

การเพิ่มอายุการใช้งานของดวงตราเหรียญกษาปณ์หมุนเวียน
ชนิดราคา 1 บาท ใหม่

IMPROVEMENT OF ONE-BATH CIRCULATION
COINING TOOL LIFE

วรวิทย์ สงวนพันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การเพิ่มอายุการใช้งานของดวงตราเหรียญกษาปณ์หมุนเวียน
ชนิดราคา 1 บาท ใหม่

วรวิทย์ สงวนพันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มอายุการใช้งานของดวงตราเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนชนิดตราคา 1 บาท
ชื่อ - นามสกุล	นายวรวิทย์ สงวนพันธ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์สมศักดิ์ อิทธิโสภณกุล, Ph.D.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์วารุณี เปรมานนท์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของดวงตรา (Die ด้านหัวและก้อย) เหรียญ 1 บาท สำเร็จรูปรุ่นใหม่ โดยวิธีการเคลือบผิวแบบ PVD ชนิดสารเคลือบโครเมียมไนไตรด์ เนื่องจากได้มีการเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ในการผลิตเหรียญ 1 บาท จากวัสดุคิวโปรนิคเกิล (ทองแดงร้อยละ 75 และนิกเกิลร้อยละ 25) โดยเปลี่ยนมาใช้วัสดุชนิด ไล่เหล็กเคลือบนิกเกิล ทำให้อายุการใช้งานของดวงตราสั้นลง จำนวน เหรียญ 1 บาทต่อดวงตรา 1 คู่ ลดลงจากประมาณ 400,000 เหรียญ เหลือเพียงประมาณ 40,000 - 50,000 เหรียญต่อดวงตรา 1 คู่ โดยวัสดุที่ใช้ในการผลิตดวงตราเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน คือ เหล็กกล้าผสมชนิด 0.97%C

ในการดำเนินงานวิจัยได้ใช้วัสดุในการทดลองผลิตดวงตรา จำนวน 2 ชนิด คือ เหล็กกล้าผสมชนิด 0.97%C และ เหล็กกล้าผสมชนิด 0.5%C โดยใช้วิธีการเคลือบผิวแบบ PVD ชนิดสารเคลือบโครเมียมไนไตรด์ ที่ความหนา 3 ระดับ คือประมาณ 1, 2 และ 3 ไมครอน ในการทดสอบวัดความหนาของผิวเคลือบ ใช้วิธีการทดสอบด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence และได้ทำการผ่าวิเคราะห์ชิ้นงานก่อนการใช้งานด้วยเครื่องตัดผิวแบบ wire cut (EDM) เพื่อศึกษาการเกาะยึดของผิวเคลือบโครเมียมไนไตรด์ โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

ผลการทดสอบนำดวงตราไปใช้ในการผลิตเหรียญ 1 บาท รุ่นใหม่ ด้วยเครื่องตีตราแรงกด 40 ตัน ความเร็ว 800 – 850 เหรียญต่อนาที ปรากฏว่า เหล็กกล้าผสมชนิด 0.5%C ที่ความหนาผิวเคลือบประมาณ 2-2.7 ไมครอน ได้จำนวนเหรียญต่อดวงตรา 1 คู่ 300,000 – 400,000 ต่อดวงตรา 1 คู่ ซึ่งมากที่สุดจากชิ้นงานทดสอบทั้งหมด ในส่วนของเหล็กกล้าผสมชนิด 0.97%C พบการแตกร้าวบริเวณผิวหน้าของดวงตราหลังจากตีตราเหรียญได้ประมาณ 50,000 – 60,000 เหรียญ ในทุกๆ ความหนาของผิวเคลือบ หลังจากการทดสอบได้ทำการผลิตดวงตราด้วย เหล็กกล้าผสมชนิด 0.5%C ที่ความหนาผิวเคลือบประมาณ 2-2.7 ไมครอน เพื่อใช้ในการผลิตจริงปรากฏว่าจำนวนเหรียญที่ได้ประมาณ 300,000 – 400,000 เหรียญต่อดวงตรา 1 คู่ เพิ่มอายุการใช้งานได้ประมาณ 10 เท่า

คำสำคัญ: โครเมียมไนไตรด์ ไล่เหล็กเคลือบนิกเกิล ไมครอน wire cut (EDM)

Thesis Title	Improvement of One-Bath Circulation Coining Tool Life
Name - Surname	Mr.Waravit Saganphan
Program	Industrial Engineering
Thesis Advisor	Mr.Somsak Ithisoponakul, Ph.D.
Thesis co Advisor	Associate Professor Varunee Premanond, Ph.D.
Academic Year	2012

ABSTRACT

The purposes of this research work is to extend the coining die life to produce 1 Baht coin for both obverse and reverse side by using PVD (Physical Vapor Deposition) Chromium Nitride (CrN) coating. According to the material to produce of 1 baht coin has changed from Cupronickel (75% copper and 25% nickel) to nickel plated steel core, the coining die life became short. The life of coining tool was reduced from 400,000 to 40,000 – 50,000 coins of new die by using the same alloy steel 0.97% C die material.

In this work two types of alloy steels 0.97% C and 0.5% C alloy steel have been used as tool materials. Hard thin film CrN coating using PVD technique of 1, 2 and 3 Micron (μm) thickness have been observed. The thickness of coating was measured by X-Ray Fluorescence. Testing specimen was cut by wire EDM to explore the CrN coating layer by using scanning electron microscope (SEM).

The coining experiments were carried out in the production line of new 1 baht coin using 40 tons mechanical press having the speed of 800 to 850 stroke per minute the results showed that the coining tool made from alloy steel 0.5% C with 2 to 2.7 Microns thickness of coating can produce the maximum amount of 300,000 - 400,000 coins. For the case of coining tool made from alloy steel 0.97% C, it was found that fracture occurred on the tool surface after 50,000 - 60,000 strokes for all coating thickness. It has been concluded that using alloy steel 0.5% C as tool material with approximately 2 to 2.7 Microns CrN-PVD coating thickness showed the best results of 300,000 to 400,000 produced.

Keywords: chromium nitride, nickel plated steel core, micron, wire (EDM)

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ โดยได้รับความอนุเคราะห์อย่างยิ่งจาก ดร.สมศักดิ์ อธิธิโสภณกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวกร อ่างทอง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล รองศาสตราจารย์ ดร.วารุณี เปรมานนท์ ที่คอยให้คำปรึกษาชี้แนะ แนวทางการจัดทำวิทยานิพนธ์ ให้คำปรึกษาแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกต้อง มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ที่ได้รับ จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้เชี่ยวชาญทุกท่านที่ได้กรุณาให้คำแนะนำในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสามารถดำเนินการให้แล้วเสร็จเรียบร้อย และมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณอดีตผู้อำนวยการสำนักศึกษาปณ นายสันติ จันทรแสงศรี ที่กรุณาอำนวยความสะดวกในการเก็บรวบรวมข้อมูล รวมถึงให้การสนับสนุนวัสดุที่ใช้ในการวิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณรักษาการผู้อำนวยการสำนักศึกษาปณ นางสาวดาวรรณ แสงเมฆ

ขอขอบคุณผู้อำนวยการส่วนดวงตรา นายทวีเลิศ กลสิไพศาล และเจ้าหน้าที่ส่วนดวงตราที่ช่วยเก็บข้อมูลรวมทั้งจัดทำขึ้นงานเพื่อการทดสอบ

ขอขอบคุณหัวหน้ากลุ่มงานผลิต นายบรรเจิด กิจพัฒน์ ช่วยอนุเคราะห์และให้การสนับสนุนให้ได้รับทุนการศึกษาจากกระทรวงการคลัง

ขอขอบคุณผู้อำนวยการส่วนผลิตเหรียญตัวเปล่า นายพิทักษ์ เหลื่อมพล และหัวหน้าฝ่ายหล่อ หลอม นายเอกสุวัชร พรหมจรรย์ ที่ช่วยให้การสนับสนุนเรื่องเวลาในการทำวิจัย

คุณค่าและประโยชน์จากการค้นคว้าอันพึงมีของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอขอบทแทน บุญคุณค่าต่อบิดา มารดา และครูอาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนศิษย์มาตลอด ด้วยวิญญานของความเป็นครู ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

รววิทย์ สงวนพันธ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	3
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานงานวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	4
1.7 ข้อจำกัดในการทำวิจัย.....	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 เหรียญ 1 บาท.....	5
2.2 โลหะนิกเกิล (Nickel).....	6
2.3 โลหะวิทยาของนิกเกิลและโลหะนิกเกิลผสม.....	7
2.4 โลหะโครเมียม (Chromium).....	8
2.5 โลหะวิทยาของโครเมียมและโครเมียมผสม.....	9
2.6 การเคลือบผิว นิกเกิลเหรียญ 1 บาท.....	10
2.7 วัสดุที่ใช้ผลิตแม่พิมพ์เหรียญ 1 บาท (รุ่นเก่า).....	11
2.8 สมบัติของธาตุเมื่อผสมในเหล็กกล้า.....	12
2.9 วัตถุประสงค์ในการนำธาตุต่างๆ มาผสมในเหล็ก.....	12
2.10 การชุบแข็ง (Hardening).....	12
2.11 การอบอ่อน (Annealing).....	13

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.12 การอบคืนไฟ (Tempering)	16
2.13 การชุบเคลือบผิวแบบไอกายภาพ Physical Vapour Deposition (PVD).....	18
2.14 การเคลือบผิวด้วยไอเคมี Chemical Vapor Deposition (CVD)	23
2.15 การควบคุมคุณภาพ (Quality Control).....	23
2.16 ประเภทของการควบคุมคุณภาพเพื่อการยอมรับ	24
2.17 การชักสิ่งตัวอย่างเพื่อการยอมรับ	25
2.18 การสุ่มตัวอย่างเพื่อยอมรับแบบ Variables.....	26
2.19 การสุ่มตัวอย่างแบบ Chain	27
2.20 การสุ่มตัวอย่างชนิดต่อเนื่อง (Continuous Sampling).....	28
2.21 ความเชื่อมั่น (Reliability)	28
2.22 การออกแบบการทดลอง (Experimental Design or Design of Experiments).....	29
2.23 ประโยชน์ของการออกแบบการทดลอง.....	31
2.24 ขั้นตอนการผลิตวงจร.....	31
2.25 เทคนิคการผลิตเหรียญกษาปณ์สำเร็จรูปโลหะชุบเคลือบไส้เหล็ก ณ โรงกษาปณ์ ประเทศฟินแลนด์	36
3 วิธีการดำเนินการวิจัย	39
3.1 วิธีการดำเนินงาน	39
3.2 ดำเนินการทดลอง	43
4 ผลการทดลอง	48
4.1 การวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Minitab 15.....	51
4.2 การวิเคราะห์ด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope SEM)	53
4.3 การวิเคราะห์ด้วยภาพโครงสร้างจุลภาค.....	54
4.4 การทดสอบความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งไมโครฮาร์ดเนส (Micro Hardness)	56
4.5 การควบคุมคุณภาพ.....	61
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	63
5.1 สรุปผล.....	63

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะ	64
รายการอ้างอิง.....	65
ภาคผนวก.....	67
ภาคผนวก ก ผลการทดลองต่างๆ	68
ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	80
ประวัติผู้เขียน	94



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	แผนการดำเนินงานวิจัย.....	4
2.1	การเปรียบเทียบประเภทของการควบคุมภาพเพื่อการยอมรับ.....	24



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ปริมาณการผลิตเหรียญ 1 บาท (ใส่เหล็กเคลือบนิกเกิล).....	2
2.1 การตัดขวางเหรียญ 1 บาท รุ่นใหม่	6
2.2 กรรมวิธีเคลือบผิวโดยไฟฟ้า (Electroplating Process)	11
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบคืนไฟกับความแข็งของเหล็ก KD21	11
2.4 (Fe-C) Phase Diagram.....	13
2.5 ช่วงอุณหภูมิในการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์	14
2.6 ช่วงอุณหภูมิในการการอบคลายความเค้น หรือการอบได้ภาวะวิกฤต	15
2.7 อุณหภูมิการอบเพื่อความอ่อนตัวสูงกว่าเส้น A_{C1}	16
2.8 อุณหภูมิการอบเพื่อความอ่อนตัวสูงต่ำและสูงกว่าเส้น A_{C1}	16
2.9 ช่วงการชุบแข็ง และการอบคืนไฟ	17
2.10 TTT Diagram.....	17
2.11 ชั้นเคลือบผิวในรูปแบบต่างๆ	19
2.12 คุณสมบัติของผิวเคลือบ.....	19
2.13 คุณลักษณะของผิวเคลือบแต่ละชนิด	20
2.14 PVD ARC Technology	20
2.15 PVD Sputter Technology	21
2.16 PVD Sputter ก่อนเคลือบผิว	21
2.17 PVD Sputter CrN Coated (1.6 μm) หลังเคลือบ	21
2.18 การทำงานของ PVD ARC and Sputter.....	22
2.19 เครื่อง PVD ARC and Sputter	22
2.20 การเปรียบเทียบกระบวนการเคลือบผิวแบบ PVD และ แบบ CVD.....	23
2.21 การชักสิ่งตัวอย่างเพื่อการยอมรับ	26
2.22 หลักการสำคัญในการออกแบบการทดลอง	30
2.23 กระบวนการผลิตดวงตรา.....	32
2.24 แม่ถอน	33
2.25 ขั้นตอนการย่อยลาย	33
2.26 หุ่นแหลม	34

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.27 เครื่องถอนดวงตรา (แม่พิมพ์).....	34
2.28 ลักษณะการกดของเครื่องถอนดวงตรา.....	35
2.29 ลักษณะหุ่นแหลมหลังผ่านการกดแล้ว.....	35
2.30 ลักษณะหุ่นแหลมหลังผ่านการกดแล้วนำมาคลึงให้ได้รูปทรงเพื่อประกอบเข้ากับเครื่องปั๊มเหรียญ.....	36
2.31 ต้นแบบเหรียญ 1 บาท ด้านหน้าหลังจากลดความสูงของลวดลายลงเหลือ 0.05 มม.....	37
2.32 การอบคืนไฟ K455.....	37
2.33 การเขียนตัว K455 (CCT Diagram).....	38
3.1 สมบัติของเหล็ก W360.....	40
3.2 การทดสอบแรงกระแทกของเหล็ก W360.....	40
3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความแข็งของเหล็ก W360.....	41
3.4 TTT ไดอะแกรมของเหล็ก W360.....	41
3.5 อุณหภูมิอบคืนไฟสัมพันธ์กับความแข็งของเหล็ก W360.....	42
3.6 ความสัมพันธ์ของเวลากับความหนาของการชุบเคลือบ PVD Process.....	43
3.7 ข้อมูลในการวัดความแข็ง.....	44
3.8 จุดกดวัดความแข็ง.....	44
3.9 ค่าความแข็งที่วัดได้.....	45
3.10 เครื่องล้างด้วยวิธีการอัลตราโซนิก.....	45
3.11 ลักษณะการล้าง.....	46
3.12 คาโตนสมบูรณ์พร้อมใช้งาน.....	46
3.13 การบรรจุชิ้นงาน.....	47
3.14 เครื่องชุบเคลือบผิว.....	47
3.15 ชิ้นงานหลังชุบเคลือบผิว.....	48
3.16 เครื่องวัดความหนาผิวเคลือบแบบเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์.....	48
3.17 ลักษณะการวัดชิ้นงาน.....	49
3.18 ค่าความหนาของผิวเคลือบที่วัดได้.....	49
3.19 ลักษณะการตัดผ่าชิ้นงานด้วย Wire Cut (EDM).....	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.20 ชิ้นทดสอบตัดผ่าด้วยเครื่องตัดแบบ Wire Cut (EDM)	50
4.1 สรุปรูปจำนวนเหรียญ 1 บาท ที่ผลิตได้ต่อแม่พิมพ์ 1 คู่ (หัว – ก้อย)	51
4.2 Main Effect Plot for qty	52
4.3 Interaction Plot for qty	52
4.4 เหล็ก KD21 จากกล้อง SEM.....	53
4.5 เหล็ก W360 จากกล้อง SEM.....	53
4.6 โครงสร้างจุลภาคของเหล็ก KD21 สภาพจำหน่าย (Nitric2%)	54
4.7 โครงสร้างจุลภาคของเหล็ก KD21 หลังอบคืนไฟที่ 530 °C 2 ครั้งๆ ละ 2 ชั่วโมง (Nitric 2%).....	55
4.8 โครงสร้างจุลภาคสภาพจำหน่ายของเหล็ก W360 (Nitric 2%)	55
4.9 โครงสร้างจุลภาคของเหล็ก W360 หลังอบคืนไฟที่ 530°C 2 ชั่วโมง และ 550°C 2 ชั่วโมง (Nitric 2%)	56
4.10 เครื่องวัดความแข็งแบบไมโครฮาร์ดเนส	57
4.11 กำหนดค่ากำลังขยาย 50X.....	57
4.12 ค่าแรงกด 200 gf เวลาที่ใช้ในการกดต่อจุด 10 วินาที	58
4.13 การวัดความแข็งเหล็ก KD21 (บริเวณเนื้อคาร์ไบด์) ความแข็ง 1092-1166 HV (0.2)	58
4.14 การวัดความแข็งเหล็ก KD21 (บริเวณ Homogeneous Matrix) ความแข็ง 837HV (0.2) .	59
4.15 การวัดความแข็งเหล็ก W360 บริเวณ (Homogeneous Matrix) ความแข็ง 729HV (0.2) .	59
4.16 ค่าความแข็งของเหล็ก W360 เป็นกราฟ.....	60
4.17 ค่าความแข็งของเหล็ก KD21 เป็นกราฟ.....	60
4.18 รวงลำเลียงเหรียญลงถังเก็บ.....	61
4.19 เครื่องคัดแยกเหรียญแบบอัตโนมัติ	62

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

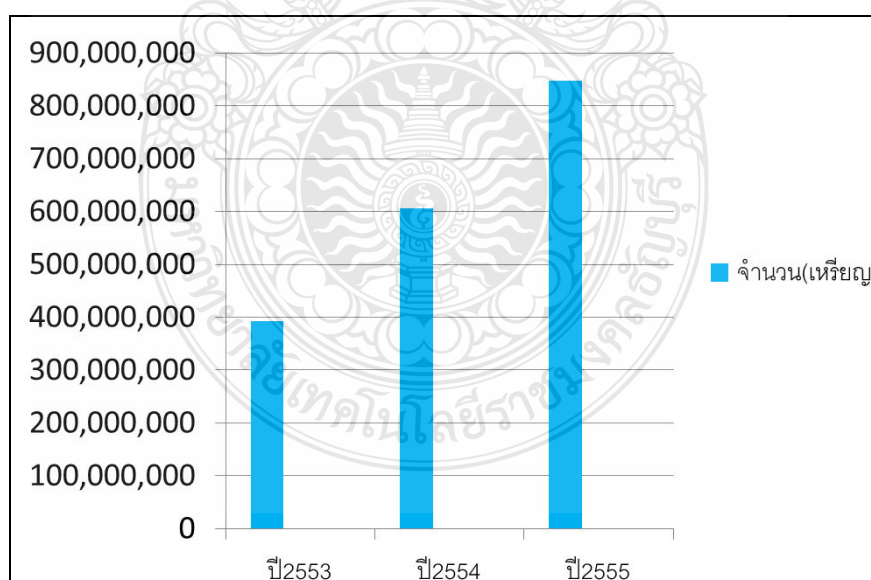
เหรียญกษาปณ์หมุนเวียนเป็นเงินตราที่ใช้เป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนสินค้าที่เป็นหน่วยย่อย ซึ่งมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อระบบเศรษฐกิจ กรมธนารักษ์ได้ตระหนักถึงความสำคัญและมุ่งหวังให้บริการอย่างเต็มที่ เพื่อให้การบริการจ่ายแลกเหรียญกษาปณ์แก่ประชาชนเป็นไปอย่างทั่วถึงเข้าถึงได้ง่าย และอย่างเท่าเทียม ทั้งได้สำรองเหรียญกษาปณ์ไว้อย่างเพียงพอเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการขาดแคลนเหรียญกษาปณ์ขึ้นในระบบเศรษฐกิจ ช่วยผลักดันให้ระบบเศรษฐกิจสามารถขับเคลื่อนไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถสร้างความเชื่อมั่นให้เกิดขึ้นกับประชาชน

เนื่องจากเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนผลิตจากโลหะจึงมีค่าในตัวเอง โดยเฉพาะในสมัยโบราณที่ใช้โลหะทองคำและเงินเป็นวัตถุดิบในการผลิต อันเป็นสิ่งของมีค่าและเป็นที่ยอมรับในสังคม โดยกำหนดให้มีขนาดและน้ำหนักสอดคล้องกับราคาหน้าเหรียญ ซึ่งในสมัยนั้นยังไม่มีกรรมวิธีนำธนบัตรมาใช้ในการแลกเปลี่ยนสินค้า เนื่องจากการซื้อขายดำเนินการอยู่ภายในเฉพาะกลุ่มบุคคลที่อยู่ในแวดวงการค้าเท่านั้น ต่อมาเมื่อระบบเศรษฐกิจขยายตัวมากขึ้นจึงได้มีการตกลงและกำหนดให้มีระบบเงินตรามาใช้หมุนเวียนในระบบเศรษฐกิจ โดยนำระบบเงินตราสำรองมาค้ำประกันเงินตราของแต่ละประเทศ และเริ่มกำหนดให้นำธนบัตรและเหรียญกษาปณ์มาใช้เป็นเงินตราอย่างเป็นทางการ วิธีการนี้ช่วยให้สามารถทำธุรกรรมทางการเงินได้กว้างขวางขึ้นแม้ว่าจะเป็นหน่วยธุรกิจขนาดย่อม ทั้งนี้ ชนิดเงินตราที่เป็นหน่วยย่อยนิยมผลิตเป็นเหรียญกษาปณ์เนื่องจากมีอายุการใช้งานยืนยาวและมีค่าในตัวเองจึงไม่ต้องใช้เงินทุนสำรองเป็นหลักประกันในการผลิต แต่ต้องนำธนบัตรมาแลก เช่นเดียวกับการซื้อขายสินค้าทั่วไป

เหรียญกษาปณ์หมุนเวียนชุดปัจจุบันมี 9 ชนิดราคา คือ ชนิดราคา 1, 5, 10, 25 และ 50 สตางค์ 1, 2, 5 และ 10 บาท ซึ่งมีจำนวนเกินมาตรฐานสากลที่ระบุว่าจำนวนชนิดราคาของเหรียญกษาปณ์และธนบัตรรวมกันไม่ควรเกิน 13 ชนิด ราคาโดยเฉพาะจำนวนชนิดราคาของเหรียญกษาปณ์ไม่ควรเกิน 8 ชนิดราคา อย่างไรก็ตาม เหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 1, 5 และ 10 สตางค์ ในปัจจุบันไม่ได้นำไปใช้หมุนเวียนในระบบเศรษฐกิจ แต่ผลิตเพื่อจัดทำเป็นแผงเหรียญให้ครบทุกชนิดราคา เพื่อเผยแพร่มาตรฐานเงินไทยในรูปแบบของสินค้าและใช้ในระบบบัญชีของส่วนราชการและรัฐวิสาหกิจเท่านั้น ดังนั้นเหรียญกษาปณ์ที่ใช้หมุนเวียนในระบบเศรษฐกิจปัจจุบันจึงมีเพียง 6 ชนิดราคา ซึ่งมีความเหมาะสมสอดคล้องกับมาตรฐานสากล

เหรียญกษาปณ์เป็นเงินตราจึงต้องมีคุณลักษณะพิเศษที่สามารถสร้างความเชื่อมั่นให้เกิดขึ้นกับประชาชน มีเอกลักษณ์เป็นที่เชิดหน้าชูตา และสามารถแสดงให้เห็นถึงวัฒนธรรมและความเจริญก้าวหน้าของประเทศ รูปแบบของเหรียญกษาปณ์ที่ออกสู่ตลาดต้องมีลักษณะกลมแบน และขนาดจึงต้องเป็นไปตามข้อกำหนด ไม่ซ้ำซ้อนกับเหรียญกษาปณ์ของประเทศอื่น ต้องมีความเงางามสามารถทนทานต่อการสึกหรอและการกัดกร่อนได้ดี มีอายุการใช้งานนาน มีคุณสมบัติสอดคล้องกับกระบวนการผลิตที่มีอยู่

เมื่อปี พ.ศ. 2552 เหรียญ 1 บาท รุ่นใหม่ ซึ่งเป็นวัสดุโลหะเคลือบด้วยนิกเกิลได้ถูกนำเข้ามาใช้ในประเทศไทยเป็นครั้งแรก ปัญหาของการใช้วัตถุดิบโลหะชุบเคลือบผิวด้วยนิกเกิลซึ่งแม่เหล็กดูดติดมีความแข็ง 110 HV (30) มีมากขึ้น ปริมาณการผลิตลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบแบบเดิม (แม่เหล็กดูดไม่ติด) เป็นวัสดุคิวโปรนิกเกิล (ทองแดงร้อยละ 75 นิกเกิลร้อยละ 25) ความแข็ง 80 HV (10) แม้ว่าทางสำนักกษาปณ์จะลดความสูงของลวดลายลงตามที่ได้ทำการศึกษาฐานโรงกษาปณ์ประเทศฟินแลนด์ แต่ก็ยังประสบปัญหาเรื่องผลผลิต คืออายุการใช้งานของดวงตรา(แม่พิมพ์) ลดลงมาก ผู้วิจัยจึงเลือกทำการวิจัยเพื่อที่จะเพิ่มอายุการใช้งานของดวงตรา เพื่อเพิ่มผลผลิตเหรียญ 1 บาท สำเร็จรูปให้มากขึ้นเพื่อให้ทันต่อความต้องการของประชาชนภายในประเทศ และยังคงไว้ซึ่งเอกลักษณ์ ความสวยงาม ความถูกต้อง เพื่อคงไว้ซึ่งความภาคภูมิใจของคนในชาติต่อไป



ภาพที่ 1.1 ปริมาณการผลิตเหรียญ 1 บาท (โลหะเคลือบนิกเกิล)

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

เพิ่มจำนวนการผลิตเหรียญ 1 บาท รุ่นใหม่ให้เหล็กเคลือบนิกเกิลสำเร็จรูปต่อดวงตรา (แม่พิมพ์) 1 คู่ (ชุด) ให้ได้ประมาณ 200,000 เหรียญต่อแม่พิมพ์ (Die) 1 คู่

1.3 สมมติฐานงานวิจัย

งานวิจัยนี้ทำให้อายุการใช้งานของแม่พิมพ์ ด้านหัว และ ก้อย มากขึ้น

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1.4.1 ใช้เหล็กทำดวงตรา (แม่พิมพ์) จำนวน 2 ชนิด 2 บริษัท ในการทดลอง

1.4.2 เหล็กที่ใช้ทำ ดวงตรา (แม่พิมพ์) ทั้งด้านหัวและด้านก้อย ใช้วิธีการชุบเคลือบ PVD ชนิดสารเคลือบ CrN ชุบเคลือบเหมือนกัน ในเตาเดียวกันกับเหล็กทั้ง 2 ชนิด

1.4.3 ความหนาของผิวเคลือบ CrN หนา $1\ \mu\text{m}$, $2\ \mu\text{m}$ และ $3\ \mu\text{m}$

1.4.4 เหรียญที่ใช้ในการทดลองเป็นเหรียญ 1 บาท รุ่นใหม่ให้เหล็กเคลือบนิกเกิลหนา $\pm 25\ \mu\text{m}$

1.4.5 เครื่องผลิตเหรียญ 1 บาท ใช้ความเร็วในการผลิต 850 เหรียญ ต่อ นาที ในการปั๊มครั้งเดียวกันทั้งด้านหัวและด้านก้อย

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินการวิจัยประกอบด้วย 5 ขั้นตอนหลักดังนี้

1.5.1 การจัดเตรียมเครื่องจักรและวัสดุอุปกรณ์

1.5.2 ดำเนินการทดลอง

1.5.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

1.5.4 การปรับปรุงกระบวนการเป็นขั้นตอนของการเลือกวิธีการแก้ไขปัญหา โดยพิจารณาหาวิธีการแก้ไขปัญหาเปรียบเทียบกับก่อนและหลังปรับปรุง

1.5.5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินการ	พ.ย.53	ธ.ค.53	ม.ค.54	ก.พ.54	มี.ค.54	เม.ย.54	พ.ค.54	มิ.ย.54
การจัดเตรียม	↔							
ดำเนินการทดลอง		↔						
การวิเคราะห์ผลการทดลอง			←				→	
วิเคราะห์ผล			←				→	
การปรับปรุงกระบวนการ							↔	
สรุปผลการทดลอง								↔

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

ปริมาณเหรียญ 1 บาท สำเร็จรูปที่ได้ต่อดวงตรา 1 คู่ เพิ่มขึ้นประมาณ 200,000 เหรียญ ต่อ ดวงตรา 1 คู่ จากเดิม 40000 – 50000 เหรียญ ต่อดวงตรา (แม่พิมพ์) 1 คู่

1.7 ข้อจำกัดในการทำวิจัย

- 1.7.1 ต้องรักษาไว้ซึ่งความสวยงามของลวดลาย
- 1.7.2 การเบิกจ่ายเงินงบประมาณอาจใช้เวลานาน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เหรียญ 1 บาท

เหรียญกษาปณ์หมุนเวียนชนิดราคา 1 บาทผลิตขึ้นจากโลหะสีขาวยังมีค่าในตัวเองเพื่อใช้ในการแลกเปลี่ยนสินค้าโดยกำหนดให้มีขนาดและน้ำหนักสอดคล้องกับราคาหน้าเหรียญ ในการกำหนดรายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะของเหรียญกษาปณ์แต่ละชนิดราคาต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของโลหะ ต้นทุนการผลิต แหล่งแร่ภายในประเทศ จำนวนผู้ผลิตและแหล่งผลิต การใช้กับเครื่องหยอดเหรียญในบางชนิดราคา ผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม รวมทั้งความสะดวกในการจับจ่ายใช้สอย

ในปัจจุบันเหรียญ 1 บาท ได้เปลี่ยนมาใช้วัสดุชนิดใส่เหล็กเคลือบผิวด้วยนิกเกิลซึ่งต่างกับเหรียญ 1 บาท รุ่นเก่าซึ่งใช้วัสดุชนิดทองแดงผสมนิกเกิลทำให้เหรียญมีต้นทุนสูงมากกว่าราคาหน้าเหรียญซึ่งเป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้ต้องเปลี่ยนมาใช้วัสดุที่มีราคาถูกลง แต่ยังคงความสวยงาม มีคุณค่าสามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดีอีกด้วย ซึ่งรายละเอียดและคุณลักษณะเฉพาะของเหรียญ 1 บาท มีดังนี้

2.1.1 เหรียญ 1 บาท รุ่นเก่า

- 1) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร
- 2) น้ำหนัก 3.4 กรัม
- 3) พื้นเพื่อรอบเหรียญจำนวน 130 พื้นเพื่อ
- 4) ความแข็ง 80 HV (10)
- 5) วัสดุ เหรียญ 1 บาท เป็นโลหะผสมประกอบด้วยทองแดง (Cu) 75% นิกเกิล (Ni) 25% ซึ่งสามารถระบุส่วนผสมหลัก คือ ทองแดงและนิกเกิลในสัดส่วน 75:25 โดยประมาณ โลหะดังกล่าวมีส่วนผสมสอดคล้องกับโลหะทองแดงผสมนิกเกิล (Copper-Nickel alloy) ซึ่งมีชื่อเรียกเฉพาะว่า คิวโปร-นิกเกิล (Cupro-Nickel)

- 6) คุณสมบัติ ด้วยการผสมนิกเกิลถึง 25 % สีของโลหะผสมจะเปลี่ยนเป็นสีของนิกเกิลเพียงอย่างเดียวสมบัติเด่นของโลหะชนิดนี้คือ สามารถขึ้นรูปเย็นได้ดีมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีมาก โดยเฉพาะการกัดกร่อนในลักษณะไฟฟ้าเคมี (Electro-Chemical Corrosion) ใช้เป็นวัสดุดิบในการผลิตเหรียญในระดับสากล ซึ่งอาจเรียกได้ว่าโลหะที่ใช้ทำเหรียญโดยเฉพาะ ทำให้เหรียญมีความเงางามดูมีคุณค่า

2.1.2 เหรียญ 1 บาท รุ่นใหม่

- 1) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19.75 – 19.85 มิลลิเมตร
- 2) น้ำหนัก 3.4 กรัม
- 3) พื้นเพื่อรอบเหรียญจำนวน 130 พื้นเพื่อ
- 4) ความแข็ง 110 HV (30)
- 5) วัสดุเหรียญ 1 บาท เป็นวัสดุโลหะเคลือบนิเกิลด้วยกระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า (Electro Plating) ส่วนผสมทางเคมีบริเวณโลหะใต้เหล็ก C 0.10 %, Mn 0.50 %, P 0.04 %, S 0.05 %, Fe Bal (Low Carbon Steel) ส่วนผสมทางเคมีของผิวเคลือบนิเกิล Ni 99.44% หนาไม่น้อยกว่า 25 μm



ภาพที่ 2.1 การตัดขวางเหรียญ 1 บาท รุ่นใหม่

6) สมบัติเพิ่มความต้านทานการเสื่อมสภาพของผิวอันเนื่องมาจากการใช้งานและอีกทั้งยังสามารถเพิ่มความสวยงามแก่ชิ้นงาน ในกระบวนการเคลือบผิวโลหะนิเกิลเป็นโลหะที่มีการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจากสมบัติเด่นเฉพาะตัว เช่น มีความต้านต่อการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) และการกัดกร่อน (Corrosion) สูง มีความเหนียว (Ductility) และอ่อนตัวสูงสามารถขึ้นรูปเย็นได้ง่าย น้ำหนักเบา ราคาถูก

