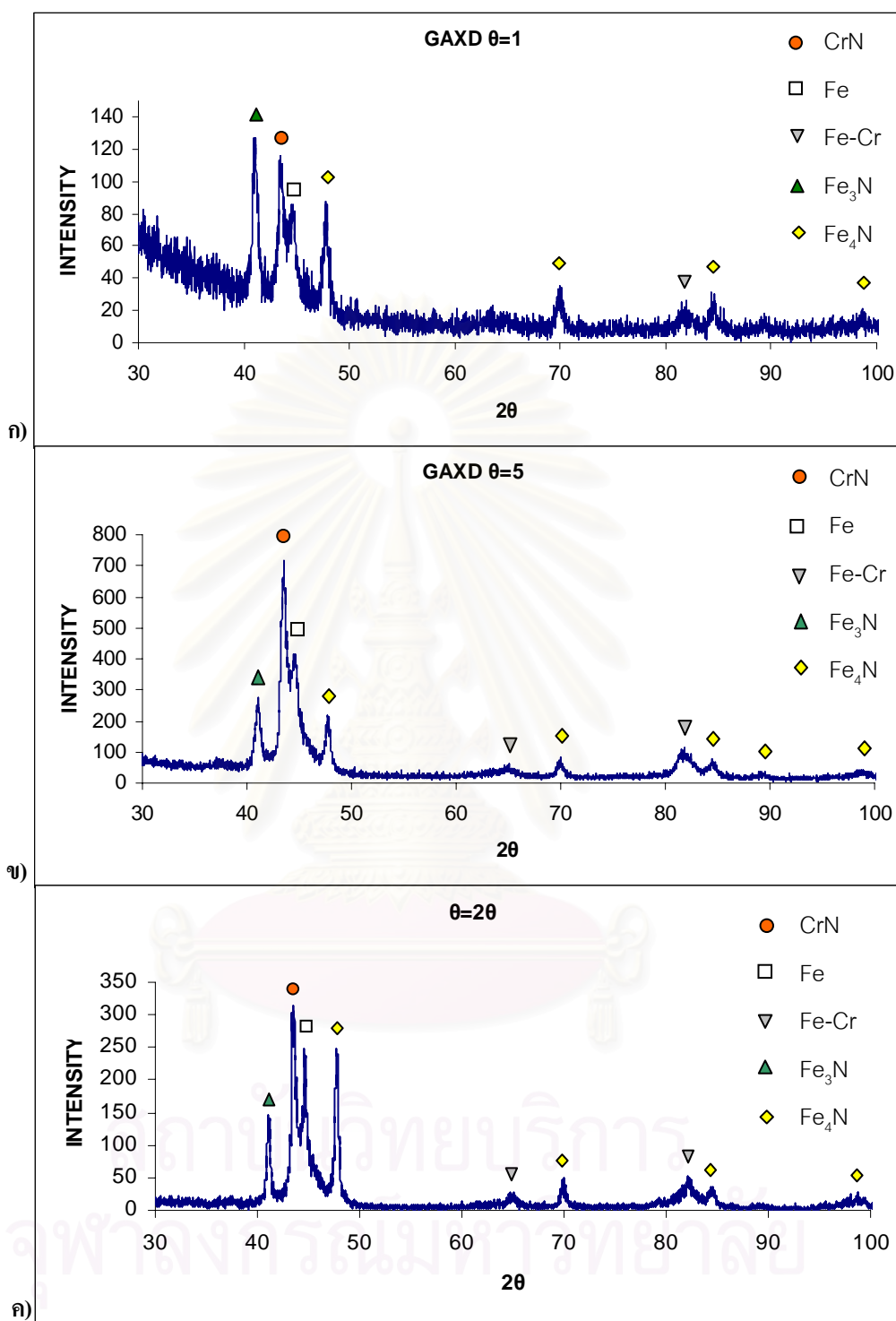
4.1.1 โครงสร้างจุลภาคและความหนาของชั้นผิวแข็งของชิ้นงาน

รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างจุลภาค และความหนาของชั้นผิวแข็งของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่ทำในทรายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773 K เป็นเวลา 72 ks ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 100 เท่า พบว่าชั้นผิวแข็งมีสีเทาดำทั่วทั้งชิ้น และมีเม็ดผลึกที่ตกผลึกออกมากระจายทั่วไปตามบริเวณใกล้กับรอยต่อระหว่างชั้นผิวแข็งกับเนื้อวัสดุภายใน



รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน H13 ปกติ ที่ทำในทรายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773 K เป็นเวลา 72 ks ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 100 เท่า

เมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคชั้นผิวแข็งของชิ้นงานปกติ ที่ทำในทรายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 36ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้มุม $\theta=1^\circ$ ซึ่งมีระยะการตรวจสอบลึกจากผิว 25.16 ไมครอน ได้รูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ดังรูปที่ 4.2 ก) นำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลในคาร์ดข้อมูล JCPDS ได้ผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.1 คือพบว่ายอดกราฟที่มุม $2\theta=41.122^\circ$ ($d=2.1933 \text{ \AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 100% และมีระยะห่างระหว่างระนาบ (d) ใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=41.069^\circ$ ($d=2.1960\text{\AA}$) ในคาร์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 03-0925 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_3N)



รูปที่ 4.2 ผล XRD แบบ GAXD ก) $\theta = 1^\circ$ ข) 5° และ ค) 2θ ของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ปกติที่ทำในทรายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 36 ks

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=43.439^\circ$ ($d=2.0815\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 91.64% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=43.738^\circ$ ($d=2.0680\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 11-0065 ของโครเมียมไนไตรด์ (CrN)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.706^\circ$ ($d=2.0254\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 63.05% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.674^\circ$ ($d=2.0268\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0696 ของเหล็ก (Fe)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.683^\circ$ ($d=1.9056\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 58.12% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.915^\circ$ ($d=1.8970\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=69.967^\circ$ ($d=1.3435\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 20.59% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=70.058^\circ$ ($d=1.3420\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ตารางที่ 4.1 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานปกติ ที่ทำไนไตรดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 36ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้มุม $\theta=1^\circ$

2θ (องศา)	ความเข้ม สัมพัทธ์ (%)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (\AA)	JCPDS No.	สูตรเคมี	2θ (องศา)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (\AA)
41.122	100	2.1933	03-0925	Fe_3N	41.069	2.1960
43.439	91.64	2.0815	11-0065	CrN	43.738	2.0680
44.706	63.05	2.0254	06-0696	Fe	44.674	2.0268
47.683	58.12	1.9056	06-0627	Fe_4N	47.915	1.8970
69.967	20.59	1.3435			70.058	1.3420
81.538	8.23	1.1796	34-0396	Fe-Cr	81.986	1.1743
84.585	16.83	1.1447	06-0627	Fe_4N	84.651	1.1440

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=81.538^\circ$ ($d=1.1796 \text{ \AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 8.23% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=81.986^\circ$ ($d=1.1743 \text{ \AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.585^\circ$ ($d=1.1447 \text{ \AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 16.83% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.651^\circ$ ($d=1.1440 \text{ \AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

และเมื่อเพิ่มระยะการตรวจสอบโดยใช้ XRD แบบ GAXD มุม $\theta=5^\circ$ มีระยะที่สามารถตรวจสอบได้เป็น 125.66 ไมครอน ได้รูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์เป็นดังรูปที่ 4.2) นำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลในการ์ดข้อมูล JCPDS ได้ผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.2 คือพบว่ายอดกราฟที่มุม $2\theta=41.154^\circ$ ($d=2.1916 \text{ \AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 29.38% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=41.069^\circ$ ($d=2.1960 \text{ \AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 03-0925 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_3N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=43.515^\circ$ ($d=2.0780 \text{ \AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 100% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=43.738^\circ$ ($d=2.0680 \text{ \AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 11-0065 ของโครเมียมไนไตรด์ (CrN)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.671^\circ$ ($d=2.0269 \text{ \AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 47.54% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.674^\circ$ ($d=2.0268 \text{ \AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0696 ของเหล็ก (Fe)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.772^\circ$ ($d=1.9023 \text{ \AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 25.02% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.915^\circ$ ($d=1.8970 \text{ \AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=65.006^\circ$ ($d=1.4335 \text{ \AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 3.74% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.779^\circ$ ($d=1.4380 \text{ \AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=69.809^\circ$ ($d=1.3462 \text{ \AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 6.44% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=70.058^\circ$ ($d=1.3420\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=81.458^\circ$ ($d=1.1805 \text{ \AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 8.33% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=81.986^\circ$ ($d=1.1743\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.766^\circ$ ($d=1.1427\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 4.61% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.651^\circ$ ($d=1.1440\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ตารางที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานปกติ ที่ทำไนไตรดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 36ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้มุม $\theta=5^\circ$

2θ (องศา)	ความเข้ม สัมพัทธ์ (%)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (\AA)	JCPDS No.	สูตรเคมี	2θ (องศา)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (\AA)
41.154	29.38	2.1916	03-0925	Fe_3N	41.069	2.1960
43.515	100.00	2.0780	11-0065	CrN	43.738	2.0680
44.671	47.54	2.0269	06-0696	Fe	44.674	2.0268
47.772	25.02	1.9023	06-0627	Fe_4N	47.915	1.8970
65.006	3.74	1.4335	34-0396	Fe-Cr	64.779	1.4380
69.809	6.44	1.3462	06-0627	Fe_4N	70.058	1.3420
81.458	8.33	1.1805	34-0396	Fe-Cr	81.986	1.1743
84.766	4.61	1.1427	06-0627	Fe_4N	84.651	1.1440

และสุดท้ายเมื่อเพิ่มระยะการตรวจสอบโดยใช้ XRD วิธี $\theta=2\theta$ มีระยะลึกที่สุดที่สามารถตรวจสอบได้เป็น 1.25 มิลลิเมตร ได้รูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์เป็นดังรูปที่ 4.2 ค) นำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลในการ์ดข้อมูล JCPDS ได้ผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.3 คือพบว่ายอดกราฟที่มุม $2\theta=41.041^\circ$ ($d=2.1974 \text{ \AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 7.88% และมีระยะห่างระหว่าง

ระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=41.069^\circ$ ($d=2.1960\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 03-0925 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_3N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=43.370^\circ$ ($d=2.0846\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 100% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=43.738^\circ$ ($d=2.0680\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 11-0065 ของโครเมียมไนไตรด์ (CrN)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.602^\circ$ ($d=2.0299\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 42.46% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.674^\circ$ ($d=2.0268\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0696 ของเหล็ก (Fe)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.647^\circ$ ($d=1.9070\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 29.82% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.915^\circ$ ($d=1.8970\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.584^\circ$ ($d=1.4418\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 2.79% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.779^\circ$ ($d=1.4380\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=70.041^\circ$ ($d=1.3423\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 3.67% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=70.058^\circ$ ($d=1.3420\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=82.091^\circ$ ($d=1.1730\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 6.41% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=81.986^\circ$ ($d=1.1743\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.305^\circ$ ($d=1.1478\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 2.01% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.651^\circ$ ($d=1.1440\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ตารางที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานปกติ ที่ทำในทราย
 ดึงแบบพลาสติกที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 36ks ด้วย XRD วิถี $\theta=2\theta$

2θ (องศา)	ความเข้ม สัมพัทธ์ (%)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (Å)	JCPDS No.	สูตรเคมี	2θ (องศา)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (Å)
41.041	7.88	2.1974	03-0925	Fe ₃ N	41.069	2.1960
43.370	100.00	2.0846	11-0065	CrN	43.738	2.0680
44.602	42.46	2.0299	06-0696	Fe	44.674	2.0268
47.647	29.82	1.9070	06-0627	Fe ₄ N	47.915	1.8970
64.584	2.79	1.4418	34-0396	Fe-Cr	64.779	1.4380
70.041	3.67	1.3423	06-0627	Fe ₄ N	70.058	1.3420
82.091	6.41	1.1730	34-0396	Fe-Cr	81.986	1.1743
84.305	2.01	1.1478	06-0627	Fe ₄ N	84.651	1.1440

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบความเข้มสัมพัทธ์ของเฟสต่าง ๆ ที่พบในชั้นผิวแข็งของชิ้นงานปกติที่
 ทำในทรายดึงแบบพลาสติกที่ 773K เป็นเวลา 36ks เมื่อระยะที่ทำการตรวจสอบ
 แตกต่างกัน

เฟส	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)		
	GAXD 1° (25.16 μm)	GAXD 5° (125.66 μm)	XRD $\theta=2\theta$ (1.25 mm)
Fe	63.05	47.54	42.46
Fe ₃ N	100.00	29.38	7.88
Fe ₄ N($2\theta\sim 47^\circ$)	58.12	25.02	29.82
Fe ₄ N($2\theta\sim 70^\circ$)	20.59	6.44	3.67
Fe ₄ N($2\theta\sim 84.5^\circ$)	16.83	4.61	2.01
CrN	91.64	100.00	100.00
Fe-Cr($2\theta\sim 65^\circ$)	-	3.74	2.79
Fe-Cr($2\theta\sim 82^\circ$)	8.23	4.61	2.01

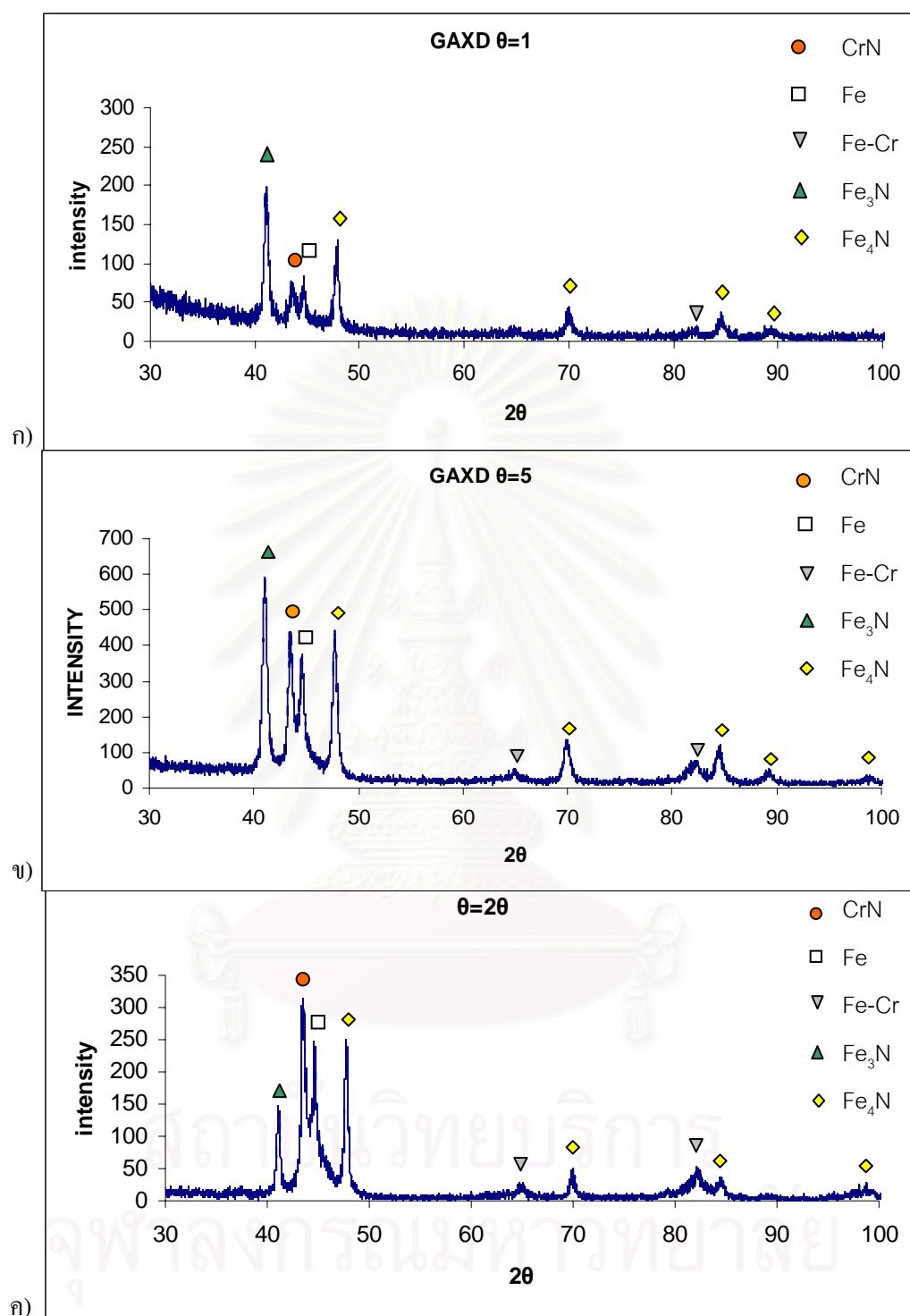
จากผลการตรวจสอบด้วย XRD จะเห็นว่าชั้นผิวแข็งในเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่ทำในทรายดิ่งที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 36 ks ประกอบด้วยเฟส เหล็ก (Fe) เหล็กไนไตรด์ (Fe_3N และ Fe_4N) โครเมียมไนไตรด์ (CrN) และสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr) โดยปริมาณที่พบ (ดูได้จากค่าความเข้มสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบความเข้มของเฟสที่พิจารณา กับเฟสที่มีความเข้มสูงสุด โดยเทียบให้ค่าความเข้มของเฟสที่มีความเข้มสูงสุดเป็น 100) นั้นแตกต่างกันไปตามระยะลึกที่สามารถตรวจสอบได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบความเข้มสัมพัทธ์ของเฟสต่าง ๆ ที่พบในชั้นผิวแข็งเมื่อระยะที่ทำการตรวจสอบแตกต่างกัน จะเห็นว่าบริเวณผิวจะมีปริมาณเฟส Fe_3N มากที่สุด รองลงมาคือเฟส CrN, Fe, Fe_4N และ Fe-Cr ตามลำดับ โดยเฟส Fe_3N , Fe, Fe_4N และ Fe-Cr จะมีปริมาณลดลงเมื่อระยะลึกจากผิวเพิ่มขึ้น แต่ต่างจากเฟส CrN ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อระยะลึกจากผิวเพิ่มขึ้น

รูปที่ 4.3 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่ทำในทรายดิ่งที่อุณหภูมิ 723K เป็นเวลา 72 ks รูปที่ 4.3 ก) เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ที่ตรวจสอบได้จากการใช้ GAXD $\theta=1^\circ$ นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูล JCPDS ได้ผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.5 คือพบว่ายอดกราฟที่มุม $2\theta=41.051^\circ$ ($d=2.1969\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 100% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=41.069^\circ$ ($d=2.1960\text{\AA}$) ในการจัดข้อมูล JCPDS หมายเลข 03-0925 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_3N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=43.526^\circ$ ($d=2.0776\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 26.03% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=43.738^\circ$ ($d=2.0680\text{\AA}$) ในการจัดข้อมูล JCPDS หมายเลข 11-0065 ของโครเมียมไนไตรด์ (CrN)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.718^\circ$ ($d=2.0249\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 21.87% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.674^\circ$ ($d=2.0268\text{\AA}$) ในการจัดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0696 ของเหล็ก (Fe)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.911^\circ$ ($d=1.8971\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 59.97% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.915^\circ$ ($d=1.8970\text{\AA}$) ในการจัดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)



รูปที่ 4.3 ผล XRD ที่ GAXD $\theta = 1^\circ$, 5° , และ 2θ ของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ปกติที่ทำไนโตรยดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 72 ks

ตารางที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานปกติ ที่ทำไนตราย
 ดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 72ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้มุม
 $\theta=1^\circ$

2 θ (องศา)	ความเข้ม สัมพัทธ์ (%)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (Å)	JCPDS No.	สูตรเคมี	2 θ (องศา)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (Å)
41.051	100.00	2.1969	03-0925	Fe ₃ N	41.069	2.1960
43.526	26.03	2.0776	11-0065	CrN	43.738	2.0680
44.718	21.87	2.0249	06-0696	Fe	44.674	2.0268
47.911	59.97	1.8971	06-0627	Fe ₄ N	47.915	1.8970
69.880	17.90	1.3450	06-0627	Fe ₄ N	70.058	1.3420
82.108	4.13	1.1728	34-0396	Fe-Cr	81.986	1.1743
84.622	11.51	1.1443	06-0627	Fe ₄ N	84.651	1.1440
89.192	4.94	1.0971	06-0627	Fe ₄ N	89.412	1.0950

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=69.880^\circ$ ($d=1.3450\text{Å}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 17.90% และมี
 ระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=70.058^\circ$ ($d=1.3420\text{Å}$) ในการ์ดข้อมูล
 JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนตรายด์ (Fe₄N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=82.108^\circ$ ($d=1.1728\text{Å}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 4.13% และมี
 ระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=81.986^\circ$ ($d=1.1743\text{Å}$) ในการ์ดข้อมูล
 JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.622^\circ$ ($d=1.1443\text{Å}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 11.51% และ
 มีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.651^\circ$ ($d=1.1440\text{Å}$) ในการ์ดข้อมูล
 JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนตรายด์ (Fe₄N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=89.192^\circ$ ($d=1.0971\text{Å}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 4.94% และมี
 ระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=89.412^\circ$ ($d=1.0950\text{Å}$) ในการ์ดข้อมูล
 JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนตรายด์ (Fe₄N)

รูปที่ 4.3 ข) เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ที่ตรวจสอบได้จากการใช้ GAXD $\theta=1^\circ$ นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูล JCPDS ได้ผลการเปรียบเทียบบังตารางที่ 4.6 คือ พบว่ายอดกราฟที่มุม $2\theta=41.044^\circ$ ($d=2.1972\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 100% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=41.069^\circ$ ($d=2.1960\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 03-0925 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_3N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=43.424^\circ$ ($d=2.0822\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 68.66% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=43.738^\circ$ ($d=2.0680\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 11-0065 ของโครเมียมไนไตรด์ (CrN)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.585^\circ$ ($d=2.0306\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 57.46% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.674^\circ$ ($d=2.0268\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0696 ของเหล็ก (Fe)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.707^\circ$ ($d=1.9048\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 76.18% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.915^\circ$ ($d=1.8970\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.898^\circ$ ($d=1.4356\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 4.87% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.779^\circ$ ($d=1.4380\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=69.723^\circ$ ($d=1.3476\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 17.13% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=70.058^\circ$ ($d=1.3420\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=82.357^\circ$ ($d=1.1699\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 8.16% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=81.986^\circ$ ($d=1.1743\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.648^\circ$ ($d=1.1440\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 14.21% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.651^\circ$ ($d=1.1440\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=89.313^\circ$ ($d=1.0959\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 5.47% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=89.412^\circ$ ($d=1.0950\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ตารางที่ 4.6 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานปกติ ที่ทำไนไตรดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 72ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้มุม $\theta=5^\circ$

2θ (องศา)	ความเข้ม สัมพัทธ์ (%)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (\AA)	JCPDS No.	สูตรเคมี	2θ (องศา)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (\AA)
41.044	100.00	2.1972	03-0925	Fe_3N	41.069	2.1960
43.424	68.66	2.0822	11-0065	CrN	43.738	2.0680
44.585	57.46	2.0306	06-0696	Fe	44.674	2.0268
47.707	76.18	1.9048	06-0627	Fe_4N	47.915	1.8970
64.898	4.87	1.4356	34-0396	Fe-Cr	64.779	1.4380
69.723	17.13	1.3476	06-0627	Fe_4N	70.058	1.3420
82.357	8.16	1.1699	34-0396	Fe-Cr	81.986	1.1743
84.648	14.21	1.1440	06-0627	Fe_4N	84.651	1.1440
89.313	5.47	1.0959	06-0627	Fe_4N	89.412	1.0950

รูปที่ 4.3 ค) เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ที่ตรวจสอบได้จาก XRD วิธี $\theta=2\theta$ นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูล JCPDS ได้ผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.7 คือพบว่ายอดกราฟที่มุม $2\theta=41.070^\circ$ ($d=2.1959\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 48.28% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=41.069^\circ$ ($d=2.1960\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 03-0925 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_3N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=43.413^\circ$ ($d=2.0827\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 100% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=43.738^\circ$ ($d=2.0680\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 11-0065 ของโครเมียมไนไตรด์ (CrN)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.588^\circ$ ($d=2.0305\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 84.31% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.674^\circ$ ($d=2.0268\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0696 ของเหล็ก (Fe)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.818^\circ$ ($d=1.9006\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 90.08% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.915^\circ$ ($d=1.8970\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.931^\circ$ ($d=1.4350\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 4.90% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.779^\circ$ ($d=1.4380\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ตารางที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานปกติ ที่ทำไนไตรดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 72ks ด้วย XRD วิธี $\theta=2\theta$

2θ (องศา)	ความเข้ม สัมพัทธ์ (%)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (\AA)	JCPDS No.	สูตรเคมี	2θ (องศา)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (\AA)
41.070	48.28	2.1959	03-0925	Fe_3N	41.069	2.1960
43.413	100.00	2.0827	11-0065	CrN	43.738	2.0680
44.588	84.31	2.0305	06-0696	Fe	44.674	2.0268
47.818	90.08	1.9006	06-0627	Fe_4N	47.915	1.8970
64.931	4.90	1.4350	34-0396	Fe-Cr	64.779	1.4380
69.926	12.43	1.3442	06-0627	Fe_4N	70.058	1.3420
82.198	11.89	1.1718	34-0396	Fe-Cr	81.986	1.1743
84.475	8.42	1.1459	06-0627	Fe_4N	84.651	1.1440

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=69.926^\circ$ ($d=1.3442\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 12.43% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=70.058^\circ$ ($d=1.3420\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=82.198^\circ$ ($d=1.1718\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 11.89% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=81.986^\circ$ ($d=1.1743\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.475^\circ$ ($d=1.1459\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 8.42% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.651^\circ$ ($d=1.1440\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบความเข้มสัมพัทธ์ของเฟสต่าง ๆ ที่พบในชั้นผิวแข็งของชิ้นงานปกติที่ทำไนไตรดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 72ks เมื่อระยะที่ทำการตรวจสอบแตกต่างกัน

เฟส	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)		
	GAXD 1° (25.16 μm)	GAXD 5° (125.66 μm)	XRD $\theta=2\theta$ (1.25 mm)
Fe	21.87	57.46	84.31
Fe_3N	100.00	100.00	48.28
$\text{Fe}_4\text{N}(2\theta\sim 47^\circ)$	59.97	76.18	90.08
$\text{Fe}_4\text{N}(2\theta\sim 70^\circ)$	17.99	17.13	12.43
$\text{Fe}_4\text{N}(2\theta\sim 84.5^\circ)$	11.51	14.21	8.42
CrN	26.03	68.66	100.00
$\text{Fe-Cr}(2\theta\sim 65^\circ)$	-	4.87	4.90
$\text{Fe-Cr}(2\theta\sim 82^\circ)$	4.13	8.16	11.89

จากผลการตรวจสอบด้วย XRD จะเห็นว่าชั้นผิวแข็งในเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่ทำไนไตรดิงที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 72ks ประกอบด้วยเฟส เหล็ก (Fe) เหล็กไนไตรด์ (Fe_3N และ Fe_4N) โครเมียมไนไตรด์ (CrN) และสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr) โดยปริมาณที่พบนั้นแตกต่างกันไปตามระยะลึกที่สามารถตรวจสอบได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.8 ซึ่ง

แสดงการเปรียบเทียบความเข้มสัมพัทธ์ของเฟสต่าง ๆ ที่พบในชั้นผิวแข็งเมื่อระยะการตรวจสอบแตกต่างกัน จะเห็นว่าบริเวณผิวจะมีปริมาณเฟส Fe_3N มากที่สุด รองลงมาคือเฟส Fe_4N , CrN, Fe และ Fe-Cr ตามลำดับ จนถึงระยะลึกจากผิว 125.66 ไมครอน จากนั้นเมื่อเพิ่มระยะตรวจสอบเป็น 1.25 มิลลิเมตร พบว่าเฟสที่มีมากที่สุดคือ CrN รองลงมาคือ Fe_3N , Fe, Fe_4N และ Fe-Cr ตามลำดับ เฟส Fe_4N , CrN, Fe และ Fe-Cr จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อระยะลึกจากผิวเพิ่มขึ้น แต่ต่างจากเฟส Fe_3N ที่มีปริมาณคงที่จนถึงระยะ 125.66 ไมครอน และลดลงหลังจากนั้น

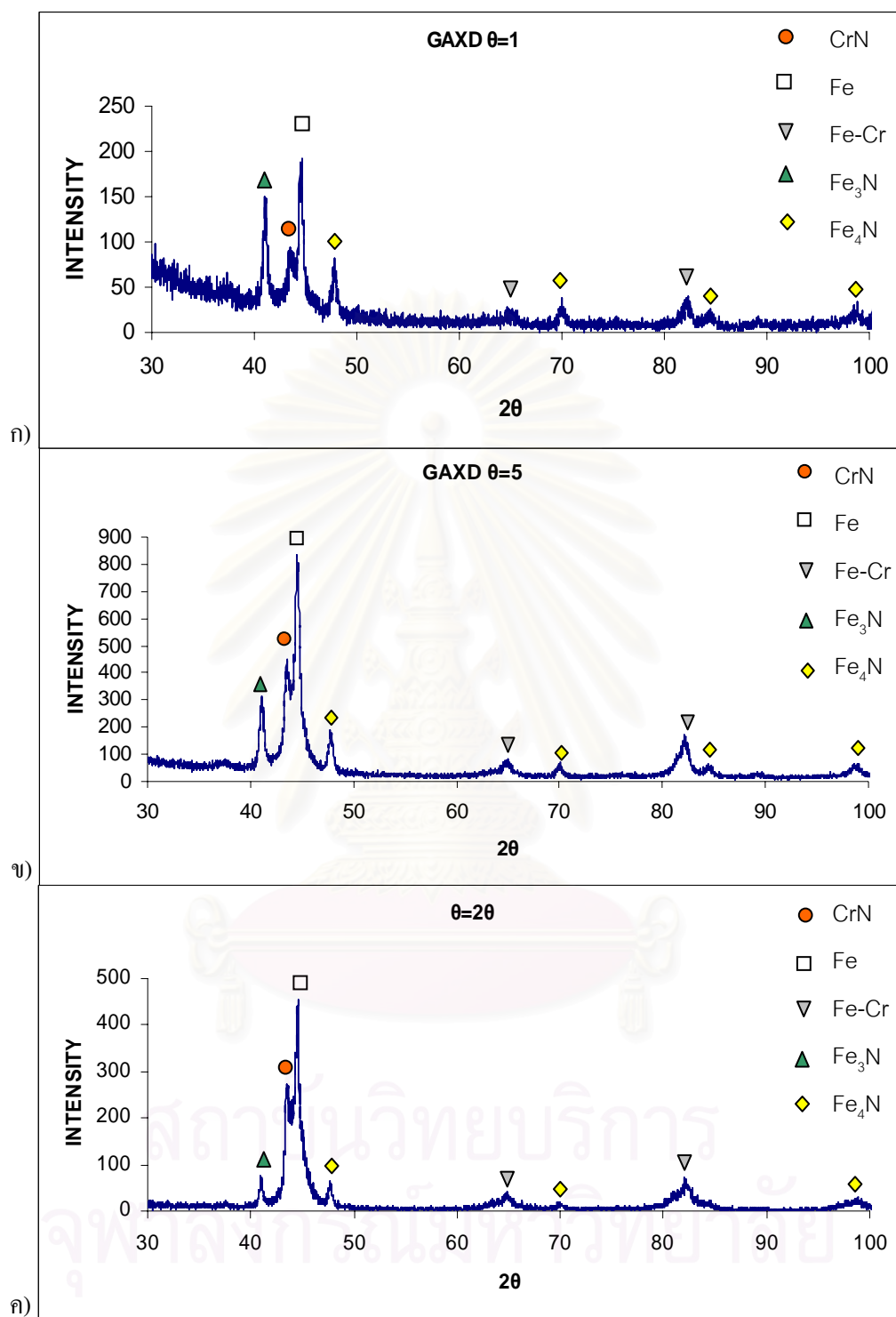
รูปที่ 4.4 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่ทำในตารางดิ่งที่อุณหภูมิ 873K เป็นเวลา 36 ks รูปที่ 4.4 ก) เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ที่ตรวจสอบได้จากการใช้ GAXD $\theta=1^\circ$ นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูล JCPDS ได้ผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.9 คือพบว่ายอดกราฟที่มุม $2\theta=41.064^\circ$ ($d=2.1962\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 75.05% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=41.069^\circ$ ($d=2.1960\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 03-0925 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_3N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=43.475^\circ$ ($d=2.0799\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 34.29% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=43.738^\circ$ ($d=2.0680\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 11-0065 ของโครเมียมไนไตรด์ (CrN)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.632^\circ$ ($d=2.0286\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 100% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.674^\circ$ ($d=2.0268\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0696 ของเหล็ก (Fe)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.816^\circ$ ($d=1.9007\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 32.04% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.915^\circ$ ($d=1.8970\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.913^\circ$ ($d=1.4353\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 4.94% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.779^\circ$ ($d=1.4380\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)



