

การกำหนดปัจจัยในการชุบเคลือบผิว PVD บนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์
ชนิดราคา 1 บาท เพื่อลดต้นทุนการผลิต

THE DETERMINING FACTOR IN PVD COATING ON ONE BAHT
COIN DIE TO REDUCE PRODUCTION COST

ธีระยุทธ วงศ์สมานมณี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การกำหนดปัจจัยในการชูปเคลือบผิว PVD บนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์
ชนิดราคา 1 บาท เพื่อลดต้นทุนการผลิต

ธีระยุทธ วงศ์สมานมณี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำหนดปัจจัยในการชุบเคลือบผิว PVD บนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท เพื่อลดต้นทุนการผลิต
ชื่อ - นามสกุล	นายธีระยุทธ วงศ์สมานมณี
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา	นายสมศักดิ์ อธิธิโสภณกุล, Ph.D.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์วารุณี เปรมานนท์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาปัจจัยระดับที่เหมาะสมในการชุบเคลือบผิวแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท เพื่อเพิ่มอายุการใช้งาน ด้วยกระบวนการชุบ PVD (Physical Vapor Deposition) โดยประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) ผู้วิจัยใช้วิธีการออกแบบการทดลองเป็นแบบ 2^k Factorial Design ซึ่งประกอบด้วย 3 ปัจจัยหลักได้แก่ ชนิดของสารเคลือบผิว (ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และไทเทเนียมคาร์ไบด์ไนไตรด์ (TiCN)) ระดับความหนา (น้อยกว่าหรือเท่ากับ $2\ \mu\text{m}$ และ $3\ \mu\text{m}$) และอุณหภูมิที่ใช้ในการชุบเคลือบผิว (น้อยกว่าหรือเท่ากับ $250\ ^\circ\text{C}$ และ $500\ ^\circ\text{C}$) เพื่อศึกษาผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมของปัจจัยต่างๆ โดยจัดลำดับการทดลองเป็นแบบสุ่มสมบูรณ์ และใช้วิธีวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าว ได้มีการนำผลการทดลองไปใช้ในการปรับปรุงกระบวนการชุบเคลือบผิว PVD โดยใช้สารเคลือบ TiN ที่ระดับความหนาเฉลี่ย $2.95\ \mu\text{m}$ และใช้อุณหภูมิชุบเคลือบผิวเฉลี่ย $425.5\ ^\circ\text{C}$ บนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท ทำให้มีอายุการใช้งานเฉลี่ยเพิ่มขึ้นกว่า 1,000,000 เหรียญต่อคู่ หรือ 2.5 เท่าจากอายุการใช้งานเดิม ส่งผลให้สามารถลดต้นทุนผันแปรในการผลิตแม่พิมพ์ลงได้กว่าร้อยละ 50 ของต้นทุนการผลิตปัจจุบัน และสามารถนำไปเป็นแนวทางในการทำงานวิจัยอื่นต่อไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการศึกษาเทคโนโลยีระดับนาโนมาประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรม

คำสำคัญ: การทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสุ่มสมบูรณ์ แม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ การชุบ PVD ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) ไทเทเนียมคาร์ไบด์ไนไตรด์ (TiCN)

Thesis Title	The Determining Factor in PVD Coating on One Baht Coin Die to Reduce Production Cost
Name - Surname	Mr. Teerayut Wongsamarnmanee
Program	Industrial Engineering
Thesis Advisor	Mr. Somsak Ithisoponakul, Ph.D.
Thesis Co-advisor	Associate Professor Varunee Premanond, Ph.D.
Academic Year	2012

ABSTRACT

The objective of this research is to study the influencing coating factors user to increase the die life for one Baht's coin die by using PVD (Physical Vapor Deposition) coating method. This experiment has been designed using 2^k Factorial Design method, composing of three main factors which are coating types; Titanium Nitride (TiN) and Titanium Carbo Nitride (TiCN), the coating thickness of $\leq 2 \mu\text{m}$ and $\leq 3 \mu\text{m}$ and the coating temperature of $\leq 250^\circ\text{C}$ and $\leq 500^\circ\text{C}$ in order to observe the main impact and interaction of each factor. Beside this, the sequencing idea of this research is based on Completely Randomized Design with the Statistical analysis by the confidence level of 95 %

The successful results have been obtained from the experiments. The PVD coating process using TiN of average thickness $2.95 \mu\text{m}$ and average temperature 425.5°C on one Baht's coin die has been proof to improve die life to more than 1,000,000 coins per die or 2.5 times of die life increasing compare to the current die. Consequently, the variable production cost has also been reduced more than 50%. The results from this research can also be extended for future work as the knowledge base for the continual improvement of the carry on research especially in the area of Nano Technology to be applied with this in industrialize scale.

Keywords: Factorial Design method, Absolutely randomize, Coining Die, PVD coating, Titanium Nitride (TiN), Titanium Carbo Nitride (TiCN)

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ โดยได้รับความอนุเคราะห์อย่างยิ่งจาก ดร.สมศักดิ์ อธิธิโสภณกุล รองศาสตราจารย์ ดร.วารุณี เปรมานนท์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศรีไร จารุกัญญา ที่คอยให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางการจัดทำวิทยานิพนธ์ ให้คำปรึกษาตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกต้อง มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้เพิ่มเติมที่ตลอดมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ที่ได้รับ จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

และที่สำคัญที่สุดผู้วิจัยขอขอบพระคุณท่านผู้อำนวยการสำนักกษาปณ์ ผู้อำนวยการส่วนต่างๆ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้านการทดลอง และการให้ความร่วมมือในงานวิจัยนี้ จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์จากการค้นคว้าอันพึงมีของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบทดแทน บุญคุณต่อบิดา มารดา และครูอาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนศิษย์มาตลอด ด้วยจิตวิญญาณของความเป็นครู ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

นายธีระยุทธ วงศ์สมานมณี



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	7
1.3 สมมติฐานการวิจัย.....	7
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	7
1.5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	8
1.6 ประโยชน์คาดว่าจะได้รับ.....	8
1.7 ข้อจำกัดในการทำวิจัย.....	9
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
2.1 การปรับปรุงแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ.....	10
2.2 เครื่องมือควบคุมคุณภาพเชิงวิศวกรรม (7 QC Tools).....	18
2.3 การนำข้อมูลทางสถิติมาใช้ในการวิจัย.....	24
2.4 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments).....	26
2.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสึกหรอ.....	37
2.6 ตัวแปรที่มีผลต่อการสึกหรอ.....	38
2.7 การชุบเคลือบผิวฟิล์มบางบนวัสดุ.....	40
2.8 อิทธิพลของตัวแปรต่อลักษณะและสมบัติทางกลของสารเคลือบในงานชุบ PVD.....	46
2.9 การทดสอบงานเคลือบผิวเพื่อหาคุณสมบัติทางกลและอื่นๆ.....	52
2.10 ต้นทุน (Cost).....	59
2.11 การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	61

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3 การดำเนินการวิจัย.....	64
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	64
3.2 การเก็บข้อมูลของปัญหาที่เกิดจากการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ.....	73
3.3 วิเคราะห์ปัญหาโดยใช้เครื่องมือควบคุมคุณภาพ.....	73
3.4 การออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม.....	75
3.5 การอภิปรายและสรุปผล	86
4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	87
4.1 ผลการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)	87
4.2 การกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสม	94
4.3 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติผิวเคลือบ	98
4.4 วิเคราะห์การลดต้นทุนการผลิต	106
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	109
5.1 สรุปผลการวิจัย	109
5.2 การลดต้นทุนการผลิต.....	111
5.3 อภิปรายงานวิจัย.....	112
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	113
รายการอ้างอิง.....	114
ภาคผนวก.....	118
ภาคผนวก ก มาตรฐานการตรวจสอบและข้อมูลอื่นที่เกี่ยวข้อง	119
ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	133
ประวัติผู้เขียน.....	145

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	รายละเอียดการจ่ายแลกเหรียญกษาปณ์หมุนเวียน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2550 2
1.2	ประมาณการต้นทุนเหรียญกษาปณ์หมุนเวียน ชนิดราคา 1 บาท ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555..... 4
2.1	การเปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุที่เป็นโลหะ 18
2.2	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบ 2 ^k 35
2.3	การเปรียบเทียบคุณสมบัติของสารเคลือบต่าง ๆ และการนำไปใช้งาน..... 45
3.1	ข้อมูลรายละเอียดปัญหาการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท ปี พ.ศ. 2555 73
3.2	การกำหนดปัจจัยและระดับการทดลอง 77
3.3	รายละเอียดการทดลองชุบเคลือบ PVD บนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญชนิดราคา 1 บาท..... 79
3.4	ผลการวัดอุณหภูมิการชุบเคลือบและความหนาผิวเคลือบหลังการชุบ PVD..... 82
3.5	การออกแบบการทดลองโดยใช้ Minitab 15 84
4.1	ผลการออกแบบการทดลอง โดยใช้ Minitab 15..... 88
4.2	การวิเคราะห์ Estimated Effects and Coefficients for Yield 92
4.3	วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)..... 92
4.4	การควบคุมระดับปัจจัยที่เหมาะสม..... 97
4.5	ประมาณการต้นทุนเหรียญกษาปณ์หมุนเวียน ชนิดราคา 1 บาท ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555..... 107

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ปริมาณเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนในระบบเศรษฐกิจ ปี พ.ศ. 2555	4
1.2 สถิติอายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์หมุนเวียน ปี พ.ศ. 2555 (อายุโดยเฉลี่ย) .	5
1.3 สาเหตุการเสียของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท ปี พ.ศ. 2555.....	6
1.4 ตัวอย่างลักษณะของผิวแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญที่เป็นรอยฝ้า (หมดอายุการใช้งาน)	6
2.1 แนวการลากผ่านวัดโค้งกระทะ (Curvature) และความสูงลาดตาย แม่พิมพ์ด้านก้อย.....	11
2.2 โค้งกระทะ (Curvature) และความสูงลาดตายแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ ชนิดราคา 1 บาทด้าน หัว.....	11
2.3 โค้งกระทะ (Curvature) และความสูงลาดตายแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ ชนิดราคา 1 บาทด้าน ก้อย.....	11
2.4 ลักษณะการไหลของเนื้อโลหะบนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญแบบไม่มีห้องกระทะ.....	12
2.5 ลักษณะการไหลของเนื้อโลหะบนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญแบบห้องกระทะพอดี	12
2.6 ลักษณะการไหลของเนื้อโลหะบนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญแบบห้องกระทะสูง	13
2.7 การกดอัดแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญในระบบปิด	13
2.8 ภาพตัดขวางโลหะเหรียญตัวเปล่าชนิดราคา 1 บาท.....	14
2.9 การเปรียบเทียบคุณสมบัติความเหนียวและความสัมพันธ์ด้านความเหนียวกับความ แข็ง	15
2.10 คุณสมบัติความแข็งที่อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ ไฟที่สัมพันธ์กับความแข็งของ เหล็กเกรด W360.....	16
2.11 แผนภาพ TTT ไคอะแกรมของเหล็กเกรด W360.....	16
2.12 แบบฟอร์มบันทึกอายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ	19
2.13 ตัวอย่างแผนภูมิพารेटอ	20
2.14 ตัวอย่างแผนภูมิแก๊งปลาตัว	21
2.15 ตัวอย่างกราฟชนิดต่างๆ.....	22
2.16 ตัวอย่างฮิสโตแกรม	23
2.17 ตัวอย่างการกระจายของข้อมูล.....	23
2.18 แผนภูมิควบคุม (Control Chart)	24
2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการ.....	27

สารบัญภาพ (ต่อ)

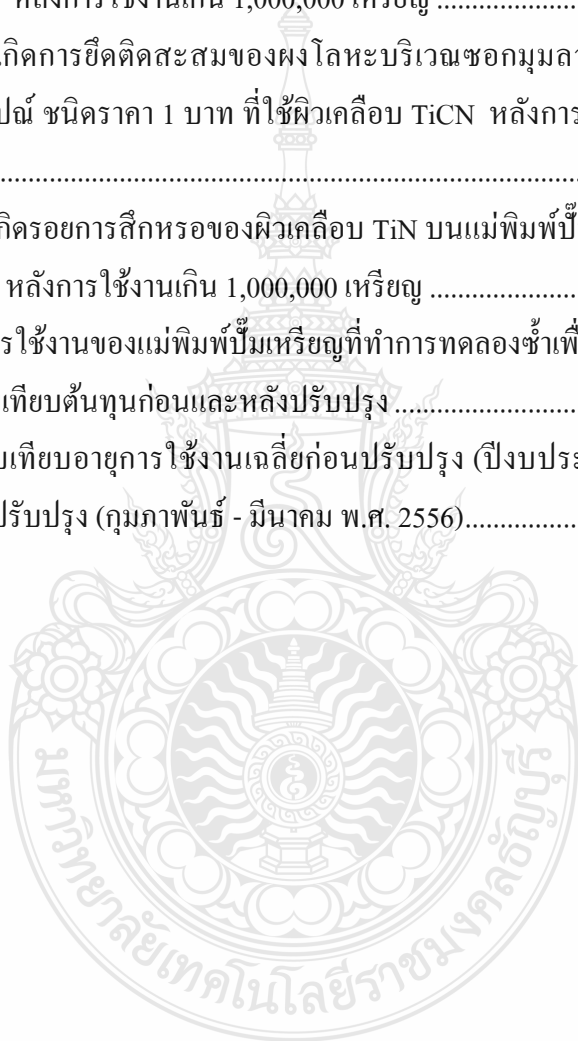
ภาพที่	หน้า
2.20 กราฟ Interaction Plots กรณีไม่พบผลกระทบร่วมปัจจัย A ศึกษาที่ 2 ระดับ และ 3 ระดับ	32
2.21 PVD Coating Technologies: Basic Layout	41
2.22 PVD ARC Technology	42
2.23 คุณสมบัติของผิวเคลือบ TiN	43
2.24 คุณสมบัติของผิวเคลือบ TiCN	44
2.25 ขนาดของผลึกของแต่ละเฟสที่สัมพันธ์กับค่าความดันของแก๊ส N_2	46
2.26 อิทธิพลของแก๊ส N_2 ต่อค่าความแข็งและ Wear Depth ภายใต้เงื่อนไข; $T_s = 400^\circ C$, $V_s = -100 V$, $I_{arc} = 80 A$	47
2.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของเหล็ก SKD11 กับอุณหภูมิการอบคืนไฟ...	48
2.28 โมเดลของโครงสร้างจุลภาคในช่วงต่างๆ Movchan, Demchishin, Thornton.....	49
2.29 Messier's Structure Zone Model That Shown The Effect of The Bias Voltage And Substrate Temperature on Film Structure	50
2.30 Schematic Representations and SEM Micrographs of Microstructures in Complex Coating	52
2.31 เส้นขอบของพื้นผิวและความหยาบ	54
2.32 Rockwell Hardness Test, HRC	55
2.33 การทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ส	56
2.34 การทดสอบวิเคราะห์ลักษณะ โครงสร้างของชั้นเคลือบ (Coating Architecture).....	57
2.35 การวัดความหนาผิวเคลือบด้วยเทคนิค Fluorescent X - Rays (XRF)	58
3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	64
3.2 แผนผังกระบวนการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์	65
3.3 เครื่องวัดความแข็งมาโครฮาร์ดเนส และขั้นตอนทดสอบหลังการชุบแข็ง	66
3.4 ขั้นตอนการชุบผิวหน้าแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญก่อนชุบเคลือบผิว.....	68
3.5 การขัดละเอียดปรับผิวหน้าแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญก่อนชุบเคลือบผิว.....	68
3.6 การปรับปรุงโปรแกรมชุบเคลือบผิว.....	69
3.7 ขั้นตอนการล้างชิ้นงานก่อนชุบ	69

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.8 แท่งคาร์ไบด์ไทเทเนียม (Ti) และตำแหน่งการติดตั้ง	70
3.9 การใช้แก๊สไนโตรเจนเป่าทำความสะอาด.....	71
3.10 การขัดผิวหน้าแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญด้วยล้อแปรงพลาสติก.....	72
3.11 การตรวจสอบคุณภาพผิวหน้าแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ	72
3.12 แผนภูมิพาเรโตของปัญหาที่เกิดจากการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญขาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท.....	74
3.13 แผนผังแสดงเหตุและผลของปัญหาที่ผิวเคลือบแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ 1 บาท เป็นรอยฝ้า ...	75
3.14 ชิ้นงานทดสอบที่ใช้เป็นตัวแทน (Dummy) ก่อนชุบเคลือบผิว PVD.....	80
3.15 ชิ้นงานหลังการชุบด้วยสารเคลือบ TiN และสารเคลือบ TiCN.....	80
3.16 อุปกรณ์ Pyrometer ใช้วัดอุณหภูมิในระหว่างการทำงานของห้องชุบเคลือบผิว PVD	81
3.17 เครื่องวัดความหนาผิวเคลือบ แบบเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์.....	81
3.18 เครื่องปั๊มเหรียญชนิดความเร็วสูงสุด 850 เหรียญต่อนาที แรงกดสูงสุด 1500 kN.....	82
3.19 อุปกรณ์สำหรับชักส้อมตัวอย่างเหรียญขาปณ์สำเร็จ ในแต่ละถังเก็บ (Hoper).....	83
4.1 กราฟแสดงผลจากการทดลองปั๊มเหรียญขาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท สำเร็จ ตามการ ออกแบบ การทดลอง	89
4.2 ทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (4 in 1 Graphs from Minitab).....	91
4.3 การทดสอบความเหมาะสมของปัจจัยหลัก (Main Effects Plot)	95
4.4 การทดสอบความเหมาะสมของปัจจัยร่วม (Interaction Plot).....	95
4.5 การกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Plot).....	97
4.6 เครื่องวัดความหยาบผิว Contour and Surface Roughness และตำแหน่งวัดบนชิ้นงาน ...	98
4.7 กราฟความหยาบผิวเคลือบ TiN และกราฟความหยาบผิวเคลือบ TiCN	99
4.8 เครื่องวัดความแข็ง Micro hardness และรอยกดบนผิวเคลือบ ขยายที่ 1000X	100
4.9 เครื่องวัดความแข็ง Rockwell C Indentation และตารางระดับค่าการเกาะยึดแบ่งเป็น 6 ระดับความเสียหาย	101
4.10 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงหลังทดสอบการเกาะยึด โดยวิธี Rockwell C ของผิวเคลือบชิ้นงานชุบเคลือบผิว TiN และชิ้นงานชุบเคลือบผิว TiCN.....	101
4.11 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ SEM สารเคลือบ TiN และ TiCN.....	102

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.12 ภาพถ่ายตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์ SEM ของชิ้นงานทดสอบเคลือบ TiN.....	103
4.13 ภาพถ่ายตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์ SEM ของชิ้นงานทดสอบเคลือบ TiCN	103
4.14 การชำรุดที่เกิดการหลุดร่อนของผิวเคลือบ TiCN บนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิด ราคา 1 บาท หลังการใช้งานเกิน 1,000,000 เหรียญ	104
4.15 การชำรุดที่เกิดการยึดติดสะสมของผงโลหะบริเวณซอกมุมลวดตายบนแม่พิมพ์ปั๊ม เหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท ที่ใช้ผิวเคลือบ TiCN หลังการใช้งานเกิน 1,000,000 เหรียญ.....	105
4.16 การชำรุดที่เกิดรอยการสึกหรอของผิวเคลือบ TiN บนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิด ราคา 1 บาท หลังการใช้งานเกิน 1,000,000 เหรียญ	105
5.1 กราฟอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญที่ทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผล	110
5.2 กราฟเปรียบเทียบต้นทุนก่อนและหลังปรับปรุง	112
5.3 กราฟเปรียบเทียบอายุการใช้งานเฉลี่ยก่อนปรับปรุง (ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555) กับ หลังทำการปรับปรุง (กุมภาพันธ์ - มีนาคม พ.ศ. 2556).....	113



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เหรียญกษาปณ์ เป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนสำหรับธุรกรรมทางเศรษฐกิจ โดยหลักการแล้วปริมาณความต้องการเหรียญจะแปรผันตามอัตราการขยายตัวทางเศรษฐกิจ ซึ่งพบว่าปริมาณความต้องการเหรียญและธนบัตรมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันกับการขยายตัวของผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ (GDP) แต่ความต้องการเหรียญจะมีความยืดหยุ่นในอัตราสูงกว่าธนบัตร เนื่องจากเหรียญได้ถูกใช้ในธุรกรรมขนาดเล็ก ทำให้มีความถี่ในการใช้มากกว่าธนบัตร จึงทำให้เกิดความไม่สมดุลระหว่างอุปสงค์และอุปทานของเหรียญในระบบเศรษฐกิจ ปัจจุบันโรงกษาปณ์ประเทศไทยยังไม่สามารถผลิตเหรียญโลหะตัวเปล่าที่เป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตเหรียญกษาปณ์ได้เอง ยังคงต้องซื้อจากภายนอก ทำให้ต้นทุนในการผลิตสูง ต้นทุนในการผลิตเหรียญแต่ละชนิดราคาประกอบด้วยค่าเหรียญโลหะตัวเปล่า (ค่าโลหะบวกค่าจัดทำ) ภาณินำเข้า ภาณิมูลค่าเพิ่ม ค่าขนส่ง ค่าใช้จ่ายในการผลิตของโรงกษาปณ์ เช่น การจัดทำแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ การปั๊มเหรียญและนับบรรจุ และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ ซึ่งต้นทุนของเหรียญทุกชนิดราคามีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามราคาโลหะในตลาดลอนดอน (LME) ทำให้ต้นทุนการผลิตเหรียญเพิ่มสูงมากขึ้น บางชนิดราคาสูงกว่าราคาหน้าเหรียญ นอกจากนี้ต้นทุนค่าเหรียญโลหะตัวเปล่าที่ต้องผันแปรไปตามราคาค่าโลหะแล้ว ต้นทุนการผลิตของโรงกษาปณ์ก็เพิ่มสูงขึ้นด้วย

ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2545 เป็นต้นมา เหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท ซึ่งเป็นเหรียญที่ผลิตมากที่สุดประสบปัญหาด้านต้นทุนตลอดมา โดยในปี พ.ศ. 2550 มีต้นทุนในการผลิตสูงถึงประมาณ 1.84 บาทต่อเหรียญ และเมื่อปริมาณความต้องการเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท ในระบบเศรษฐกิจเพิ่มขึ้น ทำให้ต้องผลิตเหรียญเพิ่มขึ้น จึงต้องประสบปัญหาด้านต้นทุนเพิ่มมากขึ้น จากข้อมูลการจ่ายแลกเหรียญกษาปณ์โดยรวมในปี พ.ศ. 2550 ดังตารางที่ 1.1 ปรากฏว่ามีผลขาดทุนประมาณ 787 ล้านบาท เมื่อพิจารณาข้อมูลโดยละเอียดจะเห็นว่าเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1, 5 และ 10 สตางค์ มีต้นทุนสูงกว่าราคาหน้าเหรียญมาก แต่มีปริมาณการจ่ายแลกค่อนข้างต่ำและการผลิตเหรียญกลุ่มนี้ในแต่ละชนิดราคาเพียงหนึ่งหมื่นเหรียญต่อปี จำนวนเงินที่ขาดทุนจึงค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับผลการดำเนินการโดยรวม ส่วนเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 25, 50 สตางค์ และ 1 บาท มีต้นทุนสูงกว่าราคาหน้าเหรียญ และมีปริมาณการจ่ายแลกสูงมาก โดยเฉพาะเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท ที่ส่งผลกระทบต่อ

ผลต่างของราคาหน้าเหรียญอย่างชัดเจน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องปรับเปลี่ยนรายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะของเหรียญโลหะตัวเปล่าเพื่อลดต้นทุนการผลิต ในขณะที่เหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 2, 5 และ 10 บาท มีราคาหน้าเหรียญสูงกว่าต้นทุนไม่มากนัก จึงเป็นปัญหาเร่งด่วนที่จะต้องดำเนินการแก้ไขปัญหาด้านต้นทุนดังกล่าว

ตารางที่ 1.1 รายละเอียดการจ่ายแลกเหรียญกษาปณ์หมุนเวียน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2550
(หน่วย: บาท)

ชนิดราคา	ยอดจ่ายแลก (เหรียญ)	ผลต่าง / (ขาดทุน) ต่อเหรียญ	ผลต่าง/(ขาดทุน) ต่อปริมาณการจ่ายแลก ทั้งหมด	หมายเหตุ
1 สตางค์	10,000	(-0.2938)	(-2,938.00)	(+) ผลต่าง
5 สตางค์	10,000	(-0.2705)	(-2,699.00)	(-) ขาดทุน
10 สตางค์	10,000	(-0.3084)	(-2,519.00)	(*) ข้อมูลปกปิด
25 สตางค์	136,730,000	(-0.7978)	(-89,298,363.00)	
50 สตางค์	106,496,000	(-0.5927)	(-63,120,179.20)	
1 บาท	792,822,000	(-1.8387)	(-1,457,761,811.40)	
2 บาท	160,102,000	*-	*-	
5 บาท	206,403,000	*-	*-	
10 บาท	168,687,000	*-	*-	
รวม			(-786,933,256.33)	

- หมายเหตุ: 1. ที่มา: กองแผนงาน กรมธนารักษ์
2. ต้นทุนตามราคาที่ทำ TOR ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2550

เนื่องจากการผลิตเหรียญกษาปณ์เป็นกิจการที่ไม่มุ่งเน้นการแสวงหากำไร แต่ต้องควบคุมไม่ให้มูลค่าโลหะสูงกว่าราคาหน้าเหรียญเพื่อป้องกันการนำเหรียญไปหลอมแล้วนำโลหะไปใช้ประโยชน์อย่างอื่น และมีผลการดำเนินการโดยรวมไม่ขาดทุน เพื่อไม่เป็นภาระกับเงินงบประมาณของประเทศ เมื่อปี พ.ศ. 2551 จึงได้มีการศึกษา วิเคราะห์หาชนิดโลหะที่มีต้นทุนต่ำ แนวโน้มราคาในระยะยาวไม่สูงมาก มีความคงทน มีคุณลักษณะสวยงาม ไม่หมองคล้ำเมื่อเก็บไว้นาน เหมาะสมที่จะ

นำมาใช้ในการผลิตเหรียญ และเป็นที่ยอมรับกันในประเทศต่างๆ ทั่วโลก ซึ่งเท่ากับมีตลาดรองรับในการจัดหาเหรียญตัวเปล่าในอนาคต เพื่อทำการปรับปรุงรายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะของเหรียญกษาปณ์ชุดใหม่ โดยมีลักษณะดังนี้

1.1.1 กลุ่มที่ 1 เหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1, 5 และ 10 สตางค์ ใช้โลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ 99% เพื่อให้สอดคล้องกับกระบวนการผลิตของสำนักกษาปณ์ ในขณะที่ต้นทุนการผลิตเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมน้อยมาก

1.1.2 กลุ่มที่ 2 เหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 25 และ 50 สตางค์ ใช้โลหะใส้เหล็กชุบทองแดง เนื่องจากเป็นเหรียญหมุนเวียนแบบทางเดียว

1.1.3 กลุ่มที่ 3 เหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1, 2, และ 5 บาท เป็นเหรียญที่มีใช้ในระบบเศรษฐกิจมากที่สุด รวมทั้งใช้งานกับเครื่องหยอดเหรียญด้วย โดย

1) ชนิดราคา 1 บาท ใช้โลหะใส้เหล็กชุบนิเกิล เนื่องจากเป็นโลหะเดียวที่มีต้นทุนต่ำที่สุด โดยยังคงใช้งานกับเครื่องหยอดเหรียญได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังมีลักษณะทางกายภาพเหมือนเดิมทุกประการ

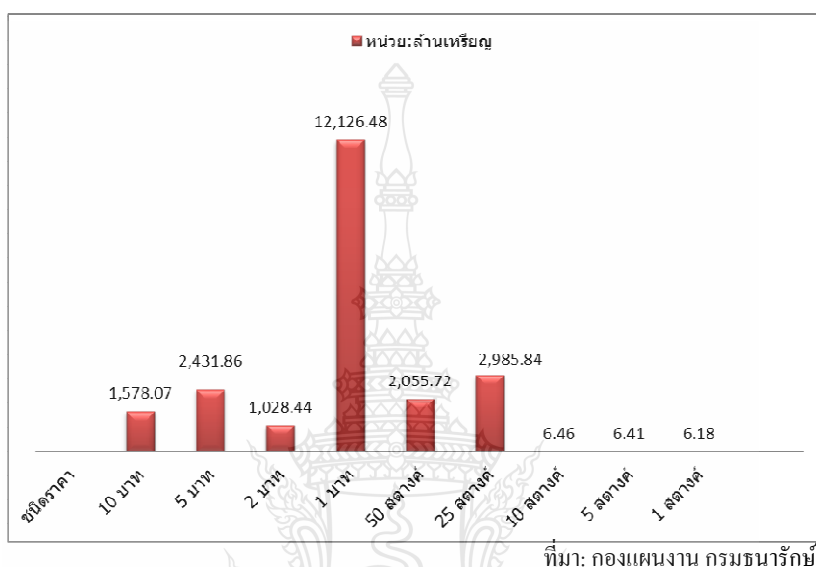
2) ชนิดราคา 2 บาท ใช้โลหะผสมอะลูมิเนียมบรอนซ์ เพื่อให้แยกความแตกต่างได้ชัดเจน แต่ต้นทุนสูงกว่าโลหะใส้เหล็กชุบนิเกิล

3) ชนิดราคา 5 บาท ใช้โลหะเดิม (นิเกิลสอดใส้ทองแดง) โดยลดน้ำหนักลง เพื่อลดต้นทุน เนื่องจากหากใช้โลหะใส้เหล็กชุบนิเกิลจะมีความเสี่ยงต่อการปลอมแปลงทั้งในการใช้งานกับเครื่องหยอดเหรียญและการใช้หมุนเวียนตามปกติ

1.1.4 กลุ่มที่ 4 เหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 10 บาท ยังคงใช้โลหะสองสีเช่นเดิม เนื่องจากสามารถแยกความแตกต่างได้ง่ายทั้งยังใช้งานเครื่องหยอดเหรียญและป้องกันการปลอมแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

หลังจากนำเทคโนโลยีโลหะชุบเคลือบผิวใส้เหล็กมาใช้ในการผลิตเหรียญกษาปณ์ชุดใหม่ ซึ่งเทคโนโลยีดังกล่าวเป็นเทคโนโลยีที่ใหม่สำหรับโรงกษาปณ์ประเทศไทย แต่ด้วยข้อจำกัดด้านต้นทุนของเหรียญโลหะผสมที่สูงขึ้นแบบก้าวกระโดด จึงมีความจำเป็นต้องทำการปรับปรุงเทคนิคการผลิตที่เกี่ยวข้องให้มีความสอดคล้องกับเทคโนโลยีที่เปลี่ยนแปลงไป และจากข้อมูลประมาณการรายจ่ายการผลิตและดำเนินงานเหรียญกษาปณ์หมุนเวียน ปี พ.ศ. 2555 พบว่าเหรียญชนิดราคาต่ำ 1, 5, 10 และ 25 สตางค์ ยังคงมีต้นทุนสูงกว่าราคาหน้าเหรียญ ในขณะที่เหรียญชนิด 1, 2 บาท มีแนวโน้มต้นทุนจะสูงกว่าราคาหน้าเหรียญ หากในอนาคตต้นทุนโลหะในตลาดโลกมีความผันผวนและราคาสูงขึ้น จะส่งผลกระทบต่อการผลิตเหรียญชนิดราคาดังกล่าวทันที โดยเฉพาะเหรียญกษาปณ์ ชนิด

ราคา 1 บาท เป็นเหรียญที่มีปริมาณการผลิตต่อปีสูง และเป็นเหรียญที่มีปริมาณการหมุนเวียนในระบบเศรษฐกิจของประเทศ มากที่สุด (ประมาณร้อยละ 56 ของจำนวนเหรียญกษาปณ์ทั้งหมดในระบบ) ดังภาพที่ 1.1 จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงการผลิตที่เกี่ยวข้องเพื่อลดต้นทุนการผลิตและช่วยลดความเสี่ยงด้านต้นทุนที่จะสูงกว่าราคาหน้าเหรียญในอนาคต



ภาพที่ 1.1 ปริมาณเหรียญกษาปณ์ที่หมุนเวียนในระบบเศรษฐกิจของปี พ.ศ. 2555

เมื่อพิจารณาข้อมูลต้นทุนเหรียญกษาปณ์หมุนเวียน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 โดยเฉพาะเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 1 บาท ดังรายละเอียดในตารางที่ 1.2 พบว่ามีต้นทุนโดยรวมใกล้เคียงกับราคาหน้าเหรียญ

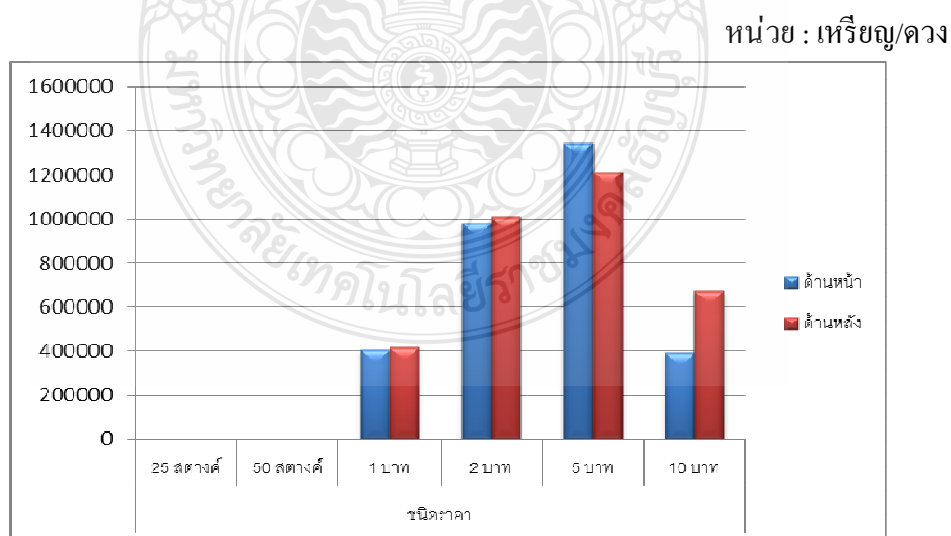
ตารางที่ 1.2 ปริมาณการต้นทุนเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 (หน่วย: บาทต่อเหรียญ)

ต้นทุนเหรียญตัวเปล่า	ค่าใช้จ่ายในการผลิต	ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน	ต้นทุนประมาณการต่อเหรียญ
0.5843 บาท	0.2250 บาท	0.0567 บาท	0.8660 บาท

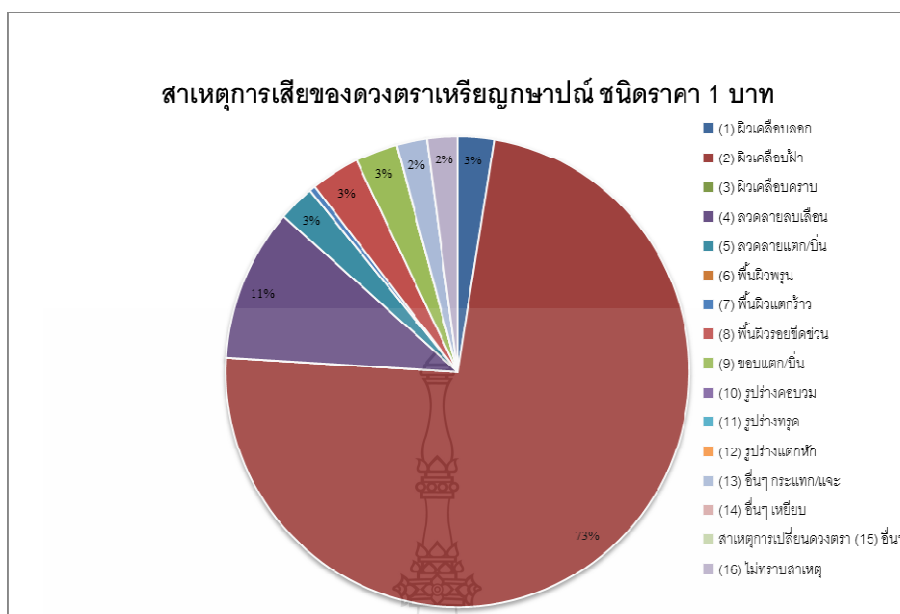
ที่มา: สำนักกษาปณ์ กรมธนารักษ์

เมื่อจำแนกรายละเอียดตามตารางที่ 1.2 พบว่าเหรียญดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายในการผลิตเท่ากับ 0.2250 บาทต่อเหรียญ หรือคิดเป็นร้อยละ 25.98 ของต้นทุนประมาณการต่อเหรียญ ค่าใช้จ่ายดังกล่าวได้รวมในส่วน of ต้นทุนการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ เท่ากับ 0.0228 บาทต่อเหรียญไว้แล้ว หรือคิดเป็นร้อยละ 10.09 ของค่าใช้จ่ายในการผลิต โดยค่าใช้จ่ายดังกล่าวจะสามารถลดลงได้ หากอายุการใช้งานเฉลี่ยของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญเพิ่มขึ้น เพราะจำนวนการผลิตแม่พิมพ์จะลดจำนวนลง ทำให้ต้นทุนในการผลิตเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 1 บาท ลดลงได้ ดังนั้นการปรับปรุงการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญจึงมีความเกี่ยวข้องกับต้นทุนในการผลิตโดยตรง

การปรับปรุงครั้งนี้ผู้วิจัยจะศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท เป็นหลัก เนื่องจากเป็นเหรียญที่มีปริมาณการผลิตหมุนเวียนในระบบเศรษฐกิจสูงสุด ตามภาพที่ 1.1 ในด้านการผลิตก็เป็นเหรียญที่มีปริมาณการผลิตต่อปีสูงเฉลี่ย 600 - 1,000 ล้านเหรียญ (ขึ้นอยู่กับสภาวะเศรษฐกิจ) และเป็นเหรียญที่มีต้นทุนใกล้เคียงกับราคาหน้าเหรียญ จึงมีโอกาสต้นทุนจะสูงกว่ามูลค่าราคาหน้าเหรียญได้ตลอดเวลา ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อภาระงบประมาณแผ่นดินอย่างมาก หากไม่สามารถควบคุมต้นทุนได้ และเมื่อพิจารณาอายุการใช้งานของแม่พิมพ์เหรียญดังกล่าว ในปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 ตามภาพที่ 1.2 พบว่ามีอายุการใช้งานเฉลี่ยประมาณ 400,000 เหรียญต่อคู่ ซึ่งอยู่ในระดับต่ำเมื่อเทียบกับแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญชนิดราคาอื่น โดยพบว่ามีสาเหตุการเสียกว่าร้อยละ 70 ที่เกิดจากผิวเคลือบเป็นรอยฝ้า ดังภาพที่ 1.3 และ 1.4 จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องมีการศึกษาเพื่อปรับปรุงอย่างเร่งด่วนต่อไป



ภาพที่ 1.2 สถิติอายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 (อายุโดยเฉลี่ย)



ภาพที่ 1.3 สาเหตุการเสียของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555



ภาพที่ 1.4 ลักษณะของผิวแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญที่เป็นรอยฝ้า (หมดอายุการใช้งาน)

อีกทั้งผู้บริหารขององค์กรยังได้เล็งเห็นความสำคัญและตระหนักว่า การลดปัญหาในการผลิตเป็นสิ่งสำคัญ โดยเฉพาะในกระบวนการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ ที่เป็นงานลักษณะต้นน้ำ และเป็นปัจจัยหลักในกระบวนการผลิตที่จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพ ประสิทธิภาพและต้นทุนการผลิต การลดปัญหาที่เกิดขึ้นและการปรับปรุงการผลิตให้เหมาะสมกับเทคโนโลยีที่เปลี่ยนแปลงจึงเป็นเป้าหมายขององค์กร จะเห็นว่าการดำเนินงานในปัจจุบันอาจยังไม่บรรลุตามนโยบายที่กำหนด เนื่องจากการแก้ไขปัญหาให้ถูกต้องยังไม่ได้ดำเนินการตามหลักวิชาการอย่างแท้จริง บางกรณีเป็นการแก้ไขปัญหา

เฉพาะหน้า และขาดมาตรฐานในการปฏิบัติงาน สิ่งเหล่านี้จะก่อให้เกิดปัญหา เช่น ของเสีย ผลิตภัณฑ์ไม่ทันสมัยมอบ ต้นทุนในการผลิตสูง ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือขององค์กรในระยะยาวได้ ในเบื้องต้นจึงได้มีการส่งเจ้าหน้าที่ผู้เกี่ยวข้องไปศึกษาดูงาน ณ โรงกษาปณ์ต่างประเทศที่มีประสบการณ์ในการผลิตเหรียญได้เหล็กชุบนิกเกิล (Nickel Plated Steel) เพื่อศึกษาดูงานกระบวนการผลิตเหรียญกษาปณ์ดังกล่าว

ประเด็นนี้ผู้วิจัย ได้ร่วมในการศึกษาดูงานดังกล่าวและต้องการที่จะศึกษาวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท เพิ่มเติม โดยผลจากการทำวิจัยร่วมกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ได้ผลนำมาซึ่งการเปลี่ยนเหล็กวัสดุเดิมใหม่ที่ใช้ผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท [26] และจากอายุการใช้งานเฉลี่ยของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ ชนิดราคา 1 บาท ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 ซึ่งถือว่าต่ำเมื่อเทียบกับอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญชนิดราคาอื่น และเพื่อจะแก้ไขปรับปรุงการผลิตให้สอดคล้องกับเทคโนโลยีที่เปลี่ยนแปลงอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อช่วยลดค่าใช้จ่ายในการผลิตที่เกิดขึ้น ก่อนดำเนินการผลิตในปริมาณมาก (Mass Production) ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาหาปัจจัยระดับที่เหมาะสมในการชุบเคลือบผิว PVD บนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท โดยประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลอง

1.2.2 เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานเฉลี่ยของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ ทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท ที่มีแนวโน้มต้นทุนการผลิตสูงเท่ากับราคาหน้าเหรียญ

1.3 สมมติฐานงานวิจัย

งานวิจัยนี้ทำให้อายุการใช้งานเฉลี่ยของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 1 บาท เพิ่มขึ้นและทำให้รู้ถึงปัจจัยที่ทำให้อายุการใช้งานเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้น

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1.4.1 กระบวนการชุบเคลือบผิวแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท ด้วยวิธี PVD โดยใช้สารเคลือบผิวชนิดไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และไทเทเนียมคาร์ไบด์ไนไตรด์ (TiCN) จำนวน 2 ชนิดในการทดลอง

1.4.2 ความหนาของผิวเคลือบที่ระดับความหนา $\leq 2\mu\text{m}$ และ $\leq 3\mu\text{m}$

1.4.3 ใช้อุณหภูมิในการชุบเคลือบผิว $\leq 250^{\circ}\text{C}$ (Low Temperature) และ $\leq 500^{\circ}\text{C}$ (High Temperature)

1.4.4 เกรดเหล็กผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 1 บาท ใช้เหล็ก W360 ยี่ห้อ Bohler ที่โรงกษาปณ์ใช้งานปัจจุบัน

1.4.5 เหรียญโลหะตัวเปล่าที่ใช้ในการผลิตเหรียญชนิดราคา 1 บาท เป็นโลหะใส่เหล็กเคลือบ นิกเกิลหนา $25 \pm 5\mu\text{m}$

1.4.6 ต้นทุนเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 1 บาท ในส่วนของต้นทุนการผลิต (Production Cost) ของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 ศึกษาข้อมูลวัสดุเหล็กทำแม่พิมพ์ วัสดุเหรียญโลหะตัวเปล่าและวัสดุเคลือบผิว (PVD)

1.5.2 จัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์และดำเนินการของบประมาณการจัดซื้อวัสดุเคลือบผิว

1.5.3 ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางกลของวัสดุเคลือบผิว วัสดุทำแม่พิมพ์ แล้วดำเนินการทดลองขั้นต้น

1.5.4 ดำเนินการทดลองขั้นต้น พร้อมปรับกระบวนการทดลองให้เหมาะสม

1.5.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

1.5.6 ดำเนินการปรับปรุงกระบวนการโดยสุ่มเลือก (Random) แก้ไขปัญหา พิจารณาหาวิธีการแก้ไขปัญหาล่วงหน้าก่อนและหลังการทดลอง

1.5.7 ดำเนินการทดลองจริง และทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผล

1.5.8 สรุปผลการทดลองพร้อมข้อเสนอแนะ

1.5.9 เผยแพร่งานวิจัย

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1.6.1 ทำให้ปริมาณเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท สำเร็จ ที่ผลิตได้ต่อแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ 1 คู่ เพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 50 - 100 จากอายุการใช้งานเฉลี่ยปัจจุบัน

1.6.2 งานวิจัยนี้จะทำให้ต้นทุนในการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท ลดลงได้ร้อยละ 25 ของต้นทุนการผลิตปัจจุบัน

1.6.3 สามารถนำกำลังการผลิตที่คงเหลือ ไปปรับจ้างผลิตงานอื่นจากหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชน เพื่อทำให้ต้นทุนการผลิตต่อหน่วยลดลง

1.6.4 สามารถนำไปเป็นแนวทางในการต่อยอดในการทำวิจัยต่อไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการศึกษาเทคโนโลยีระดับนาโนในกระบวนการชุบเคลือบผิววัสดุชนิดอื่นๆ

1.6.5 เป็นการศึกษางานทางโลหะวิทยาของเหล็กกล้าผสมที่มีเนื้อโลหะเอกพันธ์ (Homogeneous) เพิ่มเติม สำหรับงานลักษณะ Fine Art Forming

1.6.6 เป็นแนวทางในการเลือกโลหะทำแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์

1.7 ข้อจำกัดในการทำวิจัย

1.7.1 ต้องคงไว้ซึ่งความสวยงามและความคมชัดของลวดลายเหรียญ

1.7.2 การเบิกซื้อวัสดุ อุปกรณ์ตามระเบียบราชการอาจใช้ระยะเวลามาก

1.7.3 การหาข้อมูลรายละเอียดทางด้านเทคนิคมีข้อจำกัด เนื่องจากไม่สามารถนำแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญออกไปตรวจสอบภายนอกสถานที่ได้



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การปรับปรุงแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ [1]

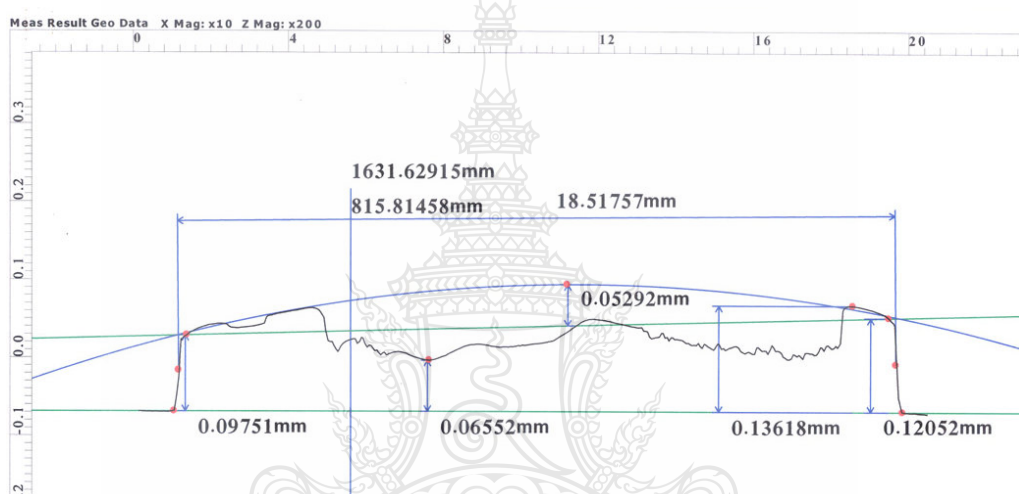
กระบวนการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์แต่ละชนิดราคา จะมีรายละเอียดการผลิตและปัจจัยการควบคุมที่แตกต่างกัน จะต้องมีการวิเคราะห์ เช่น การกำหนดค่าความสูงของลวดลาย (Relief) ค่าท้องกระทะ (Curvature) เป็นต้น เพื่อให้เหมาะสมในแต่ละชนิดราคา เพราะเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการขึ้นรูปของโลหะ รวมถึงปัจจัยอื่นๆ เช่น ขนาดของเหรียญสำเร็จ ความหนาของเหรียญโลหะตัวเปล่า ชนิดโลหะที่ใช้ทำเหรียญตัวเปล่า ซึ่งแต่ละปัจจัยอาจมีผลกระทบต่อการผลิตที่ต่างกันไป โดยเฉพาะเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนชนิดราคา 1 บาท ที่เป็นโลหะใส่เหล็กชุบนิกเกิล (Nickel Plated Steel) ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพแตกต่างจากเหรียญกษาปณ์ชนิดราคาอื่นที่สำนักกษาปณ์ได้เคยทำการผลิตมาก่อนโดยมีค่าความแข็งของผิวสูงขึ้นจากเดิมเป็น 110 HV (30) ทำให้การปั๊มขึ้นรูป (Minting Presses) ต้องใช้แรงกด (Pressure) สูงขึ้น จึงส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญและคุณภาพของเหรียญสำเร็จ

2.1.1 ความสูงลวดลายและท้องกระทะของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ

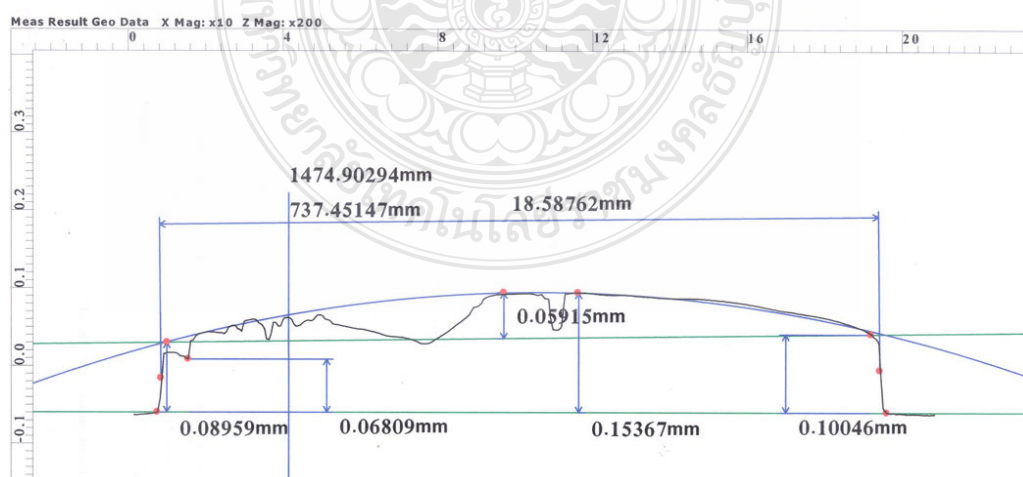
ปัญหาในการผลิตเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท มีความจำเป็นต้องปรับปรุงแก้ไขในแต่ละขั้นตอนให้มีความสัมพันธ์กัน กล่าวคือ ในด้านคุณภาพความคมชัดของลวดลาย ความสวยงาม ความสมบูรณ์ของลวดลาย และในด้านต้นทุนการผลิตที่ต้องเหมาะสม เพื่อให้สอดคล้องกับนโยบายกรมธนารักษ์ที่กำหนดไว้ตั้งแต่ต้น และจากการที่กรมธนารักษ์จัดส่งเจ้าหน้าที่ไปฝึกอบรม ศึกษาดูงาน ณ โรงกษาปณ์ต่างประเทศ ซึ่งเป็น โรงกษาปณ์ที่มีประสบการณ์ในการผลิตเหรียญโลหะใส่เหล็กชุบนิกเกิล (Nickel Plated Steel) จึงได้นำข้อมูลหลังจากการฝึกอบรม ศึกษาดูงาน ด้านการผลิตที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการผลิตแม่ตรา (Master Dies) แม่พิมพ์ปั๊มเหรียญและรายละเอียดอื่นๆ มาปรับใช้ในโรงกษาปณ์ เช่น การกำหนดค่าความสูงของลวดลาย (Relief) แม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ ชนิดราคา 1 บาท สูงสุดไม่เกิน 0.07 มิลลิเมตร และค่าท้องกระทะ (Curvature) ไม่ควรสูงเกิน 0.05 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 2.2 และภาพที่ 2.3 เป็นต้น ทางโรงกษาปณ์ได้นำมาปรับใช้ให้เหมาะสมกับเทคโนโลยีและสภาพการปฏิบัติงาน พร้อมการปรับปรุงแม่แบบใหม่ตามข้อมูลที่ได้รับจากการฝึกอบรม โดยทำการปรับความสูงของลวดลาย (Relief) ให้สอดคล้องกับการผลิต เน้นความคมชัดของลวดลายเพิ่มขึ้น ควบคุมการผลิตให้ได้ค่ากำหนด พร้อมเก็บบันทึกข้อมูลเพื่อจะใช้เปรียบเทียบในการผลิต ดังภาพที่ 2.1 และจะได้นำไปปรับใช้ในการปรับปรุงเหรียญกษาปณ์ชนิดราคาอื่นต่อไปได้



ภาพที่ 2.1 แนวการลากผ่านวัดโค้งกระทะ (Curvature) และความสูงลดตายแม่พิมพ์ด้านก้อย [1]



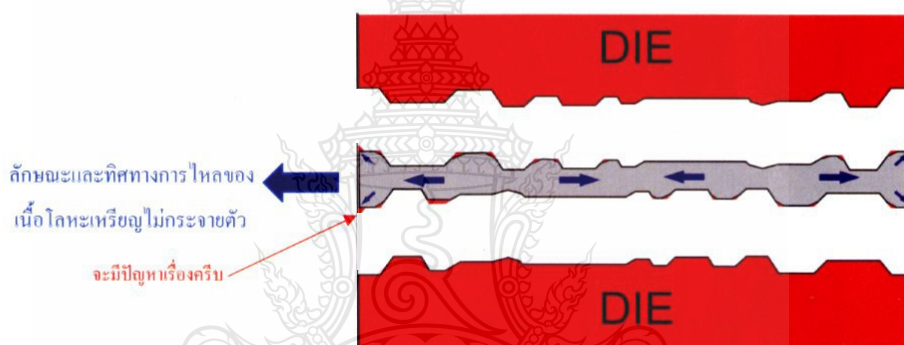
ภาพที่ 2.2 โค้งกระทะและความสูงลดตายแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ ชนิดราคา 1 บาท ด้านหัว [1]



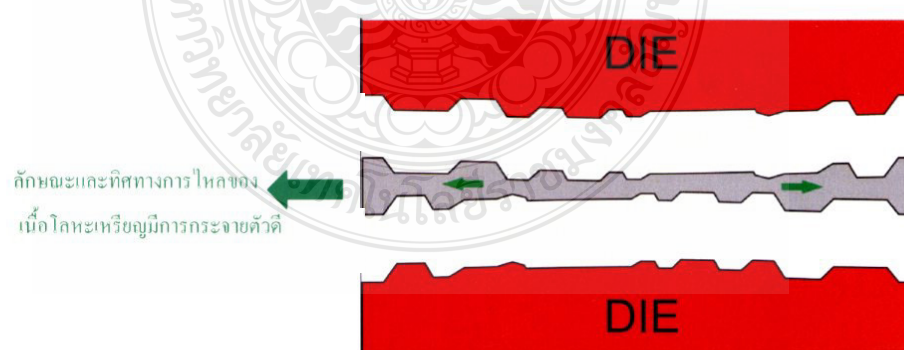
ภาพที่ 2.3 โค้งกระทะและความสูงลดตายแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ ชนิดราคา 1 บาท ด้านก้อย [1]

2.1.2 คุณลักษณะที่องกระของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ

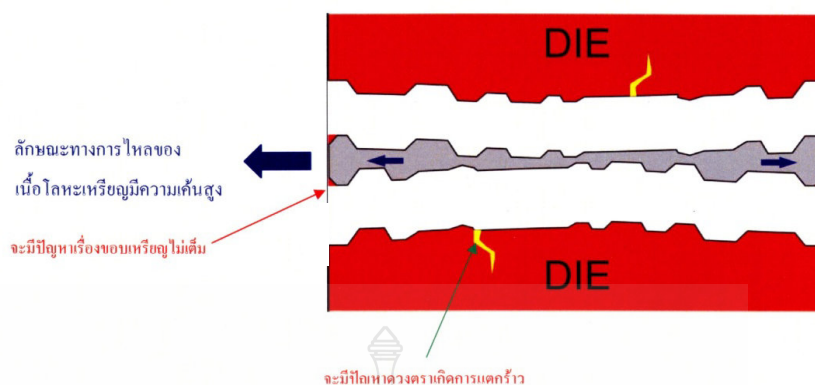
ในการปั๊มเหรียญกษาปณ์สำเร็จ (Minting Presses) มีความจำเป็นต้องปรับที่องกระ (Curvature) ของแม่พิมพ์ให้มีความเหมาะสม เพราะเป็นปัจจัยสำคัญในการช่วยให้การไหล (Flow) ของเนื้อโลหะที่มีความสมบูรณ์ อย่างในภาพที่ 2.4 กรณีที่ไม่มีที่องกระ เนื้อโลหะจะไหลกระจายในทุกทิศทางทำให้เกิดแรงต้านหรือมีปริมาณเนื้อโลหะไม่เพียงพอในการขึ้นรูปบางจุด แต่ถ้ามีมากเกินไปจะทำให้ลวดลายบริเวณขอบเหรียญขึ้นไม่สมบูรณ์หรือต้องใช้แรงกดสูงมากกว่าที่ควรจะเป็น ดังภาพที่ 2.6 ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้แม่พิมพ์แตกเร็วได้ จึงจำเป็นต้องหาความเหมาะสมในการกำหนดที่องกระ (Curvature) ของเหรียญแต่ละชนิดราคา เพื่อให้เกิดจุดที่สมดุลในการไหล (Flow) ของเนื้อโลหะและเป็นไปตามทิศทางที่กำหนด ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.4 ลักษณะการไหลของเนื้อโลหะบนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญแบบไม่มีที่องกระ [1]