2.2 โลหะนิเกิล (Nickel)

นิเกิลเป็นธาตุที่เชื่อกันว่ามีปริมาณมากบริเวณใจกลางของโลก เหตุที่เชื่อเช่นนี้มาจากผลของการวิเคราะห์พบปริมาณนิเกิลสูงจากสะเก็ดดาว (Meteorites) ที่ตกมายังโลก และสะเก็ดดาวที่ของนิเกิลจำนวนน้อย มีไม่กี่แห่งในโลกที่พบแหล่งแร่นิเกิลที่มีปริมาณสูงในเชิงพาณิชย์ประเทศที่

พบแหล่งแร่ निकเกิลที่สำคัญได้แก่ประเทศแคนาดา และแถบภาคกลางของประเทศรัสเซีย แร่ निकเกิลที่พบจะอยู่ในรูปของซัลไฟด์ซึ่งจะปนอยู่กับแร่ทองแดง โคบอลต์ และแร่โลหะที่อยู่ในกลุ่มของแพลทินัม (แพลเลเดียม, ออสเมียม เป็นต้น) แร่ निकเกิลที่พบจะมี निकเกิลอยู่ระหว่าง 0.8-5.5% ที่เหลือเป็นทองแดง โคบอลต์ และเหล็กอีกเล็กน้อย ประเทศไทยยังไม่ปรากฏพบแร่ निकเกิลที่ใด มีเพียงข่าวที่ไม่เป็นทางการพบแร่ निकเกิลที่จังหวัดน่านบนภูเขาวริเวณชายแดนไทย-ลาว [1]

2.3 โลหะวิทยาของ निकเกิลและโลหะ निकเกิลผสม

นิกเกิลเป็นโลหะที่มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันและการกัดกร่อนสูง เป็นโลหะที่มีสีขาวสวยงาม มีความเหนียวและอ่อนตัวสูงสามารถขึ้นรูปเย็นได้โดยง่าย นอกจากนี้ निकเกิลสามารถละลายกับโลหะอื่นได้ง่ายและให้สารละลายของแข็งที่มีความเหนียว ประมาณ 60% ของ निकเกิลที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าผสม [1] ส่วนที่เหลือจะใช้ทำโลหะ निकเกิลผสมที่ใช้ในงานพิเศษที่ทนการกัดกร่อนสูงๆ และใช้เคลือบผิวเหล็ก (Electroplating) โดยอาศัยคุณสมบัติทนการกัดกร่อนและให้สารละลายของแข็งได้ง่าย เมื่อพิจารณาคุณสมบัติเชิงกลจะพบว่า มีคุณสมบัติเทียบเท่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ที่เหนือกว่าตรงที่สามารถรักษาความเหนียวได้ดีในช่วงอุณหภูมิต่ำ คุณสมบัติตัวนำไฟฟ้าของ निकเกิลจะสูงไม่เท่าทองแดงและอลูมิเนียม แต่สูงพอที่จะใช้ได้บ้างกรณีที่ขั้วสายหรือเทอร์มินอลในงานอิเล็กทรอนิกส์ ในบรรยากาศใช้งานถ้ามีแก๊สของกำมะถันอยู่ด้วยจะมีส่วนทำให้นิกเกิลขาดความต้านทานที่ดี และบางที่อาจจะเปราะแตกง่าย ส่วนใหญ่ไม่ใช้นิกเกิลในสภาพโลหะบริสุทธิ์ เพราะ निकเกิลมีราคาสูงเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่นๆ จะใช้ในลักษณะโลหะผสมและกรณีที่มีความจำเป็นเพื่ออาศัยคุณสมบัติพิเศษของ निकเกิลเท่านั้น

2.3.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์

น้ำหนักอะตอม	58.69
โครงสร้างระบบผลึก	Face Centered Cubic ($a = 3.516 \text{ \AA}$)
ความหนาแน่น (25°C)	8.89 g/cm^3
อุณหภูมิหลอมเหลว	$1435\text{-}1445^{\circ}\text{C}$
จุดเดือดกลายเป็นไอ	2730°C
ความร้อนจำเพาะ ($27^{\circ}\text{-}100^{\circ}\text{C}$)	$0.130 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$
ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย	73.8 cal/g
สัมประสิทธิ์การขยาย ($27^{\circ}\text{-}100^{\circ}\text{C}$)	$13 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$
ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (20°C)	9.5 microhm.cm

สัมประสิทธิ์ตัวนำความร้อน (27°-100°C) 0.145 cal.cm/cm² .s. °C

2.3.2 คุณสมบัติเชิงกล

ความแข็งแรงหรือต้านทานแรงดึง (Tensile Strength)	47 kg/mm ²
พิกัดความยืดหยุ่น (Elastic Limit)	15 kg/mm ²
อัตราการยืดตัว (Percent Elongation)	40%
ความแข็ง (Hardness)	110 HB.
โมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)	21000 kg/mm ²

2.4 โลหะโครเมียม (Chromium)

โลหะโครเมียมที่ผลิตได้ประมาณครึ่งหนึ่งจะอยู่ในรูปของเฟอร์โรโครม ซึ่งจะใช้ในการผลิตเหล็กกล้าผสม และเหล็กกล้าไร้สนิม โดยเน้นที่คุณสมบัติความสามารถในการชุบแข็ง และความต้านทานต่อการกัดกร่อนของเหล็ก ส่วนที่เหลือจะใช้ในอุตสาหกรรมเคลือบผิวเหล็ก (Chrome Plating) และอุตสาหกรรมผลิตโลหะทนความร้อน โลหะทนการกัดกร่อน โดยผสมร่วมกับนิกเกิล โมลิบดีนัม ทองแดง และอื่นๆ เช่น โลหะผสม Nichrome, Inconel และโลหะผสมในกลุ่ม Hastelloy แร่โครเมียมที่สำคัญในเชิงพาณิชย์ได้แก่ แร่ Chromite หรือ Chromite Iron (FeO.Cr₂O₃) เป็นแร่ที่มีน้ำหนักสีดำน้ำตาล ซึ่งประกอบด้วยโครเมียมออกไซด์ (Cr₂O₃) ประมาณ 33-35% ส่วนใหญ่แร่ที่พบบ่อยจะอยู่ร่วมกับซิลิโคนออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และแมงกานีสออกไซด์ แหล่งแร่ที่สำคัญของโลกได้แก่ สหรัฐอเมริกา กรีซ ตุรกี และแอฟริกา ประเทศไทย พบแหล่งแร่โครไมต์บริเวณจังหวัดอุดรธานีที่เป็นแหล่งสำคัญของประเทศในเชิงพาณิชย์ แต่ก็เป็นแหล่งแร่ขนาดเล็ก อีกแหล่งที่สำคัญรองลงมาได้แก่แหล่งแร่ที่จังหวัดนราธิวาส [1]

แร่โครไมต์จัดเป็นวัตถุดิบที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมหลายประเภท ได้แก่ อุตสาหกรรมผลิตวัสดุทนไฟ (Refractory) อุตสาหกรรมเคมีผลิตสารประกอบ เช่น โครเมต และโครมอลัม อุตสาหกรรมผลิตเฟอร์โรโครม และอุตสาหกรรมผลิตโลหะโครเมียม เป็นต้น

การใช้โลหะโครเมียมในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะไม่ใช้ในสภาพโลหะบริสุทธิ์ เช่น ในอุตสาหกรรมเหล็กจะใช้ในรูปของเฟอร์โรโครม และในอุตสาหกรรมผลิตโลหะผสมนอกกลุ่มเหล็กยังคงใช้ผสมโดยมีเหล็กเจือปน ในอุตสาหกรรมเคลือบผิวก็ไม่ใช้โลหะโครเมียมบริสุทธิ์ เอกสารอ้างอิงส่วนใหญ่กล่าวถึงการถลุงเพื่อให้ได้โลหะโครเมียมบริสุทธิ์บ้าง แต่จะเป็นโลหะโครเมียมบริสุทธิ์เพียง 99.5%

2.5 โลหะวิทยาของโครเมียมและโครเมียมผสม

โครเมียมเป็นโลหะที่มีความแข็งแรงและความแข็งอยู่ในเกณฑ์สูงกว่าโลหะนอกกลุ่มเหล็กทั่วไป แต่ไม่มีความเหนียวที่อุณหภูมิปกติ นอกจากนี้คุณสมบัติโดยเฉพาะเชิงกลจะเปลี่ยนแปลงได้มากขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ การผลิตและลักษณะการขึ้นรูป การใช้งานโลหะโครเมียมในสภาพบริสุทธิ์จะใช้เคลือบผิวโลหะอื่น โดยเฉพาะเหล็ก (Electroplating) จะกระทำสองลักษณะ คือ เพื่อความสวยงาม (Silver White) และป้องกันสนิมเคลือบบางมากและจะต้องเคลือบรองพื้นด้วยทองแดงหรือนิกเกิลก่อน อีกลักษณะหนึ่งเคลือบในลักษณะเพิ่มความแข็งให้กับชิ้นโลหะเพื่อเสริมความต้านทานต่อการสึกหรอที่เรียกว่า Hard Chrome หรือ Hard Plating จะเคลือบหนาและผิวโครเมียมมีแรงเชื่อมประสานกับผิวของชิ้นโลหะ ซึ่งใช้มากในงานเคลือบผิวแม่พิมพ์พลาสติกที่ต้องการความคงทนต่อการสึกหรอและการกัดกร่อน ส่วนการใช้งานโลหะโครเมียมที่มีปริมาณสูงคือใช้ในลักษณะเป็นโลหะผสมในเหล็กกล้าผสมและเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) นอกจากนี้ใช้ผลิตโลหะผสมอื่นๆ เช่น โลหะโครเมิล อินโคเนลแอสเทลลอย และอื่นๆ [1]

2.5.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์

น้ำหนักอะตอม	52
ระบบโครงสร้าง	Body- Centered Cubic
	$a_0 = 2.8844 - 2.8848 \text{ \AA}$
ความหนาแน่น (20°C), g/cm ³	7.19
อุณหภูมิหลอมเหลว	1875°C
อุณหภูมิเดือดกลายเป็นไอ	2199°C
ความร้อนจำเพาะ (25°)	0.123 cal/g°C
ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย	3.2 – 3.5 kcal/mole
สัมประสิทธิ์การขยายตัว (20°)	6.2×10^{-6}
ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (20°C)	12.9 microhm/cm.

2.5.2 คุณสมบัติเชิงกล

เนื่องจากการผลิตโลหะโครเมียมมีหลายขบวนการ ทำให้คุณสมบัติเชิงกลของโลหะโครเมียมแตกต่างกันมาก จากเอกสารอ้างอิงได้กล่าวถึงคุณสมบัติเชิงกลของโครเมียมไว้พอสังเขป ดังนี้

โครเมียมโดยกรรมวิธีแยกด้วยกระแสไฟฟ้า มีค่าความต้านทานแรงดึง 83 Mpa อัตราการยืดตัว (Elongation) และ Reduction of Area 0% โมดูลัสการยืดหยุ่น 0.248 GPa ที่อุณหภูมิ 20°C

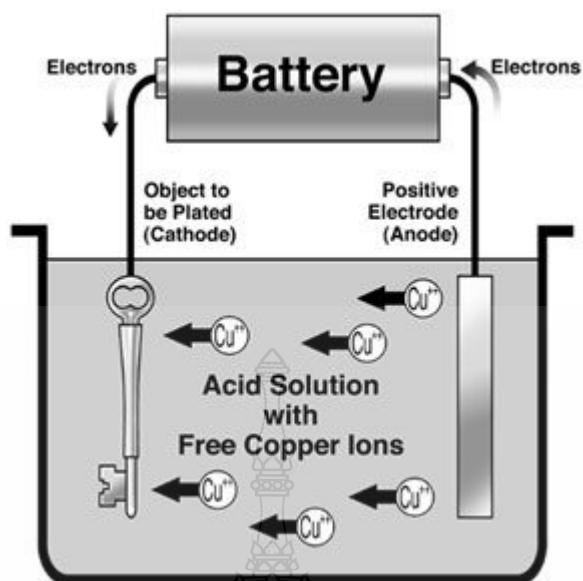
โลหะโครเมียมผลิตโดยกรรมวิธีใช้ Lodide หรือ Lodide Chromium ในสภาพที่อัดขึ้นรูป เป็นแท่งที่อุณหภูมิห้อง มีความต้านทานแรงดึง 413 MPa จุดคลาก (0.2%) 362 MPa อัตราการยืดตัว 44% และ Reduction of Area 78% ภายหลังเมื่ออบความร้อนให้เกิดการตกผลึกใหม่ (Recrystallized) ความต้านทานแรงดึงลดลงเหลือ 282 MPa ไม่สามารถยืดตัวได้ (% Elongation และ Reduction of Area 0%)

2.6 การเคลือบผิว निकิลหรือหริยญ 1 บาท

กรรมวิธีเคลือบผิวหรือหริยญ 1 บาท ใช้กรรมวิธีการเคลือบด้วยไฟฟ้า (Electroplating Process) เป็นวิธีการเคลือบผิวโลหะที่นิยมกันแพร่หลายการเคลือบผิวด้วยวิธีนี้สามารถควบคุมความหนาของโลหะที่เคลือบได้ดีกว่า และผิวที่เคลือบก็สม่ำเสมอดีทั้งยังสามารถบดงอได้ดีพอสมควรโดยไม่แตกร้าวอีกด้วย โลหะที่นำมาเคลือบก็อาจเป็นทองแดง นิกเกิล โครเมียม แคลเมียม ทองคำ เงิน ดีบุก สังกะสีและอื่นๆ ก่อนเคลือบผิวด้วยกรรมวิธีทางไฟฟ้า การเคลือบผิวโดยวิธีไฟฟ้าเคมีนี้ ชิ้นงานที่จะนำโลหะอื่นมาเคลือบจะเป็นคาโทด (Cathode) ส่วนตัวโลหะที่จะเคลือบจะเป็นอโนด (Anode) ซึ่งจะละลายลงใน อิเล็กโตรไลต์ (Electrolyte) มีเกลือของโลหะนั้นๆ ละลายอยู่ในขณะที่โลหะบางส่วนจะเคลือบผิวคาโทด ดังนั้นความเข้มข้นของโลหะใน อิเล็กโตรไลต์ จึงคงที่อยู่เสมอ ในกรณีที่อโนดเป็นตัวนำ เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม ตะกั่วหรือแท่งคาร์บอนโลหะที่ไปเคลือบผิวอาจอยู่ในลักษณะเกลือที่ละลายอยู่ในอิเล็กโตรไลต์ ก็ได้ [1]

การควบคุมการเคลือบผิวโลหะแบบนี้ให้ได้ผลดีคือโลหะที่เคลือบติดแน่นและสม่ำเสมอ จะต้องควบคุมโดยเข้มงวดทั้งความต่างศักย์ไฟฟ้าความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้า ณ ผิว คาโทด โดยมีหน่วยวัดเป็นแอมแปร์ต่อตารางเมตรสัดส่วนของพื้นที่อโนดต่อพื้นที่คาโทด เวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวรวมทั้งองค์ประกอบและอุณหภูมิของ อิเล็กโตรไลต์ ความหนาของโลหะที่เคลือบโดยทั่วไปจะมีความหนาดังนี้คือ

- 1) เคลือบนิกเกิลจะหนาประมาณ 0.0075 – 0.05000 มิลลิเมตร (7.5 – 50 μm)
- 2) เคลือบโครเมียมจะหนาประมาณ 0.00025 – 0.00125 มิลลิเมตร (0.25 – 1.25 μm)
- 3) เคลือบทองแดงจะหนาประมาณ 0.0075 – 0.02500 มิลลิเมตร (7.5 – 25 μm)
- 4) เคลือบแคลเมียมจะหนาประมาณ 0.005 – 0.01250 มิลลิเมตร (5 – 12.5 μm)
- 5) เคลือบเงินจะหนาประมาณ 0.0075 – 0.03000 มิลลิเมตร (7.5 – 30 μm)

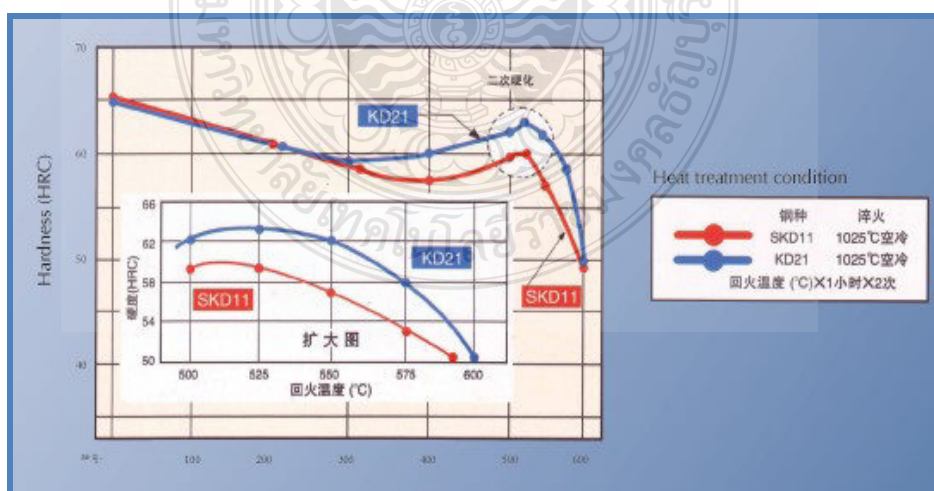


ภาพที่ 2.2 กรรมวิธีเคลือบผิวโดยไฟฟ้า (Electroplating Process) [2]

2.7 วัสดุที่ใช้ผลิตแม่พิมพ์เหรียญ 1 บาท (รุ่นเก่า)

2.7.1 แม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ 1 บาท รุ่นเก่า (คิวโปรนิคเกิล)

ใช้เหล็ก KD21 (NIPPON KOSHUHA) ประเภทญี่ปุ่น ส่วนผสมทางเคมี C 0.97%, Si 1%, Mn 0.34%, P 0.19%, S 0.08%, Cr 7.88%, Mo 1.90%, V 0.41% เป็นเหล็กเครื่องมืองานเย็น (Cold Work Tool Steel) เป็นเหล็กที่มีความแข็งหลังการอบคืนไฟ (Tempering) สูงถึงประมาณ 60 – 62 HRC [3]



ภาพที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบคืนไฟกับความแข็งของเหล็ก KD21 [3]

2.8 สมบัติของธาตุเมื่อผสมในเหล็กกล้า [4]

2.8.1 คาร์บอน (Carbon; C) คาร์บอนมีอิทธิพลต่อจุดหลอมเหลวของเหล็ก คือจะทำให้จุดหลอมเหลวต่ำลงจึงทำให้เหล็กหลอมได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้เหล็กแข็งขึ้นสามารถชุบแข็ง

2.8.2 (Chromium; Cr) โครเมียม เพิ่มความแข็งแรง ด้านทานการเป็นสนิม และคงทนต่อการกัดกร่อน

2.8.3 (Manganese; Mn) แมงกานีส เพิ่มความคงทนในการรับแรงกระแทก เพิ่มความเหนียวและคงทนต่อการสึกหรอ

2.8.4 (Nickel; Ni) นิกเกิล เพิ่มความคงทนในการกัดกร่อน เพิ่มความเหนียว และความแข็งแรง

2.8.5 (Molybdenum; Mo) โมลิบดีนัม เพิ่มความแข็งแรง ทนความร้อนสูง คงความแข็งที่อุณหภูมิสูง และด้านทานการสึกหรอ

2.8.6 (Vanadium; V) วานาเดียม เพิ่มความเหนียว ความแข็ง และคงความแข็งที่อุณหภูมิสูง

2.8.7 (Silicon; Si) ซิลิคอน เพิ่มความคงทนในการกัดกร่อน

2.8.8 (Tungsten; W) ทังสเตน คงความแข็งที่อุณหภูมิสูง เพิ่มความแข็งแรง และคงทนต่อการกัดกร่อน

2.9 วัตถุประสงค์ในการนำธาตุต่างๆ มาผสมในเหล็ก

2.9.1 สามารถทนต่อแรงกระแทกได้สูง

2.9.2 รักษาความแข็งของผิวให้ทนต่อการสึกหรอหรือการตัด

2.9.3 เพิ่มความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมี

2.9.4 เพิ่มสมบัติทางเชิงกลในการใช้งานที่อุณหภูมิสูงหรือต่ำ

2.9.5 เพิ่มความแข็งแรงในการรับภาระ (Load)

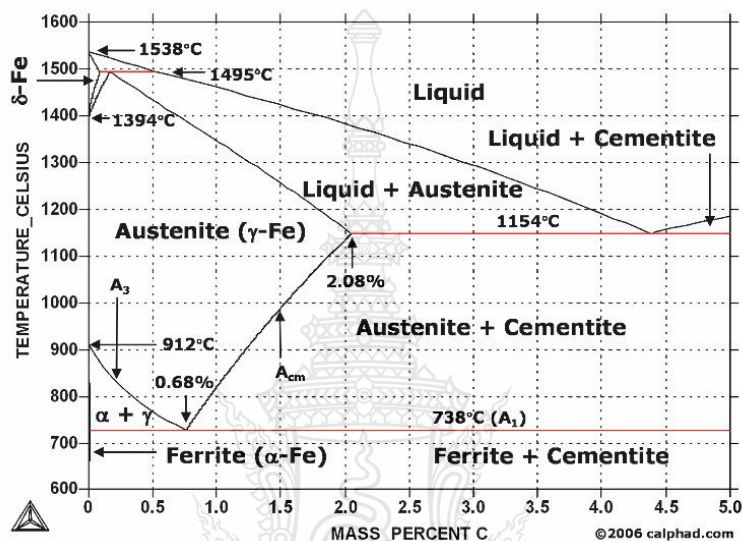
2.9.6 รักษาความสามารถในการแปรรูปบนเครื่องจักรได้ดี

2.9.7 เพิ่มสมบัติทางเชิงกล ตลอดจนการควบคุมองค์ประกอบซึ่งมีผลต่อความสามารถ ในการชุบแข็ง และเพิ่มความเหนียว

2.10 การชุบแข็ง (Hardening)

กรรมวิธีการชุบแข็งเหล็กกล้ากระทำเพื่อให้เหล็กกล้ามีความแข็ง ทนต่อการเสียดสีและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น กรรมวิธีการชุบแข็งเหล็กกล้านี้กระทำได้โดยการเผาเหล็กให้ร้อนจนกระทั่งมีความร้อนสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตสิ้นสุดประมาณ 50 องศาเซลเซียส แล้วเผาแช่ไว้ระยะเวลาหนึ่ง เพื่อให้

เหล็กกล้านั้นได้รับความร้อนโดยทั่วถึงตลอดทั้งชิ้นและให้เหล็กกล้าเปลี่ยนโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์โดยสมบูรณ์ แล้วจึงทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในสารจุ่มชุบในการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในสารจุ่มชุบเราเรียกว่า การจุ่มชุบ (Quenching) เพื่อให้เหล็กมีโครงสร้างภายในเป็นโครงสร้างที่แข็ง (Hardness) เช่น โครงสร้างแบบมาร์เทนไซต์ [4]



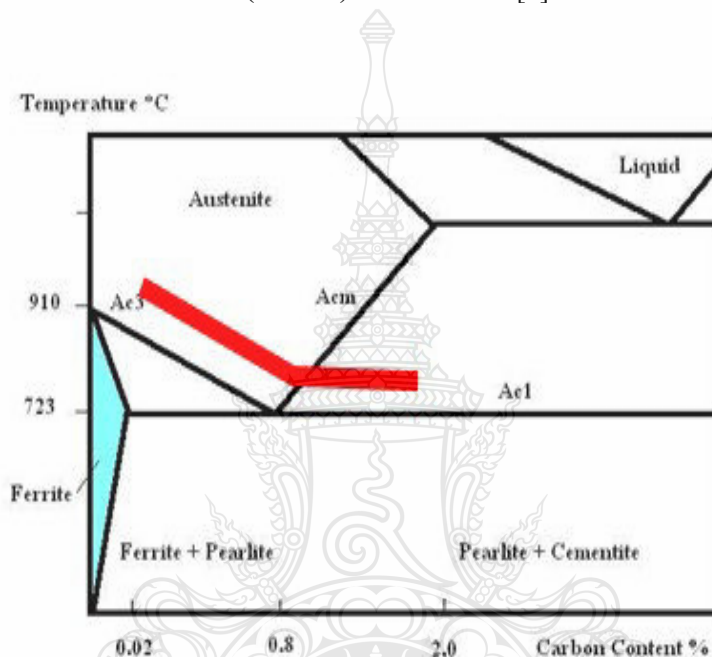
ภาพที่ 2.4 (Fe-C) Phase Diagram

2.11 การอบอ่อน (Annealing)

คือการให้ความร้อนและอบแช่โลหะที่ระดับอุณหภูมิเหมาะสมอุณหภูมิหนึ่งแล้วควบคุมการลดอุณหภูมิด้วยอัตราที่เหมาะสม มีความมุ่งหมายเพื่อปรับปรุงสมบัติของเหล็กที่ผ่านกระบวนการต่างๆ มา เช่น การขึ้นรูปร้อน (Forging and Hot Rolling Process) การขึ้นรูปเย็น (Cold Rolling Process) หรือผ่านการหล่อ (Casting Process)

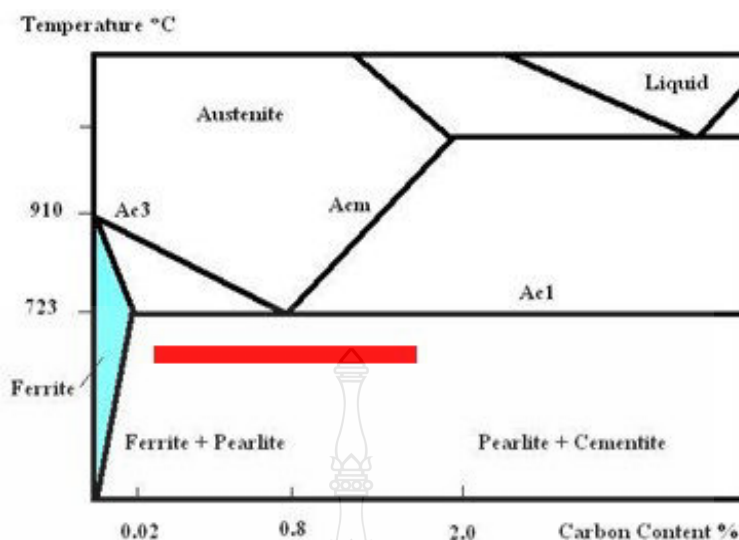
2.11.1 การอบอ่อนอย่างสมบูรณ์ (Full Annealing) การอบอ่อนจะอบเหล็กให้มีอุณหภูมิเหนือเส้น A_{C3} ประมาณ 30-50 องศาเซลเซียส ในกรณีของเหล็กไฮโปยูเทคตอยด์ (Hypo-Eutectoid) และเหนือเส้น A_{C1} ในกรณีของเหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ (Hyper-Eutectoid) อัตราการให้ความร้อนประมาณ 30-200 องศาเซลเซียส ต่อชั่วโมงขึ้นอยู่กับลักษณะของชิ้นงาน ถ้าชิ้นงานมีรูปร่างแท่งตันจะอบที่อัตราสูง และควรใช้ที่อัตราอบที่ต่ำเมื่อแผ่นเหล็กมีความหนาที่แตกต่างกันมาก เมื่ออบจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการแล้วควรทิ้งไว้ที่อุณหภูมินี้ประมาณ 30-60 นาที ต่อความหนาเฉลี่ย 25 มิลลิเมตร

หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นช้าๆ ในอัตรา 150 - 200 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง (ในทางปฏิบัติปล่อยให้เย็นตัวภายในเตา) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหล็กจะไปเป็นในลักษณะใกล้เคียงสภาวะสมดุล โครงสร้างที่เป็นอยู่ก่อนอบอ่อนซึ่งอาจจะเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) เบนไนต์ (Beinite) หรือซอร์ไบต์ (Sorbite) เหล็กกล้าจะเปลี่ยนเป็นเฟอไรต์ (Ferrite) กับ เพอร์ไรต์ (Pearlite) สำหรับเหล็กไฮโปยูเทคตอยด์ จะเป็นเฟอไรต์ (Ferrite) สำหรับเหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ ส่วนเหล็กยูเทคตอยด์ (Eutectoid) เป็น โครงสร้างเฟอไรต์ (Ferrite) 100 เปอร์เซ็นต์ [4]



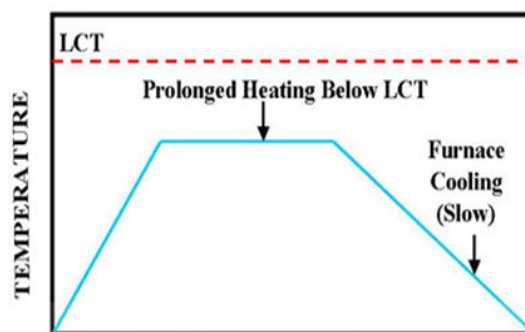
ภาพที่ 2.5 ช่วงอุณหภูมิในการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์

2.11.2 การอบคลายความเค้น หรือการอบใต้ภาวะวิกฤต (Stress-Relief Annealing or Subcritical Annealing) เป็นการอบอ่อนเพื่อมุ่งทำลายความเครียดภายในเหล็กหลังจากการขึ้นรูปเย็น เช่นเหล็กที่ผ่านการรีดหรือการดึง จะทำให้กลุ่มก้อนของอะตอมของเหล็กอยู่ในสภาพบิดเบี้ยวทำให้เหล็กมีความแข็งเพิ่มขึ้นและสูญเสียความเหนียว ไม่เหมาะนำไปใช้งานหรือไม่เหมาะสำหรับการขึ้นรูปครั้งต่อไป จะต้องทำการอบอ่อนภายในเสียก่อน โดยอบที่อุณหภูมิต่ำกว่าเส้น A_{C1} (500- 650 องศาเซลเซียส) ใช้เวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง กลุ่มอะตอมที่ไม่สมดุลจะค่อยๆ กลับคืนสภาพปกติหรือรวมตัวเกรนใหม่ที่ปราศจากความเครียด โดยที่โครงสร้างส่วนใหญ่จะไม่เปลี่ยนแปลง เพราะอุณหภูมิไม่สูงจนเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเดิมจนเป็นออสเทนไนต์ (Austenite) ภายหลังเมื่อทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 550-650 องศาเซลเซียส นานพอแล้วปล่อยให้เย็นในอากาศ [4]

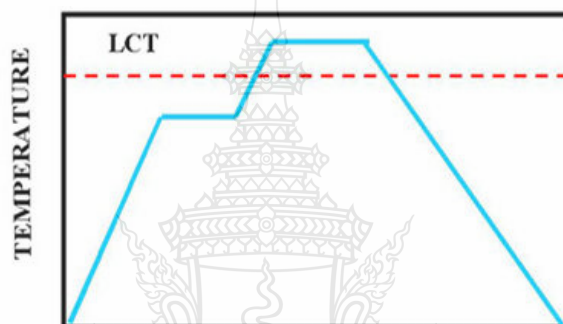


ภาพที่ 2.6 ช่วงอุณหภูมิในการการอบคลายความเค้น หรือการอบได้ภาวะวิกฤต

2.11.3 การอบเพื่อความอ่อนตัวสูง (Spheroidizing Annealing) เป็นกรรมวิธีที่ใช้กับ เหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนตั้งแต่ 0.8 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไปซึ่งโครงสร้างของเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอน 0.8 เปอร์เซ็นต์ เป็นเฟิร์ลไลต์ และเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนตั้งแต่ 0.8 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไปโครงสร้างประกอบด้วยเฟิร์ลไลต์ และ โปรยูเทคตอยด์ซีเมนไทต์ (Pro-Eutectoid Cementite) ตามขอบเกรน ลักษณะโครงสร้างเช่นนี้เหล็กจะมีความเหนียวลดลง และอีกคุณสมบัติทางด้านการกลึงหรือไสจะไม่ดีทำให้ผิวเรียบยากเพราะปลายมีดกลึงตัดผ่านเนื้อเหล็กที่อ่อนและแข็งสลับกันเนื้อเหล็กจะไม่เรียบ การแก้ไขต้องทำให้โปรยูเทคตอยด์ซีเมนไทต์ ไม่ต่อเนื่องและยูเทคตอยด์ซีเมนไทต์ (Eutectoid Cementite) ในเฟิร์ลไลต์ ให้มีลักษณะกลมๆ เล็กๆ (Spherical) ไม่เป็นแถบบางๆ (Plate)ซึ่งทำได้โดยนำเหล็กไปอบที่อุณหภูมิเหนือเส้น A_{C1} เล็กน้อยสำหรับเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนสูงกว่า 0.8 เปอร์เซ็นต์ หรือถ้าเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอน 0.8 เปอร์เซ็นต์ จะอบที่อุณหภูมิต่ำกว่า A_{C1} เล็กน้อยแล้วปล่อยให้สูงกว่า A_{C1} ทำสลับกันไปประมาณ 10 -15 ชั่วโมง จากนั้นปล่อยให้เย็นในอากาศ ในขณะที่เหล็กอยู่เหนือเส้น A_{C1} ซีเมนไทต์ (Cementite) ในเฟิร์ลไลต์ จะขาด เสถียรภาพเกิดการขาดเป็นช่วงๆ และเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า A_{C1} ซีเมนไทต์ จะแตกตัวเป็นออสเทนไนต์ (Austenite) จะไปรวมตัวกับซีเมนไทต์ ที่เหลืออยู่ไม่ให้เกิดแถบบางๆ ถ้าเหล็กถูกอบอยู่ในช่วงนี้ระยษานจะค่อยๆ ปรับตัวเป็นฟอร์มที่เสถียรภาพมากที่สุดคือ ค่อยๆ เปลี่ยนเป็นเม็ดกลมทำให้เหล็กอ่อนตัวและความเหนียว การกลึงและไสจะทำให้เนื้อผิวเรียบ มีดกลึงจะไม่มีโอกาสตัดผ่านซีเมนไทต์เม็ดกลม โดยที่จะหลุดออกหรือไม่ก็เบนหลบไปทำให้มีดกลึงตัดผ่านเฉพาะเนื้อ [4]