รูปที่ 4.4 ผล XRD ที่ GAXD $\theta = 1^\circ$, 5° , และ 20° ของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ปกติที่ทำในทรายดิงแบบพลาสติกที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 36 ks

ตารางที่ 4.9 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานปกติ ที่ทำไนตรายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 36ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้มุม $\theta=1^{\circ}$

2 θ (องศา)	ความเข้ม สัมพัทธ์ (%)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (Å)	JCPDS No.	สูตรเคมี	2 θ (องศา)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (Å)
41.064	75.05	2.1962	03-0925	Fe ₃ N	41.069	2.1960
43.475	34.29	2.0799	11-0065	CrN	43.738	2.0680
44.632	100.00	2.0286	06-0696	Fe	44.674	2.0268
47.816	32.04	1.9007	06-0627	Fe ₄ N	47.915	1.8970
64.913	4.94	1.4353	34-0396	Fe-Cr	64.779	1.4380
69.877	11.31	1.3450	06-0627	Fe ₄ N	70.058	1.3420
82.220	16.93	1.1715	34-0396	Fe-Cr	81.986	1.1743
84.672	7.13	1.1437	06-0627	Fe ₄ N	84.651	1.1440
89.098	3.14	1.0980	06-0627	Fe ₄ N	89.412	1.0950

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=69.877^{\circ}$ ($d=1.3450\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 11.31% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=70.058^{\circ}$ ($d=1.3420\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนตรายด์ (Fe₄N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=82.220^{\circ}$ ($d=1.1715\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 16.93% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=81.986^{\circ}$ ($d=1.1743\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.672^{\circ}$ ($d=1.1437\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 7.13% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.651^{\circ}$ ($d=1.1440\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนตรายด์ (Fe₄N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=89.098^{\circ}$ ($d=1.0980\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 3.14% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=89.412^{\circ}$ ($d=1.0950\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนตรายด์ (Fe₄N)

รูปที่ 4.4 ข) เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ที่ตรวจสอบได้จากการใช้ GAXD $\theta=5^\circ$ นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูล JCPDS ได้ผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.10 คือ พบว่ายอดกราฟที่มุม $2\theta=41.064^\circ$ ($d=2.1962\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 32.79% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=41.069^\circ$ ($d=2.1960\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 03-0925 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_3N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=43.521^\circ$ ($d=2.0778\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 48.57% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=43.738^\circ$ ($d=2.0680\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 11-0065 ของโครเมียมไนไตรด์ (CrN)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.610^\circ$ ($d=2.0295\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 100% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.674^\circ$ ($d=2.0268\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0696 ของเหล็ก (Fe)

ตารางที่ 4.10 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานปกติ ที่ทำไนไตรดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 36ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้มุม $\theta=5^\circ$

2θ (องศา)	ความเข้ม สัมพัทธ์ (%)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (\AA)	JCPDS No.	สูตรเคมี	2θ (องศา)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (\AA)
41.064	32.79	2.1962	03-0925	Fe_3N	41.069	2.1960
43.521	48.57	2.0778	11-0065	CrN	43.738	2.0680
44.610	100.00	2.0295	06-0696	Fe	44.674	2.0268
47.784	18.14	1.9019	06-0627	Fe_4N	47.915	1.8970
64.743	5.20	1.4387	34-0396	Fe-Cr	64.779	1.4380
70.030	4.59	1.3424	06-0627	Fe_4N	70.058	1.3420
82.123	18.27	1.1726	34-0396	Fe-Cr	81.986	1.1743
84.435	5.00	1.1463	06-0627	Fe_4N	84.651	1.1440
98.853	4.14	1.0141	06-0627	Fe_4N	98.869	1.0140

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.784^\circ$ ($d=1.9019\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 18.14% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.915^\circ$ ($d=1.8970\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.743^\circ$ ($d=1.4387\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 5.20% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.779^\circ$ ($d=1.4380\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=70.030^\circ$ ($d=1.3424\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 4.59% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=70.058^\circ$ ($d=1.3420\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=82.123^\circ$ ($d=1.1726\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 18.27% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=81.986^\circ$ ($d=1.1743\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.435^\circ$ ($d=1.1463\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 5.00% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.651^\circ$ ($d=1.1440\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=98.853^\circ$ ($d=1.0141\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 4.14% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=98.869^\circ$ ($d=1.0140\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

รูปที่ 4.4 ค) เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ที่ตรวจสอบได้จาก XRD วิธี $\theta=2\theta$ นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูล JCPDS ได้ผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.11 คือพบว่ายอดกราฟที่มุม $2\theta=40.965^\circ$ ($d=2.2013\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 13.20% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=41.069^\circ$ ($d=2.1960\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 03-0925 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_3N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=43.609^\circ$ ($d=2.0738\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 53.67% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=43.738^\circ$ ($d=2.0680\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 11-0065 ของโครเมียมไนไตรด์ (CrN)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.546^\circ$ ($d=2.0323\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 100% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.674^\circ$ ($d=2.0268\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0696 ของเหล็ก (Fe)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.587^\circ$ ($d=1.9093\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 7.59% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.915^\circ$ ($d=1.8970\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.812^\circ$ ($d=1.4373\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 4.87% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.779^\circ$ ($d=1.4380\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ตารางที่ 4.11 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานปกติ ที่ทำไนไตรดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 36ks ด้วย XRD วิธี $\theta=2\theta$

2θ (องศา)	ความเข้ม สัมพัทธ์ (%)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (\AA)	JCPDS No.	สูตรเคมี	2θ (องศา)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (\AA)
40.965	13.20	2.2013	03-0925	Fe_3N	41.069	2.1960
43.609	53.67	2.0738	11-0065	CrN	43.738	2.0680
44.546	100.00	2.0323	06-0696	Fe	44.674	2.0268
47.587	7.59	1.9093	06-0627	Fe_4N	47.915	1.8970
64.812	4.87	1.4373	34-0396	Fe-Cr	64.779	1.4380
69.920	2.18	1.3443	06-0627	Fe_4N	70.058	1.3420
82.131	9.04	1.1726	34-0396	Fe-Cr	81.986	1.1743
98.905	2.26	1.0137	06-0627	Fe_4N	98.869	1.0140

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=69.920^\circ$ ($d=1.3443\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 2.18% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=70.058^\circ$ ($d=1.3420\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=82.131^\circ$ ($d=1.1726\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 9.04% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=81.986^\circ$ ($d=1.1743\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=98.905^\circ$ ($d=1.0137\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 2.26% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=98.869^\circ$ ($d=1.0140\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบความเข้มสัมพัทธ์ของเฟสต่าง ๆ ที่พบในชั้นผิวแข็งของชิ้นงานปกติที่ทำไนไตรดิงแบบพลาสมาที่ 823K เป็นเวลา 36ks เมื่อระยะที่ทำการตรวจสอบแตกต่างกัน

เฟส	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)		
	GAXD 1° (25.16 μm)	GAXD 5° (125.66 μm)	XRD $\theta=2\theta$ (1.25 mm)
Fe	100.00	100.00	100.00
Fe_3N	75.05	32.79	13.20
Fe_4N ($2\theta\sim 47^\circ$)	32.04	18.14	7.59
Fe_4N ($2\theta\sim 70^\circ$)	11.31	4.59	2.18
Fe_4N ($2\theta\sim 84.5^\circ$)	7.13	5.00	-
CrN	34.29	48.57	53.67
Fe-Cr ($2\theta\sim 65^\circ$)	4.94	5.20	4.87
Fe-Cr ($2\theta\sim 82^\circ$)	16.93	18.27	9.04

จากผลการตรวจสอบด้วย XRD จะเห็นว่าชั้นผิวแข็งในเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่ทำไนไตรดิงที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 36 ks ประกอบด้วยเฟส เหล็ก (Fe) เหล็กไนไตรด์ (Fe_3N และ Fe_4N) โครเมียมไนไตรด์ (CrN) และสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr) โดยปริมาณที่พบนั้นแตกต่างกันไปตามระยะลึกที่สามารถตรวจสอบได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.12 ซึ่ง

แสดงการเปรียบเทียบความเข้มสัมพัทธ์ของเฟสต่าง ๆ ที่พบในชั้นผิวแข็งเมื่อระยะที่ทำการศึกษาตรวจสอบแตกต่างกัน จะเห็นว่าบริเวณผิวจะมีปริมาณเฟส Fe มากที่สุด รองลงมาคือเฟส Fe_3N , CrN , Fe_4N และ Fe-Cr ตามลำดับ เมื่อเพิ่มระยะการตรวจสอบเป็น 125.66 ไมครอนลึกจากผิวพบว่าเฟสที่มีปริมาณมากที่สุดยังคงเป็นเฟส Fe รองลงมาคือเฟส CrN , Fe_3N , Fe_4N และ Fe-Cr ตามลำดับ โดยเฟส Fe_3N , Fe , Fe_4N และ Fe-Cr จะมีปริมาณลดลงเมื่อระยะลึกจากผิวเพิ่มขึ้น แต่ต่างจากเฟส CrN ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อระยะลึกจากผิวเพิ่มขึ้น

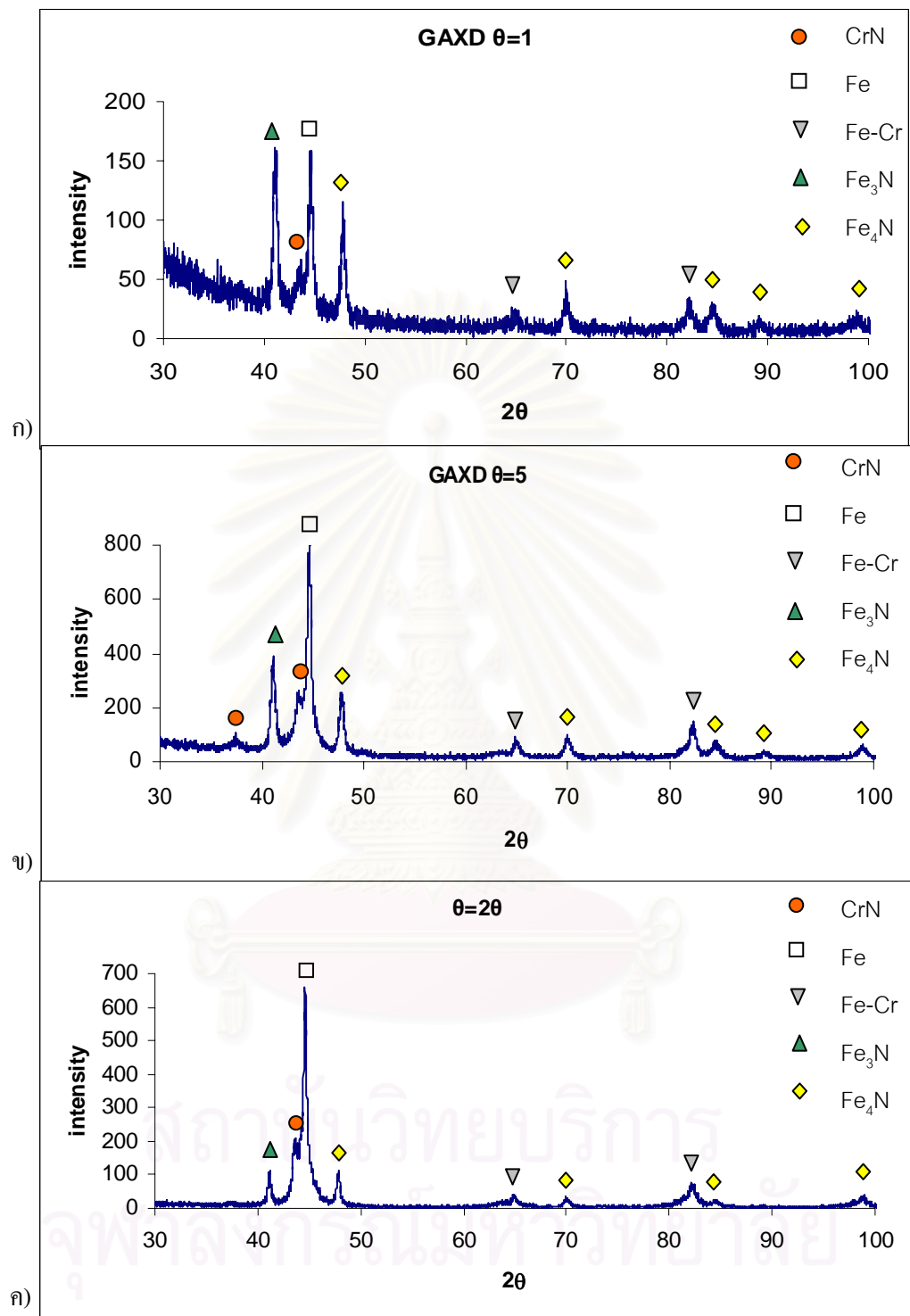
รูปที่ 4.5 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ปกติที่ทำในตารางดิงที่อุณหภูมิ 873K เป็นเวลา 72 ks รูปที่ 4.5 ก) เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ที่ตรวจสอบได้จากการใช้ GAXD $\theta=1^\circ$ นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูล JCPDS ได้ผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.13 คือพบว่ายอดกราฟที่มุม $2\theta=41.145^\circ$ ($d=2.1921\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 95.83% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=41.069^\circ$ ($d=2.1960\text{\AA}$) ในการจัดข้อมูล JCPDS หมายเลข 03-0925 ของเหล็กไนตรายด์ (Fe_3N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=43.458^\circ$ ($d=2.0706\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 19.27% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=43.738^\circ$ ($d=2.0680\text{\AA}$) ในการจัดข้อมูล JCPDS หมายเลข 11-0065 ของโครเมียมไนตรายด์ (CrN)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.581^\circ$ ($d=2.0308\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 100% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.674^\circ$ ($d=2.0268\text{\AA}$) ในการจัดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0696 ของเหล็ก (Fe)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.806^\circ$ ($d=1.9010\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 63.57% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.915^\circ$ ($d=1.8970\text{\AA}$) ในการจัดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนตรายด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=65.026^\circ$ ($d=1.4331\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 8.95% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.779^\circ$ ($d=1.4380\text{\AA}$) ในการจัดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)



รูปที่ 4.5 ผล XRD ที่ GAXD $\theta = 1^\circ$, 5° , และ 20° ของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ปกติที่ทำในทรายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72 ks

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=70.100^\circ$ ($d=1.3413\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 18.64% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=70.058^\circ$ ($d=1.3420\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=82.087^\circ$ ($d=1.1731\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 13.57% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=81.986^\circ$ ($d=1.1743\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.703^\circ$ ($d=1.1434\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 16.31% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.651^\circ$ ($d=1.1440\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ตารางที่ 4.13 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานปกติ ที่ทำไนไตรดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้มุม $\theta=1^\circ$

2θ (องศา)	ความเข้ม สัมพัทธ์ (%)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (\AA)	JCPDS No.	สูตรเคมี	2θ (องศา)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (\AA)
41.145	95.83	2.1921	03-0925	Fe_3N	41.069	2.1960
43.458	19.27	2.0706	11-0065	CrN	43.738	2.0680
44.581	100.00	2.0308	06-0696	Fe	44.674	2.0268
47.806	63.57	1.9010	06-0627	Fe_4N	47.915	1.8970
65.026	8.95	1.4331	34-0396	Fe-Cr	64.779	1.4380
70.100	18.64	1.3413	06-0627	Fe_4N	70.058	1.3420
82.087	13.57	1.1731	34-0396	Fe-Cr	81.986	1.1743
84.703	16.31	1.1434	06-0627	Fe_4N	84.651	1.1440
89.231	5.60	1.0950	06-0627	Fe_4N	89.412	1.0950
98.942	5.10	1.0134	06-0627	Fe_4N	98.869	1.0140

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=89.231^\circ$ ($d=1.0967\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 5.60% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=89.412^\circ$ ($d=1.0950\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=98.942^\circ$ ($d=1.0134\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 5.10% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=98.869^\circ$ ($d=1.0140\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

รูปที่ 4.5 ข) เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ที่ตรวจสอบได้จากการใช้ GAXD $\theta=5^\circ$ นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูล JCPDS ได้ผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.14 คือ พบว่ายอดกราฟที่มุม $2\theta=41.109^\circ$ ($d=2.1939\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 42.44% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=41.069^\circ$ ($d=2.1960\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 03-0925 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_3N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=43.596^\circ$ ($d=2.0744\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 24.97% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=43.738^\circ$ ($d=2.0680\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 11-0065 ของโครเมียมไนไตรด์ (CrN)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.684^\circ$ ($d=2.0264\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 100% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.674^\circ$ ($d=2.0268\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0696 ของเหล็ก (Fe)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.730^\circ$ ($d=1.9039\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 27.95% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.915^\circ$ ($d=1.8970\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.905^\circ$ ($d=1.4355\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 7.25% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.779^\circ$ ($d=1.4380\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=69.900^\circ$ ($d=1.3446\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 9.36% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=70.058^\circ$ ($d=1.3420\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=82.088^\circ$ ($d=1.1731\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 14.58% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=81.986^\circ$ ($d=1.1743\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.416^\circ$ ($d=1.1466\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 7.11% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.651^\circ$ ($d=1.1440\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ตารางที่ 4.14 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานปกติ ที่ทำไนไตรดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้มุม $\theta=5^\circ$

2θ (องศา)	ความเข้ม สัมพัทธ์ (%)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (\AA)	JCPDS No.	สูตรเคมี	2θ (องศา)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (\AA)
41.109	42.44	2.1939	03-0925	Fe_3N	41.069	2.1960
43.596	24.97	2.0744	11-0065	CrN	43.738	2.0680
44.684	100.00	2.0264	06-0696	Fe	44.674	2.0268
47.730	27.95	1.9039	06-0627	Fe_4N	47.915	1.8970
64.905	7.25	1.4355	34-0396	Fe-Cr	64.779	1.4380
69.900	9.36	1.3446	06-0627	Fe_4N	70.058	1.3420
82.088	14.58	1.1731	34-0396	Fe-Cr	81.986	1.1743
84.416	7.11	1.1466	06-0627	Fe_4N	84.651	1.1440
89.231	2.37	1.0964	06-0627	Fe_4N	89.412	1.0950
98.942	5.10	1.0134	06-0627	Fe_4N	98.869	1.0140

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=89.231^\circ$ ($d=1.0964\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 2.37% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=89.412^\circ$ ($d=1.0950\text{\AA}$) ในการค้นหาข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=98.942^\circ$ ($d=1.0134\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 5.10% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=98.869^\circ$ ($d=1.0140\text{\AA}$) ในการค้นหาข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

รูปที่ 4.5 ค) เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ที่ตรวจสอบได้จาก XRD วิธี $\theta=2\theta$ นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูล JCPDS ได้ผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.15 คือพบว่ายอดกราฟที่มุม $2\theta=41.122^\circ$ ($d=2.1933\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 14.46% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=41.069^\circ$ ($d=2.1960\text{\AA}$) ในการค้นหาข้อมูล JCPDS หมายเลข 03-0925 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_3N)

ตารางที่ 4.15 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานปกติ ที่ทำไนไตรดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72ks ด้วย XRD แบบ $\theta=2\theta$

2θ (องศา)	ความเข้ม สัมพัทธ์ (%)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (\AA)	JCPDS No.	สูตรเคมี	2θ (องศา)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (\AA)
41.122	14.46	2.1923	03-0925	Fe_3N	41.069	2.1960
43.476	23.51	2.0798	11-0065	CrN	43.738	2.0680
44.610	100.00	2.0295	06-0696	Fe	44.674	2.0268
47.929	13.02	1.8964	06-0627	Fe_4N	47.915	1.8970
64.872	4.14	1.4361	34-0396	Fe-Cr	64.779	1.4380
70.066	3.39	1.3418	06-0627	Fe_4N	70.058	1.3420
82.199	9.42	1.1718	34-0396	Fe-Cr	81.986	1.1743
98.737	3.01	1.0150	06-0627	Fe_4N	98.869	1.0140

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=43.476^\circ$ ($d=2.0798\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 23.51% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=43.738^\circ$ ($d=2.0680\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 11-0065 ของโครเมียมไนไตรด์ (CrN)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.610^\circ$ ($d=2.0295\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 100% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.674^\circ$ ($d=2.0268\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0696 ของเหล็ก (Fe)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.929^\circ$ ($d=1.8964\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 13.02% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.915^\circ$ ($d=1.8970\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.872^\circ$ ($d=1.4361\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 4.14% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.779^\circ$ ($d=1.4380\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=70.066^\circ$ ($d=1.3418\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 3.39% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=70.058^\circ$ ($d=1.3420\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=82.199^\circ$ ($d=1.1718\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 9.42% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=81.986^\circ$ ($d=1.1743\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=98.737^\circ$ ($d=1.0150\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 3.01% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=98.869^\circ$ ($d=1.0140\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

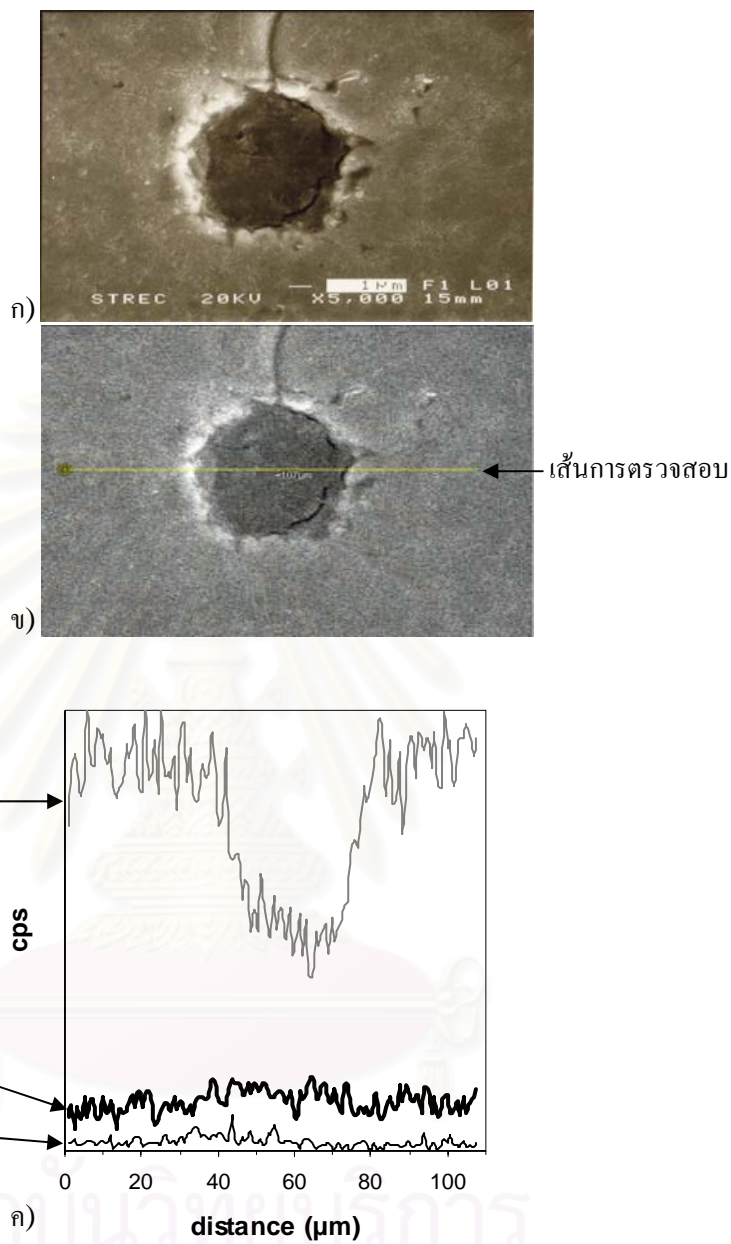
จากผลการตรวจสอบด้วย XRD จะเห็นว่าชั้นผิวแข็งในเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่ทำไนไตรดิงที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72ks ประกอบด้วยเฟส เหล็ก (Fe) เหล็กไนไตรด์ (Fe_3N และ Fe_4N) โครเมียมไนไตรด์ (CrN) และสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr) โดยปริมาณที่พบนั้นแตกต่างกันไปตามระยะลึกที่สามารถตรวจสอบได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.16 ซึ่ง

แสดงการเปรียบเทียบความเข้มข้นของเฟสต่าง ๆ ที่พบในชั้นผิวแข็งเมื่อระยะที่ทำการตรวจสอบแตกต่างกัน จะเห็นว่าบริเวณผิวจะมีปริมาณเฟส Fe มากที่สุด รองลงมาคือเฟส Fe_3N , Fe_4N , CrN และ Fe-Cr ตามลำดับ เมื่อเพิ่มระยะการตรวจสอบเป็น 125.66 ไมครอนลึกจากผิวพบว่าเฟสที่มีปริมาณมากที่สุดคือเฟส Fe รองลงมาคือเฟส CrN, Fe_3N , Fe_4N และ Fe-Cr ตามลำดับ โดยเฟส Fe_3N , Fe, Fe_4N และ Fe-Cr จะมีปริมาณลดลงเมื่อระยะลึกจากผิวเพิ่มขึ้น แต่ต่างจากเฟส CrN ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อระยะลึกจากผิวเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.16 เปรียบเทียบความเข้มข้นของเฟสต่าง ๆ ที่พบในชั้นผิวแข็งของชิ้นงานปกติที่ทำในตรายคิงแบบพลาสมาที่ 823K เป็นเวลา 72ks เมื่อระยะที่ทำการตรวจสอบแตกต่างกัน

เฟส	ความเข้มข้น (%)		
	GAXD 1° (25.16 μ m)	GAXD 5° (125.66 μ m)	XRD $\theta=2\theta$ (1.25 mm)
Fe	100.00	100.00	100.00
Fe_3N	95.83	42.44	14.46
Fe_4N ($2\theta\sim 47^\circ$)	63.57	27.95	13.02
Fe_4N ($2\theta\sim 70^\circ$)	18.64	9.36	3.39
Fe_4N ($2\theta\sim 84.5^\circ$)	16.31	7.11	-
CrN	19.27	24.97	23.51
Fe-Cr ($2\theta\sim 65^\circ$)	8.95	7.25	4.14
Fe-Cr ($2\theta\sim 82^\circ$)	13.57	14.58	9.42

และเมื่อนำชิ้นงานปกติที่ทำในตรายคิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72ks ไปตรวจสอบด้วยเครื่อง SEM พร้อมเครื่อง Energy Dispersive Spectrometer: EDS ได้ผลดังรูปที่ 4.6 โดยรูปที่ 4.6 ก) เป็นภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 5000 เท่า ของเม็ดผลึกสีดำ รูปที่ 4.6 ข) เป็นภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงแนวเส้นที่ทำการวิเคราะห์เชิงเส้น และรูปที่ 4.6 ค) เป็นผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ เหล็ก โครเมียม และคาร์บอน ตามแนวเส้นที่แสดงในรูปที่ 4.6 ข) จะเห็นว่าเมื่อถึงบริเวณที่เป็นเม็ดผลึกเส้นกราฟแสดงปริมาณเหล็กลดลง ในขณะที่เส้นกราฟแสดงปริมาณโครเมียม และคาร์บอนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทำให้ทราบว่าเม็ดผลึกสีดำที่พบในภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงประกอบด้วยธาตุคาร์บอน และโครเมียมสูง

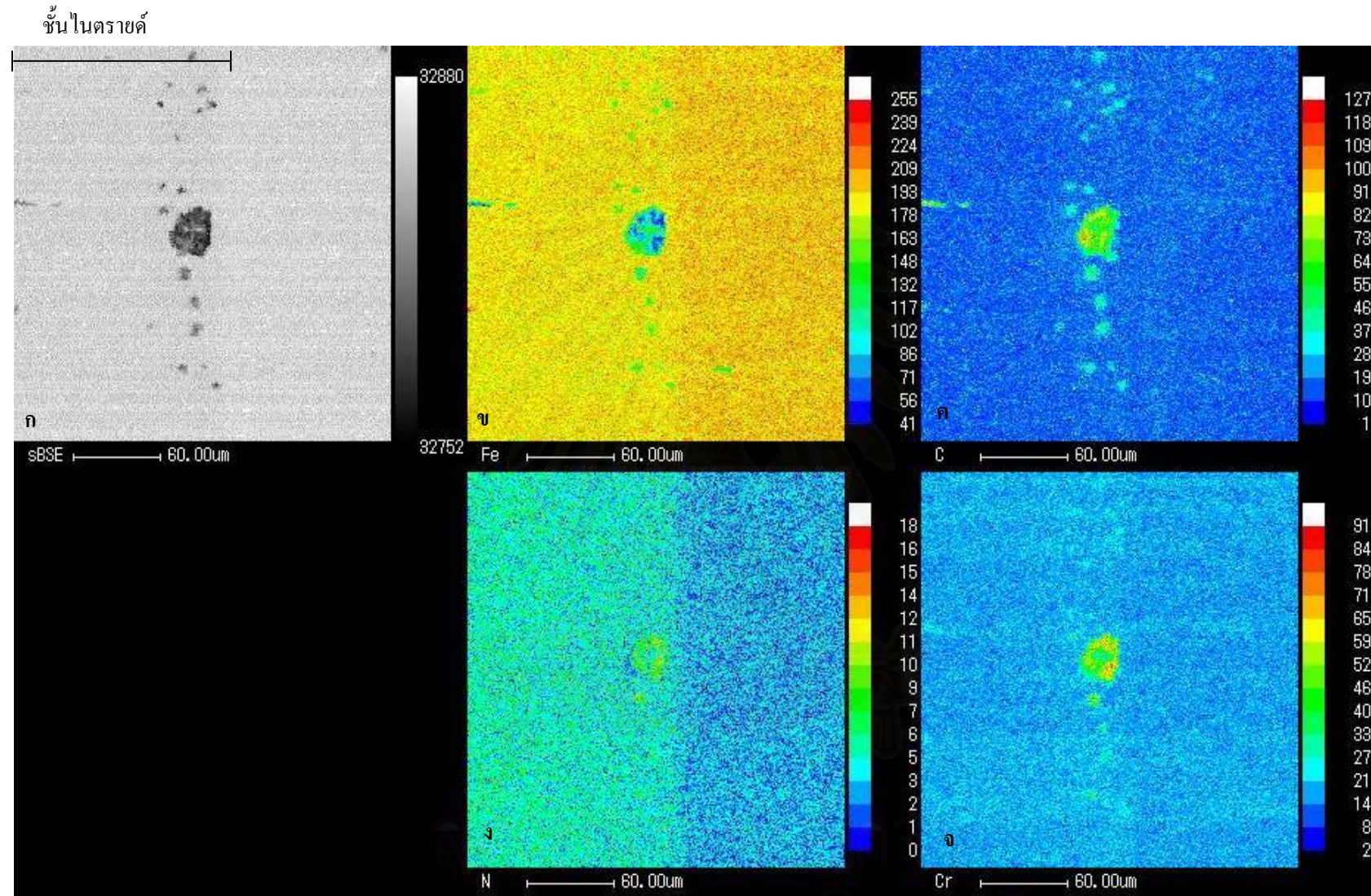


รูปที่ 4.6 ผลการตรวจสอบด้วย EDS ของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ปกติที่ทำในทรายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72 ks ก) ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ข) ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงระยะที่ทำการตรวจสอบ ค) เส้นกราฟแสดงการกระจายของธาตุ Fe Cr และ C