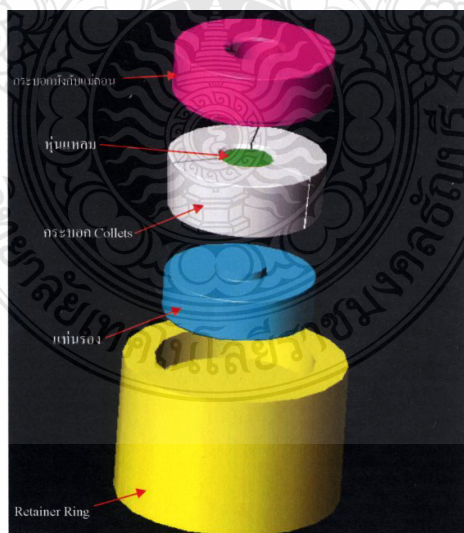
ภาพที่ 2.5 ลักษณะการไหลของเนื้อโลหะบนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญแบบที่องกระพอดี [1]



ภาพที่ 2.6 ลักษณะการไหลของเนื้อโลหะบนแม่พิมพ์ปั๊มหรือแบบทอึงกระตาะสูง [1]

2.1.3 การควบคุมทอึงกระตาะของแม่พิมพ์ปั๊มหรือแบบทอึง

ในการคัดลอกทอึงกระตาะจากแม่ตรา (Master Dies) ไปผลิตเป็นแม่พิมพ์ปั๊มหรือแบบทอึงสำหรับนำไปใช้ปั๊มเป็นหรือแบบทอึงสำเร็จ จะใช้วิธีกดอัดด้วยแรงกดสูง โดยเฉพาะหรือแบบทอึงจะใช้แรงกดประมาณ 120 - 180 ตัน ในขั้นตอนการกดอัดแม่พิมพ์ จึงมีสิ่งจำเป็นต้องใช้ความระมัดระวัง คือการเปลี่ยนแปลงของทอึงกระตาะ (Curvature) ซึ่งจะต้องควบคุมให้อยู่ในค่าที่กำหนด โดยจะใช้กรรมวิธีการกดอัดขึ้นรูปแม่พิมพ์ในกระบอกระบบปิด ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 การกดอัดแม่พิมพ์ปั๊มหรือแบบทอึงในระบบปิด [1]

ปัจจัยการควบคุมค่าที่องศาของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญให้อยู่ในค่าที่กำหนด จำเป็นต้อง ออกแบบขนาดและมุมของเหล็กทำหุ่นแหลม (Cone) พร้อมเลือกใช้แรงกด (Pressure) ที่เหมาะสม โดยมีข้อเสนอแนะในขั้นตอนการกดอัด ให้ใช้แรงกดอัดเท่ากับ Yield Strength ของโลหะ แล้วบวกเพิ่ม อีกร้อยละ 20 เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเปลี่ยนรูปของที่องศา (Curvature) เมื่อนำแม่พิมพ์ไปใช้งาน

2.1.4 คุณสมบัติของเหรียญชนิดราคา 1 บาท

- 1) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเหรียญ 20 มิลลิเมตร
- 2) มีลักษณะขอบเป็นพื้นเพียง
- 3) มีน้ำหนัก 3.0 กรัม
- 4) มีความแข็งประมาณ 110 HV (30)
- 5) ชนิดโลหะเป็นวัสดุใส่เหล็กเคลือบนิเกิล (Nickel Plated Steel) มีเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะใส่เหล็ก C 0.10, Mn 0.50, P 0.04, S 0.05, Fe Bal. (Mild Steel) และมีเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมทางเคมีของผิวเคลือบนิเกิล (Ni) 99.44 กำหนดความหนาไม่น้อยกว่า 25 μ m ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ภาพตัดขวางโลหะเหรียญตัวเปล่าชนิดราคา 1 บาท [26]

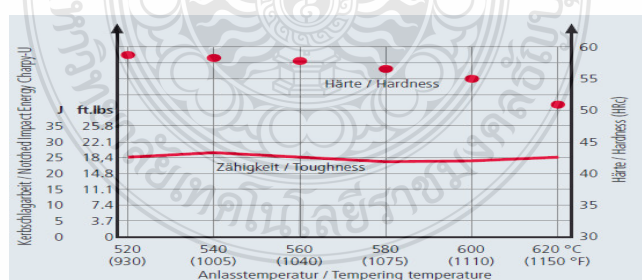
2.1.5 การเลือกใช้เกรดเหล็กผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ

โดยปกติโรงงานแม่พิมพ์ใช้เหล็กที่จัดเป็นกลุ่มเหล็กที่มีใช้งานอยู่ในระบบอุตสาหกรรม การผลิตแม่พิมพ์ทั่วไป แต่จะเลือกใช้เกรดเหล็กให้เหมาะกับการใช้งานในการผลิตเหรียญแต่ละประเภท ทั้งที่ใช้สารชุบด้วยแก๊สไนโตรเจน (N_2) และสารชุบด้วยน้ำมัน (Oil) การอ้างอิงเกรดเหล็กจะใช้ตามมาตรฐานสากล เช่น มาตรฐาน AISI, JIS, DIN เป็นต้น แต่อาจจะเพิ่มเติมข้อกำหนดในการนำมาใช้

ผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ เพราะต้องมีการควบคุมคุณภาพด้านความสม่ำเสมอของเนื้อเหล็กเป็นพิเศษ ในกรณีการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ ชนิดราคา 1 บาท ที่โลหะเหรียญตัวเปล่าเป็นวัสดุใส่เหล็กชุบนิกเกิล (Nickel Plated Steel) เมื่อปี พ.ศ. 2554 มีการศึกษาวิจัยร่วมกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จนกระทั่งได้เกรดเหล็กที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานผลิตเป็นแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญดังกล่าว [26] โดยได้รับความร่วมมือจากตัวแทนจำหน่ายเหล็กในประเทศไทยในการนำเหล็กเกรดพิเศษมาทดลองใช้ผลิต คือเหล็กเกรด W360 ซึ่งมีคุณสมบัติทางด้านความเหนียวที่ดีกว่าเหล็กเกรดเดิม ดังภาพที่ 2.9 โดยเหล็กมีเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมทางเคมี C 0.50, Si 0.20, Mn 0.25, Cr 4.50, Mo 3.0, และ V 0.55 มีความแข็งสภาพจำหน่าย 205 HB จึงง่ายต่อการขึ้นรูปเย็น (Cold Forming) อุณหภูมิสำหรับชุบแข็ง (Hardening) สูงสุด 1050 °C และคุณสมบัติอัตราการเย็นตัว ดังภาพที่ 11 โดยใช้สารชุบแข็งไนโตรเจน (N₂) ได้ความแข็งหลังการชุบแข็งและอบคืนไฟ 56 - 58 HRC ดังภาพที่ 2.10 จึงมีความเหมาะสมกับกระบวนการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญชนิดราคา 1 บาท ในปัจจุบันของโรงกษาปณ์

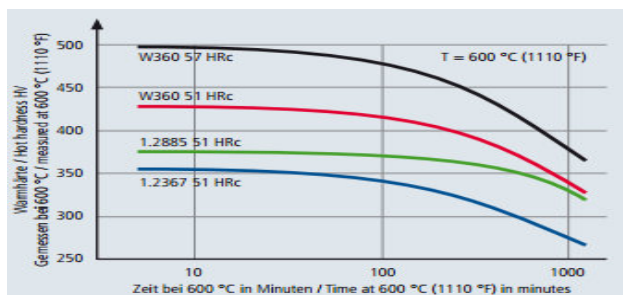


(ก) การเปรียบเทียบคุณสมบัติความเหนียว

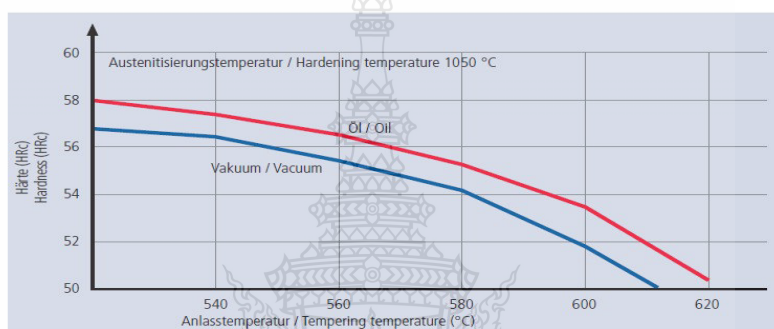


(ข) ความสัมพันธ์ด้านความเหนียวกับความแข็งที่อุณหภูมิอบคืนไฟต่างๆ ของเหล็กเกรด W360

ภาพที่ 2.9 การเปรียบเทียบคุณสมบัติความเหนียวและความสัมพันธ์ด้านความเหนียวกับความแข็ง [33]

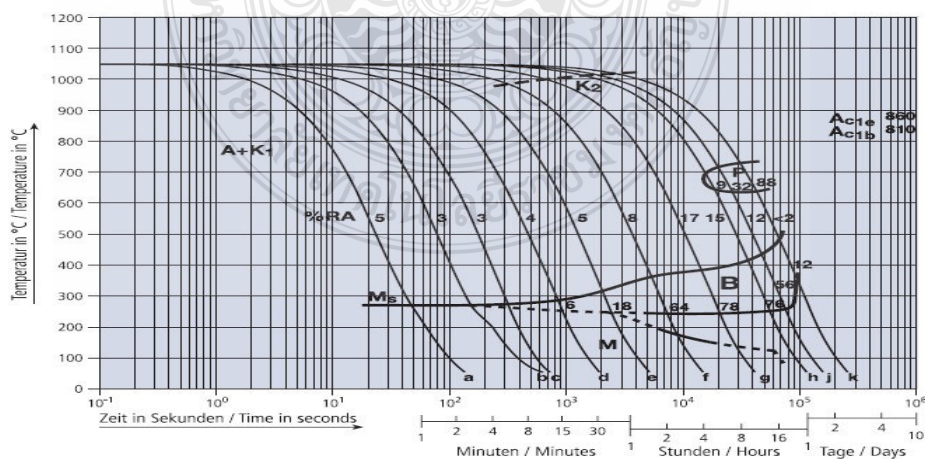


(ก) คุณสมบัติความแข็งที่อุณหภูมิสูง



(ข) อุณหภูมิอบคืนไฟที่สัมพันธ์กับความแข็ง ของเหล็กเกรด W360

ภาพที่ 2.10 คุณสมบัติความแข็งที่อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิอบคืนไฟที่สัมพันธ์กับความแข็งของเหล็กเกรด W360 [33]



ภาพที่ 2.11 แผนภาพ TTT ไดอะแกรมของเหล็กเกรด W360 [33]

2.1.6 ชนิดของเตาอบชุบโลหะ [2]

1) เตาไฟฟ้า (Electric Muffle Furnace) เป็นเตาที่ใช้ในงานอบชุบทั่วไป ไม่มีการควบคุมบรรยากาศภายในเตาหรืออาจใช้แก๊สไนโตรเจน (N_2) ปกคลุม เป็นเตาขนาดเล็กไม่ใหญ่ การบรรจุชิ้นงานอบชุบจะใช้คีมจับชิ้นงาน ใช้ในการชุบงานที่มีขนาดเล็กและจำนวนน้อยหรือใช้ในห้องทดลอง

2) เตาอ่างเกลือ (Salt Bath) โดยทั่วไปจะมีขนาดเล็กเหมาะสำหรับงานอบชุบจำนวนน้อย และชิ้นงานขนาดเล็กไม่ใหญ่โต การอบชุบสามารถควบคุมบรรยากาศได้หลายลักษณะ โดยการเปลี่ยนสูตรส่วนผสมของเกลือ

3) เตาอบชุบสุญญากาศ (Vacuum Furnace) เป็นเตาที่มีประสิทธิภาพการทำงานสูง มีคุณภาพในการอบชุบ ป้องกันการสูญเสียธาตุคาร์บอนและการเกิดออกไซด์ที่ผิวของชิ้นงาน เหมาะสำหรับการอบชุบเหล็กกล้าเครื่องมือหรือเหล็กเครื่องมืองานเย็น (Cold Work Tool Steel) สามารถทำอุณหภูมิอบชุบได้สูงสุด $1,350^\circ C$ การเย็นตัวของชิ้นงานจะใช้แก๊สอาร์กอน (Ar) หรือแก๊สไนโตรเจน (N_2) เป่าเข้าเตา โดยชนิดของเตาจะมีทั้งแบบแนวนอน (Horizontal) และแบบแนวตั้ง (Vertical) ซึ่งปัจจุบัน โรงกลายภัณฑ์ใช้งานเตาอบชุบแข็งสุญญากาศแบบแนวนอน (Horizontal) ความดันสูงสุด 10 บาร์ ใช้แก๊สไนโตรเจน (N_2) เป็นสารชุบ ควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และสามารถรองรับการอบชุบแข็งได้ครั้งละไม่เกิน 200 กิโลกรัม

2.1.7 วัสดุที่ใช้ในการผลิตเหรียญ

1) เหล็กกล้า (Mild Steel) คือ เหล็กกล้าที่มีส่วนผสมของคาร์บอนเป็นหลักโดยจะมีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไม่เกิน 0.35 เป็นเหล็กกล้าที่นำมาใช้งานทั่วไป มีราคาไม่สูง โดยมีคุณสมบัติความเหนียว เป็นเหล็กที่อ่อนสามารถนำไปรีดหรือตีเป็นแผ่นบางได้ง่าย เหมาะกับการนำไปใช้งานที่ไม่ต้องการความแข็งแรงสูงมาก เช่น ผลิตกระป๋องบรรจุอาหาร แผ่นสังกะสีมุงหลังคา วัสดุดิบในการผลิตโลหะเหรียญตัวเปล่าแบบเคลือบผิว (Electro Plating) เพื่อใช้ผลิตเหรียญกลายภัณฑ์ เป็นต้น

2) นิกเกิล (Nickel) คือ โลหะที่มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันและการกัดกร่อนสูง มีความเหนียวและอ่อนตัวสูง สามารถขึ้นรูปเย็นได้ง่าย ประมาณร้อยละ 60 ของนิกเกิลใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าผสม ส่วนที่เหลือจะใช้งานพิเศษที่ทนการกัดกร่อนสูงๆ และใช้เคลือบผิวเหล็ก นิกเกิลเป็นโลหะที่มีสีขาวสวยงาม สามารถขึ้นรูปเย็นได้ดี นอกจากนี้นิกเกิลสามารถละลายกับโลหะอื่นได้ง่ายและให้สารละลายของแข็งที่มีความเหนียว

3) ทองแดง (Copper) เป็นโลหะมีสมบัติด้านความเหนียว ขึ้นรูปได้ง่ายทนต่อการแตกหัก และมีสมบัติเด่นด้านความทนทานต่อการกัดกร่อน แต่จุดอ่อนของทองแดง คือมีความแข็งแรงต่ำ ดังข้อมูลในตารางที่ 2.1 จึงทำให้การใช้งานมีขอบเขตจำกัด การปรับปรุงสมบัติในด้านความแข็งแรง

ไม่นิยมใช้กรรมวิธีทางความร้อน แต่ทำโดยการขึ้นรูปเย็น หรือการผสมธาตุอื่นลงไป ทำให้เกิดโลหะผสมทองแดงหลายกลุ่ม ตัวอย่างเช่น เบริลลูมิอัมทองแดงผสมนิกเกิล เรียกว่า คิวโปรนิกเกิล ซึ่งเป็นวัสดุพิเศษสำคัญ ในการผลิตเหรียญชนิดสีเงินที่ใช้ในระดับสากล เนื่องจากมีความต้านทานการกัดกร่อนสูง โดยเติมโลหะนิกเกิลเพียง 10 - 15% เพื่อจะทำให้สีของโลหะผสมเปลี่ยนเป็นสีของนิกเกิลเพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุที่เป็นโลหะ [3]


วัสดุโลหะ	ความ ถ่วงจำเพาะ	ค่ายัง โมดูลัส (E) GPa	ค่าโมดูลัส เฉือน (G) GPa	โมดูลัส ความจุ (Bulk modulus) GPa	อัตราส่วน ปัวซอง	การนำความ ร้อนที่ (0°) W / (m .K)	สัมประสิทธิ์ การขยายตัว เชิงเส้น x10 ⁻⁶ /°C	จุด หลอมเหลว Deg K	ความเค้น พิสูจน์/คราก ตัว x 10 ⁷ Pa	ความเค้น สูงสุด x 10 ⁷ Pa
โครเมียม (Chromium)	7.2	248.2	-	-	-	91	6	2,133	-	-
เงิน (Silver)	10.50	72.39	28.0	100	0.37	427	19	1,234	5.5-30	14-38
ทองคำ (Gold)	19.32	74.46	28.0	167	0.42	315	14.2	1,336	0-21	11-23
ทองแดง (Copper)	8.96	117.2	46	130	0.36	398.0	16.6	1,357	4.7-32	20-35
ไทเทเนียม (Titanium)	4.54	110.3	41.0	110	0.3	22	8.5	1,943	2-50	25-70
นิกเกิล (Nickel)	8.9	213.7	79.0	176	0.31	90.5	13	1,726	14-66	48-73
เหล็ก (Iron)	7.87	196.5	76	-	0.3	80.3	12	1,809	16	35
เหล็กกล้า นี้อ่อน (Steel (Mild))	7.8	210	80	-	0.3	50	12	1,630-1,750	20-40	30-50
อะลูมิเนียม (Aluminum)	2.7	68.95	26	75.0	0.33	237	25	933	3-14	6-14

2.2 เครื่องมือควบคุมคุณภาพเชิงวิศวกรรม (7 QC Tools)

คุณภาพถือว่าเป็นจุดมุ่งหมายสูงสุด และเป็นหัวใจทางการผลิต เพราะเมื่อใดที่ผลิตสินค้าที่ไม่ได้มาตรฐาน ปัญหาต่างๆ จะตามมา เช่น ผู้รับมอบสินค้าไม่รับมอบต้องเสียค่าใช้จ่ายในการแก้ไขสินค้า ระยะเวลาการส่งมอบล่าช้า เหล่านี้ล้วนขึ้นอยู่กับคุณภาพสินค้าทั้งสิ้น ดังนั้นจึงต้องมีแนวทางในการวางแผน หรือกำหนดแนวทางในการปฏิบัติไว้อย่างชัดเจน เพื่อให้พนักงานได้รู้

ขอบเขตของการควบคุมและง่ายต่อการวิเคราะห์ แก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในการผลิต โดยแนวทางการวิเคราะห์จะเป็นการเก็บรวบรวมข้อมูลต่างๆ สำหรับเครื่องมือทั้ง 7 ชนิด สามารถแจกแจงได้ดังนี้

2.2.1 ใบตรวจสอบ (Check Sheet) เป็นแบบฟอร์มที่มีการออกแบบช่องว่างต่างๆ ไว้เพื่อใช้บันทึกข้อมูลได้ง่ายและสะดวก หรือเป็นตารางที่แสดงรายการรายละเอียดต่างๆ ของข้อมูลโดยออกแบบให้ง่ายต่อการจดบันทึกข้อมูล สะดวกต่อการจำแนกข้อมูลและสะดวกต่อการวิเคราะห์ผล ซึ่งมักจะมีช่องให้พนักงานผู้ตรวจสอบสามารถทำเครื่องหมายลงได้เลย [4] ตัวอย่างใบตรวจสอบแสดงดังภาพที่ 2.12

 **แบบฟอร์มบันทึกการติดตามการใช้งานดวงตรา**

ส่วนประกอบ

ประเภท เทรียอุทกษาบดที่ระลอก เทรียอุทกษาที่ระลอก ของสิ่งจ้าง เครื่องรางฯ อื่นๆ.....

ชื่องาน..... ชนิดตรา.....

งาน..... ฝ่าย..... ส่วน.....

เครื่องที่ตราหมายเลข.....

ว.ค.ป	ด้าน	หมายเลขดวงตรา	แรงกด (คันทัน)	ยอดตีตรา (เหนืออยู่)	สาเหตุการเปลี่ยนดวงตรา (ใส่เฉพาะหมายเลข 1 - 15)	ผู้ปฏิบัติงาน
	หน้า					
	หลัง					
	หน้า					
	หลัง					
	หน้า					
	หลัง					
	หน้า					
	หลัง					
	หน้า					
	หลัง					
	หน้า					
	หลัง					
	หน้า					
	หลัง					
	หน้า					
	หลัง					
	หน้า					
	หลัง					
	หน้า					
	หลัง					
	หน้า					
	หลัง					
	หน้า					
	หลัง					

“ใช้ 1 ใบต่อ 1 งาน และกฎว่าด้านต้นดวงตราเมื่อจบงาน”

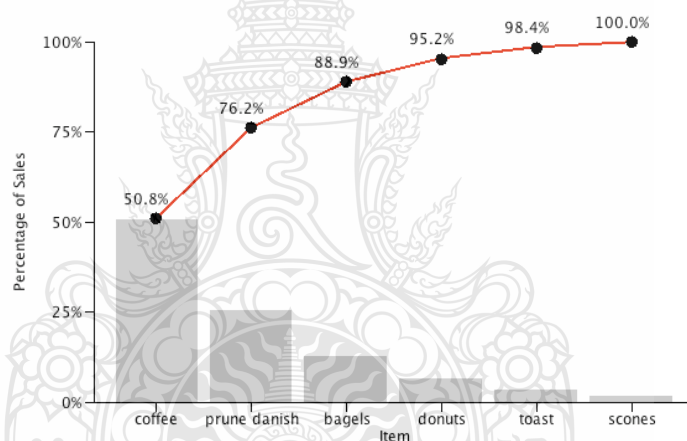
หัวหน้างานหัวหน้าช่าง.....

ตัวเลข	ลวดลาย	พื้นผิว	ขอบ	รูปร่าง	อื่นๆ ...
(1) ลอก	(4) ลวดลาย	(6) ทรุน	(9) แดกมัน	(10) คอรวม	(13) กระแตก/แฉะ
(2) มีา	(5) แดกมัน	(7) แดกร้าว		(11) ทรุค	(14) เหยียบ
(3) คราบ		(8) รอยขีดข่วน		(12) แดกหัก	(15).....(ระบุ)

แบบฟอร์มหมายเลขฯ FM-DI-056
ลำดับที่ฯ 01
วันที่บังคับใช้ 3 มกราคม 2550

ภาพที่ 2.12 แบบฟอร์มบันทึกอายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ

2.2.2 แผนภูมิพารето (Pareto Chart) เป็นแผนภูมิที่ใช้สำหรับแสดงปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น โดยเรียงลำดับปัญหาเหล่านั้นตามความถี่ที่พบจากมากไปหาน้อย และแสดงขนาดความถี่มากน้อยด้วยกราฟแท่งควบคู่ไปกับการแสดงค่าสะสมของความถี่ด้วยกราฟเส้น ซึ่งแกนนอนของแผนภูมิกราฟเป็นประเภทของปัญหาและแกนตั้งเป็นค่าร้อยละของปัญหาที่พบ แผนภูมิพารетоใช้เลือกปัญหาที่จะลงมือทำ เพราะปัญหาสำคัญในเรื่องคุณภาพมีอยู่ไม่กี่ประการ [5] แผนภูมิพารетоจะใช้กราฟแท่งแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ ระหว่างสาเหตุของความบกพร่อง กับปริมาณความสูญเสียที่เกิดขึ้น โดยสาเหตุของความบกพร่องอาจเป็นไปได้ในรูปชนิดของความบกพร่อง ตำแหน่งที่พบความบกพร่อง หรือเครื่องจักรที่ก่อให้เกิดความบกพร่อง ในขณะที่ปริมาณของเสียอาจเป็นจำนวนชิ้นงานเสีย มูลค่าความเสียหายจากของเสีย ความถี่ของการเกิด โดยทั่วไปแผนภูมิพารโตจะมีส่วนประกอบและลักษณะดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 ตัวอย่างแผนภูมิพารโต [4]

2.2.3 แผนผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) หรือแผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram) หรือผังอิชิกาวา เรียกตามชื่อผู้คิดค้นว่า อิชิกาวาไดอะแกรม (Ishikawa Diagram) เป็นแผนผังที่ใช้ต่อจากแผนภูมิพารโต แสดงให้เห็นสาเหตุที่แท้จริงในการทำให้เกิดปัญหาโดยพิจารณาทุกปัจจัยที่จะมีผลต่อคุณลักษณะทางคุณภาพ บางครั้งแผนผังก้างปลา ก็นำปัญหานั้นมาแจกแจงสาเหตุของปัญหาแบ่งเป็น 4 ประการ คือ คน (Man) เครื่องจักร (Machines) วิธีการ (Method) วัตถุดิบ (Material) ซึ่งโครงสร้างแบ่งเป็น 2 ส่วนดังนี้ [5]

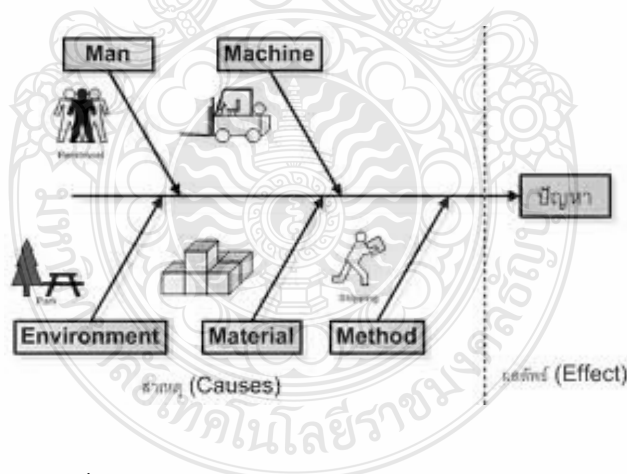
1) ส่วนที่เป็นตัวปลา เป็นส่วนที่รวมปัจจัยทั้งหมดที่อาจส่งผลกระทบต่อประเด็นปัญหาทั้งหมดในหัวปลา จะถูกแยกออกเป็นสาเหตุหลักสาเหตุย่อย จนถึงต้นเหตุที่แท้จริง [6]

ก) สาเหตุหลักมาจากสิ่งที่เป็นองค์ประกอบหลักในการทำงาน เช่น พนักงาน เครื่องจักร สิ่งแวดล้อม

ข) สาเหตุรองคือสาเหตุที่ทำให้สาเหตุหลักผิดปกติ ตัวอย่างเช่น ถ้าสาเหตุหลักคือเครื่องจักร สาเหตุรองคือน้ำมันรั่วซึมออกจากห้องเครื่อง เป็นต้น

ค) สาเหตุย่อยเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดปัญหาในสาเหตุรอง และสาเหตุย่อยๆ มิได้อีกหลายสาเหตุ ซึ่งมักเป็นจุดเริ่มต้นของปัญหา ตัวอย่างเช่น ถ้าน้ำมันรั่วซึมออกจากห้องเครื่องเป็นสาเหตุรอง สาเหตุย่อยน่าจะเกิดจาก ซิลกันน้ำมันขาด สาเหตุที่ซิลกันน้ำมันขาด อาจเนื่องมาจากการใช้น้ำมันผิดประเภท หรือซิลคุณภาพต่ำ หรือซิลอาจจะหมดอายุก็ได้หลายสาเหตุ การวิเคราะห์ลงในระดับสาเหตุย่อยจะทำให้ห้จับปัญหาที่แหล่งกำเนิดปัญหาหรือต้นตอ (Root Cause) ได้ และทำให้ปัญหาซ้ำๆ ซากๆ ลดลงหรือไม่เกิดขึ้นอีกหรือแม้ว่าเกิดขึ้นอีกก็สามารถแก้ไขได้

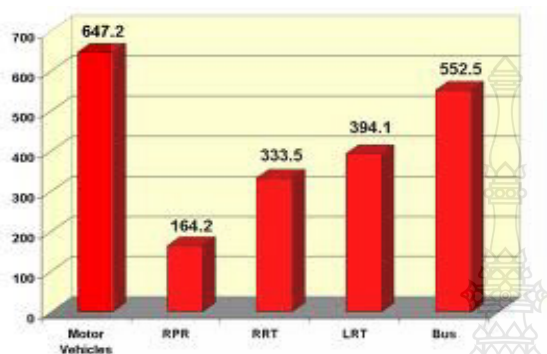
2) ส่วนที่เป็นหัวปลา คือส่วนที่ระบุปัญหา ซึ่งโดยทั่วไปในการแก้ปัญหาคุณภาพด้วยเครื่องมือคุณภาพ มักจะเลือกปัญหามาจากแผนภูมิพาเรโต ตัวอย่างแผนผังแสดงเหตุและผลของผลิตภัณฑ์ไม่ได้มาตรฐานแสดงดังภาพที่ 2.14



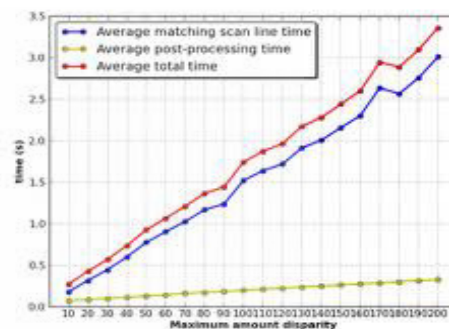
ภาพที่ 2.14 ตัวอย่างแผนภูมิแก๊งปลาตัว [4]

ข้อเสนอแนะในการทำแผนผังแสดงเหตุและผลคือ สาเหตุต่างๆ ในตัวปลาควรเกิดจากระดมสมองสาเหตุที่ได้จากการระดมสมอง ปัญหาในหัวปลาต้องละเอียดและชัดเจน หลีกเลี่ยงการใช้ความรู้สึก ก่อนสรุปสาเหตุแห่งปัญหา ควรให้น้ำหนักปัจจัยต่างๆ เพื่อลำดับความสำคัญ

2.2.4 กราฟ (Graph) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการแสดงนำเสนอข้อมูลให้ผู้อ่านเข้าใจข้อมูลต่างๆ ได้ง่ายและชัดเจนขึ้นและสามารถใช้วิเคราะห์แปลความหมาย ตลอดจนให้รายละเอียดของการเปรียบเทียบได้ดี โดยเฉพาะเมื่อข้อมูลมีจำนวนมาก และการนำเสนอข้อมูลด้วยกราฟสามารถใช้กราฟเส้น กราฟแท่ง [5] ดังภาพที่ 2.15



(ก) กราฟแท่ง



(ข) กราฟเส้น

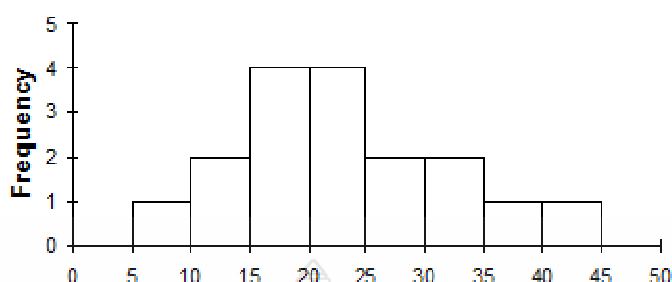
ภาพที่ 2.15 ตัวอย่างกราฟชนิดต่างๆ [36]

2.2.5 ฮิสโตแกรม (Histogram) ข้อมูลทางสถิติจะอยู่ภายใต้ความผันแปรเสมอ ในการวิเคราะห์จึงมีความจำเป็นต้องวิเคราะห์ข้อมูลก่อนว่า ข้อมูลมีความผันแปรในลักษณะใด ซึ่ง Jurun Institute ได้เสนอแนวความคิดสำคัญในการวิเคราะห์ไว้คือ [7]

- 1) ค่าของข้อมูลทางสถิติจะแสดงถึงความผันแปรเสมอ
- 2) ความผันแปรจะปรากฏเป็นตัวแบบหนึ่งที่แน่นอนเสมอ
- 3) ตัวแบบของความผันแปรจะพิจารณามาก หากดูจากตัวเลขของข้อมูล
- 4) ตัวแบบของความผันแปรจะพิจารณาได้ง่าย หากสรุปข้อมูลให้อยู่ในรูปของฮิสโตแกรม

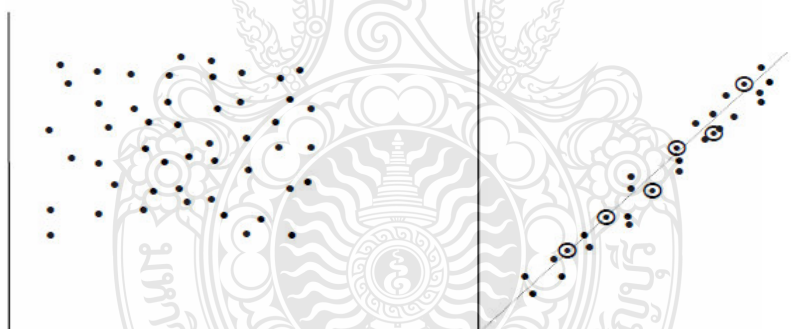
เป็นกราฟแท่งที่ใช้แสดงความถี่ของข้อมูลที่จัดเป็นหมวดหมู่ โดยที่แท่งกราฟมีความกว้างเท่ากัน และมีด้านข้างติดกัน ซึ่งจัดตัวอย่างให้ศูนย์กลางของฮิสโตแกรมเป็นค่าความถี่สูงสุด ส่วนความถี่รองลงมาจะกระจายลดหลั่นไปตามลำดับ ดังภาพที่ 2.16

Histogram



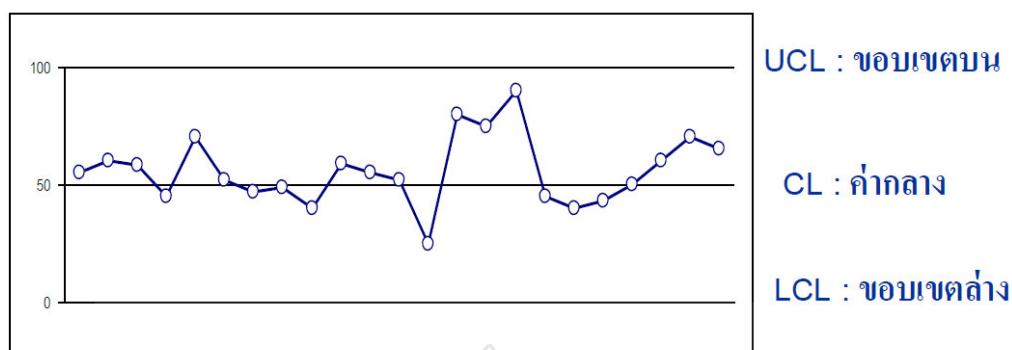
ภาพที่ 2.16 ตัวอย่างฮิสโตแกรม [35]

2.2.6 ผังแสดงการกระจาย (Scatter Diagram) เป็นแผนผังที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว ว่าสัมพันธ์กันในลักษณะใด ซึ่งจะสามารถหาสหพันธ์ (Correlation) ของตัวแปรทั้งสองตัวที่แสดงด้วยแกน x และแกน y ของกราฟ ว่าสหพันธ์เป็นบวก คือ ตัวแปรมีความสัมพันธ์แปรตามกัน หรือมีสหพันธ์เป็นลบคือตัวแปร มีความสัมพันธ์แปรผกผันต่อกัน [8] ดังภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 ตัวอย่างการกระจายของข้อมูล [35]

2.2.7 แผนภูมิควบคุม (Control Chart) เป็นแผนภูมิกราฟที่ใช้เพื่อการควบคุมกระบวนการผลิต โดยมีการแสดงให้เห็นถึงขอบเขตในการควบคุมทั้งขอบเขตควบคุมบน (Upper Control Limit, UCL) และขอบเขตล่าง (Lower Control Limit, LCL) แล้วนำข้อมูลด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการมาเขียนเทียบกับขอบเขตที่ตั้งไว้เพื่อจะได้อันตรายว่า ในกระบวนการผลิต ณ เวลาใดมีปัญหา ด้านคุณภาพ จะได้รับแก้ไขปรับปรุงกระบวนการให้กลับสู่สภาพปกติโดยเร็ว [8] แผนภูมิควบคุม แสดงในภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 แผนภูมิควบคุม (Control Chart) [4]

2.3 การนำข้อมูลทางสถิติมาใช้งานวิจัย

การนำหลักการและทฤษฎีสถิติมาประยุกต์ใช้กับการวิจัย ซึ่งทำให้การทำวิจัยแต่ละขั้นตอนลดเวลาลงได้มาก โดยเฉพาะการคำนวณเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ ทำให้ผลการคำนวณมีความถูกต้องและรวดเร็วยิ่งขึ้น

2.3.1 ข้อมูล (Data) หมายถึง ข้อเท็จจริงเกี่ยวกับเรื่องที่จะศึกษา ซึ่งอาจอยู่ในรูปตัวเลข เช่น คะแนน น้ำหนัก ความสูง ระยะทาง หรืออาจเป็นข้อเท็จจริงที่อยู่ในรูปคุณลักษณะหรือคุณสมบัติ เช่น ชื่อ เพศ ที่อยู่ สถานภาพสมรส ระดับการศึกษา อาชีพ ศาสนา [9] การแบ่งประเภทของข้อมูล มีวิธีการแบ่งได้หลายวิธี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณา ซึ่งวิธีการที่ใช้ในการพิจารณามีดังนี้

1) จำแนกตามลักษณะการเก็บข้อมูล สามารถแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ประเภท คือ

ก) ข้อมูลที่ได้จากการนับ (Counting Data) เป็นข้อมูล que เก็บรวบรวมได้ โดยใช้วิธีการนับ เช่น การนับจำนวนชิ้นงานทั้งสิ้น 50 ชิ้น เป็นจำนวนชิ้นงานที่ได้มาตรฐาน 45 ชิ้น จำนวนชิ้นงานที่ไม่ได้มาตรฐาน 5 ชิ้น ซึ่งจำนวนตัวเลข 45 และ 5 เป็นข้อมูลที่ได้จากการนับ ลักษณะของข้อมูลที่ได้จากการนับนี้โดยทั่วไปตัวเลขเป็นจำนวนเต็ม

ข) ข้อมูลที่ได้จากการวัด (Measurement Data) เป็นข้อมูล que เก็บรวบรวมได้โดยใช้วิธีการวัด เช่น การวัดขนาดของชิ้นงาน การชั่งน้ำหนักปริมาณสินค้า จำนวนตัวเลขที่ได้จากวิธีการวัดจะเป็นตัวเลขต่อเนื่อง ซึ่งอาจจะเป็นตัวเลขทศนิยมหรือเศษส่วนก็ได้

2) จำแนกตามการจัดกระทำข้อมูล สามารถแบ่งข้อมูลออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

ก) ข้อมูลดิบ (Raw Data) เป็นข้อมูลที่ได้จากการเก็บรวบรวมข้อมูล โดยยังไม่ได้นำข้อมูลเหล่านั้นมาจัดกระทำหรือจัดระเบียบ ข้อมูลเหล่านี้ยังคงปะปนกันอยู่ ไม่มีการจัดแบ่งประเภทหรือหมวดหมู่

ข) ข้อมูลที่จัดเป็นหมวดหมู่ (Group Data) เป็นข้อมูลที่มีการจัดกระทำให้เป็นหมวดหมู่ อย่างเป็นระเบียบ มีการแจกแจงความถี่ ซึ่งจะช่วยให้ข้อมูลเหล่านี้ง่ายต่อการนำไปใช้

3) จำแนกตามลักษณะข้อมูล สามารถแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ประเภท คือ

ก) ข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantitative Data) เป็นข้อมูลที่แสดงปริมาณหรือขนาดใน ลักษณะของตัวเลขโดยตรง เช่น อายุ น้ำหนัก ส่วนสูง คะแนน

ข) ข้อมูลเชิงคุณภาพ (Qualitative Data) เป็นข้อมูลที่แสดงถึงคุณลักษณะไม่ได้อยู่ในรูป ตัวเลขโดยตรง

2.3.2 ตัวแปร (Variable) หมายถึง สิ่งที่มีความผันแปรทางด้านปริมาณ เช่น น้ำหนัก ความสูง อายุ ความเร็ว หรืออาจเป็นทางด้านคุณภาพ เช่น เพศ เชื้อชาติ ศาสนา สีม สีนัยตา ตัวแปรเหล่านี้จะ ประกอบด้วยต่างๆ กัน เช่น ในกลุ่มนักศึกษากลุ่มหนึ่ง นักศึกษาแต่ละคนย่อมมีความสูงแตกต่างกัน ดังนั้นความสูงจึงถือว่าเป็นตัวแปร ถ้าให้ X แทนความสูงของนักศึกษา n คือ ตัวแปร X จะ ประกอบด้วยค่าต่างๆ คือ $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$

สำหรับการผันแปรทางด้านคุณภาพ เช่น สีนัยตาของนักศึกษานานาชาติแห่งหนึ่ง สีนัยตา ของนักศึกษาอาจแตกต่างกันออกไปเป็นสีฟ้า สีดำ สีน้ำตาล ซึ่งถือว่าเป็นตัวแปรด้านคุณภาพ แต่ใน บางกรณี ถ้าวัดสีนัยตาจากสีอ่อนไปจนถึงสีเข้มออกมาเป็นตัวเลข ตัวแปรในลักษณะนี้ถือเป็นตัวแปร ด้านปริมาณ ถ้าพิจารณาตามคุณสมบัติสามารถแบ่งตัวแปรเป็น 2 ประเภทคือ

1) ตัวแปรต่อเนื่อง (Continuous Variable) หมายถึง ตัวแปรที่มีค่าต่อเนื่องกันระหว่างค่า สองค่าที่กำหนดให้ จะมีค่าที่อยู่ระหว่างค่าสองค่านั้นมากมาย เช่น ความสูง น้ำหนัก อายุ ระยะทาง ใน ด้านตัวแปรความสูง ช่วงความสูงระหว่าง 160-165 เซนติเมตร มีค่าความสูงที่เป็นไปได้มากมายนับไม่ ถ้วน

2) ตัวแปรไม่ต่อเนื่อง (Discrete Variable) หมายถึง ตัวแปรที่มีค่าไม่ต่อเนื่องเป็นตัวแปรที่ ไม่สามารถกำหนดให้มีค่าอยู่ระหว่างค่าสองค่าได้ เช่น จำนวนนักศึกษา จำนวนสมาชิกในครัวเรือน จำนวนครัวเรือน จำนวนรถยนต์ในกรุงเทพมหานคร ค่าตัวเลขของตัวแปรเหล่านี้ไม่มีทศนิยม จะไม่มี จำนวนสมาชิกในครัวเรือน 5.5 คน หรือจำนวนครัวเรือน 134.2 หลัง และระหว่างครัวเรือนที่ 1 และ ครัวเรือนที่ 2 จะไม่มีตัวเลขอยู่ระหว่าง 1 และ 2 [9]

2.3.3 ประชากรและตัวอย่าง การทำวิจัยแต่ละครั้งได้นำวิชาสถิติมาช่วยในการจำแนกตัวอย่าง หรือกลุ่มตัวอย่างออกจากประชากร คือ

1) ประชากร (Population) เป็นหน่วยที่ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษา ดังนั้นประชากรจึง หมายถึงบุคคล องค์กร สัตว์ สิ่งของต่างๆ ที่นำมาเป็นหน่วยศึกษาหรือปัญหาการวิจัย

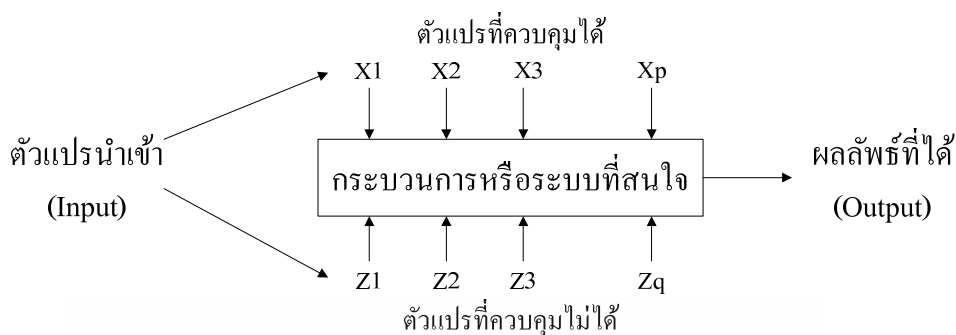
2) ตัวอย่าง (Sample) เป็นส่วนหนึ่งของประชากร ซึ่งอาจเป็น 5% 10% หรือ 50% ของจำนวนประชากรทั้งหมด โดยทั่วไปการทำวิจัยมักจะใช้ตัวอย่างหรือข้อมูลบางส่วน เพราะถ้าเก็บข้อมูลจากทุกหน่วยในประชากร จะทำให้เสียทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายสูง ทำให้ไม่ทันเวลาที่กำหนดไว้ด้วย

2.4 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments)

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) เป็นเทคนิคทางสถิติขั้นสูงที่ใช้ในการปรับค่าสภาวะของกระบวนการให้เป็นไปตามสภาพที่ต้องการ ซึ่งมีข้อแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดระหว่างวิธีการโดยทั่วไปกับเทคนิคของการออกแบบการทดลอง คือ วิธีการโดยทั่วไปมักเป็นแบบทดลองผิดลองถูก หรือใช้การทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า (One Factor at a Time) ทำซ้ำวงจรนี้ไปเรื่อยๆ เพื่อที่จะหาจุดที่ดีที่สุดของกระบวนการ โดยทั่วไปแล้วการทดลองแบบ One Factor at a Time จะให้ผลตอบแทนเข้าสู่จุดมุ่งหมายที่ต้องการได้ช้ามาก และสิ้นเปลืองทรัพยากรในการวิเคราะห์ รวมถึงต้องเก็บข้อมูลมาก และไม่เหมาะสมกับกระบวนการที่มีผลของความสัมพันธ์ร่วม (Interaction Effect) ระหว่างตัวแปรของกระบวนการด้วยตนเอง

ข้อดีของการออกแบบการทดลอง คือให้ผลของความแม่นยำและความถูกต้องในการวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างสูง โดยสามารถระบุออกมาเป็นค่าตัวเลขทางสถิติที่แสดงถึงค่าระดับความสำคัญของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการ และยังมีความรวดเร็วในการดำเนินการตรวจสอบสาเหตุของปัญหาโดยทั่วไป เช่น ถ้าหากมีปัจจัยในการทดสอบอยู่ประมาณ 10 ปัจจัย ซึ่งต้องการทดสอบว่าปัจจัยใดบ้าง ที่ส่งผลจริงต่อกระบวนการ ด้วยวิธีแบบ One Factor at a Time จะใช้เวลาจนถึง 1 ปี ในการตรวจสอบให้ได้ทุกปัจจัย แต่ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองจะใช้เวลาเพียงแค่ 1 - 3 อาทิตย์ เท่านั้นในการตรวจสอบปัจจัยดังกล่าว [9]

การออกแบบการทดลอง คือการทดสอบเพียงครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input Variables) ในระบบหรือกระบวนการที่ศึกษา เพื่อให้สามารถสังเกตและชี้สาเหตุที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Outputs) จากกระบวนการหรือระบบนั้น โดยตัวแปรนำเข้าจะถูกจัดแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ควบคุมได้ เรียกว่า ตัวแปรที่ควบคุมได้ (Controllable Variables) หรือตัวแปรที่สามารถออกแบบได้ (Design Variable) และกลุ่มที่ไม่สามารถควบคุมได้ เรียกว่า ตัวแปรที่รับกวนระบบ (Uncontrollable or Noise Variables) ดังแสดงในภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการ

2.4.1 ขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง

1) กำหนดหัวข้อปัญหา (Problem Statement) ควรมีความชัดเจน เข้าใจได้ง่ายและเป็นรูปธรรม ประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 3 อย่าง ได้แก่ อะไรที่กำลังเป็นปัญหา (What) ลักษณะของปัญหาเป็นอย่างไร (How) และพบปัญหานั้นที่ใดในช่วงเวลาใด (Where and When)

2) การเลือกปัจจัย (Factor) และการกำหนดระดับของปัจจัย (Treatment) จำเป็นที่จะต้องเลือกปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอย่างแท้จริง ซึ่งสามารถเลือกจากกรรมวิธีคัดกรองโดยเครื่องมือทางสถิติ จำพวก Uni - Variance เช่น T - Test เป็นต้น ผู้ที่มีความรู้หรือเชี่ยวชาญในกระบวนการนั้นๆ ก็เป็นผู้ที่สามารถให้คำแนะนำที่ดีในการเลือกปัจจัย และการกำหนดระดับของปัจจัยด้วย

3) การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Response) จะต้องเน้นตัวแปรที่สามารถวัดได้ ทั้งที่วัดด้วยเครื่องมือวัดและวัดด้วยกระบวนการวัดอื่นๆ เช่น การนับ และจะต้องเป็นตัวแปรที่สื่อถึงกระบวนการที่ต้องการศึกษานั้นได้ดีด้วย

4) เลือกแบบทดลอง (Experiment Design) เช่น การกำหนดจำนวนสิ่งตัวอย่าง วิธีการเลือกสิ่งตัวอย่าง วางแผนการทำการทดลอง วิธีการบันทึกผลการทดลอง และการกำหนดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ เป็นต้น

5) ดำเนินการทดลอง (Perform the Experiment) ให้เป็นไปตามแผนการ ทั้งวิธีการดำเนินการ ความถูกต้องในการวัด การควบคุมตัวแปรในการทดลอง และเก็บผลการทดลอง

6) การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis) ไม่ใช่แค่การใส่ข้อมูลให้ประมวลผลในโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป เพื่อให้ได้ผลออกมาเท่านั้น แต่รวมถึงการตรวจสอบ ลักษณะและคุณภาพของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง การตรวจสอบความถูกต้องของ Model ที่ได้ (Model Adequacy Checking)

หาค่าระดับนัยสำคัญของอิทธิพลของแต่ละปัจจัย โดยปกติ DOE จะใช้ Anova ในการวิเคราะห์ข้อมูล ดังนั้นผู้วิเคราะห์ก็ต้องเข้าใจเงื่อนไขของ Anova ด้วย

7) สรุปผลการทดลองและให้คำแนะนำ ผู้ดำเนินการทดลองเป็นผู้ที่เข้าใจที่มาของข้อมูลเป็นอย่างดี และมองออกว่าผลที่ได้เป็นเช่นนั้นเพราะอะไร การดำเนินการมีข้อบกพร่องที่จุดใด มีสาระสำคัญอะไรที่ผู้อ่านรายงานควรรับรู้ เพื่อว่าหากในอนาคตมีแผนการดำเนินการทดลองก็สามารถนำไปเป็นบรรทัดฐานได้ นอกจากนี้ผู้บริหารหน่วยงานอาจสนใจข้อวิเคราะห์ ความคิดเห็นของผู้ดำเนินการนอกเหนือไปจากผลที่ปรากฏ

2.4.2 การดำเนินการออกแบบการทดลอง

1) การออกแบบกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ (Process or Product Design) แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

ก) การออกแบบระบบ (System Design) คือ การนำความรู้ทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการ เพื่อออกแบบตัวแบบเริ่มต้น (ต้นแบบ) โดยตัวแบบนี้ถูกกำหนดด้วยการกำหนดค่าเริ่มต้นของลักษณะทางคุณภาพที่ต้องการของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการ

ข) การออกแบบค่าพารามิเตอร์ (Parameter Design) คือ การศึกษาเพื่อกำหนดและระบุค่าที่ดีที่สุดและเหมาะสมภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่ต้องการให้กับกระบวนการ เช่น การตั้งค่าพารามิเตอร์ในการขับรถเพื่อให้เครื่องยนต์กินน้ำมันน้อยที่สุด หรือระยะทาง (กิโลเมตร) ต่อลิตรมากที่สุด การตัดบานกระจกต้องการให้มีขนาดพอดีกับที่ต้องการ เป็นต้น

ค) การออกแบบค่าพิกัดเผื่อ (Tolerance Design) คือ วิธีการกำหนดช่วงหรือพิกัดเผื่อที่เหมาะสมในกระบวนการผลิต ที่จะทำให้คุณภาพทางการผลิตสูง และค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานต่ำที่สุด

2) กำหนดเป้าหมาย เพื่อให้มีความคลาดเคลื่อนของข้อมูลให้น้อยที่สุด ให้ได้สาระสำคัญของตัวปัจจัยที่กำลังพิจารณาให้มากที่สุด โดยใช้ต้นทุนและเวลาดำเนินการน้อยที่สุด

3) กลยุทธ์และวิธีการดำเนินการที่ดี ควรจะเริ่มจากเข้าใจสภาพปัญหาอย่างถ่องแท้ และรู้ว่าผู้ดำเนินการหรือผู้บริหารต้องการสิ่งใด

4) สิ่งที่ต้องยึดถือและต้องทำให้ได้ 3 ประการ คือ

ก) การสุ่ม (Randomization) การดำเนินการใดๆ กับปัจจัยจะต้องอิสระ เพื่อให้ข้อมูลแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกัน นอกจากนี้ต้องคำนึงถึงหลักการกระจายอย่างทั่วถึงสมดุลย์ (Balance Out) สำหรับปัจจัยอื่นที่ไม่อาจควบคุมได้

ข) การทำซ้ำ (Replication) หมายถึงการดำเนินการทดลองซ้ำอีกครั้ง เพื่อจุดประสงค์ 2 อย่างที่สำคัญคือ (1) เพื่อให้สามารถมองเห็นและประเมินค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองได้ การดำเนินการวิเคราะห์จะนำเอาค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวไปประเมินว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อกระบวนการบ้าง และ (2) เพื่อกำจัดทิ้งความคลาดเคลื่อน (Average Out) อิทธิพลที่ไม่สามารถควบคุมได้ ที่มีต่อปัจจัย เปรียบดังเช่นการหาค่าเฉลี่ยนั่นเอง เป็นวิธีการในการประเมินค่าอิทธิพลของปัจจัยอีกอย่างหนึ่ง

ค) การบล็อก (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการเพิ่มความแม่นยำ (Precision) ของการทดลอง หรือเพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนในการทดลอง

2.4.3 ประโยชน์ของการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์ที่สำคัญพอสรุปได้เป็น 4 ส่วน คือ

1) กำหนดตัวแปรที่ควบคุมได้ (X 's) ที่มีอิทธิพลสูงสุดต่อการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ หรือตัวแปรตอบสนอง (Y)

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

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

4) กำหนดค่าของปัจจัยที่ควบคุมได้ (X 's) ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง (Y) เพื่อทำให้ผลกระทบของตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ (Z 's) มีค่าน้อยที่สุด

2.4.4 ประเภทของการทดลอง (Types of Experiment) [10]

ในการทดลองสามารถจะจำแนกประเภท (ชนิด) ของการทดลองได้เป็น 5 ประเภทหลัก ตามข้อมูลที่ทราบเกี่ยวกับระบบวัตถุประสงค์ของการทดลอง ดังนี้ คือ

1) การทดลองเดี่ยวหรือการทดลองเพียงครั้งเดียว (Single Experiment) คือ การทดลองในกรณีที่ผู้ทดลองมีความรู้ความเข้าใจในระบบหรือกระบวนการที่ต้องการศึกษาเป็นอย่างดี ทราบถึงปัจจัยที่มีความสำคัญในกระบวนการเบื้องต้น แต่ต้องการทราบและชี้บ่งถึงสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย

2) การทดลองอย่างต่อเนื่อง (Continuous Experiment) คือ การทำการทดลองเพื่อที่จะลดค่าการเปลี่ยนแปลง (Variation) ในกระบวนการ โดยมีเป้าหมายในการปรับปรุงกระบวนการอย่างชัดเจน เช่น ต้องการปรับปรุงดัชนีวัดสมรรถภาพกระบวนการ (C_p , C_{pk} , C_{pm}) ให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แต่ผู้ทดลองไม่มีความรู้ในกระบวนการหรือระบบที่ต้องการปรับปรุงมากนัก แต่ทราบว่า

กระบวนการยังไม่ได้มาตรฐาน มีของเสียทิ้งที่ต้องทำลายทิ้ง (Scrap) และของเสียที่นำกลับมาแก้ไขได้ (Rework) มากเกินไป

3) การทดลองแบบคัดทิ้ง (Screening Experiment) คือ การทดลองที่ทำขึ้นสำหรับศึกษา ระบบหรือกระบวนการใหม่ ที่เพิ่งทำการติดตั้งหรือจะติดตั้งพัฒนาขึ้นใหม่ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใหญ่ หรือซับซ้อน และผู้ทดลองมีความเข้าใจในกระบวนการน้อย