ภาพที่ 2.7 อุณหภูมิการอบเพื่อความอ่อนตัวสูงต่ำกว่าเส้น A_{C1}



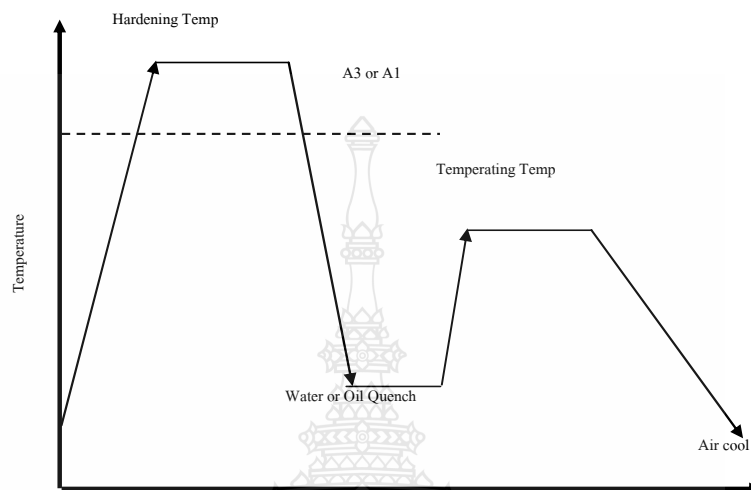
ภาพที่ 2.8 อุณหภูมิการอบเพื่อความอ่อนตัวสูงต่ำและสูงกว่าเส้น A_{C1}

2.12 การอบคืนไฟ (Tempering)

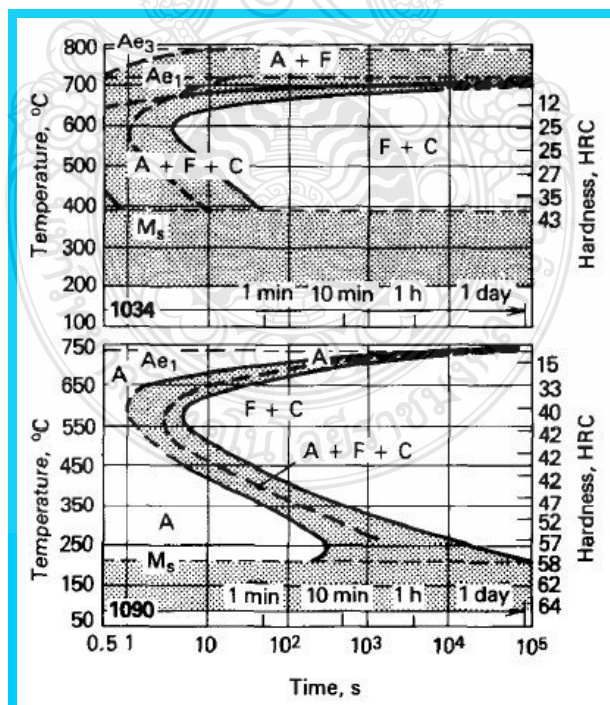
เหล็กที่ผ่านการชุบแข็ง (Hardening) มาแล้วย่อมจะเกิดความเครียด (Strain) ขึ้นภายใน มีความแข็งเพิ่มขึ้นและมีออสเตนไนท์ตกค้างอยู่ทำให้เหล็กจะขาดสมบัติทางด้าน ความเหนียว (Ductility) ทำให้ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งาน ถ้าเกิดมีการกระแทกขึ้นเหล็กอาจจะแตกร้าวได้ จึงจำเป็นต้องปรับปรุงสมบัติเสียใหม่โดยการอบคืนไฟซึ่งมีวิธีการดังนี้

นำเหล็กที่ผ่านการชุบมาแล้วเผาภายในเตาที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 200 - 400 องศาเซลเซียส (เหล็กกล้าคาร์บอน)ทิ้งไว้ประมาณ 1 - 3 ชั่วโมง แล้วเอาออกปล่อยให้เย็นในอากาศธรรมดา เหล็กจะมีสมบัติด้านความเหนียว (Ductility) ดีขึ้น แต่ความแข็งจะลดลงเล็กน้อย ในขณะที่เผาที่อุณหภูมิต่ำ มาร์เทนไซต์จะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยอะตอมคาร์บอนจะเคลื่อนไหวออกจากมาร์เทนไซต์มารวมกันเป็นเฟอร์ไรต์และซีเมนไทต์บางส่วน ที่เป็นเช่นนี้เพราะมาร์เทนไซต์ไม่ใช่โครงสร้างของเหล็กที่สมดุลที่อุณหภูมิบรรยากาศ เมื่อเหล็กได้รับความร้อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเพื่อกลับไปเป็นโครงสร้างที่สมดุลคือเหล็กเฟอร์ไรท์ กับซีเมนไทต์ที่เราต้องเผาที่อุณหภูมิสูงไม่เกิน 400 องศา

เซลเซียส ก็เพื่อไม่ต้องการให้มาร์เทนไซต์ขึ้นตัวหมด เพราะเราต้องการความแข็งของเหล็กอยู่ ถ้าเราเผาให้อุณหภูมิสูงเกิน 400 องศาเซลเซียส ความแข็งจะถูกทำลายหมดโดยทั่วๆ ไปการชุบแข็ง และการคืนไฟจะต้องกระทำติดต่อกันทันทีเพื่อให้ได้เหล็กแข็งและทนแรงกระแทกได้ดีด้วย [4]



ภาพที่ 2.9 ช่วงการชุบแข็ง และการอบคืนไฟ



ภาพที่ 2.10 TTT Diagram

2.13 การชุบเคลือบผิวแบบไอกายภาพ Physical Vapour Deposition (PVD)

การเคลือบผิวแข็ง (Hard Coating) ขึ้นงาน โดยวิธีอาร์คไฟฟ้าด้วยการใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ำแต่กระแสสูง ที่บริเวณผิวของวัสดุที่เคลือบ (Target) เกิดการหลอมละลายที่ผิวหน้าของวัสดุที่เคลือบกลายเป็นไอระเหย เรียกว่า พลาสมา (Plasma) เป็นประจุบวกอยู่ในรูปของไอออนเมื่อทำปฏิกิริยากับก๊าซไนโตรเจน (N_2) หรือมีเทน (C_2H_2) ขึ้นอยู่กับกระบวนการ เนื่องจากขึ้นงานเป็นขั้วลบ ไอระเหยเป็นประจุบวกจึงวิ่งเข้าหาผิวชิ้นงานที่ต้องการเคลือบ ซึ่งกระบวนการเคลือบผิวแข็งกระทำอยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศจึงไม่ปนเปื้อนกับสิ่งแปลกปลอมต่างๆ ผิวเคลือบจึงมีความสมบูรณ์ และวัสดุที่เคลือบผิวขึ้นงานมีความหนาตั้งแต่ 1 ถึง 10 μm ทำให้ผิวหน้าของชิ้นงานเมื่อนำไปใช้งานมีความทนทานและอายุการใช้งานนานยิ่งขึ้น [5-8]

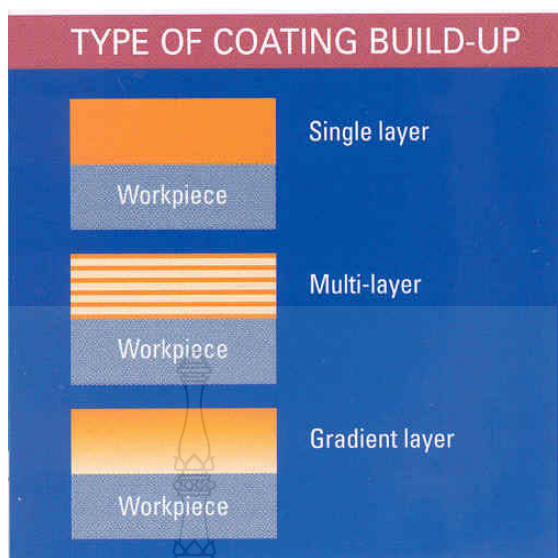
เป็นเทคนิคสำคัญอันหนึ่งสำหรับวิทยาการสมัยใหม่หลายแขนง เช่น วัสดุศาสตร์ Nanotechnology วิศวกรรมผิววัสดุ (Surface Engineering) การชุบ PVD นั้น มีอยู่หลายระบบ ปกติจะทำการชุบในเตาสุญญากาศ กระบวนการชุบมักจะเกี่ยวข้องกับสุญญากาศสูง (High Vacuum) สามารถสร้างฟิล์มบาง (Thin Film) ได้หลายชนิดสำหรับงานแตกต่างกันไปในปัจจุบัน ได้มีการนำเครื่อง PVD ระบบต่างๆ มาทำการชุบงานทั้งทางด้านประดับตกแต่ง อุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และการชุบผิวแข็งให้แก่เครื่องมือตัดเจาะขึ้นรูป รวมถึงอุตสาหกรรมในการผลิตเหรียญในต่างประเทศโดยเฉพาะประเทศในแถบยุโรป โดยใช้ในการเคลือบผิวดวงตราเพื่อยืดอายุการใช้งานของดวงตรา

2.13.1 ประโยชน์ของการชุบเคลือบ และรูปแบบการเคลือบผิวแบบ PVD

การชุบเคลือบผิวแบบ PVD มีประโยชน์กับอุตสาหกรรมที่หลากหลายรวมถึงในอุตสาหกรรมการผลิตเหรียญ สามารถป้องกันการสึกหรอ มีความแข็งสูงถึงประมาณ 2500 HV – 3500 HV ที่ความหนา 1-5 μm มีความต้านทานต่อสารเคมีสูง สัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ ผิวเรียบ การนำความร้อนต่ำ มีการยึดเกาะของแต่ละชั้นดีเยี่ยมแม้จะใช้อุณหภูมิในการเคลือบต่ำทั่วไปไม่เกิน 500 องศาเซลเซียส [9]

รูปแบบการเคลือบผิวบนชิ้นงาน (Type of Coating Build-up) ดังนี้

- 1) ผิวเคลือบชั้นเดียว (Single Layer)
- 2) ผิวเคลือบหลายชั้น (Multi Layer) (แต่ละชั้น เคลือบด้วยวัสดุต่างชนิดสลับกัน)
- 3) ผิวเคลือบผสม (Gradient Layer) (ผิวเคลือบชั้นเดียวแต่วัสดุเคลือบถูกผสมรวมด้วยวัสดุหลายชนิด เช่น อะลูมิเนียมดีเตเนียม AlTi)



ภาพที่ 2.11 ชั้นเคลือบผิวในรูปแบบต่างๆ [9]



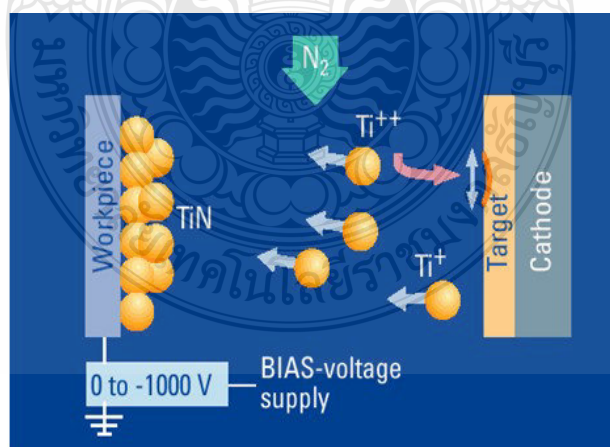
ภาพที่ 2.12 คุณสมบัติของผิวเคลือบ [9]

SELECTED COATING PROPERTIES						
Coating material	TiN	TiCN	CrN	ZrN	AlTiN	W-C:H
Hardness HK (1N)	2500 ±400	2900 ±400	2300 ±300	2400 ±400	3000 ±400	900 to 1400
Temperature resistance °C	550 ±50	450 ±50	650 ±50	600 ±50	800 ±50	350 ±50
Electr. resistance $\mu\Omega$ cm	60 ±20	8 ±20	640	30 ±10	4000– 7000	– –
Thermal conductivity ($Ws^{0.5}$)/m ² K	8800 ±1000	8100 ±1400	8100 ±2600		7000 ±400	7600 ±1000
Coefficient of friction (100Cr6)	0.65– 0.70	0.40– 0.50	0.50– 0.60	0.50– 0.60	0.55– 0.65	0.15– 0.30
Layer thickness (μ m)	2–4	2–4	3–8	2–4	2–4	1–5
Colour	gold- yellow	red-brown/ grey	silver	light gold	anthracite	anthracite/ blue-grey
Ductility	good	satisfactory	very good	good	satisfactory	–

ภาพที่ 2.13 คุณสมบัติของผิวเคลือบแต่ละชนิด [9]

2.13.2 เทคโนโลยี PVD แบบ ARC

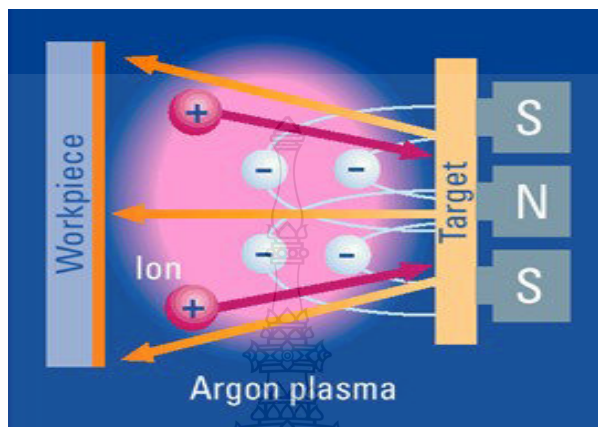
มีการยึดเกาะของสารเคลือบกับพื้นผิวดีเยี่ยมเนื่องจากใช้ประจุไฟฟ้าสูงพื้นผิวจะถูกทำลายเล็กทำให้เกิดการยึดเกาะที่ดี



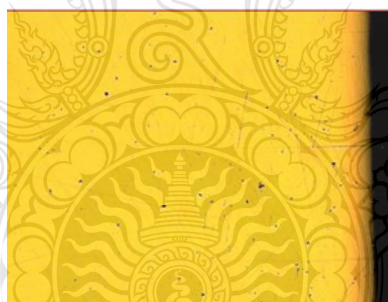
ภาพที่ 2.14 PVD ARC Technology [9]

2.13.3 เทคโนโลยี PVD แบบ Sputter

มีพื้นผิวหลังการเคลือบเรียบและสะอาดมีการเกิดเป็นประจุไฟฟ้าต่ำทำให้การยึดเกาะลดน้อยลง [9]



ภาพที่ 2.15 PVD Sputter Technology [9]



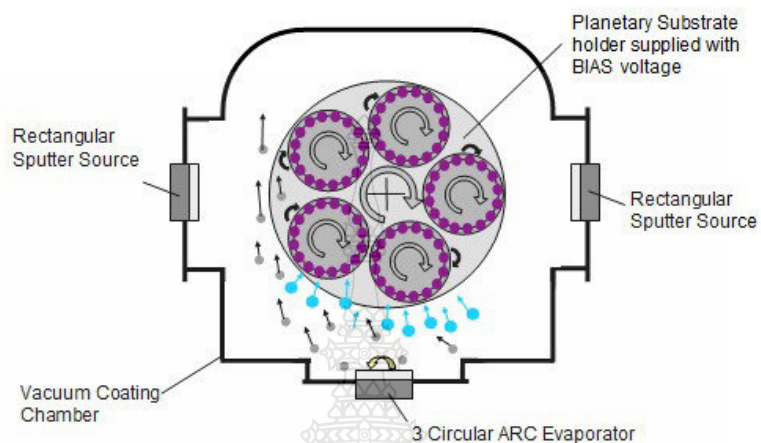
ภาพที่ 2.16 PVD Sputter ก่อนเคลือบผิว [9]



ภาพที่ 2.17 PVD Sputter CrN Coated (1.6 μm) หลังเคลือบ [9]

2.13.4 เทคโนโลยี PVD แบบ ARC and Sputter

เป็นระบบเดียวที่นำเทคโนโลยีทั้งหมดมารวมไว้มีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูงเป็นชนิดที่ใช้งานอยู่ที่สำนักกษาปณ์ [9]



ภาพที่ 2.18 การทำงานของ PVD ARC and Sputter [9]



ภาพที่ 2.19 เครื่อง PVD ARC and Sputter [9]

2.14 การเคลือบผิวด้วยไอเคมี Chemical Vapor Deposition (CVD)

เป็นกรรมวิธีสร้างชั้นฟิล์มที่มีความหนา 4-8 μm ภายในเตาที่อุณหภูมิ 800-1000 องศาเซลเซียส สามารถทำการเคลือบฟิล์ม TiC (ไทเทเนียมคาร์ไบด์) Ti (C, N) (ไทเทเนียมคาร์โบไนไตรด์) TiN (ไทเทเนียมไนไตรด์) ทั้งแบบชั้นเดียวและแบบหลายชั้นบนผิวโค้งให้มีความละเอียดและสม่ำเสมอ มีแรงยึดเกาะสูงได้การเคลือบผิวแบบ CVD มีข้อดีได้แก่ เพิ่มความต้านทานการสึกหรอ แต่ความแข็งแรงจะมีค่าลดลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งอัลลอยที่มีเกรนละเอียดถึงละเอียดปานกลาง ค่าความแข็งแรงจะลดลงมากกว่าอัลลอยที่มีเกรนหยาบ การเคลือบผิวแบบวิธีนี้สามารถนำไปใช้ในการเคลือบผิวแบบหลายชั้นได้ (Multilayer Coating) เนื่องจากสารเคลือบขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊สที่ปล่อยเข้าไป [10]

Characteristics	Process	PVD (BALINIT®)	CVD
Coating Temperature [°C]		< 500	1020
Coating thickness [μm]		1 - 4	10-20
Coating roughness R_z [μm]		like substrate	> 2
Internal stress [GPa]		1 - 4 (compressive)	< 1 (tensile)
Coating adhesion		ion etching, metallic bonding	diffusion
Coating structure		fine grain	coarse grain
Influence on the substrate		insignificant	TRS reduction up to 30%
Mechanical stability of cutting edges		like substrate	brittle (eta-phase)
Cutting edge shape after coating		sharp	rounded
Heat Treatment		before coating	after coating
Distortion		no distortion with correct heat treatment	distortion through thermal load and subsequent heat treatment
Post Treatment		generally not necessary	intensive polishing necessary

ภาพที่ 2.20 การเปรียบเทียบกระบวนการเคลือบผิวแบบ PVD และ แบบ CVD [10]

2.15 การควบคุมคุณภาพ (Quality Control)

ในการประกันคุณภาพที่ดีนั้น มีความจำเป็นต้องสร้างความเชื่อมั่นในผลิตภัณฑ์และบริการอย่างครบวงจรชีวิต ซึ่งประกอบด้วย คุณภาพในการออกแบบ (Quality of Design) และคุณภาพของความถูกต้องในการผลิต (Quality of Conformance) [11]

Taguchi (1986) ได้กำหนดบทบาทของการควบคุมคุณภาพในขั้นตอนการออกแบบ (Offline Quality Control) และในขั้นตอนการผลิต (On-Line Quality Control) หากต้องการประกันคุณภาพในการออกแบบ จะต้องดำเนินงานในขั้นตอนการวิจัยและพัฒนา (R&D) เท่านั้น ในขณะที่คุณภาพของความถูกต้องในการผลิตสามารถดำเนินการได้ทั้งช่วงออกแบบและผลิตโดยยกเว้นเฉพาะช่วงบริการหลังการขายเท่านั้น

2.16 ประเภทของการควบคุมคุณภาพเพื่อการยอมรับ

ประเภทของการควบคุมคุณภาพเพื่อการยอมรับสามารถจำแนกเป็น 4 ประเภท คือ

2.16.1 การตรวจสอบแบบ 100 % หมายถึง การตรวจสอบผลิตภัณฑ์ที่ละหน่วยทุกหน่วย

2.16.2 การตรวจสอบเป็นครั้งคราว (Spot – Check Inspection) หมายถึง การตรวจสอบแบบเลือกตามใจชอบโดยมิได้วางอยู่บนเกณฑ์ด้านวิทยาศาสตร์ ได้แก่ การตรวจสอบงานชิ้นแรก (First-Item Inspection) การตรวจสอบงานชิ้นสุดท้าย (End-Item Inspection) และการตรวจสอบลาดตระเวน (Patrol Inspection) เป็นต้น

2.16.3 การให้คำรับรอง (Certification) หมายถึง การควบคุมคุณภาพเพื่อการยอมรับเป็นผู้ออกแบบไปประกาศนียบัตรรับรองคุณภาพให้ ซึ่งในปัจจุบันประเทศไทยยังมีสถาบันดังกล่าวไม่มากนัก และโดยส่วนใหญ่จะเป็นสถาบันภาครัฐ แต่เชื่อว่าในอนาคตจะมีสถาบันภาคเอกชนที่ทำธุรกิจด้านนี้เพิ่มมากขึ้นตามจำนวนความต้องการที่มีแนวโน้มว่าจะเพิ่มมากขึ้น โดยลำดับ

2.16.3 การชักสิ่งตัวอย่างเพื่อการยอมรับ (Acceptance Sampling) หมายถึง การตรวจสอบสิ่งตัวอย่าง (Sample) ที่เลือกขึ้นมาจากงานทั้งหมดโดยวิธีการทางสถิติด้วยกฎของความน่าจะเป็น (Probability) และอาศัยคุณลักษณะของสิ่งตัวอย่างที่ตรวจสอบได้ในการอธิบายคุณลักษณะของชิ้นงานทั้งหมดที่ต้องการตัดสินใจ

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบประเภทของการควบคุมคุณภาพเพื่อการยอมรับ [12]

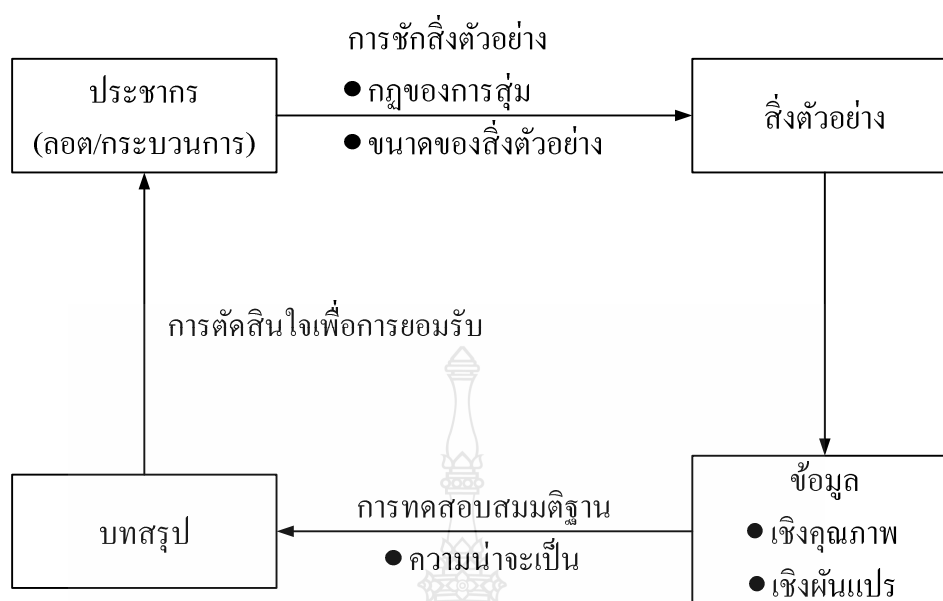
ประเภทของการควบคุม	ข้อดี	ข้อเสีย
1. การตรวจสอบแบบ 100 %	<ul style="list-style-type: none"> • ในทางทฤษฎีแล้วเชื่อว่าจะเป็นวิธีที่ทำให้ได้ผลที่ปลอดข้อบกพร่อง 	<ul style="list-style-type: none"> • ในทางปฏิบัติแล้วไม่สามารถประกันได้ว่าปลอดข้อบกพร่อง เนื่องจากความล้าของพนักงานและการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ • ค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบสูงมาก
2. การตรวจสอบเป็นครั้งคราว	<ul style="list-style-type: none"> • ใช้ได้ดีกรณีที่ผลการตรวจมิได้มีผลทางคุณภาพที่รุนแรงมากนัก • ประหยัดที่สุด 	<ul style="list-style-type: none"> • ผลการตรวจสอบไม่สามารถใช้อธิบายถึงคุณลักษณะของชิ้นงานทั้งหมดที่ต้องการตัดสินใจได้

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบประเภทของการควบคุมภาพเพื่อการยอมรับ (ต่อ)

ประเภทของการควบคุม	ข้อดี	ข้อเสีย
3. การให้คำรับรอง	<ul style="list-style-type: none"> • ไม่มีปัญหาในการจัดการ เนื่องจากเป็นวิธีที่ขึ้นอยู่กับความเชื่อถือของลูกค้ามีต่อเรา (Mark) หรือคำรับรองของสถาบัน 	<ul style="list-style-type: none"> • มีความเสี่ยงต่อการทำธุรกิจ ทั้งนี้เพราะว่าคุณภาพในยี่ห้อจะมีผลอย่างมากต่อการตัดสินใจทำธุรกิจด้วยของลูกค้า
4. การชักสิ่งตัวอย่างเพื่อการยอมรับ	<ul style="list-style-type: none"> • เป็นวิธีการค่อนข้างประหยัด • เป็นวิธีการที่ค่อนข้างจะใช้เวลาในการตรวจสอบน้อย ทำให้พนักงานตรวจสอบไม่ซ้ำ • ให้ผลที่น่าเชื่อถือโดยการอธิบายผ่านกฎของความน่าจะเป็น • มีการทำร้ายผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการตรวจสอบต่ำ • ให้ผู้ผลิตและผู้ซื้อสามารถเจรจาต่อรองราคากันได้ โดยอาศัยการพิจารณาจากความเสี่ยงและแผนการ • เหมาะกับกรณีการตรวจสอบแบบทำลาย 	<ul style="list-style-type: none"> • มีความเสี่ยงในการตัดสินใจเกี่ยวกับคุณลักษณะของชิ้นงานทั้งหมดที่ต้องการตัดสินใจเสมอ • มิได้ให้รายละเอียดทั้งหมดเกี่ยวกับคุณลักษณะของชิ้นงานทั้งหมดที่ต้องการตัดสินใจ

2.17 การชักสิ่งตัวอย่างเพื่อการยอมรับ

เทคนิคของการชักสิ่งตัวอย่างเพื่อการยอมรับ เป็นเทคนิคที่อาศัยการประยุกต์หลักการทางสถิติและความน่าจะเป็นในการเลือกสิ่งตัวอย่างจากสิ่งที่ต้องการตัดสินใจ (ทางสถิติเรียกว่า ประชากร) และอาศัยการอนุมานทางสถิติ (Statistical Inference) เพื่อการตัดสินใจโดยวิธีการทดสอบสมมติ (Test of Hypothesis) เพื่อพิจารณาว่าคุณภาพของประชากรนั้นควรได้รับการยอมรับ (Accept) หรือไม่ [12]



ภาพที่ 2.21 การชักสิ่งตัวอย่างเพื่อการยอมรับ [12]

2.18 การสุ่มตัวอย่างเพื่อยอมรับแบบ Variables

ข้อดีและข้อจำกัดของการสุ่มตัวอย่างแบบ Variables

ข้อดีที่สำคัญของแผนสุ่มตัวอย่างแบบ Variables คือในขณะที่มีโค้ง OC เดียวกันหรือมีการปกป้องกันที่เท่ากัน จะมีขนาดตัวเล็กกว่าที่ต้องการโดยแผนสุ่มตัวอย่างแบบ Attribute ดังนั้นแผนสุ่มตัวอย่างเพื่อการยอมรับแบบ Variables ที่มีระดับการปกป้องกันเดียวกันกับแผนสุ่มตัวอย่างแบบ Attribute จะต้องการขนาดตัวอย่างที่เล็กกว่า การวัดข้อมูลที่ต้องการโดยแผนสุ่มตัวอย่างแบบ Variables อาจมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าค่าใช้จ่ายสำหรับการตรวจสอบข้อมูลแบบ Attribute อย่างไรก็ตามการลดลงของขนาดตัวอย่างที่ได้รับอาจมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าการชดเชยที่มีค่าตรวจสอบสูงขึ้น ตัวอย่างเช่นสมมุติว่าแผนสุ่มตัวอย่างแบบ Attribute ต้องการขนาดตัวอย่าง 100 หน่วย แต่ในแผนสุ่มตัวอย่างแบบ Variables ต้องการขนาดตัวอย่างเพียง 65 หน่วย ถ้าค่าใช้จ่ายของการวัดข้อมูลแบบ Variables น้อยกว่า 1.61 เท่าของการวัดข้อมูลแบบ Attribute ทำให้แผนการสุ่มตัวอย่างแบบ Variables มีประสิทธิภาพในการประหยัดมากกว่าถ้าพิจารณาเฉพาะค่าใช้จ่ายเพียงอย่างเดียว ถ้าใช้การตรวจสอบแบบทำลายแผนสุ่มตัวอย่างแบบ Variables จะมีประโยชน์มากขึ้นสำหรับการลดค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบ

ข้อดีข้อที่ 2 คือ การวัดข้อมูลแบบ Variables โดยปกติจะให้ข้อมูลมากกว่าในเรื่องของกระบวนการผลิตหรือของรุ้นเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลแบบ Attribute โดยทั่วไปการวัดคุณสมบัติคุณภาพที่เป็นตัวเลขจะมีประโยชน์มากกว่าการแยกสินค้าเป็นของเสียหรือของดี

ข้อดีข้อสุดท้ายที่จะกล่าวถึงคือเมื่อระดับคุณภาพที่ยอมรับได้มากน้อย ขนาดตัวอย่างที่ต้องการ โดยแผนสุ่มตัวอย่างแบบ Attribute จะโตมาก ในกรณีนี้จะมีข้อดีอย่างเห็นได้ชัดถ้าเปลี่ยนไปใช้การวัดแบบ Attribute ดังนั้นผู้ผลิตจำนวนมากเริ่มต้นกำหนดจำนวนของเสียในการผลิต 1 ล้าน (PPM) การสุ่มตัวอย่างแบบ Variables ยิ่งน่าสนใจมากขึ้น

แผนสุ่มตัวอย่างแบบ Variable มีข้อจำกัดหลายข้อ ซึ่งข้อเสียหลักคือ ทราบการกระจายของคุณสมบัติคุณภาพ ยิ่งไปกว่านั้นแผนสุ่มตัวอย่างแบบ Variables มาตรฐานส่วนใหญ่สมมติว่าการกระจายของคุณสมบัติคุณภาพเป็นแบบปกติ ถ้าการกระจายของคุณสมบัติคุณภาพไม่เป็นปกติ และใช้แผนสุ่มตัวอย่างที่สมมติว่าคุณสมบัติคุณภาพแบบกระจายปกติ ทำให้ความเสี่ยงของการยอมรับหรือปฏิเสธ รุ้นที่กำหนดคุณภาพเบี่ยงเบนไปจากค่าที่กำหนด จำกัดข้อที่ 2 ของการสุ่มตัวอย่างแบบ Variables ก็จะต้องใช้แผนสุ่มตัวอย่างแยกจากกันสำหรับแต่ละคุณสมบัติคุณภาพที่ต้องการตรวจสอบตัวอย่างเช่นถ้าตรวจสอบ 4 คุณสมบัติคุณภาพของชิ้นค่าขึ้นหนึ่ง จำเป็นที่จะต้องมีแผนสุ่มตัวอย่างการตรวจสอบ 4 แผน ถ้าสินค้าเดียวกันนี้ตรวจสอบภายใต้การสุ่มแบบ Attribute ก็จะสามารถใช้แผนสุ่มตัวอย่างเดียว ข้อจำกัดสุดท้ายคือเป็นไปได้ว่าการใช้การสุ่มตัวอย่างแบบ Variables จะนำไปสู่การปฏิเสธรุ้นได้ถึงแม้ว่าการตรวจสอบตัวอย่างที่แท้จริงไม่พบของเสียเลย ในขณะที่สิ่งนี้ไม่เกิดขึ้นบ่อยแต่เมื่อเกิดขึ้นก็จะเป็นสาเหตุของความไม่สบายใจทั้งองค์กรผู้ส่งมอบและผู้ซื้อได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าการปฏิเสธรุ้นเป็นสาเหตุที่ทำให้ต้องหยุดการผลิตหรือผลิตในอัตราที่น้อยลง

2.19 การสุ่มตัวอย่างแบบ Chain

ในกรณีที่การตรวจสอบเป็นแบบทำลายหรือมีราคาแพงมาก จำเป็นต้องใช้แผนสุ่มตัวอย่างที่มีขนาดตัวอย่างขนาดเล็ก แผนสุ่มตัวอย่างที่มีขนาดตัวอย่างขนาดเล็กมักจะมีจำนวนของเสียที่ยอมรับเป็น 0 ซึ่งปกติจะไม่นิยมใช้เนื่องจากโค้ง OC จะเป็นแบบ Convex ตลอดเส้น ซึ่งหมายความว่าความน่าจะเป็นที่จะยอมรับรุ้นเริ่มลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อสัดส่วนของเสียเริ่มมากกว่า 0 ซึ่งจะไม่ยุติธรรมสำหรับผู้ผลิต ในกรณีของการใช้แผนการตรวจสอบโดยกรอง ผู้ซื้อจะต้องตรวจสอบ 100 % ของรุ้นจำนวนมากซึ่งน่าจะมีคุณภาพที่ยอมรับได้ แผนสุ่มตัวอย่างที่มีจำนวนของเสียที่ยอมรับเป็น 0 และมากกว่า 0