แต่เนื่องจากชิ้นงานได้ทำในทรายดิงแบบพลาสติก เพื่อตรวจหาการกระจายตัวของธาตุไนโตรเจน ซึ่งไม่สามารถทำได้ด้วย EDS (ด้วยข้อจำกัดของ EDS ที่มีความไวในการวิเคราะห์ธาตุเบาที่มีเลขปรมาณูต่ำกว่า 11 ไม่ดีเท่า WDS) จึงทำการตรวจสอบด้วย EPMA นอกจากนี้เพื่อยืนยันลักษณะการกระจายตัวของธาตุเหล็ก คาร์บอน ไนโตรเจน และโครเมียม ภายในชิ้นในทรายด์ของชิ้นงานจึงมีการตรวจสอบปริมาณธาตุเหล่านี้ด้วย EPMA ได้ผลการตรวจสอบดังรูปที่ 4.7 ปริมาณของธาตุบอกได้จากการเทียบสีที่ปรากฏในภาพถ่ายการกระจายตัวของธาตุ กับแถบสีแสดงปริมาณที่อยู่ด้านขวาของรูป รูปที่ 4.7 ก) คือภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของชิ้นในทรายด์ที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน รูปที่ 4.7 ข) เป็นภาพแสดงการกระจายตัวของธาตุเหล็กมีบริเวณที่เป็นชิ้นในทรายด์เป็นสีเหลืองอ่อน เมื่อเปรียบเทียบกับแถบสีด้านข้างแสดงว่ามีปริมาณธาตุเหล็กอยู่ประมาณ 193-209 count/second เมื่อสิ้นสุดชิ้นในทรายด์จากภาพเป็นบริเวณที่เป็นสีเหลืองเข้มขึ้น แสดงว่ามีปริมาณธาตุเหล็กประมาณ 209-224 count/second และบริเวณที่เป็นสีดำในรูป 4.7 ก) ซึ่งก็คือเม็ดผลึกสีดำที่ตกผลึกออกมา ในรูป 4.7 ข) นี้เป็นบริเวณที่เป็นสีเขียวซึ่งแสดงว่าประกอบด้วยธาตุเหล็กประมาณ 132-148 count/second และบางส่วนภายในเม็ดผลึกยังเป็นสีฟ้าถึงสีน้ำเงินแสดงถึงการมีปริมาณธาตุเหล็กอยู่ประมาณ 41-102 count/second แสดงว่าบริเวณชิ้นในทรายด์จะมีปริมาณธาตุเหล็กน้อยกว่าภายในชิ้นงาน และยิ่งพบน้อยมากตรงบริเวณเม็ดผลึกสีดำ

รูปที่ 4.7 ค) เป็นภาพแสดงการกระจายตัวของธาตุคาร์บอน การกระจายตัวของธาตุคาร์บอนสม่ำเสมอทั้งในชิ้นในทรายด์ และภายในชิ้นงานซึ่งจะเห็นได้จากในภาพเป็นสีน้ำเงินทั้งภาพ ยกเว้นบริเวณที่เป็นเม็ดผลึกสีดำเป็นบริเวณที่เป็นสีฟ้า เขียว จนถึงสีเหลืองตรงบริเวณกลางเม็ดผลึก นั่นแสดงว่าทั่วชิ้นงานมีปริมาณคาร์บอนประมาณ 1-28 count/second ส่วนบริเวณเม็ดผลึกมีคาร์บอนประมาณ 28-46 count/second ตรงบริเวณที่เป็นสีฟ้า 46-73 count/second ตรงบริเวณที่เป็นสีเขียวและ 82-100 count/second ตรงบริเวณที่เป็นสีเหลือง นั่นคือปริมาณคาร์บอนมีสม่ำเสมอทั้งชิ้นในทรายด์และภายในชิ้นงาน แต่จะพบมากบริเวณที่เป็นเม็ดผลึก

รูปที่ 4.7 ง) เป็นภาพแสดงการกระจายตัวของธาตุไนโตรเจน จากภาพจะเห็นว่าบริเวณที่เป็นชิ้นในทรายด์จะมีสีเขียว และสีเขียวมีความหนาแน่นมากขึ้นบริเวณขอบด้านในของเม็ดผลึก ส่วนภายในชิ้นงานจะมีสีน้ำเงิน เมื่อเปรียบเทียบกับแถบสีด้านข้างทำให้ทราบว่าบริเวณชิ้นในทรายด์ประกอบด้วยไนโตรเจนประมาณ 5-10 count/second และภายในชิ้นงานประกอบด้วยไนโตรเจนประมาณ 0-5 count/second ปริมาณไนโตรเจนบริเวณที่เป็นชิ้นในทรายด์มีมากกว่าภายในชิ้นงาน และมีความหนาแน่นมากบริเวณขอบด้านในของเม็ดผลึก



รูปที่ 4.7 แผนที่ยังสีเอกซ์บนชิ้นงานปกติที่ทำไนตรายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72 ks ก) ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ข) ภาพการกระจายของ Fe ค) ภาพการกระจายของ C ง) ภาพการกระจายของ N จ) ภาพการกระจายของ Cr

รูปที่ 4.7 จ) เป็นภาพแสดงการกระจายตัวของธาตุโครเมียม มีระดับสีเป็นสีน้ำเงินปนเขียวสม่ำเสมอทั่วทั้งชั้นในทรายค้และภายในชิ้นงาน ยกเว้นตำแหน่งที่เป็นเม็ดผลึกระดับสีจะเป็นสีเขียว และมีบางส่วนเป็นสีเหลือง เปรียบเทียบกับแถบสีด้านข้างทำให้ทราบว่าทั้งชั้นในทรายค้และภายในชิ้นงานมีระดับโครเมียมประมาณ 8-27 count/second ส่วนตำแหน่งเม็ดผลึกมีโครเมียมสูงขึ้นคือประมาณ 33-52 count/second และบางส่วนสูงถึง 59-78 count/second

สรุปจากการตรวจสอบชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ปกติ ที่ทำในทรายค้แบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72ks ด้วย EPMA ทำให้ทราบว่าบริเวณชั้นในทรายค้มีปริมาณธาตุเหล็กน้อยกว่า มีปริมาณธาตุไนโตรเจนมากกว่า และมีปริมาณธาตุคาร์บอนกับโครเมียมเท่ากันเมื่อเทียบกับภายในชิ้นงาน ซึ่งเป็นผลที่สอดคล้องกับผลที่พบว่าชั้นในทรายค้ประกอบด้วยเฟส Fe_3N , Fe_4N , CrN และ Fe-Cr จากการตรวจสอบด้วย XRD นอกจากนี้ยังทำให้ทราบว่าเม็ดผลึกสีดำที่พบในโครงสร้างจุลภาคเป็นบริเวณที่ประกอบด้วยธาตุ คาร์บอน และโครเมียมปริมาณสูง และบริเวณขอบด้านในของเม็ดผลึกเป็นบริเวณที่มีไนโตรเจนรวมตัวกันอย่างหนาแน่นสม่ำเสมอ จึงน่าจะกล่าวได้ว่าเม็ดผลึกดังกล่าวเป็นตำแหน่งที่ประกอบด้วยเฟสโครเมียมคาร์ไบด์และโครเมียมในทรายค้

ตารางที่ 4.17 ค่าความหนาเฉลี่ยของชั้นผิวแข็งของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ปกติ ทำพลาสมาในทรายค้ที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ

อุณหภูมิ (K)	เวลา (ks)	ความหนาชั้นผิวแข็ง (μm)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
773	36	96.01	3.49
	72	113.61	5.61
823	36	129.94	3.49
	72	173.09	8.15

พิจารณาความหนาของชั้นในทรายค้ นำค่าความหนาชั้นในทรายค้ที่ได้จากการวัดจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงมาหาค่าความหนาเฉลี่ยของแต่ละชิ้นงานได้ดังตารางที่ 4.12 โดยชิ้นงานที่ทำในทรายค้แบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 36 และ 72 ks มีความหนาชั้นผิวแข็งเป็น 88.06 ไมครอน(ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 2.84) และ 98.13 ไมครอน(ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 6.38) ตามลำดับ และสำหรับชิ้นงานที่ทำในทรายค้แบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 36 และ 72 ks มีความหนาชั้นผิวแข็งเป็น 118.89 ไมครอน(ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 6.55) และ

169.89 ไมครอน(ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 5.34) ตามลำดับ จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะสังเกตได้ว่า ชั้นผิวแข็งที่ได้ก่อนข้างมีความสม่ำเสมอมาก ซึ่งเป็นผลจากข้อดีข้อหนึ่งของกระบวนการไนตรายดิงแบบพลาสมาดังที่มีรายงานในงานของ Prabhudev K. H. [10] ว่าเนื่องจากสมบัติของโกลดิชชาร์ต ที่มีการคายประจุอยู่ในช่วงแอมบอร์มอล ซึ่งเกิดจากการที่มีความเข้มกระแสไฟฟ้าสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน ทำให้เกิดความร้อนและชั้นผิวแข็งสม่ำเสมอทั้งชิ้นงาน

4.1.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนาของชั้นไนตรายด์

ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนาของชั้นไนตรายด์อาจพิจารณาได้จากตารางที่ 4.17 และภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 4.8 และ 4.9 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นไนตรายด์กับอุณหภูมิในการทำไนตรายดิงของชิ้นงานที่ทำไนตรายดิงแบบพลาสมาเป็นเวลา 32 และ 72 ks ตามลำดับ ชิ้นงานที่ทำไนตรายดิงที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 36 ks ได้ชั้นไนตรายด์หนาเฉลี่ย 129.94 ไมครอน ซึ่งหนากว่าชั้นไนตรายด์ในชิ้นงานที่ใช้ระยะเวลาในการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาเท่ากัน ที่อุณหภูมิ 773K ซึ่งชั้นไนตรายด์หนาเฉลี่ย 96.01 ไมครอน (รูปที่ 4.8) และชิ้นงานที่ทำไนตรายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72 ks มีชั้นไนตรายด์หนาเฉลี่ย 173.09 ไมครอน ซึ่งหนากว่าชั้นไนตรายด์ในชิ้นงานที่ทำไนตรายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773K ใช้ระยะเวลาเท่ากัน ได้ชั้นไนตรายด์หนาเฉลี่ย 113.61 ไมครอน (รูปที่ 4.9) แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่ควบคุมความหนาของชั้นไนตรายด์ในกระบวนการไนตรายดิงแบบพลาสมา คือชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิสูงจะได้ชั้นไนตรายด์ที่หนากว่า ชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิต่ำ

4.1.3 ผลของเวลาที่มีต่อความหนาของชั้นไนตรายด์

ผลของเวลาที่มีต่อความหนาของชั้นไนตรายด์อาจพิจารณาได้จากตารางที่ 4.17 และภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 4.10 และ 4.11 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นไนตรายด์กับระยะเวลาในการทำไนตรายดิงของชิ้นงานที่ทำไนตรายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773 และ 823K ตามลำดับ ชิ้นงานที่ทำไนตรายดิงที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 72 ks ได้ชั้นไนตรายด์หนาเฉลี่ย 113.61 ไมครอน ซึ่งหนากว่าชั้นไนตรายด์ในชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิเดียวกัน แต่ใช้เวลา 36 ks ซึ่งมีชั้นไนตรายด์หนาเฉลี่ย 96.01 ไมครอน (รูปที่ 4.10) และชิ้นงานที่ทำไนตรายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72 ks มีชั้นไนตรายด์หนาเฉลี่ย 173.09 ไมครอน ซึ่งหนากว่าชั้นไนตรายด์ในชิ้นงานที่ใช้ระยะเวลาทำไนตรายดิงแบบพลาสมา 36 ks ซึ่งมีชั้นไนตรายด์หนาเฉลี่ย 129.94 ไมครอน (รูปที่ 4.11) จึงสรุปได้ว่าระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการไนตรายดิงแบบพลาสมาเป็นปัจจัยหนึ่งที่กำหนดความหนาของชั้นไนตรายด์ของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ปกติ นั่น

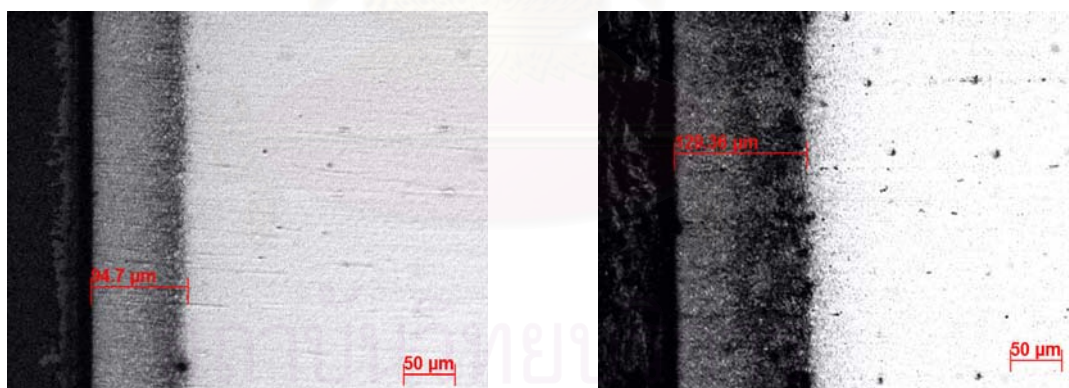
คือชิ้นงานที่ใช้ระยะเวลาในกระบวนการนานกว่าจะได้ชั้นไนไตรด์ที่หนากว่าชิ้นงานที่ใช้ระยะเวลาน้อยกว่า

4.1.4 กลไกการเกิดชั้นไนไตรด์ของเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่ทำไนไตรดิงแบบพลาสมา

จากผลการทดลองข้างต้นจะเห็นว่า การเกิดชั้นไนไตรด์ของชิ้นงานปกติในกระบวนการไนไตรดิงแบบพลาสมามีระยะเวลา และอุณหภูมิในการทำไนไตรดิงเป็นตัวแปรที่ควบคุมความหนาของชั้นไนไตรด์ที่เกิดขึ้น จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนากับรากที่สองของเวลาตามสมการของ Wagner

$$X^2 = K_p \cdot t \quad (4.1)$$

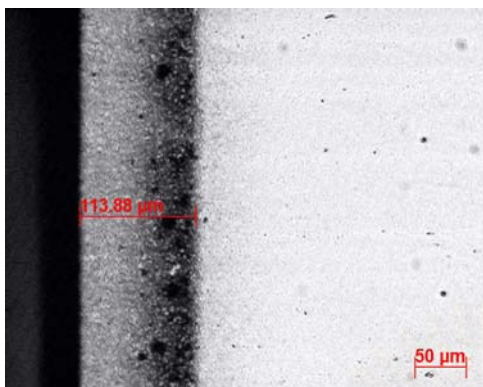
โดย X คือ ความหนาของชั้นไนไตรด์
 K_p คือ ค่าคงที่ของอัตราการเพิ่มขึ้นของชั้นไนไตรด์ (The growth rate constant of nitriding)
 t คือ ระยะเวลาที่ทำไนไตรดิง



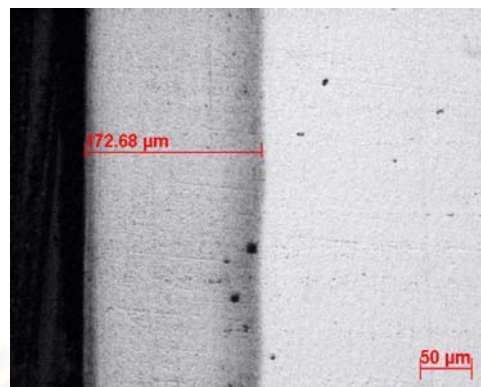
ก) ชิ้นงาน H13 ปกติ และทำไนไตรดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 36 ks

ข) ชิ้นงาน H13 ปกติ และทำไนไตรดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 36 ks

รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบความหนาชั้นผิวแข็งของชิ้นงาน H13 ปกติ จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 100 เท่า ระหว่างชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิไนไตรดิงแบบพลาสมา 773K กับ 823K เป็นเวลา 36 ks

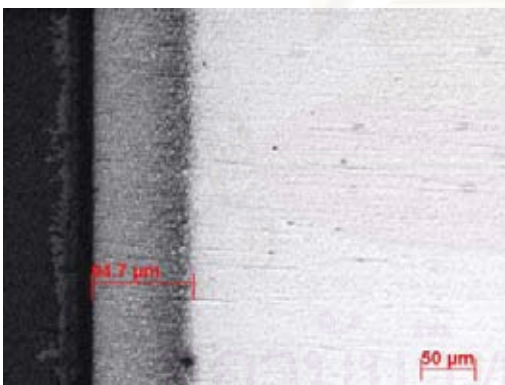


ก) ชิ้นงาน H13 ปกติ และทำในทรายดิ่ง
แบบพลาสติกที่อุณหภูมิ 773K เป็น
เวลา 72 ks

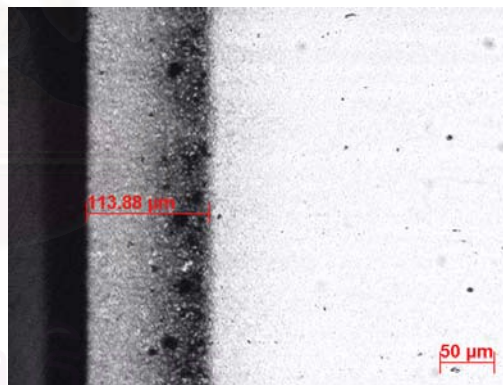


ข) ชิ้นงาน H13 ปกติ และทำในทรายดิ่ง
แบบพลาสติกที่อุณหภูมิ 823K เป็น
เวลา 72 ks

รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบความหนาชั้นผิวแข็งของชิ้นงาน H13 ปกติ จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค
ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 100 เท่า ระหว่างชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิในทรายดิ่ง
แบบพลาสติก 773K กับ 823K เป็นเวลา 72 ks

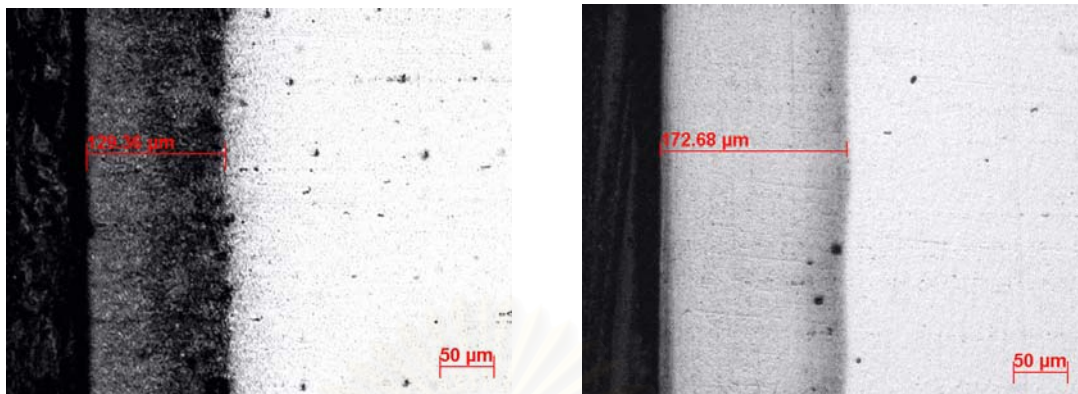


ก) ชิ้นงาน H13 ปกติ และทำในทรายดิ่ง
แบบพลาสติกที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา
36 ks



ข) ชิ้นงาน H13 ปกติ และทำในทรายดิ่ง
แบบพลาสติกที่อุณหภูมิ 773K เป็น
เวลา 72 ks

รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบความหนาชั้นผิวแข็งของชิ้นงาน H13 ปกติ จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค
ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 100 เท่า ระหว่างชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิในทรายดิ่ง
แบบพลาสติก 773K เป็นเวลา 36 กับ 72 ks



ก) ชิ้นงาน H13 ปกติและทำในทรายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 36 ks

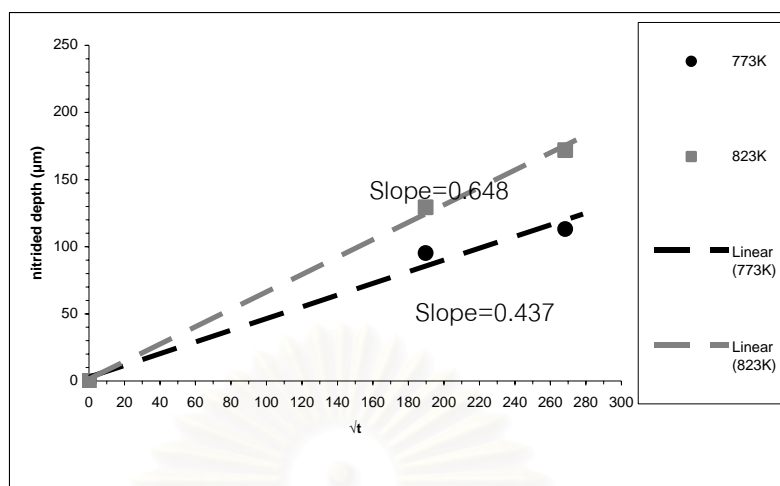
ข) ชิ้นงาน H13 ปกติและทำในทรายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72 ks

รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบความหนาชั้นผิวแข็งของชิ้นงาน H13 ปกติ จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 100 เท่า ระหว่างชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิในทรายดิงแบบพลาสมา 823K เป็นเวลา 36 กับ 72 ks

หากผลการทดลองเป็นไปตามสมการนี้ จะพิสูจน์ได้ว่าชั้นในทรายดิงที่เกิดขึ้นมีการแพร่เป็นกลไกควบคุมการเกิด จักรุปสมการ 4.1 ใหม่จะได้เป็น

$$X = K_p^{1/2} \cdot t^{1/2} \quad (4.2)$$

ดังนั้นเมื่อนำค่าความหนาเฉลี่ยของชั้นในทรายดิง ที่ได้จากการทดลองมาสร้างความสัมพันธ์กับรากที่สองของเวลา โดยให้ที่เวลาเริ่มต้น ($t=0$) ไม่มีชั้นในทรายดิงบนชิ้นงาน ความหนาชั้นในทรายดิงเป็นศูนย์ ($x=0$) จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.13 จากรูปจะเห็นว่าความสัมพันธ์ที่ได้มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง สอดคล้องกับสมการที่ 4.1 แสดงว่าชั้นในทรายดิงในกระบวนการในทรายดิงแบบพลาสมามีความหนาเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลา ทำให้สามารถสรุปได้ว่ากลไกที่ควบคุมการเกิดชั้นในทรายดิงในกระบวนการในทรายดิงแบบพลาสมาคือการแพร่ และสิ่งที่สังเกตได้จากกราฟในรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าสังเกตได้ว่าค่าความหนาเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองไม่อยู่บนเส้นตรง คาดว่าเป็นผลมาจากกระบวนการสปีดเตอริงที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการในทรายดิงแบบพลาสมา ดังที่ J. D'Haen และคณะ [37] ได้รายงานว่าการสปีดเตอริงอย่างต่อเนื่องระหว่างกระบวนการในทรายดิงแบบพลาสมา ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นในทรายดิงกับรากที่สองของเวลาเบี่ยงเบนออกจากเส้นตรง และพบว่าเมื่อการสปีดเตอริงมีมากขึ้น การเบี่ยงเบนที่พบยิ่งมากขึ้น



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของเวลากับความหนาของชั้นไนไตรด์ในชิ้นงานปกติ ที่ได้จากการบวนการไนไตรดิงแบบพลาสมา

นอกจากนี้จากกราฟในรูปที่ 4.12 สามารถหาค่า K_p ของแต่ละอุณหภูมิได้จากค่าความชันของเส้นตรงของแต่ละอุณหภูมิ คือ K_p ของอุณหภูมิ 773K มีค่าเป็น $0.437 \mu\text{m}^2/\text{s}$ และ K_p ของอุณหภูมิ 823K มีค่าเป็น $0.648 \mu\text{m}^2/\text{s}$ ค่า K_p ของอุณหภูมิ 823K ที่มีค่ามากกว่าค่า K_p ของอุณหภูมิ 773K แสดงว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของชั้นไนไตรด์ที่อุณหภูมิ 823K มีมากกว่าที่อุณหภูมิ 773K ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากการที่มีกลไกการแพร่เป็นกระบวนการที่ควบคุมการเพิ่มขึ้นของชั้นไนไตรด์นั่นเอง

การเกิดชั้นไนไตรด์ในชิ้นงานปกติ ด้วยกระบวนการไนไตรดิงแบบพลาสมามีอุณหภูมิในการทำไนไตรดิงเป็นอีกตัวแปรที่ควบคุมความหนาของชั้นไนไตรด์ที่เกิดขึ้น โดยเมื่ออุณหภูมิมากขึ้นจะทำให้ได้ชั้นไนไตรด์ที่หนาขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณากฎข้อที่หนึ่งของ Fick ที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 คือ

$$J = -D_1 \frac{\partial C}{\partial X} \quad (4.3)$$

โดย J คือ Flux ของอะตอมที่แพร่

D_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในผลึก

C คือ ความเข้มข้นของอะตอม

X คือ ระยะห่างจากผิว

และค่า D_1 ที่หาค่าได้จากสมการ

$$D_1 = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (4.4)$$

โดย	D_0	คือ	แฟกเตอร์ของความถี่
	Q	คือ	พลังงานในการแพร่
	R	คือ	ค่าคงที่ของแก๊ส
	T	คือ	อุณหภูมิ

ทั้งสองสมการเป็นสมการที่ใช้อธิบายการแพร่ของอะตอมในของแข็ง จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิ (T) มีค่าเพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์การแพร่ (D_1) จะมามีค่าเพิ่มขึ้น และทำให้ฟลักซ์ของอะตอมที่แพร่ (J) เพิ่มขึ้น นั่นคือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์การแพร่ของไนโตรเจนในเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 เพิ่มขึ้น ทำให้ฟลักซ์ของอะตอมไนโตรเจนที่แพร่เข้าสู่ชิ้นงานเพิ่มขึ้นจึงทำให้ได้ชั้นไนตรายด์ที่หนาขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้

ทั้งผลของเวลาและอุณหภูมิที่มีต่อความหนาของชั้นไนตรายด์ที่ได้ ทำให้สรุปได้ว่ากลไกที่ควบคุมการเกิดชั้นไนตรายด์ในกระบวนการไนตรายด์แบบพลาสมาในเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 คือ การแพร่ สอดคล้องกับผลการทดลองของ N. Granito และคณะ [19]

4.2 ผลของคาร์บอนที่มีต่อชิ้นงานที่ทำไนตรายด์

ชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 หลังการทำให้เป็นออสเทนไนท์ที่อุณหภูมิ 1223K (ในการวิจัยนี้) สามารถเกิดการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวของชิ้นงานได้จากปฏิกิริยาเคมี

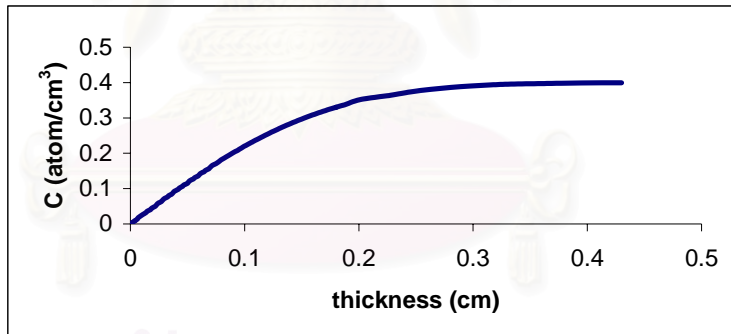


เมื่อ \underline{C}_γ คือคาร์บอนที่ละลายอยู่ในออสเทนไนท์ (γ) และสามารถคำนวณปริมาณของคาร์บอนภายในชิ้นงานที่ตำแหน่งต่าง ๆ หลังเกิดการสูญเสียคาร์บอนได้จากสมการ 4.5 ซึ่งเรียกว่า Grube Solution

$$C(x,t) = C_s - (C_s - C_0) \text{erf}\left(x/2\sqrt{Dt}\right) \quad (4.5)$$

โดย	C_s	คือ	ปริมาณคาร์บอนที่ผิว
	C_0	คือ	ปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในเนื้อวัสดุเริ่มแรก
	x	คือ	ตำแหน่งใด ๆ ในเนื้อวัสดุ, $x=0$ ที่ผิว
	D	คือ	อัตราการแพร่ของ คาร์บอนในออสเทนไนท์ มีค่าเท่ากับ 3.682×10^{-6} อะตอมต่อตารางเซนติเมตร (atom/mm ²)

กำหนดให้ C_s มีค่าคงที่เป็นศูนย์ เนื่องจากในบรรยากาศไม่มีคาร์บอน ทำให้ปฏิกิริยาเคมีของการสูญเสียคาร์บอนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว คาร์บอนที่อยู่บริเวณผิวจึงแพร่ออกไปจากชิ้นงานอย่างรวดเร็ว จนคาร์บอนที่อยู่ภายในชิ้นงานไม่สามารถแพร่เข้ามาแทนที่ได้ทัน ทำให้ปริมาณคาร์บอนที่ผิวมีค่าเป็นศูนย์อยู่ตลอดการเกิดปฏิกิริยา และปริมาณคาร์บอนภายในชิ้นงาน (C_0) เป็น 0.4 ซึ่งเป็นปริมาณคาร์บอนในเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ตามมาตรฐาน AISI รูปที่ 4.13 แสดงปริมาณคาร์บอนที่ผิวจนถึงใจกลางชิ้นงานที่ได้จากการคำนวณ ภายหลังจากทำให้เป็นออสเทนไนท์ที่อุณหภูมิ 1223K เป็นเวลา 2.4 ks