วัตถุประสงค์ของการทดลองนี้ คือพยายามปรับลดรายละเอียดของตัวแปรหรือปัจจัยใน กระบวนการ หรือระบบเพื่อที่จะ ได้จำนวนปัจจัยและกำหนดค่าที่เหมาะสม และทำการทดลองได้จริง เพื่อกำหนดค่าที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในกระบวนการหรือระบบที่ศึกษาต่อไป

4) การทดลองแบบเจาะจง (Focusing Experiment) คือ การทดลองที่ทำขึ้นโดยมีเป้าหมาย กำหนดจากความต้องการในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น โดยการกำหนดค่าที่เหมาะสมให้กับปัจจัยที่เลือก ศึกษาขึ้นๆ

5) การทดลองเชิงลำดับ (Sequential Experiment) คือ การทดลองที่ทำขึ้นเนื่องจาก กระบวนการที่สนใจศึกษาสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนหรือกระบวนการย่อยๆ เป็นจำนวนมาก ทำให้มี ปัจจัยที่ศึกษาในภาพรวมในแต่ละขั้นตอนมากจึงจำเป็นต้องแบ่งกระบวนการออกเป็น ส่วนๆ และทำ การทดลองกำหนดปัจจัย จากนั้นจึงนำมารวมเป็นข้อกำหนดของกระบวนการในภาพรวมเพื่อให้ สามารถทำการศึกษาระบบหรือกระบวนการที่มีขนาดใหญ่มากได้จริงในทางปฏิบัติ

2.4.5 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล หมายถึงการทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการ รวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น ตัวอย่างเช่น กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลอง 1 ครั้ง (Replicate) จะประกอบด้วย การทดลองทั้งหมด ab การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัด ให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล เราจะกล่าวว่าปัจจัยเหล่านี้ มีการไขว้ (Crossed) ซึ่ง กันและกัน [9]

การทดลองเชิงแฟกทอเรียลเป็นการทดลองที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในการออกแบบ แผนการทดลอง เนื่องจากสามารถศึกษาปัจจัยได้หลายปัจจัยพร้อมกัน โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ ศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย หรือที่เรียกว่า “อันตรกิริยา” (Interactions) เช่น กรณีที่ศึกษา 3 ปัจจัย คือ ปัจจัย A, B และ C ผลกระทบที่เกิดขึ้นสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท คือ

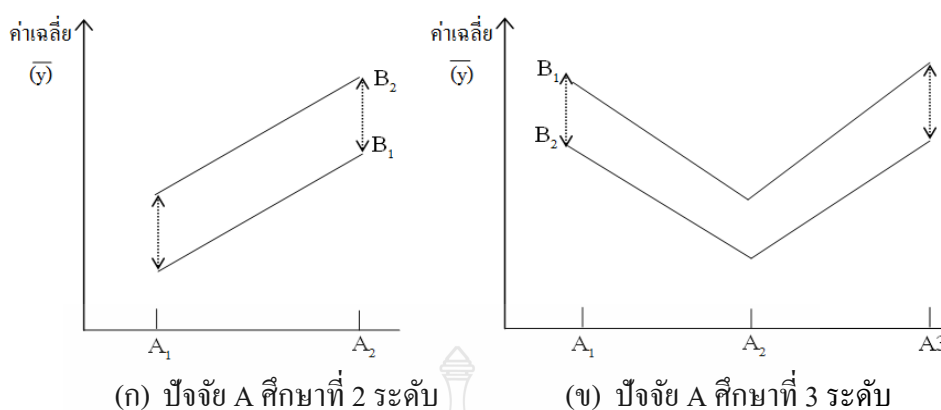
1) ผลกระทบหลักหรือผลกระทบปัจจัยเดี่ยว (Main Effects) คือ ผลกระทบกรณีที่น่าสนใจ พิจารณาปัจจัยเดี่ยว ได้แก่ ผลกระทบของปัจจัย A ผลกระทบของปัจจัย B และผลกระทบของปัจจัย C

2) ผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย (Two - Factors or 2 - Ways Interactions) คือผลกระทบที่เกิดจากการพิจารณาปัจจัยพร้อมกันเป็นคู่ (ครั้งละ 2 ปัจจัย) ได้แก่ ผลกระทบของปัจจัยร่วม (อันตรกิริยา) AB, BC และ AC

3) ผลกระทบร่วม 3 ปัจจัย (Three-Factors or 3 - Ways Interactions) คือ ผลกระทบที่เกิดจากการพิจารณาปัจจัยสามปัจจัยพร้อมกันในที่นี้ ได้แก่ผลกระทบร่วม ABC

โดยทั่วไปผู้ทดลองจะให้ความสำคัญแก่การศึกษาผลกระทบหลัก และผลกระทบร่วมของ 2 ปัจจัย (Two - Factors or 2 - Ways Interactions) เท่านั้น เนื่องจาก (Montgomery, 2005) ผลกระทบร่วมตั้งแต่ 3 ปัจจัยขึ้นไป โดยทั่วไปจะมีค่าน้อยมากจึงไม่นิยมนำมาพิจารณา จะเห็นว่าการทดลองแฟคทอเรียลนั้น มีความแตกต่างจากการศึกษากรณี CRD และ RBD ทั้งในด้านจำนวนปัจจัยที่มีได้ไม่จำกัด และยังสามารถศึกษาผลกระทบร่วมในกรณีที่สองปัจจัยใดๆ อาจไม่เป็นอิสระต่อกันด้วย แต่ต้องพึงระวังเสมอว่าจำนวนทดลองที่ทำ มีค่าน้อยเท่ากับผลคูณระหว่างค่าระดับปัจจัยของทุกปัจจัย ถ้าจำนวนปัจจัย (k) มีจำนวนมาก จำนวนการทดลอง (Runs: N) จะมีค่าสำรวจศึกษาผลกระทบร่วม (อันตรกิริยา; Interactions) ระหว่างปัจจัย จึงควรทำความเข้าใจในความหมายของคำว่าผลกระทบร่วมหรืออันตรกิริยาก่อน ในที่นี้จะใช้คำง่ายๆ คือ “ผลกระทบร่วม” แทน “อันตรกิริยา” ผลกระทบร่วม (Interactions) คือ “ความล้มเหลวของผลต่างของค่าตอบสนอง (Y) ที่จะมีค่าต่าง เท่ากัน เมื่อผู้ทดลองทำการเปลี่ยนค่าระดับของปัจจัยที่หนึ่ง (จากระดับที่ 1 ไปสู่ระดับที่ 2 เป็นต้น) ภายใต้อันตรกิริยาของระดับของปัจจัยที่สอง”

การพิจารณาผลกระทบร่วมนั้นอาจจะพิจารณาได้โดยใช้การคำนวณผลต่าง (Difference; Δ) ในแนวนอน (Horizontal) หรืออาจพิจารณาโดยใช้การคำนวณค่าผลต่างในแนวตั้ง (Vertical) ก็ทำได้เช่นกัน จะเห็นแล้วว่าในกรณีที่ปัจจัย 2 ปัจจัย มีผลกระทบกันนั้นค่าตอบสนอง (Y) จะเปลี่ยนไปสำหรับปัจจัยหนึ่ง ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการทดลอง ณ ระดับของปัจจัยที่เหลือ กล่าวคือ ค่าตอบสนอง Y เมื่อเปลี่ยนค่าของปัจจัย B จากระดับที่ 1 ไปสู่กรณีที่ 2 กรณี (b) จะเปลี่ยนไปเท่ากับ 5 หรือ 0 นั้น ขึ้นอยู่กับผู้ทดลองทำการทดลองที่ระดับที่ 1 หรือระดับที่ 2 ของปัจจัย A ดังนั้นการพิจารณาผลกระทบร่วมนั้นอาจพิจารณาได้โดยการใช้อกราฟที่เรียกว่า “Interactions Plot” (กราฟผลกระทบร่วม) ถ้าเส้นกราฟขนานกัน (Parallel) แสดงว่า ค่าต่างระหว่างเส้นมีค่าเท่ากันหรือคงที่ หมายถึง กรณีที่ไม่พบผลกระทบร่วม (No Interactions) ระหว่างปัจจัยดังแสดงในภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 กราฟ Interaction Plots กรณีไม่พบผลกระทบรวม [9]

จึงสรุปได้ว่าข้อดีของการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Factorial Experiment) คือ

ก) ผู้ทดลองสามารถศึกษาผลกระทบปัจจัยหลัก (Main Effects) และผลกระทบรวมของปัจจัยหรืออันตรกิริยาระหว่างปัจจัยได้พร้อมกันในการทดลอง ซึ่งแตกต่างจากการออกแบบการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ในแต่ละกลุ่ม (Completer Randomized Block Design; RBD) ซึ่งทำการวิเคราะห์สองปัจจัยแต่ไม่สามารถพิจารณาผลกระทบรวมได้

ข) กรณีที่ไม่พบผลกระทบรวม (อันตรกิริยา) ผู้ทดสอบสามารถใช้ผลยืนยันได้ว่าการทดลองมีแต่ปัจจัยหลัก หรือผลกระทบหลักเท่านั้นที่มีผล เมื่อทดสอบครั้งต่อไปจะสามารถลดจำนวนการทดลองลงโดยใช้วิธีการทดลองเปลี่ยนค่าปัจจัยครั้งละ 1 ปัจจัย (One - factor at a time) ได้

ค) กรณีที่พบผลกระทบรวม (Interactions) ก็จะทำให้ผู้ทดลองสามารถทราบถึงรูปแบบและอิทธิพลผลกระทบนั้นเพื่อจะได้แนวทางในการควบคุมให้ได้จุดที่เหมาะสม

การทดลองเชิงแฟคทอเรียล แบ่งออกเป็น 2 กรณีหลัก คือ การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Experiment) และการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Experiment) ซึ่งในกรณีนี้จะอธิบายรายละเอียดการวิเคราะห์ไว้ในกรณีศึกษาปัจจัยที่ 2 ระดับ และ 3 ระดับเท่านั้น เนื่องจากจำนวนทดลอง (Runs: N) จะแปรผันตามผลคูณของจำนวนระดับปัจจัยทุกปัจจัย หรือเท่ากับผลคูณของระดับปัจจัยทุกปัจจัยคูณกับจำนวนครั้งที่ทำซ้ำ ($N = \text{จำนวนปฏิบัติทั้งหมดที่เป็นไปได้} \times \text{จำนวนครั้งที่ทำการทดลองซ้ำ}$) ถ้าทำการศึกษา 10 ปัจจัย แต่ละปัจจัยที่ 2 ระดับ จำนวนการทดลอง (ไม่ทำการทดลองซ้ำ) $= 2^{10} = 1,024$ การทดลอง โดยทั่วไปจึงนิยมศึกษาปัจจัยเพียงที่ 2 ระดับ และ 3 ระดับเท่านั้น และเรียกแผนการทดลอง 2^k และ 3^k ว่าการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ และเรียกแผนการทดลอง 2^{k-p} และ 3^{k-p} ว่าการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วนตามลำดับ

2.4.6 การทดลองเชิงแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ สำหรับศึกษาปัจจัยที่ 2 และ 3 ระดับ

การทดลองเชิงแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Experiment) เป็นการทดลองที่ทำขึ้นเพื่อศึกษาผลกระทบระหว่างปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ($k \geq 2$) โดยมีวัตถุประสงค์หลัก คือ ต้องการศึกษากิจกรรมร่วม (Interactions) ผู้ทดลองจะใช้จำนวนระดับของปัจจัยที่ระดับขึ้นกับความสำคัญของปัจจัย ปัจจัยที่วิกฤต (Critical Factor) หรือปัจจัยที่ต้องการศึกษาละเอียดจะใช้จำนวนระดับที่มีค่ามาก (ในการทดลองเดียวกันผู้ทดลองไม่จำเป็นต้องทำการศึกษาปัจจัยแต่ละปัจจัยที่จำนวนระดับเท่ากัน) ค่าจำนวนระดับที่ระบุจะต้องสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ในการทดลอง เช่น กรณีศึกษา 2 ปัจจัย (2^k Full Factorial) วัตถุประสงค์ของการทดลองคือ ทำเพื่อคัดปัจจัยออก (Screening Experiment) หรือทำเพื่อต้องการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (Linear Model) ในกรณีทำการศึกษาปัจจัยตั้งแต่ 3 ระดับขึ้นไป จะเป็นศึกษาความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเส้นตรง หรือโพลีโนเมียลกำลังสองขึ้นไป

การพิจารณา 2^2 การทดลองเชิงแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ สามารถเขียนสมการตัวแบบได้ ดังนี้ คือ

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

โดยที่ y_{ijk} คือ ค่าตอบสนอง (Response) ของการทดลองปัจจัย A ที่ระดับที่ i ปัจจัย B ที่ระดับที่ j ทำการทดลองซ้ำครั้งที่ k ; $i = 1, 2$; $j = 1, 2$; $k = 1, 2, \dots, n$

μ คือ ค่าเฉลี่ยรวม (Grand Mean)

α_i คือ ค่าผลกระทบของปัจจัย A ที่ระดับที่ i

β_j คือ ค่าผลกระทบของปัจจัย B ที่ระดับที่ j

$(\alpha\beta)_{ij}$ คือ ค่าอันตรกิริยา หรือผลกระทบร่วมของปัจจัย A ที่ระดับ i และปัจจัย B ที่ระดับ j

โดยทำการทดลองซ้ำครั้งที่ k

ในการออกแบบที่มี k ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ แบบจำลองทางสถิติ สำหรับการออกแบบ 2^k จะประกอบด้วยผลหลัก k ชนิด, $\binom{k}{2}$ อันตรกิริยาของ 2 ปัจจัย, $\binom{k}{3}$ อันตรกิริยาของ 3 ปัจจัย, ... และ 1 อันตรกิริยาของ k ปัจจัย นั่นคือ แบบจำลองบริบูรณ์สำหรับการออกแบบ 2^k จะประกอบด้วยผลทั้งสิ้น $2^k - 1$ ชนิดเครื่องหมายสำหรับการทดลองร่วมปัจจัยที่กำหนดให้ก่อนหน้านี้นี้ยังใช้ในรูปแบบทั่วไปได้เช่นกัน ตัวอย่างเช่น abd ในการออกแบบ 2^5 หมายถึง การทดลองร่วมปัจจัยที่ A, B และ D อยู่ที่ระดับสูง และ C และ E อยู่ที่ระดับต่ำ การทดลองร่วมปัจจัย

สามารถเขียนให้อยู่ใน ลำดับมาตรฐานได้โดยการเพิ่มปัจจัยเข้าไปทีละตัว และให้ปัจจัยใหม่ que เพิ่มขึ้นนี้รวมกับปัจจัยที่อยู่ก่อนหน้า เช่น ลำดับมาตรฐานของการออกแบบ 2^4 คือ (1), a, b, ab, c, ac, bc, abc, d, ad, bd, abd, cd,acd, bcd และ abcd ตามลำดับ วิธีการทั่วไปในการวิเคราะห์เชิงสถิติของการออกแบบ 2^k สรุปได้ดังนี้

- 1) Estimate Factor Effects
- 2) Form Initial Model
- 3) Perform Statistical Testing
- 4) Refine Model
- 5) Analyze Residual
- 6) Interpret Results

ในขั้นแรกจะต้องประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยต่างๆ และตรวจสอบเครื่องหมายและขนาดของผลที่เกิดขึ้น ข้อมูลเช่นนี้จะทำให้ผู้ทดลองทราบโดยเบื้องต้นว่า ปัจจัยและอันตรกิริยาดัวใดที่มีความสำคัญ และปัจจัยเหล่านี้ควรจะถูปรับให้อยู่ในทิศทางใดเพื่อที่จะปรับปรุงผลตอบสนอง ในการสร้างแบบจำลองเริ่มต้น ควรจะเลือกแบบจำลองแบบเต็มรูปแบบ ซึ่งประกอบด้วยผลหลักและอันตรกิริยาทั้งหมด ในขั้นตอนที่สามจะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อที่จะทดสอบความมีนัยสำคัญของผลหลักและอันตรกิริยา ตารางที่ 2.2 แสดงรูปแบบทั่วไปของการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ที่มี n Replicate ขั้นตอนที่จะเป็นการจัดเกลาแบบจำลอง ซึ่งขั้นตอนนี้จะเกี่ยวกับการดึงเอาตัวแปรที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญออกจากแบบจำลองเต็มรูปแบบ ขั้นตอนที่ห้าจะเป็นการวิเคราะห์ส่วนตกค้างเพื่อที่จะตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง และตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานที่สร้างขึ้น มีบางครั้งเช่นกันที่การจัดเกลาแบบจำลองเกิดขึ้นหลังจากการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง ทั้งนี้ เนื่องจากพบว่าแบบจำลองเกิดความไม่เพียงพอ หรือสมมติฐานที่กำหนดให้หั้นนั้นไม่ถูกต้องอย่างรุนแรง ในขั้นตอนสุดท้ายจะทำการวิเคราะห์ด้วยกราฟ โดยจะสร้างกราฟและผลหลักและอันตรกิริยาขึ้น

ตารางที่ 2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบ 2^k [10]

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom
k main effects		
A	SS_A	1
B	SS_B	1
.	.	.
.	.	.
.	.	.
K	SS_K	1
$\binom{k}{2}$ two factor interactions		
AB	SS_{AB}	1
AC	SS_{AC}	1
.	.	.
.	.	.
.	.	.
JK	SS_{JK}	1
$\binom{k}{3}$ three factor interactions		
ABC	SS_{ABC}	1
ABD	SS_{ABD}	1
.	.	.
.	.	.
.	.	.
LJK	SS_{LJK}	1
.	.	.
.	.	.
.	.	.
$\binom{k}{k}$ 1k factor interactions		
ABC...K	$SS_{ABC...K}$	1
Error	SS_E	$2^E(n-1)$
Total	SS_T	$n2^k-1$

การออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) มีข้อดีของการออกแบบปัจจัยเต็มรูปแบบ คือ 1) ไม่มีการเกิดอิทธิพลแฝง (Alias) 2) สามารถวิเคราะห์อิทธิพลหลักและบางปฏิสัมพันธ์ได้ทั้งหมด และมีข้อด้อยของการออกแบบปัจจัยเต็มรูปแบบ คือ 1) ต้องทำการทดลองให้ครบทุกการดำเนินการ ทำให้ต้องสิ้นเปลืองทรัพยากรมากใช้เวลาดำเนินการมาก 2) เมื่อจำนวนการดำเนินการมากๆ อาจประสบปัญหาในการป้องกันความคลาดเคลื่อนของการปรับเปลี่ยนค่าของปัจจัยใดๆได้ [9]

2.4.7 การทดสอบสมมติฐาน

สมมติฐานทางสถิติ คือ ประโยคหรือข้อความที่กล่าวเกี่ยวกับพารามิเตอร์ของการแจกแจงความน่าจะเป็น ซึ่งอาจจะเป็นจริงหรือเท็จก็ได้ ข้อความหรือประโยคดังกล่าวนี้ ต้องระบุกลุ่มของประชากรที่เกี่ยวข้องมาด้วยหนึ่งกลุ่มหรือมากกว่าหนึ่งกลุ่มก็ได้ [11] สมมติฐานทางสถิติที่เขียนไว้ในเชิงปริมาณการเท่ากันของค่าสถิติเราเรียกว่า สมมติฐานที่ไม่มีความแตกต่างกัน ภาษานักวิจัยเรียกกันว่า สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis) แทนด้วยสัญลักษณ์ H_0 ส่วนสมมติฐานที่มีความแตกต่างกันเรียกว่า สมมติฐานรอง (Alternative Hypothesis) แทนด้วยสัญลักษณ์ H_1

2.4.8 การใช้ P - Value ในการทดสอบสมมติฐาน

วิธีการของ P - Value ได้ถูกนำมาใช้อย่างมาก คือ P - Value เป็นค่าความน่าจะเป็นจากการทดสอบทางสถิติ จะมีค่าเป็นอย่างน้อยที่จะทำให้ค่านี้มีค่ามากเท่ากับค่าสังเกตในทางสถิติ เมื่อสมมติฐานหลักเป็นจริง ดังนั้น P - Value นี้จะแสดงถึงน้ำหนักของหลักฐานที่จะใช้ในการปฏิเสธ H_0 และผู้ตัดสินใจสามารถสร้างข้อสรุปที่ระดับนัยสำคัญอื่นๆ ได้ นอกจากนี้ยังสามารถนิยาม P - Value ว่าเป็นเหมือนกับค่าที่น้อยที่สุดของระดับนัยสำคัญ ซึ่งนำไปสู่การปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 ก็ได้

เมื่อทำการวิเคราะห์การทดลองแบบ Factorial Design โดยใช้ Minitab 15 นอกจากจะได้กราฟแสดงการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองแล้ว Minitab ยังแสดงส่วนสำคัญคือตารางที่ใช้ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Anova) ของผลกระทบหลัก (Main Effect) และผลกระทบทางปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ของการออกแบบการทดลองที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$ [9]

สรุปคือ การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลมีประโยชน์หลายประการ และเป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพเหนือกว่าการทดลองแบบที่ละปัจจัย ยิ่งกว่านั้นแล้วการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลยังเป็นสิ่งที่จำเป็นเมื่อมีอันตรกิริยาเกิดขึ้น ซึ่งกรณีเช่นนี้ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงข้อสรุปที่ผิดพลาดได้ นอกจากนี้การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล ทำให้สามารถประมาณผลของปัจจัยหนึ่งที่ระดับต่างๆ ของปัจจัยอื่นได้ ทำให้สามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผล (Valid) ตลอดเงื่อนไขของการทดลองได้

จากนั้นนำปัจจัยที่ได้ไปหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) เป็นกระบวนการสำหรับพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่เป็นไปได้ที่ดีที่สุดในกลุ่มหรือประเภทของผลิตภัณฑ์นั้นๆ ค่าที่เหมาะสมจะต้องตอบสนองหรือบรรลุถึงวัตถุประสงค์ 3 ประการดังนี้

1) ค่าที่เหมาะสมจะต้องเป็นค่าที่ได้รับการยอมรับสูงสุด โดยเป็นค่าที่เป็นไปได้ที่ดีที่สุด เมื่อมีการกำหนดกลุ่มของค่าตัวแปร

2) ค่าที่เหมาะสมจะต้องอยู่ในภายใต้ข้อจำกัดทางด้านต้นทุนที่สมเหตุสมผล

3) ค่าที่เหมาะสมควรมีคุณลักษณะอยู่ในระดับมาตรฐานขององค์กร

ข้อดีของการเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม มีดังนี้ คือ

ก) เป็นวิธีการที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพในด้านต้นทุน หลีกเลี่ยงการทดลองซ้ำ

ข) เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพทางสถิติ เพราะอิทธิพลร่วมระหว่างตัวแปรอิสระและอิทธิพล หรือความสัมพันธ์แบบกำลังสอง ที่มีต่อค่าผลตอบสนองสามารถคาดคะเนได้

ค) วิธีการหาค่าที่เหมาะสม ให้ฐานข้อมูลที่ตอบคำถามหลายประการ เช่น ถ้าที่สภาวะ A มีต้นทุนการผลิตสูง การจะหาสภาวะใหม่ที่ต้นทุนลดลง ไม่จำเป็นต้องทำการทดสอบเต็มรูปแบบอีกครั้ง เนื่องจากฐานข้อมูลที่มีสามารถจะให้คำตอบที่ต้องการได้ อย่างไรก็ตามการตรวจสอบยืนยันสมการนั้นว่ามีความจำเป็น

2.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสึกหรอ [12]

การสึกหรอ หมายถึง ความเสียหายของผิววัสดุเนื่องจากการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างผิวสัมผัส ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปหรือการสูญเสียเนื้อบริเวณผิวสัมผัสนั้น พฤติกรรมการสึกหรอมีความซับซ้อนเนื่องจากมีปัจจัยหลายอย่างเข้ามาเกี่ยวข้อง การวิเคราะห์กลไกการสึกหรอเพื่อหาวิธีป้องกันหรือแก้ไข จึงต้องอาศัยความเข้าใจรูปแบบกลไกการสึกหรอและอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง การสึกหรอสามารถแบ่งได้เป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 4 กลุ่มคือ

2.5.1 Abrasion คือ กลุ่มการสึกหรอที่เกี่ยวข้องกับการตัดหรือเฉือนของผิววัสดุ โดยวัสดุที่แข็งหรือมีขอบคมมักทำให้วัสดุที่อ่อนกว่าสึกหรอ ชนิดการสึกหรอในกลุ่มนี้ประกอบด้วย Low Stress Abrasion, High Stress Abrasion, Gouging Abrasion และ Polishing Wear

2.5.2 Erosive Wear เป็นความเสียหายของผิววัสดุอันเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างผิวของแข็งและของไหลหรือการปะทะของลำของไหลที่อาจประกอบด้วยอนุภาคของแข็งและของไหลอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี ดังนั้นการสูญเสียเนื้อวัสดุอาจมีสาเหตุมาจากทั้งกระบวนการทางเคมีและทางกลพร้อมกัน

2.5.3 Adhesive Wear เนื่องจากความจริงที่ว่าไม่มีผิววัสดุใดที่มีความเรียบสมบูรณ์แบบ เมื่อผิวสัมผัสถูกแรงกระทำจึงมีบางส่วนของผิวเท่านั้นที่รับแรง ซึ่งหากได้รับแรงมากพอจะมีความเค้นสูงมากและจะเกิดการเชื่อมติดกันของผิวที่สัมผัส เมื่อมีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันของผิวสัมผัสบริเวณที่ถูกเชื่อมต่อกันจะไถลอก ทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อของวัสดุชิ้นใดชิ้นหนึ่งหรือทั้งสองชิ้น

2.5.4 Surface Fatigue Wear เป็นการแตกหักของผิวของแข็งอันเนื่องมาจากวัสดุต้องรับภาระซ้ำๆ (Cyclic Stress) จากการเคลื่อนที่ในลักษณะกลิ้งหรือไถไปบนผิวของวัสดุ

2.6 ตัวแปรที่มีผลต่อการสึกหรอ [13]

2.6.1 ตัวแปรเนื่องจากวัสดุ

1) ชนิดวัสดุ (Type of Material) ปริมาณการสึกหรอขึ้นอยู่กับชนิดของกลุ่มผิวสัมผัส ถ้าผิวสัมผัสเป็นผิวต่างชนิดกัน ผิววัสดุที่แข็งแรงกว่าจะมีปริมาณการสึกหรอที่ต่ำกว่า กรณีต้องการรักษาชิ้นส่วนสำคัญที่ต้องใช้เป็นผิวสัมผัสวัสดุที่อ่อนกว่าจึงมักถูกเลือกให้เป็นผิวสัมผัส เช่น กรณีการใช้โลหะผสม Babbit เป็นผิวสัมผัสซึ่งเป็นชิ้นส่วนสำคัญ เศษการสึกหรอที่เกิดขึ้นจะฝังตัวภายในวัสดุที่อ่อนกว่าและจะช่วยลดการสึกหรอเนื่องจาก Abrasion ของเหล็กกล้าได้

2) ความหยาบผิว (Surface Roughness) ผิวหยาบมากจะทำให้ปริมาณการสึกหรอของกลุ่มผิวสัมผัสสูงเนื่องจากผิวที่หยาบมีค่าความเค้นที่ Asperity สูง ในขณะที่เดียวกันกรณีผิวสัมผัสมีความเรียบมากบริเวณผิวสัมผัสจะขาค่อง (Valleys) ในการสะสมของเศษการสึกหรอและผิวที่เรียบจะมีค่า Molecular Interaction Force สูง เป็นเหตุให้เกิดการสึกหรอแบบ Abrasion ที่สูง ได้เช่นกัน ดังนั้นจึงต้องกำหนดความหยาบผิวที่เหมาะสมในการใช้งานแต่ละสถานะ

3) ความแข็ง (Hardness) ในสถานะตัวแปรต่างๆ คงที่ เหตุที่ชิ้นงานด้านทานการสึกหรอได้ดีขึ้น เมื่อความแข็งเพิ่มขึ้นเนื่องจากวัสดุที่แข็งจะมีการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกที่ต่ำกว่า จึงทำให้เกิดปริมาณการสึกหรอที่ต่ำกว่า

4) ขนาดของเกรน (Grain Size) เนื่องจากขนาดของเกรนมีผลต่อการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก ขนาดของเกรนจึงมีผลกระทบต่อปริมาณการสึกหรอ อิทธิพลของขอบเกรนต่อการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกจะต่ำเมื่อขนาดของเกรนโตกว่าพื้นที่ผิวสัมผัสของความหยาบ (Asperity) ดังนั้นขนาดของเกรนที่โตจะทำให้ความสามารถในการต้านการสึกหรอต่ำ

5) ผิวเคลือบ (Surface Coating) การเพิ่มความแข็งบริเวณผิวเป็นทางเลือกหนึ่งในการพัฒนาความสามารถในความต้านทานการสึกหรอ เช่น คาร์บูไรซ์ซิง คาร์บอนไนไตรดิง เป็นต้น อีกวิธีหนึ่งคือการสร้างผิวเคลือบเพื่อป้องกันการสึกหรอ เช่น ชั้นผิวเคลือบฟอสเฟต ออกไซด์ สี หรือผิว

เคลือบอื่นๆ เช่น PVD Coating, CVD Coating เป็นต้น ผิวเคลือบเหล่านี้จะส่งผลให้กลไกการสึกหรอ ถูกปรับเปลี่ยนไป ดังนั้นคุณสมบัติของผิวเคลือบจึงมีอิทธิพลต่อปริมาณการสึกหรอ

6) สารหล่อลื่น (Lubricant) สารหล่อลื่นลดการสัมผัสกันโดยตรงของผิวชิ้นงาน โดยคันผิวสัมผัสด้วยฟิล์มของสารหล่อลื่น ทำให้ลดการสึกหรอ ทั้งยังทำหน้าที่ลดแรงเสียดทาน ระบายความร้อน ลดการกัดกร่อนการกระแทก และช่วยทำความสะอาดชิ้นงาน เป็นต้น

2.6.2 ตัวแปรจากสภาวะแวดล้อม

1) รูปร่างของผิวสัมผัส การสึกหรอ อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่สัมผัสของสองผิวสัมผัส ในสภาวะปราศจากสิ่งแปลกปลอมใดๆ ดังนั้นทฤษฎีรูปร่างของผิวสัมผัสจึงไม่มีผลต่อปริมาณการสึกหรอโดยตรง แต่รูปร่างผิวสัมผัสจะมีผลต่อการสะสมของเศษการสึกหรอ (Debris) อันจะส่งผลต่อปริมาณการสึกหรอแบบ Abrasion ได้ เช่น หากเปรียบเทียบปริมาณการสึกหรอคู่ผิวสัมผัสที่ 1 ซึ่งเป็น Steel Ball บนแผ่นโลหะรูปร่างกระทะหงาย กับผิวสัมผัสคู่ที่ 2 ซึ่งเป็น Steel Ball บนแผ่นโลหะรูปร่างกระทะคว่ำ คู่ผิวสัมผัสที่ 1 จะเกิดการสะสมของเศษการสึกหรอบริเวณผิวสัมผัสได้มากกว่า ทำให้ปริมาณการสึกหรอสูงกว่า

2) น้ำหนักที่กด น้ำหนักด้าทำให้เกิดการสึกหรอแบบ Mid Wear การค่อยๆเพิ่มน้ำหนักขึ้น ทำให้อัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นด้วย หากเพิ่มน้ำหนักจนเกิน “น้ำหนักวิกฤต” อัตราการสึกหรออาจเพิ่มขึ้นมากกว่าสองเท่าของอัตราการสึกหรอสูงสุด กรณีนี้เป็นการสึกหรอแบบ Severe Wear ลักษณะการเคลื่อนที่สัมผัส เช่น การไถล การกลิ้ง เป็นต้น ส่งผลต่อกลไกการสึกหรอ เพราะมีผลต่อการกระจายความเค้นภายใต้ผิวสัมผัส

3) อัตราเร็วสัมผัสของผิวสัมผัส การเพิ่มขึ้นของความเร็วในการสึกหรอแบบ Severe Wear ปกติจะช่วยลดอัตราการสึกหรอลง เนื่องจากแรงเสียดทานทำให้ความร้อนเพิ่มขึ้น ความร้อนจะลดการแตกหักแบบเปราะในขั้นตอนการเกิด Debris ลง

4) อิทธิพลของสิ่งแวดล้อม สิ่งแวดล้อมที่เกิดการสึกหรอมีผลต่อความเสียดทาน โดยหลายกรณีที่อากาศ ออกซิเจนหรือไอน้ำลดอัตราการสึกหรอลง แต่ในบางกรณีก็มีผลตรงกันข้ามเช่น การเกิดออกไซด์บนโลหะบางประเภทที่มีความแข็งจะมีผลทำให้เกิดการสึกหรอแบบ Abrasion ได้ง่าย การเกิดออกไซด์อย่างต่อเนื่องกรณีการเกิดสนิมของเหล็กส่งผลให้อัตราการสึกหรอสูงขึ้น เป็นต้น

5) อุณหภูมิ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการสึกหรอแบบ Mid Wear ทำให้อัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นเพราะอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ความแข็งลดลง ดังนั้นการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกจึงง่ายขึ้น อุณหภูมิที่สูงยังเป็นการเพิ่มโอกาสการเกิดออกซิเดชันด้วย ส่วนในการสึกหรอแบบ Severe Wear การ

เพิ่มอุณหภูมิทำให้อัตราการสึกหรอกลับลดลง ในโลหะเหล็กกล้าผสมบางชนิดที่อุณหภูมิปกติคาร์ไบด์จะกระจายสม่ำเสมอและบางอุณหภูมิที่สูงจากอุณหภูมิห้องคาร์ไบด์บางตัวจะรวมตัวกัน

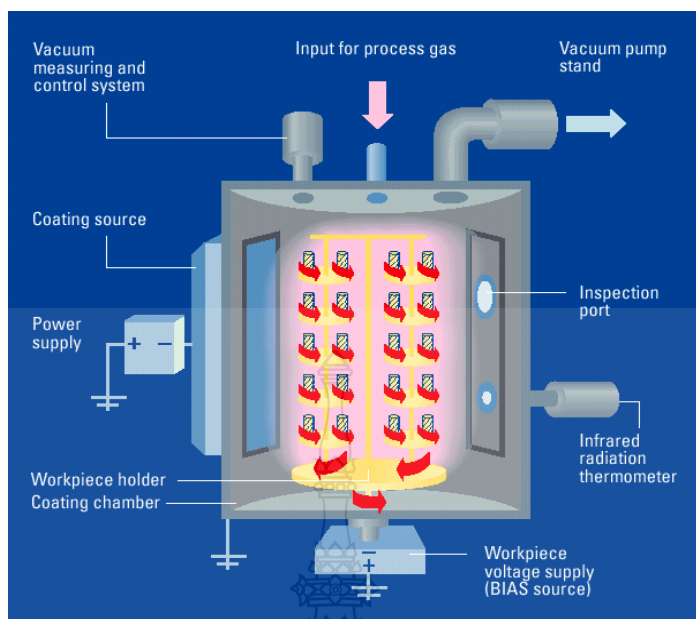
6) เวลา การเพิ่มเวลาการรับภาระของผิวสัมผัสทำให้ปริมาณการสึกหรอเพิ่มขึ้น เพราะเท่ากับเป็นการเพิ่มระยะทางหรือจำนวนรอบในการรับภาระ ในคู่ผิวสัมผัสใหม่ต้องใช้เวลาในการปรับตัวเพิ่มเข้าสู่ภาวะสมดุล กระบวนการก่อนที่จะถึงภาวะสมดุลนี้เรียกว่า Running-in Process ช่วงนี้เกิด Work Hardening, Oxidation และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผิว

2.7 การชุบเคลือบผิวฟิล์มบางบนวัสดุ [14]

การเคลือบผิววัสดุมีวัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนแปลงและปรับปรุงสมบัติของวัสดุให้เป็นไปตามที่ต้องการ ทั้งนี้การปรับปรุงคุณภาพผิววัสดุวิธีหนึ่ง คือ การเคลือบด้วยสารที่มีลักษณะเป็นชั้นเคลือบบางๆ ที่เรียกว่า ฟิล์มบาง (Thin Film) บนผิววัสดุ ในอดีตจนถึงปัจจุบันการเคลือบผิวชิ้นงานส่วนใหญ่จะนิยมใช้วิธีทางเคมี เช่น การเคลือบด้วยไฟฟ้า (Electroplating) แต่การเคลือบวิธีนี้มีข้อเสียคือคุณภาพของผิวเคลือบต่ำอีกทั้งยังมีปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม จึงมีการวิจัยและพัฒนาเทคนิคการเคลือบผิวใหม่ได้แก่ การเคลือบในสุญญากาศ (Vacuum Coating) เนื่องจากการเคลือบนี้เกิดขึ้นเฉพาะในสุญญากาศและไม่ใช้สารเคมีที่จะทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมในกระบวนการเคลือบ ซึ่งการเคลือบในสุญญากาศ สามารถได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

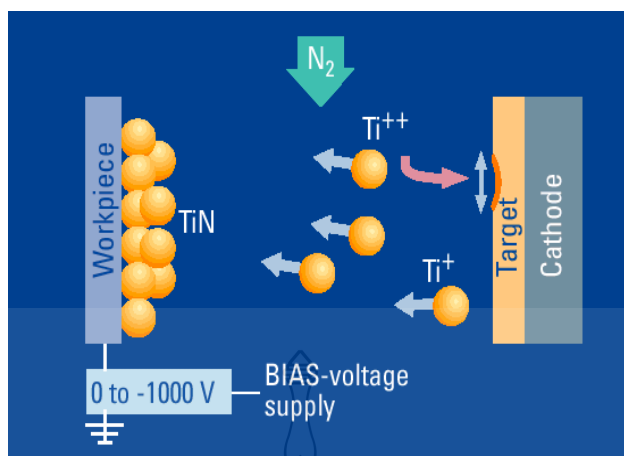
2.7.1 Chemical Vapor Deposition: CVD อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพแก๊สและเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นสารใหม่เคลือบบนผิววัสดุ

2.7.2 Physical Vapor Deposition: PVD อาศัยการทำให้อะตอมสารเคลือบหลุดออกจากผิวสารเคลือบด้วยความร้อนหรือการถ่ายเทโมเมนตัมแล้วฟุ้งกระจายเข้าจับและยึดติดกับผิววัสดุรองรับ โดยมีองค์ประกอบพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการชุบเคลือบผิว PVD ดังภาพที่ 2.21 ปัจจุบันมีอุตสาหกรรมในประเทศได้นำเครื่องชุบเคลือบในสุญญากาศมาใช้มากขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเป็นสำคัญ



ภาพที่ 2.21 PVD Coating Technologies; Basic Layout [15]

Physical Vapor Deposition: PVD คือการเคลือบผิวชิ้นงานโดยทำให้สารที่นำมาเคลือบระเหยและแตกตัว ในรูปของอะตอมหรือโมเลกุล แล้วไปเกาะบนชิ้นงานในสภาพสุญญากาศ ซึ่งระบบจะถูกทำให้เป็นสุญญากาศที่ประมาณ 10^{-4} ถึง 10^{-5} Torr ก่อนจะปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าไปจนความดันสุญญากาศประมาณ 10^{-2} Torr ชิ้นงานจะอยู่ที่ขั้วลบและทำความสะอาดโดยอาร์กอนไอออน ให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างชิ้นงานกับแหล่งกำเนิดไอโลหะ โดยไอโลหะที่ระเหยออกมาจะแตกตัวแล้วไปเกาะที่ชิ้นงาน ดังภาพที่ 2.22 ผิวเคลือบที่ได้จากวิธีนี้จะติดแน่นมากที่สุด และสามารถเคลือบโลหะประเภทไทเทเนียม หรือโลหะอื่นๆ ในกรณีที่ผสมแก๊สซึ่งไม่ใช่แก๊สเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน ออกซิเจน หรือมีเทนระหว่างการเคลือบผิว ก็จะได้ผิวเคลือบของสารประกอบโลหะ เช่น ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) ไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) ไทเทเนียมคาร์ไบด์ไนไตรด์ (TiCN) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และอะลูมิเนียมไนไตรด์ (AlN) ซึ่งผิวเคลือบที่ได้จะทนต่อการขีดสีสูงและทนความร้อนได้มาก



ภาพที่ 2.22 PVD ARC Technology [15]


- 1) ผิวเคลือบกลุ่มไนไตรด์ ได้จากแก๊ส ไนโตรเจน แอมโมเนีย
- 2) ผิวเคลือบกลุ่มคาร์ไบด์ ได้จากแก๊ส CH₄, C₂H₄, C₃H₈
- 3) ผิวเคลือบกลุ่มออกไซด์ ได้จากแก๊ส ออกซิเจน
- 4) ผิวเคลือบกลุ่มโบไรด์ ได้จากแก๊ส BH₃, BCl₃

เนื่องจาก PVD หลายระบบจะใช้ไอของสสารที่มีพลังงานสูง (High Energy Beam) หรือ อีออน (Ion) จากพลาสมา เข้ามาช่วยทำให้การฝังตัวของอนุภาคที่จะเข้าร่วมตัวกับผิวชิ้นงานได้มากกว่าการอาศัยการแพร่เป็นหลักแต่เพียงอย่างเดียวของหลายๆกรรมวิธี อย่างไรก็ตามในการทำงานจริง PVD มักจะมีข้อจำกัดในเรื่องของความหนาของชั้นฟิล์ม เนื่องจากการจ่ายสารเข้าทำปฏิกิริยาโดย PVD มักจะมี ความบกพร่องในเนื้อฟิล์ม เป็นลักษณะของก้อนสารที่ไม่ยอมกลายเป็นไอและมีอนุภาคขนาดใหญ่ปะปนเข้ามาในเนื้อสารด้วย และอนุภาคนี้อาจเกิดในชั้นฟิล์มความสามารถในการเกาะติดระหว่างพันธะในบริเวณใกล้เคียงจะไม่สมดุล และเกิดการดึงกันระหว่างอนุภาคซึ่งต่างสถานะกันทำให้ความแข็งแรงของผิวเคลือบลดลง และจะทำให้ความหนาที่ได้ก็ต่ำลง ชิ้นงานที่จะนำมาทำการชุบด้วย PVD ต้องอยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน จะไม่สามารถแก้ไขชิ้นงานภายหลังชุบได้ เพราะจะส่งผลต่อคุณสมบัติของฟิล์ม และจะต้องเตรียมผิวให้เรียบที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ และต้องทำการเตรียมผิวงานให้มีความสะอาดมากที่สุด คือต้องไม่มีน้ำมัน สารหล่อลื่น สารเคมีอื่นๆ ตกค้างอยู่ เนื่องจากจะไปทำปฏิกิริยาส่งผลที่ไม่ต้องการบนผิวงานได้ [12]

2.7.1 ผิวเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) [16]

การชุบเคลือบผิว TiN เป็นการเคลือบผิวเพื่อป้องกันการสึกหรอ เหมาะสำหรับการประยุกต์กับวัสดุที่หลากหลาย เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของการตัด เพิ่มอายุการใช้งาน และเพิ่มความเร็วที่มากขึ้น มีคุณสมบัติด้านสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในเรื่องอัตราการไหลของโลหะได้ดี ป้องกันการสะสมของเศษบนวัสดุที่บริเวณขอบของเครื่องมือ ช่วยลดแรงและอุณหภูมิในการตัดเฉือน ปัจจุบันการชุบเคลือบผิว PVD ด้วย TiN ได้มีการพัฒนาและถูกประยุกต์ใช้ในลักษณะของสารเคลือบที่หลากหลายขึ้น เช่น TiAlN, TiCN, TiC เป็นต้น

การชุบเคลือบผิว TiN มีวัตถุประสงค์ใช้งานขึ้นรูปโลหะ (โลหะผสม สแตนเลส เหล็กหล่อ และโลหะผสมอะลูมิเนียม) สำหรับปกป้องการสึกหรอของแม่พิมพ์ แม่พิมพ์ตัด แม่พิมพ์ที่ใช้งานปั๊มโลหะและเครื่องมือขึ้นรูป ปัจจุบันยังถูกนำมาใช้งานชิ้นส่วนเครื่องประดับที่ใช้แทนการชุบทอง เนื่องจากมีลักษณะสีที่ใกล้เคียงกัน โดยสารเคลือบ TiN มีคุณสมบัติดังภาพที่ 2.23


NAME	Color	Nanohardness up to [GPa]	Thickness [μm]	Friction (fretting) coefficient	Max. usage temperature [°C]	Symbol color
TiN	gold	24	1-7	0.55	800	

ภาพที่ 2.23 คุณสมบัติของผิวเคลือบ TiN [15]

2.7.2 ผิวเคลือบไทเทเนียมคาร์ไบด์ไนไตรด์ (TiCN)

เป็นการชุบเคลือบที่เกี่ยวข้องกับโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนในกระบวนการชุบเคลือบผิวของ TiN โดยผลลัพธ์คือ ชิ้นงานจะถูกเคลือบให้มีคุณสมบัติเป็นเลิศด้านความแข็งและการต้านทานการสึกหรอที่เหนือกว่าการชุบเคลือบผิว TiN และดีเยี่ยมกับเหล็กที่ใช้ในงานแปรรูปวัสดุ งานปั๊ม และเหล็กขึ้นรูปคาร์บอนสูง เหล็กเครื่องมือ และวัสดุที่กัดกร่อนอื่นๆ การเคลือบผิว TiCN สามารถกำหนดให้มีสีที่หลากหลาย (สีเทาฟ้าจนถึงสีชมพู) ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของไทเทเนียม (Ti) และไนโตรเจน (N₂) แต่ส่วนมากผิวเคลือบจะออกสีเทาฟ้า จึงสามารถนำไปปรับใช้กับการเคลือบผิวของเครื่องประดับตกแต่งได้ คุณลักษณะเด่นของผิวเคลือบ TiCN จะมีความแข็งสูงและมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำกว่าผิวเคลือบ TiN แต่ไม่สามารถทดแทนการประยุกต์ใช้ของผิวเคลือบ TiN ได้ทั้งหมด โดยปกติจะนำไปใช้สำหรับงานตัด งานกดอัด และงานเกี่ยวกับการสึกหรอที่ปฏิบัติการในอุณหภูมิปานกลาง

สามารถประยุกต์ใช้งานได้ดีที่หลากหลายสำหรับเครื่องมืองานตัด ดอกสว่าน งานกัด งานคว้าน งานเจาะ งานตีปเกลียว ซึ่งทำงานด้วยเครื่องจักร เหมาะสำหรับใช้งานกับเหล็กที่มีความแข็งสูง และสามารถใช้ได้ดีกับสแตนเลส และใช้สำหรับปกป้องการสึกหรอของแม่พิมพ์ แม่พิมพ์ตัด การบ่ม และการขึ้นรูป โดยสารเคลือบ TiCN มีคุณสมบัติดังภาพที่ 2.24

NAME	Color	Nanohardness up to [GPa]	Thickness [μm]	Friction (fretting) coefficient	Max. usage temperature [$^{\circ}\text{C}$]	Symbol color
TiCN	blue-grey	37	1-4	0.2	400	

ภาพที่ 2.24 คุณสมบัติของผิวเคลือบ TiCN [15]

ทั้งนี้เทคโนโลยีดังกล่าวถือเป็นเทคโนโลยีสำคัญสำหรับวิทยาการสมัยใหม่หลายแขนง เช่น วัสดุศาสตร์ นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) วิศวกรรมผิววัสดุ (Surface Engineering) โดยเฉพาะการชุบ PVD สามารถสร้างฟิล์มบาง (Thin Film) ได้หลายชนิด จึงมีการประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกันไป มีการนำเทคนิคการชุบ PVD มาทำการชุบงานทางด้านประดับตกแต่ง อุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การชุบผิวแข็งให้แก่เครื่องมือตัดเจาะขึ้นรูป และรวมถึงอุตสาหกรรมในการผลิตเหรียญของโรงงานต่างประเทศ [1] โดยใช้ในการชุบเคลือบผิวแม่พิมพ์ บ่มเหรียญ เพื่อยืดอายุการใช้งาน หรืองานบังคับขอบเหรียญ (Collar) ทำให้ประสิทธิภาพในการใช้งานเพิ่มสูงขึ้น และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานชุบเคลือบผิวชนิดต่างๆ ที่สอดคล้องกับอุตสาหกรรมการผลิตในแต่ละประเภทที่ค่อนข้างหลากหลาย ดังตารางที่ 2.3

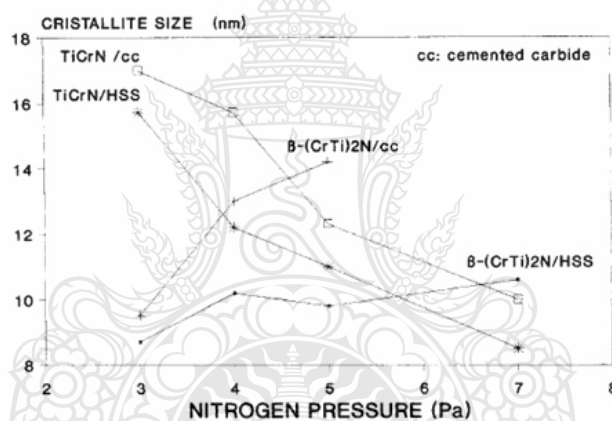
ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของสารเคลือบต่าง ๆ และการนำไปใช้งาน [34]

Coatings	TiN	TiCN	ZrN	CrN	TiAlN	AlTiN	AlTiSiN	AlTiCrN	Quantum	X-LC	DLC
	Titanium Nitride	Titanium Cobornitride	Zirconium Nitride	Chromium Nitride	Titanium Aluminium Nitride	Aluminium Titanium Nitride	Aluminium Titanium Silicon Nitride	Aluminium Chromium Nitride	Titanium Nitride Alloy	Molybdenum Desulfide	Diamond Like Carbon
Hardness [HV]	2400	3500	2400	1800	3400	3600	4500	3400	2400	600	2000
Friction Coefficient	0.4	0.2	0.3	0.3	0.5	0.5	0.45	0.55	0.3	< 0.1	0.1
Thickness (Microns)	1 - 5	1 - 4	1 - 4	1 - 4	1 - 4	1 - 4	1 - 4	1 - 4	1 - 4	1	0.5
Color	Gold	Silver Grey	Light Gold	Silver Grey	Blue Grey	Dark Grey	Dark Grey	Dark Grey	Oil Gold	Black	Metallic Black
Max. Working Temperature	600 C 1100 F	400 C 750 F	550 C 1050 F	700 C 1300 F	800 C 1475 F	900 C 1650 F	1200 C 2200 F	850 C 1550 F	660 C 1100 F	200 C 400 F	400 C 750 F
Special Characteristics	Good wear and corrosion characteristic for general purpose use biocompatible	High hardness added carbon for lubricity; good wear resistance	Biocompatible; corrosion resistance; good wear; decorative	Good adhesion; high toughness; corrosion resistant	High hardness and good corrosion resistance	High hardness and good corrosion resistance; very high oxidation resistance	Highest hardness and good corrosion resistance; high thermal threshold	High oxidation and wear resistance; high hardness; extreme thermal stability	High wear resistance; good lubricity; corrosion resistance	Dry lubricant film; excellent adhesion; low coefficient of friction	Dry lubricant film; smooth surface; low coefficient of friction
Applications	Machining of iron based materials; metal and plastic foaming; standard coating for general purpose; medical implants	Machining of difficult to machine steel alloys; milling and tapping; excellent for stamping, punching and foaming	Reduces the build-up on edges when machining; aluminum and titanium alloys; decorative industry	Machining copper and non-ferrous materials; non-cutting applications like molds and dies; machining parts	Universal high performance coating for drilling, milling, reaming and turning; dry machining; high speed tooling	Machining hardened steel; dry and high speed machining excellent for stainless steel and nickel based high-temperature alloys	Excellent for machining hard, dry milling abrasive materials; high speed operations	Machining metal where other coatings reach their limits of thermal stability; high speed milling under dry or semi-dry conditions	Excellent for milling & turning titanium; inconel materials	Machining aluminum; for ball bearings, plastic parts, plastic injection molds, engine components, shafts, gears, fasteners, wear plates; vacuum/space applications	Milling tapping punching and stamping; prevents built-up edges; optimizes release during foaming applications

2.8 อิทธิพลของตัวแปรต่อลักษณะและสมบัติทางกลของสารเคลือบในงานชุบ PVD [18]

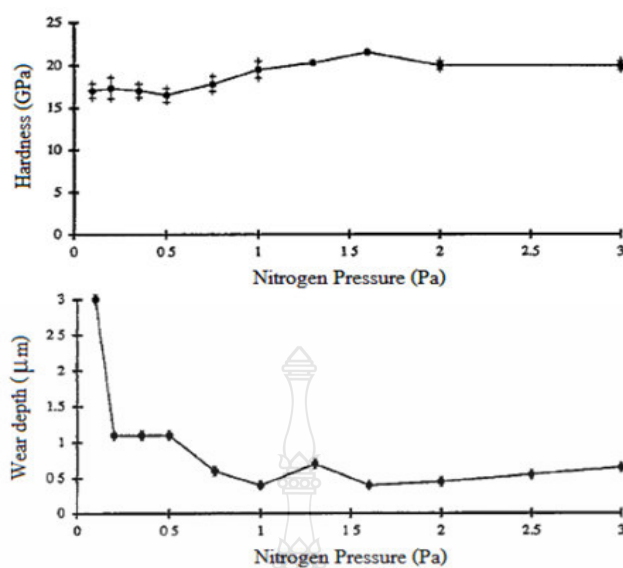
กระบวนการชุบเคลือบผิว PVD มีตัวแปรมากมายที่ต้องควบคุม ซึ่งมีผลต่อลักษณะโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของสารเคลือบนั้นๆ ตัวแปรที่ต้องควบคุม เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อชิ้นงาน หรือตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ ก็มีอิทธิพลเช่นกัน ตัวแปรที่ควบคุมได้มีดังนี้

2.8.1 ความดันของแก๊ส (Gas Pressure) เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างจุลภาค (Crystal Structure) ลักษณะ (Morphology) และส่วนผสมทางเคมี (Chemical Composition) ของชั้นสารเคลือบ ปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกลของชั้นสารเคลือบ เช่น แก๊สที่ใช้ในกระบวนการคือ แก๊สไนโตรเจน (N_2) หากเพิ่มปริมาณความดันแก๊สไนโตรเจนจะส่งผลให้มีปริมาณของแก๊สที่อยู่ในชั้นเคลือบเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความแข็งของชั้นเคลือบเพิ่มสูงขึ้น และผลต่อเนื่องจากการเพิ่มปริมาณของแก๊สส่งผลให้ขนาดของผลึก (Crystallite Size) มีขนาดเล็กลง ดังตัวอย่างของ (TiCr)N ในภาพที่ 2.25



ภาพที่ 2.25 ขนาดของผลึกของแต่ละเฟสที่สัมพันธ์กับค่าความดันของแก๊ส N_2 [19]

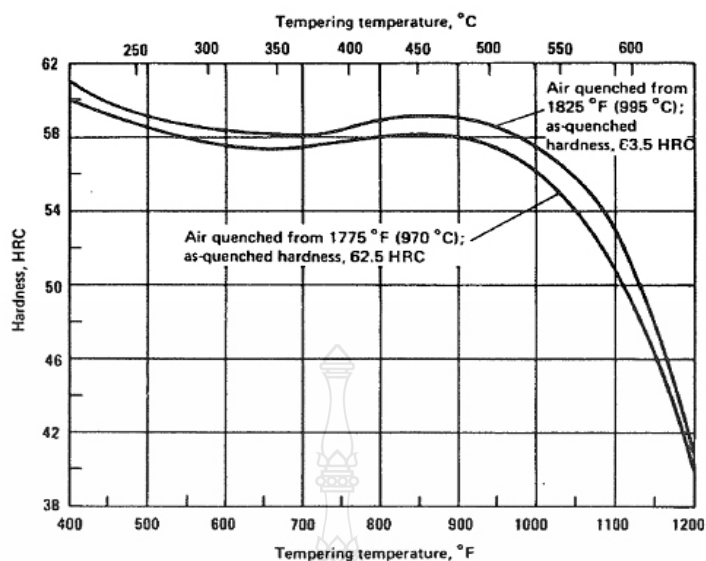
เมื่อผ่านกระบวนการแล้วจะมีเฟส (Phase) เกิดขึ้น 2 เฟส คือเฟส TiCrN มีโครงสร้างเป็นแบบ Cubic และ β -(CrTi)₂N มีโครงสร้างเป็นแบบ Hexagonal โดยปกติความหนาแน่นหรือจำนวนของเฟสที่สองจะน้อยกว่าเฟสของ TiCrN และ TiCrN จะมีขนาดผลึกเล็กลงเมื่อเพิ่มระดับของแก๊สไนโตรเจนและเป็นการเพิ่มความต้านทานการสึกหรอ ที่อธิบายในรูปของความลึกของการสึกหรอ (Wear Depth) โดยจะมีค่าลดลง ซึ่งมีความสอดคล้องหรือเกี่ยวข้องกับลักษณะของโครงสร้างฟิล์มที่ได้ขนาดเกรน ปริมาณ Droplet ภายในชั้นเคลือบ ดังภาพที่ 2.26 และในทางกลับกันเมื่อเพิ่มปริมาณแก๊สก็จะส่งผลให้ปริมาณธาตุผสม (Alloying Element) มีปริมาณที่ลดลงเช่นกัน เช่น ปริมาณ Cr ใน CrN, TiN หรือ (TiCr)N เป็นต้น



ภาพที่ 2.26 อิทธิพลของแก๊ส N_2 ต่อค่าความแข็งและ Wear Depth ภายใต้เงื่อนไข; $T_s = 400^\circ C$, $V_s = -100 V$, $I_{arc} = 80 A$ [19]

เมื่อพิจารณาแก๊สอีกชนิดที่ใช้ในกระบวนการ คือแก๊สอาร์กอน (Ar) จะมีอิทธิพลต่อลักษณะโครงสร้างของชั้นเคลือบในลักษณะการเรียงตัวของชั้นเคลือบในระหว่างกระบวนการ โดยสามารถควบคุมได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าความดันของแก๊สอาร์กอน ซึ่งผลจากแก๊สเพียงอย่างเดียวไม่สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลได้ แต่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงร่วมกับตัวแปรตัวอื่นๆ เช่น อุณหภูมิของชิ้นงาน (Substrate Temperature) เป็นต้น

2.8.2 อุณหภูมิของชิ้นงาน (Substrate Temperature) มีอิทธิพลต่อค่าสมบัติทางกลของชั้นเคลือบและชิ้นงาน (Substrate) ดังนั้นชนิดหรือเกรดโลหะของชิ้นงาน จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องทราบก่อนจะเข้ากระบวนการ เพื่อเลือกใช้สารเคลือบให้เหมาะสมและปรับตั้งหรือควบคุมอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการได้อย่างถูกต้อง เพราะถ้ามีความผิดพลาดของอุณหภูมิ จะทำให้ชิ้นงานมีค่าความแข็งที่ลดลง เช่น เหล็ก SKD 11 ต้องการเคลือบผิว TiC ซึ่งจากกราฟการ Tempering ดังภาพที่ 2.27 ของเหล็กเกรดนี้จะต้องใช้อุณหภูมิช่วง $450 - 500^\circ C$ ถึงจะทำให้ค่าความแข็งไม่ลดลง เป็นต้น



ภาพที่ 2.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของเหล็ก SKD11 กับอุณหภูมิการอบคืนไฟ [18]

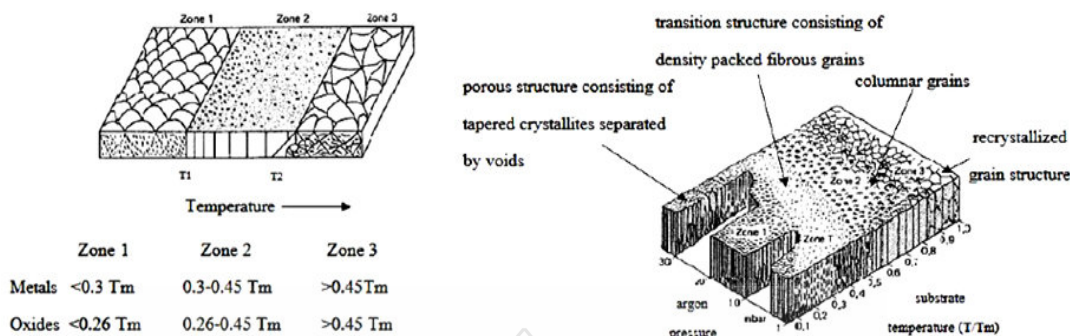
นอกจากนี้อุณหภูมิที่ใช้จะมีความสัมพันธ์กับพลังงานที่ Interface และ Volume Diffusion และพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นให้เกิดการแพร่ซึมและการยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมด้วยกันเองในเนื้อชิ้นเคลือบ มีอิทธิพลมาจากอุณหภูมิที่ใช้ในระหว่างกระบวนการ โดยเขียนให้อยู่ในรูปที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของจุดหลอมละลายได้เป็น T/T_m เรียกว่า Homologous Temperature ซึ่งจะสามารถอธิบาย Microstructure Formation ของชั้นเคลือบได้ โดยไม่ขึ้นกับชนิดของสารเคลือบ และจากการที่ MOVCHAN และ DEMCHISHIN ได้ ทำการศึกษาไว้ นั้น สามารถกำหนดเป็นช่วงได้ดังนี้

$$\text{โซนที่ 1: } T/T_m \leq 0.26 \dots 0.3$$

$$\text{โซนที่ 2: } 0.26 \dots 0.3 \leq T/T_m \leq 0.45$$

$$\text{โซนที่ 3: } T/T_m > 0.45$$

โดยในแต่ละโซนจะมีลักษณะดังภาพที่ 2.28 ก ที่เป็นโมเดลแบบง่าย ซึ่งเป็นโมเดลที่มีประโยชน์มาก และได้มีการศึกษาเพิ่มเติม โดย THORNTON ดังภาพที่ 2.28 ข ได้แสดงความสัมพันธ์ร่วมกับความดันแก๊สที่ใช้



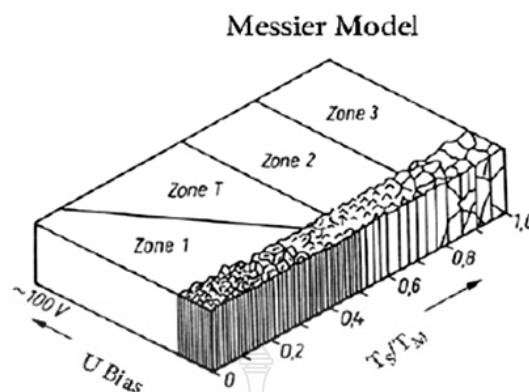
ก) Movchan and Demchishin Model

ข) Thornton Model

ภาพที่ 2.28 โมเดลของโครงสร้างจุลภาคในช่วงต่างๆ [20]

ในการศึกษาเพิ่มเติมจะทำการแบ่งโซนที่ 1 ออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนของโซนที่ 1 อธิบายโครงสร้างของช่วงอัตราส่วนอุณหภูมิ T/T_m ตั้งแต่ 0 - 0.1 และโซน T คือโซนที่มีค่ามากกว่า 0.1 ขึ้นไป ลักษณะโครงสร้างในช่วงอุณหภูมินี้จะมีความอัดแน่นกันของเกรนมากกว่าโซนที่ 1 มีสมบัติทางกลที่เหมาะสมและมีค่าความเค้นตกค้าง (Residual Stresses) ที่สูง โดยสรุป ทั้ง 2 โมเดล เป็นโมเดลที่ถูกใช้มากที่สุดในการใช้อธิบายลักษณะโครงสร้างของชั้นเคลือบ แต่อย่างไรก็ตามลักษณะของโครงสร้างจุลภาคนั้นไม่สามารถอธิบายได้ทั้งหมด เพราะยังมีตัวแปรหลักที่สำคัญอื่นๆ อีก เช่น Particle Fluxes, Direction of Particle และยักรวมถึงตัวแปรอื่นๆ อีกที่ไม่สามารถควบคุมได้

2.8.3 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Bias Voltage) ที่ให้กับตัวชิ้นงานซึ่งจะจ่ายขั้วลบให้ โดยปกติกระบวนการจะจ่ายให้มีค่าค่อนข้างสูง เช่น ในกระบวนการอาร์คจะอยู่ที่ -1000 V เพื่อให้เกิดการเร่งของไอออนที่ได้จากการอาร์คหรือหลุดออกมาจากการชน (Ion Bombardment) ที่มีขั้วบวกวิ่งเข้าหาชิ้นงาน ในขณะที่กระแสที่ใช้จะขึ้นอยู่กับการปริมาณไอออน หรือเกิดกระแสไหลเมื่อเกิดการครบวงจร โดยทั่วไปอยู่ที่ไม่เกิน 5 A เทคนิคการควบคุม Bias Voltage มีอยู่ 2 อย่าง คือแบบกระแสตรง (DC) และกระแสไฟฟ้าสลับ (AC) ในแต่ละชนิดของกระแสหรือแต่ละเทคนิคจะถูกเลือกใช้ตามลักษณะโครงสร้างของชั้นเคลือบ (Architecture of PVD Coating) ที่ต้องการ จากโมเดลของ Movchan และ Demchishin ถูกนำมาพัฒนาโดย Messier กล่าวถึงอิทธิพลของค่า Bias Voltage ร่วมกับอุณหภูมิของชิ้นงานที่มีผลต่อลักษณะฟิล์ม ดังภาพที่ 2.29



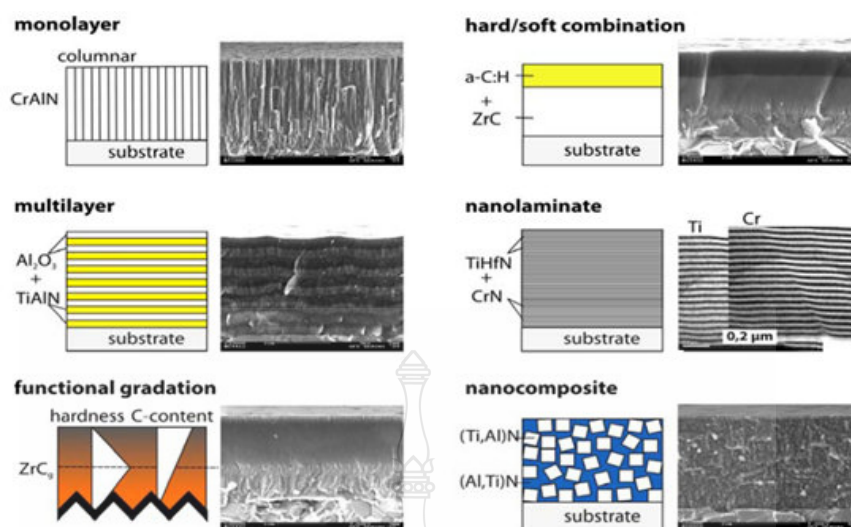
ภาพที่ 2.29 Messier's Structure Zone Model That Shown The Effect of The Bias Voltage And Substrate Temperature on Film Structure [20]

จากภาพได้อธิบายไปในทิศทางเดียวกันว่า อิทธิพลของ Bias Voltage ส่งผลต่อค่าส่วนผสมทางเคมี โครงสร้างและคุณสมบัติทางกล โดยเฉพาะอิทธิพลต่อส่วนผสมทางเคมี มีเหตุจากการเพิ่มค่า Bias Voltage ทำให้มีผลต่อก๊าซไนโตรเจนมากกว่าธาตุผสม ตัวอย่างเช่น CrN เมื่อทำการเพิ่มค่า Bias Voltage จะทำให้ค่า N/Cr มีค่าลดลง หรืออีกนัยหนึ่งคือ ปริมาณของ N และ Cr จะลดลงเมื่อค่า Bias Voltage เพิ่มขึ้น แต่ปริมาณของ Cr ที่ลดลงนั้นจะมีค่าน้อยกว่าการลดลงของ N ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Vetter ซึ่งการเพิ่มของ Bias Voltage ส่งผลทำให้ขนาดของเกรน (Grain size) มีค่าลดลงเนื่องจากพลังงานของไอออนที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มของพลังงานจะส่งผลให้เกิดสิ่งบกพร่อง (Defect) ที่ผิวของชั้นเคลือบเพิ่มมากขึ้นด้วย เพราะการเพิ่มขึ้นของจำนวนการเกิดนิวเคลียส (Nucleation Sites) และการลดลงของขนาดเกรน มีความเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของอะตอมที่มีค่าลดลง และอ้างถึงการเกิด Resputtering ของแก๊สไนโตรเจนด้วย การที่ขนาดเกรนมีขนาดเล็กจะส่งผลให้มีค่าสมบัติทางกลดีขึ้น โดยเฉพาะสมบัติทางด้านความแข็งระดับจุลภาค (Micro Hardness) ส่วนการต้านทานการขัดสี (Wear Resistance) จะเกี่ยวข้องปริมาณของอนุภาคขนาดใหญ่ (Droplet) ซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่อทำการเพิ่มค่า Bias Voltage

2.8.4 กระแสไฟอาร์ค (Arc Voltage) เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลหลักต่ออัตราการเกิดไอสารเคลือบ (Evaporation Rate) และอัตราการเคลือบผิว (Deposition Rate) อัตราการเคลือบผิวจะถูกทำให้เพิ่มขึ้นเมื่อกระแสไฟอาร์คเพิ่มขึ้น การผันแปรกระแสไฟอาร์คไม่ส่งผลต่อองค์ประกอบของชั้นเคลือบ แต่ประสิทธิภาพของการเกิดเป็นไอของสารเคลือบมีค่าลดลง หรือระหว่างกระบวนการเมื่อกระแสไฟอาร์คเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดปริมาณ Droplet เพิ่มมากขึ้น จึงเป็นสาเหตุสำคัญที่จะต้องปรับค่ากระแสไฟ

อาร์คให้เหมาะสมเมื่อเลือกใช้วัสดุสารเป้า (Target Material) ในแต่ละชนิด เพราะถ้าหากเลือกหรือปรับตั้งไม่ถูกต้อง ในระดับทั่วไปจะทำให้เกิดปริมาณ Droplet มาก แต่ในกรณีรุนแรงคือทำให้วัสดุสารเป้าเกิดการหลอมละลายหรือไหม้ได้ สารหล่อเย็นที่ใช้เพื่อควบคุมความร้อนที่อยู่โดยรอบเตาชุบเคลือบและบริเวณเป้าสารเคลือบ ถ้าไม่สามารถดึงความร้อนออกได้ทัน อาจจะทำให้เกิดการหลอมละลายของเป้าได้ ดังนั้นแหล่งจ่ายที่ใช้ต้องทำการปรับตั้งโดยการควบคุมค่ากระแสในระหว่างกระบวนการและชนิดของเป้าสารเคลือบที่เลือกใช้ โดยยินยอมให้มีค่าแกว่งอยู่ในช่วง 10 - 20 V เมื่อพิจารณาการเกิดปริมาณ Droplet ที่มากเกิดขึ้นและตกลงเกาะบนผิวชิ้นงาน จะส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานการขูดขีดหรือสึกหรอของชั้นฟิล์มลดลง

2.8.5 ความเร็วรอบการหมุนชิ้นงาน (Substrate Rotation Speed) ตัวแปรนี้มีความสำคัญในการกำหนดลักษณะของโครงสร้างชั้นเคลือบซึ่งมีอยู่หลายแบบขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การใช้งาน ดังภาพที่ 2.30 เนื่องจากเป็นตัวกำหนดร่วมกับค่ากระแสไฟและแรงดันกระแสในการอาร์คตัวโลหะเป้าและลักษณะของ Bias Voltage ที่ให้แก่ตัวชิ้นงานที่เหมาะสม เพื่อกำหนดว่าจะให้สารเคลือบเป็นแบบชั้นเดี่ยว (Monolayer) หรือเป็นแบบชนิดอื่นๆ จนถึงระดับ Nanolaminate ซึ่งความเร็วในการหมุนชิ้นงานไม่ว่าจะเป็นแบบกี่แกน ความเร็วที่ใช้จะกำหนดค่าความหนาของชั้นเคลือบที่สอดคล้องหรือสัมพันธ์กับอัตราการเคลือบผิว ซึ่งควบคุมด้วยกระแสไฟอาร์คที่ใช้ ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการชั้นเคลือบที่บางมากขึ้น ก็ต้องเพิ่มความเร็วรอบมากขึ้น และถ้าต้องการเพิ่มชั้นมากขึ้น ก็ต้องแบ่งรอบของการหมุนเป็นหลายๆ ช่วง โดยแต่ละช่วงของการหมุนจะถูกกำหนดด้วยมุมหรือองศาที่ตรงกับองศาของวัสดุสารเคลือบที่ได้ติดตั้งอยู่ ทั้งนี้ค่า Bias Voltage จะเป็นตัวกำหนด เช่น กำหนดค่า Bias Voltage ให้แก่ชิ้นงานเป็นจังหวะคล้ายกับสัญญาณพลัส ที่สามารถปรับตั้งค่าความถี่ห่างได้ ทำให้สามารถควบคุมจังหวะของการเกาะติดของไอสารเคลือบได้เช่นเดียวกัน



ภาพที่ 2.30 Schematic Representations and SEM Micrographs of Microstructures in Complex Coating [22]

ตัวอย่างเช่น ต้องการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiAlN การที่จะควบคุมให้เกิด Ti และ Al ตกลงบนผิวชิ้นงาน โดยให้เกิดเป็นลักษณะที่สลับกันไปเป็นชั้นๆ ระหว่างสารเคลือบทั้งสอง สามารถทำได้ด้วยการควบคุมการหมุนของชิ้นงาน ซึ่งกำหนดให้ผิวที่ต้องการเคลือบผิวหันหน้าไปทางเป้าของสารดังกล่าว ในเวลาที่กำหนดหรือในมุมที่กำหนด และถ้าต้องการควบคุมความหนาผิวเคลือบชิ้นงานให้มีชั้นเคลือบที่บางของสารเคลือบนั้น ก็ทำให้ชิ้นงานหมุนเร็วขึ้นหรือมีเวลาอยู่ในพื้นที่สั้นลง ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถควบคุมได้ และในกระบวนการทำงานจริงก่อนดำเนินการเคลือบผิว ต้องทำการวางแผนการเคลือบผิวก่อน โดยการเขียนบันทึกจากข้อมูลที่มี รวมทั้งเข้าใจถึงผลลัพธ์ที่ตามมาเมื่อควบคุมตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการ และใช้ร่วมกับการทำ Reproducible ที่ดี ซึ่งได้มาจากการทดลองทำมาก่อน

2.9 การทดสอบงานเคลือบผิวเพื่อหาคุณสมบัติทางกลและอื่นๆ

การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางกลของชั้นเคลือบ เป็นขั้นตอนสุดท้ายที่จะตรวจสอบว่าผลการเคลือบ ได้คุณสมบัติเป็นไปตามต้องการหรือไม่ การทดสอบมีหลายวิธีการ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสิ่งที่ต้องการทราบ โดยอ้างอิงถึงลักษณะการใช้งานของชิ้นงาน เช่น ใช้งานในสภาวะที่มีความร้อนและเสียดสีสูง เป็นต้น ซึ่งในการทดสอบก็ต้องมีลักษณะของทั้งสองปัจจัยอยู่ด้วย โดยลักษณะการทดสอบในแต่ละประเภทมีรายละเอียดดังนี้

2.9.1 ความหยาบของพื้นผิว (Surface Roughness)

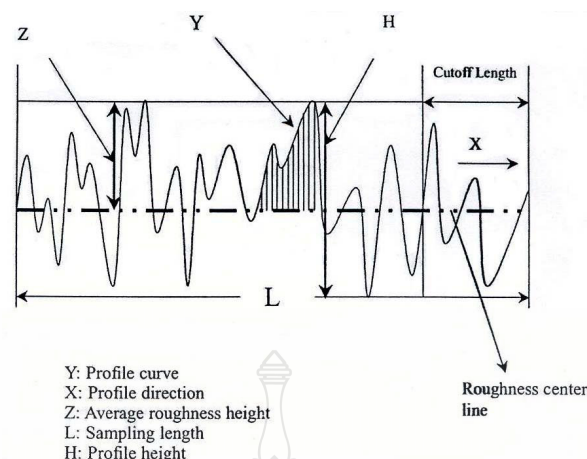
ความหยาบ (Roughness) คือ ระลอกคลื่นที่มีช่วงคลื่นสั้น แสดงได้โดยขนาด (Amplitude) ของคลื่นและค่าความยาวคลื่นเส้นขอบ (Profile) ซึ่งเป็นเส้นแสดงพื้นที่ผิวเมื่อถูกตัดตามแนวขวาง

การวัดความหยาบผิว (Surface Roughness) เป็นการวัดด้วยการใช้เครื่อง Profile Meter เพื่อช่วยในการบันทึกผิว ซึ่งให้ความละเอียดสูงมาก ในการวัดจะใช้ปลายของเข็มวัดลากไปบนชิ้นงานในแนวเส้นตรง จากนั้นเครื่องจะบันทึกผลออกมาเป็นกราฟแสดงความเรียบเป็นไมครอน โดยค่าของความหยาบของผิวชิ้นงานหรือวัสดุที่ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Profile Meter เครื่องจะทำการคำนวณค่าตัวแปรต่างๆ เช่นค่า Ra, Rq และ Rt ซึ่งเป็นค่าที่ห้วเข็มได้ลากผ่านผิวชิ้นงาน โดยแต่ละค่าที่เครื่องทำการคำนวณจะเป็นการวิเคราะห์ค่าความหยาบในแต่ละจุดที่มีความแตกต่างกัน และค่าที่นิยมนำมาทำการตรวจสอบความหยาบผิวที่เครื่องทำการวิเคราะห์คือ ค่า Ra เนื่องจากค่า Ra เป็นค่าเฉลี่ยของจุดที่เข็มลากผ่านระยะที่จุดของยอด Profile แต่จะได้จากเส้นกึ่งกลางเฉลี่ย ของยอด Profile ที่อยู่ระหว่างยอดสูงสุดและจุดกึ่งกลาง ในการทดสอบด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว ค่าต่างๆ ที่ได้จากการวัดหรือจากการทดสอบ ถ้าหากค่าที่ได้จากการวัดความหยาบผิวมีอัตราต่ำแสดงว่ามีความเรียบที่สูง

ค่าเฉลี่ยทางเลขคณิต (Arithmetic Average, Ra) ความสูงเฉลี่ย (Ra) มีค่าเท่ากับความสูงของสี่เหลี่ยมมุมฉากซึ่งจะต้องมีพื้นที่รวมของความหยาบผิวด้านบนและใต้เส้นศูนย์กลาง (Roughness Center Line) โดยวิธีการกลับเส้นความหยาบผิวทางด้านล่างให้อยู่ระดับเดียวกับเส้นความหยาบผิวด้านบนโดยจุดที่เป็นตัวแบ่งคือเส้นศูนย์กลาง และทำการหาค่าความสูงเฉลี่ยของเส้นความหยาบผิวที่อ้างอิงกับเส้นศูนย์กลาง โดยใช้สี่เหลี่ยมมุมฉากมาหาค่าเฉลี่ยและมีข้อกำหนดที่ว่าขนาดของพื้นที่ต้องเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟของเส้นความหยาบผิว ซึ่งสามารถอธิบายในรูปสมการ 2.1

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |Y(x)| dx \quad (2.1)$$

โดยที่ Y (x) คือ พื้นที่ใต้กราฟและ L คือ ระยะทางที่ทำการวัด ดังรูปที่ 2.15 รูป

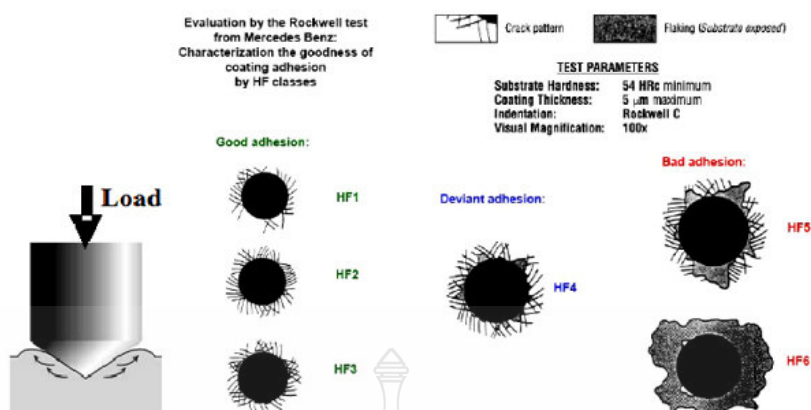


ภาพที่ 2.31 เส้นขอบของพื้นผิวและความหยาบ [38]

2.9.2 การทดสอบกำลังการยึดเกาะของผิวเคลือบ (Adhesion Test)

สำหรับงานทางด้านการชุบเคลือบผิววัสดุ การยึดเกาะของผิวเคลือบมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากจะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของชิ้นงานที่ได้รับการเคลือบผิว โดยเฉพาะคุณสมบัติที่ดีในการต้านทานต่อสภาพแวดล้อม เคมี การขูดขีด และแรงกระแทก ถ้าหากผิวเคลือบมีกำลังการยึดเกาะต่ำเมื่อมีปัจจัยต่างๆ ดังกล่าวข้างต้น จะเป็นตัวกระตุ้นให้ผิวเคลือบเสื่อมสภาพไปได้ เช่น เกิดการหลุดล่อน เกิดการรกราก หรือการแยกชั้นออกจากกัน ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะส่งผลถึงประสิทธิภาพของวัสดุที่ถูกเคลือบและทำให้อายุการใช้งานจะต่ำลง สำหรับการตรวจสอบกำลังการยึดเกาะสามารถทำได้หลายวิธี ตั้งแต่การตรวจสอบด้วยสายตา Tensile Method, Scratch Test, Indentation Testing เป็นต้น [29]

การทดสอบสมบัตินี้เป็นการทดสอบตามมาตรฐาน VDI 3198 (มาตรฐานวิศวกรรมเยอรมัน) โดยการใช้เครื่องทดสอบความแข็ง (Rockwell Hardness Test, HRC) ทำการกดทดสอบลงไปบนผิวหน้าที่ทำการเคลือบ ซึ่งใช้หัวกดเป็นเพชรทรงกรวยมีมุมยอด 120 องศา และใช้แรงในการกด 150 Kg. หลังจากกดแล้วทำการตรวจสอบรอยกดโดยตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 100X เพื่อดูลักษณะบริเวณขอบรอยกด และเปรียบเทียบกับตารางกำหนดค่าระดับการเกาะยึด 6 ระดับ ความเสียหายของผิวเคลือบ ดังภาพที่ 2.32



ภาพที่ 2.32 Rockwell Hardness Test, HRC [37]

2.9.3 การทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส (Micro Vickers Hardness Test)

การทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ส สามารถทดสอบกับโลหะได้ทุกชนิด โดยเฉพาะโลหะที่ชุบผิวแข็งเช่น ชุบไนไตรด์ สามารถวัดความลึกผิวแข็งที่เป็นชั้นบางๆ ได้อย่างละเอียด ใช้วัดความแข็งแรงเชื่อม ความแข็งเคลือบผิว ตลอดจนแร่ธาตุต่างๆ เหมาะสำหรับงานใช้ในห้องทดสอบ หลักการทำงานคล้ายคลึงกับการทดสอบแบบวิกเกอร์ส คือ เมื่อทดสอบแล้วรอยกดบนชิ้นงานต้องนำมาขยายด้วยกล้องขยาย และวัดค่าความยาวของเส้นทแยงมุมทั้งสองด้าน โดยเครื่องจะจำค่าที่ทดสอบไว้แล้วคำนวณค่าความแข็งออกมา ซึ่งเป็นการสะดวกและรวดเร็วมาก

ค่าความแข็งที่ได้ มาจากอัตราส่วนของน้ำหนักที่ใช้กดต่อพื้นที่สัมผัสของหัวกด (Indenter) ที่ใช้ทำจากเพชรรูปทรงพีระมิด โดยหัวกดมีฐานเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีมุมระหว่างหน้าต่อหน้าเท่ากับ 136 องศา ดังภาพที่ 2.33 ส่วนน้ำหนักหรือแรงกดที่ใช้ขึ้นอยู่กับผิวของชิ้นทดสอบหรือความหนาของผิวเคลือบ จะมีขนาดตั้งแต่ 1 กรัมแรง (gmf) ถึง 2 กิโลกรัมแรง (kgf) ใช้เวลาในการกดประมาณ 10 - 30 วินาที ในการทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์เป็นการทดสอบที่ให้ความละเอียดสูง เพราะเมื่อทำการทดสอบวัดความแข็งแล้วจะเกิดรอยกดบนชิ้นงานขนาดเล็กมาก ต้องนำมาตรวจสอบด้วยกล้องขยายแล้วจึงวัดค่าความยาวของเส้นทแยงมุมของรอยกดนั้น เมื่อทราบค่าแล้วนำมาคำนวณจึงจะทราบค่าความแข็งของชิ้นงาน

สูตร

$$\begin{aligned} \text{HVM} &= [(2P \sin\theta/2)/d^2] \times 1000 \\ &= 1854.4P/d^2 \end{aligned} \quad (2.2)$$

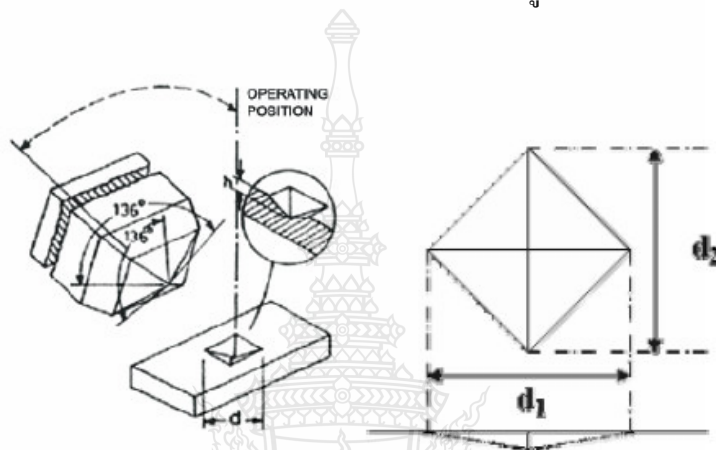
HMV = Micro Hardness Number

θ = มุมกคของหัวกดเท่ากับ 136 องศา

P = น้ำหนักกดบนชิ้นงาน (กรัม)

D = ค่าเฉลี่ยของรอยทแยงทั้ง 2 ของรอยกด ($\mu = 1/1000$ มม.)

จะเห็นได้ว่า เครื่องทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ส สามารถใช้งานได้อย่างสะดวกและมีความแม่นยำ แต่ยังไม่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เพราะมีราคาค่อนข้างสูง

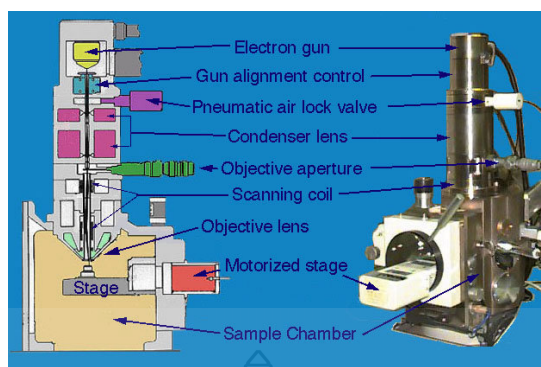


ภาพที่ 2.33 การทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ส [38]

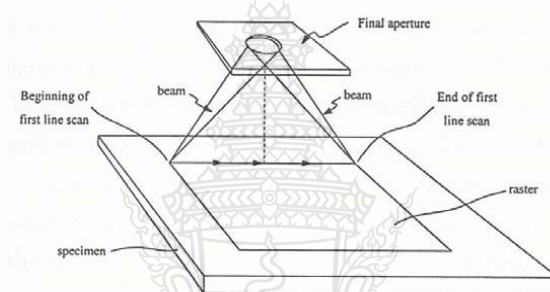
2.9.4 การทดสอบวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของชั้นเคลือบ (Coating Architecture)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Elcetron Microscops: SEM) เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัตถุที่เป็นของแข็ง เนื่องจากสามารถให้ภาพความละเอียดสูง มีกำลังขยายถึง 50,000 เท่า จึงให้ค่าการวัดที่ค่อนข้างละเอียดแน่นอนและมีค่าตัวเลขที่มีความคมชัด พร้อมทั้งจะทำการวิเคราะห์รายละเอียดภาพโดยการประมวลผลด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์บนเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งให้ความสะดวกและมีความเชื่อมั่นของผลการวิเคราะห์สูง [31]

ระบบภาพของ SEM เกิดจากกระบวนการควบคุมการสแกนลำอิเล็กตรอนที่มีขนาดเล็กมาก ให้เคลื่อนที่บนระนาบ X-Y ของพื้นที่ผิวชิ้นงานตัวอย่างจะทำให้เกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างอิเล็กตรอนจากลำอิเล็กตรอนกับอะตอมของธาตุในชิ้นงานตัวอย่าง ซึ่งสัญญาณอิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับ (Detect) และเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณภาพด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แล้วส่งผ่านสัญญาณให้กับระบบแสดงภาพบนจอแคโทดเรย์ (CRT) ดังรูป 2.34



(ก) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscopes: SEM)



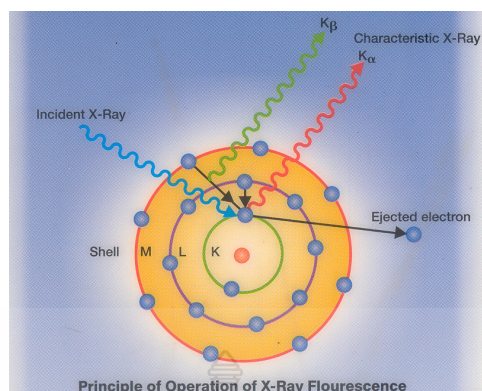
(ข) เส้นทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนผิวชิ้นงานในกล้อง SEM

ภาพที่ 2.34 การทดสอบวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของชั้นเคลือบ (Coating Architecture) [38]

2.9.5 การวัดความหนาผิวเคลือบด้วยเทคนิค Fluorescent X - Rays (XRF)

ความหนาของสารเคลือบ (Coating Thickness) เป็นสมบัติที่สำคัญและต้องมีการควบคุมให้ได้มาตรฐานตามชนิดของผลิตภัณฑ์ เพราะความหนาฟิล์มมีผลต่อคุณภาพด้านต่างๆของวัสดุที่เคลือบ เช่น สมบัติด้านการสะท้อนแสง สมบัติด้านความแข็งแรงทนทานต่อการเสียดสี การสึกกร่อน เป็นต้น ซึ่งถ้าความหนาน้อยไปอาจทำให้ไม่ได้ตามมาตรฐานและถ้าหนาเกินไป จะทำให้ต้นทุนการผลิตสูงโดยไม่จำเป็น

การวัดความหนาสารเคลือบด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ เป็นการวัดความหนาผิวเคลือบทางอ้อม ซึ่งต่างไปจากการใช้เครื่องมือชนิดอื่น กล่าวคือความเข้มรังสีเอกซ์เรือง (Fluorescent X-rays) ที่วัดได้ ที่อาศัยหลักการวัดความเข้มของรังสีเอกซ์เรืองที่แผ่จากวัสดุรองรับ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามระดับความหนาของสารเคลือบ โดยอาศัยการเทียบสารเคลือบมาตรฐาน (Standards) ดังภาพที่ 2.35



(ก) การวัดความหนาโดยอาศัยหลักการเรืองรังสีเอกซ์

X-Ray Energies of Emission Lines and Absorption Edges

Element	L Series			
	L _{II}	L _{III}	L _I	L _{II} abs
19 Potassium K	0.346	0.353	-	0.411
20 Calcium Ca	0.389	0.401	-	0.490
21 Scandium Sc	0.446	0.454	-	0.519
22 Titanium Ti	0.589	0.599	0.462	0.530
23 Vanadium V	0.482	0.458	-	0.530
24 Chromium Cr	0.610	0.519	0.604	-

Element	K Series		M Series	
	K _{α1}	K _{β2}	M _{α1}	M _{β2}
19 Potassium K	4.460	-	-	-
20 Calcium Ca	4.931	-	-	-
21 Scandium Sc	5.427	-	4.499	-
22 Titanium Ti	4.050	4.063	4.984	-
23 Vanadium V	4.510	4.594	5.463	-
24 Chromium Cr	4.952	4.944	-	-

1. Set energy (keV) in appropriate box
2. Read corresponding element and its atomic number in window at left

(ข) ข้อมูลพลังงานสารเคลือบมาตรฐาน (Standards)

ภาพที่ 2.35 การวัดความหนาผิวเคลือบด้วยเทคนิค Fluorescent X - Rays (XRF) [40]

การวิเคราะห์ของเครื่อง XRF จะอาศัยหลักการเรืองรังสีเอกซ์ของตัวอย่าง โดยการยิงรังสีเอกซ์เข้าไปในตัวอย่าง ธาตุต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่างจะดูดกลืนรังสีเอกซ์ แล้วคายพลังงานออกมา โดยพลังงานที่คาย หรือ Fluorescence ออกมา จะมีค่าพลังงานขึ้นกับชนิดของธาตุที่อยู่ในตัวอย่งนั้นๆ และใช้ Detector วัดค่าพลังงานที่ออกมาจากตัวอย่าง

สำหรับการวัดความหนาของสารเคลือบด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (Fluorescence X - Ray) เป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางในวงการอุตสาหกรรมและห้องปฏิบัติการวิจัย เพราะเป็นการวัดแบบไม่ทำลาย (Nondestructive) มีความสะดวก รวดเร็วและให้ความถูกต้องสูง ที่สำคัญคือสามารถระบุชนิดของสารเคลือบ (ธาตุ) ได้ด้วย

2.10 ต้นทุน (Cost) [39]

ต้นทุน หมายถึง มูลค่าของทรัพยากรที่สามารถวัดเป็นจำนวนเงินได้ ซึ่งกิจการสูญเสีย หรือ เสียสละไป เพื่อแลกกับการได้รับสิ่งใดสิ่งหนึ่งกลับมา ในที่นี้อาจหมายถึงสินค้าหรือบริการต่างๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อกิจการ

ต้นทุนการผลิต (Cost of Production) หมายถึงค่าใช้จ่ายหรือรายจ่ายในปัจจัยการผลิตที่ใช้ในกระบวนการผลิต เนื่องจากปัจจัยการผลิตแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ปัจจัยคงที่กับปัจจัยผันแปร

ดังนั้นต้นทุนการผลิตซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายหรือรายจ่ายในปัจจัยการผลิตจึงแบ่งตามประเภทของปัจจัยการผลิตออกเป็น 2 ประเภทเช่นเดียวกัน คือ

2.10.1 ต้นทุนคงที่ (Fixed Cost) หมายถึงค่าใช้จ่ายหรือรายจ่ายในการผลิตที่เกิดจากการใช้ปัจจัยคงที่ ต้นทุนคงที่เป็นค่าใช้จ่ายหรือรายจ่ายที่ไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณของผลผลิต กล่าวคือไม่ว่าจะผลิตปริมาณมาก ปริมาณน้อยหรือไม่ผลิตเลย ก็จะเสียค่าใช้จ่ายในจำนวนที่คงที่ ตัวอย่างของต้นทุนคงที่ได้แก่ ค่าใช้จ่ายในการลงทุนซื้อที่ดิน ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างอาคารสำนักงาน โรงงาน ฯลฯ ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายที่ตายตัวไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณการผลิต

2.10.2 ต้นทุนผันแปร (Variable Cost) หมายถึงค่าใช้จ่ายหรือรายจ่ายในการผลิตที่เกิดจากการใช้ปัจจัยผันแปร ต้นทุนผันแปรเป็นค่าใช้จ่ายหรือรายจ่ายที่ขึ้นอยู่กับปริมาณของผลผลิต กล่าวคือถ้าผลิตปริมาณมากก็จะเสียต้นทุนมาก ถ้าผลิตปริมาณน้อยก็จะเสียต้นทุนน้อย และจะไม่ต้องจ่ายเลยถ้าไม่มีการผลิต ตัวอย่างของต้นทุนผันแปร ได้แก่ ค่าใช้จ่ายที่เป็นค่าแรงงาน ค่าวัตถุดิบ ค่าขนส่ง ค่าน้ำประปา ค่าไฟฟ้า ฯลฯ

นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งต้นทุนการผลิตออกเป็นต้นทุนทางบัญชีกับต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งทั้ง 2 ประเภทมีความแตกต่างดังนี้

1) ต้นทุนทางบัญชี (Business Cost) หมายถึงค่าใช้จ่ายต่างๆ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการผลิตซึ่งคิดเฉพาะรายจ่ายที่เห็นชัดเจน มีการจ่ายเกิดขึ้นจริงๆ (Explicit Cost)

2) ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ (Economic Cost) หมายถึงค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการผลิต ทั้งรายจ่ายที่เห็นชัดเจนว่ามีการจ่ายจริงและรายจ่ายที่มองไม่เห็นชัดเจนหรือไม่ต้องจ่ายจริง (Implicit Cost)

รายจ่ายที่เห็นชัดเจนว่ามีการจ่ายจริง ได้แก่ ค่าใช้จ่ายต่างๆ ที่จ่ายออกไปเป็นตัวเงิน เช่น เงินเดือน ค่าจ้าง ค่าเช่า ดอกเบี้ย ค่าวัตถุดิบ ค่าขนส่ง และอื่นๆ

รายจ่ายที่มองไม่เห็นชัดเจนว่ามีการจ่ายจริง เป็นค่าใช้จ่ายที่ไม่ได้จ่ายออกไปเป็นตัวเงิน แต่ผู้ผลิตหรือผู้ประกอบการจะต้องประเมินขึ้นมาและถือเป็นต้นทุนการผลิตส่วนหนึ่ง ได้แก่ ราคา หรือ

ผลตอบแทนของปัจจัยการผลิตในส่วนที่ผู้ผลิตเป็นเจ้าของ และได้นำปัจจัยนั้นมาใช้ร่วมในการผลิตด้วยการนำมาใช้ในการประกอบกิจการดังกล่าว ซึ่งถ้านำปัจจัยดังกล่าวไปทำให้เกิดประโยชน์ในด้านอื่นแทน มูลค่าของผลประโยชน์ด้านอื่นถือว่าเป็นต้นทุนค่าเสียโอกาส (Opportunity Cost) ขององค์กรใด ซึ่งต้นทุนดังกล่าวจะนำมารวมอยู่ในต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ นอกจากนี้ เช่น ค่าจ้างของนาย ก. ที่ควรจะได้รับหากนาย ก. ไปรับจ้างทำงานให้ผู้อื่น แต่กลับไม่ได้รับเพราะต้องมาดำเนินการเอง เงินค่าจ้างส่วนนี้ก็ต้องนำมารวมในต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ด้วย เช่นกัน

สำหรับการจัดทำต้นทุนการผลิตหรือบัญชีของโรงกษาปณ์ ได้กำหนดหลักเกณฑ์การคำนวณ โดยจะใช้ต้นทุนของการจัดซื้อหรือผลิตเหรียญโลหะตัวเปล่าเพื่อนำมาปั๊มเหรียญ ซึ่งในการคำนวณมี 3 องค์ประกอบ ดังนี้

ก) ต้นทุนเหรียญโลหะตัวเปล่า คำนวณโดยใช้ข้อมูลจากสัญญาซื้อขายเหรียญโลหะตัวเปล่าที่ได้ทำสัญญาเรียบร้อยแล้วและส่งมอบในปีงบประมาณที่จัดทำประมาณการต้นทุนฯ

ข) ค่าใช้จ่ายในการผลิตและการดำเนินงาน คำนวณโดยใช้ค่าใช้จ่ายที่เป็นต้นทุนจริงจากงบการเงินของเงินทุนฯ ของปีงบประมาณก่อนปีงบประมาณที่จัดทำประมาณการต้นทุนฯ โดยใช้สูตร

$$\text{ค่าใช้จ่ายในการผลิตต่อกรัม} = \frac{\text{ค่าใช้จ่ายจริงในการผลิตประจำปี (บาท)}}{\text{น้ำหนักรวมเหรียญกษาปณ์ที่ผลิตได้ประจำปี (กรัม)}} \quad (2.1)$$

$$\text{ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่อกรัม} = \frac{\text{ค่าใช้จ่ายจริงในการดำเนินงานประจำปี (บาท)}}{\text{น้ำหนักรวมเหรียญกษาปณ์ที่ผลิตได้และจัดซื้อประจำปี (กรัม)}} \quad (2.2)$$

ค) วัสดุบรรจุ เช่น กุ้งฝ้ายดิบ กุ้งพลาสติก กุ้งไข่สังเคราะห์ เป็นต้น ซึ่งได้รวมต้นทุนส่วนนี้เป็นค่าวัสดุโรงงานที่ใช้ไปในค่าใช้จ่ายของการผลิตแล้ว

สำหรับค่าใช้จ่ายในการผลิตเมื่อจำแนกรายละเอียดประกอบด้วย เช่น ต้นทุนการจัดทำแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ ต้นทุนการปั๊มเหรียญ ต้นทุนการนับบรรจุ เป็นต้น ซึ่งต้นทุนดังกล่าวจะถูกนำมาคำนวณเป็นต้นทุนโดยรวมของการผลิตเหรียญกษาปณ์ต่อเหรียญต่อไป

2.11 การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศนิชัช ทับทิมทอง (2551) ทำการศึกษาการปรับปรุงกระบวนการผลิตแผงวงจรแบบอ่อนเพื่อลดปัญหาการโค้งงอ โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ 2^2 Factorial Design ในการลดปัญหาการโค้งงอของการผลิตแผงวงจรแบบอ่อน ผลจากการปรับปรุงสามารถลดค่าใช้จ่ายในการแก้ปัญหาได้ 2,691,889 บาทต่อปี [23]

ยรรยง เตชะวิจิตร (2550) ทำการศึกษาการลดของเสียจากกระบวนการล้างฟิล์มป้องกันการซุบของแผงวงจรแบบอ่อน ด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลองโดยใช้ 2^3 Factorial Design ในการปรับปรุงกระบวนการล้างฟิล์มในการผลิตแผงวงจรแบบอ่อน จึงสามารถช่วยลดของเสียจาก 1.63 เปอร์เซ็นต์ ลงเหลือ 1.33 เปอร์เซ็นต์ [24]

สมชาย วิกรานตานนท์ (2548) ได้นำหลักการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้เพื่อกำหนดปัจจัยที่เหมาะสมในการเพิ่มอายุแม่พิมพ์ทึบขึ้นรูปร้อนของมาตรวัดน้ำร้อน LCX15 ที่ทึบขึ้นรูปร้อนได้ชิ้นงานเฉลี่ย 5,798 ชิ้น แล้วเกิดการแตกกลางที่ผิว จำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ต่ำกว่ามาตรฐาน 8,000 ชิ้น โดยนำ 2^k Factorial Design มาทำการวิเคราะห์ผลกระทบ เมื่อกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิเผาเทียนทองเหลืองอยู่ที่ 668°C และความหนาช่องกริบเท่ากับ 0.7 มม. ทำให้จำนวนทึบขึ้นรูปร้อนได้ชิ้นงานประมาณ 8,435 ชิ้น ซึ่งอายุแม่พิมพ์เพิ่มขึ้นร้อยละ 40 [25]

วรวิทย์ สงวนพันธ์ (2554) ได้ศึกษาการยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์เหรียญชนิดราคา 1 บาท โดยประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลอง เพื่อเปรียบเทียบวัสดุระหว่างเหล็ก X กับเหล็ก Y ใช้วิธีการเคลือบผิวแบบ PVD ชนิดสารเคลือบ CrN ผลจากการทดสอบแม่พิมพ์ไปใช้ในการปั๊มเหรียญชนิดราคา 1 บาท (โลหะใส่เหล็กชุบนิเกิล) ปรากฏว่าเหล็ก Y ที่ความหนาผิวเคลือบประมาณ 2.7 ไมครอน ได้จำนวนเหรียญ 400,000 - 450,000 เหรียญต่อคู่ ซึ่งมากที่สุดจากชิ้นงานทดสอบทั้งหมด [26]

ปกรณ์ ชุมรัมย์ (2552) ศึกษาเทคโนโลยีด้านการเคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งมาประยุกต์ใช้เพื่อยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ ผลการทดลองพบว่าพันธที่ไม่ได้เคลือบผิวเกิดการสึกหรอสูงที่สุด ส่วนพันธที่เคลือบผิวด้วย TiCN - CVD และ TiCN - PVD เกิดการสึกหรอรองลงมาตามลำดับ เมื่อพิจารณาแล้วสรุปได้ว่าการเคลือบผิวสามารถยืดอายุการใช้งานของพันธจะรู้ได้ประมาณ 2 เท่า [27]

Yucong Wang (1997) ศึกษาเกี่ยวกับการนำเทคนิคเคลือบผิว PVD ไปใช้ในการยืดอายุแม่พิมพ์ เพื่อลดสึกหรอและกัดกร่อนของแม่พิมพ์ที่ทำจากเหล็กหลายเกรด จากการทดลองชุบ PVD สารเคลือบ TiN, TiAlN และ CrN พบว่ามีนัยสำคัญในการป้องกันการสึกหรอและกัดกร่อนจากการหลอมเหลวของ Aluminum แต่ผิวเคลือบ TiN ไม่สามารถป้องกันได้ยาวนานเพราะมีอุณหภูมิ

Oxidation ต่ำ ซึ่งอิทธิพลของเหล็กแต่ละเกรดกับความต้านทานการเสียหายจากร้อนเป็นปัจจัยต้องพิจารณา จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการประยุกต์ใช้เหล็กทำแม่พิมพ์เกรดผสมพิเศษเข้ากับการชุบเคลือบผิว PVD จะช่วยในการยืดอายุแม่พิมพ์และลดต้นทุนการผลิตได้ [28]

L.W. Ma และคณะ (2009) ศึกษาการเปลี่ยนรูปลักษณะทางกลของผิวเคลือบ TiN ที่ระดับความหนาต่างกัน โดยมีระดับความหนาประมาณ 0.7, 2.0, 3.7 และ 4.0 ไมครอน จากการทดลองพบว่า การเพิ่มขึ้นของระดับความหนาผิวเคลือบ จะส่งผลต่อลักษณะรอยแตก (Crack) ของ Columnar และรอยเลื่อนของผิวเคลือบ การเคลือบผิว TiN ที่บางทำให้เกิดเป็นรอยแตกเฉียงตามยาวของขอบเกรน Columnar สำหรับการเคลือบผิว TiN ที่หนาขึ้นจะมีรอยแตกเป็นจำนวนมากตามยาวขอบเกรน ซึ่งเป็นรอยแตกที่ขาดเป็นส่วนๆ เป็นไปตามสัดส่วนของความหนาผิวเคลือบแต่แนวขอบเกรน Columnar ที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น จึงบ่งบอกได้ว่าโครงสร้างของ Columnar และหรือระดับความหนาของผิวเคลือบ TiN มีอิทธิพลสำคัญมากในการเปลี่ยนรูปลักษณะทางกลของผิวเคลือบ [29]

Hogmark, S. และคณะ (2000) ได้นำเสนอแนวทางในการออกแบบและประเมินผลการเคลือบผิวแม่พิมพ์สำหรับงานแม่พิมพ์และชิ้นส่วนเครื่องจักร โดยกล่าวถึงพื้นฐานการเคลือบผิวด้วยกรรมวิธีต่างๆ และสิ่งที่ต้องคำนึงถึงก่อนออกแบบการเคลือบผิวที่เหมาะสมกับงานเฉพาะด้าน ตลอดจนแสดงคุณสมบัติทางกลของสารเคลือบแต่ละชนิด แต่ละกรรมวิธี จัดเป็นบทความที่มีประโยชน์ในการพิจารณาเลือกชนิดและกรรมวิธีการเคลือบผิวที่เหมาะสมเพื่อจะใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ต่อไป [30]

Mitterer C. และคณะ (2003) ทำการวิจัยกรรมวิธีการเคลือบผิวที่เหมาะสมในอุตสาหกรรมการทำแม่พิมพ์ที่ใช้ในงานขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยทำการศึกษาสารเคลือบผิวที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบทั้ง 5 ชนิด คือ Nitriding, TiN, TiCN, TiBN และ TiAlN โดยกรรมวิธี PACVD ผลการทดสอบพบว่า TiN ที่เคลือบผิวด้วยกรรมวิธีนี้มีความเหมาะสมทั้งในแง่การลดแรงเสียดทานในการทำงาน และการต้านทานการสึกหรอ อีกทั้งยังสามารถเคลือบผิวแม่พิมพ์ที่มีรูปร่างที่ซับซ้อนได้ดี [31]

Pesch P. (2003) ทำการทดสอบความสามารถของฟิล์มแข็งที่เหมาะสมกับงานดึง งานรีดเหล็กแผ่น โดยใช้วิธีการทดสอบแบบดึงแผ่นเหล็ก (Steel - Strip - Drawing - Test) กับแผ่นเหล็กกล้าผ่านแม่พิมพ์เคลือบสารต่างชนิดและกรรมวิธีการเคลือบกัน คือ PVD - TiN, PVD - TiAlN, PVD - TiCN, TiN - Sputter และ TiN - arc ได้ผลสรุปว่า TiN - arc เหมาะสมกับงานรีดเหล็กแผ่นหรือแม่แต่งานที่มีการลื่นไถลของเหล็กแผ่น ถึงแม้ว่าจะมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่สูงกว่าตัวอื่นแต่ไม่เกิดการหลุดมาเกาะติดของ Zinc จากเหล็กแผ่น และกรรมวิธีนี้สารเคลือบผิวสามารถครอบคลุมปกป้องได้อย่างทั่วถึงและต่อเนื่องกว่ากรรมวิธีอื่นๆ [32]

มีงานวิจัยหลายฉบับสรุปผลให้เห็นว่าสารเคลือบผิวแม่พิมพ์ที่นำมาใช้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในเรื่องของการต้านทานการสึกหรอ ทำให้เพิ่มอายุการใช้งาน ให้คุณสมบัติที่ดีในเรื่องป้องกันการเกิดการยึดติดกับวัสดุผิวชิ้นงาน และชี้ให้เห็นถึงข้อจำกัดของสารเคลือบผิวบางชนิดที่ไม่เหมาะกับวัสดุบางประเภท จึงจัดเป็นข้อมูลที่สำคัญในการเลือกใช้สารเคลือบผิวในงานวิจัยฉบับนี้

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าแนวทางในการทำงานวิจัยที่ผ่านมา นั้น มีการนำหลักการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้ ทั้งในด้านการทดสอบความสามารถของสารเคลือบผิว เพื่อเป็นการเปรียบเทียบ และใช้ในการวิเคราะห์ปัจจัยที่เกิดในกระบวนการทำงานและเพื่อพิจารณาปัจจัยที่ดีที่สุดในการทดลอง และการออกแบบการทดลองหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปัญหา โดยมีผู้วิจัยหลายท่าน ได้นำหลักการออกแบบการทดลองทั้งแบบแฟคทอเรียลและเศษส่วนแฟคทอเรียล เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการแก้ไขปัญหาในอุตสาหกรรมการผลิต ลดของเสีย การปรับปรุงกระบวนการ และการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ซึ่งก็จัดเป็นรูปแบบของงานวิจัยที่ดี มีเหตุมีผลกัน อันจะเป็นแนวทางที่เลือกพิจารณาใช้ในงานวิจัยฉบับนี้เช่นกัน

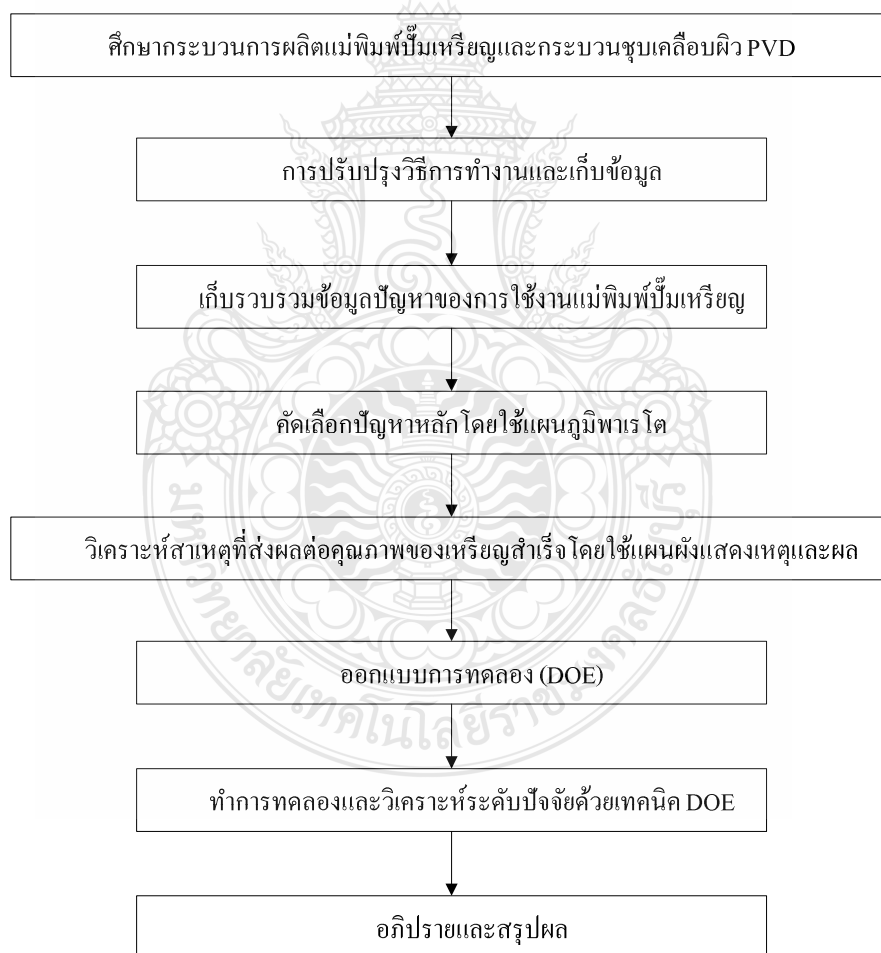


บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

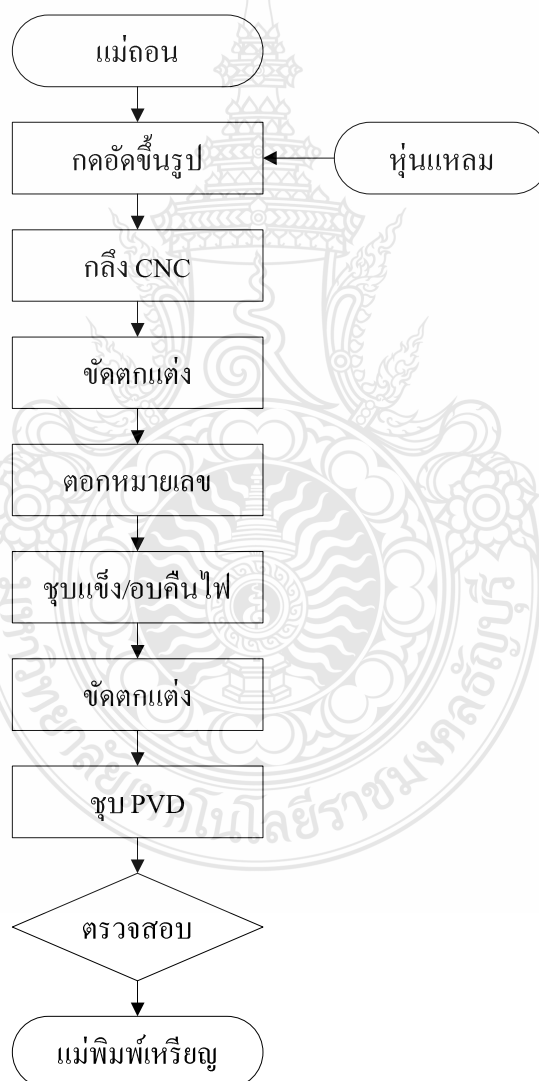
การดำเนินการวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่ก่อให้เกิดปัญหาในกระบวนการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ โดยผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลจาก กรณีศึกษาของ โรงกษาปณ์ที่เป็นหน่วยงานผลิตเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนของประเทศไทย โดยแผนกดวงตรา ที่มีหน้าที่รับผิดชอบในการจัดทำแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ เพื่อใช้ในปั๊มเหรียญกษาปณ์สำเร็จ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในกระบวนการผลิตเหรียญกษาปณ์ โดยมีแผนผังขั้นตอนการวิจัยดังในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยจะทำการศึกษำขั้นตอนการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ทั้งหมดและกรรมวิธีการชุบเคลือบผิว PVD โดยเริ่มจากการเก็บข้อมูลปัญหาในการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท ในปี พ.ศ. 2555 เมื่อทราบถึงปัญหาที่พบในการผลิตแล้ว จึงจำแนกปัญหาโดยใช้แผนภูมิพาเรโต จากนั้นทำการศึกษาสาเหตุและทำการวิเคราะห์ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับปัญหานี้ เพื่อกำหนดระดับของตัวแปรที่เหมาะสมโดยใช้การออกแบบการทดลอง (DOE) ที่จะช่วยในการอภิปรายสรุปผลก่อนและหลังการปรับปรุงสุดท้าย ก่อนจะนำไปกำหนดวิธีแก้ไขปัญหาให้เป็นมาตรฐานในการทำงานต่อไป

3.1.1 การศึกษาขั้นตอนการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์



ภาพที่ 3.2 แผนผังกระบวนการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์

กระบวนการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ใช้ขั้นตอนการผลิตตามภาพที่ 3.2 เหมือนกันทุกชนิดราคา แต่จะมีรายละเอียดปัจจัยการควบคุมทางเทคนิคที่แตกต่างกัน เช่น ความสูงของลวดลายเหรียญ (Relief) ความสูงของท้องกระทะ (Curvature) เป็นต้น ในส่วนของเหล็กที่ใช้ทำแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ ได้มีการแบ่งกลุ่มการใช้งานที่ชัดเจน เพื่อรองรับการใช้งานในการปั๊มเหรียญกษาปณ์สำเร็จแต่ละชนิดราคา โดยเฉพาะเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท ที่เป็นเหรียญโลหะใส่เหล็กชุบเคลือบนิเกิล (Nickel Plated Steel) จะต้องใช้เหล็กที่มีคุณสมบัติด้านความเหนียวสูง (High Toughness) ซึ่งปัจจุบันได้เลือกใช้เหล็กเกรด W360 ยี่ห้อ Bohler มาใช้ในการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญดังกล่าว และได้นำมาใช้ผลิตเป็นชิ้นงานทดลองในงานวิจัยนี้ โดยนำมาผลิตเป็นแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท และผลิตเป็นชิ้นงานทดสอบ ตามจำนวนที่ได้ออกแบบการทดลองไว้

สำหรับขั้นตอนการชุบแข็งและอบคืนไฟ (Hardening and Tempering) ใช้วิธีชุบแข็งและอบคืนไฟในเตาชุบแข็งแบบสุญญากาศ (Vacuum Furnace) ที่ควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยกำหนดอุณหภูมิชุบแข็งที่ 1,050 °C เวลาอบแช่ (Soaking) 30 นาที ชุบแข็งด้วยแก๊สไนโตรเจน (N₂) ที่แรงดัน 6 bar และอบคืนไฟ (Tempering) รอบแรกที่อุณหภูมิที่ 530 °C เวลา 2 ชั่วโมง รอบที่สอง 550 °C เวลา 2 ชั่วโมง (ตามมาตรฐานผู้ผลิตเหล็ก) ซึ่งหลังตรวจสอบวัดความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งมาโครฮาร์ดเนส ยี่ห้อ Wilson Wolpert รุ่น 600 MRD ดังภาพที่ 3.3 ได้ความแข็งชิ้นงานอยู่ที่ประมาณ 57-58 HRC



(ก) เครื่องวัดความแข็งมาโครฮาร์ดเนส



(ข) ชิ้นงานทดสอบหลังการชุบแข็ง

ภาพที่ 3.3 เครื่องวัดความแข็งมาโครฮาร์ดเนสและชิ้นงานทดสอบหลังการชุบแข็ง

3.1.2 กระบวนการชุบเคลือบผิว PVD

ในการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ หนึ่งในกระบวนการหลักที่สำคัญคือ กระบวนการชุบเคลือบผิว PVD (Physical Vapor Deposition) โดยใช้เครื่องชุบเคลือบผิว PVD ควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ซึ่งต้องใช้โปรแกรมการชุบเคลือบผิวที่ถูกออกแบบจากโรงงานผู้ผลิต มาควบคุมให้เครื่องทำงานตามคุณสมบัติของสารเคลือบแต่ละชนิดที่กำหนดไว้ เพื่อใช้สำหรับชุบเคลือบผิวบนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์แต่ละชนิดราคา หรือแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญที่ระลึก ที่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาให้เข้าใจขั้นตอนการชุบเคลือบผิว PVD โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ขั้นตอนการเขียนโปรแกรมการชุบเคลือบผิวและขั้นตอนการชุบเคลือบผิว

1) ขั้นตอนการเขียนโปรแกรม (Programming)

ในการปรับปรุงโปรแกรมควบคุมการทำงานจะต้องอาศัยข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตเครื่องชุบเคลือบผิว PVD เนื่องจากเป็นโปรแกรมที่มีลักษณะเฉพาะ ต้องใช้ความรู้และความเชี่ยวชาญของผู้มีประสบการณ์ และมีการกำหนดขั้นตอนในการทำงาน เพื่อให้โปรแกรมเป็นไปตามข้อกำหนดที่ตั้งค่าไว้ โดยมีกระบวนการย่อยคือ

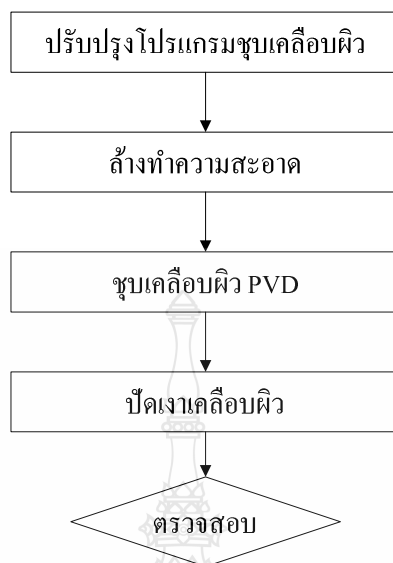
ก) พิจารณาข้อมูลในใบกำกับการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ ซึ่งจะประกอบไปด้วยข้อมูลรายละเอียดต่างๆ ของการผลิต เช่น ชนิดราคาเหรียญที่ผลิต ชนิดสารเคลือบที่กำหนด เป็นต้น

ข) จัดทำเอกสารข้อมูลโปรแกรม (Program Data Sheet) ซึ่งเป็นการเขียนเอกสารที่ระบุรายละเอียดในการดำเนินการ

ค) ทำการตรวจสอบความถูกต้องด้วยตนเอง (Self - Inspection) ขั้นตอนนี้ช่างเทคนิคที่เป็นคนควบคุมเครื่อง จะทำการตรวจสอบโปรแกรมบนเครื่องชุบเคลือบผิวกับเอกสารด้วยตนเอง

2) ขั้นตอนการชุบเคลือบผิว PVD (Coating Process)

ในขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการชุบเคลือบผิวโดยเครื่องชุบเคลือบผิว PVD ซึ่งมีขั้นตอนย่อยในการทำงานให้เป็นไปตามที่โปรแกรมการชุบเคลือบผิวที่กำหนด ดังแผนผังขั้นตอนในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.4 แผนผังขั้นตอนการชุบเคลือบ PVD

ก) การเตรียมแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ หลังผ่านการชุบแข็งและอบคืนไฟ (Hardening and Tempering) แล้วทำการขัดตกแต่ง (Polishing) พื้นผิวหน้าแม่พิมพ์ โดยใช้มอเตอร์หมุนล้อย่า สึกหลากหลายชนิดผงเพชร (Diamond Compound) ความละเอียด 6 ไมครอน ดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 การขัดละเอียดปรับผิวหน้าแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญก่อนชุบเคลือบผิว

ข) ทำการปรับปรุงโปรแกรมการซุบเคลือบผิวบนเครื่องซุบ PVD ดังภาพที่ 3.6 พร้อมตรวจสอบเอกสารใบกำกับการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ เพื่อใช้ในการเลือกชนิดสารเคลือบหรือรายละเอียดอื่น และทำการเลือก Load โปรแกรมตามที่ระบุไว้



ภาพที่ 3.6 การปรับปรุงโปรแกรมซุบเคลือบผิว

ค) นำแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญคุณภาพดีบรรจุลงตะกร้า ในภาพที่ 3.7 เพื่อล้างทำความสะอาดตามขั้นตอนที่กำหนด ในถังน้ำยาเคมีภายใต้ระบบอุลตราโซนิก 2 ขั้นตอน ใช้เวลาขั้นตอนละ 2 นาที ล้างด้วยน้ำสะอาดแบบ Reverse Osmosis (RO) 3 ขั้นตอน ใช้เวลาขั้นตอนละประมาณ 0.50 นาที เป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน 99.9 เปอร์เซ็นต์ และอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ใช้เวลาประมาณ 10 นาที



ภาพที่ 3.7 ขั้นตอนการล้างชิ้นงานก่อนซุบ

ง) ทำการเปลี่ยนแท่งคาร์โทด (Cathode) เป็นชนิดสารเคลือบที่ต้องการ เช่น ไทเทเนียม (Ti) ดังภาพที่ 3.8 (ก) ซึ่งจะติดตั้งอยู่ในห้องชุบเคลือบผิว จำนวน 2 แท่ง ตามตำแหน่งติดตั้ง ในภาพที่ 3.8 (ข) หรือทำการเปลี่ยนแท่งคาร์โทดชนิดสารเคลือบอื่น เช่น โครเมียม (Cr) เป็นต้น ตามที่กำหนดในใบกำกับการผลิตของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญแต่ละชนิดราคา



(ก) แท่งคาร์โทดไทเทเนียม (Ti)



(ข) ตำแหน่งการติดตั้ง

ภาพที่ 3.8 แท่งคาร์โทดไทเทเนียม (Ti) และตำแหน่งการติดตั้ง

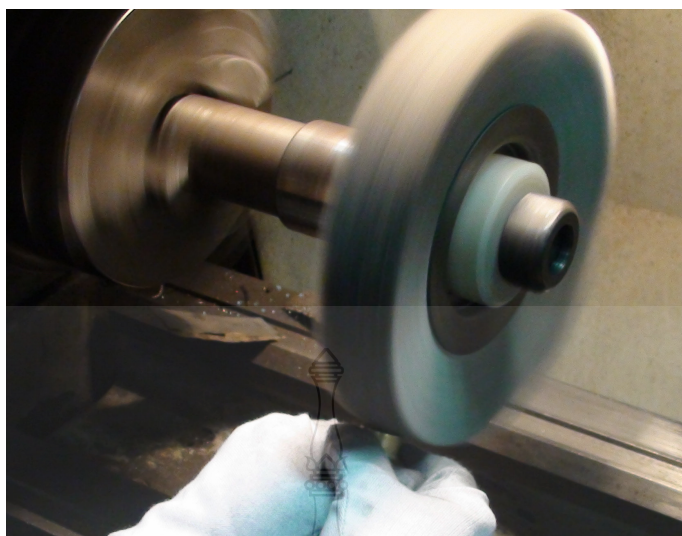
จ) นำแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ที่ผ่านการอบไล่ความชื้นแล้ว บรรจุบนอุปกรณ์วางชิ้นงานในห้องชุบเคลือบผิว PVD ซึ่งขั้นตอนนี้อาจจำเป็นต้องมีการควบคุมความสะอาดและความชื้นสัมพัทธ์โดยผู้ปฏิบัติงานจะต้องใช้ผ้าปิดจมูกและสวมถุงมือผ้าฝ้าย และชิ้นงานทุกชิ้นจะถูกเป่าทำความสะอาดด้วยแก๊สไนโตรเจน 99.9 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพที่ 3.9 และต้องทำการดูดฝุ่นภายในห้องชุบตามขั้นตอนที่กำหนด พร้อมทำความสะอาดขอบซีลประตูห้องชุบด้วยเมทิลแอลกอฮอล์ทุกครั้ง ก่อนปิดล็อกประตูห้องชุบดังกล่าว



ภาพที่ 3.9 การใช้แก๊สไนโตรเจนเป่าทำความสะอาด

ฉ) ทำการตั้งการให้โปรแกรมเครื่องชุบ PVD ทำงาน ที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ตามคู่มือการปฏิบัติงาน และในระหว่าง 15 - 30 นาทีแรก จะตรวจสอบการทำงานของระบบสุญญากาศ โดยดูจากกราฟแสดงการทำงาน หากไม่มีสิ่งผิดปกติก็ปล่อยให้เครื่องทำงานตามโปรแกรมการชุบเคลือบจนจบกระบวนการ ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 4 - 6 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของผิวเคลือบที่กำหนดในโปรแกรม

ช) แม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ที่ผ่านการชุบเคลือบผิวแล้ว นำไปปิดเงาผิวหน้าเพื่อขจัดคราบและละอองผิวเคลือบที่ติดอยู่ ด้วยล้อแปรงพลาสติกเคลือบด้วยสารขัด Aluminum Oxide ดังภาพที่ 3.10 ซึ่งหมุนด้วยความเร็วรอบประมาณ 150 - 200 รอบต่อนาที



ภาพที่ 3.10 การขัดผิวหน้าแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญด้วยล้อแปรงพลาสติก

ซ) ตรวจสอบควบคุมคุณภาพ ผิวหน้าแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญที่ชุบเคลือบผิวแล้ว ด้วยกล้องขยาย Microscope กำลังขยาย 7 - 47 เท่า ดังภาพที่ 3.11 เพื่อคุณภาพความเรียบร้อยของผิวเคลือบและความสวยงาม



ภาพที่ 3.11 การตรวจสอบคุณภาพผิวหน้าแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ

3.2 การเก็บข้อมูลของปัญหาที่เกิดจากการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ

จากการติดตามอายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท ในปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 และรวบรวมปัญหาที่เกิดขึ้น ดังตารางที่ 3.1 เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการวิเคราะห์ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลรายละเอียดปัญหาการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท ปี พ.ศ. 2555

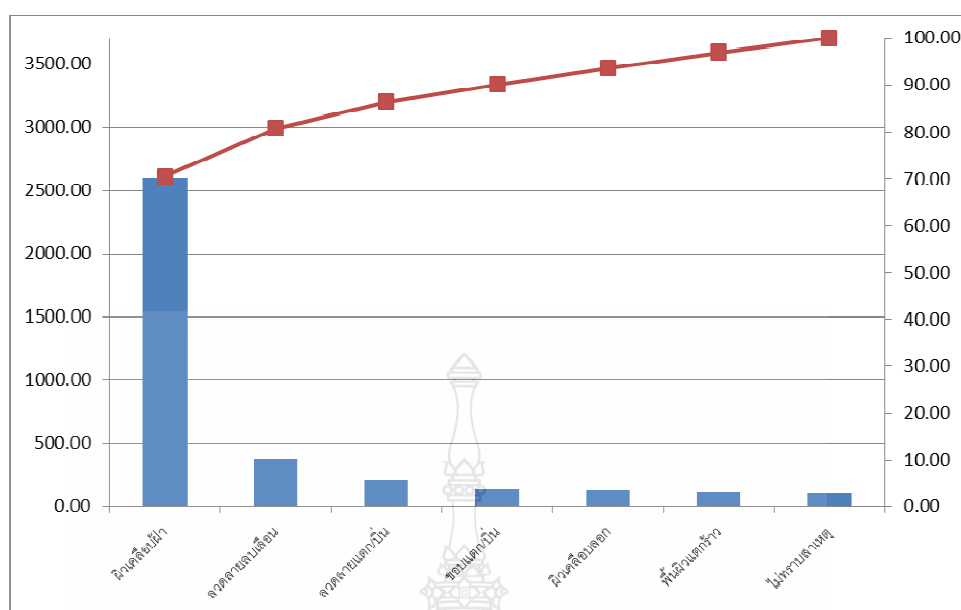
สาเหตุ	ประจำปีงบประมาณ 2555																								รวม	
	ต.ค. 54		พ.ย. 54		ธ.ค. 54		ม.ค. 55		ก.พ. 55		มี.ค. 55		เม.ย. 55		พ.ค. 55		มิ.ย. 55		ก.ค. 55		ส.ค. 55		ก.ย. 55			
	หน้า	หลัง	หน้า	หลัง	หน้า	หลัง	หน้า	หลัง	หน้า	หลัง	หน้า	หลัง	หน้า	หลัง	หน้า	หลัง	หน้า	หลัง	หน้า	หลัง	หน้า	หลัง	หน้า	หลัง	หน้า	หลัง
(1) มิวคลือบลอก	0	0	0	0	2	5	0	0	6	9	3	2	7	7	16	16	7	9	3	4	7	6	10	11	61	69
(2) มิวคลือบฝ้า	88	102	68	82	126	142	102	93	46	44	30	25	119	124	169	165	159	174	76	80	165	174	114	125	1262	1330
(3) มิวคลือบคราบ	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2
(4) สลวดลายสลับ	11	14	1	1	17	11	4	6	7	8	25	27	6	12	21	25	7	14	27	26	23	25	28	30	177	199
(5) สลวดลายแตกบิ่น	43	10	11	1	12	8	10	2	2	2	1	3	4	0	4	4	23	2	7	6	20	6	18	9	155	53
(6) พื้นผิวพรุน	1	1	4	4	4	4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	11	10
(7) พื้นผิวแกร้ว	10	2	11	1	14	5	10	2	6	3	3	0	8	0	1	0	11	1	4	5	10	1	10	2	98	22
(8) พื้นผิวรอยขีดข่วน	0	5	0	2	0	2	0	1	2	2	1	4	0	2	0	1	0	0	0	2	1	8	2	1	6	30
(9) ขอบแตกบิ่น	4	26	0	4	2	4	0	9	2	8	0	15	2	5	1	15	3	11	3	5	0	7	3	9	20	118
(10) รูปร่างขอบวม	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	3	2	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	8	4
(11) รูปร่างทรุด	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	2	3	3	2	0	0	1	1	3	4	1	0	4	5	16	16
(12) รูปร่างแตกหัก	0	0	0	0	0	0	1	0	4	0	8	0	7	3	3	0	2	0	8	0	11	0	12	1	56	4
(13) อื่นๆ กระแทกเงาะ	1	1	0	0	0	0	0	0	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0	2	2	2	5	4	7	11	18
(14) อื่นๆ เหยียบ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	7	8	2	1	0	0	0	0	15	15
(15) อื่นๆ สาเหตุการเปลี่ยนดวง	0	0	0	0	0	0	2	2	1	2	0	0	2	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	7	6
(16) ไม่ทราบสาเหตุ	7	6	2	1	3	3	4	3	3	4	11	12	2	4	5	3	0	0	8	6	5	5	7	9	57	56
รวม	166	167	97	96	180	184	133	119	83	86	88	95	164	162	225	234	222	221	144	141	245	237	214	210	1961	1952

3.3 วิเคราะห์ปัญหาโดยใช้เครื่องมือควบคุมคุณภาพ

งานวิจัยนี้ นำเครื่องมือควบคุมคุณภาพและเครื่องควบคุมคุณภาพมาใช้ 2 เครื่องมือคือ แผนภูมิพารेटโต และแผนผังแสดงเหตุและผล

3.3.1 คัดเลือกปัญหาโดยใช้แผนภูมิพารेटโต (Pareto Chart)

จากการจำแนกสาเหตุปัญหาของการใช้งานแม่พิมพ์เหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท ในตารางที่ 3.1 ทำการจัดเรียงลำดับความสำคัญ โดยใช้แผนภูมิพารेटโต เพื่อกำหนดปัญหาหลักของแม่พิมพ์ที่ส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานมากที่สุด ดังในภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 แผนภูมิพารโตของปัญหาที่เกิดจากใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท

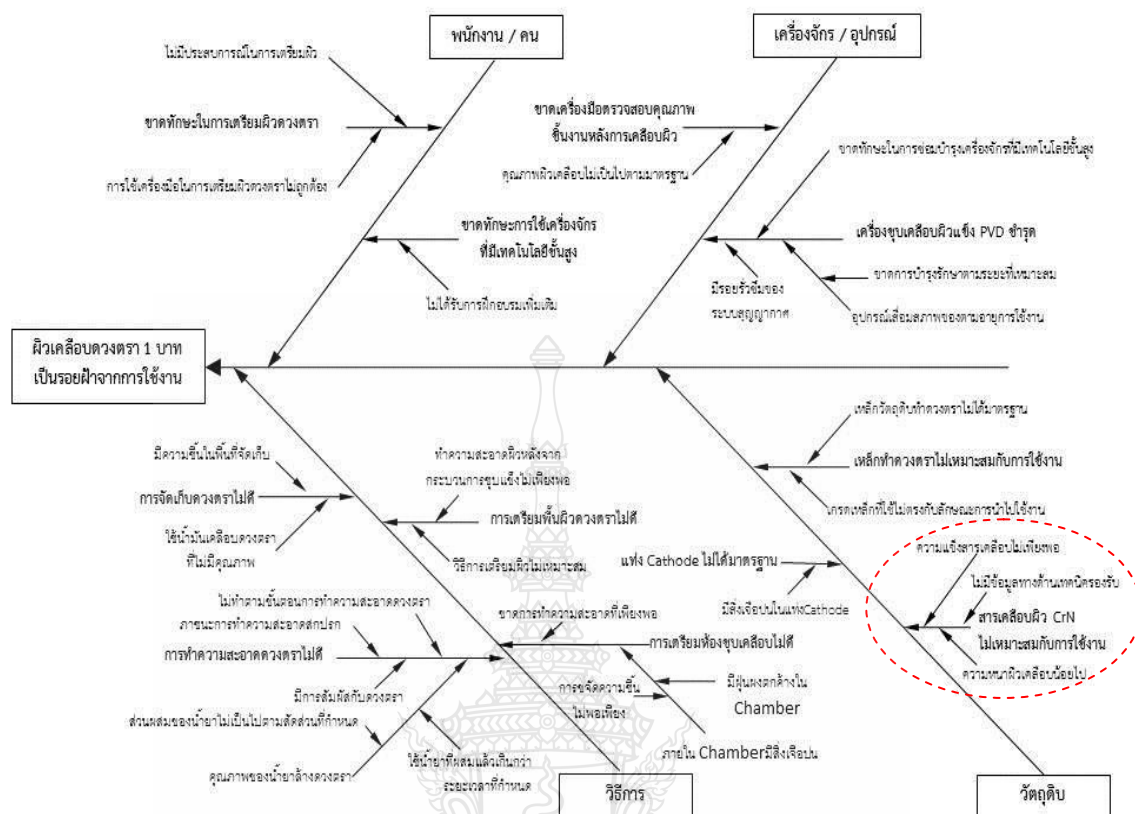
จากแผนภูมิพารโตข้างต้นจะพบว่าปัญหาผิวเคลือบฝ้า ซึ่งเป็นปัญหาด้านคุณภาพของผิวเคลือบ ที่พบปัญหามากที่สุด ในขณะที่ปัญหาตามลำดับถัดมาคือ ลวดลายลบเลือน ก็อยู่ในกลุ่มปัญหาที่มาจากคุณภาพผิวเคลือบ ผู้วิจัยจึงคัดเลือกมาทำการศึกษาตามวัตถุประสงค์การวิจัย

3.3.2 วิเคราะห์ปัจจัยโดยใช้แผนผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)

จากปัญหาด้านคุณภาพที่ได้จากการใช้แผนภูมิพารโตในข้อ 3.3.1 นำมาวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเกิดปัญหาของอายุการใช้งานการเคลือบผิว โดยผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลสาเหตุของปัญหาจากประสบการณ์ คู่มือทางเทคนิค และทีมงานการชุบเคลือบ PVD (วิศวกร 1 ท่าน ช่างเทคนิคอาวุโส 1 ท่าน และช่างเทคนิค 2 ท่าน) นำมาพิจารณาเขียนแผนผังแสดงเหตุและผล ดังในภาพที่ 3.13

1) ส่วนที่ระบุปัญหาที่ใช้ในการวิจัย โดยเลือกปัญหาจากแผนภูมิพารโต คือ ปัญหาผิวเคลือบแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญเป็นรอยฝ้าจากการใช้งาน

2) ส่วนที่บอกสาเหตุ คือ พนักงาน (Man) เครื่องจักร (Machine) วัตถุดิบ (Material) วิธีการทำงาน (Method) ซึ่งในแต่ละสาเหตุหลัก ก็จะถูกแยกออกเป็นสาเหตุย่อยๆ ที่ก่อให้เกิดสาเหตุหลัก



ภาพที่ 3.13 แผนผังแสดงเหตุและผลของปัญหาผิวเคลือบแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ 1 บาท เป็นรอยฝ้าจากการใช้งาน

3.4 การออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม

ในการวิจัยนี้จะทำการคัดกรองปัจจัยทุกตัวในการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Design: 2^k) โดยใช้โปรแกรม Minitab 15 ด้วยระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับร้อยละ 95

3.4.1 การกำหนดปัจจัยในการออกแบบทดลอง

จากแผนผังสาเหตุและผลของปัญหา ซึ่งเป็นข้อมูลในการผลิตของ โรงกษาปณ์ จึงสามารถกำหนดระดับของปัจจัย (Factor) เพื่อทำการออกแบบการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.2 โดยปัจจัยชนิดอื่นที่อยู่นอกเหนือการควบคุมนั้นจะกำหนดให้เป็นค่าคงที่ (Constant Value) และสามารถกำหนดระดับปัจจัยได้ดังนี้

- 1) ชนิดสารเคลือบ เดิมกระบวนการชุบเคลือบผิว PVD บนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ทุกชนิดราคา จะใช้สารเคลือบชนิดโครเมียมไนไตรด์ (CrN) โดยนำไปใช้งานในการปั๊มเหรียญกับวัสดุโลหะเหรียญตัวเปล่าที่เป็นโลหะผสม แต่เนื่องจากเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 1 บาท มีการเปลี่ยนวัสดุ

เหรียญโลหะตัวเปล่าจากโลหะคิวโปรนิกเกิล (ทองแดงร้อยละ 75 และนิกเกิลร้อยละ 25) มาใช้โลหะเคลือบชุบเคลือบนิกเกิล (Nickel Plated Steel) ที่มีค่าความแข็งผิวเคลือบสูงถึงเป็น 110 HV ทำให้อายุการใช้งานเฉลี่ยของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญชนิดราคา 1 บาท อยู่ที่ประมาณ 400,000 เหรียญต่อคู่ ซึ่งค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญชนิดราคาอื่น และจากการศึกษาคุณภาพของผู้วิจัยพบว่าโรงกลาปณ์ประเทศฟินแลนด์ ซึ่งเป็นโรงกลาปณ์ที่มีประสบการณ์ในการผลิตเหรียญที่เป็นวัสดุใส่เหล็กชุบเคลือบนิกเกิล (Nickel Plated Steel) ได้เลือกใช้สารเคลือบไทเทเนียมไนไตร (TiN) ในการชุบเคลือบผิว PVD บนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ เพื่อใช้ปั๊มเหรียญดังกล่าว [1] ประกอบกับผู้วิจัยได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [27 - 32] พบว่าสารไทเทเนียม (Ti) มีความเหมาะสมสำหรับการทดลองในงานวิจัย ดังนั้นผู้วิจัยจึงกำหนดระดับปัจจัยเป็น 2 ระดับ คือไทเทเนียมไนไตร (TiN) และไทเทเนียมคาร์ไบด์ไนไตร (TiCN)

2) ความหนาผิวเคลือบ เป็นพารามิเตอร์ในโปรแกรมควบคุมการทำงานที่กำหนดค่าเป็นสัดส่วนของการเพิ่มหรือการลด สามารถกำหนดในโปรแกรม ซึ่งค่าระดับความหนาที่ได้จะเป็นช่วงโดยประมาณ (Range) และจากงานวิจัยที่ศึกษาอายุการใช้งานของดวงตราเหรียญกลาปณ์ชนิดราคา 1 บาท ที่ใช้วิธีการเคลือบผิว PVD ด้วยชนิดสารเคลือบ CrN พบว่าที่ระดับความหนาผิวเคลือบประมาณ $2.7 \mu\text{m}$ จะได้จำนวนเหรียญสำเร็จต่อคู่มากที่สุด [26] และเพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์งานวิจัยนี้ในการลดต้นทุนการผลิต จึงกำหนดให้มี 2 ระดับคือ ความหนาน้อยกว่าหรือเท่ากับ $2 \mu\text{m}$ และ $3 \mu\text{m}$ ซึ่งเป็นระดับความหนาที่ทางโรงกลาปณ์ได้ทดสอบแล้ว ไม่ส่งผลกระทบต่อความคมชัดของลวดลายบนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญและคุณภาพของเหรียญกลาปณ์สำเร็จ

3) อุณหภูมิชุบเคลือบ จากประสบการณ์ของผู้วิจัยและการศึกษาจากคู่มือ [17] สรุปได้ว่าการกำหนดอุณหภูมิของกระบวนการชุบเคลือบ PVD มีช่วงอุณหภูมิระหว่าง $200 - 800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติที่ต้องการ และคุณสมบัติของชิ้นงาน (Substrate) ดังนั้นเพื่อให้สอดคล้องตามวัตถุประสงค์ของผู้วิจัย และพิจารณาในด้านการลดต้นทุนการผลิต ที่อาจมีการเลือกใช้เกรดเหล็กวัสดุดิบที่มีราคาต่ำลงในอนาคต แต่อาจมีผลกระทบหรือข้อจำกัดด้านกระบวนการปรับปรุงด้วยความร้อน (Heat Treatment) จึงได้กำหนดระดับอุณหภูมิการชุบเคลือบไว้ 2 ระดับ คือน้อยกว่าหรือเท่ากับ $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Low Temperature) และน้อยกว่าหรือเท่ากับ $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (High Temperature)

ตารางที่ 3.2 การกำหนดปัจจัยและระดับการทดลอง

ปัจจัย (Factor)	รายละเอียด	ระดับ (Level)
ชนิดสารเคลือบ (A)	TiN	Low (-)
	TiCN	High (+)
ความหนาผิวเคลือบ (B)	$\leq 2\mu\text{m}$	Low (-)
	$\leq 3\mu\text{m}$	High (+)
อุณหภูมิการชุบเคลือบ (C)	$\leq 250^{\circ}\text{C}$	Low (-)
	$\leq 500^{\circ}\text{C}$	High (+)

3.4.2 ค่าตอบสนอง (Response) ในการออกแบบทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ข้อมูล จากผลการทดลองใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญตามที่ได้ ออกแบบการทดลองไว้ ซึ่งกำหนดเป็นจำนวนนับ (Attribute Data) ของจำนวนเหรียญกษาปณ์ชนิด ราคา 1 บาท สำเร็จ ที่ยอมรับได้ต่อแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ 1 คู่ (อายุการใช้งาน) โดยเป็นข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantitative) และเชิงคุณภาพ (Qualitative) ซึ่งการระบุได้ว่าเหรียญกษาปณ์สำเร็งนั้นยอมรับ (Accept) หรือไม่ยอมรับ (Reject) จะใช้มาตรฐานการตรวจสอบจากฝ่ายตรวจสอบคุณภาพของ โรงกษาปณ์ ดังนั้นค่าตอบสนองที่ใช้จึงมีหน่วยเป็นจำนวนเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 1 บาท สำเร็จที่ ผ่านการปั๊มดีตราและผ่านเกณฑ์คุณภาพ (Yield) ต่อแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ 1 คู่ (ด้านหัว - ด้านก้อย) ซึ่งมี ค่ายิ่งมากยิ่งดี

3.4.3 การกำหนดจำนวนการทดลอง (Replicate)

ก่อนจะทำการออกแบบการทดลอง ต้องทำการกำหนดจำนวนการทดลอง (Replicate) ที่ เหมาะสมเพื่อกำหนดจำนวนชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในวิจัยนี้ ซึ่งจากข้อมูลการติดตามอายุการใช้งาน แม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ 1 บาท ในปี พ.ศ. 2555 ตามตารางที่ 3.1 ผู้วิจัยพบว่า มี 2 สาเหตุหลักๆ ที่ส่งผลทำ ให้แม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ หดอายุการใช้งาน (ที่อายุการใช้งานเฉลี่ยประมาณ 400,000 เหรียญต่อคู่) จึง เลือกเป็นตัวแทนในการทดลอง อีกทั้งพบว่าโรงกษาปณ์มีการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิด ราคา 1 บาท ต่อปีมีปริมาณมากที่สุด จึงกำหนดทำการทดลองซ้ำเพื่อให้เกิดความเชื่อมั่น ดังนั้นใน งานวิจัยนี้จะกำหนดการออกแบบการทดลองซ้ำ (Replicate) จำนวน 3 ครั้ง

3.4.4 การตั้งสมมติฐานการวิจัย (Test of Hypothesis)

1) สมมติฐานการวิจัย: ปัจจัย A มีผลต่ออายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ 1 บาท (β)

สมมติฐานทางสถิติ: $H_{0A}:\beta_i = 0$ ทุกค่า i

$H_{1A}:\beta_i \neq 0$ บางค่า i

2) สมมติฐานการวิจัย: ปัจจัย B มีผลต่ออายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ 1 บาท (γ)

สมมติฐานทางสถิติ: $H_{0B}:\gamma_j = 0$ ทุกค่า j

$H_{1B}:\gamma_j \neq 0$ บางค่า j

3) สมมติฐานการวิจัย: ปัจจัย C มีผลต่ออายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ 1 บาท (δ)

สมมติฐานทางสถิติ: $H_{0C}:d_k = 0$ ทุกค่า k

$H_{1C}:d_k \neq 0$ บางค่า k

4) สมมติฐานการวิจัย: ปัจจัยร่วม AB มีผลต่ออายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ 1 บาท

($\beta\gamma$)

สมมติฐานทางสถิติ: $H_{0AB}:\beta\gamma_{ij} = 0$ ทุกค่า i, j

$H_{1AB}:\beta\gamma_{ij} \neq 0$ บางค่า i, j

5) สมมติฐานการวิจัย: ปัจจัยร่วม AC มีผลต่ออายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ 1 บาท

($\beta\delta$)

สมมติฐานทางสถิติ: $H_{0AC}:\beta\delta_{ik} = 0$ ทุกค่า i, k

$H_{1AC}:\beta\delta_{ik} \neq 0$ บางค่า i, k

6) สมมติฐานการวิจัย: ปัจจัยร่วม BC มีผลต่ออายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ 1 บาท

($\gamma\delta$)

สมมติฐานทางสถิติ: $H_{0BC}:\gamma\delta_{jk} = 0$ ทุกค่า j, k

$H_{1BC}:\gamma\delta_{jk} \neq 0$ บางค่า j, k

เมื่อ

β คือ อิทธิพลที่เกิดจากชนิดสารเคลือบ

γ คือ อิทธิพลที่เกิดจากความหนาผิวเคลือบ

δ คือ อิทธิพลที่เกิดจากอุณหภูมิการชุบเคลือบ

3.4.5 วิธีการออกแบบการทดลอง

จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การออกแบบการทดลองแบบ Factorial Design เป็นการออกแบบการทดลองที่ให้ความน่าเชื่อถือมากที่สุด ผู้วิจัยจึงเลือกการออกแบบการทดลองชนิดนี้ ในการทดลองเพื่อคัดกรองปัจจัย (Screening Factors) ที่สำคัญ แล้วจึงนำปัจจัยที่ได้ไปใช้ในการศึกษาวิเคราะห์ขั้นละเอียดต่อไป ผู้วิจัยได้เลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบ Factorial Design มีปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัย และแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ ซึ่งจะได้รูปแบบการทดลองเป็นแบบ 2^3 Factorial Design ได้จำนวนครั้งในการทดลอง (Runs) เท่ากับ 8 การทดลอง และเมื่อมีการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง (Replicates) จาก 3 ปัจจัยการทดลอง โดยกำหนด Number of Blocks = 1 เลือกการออกแบบ Randomize Runs เพื่อเพิ่มความเชื่อมั่น จะมีจำนวนครั้งที่ต้องทำการทดลองทั้งหมด 24 การทดลอง

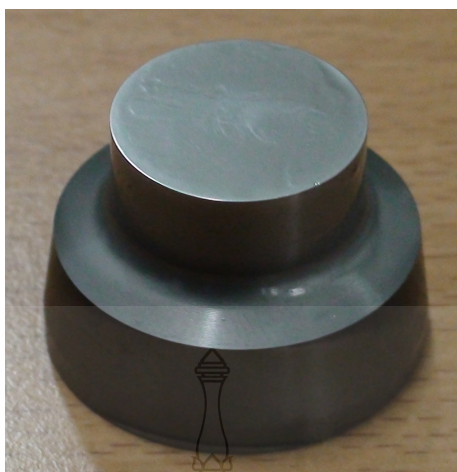
3.4.6 รูปแบบการออกแบบการทดลอง

การจัดลำดับการทดลอง เนื่องจากในการทำงานของเครื่องชุบเคลือบผิว PVD ในแต่ละรอบ (Cycle) ต้องใช้เวลานาน เพื่อให้เป็นการประหยัดเวลาในการทดลอง จึงกำหนดให้ทำการทดลองที่ระดับเดียวกันให้เสร็จก่อน คือ การกำหนดชุบเคลือบผิว PVD บนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 1 บาท ให้ครบรอบแต่ละการทดลองในระดับเดียวกันให้เสร็จก่อนจึงเปลี่ยนไปอีกระดับหนึ่ง

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดการทดลองชุบเคลือบ PVD บนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญชนิดราคา 1 บาท

ความหนาผิวเคลือบ	ชนิดสารเคลือบ			
	TiN		TiCN	
	อุณหภูมิ $\leq 250^{\circ}\text{C}$	อุณหภูมิ $\leq 500^{\circ}\text{C}$	อุณหภูมิ $\leq 250^{\circ}\text{C}$	อุณหภูมิ $\leq 500^{\circ}\text{C}$
$\leq 2\mu\text{m}$	แม่พิมพ์ 3 คู่	แม่พิมพ์ 3 คู่	แม่พิมพ์ 3 คู่	แม่พิมพ์ 3 คู่
$\leq 3\mu\text{m}$	แม่พิมพ์ 3 คู่	แม่พิมพ์ 3 คู่	แม่พิมพ์ 3 คู่	แม่พิมพ์ 3 คู่

ทำการทดลองตามตารางที่ 3.3 โดยชุบเคลือบผิว PVD บนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญตัวอย่างตามระดับปัจจัยที่กำหนดไว้ และผู้วิจัยได้บรรจุชิ้นงานทดสอบที่ใช้วัสดุและมีขนาดเหมือนกับแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 1 บาท ไปพร้อมกับการทดลองชุบเคลือบผิว PVD แต่ละรอบด้วย ดังภาพที่ 3.14 ซึ่งจะใช้เป็นตัวแทน (Dummy) เพื่อใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติด้านต่างๆ ของผิวเคลือบ



ภาพที่ 3.14 ชิ้นงานทดสอบที่ใช้เป็นตัวแทน (Dummy) ก่อนชุบเคลือบผิว PVD

3.4.7 การดำเนินการทดลอง

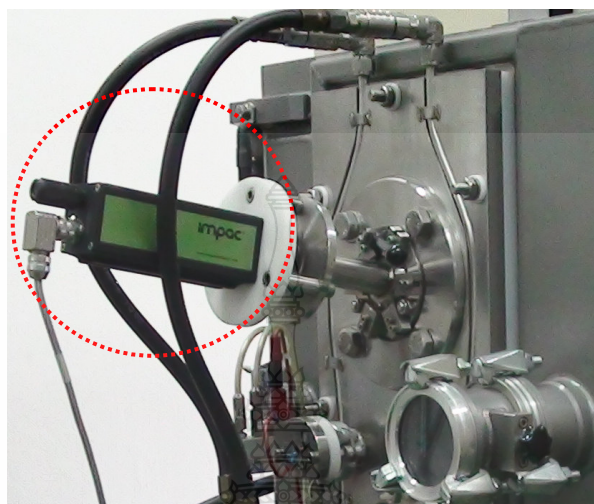
ทำการชุบเคลือบผิว PVD บนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท พร้อมชิ้นงานทดสอบ ตามรูปแบบการทดลองที่ได้ออกแบบไว้แล้ว ซึ่งจะ ได้ลักษณะสีของชิ้นงานดังภาพที่ 3.15



(ก) ชิ้นงานหลังการชุบด้วยสารเคลือบ TiN (ข) ชิ้นงานหลังชุบด้วยสารเคลือบ TiCN

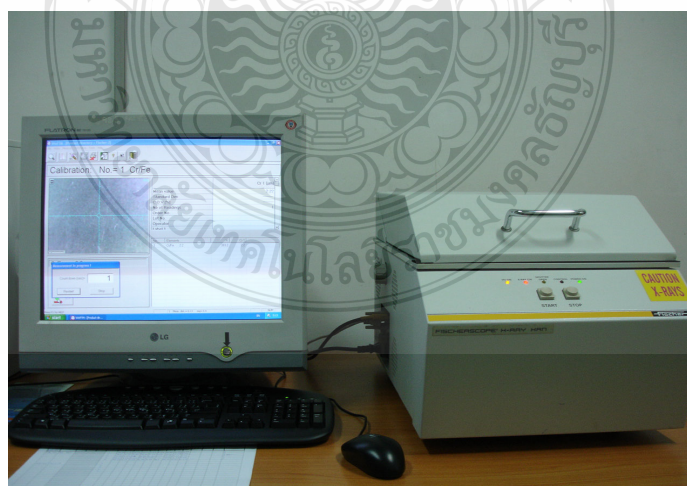
ภาพที่ 3.15 ชิ้นงานหลังการชุบด้วยสารเคลือบ TiN และชิ้นงานหลังชุบด้วยสารเคลือบ TiCN

พร้อมทำการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิการทำงานจริงของแต่ละรอบการทดลองโดยอุปกรณ์ Pyrometer ยี่ห้อ Impact Infrared รุ่น Infraterm IP 140 ที่ติดตั้งบนเครื่องชุบ PVD ดังภาพที่ 3.16



ภาพที่ 3.16 อุปกรณ์ Pyrometer ใช้วัดอุณหภูมิในระหว่างการทำงานของห้องชุบเคลือบผิว PVD

นำชิ้นงานทดสอบไปตรวจสอบวัดความหนาของผิวเคลือบด้วยเครื่องวัดความหนาผิวเคลือบแบบเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ยี่ห้อ Fischer รุ่น XAN ดังภาพที่ 3.17 และได้ผลการวัดความหนาผิวเคลือบ ตามตารางที่ 3.4



ภาพที่ 3.17 เครื่องวัดความหนาผิวเคลือบ แบบเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์

ตารางที่ 3.4 ผลการวัดอุณหภูมิการชุบเคลือบและความหนาผิวเคลือบหลังการชุบ PVD

ชนิดสารเคลือบ	อุณหภูมิ (°C) $H \leq 500L \leq 250$	ระดับความหนา $\leq 2\mu\text{m}$	ระดับความหนา $\leq 3\mu\text{m}$
	ค่าที่อ่านได้เฉลี่ย (°C)*	ค่าที่วัดได้เฉลี่ย (μm)	ค่าที่วัดได้เฉลี่ย (μm)
TiN	425.5 (H)	1.98	2.95
	220.5 (L)	1.94	2.99
TiCN	342.5 (H)	2.00	2.98
	238.5 (L)	1.99	3.01

* อ่านค่าจากอุปกรณ์ Pyrometer ที่ติดตั้งบนเครื่องชุบ PVD

ดำเนินการนำส่งแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญทดลอง ไปทำการปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท สำเร็จ โดยใช้เครื่องปั๊มเหรียญชนิดความเร็วสูง ยี่ห้อ Grabener ที่อัตราความเร็วเฉลี่ย 800 เหรียญต่อนาที ความคุมแรงกดที่ประมาณ 350 - 380 kN ดังภาพที่ 3.18 พร้อมบันทึกอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญแต่ละคู่



ภาพที่ 3.18 เครื่องปั๊มเหรียญชนิดความเร็วสูงสุด 850 เหรียญต่อนาที แรงกดสูงสุด 1500 kN

3.4.8 การควบคุมคุณภาพ

ในการควบคุมคุณภาพ เป็นไปตามมาตรฐานการสุ่มตัวอย่างที่โรงพยาบาลกำหนด คือ เบื้องต้นเจ้าหน้าที่ผู้ควบคุมเครื่องปั๊มเหรียญจะเป็นผู้สุ่มตรวจ (Randomize Sampling) เหรียญสำเร็จ ทุกประมาณ 5 นาที หรือประมาณ 4,000 เหรียญ โดยการสุ่มตรวจนั้น จะสุ่มหยิบเหรียญที่ถูกกักอยู่บนรางก่อนปล่อยลงถึงเก็บ (Hoper) ในขณะเดียวกันทางฝ่ายตรวจสอบคุณภาพของโรงพยาบาลจะมีการ ซักสุ่มตัวอย่างเหรียญสำเร็จที่บรรจุอยู่ในถังเก็บ (Hoper) ด้วยการใช้ท่อ PVC ดังภาพที่ 3.19 โดยเจาะรู เป็นร่องสลับเป็นช่วงๆ วางไว้ในถังเก็บ (Hoper) เพื่อให้เหรียญสำเร็จที่ถูกปล่อยลงมาจากรางไหลเข้าไปในร่องดังกล่าว



ภาพที่ 3.19 อุปกรณ์สำหรับซักสุ่มตัวอย่างเหรียญสำเร็จ ในแต่ละถังเก็บ (Hoper)

โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ตัวอย่างเหรียญที่ครอบคลุมทั้งหมด ซึ่งปริมาณเหรียญต่อหนึ่ง ถังเก็บ (Hoper) ประมาณ 200,000 เหรียญ ในกระบอกสุ่มชักเมื่อดึงขึ้นมาจะสามารถเก็บตัวอย่างได้ ประมาณ 2,000 เหรียญ แล้วนำเหรียญตัวอย่างไปตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพและตรวจสอบคุณภาพตามมาตรฐานที่กำหนดต่อไป

3.4.9 บันทึกข้อมูลลง Minitab

นำผลจากการทดลองทั้งหมด 24 การทดลอง โดยจะบันทึกข้อมูลการทดลองลงใน Minitab15 ตามตารางที่ 3.5 แล้วทำการออกแบบการทดลองโดยใช้ Function: Stat>DOE>Factorial> Create Factorial Design จะได้แผนการทดลองแบบสุ่ม (Randomize) จึงต้องจัดลำดับการทดลอง (Standard Order) เพื่อสะดวกในการทดลอง

ตารางที่ 3.5 การออกแบบการทดลองโดยใช้ Minitab 15

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Block	A	B	C	อายุการใช้งาน
1	17	1	1	-1	-1	-1	
2	18	1	1	1	-1	-1	
3	8	1	1	-1	1	-1	
4	1	1	1	1	1	-1	
5	14	1	1	-1	-1	1	
6	10	1	1	1	-1	1	
7	2	1	1	-1	1	1	
8	7	1	1	1	1	1	
9	19	1	1	-1	-1	-1	
10	12	1	1	1	-1	-1	
11	3	1	1	-1	1	-1	
12	22	1	1	1	1	-1	
13	4	1	1	-1	-1	1	
14	11	1	1	1	-1	1	
15	9	1	1	-1	1	1	
16	20	1	1	1	1	1	
17	24	1	1	-1	-1	-1	
18	21	1	1	1	-1	-1	
19	15	1	1	-1	1	-1	
20	16	1	1	1	1	-1	
21	5	1	1	-1	-1	1	
22	13	1	1	1	-1	1	
23	6	1	1	-1	1	1	
24	23	1	1	1	1	1	

3.4.10 การทดสอบความพอเพียงของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

เลือกการวิเคราะห์จาก Minitab Function: Stat>DOE>Factorial>Analysis Factorial Design อ่านผลการทดสอบความพอเพียงจากกราฟ (4 in 1 in Minitab) แปลงส่วนที่เหลือสำหรับผล (Residual Plots for Result) ทั้ง 4 ชนิดเพื่อทดสอบแบบพารามेटริก ข้อมูลต้องมีลักษณะการแจกแจงแบบปกติ เพื่อความสมบูรณ์ของเงื่อนไขการทดสอบ เพื่อการทดสอบแบบ Parametric โดยข้อมูลต้องมีลักษณะการแจกแจงแบบปกติ ดัง 4 เงื่อนไข

1) ความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Plot) ของส่วนตกค้าง (Residual) ต้องเป็นกราฟเส้นตรง ข้อมูลอยู่ในแนวเส้น แสดงว่าค่า y มีการแจกแจงแบบปกติ

2) ฮิสโตแกรม (Histogram) คือกราฟแสดงการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นแบบปกติจะมีลักษณะทรงระฆังคว่ำ หรือเป็นส่วนตกค้างต้องการกระจายแบบปกติหรือแบบสุ่ม

3) ระดับเหมาะสมต่อต้านส่วนตกค้าง (Residual Plot Versus Fitted Value) กราฟที่ชี้บ่งถึงการกระจายของข้อมูลเป็นแบบสุ่ม (อยู่เหนือและใต้เส้นกึ่งกลางพอๆ กัน) เพื่อตรวจสอบความแปรปรวนของแต่ละกลุ่มต้องไม่แตกต่างกัน

4) ลำดับต่อต้านส่วนตกค้าง (Residual Plot Versus the Order (Time) ค่าความคาดเคลื่อนของข้อมูลเป็นกระจายแบบสุ่ม ไม่มีรูปแบบที่ชัดเจน ใช้เพื่อตรวจสอบความแปรปรวนของแต่ละกลุ่มมีค่าคงที่

3.4.11 วิเคราะห์ความแปรปรวน (Anova)

เมื่อทำการวิเคราะห์การทดลองแบบ Factorial Design โดยใช้ Minitab 15 นอกจากจะได้กราฟแสดงการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองแล้ว Minitab ยังแสดงส่วนสำคัญ คือตารางที่ใช้ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Anova) ของผลกระทบหลัก (Main Effect) และผลกระทบทางปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ของการออกแบบการทดลองที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติที่ 0.05

1) วิเคราะห์ปัจจัยที่มีนัยสำคัญ จากค่า P - Value ที่ได้จากราย Anova ของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมเพื่อพิสูจน์ความแตกต่างของแต่ละปัจจัยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 หรือไม่ได้ดังนี้

ก) ถ้าค่า P - Value ของปัจจัยหลักหรือปัจจัยร่วมใด มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยตัวนั้นมีอิทธิพลต่ออายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ 1 บาท

ข) ถ้าค่า P - Value ของปัจจัยหลักหรือปัจจัยร่วมใด มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยตัวนั้นไม่มีอิทธิพลต่ออายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ 1 บาท

2) วิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2_{adj}) สามารถวิเคราะห์ได้จากการ Runs ใน Minitab ที่แสดงให้เห็นถึงระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ที่มีระดับเป็นเปอร์เซ็นต์ความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน

3.4.12 ขั้นตอนสรุปผลการทดลอง

จากผลการวิเคราะห์ Anova ผู้วิจัยจะทราบว่าปัจจัยหลักทั้ง 3 และปัจจัยร่วมปัจจัยใดบ้างที่มีอิทธิพลต่ออายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ 1 บาท แล้วเลือกระดับปัจจัยที่ทำให้ค่าความพึงพอใจ (Desirability) เข้าใกล้ 1 มากที่สุด ซึ่งจะสามารถพยากรณ์ (Response Optimizer) ได้ค่า Y (Yield) ที่เหมาะสม จากกราฟทดสอบความเหมาะสมระดับปัจจัย

3.5 การอภิปรายและสรุปผล

3.5.1 เมื่อได้ผลลัพธ์ออกมาแล้ว ทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลที่ปัจจัยระดับที่ส่งผลให้ค่า Yield สูงสุด โดยทดลองซ้ำไม่น้อยกว่า 2 ครั้งๆ ละ 3 คู่

3.5.2 คำเนิการปรับปรุง โดยนำเสนอชี้แจงผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลองต่อผู้อำนวยการส่วนดวงตราและผู้เกี่ยวข้องถึงระดับปัจจัยที่ต้องควบคุมในการชุบเคลือบผิว PVD บนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท เพื่อขออนุมัติดำเนินการปรับปรุงแก้ไขปัญหาด้านอายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญดังกล่าว ตามผลการทดลองในการผลิตงานตัวอย่างจริง

3.5.3 กำหนดเป็นมาตรฐานการทำงานหลังจากทำการแก้ไขและปรับปรุงแล้ว จึงจะนำไปกำหนดเป็นระเบียบวิธีการปฏิบัติงาน (Work Instruction) เพื่อใช้เป็นแนวทางปฏิบัติในการกำหนดขั้นตอนการชุบเคลือบผิว PVD และกำหนดเอกสารควบคุมการผลิต

3.5.4 เสนอข้อเสนอแนะในการวิจัย เพื่อให้สามารถพัฒนางานวิจัยในระดับต่อไป

บทที่ 4

ผลการดำเนินวิจัย

4.1 ผลการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

จากปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ 1 บาท ในปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 ที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้น ได้สรุปมาจากแผนผังแสดงเหตุและผลจากภาพที่ 3.12 ในบทที่ 3 และข้อมูลจากการศึกษาฐานโรงงานต่างประเทศ ซึ่งจะใช้การวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อวิเคราะห์ว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลมากที่สุดต่ออายุการใช้งานของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ และควรกำหนดค่าของแต่ละปัจจัยอย่างไรจึงจะมีความเหมาะสมมากที่สุด และข้อสรุปจากการทำการทดลองแบบ 23 แฟกทอเรียล ซึ่งอาศัยโปรแกรม Minitab โดยนำมากำหนดระดับความมีนัยสำคัญของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง สรุปได้ตามตารางที่ 3.2 คือ

ปัจจัย A คือชนิดสารเคลือบที่ใช้ในกระบวนการชุบเคลือบ PVD บนตัวอย่างแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท มี 2 ชนิดสารเคลือบ คือ TiN และ TiCN ซึ่งเป็นแท่งคาร์โทดมาตรฐานจากผู้ผลิต สำหรับการชุบเคลือบ PVD

ปัจจัย B คือความหนาผิวเคลือบ ในการชุบเคลือบ PVD บนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท ได้กำหนดเป็น 2 ระดับของแต่ละสารเคลือบ คือ ความหนาน้อยกว่าหรือเท่ากับ $2\ \mu\text{m}$ และ $3\ \mu\text{m}$

ปัจจัย C คือการกำหนดอุณหภูมิการชุบเคลือบของกระบวนการชุบเคลือบ PVD เป็น 2 ระดับ คือระดับต่ำ (Low) น้อยกว่าหรือเท่ากับ $250\ ^\circ\text{C}$ และระดับสูง (High) น้อยกว่าหรือเท่ากับ $500\ ^\circ\text{C}$ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ไม่กระทบต่อคุณสมบัติของชิ้นงานตามคำแนะนำของผู้ผลิตเหล็ก

เมื่อได้ปัจจัยที่ต้องการแล้ว จึงทำการเขียนโปรแกรมการชุบเคลือบ PVD ตามแต่ละระดับปัจจัยที่ได้ออกแบบไว้ในตารางที่ 3.2 แล้วจัดเตรียมแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 1 บาท แท่งคาร์โทด และเครื่องชุบเคลือบ PVD เพื่อดำเนินการทดลองที่ละโปรแกรมการชุบเคลือบ หลังจากชุบเคลือบ PVD แล้ว ส่งไปทำการทดลองปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 1 บาทสำเร็จ ซึ่งผลการยอมรับ (Accept) หรือไม่ยอมรับ (Reject) จะใช้มาตรฐานการตรวจสอบจากฝ่ายตรวจสอบคุณภาพของโรงงาน ตามที่ได้กล่าวมาในบทที่ 3 สำหรับค่าตอบสนองที่ใช้มีหน่วยเป็นจำนวนนับของเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 1 บาท สำเร็จ ที่ผ่านเกณฑ์คุณภาพ

4.1.1 ผลการออกแบบการทดลอง (DOE)

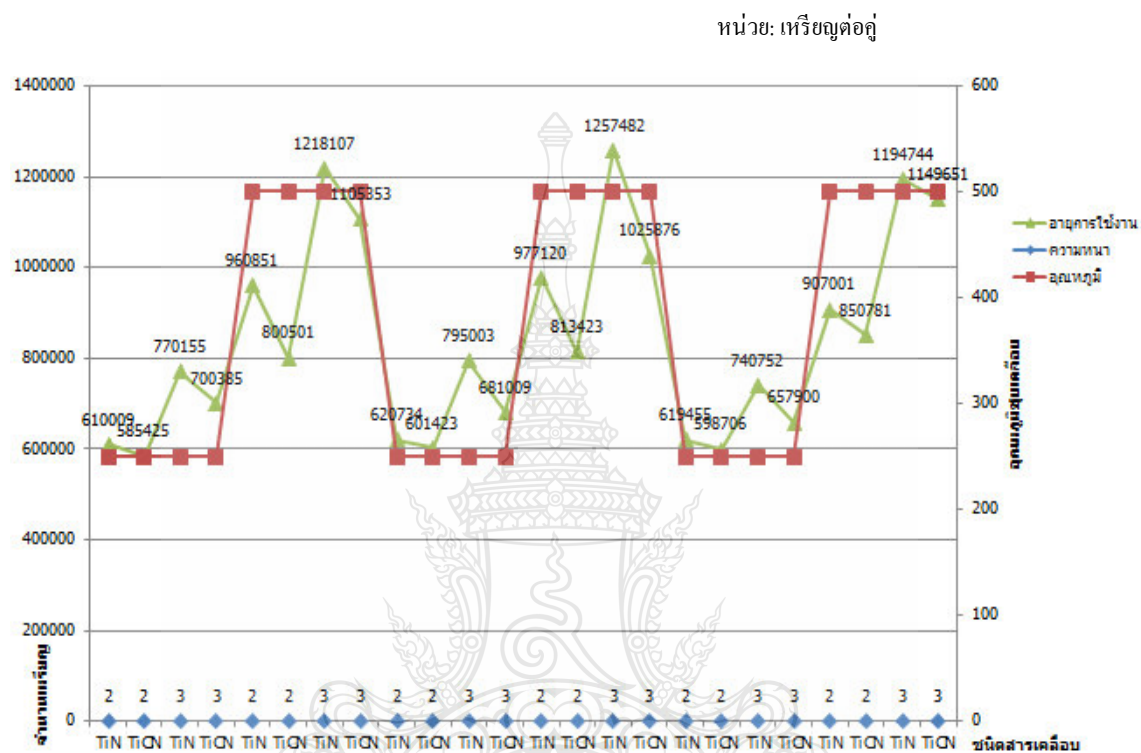
จาก 3 ปัจจัยข้างต้น ประกอบด้วย 2 ระดับ และทำการทดลองซ้ำ (Replicates) 3 ครั้ง จากการใช้การทดลองแบบ 2k เนื่องจากต้องการความมั่นใจในการกำหนดระดับปัจจัยให้ถูกต้อง ได้ผลการทดลองจำนวน 24 ครั้ง ทำการบันทึกข้อมูลในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการออกแบบการทดลองโดยใช้ Minitab 15

หน่วย: เหรียญต่อคู่

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Block	A	B	C	อายุการใช้งาน
1	17	1	1	-1	-1	-1	610009
2	18	1	1	1	-1	-1	585425
3	8	1	1	-1	1	-1	770155
4	1	1	1	1	1	-1	700385
5	14	1	1	-1	-1	1	960851
6	10	1	1	1	-1	1	800501
7	2	1	1	-1	1	1	1218107
8	7	1	1	1	1	1	1105353
9	19	1	1	-1	-1	-1	620734
10	12	1	1	1	-1	-1	601423
11	3	1	1	-1	1	-1	795003
12	22	1	1	1	1	-1	681009
13	4	1	1	-1	-1	1	977120
14	11	1	1	1	-1	1	813423
15	9	1	1	-1	1	1	1257482
16	20	1	1	1	1	1	1025876
17	24	1	1	-1	-1	-1	619455
18	21	1	1	1	-1	-1	598706
19	15	1	1	-1	1	-1	740752
20	16	1	1	1	1	-1	657900
21	5	1	1	-1	-1	1	907001
22	13	1	1	1	-1	1	850781
23	6	1	1	-1	1	1	1194744
24	23	1	1	1	1	1	1149651

จากข้อมูลผลการทดลองบีมเหริยูกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท ตามที่ออกแบบการทดลองจำนวน 24 คู่ สามารถนำผลการทดลองไปสร้างกราฟแสดง เพื่อเปรียบเทียบข้อมูลอายุการใช้งานของแม่พิมพ์บีมเหริยูกษาปณ์แต่ละคู่ในแต่ละรอบการทดลองได้ ดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 ผลจากการทดลองบีมเหริยูกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท สำเร็จ ตามการออกแบบการทดลอง

4.1.2 การทดสอบความพอเพียงของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking) เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้ทำการทดลอง ซึ่งมีสมมติฐานว่ารูปแบบของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ที่ได้จากข้อมูลที่ได้ทำการทดลอง ต้องเป็นไปตามหลักการ $\epsilon_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$ คือ ค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ และเป็นอิสระด้วยค่าเฉลี่ยใกล้เคียง 0 และ σ^2 มีค่าคงตัว (Stability) จึงจะทำให้ข้อมูลจากการทดลองมีความถูกต้องและเชื่อถือได้

เลือกการวิเคราะห์จาก Minitab Function: Stat > DOE > Factorial > Analysis Factorial Design อ่านผลการทดสอบความพอเพียงจากกราฟ (4 in 1 Graphs from Minitab) แปลงส่วนที่เหลือ

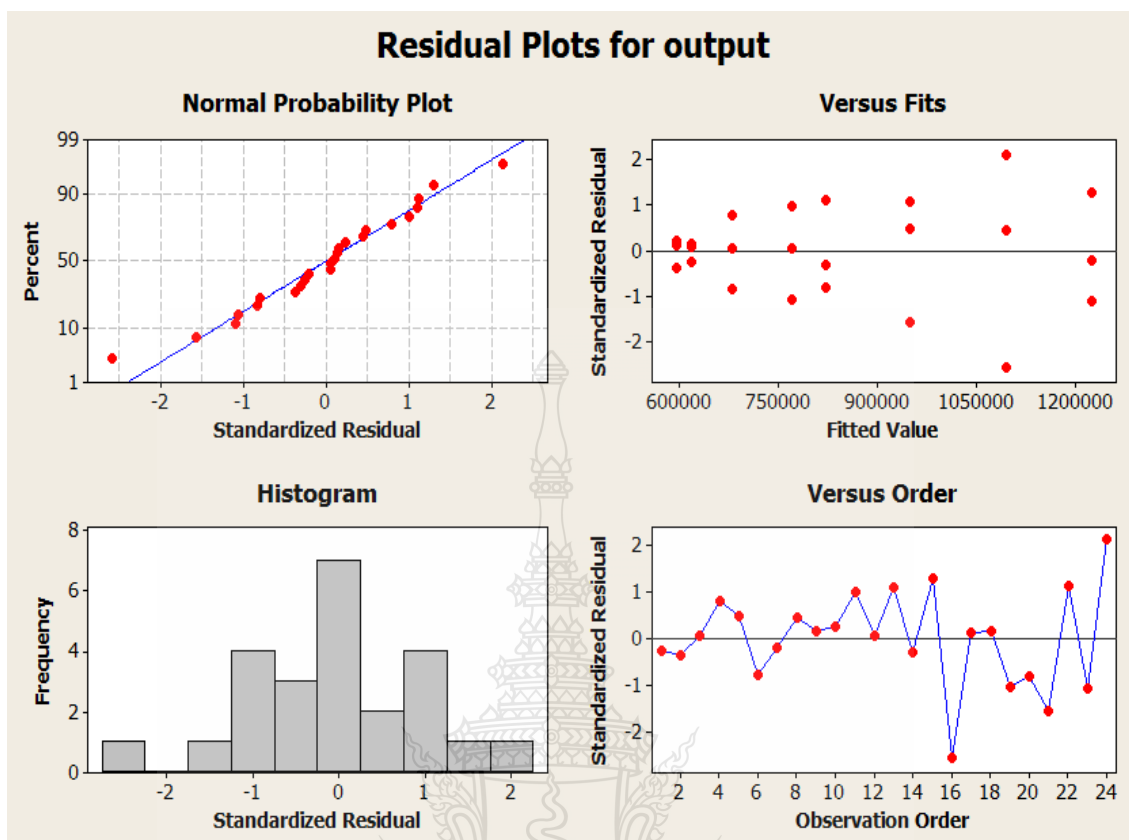
สำหรับผล (Residual Plots for Result) ทั้ง 4 ชนิดเพื่อการทดสอบแบบพารามेटริก โดยข้อมูลทั้ง 4 เงื่อนไข จะใช้ตรวจสอบ ϵ_{ij} และความเป็นไปได้ตามข้อสมมติฐานแสดงได้ดังต่อไปนี้

1) การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ของค่าส่วนตกค้างจากการพิจารณาจากการกระจายของค่าส่วนตกค้าง ซึ่งใช้การทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Plots) ในภาพที่ 4.2 พบว่าค่าส่วนตกค้าง มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ข้อมูลอยู่ในแนวเส้น ทำให้ประมาณได้ว่า ค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

2) ฮิสโตแกรม (Histogram) หมายถึงกราฟแสดงการแจกแจงของข้อมูลเป็นแบบปกติหรือไม่ จากภาพที่ 4.2 จะมีลักษณะเป็นทรงระฆังคว่ำ หรือค่าส่วนตกค้างกระจายตัวแบบปกติ ดังนั้นกราฟจากข้อ ก การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ และข้อ ข ฮิสโตแกรม สามารถสรุปได้เหมือนกันว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ

3) การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าส่วนตกค้าง โดยพิจารณาจากแผนภูมิการกระจายของค่าความคาดเคลื่อนของส่วนตกค้าง จากภาพที่ 4.2 เมื่อพิจารณาความเสถียรของ σ^2 (Variance Stability) โดยพิจารณาแผนภูมิการกระจายของค่าส่วนตกค้าง เทียบกับ Fitted Value พบว่าการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ แสดงให้เห็นว่าค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน (Independent) มีการกระจายแบบสุ่มทั้งทางด้านบวกและทางด้านลบสม่ำเสมอพอๆกัน แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน ดังนั้นระดับเหมาะสมต่อด้านส่วนตกค้าง (Residual Plot Versus Fitted Value) ที่ได้จากข้อมูลในการทดลอง มีความแปรปรวนของแต่ละกลุ่มต้องไม่แตกต่างกัน เป็นไปตามหลักการ $\epsilon_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$ ทุกประการอยู่ในระดับที่น่าพอใจ และไม่พบว่ารูปแบบการกระจายตัวของ Residuals เข้าข่ายลักษณะแบบกรวยปลายเปิด หรือรูปแบบลำโพง (Outward Opening Funnel or Megaphone) แต่อย่างใด

4) ลำดับต่อด้านส่วนตกค้าง (Residual Plot Versus the Order) ค่าความคาดเคลื่อนของข้อมูลเป็นกระจายแบบสุ่ม ไม่มีรูปแบบที่ชัดเจน คุณลักษณะการกระจายของจุดในด้านบวกและด้านลบที่มีความสมดุลกัน ใช้ร่วมกับกราฟในข้อ ค เพื่อตรวจสอบความแปรปรวนของแต่ละกลุ่มมีค่าคงที่ การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้าง จึงประมาณได้ว่ามีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับ 0 แทนข้อมูลบนแผนภูมิเป็นรูปแบบอิสระหรือไม่ จากภาพที่ 4.2 กราฟ Versus Order มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ แสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระ



ภาพที่ 4.2 การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (4 in 1 Graphs from Minitab)

4.1.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Anova)

เมื่อทำการวิเคราะห์การทดลองแบบ Factorial Design 2k โดยใช้ Minitab15 นอกจากจะได้กราฟแสดงการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองแล้ว Minitab ยังแสดงส่วนสำคัญคือ ตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Anova) ของผลกระทบหลัก (Main Effect) และผลกระทบร่วมทางปฏิกริยา (Interaction) ของการออกแบบการทดลองที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติที่ 0.05

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ Estimated Effects and Coefficients for Yield

Estimated Effects and Coefficients for Output (Coded Units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		843410	6561	128.55	0.000
สารเคลือบ (A)	-91748	-45874	6561	-6.99	0.000
ความหนา (B)	195916	97958	6561	14.93	0.000
อุณหภูมิ (C)	356661	178331	6561	27.18	0.000
สารเคลือบ*ความหนา (AB)	-17596	-8798	6561	-1.34	0.199
สารเคลือบ*อุณหภูมิ (AC)	-36538	-18269	6561	-2.78	0.013
ความหนา*อุณหภูมิ (BC)	77674	38837	6561	5.92	0.000
สารเคลือบ*ความหนา*อุณหภูมิ (ABC)	16066	8033	6561	1.22	0.239

S = 32141.8 PRESS = 37191330074

R-Sq = 98.51% R-Sq (pred) = 96.64% R-Sq(adj) = 97.86%

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Anova)

Analysis of Variance for Output (Coded Units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	1.04405E+12	1.04405E+12	3.48016E+11	336.87	0.000
2-Way Interactions	3	46067310651	46067310651	15355770217	14.86	0.000
3-Way Interactions	1	1548601742	1548601742	1548601742	1.50	0.239
Residual Error	16	16529480033	16529480033	1033092502		
Pure Error	16	16529480033	16529480033	1033092502		
Total	23	1.10819E+12				

การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีนัยสำคัญ จากตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 ค่า P - Value ที่ได้จากตาราง Anova ของผลกระทบหลัก (Main Effect) และปัจจัยร่วม (Interaction) จะนำมาใช้เพื่อพิสูจน์ความแตกต่างของแต่ละปัจจัยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 หรือไม่ ได้ดังนี้

1) ถ้าค่า P - Value ของปัจจัยหลักหรือปัจจัยร่วมใด มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยตัวนั้นมีอิทธิพลต่ออายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 1 บาท

2) ถ้าค่า P - Value ของปัจจัยหลักหรือปัจจัยร่วมใด มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยตัวนั้น ไม่มีอิทธิพลต่ออายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 1 บาท

สามารถอ่านผลการทดลองจากตารางที่ 4.2 ตามสมมติฐานการวิจัยที่ตั้งไว้ได้ดังนี้

ก) ปัจจัย A มีค่า P - Value = 0.000 มีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานว่าง H_0A และยอมรับสมมติฐาน H_1A นั่นคือ ชนิดสารเคลือบมีผลต่ออายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 1 บาท อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ข) ปัจจัย B มีค่า P - Value = 0.000 มีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานว่าง H_0B และยอมรับสมมติฐาน H_1B นั่นคือ ความหนาผิวเคลือบมีผลต่ออายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 1 บาท อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ค) ปัจจัย C มีค่า P - Value = 0.000 มีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานว่าง H_0C และยอมรับสมมติฐาน H_1C นั่นคือ อุณหภูมิการชุบเคลือบมีผลต่ออายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 1 บาท อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ง) ปัจจัยร่วม AB มีค่า P - Value = 0.199 มีค่ามากกว่า 0.05 จึงยอมรับสมมติฐานว่าง H_0AB และปฏิเสธสมมติฐาน H_1AB นั่นคือ ปัจจัยร่วมชนิดสารเคลือบและความหนาผิวเคลือบไม่มีผลต่ออายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 1 บาท อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

จ) ปัจจัยร่วม AC มีค่า P - Value = 0.013 มีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานว่าง H_0AC และยอมรับสมมติฐาน H_1AC นั่นคือ ปัจจัยร่วมชนิดสารเคลือบและอุณหภูมิการชุบเคลือบมีผลต่ออายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 1 บาท อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

ฉ) ปัจจัยร่วม BC มีค่า P - Value = 0.000 มีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานว่าง H_0BC และยอมรับสมมติฐาน H_1BC นั่นคือ ปัจจัยร่วมความหนาผิวเคลือบและอุณหภูมิการชุบเคลือบมีผลต่ออายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 1 บาท อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

สามารถอ่านผลการทดลองจากตารางที่ 4.3 ได้ดังนี้

ก) ผลกระทบหลัก (Main Effect) มีค่า P - Value = 0.000 มีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานว่าง H_0 และยอมรับสมมติฐาน H_1 นั่นคือ ปัจจัยหลักมีผลต่ออายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 1 บาท อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ข) ปัจจัยร่วมระดับ 2 (2 Way Interaction) มีค่า P - Value = 0.000 มีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานว่าง H_0 และยอมรับสมมติฐาน H_1 นั่นคือ ปัจจัยหลักมีผลต่ออายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 1 บาท อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

4.1.4 สมการถดถอย (Regression)

ค่าความมีนัยสำคัญของการถดถอยของสมการ (Regression) คือการทดสอบเพื่อที่จะตรวจสอบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยผลตอบแทน (ในที่นี้คือ Yield) กับเซตย่อยของตัวแปรถดถอยหรือไม่ และจากการประมวลผลของโปรแกรม Minitab ในตารางที่ 4.2 สามารถนำเขียนสมการถดถอยขึ้นต้นแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลกระทบของอายุการใช้งานแม่พิมพ์บ่มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 1 บาท

4.1.5 วิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

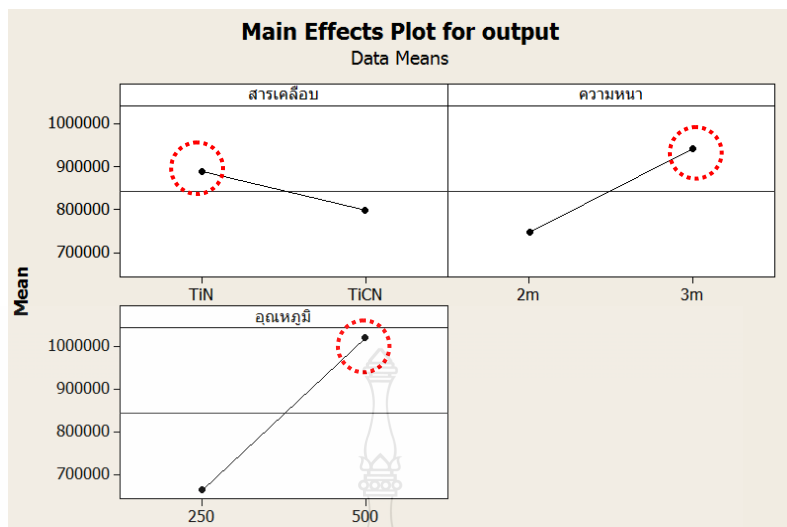
จากการประมวลผลของโปรแกรม Minitab ในตารางที่ 4.2 สามารถแสดงให้เห็นถึงระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ที่มีเปอร์เซ็นต์ความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันดังนี้

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เป็นตัววัดจำนวนที่ลดลงในความผันแปรของค่าตอบสนอง เมื่อใช้ตัวถดถอยในสมการ เมื่อพิจารณาจากค่า R^2 แสดงให้เห็นถึงระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ซึ่งมีความสัมพันธ์กันที่ระดับ 98.51% การที่ค่า R^2 มีค่ามากไม่ได้แปลว่าแบบจำลองการถดถอยที่สร้างขึ้นมานี้ดี เนื่องจากถ้ามีการเติมตัวแปรเข้าไปในสมการ จะทำให้ R^2 เพิ่มขึ้น ไม่ว่าตัวแปรนั้นจะมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ ดังนั้นอาจเป็นไปได้ว่าสมการที่มีค่า R^2 มีค่ามาก อาจจะเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ดีในการพยากรณ์ค่าตอบสนองก็ได้

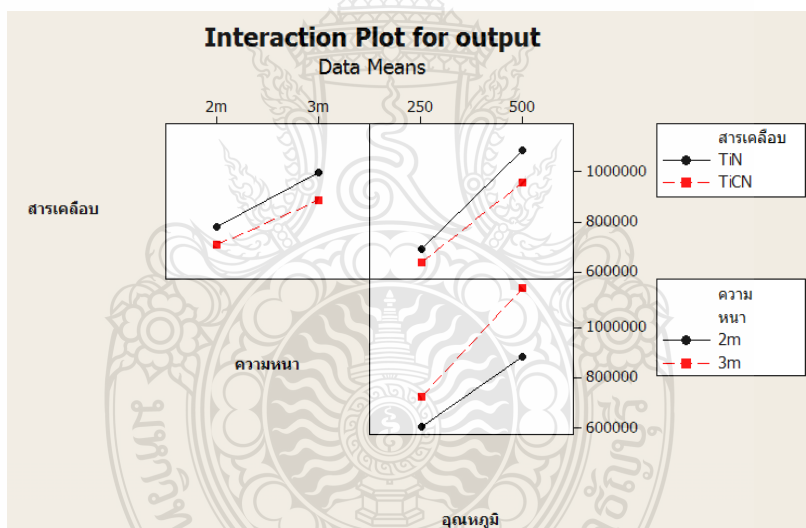
การทดสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจที่ปรับแล้ว (R^2_{adj}) ซึ่งสามารถบอกได้ว่าปัจจัยทั้ง 3 ที่นำมาทดลอง มีอิทธิพลต่อตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ซึ่งมีความสัมพันธ์กันที่ระดับ 97.86 % ส่วนที่เหลืออีก 2.14% มีอิทธิพลจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ในการชุบเคลือบ เช่น การเตรียมผิวชิ้นงาน บริเวณซอกมุมของลวดลาย พนักงาน เป็นต้น ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้ว (R^2_{adj}) ตามปกติแล้ว มักจะไม่เพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนของตัวแปรเพิ่มขึ้นในแบบจำลอง แต่ถ้าเพิ่มตัวแปรที่ไม่จำเป็นลงไป ในสมการ ค่าของ R^2_{adj} จะมีค่าลดลงเสมอ

4.2 การกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสม

เมื่อได้ทราบปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออายุการใช้งานแม่พิมพ์บ่มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 1 บาท แล้วหากต้องการทราบระดับของปัจจัยที่เหมาะสมในการกำหนดปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม สำหรับการชุบเคลือบผิว PVD บนแม่พิมพ์เหล็กบ่มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท ที่ให้ผลตอบแทนและคุณภาพงานดีที่สุด ต้องมีการควบคุมปัจจัย ดังภาพที่ 4.3 และภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.3 การทดสอบความเหมาะสมของปัจจัยหลัก (Main Effects Plot)



ภาพที่ 4.4 การทดสอบความเหมาะสมของปัจจัยร่วม (Interaction Plot)

จากภาพที่ 4.3 จะพบว่าปัจจัยหลัก (Main Effects Plot) ที่มีอิทธิพลให้ค่าเฉลี่ย (Mean) ของผลตอบสนองและภาพที่ 4.4 จะเป็นอิทธิพลที่เกิดจากปัจจัยร่วม สามารถสรุปแต่ละปัจจัยได้ดังนี้

4.2.1 ปัจจัย A ชนิดสารเคลือบ จากการทดลองใช้แม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท ที่ชุบเคลือบผิว PVD ด้วยสารเคลือบ TiN และ TiCN เมื่อทำการทดลองปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 1 บาท สำเร็จ พบว่าสารเคลือบ TiN ให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่า

4.2.2 ปัจจัย B การกำหนดความหนาผิวเคลือบ จากผลการทดลองใช้งาน ระดับความหนาที่ทำให้แม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท มีอายุการใช้งานดีที่สุด คือระดับความหนาเฉลี่ย $2.95 \mu\text{m}$ (น้อยกว่าหรือเท่ากับ $3 \mu\text{m}$)

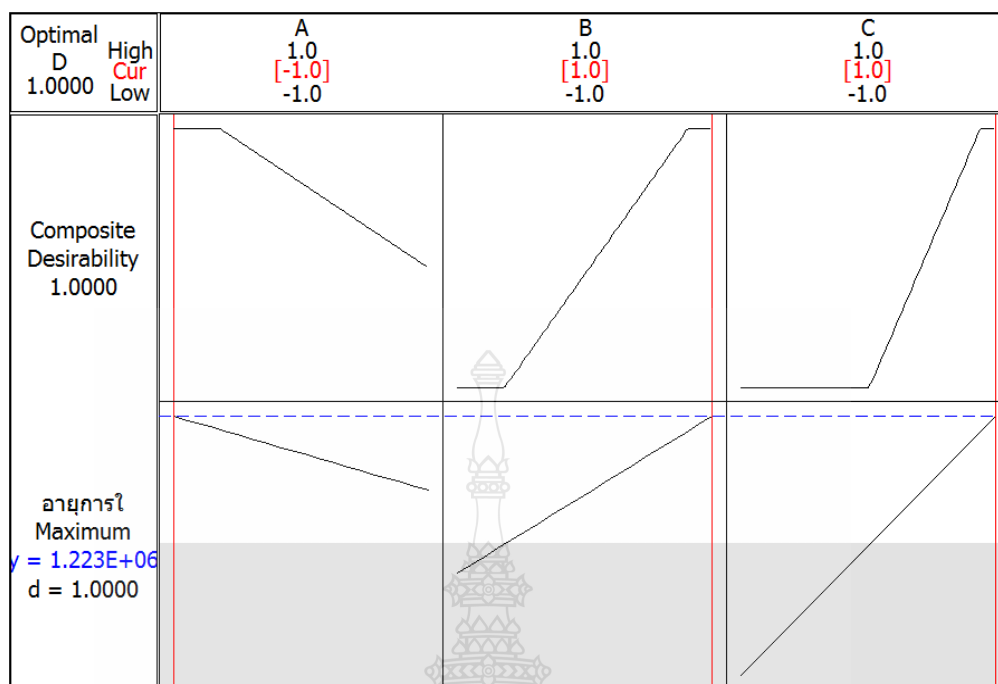
4.2.3 ปัจจัย C อุณหภูมิการชุบเคลือบในการชุบเคลือบผิว PVD บนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท ที่ใช้อุณหภูมิสูงเฉลี่ย 425.5°C (น้อยกว่าหรือเท่ากับ 500°C) นั้นจะส่งผลให้อายุการใช้งานของแม่พิมพ์เฉลี่ยสูงที่สุด

4.2.4 ปัจจัยร่วม 2 ระดับ AB (ชนิดสารเคลือบและความหนาผิวเคลือบ) จะเห็นว่าทั้งสองปัจจัยที่ส่งผลให้อายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท ดีที่สุด ซึ่งอยู่ระดับสูง (High) ทั้งคู่แสดงว่าสารเคลือบ TiN และระดับความหนาเฉลี่ย $2.95 \mu\text{m}$ (น้อยกว่าหรือเท่ากับ $3 \mu\text{m}$) เหมาะสมที่สุด

4.2.5 ปัจจัยร่วม 2 ระดับ AC (ชนิดสารเคลือบและอุณหภูมิการชุบเคลือบ) สำหรับสองปัจจัยนี้ จากรูปที่ 4.3 พบว่าชนิดสารเคลือบอยู่ในระดับสูง (High) อุณหภูมิการชุบเคลือบก็อยู่ในระดับสูง (High) เช่นเดียวกัน เมื่อต้องการให้อายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท สูงขึ้น ควรใช้สารเคลือบ TiN และใช้อุณหภูมิสูงเฉลี่ย 425.5°C (น้อยกว่าหรือเท่ากับ 500°C)

4.2.6 ปัจจัยร่วม 2 ระดับที่เกิดจากโครงสร้างคู่แข่ง ปัจจัยร่วม BC (ความหนาผิวเคลือบและอุณหภูมิการชุบเคลือบ) จากภาพที่ 4.4 จะเห็นว่า Interaction Plot เส้นกราฟของข้อมูลไม่ตัดกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าปัจจัยร่วมที่เกิดจากคู่แข่งส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท ไม่ต่างจากผลสรุปข้างต้น

ในการวิเคราะห์ปัจจัยโดยใช้ Minitab ยังมีการใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ช่วยในการกำหนดระดับของปัจจัย ถ้าต้องการผลตอบแทนที่ดีที่สุด ในการทดลองการชุบเคลือบผิว PVD บนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท จากภาพที่ 4.5 พบว่า เมื่อต้องการค่า Yield มากที่สุด (Maximum) โดยกำหนดค่าที่ต้องการต่ำที่สุด (Lower) ที่ 1,000,000 เหรียญ และค่าเป้าหมาย (Target) ที่ 1,200,000 เหรียญ



ภาพที่ 4.5 การกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Plot)

เมื่อทำการวิเคราะห์จากฟังก์ชัน Response Optimizer ค่าผลตอบแทนที่ส่งผลให้อายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มหรือลูกสูบหนึ่ง ชนิดราคา 1 บาท ได้ยาวนานที่สุด คือได้จำนวนหรือลูกสูบหนึ่ง ชนิดราคา 1 บาท สำเร็จมากที่สุด ซึ่งมากกว่า 1,200,000 หรือลูกสูบหนึ่ง โดยต้องควบคุมปัจจัยหลักตามสภาพการทำงานจริง ต้องเขียน โปรแกรมกำหนดเงื่อนไขและเลือกใช้สารเคลือบตามที่กำหนดในตารางที่ 4.4 ซึ่งมีค่าความน่าปรารถนา (Desirability: D) มากที่สุด

ตารางที่ 4.4 การควบคุมระดับปัจจัยที่เหมาะสม

ปัจจัยหลัก	ระดับ	สัญลักษณ์	หน่วย
A: ชนิดสารเคลือบ	TiN	-1	-
B: ความหนาผิวเคลือบ (เฉลี่ย)	2.95	1	μm
C: อุณหภูมิชุบเคลือบ (เฉลี่ย)	425.5	1	$^{\circ}\text{C}$

4.3 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติผิวเคลือบ

ผลการทดลองทำให้ทราบถึงระดับปัจจัยที่ให้ผลตอบสนองที่ดีที่สุดดังที่กล่าวมาแล้วนั้น ในขณะเดียวกัน ก็ได้ทราบระดับปัจจัยที่รองลงมา ซึ่งให้ผลตอบสนองอายุการใช้งานของแม่พิมพ์บี้ม เทริยญาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท ที่สูงเกิน 1,000,000 เทริยญา เช่นกัน คือ ชุบด้วยสารเคลือบ TiCN ที่ระดับความหนาเฉลี่ย 2.98 μm โดยใช้อุณหภูมิสูงเฉลี่ยชุบเคลือบ 342.5 $^{\circ}\text{C}$ ผู้วิจัยจึงได้นำชิ้นงาน ทดสอบจากการทดลองดังกล่าว ไปทดสอบสมบัติผิวเคลือบเพื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานทดสอบที่ให้ ผลตอบสนองที่ดีที่สุด โดยทำการตรวจสอบความหยาบผิว ความแข็งผิวเคลือบ ทดสอบการเกาะยึด ของผิวเคลือบ การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวเคลือบ และตรวจสอบภาพตัดขวาง ลักษณะการแพร่ซึมของผิวเคลือบกับชิ้นงาน ดังต่อไปนี้

4.3.1 การวัดความหยาบผิวของผิวเคลือบ

การวัดความหยาบผิวใช้ระบบ Contour and Surface Roughness รุ่น CS 3000 ยี่ห้อ Mitutoyo ดังภาพที่ 4.6 (ก) เป็นการวัดลักษณะพื้นผิวชิ้นงานทดสอบ เพื่อทำการวัดค่า Ra โดยค่า ของ Ra มีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร (μm) และดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน DIN EN ISO 4287,3274 ได้ค่าความหยาบผิวของผิวเคลือบ TiN เท่ากับ 0.061 μm และผิวเคลือบ TiCN เท่ากับ 0.043 μm ดังภาพที่ 4.7

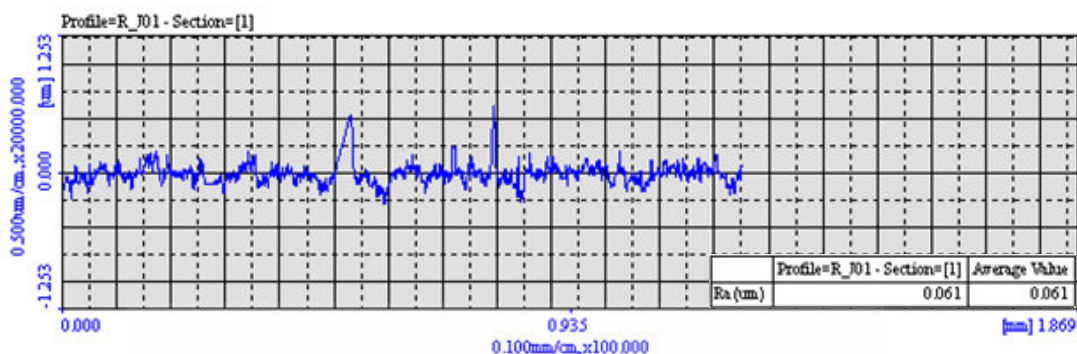


(ก)

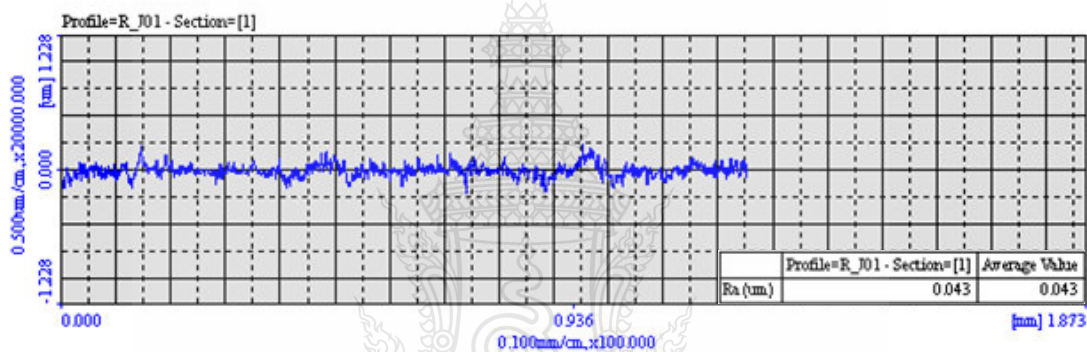
(ข)

ภาพที่ 4.6 การวัดความหยาบผิวของผิวเคลือบ

- ก) เครื่องวัดความหยาบผิว Contour and Surface Roughness
- ข) ตำแหน่งวัดบนชิ้นงาน



(ก) กราฟความหยาบผิวเคลือบ TiN



(ข) กราฟความหยาบผิวเคลือบ TiCN

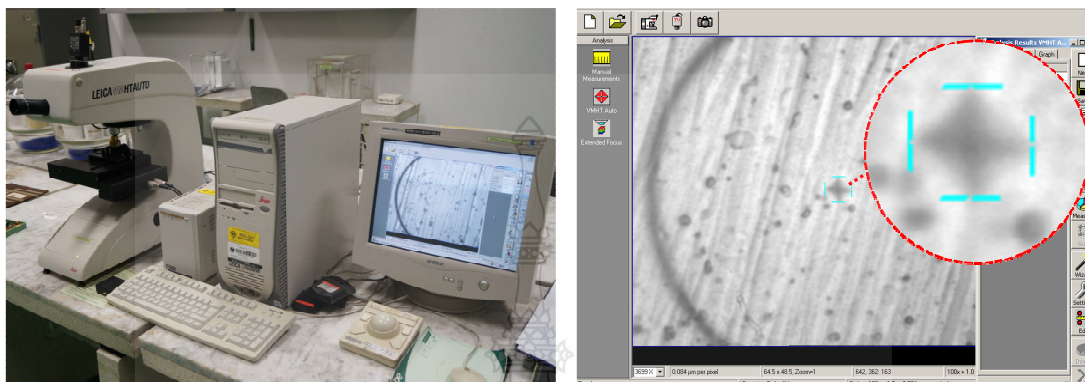
ภาพที่ 4.7 กราฟความหยาบผิวเคลือบ

ซึ่งจากผลการวัดค่าความหยาบผิวของผิวเคลือบ TiN มีค่ามากกว่าผิวเคลือบ TiCN จึงมีความสอดคล้องกับงานวิจัยทั่วไป ที่ผิวเคลือบ TiCN มีความเรียบผิวที่ดีกว่า TiN แต่ทั้งนี้สำหรับค่าความหยาบผิวที่ได้ขึ้นจะขึ้นอยู่กับการเตรียมผิวของชิ้นงานรองรับ (Substrate) ด้วยเช่นกัน (Ali: 2010)

4.3.2 การทดสอบความแข็งของผิวเคลือบ

การวัดความแข็งของผิวเคลือบ เนื่องจากผิวเคลือบที่ได้รับการเคลือบจากวิธี PVD มีความหนาอยู่ในระดับ 2 - 3 µm ดังนั้นอิทธิพลของชิ้นงานรองรับอาจทำให้ค่าความแข็งของผิวเคลือบที่ได้จากการวัดเกิดความคลาดเคลื่อนได้ ในการทดสอบใช้เครื่องวัดความแข็ง Micro Hardness รุ่น VMHT Auto ยี่ห้อ Leica ดังภาพที่ 4.8 (ก) โดยค่าของความแข็งมีหน่วยเป็น Hardness Vickers (HV) การ

ทดสอบความแข็งผิวเคลือบจะทำการวัดความแข็งชิ้นงาน 5 จุด แล้วหาค่าเฉลี่ย ในการทดสอบใช้ตามมาตรฐาน ISO 6507-1 ซึ่งกำหนดภาระกดสูงสุดที่ 0.490 3 N (HV 0.05) ได้ค่าความแข็งเฉลี่ยของผิวเคลือบ TiN เท่ากับ 2,135 HV 0.05 และค่าความแข็งเฉลี่ยของผิวเคลือบ TiCN เท่ากับ 2,975 HV 0.05



(ก) เครื่องวัดความแข็ง Micro Hardness

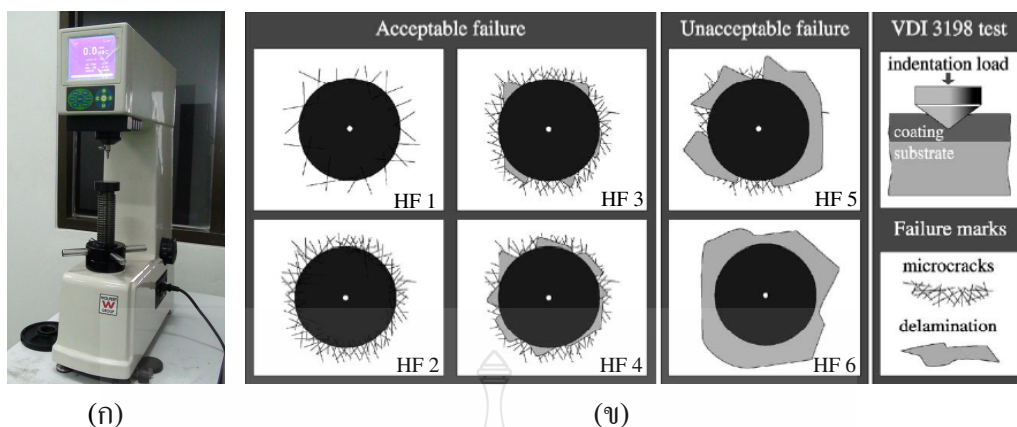
(ข) รอยกดบนผิวเคลือบ ขยายที่ 1000X

ภาพที่ 4.8 การทดสอบความแข็งของผิวเคลือบ

โดยค่าความแข็งเฉลี่ยของผิวเคลือบที่วัดค่าได้ในระดับความแข็งดังกล่าว มีความสอดคล้องกับทฤษฎีและงานวิจัยทั่วไป ที่ผิวเคลือบ TiCN จะมีความแข็งผิวที่สูงกว่าผิวเคลือบ TiN

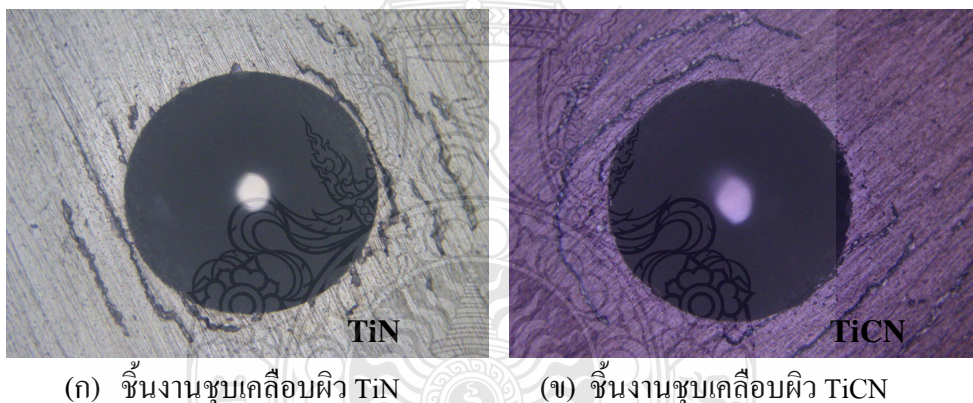
4.3.3 การทดสอบการเกาะยึดโดย Rockwell C Indentation (VDI 3198)

การทดสอบใช้วิธีตามมาตรฐาน VDI 3198 (มาตรฐานวิศวกรรมเยอรมัน) การวัดการเกาะยึดจะใช้เครื่อง Rockwell C Indentation รุ่น 600 MRD ยี่ห้อ Wilson Wolpert ดังภาพที่ 4.9 (ก) ในการวัดการเกาะยึดจะใช้วิธีการกดหัวเพชร โค้นทรงกรวย มีมุมยอดเท่ากับ 120 องศา กดลงบนชิ้นงานที่มีผิวเคลือบด้วยแรง 150 กิโลกรัม-ฟอร์ซ (Kgf) แล้วจึงนำไปเปรียบเทียบความเสียหายด้วยกล้องจุลทรรศน์ โดยมีตารางกำหนดระดับค่าการเกาะยึดแบ่งเป็น 6 ระดับความเสียหายของผิวเคลือบหลังการทดสอบ ดังภาพตารางที่ 4.9 (ข) เมื่อนำชิ้นงานทดสอบไปทดสอบโดย Rockwell C ทำการตรวจสอบจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ได้ผลดังภาพที่ 4.10 แล้วนำผลมาเปรียบเทียบกับมาตรฐาน



ภาพที่ 4.9 การทดสอบการเกาะยึดโดย Rockwell C Indentation (VDI 3198)

- ก) เครื่องวัดความแข็ง Rockwell C Indentation
- ข) ระดับค่าการเกาะยึดแบ่งเป็น 6 ระดับความเสียหาย



(ก) ชิ้นงานชุบเคลือบผิว TiN (ข) ชิ้นงานชุบเคลือบผิว TiCN

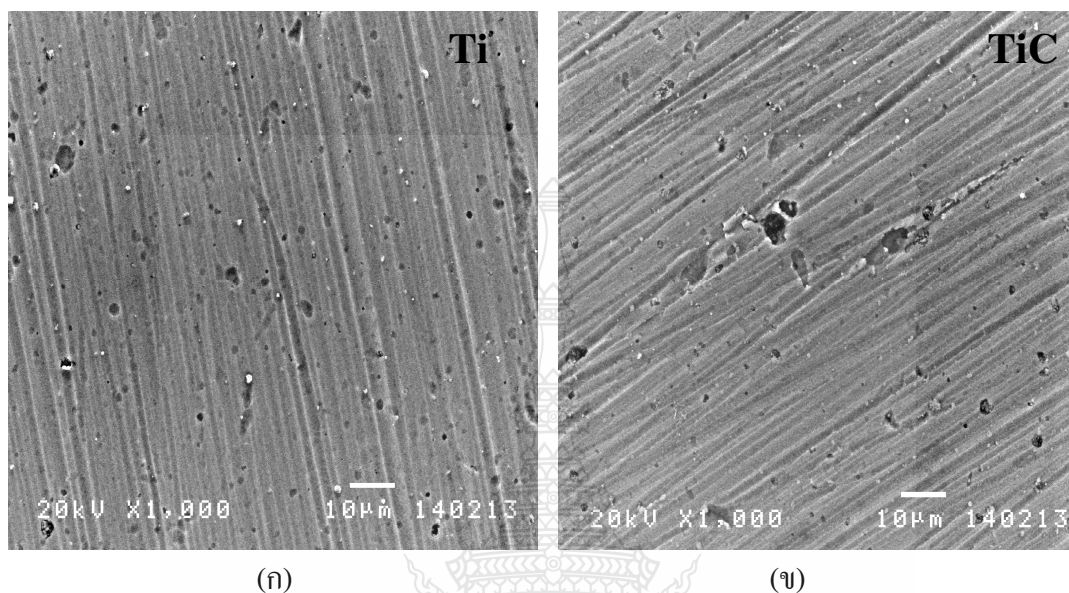
ภาพที่ 4.10 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงหลังทดสอบการเกาะยึดโดยวิธี Rockwell C ของผิวเคลือบชิ้นงาน

จากการตรวจสอบพบว่าบริเวณรอยกดไม่ปรากฏรอยแตกหรือความเสียหายของผิวเคลือบบริเวณรอยกด และเมื่อทดสอบตามวิธีมาตรฐาน VDI 3198 พบว่าผิวเคลือบจัดอยู่ในระดับ HF 1 ทั้ง 2 ชนิดสารเคลือบ กล่าวคือ ผิวเคลือบที่ได้มีการเกาะยึดกับชิ้นงานรองรับที่ดีมาก

4.3.4 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวเคลือบ

ตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวเคลือบ ด้วยการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) รุ่น JSM-5410 LV ยี่ห้อ JEOL โดย

ศึกษาลักษณะทางกายภาพของผิวเคลือบ ดังภาพที่ 4.11 เพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะของผิวเคลือบที่มีผลต่อคุณภาพผิวของเหรียญสำเร็จ ที่ผ่านการปั๊มด้วยแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญในแต่ละชนิดสารเคลือบ



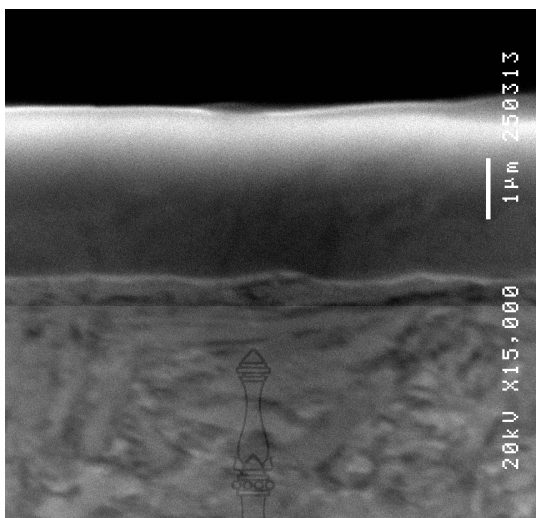
ภาพที่ 4.11 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวเคลือบ

ก) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ SEM สารเคลือบ TiN

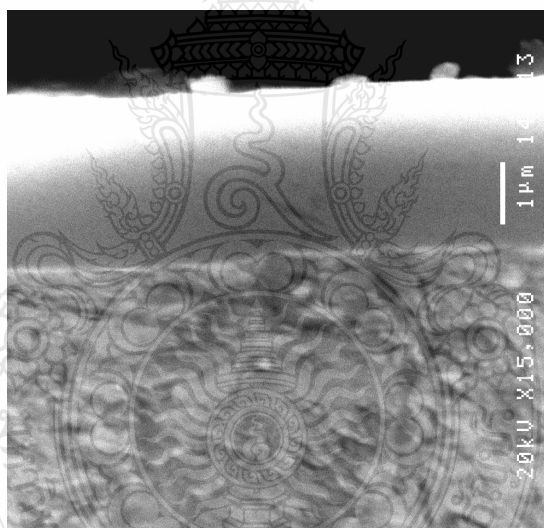
ข) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ SEM สารเคลือบ TiCN

จากภาพถ่าย SEM คุณลักษณะทางกายภาพของผิวเคลือบทั้ง 2 ชนิด พบว่าภาพ (ก) สารเคลือบ TiN มีความสม่ำเสมอของ Droplet ขนาดเล็กเกิดกระจายทั่วไปบนพื้นผิว ในขณะที่ภาพ (ข) สารเคลือบ TiCN จะมี Droplet ขนาดใหญ่เป็นจุด ซึ่งจากการทดลองแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญพบว่าเหรียญกษาปณ์สำเร็จที่ผ่านการปั๊มด้วยแม่พิมพ์ซุบสารเคลือบ TiCN จะมีรอยตำหนิเกิดขึ้นบนผิวเหรียญสำเร็จที่สามารถสังเกตได้ แต่คุณภาพโดยรวมยังอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้

ในการศึกษาวิเคราะห์การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบ TiN และ TiCN กับพื้นผิวของชิ้นงาน (Substrate Material) ว่ามีความสมบูรณ์หรือไม่ ต้องคุณลักษณะทางกายภาพในลักษณะภาพตัดขวางเพื่อศึกษาลักษณะการเกาะยึดของสารเคลือบกับผิวชิ้นงาน โดยทำการผ่าครึ่งชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการเคลือบผิว ด้วยเครื่อง EDM Wire Cut และนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการยืนยันผลการวิเคราะห์ทางสถิติว่าสอดคล้องกับผลการทดสอบหรือไม่



ภาพที่ 4.12 ภาพถ่ายตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์ SEM ของชิ้นงานทดสอบเคลือบ TiN



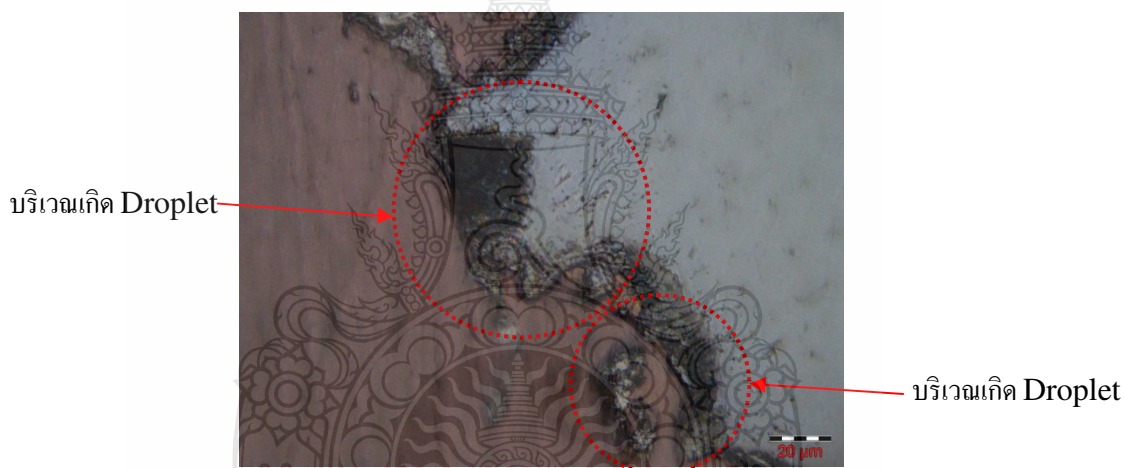
ภาพที่ 4.13 ภาพถ่ายตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์ SEM ของชิ้นงานทดสอบเคลือบ TiCN

จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ SEM ที่อัตราขยาย 15,000 เท่า พบว่าลักษณะการเกาะยึดของสารเคลือบ TiN ในภาพที่ 4.12 และสารเคลือบ TiCN ในภาพที่ 4.3 กับพื้นผิวชิ้นงาน (Substrate Material) มีความสมบูรณ์ทั้ง 2 ชนิดสารเคลือบ ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบงานจริงในการปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท สำเร็จ ที่ทำให้แม่พิมพ์ปั๊มเหรียญมีอายุการใช้งานเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้นเกินกว่า 1,000,000 เหรียญต่อคู่ และสามารถยืนยันทันผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติได้

4.3.5 การวิเคราะห์อายุการใช้งานของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ

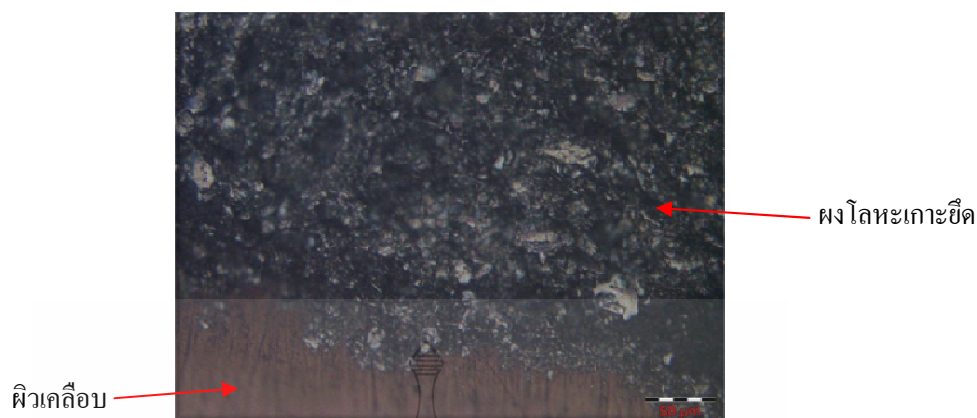
ทำการตรวจสอบแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท หลังการใช้งานทดลองปั๊มเหรียญกษาปณ์สำเร็จ ที่มีอายุการใช้งานเกิน 1,000,000 เหรียญ โดยนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ยี่ห้อ Olympus รุ่น BX50 เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการชำรุดที่เกิดขึ้น

1) ลักษณะการชำรุดของแม่พิมพ์ที่ชุบด้วยสารเคลือบ TiCN พบว่ามีแม่พิมพ์บางส่วนมีรอยตำหนิที่คล้ายกับการหลุดร่อนของผิวเคลือบ เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง พบว่ารอยตำหนิดังกล่าวเกิดขึ้นอยู่ในบริเวณที่เกิด Droplet ที่มีขนาดใหญ่ของผิวเคลือบ TiCN ดังภาพที่ 4.14 จึงส่งผลให้เกิดการสึกหรอแบบล้า (Fatigue Wear) ที่เกิดจากความเสียหายของรอยผิวเคลือบที่มีตำหนิ [38] ซึ่งเป็นจุดอ่อนของผิวเคลือบ TiCN ในการเคลือบผิวบนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญที่ทำการวิจัย ในขณะที่แม่พิมพ์ปั๊มเหรียญที่เคลือบ TiN ไม่พบรอยตำหนิลักษณะดังกล่าว



ภาพที่ 4.14 การชำรุดที่เกิดการหลุดร่อนของผิวเคลือบ TiCN บนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท หลังการใช้งานเกิน 1,000,000 เหรียญ

และยังพบแม่พิมพ์บางส่วนเกิดรอยตำหนิขึ้นบริเวณซอกมุมของลวดลาย เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง พบว่าเป็นรอยตำหนิที่เกิดจากการยึดติดสะสมของผงโลหะ (โดยปกติในขณะปั๊มเหรียญจะมีเศษผงโลหะจากเหรียญตัวเปล่าหลุดออกมา) ดังภาพที่ 4.15 จึงส่งผลให้เกิดการสึกหรอแบบกัดเซาะ (Erosive Wear) ที่เกิดจากการตกกระทบของอนุภาคของแข็งซ้ำๆ กันเป็นเวลานาน [38] จนกลายเป็นตำหนิที่ส่งผลต่อคุณภาพเหรียญสำเร็จ ซึ่งเป็นจุดอ่อนของผิวเคลือบ TiCN ในการเคลือบผิวบนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญอีกสาเหตุหนึ่ง



ภาพที่ 4.15 การชำรุดที่เกิดการยึดติดสะสมของผงโลหะบริเวณซอกมุมลวดลายบนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท ที่ใช้ผิวเคลือบ TiCN หลังการใช้งานเกิน 1,000,000 เหรียญ

2) ลักษณะการชำรุดของแม่พิมพ์ที่ชุบด้วยสารเคลือบ TiN หลังการใช้งานทดลองปั๊มเหรียญกษาปณ์สำเร็จ นำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ดังภาพที่ 4.15 พบว่าแม่พิมพ์บางส่วนมีลักษณะการสึกหรอของพื้นผิวเคลือบ โดยเฉพาะบริเวณซอกของลวดลายต่างๆ เช่น ลวดลายตัวหนังสือ ลวดลายคิ้ว เป็นต้น ซึ่งเป็นลักษณะการสึกหรอแบบขูดขีด (Abrasive Wear) ที่เกิดความเสียหายจากรอยผิวเคลือบ [38] จึงส่งผลกระทบต่อคุณภาพความคมชัดของลวดลายและความเงาของเหรียญสำเร็จ



ภาพที่ 4.16 การชำรุดที่เกิดรอยการสึกหรอของผิวเคลือบ TiN บนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท หลังการใช้งานเกิน 1,000,000 เหรียญ

4.4 วิเคราะห์การลดต้นทุนการผลิต

4.4.1 ค่าใช้จ่ายในการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555

จากข้อมูลการสรุปบัญชีเงินทุนหมุนเวียนการผลิต ของส่วนบริหารเงินทุน สำนักกษาปณ์ ในปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 มีการผลิตเหรียญกษาปณ์รวมทุกชนิดราคา จำนวน 1,653,145,000 เหรียญ ซึ่งเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท เป็นเหรียญที่มีปริมาณการผลิตมากที่สุด จำนวน 846,862,000 เหรียญ หรือคิดเป็นร้อยละ 51.23 ของการผลิตทั้งหมด โดยมีค่าใช้จ่ายในการผลิตเหรียญกษาปณ์ทุกชนิดราคาของปีงบประมาณดังกล่าว คิดเป็นเงินจำนวน 290,825,670.38 บาท ประกอบด้วย

1) ค่าใช้จ่ายผันแปร (Variable Costs) คิดเป็นจำนวนเงิน 93,047,888.26 บาท ได้แก่ วัสดุ โรงงาน วัสดุอื่นๆ ค่าตอบแทนการปฏิบัติงานนอกเวลาราชการ ค่าสาธารณูปโภค

2) ค่าใช้จ่ายคงที่ (Fixed Costs) คิดเป็นจำนวนเงิน 197,777,782.12 บาท ได้แก่ ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับบุคลากร ค่าจ้างเหมาบริการ ค่าเสื่อมราคาสินทรัพย์ และค่าใช้จ่ายอื่นๆ

จากค่าใช้จ่ายในการผลิตเหรียญกษาปณ์ดังกล่าว ได้มีการปันส่วนเป็นค่าใช้จ่ายในส่วนของงานผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ (ส่วนดวงตรา) คิดเป็นจำนวนเงิน 29,284,635.28 บาท หรือคิดเป็นร้อยละ 10.06 ของค่าใช้จ่ายในการผลิตเหรียญกษาปณ์รวม ซึ่งแบ่งออกเป็นค่าใช้จ่ายคงที่ (Fixed Costs) จำนวน 16,933,688.04 บาท และค่าใช้จ่ายผันแปร (Variable Costs) จำนวน 12,350,947.24 บาท โดยมีรายละเอียดดังนี้ (ข้อมูลจากส่วนบริหารเงินทุน สำนักกษาปณ์)

ค่าใช้จ่ายของส่วนดวงตรา ปี 2555

ค่าใช้จ่ายคงที่

เงินสมทบประกันสังคม	12,968.00 บาท
ค่าจ้างชั่วคราว	89,480.00 บาท
ค่าตอบแทน	69,880.00 บาท
ค่าจ้างประจำ	1,127,331.60 บาท
ค่าแรง	119,049.48 บาท
ค่าเล่าเรียนบุตรและค่ารักษาพยาบาล	13,145.00 บาท
ค่าเสื่อมราคา	15,401,833.96 บาท
รวม	<u>16,933,688.04 บาท</u>

ค่าใช้จ่ายผันแปร

ค่าตอบแทนการปฏิบัติงานนอกเวลาราชการ	652,240.00 บาท
เหล็กเพลากลม	3,076,616.40 บาท
ค่าซ่อมแซมและบำรุงรักษา	1,746,220.00 บาท
ค่าไฟฟ้า	1,331,368.68 บาท
ค่าน้ำประปา	167,397.75 บาท
ค่าวัสดุอื่นๆ	18,103.14 บาท
วัสดุไฟฟ้า	10,346.50 บาท
ค่าใช้จ่ายเบ็ดเตล็ด	18,734.88 บาท
วัสดุโรงงาน	3,702,242.73 บาท
ค่าดำเนินงาน	80,730.31 บาท
ค่าโสฮุย	1,546,946.85 บาท
รวม	<u>12,350,947.24 บาท</u>
รวมค่าใช้จ่าย	<u>29,284,635.28 บาท</u>

4.4.2 พิจารณาค่าใช้จ่ายในการผลิตต่อเหรียญที่ลดลง

จากประมาณการต้นทุนเหรียญกษาปณ์หมุนเวียน ชนิดราคา 1 บาท ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 ในตารางที่ 4.5 จึงสามารถนำไปคำนวณค่าใช้จ่ายในการผลิตที่ลดลงของงานผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ (ส่วนดวงตรา) อันเนื่องมาจากอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ปริมาณการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญลดลง

ตารางที่ 4.5 ประมาณการต้นทุนเหรียญกษาปณ์หมุนเวียน ชนิดราคา 1 บาท ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555

หน่วย: บาทต่อเหรียญ

ต้นทุนเหรียญตัวเปล่า	ค่าใช้จ่ายในการผลิต	ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน	ต้นทุนประมาณการ
0.5843	0.2250	0.0567	0.8660

จากตารางดังกล่าวจะมีค่าใช้จ่ายในการผลิตเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 1 บาทต่อเหรียญเป็นเงิน 0.2250 บาท โดยคิดเป็นค่าใช้จ่ายในการผลิตของงานผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ 0.0228 บาทต่อเหรียญ ซึ่งมาจากการคำนวณโดยการปันส่วนค่าใช้จ่ายในการผลิตตามบัญชีต้นทุน จากสูตร

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยหัวข้อนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการชุบเคลือบผิว PVD บนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ 1 บาท เพื่อลดต้นทุนการผลิต ซึ่งจากข้อมูลที่ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลปัญหาที่เกิดจากใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ กำหนดปัญหาในการวิจัยโดยใช้แผนภูมิพาเรโต แล้วกำหนดปัจจัยที่ควบคุมได้ที่ส่งผลต่ออายุการใช้งานของแม่พิมพ์โดยใช้แผนผังแสดงเหตุและผล เพื่อหาสาเหตุของปัญหา และทำการทดลองตามที่ออกแบบ ผลจากการทดลองปั๊มเหรียญสำเร็จของโรงกษาปณ์ ด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม สามารถช่วยในการกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการปฏิบัติงานได้ นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ ชนิดราคา 1 บาท และจะลดค่าใช้จ่ายในการผลิตลงได้ระดับหนึ่ง

5.1.1 สรุปผลจากการออกแบบการทดลอง

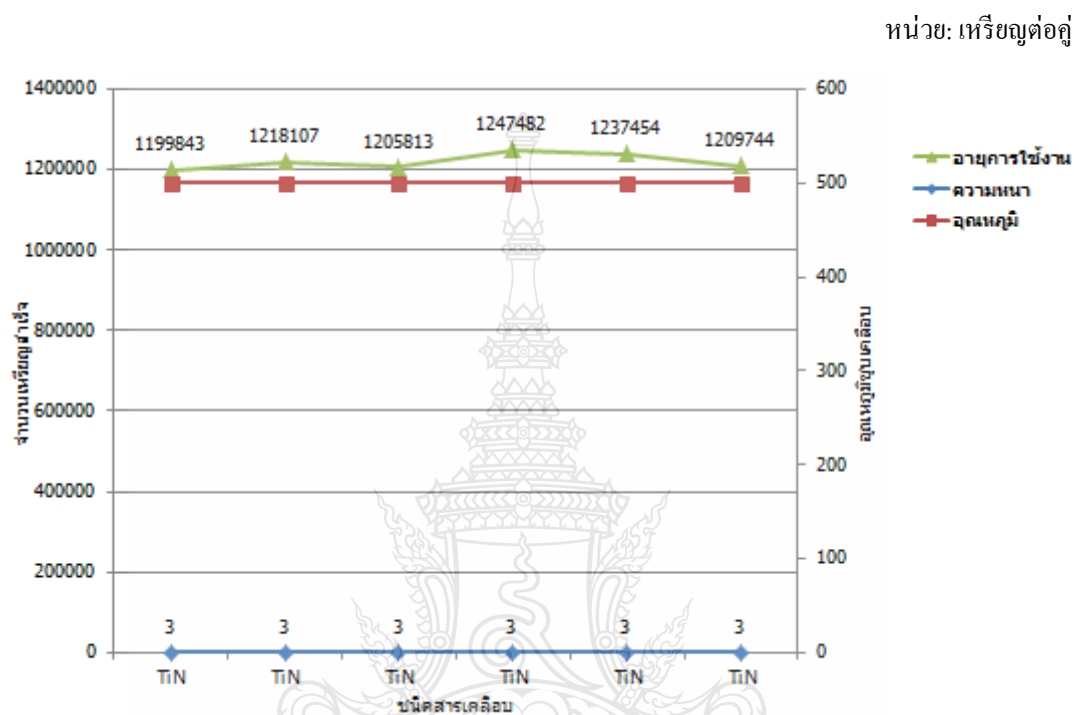
1) การเลือกใช้ชนิดสารเคลือบในการชุบเคลือบผิว PVD บนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท ควรเลือกใช้สารเคลือบ TiN จะทำให้อายุการใช้งานของแม่พิมพ์และคุณภาพของเหรียญสำเร็จดีที่สุดในอายุเฉลี่ย 1,223,444 เหรียญต่อคู่ สำหรับสารเคลือบ TiCN ถึงแม้จะทำให้อายุการใช้งานของแม่พิมพ์สูงขึ้นเฉลี่ย 1,093,626 เหรียญต่อคู่ ซึ่งใกล้เคียงกับสารเคลือบ TiN แต่อาจมีข้อจำกัดด้านคุณภาพของเหรียญสำเร็จ อีกทั้งในกระบวนการชุบเคลือบจะใช้ระยะเวลา นานกว่าประมาณ 30 นาที และมีต้นทุนค่าโสหุ้ยในการชุบเคลือบที่สูงกว่า TiN

2) ระดับความหนาผิวเคลือบที่ทำให้แม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท มีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ อยู่ที่ความหนาเฉลี่ย $2.95\ \mu\text{m}$ ของสารเคลือบ TiN และที่ความหนาเฉลี่ย $2.98\ \mu\text{m}$ ของสารเคลือบ TiCN ซึ่งที่ระดับความหนาดังกล่าว แม่พิมพ์ปั๊มเหรียญมีอายุการใช้งานเฉลี่ยสูงสุด โดยไม่กระทบต่อคุณภาพความคมชัดของลวดลายเหรียญสำเร็จ

3) ปัจจัย C คืออุณหภูมิการชุบเคลือบ ในการชุบเคลือบผิว PVD บนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 1 บาท ที่อุณหภูมิสูงเฉลี่ย $425.5\ ^\circ\text{C}$ ของสารเคลือบ TiN และอุณหภูมิสูงเฉลี่ย $342.5\ ^\circ\text{C}$ ของสารเคลือบ TiCN นั้น จะส่งผลให้อายุการใช้งานของแม่พิมพ์เฉลี่ยสูงสุด โดยอุณหภูมิดังกล่าวไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติด้านความแข็งของเหล็กทำแม่พิมพ์

4) เมื่อทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผล โดยใช้สารเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) ระดับความหนาผิวเคลือบเฉลี่ย $2.95\ \mu\text{m}$ และระดับอุณหภูมิสูงเฉลี่ย $425.5\ ^\circ\text{C}$ โดยทดลองซ้ำจำนวน 2 ครั้ง

ครั้งละ 3 คู่ หลังจากนั้นนำไปทดลองบ่มเหรียญกษาปณ์สำเร็จ ปรากฏว่าอายุการใช้งานของแม่พิมพ์บ่มเหรียญ (Yield) ได้จำนวนเหรียญสำเร็จเฉลี่ยที่ 1,219,740 เหรียญต่อคู่ ซึ่งอายุการใช้งานเฉลี่ยดังกล่าว มีปริมาณใกล้เคียงกับผลการทดลองครั้งแรก ดังภาพที่ 5.1



ภาพที่ 5.1 อายุการใช้งานของแม่พิมพ์บ่มเหรียญที่ทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผล

5.1.2 สรุปผลจากการตรวจสอบชิ้นงานทดสอบ

1) จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ในลักษณะภาพตัดขวาง แสดงถึงความเหมาะสมในการเลือกใช้ชนิดสารเคลือบที่นำมาเคลือบผิว PVD บนแม่พิมพ์บ่มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท ซึ่งจะเห็นได้ว่าสารเคลือบทั้ง 2 ชนิด คือ TiN และ TiCN ที่ความหนาเฉลี่ย $2.95 \mu\text{m}$ และที่ความหนา $2.98 \mu\text{m}$ โดยใช้อุณหภูมิสูงเฉลี่ย 425.5°C และ 342.5°C ตามลำดับ มีลักษณะการยึดเกาะกับชิ้นงาน (Substrate Material) ที่ดีใกล้เคียงกัน แต่ในลักษณะด้านกายภาพผิวเคลือบ TiN จะมีปริมาณ Droplet เกิดขึ้นกระจายทั่วไปแต่มีขนาดเล็ก ขณะเดียวกันผิวเคลือบ TiCN จะมีปริมาณ Droplet เกิดขึ้นน้อย แต่มีขนาดใหญ่กว่า จึงมีโอกาสเกิดเป็นตำหนิที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของเหรียญสำเร็จ ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลองผลิตจริง

2) ผลจากการทดสอบการเกาะยึดตามมาตรฐาน VDI 3198 (มาตรฐานวิศวกรรมเยอรมัน) ทั้ง 2 ชนิดสารเคลือบ และตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง พบว่าการเกาะยึดของผิวเคลือบ มีการเกาะยึดกับชิ้นงานรองรับในระดับที่ดีมาก ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในการผลิตจริง

3) จากการทดสอบความแข็งไมโครฮาร์ดเนส ค่าความแข็งเฉลี่ยของผิวเคลือบ TiN เท่ากับ 2,135 HV 0.05 และค่าความแข็งเฉลี่ยของผิวเคลือบ TiCN เท่ากับ 2,975 HV 0.05 ที่ระดับความแข็งดังกล่าว มีความสอดคล้องกับทฤษฎีและงานวิจัยทั่วไป จึงส่งผลให้อายุการใช้งานของแม่พิมพ์ปั๊ม เบริลลูมียาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามผิวเคลือบ TiCN ที่มีความแข็งผิวที่สูงกว่า ซึ่งควรมีอายุการใช้งานมากกว่าผิวเคลือบ TiN แต่จากคุณสมบัติทางกายภาพของผิวเคลือบที่มี Droplet ขนาดใหญ่ จึงเป็นข้อจำกัดในการใช้งานกับแม่พิมพ์ปั๊ม เบริลลูมียาปณ์

4) จากการวัดความหยาบผิว ได้ค่าความหยาบผิว (Ra) ของผิวเคลือบทั้ง 2 ชนิดสารเคลือบ พบว่าความเรียบผิวของผิวเคลือบ TiCN จะดีกว่าผิวเคลือบ TiN ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยทั่วไป แต่จากการทดลองปั๊ม เบริลลูมียาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท ผลจากปัจจัยดังกล่าวไม่พบความแตกต่างในการทดลองใช้งาน เช่น แรงกดที่ใช้ในการปั๊ม เบริลลูมียาปณ์ เป็นต้น

สรุปจากผลการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองทั้งทางสถิติ และการทดสอบชิ้นงานทดสอบ จะเห็นว่าข้อมูลมีความสอดคล้องเป็นไปในทางเดียวกันกับการทดลองใช้งานผลิตจริง

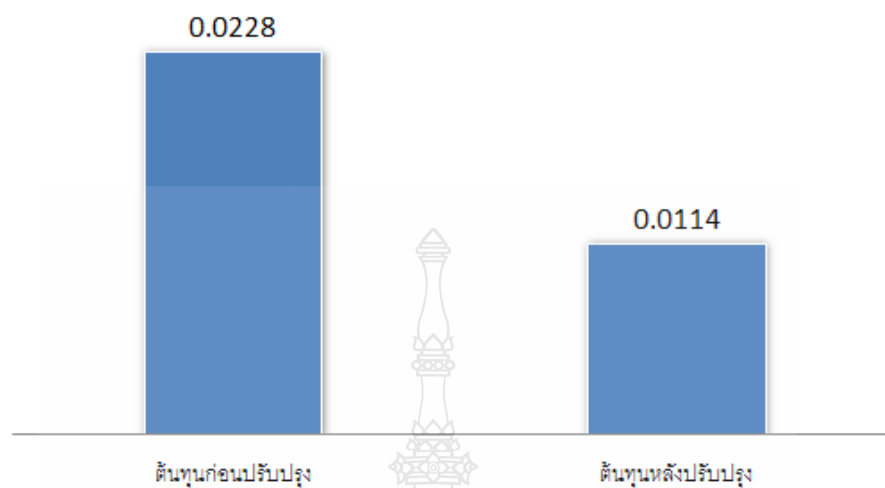
5.2 การลดต้นทุนการผลิต

ผลจากการปรับปรุงการเคลือบผิว PVD บนแม่พิมพ์ปั๊ม เบริลลูมียาปณ์ จนทำให้มีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ปริมาณการผลิตแม่พิมพ์ปั๊ม เบริลลูมียาปณ์ ลดลง จึงนำไปพิจารณาลดต้นทุนการผลิตในส่วน of ค่าใช้จ่ายผันแปร (Variable Costs) และสามารถนำกำลังการผลิตที่เหลื่อมมาบริหารจัดการในการผลิตผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้ โดยเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มจากกำลังการผลิตที่เหลืออยู่ ซึ่งจะสามารถผลักราคาใช้จ่ายคงที่ (Fixed Costs) โดยรวมที่มีอยู่ออกไปได้อีก

เมื่อนำมาพิจารณาประกอบกับแผนการผลิต เบริลลูมียาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556 จำนวน 990,000,000 เบริลลูมียาปณ์ (ข้อมูลจากกองแผนงาน กรมธนารักษ์) โดยคิดค่าใช้จ่ายในการผลิตของงานผลิตแม่พิมพ์ปั๊ม เบริลลูมียาปณ์ ที่ลดลงร้อยละ 50 จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิต เบริลลูมียาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท ลดลงได้ ดังภาพที่ 5.2 ซึ่งจะทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการผลิตของงานผลิตแม่พิมพ์ได้ เป็นเงินจำนวน 11,286,000 บาท ($0.0114 \text{ บาท} \times 990,000,000 \text{ เบริลลูมียาปณ์}$)

หน่วย: บาทต่อเหรียญ

ต้นทุนการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท



ภาพที่ 5.2 การเปรียบเทียบต้นทุนก่อนและหลังปรับปรุง

5.3 อภิปรายงานวิจัย

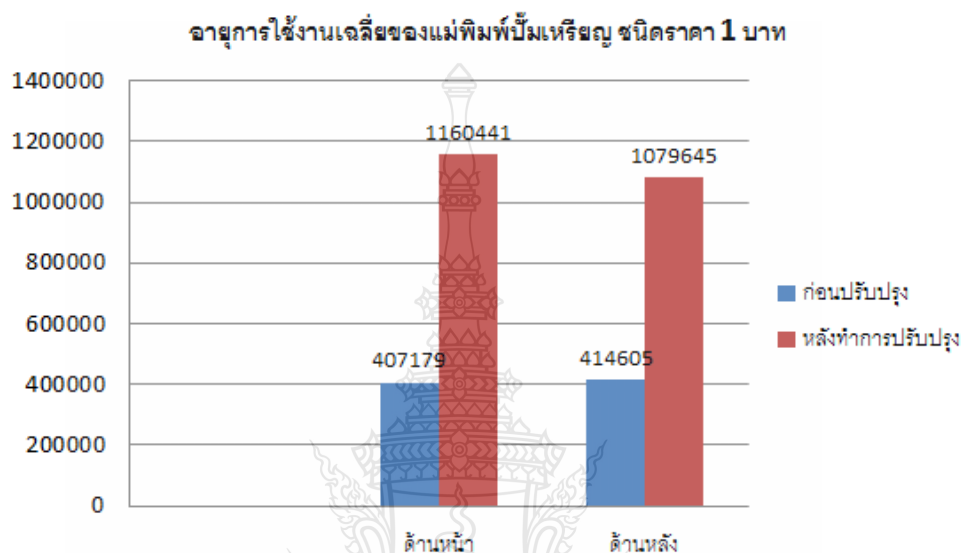
จากการดำเนินงานวิจัย มีสิ่งที่ยกย่องหลักในการดำเนินงานวิจัยคือ

5.3.1 วัสดุเหล็กในการผลิตแม่พิมพ์เหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท เหล็กเกรด W360 เป็นวัสดุเหล็กกล้าที่มีเนื้อเป็นเอกพันธ์ (Homogeneous) กระบวนการชุบแข็งดำเนินการตามที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำ ในการอบคืนไฟ (Tempering) เลือกใช้อุณหภูมิที่ให้ความแข็งสูงสุด คือ 57.5 HRC หลังจากนั้นทำการชุบเคลือบผิว PVD ด้วยสารเคลือบ TiN ที่อุณหภูมิสูงเฉลี่ย 425.5°C และความหนาผิวเคลือบเฉลี่ย 2.95 μm จะมีความเหมาะสมที่สุด ทำให้ได้ผลผลิตของเหรียญสำเร็จสูงเกิน 1,000,000 เหรียญต่อแม่พิมพ์ 1 คู่

5.3.2 จากการควบคุมปัจจัยในการทำงานของกระบวนการชุบเคลือบผิว PVD หลังจากนำไปใช้ในกระบวนการผลิตแม่พิมพ์เหล็กปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท โดยสรุปคือ ข้อมูลก่อนการปรับปรุงแม่พิมพ์เหล็กปั๊มเหรียญดังกล่าวมีอายุการใช้งานเฉลี่ย 400,000 เหรียญต่อคู่ เมื่อทำการปรับปรุงกระบวนการและเก็บข้อมูลในระยะเวลา 2 เดือน กุมภาพันธ์ - มีนาคม พ.ศ. 2556 พบว่าอายุการใช้งานของแม่พิมพ์เหล็กปั๊มเหรียญเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเกินกว่า 1,000,000 เหรียญต่อคู่ ดังภาพที่ 5.3 หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 2.5 เท่าของอายุการใช้งานเฉลี่ยเดิม ทำให้ปริมาณการใช้แม่พิมพ์ลดลงกว่าร้อยละ 50 จึงส่งผลให้ปริมาณการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญลดลงเช่นกัน จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการปรับปรุงระดับ

ปัจจัยให้เหมาะสมแล้ว ทำให้อายุการใช้งานแม่พิมพ์เพิ่มสูงขึ้น 2.5 เท่า ส่งผลให้ปริมาณการผลิตแม่พิมพ์ลดลงกว่าร้อยละ 50 จึงสามารถลดต้นทุนในการผลิตในส่วนของค่าใช้จ่ายผันแปร (Variable Cost) ลดลงกว่าร้อยละ 50 ซึ่งถือว่าบรรลุวัตถุประสงค์การวิจัย

หน่วย: เหยียดต่อดวง



ภาพที่ 5.3 การเปรียบเทียบอายุการใช้งานเฉลี่ยก่อนปรับปรุง (ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555) กับหลังทำการปรับปรุง (กุมภาพันธ์ - มีนาคม พ.ศ. 2556)

5.4 ข้อเสนอแนะ

5.4.1 ควรมีการศึกษาการนำเทคนิคการเคลือบด้วยวัสดุเคลือบผิวอื่นๆ เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ เช่น Duplex Coating หรือ Ion Nitride Process คือทำกรรมวิธีไนโตรดิ่งในชั้นแรกแล้วตามด้วยการเคลือบผิว PVD วัสดุอื่นๆ เป็นต้น

5.4.2 ในการลดต้นทุนการผลิตอาจพิจารณาในส่วนของทางเลือกวัสดุดิบเกรดใหม่ที่มีราคาต่อหน่วยต่ำกว่าปัจจุบัน มาทำการทดสอบเพิ่มเติมเพื่อเป็นทางเลือกในการผลิต

รายการอ้างอิง

- [1] สุภิญญา ชูช่วย และคณะ, “เทคนิคการผลิตเหรียญกษาปณ์สำเร็จรูป โลหะชุบเคลือบใส่เหล็ก โรงกษาปณ์ประเทศฟินแลนด์,” รายงานการฝึกอบรม, กรมธนารักษ์, 2552.
- [2] มนต์ สติรจินดา, **วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2535.
- [3] สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น), **ตารางการเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุ (ออนไลน์)**, Available: http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php (20 มีนาคม 2555)
- [4] สัจชัย ลังแก, “ชุดเครื่องมือการแก้ปัญหา 7 อย่าง และชุดเครื่องมือการจัดการ 7 อย่าง (7 QC Tools & 7 New QC Tools),” เอกสารประกอบการฝึกอบรม, สถาบันเพิ่มผลผลิตแห่งชาติ, 2552.
- [5] อรรถพล เฉลิมผลประภา, **การปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยใช้เทคนิคลีนและซิกซ์ซิกมาในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์**, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2547.
- [6] กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, **สถิติสำหรับงานวิศวกรรม เล่ม 1**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น), 2540.
- [7] ชีวิน จันทรสุนทร และณฐา คุปตัยเชียร, “การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของภาพพิมพ์กรณีศึกษาการทดสอบขั้นสุดท้ายของการผลิตเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท,” **วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชวมงคลชัยบุรี**, ปีที่ 6, ฉบับที่ 12, 2551. หน้า 49 - 57.
- [8] กานดา พูนลาภทวี, **สถิติเพื่อการวิจัย**. คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ: ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, 2539.
- [9] ศรีไร จารุกัญญา, “การออกแบบการทดลอง (DOE),” **เอกสารประกอบการบรรยายวิชา, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลชัยบุรี**, 2554.
- [10] ประเมศ ชูติมา, **การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

- [11] เสาวภา แซ่ซัน, การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการพิมพ์ออฟเซตบนกล่องบรรจุภัณฑ์ โดยการออกแบบการทดลอง กรณีศึกษาโรงงานผลิตกล่องบรรจุภัณฑ์ประเภทกระดาษ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2549.
- [12] กฤษณ์ ประสงค์เจริญ, การปรับปรุงกระบวนการลากขึ้นรูปสีกโดยกรรมวิธีเคลือบผิวแม่พิมพ์ ด้วยฟิล์มแข็ง, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2546.
- [13] พิมพ์พร ดาวัลย์ม, การศึกษากระบวนการทึบขึ้นรูปร้อนเพลลาขับท้ายเพื่อหาแนวทางยืดอายุการใช้งานแม่พิมพ์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2553.
- [14] Donald M. Mattox, **Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing**, Society of Vacuum Coaters, Albuquerque, New Mexico, 1998.
- [15] “เครื่องชุบเคลือบผิวแข็ง PVD (PVD Hard Coatings),” **Sulzer Metaplas** (สื่ออิเล็กทรอนิกส์ แนะนำข้อมูลผลิตภัณฑ์), 2007.
- [16] ไชยวัฒน์ โชควัฒน์วิกุล, ผลของเฟสในวัสดุป่าต่อการเคลือบไทเทเนียมอะลูมิเนียมไนไตรต์ โดยวิธีตกเคลือบด้วยไอทางกายภาพแบบแคโทดิกอาร์ค, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2554.
- [17] Kenneth G. Budinski and Michel K. Budinski, “Properties and Selection,” **Engineering Materials**, Upper Saddle River, New Jersey, 1999.
- [18] ศูนย์เครือข่ายบริการทดสอบ วิเคราะห์ วิจัย ด้านอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, **อิทธิพลของตัวแปรต่อลักษณะและสมบัติทางกลของสารเคลือบในงานชุบ PVD**, สืบค้นจาก (ออนไลน์) Available: <http://www.tsnc.in.th/index.php?CID=118> [เข้าถึง 20 สิงหาคม 2555]
- [19] A. Ehrlich, M. Kühn, F. Richter and W. Hoyer, “Complex Characterisation of Vacuum Arc-Deposited Chromium Nitride Thin Films,” **Surface and Coatings Technology**, Elsevier, 76-77, p. 280-286, 1995.
- [20] R. Messier, A.P. Giri and R.A. Roy, “Revised Structure Zone Model for Thin Film Physical Structure,” **J. Vac. Sci. Technol.** A2 (2), Apr.-June, 1984.

- [21] J. Vetter, H.J. Scholl and O. Knotek, "(TiCr)N Coatings Deposited by Cathodic Vacuum Arc Evaporation," **Surface and Coatings Technology**, 74-75, p. 286-291, Elsevier, 1995.
- [22] H. Oettel, S.Hogmark and J.Stebut, "Mechanical Behaviour of PVD," **Coated Materials**, B287 Werkstoffwissenschaft Werkstoff-fertigungstechnologie, 1998.
- [23] ศนิรัช ทับทิมทอง, การปรับปรุงกระบวนการผลิตแผงวงจรแบบอ่อน เพื่อลดปัญหาการโค้งงอ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2551.
- [24] ชรรยง เตชะวิจิตร, การลดของเสียจากกระบวนการล้างฟิล์มป้องกันการชุบทองของแผงวงจรแบบอ่อนด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต การจัดการอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2550.
- [25] สมชาย วิกรานตานนท์, การเพิ่มอายุแม่พิมพ์ทึบขึ้นรูปร้อนมาตรฐาน LCX15 โดยวิธีการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลอง, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548.
- [26] วรวิทย์ สงวนพันธ์, การเพิ่มอายุการใช้งานของดวงตราเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนชนิดราคา 1 บาท ใหม่, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554
- [27] ปกรณ์ ชุมรม, การยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์เจาะรูในการผลิตคลิปรัดแหงนสปริง, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2553.
- [28] Yucong Wang, "A study of PVD coatings and die materials for extended die-casting die life2," **Surface and Coatings Technology**, 94-95, 1997, pp. 60-63.
- [29] L.W. Ma, J.M. Cairney and M.J. Hoffman, "P.R. Munroe. Effect of coating thickness on the deformation mechanisms in PVD TiN-coated steel," **Surface & Coatings Technology** 204, 2010, pp. 1764-1773.
- [30] Hogmark, S., Jacobson, S. and Larsson, "M. Design and Evaluation of Tribological Coatings," **Journal of Wear**, Vol. 246, Issues 1-2, 2000, pp. 20-33.
- [31] Mitterer, C., Holler, F., Reitberger, D. and R. Kullmer, "Industrial Applications of PACVD Hard Coatings," **Journal of Surface and Coatings Technology**, Vol. 163-164, 2003, pp. 716-722.

- [32] Pesch, P, “Performance of hard coated steel tools for steel sheet drawing,” **Journal of Surface and Coatings Technology**, Vol. 163-164, 2003, pp. 739-746.
- [33] Böhler Special Steel, **Böhler W360 Hot Work Tool Steel** (Online), Available:
http://www.bohlersteel.com/buag_frontend/download/grade/W360DE.pdf (2 April 2013).
- [34] บริษัท แอลเอ็ม อินเตอร์เนชันแนล เอ็นจิเนียริง จำกัด, **การเคลือบผิวด้วยกระบวนการแบบ PVD Coating** (ออนไลน์), Available: <http://lm.co.th/www/pvdcoat.html> (4 เมษายน 2556).
- [35] B. Girish Dy, **Director National Productivity Council Chennai**. “**The 7 QC Tools** (Online), Available:<http://www.productivity.in/knowledgebase/TQM/c.%20Tools%20and%20Techniques/3.1.%207QC%20Tools/7%20QC%20TOOLS.pdf>. (10 December 2012).
- [36] สถาบันเพิ่มผลผลิตแห่งชาติ, **เครื่องมือคุณภาพ 7 ชนิด** (ออนไลน์), Available:
http://youth.ftpi.or.th/index.php?option=com_content&task=view&id=35&Itemid=42.
 (31 ตุลาคม 2555).
- [37] ศูนย์เครือข่ายบริการทดสอบ วิเคราะห์ วิจัย ด้านอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, **การทดสอบงานเคลือบผิวเพื่อหาคุณสมบัติทางกลและอื่นๆ** (ออนไลน์), Available:
<http://www.tsnc.in.th/index.php?CID=119> (10 เมษายน 2556).
- [38] ชวนันท์ ทองโยธี, **การศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติที่ผิวของเหล็กแม่พิมพ์ SKD11 จากกระบวนการ Surface Treatment แบบต่างๆ**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548.
- [39] สิริินทร์ ต้นตรงศรี, **การลดต้นทุนการผลิตโดยวิธีโปรแกรมเชิงเส้น: กรณีศึกษาบริษัทผู้ผลิตกระดาษแห่งหนึ่ง**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการบริหารเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2553.
- [40] คู่มือเครื่องและแนะนำข้อมูลผลิตภัณฑ์, “**เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)**,” ใน **Fischer type XAN**, 2010.





ภาคผนวก ก

มาตรฐานการตรวจสอบและข้อมูลอื่นที่เกี่ยวข้อง

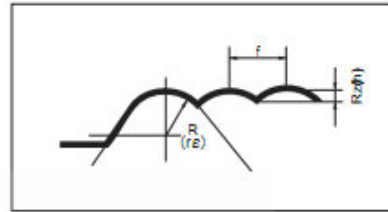
Surface Roughness (JIS B 0601-2001)

Theoretical (Geometrical) Surface Roughness

Theoretical Surface Roughness at Turning indicates the minimum roughness value from the cutting conditions and it is shown by the formula as follows:

$$Rz(h) = \frac{f^2}{8R(re)} \times 10^3$$

Rz(h) : Theoretical Surface Roughness (μm)
 f : Feed Rate (mm/rev)
 R(re) : Corner Radius of Insert (mm)



How to Obtain Surface Roughness Values

Type	Symbol	How to Obtain	Explanation
Max. Height Roughness	Rz	Rz is obtained from the distance in micron meter between the highest peak and the lowest valley in the range of sampled reference length (l) to the direction of mean line of the roughness curve. $Rz = Rp + Rv$	
Ten Points Mean Roughness	Rz1/5	Rz is obtained from the total in micron meter of the mean value of the each distance between the mean line and 5 peaks (Yp) from the highest one, and the mean value of the each distance between the mean line and the 5 valleys (Yv) from the lowest one, of the roughness curve in the range of sampled reference length "l". $Rz_{1/5} = \frac{(Yp1+Yp2+Yp3+Yp4+Yp5) + (Yv1+Yv2+Yv3+Yv4+Yv5)}{5}$	 Yp1, Yp2, Yp3, Yp4, Yp5 : Distance from the mean line to highest 5 peaks in the range of sampled reference length "l". Yv1, Yv2, Yv3, Yv4, Yv5 : Distance from the mean line to the lowest 5 valleys in the range of sampled reference length "l".
Arithmetical Mean Roughness	Ra	Ra is obtained from the following formula in micron meter when the roughness curve is expressed by y(x), taking X-axis to the mean line direction and Y-axis to the vertical magnification of the roughness curve in the range of sampled reference length "l". $Ra = \frac{1}{l} \int_0^l y(x) dx$	

Relationship with Triangle Symbol

Arithmetical Mean Roughness Ra(μm)	Max. Height Roughness Rz(μm)	Ten Points Mean Roughness Rz1/5(μm)	Note: (Relationship with Triangle)
0.025	0.1	0.1	▽▽▽
0.05	0.2	0.2	
0.1	0.4	0.4	
0.2	0.8	0.8	
0.4	1.6	1.6	▽▽
0.8	3.2	3.2	
1.6	6.3	6.3	
3.2	12.5	12.5	▽
6.3	25	25	
12.5	50	50	▽
25	100	100	

Note: Finishing symbol (Triangle with wave) was established from JIS standard from 1994 Revision.

How to Indicate

Example

- ①When Ra is 1.6μm—1.6μmRa
- ②When Rz is 6.3μm—6.3μmRz
- ③When Rz1/5 is 6.3μm—6.3μmRz1/5

Indication in JIS Standard

Example of Ra Indication	Example of Ry, (Rz) Indication
①When indicating the upper limit only (when upper limit is 6.3μmRa)	①When indicating upper limit only indicates surface roughness following the parameter symbol.
②When indicating both lower and upper limit (when upper limit is 6.3μmRa, lower limit is 1.6μmRa)	②When indicating both lower and upper limit indicate surface roughness as (upper limit - lower limit) following the parameter symbol.

Note: The indications of Ra and Rz are different.

Surface Roughness Symbol Caution

The above information is based on JIS B 0601-2001.

However, some symbols were revised as shown in the right table in accordance with ISO Standard from JIS B 0601-2001 version.

Ten Points Mean Roughness (Rz) was eliminated from 2001 version but it still remains as RzJIS reference, since it was popular in Japan.

Type	Symbol of JIS B 0601-1994	Symbol of JIS B 0601-2001
Max. Height Roughness	Ry	Rz
Ten Points Mean Roughness	Rz	(RzJIS)
Arithmetical Mean Roughness	Ra	Ra

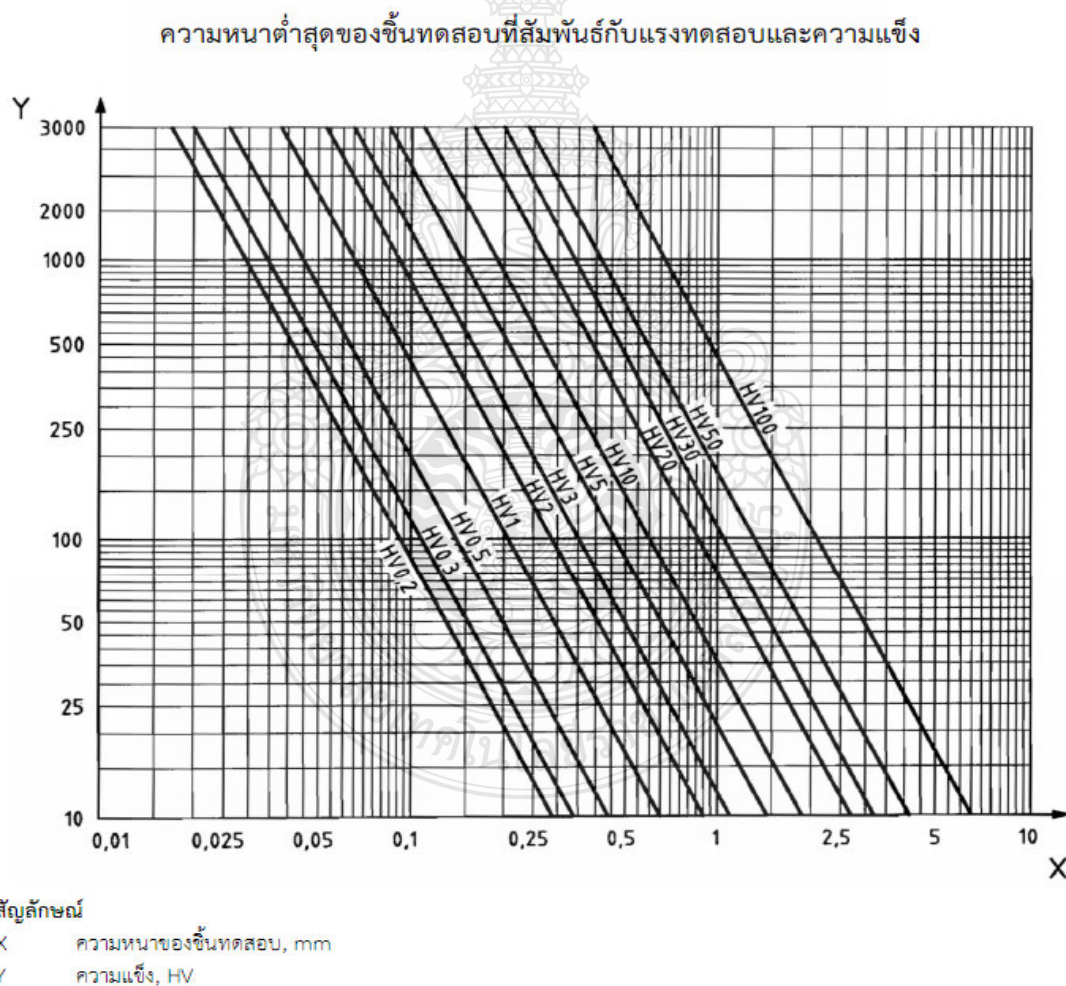
R
Technical Information

ภาพที่ ก.1 มาตรฐานการวัดความหยาบผิว JIS B 0601-2001

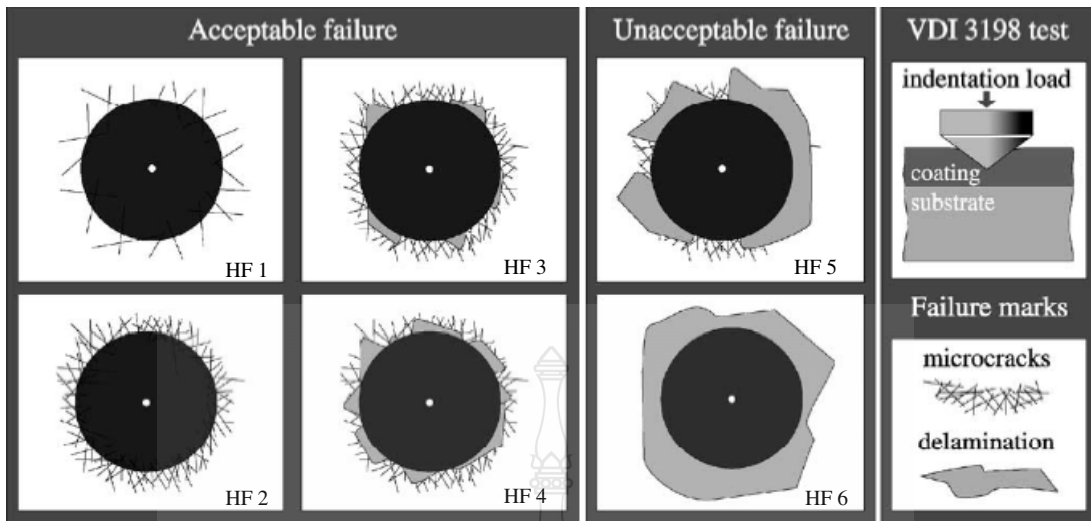
การทดสอบความแข็ง ⁿ		การทดสอบความแข็งแรงต่ำ		การทดสอบความแข็งจุลภาค	
สัญลักษณ์ความแข็ง	ค่าระบุของแรงทดสอบ F N	สัญลักษณ์ความแข็ง	ค่าระบุของแรงทดสอบ F N	สัญลักษณ์ความแข็ง	ค่าระบุของแรงทดสอบ F N
HV 5	49.03	HV 0.2	1.961	HV 0.01	0.098 07
HV 10	98.07	HV 0.3	2.942	HV 0.015	0.147 1
HV 20	196.1	HV 0.5	4.903	HV 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

ⁿ อาจใช้แรงทดสอบระบุที่มากกว่า 980.7 N ได้

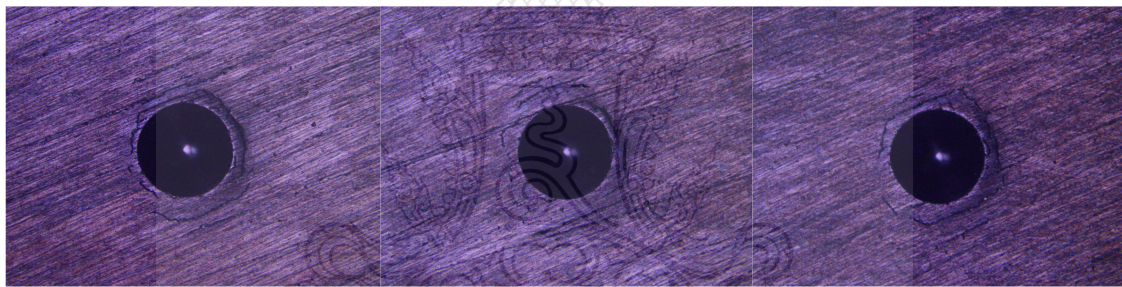
ภาพที่ ก.2 มาตรฐานแรงกดที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (ISO 6507-1)



ภาพที่ ก.3 มาตรฐานการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (ISO 6507-1)



ภาพที่ ก.4 The principle of the VDI 3198 indentation test



(ก) แสดงรอยกดบนผิวเคลือบ TiCN จำนวน 3 จุด



(ข) แสดงรอยกดบนผิวเคลือบ TiN จำนวน 3 จุด ในการทดสอบตามมาตรฐาน VDI 3198

ภาพที่ ก.5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง



(ก) เครื่องวัดความแข็งแบบมาโครฮาร์ดเนส ยี่ห้อ Wilson Wolpert รุ่น 600 MRD



(ข) ตำแหน่งรอยกดวัดความแข็งชิ้นงานทดสอบหลังชุบแข็งและอบคืนไฟ

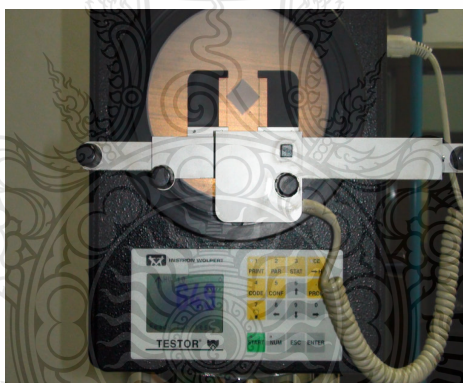
ภาพที่ ก.6 การวัดความแข็งแบบมาโครฮาร์ดเนส

ตารางที่ ก.1 ผลการวัดค่าความแข็งแบบมาโครฮาร์ดเนส บนชิ้นงานทดสอบ จำนวน 3 จุด

ค่าความแข็ง (HRC) ในแต่ละจุด			ค่าความแข็งเฉลี่ย (HRC)
จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	
57.5	57.8	57.7	57.6



(ก) เครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ส ยี่ห้อ Instron Wolpert รุ่น DIA TESTOR 7551

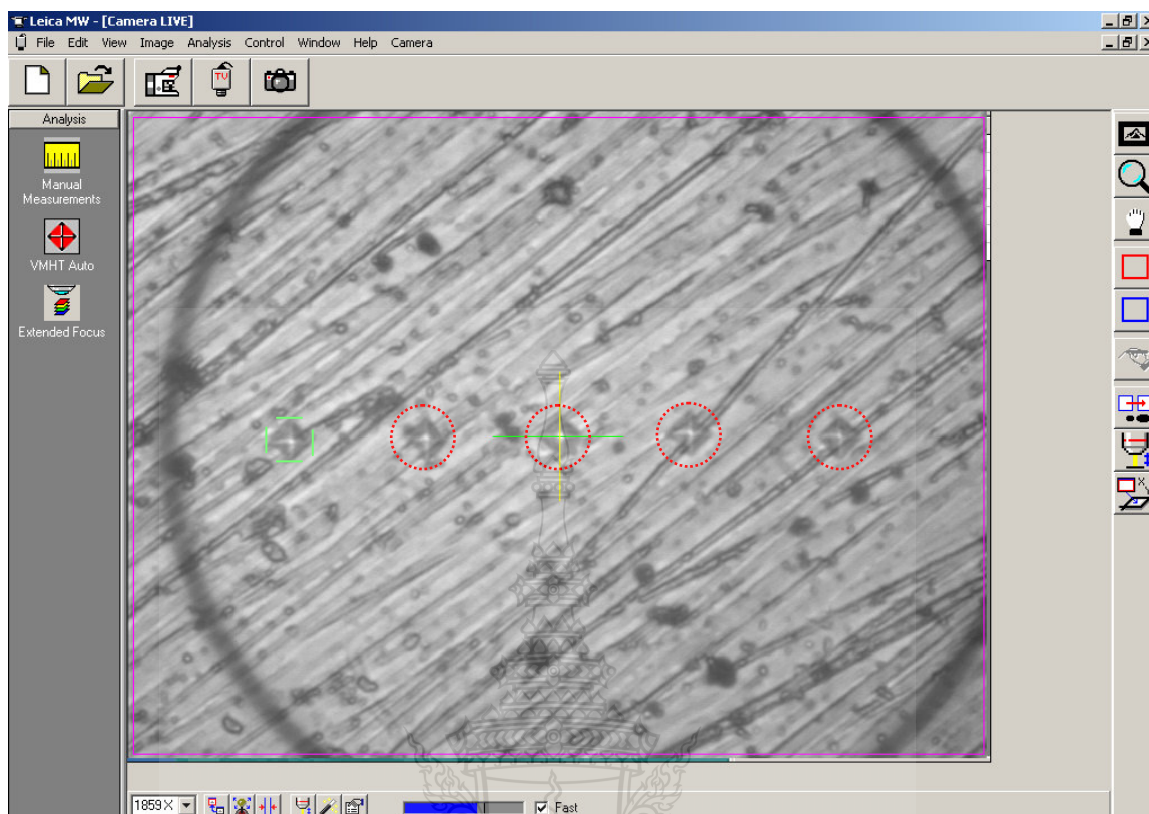


(ข) การตรวจสอบวัตรอยกกด ของเครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ส

ภาพที่ ก.7 การวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ส

ตารางที่ ก.2 ผลการวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ส บนชิ้นงานทดสอบ จำนวน 3 จุด

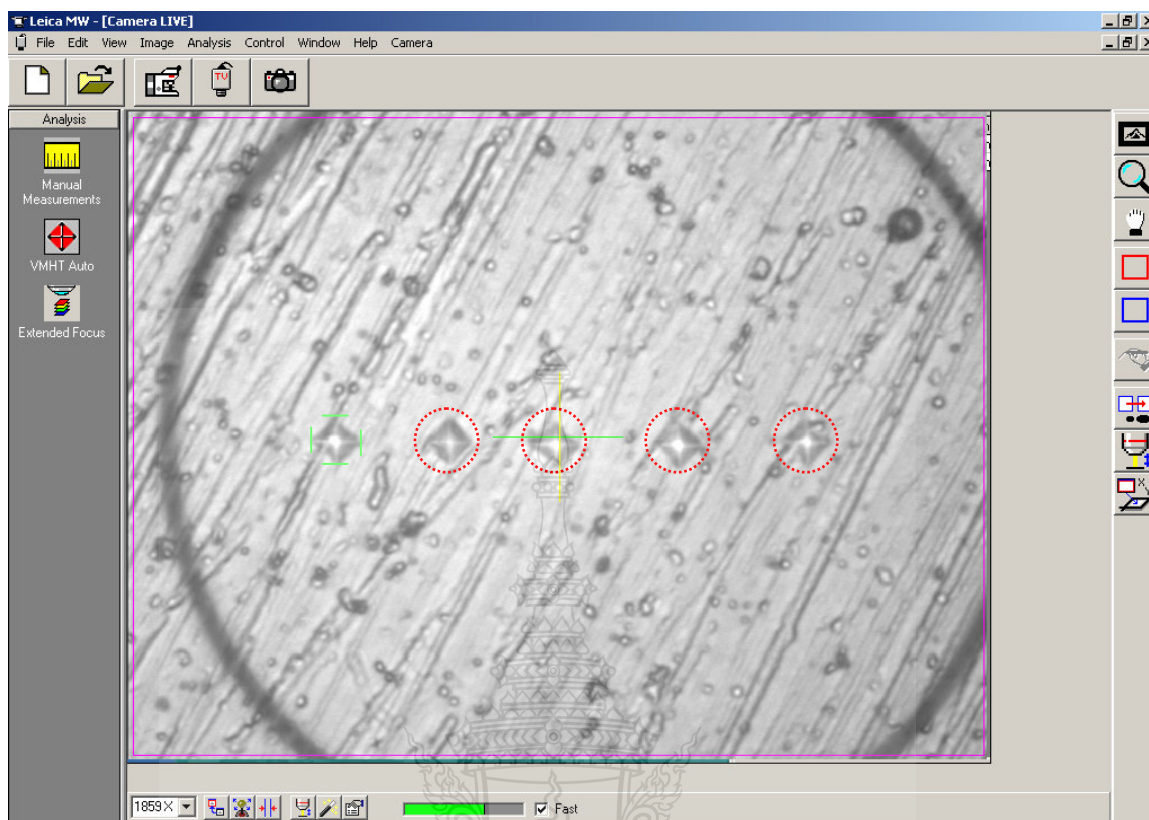
ค่าความแข็ง HV10 ในแต่ละจุด			ค่าความแข็งเฉลี่ย (HV 10)
จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	
642	651	649	647.3



Analysis Results VMHT Auto			
Results Raw Data Graph			
No./Specimen	Vickers Hardness	Diagonal 1	Diagonal 2
01/Specimen 1	2851 HV 0.05	5.6 μm	5.8 μm
02/Specimen 1	2894 HV 0.05	5.6 μm	5.7 μm
03/Specimen 1	3074 HV 0.05	5.4 μm	5.6 μm
04/Specimen 1	3075 HV 0.05	5.5 μm	5.5 μm
05/Specimen 1	2982 HV 0.05	5.6 μm	5.6 μm

Analysis Results VMHT Auto	
Results Raw Data Graph	
Specimen 1	Statistics
Average	2975 HV 0.05
Maximum	3075 HV 0.05
Minimum	2851 HV 0.05
Std. Deviation	45.77
Number	5

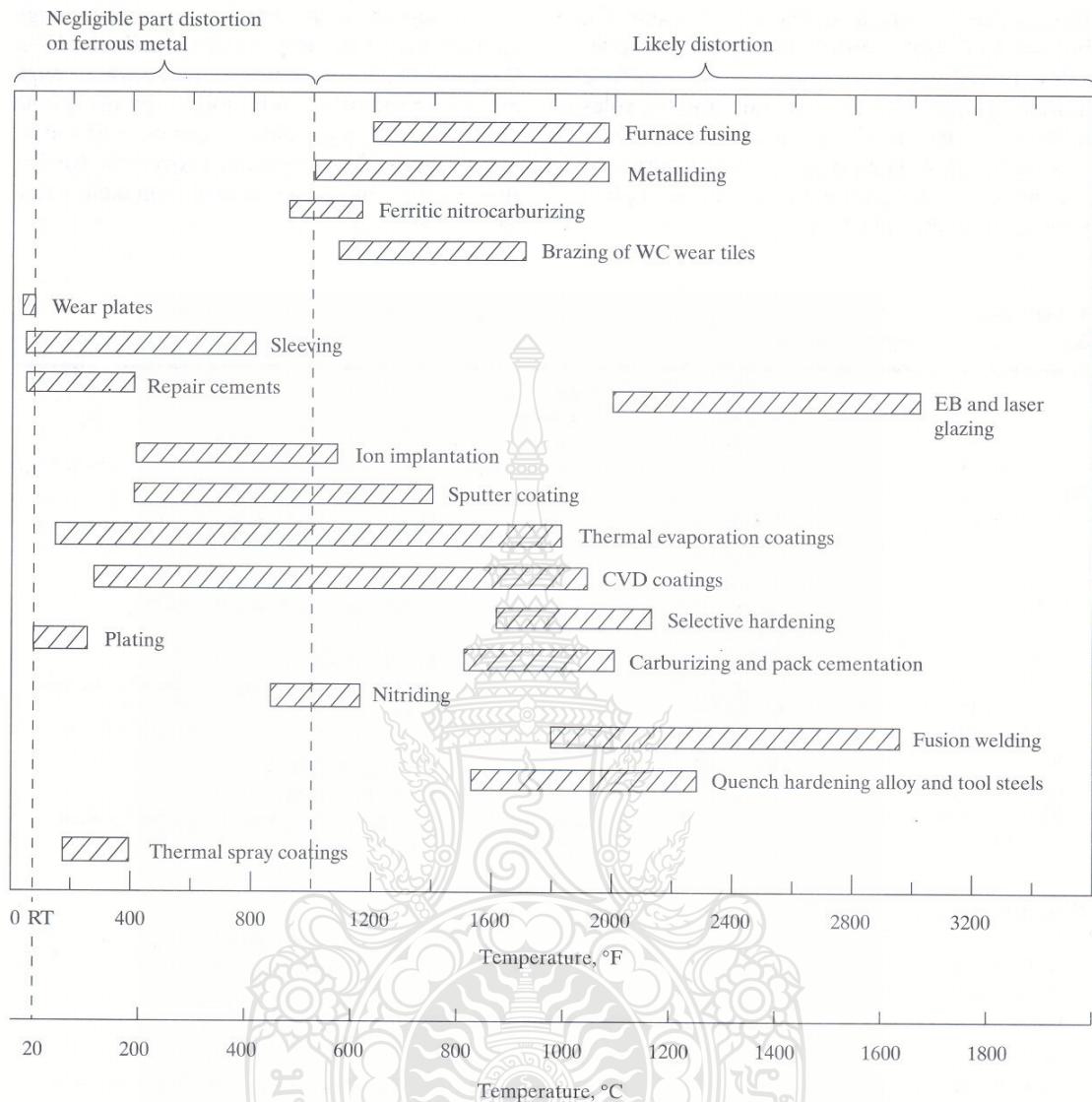
ภาพที่ ก.8 การวัดความแข็งผิวเคลือบ ด้วยเครื่องไมโครฮาร์ดเนส บนผิวเคลือบ TiCN



Analysis Results VMHT Auto			
Results Raw Data Graph			
No./Specimen	Vickers Hardness	Diagonal 1	Diagonal 2
01/Specimen 1	2191 HV 0.05	6.5 μ m	6.5 μ m
02/Specimen 1	2081 HV 0.05	6.3 μ m	7.0 μ m
03/Specimen 1	2190 HV 0.05	6.5 μ m	6.5 μ m
04/Specimen 1	2078 HV 0.05	6.6 μ m	6.8 μ m
05/Specimen 1	2134 HV 0.05	6.3 μ m	6.8 μ m

Analysis Results VMHT Auto	
Results Raw Data Graph	
Statistics	
Specimen 1	
Average	2135 HV 0.05
Maximum	2191 HV 0.05
Minimum	2078 HV 0.05
Std. Deviation	24.72
Number	5

ภาพที่ ก.9 การวัดความแข็งผิวเคลือบ ด้วยเครื่องไมโครฮาร์ดเนส บนผิวเคลือบ TiN



ภาพที่ ๑.๑๐ Temperature encountered in various surface engineering processes

	Typical thickness ^a (mils)	Approximate hardness (kg/mm ²)	Use
<i>Platings</i>			
Chromium	Flash 0.05 to 0.1 Avg. 0.1 to 1 Heavy 0.5 to 2.5	900	Decorative surfaces wear parts
Copper	Avg. 0.5 to 1 Heavy 2.0 to 5.0	150	Conductive surface underplating
Gold	0.02 to 0.1	80	Electrical contacts
Nickel (soft)	0.1 to 0.5	250	Atmospheric corrosion resistance durable surfaces
(hard)	0.7 to 1.5 Heavy 2 to 50	500	
Silver	0.1 to 0.3	100	Galling resistance
Zinc	0.2 to 0.5	100	Rust protection on steel
Electroless nickel + PTFE	0.5 to 1 0.5 to 1	450 as plated 650 aged	Atmospheric corrosion resistance, wear surfaces
<i>Conversion Coatings</i>			
Anodizing	0.4 to 0.6	1100	Corrosion protection
Hardcoating	1 to 3	1100	Abrasion resistance
Phosphate/chromate	0.001 to 0.4	150	Improved rust resistance
Black oxide	0.001 to 0.1	150	Appearance
<i>Thin-Film Coatings</i>			
PVD TiN/TiCN	0.05 to 0.1	800 to 1800	Abrasion resistance
PVD Pure Metals	0.005 to 0.01	—	Decorative
<i>Hardfacing</i>			
ERCoCr-A (cobalt [®] base)	100 to 200	420	Galling/corrosion
420 stainless steel	100 to 200	550	Corrosion/wear
RFe Cr-Al (iron/chromium)	125 to 250	600	High stress abrasion

ภาพที่ ก.11 Surface engineering processes



ภาพที่ ก.12 การเตรียมชิ้นงานทดสอบเพื่อตรวจสอบค่าต่างๆของผิวเคลือบ

ตารางที่ ก.3 ผลการวัดความหนาผิวเคลือบและอุณหภูมิชิ้นงานทดสอบ TiN และ TiCN

ชนิดสารเคลือบ	อุณหภูมิ (°C)	ระดับความหนา 2 μm			ความหนาเฉลี่ยรวม (μm)	ระดับความหนา 3 μm			ความหนาเฉลี่ยรวม (μm)
	$H \leq 500 L \leq 250$	ค่าที่วัดได้ (μm)				ค่าที่วัดได้ (μm)			
	ค่าที่อ่านได้ (°C)	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3		จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	
TiN	423-428 (H)	1.91	1.99	2.04	1.98	2.93	2.96	2.98	2.95
TiN	218-223 (L)	1.89	1.97	1.98	1.94	2.96	2.99	3.02	2.99
TiCN	339-346 (H)	1.94	2.02	2.04	2.00	2.96	2.98	3.02	2.98
TiCN	235-242 (L)	1.97	1.99	2.01	1.99	2.92	3.04	3.09	3.01

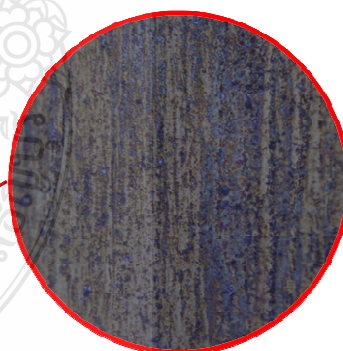
ตารางที่ ก.4 ข้อมูลและจำนวนเหรียญที่ได้จากทดลองปั๊มเหรียญกษาปณ์

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	สารเคลือบ	ความหนา	อุณหภูมิ	อายุการใช้งาน
1	17	1	1	TiN	2	250	610009
2	18	1	1	TiCN	2	250	585425
3	8	1	1	TiN	3	250	770155
4	1	1	1	TiCN	3	250	700385
5	14	1	1	TiN	2	500	960851
6	10	1	1	TiCN	2	500	800501
7	2	1	1	TiN	3	500	1218107
8	7	1	1	TiCN	3	500	1105353
9	19	1	1	TiN	2	250	620734
10	12	1	1	TiCN	2	250	601423
11	3	1	1	TiN	3	250	795003
12	22	1	1	TiCN	3	250	681009
13	4	1	1	TiN	2	500	977120
14	11	1	1	TiCN	2	500	813423
15	9	1	1	TiN	3	500	1257482
16	20	1	1	TiCN	3	500	1025876
17	24	1	1	TiN	2	250	619455
18	21	1	1	TiCN	2	250	598706
19	15	1	1	TiN	3	250	740752
20	16	1	1	TiCN	3	250	657900
21	5	1	1	TiN	2	500	907001
22	13	1	1	TiCN	2	500	850781
23	6	1	1	TiN	3	500	1194744
24	23	1	1	TiCN	3	500	1149651

สารเคลือบ TiCN



สารเคลือบ TiN



ภาพที่ ก.13 ตัวอย่างความชำรุดของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญหลังการใช้งานที่อายุมากกว่า 1,000,000 เหรียญ

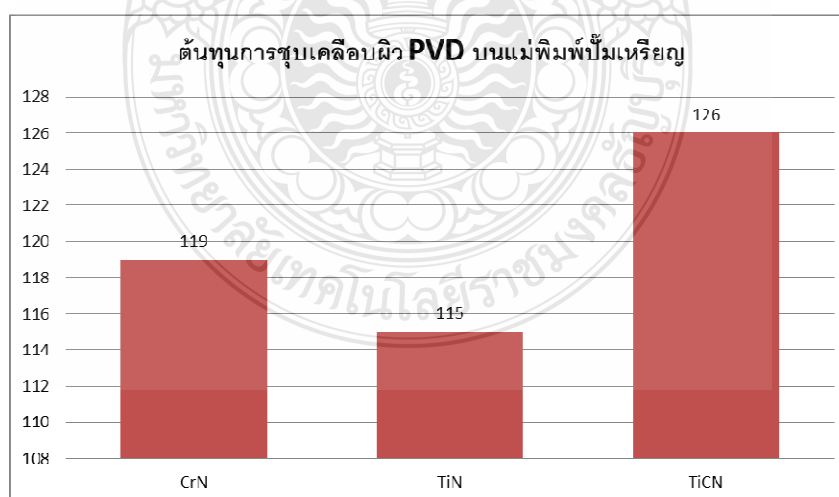
ข้อมูลการเปรียบเทียบต้นทุนการชุบเคลือบ PVD ของแต่ละชนิดสารเคลือบ



ตารางที่ ก.4 รายละเอียดของแท่งคาร์โทดที่ใช้งาน

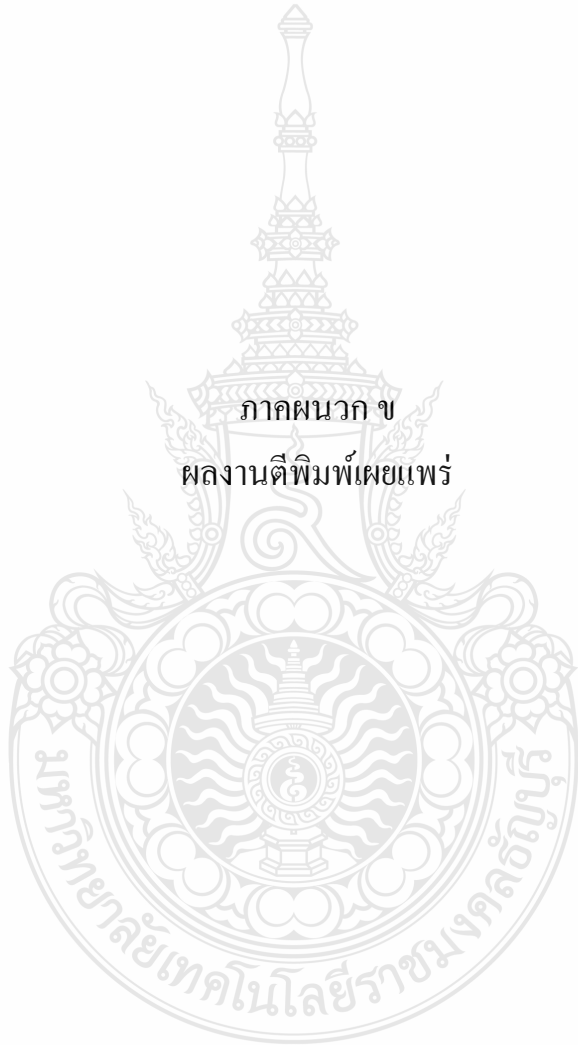
รายละเอียด	ชนิดคาร์โทด	
	ไทเทเนียม (Ti)	โครเมียม (Cr)
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง	60 มม.	60 มม.
น้ำหนักต่อชิ้น	378 กรัม	695 กรัม
ราคาต่อชิ้น	5,000 บาท	13,500 บาท
จำนวนรอบการใช้งาน (3 μm)	12 - 15 รอบ	24 - 28 รอบ

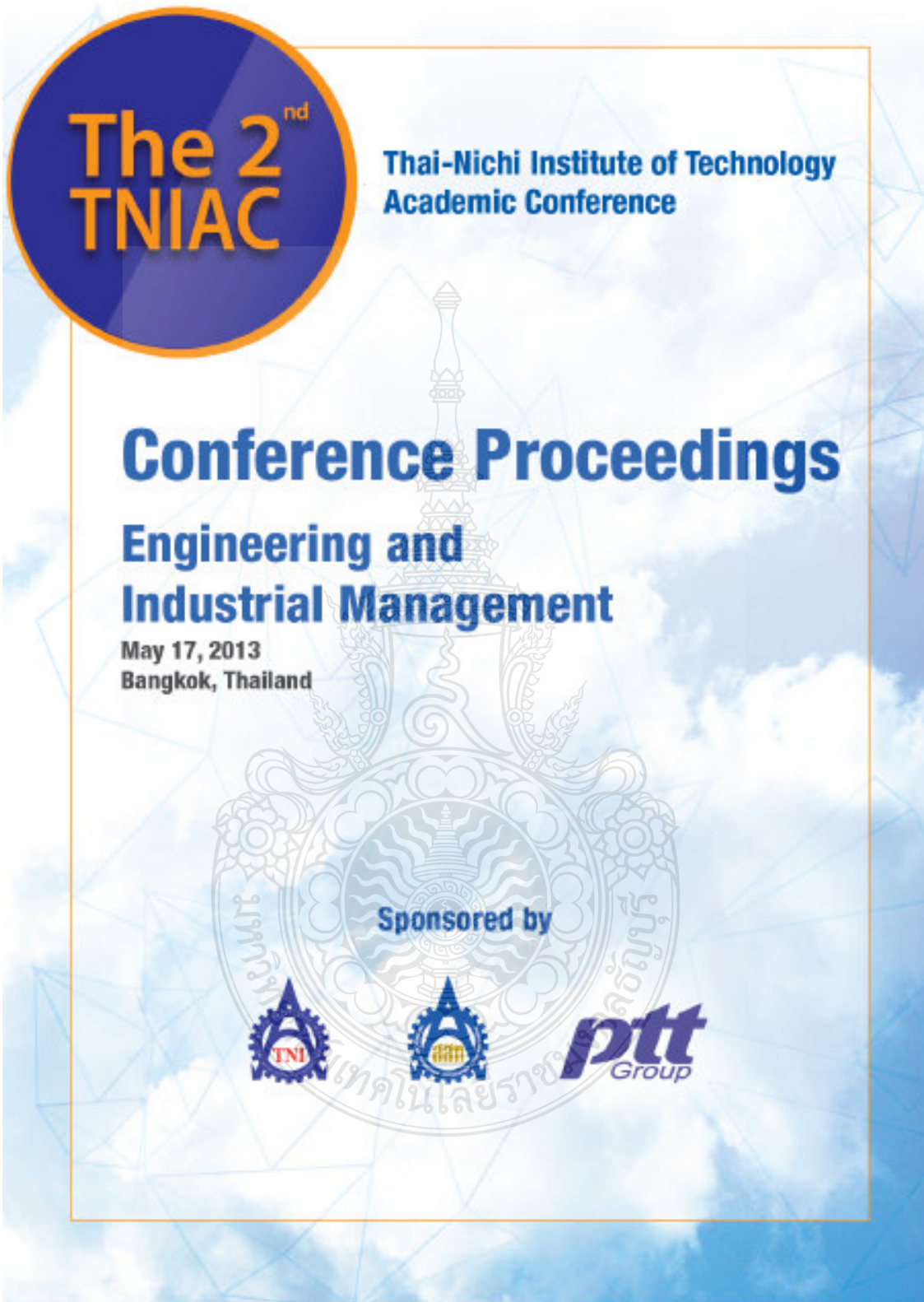
หน่วย: บาทต่อชิ้น



ภาพที่ ก.14 การเปรียบเทียบต้นทุนต่อหน่วย (คำนวณที่ปริมาณการเคลือบต่อรอบ 80 ชิ้น)

ภาคผนวก ข
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่





Editor-in-Chief

Associate Professor Dr. Pichit Sukcharoenpong

Vice President of Academic Affairs

Thai-Nichi Institute of Technology (TNI)

Bangkok 10250, Thailand

Telephone: 662 763 2631 Ext. 2631

Fax: 662 763 2725

Email: pichit@tni.ac.th

Internet: <http://www.tni.ac.th/tniac>

Assistant Editor

Dr. Jintawat Chaichanawong

Faculty of Engineering

Thai-Nichi Institute of Technology (TNI)

Bangkok 10250, Thailand

Email: jintawat@tni.ac.th

Referees

Professor Dr. Sura Lekhakul, Thai-Nichi Institute of Technology

Assistant Professor Dr. Aroonluck Vithayavijin, Thai-Nichi Institute of Technology

Assistant Professor Dr. Lerkiat Vongsampigoon, Thai-Nichi Institute of Technology

Assoc. Prof. Dr. Natha Kuptasthien Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Associate Professor Dr. Penkhae Pachonpachanuk, Thai-Nichi Institute of Technology

Associate Professor Dr. Pichit Sukcharoenpong, Thai-Nichi Institute of Technology

Asst. Prof. Dr. Adisorn Leelasantitham Mahidol University

Asst. Prof. Dr. Nuttapol Limjeerajarus Thai-Nichi Institute of Technology

Asst. Prof. Dr. Pisut Pongchairerks Thai-Nichi Institute of Technology

Asst. Prof. Dr. Thosapon Katejanekarn Silpakorn University

Asst. Prof. Dr. Warakorn Nerdnoi Thai-Nichi Institute of Technology

Asst. Prof. Dr. Warakorn Srichavengsup Thai-Nichi Institute of Technology

Asst. Prof. Dr. Wipawadee Wongsuwan Thai-Nichi Institute of Technology

Dr. Apiluck Eiad-ua King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Dr. Boontariga Kasemsontitum Sirindhorn International Institute of Technology

Dr. Chansiri Singhtaun Kasetsart University

Dr. Dumrongkiat Ratana-Amornpin Thai-Nichi Institute of Technology

Dr. Jintawat Chaichanawong Thai-Nichi Institute of Technology

Dr. Korakot Hemsathapat, Thai-Nichi Institute of Technology

Dr. Nawin Viriya-empikul National Nanotechnology Center

Dr. Phaisarn Sudwilai Thai-Nichi Institute of Technology

Dr. Pipat Chaiwiwatworakul The Joint Graduate School of Energy and Environment

Dr. Ramidayu Yousuk Kasetsart University

Dr. Sunida Aroonpipat Pridi Banomyong International College, Thammasat University

Dr. Weerawut Chaiwat Mahidol University, Kanchanaburi Campus

Dr. Wimol San-Um Thai-Nichi Institute of Technology

Dr. Wipawan Wongsuwan Kongpow Chulalongkorn University



LIST OF ABSTRACTS

Industrial and Engineering Technology	A
<i>การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตของสายการผลิตคอยล์เย็น</i>	A1-1
วารุณี ปิ่นฮวน, วงศ์พรรค บัณฑิตกุล, จริญญา วันแก้ว, จินตวัฒน์ ไชยชนวงค์	
<i>การลดปัญหาความบกพร่องของชิ้นงานในเรือนลับที่เกิดจากโพรงอากาศในระหว่างกระบวนการหล่อขึ้นรูป</i>	A1-2
พิมพ์เพชร สระทองอ่อน, จรียา โภกบาทลี, ประภินทร์ ตั้งวรรณธร, ณัฐพล ลิ่มจิระจรัส	
<i>การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเชื่อมโลหะด้วยไฟฟ้าแบบใช้ก๊าซคลุมสำหรับ</i>	A1-3
<i>เหล็กกล้าไร้สนิมโดยวิธีการออกแบบการทดลอง</i>	ชนิภา นีวาสุวานนท์, จันท์ศิริ สิงห์เลื่อน
<i>การทดสอบระบบทำความเย็นแบบนาฟเพียนเมมเบรนกับท่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบเพิ่มขนาด 300 วัตต์</i>	A2-1
วิภาวดี วงษ์สุวรรณ, นฤทธิ์ หล่อประยสิทธิ์	
<i>การกำหนดมาตรฐานการผูกมัดยึดโยงวัสดุอุปกรณ์การสำรวจและผลิตก๊าซธรรมชาติเพื่อการขนส่งทางถนน</i>	A2-2
ณรงค์ศักดิ์ ตับทุกข์, จันท์ศิริ สิงห์เลื่อน	
<i>การกำหนดปัจจัยในการจับเคลื่อนผิว PVD บนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท เพื่อลดต้นทุน</i>	A2-3
<i>การผลิต</i>	ธีระยุทธ วงศ์สนามเมณี, สมศักดิ์ อธิธิโสภณกุล
<i>ผลกระทบของสภาวะการตัดเฉือนที่มีผลต่อความเรียบของผิวงานกลึง</i>	A2-4
ชูศักดิ์ งามวงศ์, จินตวัฒน์ ไชยชนวงค์	
<i>การออกแบบความเย็นในไหลดงเซลล์</i>	A2-5
ชาคริต วรรณศิริ, ก้อง ศรีสมพงษ์, ชินรัฐ ภัทติชาติ, นริช นรินทร, เลอเกียรติ วงศ์สารพิกุล	
<i>Stable Photovoltaic Generation by Boost Converter via Adaptive ILQ Servo-Control</i>	A3-1
Yuichiro Nagano, Sorawit Stapornchaisit, Hiroshi Takami, Sidshchadhaa Aumted	
<i>Multivariate Statistical Process Control for On-line Monitoring Size of Milling Process</i>	A3-2
Bundit Boonkhao, Xue Z. Wang	



The 2nd TNIAC: Thai-Nichi Institute of Technology Academic Conference
 “Engineering and Industrial Management”
 May 17, 2013. Thai-Nichi Institute of Technology

การกำหนดปัจจัยในการชุบเคลือบผิว PVD บนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์

ชนิดราคา 1 บาท เพื่อลดต้นทุนการผลิต

The determining factor in PVD coating on 1 baht coin die

to reduce production cost

ธีระยุทธ วงศ์สมานมณี¹ และ สมศักดิ์ อภิทธิโสภณกุล²

¹ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ถนนรังสิต - นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี รหัสไปรษณีย์ 12110

E-mail: teerayut_wo@yahoo.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาปัจจัยระดับที่เหมาะสมในการชุบเคลือบผิวแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท เพื่อเพิ่มอายุการใช้งาน ด้วยกระบวนการชุบ PVD (Physical Vapor Deposition) โดยประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) ผู้วิจัยใช้วิธีการออกแบบการทดลองเป็นแบบ 2^k Factorial Design ซึ่งประกอบด้วย 3 ปัจจัยหลักได้แก่ สารเคลือบผิวชนิดไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiCN) ที่ระดับความหนา $\leq 2 \mu\text{m}$ และ $\leq 3 \mu\text{m}$ ใช้อุณหภูมิในการชุบเคลือบผิว $\leq 250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $\leq 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เพื่อศึกษาผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมของปัจจัยต่างๆ และในการจัดลำดับการทดลองเป็นการจัดลำดับการทดลองให้เป็นแบบสุ่มสมบูรณ์ โดยใช้วิธีวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ในการดำเนินการวิจัยนี้สามารถนำผลการทดลองไปใช้ปรับปรุงกระบวนการชุบเคลือบผิว PVD บนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท เพื่อให้มีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 50 - 90 จากอายุการใช้งานเดิม ซึ่งจะช่วยให้ต้นทุนในการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 1 บาท ลดลงได้ประมาณร้อยละ 25 ของต้นทุนการผลิตปัจจุบัน และสามารถนำกำลังการผลิตที่คงเหลือไปรับจ้างผลิตงานอื่นจากหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชนเพื่อทำให้ต้นทุนการผลิตต่อหน่วยลดลงได้ อีกทั้งเป็นแนวทางในการต่อยอดการทำวิจัยต่อไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการศึกษาเทคโนโลยีระดับนาโนมาประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรม

คำสำคัญ: การทดลองเชิงแฟคทอเรียล, แบบสุ่มสมบูรณ์, แม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์, กระบวนการชุบ PVD, ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN), ไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiCN)

Abstract

The objective of this research (experiment) is to study the proper factor of increasing the die life for 1 Baht's coin die by using PVD (Physical Vapor Deposition) coating method. This research

(experiment) has been designed by using 2^k Factorial Design method, composing of three main factors those are Titanium Nitride (TiN) Coating, Titanium Carbo Nitride (TiCN) coating with the coating thickness of $\leq 2 \mu\text{m}$ and $\leq 3 \mu\text{m}$ and the coating temperature of $\leq 250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ and $\leq 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ in order to observe the main impact and interaction of each factor. Beside this, the sequencing idea of this research is based on Completely Randomized Design with the Statistical analysis by the confidence level of 95%

The result from this research (experiment) reveals that the die life of 1 Baht coin die has been increasing about 50% - 90%, then, the production cost of this coin die has also been reduced more about 25% from the present. Furthermore, the additional time from the remained coin die's production capacity can also be used for another application job to earn any revenue back from both Government organization part and another private company section. In the future, the result from this research can also be used as the knowledge base for the continual improvement of the next research especially for the study of Nano Technology to be applied with this in industrialize scale.

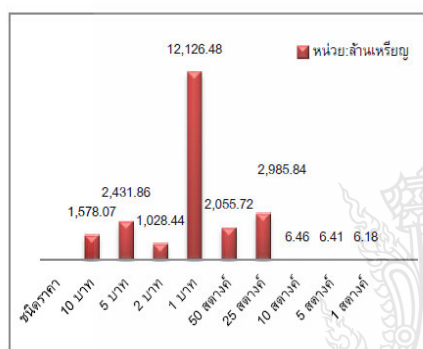
Keywords: Factorial Design method, Absolutely randomize, Coining Die, PVD coating, Titanium Nitride (TiN), Titanium Carbo Nitride (TiCN)

1. บทนำ

ปัจจุบันโรงกษาปณ์ประเทศไทยยังไม่สามารถผลิตเหรียญตัวเปล่าที่เป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนได้เอง ยังคงต้องซื้อเหรียญโลหะตัวเปล่าจากภายนอก ทำให้ต้นทุนในการผลิตสูง ต้นทุนในการผลิตเหรียญแต่ละชนิดราคาประกอบด้วยค่าเหรียญโลหะตัวเปล่า (ค่าโลหะบวกค่าจัดทำ) ภาชนะนำเข้า ภาษีมูลค่าเพิ่ม ค่าขนส่ง ค่าใช้จ่ายในการผลิตของโรงกษาปณ์ เช่น การจัดทำแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ การปั๊มเหรียญ การนำ

บรรจุ และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ ซึ่งต้นทุนของเหรียญทุกชนิดราคา มีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามราคาโลหะในตลาดลอนดอน (LME) ทำให้ต้นทุนการผลิตเหรียญเพิ่มสูงขึ้น บางชนิดราคาสูงกว่าราคาหน้าเหรียญ นอกจากนี้ ต้นทุนค่าเหรียญโลหะตัวเปล่าที่ต้องแปรผันไปตามราคาโลหะแล้ว ต้นทุนการผลิตของโรงกษาปณ์ก็เพิ่มสูงขึ้นด้วย

เนื่องจากการผลิตเหรียญกษาปณ์เป็นกิจการที่ไม่มุ่งเน้นการแสวงหากำไร แต่ต้องควบคุมไม่ให้มูลค่าโลหะสูงกว่าราคาหน้าเหรียญเพื่อป้องกันการนำเหรียญไปหลอมแล้วนำโลหะไปใช้ประโยชน์อย่างอื่น และผลการดำเนินงานโดยรวมไม่ขาดทุนเพื่อไม่เป็นการกีดกันเงินทุนหมุนเวียนและงบประมาณของประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนชนิดราคา 1 บาท ซึ่งเป็นเหรียญที่มีปริมาณการผลิตต่อปีสูงเฉลี่ย 600 - 1,000 ล้านเหรียญ (ขึ้นอยู่กับสภาวะเศรษฐกิจ) และเป็นเหรียญที่มีปริมาณการหมุนเวียนในระบบเศรษฐกิจของประเทศมากที่สุด (ประมาณร้อยละ 56 ของจำนวนเหรียญกษาปณ์ทั้งหมด) ดังข้อมูลในรูปที่ 1



ที่มา: กองแผนงาน กรมธนารักษ์

รูปที่ 1 ปริมาณเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนในระบบเศรษฐกิจ ปี 2555

จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงการผลิตที่เกี่ยวข้องเพื่อลดต้นทุนการผลิตและช่วยลดความเสี่ยงด้านต้นทุนสูงกว่าราคาหน้าเหรียญในอนาคต

สำหรับค่าใช้จ่ายในสักรการผลิตจะประกอบด้วย เช่น ต้นทุนการจัดทำแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ ต้นทุนการปั๊มเหรียญ ต้นทุนการนับบรรจุ เป็นต้น จะถูกนำมาคำนวณเป็นต้นทุนรวมของการผลิตเหรียญ จึงเป็นค่าใช้จ่ายที่โรงกษาปณ์จำเป็นต้องนำมาพิจารณาในการลดต้นทุนของเหรียญกษาปณ์ เพื่อให้สอดคล้องกับนโยบายกรมธนารักษ์ โดยเฉพาะเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท ที่มีแนวโน้มต้นทุนใกล้เคียงกับราคาหน้าเหรียญ ตามข้อมูลต้นทุนเหรียญกษาปณ์ ประจำปีงบประมาณ 2555 รายละเอียดดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ประมาณการต้นทุนเหรียญกษาปณ์ ชนิดราคา 1 บาท ประจำปีงบประมาณ 2555

หน่วย : บาท
ที่มา: สำนักกษาปณ์ กรมธนารักษ์

ต้นทุนเหรียญตัวเปล่า	ค่าใช้จ่ายในการผลิต	ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน	ต้นทุนประมาณการต่อเหรียญ
0.5843	0.2250	0.0567	0.8660

เมื่อจำแนกรายละเอียดตามตารางที่ 1 พบว่าเหรียญดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายในการผลิตเท่ากับ 0.2250 บาทต่อเหรียญ คิดเป็นร้อยละ 25.98 ของต้นทุนประมาณการต่อเหรียญ ค่าใช้จ่ายดังกล่าวได้รวมในส่วนต้นทุนการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญเท่ากับ 0.0227 บาทต่อเหรียญไว้แล้ว ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 10.09 ของค่าใช้จ่ายในการผลิต โดยค่าใช้จ่ายดังกล่าวจะสามารถลดลงได้หากอายุการใช้งานเฉลี่ยของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญเพิ่มขึ้น เพราะจำนวนการผลิตแม่พิมพ์จะลดจำนวนลง ทำให้ต้นทุนโดยรวมในการผลิตเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 1 บาท ลดลงได้ ดังนั้นการปรับปรุงการผลิตแม่พิมพ์จึงมีความเกี่ยวข้องกับต้นทุนการผลิตโดยตรง

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เครื่องมือควบคุมคุณภาพ [1]

เครื่องมือควบคุมคุณภาพทั้ง 7 ประกอบด้วย 1) ไปตรวจสอบ 2) แผนภูมิพารโตใช้สำหรับแสดงปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น โดยเรียงลำดับปัญหาเหล่านั้นตามความถี่ที่พบจากมากไปหาน้อย 3) แผนผังแสดงเหตุและผลแสดงให้เห็นสาเหตุที่แท้จริงในการทำให้เกิดปัญหา โดยแจกแจงแบ่งเป็น 4 ประการ คือ คน (Man) เครื่องจักร (Machines) วิธีการ (Method) วัสดุุดิบ (Material) 4) กราฟ 5) ฮิสโตแกรม 6) แผนผังการกระจาย 7) แผนภูมิควบคุม

2.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

ปรานเมต [2] และซีวิน [3] กล่าวว่า การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล หมายถึงการทดลองถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น ตัวอย่างเช่น กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลอง 1 ครั้ง (Replicate) จะประกอบด้วยการทดลองทั้งหมด ab การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล สามารถกล่าวได้ว่าปัจจัยเหล่านี้ มีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ที่มี n replicate จะเกี่ยวกับการดึงเอาตัวแปรที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญออกจากแบบจำลองเต็มรูปแบบ แล้ววิเคราะห์ส่วนตกค้าง (residue) เพื่อที่จะตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง และตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานที่สร้างขึ้น มีบางครั้งเช่นกันที่การขัดเกลารูปแบบจำลองเกิดขึ้นหลังจากการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง ทั้งนี้ เนื่องจากพบว่า

แบบจำลองเกิดความไม่เพียงพอ หรือสมมติฐานที่กำหนดให้นั้นไม่ถูกต้องอย่างรุนแรง เพื่อจะทำกรวิเคราะห์ด้วยกราฟ โดยจะสร้างกราฟและผลหลัก (Main effect) และอิทธิพลร่วม (Interaction) ขึ้น

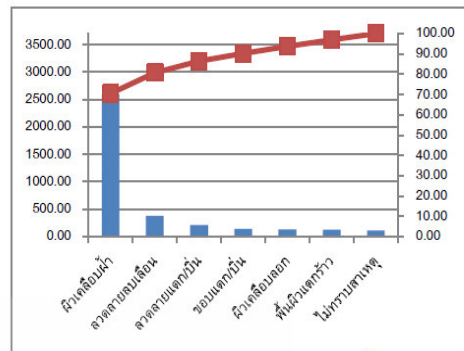
2.3 การทบทวนวรรณกรรมจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบการทดลองหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปัญหา ได้มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยมีผู้วิจัยหลายท่านได้นำหลักการออกแบบการทดลอง เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการแก้ไขปัญหาในอุตสาหกรรมการผลิต ลดของเสีย การปรับปรุงกระบวนการ และการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต เช่น การใช้ 2² Factorial Design ในการลดปัญหาการโค้งงอของการผลิตแผงวงจรแบบอ่อน โดยสามารถลดค่าใช้จ่ายในการแก้ปัญหาได้ 2,691,889 บาทต่อปี [4] การศึกษาการยึดอายุการใช้งานของดวงตราเหรียญ ชนิดราคา 1 บาท โดยออกแบบการทดลองใช้หลัก X และหลัก Y เคลือบผิวแบบ PVD ด้วยสารเคลือบ CrN ได้ผลการทดสอบในการผลิตเหรียญสำเร็จ พบว่าหลัก Y ที่ความหนาผิวเคลือบ 2.27 ไมครอน ได้จำนวนเหรียญสูงสุด 400,000 - 430,000 เหรียญต่อคู่ [5] เป็นต้น และมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการเลือกใช้สารเคลือบผิวแม่พิมพ์ที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในเรื่องของการลดการสึกหรอ และชี้ให้เห็นถึงข้อจำกัดของสารเคลือบผิวบางชนิดที่ไม่เหมาะสมกับวัสดุบางประเภท เช่น การวิจัยกรรมวิธีการเคลือบผิวที่เหมาะสมในอุตสาหกรรมการทำแม่พิมพ์ที่ใช้ในงานขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยศึกษาสารเคลือบผิว TIN, TICN, TIBN และ TiAlN โดยกรรมวิธี PACVD ผลการทดสอบพบว่า TIN มีความเหมาะสมในการลดแรงเสียดทาน และการต้านทานการสึกหรอ [6] การนำเทคนิคเคลือบผิว PVD ไปใช้ในการยึดอายุแม่พิมพ์ เพื่อลดสึกหรอและกัดกร่อนของแม่พิมพ์ ผลการทดลองสรุปได้ว่าการประยุกต์ใช้หลักทำแม่พิมพ์ผสมพิเศษด้วยการชุบเคลือบผิว PVD ช่วยยึดอายุแม่พิมพ์ และลดต้นทุนการผลิตได้ [7] การเพิ่มขึ้นของระดับความหนาผิวเคลือบ TIN ที่หนาขึ้น ทำให้แนวขอบเกรน Columnar มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของความหนาผิวเคลือบ และบ่งบอกว่าโครงสร้างของ columnar และหรือระดับความหนาของผิวเคลือบ TIN มีอิทธิพลสำคัญมากในการเปลี่ยนรูปลักษณะทางกลของผิวเคลือบ [8] เป็นต้น

3. การดำเนินการวิจัย

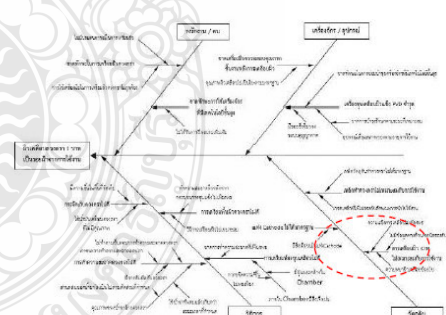
3.1 วิเคราะห์ปัญหาโดยเครื่องมือควบคุมคุณภาพ

ทำการเก็บข้อมูลปัญหาที่เกิดจากการใช้งาน โดยติดตามอายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ ชนิดราคา 1 บาท ของปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 ซึ่งมีอายุการใช้งานเฉลี่ยประมาณ 400,000 เหรียญต่อคู่ พร้อมจำแนกปัญหาอายุเฉลี่ยของแม่พิมพ์ จากการปั๊มเหรียญสำเร็จและจัดเรียงลำดับความสำคัญ โดยใช้แผนภูมิพาเรโต เพื่อกำหนดปัญหาหลักของการใช้งานแม่พิมพ์ที่ส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานมากที่สุด ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภูมิพาเรโตสาเหตุการชำรุดของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญชนิดราคา 1 บาท ปี 2555

จากปัญหาด้านคุณภาพที่ได้จากการใช้แผนภูมิพาเรโต นำมาวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปัญหาอายุการใช้งานเฉลี่ยของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ ซึ่งกว่าร้อยละ 70 พบว่าเป็นรอยผ่าจากการใช้งาน โดยยังไม่แตกร้าว (Crack) ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลสาเหตุของปัญหาจากประสบการณ์คู่มือทางเทคนิค และทีมงาน (วิศวกร 1 ท่าน ช่างเทคนิคอาวุโส 1 ท่าน และช่างเทคนิค 2 ท่าน) นำมาพิจารณาเขียนแผนผังแสดงเหตุและผล ดังในภาพที่ 3 ซึ่งสามารถประเมินได้ว่าสารเคลือบชนิดโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ไม่เหมาะสมกับการเคลือบผิวแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ ชนิดราคา 1 บาท ปัจจุบันเนื่องจากการเปลี่ยนวัสดุเหรียญโลหะตัวปลั๊กที่ใช้ในการผลิตเหรียญ ชนิดราคา 1 บาท จากวัสดุคิวโปรนิคเกิล (ทองแดงร้อยละ 75 และนิกเกิลร้อยละ 25) เปลี่ยนมาใช้วัสดุชนิดสแตนเลสเคลือบนิกเกิล (Nickel plated steel) ซึ่งมีค่าความแข็งผิวเคลือบเพิ่มขึ้นเป็น 110 HV ในขณะที่ค่าความแข็งเหรียญชนิดราคา 1 บาท เดิมที่เป็นวัสดุคิวโปรนิคเกิล มีค่าความแข็งอยู่ที่ 80 HV



รูปที่ 3 แผนผังแสดงเหตุและผลของปัญหาผิวเคลือบแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญชนิดราคา 1 บาทเป็นรอยผ่าจากการใช้งาน

3.2 เลือกใช้สารเคลือบผิวแม่พิมพ์ที่เหมาะสม

จากการศึกษาในงานในโรงพิมพ์ต่างประเทศ [9] และข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่างานวิจัยหลายฉบับสรุปผลให้เห็นว่ามีสารเคลือบผิวแม่พิมพ์ที่นำมาใช้แล้ว สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในเรื่องของการลดการสึกหรอ และยังชี้ให้เห็นถึงข้อจำกัดของสารเคลือบผิวบางชนิดที่ไม่เหมาะกับ

วัสดุบางประเภทอีกด้วย ในการเคลือบผิวแม่พิมพ์ในงานวิจัยนี้ได้เลือกสารเคลือบชนิดไทเทเนียม (Ti) ซึ่งมีคุณสมบัติในการต้านทานการสึกหรอเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้กับวัสดุที่หลากหลาย เพื่อเพิ่มอายุการใช้งาน มีคุณสมบัติด้านสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในเรื่องอัตราการไหลของโลหะได้ดี สามารถป้องกันการสะสมของเศษบนวัสดุที่บริเวณขอบของเครื่องมือ ช่วยลดแรงและอุณหภูมิในการตัดเฉือน และปัจจุบันเทคโนโลยีการชุบเคลือบผิว PVD ด้วยสารเคลือบ Ti ได้มีการพัฒนาและถูกประยุกต์ใช้ในลักษณะของสารเคลือบที่หลากหลายขึ้น ในกรณีผสมแก๊สซึ่งไม่ใช่แก๊สเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน (N₂) ออกซิเจน(O₂) หรือมีเทน(CH₄) ระหว่างการเคลือบผิว ก็จะได้ผิวเคลือบของสารประกอบโลหะ เช่น ไทเทเนียมไนไตร (TiN) ไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) ไทเทเนียมคาร์โบไนไตร (TiCN) เป็นต้น ซึ่งผิวเคลือบที่ได้จะทนต่อการขีดสีสูงและทนความร้อนได้มาก [10]

3.3 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments)

ในการวิจัยนี้จะทำการคัดกรองปัจจัยทุกตัว ในการออกแบบการทดลองแบบ 2^k Factorial Design โดยใช้โปรแกรม Minitab 15 ด้วยระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับร้อยละ 95

1) กำหนดจำนวนปัจจัยของปัญหาที่นำมาวิเคราะห์ จากแผนผังแสดงเหตุและผล ซึ่งการวิจัยจะมี 3 ปัจจัย ในแต่ละปัจจัยจะกำหนดให้มี 2 ระดับ ของการทดลอง ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รายละเอียดปัจจัยและระดับการทดลอง

ปัจจัย (Factor)	ระดับ (Level)
ชนิดสารเคลือบ (A)	TiN (-1)
	TiCN (1)
ความหนาผิวเคลือบ (B)	≤ 2 μm (-1)
	≤ 3 μm (1)
อุณหภูมิการชุบเคลือบ (C)	≤ 250 °C (-1)
	≤ 500 °C (1)

2) กำหนดค่าตอบสนอง (Response) เป็นจำนวนเหรียญกษาปณ์สำเร็จ ชนิดราคา 1 บาท ที่ได้จากการปั๊มของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญต่อคู่ (ด้านหัว-ด้านก้อย) ซึ่งเป็นข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantitative) และด้านคุณภาพยอมรับ (Accept) หรือไม่ยอมรับ (Reject) จะใช้มาตรฐานการตรวจสอบจากส่วนงานตรวจสอบคุณภาพของโรงกษาปณ์

3) กำหนดจำนวนการทดลอง (Replicate) ที่เหมาะสม เพื่องานตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยทำการออกแบบการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง (Replicate)

4) ออกแบบตารางการทดลองจาก Minitab 15 ตามพารามิเตอร์ใน

3.4 จัดเตรียมวัสดุ

- ทำการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญชนิดราคา 1 บาท จำนวนตัวอย่าง 24 คู่ (ด้านหัว-ด้านก้อย) โดยใช้เหล็ก Tool steel ที่โรงกษาปณ์ใช้งานอยู่ปัจจุบัน

มีส่วนผสมทางเคมีคือ C 0.50 %, Si 0.20 %, Mn 0.25 %, Cr 4.50 %, Mo 3.0 %, V 0.55 %

- ทำการผลิตชิ้นงานทดสอบที่มีรูปทรงเดียวกับแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญชนิดราคา 1 บาท พร้อมดำเนินการตามกระบวนการผลิตของแม่พิมพ์เหรียญเช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ชิ้นงานทดสอบ

- นำแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญชนิดราคา 1 บาท และชิ้นงานทดสอบเข้าสู่กระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีการ PVD ตามขั้นตอนดังนี้

1) ทำการปรับปรุงโปรแกรมควบคุมการชุบเคลือบผิวบนเครื่องชุบ PVD ยี่ห้อ Sulzer รุ่น Mataplas ionon ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 เครื่องชุบเคลือบผิว PVD

2) เปลี่ยนแท่งคาร์โทด (Cathode) เป็นชนิดสารเคลือบไทเทเนียม (Ti) ซึ่งติดตั้งอยู่ภายในห้องชุบเคลือบผิว ดังภาพที่ 6



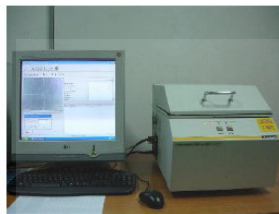
(a) (b)

ภาพที่ 6 a) แท่งคาร์โทดไทเทเนียม (Ti) b) ตำแหน่งการติดตั้ง

เคลือบ PVD แล้วทำการรันโปรแกรมของเครื่องตามคู่มือปฏิบัติงาน ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 4-6 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของผิวเคลือบที่กำหนด

4) ตรวจสอบคุณภาพผิวหน้าแม่พิมพ์ที่ผ่านการชุบเคลือบผิวแล้ว ด้วยกล้องขยาย Microscope กำลังขยาย 7-47 เท่า เพื่อตรวจสอบคุณภาพความเรียบร้อยของผิวเคลือบ

- นำชิ้นงานทดสอบไปทำการตรวจสอบวัดความหนาผิวเคลือบ ด้วยเครื่องวัดความหนาผิวเคลือบแบบเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ยี่ห้อ Fischer รุ่น XAN ดังภาพที่ 7 ได้ผลความหนาผิวเคลือบ แสดงในตารางที่ 3



รูปที่ 7 เครื่องวัดความหนาผิวเคลือบ

ตารางที่ 3 ผลการวัดอุณหภูมิและความหนาผิวเคลือบ

ชนิดสารเคลือบ	อุณหภูมิ (°C)	ระดับความหนา	ระดับความหนา
	H ≤ 500 L ≤ 250	≤ 2 μm	≤ 3 μm
	ค่าที่อ่านได้ (°C)*	ค่าที่วัดได้ (μm)	ค่าที่วัดได้ (μm)
TIN	423-428 (H)	1.91 – 2.04	2.87 – 2.98
	218-223 (L)	1.89 – 1.98	2.92 – 3.02
TICN	339-346 (H)	1.94 – 2.14	2.96 – 3.02
	235-242 (L)	1.97 – 2.01	2.92 – 3.13

* อ่านจากอุปกรณ์ Pyrometer ที่ติดตั้งบนเครื่องชุบ PVD

3.4 ดำเนินการทดลองปั๊มเหรียญสำเร็จ

หลังจากได้แม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ ชนิดราคา 1 บาท เรียบร้อยแล้ว ทำการส่งไปทดลองปั๊มเหรียญสำเร็จ ด้วยเครื่องปั๊มเหรียญความเร็วสูง อัตราการปั๊มเฉลี่ย 800 เหรียญต่อนาที ใช้แรงกดประมาณ 35-38 ตัน ดังภาพที่ 8



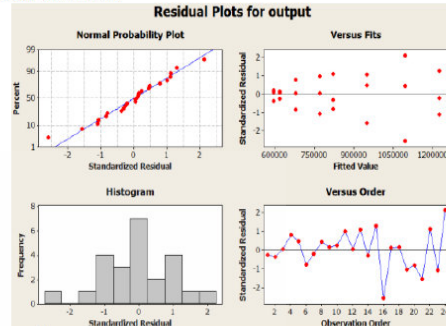
ภาพที่ 8 เครื่องปั๊มเหรียญ ยี่ห้อ Grabener

4. ผลการดำเนินการวิจัย

จากการกำหนด 3 ปัจจัยหลักประกอบด้วยปัจจัยละ 2 ระดับ และทำการทดลองซ้ำ (Replicates) 3 ครั้ง ในการออกแบบการทดลองแบบ 3² ได้ผลการทดลองจำนวน 24 ครั้ง แล้วบันทึกผลลงในตารางเพื่อทำการประมวลผลด้วย Minitab 15 นำผลการทดลองที่ได้มาสร้างกราฟ เพื่อ

ทดสอบความพอเพียงของแบบจำลอง แล้วทำการวิเคราะห์ผลและสรุปปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการวิจัย

1) การทดสอบความพอเพียงของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองจาก Minitab 15

จากภาพที่ 9 กราฟที่ 1 ซ้ายบน เป็นการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของ Residuals มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ข้อมูลอยู่ในแนวเส้น แสดงว่า Residuals มีการแจกแจงแบบปกติ กราฟที่ 2 ซ้ายล่าง ฮิสโตแกรม จะมีลักษณะเป็นทรงระฆังคว่ำ หรือค่า Residual จะกระจายตัวแบบปกติ เหมือนกราฟแรก กราฟที่ 3 ขวาบน เป็นการตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) จากแผนภูมิการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อนของค่า Residual เทียบกับ Fitted Value พบว่าการกระจายตัวของ Residual มีรูปแบบที่เป็นอิสระ มีการกระจายแบบสุ่ม แสดงว่าข้อมูลมีความแปรปรวนของแต่ละกลุ่มไม่แตกต่างกัน กราฟที่ 4 ขวาล่าง คือลำดับข้อต่อด้านส่วนตกค้าง (Residual Plot Versus the Order) ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลเป็นกระจายแบบสุ่ม ไม่มีรูปแบบที่ชัดเจน ดูการกระจายของจุดในด้านบวกและลบที่มีความสมดุลกัน ใช้ร่วมกับกราฟที่ 3 เพื่อตรวจสอบความแปรปรวนของแต่ละกลุ่มมีค่าคงที่

2) ทำการวิเคราะห์การทดลองจากโปรแกรม Minitab 15 ได้ผลดังตารางที่ 4 และตารางที่ 5

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยในการทดลอง

Estimated Effects and Coefficients for output (coded units)					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		843410	6661	128.55	0.000
สารเคลือบ (A)	-91748	-45874	6661	-6.99	<0.000
ความหนา (B)	196916	97968	6661	14.93	<0.000
อุณหภูมิ (C)	356661	178331	6661	27.18	<0.000
สารเคลือบ*ความหนา (AB)	-17596	-8798	6661	-1.34	0.199
สารเคลือบ*อุณหภูมิ (AC)	-36538	-18269	6661	-2.78	<0.013
ความหนา*อุณหภูมิ (BC)	77674	38837	6661	5.92	<0.000
สารเคลือบ*ความหนา*อุณหภูมิ (ABC)	16066	8033	6661	1.22	0.239

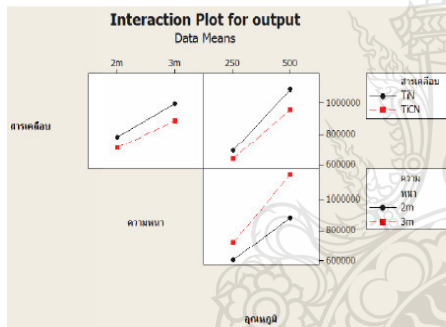
S = 32141.8 PRESS = 37191330074
R-Sq = 98.51% R-Sq (pred) = 96.64% R-Sq(adj) = 97.86%

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

Analysis of Variance for output (coded units)

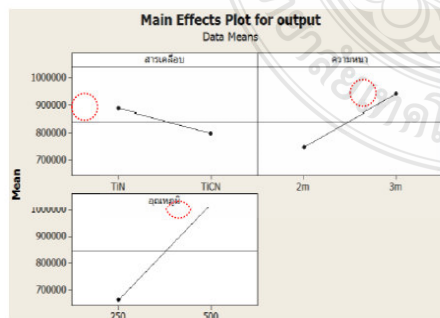
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	1.04405E+12	1.04405E+12	3.48016E+11	336.87	0.0000
2-Way Interactions	3	46067310651	46067310651	15355770217	14.86	0.0000
3-Way Interactions	1	1548601742	1548601742	1548601742	1.50	0.239
Residual Error	16	16529480033	16529480033	1033092502		
Pure Error	16	16529480033	16529480033	1033092502		
Total	23	1.10819E+12				

เมื่อทำการวิเคราะห์การทดลองแบบ Factorial Design 2^k โดยใช้ Minitab15 นอกจากจะได้กราฟแสดงการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองแล้ว Minitab ยังแสดงส่วนสำคัญคือ ตารางที่ 4 และตารางที่ 5 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของผลกระทบหลัก (Main Effect) และผลกระทบร่วมทางปฏิกริยา (Interaction) ของการออกแบบการทดลองที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติที่ $\alpha=0.05$ จากกรณีวิเคราะห์หือทธิพลของปัจจัย ซึ่งจะพิจารณาถึงปัจจัยร่วมระดับ 2 เท่านั้น โดยพิจารณาจากค่า P-Value ที่มีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงสรุปได้ว่าปัจจัยนั้นมีผลต่ออายุการใช้งานของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ ซึ่งได้แก่ปัจจัย A, B, C, AC และ BC เนื่องจากปัจจัยร่วม AC และ BC มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 โดยไปอ่านค่าจาก Interaction Plot for Y ได้ผลดังภาพที่ 10



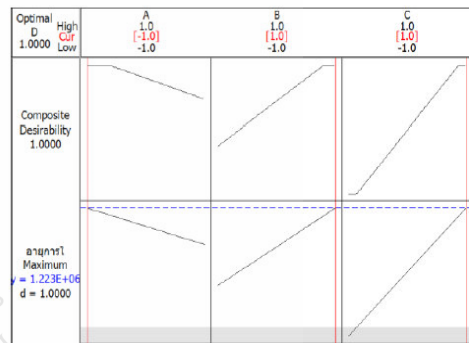
ภาพที่ 10 กราฟ Interaction Plot for Y

เมื่อพิจารณาผลจาก Interaction Plot for Y แล้วมีผลกระทบน้อยมาก จึงไปทำการอ่านผลจาก Main Effects Plot for Y ในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 กราฟ Main Effect Plot for Y

3) การวิเคราะห์ Response Optimizer เพื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่ต้องการผลตอบสนองที่ดีที่สุด ในการทดลองปั๊มเหรียญขนาดราคา 1 บาท จากรูปที่ 12 พบว่าเมื่อต้องการค่า Yield มากที่สุด จึงกำหนดค่าที่ต้องการต่ำสุดที่ 1,000,000 เหรียญ และค่าเป้าหมายที่ 1,200,000 เหรียญ คือได้จำนวนเหรียญสำเร็จต่อแม่พิมพ์ 1 คู่มากที่สุด โดยมีค่าความน่าปรารถนา (Desirability: D) มากที่สุด จะต้องควบคุมปัจจัยหลักตามสภาพการทำงานจริงตามที่กำหนดคือ ชนิดสารเคลือบไทเทเนียมไนไตร (TiN) ที่ระดับความหนา 3 μm อุณหภูมิชุบเคลือบ 423-428 $^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 12 ระดับปัจจัยที่เหมาะสม (Optimization Plot)

5. สรุปผลการวิจัย

- 1) ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab ทำให้ทราบว่าต้องเลือกใช้สารเคลือบชนิด TiN ที่ระดับความหนาประมาณ 2.87-2.98 μm อุณหภูมิ 423-428 $^{\circ}\text{C}$ จะทำให้อายุการใช้งานของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ ชนิดราคา 1 บาท สูงที่สุด
- 2) เมื่อนำผลการวิเคราะห์ มาทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผล โดยกำหนดปัจจัย A ระดับ -1, ปัจจัย B ระดับ 1 และปัจจัย C ระดับ 1 ซึ่งทดลองซ้ำจำนวน 2 ครั้งๆ ละ 3 คู่ ปรากฏว่าค่า Yield ได้ปริมาณเหรียญสำเร็จที่ใกล้เคียงกัน
- 3) คุณภาพเหรียญชนิดราคา 1 บาทสำเร็จ ที่ได้จากแม่พิมพ์ชุบเคลือบผิว TiN ดีกว่าแม่พิมพ์ชุบเคลือบผิว TiCN เนื่องจากผิวเคลือบ TiCN จะมี Droplet เกิดขึ้นเป็นจุดขนาดใหญ่ จึงส่งผลต่อคุณภาพของผิวเหรียญสำเร็จ
- 4) จากอายุการใช้งานเพิ่มขึ้นมากกว่า 1 เท่า จะส่งผลให้ปริมาณการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญลดลง จึงสามารถนำไปพิจารณาลดต้นทุนการผลิตในส่วนของค่าใช้จ่ายผันแปร (Variable Costs) ที่ลดลงได้ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ก็ด้วยความร่วมมือจากหลายฝ่าย ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วราณี เปรมมานนท์ ที่คอยให้คำปรึกษา ผศ. ศรีโรจารักษ์โยธู ที่ให้คำแนะนำ รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ย่าง

เต็มที่สุดอดมา และที่สำคัญที่สุดขอขอบพระคุณท่านผู้อำนวยการสำนัก
 กษาปณ์และเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] โยชิโนบุ นายทานิ และคณะ. 2541. 7 New QC Tools เครื่องมือสู่คุณภาพยุคใหม่. แปลโดย วิฑูรย์ สิมะโชคดี. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ:TPA PUBLISHING.
- [2] กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, 2540. สถิติสำหรับงานวิศวกรรม เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 2. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- [3] จักรกฤษณ์ ภูพานเพชร และธเรฐา คุปต์ษเรีเยร์, 2552. การลดข้อร้องเรียนจากลูกค้าและค่าใช้จ่ายคุณภาพด้วยเครื่องมือควบคุมคุณภาพยุคใหม่. 31 สิงหาคม 2552.
- [4] ศนิษฐ์ ทับทิมทอง, 2551. การปรับปรุงกระบวนการผลิตแผงวงจรแบบอ่อน เพื่อลดปัญหาการโค้งงอ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [5] วรวิทย์ สงวนพันธ์, 2554. การเพิ่มอายุการใช้งานของดวงตราเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนชนิดราคา 1 บาท ใหม่. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [6] Mitterer, C., Holler, F., Reitberger, D. and R. Kullmer2003, "Industrial Applications of PACVD Hard Coatings", Journal of Surface and Coatings Technology, Vol. 163-164, pp. 716-722.
- [7] Yucong Wang., 1997. "A study of PVD coatings and die materials for extended die-casting die life2." Surface and Coatings Technology 94-95, pp. 60-63.
- [8] L.W. Ma, J.M. Cairney, M.J. Hoffman, P.R. Munroe., 2010 "Effect of coating thickness on the deformation mechanisms in PVD TiN-coated steel." Surface & Coatings Technology 204, pp. 1764–1773.
- [9] สุกัญญา ชูช่วย และคณะ, 2552. รายงานการฝึกอบรม เรื่องเทคนิคการผลิตเหรียญกษาปณ์สำเร็จรูปโลหะชุบเคลือบไล่เหล็ก ณ โรงกษาปณ์ประเทศฟินแลนด์. สำนักกษาปณ์ กรมธนารักษ์.
- [10] Donald M. Mattox, 1998. Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing, Society of Vacuum Coaters, Albuquerque, New Mexico.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นายธีระยุทธ วงศ์สมานมณี
วัน เดือน ปีเกิด	18 เมษายน 2519
ที่อยู่	89/397 หมู่ 5 หมู่บ้านฟ้าชมพุกฤษ์ 2 ซอย 8 ถนนเลียบบคลองแปด ตำบลลำลูกกา อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี 12150
การศึกษา	
พ.ศ. 2543	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนครเหนือ
ประสบการณ์การทำงาน	
ปัจจุบัน	ตำแหน่งผู้ควบคุมงานส่วนดวงตรา (แม่พิมพ์) สำนักษาปณ์ กรมธนารักษ์ กระทรวงการคลัง