2.20 การสุ่มตัวอย่างชนิดต่อเนื่อง (Continuous Sampling)

แผนสุ่มตัวอย่างทั้งหมดที่ได้กล่าวถึงมาแล้วเป็นการตรวจสอบที่แบ่งเป็นรุ่น การใช้แผนเหล่านี้จะมีการแบ่งสินค้าเป็นรุ่นๆ และวัตถุประสงค์ของการสุ่มตัวอย่างก็เพื่อตัดสินรุ่น อย่างไรก็ตาม ในการผลิตสินค้าบางชนิดโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อกระบวนการประกอบมีความซับซ้อน ธรรมชาติของการผลิตไม่มีผลให้แบ่งสินค้าเป็นรุ่น ตัวอย่างเช่นการผลิตสินค้าอิเล็กทรอนิกส์หลายๆ ชนิด ได้แก่ คอมพิวเตอร์ซึ่งมีการประกอบบนสายพาน

เมื่อการผลิตสินค้าเป็นแบบต่อเนื่อง มี 2 วิธีที่กำหนดรุ่น วิธีแรกให้สินค้าสะสมในกระบวนการประกอบจนถึงค่าที่กำหนด ซึ่งจะมีข้อเสียคือมีสินค้ากำลังผลิตตามจุดต่างๆ ที่ต้องการพื้นที่อาจนำไปสู่ปัญหาความปลอดภัย และโดยปกติจะเป็นวิธีจัดการสายการผลิตที่ไม่มีประสิทธิภาพ วิธีที่ 2 กำหนดส่วนใดๆ ของสินค้าที่ผลิตได้เป็นรุ่น ข้อเสียของวิธีนี้คือถ้ารุ่นถูกปฏิเสธและทำการตรวจสอบ 100% อาจต้องมีการเรียกสินค้าที่ผ่านจุดนี้ไปแล้วมาตรวจสอบ ซึ่งจะต้องแยกชิ้นส่วนที่ประกอบแล้ว หรือทำร้ายบางส่วนของสินค้าที่ประกอบไประดับหนึ่งแล้ว

ด้วยเหตุผลนี้แผนสุ่มตัวอย่างพิเศษสำหรับการผลิตสินค้าแบบต่อเนื่องได้ถูกพัฒนาขึ้น แผนสุ่มตัวอย่างแบบต่อเนื่องประกอบด้วยขั้นตอนการสับเปลี่ยนระหว่าง (1) การสุ่มตัวอย่าง (2) การตรวจสอบ 100% (ตรวจทุกชิ้น) โดยปกติแผนการสุ่มตัวอย่างจะเริ่มต้นด้วยการตรวจสอบ 100 % และเมื่อจำนวนที่ตรวจสอบที่กำหนด i หน่วยไม่มีข้อเสียเลย (จำนวนหน่วย i โดยปกติถูกเรียกว่า Clearance Number) ก็จะเปลี่ยนไปใช้แบบสุ่มตัวอย่าง การสุ่มตัวอย่างจะดำเนินต่อเนื่องจนกระทั่งได้พบของเสียจำนวนที่กำหนดก็จะกลับมาตรวจสอบ 100% แผนสุ่มตัวอย่างแบบต่อเนื่องเป็นแผนการตรวจสอบโดยรองในกรณีที่คุณภาพของสินค้าสามารถปรับปรุงได้ในส่วนของการตรวจสอบทุกชิ้น

2.21 ความเชื่อมั่น (Reliability)

อาจให้นิยามง่ายๆ ดังนี้ “Reliability คือคุณภาพในระยะยาว” นั่นคือความสามารถของสินค้าที่จะ Perform หน้าที่ที่ถูกกำหนดในช่วงของเวลา สินค้าที่ใช้งานได้ในระยะเวลานานคือสินค้าที่ Reliable เนื่องจากสินค้าทุกหน่วยจะไม่ทำหน้าที่ (Fail) ในช่วงเวลาต่างๆ กัน Reliability ก็คือความน่าจะเป็นนั่นเอง

นิยามที่เหมาะสมคือ “Reliability คือความน่าจะเป็นที่สินค้าจะ Perform หน้าที่ที่ได้กำหนดไว้อย่างสมบูรณ์ในช่วงเวลาที่กำหนด ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เหมาะสม” จากนิยามนี้จะมี 4 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับ Reliability คือ (1) ค่าตัวเลข (Numerical Value) (2) หน้าที่ที่กำหนด (Intended Function) (3) อายุ (Life) และ (4) สภาพแวดล้อม (Environmental Conditions)

ค่าตัวเลขคือความน่าจะเป็นที่สินค้าจะทำหน้าที่ได้เป็นอย่างดีในช่วงเวลาที่กำหนด ดังนั้นค่า 0.93 หมายถึงความน่าจะเป็นที่สินค้า 93 ใน 100 หน่วยจะทำงานได้หลังจากจากระยะเวลาที่กำหนด และมีสินค้า 7 หน่วยจะใช้งานไม่ได้หลังจากเวลาที่กำหนดนั้น การกระจายความน่าจะเป็นเฉพาะด้านจะถูกนำมาใช้เพื่ออธิบายการใช้งานไม่ได้ของสินค้า

ปัจจัยที่สองจะเกี่ยวกับหน้าที่ที่กำหนดของสินค้า สินค้าจะถูกออกแบบสำหรับการประยุกต์ใช้งานเฉพาะ และถูกหวังว่าจะจะสามารถทำหน้าที่ดังกล่าวเหล่านั้นได้ ตัวอย่างเช่น รอกยกภาระไฟฟ้าจะถูกหวังว่าจะสามารถยกภาระที่ออกแบบไว้ได้ โดยปกติผู้ใช้จะไม่หวังว่าภาระได้เกินภาระที่กำหนด ไขควงได้ถูกออกแบบเพื่อหมุนสกรู ไม่ใช่เปิดกระป๋องสี

ปัจจัยที่ 3 ในนิยามของ Reliability คืออายุการใช้งานที่กำหนดของสินค้า นั่นคือจะใช้สินค้าได้นานเท่าใด เช่นอายุการใช้งานของยางรถยนต์อาจกำหนดได้หลายลักษณะที่แตกต่างกันเช่น 36 เดือน หรือ 70,000 กทม. ซึ่งอยู่กับโครงสร้างของยาง อายุการใช้งานของสินค้าจะถูกกำหนดในลักษณะการใช้ เวลาหรือทั้งสองปัจจัย

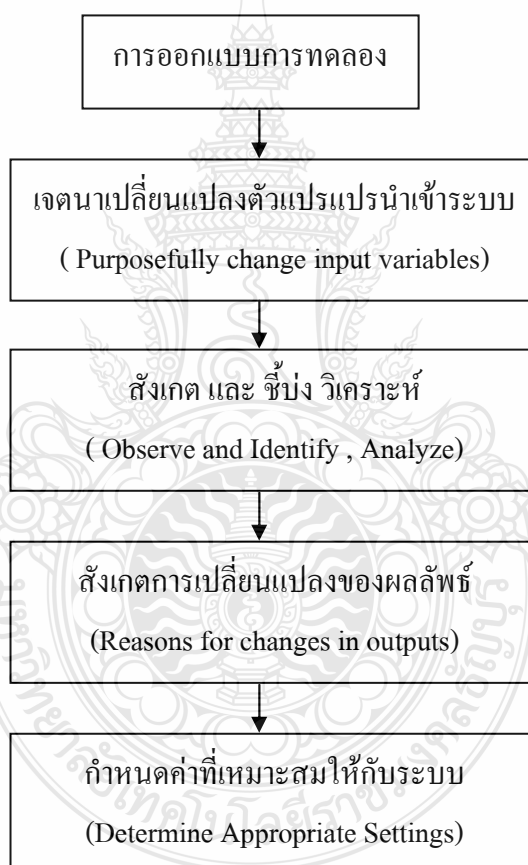
ปัจจัยสุดท้ายในนิยามจะเกี่ยวกับสภาพแวดล้อม สินค้าที่ถูกออกแบบให้ใช้ในอาคาร เช่นเก้าอี้ที่ใช้ในห้องเรียนจะไม่สามารถใช้ได้ดีในกลางแจ้งที่มีแสงแดดและสายฝน สภาพแวดล้อมหมายถึงรวมถึงลักษณะของการเก็บรักษาและการขนส่งของสินค้า สิ่งเหล่านี้อาจมีความรุนแรงมากกว่าการใช้ปกติ

2.22 การออกแบบการทดลอง (Experimental Design or Design of Experiments)

การออกแบบ (Design) หมายถึง การเลือกรูปแบบที่เหมาะสมในการศึกษาระบบที่สนใจ

การทดลอง (Experiments) หมายถึง สิ่งที่เกิดขึ้นเพื่อการค้นหาองค์ความรู้หรือข้อมูลส่วนที่ยังขาดไปเกี่ยวกับกระบวนการหรือระบบที่สนใจโดยผู้ทำการศึกษาในสาขานั้นๆ การออกแบบแผนการทดลอง (Experimental Design or Design of Experiments) คือ การทดสอบเพียงครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input Variables) ในระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อที่จะทำให้สามารถสังเกตและชี้สาเหตุต่างๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Outputs or Responses) จากกระบวนการหรือระบบนั้น โดยตัวแปรนำเข้าจะถูกจัดแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ควบคุมได้ เรียกว่า “ตัวแปร (หรือปัจจัย) ที่ควบคุมได้ (Controllable Variables or Factors) หรือตัวแปร (หรือปัจจัย) ที่สามารถออกแบบได้” (Design Variable or Factors) และกลุ่มที่ไม่สามารถควบคุมได้ เรียกว่า “ตัวแปร (หรือปัจจัย) ที่รับกวนระบบ”

การกำหนดตัวแปรที่ควบคุมได้และตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ขึ้นอยู่กับระบบแต่ละระบบ ซึ่งโดยหลักแล้วตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้หรือตัวแปรรบกวน (Noise Variables) มักจะเกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมในธรรมชาติ เช่น ลม ฝุ่นละออง ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิภายนอก หรือส่วนของอุปกรณ์หรือระบบที่ยากแก่การควบคุมเนื่องจากในการควบคุมต้องใช้ความระมัดระวังสูง เพราะเมื่อชำรุดอาจส่งถึงต้นทุนค่าใช้จ่ายที่สูงมาก ส่วนตัวแปรที่ควบคุมได้ เช่น ที่มาของวัตถุดิบ เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต พนักงานที่ควบคุม (ซึ่งในบางระบบอาจพิจารณาให้เป็น “ตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้”) อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต เป็นต้น ในทุกกระบวนการสามารถที่จะระบุและบันทึกไว้เพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์ต่อไปได้โดยสรุปในการออกแบบการทดลองมีหลักการสำคัญดังนี้



ภาพที่ 2.22 หลักการสำคัญในการออกแบบการทดลอง

ดังนั้นในภาพรวมการออกแบบการทดลองจึงมีส่วนสำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะในส่วนของ การออกแบบกระบวนการ ในด้านการกำหนดค่าพารามิเตอร์ หรือค่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ใช้ในระบบ

หรือกระบวนการเช่นในการผลิตน้ำอัดลม การกำหนดส่วนผสมเพื่อให้ได้รสชาติที่เหมาะสม กำหนดความเร็วของสายพานเพื่อประโยชน์ในการบรรจุจะทำให้สูญเสีย น้ำอัดลม น้อยที่สุด เป็นต้น ซึ่งในทางวิศวกรรมจะเรียกขั้นตอนนี้ว่า “Parameter Design” ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในการออกแบบกระบวนการ (Design Process) ในระยะกลาง [13]

2.23 ประโยชน์ของการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์ที่สำคัญพอสรุปได้เป็น 4 ส่วน คือ

2.23.1 กำหนดตัวแปรที่ควบคุมได้ (X's) ที่มีอิทธิพลสูงสุดต่อการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์หรือตัวแปรตอบสนอง (Y)

2.23.2 กำหนดค่าของตัวแปร (ปัจจัย) ที่ควบคุมได้ (X's) ที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนอง (Y) เพื่อให้โอกาสที่ผลของค่าตัวแปรตอบสนองมีค่าใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายที่ต้องการมากที่สุด

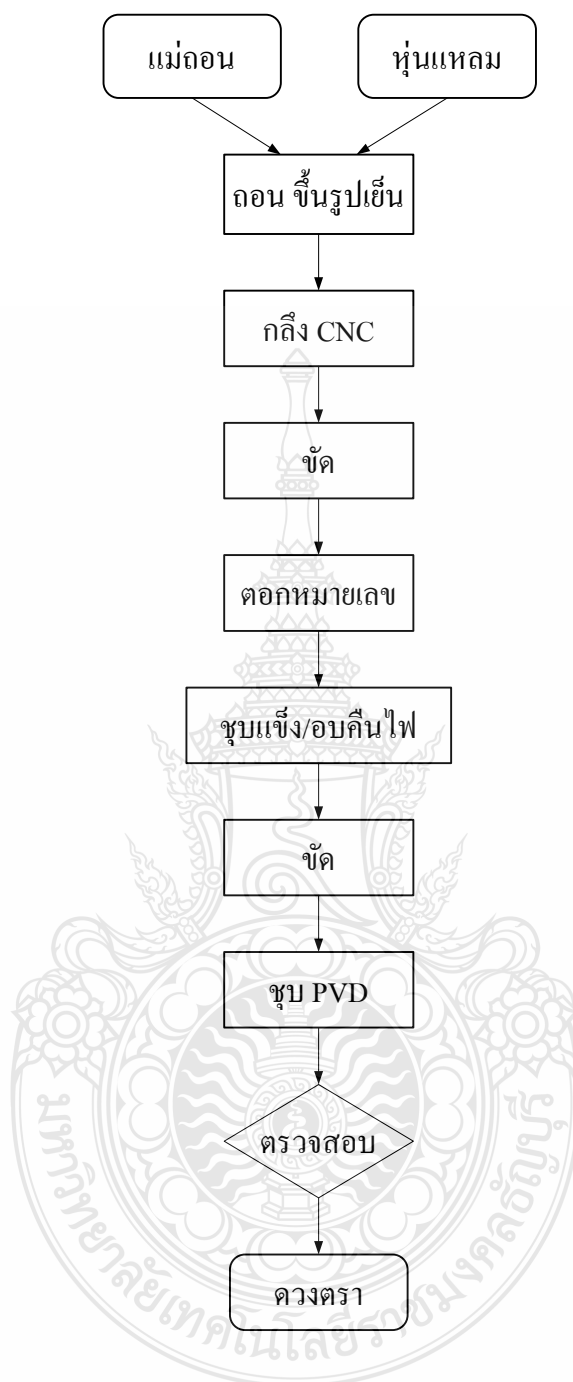
2.23.3 กำหนดค่าของปัจจัยที่ควบคุมได้ (X's) ที่มีผลต่อค่าตัวแปรตอบสนอง (Y) โดยทำให้ค่าความแปรปรวนของ Y มีค่าต่ำที่สุด

2.23.4 กำหนดค่าของปัจจัยที่ควบคุมได้ (X's) ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง (Y) เพื่อให้ผลกระทบของตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ (Z's) มีค่าน้อยที่สุด

ในการทำการออกแบบการทดลองนั้น ต้องทำการตั้งวัตถุประสงค์ขึ้นก่อน และวัตถุประสงค์ในลำดับที่สูงขึ้นนั้นจะบรรลุได้ต้องผ่านการวิเคราะห์ในส่วนก่อนหน้าไปพร้อมกันด้วย เช่น ถ้าตั้งวัตถุประสงค์ตาม (2) ไว้ต้องทำการวิเคราะห์ (1) มาก่อน หรือถ้าตั้งวัตถุประสงค์ตาม (3) ไว้ต้องทำการวิเคราะห์ (1) และ (2) ไปพร้อมกันด้วย

2.24 ขั้นตอนการผลิตวงจร

กระบวนการผลิตวงจร การชุบเคลือบผิวด้วยวิธีการ PVD ชนิดสารเคลือบ CrN ซึ่งขั้นตอนการผลิตวงจรมีดังนี้



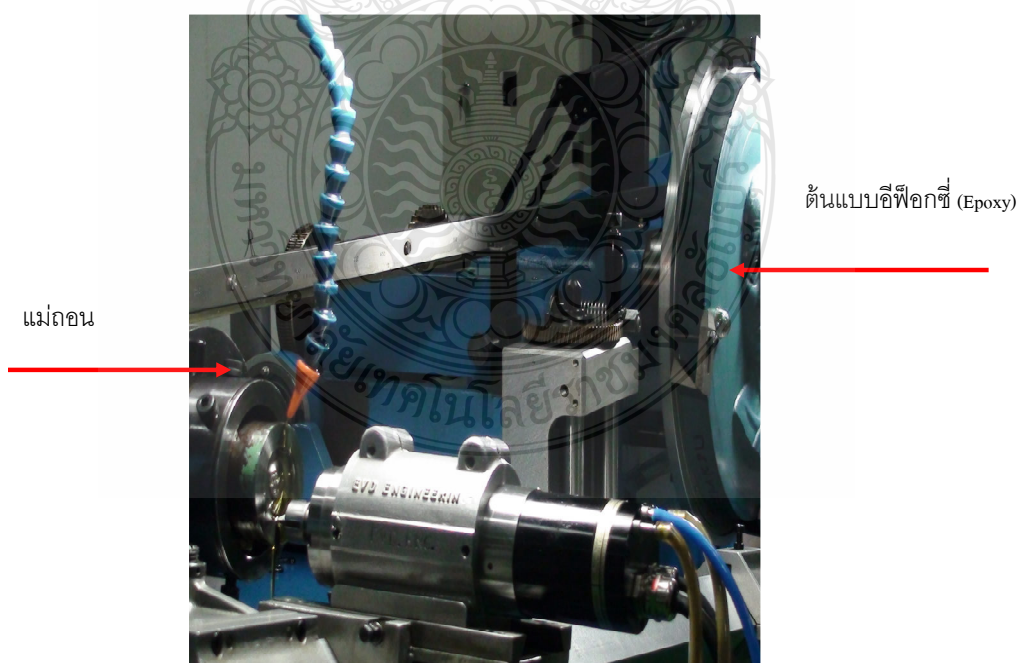
ภาพที่ 2.23 กระบวนการผลิตดวงตรา

จากแผนภาพขั้นตอนกระบวนการผลิตดวงตรา (แม่พิมพ์) ผู้ทำการวิจัยต้องให้ความหมายของคำต่างๆ ที่ใช้เรียกในกระบวนการผลิตดวงตรา เพื่อจะได้เป็นที่เข้าใจถูกต้องตรงกัน พร้อมทั้งภาพประกอบเพื่อการสื่อสารให้ชัดเจนยิ่งขึ้น ทำให้เกิดความเข้าใจมากยิ่งขึ้น



ภาพที่ 2.24 แม่ตอน

แม่ตอน (Master Die) เป็นต้นแบบที่เกิดจากการผลิตด้วยเครื่องจักรเครื่องมือกลที่เรียกว่า เครื่องย่อลาย คือการนำต้นแบบที่ทำจากอีพ็อกซี่ (Epoxy) ทำการลอกลายลงบนวัสดุที่ทำแม่ตอน



ภาพที่ 2.25 ขั้นตอนการย่อลาย

แม่ถอนเป็นต้นแบบที่เกิดจากการผลิตด้วยเครื่องจักรเครื่องมือกลที่เรียกว่าเครื่องย่อลาย คือ การนำต้นแบบที่ทำจากอีพ็อกซี่ (Epoxy) ทำการลอกลายลงบนวัสดุที่ทำแม่ถอน

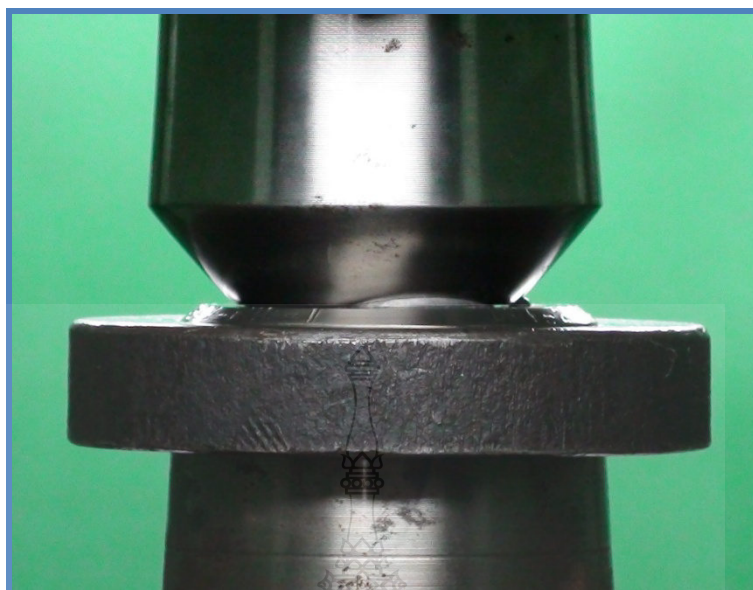


ภาพที่ 2.26 หุ่นແหลມ

หุ่นແหลມคือส่วนที่ใช้ผลิตดวงตรา (Die) โดยนำวัสดุที่ใช้ผลิตดวงตรานำมากลึงขึ้นรูปให้ได้ตามสัดส่วนที่ต้องการ ขนาดโดยทั่วไป $\varnothing 31$ มม. มุม 80° สูง 30 มม.



ภาพที่ 2.27 เครื่องถอนดวงตรา (แม่พิมพ์)



ภาพที่ 2.28 ลักษณะการกดของเครื่องถนอมดวงตรา

ภาพที่ 2.28 แสดงลักษณะการกดระหว่างแม่ตอกกับหุ่นแหลม ในกระบวนการผลิตจริงจะมีกระบอกสวมปิดเพื่อบังคับการกดให้เป็นไปในทิศทางที่ต้องการ แต่เพื่อจะได้เห็นภาพชัดเจนยิ่งขึ้น จึงได้ทำการกดโดยไม่ใช้กระบอกเพื่อให้เห็นภาพชัดเจนยิ่งขึ้น



ภาพที่ 2.29 ลักษณะหุ่นแหลมหลังผ่านการกดแล้ว



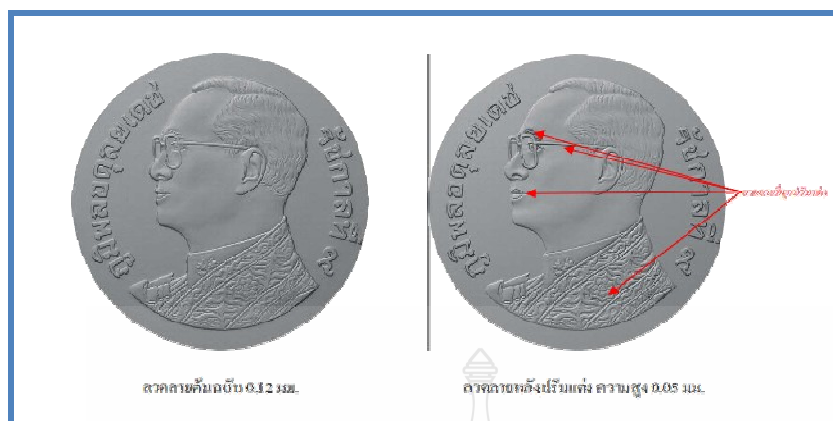
ภาพที่ 2.30 ลักษณะหุ่นแหลมหลังผ่านการกดแล้วนำมาคลึงให้ได้รูปทรงเพื่อประกอบเข้ากับเครื่องปั๊มเหรีญ

หลังจากที่ได้ดวงตราสำเร็จรูปแล้วนำไปเข้ากระบวนการชุบแข็งด้วยเตาสุญญากาศทำการอบคืนไฟและชุบเคลือบผิวด้วยวิธีการ PVD ทำการทดสอบ

2.25 เทคนิคการผลิตเหรีญกษาปณ์สำเร็จรูปโลหะชุบเคลือบไส้เหล็ก ณ โรงกษาปณ์ ประเทศฟินแลนด์

ในกรณีของเหรีญกษาปณ์ชนิดราคา 1 บาท ได้มีการเปลี่ยนโลหะจากคิวโปรนิกเกิลเป็นไส้เหล็กชุบนิกเกิล ทำให้ค่าความแข็งของเหรีญตัวเปล่าเพิ่มขึ้นจาก 70-85 HV(10) เป็น Max. 110 HV (30) วิธีการที่จะรองรับการผลิตก็จะต้องเพิ่มความหนาของตัวเปล่าหรือลดความสูงของลวดลายและลวดลายที่บางลงจะต้องมีความคมชัด จึงจะสามารถตีตรา (Pressing) ได้ดี

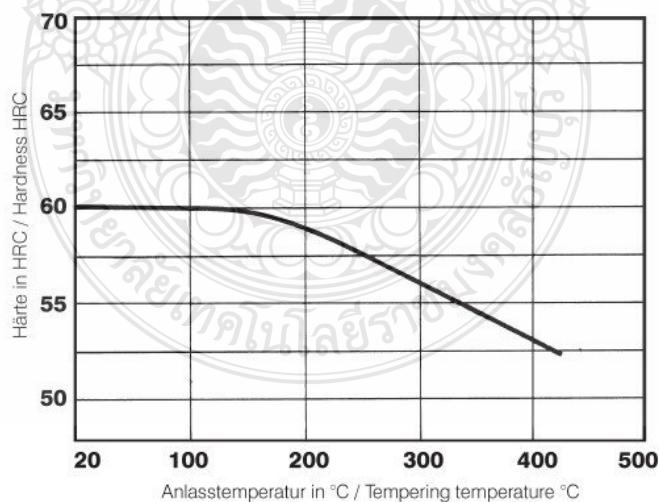
ในการผลิตเหรีญ 1 บาท ไส้เหล็กเคลือบนิกเกิลให้กับประเทศไทยนั้น โรงกษาปณ์ประเทศฟินแลนด์ได้มีการทดลองลดความสูงของลวดลายของเหรีญลงจาก 0.12 มม. เป็น 0.05 มม.



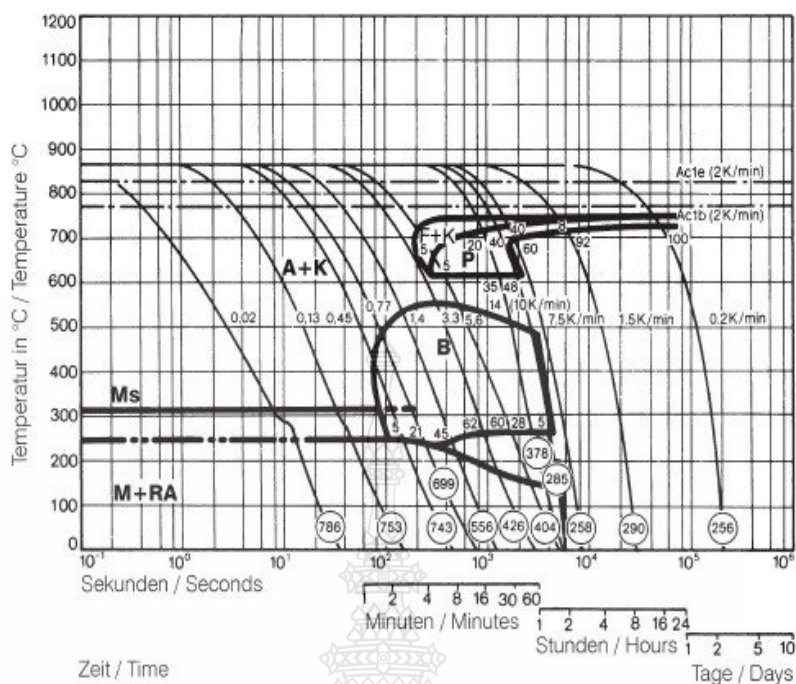
ภาพที่ 2.31 ต้นแบบเหรียญ 1 บาท ด้านหน้าหลังจากลดความสูงของลวดลายลงเหลือ 0.05 มม.

ในการผลิตแม่พิมพ์เหรียญ 1 บาท (ใส่เหล็กเคลือบนิกเกิล) โรงขยายแผ่นฟิล์มแลนด้าใช้เหล็กงานเย็น (Cold Work Tool Steel) ยี่ห้อ BOHLER เกรด K 455 (DIN 1.2550) มีส่วนผสมทางเคมี 0.63%C, 0.60%Si, 0.30%Mn, 1.10%Cr, 0.18%V, 2.00%W นำมาผลิตเป็นแม่พิมพ์ เหรียญ 1 บาท

ในการชุบแข็งทำการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 880 องศาเซลเซียส โดยใช้แก๊สไนโตรเจนปกคลุมภายในเตาเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยากับอากาศ (Oxidation) ชุบน้ำมันความแข็งประมาณ 61-62 HRC และอบคืนไฟที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ได้ความแข็งประมาณ 57-58 HRC



ภาพที่ 2.32 การอบคืนไฟ K455 [14]



ภาพที่ 2.33 การเขียนตัว K455 (CCT Diagram) [14]

กระบวนการชุบเคลือบผิวแข็งด้วยระบบ PVD Coating โรงงานแผ่นฟินแลนด์เลือกใช้ผิวเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) เป็นหลัก เพราะจากการติดตามการใช้งานจริงเกี่ยวกับการตีตราเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท พบว่าอายุการใช้งานเฉลี่ยของดวงตราที่ชุบเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) ประมาณ 450,000 เหรียญต่อคู่ ในขณะที่ดวงตราที่ชุบเคลือบผิวด้วยโครเมียมไนไตรด์ (CrN) มีอายุการใช้งานเฉลี่ยประมาณ 300,000 เหรียญต่อคู่

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วิธีการดำเนินงาน

3.1.1 การเลือกชนิดวัสดุที่ใช้ในการผลิตแม่พิมพ์เหรียญ 1 บาท (ใส่เหล็กเคลือบนิเกิล) ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

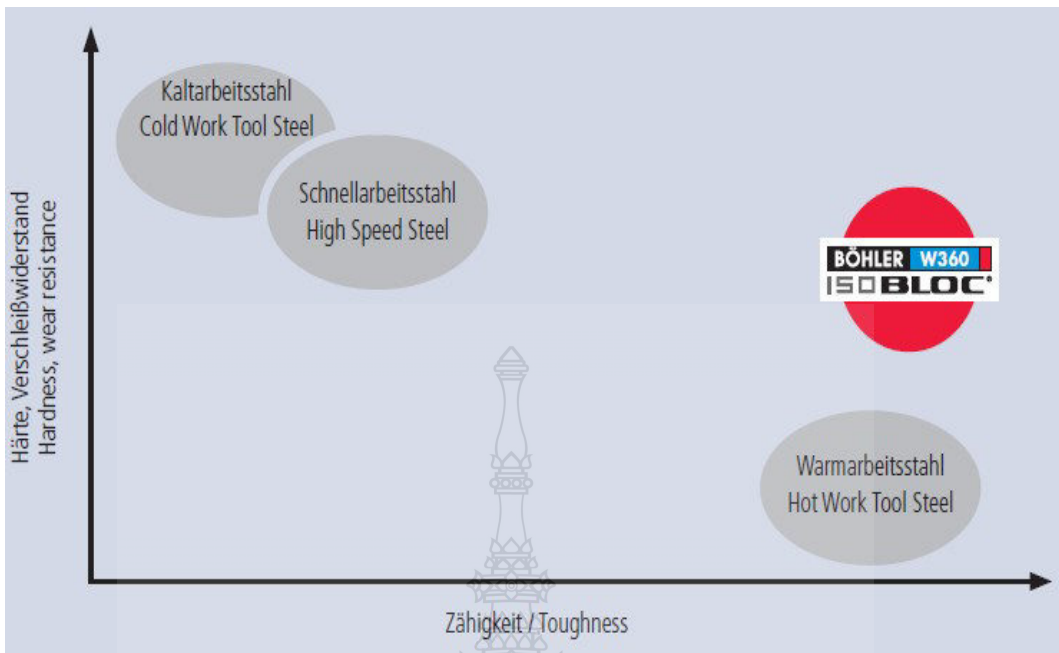
จากกรณีศึกษาโรงกลายปณัประเทศไทยฟินแลนด์ จะพบว่าเหล็กที่ใช้ในการผลิตแม่พิมพ์เหรียญ 1 บาท (ใส่เหล็กเคลือบนิเกิล) มีส่วนผสมทางเคมี คือ C 0.63%, Si 0.60%, Mn 0.30%, Cr 1.10%, V 0.18%, W 2.00% เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่สำนักกลายปณัใช้ในการผลิตแม่พิมพ์เหรียญ 1 บาท (ใส่เหล็กเคลือบนิเกิล) คือเหล็ก KD21 มีส่วนผสมทางเคมีคือ C 0.97 %, Si 1%, Mn 0.34 %, P 0.19 %, S 0.08 %, Cr 7.88 %, Mo 1.90 %, V 0.41 % พบว่าเหล็กที่โรงกลายปณัประเทศไทยฟินแลนด์มีเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนต่ำกว่าเหล็กที่สำนักกลายปณัใช้อยู่ในกระบวนการผลิต

แนวทางในการพิจารณาเลือกชนิดของวัสดุในการดำเนินงานวิจัยผู้วิจัยพิจารณาถึงความเหมาะสมในการใช้งานโดยพิจารณาจากลักษณะของกระบวนการผลิต และเครื่องจักรที่ใช้อยู่ภายในสำนักกลายปณั โดยพิจารณาถึงลักษณะในการปั๊มเหรียญซึ่งใช้ความเร็วสูงถึง 800 – 850 เหรียญต่อ นาที เป็นกระบวนการผลิตแบบงานเย็น ซึ่งอาจจะทำให้แม่พิมพ์เกิดการแตกร้าวได้ง่ายถ้าวัสดุที่นำมาผลิตแม่พิมพ์มีความแข็งสูงแต่ขาดคุณสมบัติทางด้านความเหนียว ธาตุคาร์บอนจึงเป็นตัวสำคัญที่ต้องพิจารณา จากการใช้งาน เหล็ก KD21 มีคาร์บอน 0.97% ซึ่งอาจจะสูงเกินไปไม่เหมาะกับการใช้ในการผลิตเหรียญ 1 บาท (ใส่เหล็กเคลือบนิเกิล) ซึ่งมีความแข็งของเหรียญสูงกว่าเหรียญ 1 บาท แบบเก่า