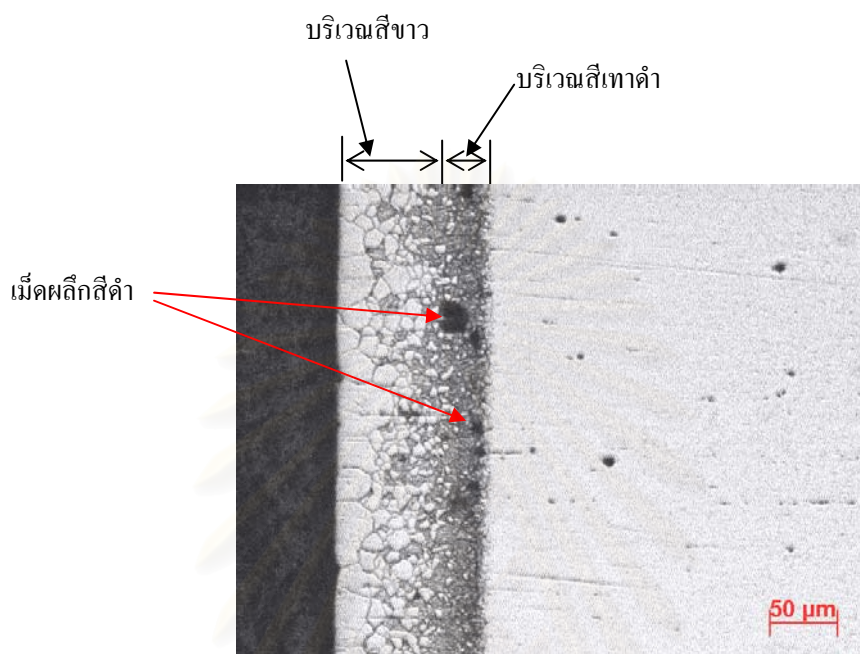


รูปที่ 4.13 ปริมาณคาร์บอนจากการคำนวณ ที่ผิวจนถึงใจกลางชิ้นงานภายหลังจากทำให้เป็นออสเทนไนท์ที่อุณหภูมิ 1223K เป็นเวลา 2.4 ks

4.2.1 โครงสร้างจุลภาคและความหนาของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนและทำในทรายดิงแบบพลาสติก

รูปที่ 4.14 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่มีการสูญเสียคาร์บอนและทำในทรายดิงแบบพลาสติกที่อุณหภูมิ 823 K เป็นเวลา 36 ks ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 100 เท่า ชั้นผิวแข็งสามารถแบ่งได้ 2 บริเวณ คือ บริเวณที่มีสีขาว และบริเวณที่มีสีเทาเข้ม ซึ่งต่างจากชิ้นงานปกติที่ชั้นผิวแข็งจะมีสีเทาเข้มทั่วทั้งชิ้น ดังรูปที่ 4.15 ซึ่งแสดง

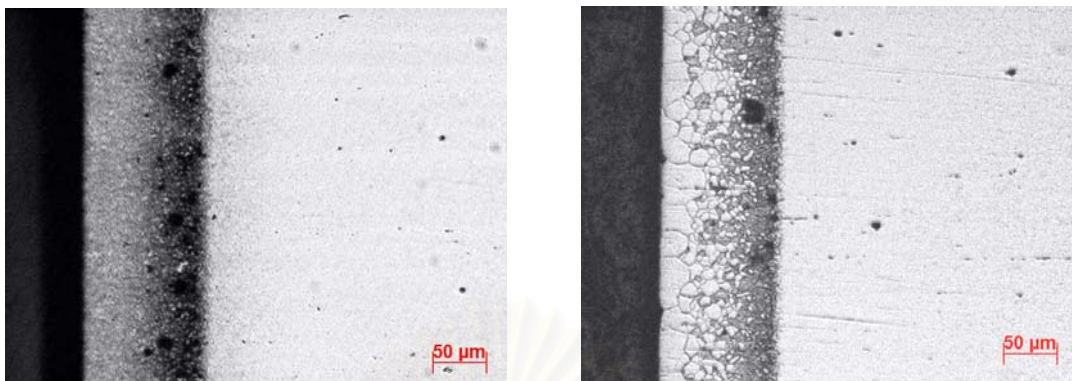
การเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานปกติกับชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน นอกจากนี้ในโครงสร้างจุลภาคของชิ้นผิวแข็งของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนยังพบเม็ดผลึกสีดำบริเวณใกล้กับรอยต่อระหว่างชั้นผิวแข็งกับภายในชิ้นงาน เป็นลักษณะเดียวกับที่พบในชิ้นงานปกติ



รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน H13 ที่มีการสูญเสียคาร์บอนบริเวณผิว และทำไนตรายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823 K เป็นเวลา 36 ks ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 100 เท่า

เมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคชิ้นผิวแข็งของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำไนตรายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 36ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้มุม $\theta=1^\circ$ ซึ่งมีระยะการตรวจสอบลึกจากผิว 25.16 ไมครอน ได้รูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ดังรูปที่ 4.16 ก) นำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลในการ์ดข้อมูล JCPDS ได้ผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.18 คือพบว่ายอดกราฟที่มุม $2\theta=41.086^\circ$ ($d=2.1951 \text{ \AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 94.75% และมีระยะห่างระหว่างระนาบ (d) ใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=41.069^\circ$ ($d=2.1960 \text{ \AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 03-0925 ของเหล็กไนตรายด์ (Fe_3N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.426^\circ$ ($d=2.0375 \text{ \AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 100% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.485^\circ$ ($d=2.0350 \text{ \AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)



ก) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสง
กำลังขยาย 100 เท่า ของชิ้นงาน H13
ปกติ ทำไนตรายดิงแบบพลาสมา

ข) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสง
กำลังขยาย 100 เท่า ของชิ้นงาน H13
ที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว และทำ
ไนตรายดิงแบบพลาสมา

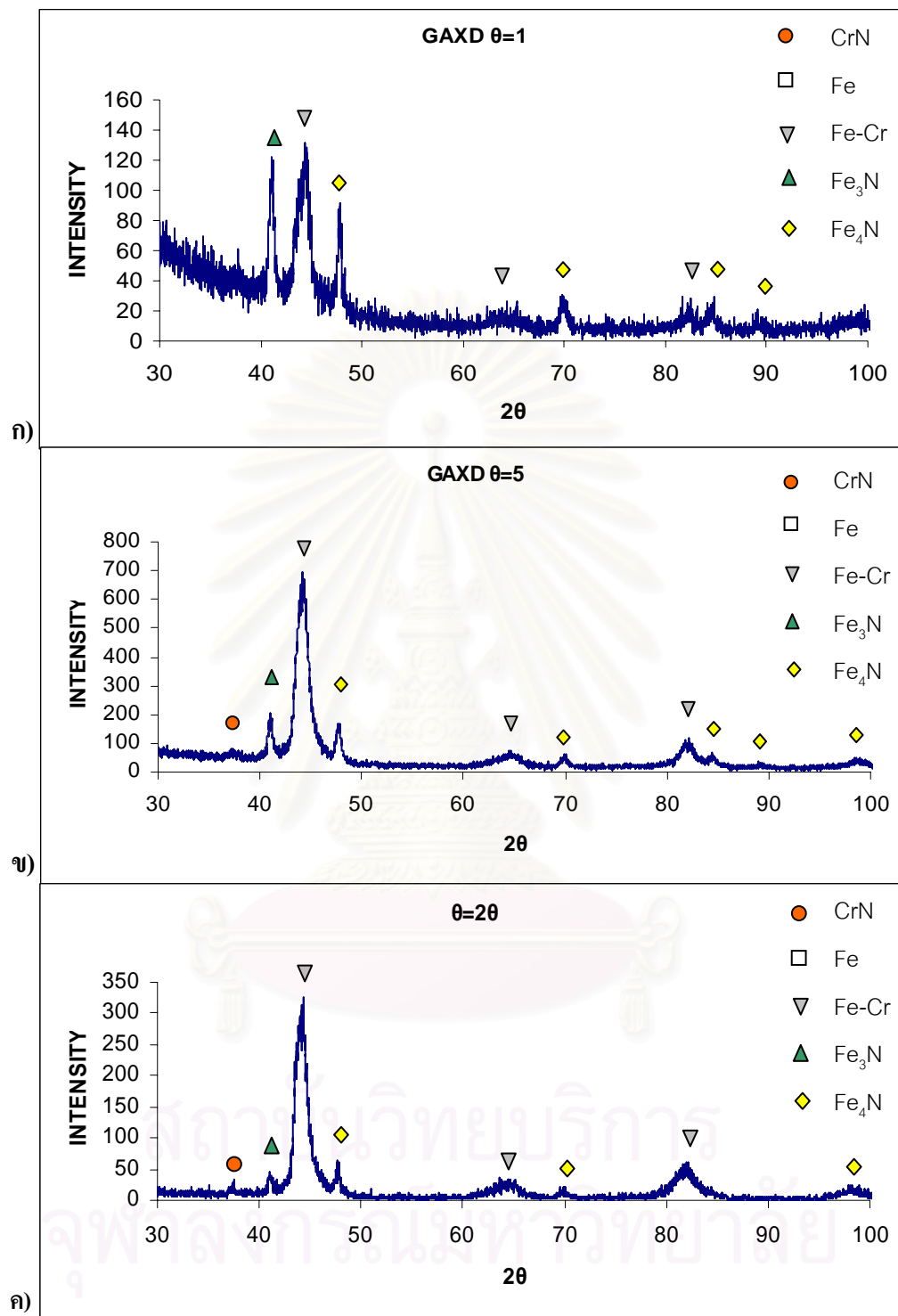
รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของชั้นผิวแข็ง ที่ได้จากการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา
ในชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ปกติ กับชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.677^\circ$ ($d=1.9059 \text{ \AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 60.12% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.915^\circ$ ($d=1.8970 \text{ \AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนตรายด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=69.851^\circ$ ($d=1.3454 \text{ \AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 22.54% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=70.058^\circ$ ($d=1.3420 \text{ \AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนตรายด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=82.254^\circ$ ($d=1.1711 \text{ \AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 10.38% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=81.986^\circ$ ($d=1.1743 \text{ \AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.746^\circ$ ($d=1.1429 \text{ \AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 14.60% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.651^\circ$ ($d=1.1440 \text{ \AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนตรายด์ (Fe_4N)



รูปที่ 4.16 ผล XRD ที่ GAXD $\theta=1^\circ$, 5° , และ 2θ ของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่มีคาร์บอนและทำไนตรายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 36 ks

ตารางที่ 4.18 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำในทรายดิงแบบพลาสติกที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 36ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้มุม $\theta=1^\circ$

2 θ (องศา)	ความเข้ม สัมพัทธ์ (%)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (Å)	JCPDS No.	สูตรเคมี	2 θ (องศา)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (Å)
41.086	94.75	2.1951	03-0925	Fe ₃ N	41.069	2.1960
44.426	100.00	2.0375	34-0396	Fe-Cr	44.485	2.0350
47.677	60.12	1.9059	06-0627	Fe ₄ N	47.915	1.8970
69.851	22.54	1.3454	06-0627	Fe ₄ N	70.058	1.3420
82.254	10.38	1.1711	34-0396	Fe-Cr	81.986	1.1743
84.746	14.60	1.1429	06-0627	Fe ₄ N	84.651	1.1440

และเมื่อเพิ่มระยะการตรวจสอบโดยใช้ XRD แบบ GAXD มุม $\theta=5^\circ$ มีระยะที่สามารถตรวจสอบได้เป็น 125.66 ไมครอน ได้รูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์เป็นดังรูปที่ 4.16) นำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลในการ์ดข้อมูล JCPDS ได้ผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.19 คือพบว่า พบว่ายอดกราฟที่มุม $2\theta=37.570^\circ$ ($d=2.3921\text{Å}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 10.66% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=37.539^\circ$ ($d=2.3940\text{Å}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 11-0065 ของโครเมียมไนไตรด์ (CrN)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=41.093^\circ$ ($d=2.1947\text{Å}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 21.41% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=41.069^\circ$ ($d=2.1960\text{Å}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 03-0925 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe₃N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.223^\circ$ ($d=2.0464\text{Å}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 100% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.485^\circ$ ($d=2.0350\text{Å}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.740^\circ$ ($d=1.9035\text{Å}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 19.07% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.915^\circ$ ($d=1.8970\text{Å}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe₄N)

ตารางที่ 4.19 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำในตรายดิงแบบพลาสติกที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 36ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้มุม $\theta=5^{\circ}$

2 θ (องศา)	ความเข้ม สัมพัทธ์ (%)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (Å)	JCPDS No.	สูตรเคมี	2 θ (องศา)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (Å)
37.570	10.66	2.3921	11-0065	CrN	37.539	2.3940
41.093	21.41	2.1947	03-0925	Fe ₃ N	41.069	2.1960
44.223	100	2.0464	34-0396	Fe-Cr	44.485	2.0350
47.740	19.07	1.9035	06-0627	Fe ₄ N	47.915	1.8970
64.664	4.05	1.4402	34-0396	Fe-Cr	64.779	1.4380
70.019	5.34	1.3426	06-0627	Fe ₄ N	70.058	1.3420
81.800	11.96	1.1765	34-0396	Fe-Cr	81.986	1.1743
84.544	5.43	1.1451	06-0627	Fe ₄ N	84.651	1.1440
89.275	2.17	1.0963	06-0627	Fe ₄ N	89.412	1.0950
98.774	2.92	1.0147	06-0627	Fe ₄ N	98.869	1.0140

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.664^{\circ}$ ($d=1.4402$ Å) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 4.05% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.779^{\circ}$ ($d=1.4380$ Å) ในการัดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=70.019^{\circ}$ ($d=1.3426$ Å) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 5.53% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=70.058^{\circ}$ ($d=1.3420$ Å) ในการัดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนตรายด์ (Fe₄N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=81.800^{\circ}$ ($d=1.1765$ Å) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 11.96% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=81.986^{\circ}$ ($d=1.1743$ Å) ในการัดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.544^\circ$ ($d=1.1451\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 5.34% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.651^\circ$ ($d=1.1440\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=89.275^\circ$ ($d=1.0963\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 2.17% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=89.412^\circ$ ($d=1.0950\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=98.774^\circ$ ($d=1.0147\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 2.92% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=98.869^\circ$ ($d=1.0140\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

และสุดท้ายเมื่อเพิ่มระยะการตรวจสอบโดยใช้ XRD วิธี $\theta=2\theta$ มีระยะลึกที่สุดที่สามารถตรวจสอบได้เป็น 1.25 มิลลิเมตร ได้รูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์เป็นดังรูปที่ 4.16 ค) นำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลในการ์ดข้อมูล JCPDS ได้ผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.20 คือพบว่ายอดกราฟที่มุม $2\theta=37.610^\circ$ ($d=2.3896\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 8.68% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=37.539^\circ$ ($d=2.3940\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 11-0065 ของโครเมียมไนไตรด์ (CrN)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=41.006^\circ$ ($d=2.1992\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 10.19% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=41.069^\circ$ ($d=2.1960\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 03-0925 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_3N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.415^\circ$ ($d=2.0380\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 100% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.485^\circ$ ($d=2.0350\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.780^\circ$ ($d=1.9020\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 14.95% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.915^\circ$ ($d=1.8970\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ตารางที่ 4.20 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำในตรายคิงแบบพลาสติกที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 36ks ด้วย XRD วิธี $\theta=2\theta$

2 θ (องศา)	ความเข้ม สัมพัทธ์ (%)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (Å)	JCPDS No.	สูตรเคมี	2 θ (องศา)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (Å)
37.610	8.68	2.3896	11-0065	CrN	37.539	2.3940
41.006	10.19	2.1992	03-0925	Fe ₃ N	41.069	2.1960
44.415	100.00	2.0380	34-0396	Fe-Cr	44.485	2.0350
47.780	14.95	1.9020	06-0627	Fe ₄ N	47.915	1.8970
64.490	10.61	1.4438	34-0396	Fe-Cr	64.779	1.4380
69.999	4.95	1.3430	06-0627	Fe ₄ N	70.058	1.3420
82.070	18.65	1.1733	34-0396	Fe-Cr	81.986	1.1743
98.970	7.72	1.0132	06-0627	Fe ₄ N	98.869	1.0140

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.490^\circ$ ($d=1.4438\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 10.61% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.779^\circ$ ($d=1.4380\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=69.999^\circ$ ($d=1.3430\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 4.95% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=70.058^\circ$ ($d=1.3420\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนตรายด์ (Fe₄N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=82.070^\circ$ ($d=1.1733\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 18.65% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=81.986^\circ$ ($d=1.1743\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=98.970^\circ$ ($d=1.0132\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 7.72% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=98.869^\circ$ ($d=1.0140\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนตรายด์ (Fe₄N)

ตารางที่ 4.21 เปรียบเทียบความเข้มข้นของเฟสต่าง ๆ ที่พบในชั้นผิวแข็งของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำในตารางดิงแบบพลาสติกที่ 773K เป็นเวลา 36ks เมื่อระยะที่ทำการตรวจสอบแตกต่างกัน

เฟส	ความเข้มข้น (%)		
	GAXD 1° (25.16 μm)	GAXD 5° (125.66 μm)	XRD $\theta=2\theta$ (1.25 mm)
Fe ₃ N	94.75	21.41	10.19
Fe ₄ N (2 θ ~47°)	60.12	19.07	14.95
Fe ₄ N (2 θ ~70°)	22.54	5.53	4.95
Fe ₄ N (2 θ ~84.5°)	14.60	5.34	-
CrN	-	10.66	8.68
Fe-Cr (2 θ ~44.5°)	100.00	100.00	100.00
Fe-Cr (2 θ ~65°)	-	4.05	10.61
Fe-Cr (2 θ ~82°)	10.38	11.96	18.65

จากผลการตรวจสอบด้วย XRD จะเห็นว่าชั้นผิวแข็งในเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำในตารางดิงที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 36ks โครงสร้างจุลภาคที่พบสามารถแบ่งได้เป็น 2 บริเวณตามชนิดของเฟสที่พบคือ ลึกจากผิวเป็นระยะประมาณ 25.16 ไมครอน โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟสเหล็กไนไตรด์ (Fe₃N และ Fe₄N) และสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr) จากนั้นเมื่อระยะลึกจากผิวมากกว่า 25.16 ไมครอนจนถึง 1.25 มิลลิเมตร โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟสสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr) เหล็กไนไตรด์ (Fe₃N และ Fe₄N) และโครเมียมไนไตรด์ (CrN) สอดคล้องกับการแบ่งตามลักษณะที่ปรากฏในภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ซึ่งเป็นผลที่แตกต่างจากลักษณะที่พบในชิ้นงานปกติซึ่งมีชนิดของเฟสที่พบเป็นรูปแบบเดียวกันทั่วทั้งชิ้นไนไตรด์ ส่วนปริมาณเฟสที่พบในชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนนั้นแตกต่างกันไปตามระยะลึกที่สามารถตรวจสอบได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.21 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบความเข้มข้นของเฟสต่าง ๆ ที่พบในชั้นผิวแข็งเมื่อระยะที่ทำการตรวจสอบแตกต่างกัน จะเห็นว่าบริเวณผิวจะมีปริมาณเฟส Fe-Cr มากที่สุด รองลงมาคือเฟส Fe₃N, Fe₄N ตามลำดับ เมื่อเพิ่มระยะการตรวจสอบเป็น 125.66 ไมครอนลึกจากผิว สามารถพบเฟส CrN ซึ่งไม่พบในช่วงแรก และเฟสที่มีปริมาณเฟสมากที่สุดคือเฟส Fe-Cr รองลงมาคือเฟส

Fe_3N , Fe_4N , CrN ตามลำดับ โดยทุกเฟสจะมีปริมาณลดลงเมื่อระยะลึกลงจากผิวเพิ่มขึ้น ยกเว้นเฟส Fe-Cr มีแนวโน้มคงที่และบางยอดกราฟ (บางระนาบ) มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อระยะลึกลงจากผิวเพิ่มขึ้น

รูปที่ 4.17 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำไนตรายดิงที่อุณหภูมิ 723K เป็นเวลา 72 ks รูปที่ 4.17 ก) เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ที่ตรวจสอบได้จากการใช้ GAXD $\theta=1^\circ$ นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูล JCPDS ได้ผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.22 คือพบว่ายอดกราฟที่มุม $2\theta=41.097^\circ$ ($d=2.1945\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 100% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=41.069^\circ$ ($d=2.1960\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 03-0925 ของเหล็กไนตรายด์ (Fe_3N)

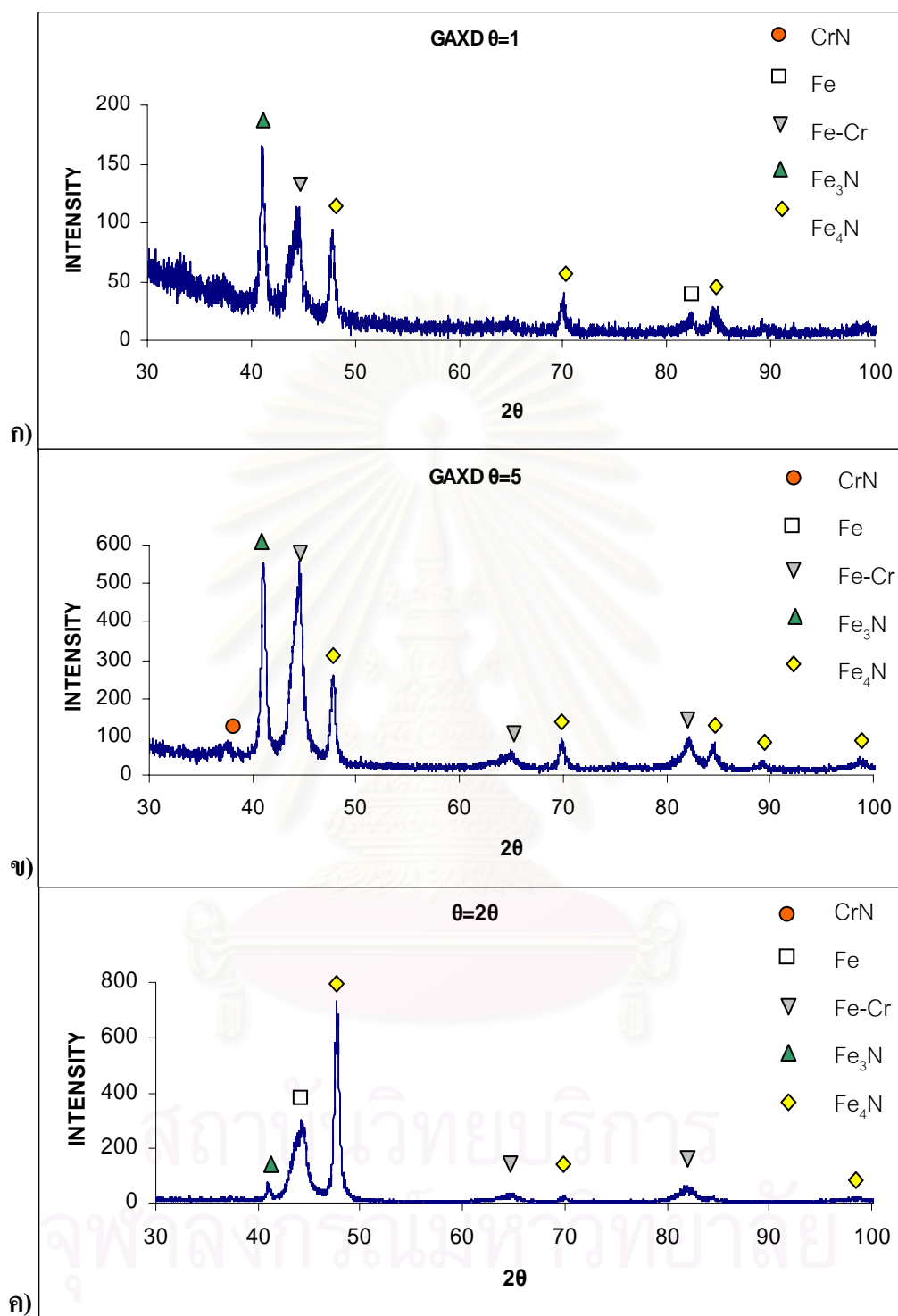
ยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.586^\circ$ ($d=2.0305\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 69.23% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.485^\circ$ ($d=2.0350\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.738^\circ$ ($d=1.9036\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 54.08% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.915^\circ$ ($d=1.8970\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนตรายด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.867^\circ$ ($d=1.4362\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 2.55% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.779^\circ$ ($d=1.4380\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=69.996^\circ$ ($d=1.3430\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 18.01% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=70.058^\circ$ ($d=1.3420\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนตรายด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=82.460^\circ$ ($d=1.1687\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 7.11% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=82.335^\circ$ ($d=1.1702\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0696 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe)



รูปที่ 4.17 ผล XRD ที่ GAXD $\theta = 1^\circ, 5^\circ$, และ 2θ ของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่มีการสูญเสียคาร์บอนและทำไนตรายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 72 ks

ตารางที่ 4.22 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน ที่ทำในทรายดิงแบบพลาสติกที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 72ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้มุม $\theta=1^\circ$

2 θ (องศา)	ความเข้ม สัมพัทธ์ (%)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (Å)	JCPDS No.	สูตรเคมี	2 θ (องศา)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (Å)
41.097	100.00	2.1945	03-0925	Fe ₃ N	41.069	2.1960
44.586	69.23	2.0305	06-0696	Fe-Cr	44.485	2.0350
47.738	54.08	1.9036	06-0627	Fe ₄ N	47.915	1.8970
64.867	2.55	1.4362	34-0396	Fe-Cr	64.779	1.4380
69.996	18.01	1.3430	06-0627	Fe ₄ N	70.058	1.3420
82.460	7.11	1.1687	06-0696	Fe	82.335	1.1702
84.386	13.71	1.1469	06-0627	Fe ₄ N	84.651	1.1440

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.386^\circ$ ($d=1.1469\text{Å}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 13.71% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.651^\circ$ ($d=1.1440\text{Å}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนตรายด์ (Fe₄N)

รูปที่ 4.17 ข) เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ที่ตรวจสอบได้จากการใช้ GAXD $\theta=5^\circ$ นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูล JCPDS ได้ผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.23 คือ พบว่ายอดกราฟที่มุม $2\theta=37.810^\circ$ ($d=2.3775\text{Å}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 15.31% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=37.539^\circ$ ($d=2.3940\text{Å}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 11-0065 ของโครเมียมไนตรายด์ (CrN)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=40.965^\circ$ ($d=2.2013\text{Å}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 99.90% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=41.069^\circ$ ($d=2.1960\text{Å}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 03-0925 ของเหล็กไนตรายด์ (Fe₃N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.570^\circ$ ($d=2.0312\text{Å}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 100% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.485^\circ$ ($d=2.0350\text{Å}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ตารางที่ 4.23 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำในตรายคิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 72ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้มุม $\theta=5^{\circ}$

2 θ (องศา)	ความเข้ม สัมพัทธ์ (%)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (Å)	JCPDS No.	สูตรเคมี	2 θ (องศา)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (Å)
37.810	15.31	2.3775	11-0065	CrN	37.539	2.3940
40.965	99.90	2.0013	03-0925	Fe ₃ N	41.069	2.1960
44.570	100.00	2.0312	06-0696	Fe-Cr	44.485	2.0350
47.880	42.41	1.8983	06-0627	Fe ₄ N	47.915	1.8970
64.897	5.41	1.4356	34-0396	Fe-Cr	64.779	1.4380
69.943	13.80	1.3439	06-0627	Fe ₄ N	70.058	1.3420
82.392	10.35	1.1695	06-0696	Fe	82.335	1.1702
84.523	10.43	1.1453	06-0627	Fe ₄ N	84.651	1.1440
98.826	3.51	1.0143	06-0627	Fe ₄ N	98.869	1.0140

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.880^{\circ}$ ($d=1.8983\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 42.41% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.915^{\circ}$ ($d=1.8970\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนตรายด์ (Fe₄N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.897^{\circ}$ ($d=1.4356\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 5.41% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.779^{\circ}$ ($d=1.4380\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=69.943^{\circ}$ ($d=1.3439\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 13.80% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=70.058^{\circ}$ ($d=1.3420\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนตรายด์ (Fe₄N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=82.392^{\circ}$ ($d=1.1695\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 10.35% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=81.986^{\circ}$ ($d=1.1702\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0696 ของเหล็ก (Fe)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.523^\circ$ ($d=1.1453\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 10.43% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.651^\circ$ ($d=1.1440\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=98.826^\circ$ ($d=1.0143\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 3.51% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=98.869^\circ$ ($d=1.0140\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

รูปที่ 4.17 ค) เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ที่ตรวจสอบได้จาก XRD วิธี $\theta=2\theta$ นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูล JCPDS ได้ผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.24 คือพบว่ายอดกราฟที่มุม $2\theta=41.051^\circ$ ($d=2.1969\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 6.48% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=41.069^\circ$ ($d=2.1960\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 03-0925 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_3N)

ตารางที่ 4.24 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำไนไตรดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 72ks ด้วย XRD วิธี $\theta=2\theta$

2θ (องศา)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	ระยะห่างระหว่างระนาบ (\AA)	JCPDS No.	สูตรเคมี	2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ (\AA)
41.051	6.48	2.1969	03-0925	Fe_3N	41.069	2.1960
44.608	29.52	2.0296	06-0696	Fe	44.674	2.0268
47.703	100.00	1.9049	06-0627	Fe_4N	47.915	1.8970
64.919	2.44	1.4352	34-0396	Fe-Cr	64.779	1.4380
69.996	2.16	1.3430	06-0627	Fe_4N	70.058	1.3420
82.135	4.92	1.1725	34-0396	Fe-Cr	81.986	1.1743

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.608^\circ$ ($d=2.0296\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 29.52% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.674^\circ$ ($d=2.0268\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0696 ของเหล็ก (Fe)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.703^\circ$ ($d=1.9049\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 100% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.915^\circ$ ($d=1.8970\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.919^\circ$ ($d=1.4352\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 2.44% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.779^\circ$ ($d=1.4380\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=69.996^\circ$ ($d=1.3430\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 2.16% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=70.058^\circ$ ($d=1.3420\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=82.135^\circ$ ($d=1.1725\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 4.92% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=81.986^\circ$ ($d=1.1743\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

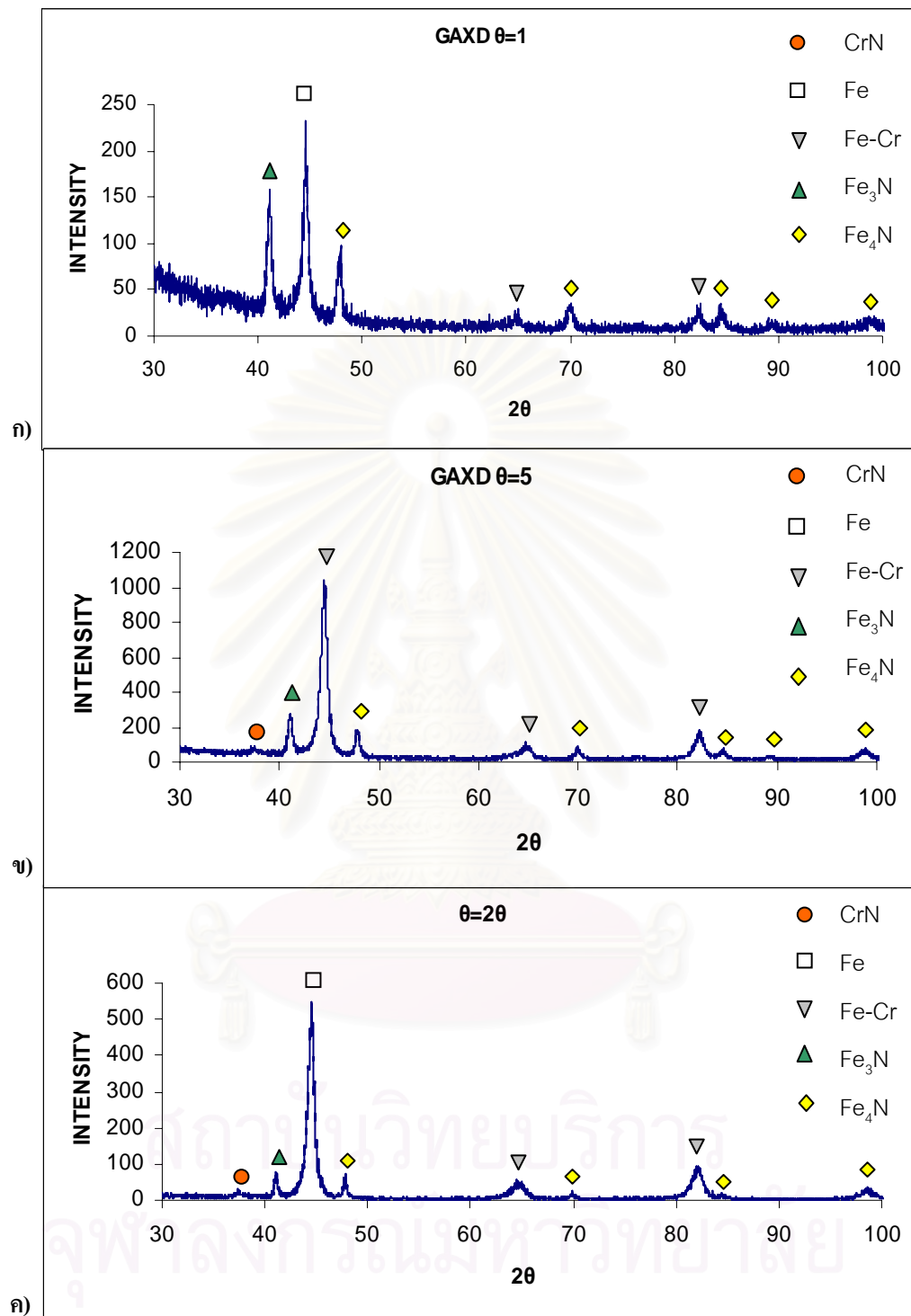
จากผลการตรวจสอบด้วย XRD จะเห็นว่าชั้นผิวแข็งในเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำไนไตรดิงที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 72ks โครงสร้างจุลภาคที่พบสามารถแบ่งได้เป็น 2 บริเวณตามชนิดของเฟสที่พบคือ ลึกลงจากผิวเป็นระยะประมาณ 25.16 ไมครอน โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟสเหล็กไนไตรด์ (Fe_3N และ Fe_4N) และสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr) จากนั้นเมื่อระยะลึกลงจากผิวมากกว่า 25.16 ไมครอนจนถึง 1.25 มิลลิเมตร โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟสเหล็ก (Fe) เหล็กไนไตรด์ (Fe_3N และ Fe_4N) โครเมียมไนไตรด์ (CrN) และสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr) สอดคล้องกับการแบ่งตามลักษณะที่ปรากฏในภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง แต่ลักษณะที่พบแตกต่างจากชิ้นงานปกติซึ่งมีชนิดของเฟสที่พบเป็นรูปแบบเดียวกันทั่วทั้งชิ้นไนไตรด์ ส่วนปริมาณเฟสที่พบในชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนนั้นแตกต่างกันไปตามระยะลึกที่สามารถตรวจสอบได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.25 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบความเข้มสัมพัทธ์ของเฟสต่าง ๆ ที่พบในชั้นผิวแข็งเมื่อระยะที่ทำการตรวจสอบแตกต่างกัน จะเห็นว่าเฟส Fe_3N เป็นเฟสที่มีปริมาณมากที่สุดและมีแนวโน้มคงที่จนถึงระยะ 125.66 ไมครอนแต่เมื่อระยะลึกถึง 1.25 มิลลิเมตรปริมาณเฟสนี้กลับลดลงอย่างมาก ในขณะที่เฟส Fe-Cr ที่ผิวมีปริมาณมากกว่าเฟส Fe_3N จากนั้นเมื่อระยะลึกลงจากผิวมากขึ้นถึง 125.66 ไมครอน เฟส Fe-Cr เป็นเฟสที่มีปริมาณมากที่สุดแต่เมื่อระยะลึกมากขึ้นเป็น 1.25

มิลลิเมตร จะไม่พบเฟส Fe-Cr แต่กลับพบเฟส Fe ส่วนเฟส Fe_4N ที่ผิวมีปริมาณมากรองจากสองเฟสแรกที่ถูกกล่าวไปแล้ว และเมื่อระยะลึกจากผิวมากขึ้นปริมาณเฟส Fe_4N กลับลดลงจนถึงระยะลึกจากผิว 125.66 ไมครอน จากนั้นเฟส Fe_4N มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะลึกที่เพิ่มขึ้น สุดท้ายคือเฟส CrN ที่สามารถตรวจพบเมื่อเพิ่มระยะการตรวจสอบเป็น 125.66 ไมครอนจากผิว แต่เนื่องจากมีปริมาณน้อยมากในขณะที่เฟสต่าง ๆ มีปริมาณเพิ่มขึ้น จึงไม่สามารถตรวจพบยอดกราฟของเฟส CrN ที่ระยะ 1.25 มิลลิเมตรจากผิว

ตารางที่ 4.25 เปรียบเทียบความเข้มสัมพัทธ์ของเฟสต่าง ๆ ที่พบในชั้นผิวแข็งของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำในตรายคิงแบบพลาสติกที่ 773K เป็นเวลา 72ks เมื่อระยะที่ทำการตรวจสอบแตกต่างกัน

เฟส	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)		
	GAXD 1° (25.16 μm)	GAXD 5° (125.66 μm)	XRD 2θ (1.25 mm)
Fe	-	-	29.52
Fe_3N	100.00	99.90	6.48
Fe_4N ($2\theta \sim 47^\circ$)	54.08	42.41	100.00
Fe_4N ($2\theta \sim 70^\circ$)	18.01	13.80	2.16
Fe_4N ($2\theta \sim 84.5^\circ$)	13.71	10.46	-
CrN	-	2.38	-
Fe-Cr ($2\theta \sim 44.5^\circ$)	69.23	100.00	-
Fe-Cr ($2\theta \sim 65^\circ$)	2.55	5.41	2.44
Fe-Cr ($2\theta \sim 82^\circ$)	7.11	10.35 (Fe)	4.92

รูปที่ 4.18 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำในตรายคิงที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 36ks รูปที่ 4.18 ก) เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ที่ตรวจสอบได้จากการใช้ GAXD $\theta = 1^\circ$ นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูล JCPDS ได้ผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.26 คือพบว่ายอดกราฟที่มุม $2\theta = 41.097^\circ$ ($d = 2.1945 \text{ \AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 62.44% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta = 41.069^\circ$ ($d = 2.1960 \text{ \AA}$) ในการค้นหาข้อมูล JCPDS หมายเลข 03-0925 ของเหล็กไนตรายด์ (Fe_3N)



รูปที่ 4.18 ผล XRD ที่ GAXD $\theta = 1^\circ, 5^\circ$, และ 2θ ของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่มีคาร์บอนและทำไนตรายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 36 ks

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.592^\circ$ ($d=2.0303\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 100% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.674^\circ$ ($d=2.0268\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0696 ของเหล็ก (Fe)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.877^\circ$ ($d=1.8984\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 32.92% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.915^\circ$ ($d=1.8970\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.978^\circ$ ($d=1.4340\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 4.52% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.779^\circ$ ($d=1.4380\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=70.008^\circ$ ($d=1.3428\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 12.83% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=70.058^\circ$ ($d=1.3420\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ตารางที่ 4.26 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน ที่ทำในทรายดิงแบบพลาสติกที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 36ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้มุม $\theta=1^\circ$

2θ (องศา)	ความเข้ม สัมพัทธ์ (%)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (\AA)	JCPDS No.	สูตรเคมี	2θ (องศา)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (\AA)
41.097	62.44	2.1945	03-0925	Fe_3N	41.069	2.1960
44.592	100.00	2.0303	06-0696	Fe	44.674	2.0268
47.877	32.92	1.8984	06-0627	Fe_4N	47.915	1.8970
64.978	4.52	1.4340	34-0396	Fe-Cr	64.779	1.4380
70.008	12.83	1.3428	06-0627	Fe_4N	70.058	1.3420
82.310	10.24	1.1705	06-0696	Fe	82.335	1.1702
84.426	9.21	1.1464	06-0627	Fe_4N	84.651	1.1440
89.236	2.40	1.0967	06-0627	Fe_4N	89.412	1.0950
98.925	3.36	1.0136	06-0627	Fe_4N	98.869	1.0140

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=82.310^\circ$ ($d=1.1705\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 10.24% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=82.335^\circ$ ($d=1.1702\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0696 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับ โครเมียม (Fe)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.426^\circ$ ($d=1.1464\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 9.21% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.651^\circ$ ($d=1.1440\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=89.236^\circ$ ($d=1.0967\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 2.40% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=89.412^\circ$ ($d=1.0950\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=98.925^\circ$ ($d=1.0136\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 3.36% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=98.869^\circ$ ($d=1.0140\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

รูปที่ 4.18 ข) เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ที่ตรวจสอบได้จากการใช้ GAXD $\theta=5^\circ$ นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูล JCPDS ได้ผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.27 คือ พบว่ายอดกราฟที่มุม $2\theta=37.730^\circ$ ($d=2.3823\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 6.93% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=37.539^\circ$ ($d=2.3940\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 11-0065 ของโครเมียมไนไตรด์ (CrN)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=41.034^\circ$ ($d=2.1977\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 21.37% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=41.069^\circ$ ($d=2.1960\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 03-0925 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_3N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.510^\circ$ ($d=2.0338\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 100% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.485^\circ$ ($d=2.0350\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับ โครเมียม (Fe-Cr)

ตารางที่ 4.27 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำในตรายคิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 36ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้มุม $\theta=5^\circ$

2 θ (องศา)	ความเข้ม สัมพัทธ์ (%)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (Å)	JCPDS No.	สูตรเคมี	2 θ (องศา)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (Å)
37.730	6.93	2.3823	11-0065	CrN	37.539	2.3940
41.034	21.37	2.1977	03-0925	Fe ₃ N	41.069	2.1960
44.510	100.00	2.0338	34-0396	Fe-Cr	44.485	2.0350
47.744	13.79	1.9034	06-0627	Fe ₄ N	47.915	1.8970
64.798	5.43	1.4376	34-0396	Fe-Cr	64.779	1.4380
69.933	5.74	1.3441	06-0627	Fe ₄ N	70.058	1.3420
82.142	13.72	1.1724	34-0396	Fe-Cr	81.986	1.1743
84.600	4.44	1.1440	06-0627	Fe ₄ N	84.651	1.1440
98.948	4.06	1.0134	06-0627	Fe ₄ N	98.869	1.0140

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.744^\circ$ ($d=1.9034\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 13.79% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.915^\circ$ ($d=1.8970\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนตรายด์ (Fe₄N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.798^\circ$ ($d=1.4376\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 5.43% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.779^\circ$ ($d=1.4380\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=69.933^\circ$ ($d=1.3441\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 5.74% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=70.058^\circ$ ($d=1.3420\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนตรายด์ (Fe₄N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=82.142^\circ$ ($d=1.1724\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 13.72% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=81.986^\circ$ ($d=1.1743\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งของเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.600^\circ$ ($d=1.1440\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 4.44% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.651^\circ$ ($d=1.1440\text{\AA}$) ในการค้นหาข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=98.948^\circ$ ($d=1.0134\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 4.06% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=98.869^\circ$ ($d=1.0140\text{\AA}$) ในการค้นหาข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

รูปที่ 4.18 ค) เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ที่ตรวจสอบได้จาก XRD วิธี $\theta=2\theta$ นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูล JCPDS ได้ผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.28 คือพบว่ายอดกราฟที่มุม $2\theta=37.670^\circ$ ($d=2.3860\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 3.75% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=37.539^\circ$ ($d=2.3940\text{\AA}$) ในการค้นหาข้อมูล JCPDS หมายเลข 11-0065 ของโครเมียมไนไตรด์ (CrN)

ตารางที่ 4.28 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำไนไตรดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 36ks ด้วย XRD วิธี $\theta=2\theta$

2θ (องศา)	ความเข้ม สัมพัทธ์ (%)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (\AA)	JCPDS No.	สูตรเคมี	2θ (องศา)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (\AA)
37.670	3.75	2.3860	11-0065	CrN	37.539	2.3940
41.150	11.30	2.1918	03-0925	Fe_3N	41.069	2.1960
44.596	100.00	2.0301	06-0696	Fe	44.674	2.0268
47.789	12.55	1.9017	06-0627	Fe_4N	47.915	1.8970
64.473	6.59	1.4440	34-0396	Fe-Cr	64.779	1.4380
69.896	2.29	1.3447	06-0627	Fe_4N	70.058	1.3420
82.092	16.22	1.1730	34-0396	Fe-Cr	81.986	1.1743
98.948	4.28	1.0151	06-0627	Fe_4N	98.869	1.0140

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=41.150^\circ$ ($d=2.1918\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 11.30% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=41.069^\circ$ ($d=2.1960\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 03-0925 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_3N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.596^\circ$ ($d=2.0301\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 100% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.674^\circ$ ($d=2.0268\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0696 ของเหล็ก (Fe)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.789^\circ$ ($d=1.9017\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 12.55% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.915^\circ$ ($d=1.8970\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.473^\circ$ ($d=1.4440\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 6.59% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.779^\circ$ ($d=1.4380\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=69.896^\circ$ ($d=1.3447\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 2.29% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=70.058^\circ$ ($d=1.3420\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=82.092^\circ$ ($d=1.1730\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 16.22% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=81.986^\circ$ ($d=1.1743\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=98.723^\circ$ ($d=1.0151\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 4.28% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=98.869^\circ$ ($d=1.0140\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

จากผลการตรวจสอบด้วย XRD จะเห็นว่าชั้นผิวแข็งในเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำไนไตรดิงที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 36ks โครงสร้างจุลภาคที่พบสามารถแบ่งได้เป็น 2 บริเวณตามชนิดของเฟสที่พบคือ ลึกจากผิวเป็นระยะประมาณ 25.16 ไมครอน โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟสเหล็กไนไตรด์ (Fe_3N และ Fe_4N) เหล็ก (Fe) และ

สารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr) จากนั้นเมื่อระยะมากกว่า 25.16 ไมครอนจนถึง 1.25 มิลลิเมตร โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟสเหล็กไนไตรต์ (Fe_3N และ Fe_4N) โครเมียมไนไตรต์ (CrN) เหล็ก (Fe) และสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr) สอดคล้องกับการแบ่งตามลักษณะที่ปรากฏในภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง แต่แตกต่างจากลักษณะที่พบในชิ้นงานปกติ ซึ่งมีชนิดของเฟสที่พบเป็นรูปแบบเดียวกันทั่วทั้งชิ้นไนไตรต์ ส่วนปริมาณเฟสที่พบในชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนนั้นแตกต่างกันไปตามระยะลึกที่สามารถตรวจสอบได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.29 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบความเข้มข้นของเฟสต่าง ๆ ที่พบในชั้นผิวแข็งเมื่อระยะที่ทำการตรวจสอบแตกต่างกัน จะเห็นว่าเฟส Fe เป็นเฟสที่มีปริมาณมากที่สุดที่ระยะการตรวจสอบเป็น 25.16 ไมครอนและที่ 1.25 มิลลิเมตร แต่ที่ระยะ 125.66 ไมครอน ยอดกราฟที่มุม $2\theta \sim 44.6$ ระยะห่างระหว่างระนาบนี้กลับเข้าใกล้เฟส Fe-Cr มากกว่าคาดว่าเกิดจากในระนาบนี้โครเมียมละลายอยู่ในผลึกเหล็กมากทำให้ยอดกราฟเลื่อนเข้าใกล้เฟส Fe-Cr มากกว่า ในขณะที่เฟส Fe_3N ที่ผิวมีปริมาณมากกว่ารองจากเฟส Fe และมีปริมาณลดลงเมื่อระยะลึกจากผิวเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับเฟส Fe_4N ที่เป็นเฟสที่มีปริมาณมากกว่ารองจากเฟส Fe และ Fe_3N ส่วนเฟส Fe-Cr นอกเหนือจากที่

ตารางที่ 4.29 เปรียบเทียบความเข้มข้นของเฟสต่าง ๆ ที่พบในชั้นผิวแข็งของชิ้นที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำไนไตรต์แบบพลาสมาที่ 823K เป็นเวลา 36ks เมื่อระยะที่ทำการตรวจสอบแตกต่างกัน

เฟส	ความเข้มข้น (%)		
	GAXD 1° (25.16 μm)	GAXD 5° (125.66 μm)	XRD $\theta=2\theta$ (1.25 mm)
Fe	100.00	-	100.00
Fe_3N	62.44	21.37	11.30
Fe_4N ($2\theta \sim 47^\circ$)	32.92	13.79	12.55
Fe_4N ($2\theta \sim 70^\circ$)	12.83	5.74	2.29
Fe_4N ($2\theta \sim 84.5^\circ$)	9.21	4.44	-
CrN	-	6.93	3.75
Fe-Cr ($2\theta \sim 45.5$)	-	100.00	-
Fe-Cr ($2\theta \sim 65^\circ$)	4.52	5.43	6.59
Fe-Cr ($2\theta \sim 82^\circ$)	10.24	13.72	16.22

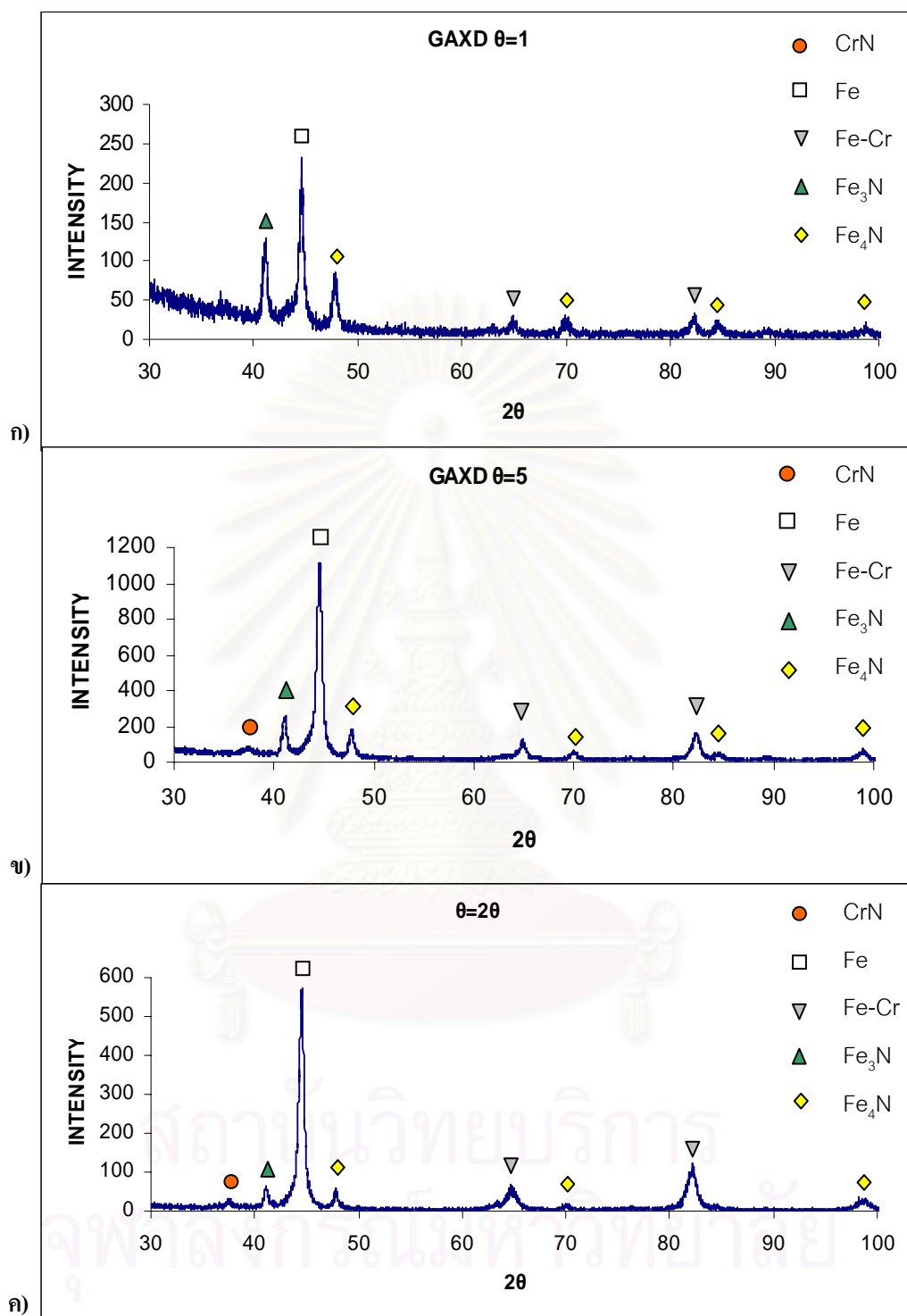
มุม $2\theta \sim 44.6$ ต่างมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะลึกจากผิวที่เพิ่มขึ้น สุดท้ายคือเฟส CrN ที่สามารถตรวจพบเมื่อเพิ่มระยะการตรวจสอบเป็น 125.66 ไมครอนจากผิว และมีปริมาณลดลงเมื่อระยะลึกจากผิวเพิ่มขึ้น

รูปที่ 4.19 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำในเตาเรียงที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72ks รูปที่ 4.19 ก) เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ที่ตรวจสอบได้จากการใช้ GAXD $\theta=1^\circ$ นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูล JCPDS ได้ผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.30 คือพบว่ายอดกราฟที่มุม $2\theta=41.171^\circ$ ($d=2.1908\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 44.70% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=41.069^\circ$ ($d=2.1960\text{\AA}$) ในการค้นหาข้อมูล JCPDS หมายเลข 03-0925 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_3N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.615^\circ$ ($d=2.0293\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 100% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.674^\circ$ ($d=2.0268\text{\AA}$) ในการค้นหาข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0696 ของเหล็ก (Fe)

ตารางที่ 4.30 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน ที่ทำในเตาเรียงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้มุม $\theta=1^\circ$

2θ (องศา)	ความเข้ม สัมพัทธ์ (%)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (\AA)	JCPDS No.	สูตรเคมี	2θ (องศา)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (\AA)
41.171	44.70	2.1908	03-0925	Fe_3N	41.069	2.1960
44.615	100.00	2.0293	06-0696	Fe	44.674	2.0268
47.835	28.64	1.8999	06-0627	Fe_4N	47.915	1.8970
64.974	5.13	1.4341	34-0396	Fe-Cr	64.779	1.4380
70.143	7.32	1.3406	06-0627	Fe_4N	70.058	1.3420
82.281	10.05	1.1708	06-0696	Fe	82.335	1.1702
84.569	7.24	1.1449	06-0627	Fe_4N	84.651	1.1440
98.715	2.43	1.0152	06-0627	Fe_4N	98.869	1.0140



รูปที่ 4.19 ผล XRD ที่ GAXD $\theta = 1^\circ$, 5° , และ 2θ ของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่มีคาร์บอนและทำไนตรายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72 ks

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.835^\circ$ ($d=1.8999\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 28.64% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.915^\circ$ ($d=1.8970\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.974^\circ$ ($d=1.4341\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 5.13% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.779^\circ$ ($d=1.4380\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=70.143^\circ$ ($d=1.3406\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 7.32% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=70.058^\circ$ ($d=1.3420\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=82.281^\circ$ ($d=1.1708\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 10.05% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=82.335^\circ$ ($d=1.1702\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0696 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.569^\circ$ ($d=1.1449\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 7.24% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.651^\circ$ ($d=1.1440\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=98.715^\circ$ ($d=1.0152\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 2.43% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=98.869^\circ$ ($d=1.0140\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

รูปที่ 4.19 ข) เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ที่ตรวจสอบได้จากการใช้ GAXD $\theta=5^\circ$ นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูล JCPDS ได้ผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.31 คือ พบว่ายอดกราฟที่มุม $2\theta=37.670^\circ$ ($d=2.3860\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 8.29% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=37.539^\circ$ ($d=2.3940\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 11-0065 ของโครเมียมไนไตรด์ (CrN)

ตารางที่ 4.31 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำในตรายคิงแบบพลาสติกที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72ks ด้วย XRD แบบ GAXD โดยใช้มุม $\theta=5^{\circ}$

2 θ (องศา)	ความเข้ม สัมพัทธ์ (%)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (Å)	JCPDS No.	สูตรเคมี	2 θ (องศา)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (Å)
37.670	8.29	2.3860	11-0065	CrN	37.539	2.3940
41.043	18.86	2.1973	03-0925	Fe ₃ N	41.069	2.1960
44.631	100.00	2.0286	06-0696	Fe	44.674	2.0268
47.873	12.33	1.8985	06-0627	Fe ₄ N	47.915	1.8970
64.765	6.41	1.4382	34-0396	Fe-Cr	64.779	1.4380
69.925	4.00	1.3442	06-0627	Fe ₄ N	70.058	1.3420
82.176	14.14	1.1720	06-0696	Fe	82.335	1.1702
84.443	2.68	1.1463	06-0627	Fe ₄ N	84.651	1.1440
98.897	5.03	1.0138	06-0627	Fe ₄ N	98.869	1.0140

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=41.043^{\circ}$ ($d=2.1973\text{Å}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 18.86% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=41.069^{\circ}$ ($d=2.1960\text{Å}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 03-0925 ของเหล็กไนตรายด์ (Fe₃N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.631^{\circ}$ ($d=2.0286\text{Å}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 100% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.674^{\circ}$ ($d=2.0268\text{Å}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0696 ของเหล็ก (Fe)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.873^{\circ}$ ($d=1.8985\text{Å}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 12.33% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.915^{\circ}$ ($d=1.8970\text{Å}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนตรายด์ (Fe₄N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.765^{\circ}$ ($d=1.4382\text{Å}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 6.41% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.779^{\circ}$ ($d=1.4380\text{Å}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=69.925^\circ$ ($d=1.3442\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 4.00% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=70.058^\circ$ ($d=1.3420\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=82.176^\circ$ ($d=1.1720\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 14.14% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=82.335^\circ$ ($d=1.1702\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0696 ของเหล็ก (Fe)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.443^\circ$ ($d=1.1463\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 2.68% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=84.651^\circ$ ($d=1.1440\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=98.897^\circ$ ($d=1.0138\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 5.03% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=98.869^\circ$ ($d=1.0140\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

รูปที่ 4.19 ค) เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ที่ตรวจสอบได้จาก XRD วิธี $\theta=2\theta$ นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูล JCPDS ได้ผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.32 คือพบว่ายอดกราฟที่มุม $2\theta=37.590^\circ$ ($d=2.3909\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 4.74% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=37.539^\circ$ ($d=2.3940\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 11-0065 ของโครเมียมไนไตรด์ (CrN)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=41.084^\circ$ ($d=2.1952\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 8.97% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=41.069^\circ$ ($d=2.1960\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 03-0925 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_3N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.616^\circ$ ($d=2.0292\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 100% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=44.674^\circ$ ($d=2.0268\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0696 ของเหล็ก (Fe)

ตารางที่ 4.32 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำในตรายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72ks ด้วย XRD วิธี $\theta=2\theta$

2 θ (องศา)	ความเข้ม สัมพัทธ์ (%)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (Å)	JCPDS No.	สูตรเคมี	2 θ (องศา)	ระยะห่าง ระหว่างระนาบ (Å)
37.590	4.74	2.3909	11-0065	CrN	37.539	2.3940
41.084	8.97	2.1952	03-0925	Fe ₃ N	41.069	2.1960
44.616	100.00	2.0292	06-0696	Fe	44.674	2.0268
47.735	7.54	1.9037	06-0627	Fe ₄ N	47.915	1.8970
64.947	8.70	1.4347	34-0396	Fe-Cr	64.779	1.4380
70.090	3.16	1.3415	06-0627	Fe ₄ N	70.058	1.3420
82.235	17.7	1.1713	34-0396	Fe-Cr	81.986	1.1743
98.929	4.36	1.0135	06-0627	Fe ₄ N	98.869	1.0140

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.735^\circ$ ($d=1.9037\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 7.54% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=47.915^\circ$ ($d=1.8970\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนตรายด์ (Fe₄N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.947^\circ$ ($d=1.4347\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 8.70% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=64.779^\circ$ ($d=1.4380\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=70.090^\circ$ ($d=1.3415\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 3.16% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=70.058^\circ$ ($d=1.3420\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนตรายด์ (Fe₄N)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta=82.235^\circ$ ($d=1.1713\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 17.7% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=81.986^\circ$ ($d=1.1743\text{\AA}$) ในการ์ดข้อมูล JCPDS หมายเลข 34-0396 ของสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr)

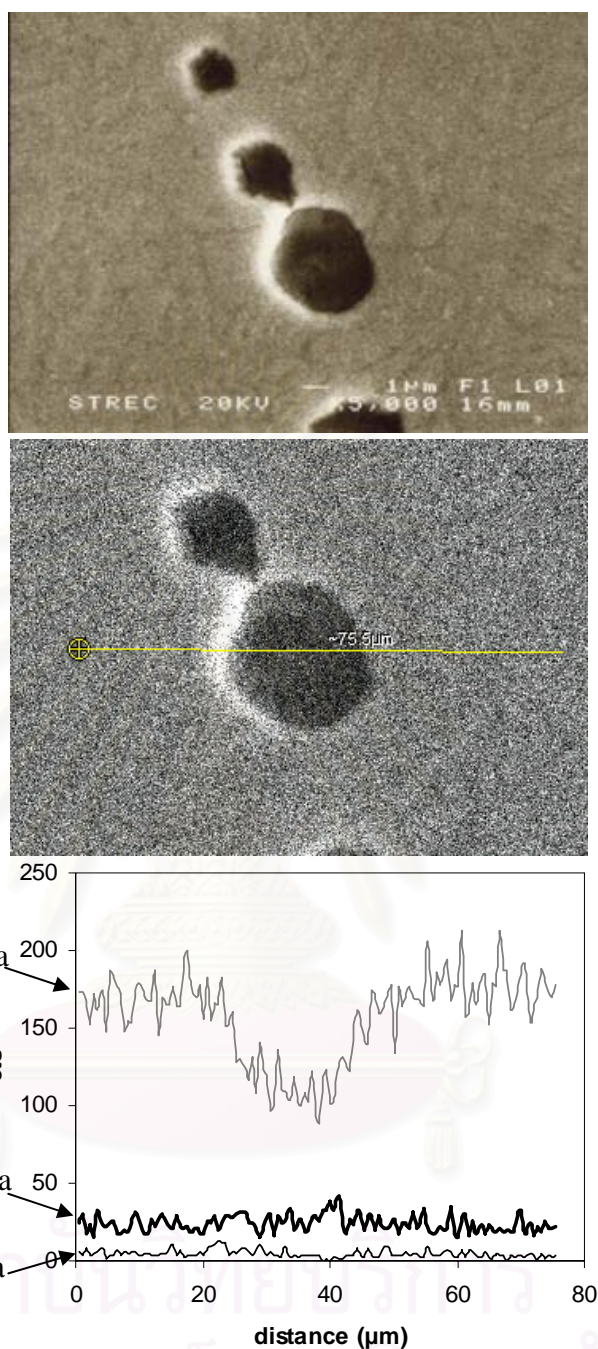
ยอดกราฟที่มุม $2\theta=98.929^\circ$ ($d=1.0135\text{\AA}$) มีความเข้มสัมพัทธ์เป็น 4.36% และมีระยะห่างระหว่างระนาบใกล้เคียงกับยอดกราฟที่มุม $2\theta=98.869^\circ$ ($d=1.0140\text{\AA}$) ในการค้ข้อมูล JCPDS หมายเลข 06-0627 ของเหล็กไนไตรด์ (Fe_4N)