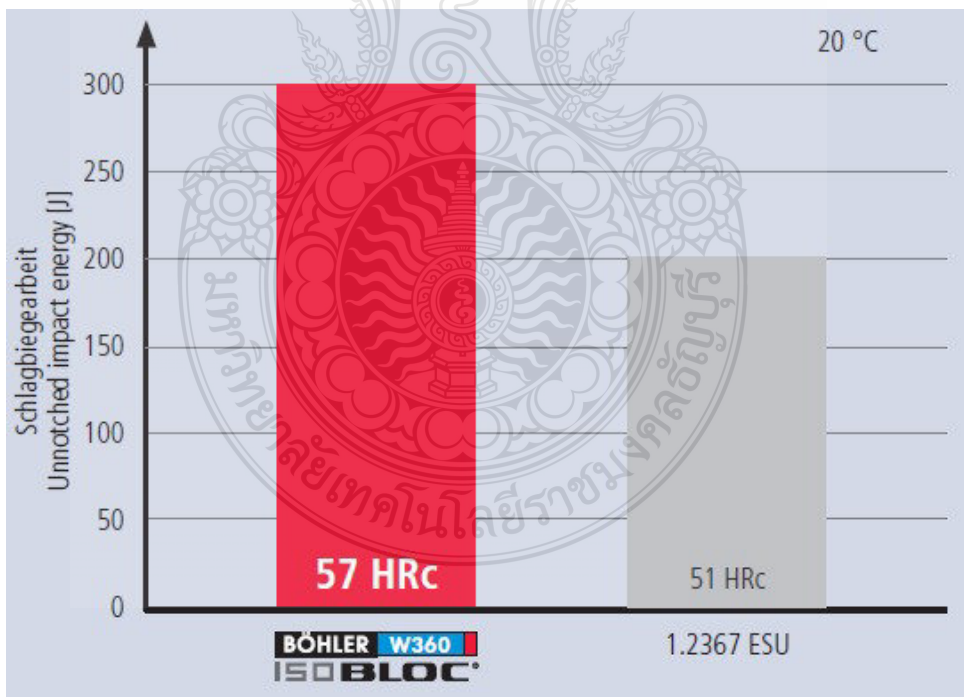
เหล็ก W360 มีส่วนผสมทางเคมีคือ C 0.50%, Si 0.20%, Mn 0.25%, Cr 4.50%, Mo 3.0%, V 0.55% มีความแข็งหลังการอบคืนไฟ 52 – 57 HRC ซึ่งน้อยกว่าเหล็ก KD21 ที่มีความแข็งหลังการอบคืนไฟสูงถึง 60 – 62 HRC ทำให้เหล็ก W360 มีคุณสมบัติทางด้านความเหนียวที่ดีกว่า มีความเหมาะสมกับกระบวนการผลิตในปัจจุบันของสำนักกลายปณั

อย่างไรก็ดีผู้วิจัยมิได้พิจารณาเหล็ก W360 เพียงชนิดเดียวยังมีเหล็กที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิตในปัจจุบันของสำนักกลายปณัแต่มีข้อจำกัดในการสั่งซื้อต้องเป็นไปตามระเบียบพัสดุ ซึ่งต้องการให้เกิดการแข่งขันกันอย่างน้อย 2 ราย

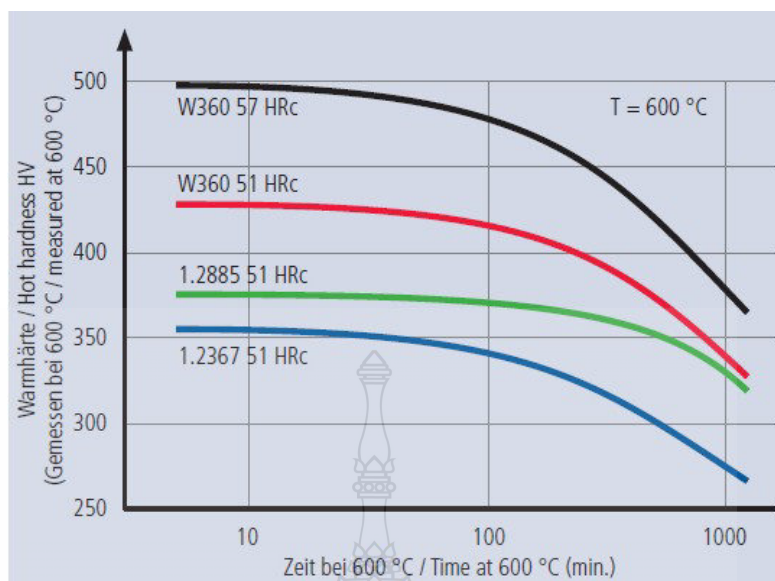
เหล็กที่ใช้ในการทดลองจึงได้นำเหล็กชนิดที่เหมาะสมกับงานแม่พิมพ์งานเย็น จำนวน 2 ชนิด นำมาผลิตเป็นดวงตราเหรียญ 1 บาท (ใส่เหล็กเคลือบนิเกิล) ได้แก่ KD21 และ W360



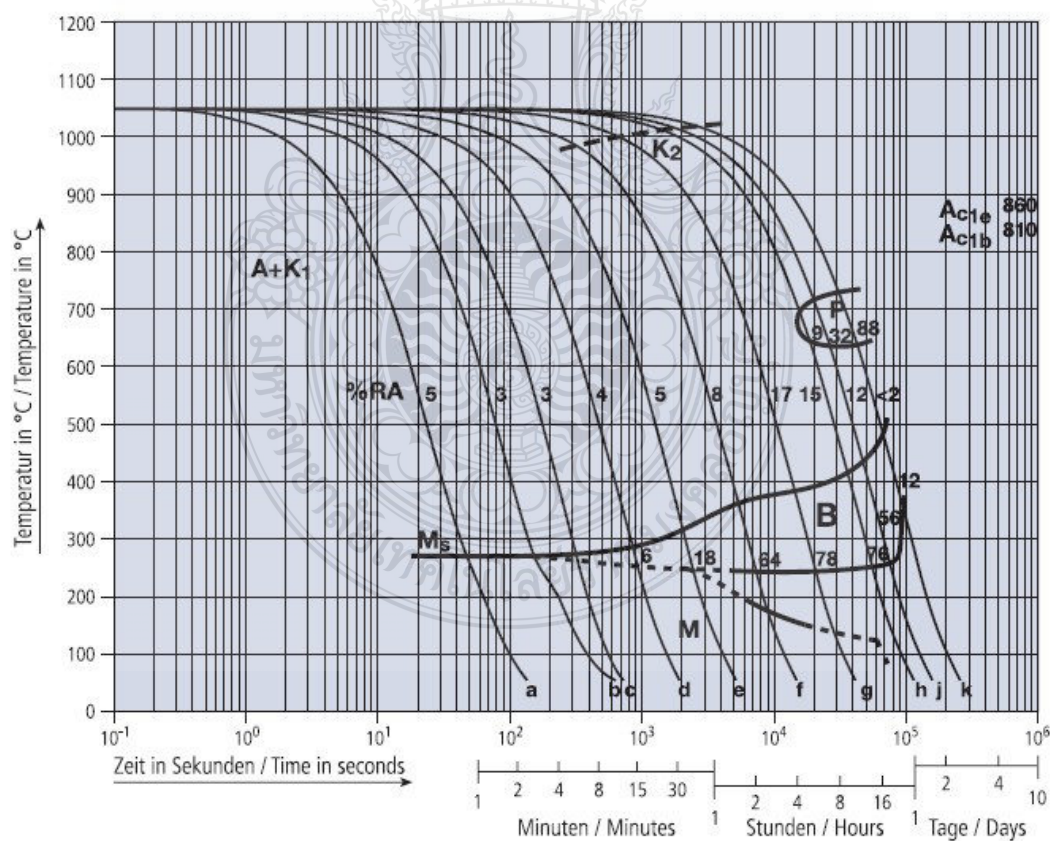
ภาพที่ 3.1 สมบัติของเหล็ก W360 [15]



ภาพที่ 3.2 การทดสอบแรงกระแทกของเหล็ก W360 [15]

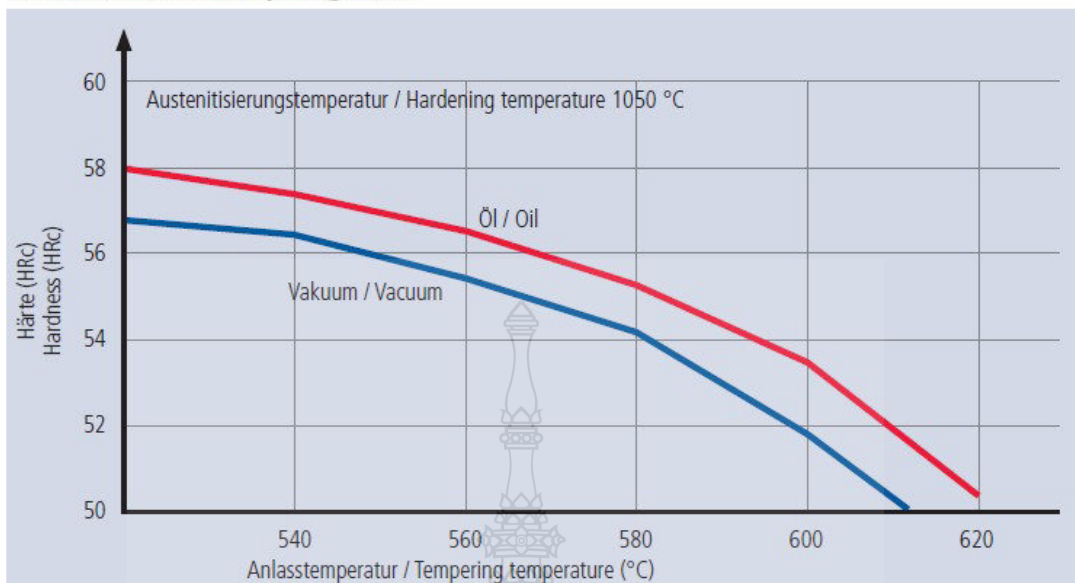


ภาพที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความแข็งของเหล็ก W360 [15]



ภาพที่ 3.4 TTT ไดอะแกรมของเหล็ก W360 [15]

Anlassschaubild / Tempering chart

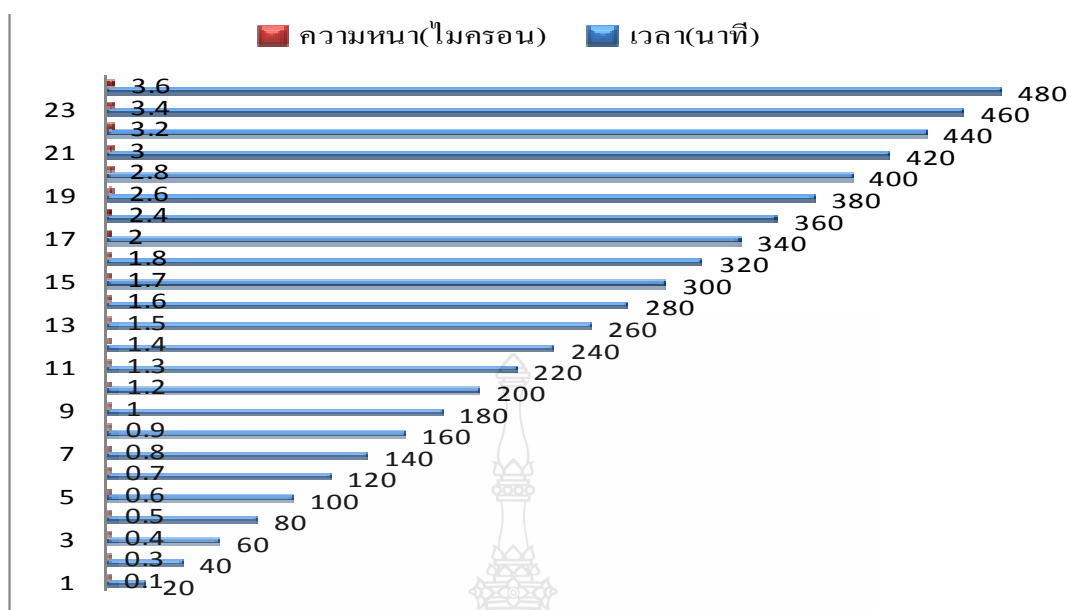


ภาพที่ 3.5 อุณหภูมิอบคืนไฟสัมพันธ์กับความแข็งของเหล็ก W360 [15]

3.1.2 ชนิดของสารเคลือบโครเมียมไนไตรด์ (CrN) และการกำหนดความหนาของสารเคลือบ

ในการพิจารณาถึงชนิดของสารเคลือบที่ใช้เคลือบผิวแม่พิมพ์เหรียญ 1 บาท (ใส่เหล็กเคลือบนิเกิล) ด้วยวิธีการแบบ PVD สำนักกษาปณ์ได้ทำการจัดซื้อระบบชุบเคลือบผิวแบบ PVD ในปีพ.ศ. 2550 ซึ่งจุดประสงค์ในการจัดซื้อก็เพื่อนำมาใช้กระบวนการผลิตแม่พิมพ์เหรียญที่ระลึก ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เน้นในด้านของความสวยงาม จึงใช้สารเคลือบชนิด CrN ในการชุบเคลือบผิวแม่พิมพ์ เพราะสารเคลือบชนิด CrN นั้นมีความเงาม มีคุณสมบัติของผิวหลังการชุบเป็นที่ยอมรับเป็นไปตามมาตรฐานในการผลิตเหรียญของทางสำนักกษาปณ์ ผู้วิจัยจึงพิจารณาในเรื่องของความหนาผิวเคลือบที่เหมาะสม โดยพิจารณาถึงความสูงของลวดลายของเหรียญ 1 บาท (ใส่เหล็กเคลือบนิเกิล) ซึ่งมีการปรับลด จาก 0.12 มม. เหลือ 0.05 มม. เพราะฉะนั้นในการเคลือบผิวถ้าความหนาผิวเคลือบหนาเกินไปอาจจะส่งผลให้ลวดลายไม่ชัดเจน บางเกินไปผิวเคลือบอาจเกิดการหลุดร่อนเร็ว อีกทั้งยังต้องพิจารณาในเรื่องของเวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบผิวซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดความหนา

ผู้วิจัยจึงได้พิจารณากำหนดความหนาเป็น 3 ระดับ คือ 1, 2 และ 3 ไมครอน (μm) ในการชุบเคลือบผิวแบบ PVD ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเก็บข้อมูลทางเทคนิคที่ผู้ปฏิบัติงานประจำได้ทำการจดบันทึกข้อมูลในการปฏิบัติงานเพื่อใช้ในการกำหนดเวลาที่ใช้ในกระบวนการชุบเคลือบผิวแบบ PVD เพื่อให้ได้ความหนาใกล้เคียงกับระดับความหนาที่ต้องการ



ภาพที่ 3.6 ความสัมพันธ์ของเวลากับความหนาของการชุบเคลือบ PVD Process

3.1.3 จัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์

- 1) เหล็ก KD21 และ W360
- 2) เตาอบชุบโลหะแบบสุญญากาศ
- 3) เครื่องเคลือบผิว PVD
- 4) เครื่องทดสอบความแข็งมาโครฮาร์ดเน็ต (Macrohardness)
- 5) เครื่องวัดความหนาผิวเคลือบโดยวิธีการเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence)
- 6) เครื่องตัดแบบ Wire Cut (EDM)

3.2 ดำเนินการทดลอง

นำเหล็กชิ้นทดสอบ ที่ผ่านกระบวนการผลิตพร้อมทำการอบชุบด้วยเตาอบชุบแบบสุญญากาศดังนี้

3.2.1 เหล็ก KD21 อุณหภูมิชุบแข็งที่ 1,040 °C เวลาอบแช่ (Soaking) 30 นาที ชุบแข็งด้วยก๊าซไนโตรเจน อบคืนไฟ (Tempering) ที่ 3 ระดับอุณหภูมิ

- 1) 500 °C สองครั้งๆ ละ 2 ชั่วโมง
- 2) 530 °C สองครั้งๆ ละ 2 ชั่วโมง (ตามมาตรฐานผู้ผลิต)
- 3) 580 °C สองครั้งๆ ละ 2 ชั่วโมง

3.2.2 เหล็ก W360 อุดหนุมิชุบแข็ง 1,050 °C เวลาอบแช่ 30 นาที ชุบแข็งด้วยก๊าซไนโตรเจน อบอุ่นไฟ (Tempering) ที่ 3 ระดับอุณหภูมิ

- 1) 500 °C สองครั้งๆ ละ 2 ชั่วโมง
- 2) 530 °C 2 ชั่วโมง รอบแรก รอบที่สอง 550 °C 2 ชั่วโมง (ตามมาตรฐานผู้ผลิต)
- 3) 580 °C สองครั้งๆ ละ 2 ชั่วโมง

3.2.3 ทดสอบความแข็งมาโครฮาร์ดเน็ต (Macrohardness) หน่วยการวัดแบบ HRC ชนิดหัวกดแบบเพชรน้ำหนักรักที่ใช้ในการกด 1471 N ในการวัดค่าความแข็งทำการวัดชั้นละ 3 จุด

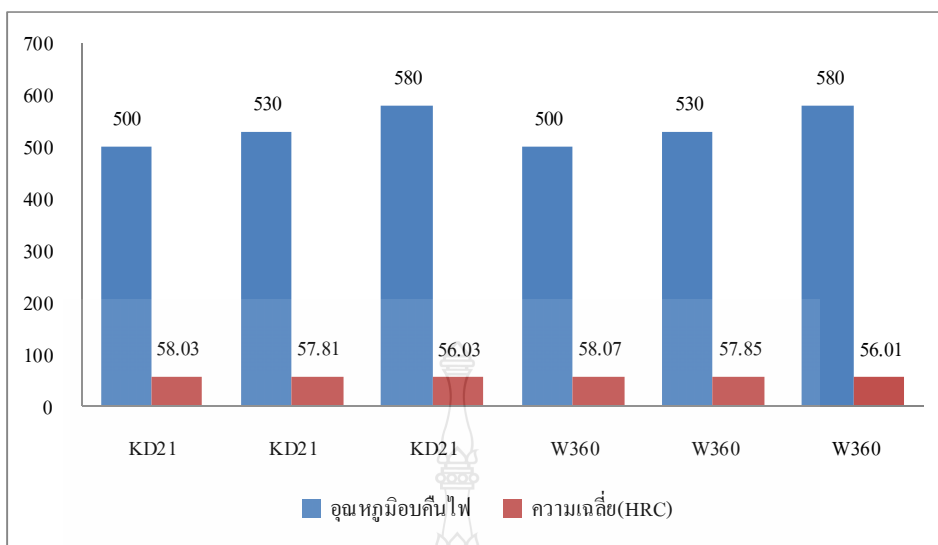


ภาพที่ 3.7 ข้อมูลในการวัดความแข็ง



1 2 3

ภาพที่ 3.8 จุดกดวัดความแข็ง



ภาพที่ 3.9 ค่าความแข็งที่วัดได้

3.2.4 กระบวนการชุบเคลือบผิวด้วยวิธีการ PVD ชนิดสารเคลือบโครเมียมไนไตรด (CrN) รายละเอียดดังนี้

- 1) นำชิ้นทดสอบมาเช็ดน้ำมันเคลือบกันสนิมหน้าดวงตราออกด้วยกระดาษชำระ และทำความสะอาดดวงตราโดยการเช็ดล้างด้วยน้ำยาอะซิโตน
- 2) เข้าสู่กระบวนการล้างระบบอุลตราโซนิค อุณหภูมิ น้ำยาล้าง 60 °C เวลาที่ใช้ในการล้าง 10 นาที อบแห้งที่อุณหภูมิ 80 °C ใช้เวลาประมาณ 15 นาที
- 3) นำชิ้นงานเข้าสู่กระบวนการชุบเคลือบผิว



ภาพที่ 3.10 เครื่องล้างด้วยวิธีการอุลตราโซนิค



ภาพที่ 3.11 ลักษณะการล้าง

3.2.5 รายละเอียดในกระบวนการชุบเคลือบผิวมีดังนี้

- 1) เวลาที่ใช้ในกระบวนการเคลือบผิวประมาณ 5 – 6 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับความหนาที่ต้องการในการวิจัยทำการชุบที่ 3 ระดับความหนาเฉลี่ยที่ 1, 2 และ 3 ไมครอน
- 2) อุณหภูมิที่ใช้เคลือบผิวประมาณ 400-450 °C
- 3) ไนโตรเจนบริสุทธิ์ (Nitrogen 99.999%) ปริมาณที่ใช้ 500 ลบ.ซม. ต่อ นาที
- 4) อาร์กอนบริสุทธิ์ (Argon 99.999%) ปริมาณที่ใช้ 300 ลบ.ซม. ต่อ นาที
- 5) ตรวจสอบแท่งคาโทดหากพบการสึกหรือควรเปลี่ยนใหม่



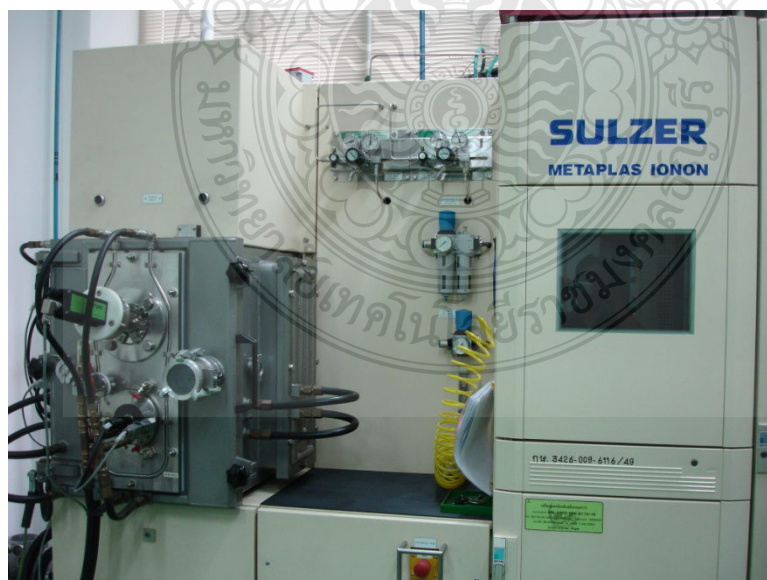
ภาพที่ 3.12 คาโทดสมบูรณ์พร้อมใช้งาน

6) บรรจุชิ้นงานเข้าห้องชุบ ในขั้นตอนนี้ต้องระมัดระวังไม่ให้มีไขมันหรือสารหล่อลื่น เกาะติดบริเวณพื้นผิวของชิ้นงาน

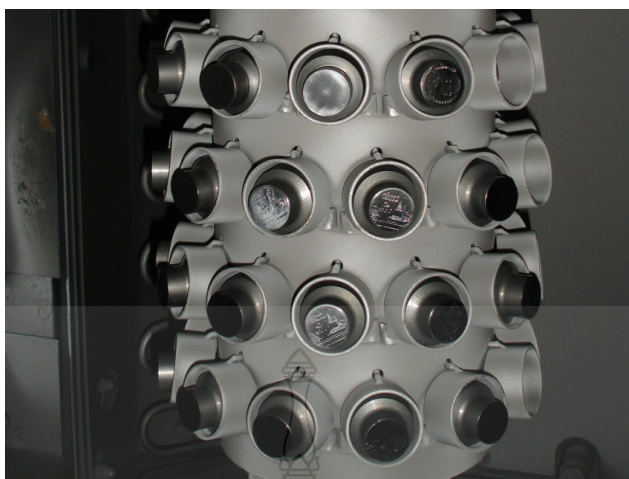


ภาพที่ 3.13 การบรรจุชิ้นงาน

7) เข้าสู่กระบวนการชุบเคลือบผิวโดยใช้โปรแกรมการชุบสำเร็จรูป โดยปฏิบัติตามคู่มือการปฏิบัติงาน คู่มือการใช้งานเครื่องชุบเคลือบผิวเชิงระบบ PVD ยี่ห้อ SUZER METAPLAS IONON รุ่น MZR 303 (Operating Manual PVD Coating System MZR-303) เลขที่เอกสาร 301-06517 Vol. 1 ถึง Vol. 6 ของสำนักกษาปณ์



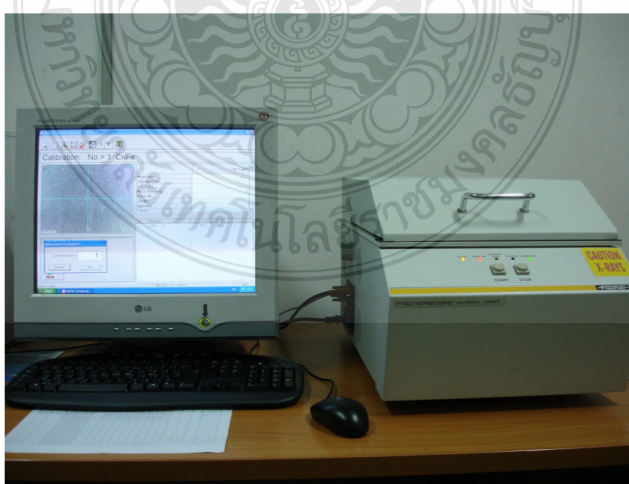
ภาพที่ 3.14 เครื่องชุบเคลือบผิว



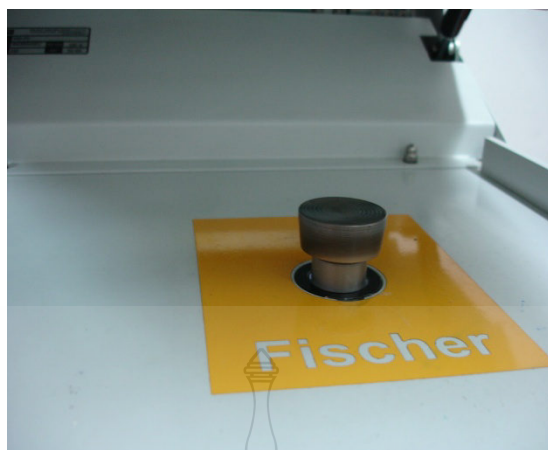
ภาพที่ 3.15 ชิ้นงานหลังชุบเคลือบผิว

3.2.6 หลังจากกระบวนการชุบเคลือบผิวแบบ PVD แล้วนำชิ้นทดสอบวัดความหนาของผิวเคลือบ Cr ด้วยเครื่องวัดความหนาผิวเคลือบแบบเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ รายละเอียดดังนี้

- 1) ทำการสอบเทียบ Cr ที่ระดับความหนา 2.18 ไมครอน ด้วยชิ้นทดสอบผิวเคลือบมาตรฐานจากบริษัท ผู้ผลิต
- 2) กระแสที่ใช้ในการวัด 50 kV
- 3) เวลาที่ใช้ในการวัด 20 วินาที ต่อ 1 จุด
- 4) วัด 3 จุด ต่อ ชิ้นงาน 1 ชิ้น

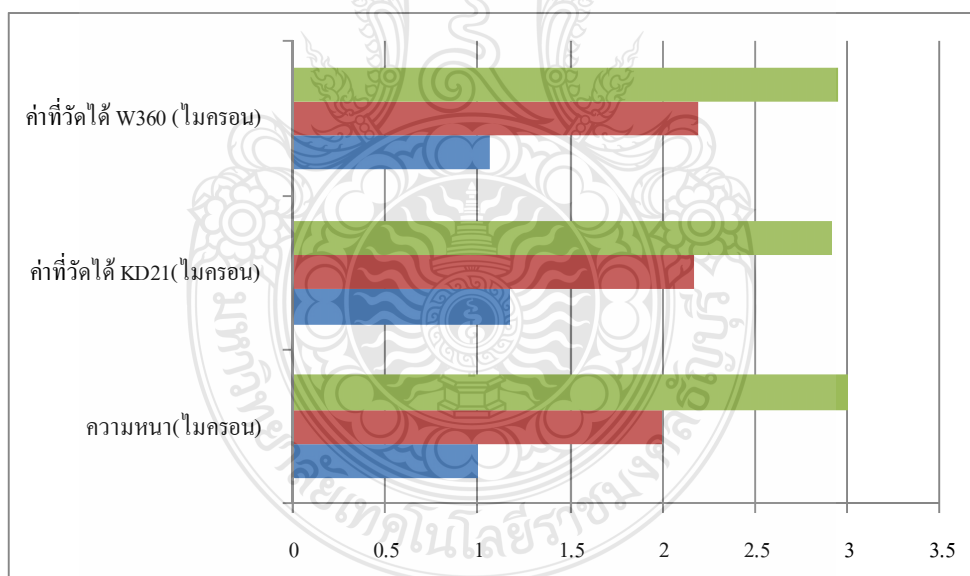


ภาพที่ 3.16 เครื่องวัดความหนาผิวเคลือบแบบเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์



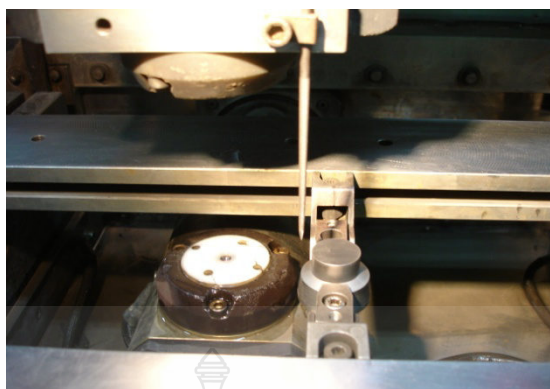
ภาพที่ 3.17 ลักษณะการวัดชิ้นงาน

ในการวัดความหนาของผิวเคลือบมีการจดบันทึกในตารางเพื่อใช้เป็นข้อมูลยืนยันความหนาเฉลี่ยที่เหมาะสม ผู้วิจัยได้นำข้อมูลจากการจดบันทึกสรุปเป็นกราฟดังนี้



ภาพที่ 3.18 ค่าความหนาของผิวเคลือบที่วัดได้

3.2.7 หลังจากวัดความหนาของผิวเคลือบนำชิ้นทดสอบที่ยังไม่ผ่านการใช้งานตัดผ่าด้วยเครื่องตัดแบบ Wire Cut (EDM)



ภาพที่ 3.19 ลักษณะการตัดผ่าชิ้นงานด้วย Wire Cut (EDM)



ภาพที่ 3.20 ชิ้นทดสอบตัดผ่าด้วยเครื่องตัดแบบ Wire Cut (EDM)

3.2.8 นำชิ้นงานเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อดูการยึดเกาะระหว่างชิ้นงานทดสอบกับสารเคลือบชนิด CrN ซึ่งในขั้นตอนนี้ได้นำชิ้นทดสอบทำการถ่ายภาพที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ทำการทดสอบความแข็งไมโครฮาร์ดเนส (Microhardness) และทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเหล็กทั้งสองชนิดเพื่อเป็นการทดสอบว่ามีความสอดคล้องในการวิเคราะห์ผลโดยโปรแกรมมินิแทป 15 (Minitab15)

3.2.9 ในกระบวนการผลิตเหรียญสำเร็จ (Pressing and Forming) ใช้เหรียญตัวเปล่าหน้า 1.25 มม. ด้านหัว – ก้อย พร้อมกับขึ้นขอบเพื่อความเร็วที่ใช้ในการปั๊ม 800 – 850 เหรียญ ต่อ นาที ทำการสุ่มตรวจทุกๆ 5 นาที (ประมาณ 4,000 เหรียญต่อครั้ง ครั้งละ 20 เหรียญ)

3.2.10 ในการคัดเหรียญว่าเสียหรือไม่ (Reject Coin) จะใช้เจ้าหน้าที่พนักงานที่มีความเชี่ยวชาญทำการตัดสินใจคัดแยกเหรียญชำรุด และทำการเปลี่ยนแม่พิมพ์ด้านหัว - ก้อย เมื่อหมดอายุ

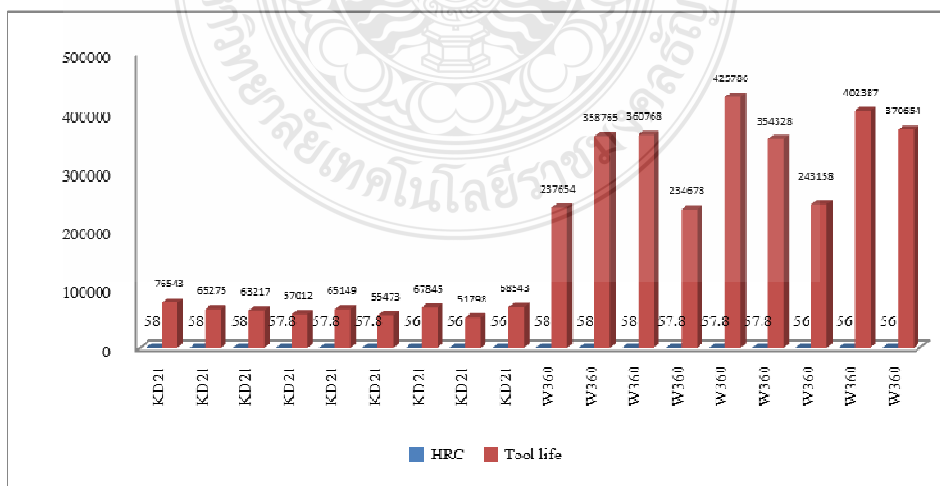
บทที่ 4

ผลการทดลอง

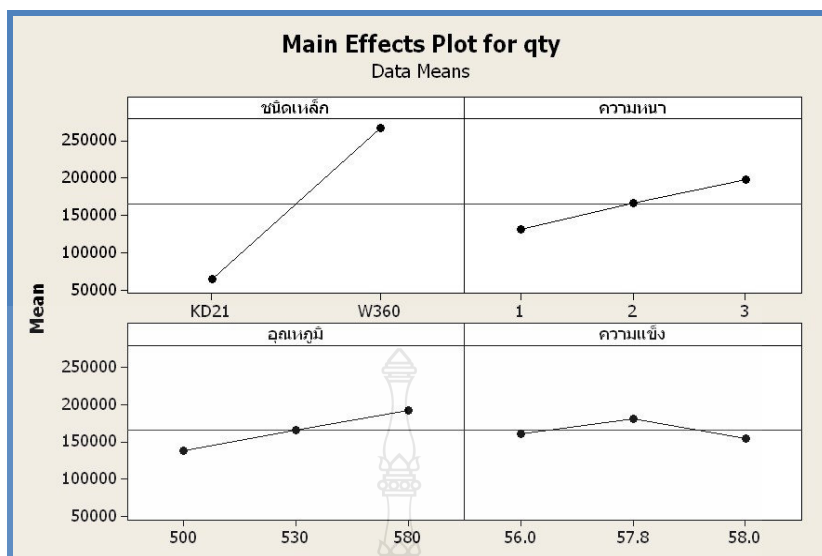
ในการวิเคราะห์และสรุปผลการวิจัยนั้น งานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมมินิแทปเวอร์ชัน 15 เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการทดลอง รวมถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลกับงานวิจัย ด้วยวิธีการทางสถิติแบบ DOE Factorial นอกจากการวิเคราะห์ทางข้อมูลแล้วยังมีการวิเคราะห์ขั้นทดสอบโดยวิธีการแสดงภาพถ่ายของชิ้นงานที่ทำการทดลองด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความสมบูรณ์ผิวเคลือบโครเมียมไนไตรด์ (CrN) เพื่อแสดงความแตกต่างของชิ้นทดสอบของวัสดุทั้งสองชนิดเนื่องจากจำนวนเหรียญที่ตีตราได้มีจำนวนที่แตกต่างกันพอสมควร การวิเคราะห์โดยวิธีการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก KD21 และ W360 เพื่อทำการเปรียบเทียบโครงสร้างว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร

4.1 การวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Minitab 15

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการทางสถิติแบบ DOE Factorial เนื่องจากมีปัจจัยมากกว่า 2 ปัจจัยแสดงให้เห็นถึงปัจจัยที่มีผลเกี่ยวข้องกัน ใช้ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% รวมถึงการพิจารณาจากค่า P-Value โดยดูที่ Term ถ้า Term ใดมีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่ามีผลต่อจำนวนเหรียญที่ได้ หรือค่า Y (qty) อย่างมีนัยสำคัญ ผู้วิจัยได้ทำการแจกแจงข้อมูลจำนวนมากทำให้เห็นถึงรายละเอียดของข้อมูล ในการวิเคราะห์สรุปผลได้ทำการสรุปข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบของกราฟเพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้น ดังนี้ ภาพที่ 4.1 กราฟสรุปจำนวนปริมาณเหรียญ 1 บาท ที่ผลิตได้ต่อแม่พิมพ์ 1 คู่ (หัว - ก้อย)

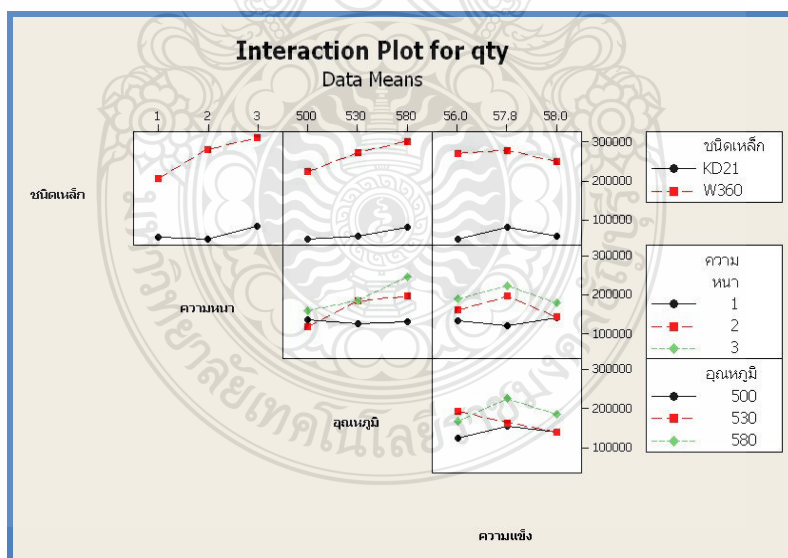


ภาพที่ 4.1 สรุปจำนวนเหรียญ 1 บาท ที่ผลิตได้ต่อแม่พิมพ์ 1 คู่ (หัว - ก้อย)



ภาพที่ 4.2 Main Effect Plot for qty

กราฟ Main Effect Plot for qty ประมวลผลโดยโปรแกรมมินิแทป 15 เป็นกราฟที่แสดงให้เห็นถึงปัจจัยที่ดีที่สุดที่ทำให้จำนวนเหรียญที่ผลิตได้มากที่สุด (qty)

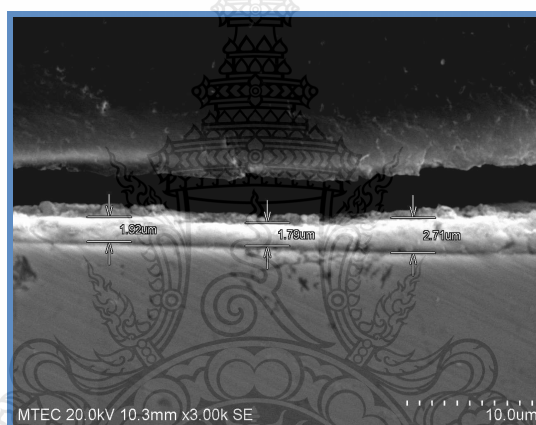


ภาพที่ 4.3 Interaction Plot for qty

กราฟ Interaction Plot for qty เป็นกราฟที่แสดงให้เห็นถึงปัจจัยที่มีผลเกี่ยวข้องกันซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อจำนวนเหรียญที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab ทำให้ทราบว่าต้องกำหนดชนิดเหล็กเป็น W360 ความหนา 2-3 μm อุณหภูมิอบคืนไฟ เท่ากับ 530-580 $^{\circ}\text{C}$ ความแข็งเท่ากับ 56-57.8 HRC ทำให้ปริมาณเหรียญที่ได้ต่อดวงตรา 1 คู่ (qty) ดีหรือสูงที่สุด

4.2 การวิเคราะห์ด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope SEM)

เพื่อการยึดเกาะระหว่างสารเคลือบชนิดโครเมียมไนไตรด์ (CrN) กับ พื้นผิวของวัสดุ (Substrate Material) ว่ามีความสมบูรณ์ หรือ ไม่สมบูรณ์ของสารเคลือบ เพื่อเป็นการยืนยันผลการวิเคราะห์ทางสถิติว่าสอดคล้องกับผลการทดสอบหรือไม่



ภาพที่ 4.4 เหล็ก KD21 จากกล้อง SEM



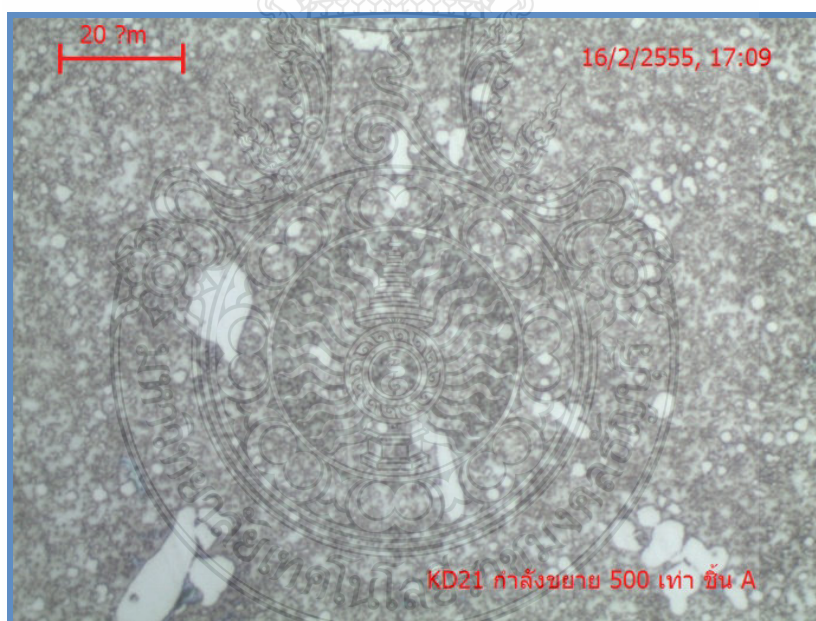
ภาพที่ 4.5 เหล็ก W360 จากกล้อง SEM

จากภาพที่ 4.4 และ 4.5 แสดงให้เห็นสารเคลือบชนิด CrN กับพื้นวัสดุ (Substrate Material) จะเห็นว่าเหล็ก KD21 กับสารเคลือบเกิดรอยแยกระหว่างสารเคลือบ CrN กับพื้นวัสดุ ถึงแม้ว่าภาพจะแสดงให้เห็นลักษณะทางกายภาพภายนอกเท่านั้นยังแสดงให้เห็นถึงลักษณะที่ไม่สมบูรณ์ระหว่างสารเคลือบกับวัสดุที่เคลือบ

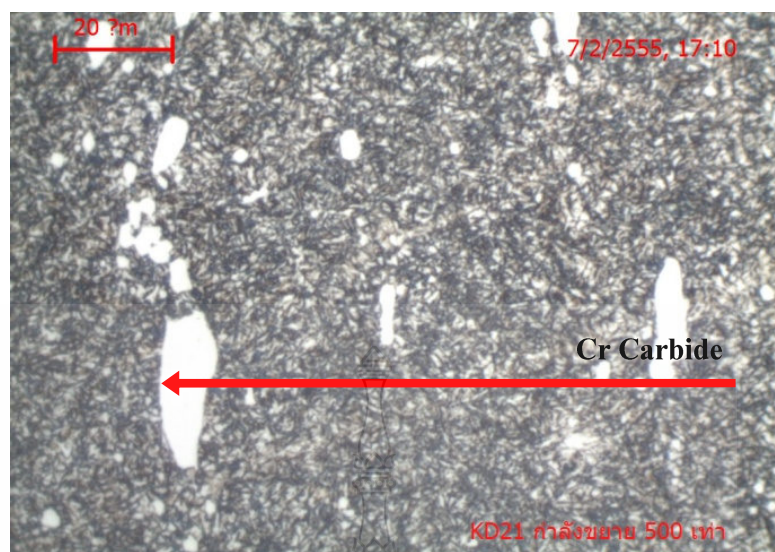
เหล็ก W360 แสดงให้เห็นสารเคลือบชนิด CrN กับพื้นวัสดุ (Substrate Material) มีลักษณะที่สมบูรณ์ระหว่างสารเคลือบกับวัสดุที่เคลือบถึงแม้ว่าภาพจะแสดงให้เห็นลักษณะทางกายภาพภายนอกเท่านั้น เมื่อทำการพิจารณาเปรียบเทียบภาพจากกล้อง SEM ระหว่างเหล็ก KD21 และ W360 จะเห็นว่าเหล็ก W360 มีความเป็นไปได้อย่างสูงกับการนำไปใช้ในกระบวนการผลิตเหรียญ (หัว – ก้อย)

4.3 การวิเคราะห์ด้วยภาพโครงสร้างจุลภาค

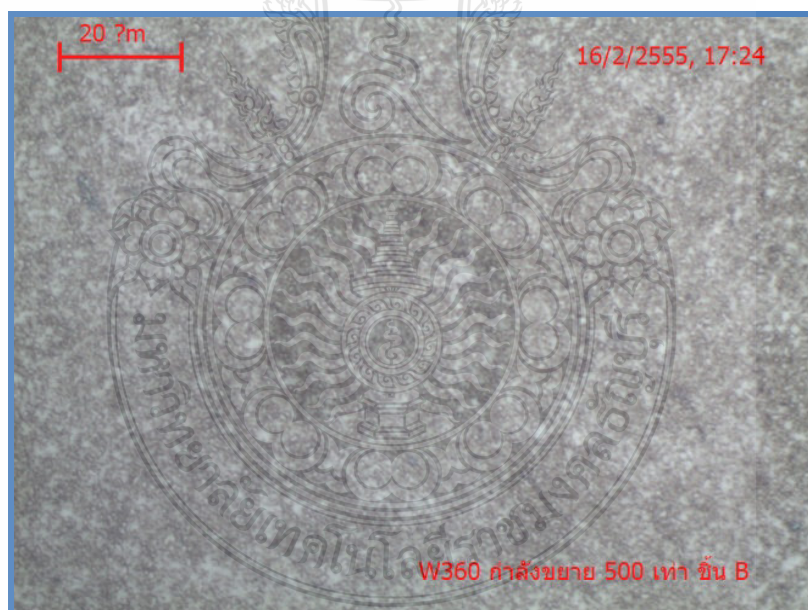
ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคเนื่องด้วยภาพจากกล้อง SEM มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน



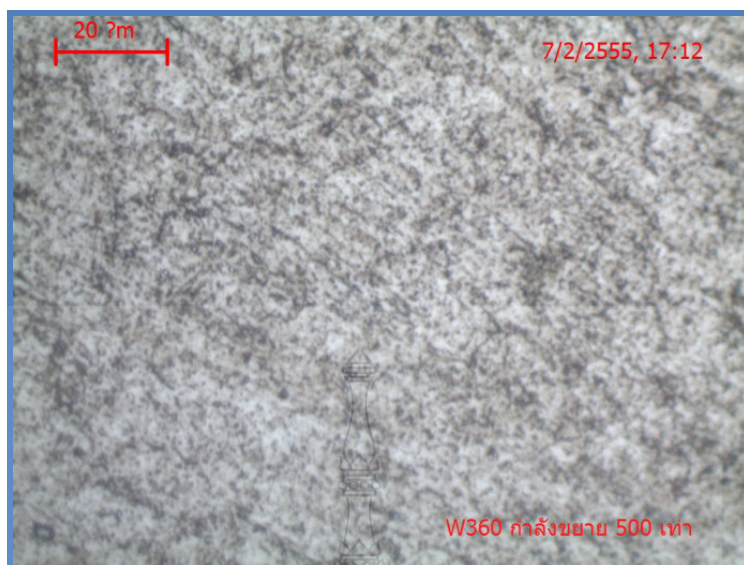
ภาพที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคของเหล็ก KD21 สภาพจำหน่าย (Nitric2%)



ภาพที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของเหล็ก KD21 หลังอบคืนไฟที่ 530 °C 2 ครั้งๆ ละ 2 ชั่วโมง (Nitric 2%)



ภาพที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคสภาพจำหน่ายของเหล็ก W360 (Nitric 2%)



ภาพที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของเหล็ก W360 หลังอบคืนไฟที่ 530°C 2 ชั่วโมง และ 550°C 2 ชั่วโมง (Nitric 2%)

จากภาพโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก KD21 และ W360 จะเห็นได้ว่าภาพโครงสร้างมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนที่กำลังขยาย 500 เท่า ในสภาพจำหน่าย KD21 โครงสร้างมีจุดขาวๆ เป็น Cr Carbide ที่ไม่หลอมละลาย ในสภาพจำหน่าย W360 โครงสร้าง Homogeneous เป็น Phase ไม่เห็น Grain Boundary หลังการอบคืนไฟ KD21 มี Cr Carbide ซึ่งเป็น Ledeburite Carbide ที่ไม่หลอมละลาย ส่วน W360 เนื้อละเอียดมากเป็น Homogeneous หลังจากชุบแข็งและอบคืนไฟแล้ว

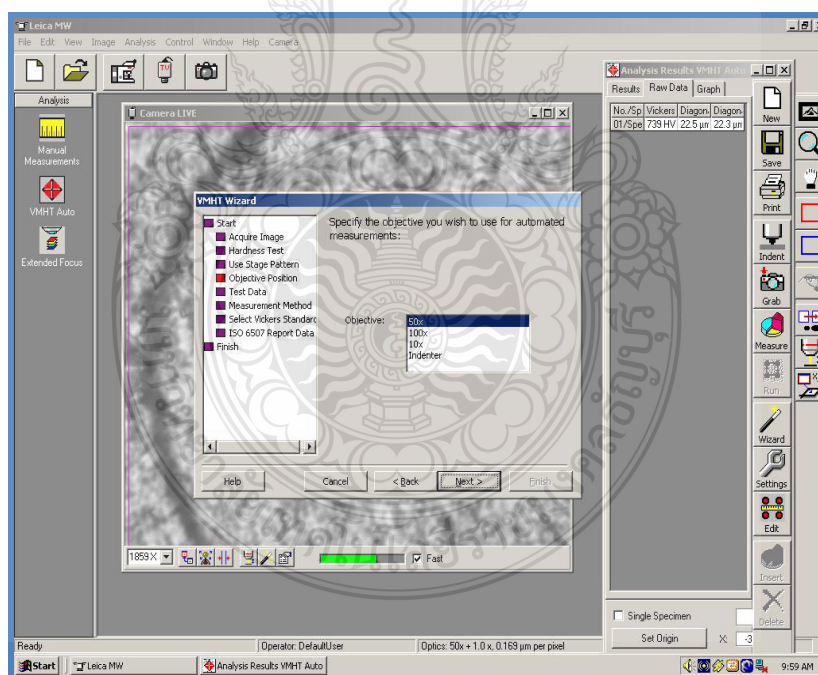
ในการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก KD21 และ W360 จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกับปริมาณหรือชนิดที่ได้ต่อดวงตรา 1 คู่ และยังมีความสอดคล้องกับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรมมินิแทป 15 อีกด้วย

4.4 การทดสอบความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งไมโครฮาร์ดเนส (Micro Hardness)

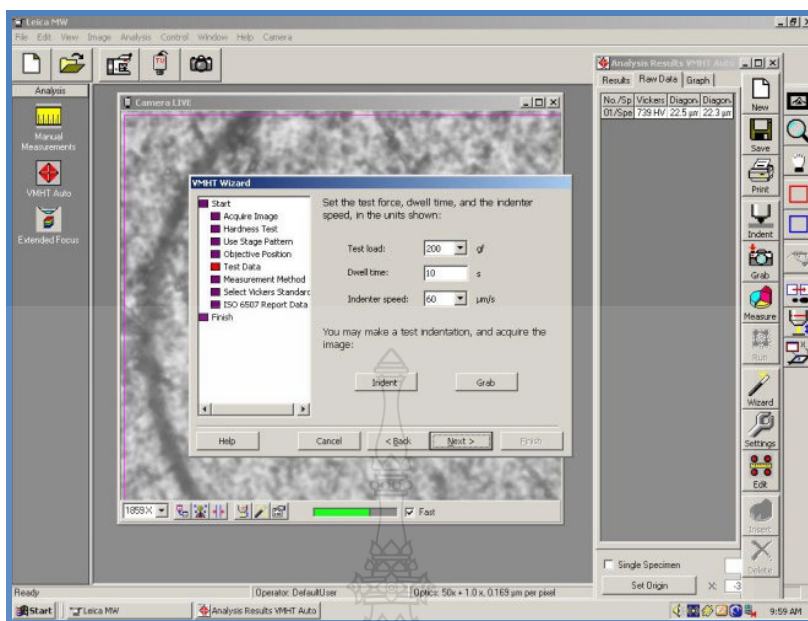
จุดประสงค์ในการวัดความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบไมโครฮาร์ดเนสนั้นเนื่องมาจาก การวิเคราะห์ด้วยภาพโครงสร้างจุลภาคเหล็ก KD21 โครงสร้างมีจุดขาวๆ เป็น Carbide ที่ไม่หลอมละลาย (C 0.97%, Cr 7.88 %, Mo 1.90 %, V 0.41%) จึงต้องการทดสอบความแข็งบริเวณเนื้อ Carbide เปรียบเทียบกับโครงสร้างที่เป็น Homogeneous ในการวัดความแข็งของเหล็กโดยเครื่องวัดความแข็งแบบไมโครฮาร์ดเนส มีรายละเอียดดังนี้



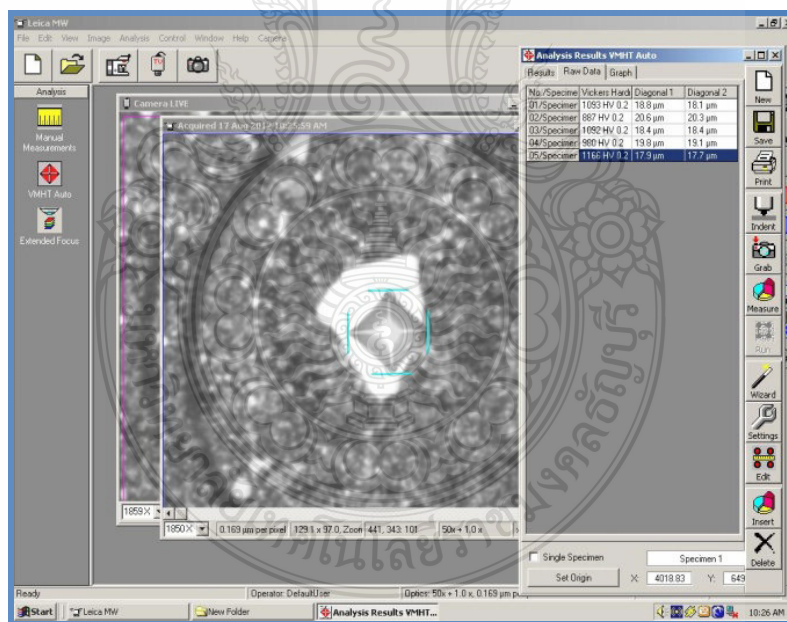
ภาพที่ 4.10 เครื่องวัดความแข็งแบบไมโครฮาร์ดเนส



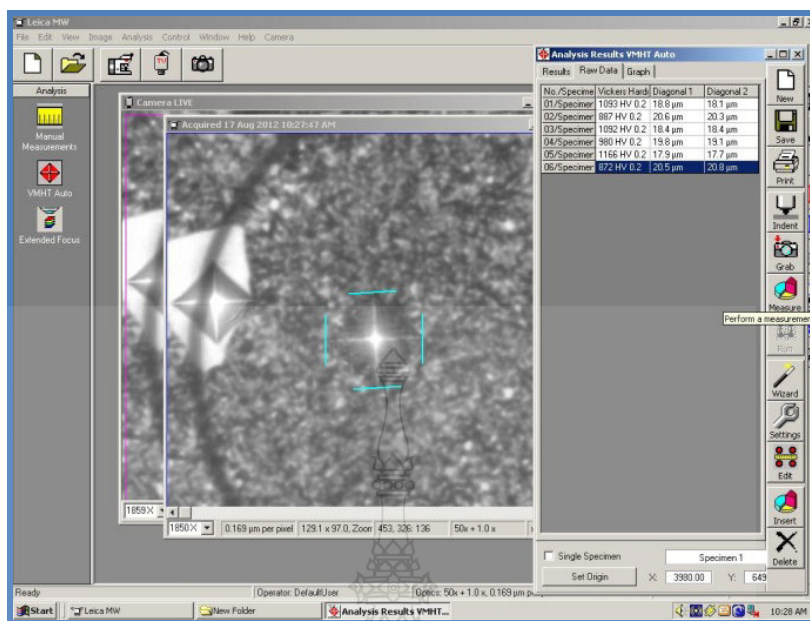
ภาพที่ 4.11 กำหนดค่ากำลังขยาย 50X



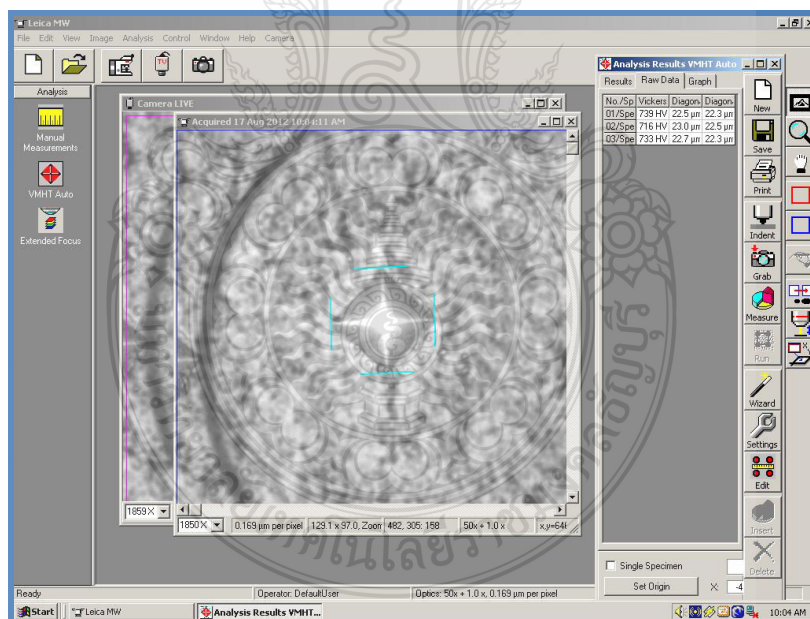
ภาพที่ 4.12 ค่าแรงกด 200 gf เวลาที่ใช้ในการกดต่อจุด 10 วินาที



ภาพที่ 4.13 การวัดความแข็งเหล็ก KD21 (บริเวณเนื้อคาร์ไบด์) ความแข็ง 1092-1166 HV (0.2)

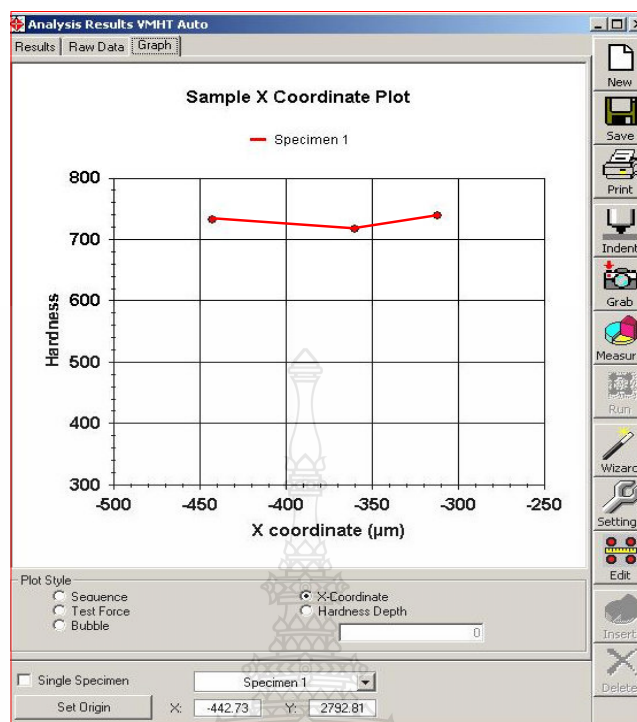


ภาพที่ 4.14 การวัดความแข็งเหล็ก KD21 (บริเวณ Homogeneous Matrix) ความแข็ง 837HV (0.2)

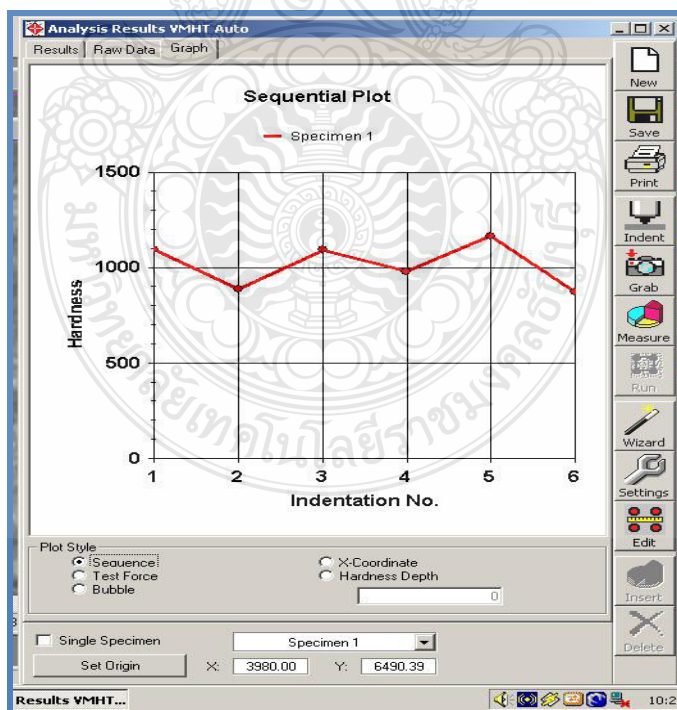


ภาพที่ 4.15 การวัดความแข็งเหล็ก W360 บริเวณ (Homogeneous Matrix) ความแข็ง 729HV (0.2)

หลังจากวัดความแข็งได้นำข้อมูลค่าความแข็งที่วัดได้ ทำเป็นกราฟค่าความแข็งโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปของเครื่องวัดความแข็งดังนี้



ภาพที่ 4.16 ค่าความแข็งของเหล็ก W360 เป็นกราฟ

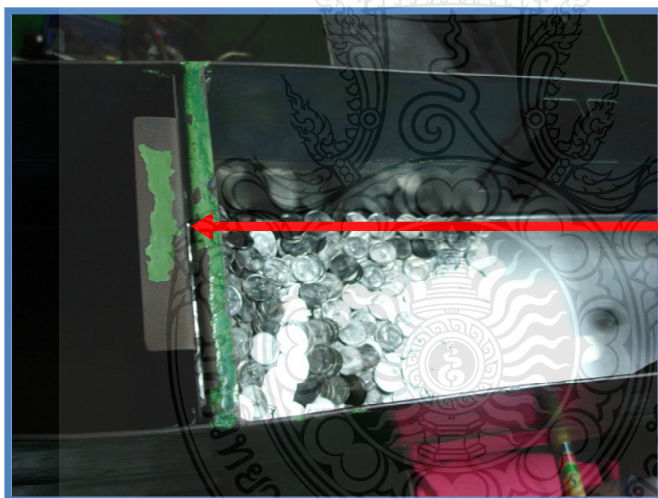


ภาพที่ 4.17 ค่าความแข็งของเหล็ก KD21 เป็นกราฟ

จากกราฟแสดงค่าความแข็งของเหล็ก W360 จะเห็นได้ว่ากราฟมีลักษณะเกือบเป็นเส้นตรง แสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งมีความสม่ำเสมอ เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟแสดงค่าความแข็งของเหล็ก KD21 มีลักษณะขึ้นลงเป็นฟันปลาแสดงให้เห็นถึงค่าความแข็งที่แตกต่างกันระหว่างเนื้อคาร์ไบด์ กับ บริเวณโครงสร้างที่เป็นเนื้อเดียวกัน

4.5 การควบคุมคุณภาพ

ในการควบคุมคุณภาพเป็นไปตามมาตรฐานการสุ่มตัวอย่างที่สำนักกษาปณ์กำหนด คือมีการสุ่มตรวจเหรียญประมาณทุกๆ 5 นาที หรือประมาณทุกๆ 4,000 เหรียญ โดยการสุ่มตรวจนั้นจะสุ่มหยิบเหรียญที่ถูกกักอยู่บนรางก่อนปล่อยลงถึงเก็บก่อนนำไปทำการนับบรรจุ ในกรณีที่พบเหรียญเสียจะนำเหรียญในในถังเก็บหน้าเครื่องมาทำการตรวจสอบอีกครั้งด้วยเครื่องตรวจสอบแบบอัตโนมัติ เพื่อสร้างความมั่นใจในกรณีของจำนวนเหรียญที่ได้ต่อแม่พิมพ์ 1 คู่ ทำให้การวิเคราะห์เป็นไปอย่างถูกต้องเป็นไปตามมาตรฐานกระบวนการผลิตของสำนักกษาปณ์



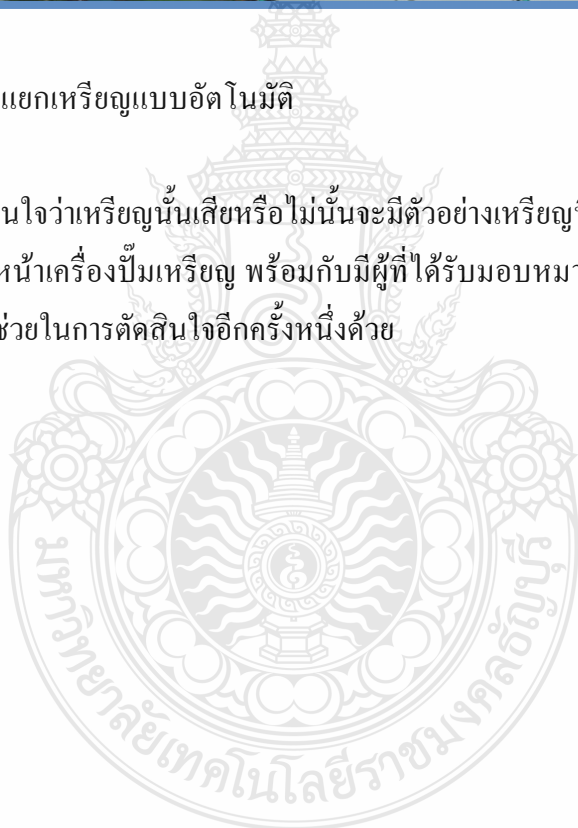
แผ่นกั้นเหรียญก่อนปล่อยลงถึงเก็บ

ภาพที่ 4.18 รางลำเลียงเหรียญลงถึงเก็บ



ภาพที่ 4.19 เครื่องคัดแยกเหรียญแบบอัตโนมัติ

ในการตัดสินใจว่าเหรียญนั้นเสียหรือไม่นั้นจะมีตัวอย่างเหรียญที่ผ่านการตรวจสอบแล้วไว้เป็นตัวอย่างที่บริเวณหน้าเครื่องปั๊มเหรียญ พร้อมกับมีผู้ที่ได้รับมอบหมายหน้าที่ในการตัดสินใจว่าเหรียญนั้นเสียหรือไม่ช่วยในการตัดสินใจอีกครั้งหนึ่งด้วย



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การผลิตเหรียญบาทรุ่นใหม่ซึ่งเริ่มผลิตเมื่อปี พ.ศ. 2551 มีผิวเคลือบนิกเกิลหนา 25 μm เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. น้ำหนัก 3.0 กรัม ความแข็ง 110 HV (30) ความสูงของลวดลาย 0.05 มม. โดยใช้วัสดุทำแม่พิมพ์เหรียญ 2 ชนิด ซึ่งเคลือบผิวด้วยกรรมวิธี PVD มีความหนา 1, 2 และ 3 μm ความเร็วของเครื่องปั๊มเหรียญ 800 – 850 เหรียญ/นาที สรุปผลได้ดังนี้

5.1 สรุปผล

5.1.1 จากการวิเคราะห์ผลพบว่าการผลิตแม่พิมพ์เหรียญ 1 บาท (หัว – ก้อย) ควรใช้เหล็ก W360 ควบคุมอุณหภูมิในการอบคืนไฟอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ 530 – 580 °C เพื่อให้ได้ความแข็งเฉลี่ยที่ 56-57.8 HRC ความหนาของผิวเคลือบ CrN เฉลี่ยที่ 2 – 3 μm จะทำให้จำนวนเหรียญที่ผลิตได้มีปริมาณเป็นที่น่าพอใจ โดยนำแม่พิมพ์เหรียญ 1 บาท ที่มีลวดลายพร้อมใช้งานนำไปทดลองปั๊มด้วยเครื่องปั๊มเหรียญหมุนเวียนขนาดแรงกด 40 ตัน ความเร็วในการตีตรา 800 – 850 เหรียญ/นาที จำนวนเหรียญที่ได้ต่อแม่พิมพ์ 1 คู่ โดยประมาณ 300,000 – 400,000 เหรียญ ต่อแม่พิมพ์ 1 คู่ ส่วนเหล็ก KD21 นั้นพบว่าจำนวนเหรียญที่ได้ต่อแม่พิมพ์ 1 คู่ อยู่ที่ประมาณ 40,000 – 50,000 เหรียญ โดยใช้กระบวนการทดลองแบบเดียวกันกับเหล็ก W360 เหมือนกันทุกประการ

5.1.2 ภาพถ่ายจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกวาดแสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมในการเลือกใช้วัสดุที่นำมาเคลือบผิวด้วยวิธีการ PVD จะเห็นได้ว่าวัสดุทั้ง 2 ชนิด คือ KD21 และ W360 มีการยึดเกาะของ CrN ดีกว่า เมื่อนำมาเข้ากระบวนการผลิตเหมือนกันเหล็ก W360 มีผลผลิตที่มากกว่า

5.1.3 จากการวิเคราะห์ทั้งทางสถิติ และทางภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องเป็นไปในทางเดียวกันกับการทดลองใช้งานจริง

5.1.4 โครงสร้างจุลภาคของเหล็ก W360 กำลังขยาย 500 เท่า จะเห็นโครงสร้างละเอียด (Homogeneous) สม่ำเสมอตลอด มีความแข็งเฉลี่ย (Hardness) สม่ำเสมอตลอดที่ 729 HV (0.2) ทำให้ PVD ยึดเกาะได้ดี Substrate Material ยุบตัวเท่ากันหรือสม่ำเสมอ จำนวนเหรียญที่ผลิตได้ ประมาณ 300,000 – 400,000 เหรียญ ต่อ แม่พิมพ์ 1 คู่

5.1.5 โครงสร้างจุลภาคของเหล็ก KD21 ที่กำลังขยาย 500 เท่า จะเห็นเนื้อคาร์ไบด์เป็นกลุ่มซึ่งมีความแข็ง 1092 – 1166 HV (0.2) และพื้นโลหะที่ติดกันซึ่งเป็นโครงสร้างมาเทนไซต์มีความแข็ง 837 HV (0.2) ซึ่งในการวัดความแข็งแบบมาร์โครฮาร์ดเนสวัดได้ค่าเฉลี่ย 58.5 HRC แต่เมื่อวิเคราะห์ด้วย

ไมโครฮาร์ดเนส เหล็ก KD21 จะมีความแตกต่างกันซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุทำให้การยึดเกาะของ PVD ไม่ดีเท่าที่ควร Substrate Material ยึดตัวไม่เท่ากันทำให้อายุแม่พิมพ์ด้านหัวและก้อยต่ำเหลือเพียง 40,000 เทรียญ ต่อแม่พิมพ์ 1 คู่ (สำหรับงานขึ้นรูปละเอียด Fine Art)

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการศึกษาศาสตร์เคลือบชนิดอื่นๆ เช่น ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ไนไตรด์ (TiCN)

5.2.2 ควรมีการวิเคราะห์รายละเอียดของ Alloy Carbide ว่าเป็นคาร์ไบด์ชนิดใดด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ร่วมกับ Energy Dispersive X-Ray (EDX)

5.2.3 ควรมีการศึกษากกรรมวิธีการเคลือบผิวแบบ CVD Process เพิ่มเติมโดยเปลี่ยน Substrate Material เป็น Hot Work Tool Steel



รายการอ้างอิง

- [1] รศ.มนัส สติรจินดา, โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
- [2] นภจักร ธารีลาภ, ยอดหญิง หมวกงาม, ชูชาติ นิติปัญญาวงศ์และนันท์ ถาวรรังกูร, “การชุบเคลือบผิววัสดุผสมนิกเกิลอะลูมินา ด้วยไฟฟ้าเพื่อป้องกันการสึกหรอ,” **Proceedings of the 38th Kasetsart University Annual Conference: Engineering, Agro-Industry, Bangkok (Thailand), 2000.** pp. 315-323.
- [3] Engineering man, กระบวนการเคลือบผิว (Online), 2008. Available: http://engineeringman.blogspot.com/2008/07/blog-post_16.html (18 August 2012).
- [4] รศ.มนัส สติรจินดา, วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2537.
- [5] Donald M. Mattox, “Society of Vacuum Coaters, Albuquerque,” In **Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing**, New Mexico, 1998.
- [6] ISO, **ISO 6507-1:2005** (Online), 2010. Available: http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=37746 (18 June 2012).
- [7] นายทัศนัย แสนพลพัฒน์, **แนวทางการวัด/ทดสอบความแข็ง** (Online), 2011. Available: http://www.nimt.or.th/nimt/upload/contentfile/sys-lab_magazine-217-449.pdf (20 August 2012).
- [8] Z.G. Zhang a,b,* , O. Rapaud b, N. Allain b, D. Mercs b, M. Baraket b, C. Dong a, C. Coddet b, “Microstructures and tribological properties of CrN/ZrN nanoscale multilayer coatings,” **Applied Surface Science**, 2009. pp. 4020–4026.
- [9] M. Polok-Rubiniec*, L.A. Dobrzanski, M. Adamiak, “The properties and wear resistance of the CrN PVD coatings,” **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, Vol 30, No. 2, 2008; pp.165-171.
- [10] Warmarbeitsstahl hot work tool steel, **Bohler W360 ISO BLOC** (Online), 2007. Available: http://www.bohlersteel.com/buag_frontend/download/grade/69/1/W360DE.pdf

- [11] กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ (ประมวลผลด้วย **Minitab**). พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: ศ.ศ.ท ส.น.พ, 2551.
- [12] Fujilloy, การเคลือบผิวแบบ **CVD** (Online), 1999. Available:
<http://www.fujilloy.co.th/index.php/product/coating/cvd-coatng/> (15 September 2012).
- [13] รศ.ดร.ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา. รศ.ดร.พงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์, การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: ท็อป, บจก. สนพ. ,2552 .
- [14] กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, การอบชุบเหล็กกล้าด้วยความร้อน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะการ, 2532.
- [15] PHH™, KD 21 Cold Work Tool Steel (Online), 1999. Available:
<http://www.phh.com.my/index.php?view=kd21> (22 August 2012).



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
ผลการทดลองต่างๆ



ตารางที่ ก.1 รายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะของเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนแบบเก่า

ชนิด ราคา (บาท)	ชนิดโลหะ	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	ลักษณะขอบเหรียญ
0.01	Al97.5Mg2.5	15.00	0.50	เรียบ
0.05		16.00	0.60	
0.10		17.50	0.80	
0.25	Cu92Ni2Al6	16.00	1.90	ฟันเฟือง จำนวน 104
0.50		18.00	2.40	ฟันเฟือง
1	Cu75Ni25	20.00	3.40	ฟันเฟือง จำนวน 116
2	Ni/Fe	21.75	4.40	ฟันเฟือง
5	Cu75Ni25/Cu99.5	24.00	7.50	ฟันเฟือง จำนวน 130
10	Ring- Cu75Ni25	26.00	8.50	ฟันเฟือง
	Disc- Cu92Ni2Al6			ฟันเฟืองสลับเรียบ จำนวน 49
				ฟันเฟือง
				ฟันเฟือง จำนวน 78 ฟันเฟือง
				ฟันเฟืองสลับเรียบ จำนวน 75
				ฟันเฟือง

ตาราง ก.2 ผลการวัดค่าความแข็งแบบมาโครฮาร์ดเนส

อบคืนไฟ ครั้งที่	ชนิดเหล็ก	อุณหภูมิอบคืนไฟ °C / จำนวนครั้ง / ครั้งละ (ชั่วโมง)	ค่าความแข็ง (HRC) ใน แต่ละจุด			ค่าความแข็ง เฉลี่ย (HRC)	ค่าความ แข็งเฉลี่ย รวม (HRC)
			จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3		
1	KD21	500 / 2 / 2	58.6	57.8	57.8	58.06	58.03
	KD21	500 / 2 / 2	57.8	58.1	58.2	58.03	
	KD21	500 / 2 / 2	58.0	57.9	58.1	58.00	
2	KD21	530 / 2 / 2	57.8	57.9	57.8	57.83	57.81
	KD21	530 / 2 / 2	57.8	57.8	57.8	57.80	
	KD21	530 / 2 / 2	57.8	57.8	57.8	57.80	
3	KD21	580 / 2 / 2	56.1	55.95	56.01	56.01	56.03
	KD21	580 / 2 / 2	56.0	56.2	55.97	56.06	
	KD21	580 / 2 / 2	56.0	56.0	56.1	56.03	
4	W360	500 / 2 / 2	58.5	58.0	57.9	58.13	58.07
	W360	500 / 2 / 2	58.3	57.9	58.1	58.10	
	W360	500 / 2 / 2	58.2	57.9	57.9	58.0	
5	W360	530 / 2 / 2	57.9	57.8	58.0	57.90	57.85
	W360	530 / 2 / 2	57.8	57.8	58.0	57.86	
	W360	530 / 2 / 2	57.9	57.7	57.8	57.80	
6	W360	580 / 2 / 2	55.9	56.0	55.8	55.90	56.01
	W360	580 / 2 / 2	56.1	56.1	55.9	56.03	
	W360	580 / 2 / 2	56.1	56.1	56.1	56.10	

ตารางที่ ก.3 ผลการวัดความหนาผิวเคลือบโครเมียม (Cr)

ชั้นที่ ชนิด เหล็ก	ระดับความหนาที่ 1 (μm) ค่าที่วัดได้ (μm)			ระดับความหนาที่ 2 (μm) ค่าที่วัดได้ (μm)			ระดับความหนาที่ 3 (μm) ค่าที่วัดได้ (μm)			ความหนา เฉลี่ย(μm)	ความหนา เฉลี่ยรวม (μm)
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3		
1. 0.97%C	1.22	1.15	1.20							1.19	1.17
2. 0.97%C	1.23	1.32	1.05							1.20	
3. 0.97%C	1.14	1.12	1.12							1.13	
4. 0.97%C				2.02	2.05	2.13				2.06	2.17
5. 0.97%C				2.22	2.09	2.18				2.16	
6. 0.97%C				2.32	2.32	2.29				2.31	
7. 0.97%C							2.89	2.90	2.89	2.89	2.92
8. 0.97%C							2.93	2.92	2.92	2.92	
9. 0.97%C							2.98	2.96	2.91	2.95	
10. 0.5%C	1.03	1.02	1.06							1.03	1.07
11. 0.5%C	1.11	1.09	1.06							1.08	
12. 0.5%C	1.10	1.09	1.14							1.11	
13. 0.5%C				2.13	2.15	2.22				2.16	2.19
14. 0.5%C				2.25	2.23	2.21				2.23	
15. 0.5%C				2.10	2.22	2.24				2.18	
16. 0.5%C							2.96	2.93	2.97	2.95	2.95
17. 0.5%C							2.96	2.95	2.89	2.93	
18. 0.5%C							2.95	2.98	2.98	2.97	

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลและจำนวนเหรียญที่ได้จากวัสดุแม่พิมพ์ 2 ชนิด

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	ชนิด เหล็ก	ความ หนา	อุณหภูมิ	ความ แข็ง	qty
1	71	1	1	KD21	1	500	58	50742
2	12	1	1	KD21	1	500	57.8	55192
3	75	1	1	KD21	1	500	56	42213
4	65	1	1	KD21	1	530	58	70119
5	83	1	1	KD21	1	530	57.8	55096
6	73	1	1	KD21	1	530	56	60598
7	39	1	1	KD21	1	580	58	55148
8	80	1	1	KD21	1	580	57.8	45118
9	7	1	1	KD21	1	580	56	42124
10	13	1	1	KD21	2	500	58	44137
11	21	1	1	KD21	2	500	57.8	60102
12	3	1	1	KD21	2	500	56	45127
13	61	1	1	KD21	2	530	58	55046
14	26	1	1	KD21	2	530	57.8	51024
15	62	1	1	KD21	2	530	56	51798
16	103	1	1	KD21	2	580	58	65275
17	91	1	1	KD21	2	580	57.8	65149
18	17	1	1	KD21	2	580	56	45144
19	90	1	1	KD21	3	500	58	60163
20	102	1	1	KD21	3	500	57.8	55122
21	55	1	1	KD21	3	500	56	40341
22	43	1	1	KD21	3	530	58	55184
23	99	1	1	KD21	3	530	57.8	50654
24	95	1	1	KD21	3	530	56	65028
25	87	1	1	KD21	3	580	58	60743
26	78	1	1	KD21	3	580	57.8	55058
27	28	1	1	KD21	3	580	56	63071
28	59	1	1	W360	1	500	58	210168

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลและจำนวนเหรียญที่ได้จากวัสดุแม่พิมพ์ 2 ชนิด (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	ชนิด เหล็ก	ความ หนา	อุณหภูมิ	ความ แข็ง	qty
29	37	1	1	W360	1	500	57.8	200120
30	100	1	1	W360	1	500	56	213046
31	60	1	1	W360	1	530	58	210066
32	74	1	1	W360	1	530	57.8	123187
33	97	1	1	W360	1	530	56	204122
34	24	1	1	W360	1	580	58	214108
35	70	1	1	W360	1	580	57.8	200057
36	72	1	1	W360	1	580	56	205741
37	52	1	1	W360	2	500	58	200763
38	89	1	1	W360	2	500	57.8	200023
39	8	1	1	W360	2	500	56	123254
40	41	1	1	W360	2	530	58	130172
41	50	1	1	W360	2	530	57.8	421231
42	15	1	1	W360	2	530	56	402387
43	106	1	1	W360	2	580	58	350577
44	49	1	1	W360	2	580	57.8	370317
45	23	1	1	W360	2	580	56	300168
46	66	1	1	W360	3	500	58	282187
47	36	1	1	W360	3	500	57.8	311697
48	68	1	1	W360	3	500	56	295714
49	14	1	1	W360	3	530	58	300143
50	11	1	1	W360	3	530	57.8	270137
51	98	1	1	W360	3	530	56	370125
52	76	1	1	W360	3	580	58	360312
53	4	1	1	W360	3	580	57.8	345341
54	86	1	1	W360	3	580	56	351026
55	82	1	1	KD21	1	500	58	55197
56	29	1	1	KD21	1	500	57.8	57012

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลและจำนวนเหรียญที่ได้จากวัสดุแม่พิมพ์ 2 ชนิด (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	ชนิด เหล็ก	ความ หนา	อุณหภูมิ	ความ แข็ง	qty
57	54	1	1	KD21	1	500	56	45790
58	81	1	1	KD21	1	530	58	76543
59	46	1	1	KD21	1	530	57.8	56538
60	67	1	1	KD21	1	530	56	67845
61	77	1	1	KD21	1	580	58	76549
62	2	1	1	KD21	1	580	57.8	56732
63	57	1	1	KD21	1	580	56	45632
64	16	1	1	KD21	2	500	58	56743
65	96	1	1	KD21	2	500	57.8	62134
66	64	1	1	KD21	2	500	56	43215
67	85	1	1	KD21	2	530	58	59874
68	94	1	1	KD21	2	530	57.8	45672
69	101	1	1	KD21	2	530	56	46732
70	42	1	1	KD21	2	580	58	53211
71	58	1	1	KD21	2	580	57.8	45327
72	32	1	1	KD21	2	580	56	45632
73	104	1	1	KD21	3	500	58	63217
74	25	1	1	KD21	3	500	57.8	54321
75	18	1	1	KD21	3	500	56	46328
76	45	1	1	KD21	3	530	58	53786
77	10	1	1	KD21	3	530	57.8	55473
78	105	1	1	KD21	3	530	56	67432
79	47	1	1	KD21	3	580	58	54375
80	84	1	1	KD21	3	580	57.8	554321
81	56	1	1	KD21	3	580	56	68543
82	6	1	1	W360	1	500	58	223416
83	9	1	1	W360	1	500	57.8	234678
84	30	1	1	W360	1	500	56	243158

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลและจำนวนเหรียญที่ได้จากวัสดุแม่พิมพ์ 2 ชนิด (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	ชนิด เหล็ก	ความ หนา	อุณหภูมิ	ความ แข็ง	qty
85	107	1	1	W360	1	530	58	237654
86	69	1	1	W360	1	530	57.8	134256
87	88	1	1	W360	1	530	56	221367
88	1	1	1	W360	1	580	58	209874
89	34	1	1	W360	1	580	57.8	234176
90	51	1	1	W360	1	580	56	206742
91	33	1	1	W360	2	500	58	212564
92	20	1	1	W360	2	500	57.8	241563
93	5	1	1	W360	2	500	56	132044
94	48	1	1	W360	2	530	58	129876
95	63	1	1	W360	2	530	57.8	399874
96	38	1	1	W360	2	530	56	396543
97	44	1	1	W360	2	580	58	358765
98	31	1	1	W360	2	580	57.8	378654
99	93	1	1	W360	2	580	56	300564
100	79	1	1	W360	3	500	58	200675
101	40	1	1	W360	3	500	57.8	309543
102	108	1	1	W360	3	500	56	209654
103	27	1	1	W360	3	530	58	300343
104	35	1	1	W360	3	530	57.8	270435
105	22	1	1	W360	3	530	56	370654
106	53	1	1	W360	3	580	58	360786
107	92	1	1	W360	3	580	57.8	354328
108	19	1	1	W360	3	580	56	340987

Source	F	P
ชนิดเหล็ก	439.03	0.000
ความหนา	15.74	0.000
อุณหภูมิ	10.58	0.000
ความแข็ง	2.64	0.081
ชนิดเหล็ก*ความหนา	7.17	0.002
ชนิดเหล็ก*อุณหภูมิ	2.38	0.102
ชนิดเหล็ก*ความแข็ง	0.85	0.434
ความหนา*อุณหภูมิ	3.85	0.000
ความหนา*ความแข็ง	2.01	0.107
อุณหภูมิ*ความแข็ง	3.03	0.025
ชนิดเหล็ก*ความหนา*อุณหภูมิ	3.78	0.009
ชนิดเหล็ก*ความหนา*ความแข็ง	2.90	0.030
ชนิดเหล็ก*อุณหภูมิ*ความแข็ง	2.46	0.056
ความหนา*อุณหภูมิ*ความแข็ง	2.59	0.018
ชนิดเหล็ก*ความหนา*อุณหภูมิ*ความแข็ง	2.78	0.012
Error		
Total		

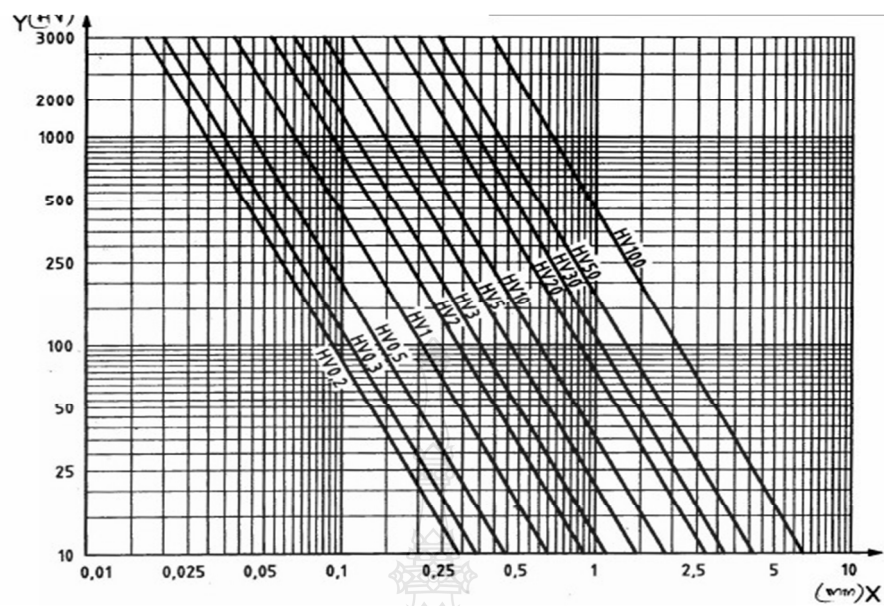
S = 50179.5 R-Sq = 92.14% R-Sq(adj) = 84.42%

ภาพที่ ก.1 ค่า P-value พิจารณา Term ที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05

Hardness test ^a		Low -force hardness test		Microhardness test	
Hardness symbol	Nominal value of the test force F N	Hardness symbol	Nominal value of the test force F N	Hardness symbol	Nominal value of the test force F N
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961	HV 0,01	0,098 07
HV 10	98,07	HV 0,3	2,942	HV 0,015	0,147
HV 20	196,1	HV 0,5	4,903	HV 0,02	0,196 1
HV 30	294,2	HV 1	9,807	HV 0,025	0,245 2
HV 50	490,3	HV 2	19,61	HV 0,05	0,490 3
HV 100	980,7	HV 3	29,42	HV 0,1	0,980 7

^a Nominal test forces greater than 980,7 N may be applied.

ภาพที่ ก.2 Scale ของวิกเกอร์ส



ภาพที่ ก.3 Minimum thickness of the test piece in relation to the test force and to the hardness (HV 0.2 to HV 100)



ภาพที่ ก.4 จุดเสี้ยวของเหรียญ 1 บาท (ใส่เหล็กเคลือบนิกเกิล)



(ค) ด้านหน้า

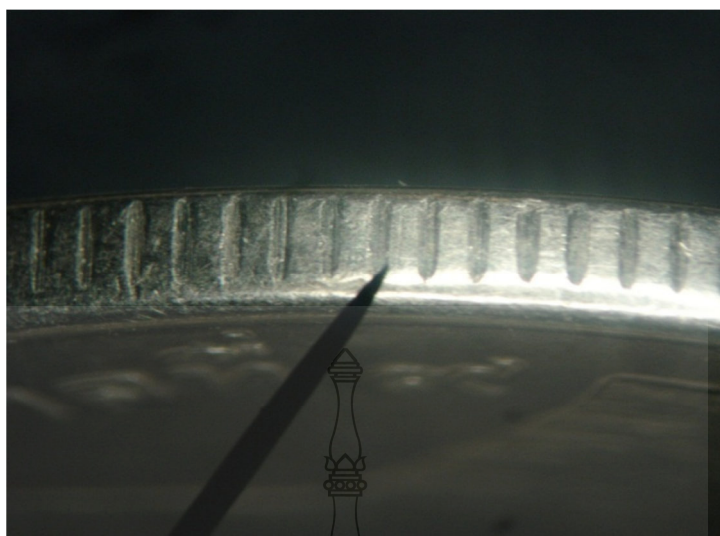


(ง) ด้านหลัง

ภาพที่ ก.5 เหรียญ 1 บาท ดี (ใส่เหล็กเคลือบนิเกิล)



ภาพที่ ก.5 แม่พิมพ์ฟันเฟืองเหรียญ 1 บาท (ใส่เหล็กเคลือบนิเกิล)



ภาพที่ ก.6 ฟันเฟืองเหรียญ 1 บาท (ใส่เหล็กเคลื่อนนิกเกิล)



ภาพที่ ก.7 การศึกษาดูงาน ณ สำนักกษาปณ์



ภาคผนวก ญ
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



รวมบทความ
การประชุมวิชาการย้ายงาน
วิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2554
IE NETWORK CONFERENCE 2011

20 - 21 ตุลาคม 2554
โรงแรมแอมบาสเตอร์ซิตี จอมเทียน พัทยา จังหวัดชลบุรี

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิในการพิจารณาบทความ
การประชุมช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2554

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รศ.ดร.จิตรารัฐกิจการพานิช
ผศ.ดร.ณัฐชา ทวีแสงสกุลไทย
ผศ.ดร.ประมวล สุธีจาร์วัฒน์

รศ.ดร.ปารเมศ ชุตินา
ผศ.ดร.ดาริชา สุธีวงศ์
ผศ.ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดร.ปฎิภาณ จุ้ยเจิม
ดร.สุदारัตน์ วงศ์กั๊วเกียรติ

ดร.ปณณมี สัจจกมล
ดร.สุวิษกรณ์ วิชกุล

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง
ดร.ศิริรัตน์ หมั่นวนิชกุล
อ.จันจิรา คงชื่นใจ

ดร.เพ็ญสุตา พันฤทธิ์ดำ
ดร.สิรางค์ กลั่นคำสอน

มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

ผศ.ชานนท์ มุลวรรณ
อ.ประภาพรรณ เกษราพงศ์

ดร.ศักดิ์ชาย รักการ
อ.จักรินทร์ กลั่นเงิน

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

รศ.ดร.พรเทพ ขอบขจายเกียรติ
ผศ.ดร.ชาญณรงค์ สายแก้ว
ผศ.ดร.วีรพัฒน์ เศรษฐ์สมบูรณ์
ดร.ปาพจน์ เจริญอภิบาล

รศ.ดร.ศุภชัย ปทุมนากุล
ผศ.ดร.दनัยพงศ์ เชษฐโชติศักดิ์
ดร.ธนา ราษฎร์ภักดิ์

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รศ.ดร.วิชัย ฉัตรทินวัฒน์
ผศ.ดร.คมกฤต เล็กสกุล
ผศ.ดร.สรรฐติชัย ชิวสุทธิศิลป์
ผศ.ดร.อรรณพผล สมุทคุปดี
ดร.ชมพูนุท เกษมเศรษฐ์
ดร.อนิรุท ไชยจาร์วัฒน์

รศ.ดร.วิมลสิน เหล่าศิริถาวร
ผศ.ดร.วัสสนัย วรธนังฉริยา
ผศ.ดร.อภิชาติ โสภามาแดง
ดร.กรกฎ ไบบัวเทศ ทิพย์วงศ์
ดร.วสวัชร นาคเขียว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รศ.คมสัน จิระภัทรศิลป์

รศ.ดร.สิทธิชัย แก้วเกื้อกุล

ผศ.ดร. เจริญชัย โขมพัตราภรณ์

ผศ.พจมาน เตียวัฒนรัฐติกาล

ดร.วิศิษฐ์ศรี วัยรัตน์

อ.ปรัชญา เพ็ญสุระ

รศ.ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์

รศ.สันติรัฐ นันสะอาจ

ผศ.ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์

ดร.ช่อแก้ว จตุรานนท์

ดร.อิศรทัต พึ่งอัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รศ.วันชัย แผลมหลักสกุล

ดร.กนกพร ศรีปฐมสวัสดิ์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

ผศ.ดร. สกนธ์ คล่องบุญจิต

ดร. อุดม จันทร์จรัสสุข

ดร.ชুমพล ยวงใย

รศ.ดร. ฤดี มาสุจันทร์

ผศ.ดร.สิทธิพร พิมพัสกุล

ดร.พิชญ์วดี กิตติปัญญางาม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ผศ.พิชัย จันทร์มณี

ผศ.วิชาญ ช่วยพันธ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล

ผศ.ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

ดร.นเรศ อินต๊ะวงศ์

ดร.ภาคภูมิ จารุภูมิ

ดร.บรรเจิด แสงจันทร์

ผศ.มนวิภา อารีพันธ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

รศ.สุชาติ เย็นวิเศษ

ผศ.สุรสิทธิ์ ระว่างวงศ์

ผศ.เดช เหมือนขาว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผศ.ดร.พรศิริ จงกล

ดร.ปภากร สุนานนท์

อ.นรา สมัตถภาพงศ์

ดร.พงษ์ชัย จิตตะมัย

ดร.ปวีร์ ศิริรักษ์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

รศ.ดร.จิรรัตน์ ธีระวราพฤกษ์
 ผศ.ดร.วุฒิชัย วงษ์ทัศนีย์กร
 ผศ.ดร.สวัสดี ภาละราช

รศ.ดร.จิรศิริพงษ์ เจริญภักดิ์
 ผศ.ดร.วรารัตน์ กังสัณฤทธิ
 ผศ.ดร.เสมอจิตร์ หอมรสสุนธ์

มหาวิทยาลัยนเรศวร

ผศ.ดร.ภุพงษ์ พงษ์เจริญ
 ดร.ขวัญนิจ คำเมือง
 ดร.ภาณุ บุรณจารุกร
 อ.ศรีสัจจา วิทยศักดิ์

ผศ.ศิษฏา สิมารักษ์
 ดร.สมลักษณ์ วรรณณมล
 อ.ธณิกานต์ ธงชัย

มหาวิทยาลัยปทุมธานี

ดร. ภาสพิรุฬห์ ศรีสำเร็จ

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ผศ.ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป
 ผศ.ดร.บพิช บุปผโชติ
 ดร.นิตา ชัยมูล

ผศ.ดร.สุตสาคร อินธิเดช
 ดร.อรอุมา ลาสุนนท์

มหาวิทยาลัยมหิดล

รศ.ดร.ดวงพรรณณ ศฤงคารินทร์
 ดร.จิรพรรณ เลียงโรคาพาธ

ผศ.ดร.วเรศรา วีระวัฒน์
 ผศ.ศุภชัย นาทะพันธ์

มหาวิทยาลัยรังสิต

ผศ.ดร.ธนวรรณ อัครวโฒย์
 ผศ.สินี สุขกรมใส
 อ.ศิลปชัย วัฒนเสย
 อ.พรรคพงษ์ แก่นณรงค์

ผศ.ดร.เพียงจันทร์ จริ่งจิตร
 ดร.พิชญ มนัสปิติ
 อ.ต่อศักดิ์ อุทัยไขฟ้า
 อ.สายสุนีย์ พงษ์พัฒนศึกษา

มหาวิทยาลัยรามคำแหง

ผศ.ดร. กฤษดา พิศลยบุตร
 อ.นุกูล อุบลบาน

ดร.เลิศเลขา ธนะชัยพันธ์
 อ.นันทวรรณ อ้าเอี่ยม

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

รศ.ธนรัตน์ แต้ววัฒนา
 ผศ.ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์
 ดร.สิริเดช ขาตินิยม

ผศ.ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล
 ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ
 ดร.พงษ์เพ็ญ จันทนะ

มหาวิทยาลัยศรีปทุม**ผศ.พัฒนาพงศ์ อริยสิทธิ์****อ.จักรพันธ์ กัณหา****อ.ธนิน ศรีวระมย์****อ.วราพจน์ พันธุ์คง**

ดร.ธรีณี มณีศรี

อ.ชวลิต มณีศรี

อ.พิสุทธิ์ รัตนแสนวงษ์

อ.สุพัฒตรา เกษราพงศ์

มหาวิทยาลัยศิลปากร**ผศ.ดร.ประจวบ กลุ่มจิตร****ผศ.ปฏิพัทธ์ หงษ์สุวรรณ****ผศ.สุขุม โฆษิตชัยมงคล****ดร.กัญจนา ทองสนิท****ดร.สิทธิชัย แซ่แหล่ม**

ผศ.จันทร์เพ็ญ อนุรัตน์านนท์

ผศ.วันชัย ลีลาแก้ววงศ์

ผศ.สุวัฒน์ เณรโต

ดร.ณัฐพล ศิริสว่าง

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์**รศ.ดร.นิกร ศิริวงศ์ไพศาล****รศ.สมชาย ชูโณม****ผศ.ดร.เจษฎา วรณสินธุ์****ผศ.ดร.นภิสพร มีมงคล****ผศ.ดร.รัฐชนา สิ้นธวาลัย****ผศ.ดร.เสกสรร สุธรรมานนท์****ผศ.เจริญ เจตวิจิตร****ผศ.ยอดดวง พันธุ์นรา**

รศ.วนิดา รัตนมณี

ผศ.ดร.กลางเดือน โพชนา

ผศ.ดร.ธเนศ รัตนวิไล

ผศ.ดร.ประภาส เมืองจันทร์บุรี

ผศ.ดร.สุภาพรณ ไชยประพัทธ์

ผศ.ดร.อังุ่น สังข์พงศ์

ผศ.พิเชฐ ตระการชัยศิริ

ผศ.สงวน ตั้งโพธิธรรม

มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย**อ.จิตลดา ชัมเจริญ****อ.วรลักษณ์ เสถียรรังสฤษฏ์****อ.อรอุมา กอสนาน**

อ.นิศากร สมสุข

อ.อัญชลี สุพิทักษ์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี**ผศ.ดร.คณิศร ภูนิคม****ผศ.ดร.นุชสรา เกรียงกรกฎ****ผศ.ดร.ระพีพันธ์ ปิตาคะโส****ผศ.ดร.สุขอังคณา ลี****ดร.จริยาภรณ์ อุ่นวงษ์**

ผศ.ดร.นลิน เพ็ชรทอง

ผศ.ดร.ปรีชา เกรียงกรกฎ

ผศ.ดร.สมบัติ สิ้นธุเชาวน์

ดร.ธารชуда พันธุ์นิกุล

ดร.สัณณ์ โอฬาพิริยะกุล

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น**ดร.กรกฎ เหมสถาปัตย์**

ดร.ดำรงเกียรติ รัตนอมรพิน

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

ผศ.ชัยพฤกษ์ อภาเวท

อ.เจษฎา วงศ์อ่อน

ผศ.ประยูร สุรินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รศ.ดร.ชัยยุทธ ช่างสาร

ผศ.ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

ผศ.ดร.ณฐา คุปต์ชเรีเยร

ผศ.ดร.ศิวกร อ่างทอง

ผศ.ดร.สมหมาย ผิวสอาด

ดร.กุลชาติ จุลเพ็ญ

ดร.ณรงค์ชัย โอเจริญ

ดร.สรพงษ์ ภาวสุปรีย์

ผศ.สุรัตน์ ตรีวัฒนพงศ์

รศ.มานพ ตันตระบัณฑิตย์

ผศ.ดร.จตุรงค์ ลังกาพินธุ์

ผศ.ดร.วารุณี อริยวิริยะนันท์

ผศ.ดร.ศิริชัย ต่อสกุล

ผศ.ชวลิต แสงสวัสดิ์

ดร.ชัยยะ ปราณีตพลกรัง

ดร.ระพี กาญจนะ

ดร.สุนนมาลย์ เนียมกลาง



สารบัญ (ต่อ)

OIE22	การประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการบรรจุผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ ธนาคาร เข้าทอง เพิ่มศักดิ์ พิมพ์จ่อง ปภากร พิทยชวาล ปวีร์ ศิริรักษ์	321
OIE23	การศึกษาลักษณะและเกณฑ์ในการปันส่วนต้นทุนค่าไฟฟ้าแยกตามประเภทของผู้ใช้ ไฟฟ้า อรุณฤทธิ์ ตระการไพบุลย์ สุทัศน์ รัตนเกือกังวาน	322
OIE25	การประเมินต้นทุนการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกกรรมโรงงานผลิตชิ้นส่วนภายในรถยนต์ พันธ์ินดา เรืองฤทธิ์ และ สมชาย พัวจินดาเนตร	323
OIE27	ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจากการควบคุมการจ่ายพลังงานให้ช่วยลดความร้อน สำหรับตู้อบไฟฟ้าที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม วิชัย แซ่ลี ประภาพรรณ เคลือบวัฒนรัตน์	324
OIE28	การปรับปรุงประสิทธิภาพแกวค้อยในการรับบริจาคโลหิต โดยใช้การจำลอง สถานการณ์ นรา สมัตถภาพงศ์ อนุวุฒิ คงเพชร ภูวนาท รัตนยรรยง	325
OIE29	การปรับปรุงกระบวนการผลิตด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมอุตสาหกรรมและ การจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ กรณีศึกษา: สายการผลิตชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ ไดร์ฟ ภาณุวัฒน์ ศรีชัย ระพี กาญจนะ	325
OIE30	การคัดเลือกบรรจุภัณฑ์โดยใช้ผังเมทริกซ์รูปตัวเอ็กซ์และกระบวนการลำดับชั้นเชิง วิเคราะห์ กรณีศึกษา: ผลิตภัณฑ์แคบหมู พัฒน์พงษ์ แสงหัตถวัฒนา	327
OIE32	การเพิ่มผลผลิตสำหรับสายการผลิตชุบเคลือบชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ กิตติพงษ์ แสงบุตตี ระพี กาญจนะ	328
OIE33	การเพิ่มอายุการใช้งานของดวงตราเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนชนิดราคา 1 บาท ใหม่ วรวิทย์ สงวนพันธ์ สมศักดิ์ อิทธิโสภณกุล	329



การเพิ่มอายุการใช้งานของดวงตราเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนชนิดราคา 1 บาท ใหม่

Increasing Die's Life of New One Baht Circulation Coins

วรวิทย์ สงวนพันธ์ และ สมศักดิ์ อิทธิโสภณกุล

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ถนน รังสิต - นครนายก ตำบล คลองหก อำเภอ ธัญบุรี จังหวัด ปทุมธานี รหัสไปรษณีย์ 12110

E-mail: goldpurepure@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อยืดอายุการใช้งานของดวงตรา (Die ด้านหัวและก้อย) เหรียญ 1 บาท สำเร็จรูปใหม่ โดยวิธีการเคลือบผิวแบบ PVD (Physical Vapour Deposition) ชนิดสารเคลือบโครเมียมไนไตรด์ (CrN) เนื่องจากได้มีการเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ในการผลิตเหรียญ 1 บาท จากวัสดุคิวโปรนิคเกิล (ทองแดง 75 % และ นิกเกิล 25%) โดยเปลี่ยนมาใช้วัสดุชนิด ไล่เหล็กเคลือบนิกเกิล ทำให้อายุการใช้งานของดวงตราสั้นลง จำนวน เหรียญ 1 บาท ต่อดวงตรา 1 คู่ ลดลงจากประมาณ 400,000 เหรียญ เหลือเพียงประมาณ 40,000 - 50,000 เหรียญ ต่อ ดวงตรา 1 คู่ โดยวัสดุที่ใช้ในการผลิตดวงตราเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน คือ เหล็ก X

ในการดำเนินงานวิจัยได้ใช้วัสดุในการทดลองผลิตดวงตรา จำนวน 2 ชนิด คือ เหล็ก X [11] และ เหล็ก Y [12] โดยใช้วิธีการเคลือบผิวแบบ PVD ชนิดสารเคลือบ CrN ที่ความหนา 3 ระดับ คือประมาณ 1,2 และ 3 ไมครอน(μm) ในการทดสอบวัดความหนาของผิวเคลือบ ใช้วิธีการทดสอบด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence ยี่ห้อ Fischer รุ่น XAN มีการใช้ชิ้นงานมาตรฐานในการสอบเทียบก่อนการวัดชิ้นงานทดสอบ ได้ทำการผ่าวิเคราะห์ชิ้นงานก่อนการใช้งานด้วยเครื่องตัดผ้าแบบ Wire Cut เพื่อศึกษาการเกาะยึดของผิวเคลือบ CrN โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกาว (Scanning Electron Microscope: SEM)

จากการทดสอบนำดวงตราไปใช้ในการผลิตเหรียญ 1 บาท รุ่นใหม่ ด้วยเครื่องตีตรา(Press)เหรียญ ยี่ห้อ GRABERNER แรงกดที่ใช้ 40 ตัน ความเร็ว 800 - 850 เหรียญต่อนาที ปรากฏว่า เหล็ก Y ที่ความหนาผิวเคลือบประมาณ 2-2.7 ไมครอน ได้จำนวนเหรียญต่อดวงตรา 1 คู่ 400,000 - 450,000 ต่อดวงตรา 1 คู่ ซึ่งมากที่สุดจากชิ้นงานทดสอบทั้งหมด ในส่วนของ เหล็ก X พบการแตกร้าวบริเวณผิวหน้าของดวงตราหลังจากตีตราเหรียญได้ประมาณ 50,000 - 60,000 เหรียญ ในทุกๆความหนาของผิวเคลือบ หลังจากการทดสอบได้ทำการผลิตดวงตราด้วย เหล็ก Y ที่ความหนาผิวเคลือบประมาณ 2-2.7 ไมครอน เพื่อใช้ในการผลิตจริงปรากฏว่าจำนวนเหรียญที่ได้ประมาณ 400,000 - 430,000 เหรียญ ต่อดวงตรา 1 คู่ ในจำนวนการทดลองทั้งหมด 6 คู่

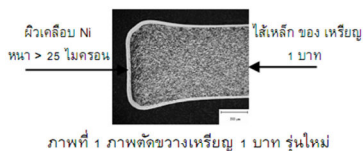
1. บทนำ

เหรียญกษาปณ์หมุนเวียนชุดปัจจุบันมี 9 ชนิดราคา คือ ชนิดราคา 1, 5, 10, 25 และ 50 สตางค์ 1, 2, 5 และ 10 บาท ใน

การกำหนดรายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะของเหรียญกษาปณ์แต่ละชนิดราคาต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของโลหะ ต้นทุนการผลิต แหล่งแร่ภายในประเทศ จำนวนผู้ผลิตและแหล่งผลิต การใช้กับเครื่องหยอดเหรียญในบางชนิดราคา ผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม รวมทั้งความสะดวกในการจับจ่ายใช้สอย

โลหะชุบเคลือบไล่เหล็ก (Electroplated Steel) นำมากล่าวไว้ โดยเฉพาะโดยไม่กล่าวถึงโลหะชุบเคลือบประเภทอื่น เนื่องจากเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติและต้นทุนเหมาะสมที่จะใช้ผลิตเป็นเหรียญกษาปณ์ของประเทศไทยในขณะนี้ โดยเหรียญชุบเคลือบโลหะหลายๆชนิดโดยใช้ไล่เหล็ก ได้เริ่มผลิตและนำออกใช้เป็นเหรียญกษาปณ์ตั้งแต่ปี ค.ศ.1977 ซึ่งในระยะแรกไม่ได้รับความนิยมเท่าที่ควรเนื่องจากมีค่าความแข็งค่อนข้างสูงซึ่งค่าความแข็งเหรียญ 1 บาท ใหม่มีค่าความแข็ง 110 HV30 [13] ทำให้อายุการใช้งานของดวงตราค่อนข้างสั้น ในขณะที่ค่าความแข็งเหรียญ 1 บาท รุ่นเก่า วัสดุคิวโปรนิคเกิล มีค่าความแข็ง 80 HV10 [13] แต่ในปัจจุบันเหรียญชุบเคลือบโลหะหลายๆชนิดโดยใช้ไล่เหล็กได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเทคโนโลยีการชุบเคลือบผิวดวงตราแบบ PVD สามารถเพิ่มอายุการใช้งานของดวงตราให้สูงขึ้น และเหรียญชุบเคลือบไล่เหล็กสามารถแก้ไขปัญหาต้นทุนการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งคุณสมบัติของโลหะที่ได้ก็ใกล้เคียงกับโลหะที่นำมาใช้เคลือบผิวเหรียญ

ไล่เหล็กชุบนิกเกิล พัฒนามาใช้แทนโลหะสีขาว(คิวโปรนิคเกิล) โลหะชนิดนี้มีข้อได้เปรียบในเรื่องของความเงางาม และความทนทานต่อการทำปฏิกิริยาในบรรยากาศปกติ (หมองคล้ำ) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีของโลหะนิกเกิลที่อยู่ชั้นนอก อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีการผลิตเหรียญประเภทนี้มีหลายประเภททั้งแบบเคลือบชั้นเดียว สองชั้น และสามชั้น ซึ่งการใช้เทคโนโลยีที่ต่างกันทำให้คุณสมบัติของเหรียญที่ได้ต่างกัน เช่น อายุการใช้งาน ค่าสัญญาณทางไฟฟ้าและแม่เหล็ก ความทนทานต่อการสึกหรอและการยอมรับของประชาชนเมื่อลักษณะทางกายภาพของเหรียญเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากจากการสึกหรอของเหรียญจากการใช้งานตามปกติ เป็นต้น



ปัญหาที่พบในปัจจุบันพบว่าการตีตราเหริญญคุณภาพดี หมุนเวียนชนิดราคา 1 บาท พบว่าอายุการใช้งานของดวงตราอายุ การใช้งานสั้นลงมากทำให้ผลผลิตจากการตีตราลดลงมากผู้วิจัยจึง เลือกว่าการวิจัยเพื่อที่จะเพิ่มอายุการใช้งานของดวงตรา เพิ่ม ผลผลิตเหริญญ 1 บาท สำเร็จรูปให้มากขึ้นเพื่อให้ทันต่อความ ต้องการของประชาชนภายในประเทศ และยังคงไว้ซึ่งเอกลักษณ์ ความสวยงาม ความถูกต้อง เพื่อคงไว้ซึ่งความภาคภูมิใจของคนใน ชาติดต่อไป

2. การดำเนินการวิจัย

2.1 จัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์

เหล็กที่ใช้ในการทดลองเป็นเหล็กชนิดที่เหมาะสมกับงาน แม่พิมพ์งานเย็น จำนวน 2 ชนิด นำมาผลิตเป็นดวงตราเหริญญ 1 บาท ดังนี้

- เหล็ก X ส่วนผสมทางเคมี C 0.97% , Si 1% , Mn 0.34% , P 0.19% , S 0.08% , Cr 7.88% , Mo 1.90% , V 0.41%

- เหล็ก Y ส่วนผสมทางเคมี C 0.50% , Si 0.20% , Mn 0.25% , Cr 4.50% , Mo 3.0% , V 0.55%

- เต้าอบชุบโลหะแบบสูญญากาศยี่ห้อ SCHMETZ
- เครื่องเคลือบผิว PVD ยี่ห้อ Sulzer รุ่น Metaplas Ioron
- เครื่องทดสอบความแข็งมาโครฮาร์ดเนต
- เครื่องวัดความหนาผิวเคลือบโดยวิธีการเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรส เซนซ์ ยี่ห้อ Fischer รุ่น XAN
- เครื่องตัดแบบ Wire Cut ยี่ห้อ CHARMILLES

2.2 ดำเนินการทดลอง

- นำเหล็กชิ้นทดสอบ ที่ผ่านกระบวนการผลิตพร้อมทำการ อบชุบด้วยเต้าอบชุบแบบสูญญากาศดังนี้

- เหล็ก X จำนวน 9 ชิ้น อุณหภูมิชุบแข็งที่ 1,040 °C เวลาอบ 30 นาที ชุบแข็งในน้ำมัน อบคืนไฟ(Tempering)ที่ 3 ระดับ อุณหภูมิ จำนวน 3 ชั้น คือ อุณหภูมิ

- (1) 500°C สองครั้ง ระยะเวลา 2 ชั่วโมง
- (2) 530°C สองครั้ง ระยะเวลา 2 ชั่วโมง (ตามมาตรฐานผู้ผลิต) [11]
- (3) 580°C สองครั้ง ระยะเวลา 2 ชั่วโมง [2]

- เหล็ก Y จำนวน 9 ชิ้น อุณหภูมิชุบแข็ง 1050°C เวลาอบ 30 นาที ชุบแข็งด้วยก๊าซไนโตรเจน อบคืนไฟ(Tempering) ที่ 3 ระดับ ที่ 3 อุณหภูมิ จำนวน 3 ชั้น คือ อุณหภูมิ

- (1) 500°C สองครั้ง ระยะเวลา 2 ชั่วโมง

- (2) 530°C 2 ชั่วโมง รอบแรก รอบที่สอง 550°C 2 ชั่วโมง (ตามมาตรฐานผู้ผลิต) [12]
- (3) 580°C สองครั้ง ระยะเวลา 2 ชั่วโมง [2]



ภาพที่ 2 ชิ้นทดสอบ เหล็ก X และ Y

- ทดสอบความแข็งมาโครฮาร์ดเนต หนวยการวัดแบบ HRC ชนิดหัวกดแบบเพชรน้ำหนักที่ใช้ในการกด 1471 N ได้ค่าความแข็ง ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงค่าความแข็งหลังจากอบคืนไฟของวัสดุแม่พิมพ์ (Substrate Material)

ชนิดเหล็ก	อุณหภูมิอบคืนไฟ / จำนวนครั้ง / ครั้งละ (ชั่วโมง)	จำนวน จุดที่วัด	ค่าความ แข็งเฉลี่ย (HRC)
X	500 / 2 / 2	3	58
X	530 / 2 / 2	3	57.8
X	580 / 2 / 2	3	56
Y	500 / 2 / 2	3	58
Y	530 / 2 / 2	3	57.8
Y	580 / 2 / 2	3	56

- นำชิ้นทดสอบเข้าสู่กระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีการ PVD ชนิดสารเคลือบ CrN รายละเอียดดังนี้

- (1) เครื่องเคลือบผิวด้วยวิธีการ PVD ภาพที่ 3



ภาพที่ 3 เครื่อง PVD

- (2) คาโทดชนิด Cr ภาพที่ 4



ภาพที่ 4 คาโทดโครเมียม (Cr)



- (3) ค่าพารามิเตอร์ต่างที่ใช้ในการเคลือบผิวรายละเอียด ดังนี้ ภาพที่ 5
- เวลาที่ใช้ในกระบวนการเคลือบผิวประมาณ 5 – 6 ชั่วโมง
 - อุณหภูมิที่ใช้เคลือบผิวประมาณ 400-450 °C
 - ปริมาณของก๊าซที่ใช้ อาร์กอน 300 ลบ.ซ.ม ต่อ นาที ในโตรเจน 500 ลบ.ซ.ม ต่อ นาที
 - บรรจุชิ้นงานใส่แท่นวางชิ้นงาน ภาพที่ 5



ภาพที่ 5 บรรจุชิ้นงาน

- ทำการวัดความหนาผิวเคลือบ CrN ของชิ้นทดสอบได้ ความหนาผิวเคลือบ 3 ระดับความหนา ของชิ้นทดสอบของเหล็ก ทั้งสองชนิดดังแสดงในตารางที่ 2 [10]

ตารางที่ 2 แสดงผลการวัดความหนาผิวเคลือบ

ชนิดเหล็ก	ระดับความหนา	ระดับความหนา	ระดับความหนาที่
	ที่ 1 (µm)	ที่ 2 (µm)	3 (µm)
X	1.2 – 1.3	1.8 – 1.88	2.5 – 2.7
Y	1.2 – 1.3	1.8 – 1.88	2.5 – 2.7



ภาพที่ 8 นำชิ้นทดสอบวัดความหนาผิวเคลือบ

- หลังจากกระบวนการชุบเคลือบผิวแบบPVD แล้วนำชิ้นทดสอบวัดความหนาของผิวเคลือบCr ด้วยเครื่องวัดความหนาผิวเคลือบแบบเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 เครื่องวัดความหนาผิวเคลือบ

- หลังจากวัดความหนาของผิวเคลือบนำชิ้นทดสอบที่ยังไม่ผ่านการใช้งานตัดผ้าด้วยเครื่องตัดแบบ Wire Cut ยี่ห้อ CHARMILLES ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 เครื่องตัดแบบ Wire Cut

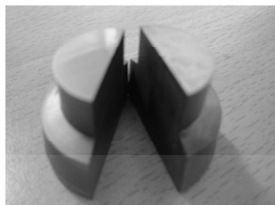
- ในการวัดความหนาผิวเคลือบได้ทำการสอบเทียบด้วยชิ้นผิวเคลือบCr หนา 2.18 ไมครอนมาตรฐานจากบริษัทผู้ผลิต ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ชิ้นงานผิวเคลือบมาตรฐาน

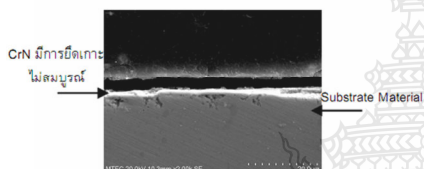


ภาพที่ 10 ผ้าชิ้นทดสอบด้วยเครื่อง Wire Cut



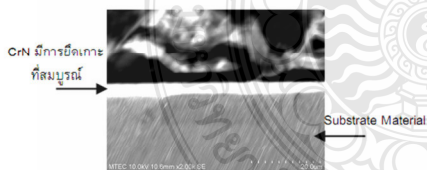
ภาพที่ 11 ชิ้นทดสอบหลังการผ่าด้วยเครื่อง Wire Cut

- หลังจากให้นำชิ้นทดสอบที่ทำสำเร็จแล้วพร้อมทำการทดลองแต่ยังไม่ผ่านการใช้งานมาทำการผ่าด้วยเครื่องตัด Wire Cut แล้วให้นำชิ้นงานเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ที่ถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด(SEM) เพื่อการยึดเกาะระหว่างชิ้นงานทดสอบกับสารเคลือบชนิด CrN



ภาพที่ 12 ชิ้นทดสอบเหล็ก X

จากภาพที่ 12 ในการถ่ายภาพใช้กำลังไฟฟ้าขนาด 24 kV ขนาดเลนส์ 10.3 mm x2.00k จะเห็นได้ว่าการยึดเกาะของสารเคลือบกับชิ้นงานทดสอบชนิดเหล็ก X (Substrate Material) มีการยึดเกาะที่ไม่สมบูรณ์พบจุด บกพร่องรอยแตกกว้างระหว่างสารเคลือบกับชิ้นงานทดสอบเป็นสาเหตุที่สำคัญที่ทําอายุการใช้งานของดวงตรา (Die) ของเหรียญ 1 บาท รุ่นใหม่ สั่นลงมากเมื่อนำมาใช้ผลิตเหรียญ 1 บาท รุ่นใหม่ ชนิดใส่เหล็กเคลือบนิกเกิลมีอายุการใช้งานเฉลี่ย 40,000 – 50,000 เหรียญต่อดวงตรา 1 คู่ (หัว – ก้อย)



ภาพที่ 13 ชิ้นทดสอบเหล็ก Y

จากภาพที่ 13 การถ่ายภาพใช้กำลังไฟฟ้าขนาด 24 kV ขนาดเลนส์ 10.3 mm x2.00k จะเห็นได้ว่าการยึดเกาะของสารเคลือบกับชิ้นงานทดสอบชนิดเหล็ก Y (Substrate Material) มีการยึดเกาะที่ดีไม่พบรอยแตกกว้างหรือรอยแยกระหว่างสารเคลือบกับชิ้นงานทดสอบซึ่งสอดคล้องกับการทดลองใช้งานอายุการใช้งาน

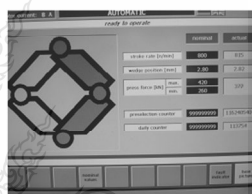
ของดวงตรา(Die) มีอายุการใช้งานที่ต่ำกว่าเหล็ก X มากเมื่อนำมาใช้ผลิตเหรียญ 1 บาท รุ่นใหม่ ชนิดใส่เหล็กเคลือบนิกเกิลมีอายุการใช้งานเฉลี่ย 400,000 – 450,000 เหรียญต่อดวงตรา 1 คู่ (หัว – ก้อย) กระบวนการเคลือบผิว PVD ทั้ง X และ Y ทำตามขั้นตอนเหมือนกันทุกประการ

3. สรุปผลการวิจัย

หลังจากที่ได้ดำเนินการทดลองผลิตดวงตราเหรียญ 1 บาท แล้วได้นวดวงตราที่มีลวดลายพร้อมใช้งาน นำไปทดลองตีตราด้วยเครื่องตีตราเหรียญหมุนเวียนขนาดแรงกด 40 ตัน ความเร็วในการตีตรา 800 – 850 เหรียญ ต่อ นาที ดังภาพ



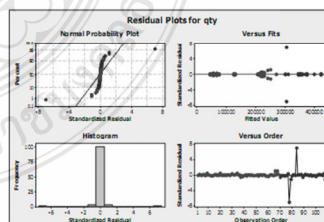
ภาพที่ 14 เครื่องตีตรา



ภาพที่ 15 แสดงค่าต่างๆของเครื่องตีตรา

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการวิจัยได้มีการนำเอาโปรแกรม Minitab15 เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ผลและสรุปปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องในการวิจัย ด้วยวิธีการทางสถิติแบบ DOE Factorial ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พิจารณาจากค่า P-Value ถ้า Term ใดมีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่ามีผลต่อค่า Y (qty) อย่างมีนัยสำคัญ ดังนี้

(1) วิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นจากกราฟ Residual Plots for qty



ภาพที่ 16 Residual Plots for qty



- Normal Probability Plot - ข้อมูลอยู่ใกล้เส้น แสดงว่าค่า y มีการแจกแจงแบบปกติ
 - Histogram - กราฟมีลักษณะทรงระฆังคว่ำ แสดงว่าค่า y มีการแจกแจงแบบปกติ
 - Versus Fits - ข้อมูลกระจายตัวแบบสุ่ม แสดงว่าค่าความแปรปรวนของแต่ละกลุ่มเท่ากัน
 - Versus Order - ค่าความคาดเคลื่อนเป็นแบบสุ่ม ไม่มีรูปแบบที่เป็น Pattern ชัดเจน แสดงว่าค่าความแปรปรวนมีค่าคงที่
- จากผลทั้ง 4 ข้อข้างต้น แสดงว่าข้อมูลที่ได้ออกแบบการทดลองขึ้นมีความเหมาะสมที่จะนำไปวิเคราะห์ด้วย Multilevel Factorial Design ต่อไป

(2) การวิเคราะห์ผลด้วย Multilevel Factorial Design

พิจารณาว่า Term ที่มีค่า P-value ที่ระดับน้อยกว่า 0.05 แสดงว่ามีปัจจัยที่มีผลต่อค่า qty อย่างมีนัยสำคัญ ดังภาพที่ 17

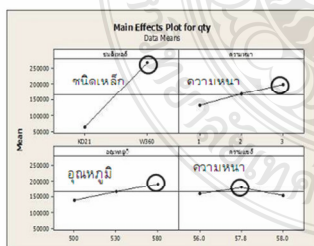
Source	F	P
ชนิดเหล็ก	439.49	0.000
ความหนา	15.70	0.000
อุณหภูมิ	10.76	0.000
ความแข็ง	2.95	0.000
ชนิดเหล็ก*ความหนา	7.13	0.002
ชนิดเหล็ก*อุณหภูมิ	2.46	0.095
ชนิดเหล็ก*ความแข็ง	0.82	0.446
ความหนา*อุณหภูมิ	3.97	0.000
ความหนา*ความแข็ง	2.03	0.103
อุณหภูมิ*ความแข็ง	3.06	0.024
ชนิดเหล็ก*ความหนา*อุณหภูมิ	3.82	0.000
ชนิดเหล็ก*ความหนา*ความแข็ง	2.91	0.000
ชนิดเหล็ก*อุณหภูมิ*ความแข็ง	2.50	0.053
ความหนา*อุณหภูมิ*ความแข็ง	2.60	0.038
ชนิดเหล็ก*ความหนา*อุณหภูมิ*ความแข็ง	2.81	0.011
Error		
Total		

S = 50074.5 R-Sq = 92.16% R-Sq(adj) = 84.46%

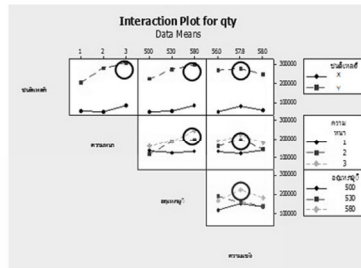
ภาพที่ 17 แสดงค่า P-Value

พิจารณา Term ที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ปัจจัยที่มีผลคือ ชนิดเหล็ก, ความหนา, อุณหภูมิ, ชนิดเหล็กกับความหนา, ความหนากับอุณหภูมิ, อุณหภูมิกับความแข็ง, ชนิดเหล็กกับความหนากับอุณหภูมิ, ชนิดเหล็กกับความหนากับความแข็ง, ความหนากับอุณหภูมิกับความแข็ง, ชนิดเหล็กกับความหนากับอุณหภูมิกับความแข็ง มีผลต่อค่า qty อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

(3) วิเคราะห์หาค่าของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสม (Optimize) ที่ทำให้ค่า qty ดีหรือสูงที่สุด



ภาพที่ 18 กราฟ Main Effect Plot for qty



ภาพที่ 19 กราฟ Interaction Plot for qty

สรุปจากกราฟ

จากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab ทำให้ทราบว่าต้องกำหนดให้ ชนิดเหล็กเป็น Y ความหนาเท่ากับ 3 μm อุณหภูมิคืนไฟ (Tempering) เท่ากับ 580 °C ความแข็งเท่ากับ 57.8 HRC ทำให้ค่า qty ดีหรือสูงที่สุด

จากการวิจัยนี้พบว่าชนิดของเหล็กที่นำมาใช้ในการผลิตดงตรา(Die)มีผลต่อจำนวนเหรียญที่ผลิตได้เป็นอย่างมาก จะเห็นได้ว่าเหล็ก Y เมื่อนำมาใช้ในการผลิตดงตราควรควบคุมอุณหภูมิในการอบคืนไฟอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ 530 – 580 °C เพื่อให้ได้ความแข็งเฉลี่ยที่ 57.8 HRC และความหนาของผิวเคลือบ CrN เฉลี่ยที่ 2 – 3 μm จะทำให้จำนวนเหรียญที่ผลิตได้มีปริมาณสูงที่สุด

4. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยความร่วมมือจากหลายฝ่าย ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วารุณี เปรมานนท์ ที่คอยให้คำปรึกษา เป็นอย่างดี รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ย่างเต็มที่ตลอดมา ขอขอบพระคุณคุณเลิศชัย เจ้าหน้าที่ MTEC ที่เอื้อเพื่อการถ่ายภาพ SEM และที่สำคัญที่สุดขอขอบพระคุณท่านผู้อำนวยการสำนักขาปณและเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในงานวิจัยนี้ด้วยดีมาตลอด

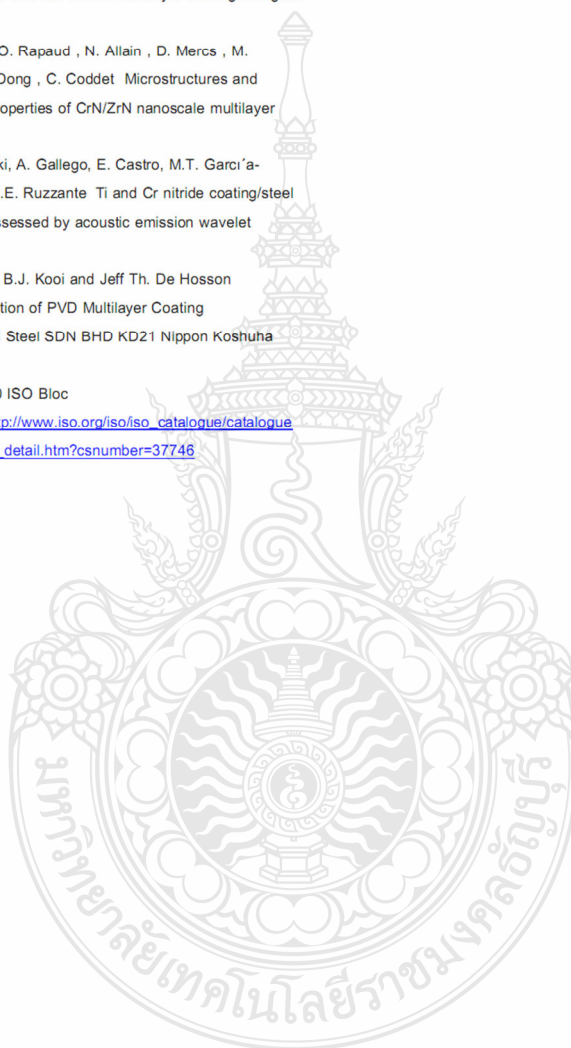
5. เอกสารอ้างอิง

- [1] นางฉัตร ชารีลาภ, ยอดหญิง หมวกงาม, ชูชาติ นิติบัญญัติวงศ์ และนันทน์ ภาวรุ่งกูร การชุบเคลือบผิววัสดุผสมนิกเกิล – อะลูมิเนียม ด้วยไฟฟ้าเพื่อป้องกันการสึกหรอ
- [2] รศ.มณัส สติระจินดา วิศวกรรมกรรมการอบชุบเหล็ก วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์
- [3] การอบชุบเหล็กกล้าด้วยความร้อน สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะการ กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม
- [4] กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ (ประมวลด้วย Minitab)
- [5] Arnold H. Deutchman, Ph.D. and Robert J. Partyka, M.S. Comparison of the Properties of PVD and IBED



Hardcoats (TiN and Cr₂N)

- [6] C. Martini n, L.Ceschini A comparative study of the tribological behaviour of PVD coatings on the Ti-6Al-4V alloy
- [7] R. Bayon a, A. Igartua a, X. Fernandez a, R. Martinez b, R.J. Rodriguez b, J.A. Garcia b, A. de Frutos c, M.A. Arenas c, J. de Damborenea c Corrosion-wear behaviour of PVD Cr/CrN multilayer coatings for gear applications
- [8] Z.G. Zhang, O. Rapaud, N. Allain, D. Merck, M. Baraket, C. Dong, C. Coddet Microstructures and tribological properties of CrN/ZrN nanoscale multilayer coatings
- [9] R. Piotrkowski, A. Gallego, E. Castro, M.T. Garcia-Hernandez, J.E. Ruzzante Ti and Cr nitride coating/steel adherence assessed by acoustic emission wavelet analysis
- [10] N. Carvalho, B.J. Kooi and Jeff Th. De Hosson Characterization of PVD Multilayer Coating
- [11] PHH Special Steel SDN BHD KD21 Nippon Koshuha Steel
- [12] Bohler W360 ISO Bloc
- [13] ISO 6507 http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue/tc/catalogue_detail.htm?csnumber=37746



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายวรวิทย์ สงวนพันธ์
วัน เดือน ปีเกิด	29 กันยายน 2517
ที่อยู่	51/10 หมู่ที่ 3 ต. บ้านใหม่ อ. ปากเกร็ด จ. นนทบุรี 11120
การศึกษา	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชา อุตสาหกรรม
ประสบการณ์การทำงาน	นายช่างโลหะชำนาญงาน ฝ่ายหล่อหลอม ส่วนผลิตตัวเปล่า สำนักสถาปนิก กรมธนารักษ์ กระทรวงการคลัง