ตารางที่ 4.33 เปรียบเทียบความเข้มสัมพัทธ์ของเฟสต่าง ๆ ที่พบในชั้นผิวแข็งของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำไนไตรดิงแบบพลาสมาที่ 823K เป็นเวลา 72ks เมื่อระยะที่ทำการตรวจสอบแตกต่างกัน

เฟส	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)		
	GAXD 1° (25.16 μm)	GAXD 5° (125.66 μm)	XRD $\theta=2\theta$ (1.25 mm)
Fe	100.00	100.00	100.00
Fe_3N	44.70	18.86	8.97
Fe_4N ($2\theta\sim 47^\circ$)	28.64	12.33	7.54
Fe_4N ($2\theta\sim 70^\circ$)	7.32	4.0	3.16
Fe_4N ($2\theta\sim 84.5^\circ$)	7.24	2.68	-
CrN	-	8.29	4.74
Fe-Cr ($2\theta\sim 65^\circ$)	5.13	6.41	8.70
Fe-Cr ($2\theta\sim 82^\circ$)	10.05	14.14	17.7

จากผลการตรวจสอบด้วย XRD จะเห็นว่าชั้นผิวแข็งในเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำไนไตรดิงที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72ks โครงสร้างจุลภาคที่พบสามารถแบ่งได้เป็น 2 บริเวณตามชนิดของเฟสที่พบคือ ลึกลงจากผิวเป็นระยะประมาณ 25.16 ไมครอน โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟสเหล็กไนไตรด์ (Fe_3N และ Fe_4N) เหล็ก (Fe) และสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr) จากนั้นเมื่อระยะลึกลงจากผิวมากกว่า 25.16 ไมครอน จนถึง 1.25 มิลลิเมตร โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟสเหล็กไนไตรด์ (Fe_3N และ Fe_4N) โครเมียมไนไตรด์ (CrN) และสารละลายของแข็งเหล็กกับโครเมียม (Fe-Cr) สอดคล้องกับการแบ่งตามลักษณะที่ปรากฏในภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ซึ่งแตกต่างจากลักษณะที่พบในชิ้นงานปกติซึ่งมีชนิดของเฟสที่พบเป็นรูปแบบเดียวกันทั่วทั้งชิ้นไนไตรด์ ส่วนปริมาณเฟสที่พบในชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนนั้นแตกต่างกันไปตามระยะลึกที่สามารถตรวจสอบได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.33 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบความเข้มสัมพัทธ์ของเฟสต่าง ๆ ที่พบในชั้นผิวแข็งเมื่อ

ระยะที่ทำการตรวจสอบแตกต่างกัน จะเห็นว่าเฟส Fe เป็นเฟสที่มีปริมาณมากที่สุดคงที่ตลอดชั้น รองลงมาคือเฟส Fe_3N , Fe_4N และสารละลายของแข็งของ Fe กับ Cr ตามลำดับ เฟส Fe_3N และ Fe_4N มีปริมาณลดลงตามระยะลึกที่เพิ่มขึ้น ส่วนเฟสสารละลายของแข็ง Fe กับ Cr จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะลึกที่เพิ่มขึ้น สุดท้ายคือเฟส CrN ที่สามารถตรวจพบเมื่อเพิ่มระยะการตรวจสอบ เป็น 125.66 ไมครอนจากผิว และมีปริมาณลดลงตามระยะลึกที่เพิ่มขึ้นและเมื่อนำชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำในทรายดิงแบบพลาสติกที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72ks ไปตรวจสอบด้วย Energy Dispersive Spectrometer: EDS (ได้ผลดังรูปที่ 4.20 โดยรูปที่ 4.20 ก) เป็นภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 5000 เท่า ของเม็ดผลึกสีดำ รูปที่ 4.20 ข) เป็นภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงแนวเส้นที่ทำการวิเคราะห์เชิงเส้น และรูปที่ 4.20 ค) เป็นผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ เหล็ก โครเมียม และคาร์บอน ตามแนวเส้นที่แสดงในรูปที่ 4.20 ข) จะเห็นว่าเมื่อถึงบริเวณที่เป็นเม็ดผลึกเส้นกราฟแสดงปริมาณเหล็กลดลง ในขณะที่เส้นกราฟแสดงปริมาณโครเมียมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และคาร์บอนมีแนวโน้มคงที่ ทำให้ทราบว่าเม็ดผลึกสีดำที่พบในภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงประกอบด้วยธาตุคาร์บอน และโครเมียมสูง เช่นเดียวกับที่พบในชิ้นงานปกติ แต่เนื่องจากชิ้นงานได้ทำในทรายดิงแบบพลาสติก เพื่อตรวจหาการกระจายตัวของธาตุไนโตรเจน ซึ่งไม่สามารถทำได้ด้วย EDS (ด้วยข้อจำกัดของ EDS ที่ได้กล่าวไว้ในส่วนของชิ้นงานปกติ) จึงทำการตรวจสอบชิ้นงานด้วย EPMA นอกจากนี้เพื่อยืนยันลักษณะการกระจายตัวของธาตุเหล็ก คาร์บอน ไนโตรเจน และโครเมียม ภายในชั้นไนไตรด์ของชิ้นงานจึงมีการตรวจสอบธาตุเหล่านี้ด้วย EPMA ได้ผลการตรวจสอบดังรูปที่ 4.21 ปริมาณของธาตุบอกได้จากการเทียบสีที่ปรากฏในภาพถ่ายการกระจายตัวของธาตุ กับแถบสีแสดงปริมาณที่อยู่ด้านขวาของรูป รูปที่ 4.21 ก) คือภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของชั้นไนไตรด์ที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน รูปที่ 4.21 ข) เป็นภาพแสดงการกระจายตัวของธาตุเหล็ก บริเวณที่เป็นชั้นไนไตรด์จากรูปนี้เป็นบริเวณที่เป็นสีเหลืองอ่อน เปรียบเทียบกับแถบสีด้านข้างแสดงว่ามีปริมาณธาตุเหล็กอยู่ประมาณ 176-229 count/second เมื่อสิ้นสุดชั้นไนไตรด์จากภาพเป็นบริเวณที่เป็นสีเหลืองเข้มขึ้น แสดงว่ามีปริมาณธาตุเหล็กเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 229-246 count/second และบริเวณที่เป็นสีดำในรูป 4.21 ก) ซึ่งก็คือเม็ดผลึกสีดำที่ตกผลึกออกมาในรูป 4.21 ข) เม็ดผลึกดังกล่าวเป็นบริเวณที่เป็นสีเขียวซึ่งแสดงว่าประกอบด้วยธาตุเหล็กประมาณ 124-156 count/second และบริเวณใจกลางเม็ดผลึกยังเป็นสีน้ำเงินแสดงถึงการมีปริมาณธาตุเหล็กอยู่ประมาณ 19-36 count/second แสดงว่าบริเวณชั้นไนไตรด์จะมีปริมาณธาตุเหล็กน้อยกว่าภายในชิ้นงาน และยิ่งพบน้อยมากตรงบริเวณเม็ดผลึกสีดำ



รูปที่ 4.20 ผลการตรวจสอบจุดสีดำในชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำในทรายดิ่งแบบพลาสติกที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72 ks ด้วย EDS ก) ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ข) ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงระยะที่ทำการตรวจสอบ ค) เส้นกราฟแสดงการกระจายของธาตุ Fe Cr และ C

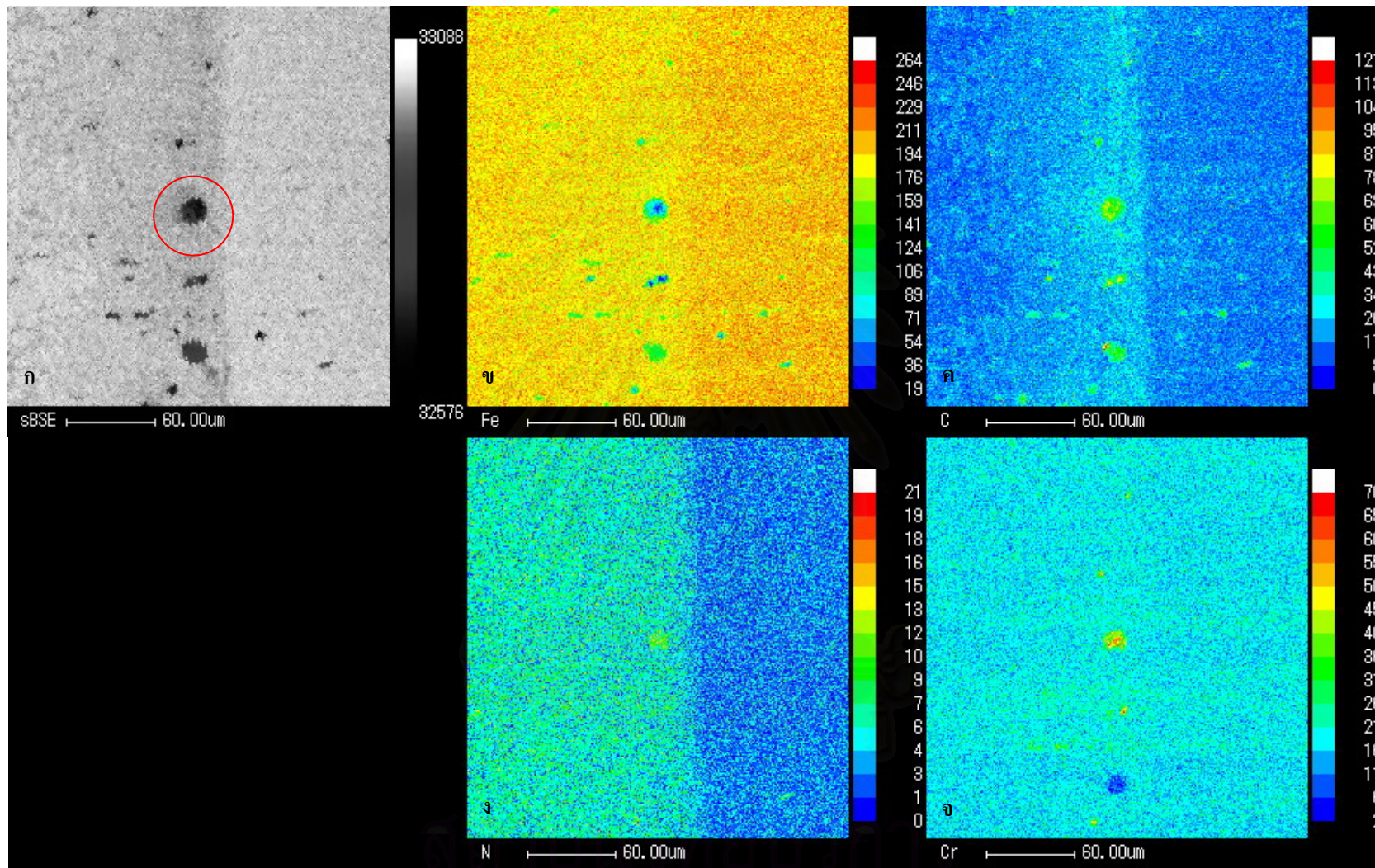
รูปที่ 4.21 ก) เป็นภาพแสดงการกระจายตัวของธาตุคาร์บอนบริเวณชั้นในทรายดี ในส่วนใกล้ผิวการกระจายตัวของธาตุคาร์บอนแสดงด้วยสีน้ำเงินเป็นส่วนใหญ่และมีสีฟ้าเขียวปน

บ้างเล็กน้อย นั่นคือบริเวณใกล้ผิวส่วนใหญ่ไม่มีคาร์บอน ส่วนบางจุดที่เป็นสีฟ้าเขียวนั้นมีปริมาณคาร์บอนประมาณ 26-34 count/second ต่อมาบริเวณที่ใกล้กับรอยต่อระหว่างชั้นในตราดกับภายในชิ้นงาน ซึ่งเป็นบริเวณที่พบเม็ดผลึก บริเวณส่วนใหญ่แสดงปริมาณคาร์บอนด้วยสีฟ้าเขียวปะปนด้วยจุดสีน้ำเงินเล็กน้อยซึ่งแสดงว่าบริเวณนี้ส่วนใหญ่มีปริมาณเพิ่มขึ้นจากช่วงแรกเป็นประมาณ 26-34 count/second และบางจุดที่เป็นสีน้ำเงินนั่นคือจุดที่มีปริมาณคาร์บอนประมาณ 0-8 count/second แต่ตำแหน่งที่เป็นเม็ดผลึกนั้นแสดงปริมาณคาร์บอนด้วยสีเขียวและใจกลางเป็นจุดสีเหลืองแสดงว่าเป็นตำแหน่งที่มีปริมาณคาร์บอนประมาณ 43-69 count/second และจุดใจกลางมีคาร์บอนสูงถึงประมาณ 69-87 count/second ส่วนภายในชิ้นงานจะเห็นว่าน้ำเงินจนถึงฟ้าปะปนด้วยจุดสีฟ้าเขียวแสดงว่าภายในชิ้นงานมีปริมาณคาร์บอนประมาณ 0-34 count/second การกระจายตัวของคาร์บอนนี้แตกต่างจากที่พบในชิ้นงานปกติอย่างชัดเจน เพราะในชิ้นงานปกติการกระจายตัวของคาร์บอนนั้นมีความสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้น แต่ปริมาณคาร์บอนที่สูงขึ้น ณ ตำแหน่งที่เป็นเม็ดผลึกเป็นผลที่เหมือนกันทั้งในชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนและชิ้นงานปกติ

รูปที่ 4.21 ง) เป็นภาพแสดงการกระจายตัวของธาตุไนโตรเจน จากภาพจะเห็นว่าบริเวณที่เป็นชั้นในตราดจะมีสีเขียว และสีเขียวจะมีความหนาแน่นมากขึ้นบริเวณภายในของเม็ดผลึก ส่วนภายในชิ้นงานจะมีสีน้ำเงิน เมื่อเปรียบเทียบกับแถบสีด้านข้างทำให้ทราบว่าบริเวณชั้นในตราดประกอบด้วยไนโตรเจนประมาณ 6-12 count/second และภายในชิ้นงานประกอบด้วยไนโตรเจนประมาณ 0-7 count/second ปริมาณไนโตรเจนบริเวณที่เป็นชั้นในตราดมีมากกว่าภายในชิ้นงาน และมีความหนาแน่นมากบริเวณภายในเม็ดผลึก เป็นลักษณะเช่นเดียวกับที่พบในชิ้นงานปกติ

รูปที่ 4.21 จ) เป็นภาพแสดงการกระจายตัวของธาตุโครเมียม มีระดับสีเป็นฟ้าเขียวปะปนด้วยสีน้ำเงินเล็กน้อยสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นในตราดและภายในชิ้นงาน ยกเว้นตำแหน่งที่เป็นเม็ดผลึกระดับสีจะเป็นสีเขียว และตรงใจกลางเป็นสีเหลือง เปรียบเทียบกับแถบสีด้านข้างทำให้ทราบว่าทั้งชิ้นในตราดและภายในชิ้นงานมีระดับโครเมียมประมาณ 2-26 count/second ส่วนตำแหน่งเม็ดผลึกมีโครเมียมสูงขึ้นคือประมาณ 26-36 count/second และใจกลางสูงถึง 45-60 count/second เป็นลักษณะการกระจายตัวของโครเมียมเช่นเดียวกับในชิ้นงานปกติ

สรุปจากการตรวจสอบชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่มีการสูญเสียคาร์บอนและทำในตราดดึงแบบพลาสติกที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72ks ด้วย EPMA ทำให้ทราบว่าบริเวณชั้นในตราดมีปริมาณธาตุเหล็กน้อยกว่าและมีปริมาณธาตุโครเมียมเท่ากันเมื่อเทียบกับภายใน-



รูปที่ 4.21 แผนทีรังสีเอกซ์บนชิ้นงานที่มีการสูญเสียปริมาณคาร์บอนที่ผิว ที่ทำในตารางดิงแบบพลาสติกที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72 ks
 ก) ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ข) ภาพการกระจายของ Fe ค) ภาพการกระจายของ C ง) ภาพการกระจายของ N จ) ภาพการกระจายของ Cr

งาน ส่วนปริมาณคาร์บอนมีการกระจายแบ่งได้ 3 บริเวณ คือบริเวณใกล้กับผิว (85-130 ไมครอน จากผิว) เป็นบริเวณที่มีคาร์บอนน้อยจนถึงไม่มีคาร์บอนอยู่เลย ระยะต่อมา (ประมาณ 155-200 ไมครอนจากผิว) เป็นบริเวณที่มีคาร์บอนเพิ่มขึ้น 4-7 เท่าของบริเวณใกล้ผิว จากนั้นเมื่อเข้าสู่ภายใน ชิ้นงานปริมาณคาร์บอนกลับลดลงอีกครั้ง ซึ่งเป็นผลที่สอดคล้องกับผลการตรวจสอบด้วย XRD ที่พบว่าชั้นไนไตรต์แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกที่ใกล้ผิวประกอบด้วยเฟส Fe_3N , Fe_4N , และ $Fe-Cr$ ส่วนที่สองซึ่งใกล้กับรอยต่อระหว่างชั้นไนไตรต์กับภายในชิ้นงานประกอบด้วยเฟส Fe_3N , Fe_4N , $Fe-Cr$ และ CrN นอกจากนี้การตรวจสอบชิ้นงานด้วย EPMA ยังทำให้ทราบว่าเม็ดผลึกสีดำที่พบในโครงสร้างจุลภาคเป็นบริเวณที่ประกอบด้วยธาตุ คาร์บอน และ โครเมียมปริมาณสูง และ ภายในเม็ดผลึกเป็นบริเวณที่มีไนโตรเจนรวมตัวกันอย่างหนาแน่นสม่ำเสมอเช่นเดียวกับเม็ดผลึกใน ชิ้นงานปกติ จึงอาจกล่าวได้ว่าเม็ดผลึกทั้งในชิ้นงานปกติและชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนเป็น ตำแหน่งที่ประกอบด้วยเฟสโครเมียมคาร์ไบด์และโครเมียมไนไตรต์ โดยเป็นเม็ดผลึกโครเมียมไนไตรต์ที่มีโครเมียมคาร์ไบด์อยู่ใจกลาง

ตารางที่ 4.34 ค่าความหนาเฉลี่ยของชั้นผิวแข็งของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่มีการสูญเสีย คาร์บอน และทำพลาสมาไนไตรดิงที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ

อุณหภูมิ (K)	เวลา (ks)	ความหนาชั้น ไนไตรต์ (μm)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ความหนาชั้น สีขาว (μm)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ร้อยละของ ชั้นสีขาว
773	36	88.06	2.84	62.45	7.27	~71
	72	91.71	5.04	79.23	5.75	~86
823	36	118.89	6.55	87.13	5.59	~73
	72	169.89	5.34	72.06	6.40	~42

พิจารณาความหนาของชิ้นงาน ตารางที่ 4.34 แสดงค่าความหนาเฉลี่ยของชั้นไนไตรต์ในแต่ละชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่ทำไนไตรดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 36 ks มีความหนาชั้นไนไตรต์เป็น 88.06 ไมครอน (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 2.84) ความหนาชั้นสีขาวเป็น 62.45 ไมครอน (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน=7.27) และชิ้นงานที่ทำไนไตรดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 72 ks มีความหนาชั้นไนไตรต์เป็น 91.71 ไมครอน (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 5.04)

ความหนาชั้นสีขาวเป็น 79.23 ไมครอน (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 5.75) และสำหรับชิ้นงานที่ทำใน ทรายดิงแบบพลาสติกที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 36 ks มีความหนาชั้นไนไตรด์เป็น 118.89 ไมครอน (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 6.55) ความหนาชั้นสีขาวเป็น 87.13 ไมครอน (ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน=5.59) และชิ้นงานที่ทำในทรายดิงแบบพลาสติกที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72 ks มีความ หนาชั้นไนไตรด์เป็น 169.89 ไมครอน (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 5.34) ความหนาชั้นสีขาวเป็น 72.06 ไมครอน (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน=6.40) ตามลำดับ

4.2.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนาของชั้นไนไตรด์

ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนาของชั้นไนไตรด์ ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่มีการ สูญเสียคาร์บอนอาจพิจารณาได้จากตารางที่ 4.34 และภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 4.22 และ 4.23 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนากับอุณหภูมิในทรายดิง ของชิ้นงานที่มีการสูญเสีย คาร์บอนและทำในทรายดิงแบบพลาสติกเป็นเวลา 36 และ 72 ks ตามลำดับ ชิ้นงานที่ทำในทรายดิง แบบพลาสติกที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 36 ks มีความหนาเฉลี่ยของชั้นไนไตรด์เป็น 118.89 ไมครอน และมีความหนาเฉลี่ยของชั้นสีขาวเป็น 87.13 ไมครอน หนากว่าชั้นไนไตรด์ในชิ้นงานที่ ทำในทรายดิงแบบพลาสติกเป็นเวลาเท่ากันที่อุณหภูมิ 773K ซึ่งมีความหนาเฉลี่ยของชั้นไนไตรด์ เป็น 88.06 ไมครอน และมีความหนาเฉลี่ยของชั้นสีขาวเป็น 62.45 ไมครอน (รูปที่ 4.22) และ ชิ้นงานที่ทำในทรายดิงแบบพลาสติกที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72 ks มีความหนาเฉลี่ยของชั้นไน ไตรด์เป็น 169.89 ไมครอน มีความหนาเฉลี่ยของชั้นสีขาวเป็น 72.06 ไมครอน หนากว่าชั้น ไนไตรด์ในชิ้นงานที่ทำในทรายดิงแบบพลาสติกเป็นเวลาเท่ากันที่อุณหภูมิ 773K ซึ่งมีความหนา เฉลี่ยของชั้นไนไตรด์เป็น 91.71 ไมครอน มีความหนาเฉลี่ยของชั้นสีขาวเป็น 79.23 ไมครอน (รูป ที่ 4.23) แสดงว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่ควบคุมความหนาของชั้นไนไตรด์ และชั้นสีขาวของ ชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวในกระบวนการในทรายดิงแบบพลาสติก โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้ได้ชั้นผิวแข็งที่หนากว่า เช่นเดียวกับผลของชิ้นงานปกติ

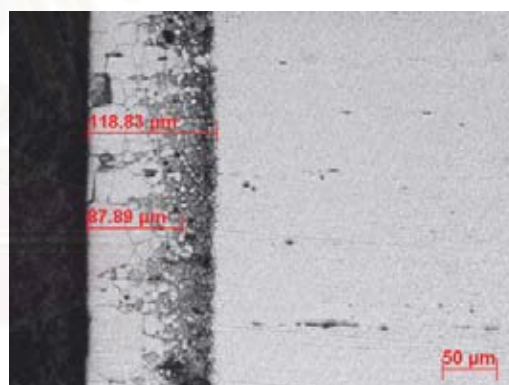
4.2.3 ผลของเวลาที่มีต่อความหนาของชั้นไนไตรด์

ผลของเวลาที่มีต่อความหนาของชั้นไนไตรด์ อาจพิจารณาได้จากตารางที่ 4.2 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 4.24 และ 4.25 ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความหนากับ ระยะเวลาในการทำในทรายดิง ชิ้นงานที่ทำในทรายดิงแบบพลาสติกที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 72ks มีความหนาเฉลี่ยของชั้นไนไตรด์เป็น 91.71 ไมครอน มีความหนาเฉลี่ยของชั้นสีขาวเป็น 79.23

ไมครอน มีความหนามากกว่าชั้นไนตรายด์ในชิ้นงานที่ทำไนตรายด์แบบพลาสมาที่อุณหภูมิเดียวกันแต่ใช้ระยะเวลา 36 ks ซึ่งมีความหนาเฉลี่ยของชั้นไนตรายด์เป็น 88.06 ไมครอน มีความหนาเฉลี่ยของชั้นสีขาวเป็น 62.45 ไมครอน (รูปที่ 4.24) และชิ้นงานที่ทำไนตรายด์แบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72 ks มีความหนาเฉลี่ยของชั้นไนตรายด์เป็น 169.89 ไมครอน มีความหนาเฉลี่ยของชั้นสีขาวเป็น 72.06 ไมครอน มีความหนาสูงกว่าชั้นผิวไนตรายด์ในชิ้นงานที่ทำไนตรายด์แบบพลาสมาที่อุณหภูมิเดียวกันแต่ใช้ระยะเวลา 36 ks ที่มีความหนาเฉลี่ยชั้นไนตรายด์เป็น 118.89 ไมครอน มีความหนาเฉลี่ยชั้นสีขาวเป็น 87.13 ไมครอน (รูปที่ 4.25) นั่นแสดงว่าเวลาเป็นปัจจัยหนึ่งที่ควบคุมความหนาของชั้นไนตรายด์ และชั้นสีขาวของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวในกระบวนการไนตรายด์แบบพลาสมา โดยเมื่อใช้เวลามากขึ้นจะทำให้ได้ชั้นผิวแข็งที่หนากว่า เช่นเดียวกับผลของชิ้นงานปกติ

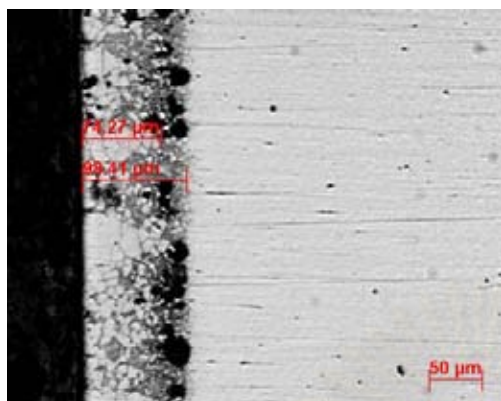


ก) ชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว และ
ทำไนตรายด์แบบพลาสมาที่อุณหภูมิ
773K เป็นเวลา 36 ks

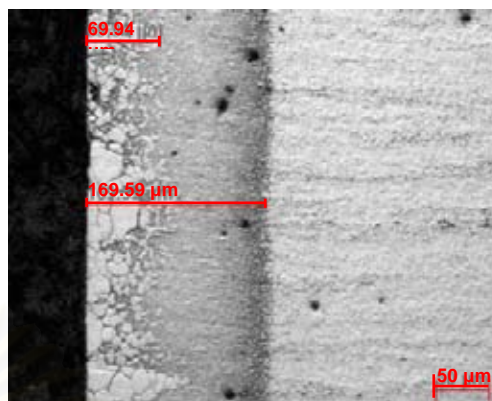


ข) ชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว และ
ทำไนตรายด์แบบพลาสมาที่อุณหภูมิ
823K เป็นเวลา 36 ks

รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบความหนาชั้นผิวแข็งของชิ้นงาน H13 ที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว ด้วยภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 100 เท่า ระหว่างชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิไนตรายด์แบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773 K กับ 823K เป็นเวลา 36 ks



ก) ชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว และทำในตรายคิงแบบพลาสมาที่ อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 20 ชั่วโมง

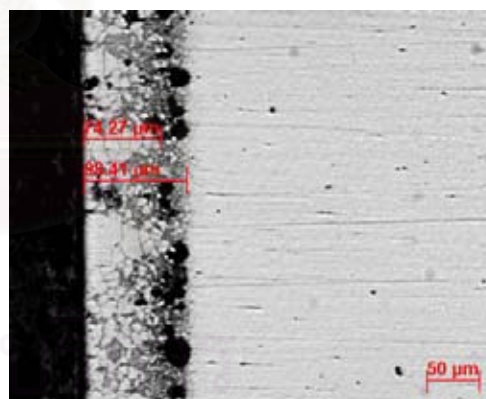


ข) ชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว และทำในตรายคิงแบบพลาสมาที่ อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 20 ชั่วโมง

รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบความหนาชั้นผิวแข็งของชิ้นงาน H13 ที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว ด้วย ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 100 เท่า ระหว่าง ชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิในตรายคิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773K กับ 823K เป็นเวลา 72 ks

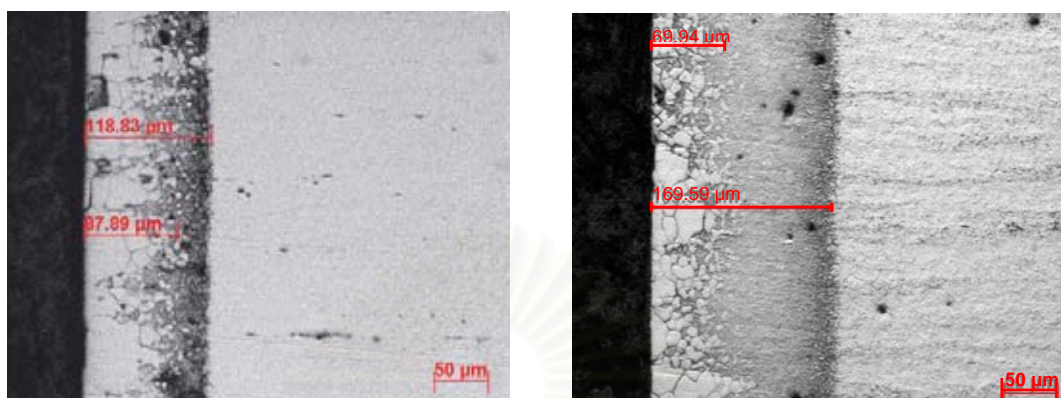


ก) ชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว และทำในตรายคิงแบบพลาสมาที่ อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



ข) ชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว และทำในตรายคิงแบบพลาสมาที่ อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 20 ชั่วโมง

รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบความหนาชั้นผิวแข็งของชิ้นงาน H13 ที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว ด้วย ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 100 เท่า ระหว่าง ชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิในตรายคิงแบบพลาสมา 773K เป็นเวลา 36 และ 72 ks



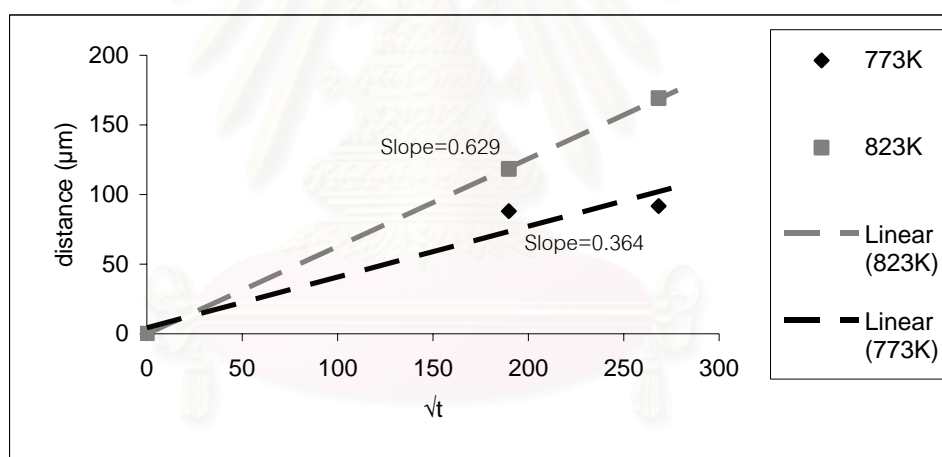
- ก) ชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว และ
ทำในตรายคิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ
823K เป็นเวลา 10 ชั่วโมง
- ข) ชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว และ
ทำในตรายคิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ
823K เป็นเวลา 20 ชั่วโมง

รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบความหนาชั้นผิวแข็งของชิ้นงาน H13 ที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว ด้วย
ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 100 เท่า ระหว่าง
ชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิในตรายคิงแบบพลาสมา 823K เป็นเวลา 36 และ 72 ks

4.2.4 กลไกการเกิดชั้นในตรายคิงของเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่มีการสูญเสียคาร์บอนและทำ ในตรายคิงแบบพลาสมา

จากผลการทดลองข้างต้นจะเห็นว่า การเกิดชั้นในตรายคิงในชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนในกระบวนการในตรายคิงแบบพลาสมามีระยะเวลา และอุณหภูมิในการทำในตรายคิงเป็นตัวแปรที่ควบคุมความหนาของชั้นในตรายคิงที่เกิดขึ้น โดยเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความหนาของชั้นในตรายคิงเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับที่พบในชิ้นงานปกติ และเมื่อสร้างความสัมพันธ์ของรากที่สองของเวลากับความหนาของชั้นในตรายคิงที่ได้ในชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน จะได้ความสัมพันธ์แสดงดังรูปที่ 4.26 ซึ่งก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกับที่พบในชิ้นงานปกติ คือเป็นไปตามสมการที่ 4.1 แสดงว่าชั้นในตรายคิงที่เกิดขึ้นมีความหนาเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลา จึงสรุปได้ว่ากลไกที่ควบคุมการเกิดชั้นในตรายคิงของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนในกระบวนการในตรายคิงคือการแพร่ จากรูป 4.26 ยังคงพบการเบี่ยงเบนออกจากเส้นตรงเช่นเดียวกับในชิ้นงานปกติ ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการสปัตเตอริงที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการในตรายคิงแบบพลาสมา และนอกจากนี้จากรูปสามารถหาค่าสามารถหาค่า K_p ของแต่ละอุณหภูมิได้จากค่าความชันของเส้นตรงของแต่ละ

อุณหภูมิ คือ K_p ของอุณหภูมิ 773K มีค่าเป็น $0.3644 \mu\text{m}^2/\text{s}$ และ K_p ของอุณหภูมิ 823K มีค่าเป็น $0.6294 \mu\text{m}^2/\text{s}$ ค่า K_p ของอุณหภูมิ 823K ที่มีค่ามากกว่าค่า K_p ของอุณหภูมิ 773K แสดงว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของชั้นไนไตรต์ในชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่อุณหภูมิ 823K มีมากกว่าที่อุณหภูมิ 773K เช่นเดียวกับที่พบในชิ้นงานปกติ ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากการที่มีกลไกการแพร่เป็นกระบวนการที่ควบคุมการเพิ่มขึ้นของชั้นไนไตรต์นั่นเอง และหากเปรียบเทียบค่า K_p ระหว่างชิ้นงานปกติและชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนดังตารางที่ 4.35 ที่อุณหภูมิเดียวกันจะเห็นว่า ค่า K_p ของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนมีค่าน้อยกว่าในชิ้นงานปกติ นั่นแสดงว่าอัตราการแพร่ในชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนช้ากว่าในชิ้นงานปกติ สอดคล้องกับรายงานของ N. Granito และคณะ [19] ที่สัมพันธ์การแพร่ของไนโตรเจนในชั้นไนไตรต์มีค่าลดลงเมื่อปริมาณโครเมียมในวัสดุเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ปริมาณโครเมียมที่ละลายอยู่ในผลึกของเหล็กในชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนในการทดลองครั้งนี้มีมากกว่าในชิ้นงานปกติ (ดูได้จากผลการตรวจสอบด้วย XRD)



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของเวลากับความหนาของชั้นไนไตรต์ในชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน ที่ได้จากการบวนการไนไตรดิงแบบพลาสมา

ตารางที่ 4.35 เปรียบเทียบค่า K_p ของชิ้นงานปกติกับชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน

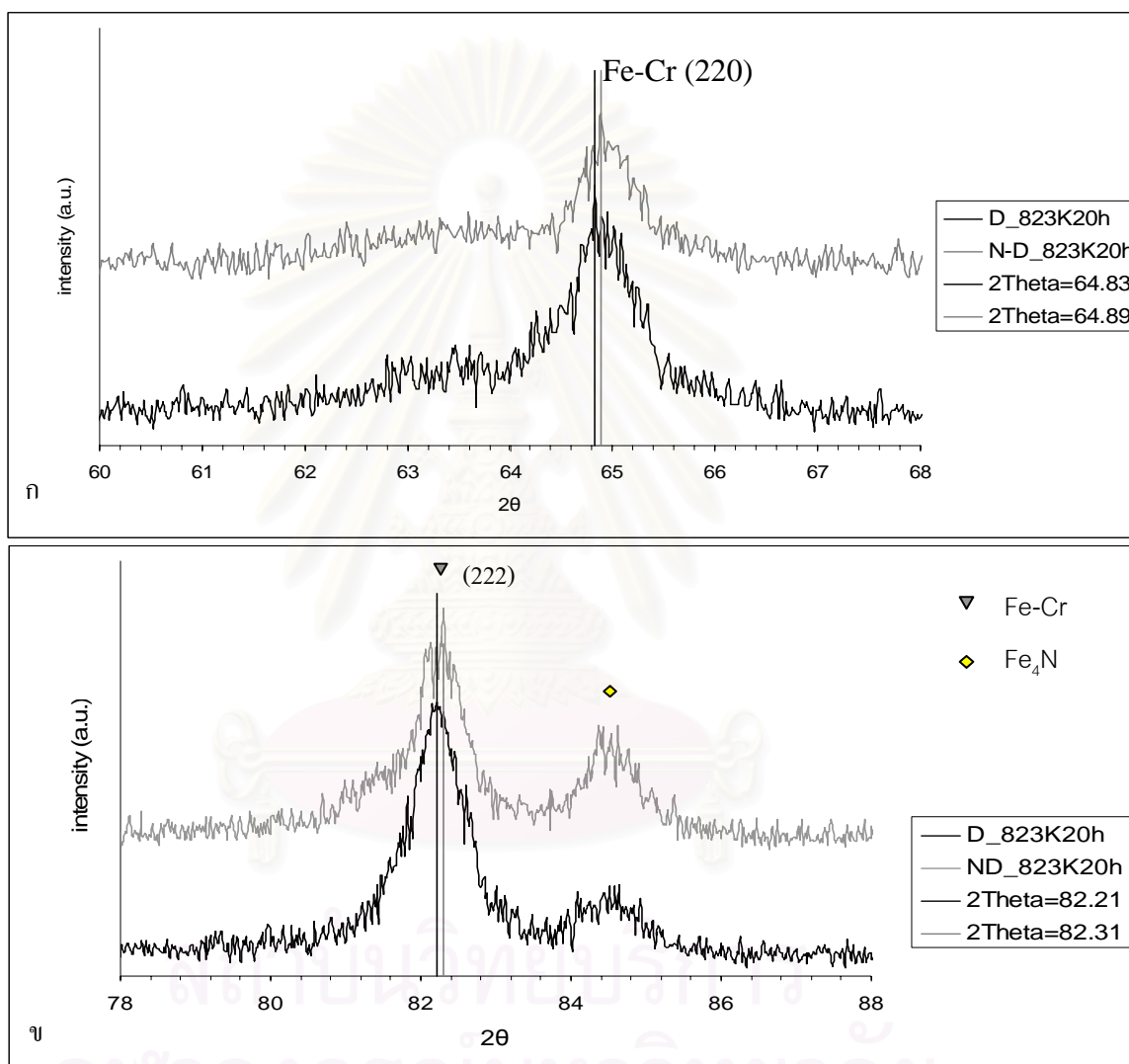
ชิ้นงาน	K_p ชิ้นงานปกติ ($\mu\text{m}^2/\text{s}$)	K_p ชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน ($\mu\text{m}^2/\text{s}$)
773K	0.437	0.364
823K	0.648	0.629

การเกิดชั้นไนตรายด์ในชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน ด้วยกระบวนการไนตรายด์แบบพลาสมามีอุณหภูมิในการทำไนตรายด์เป็นอีกตัวแปรที่ควบคุมความหนาของชั้นไนตรายด์ที่เกิดขึ้น โดยเมื่ออุณหภูมิมากขึ้นจะทำให้ได้ชั้นไนตรายด์ที่หนาขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาจากข้อที่หนึ่งของ Fick รวมทั้งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความหนาของชั้นไนตรายด์ที่ได้ก็เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับที่พบในชิ้นงานปกติ ดังนั้นกลไกที่ควบคุมการเกิดชั้นไนตรายด์ในชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนจึงเป็นการแพร่เช่นเดียวกัน

จากผลการตรวจสอบชั้นไนตรายด์ในชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน ที่พบว่าชั้นไนตรายด์บริเวณหนึ่งประกอบด้วยเฟส γ' (Fe_4N), ϵ (Fe_3N) และ โครเมียมไนตรายด์ (CrN) (รูปที่ 4.16-4.20) แต่ปริมาณ โครเมียมไนตรายด์และบริเวณที่พบโครเมียมไนตรายด์ในชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนมีน้อยกว่าที่พบในชิ้นงานปกติ และเปรียบเทียบผลการตรวจสอบจาก XRD กับภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคยังพบว่าบริเวณที่พบ CrN เป็นช่วงบริเวณที่มีสีเทาดำในภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค และจากภาพแสดงการกระจายตัวของธาตุคาร์บอนในชิ้นงานปกติและชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน (รูปที่ 4.7 ก) และรูปที่ 4.21ก) ตามลำดับ)

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาออกกราฟของเฟส Fe-Cr ในผลการตรวจสอบด้วย XRD ของทั้งชิ้นงานปกติและชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน จึงพบว่ามุม 2θ ที่เกิดออกกราฟของเฟส Fe-Cr ในชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนมีค่าน้อยกว่าในชิ้นงานปกติทั้งเฟส Fe-Cr ระนาบ (220) และ (222) (รูปที่ 4.27) เมื่อนำค่า 2θ ดังกล่าวไปคำนวณหาค่าแลททิซพารามิเตอร์ได้ค่าแสดงดังตารางที่ 4.35 และ 4.36 ซึ่งแสดงค่าแลททิซพารามิเตอร์ของเฟส Fe-Cr ระนาบ (220) และ (222) ตามลำดับ ของ JCPDS 34-0396 (Fe-Cr ใน 434L stainless steel) ชิ้นงานปกติ ชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน และค่าแลททิซพารามิเตอร์ของ Fe ใน JCPDF 06-0696 (Fe synthesis) ที่มีระนาบเดียวกัน จะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าแลททิซพารามิเตอร์ของเฟส Fe-Cr ใน JCPDF 34-0396 (4.067 Å) กับค่าแลททิซพารามิเตอร์ของ Fe ใน JCPDF 06-0696 (4.065 Å) ค่าแลททิซพารามิเตอร์ของเฟส Fe-Cr ใน JCPDF 34-0396 มีค่ามากกว่า เนื่องจากการที่มีอะตอมของโครเมียมละลายเข้าไปในโครงผลึกของเหล็กทำให้โครงผลึกขยายตัว ดังนั้นโครงผลึกที่มีการขยายตัวมากซึ่งค่าแลททิซพารามิเตอร์จะมีค่ามาก แสดงว่ามีโครเมียมละลายอยู่มาก จากตารางที่ 4.35 ค่าแลททิซพารามิเตอร์ในชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน (4.064 Å) มากกว่าในชิ้นงานปกติ (4.061 Å) และจากตาราง 4.4 ค่าแลททิซพารามิเตอร์ในชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน (4.059 Å) มากกว่าในชิ้นงานปกติ (4.055 Å) แสดงว่าโครเมียมที่ละลายอยู่ในโครงผลึกของเหล็กในชิ้นงานที่มีการสูญเสีย

คาร์บอน มีมากกว่าในชิ้นงานปกติ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนมีปริมาณโครเมียมคาร์ไบด์น้อยกว่าในชิ้นงานปกติ



รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบยอดกราฟของเฟสสารละลายของแข็งของเหล็กกับโครเมียม ในชิ้นงานปกติกับชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน ที่ทำพลาสมาในตรายดิ่งที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 72 ks ก) ระบาย 220 ข) ระบาย 222

ตารางที่ 4.36 ค่าเลขทิกซพารามิเตอร์ของเฟสสารละลายของแข็งของเหล็กกับโครเมียมระนาบ (220) ในชิ้นงานปกติและชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว ทำในตรายคิงแบบพลาสมาที่ 823K เป็นเวลา 20 ชั่วโมง เทียบกับ JCPDF 06-0696 (Fe) และ 34-0396 (Fe-Cr)

ชิ้นงาน	เฟส	2θ	d_{hkl}	เลขทิกซพารามิเตอร์ Å
JCPDS 06-0696	Fe	65.023	1.4332	4.054
JCPDS 34-0396	Fe-Cr	64.779	1.4380	4.067
ND283K20hr	Fe-Cr	64.89	1.4358	4.061
D283K20hr	Fe-Cr	64.83	1.4370	4.064

ตารางที่ 4.37 ค่าเลขทิกซพารามิเตอร์ของเฟสสารละลายของแข็งของเหล็กกับโครเมียมระนาบ (222) ในชิ้นงานปกติและชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว ทำในตรายคิงแบบพลาสมาที่ 823K เป็นเวลา 20 ชั่วโมง เทียบกับ JCPDF 06-0696 (Fe) และ 34-0396 (Fe-Cr)

ชิ้นงาน	เฟส	2θ	d_{hkl}	เลขทิกซพารามิเตอร์ Å
JCPDF 06-0696	Fe	82.335	1.1702	4.054
JCPDS 34-0396	Fe-Cr	81.986	1.1743	4.068
ND283K20hr	Fe-Cr	82.31	1.1705	4.055
D283K20hr	Fe-Cr	82.21	1.1717	4.059

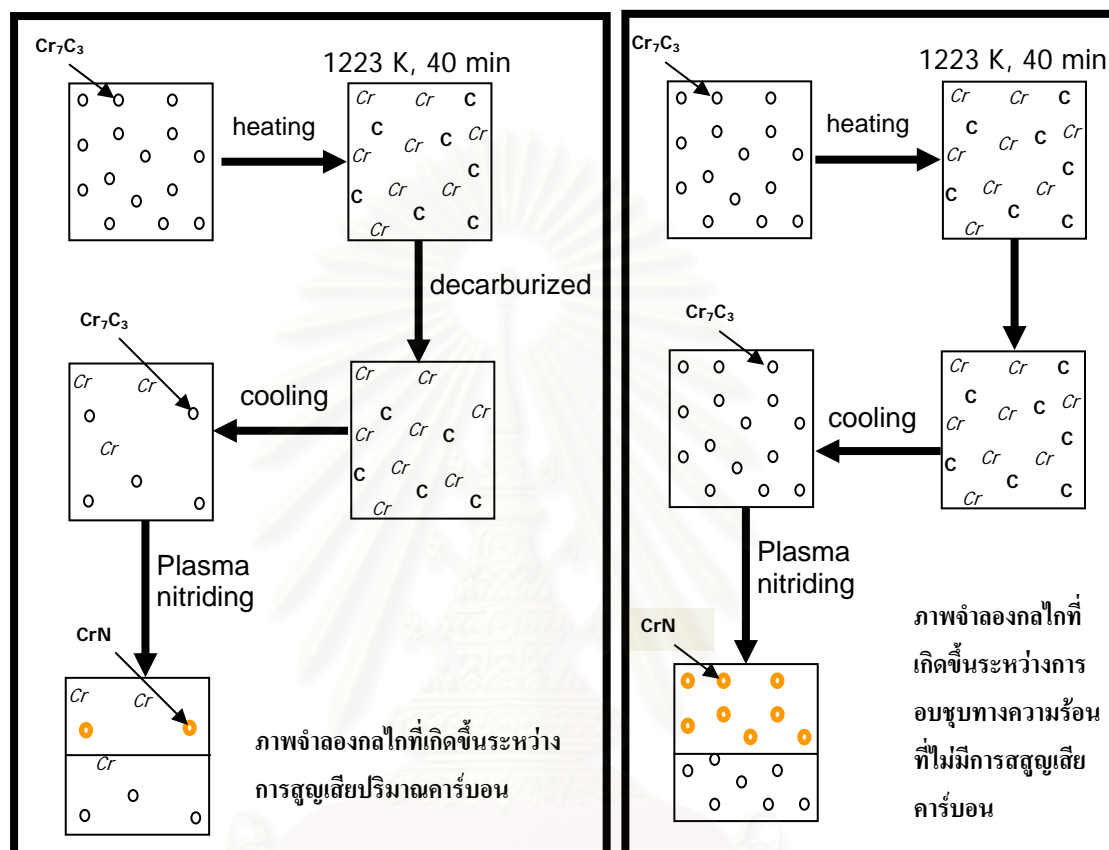
ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าการที่พบ CrN มีความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอน การสูญเสียคาร์บอน ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการทำให้เป็นอสเทนไนท์ที่อุณหภูมิ 1223K (950°C) เป็นเวลา 40 นาที (2.4ks) ที่อุณหภูมินี้ จากแผนภูมิสมดุลของเหล็กกับคาร์บอนของเหล็กที่มีปริมาณโครเมียม 5% โดยอะตอม (ภาคผนวก) โครเมียมคาร์ไบด์ Cr_7C_3 ที่มีอยู่เหล็กกล้าเครื่องมือ H13 เกิดการสลายตัวเป็นอะตอมของธาตุโครเมียม Cr และคาร์บอน C ละลายกลับเข้าสู่เนื้อพื้นซึ่งเป็นเฟสอสเทนไนท์ของชิ้นงาน ดังแบบจำลองในรูปที่ 4.28 เมื่ออยู่ในสภาวะที่ทำให้เกิดการสูญเสียคาร์บอน อะตอมของธาตุคาร์บอนดังกล่าวจึงแพร่ออกสู่บรรยากาศภายนอก ทำให้ปริมาณอะตอมของ

คาร์บอนภายในชิ้นงานลดลง ตามที่แสดงในรูปที่ 4.13 ดังนี้แล้วเมื่อชิ้นงานนี้เย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้อง ปริมาณโครเมียมคาร์ไบด์ภายในชิ้นงานจึงน้อยกว่า และมีปริมาณอะตอมธาตุโครเมียมละลายอยู่ในโครงสร้างผลึกของเหล็กมากกว่าชิ้นงานปกติ หลังจากนั้นเมื่อชิ้นงานเข้าสู่กระบวนการไนตรายดิงแบบพลาสมา จึงทำให้ชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนได้ CrN น้อยกว่าในชิ้นงานปกติ

ตามที่ Mehmet และคณะ [3] และ Chen-Yi Wei และ Fan-Shiong Chen [32] ได้เสนอในรายงานว่าหลังจากอะตอมของไนโตรเจนแพร่เข้าสู่ชิ้นงาน ในโตรเจนอะตอมบางส่วนได้เข้าไปแทนที่อะตอมของคาร์บอนในเนื้อวัสดุเกิดสารประกอบไนไตรด์ ทั้งเหล็กไนไตรด์และโครเมียมไนไตรด์ และจากรายงานของ O. Salas และคณะ [34] การเกิดผลึกรูปร่างแผ่น (plate) ขนาดเล็กละเอียดของ CrN ในชั้นไนไตรด์เป็นผลจากคาร์ไบด์ที่ละลายอยู่ในชิ้นงาน (dissolution carbides) ก่อนการทำไนตรายดิง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในงานวิจัยครั้งนี้ที่พบปริมาณ CrN น้อยในชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน ซึ่งมีปริมาณคาร์บอนน้อยกว่าในชิ้นงานปกติ จึงส่งผลให้มีปริมาณโครเมียมคาร์ไบด์ในชิ้นงานน้อยกว่าปกติ เมื่อนำไปทำไนตรายดิงแบบพลาสมาอะตอมไนโตรเจนเข้าไปแทนที่อะตอมคาร์บอน โครเมียมคาร์ไบด์ที่มีอยู่จึงเปลี่ยนเป็น CrN ส่งผลให้มีปริมาณ CrN น้อยด้วยเช่นกัน อีกทั้งจุดสีดำที่พบในโครงสร้างจุลภาคซึ่งประกอบด้วยโครเมียมคาร์บอน และไนโตรเจน ทั้งในชิ้นงานปกติและชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน ยังเป็นสิ่งที่ยืนยันกลไกการเปลี่ยนจากโครเมียมคาร์ไบด์เป็นโครเมียมไนไตรด์ ที่เกิดจากการแทนที่ของอะตอมไนโตรเจนในตำแหน่งของคาร์บอน ดังรายงานของ Ralf Riedel [33] ที่ว่า เนื่องด้วยการเปลี่ยนแปลง (transition) ของโลหะคาร์ไบด์มีความคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงของโลหะไนไตรด์มาก ดังนั้นคาร์บอนจึงสามารถถูกแทนที่ด้วยอะตอมไนโตรเจนได้อย่างสมบูรณ์โดยไม่มีการเปลี่ยนโครงสร้าง (structure) ในคาร์ไบด์กลุ่ม IVB และ VB แต่ความสามารถในการละลายของแข็ง (solid solubility) ในคาร์โบ-ไนไตรด์กลุ่ม VIB ระบบ Cr-C-N และ Mo-C-N ไม่สมบูรณ์ เพราะที่ระบบขอบ (boundary system) ในโครงสร้างของเฟสคาร์ไบด์และไนไตรด์มีความแตกต่างกัน

นอกจากนี้คงเป็นที่น่าสังเกตว่า ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของคาร์บอนด้วย EPMA ในชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน ตรงบริเวณใกล้กับรอยต่อของชั้นไนไตรด์กับภายในชิ้นงานเป็นบริเวณที่มีคาร์บอนสูงกว่าบริเวณอื่นเล็กน้อย แต่ไม่พบปรากฏการณ์เช่นนี้ในชิ้นงาน

ปกติ ทั้งนี้ น่าจะเกิดจากอะตอมคาร์บอนที่ถูกแทนที่ด้วยไนโตรเจนแล้วถูกผลักให้แพร่เข้าสู่ด้านใจกลางชิ้นงาน ซึ่งตรงกับที่มีรายงานในงานของ Mehmet และคณะ [3]



รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบแบบจำลองกลไกระหว่างการทำให้เป็นอสเทนไนท์ที่อุณหภูมิ 1224K เป็นเวลา 40 นาที ของชิ้นงานปกติกับชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน

4.3 ผลการตรวจสอบความแข็งผิวชิ้นงาน

เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิ เวลา และปริมาณคาร์บอนที่ผิว ที่มีต่อความแข็งของชิ้นผิวแข็งที่ได้จากกระบวนการไนตรายดิงแบบพลาสมา จึงทำการทดสอบความแข็งผิวด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ ใช้น้ำหนักกด 50 กรัม ได้ผลการทดสอบความแข็งที่ผิว และบริเวณกลางชิ้นงานของแต่ละชิ้นงานดังตารางที่ 4.36 นั่นคือ ชิ้นงานปกติที่ทำไนตรายดิงแบบพลาสมาที่ 773K เป็นเวลา 36ks มีความแข็งผิวเป็น $1289.60HV_{0.05}$ ความแข็งบริเวณใจกลางชิ้นงานเป็น $591.16HV_{0.05}$ ชิ้นงานปกติที่ทำไนตรายดิงแบบพลาสมาที่ 773K เป็นเวลา 72ks มีความแข็งผิวเป็น $1160.60HV_{0.05}$ ความแข็งบริเวณใจกลางชิ้นงานเป็น $520.56HV_{0.05}$ ชิ้นงานปกติที่ทำไนตรายดิงแบบ

พลาสติกที่ 823K เป็นเวลา 36ks มีความแข็งผิวเป็น $1026.30HV_{0.05}$ ความแข็งบริเวณใจกลางชิ้นงาน เป็น $520.56HV_{0.05}$ ชิ้นงานปกติที่ทำในทรายดิงแบบพลาสติกที่ 823K เป็นเวลา 72ks มีความแข็งผิว เป็น $980.58HV_{0.05}$ ความแข็งบริเวณใจกลางชิ้นงานเป็น $503.06HV_{0.05}$

และสำหรับชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนก่อนทำในทรายดิงแบบพลาสติก ชิ้นงานที่ทำในทรายดิงแบบพลาสติกที่ 773K เป็นเวลา 36ks มีความแข็งผิวเป็น $1094.40HV_{0.05}$ ความแข็งบริเวณใจกลางชิ้นงานเป็น $520.80HV_{0.05}$ ชิ้นงานที่ทำในทรายดิงแบบพลาสติกที่ 773K เป็นเวลา 72ks มีความแข็งผิวเป็น $1058.44HV_{0.05}$ ความแข็งบริเวณใจกลางชิ้นงานเป็น $601.50HV_{0.05}$ ชิ้นงานที่ทำในทรายดิงแบบพลาสติกที่ 823K เป็นเวลา 36ks มีความแข็งผิวเป็น $1129.60HV_{0.05}$ ความแข็งบริเวณใจกลางชิ้นงานเป็น $515.34HV_{0.05}$ ชิ้นงานที่ทำในทรายดิงแบบพลาสติกที่ 823K เป็นเวลา 72ks มีความแข็งผิวเป็น $1066.60HV_{0.05}$ ความแข็งบริเวณใจกลางชิ้นงานเป็น $454.48HV_{0.05}$ จะเห็นว่าทั้งในชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ปกติและชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน กระบวนการในทรายดิงแบบพลาสติกสามารถเพิ่มความแข็งผิวให้แก่ชิ้นงานได้อย่างมาก

ตารางที่ 4.38 ค่าความแข็งที่ผิวและบริเวณใจกลางชิ้นงานของชิ้นงานทั้งหมด

สถานะในการทำในทรายดิงแบบพลาสติก		ความแข็งผิว	ความแข็งบริเวณกลางชิ้นงาน	
ชิ้นงาน	อุณหภูมิ(K)	เวลา (ks)	($HV_{0.05}$)	($HV_{0.05}$)
ปกติ	773	36	1289.60	591.16
		72	1160.60	520.56
	823	36	1026.30	520.56
		72	980.58	503.06
มีการสูญเสียคาร์บอน	773	36	1094.40	520.8
		72	1058.44	601.50
	823	36	1129.60	515.34
		72	1066.60	454.48

4.3.1 ผลของเวลาในการทำในทรายดิงที่มีต่อความแข็งของชิ้นในทรายด์

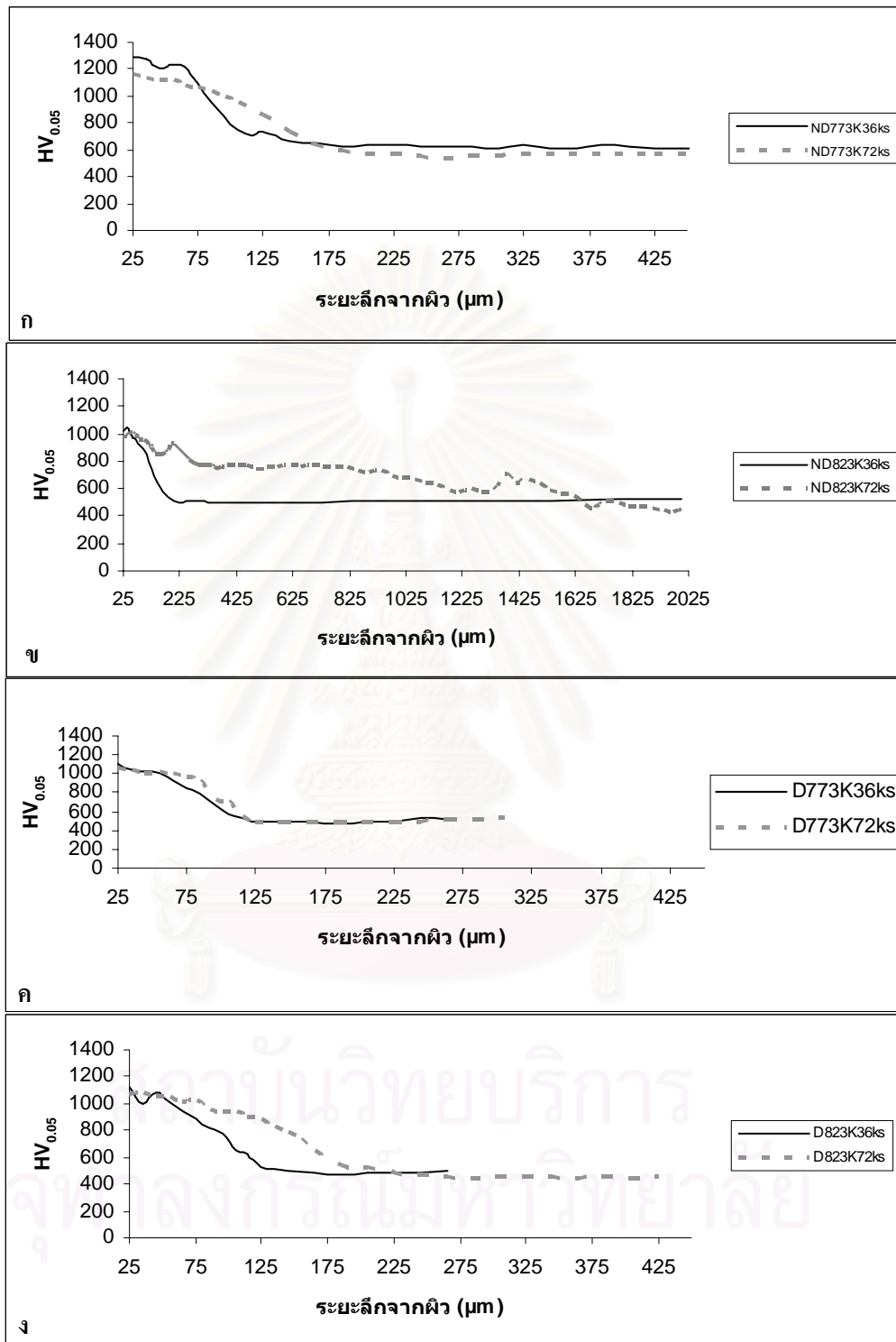
รูปที่ 4.29 เป็นการเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานที่ทำในทรายดิงแบบพลาสติกที่อุณหภูมิเดียวกัน แต่ใช้ระยะเวลาต่างกันคือ 36 กับ 72ks จะเห็นว่าชิ้นงานที่ใช้ระยะเวลา

ในการทำในตรายคิงแบบพลาสมานานกว่าจะได้ความแข็งของชั้นในตรายคิง และภายในชิ้นงานมีค่าน้อยกว่า เนื่องจากชิ้นงานที่ใช้เวลาในการทำในตรายคิงนานกว่าจะเกิดเฟสสารประกอบที่มีความแข็งน้อยกว่าที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ใช้ระยะเวลาสั้นกว่า [4] สำหรับงานวิจัยนี้คือเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น สำหรับชิ้นงานปกติที่ทำในตรายคิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773K (รูปที่ 4.29 ก) ทำให้ปริมาณเฟส CrN ลดลง ในขณะที่ปริมาณเฟสอื่น ๆ ใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 4.4 และ 4.8) และสำหรับชิ้นงานปกติที่ทำในตรายคิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K (รูปที่ 4.29 ข) เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณเฟส CrN ลดลง (ตารางที่ 4.12 และ 4.16) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ N. Granito, H. Kuwahara, และ T. Aizawa [19] ที่กล่าวไว้ว่าความแข็งของเหล็กกล้าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนตามปริมาตรของ CrN และจากงานของ O. Salas และคณะ [34] ยังรายงานว่า ความแข็งที่เปลี่ยนแปลงมีความสัมพันธ์การเปลี่ยนจากโครเมียมคาร์ไบด์เป็นโครเมียมไนตรายคิง และผลของความเครียดแบบอาพันธ์ (coherent strain) ของ CrN กับเนื้อพื้น

ส่วนชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนและทำในตรายคิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773K (รูปที่ 4.29 ค) เมื่อระยะเวลาในการทำในตรายคิงแบบพลาสมามากขึ้น ความแข็งผิวมีค่าต่างกันไม่มากนัก โดยชิ้นงานที่ใช้ระยะเวลา 72ks มีค่าความแข็งต่ำกว่าเพียงเล็กน้อย ดูจากปริมาณเฟสที่พบบริเวณผิว (ตารางที่ 4.21 และ 4.25) อาจเกิดจากชนิดของเฟสที่มีปริมาณมากที่สุดในสองชิ้นงานนี้มีความแตกต่างกัน ชิ้นงานที่ใช้ระยะเวลาน้อยกว่ามีเฟส Fe-Cr เป็นเฟสที่มีปริมาณมากที่สุด ส่วนชิ้นงานที่ใช้ระยะเวลาเพิ่มขึ้นจะเป็นเฟส Fe เฟส Fe-Cr มีความแข็งมากกว่า Fe เนื่องจาก Cr ที่ละลายอยู่ในเหล็ก สำหรับชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนและทำในตรายคิงที่อุณหภูมิ 823K (รูปที่ 4.29 ง) เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นค่าความแข็งของชิ้นงานที่ใช้เวลานานกว่ามีค่าต่ำกว่าอีกชิ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อพิจารณาปริมาณเฟสที่ผิวจากตารางที่ 4.29 เปรียบเทียบกับตารางที่ 4.33 จะเห็นว่าปริมาณของเฟสต่าง ๆ ที่พบมีความใกล้เคียงกันมาก

4.3.2 ผลของอุณหภูมิในการทำในตรายคิงที่มีต่อความแข็งของชั้นในตรายคิง

รูปที่ 4.30 เป็นการเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานที่ใช้ระยะเวลาในการทำในตรายคิงแบบพลาสมาเท่ากัน แต่ใช้อุณหภูมิต่างกันคือ 773 กับ 823 K จะเห็นว่าชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิต่ำกว่าในการทำในตรายคิงแบบพลาสมาสูงกว่าจะได้ชั้นในตรายคิง และเนื้อพื้นที่มีค่าความแข็งน้อยกว่า ชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิต่ำกว่า



รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบผลระหว่างชิ้นงานที่ทำในตรายคิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิต่างกัน แต่ใช้ระยะเวลาในกระบวนการเท่ากัน

รูปที่ 4.30 ก) แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับระยะลึกจากผิวของชิ้นงานปกติที่ทำในทรายคิงเป็นเวลา 36ks ที่อุณหภูมิ 773K กับ 823K ชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิสูงกว่ามีความแข็งผิวต่ำกว่าอย่างชัดเจน และเมื่อพิจารณาปริมาณเฟสที่ผิวของชิ้นงานทั้งสองจากตารางที่ 4.4 กับ 4.12 พบว่าในชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิ 823K มีปริมาณของเฟส CrN ลดลงอย่างชัดเจน จาก 91.64% เป็น 34.29% เป็นการยืนยันว่าเฟส CrN เป็นเฟสที่มีผลต่อความแข็งของชิ้นในทรายคิงในชิ้นงานปกติอย่างมาก

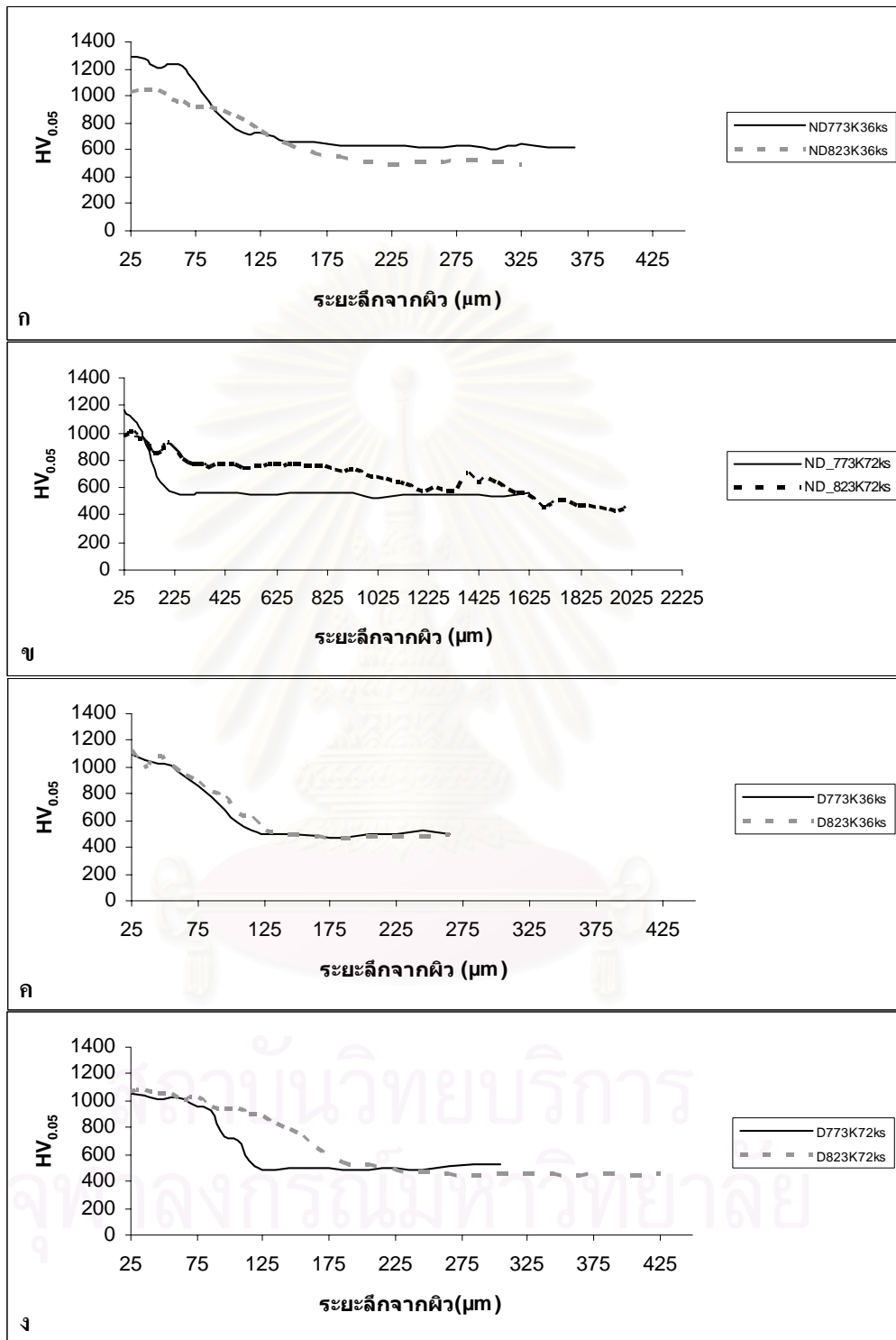
รูปที่ 4.30 ข) แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับระยะลึกจากผิวของชิ้นงานปกติที่ทำในทรายคิงเป็นเวลา 72ks ที่อุณหภูมิ 773K กับ 823K ชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิสูงกว่ามีความแข็งผิวต่ำกว่าอย่างชัดเจน และเมื่อพิจารณาปริมาณเฟสที่ผิวของชิ้นงานทั้งสองจากตารางที่ 4.8 กับ 4.16 พบว่าในชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิ 823K มีปริมาณของเฟส CrN ลดลง

รูปที่ 4.30 ค) แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับระยะลึกจากผิวของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำในทรายคิงเป็นเวลา 36ks ที่อุณหภูมิ 773K กับ 823K ค่าความแข็งผิวของชิ้นงานทั้งสองไม่แตกต่างกันมาก และเมื่อพิจารณาปริมาณเฟสที่ผิวของชิ้นงานทั้งสองจากตารางที่ 4.21 กับ 4.29 พบว่าในชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิ 823K ทั้งเฟส Fe_3N , Fe_4N และ Fe-Cr มีปริมาณลดลง

รูปที่ 4.30 ง) แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับระยะลึกจากผิวของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน และทำในทรายคิงเป็นเวลา 72ks ที่อุณหภูมิ 773K กับ 823K ค่าความแข็งผิวของชิ้นงานทั้งสองไม่แตกต่างกันมาก และเมื่อพิจารณาปริมาณเฟสที่ผิวของชิ้นงานทั้งสองจากตารางที่ 4.25 กับ 4.33 พบว่าในชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิ 823K ทั้งเฟส Fe_3N , Fe_4N และ Fe-Cr มีปริมาณลดลงเช่นเดียวกับชิ้นงานที่ใช้เวลา 36ks

4.3.3 ผลของปริมาณคาร์บอนที่ผิวที่มีต่อความแข็งของชิ้นในทรายคิง

รูปที่ 4.31 เป็นการเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานที่ใช้ระยะเวลา และอุณหภูมิในการทำในทรายคิงแบบพลาสมาเท่ากัน แต่มีปริมาณคาร์บอนบริเวณผิวแตกต่างกัน จะเห็นว่าผลที่ได้สามารถแบ่งได้ 2 กลุ่ม คือชิ้นงานที่ทำในทรายคิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773K ชิ้นงานที่มีปริมาณคาร์บอนสูงกว่า (ชิ้นงานปกติ) จะได้ชิ้นในทรายคิง และเนื้อพื้นที่มีค่าความแข็ง

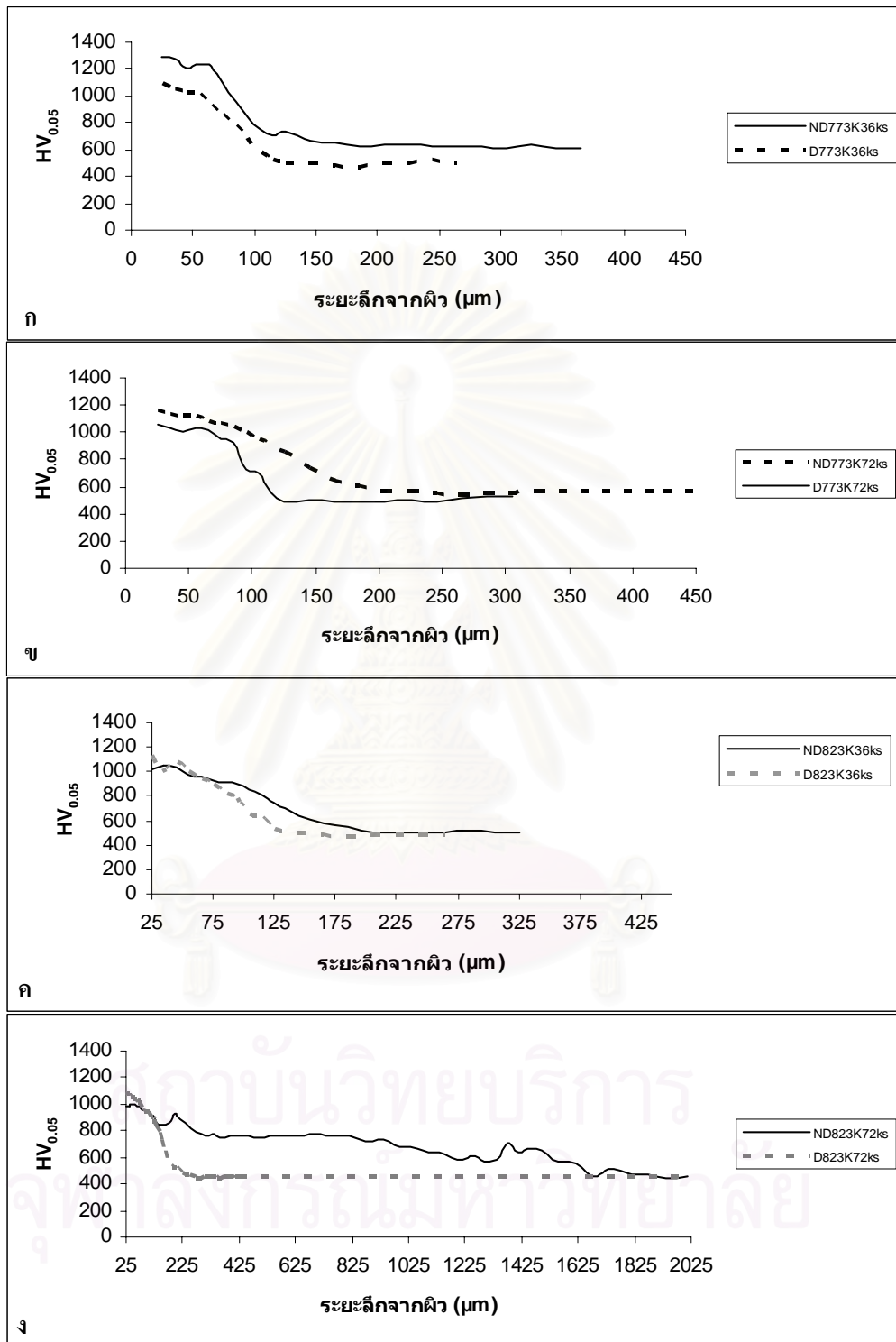


รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบผลระหว่างชิ้นงานที่ใช้ระยะเวลาในกระบวนการในทรายดิ่งแบบพลาสมาต่างกัน แต่ใช้อุณหภูมิในกระบวนการเท่ากัน

มากกว่า สองคือกลุ่มชิ้นงานที่ทำในทรายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K ชิ้นงานที่มีปริมาณคาร์บอนสูงกว่า (ชิ้นงานปกติ) จะได้ค่าความแข็งที่ผิวต่ำกว่าในชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน

รูปที่ 4.31 ก) เป็นการเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานปกติกับชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน ที่ทำในทรายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 36ks ค่าความแข็งของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนมีค่าต่ำกว่าในชิ้นงานปกติอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาปริมาณเฟสในชิ้นงานทั้งสองจากตารางที่ 4.4 และ 4.21 จะเห็นว่าทั้งสองชิ้นงานมีเฟสต่างชนิดกันอยู่หนึ่งเฟส คือ เฟส CrN ซึ่งไม่มีในชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน ซึ่งเป็นผลที่มีลักษณะเดียวกับในรูปที่ 4.31 ข) เป็นการเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานปกติกับชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน ที่ทำในทรายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 72ks (เปรียบเทียบปริมาณเฟสได้จากตารางที่ 4.8 และ 4.25) เป็นผลที่ยืนยันอีกครั้งว่าเฟส CrN เป็นเฟสที่มีผลต่อความแข็งของชิ้นในทรายดิงในชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 อย่างมาก

รูปที่ 4.31 ค) เป็นการเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานปกติกับชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน ที่ทำในทรายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 823K เป็นเวลา 36ks ค่าความแข็งของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนมีค่าสูงกว่าชิ้นงานปกติเล็กน้อย และเช่นเดียวกันในรูปที่ 4.31 ง) เป็นการเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานปกติกับชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอน ที่ทำในทรายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิเดียวกันเป็นเวลา 72ks พบว่าค่าความแข็งของชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนมีค่าสูงกว่าชิ้นงานปกติเล็กน้อยเช่นกัน แต่ต่างผลที่ได้ในชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิ 773K เมื่อพิจารณาปริมาณเฟสในชิ้นงานทั้งสองจากตารางที่ 4.12 กับ 4.29 และตารางที่ 4.16 กับ 4.33 ตามลำดับ แม้ปริมาณเฟสจะเป็นไปในแนวทางเดียวกับที่พบในอุณหภูมิ 773K แต่ผลการเปรียบเทียบความแข็งกลับต่างกัน ทั้งนี้จากรายงานของ O. Salas และคณะ [34] ที่กล่าวไว้ว่ากระบวนการเพิ่มความแข็งระหว่างการทำในทรายดิงในเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 เป็นไปตามลักษณะของการบ่มแข็ง (aging) ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าการที่ค่าความแข็งผิวของชิ้นงานปกติที่ทำในทรายดิงที่อุณหภูมิ 823K มีค่าต่ำกว่าค่าความแข็งผิวในชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ใช้อุณหภูมิในทรายดิงและระยะเวลาเท่ากัน เกิดจากผลึก CrN ซึ่งเป็นเฟสที่ช่วยเพิ่มความแข็งผิวให้กับชิ้นงานปกติที่ทำพลาสมาในทรายดิงที่อุณหภูมิ 773K นั้นเมื่อใช้อุณหภูมิในทรายดิงสูงขึ้นเป็น 823K ผลึกดังกล่าวได้เกิดสภาพเกินบ่ม (over aging) นั่นคือผลึก CrN กลายสภาพเป็นผลึกสมบูรณ์ แรงเชื่อมประสานระหว่างผลึกกับเนื้อพื้นลดลงหรือหมดไป [2]



ภาพที่ 4.31 เปรียบเทียบผลระหว่างชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวกับชิ้นงานปกติ ทำใน
 ทรายคิงแบบพลาสติกที่สภาวะเดียวกัน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการตรวจสอบเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่ทำในทรายดิงแบบพลาสติกด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง เครื่อง X-ray Diffractometer แบบ Glancing Angle X-ray Diffraction (GAXD) เครื่อง Electron Probe Microanalysis (EPMA) และทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ สามารถสรุปคุณลักษณะของชิ้นงานได้ดังนี้

- 5.1.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นผิวแข็งในเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ปกติที่ทำในทรายดิงแบบพลาสติกประกอบด้วยเฟสเหล็กไนไตรด์ (Fe_3N และ Fe_4N) และโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ทั่วทั้งชิ้นผิวแข็ง ส่วนเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนการทำในทรายดิงแบบพลาสติก โครงสร้างจุลภาคของชิ้นผิวแข็งจะแบ่งเป็น 2 บริเวณ คือ บริเวณใกล้ผิวประกอบด้วยเฟสเหล็กไนไตรด์ (Fe_3N และ Fe_4N) และบริเวณที่ใกล้กับรอยต่อระหว่างชิ้นไนไตรด์กับภายในชิ้นงาน ประกอบด้วยเฟสเหล็กไนไตรด์ (Fe_3N และ Fe_4N) และโครเมียมไนไตรด์ (CrN)
- 5.1.2 อุณหภูมิในการทำในทรายดิงแบบพลาสติก มีผลต่อความหนาของชั้นไนไตรด์ในเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 คือเมื่ออุณหภูมิที่ใช้เพิ่มขึ้นชั้นไนไตรด์ที่ได้จะมีความหนาเพิ่มขึ้น
- 5.1.3 ระยะเวลาในการทำในทรายดิงแบบพลาสติก มีผลต่อความหนาของชั้นไนไตรด์ในเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 คือเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นชั้นไนไตรด์ที่ได้จะมีความหนาเพิ่มขึ้น
- 5.1.4 การสูญเสียคาร์บอนที่ผิวมีผลต่อความหนาของชั้นไนไตรด์ คือชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ปกติจะมีชั้นไนไตรด์หนากว่า ชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำในทรายดิงแบบพลาสติก

- 5.1.5 อุณหภูมิในการทำในตรายดิงแบบพลาสมา มีผลต่อความแข็งของชั้นไนตรายด์ในเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 คือชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิสูงกว่า ชั้นไนตรายด์ที่ได้จะมีความแข็งน้อยกว่า
- 5.1.6 ระยะเวลาในการทำในตรายดิงแบบพลาสมา มีผลต่อความแข็งของชั้นไนตรายด์ในเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 คือชิ้นงานที่ใช้ระยะเวลาทำในตรายดิงแบบพลาสมานานกว่า จะให้ชั้นไนตรายด์ที่มีความแข็งน้อยกว่า
- 5.1.7 ผลของการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวที่มีต่อความแข็งของชั้นไนตรายด์ของเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่ทำในตรายดิงแบบพลาสมาแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มตามอุณหภูมิในการทำในตรายดิงแบบพลาสมาคือ

กลุ่มที่อุณหภูมิการทำในตรายดิงเป็น 773K ชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวจะมีความแข็งที่ผิวน้อยกว่าในชิ้นงานปกติ

กลุ่มที่อุณหภูมิการทำในตรายดิงเป็น 823K ชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวจะมีความแข็งที่ผิวมากกว่าในชิ้นงานปกติ

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 อุณหภูมิในการทำในตรายดิงแบบพลาสมา ควรเลือกใช้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเทมเปอร์ เพื่อให้ความแข็งภายในชิ้นงานไม่ลดลง
- 5.2.2 งานวิจัยต่อไป ควรศึกษาผลของโครงสร้างที่แตกต่างกันของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ปกติ และชิ้นงานที่มีการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว ต่อความสามารถต้านทานการสึกหรอของชิ้นงาน เพื่อประโยชน์ในการนำชิ้นงานไปใช้งานจริง

รายการอ้างอิง

1. ASM International . ASM Metal Handbook Vol.1. Ohio USA: ASM International, 1990: 439-445.
2. มนัส สติรจินดา. วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก. พิมพ์ครั้งที่ 7, กรุงเทพฯ:สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, เมษายน 2543.
3. M. Çapa, M. Tamer, T. Gülmez, and C. T. Bodur. Life Enhancement of Hot-Forging Dies by Plasma-Nitriding. Turkey Journal Engineering Environment Science, 24(2000), 111-117.
4. C.R. Brooks. Principles of the Surface treatment of Steels. Pennsylvania, USA: Technomic Publishing Co.,Inc.,1992.
5. H. Kuwahara, H. Matsuoka, J. Takada, S. Kikuchi, Y. Tomii, T. Takayama. Ammonia gas nitriding of Fe-18Cr-9Ni alloy at lower than 823K. Journal of material science, 25(1990).
6. ประสงค์ ศรีเจริญชัย . เอกสารคำสอน วิชา วิศวกรรมพื้นผิว (Surface Engineering). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
7. B. Edenhofer. Physical and Metallurgical Aspects of Ionitriding. Heat Treatment Of Metals, 1(1974): 23-28.
8. W. Kovacs, and W. Russell. An Introduction to ion nitriding What is it? Why is it used? Where is it used?. Massachusetts. USA.
9. ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล. การกำหนดคุณลักษณะของผงอะลูมิเนียมอัดที่ผ่านกระบวนการไนไตรดิงแบบพลาสมา. วิทยานิพนธ์ระดับมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

10. K. H. Prabhudev. Handbook of heat treatment of steels. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 1988:182-246, 263-282.
11. K. Genel, M. Demirkol. A method to predict effective case depth in ion nitrided steels. Surface and Coatings Technology, 195 (2005): 116-120.
12. M. Uma Devi, and O.N. Mohanty. Plasma-nitriding of Tool steel for combined percussive impact and rolling fatigue wear applications. Surface and Coatings Technology, 107(1998): 55-64.
13. ASM International. ASM Vol.4 Heat treatment. Ohio, USA: ASM International, 1995: 387-436.
14. W.F. Smith. Structure and Properties of Engineering Alloys. 2nd edition, McGraw-Hill, Inc., 1993, 404-409.
15. R. George, K. George, and K. Richard. Tool Steels. 5th edition, ASM international, 1998: 219-224, 306-309.
16. M. Edamura, Ph.D. Thesis, Kyoto University ,1981: 116.
17. H. A. Wreidt, N.A. Gokcen, and R. H. Nafziger. Bulletin of Alloy Phase Diagrams. 8(1987): 355.
18. D.R. Poirier, and G.H. Geiger. Transport Phenomena in Materials Processing. Pennsylvania, USA: A publication of The Minerals, Metals and Materials Society, 1994: 491-493.
19. N. Granito, H. Kuwahara, T. Aizawa. Normal and abnormal microstructure of plasma nitrided Fe-Cr alloys. Journal of Materials Science, 37 (2002): 835-844.
20. T. Björk, R. Westergård, and S. Hogmark. Wear of surface treated dies for Aluminium extrusion-a case study. Wear, 249(2001) 316-323.

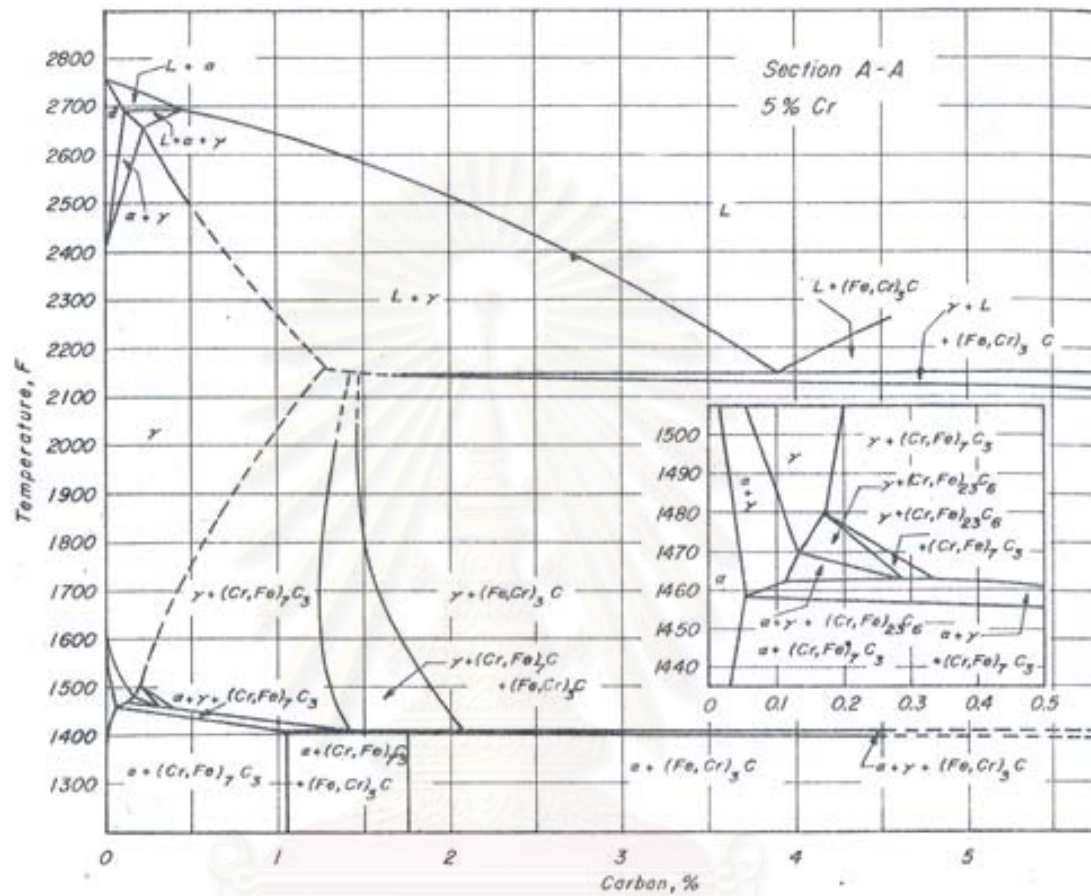
21. M.B. Karamiş, and H. Sert. The role of PVD TiN coating in wear behaviour of Aluminium extrusion die. Wear, 217(1998): 46-55.
22. P. C. King, Ray W. Reynoldson, A. Brownring, and John M. Long. Cr(N,C) diffusion coating formation on pre-nitrocarburised H13 tool steel. Surface and Coatings Technology, 179(2004): 18-26.
23. E.J. Miola, S.D. de Souza, M. Olzon-Dionysio, D. Spinelli, C.A. dos Santos. Nitriding of H-12 tool steel by direct-current and pulsed plasmas. Surface and Coatings Technology, 116-119(1999): 347-351.
24. E.J. Miola, S.D. de Souza, M. Olzon-Dionysio, D. Spinelli, M.R.F. Soares, M.A.Z. Vasconcellos, and C.A. dos Santos. Near-surface composition and microhardness profile of plasma nitrided H-12 tool steel. Materials Science and Engineering, A256(1998): 60-68.
25. M. Uma Devi, T.K. Chakraborty, and O.N. Mohanty. Wear behaviour of plasma nitrided tool steels. Surface and Coatings Technology, 116-119(1999): 212-221.
26. S.W. Huang, M. Samandi, and M. Brandt. Abrasive wear performance and microstructure of laser clad WC/Ni layers. Wear, 256(1999): 1095-1105.
27. S.V. Shah and N.B. Dahotre. Laser surface – engineered vanadium carbide coating for extended die life. Journal of Materials Processing Technology, 124(2002): 105 – 112.
28. J. Yang and T. Zhang. Characterization of surface mechanical properties and microstructure of H13 steel implanted by pulsed tungsten. Materials Science and Engineering, A362(2003): 200 – 203.
29. K.G. Kostov, M. Ueda, M. Lepiensky, P.C. Soares Jr., G.F. Gomes, M.M. Silva, and H. Reuther. Surface modification of metal alloys by plasma immersion ion

- implantation and subsequent plasma nitriding. Surface and Coatings Technology, 186(2004): 204 – 208.
30. O.H. Kessler, F.T. Hoffman, and P. Mayr. Microstructure and property changes caused by diffusion during CVD coating of steels. Surface and Coatings Technology, 120 - 121(1999): 366 – 372.
31. C.K.N. Oliverira, R.M. Muñoz Riofano, and L.C. Casteletti. Formation of carbide layers on AISI H13 and D2 steels by treatment in molten borax containing dissolved both Fe-Nb and Fe-Ti powders. Materials letters, (2005) in printed.
32. C. Wei, and F. Chen. Characterization on multi-layer fabricated by TRD and plasma nitriding. Materials Chemistry and Physics, 90(2005): 178-184.
33. R. Riedel. Handbook of Ceramic Hard Materials Vol.1. Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2000: 221-222.
34. O. Salas, J. Oseguera, N. Garci, and U. Figueroa. Nitriding of an H13 Die Steel in Dual Plasma Reactor. Journal of Materials Engineering and Performance, 10(6)(2001): 649-655.
35. B.D. Cullity, and S.R. Stock. Elements of X-Ray Diffraction. 3rd edition, New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 2001.
36. G.A. Roberts, J.C. Hamaker, A.R. Johnson. Tool Steels. 3rd edition, Ohio USA: American society for metals, 1961.
37. J.D'Haen, C. Queyhaegens, G. Knuyt, M. D'Olieslaeger, and L.M. Stals. Structure analysis of Plasma-nitrided pure iron. Surface and Coatings Technology, 74-75 (1995): 405 – 411.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



แผนภูมิสมดุลระหว่างเหล็ก-โครเมียม-คาร์บอน ที่ปริมาณ โครเมียม 5% โดยน้ำหนัก [36]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวชุลีพรย์ ป่าไร่ เกิดเมื่อวันที่ 17 มีนาคม พ.ศ. 2524 ที่จังหวัดเชียงใหม่ เริ่มเข้าศึกษาระดับอุดมศึกษาที่ สาขาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีการศึกษา 2542 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ปีการศึกษา 2546 จากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโลหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2546



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย