สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบและสร้างชุดทำความร้อนแม่พิมพ์สำหรับกระบวนการปั๊มขึ้นรูปเลนส์โปรเจคเตอร์

นายวิทยา ปิยะตระกูลกาญจน
นายสุรภัสสร์ กาญจนาชีวะ

วศ.
ว5821ก
2550

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....83171
วัน,เดือน,ปี.....-6 ส.ค. 2551

b.....11960101
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND CONSTRUCTION OF HOT SET FOR PROJECTOR LENS FORMING PROCESS

MR. WITTAYA PIYATRAKOONKARNJANA

MR. SURAPAT KANCHANAJIVA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

หัวข้อปริญญานิพนธ์	**การออกแบบและสร้างชุดทำความร้อนแม่พิมพ์สำหรับกระบวนการขึ้นรูปเลนส์โปรเจคเตอร์** DESIGN AND CONSTRUCTION OF HOT SET FOR PROJECTOR LENS FORMING PROCESS		
นักศึกษา	**นายวิทยา ปิยะตระกูลกาญจน**	**รหัสประจำตัว**	48015680
	นายสุรภัสสร์ กาญจนาชีวะ	**รหัสประจำตัว**	48015689
หลักสูตร	**วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ**		

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

(รศ.พรศักดิ์ อรรถวานิช)

(ดร.อนิรุท ไชยจารุวณิช)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การออกแบบและสร้างชุดทำความร้อนแม่พิมพ์สำหรับกระบวนการขึ้นรูปเลนส์โปรเจคเตอร์		
นักศึกษา	นายวิทยา ปิยะตระกูลกาญจน	รหัสประจำตัว	48015680
	นายสุรภัสสร์ กาญจนาชีวะ	รหัสประจำตัว	48015689
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง		
ปีการศึกษา	2550		
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	รศ.พรศักดิ์ อรรถวานิช ดร. อนิรุท ไชยจารุวณิช		

บทคัดย่อ

โครงงานนี้จัดทำขึ้นเพื่อช่วยในการลดของเสียในการผลิตการขึ้นรูปเลนส์โปรเจคเตอร์ ของ บริษัท เอจีซี เทคโน กลาส จำกัด จากการศึกษาขั้นตอนการทำงานโดยละเอียดพบว่าปัญหาที่ทำให้เกิดของเสียคืออุณหภูมิของแม่พิมพ์ ที่ใช้ในการขึ้นรูป เลนส์โปรเจคเตอร์ลดลงในช่วงเปลี่ยนรอบการทำงานนั้น ทำให้ชิ้นงานที่ผลิตออกมาต้องเสียไปในช่วง 3-4 ชิ้นแรก จึงได้ออกแบบและสร้างชุดทำความร้อนแม่พิมพ์ (Hot Set) ทั้งหมด 3 รุ่น โดยรุ่น 1 และ 2 นั้นไม่สามารถใช้ในงานจริงได้เนื่องจากมีปัญหาด้านการออกแบบที่ไม่ถูกต้องหรือผิดหลัก แต่เมื่อได้ทำการศึกษาและสร้างชุดที่ 3 รวมถึงนำมาใช้ในงานจริงแล้วสามารถลดของเสียได้อีกทั้งอายุการใช้งานของชุดทำความร้อนแม่พิมพ์ยังใช้ได้นานอีกด้วย และการเก็บข้อมูลการทำงานซึ่งเมื่อใช้งานไปแล้ว 4 ถึง 5 เดือนปัญหาที่พบส่วนใหญ่ไม่ร้ายแรง และยังได้มีการใช้หลักเศรษฐศาสตร์เข้ามาเพื่อคำนวณหาจุดคุ้มทุนตั้งแต่เริ่มการทำงาน ซึ่งผลที่คำนวณได้คือ 75 วันหลังจากใช้งานซึ่งเป็นผลที่น่าพอใจและเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Designs and Construction of Hot Set for Projector Lens Forming Process
Student	Mr.wittaya Piyatrakoonkarnjana
	Mr. Surapat Kanchanajiva
Degree	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering
	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2550
Thesis Advisor	Associate Prof. Pornsak Attavanich
	Dr. Anirut Chaijaruwanich

ABSTRACT

This project is studied to reduce the defect in projector lens forming fabrication of AGC Techno Glass (Thailand) Co. Ltd. Studying in detail in the working process; it was found that the cause of the defects was the drop of die temperature between working cycles, losing 3-4 pieces at the beginning of each cycle. Consequently, 3 hot sets were designed and constructed, where the first and the second could not be used dud to mistaking in the design. The third hot set, have a long working life, was employed in the process and thus the defects was reduced. Having collected data for 4-5 months, it had no severe problems. Using economic principle in calculation of break event point, the result was 75 days. This showed that the hot set was effectively and satisfactorily used as stated in the objective.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่องการออกแบบและสร้างชุดทำความร้อนให้กับแม่พิมพ์ เพื่อใช้ในระบวนการปั๊มขึ้นรูปเลนส์โปรเจคเตอร์ กรณีศึกษา บริษัท เอจีซี เทคโน กลาส จำกัด สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี กลุ่มผู้จัดทำขอกราบขอพระคุณบุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้องส่งผลให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

บริษัท เอจีซี เทคโน กลาส จำกัด กลุ่มผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงทางบริษัทที่อนุญาตและให้โอกาสกลุ่มผู้จัดทำเข้าไปศึกษาและทำชุดทำความร้อนให้กับแม่พิมพ์ และใช้ในงานจริงในสายการผลิต

รศ.พรศักดิ์ อรรถวานิช อาจารที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์และหัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ กลุ่มผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับการให้โอกาสในการศึกษาปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ คำแนะนำ ความเอาใจใส่และทุกสิ่งทุกอย่างตลอดจนการศึกษาระดับปริญญาตรี ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรอุตสาหการ

ผศ.ดร.สิทธิพร พิมพ์สกุล กลุ่มผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับการให้โอกาส ในการศึกษาปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือและความเอาใจใส่ในทุกๆด้าน ตลอดเวลาที่ผ่านมา

ดร. อนิรุท ไชยจารุวณิช อาจารที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ กลุ่มผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับการให้โอกาสในการศึกษาปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ความรู้ คำแนะนำ ความเอาใจใส่ที่ท่านให้ตลอดจนการศึกษาระดับปริญญาตรี

ดร.สกนธ์ คล่องบุญจิต กลุ่มผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับความรู้ คำแนะนำ และความช่วยเหลือในทุกๆด้านในการจัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ผศ.ดร.สรรพสิทธิ์ ลิ่มนรรัตน์ กลุ่มผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับคำแนะนำ กำลังใจ และความช่วยเหลือทุกๆด้าน

ขอขอบคุณเพื่อนทุกคนสำหรับความรัก ความห่วงใยที่มีให้กัน รวมถึงความช่วยเหลือทุกด้านจนทำให้ปริญญานิพนธ์สำเร็จลุล่วง และคอยเป็นกำลังใจให้กันตลอดมา

นายวิทยา ปิยะตระกูลกาญจน
นายสุรภัสสร์ กาญจนาชีวะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ข

กิตติกรรมประกาศ ..... ค

สารบัญ ..... ง

สารบัญรูป ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฌ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญของโครงงาน 1

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน 1

1.3 ขอบเขตของโครงงาน 1

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ 1

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การควบคุมคุณภาพ 2

2.1.1 ความสำคัญของการปรับปรุงคุณภาพ 3

2.1.2 ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับคุณภาพ 3

2.1.3 เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพ 6

2.2 การควบคุมกระบวนการทางสถิติ 9

2.2.1 เครื่องมือในการวิเคราะห์ 9

2.3 การเลือกใช้วัสดุและการออกแบบทางวิศวกรรม 11

2.3.1 ข้อกำหนดทางเทคนิคที่ต้องปฏิบัติตาม 11

2.3.2 สิ่งที่ต้องพิจารณาในการตัดสินใจเลือกวัสดุและกรรมวิธีการผลิต 11

2.3.3 ทำไมจึงต้องมีการเลือกใช้วัสดุ 12

2.4 การเลือกโลหะและการออกแบบเพื่อทนอุณหภูมิ 13

2.4.1 การพัฒนาโลหะผสมที่ทนต่อการคืบ 13

2.4.2 การออกแบบโดยใช้ลาร์สัน-มิลเลอร์พารามิเตอร์ 14

2.4.3 การเลือกใช้ชนิดของโลหะ 14

2.4.4 การป้องกันการเกิดการกัดกร่อนเชิงไฟฟ้า–เคมี 18

2.4.5 การป้องกันการกัดกร่อนที่มีความเค้นเกี่ยวข้อง 22

2.4.6 พฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะวิศวกรรมที่สำคัญบางชนิด 22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.7 การเลือกโลหะเพื่อการทนสึกหรอ 27

2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ และการนำไปใช้ 30

2.5.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Present Value, Future Value, และ Annual Value 30

2.5.2 การคำนวณหาค่า Present Value สำหรับกระแสเงินสดที่อยู่ในรูปแบบของอนุกรม Uniform Gradient 32

2.6 การหาจุดคุ้มทุน ระยะเวลาในการคืนทุนค่าคาดหมายของโครงการ การวิเคราะห์ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรและการวางแผนการลงทุนในกรณีที่มีข้อจำกัดทางด้านการเงิน 32

2.6.1 การหาจุดคุ้มทุน 32

2.6.2 ระยะเวลาการคืนทุน 33

2.6.3 การหาค่าความคาดหมาย 34

บทที่ 3 วิธีการทำงาน

3.1 การศึกษาขั้นตอนการทำงานโดยละเอียด 35

3.1.1 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ 35

3.1.2 ขั้นตอนการทำความสะอาดวัตถุดิบ 36

3.1.3 การให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัตถุดิบ 36

3.1.4 ขั้นตอนการผลิต 37

3.1.5 การอบคลายความเครียด 38

3.1.6 การตรวจสอบชิ้นงาน 39

3.2 การหาสาเหตุของปัญหา 41

3.3 ขั้นตอนการออกแบบ 43

3.3.1 ชุดควบคุมอุณหภูมิ 43

3.3.2 ชุดทำความร้อนให้แม่พิมพ์ 44

3.3.3 ชุด Hot Set รุ่นที่ 1 45

3.3.4 ชุด Hot Set รุ่นที่ 2 45

3.3.5 ชุด Hot Set รุ่นที่ 3 46

3.3.6 ฐานรองชุด Hot Set 47

3.3.7 การเลือกใช้วัสดุในการทำชุดทำความร้อนให้กับหัวแม่พิมพ์ 47

3.3.8 หลักในการเลือกชุดขดลวดทำความร้อน 48

3.4 การตรวจสอบขณะทำงานจริง 48

3.5 สรุปผลการดำเนินงาน 49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน

4.1 การทดสอบการสร้างชุดทำความร้อนให้กับแม่พิมพ์ 50

4.1.1 รุ่นที่ 1 50

4.1.2 รุ่นที่ 2 52

4.1.3 รุ่นที่ 3 56

4.2 ผลการดำเนินงานตรวจสอบระหว่างการทำงานจริง 59

4.3 การคำนวณหาจุดคุ้มทุน 61

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง 63

5.2 สรุปปัญหาจากการทดลอง 63

5.3 วิจารณ์ผลการทดลอง 63

หนังสืออ้างอิง 64

ภาคผนวก ก

แบบของชุดทำความร้อนให้กับแม่พิมพ์ รุ่นที่ 1 ..... ผก 1

ภาคผนวก ข

แบบของชุดทำความร้อนให้กับแม่พิมพ์ รุ่นที่ 2 ..... ผข 1

ภาคผนวก ค

แบบของชุดทำความร้อนให้กับแม่พิมพ์ รุ่นที่ 3 ..... ผค 1

ภาคผนวก ง

แบบของชุดฐานรองทำความร้อนให้กับแม่พิมพ์ ..... ผง 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 เปอร์เซ็นต์ของการใช้เทคนิคต่างๆ 7
รูปที่ 2.2 ความผันแปรของกระบวนการเมื่อใช้เทคนิคต่างๆ 8
รูปที่ 2.3 แผ่นตรวจสอบ 10
รูปที่ 2.4 ผังแสดงเหตุและผล 11
รูปที่ 2.5 กราฟของลาร์สัน-มิลเลอร์ 14
รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงตัวอย่างการป้องกันแบบแคโทดิก 19
รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงสภาพเซนซิไทเซชันของเหล็กกล้าสเตนเลส 21
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างกระแสเงินที่อยู่ในรูปแบบอนุกรม Uniform Gradient 32
รูปที่ 3.1 การจัดเบิกใช้ของวัตถุดิบ 35
รูปที่ 3.2 การตรวจสอบคุณภาพของวัตถุดิบ 36
รูปที่ 3.3 การทำความสะอาดวัตถุดิบ 36
รูปที่ 3.4 การให้ความร้อนต่ำขั้นต้นแก่วัตถุดิบประมาณ 800-1000 °C 37
รูปที่ 3.5 การให้ความร้อนในอุณหภูมิ 1000-1180 °C เพื่อให้วัตถุดิบอ่อนตัว 37
รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการปั๊มขึ้นรูป 38
รูปที่ 3.7 การอบคลายความเครียด 38
รูปที่ 3.8 การตรวจสอบชิ้นงาน 39
รูปที่ 3.9 การตัดดิบที่เป็นส่วนเกิน 39
รูปที่ 3.10 การขัดและทำความสะอาดผลิตภัณฑ์โดยวิธีอัลตราโซนิค 39
รูปที่ 3.11 แผนผังแสดงการทำงานเมื่อ NG คือ งานเสีย 40
รูปที่ 3.12 แผนผังก้างปลาเพื่อหาสาเหตุของการเกิดของเสียในขั้นตอนการปั๊ม 41
รูปที่ 3.13 วงจรการทำงานของชุดควบคุมอุณหภูมิ 44
รูปที่ 3.14 ชุดควบคุมอุณหภูมิ 44
รูปที่ 3.15 ชุด Hot Set รุ่นที่1 45
รูปที่ 3.16 ชุด Hot Set รุ่นที่2 46
รูปที่ 3.17 ชุด Hot Set รุ่นที่3 46
รูปที่ 3.18 ฐานรองชุด Hot Set 47
รูปที่ 3.19 ขดลวดทำความร้อน 48
รูปที่ 4.1 Hot Set ชุดที่ 1 ขณะประกอบพร้อมใช้งาน 50
รูปที่ 4.2 Hot Set ชุดที่ 2 และร่องสำหรับใส่ขดลวดทำความร้อน 52
รูปที่ 4.3 Hot Set ชุดที่ 2 เมื่อประกบเข้าด้วยกัน 52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.4 Hot Set ชุดที่ 2 ประกอบกับฐานรองขณะทำงาน 52
รูปที่ 4.5 Hot Set รุ่นที่ 3 และร่องใส่ชุดขดลวดทำความร้อนที่ออกแบบใหม่ 56
รูปที่ 4.7 แผนผังกระแสเงินสด 62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 อุณหภูมิใช้งานสูงสุดโดยประมาณสำหรับโลหะผสมที่สำคัญบางชนิด 15
ตารางที่ 2.2 โคบอลต์ผสมสำหรับงานที่ต้องการความต้านทานการสึกกร่อน..... 29
ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจากการบันทึกอุณหภูมิของแม่พิมพ์ก่อนใช้ชุด Hot Set..... 42
ตารางที่ 3.2 จำนวนเงินที่สูญเปล่าในแต่ละช่วงเวลา..... 43
ตารางที่ 4.1 ตารางการทดสอบชุดทำความร้อนแม่พิมพ์รุ่นที่ 1..... 51
ตารางที่ 4.2 ตารางการทดสอบชุดทำความร้อนแม่พิมพ์รุ่นที่ 2..... 53
ตารางที่ 4.3 ตารางการทดสอบชุดทำความร้อนแม่พิมพ์รุ่นที่ 2..... 54
ตารางที่ 4.4 ตารางการทดสอบชุดทำความร้อนแม่พิมพ์รุ่นที่ 2..... 55
ตารางที่ 4.5 ตารางการทดสอบชุดทำความร้อนแม่พิมพ์รุ่นที่ 3..... 57
ตารางที่ 4.6 ตารางการทดสอบชุดทำความร้อนแม่พิมพ์รุ่นที่ 3..... 58
ตารางที่ 4.7 ตารางการทดสอบชุดทำความร้อนแม่พิมพ์รุ่นที่ 3..... 59
ตารางที่ 4.8 แผ่นตรวจสอบการทำงาน..... 60
ตารางที่ 4.9 รายการค่าใช้จ่ายวัสดุ..... 61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่1
บทนำ

1.1 ความสำคัญของโครงงาน

โครงงานนี้จัดทำขึ้นเพื่อช่วยในการลดของเสียในกระบวนการผลิตที่เกิดขึ้นจากแม่พิมพ์ตัวผู้ (Plunger) และแม่พิมพ์ตัวเมีย (Mold) มีอุณหภูมิต่ำกว่ามาตรฐาน อันเนื่องมาจากลักษณะการทำงานเดิมนั้นจะใช้ความร้อนจากแท่งแก้วที่นำออกมาจากเตาอบในการทำให้แม่พิมพ์ตัวผู้และตัวเมียมีอุณหภูมิที่เหมาะสมคือในช่วง 450-470 องศาเซลเซียส ซึ่งจากการศึกษาขั้นตอนการทำงานโดยละเอียดแล้วพบว่าปัญหาที่ทำให้เกิดของเสียในสายการผลิตนี้ คือ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ ที่ใช้ในการขึ้นรูปเลนส์โปรเจคเตอร์ซึ่งในขณะเปลี่ยนรอบการทำงานนั้น ลดลงจนทำให้ชิ้นงานที่ผลิตออกมาต้องเสียไปในช่วง 3-4 ชิ้นแรก จึงได้คิดหาวิธีแก้ปัญหานี้และเริ่มจัดทำชุดทำความร้อนให้กับแม่พิมพ์ (Hot Set) ขึ้นมาเพื่อให้ความร้อนกับแม่พิมพ์ตัวผู้และตัวเมียและเมื่อแม่พิมพ์มีอุณหภูมิที่เหมาะสมซึ่งจะทำให้ของเสียที่เกิดจากอุณหภูมิแม่พิมพ์ไม่เหมาะสมลดลง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

เพื่อออกแบบและสร้างชุด Hot Set สำหรับแม่พิมพ์ตัวผู้และตัวเมียในการปั๊มขึ้นรูปเลนส์โปรเจคเตอร์เพื่อลดจำนวนของเสียในสายการผลิตเลนส์โปรเจคเตอร์

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

1.3.1 ศึกษาและวิเคราะห์ขั้นตอนในสายการผลิตการขึ้นเลนส์โปรเจคเตอร์ซึ่งทำให้เกิดชิ้นงานเสีย (Defect) ของบริษัท เอจีซี เทคโน กลาส จำกัด

1.3.2 ศึกษาและวิเคราะห์จากการผลิตงาน รุ่น S64WN1-US ในสายการผลิตการขึ้นรูป

1.3.3 ออกแบบและทดสอบอุปกรณ์หรือวิธี ขั้นตอนการทำงาน ซึ่งช่วยลดของเสียในสายการผลิตการขึ้นรูปเลนส์โปรเจคเตอร์ ของบริษัท เอจีซี เทคโน กลาส จำกัด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ลดของเสียในสายการผลิตการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เลนส์โปรเจคเตอร์

1.4.2 ได้ผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้นจากปริมาณวัตถุดิบและเวลาที่เท่าเดิม

1.4.3 ลดเวลาสูญเสียที่ใช้ในการอุ่นแม่พิมพ์

1.4.4 ต้นทุนการผลิตต่อชิ้นลดลงทำให้ได้ผลกำไรมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การควบคุมคุณภาพ

ความหมายของคุณภาพ คุณภาพ (Quality) เป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการดำเนินธุรกิจ ไม่ว่าจะเป็นธุรกิจที่ เกี่ยวกับการผลิตหรือการบริการ เมื่อพูดถึงคุณภาพ เราจะนึกถึงคุณภาพในสองลักษณะ ดังนี้

- คุณภาพตามการออกแบบ (Quality of Design) คือ คุณภาพที่เกิดขึ้นจากความตั้งใจเพื่อให้สินค้า (Product) ตรงตามความต้องการของลูกค้าในกลุ่มเป้าหมาย โดยทั่วไปความสำเร็จของคุณภาพตามการออกแบบจะเกิดในขั้นตอนของการออกแบบ โดยการออกแบบให้สินค้ามีความหลากหลาย เป็นที่พอใจของลูกค้าในกลุ่มเป้าหมายได้ เช่น โทรศัพท์มือถือ บางรุ่นสามารถร้องคาราโอเกะได้ บางรุ่นสามารถถ่ายรูปได้ เป็นต้น
- คุณภาพตามข้อกำหนด (Quality of Conformance) คือ คุณภาพที่ตรงตามข้อกำหนดทางเทคนิค (Specification) และพิกัดความเผื่อ (Tolerance) โดยทั่วไป คุณภาพตามข้อกำหนด จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต (Material) ความสามารถ ความเชี่ยวชาญ หรือประสบการณ์ของแรงงาน (Man) เครื่องจักรที่ใช้ (Machine) วิธีการผลิต (Method) เป็นต้น

สินค้าที่มีคุณภาพดีย่อมก่อให้เกิดความพึงพอใจต่อลูกค้า (Consumer Satisfaction) และความพึงพอใจจากลูกค้า นี้เอง ที่เป็นตัวกำหนด "ส่วนครองตลาด" (Market Share) ของสินค้า หรืออีกนัยหนึ่ง คุณภาพเป็นตัวกำหนดความอยู่รอดของธุรกิจ ถึงแม้ว่าความพึงพอใจของลูกค้าแต่ละคนต่อสินค้าใด ๆ จะอยู่บนพื้นฐานที่ต่างกัน เนื่องจากลูกค้าแต่ละคนใช้มาตรฐานการวัดคุณภาพที่ต่างกัน แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นจากผลการสำรวจลูกค้าจำนวน 3,000 ราย ในประเทศสหรัฐอเมริกา เยอรมัน และญี่ปุ่น โดย American Society for Quality Control (ASQC) และ Gallup Organization พบว่า มาตรฐานการวัดคุณภาพที่ลูกค้าส่วนใหญ่ นิยมใช้ คือ การใช้งานราคา และชื่อเสียง ดังนั้นสินค้าใด ๆ จะเป็นสินค้าที่ดี ก็ต่อเมื่อสินค้านั้นมีความเหมาะสมต่อการใช้งาน สำหรับลูกค้าที่ซื้อสินค้าเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิต ความเหมาะสมต่อการใช้งาน คือ ความสามารถในการแปรรูปวัตถุดิบให้เกิดเป็นสินค้าที่ตรงตามข้อกำหนด (Conforming) ได้มากที่สุด โดยเสียค่าใช้จ่ายในการแปรรูปน้อยที่สุด สำหรับลูกค้าที่ซื้อรถยนต์ ความเหมาะสมต่อการใช้งาน คือ ความสามารถในการใช้งานของรถยนต์อย่างปลอดภัย โดยเสียค่าซ่อมบำรุงน้อยที่สุด ความเหมาะสมต่อการใช้งานสำหรับสินค้าแต่ละชนิด สามารถอธิบายได้จากคุณลักษณะทางคุณภาพ (Quality Characteristic) ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น

- ทางกายภาพ (Physical) เช่น ความยาว ความสูง น้ำหนัก
- ทางสัมผัส (Sensory) เช่น รูปลักษณ์ รสชาติ สี
- ที่เกี่ยวกับเวลา (Time Orientation) เช่น ความทนทาน การบริการ การดูแลรักษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 ความสำคัญของการปรับปรุงคุณภาพ

เป็นที่แน่นอนที่ผู้ผลิตย่อมต้องการให้สินค้าของตนเป็นสินค้าที่ดีเยี่ยม ไม่มีรอยตำหนิหรือความบกพร่อง (Defect of Nonconformity) ใด ๆ ถึงแม้ว่าในความเป็นจริงแล้วจะเป็นไปได้ยากมากอันเนื่องมาจากความผันแปร (Variation) ซึ่งเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ ยิ่งไปกว่านั้นความผันแปรยังส่งผลให้ไม่มีสินค้า 2 ชิ้นใด ๆ ที่ผลิตด้วยเครื่องจักรเครื่องเดียวกันในเวลาไล่เลี่ยกัน มีคุณลักษณะที่เหมือนกันทุกประการ เช่น ในการบรรจุอาหารกระป๋อง น้ำหนักของอาหารกระป๋อง จะไม่เท่ากับน้ำหนักที่ระบุบนฉลากข้างกระป๋อง อาจมีความคลาดเคลื่อนบ้างเล็กน้อย นอกจากนี้ยังมีความเป็นไปได้ว่า ถ้าชั่งอาหารกระป๋อง 10 กระป๋องที่บรรจุต่อเนื่องกันด้วยเครื่องบรรจุเครื่องเดียวกัน อาจจะไม่มีกระป๋องใดที่น้ำหนักเท่ากันเลย อย่างไรก็ตาม ถ้าคุณลักษณะของสินค้าไม่ตรงตามข้อกำหนด (Nonconforming) แต่ไม่รุนแรงก็อาจส่งสินค้านั้นไปทำซ่อมได้ (Rework) แต่ถ้าคุณลักษณะของสินค้าผิดจากข้อกำหนดเกินกว่าที่จะส่งกลับไปทำซ่อมได้ สินค้านั้นจะถูกคัดออกและถือเป็นของเสีย (Defective) ดังนั้น การปรับปรุงคุณภาพคือ การลดความผันแปรของกระบวนการผลิตให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นได้ ถึงแม้ว่าจะไม่สามารถลดจนเป็นศูนย์เพื่อให้มีสินค้าที่ไม่ตรงตามข้อกำหนดหรือของเสียออกมาน้อยที่สุด โดยใช้ความรู้ทางวิศวกรรมคุณภาพ (Quality Engineering) เพื่อการออกแบบ ปฏิบัติ และจัดการให้คุณลักษณะทางคุณภาพต่าง ๆ อยู่ในระดับที่ยอมรับได้มากที่สุด

จึงเป็นหน้าที่ของวิศวกรในการปรับปรุงคุณภาพของสินค้า ให้อยู่ในระดับที่ลูกค้าพึงพอใจ โดยนำความรู้ทางคณิตศาสตร์และ/หรือฟิสิกส์มาประยุกต์ใช้ อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันการเติบโตและพัฒนาของเทคโนโลยีเป็นไปอย่างรวดเร็ว จนในบางครั้ง ทฤษฎีที่มีอยู่ก็ไม่สามารถนำไปแก้ไขปัญหาที่ต้องการได้ วิธีหนึ่งที่สามารถทำได้ คือการนำสถิติ (Statistics) เพื่อใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการปรับปรุงคุณภาพ เนื่องจากความผันแปรสามารถอธิบายได้ในแง่ของสถิติ โดยการสำรวจและเก็บข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์ทางสถิติ (Statistical Analysis) และสรุปผล อย่างไรก็ตาม การสำรวจและเก็บข้อมูลนั้นจะต้องดำเนินการอย่างถูกต้อง เพราะบทวิเคราะห์และผลสรุปที่ไม่ถูกต้องหมายถึงเวลาที่เสียไปในการเก็บข้อมูลนั่นเอง

ข้อดีของการปรับปรุงคุณภาพมีดังนี้

- การปรับปรุงคุณภาพอย่างมีประสิทธิภาพและต่อเนื่อง จะช่วยเพิ่มความสามารถของกระบวนการผลิต
- เนื่องจากระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ทำให้ผลิตสินค้าที่ตรงตามข้อกำหนดมากขึ้น มีของเสียน้อยลง จำนวนสินค้าที่จะต้องส่งกลับไปทำซ่อมลดลง ทำให้มีรายรับเพิ่มขึ้น
- เพิ่มความเชื่อมั่นของลูกค้าในตัวสินค้า
- เพิ่มความตื่นตัวของลูกค้า ทำให้ลูกค้าตระหนักถึงคุณภาพของสินค้ามากขึ้น
- ทำให้การแข่งขันทางการค้าสูงขึ้น สินค้าที่ออกมาก็จะมีมาตรฐานที่ดีขึ้น ผู้ผลิตที่ผลิตสินค้าต่ำกว่ามาตรฐานท้ายที่สุดจะไม่สามารถอยู่ได้ กิจการที่จะปิดไปหากไม่มีการพัฒนาให้ดีขึ้น

2.1.2 ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับคุณภาพ

ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับคุณภาพ คือ ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากความพยายามหลีกเลี่ยงเพื่อไม่ให้เกิด รอยตำหนิ หรือความบกพร่องในตัวสินค้า จากการหารอยตำหนิหรือความบกพร่องในตัวสินค้าหรือจากการทำซ่อมเพื่อให้สินค้าตรงตามข้อกำหนด ในช่วงทศวรรษที่ 1950 บริษัทต่าง ๆ เริ่มให้ความสำคัญกับค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับคุณภาพมากขึ้นเนื่องมาจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. สินค้ามีความซับซ้อนมากขึ้นตามการพัฒนาอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยี ทำให้ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับคุณภาพสูงขึ้นตามไปด้วย
2. ความตื่นตัวเกี่ยวกับค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นตามกาลเวลามีมากขึ้น เช่น ค่าดูแลรักษา ค่าซ่อมบำรุง ค่าใช้จ่ายที่เกิดจากสินค้าไม่สามารถใช้งานได้ เป็นต้น
3. ความต้องการวิศวกรคุณภาพเข้ามาช่วยในการปรับปรุงคุณภาพ

โดยทั่วไป ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับคุณภาพสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ดังนี้

1. ค่าใช้จ่ายด้านการป้องกัน (Prevention Costs)
2. ค่าใช้จ่ายด้านการประเมิน (Appraisal Costs)
3. ค่าใช้จ่ายจากความเสียหายภายใน (Internal Failure Costs)
4. ค่าเสียหายจากความเสียหายภายนอก (External Failure Costs)

2.1.2.1 ค่าใช้จ่ายด้านการป้องกัน

ค่าใช้จ่ายด้านการป้องกัน คือ ค่าใช้จ่ายจากความพยายามในการทำให้สินค้าตรงตามข้อกำหนด สามารถแจกแจงได้ดังนี้

- ค่าใช้จ่ายจากการวางแผนในการควบคุมคุณภาพ แผนการตรวจสอบ แผนการเก็บรวบรวมข้อมูล การรับประกันคุณภาพ (Quality Assurance, QA) รวมถึงการเตรียมเอกสารต่าง ๆ
- ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการออกตัวสินค้าใหม่ ซึ่งรวมถึง ค่าใช้จ่ายจากการเฝ้าติดตามสินค้าใหม่ค่าใช้จ่ายจากการประเมินคุณภาพของสินค้าใหม่ ค่าใช้จ่ายจากการวางแผนและทดสอบสินค้าใหม่ และค่าใช้จ่ายอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการพัฒนาและการเตรียมตัวเพื่อผลิตสินค้าใหม่
- ค่าใช้จ่ายจากการออกแบบสินค้าให้มีคุณภาพที่ดีขึ้น
- ค่าใช้จ่ายจากการควบคุมกระบวนการผลิตให้อยู่ในการควบคุม โดยมีความผันแปรน้อยที่สุด
- ค่าใช้จ่ายด้านการป้องกันไม่ให้สินค้าเสื่อมก่อนหมดอายุการใช้งาน
- ค่าใช้จ่ายจากการจัดให้มีโปรแกรมการฝึกอบรม โดยเน้นถึงความสำคัญของคุณภาพเป็นสำคัญ
- ค่าใช้จ่ายจากการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลทางคุณภาพ เพื่อหาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหา

2.1.2.2 ค่าใช้จ่ายด้านการประเมิน

ค่าใช้จ่ายด้านการประเมิน คือ ค่าใช้จ่ายจากความพยายามเพื่อเพิ่มความแน่ใจว่าสินค้าที่ ผลิตได้จะตรงตามข้อกำหนด สามารถแจกจงได้ดังนี้

- ค่าใช้จ่ายจากการทดสอบและตรวจสอบวัตถุดิบที่ใช้ รวมถึงค่าใช้จ่ายจากการตรวจสอบแผนการรับประกันคุณภาพของผู้ผลิต
- ค่าใช้จ่ายจากการทดสอบและตรวจสอบสินค้า ซึ่งรวมถึงค่าใช้จ่ายจากการทดสอบและตรวจสอบตามขั้นตอนต่าง ๆ ของกระบวนการผลิต เพื่อให้มั่นใจได้ว่าสินค้าจะตรงตามข้อกำหนด
- ค่าใช้จ่ายจากการทดสอบความเชื่อถือได้ (Reliability) ของสินค้า
- ค่าใช้จ่ายจากการดูแลรักษาเครื่องมือที่ใช้ทดสอบให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสม มีความถูกต้องแม่นยำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.3 ค่าเสียหายจากความเสียหายภายใน

ค่าใช้จ่ายจากความเสียหายภายใน คือ ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นเมื่อสินค้า ชิ้นส่วนประกอบ หรือวัตถุดิบไม่ตรงตามความต้องการทางคุณภาพก่อนที่สินค้าจะถึงมือลูกค้า ค่าใช้จ่ายเหล่านี้จะไม่เกิดขึ้นถ้าสินค้าที่ผลิตได้ไม่มีรอยตำหนิหรือความบกพร่อง ค่าใช้จ่ายจากความเสียหายภายในสามารถแจกแจงได้ดังนี้

- ค่าใช้จ่ายทางตรง (Direct Costs) และทางอ้อม (Indirect Costs) ในส่วนของการผลิตสินค้าประเภท Scrap ซึ่งเป็นสินค้าที่ไม่ตรงตามความต้องการทางคุณภาพ ไม่สามารถนำมาใช้งานได้ และไม่คุ้มกับการนำกลับไปทำซ่อม (Rework) เพื่อให้สินค้าที่ตรงตามความต้องการทางคุณภาพได้อีก
- ค่าใช้จ่ายจากการทำซ่อมสินค้าที่ไม่ตรงตามความต้องการทางคุณภาพ แต่สามารถนำกลับมาไปทำซ่อมเพื่อให้เป็นสินค้าที่ตรงตามความต้องการทางคุณภาพ และสามารถนำมาใช้งานได้อีก
- ค่าใช้จ่ายจากการทดสอบและตรวจสอบสินค้าที่ผ่านการทำซ่อม (Retest Costs)
- ค่าใช้จ่ายจาการหาสาเหตุของความเสียหายในการใช้งาน (Failure Analysis Costs)
- ความสูญเสียจากการที่หน่วยผลิตต้องหยุดการผลิตชั่วคราว (Downtime Costs) เนื่องจากสิ่งหนึ่งสิ่งใดไม่ตรงตามข้อกำหนด เช่นวัตถุดิบไม่ตรงตามข้อกำหนด เป็นต้น
- รายรับที่สูญไป เมื่อสินค้าที่ผลิตได้น้อยกว่าที่คาดไว้ (Yield Losses) อาจเนื่องมาจากความผันแปรของกระบวนการผลิตที่สูงมาก หรือค่าเฉลี่ยของกระบวนการผลิตสูงขึ้น ทำให้จำนวนสินค้าที่ผลิตได้น้อยลง เช่น ปริมาณของครีมนวดผมที่บรรจุจริงมากกว่าที่ระบุไว้บนลากข้างขวด จึงทำให้จำนวนขวดของครีมนวดผมที่บรรจุได้น้อยกว่าที่คาดไว้
- รายรับที่สูญไปจากการขายสินค้าที่ไม่ตรงตามความต้องการของลูกค้า ต่ำกว่าราคาขายที่คาดไว้ (Downgrading/ Off- Spacing Losses)

2.1.2.4 ค่าเสียหายจากความเสียหายภายนอก

ค่าใช้จ่ายจากความเสียหายภายนอก คือ ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นเมื่อสินค้าไม่ตรงตามความต้องการของลูกค้าหลังจากที่สินค้าได้ถึงมือลูกค้าแล้ว ค่าใช้จ่ายเหล่านี้จะไม่เกิดขึ้นถ้าสินค้าที่ผลิตได้ตรงตามข้อกำหนด ค่าใช้จ่ายจากความเสียหายภายนอกสามารถแจกแจงได้ดังนี้

- ค่าชดเชยความไม่พึงพอใจของลูกค้าที่มีต่อสินค้านั้น ๆ (Compliant Adjustment)
- ค่าใช้จ่ายจากการเก็บรักษาสินค้าที่ไม่ตรงตามข้อกำหนด รวมถึงการทดแทนด้วยสินค้าที่ตรงตามข้อกำหนด (Returned Product / Material Costs)
- ค่าใช้จ่ายและค่าบริการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในช่วงการรับประกันสินค้า (Warranty Charges)
- ค่าใช้จ่ายหรือผลตอบแทนที่เกิดจากความเชื่อมั่นในตัวสินค้า (Liability Costs)
- ความสูญเสียจากความไม่พึงพอใจในตัวสินค้าของลูกค้า เนื่องจากสินค้าที่ได้ไม่ตรงตามข้อกำหนด โดยอาจมีผลถึงทัศนะคติในมุมลบของลูกค้าที่มีต่อบริษัท อาจทำให้ส่วนครองตลาดลดลง นอกจากนี้อาจมีผลต่อความไว้วางใจของลูกค้าต่อสินค้าตัวอื่น ๆ ของบริษัทอีกด้วย

2.1.2.5 การจัดการค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับคุณภาพ

ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับคุณภาพจะแตกต่างกันไปสำหรับแต่ละบริษัท ทั้งนี้ทั้งนั้นก็ขึ้นอยู่กับประเภทของบริษัทและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสำเร็จของการปรับปรุงคุณภาพ ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับคุณภาพอาจมีเพียง 4-5 % หรืออาจมากถึง 35-40 % ก็เป็นได้ ค่าใช้จ่ายด้านการป้องกันและการประเมิน ถือเป็นค่าใช้จ่ายที่ควบคุมได้ ในขณะที่ค่าใช้จ่ายจากความเสียหายภายในและความเสียหายภายนอกเป็นค่าใช้จ่ายที่ควบคุมไม่ได้ อย่างไรก็ตาม ค่าใช้จ่ายด้านการป้องกันและการประเมินที่เพิ่มขึ้นจะช่วยลดความเสียหายภายในและความเสียหายภายนอกได้ ทำให้ค่าใช้จ่ายจากความเสียหายภายในและความเสียหายภายนอกลดลง โดยส่วนใหญ่ บริษัทจะมีค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับคุณภาพสูงเกินความจำเป็น และมักจะพบว่าค่าใช้จ่ายด้านการประเมินสูงกว่าค่าใช้จ่ายด้านการป้องกันมาก ซึ่งเป็นความผิดพลาดที่พบได้บ่อย เพราะในความเป็นจริงแล้ว ค่าใช้จ่ายด้านการป้องกันควรจะมากกว่าค่าใช้จ่ายด้านการประเมิน เนื่องจากค่าใช้จ่ายด้านการป้องกันให้ผลตอบกลับที่ดีกว่านั้นเอง

หน้าที่ของนักจัดการ คือ การลดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับคุณภาพรวมถึงการจัดสรรค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับคุณภาพแต่ละประเภทให้เหมาะสม วิธีการในการลดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับคุณภาพโดยทั่วไป คือ การวิเคราะห์แบบพาเรโต (Pareto Analysis) โดยเริ่มจากการแยกประเภทของค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับคุณภาพตามประเภทของสินค้า ชนิดของสินค้า หรือรอยตำหนิหรือความบกพร่องตามที่ต้องการ แล้วเรียงลำดับจากประเภทที่พบมากที่สุดไปยังประเภทที่พบน้อยที่สุด ผลของการจัดเรียงข้อมูลที่ได้จะพบว่า มีค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับคุณภาพเพียงไม่กี่ประเภทที่มีสัดส่วนที่มากเมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับคุณภาพประเภทอื่น ๆ ดังนั้น การลดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับคุณภาพ คือ ความพยายามที่จะแก้ปัญหาที่ก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับคุณภาพที่มีสัดส่วนค่อนข้างมากซึ่งมีเพียงไม่กี่ประเภทนั่นเอง

2.1.3 เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพ

เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการที่สำคัญมี 3 วิธี ดังนี้

1. การออกแบบการทดลอง (Experimental Design)
2. การควบคุมกระบวนการทางสถิติ (Statistical Process Control, SPC)
3. การสุ่มตัวอย่างของการยอมรับ (Acceptance Sampling)

2.1.3.1 <u>การออกแบบการทดลอง</u>

การออกแบบการทดลองใช้เป็นครั้งแรกในช่วงทศวรรษ 1950 ในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยเริ่มใช้ครั้งแรกในอุตสาหกรรมเคมี แต่ยังไม่แพร่หลายนัก จนกระทั่งในช่วงทศวรรษ 1960 เทคนิคนี้ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศญี่ปุ่นและตอนปลายของช่วงทศวรรษ 1970 ในซีกโลกตะวันตก การออกแบบการทดลองจะช่วยในการหาปัจจัย (Factor) ต่าง ๆ ที่มีผลต่อคุณลักษณะทางคุณภาพของกระบวนการที่สนใจ โดยการเปลี่ยนค่าปัจจัยเหล่านี้อย่างมีระบบแล้วบันทึกผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อคุณลักษณะทางคุณภาพที่สนใจ การออกแบบการทดลองเป็นการควบคุมกระบวนการนอกสาย (Off-Line Process Control) ไม่จำเป็นจะต้องทำไปพร้อมกับกระบวนการ นอกจากนี้ การออกแบบการทดลองยังช่วยลดความผันแปรของกระบวนการได้อีกด้วย รวมทั้งยังช่วยกำหนดค่าหรือระดับของปัจจัยต่าง ๆ ที่เหมาะสม เพื่อจะได้มาซึ่งคุณลักษณะทางคุณภาพที่ดีที่สุด

หลังจากที่ทราบปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อคุณลักษณะทางคุณภาพของกระบวนการที่สนใจแล้วขั้นตอนต่อไป คือ การสร้างแบบจำลองของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยเหล่านี้กับคุณลักษณะทางคุณภาพของกระบวนการที่สนใจ เทคนิคการสร้างแบบจำลองที่นิยมใช้กัน คือ การวิเคราะห์ความถดถอย (Regression Analysis) และการวิเคราะห์อนุกรมเวลา (Time Series Analysis) โดยแบบจำลองนี้สามารถนำมาใช้ในการปรับแต่งกระบวนการเมื่อกระบวนการไม่อยู่ในการควบคุมได้

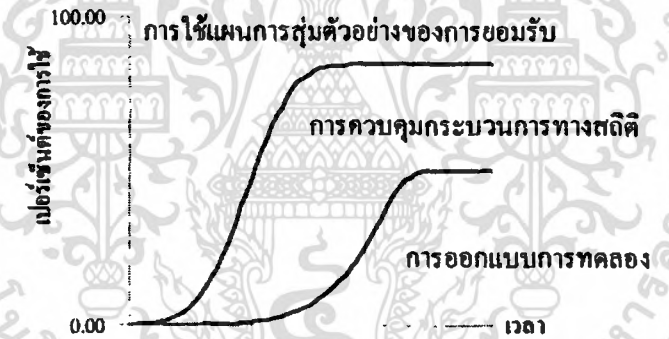
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.2 การควบคุมกระบวนการทางสถิติ

หลังจากที่ได้แบบจำลองของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ กับคุณลักษณะทางคุณภาพของกระบวนการที่สนใจแล้ว ขั้นตอนต่อไป คือ การควบคุมกระบวนการทางสถิติ โดยใช้แผนภูมิควบคุมเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ทางคุณภาพ การควบคุมกระบวนการทางสถิติ เป็นการควบคุมกระบวนการตามสาย (On-Line Process Control) จะต้องทำไปพร้อมกับกระบวนการ โดยการเฝ้าสังเกตคุณลักษณะทางคุณภาพที่สนใจ และตรวจจับเมื่อกระบวนการไม่อยู่ในการควบคุม เพื่อจะได้ปรับแต่งปัจจัยต่าง ๆ ตามความสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองและทำให้กระบวนการกลับมาอยู่ในการควบคุมอีกครั้ง

2.1.3.3 การสุ่มตัวอย่างของการยอมรับ

การสุ่มตัวอย่างของการยอมรับมักจะใช้ในขั้นตอน ของการตรวจรับสินค้า (Lot Sentencing) โดยจะทำการสุ่มตัวอย่างจากล๊อต (Lot) และใช้ข้อมูลที่ได้จากตัวอย่างที่สุ่มเป็นเกณฑ์ในการตัดสินว่าจะยอมรับล๊อตนั้น ๆ หรือไม่ การสุ่มตัวอย่างของการยอมรับไม่ได้เป็นการประเมินคุณภาพของล๊อตแต่อย่างใด และไม่ได้แสดงว่าล๊อตที่ได้รับยอมรับจะดีกว่าล๊อตที่ถูกปฏิเสธในบทที่ 9 และ 10 จะกล่าวถึงรายละเอียดของแผนการสุ่มตัวอย่างของการยอมรับ (acceptance-Sampling Plan) ชนิดต่าง ๆ

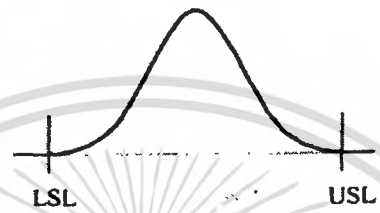


รูปที่ 2.1 เปอร์เซ็นต์ของการใช้เทคนิคต่าง ๆ

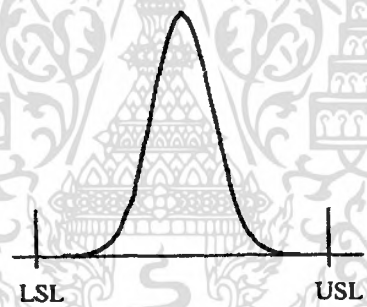
รูปที่ 2.1 แสดงถึงเปอร์เซ็นต์ของการใช้เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพวิธีต่าง ๆ จากรูปจะพบว่าการใช้แผนการสุ่มตัวอย่างของการยอมรับเป็นวิธีที่นักจัดการมือใหม่นิยมใช้ อย่างไรก็ตาม วิธีนี้เป็นวิธีที่ไม่ได้ตระหนักถึงความสำคัญของปัญหาทางด้านคุณภาพมากนัก รวมทั้งยังไม่มีแผนการรับประกันคุณภาพที่เป็นระบบและมีประสิทธิภาพเพียงพอ เมื่อนักจัดการเริ่มตระหนักแล้วว่า การใช้แผนการสุ่มตัวอย่างของการยอมรับเพียงอย่างเดียว ไม่สามารถทดสอบหรือตรวจสอบคุณภาพของสินค้าได้เลย เปอร์เซ็นต์การใช้แผนการสุ่มตัวอย่างของการยอมรับจะลดลง บริษัทจะเริ่มให้ความสำคัญกับการปรับปรุงกระบวนการผลิตมากขึ้น โดยใช้การควบคุมกระบวนการทางสถิติและการออกแบบการทดลองมากขึ้น ด้วยสัดส่วนที่มากกว่าการใช้แผนการสุ่มตัวอย่างของการยอมรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(a) การใช้แผนการสุ่มตัวอย่างของการยอมรับ



(b) การควบคุมกระบวนการทางสถิติ



(c) การออกแบบการทดลอง

รูปที่ 2.2 ความผันแปรของกระบวนการเมื่อใช้เทคนิคต่าง ๆ

รูปที่ 2.2 แสดงความผันแปรของกระบวนการเมื่อใช้วิธีต่าง ๆ จากรูปจะพบว่า เมื่อใช้แผนการสุ่มตัวอย่างของการยอมรับ ความผันแปรของกระบวนการจะสูง รวมทั้งเปอร์เซ็นต์ของสินค้าที่ไม่ตรงตามข้อกำหนด (พื้นที่ในส่วนที่สูงกว่าขีดจำกัดบนของข้อกำหนด, USL, หรือต่ำกว่าขีดจำกัดล่างของข้อกำหนด, LSL) ก็จะสูงด้วย การควบคุมกระบวนการทางสถิติจะช่วยลดความผันแปรของกระบวนการผลิต ทำให้กระบวนการผลิตอยู่ในการควบคุม เปอร์เซ็นต์ของสินค้าที่ไม่ตรงตามข้อกำหนดลดลง อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่ากระบวนการผลิตจะอยู่ในการควบคุมตามที่ต้องการแล้ว การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองร่วมด้วยจะช่วยลดความผันแปรของกระบวนการผลิตได้อีก และความผันแปรที่ลดลงจะทำให้ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับคุณภาพลดลงด้วย

เนื้อหาในหนังสือเล่มนี้ จะมุ่งเน้นถึงวิธีการปรับปรุงคุณภาพของสินค้าโดยอาศัยหลักสถิติเบื้องต้น นอกเหนือจากฝ่ายผลิต วิธีการเหล่านี้ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับส่วนอื่น ๆ ของบริษัท เช่น ฝ่ายบริการ ฝ่ายขาย ฝ่ายบัญชี เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การควบคุมกระบวนการทางสถิติ

2.2.1 เครื่องมือในการวิเคราะห์คุณภาพ

การควบคุมกระบวนการทางสถิติ เป็นชุดเครื่องมือที่ช่วยในการปรับปรุงเสถียรภาพ (Stability) และสมรรถนะ (Capability) ของกระบวนการโดยการลดความผันแปร ความผันแปรสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

- สาเหตุโดยบังเอิญหรือสาเหตุที่ระบุไม่ได้ (Chance Causes โดย Shewhart, Common Causes โดย Deming, Chronic Problems โดย Juran) เป็นความผันแปรโดยธรรมชาติที่ไม่รุนแรงและไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ โดยส่วนใหญ่จะเป็นค่าที่น้อยมากและยอมรับได้ กระบวนการที่มีแต่สาเหตุโดยบังเอิญถือได้ว่าเป็นกระบวนการที่อยู่ในการควบคุม (In Control)
- สาเหตุที่ระบุได้หรือสาเหตุที่กำจัดได้ (Assignable Causes โดย Shewhart, Special Causes โดย Deming, Sporadic Problems โดย Juran) โดยส่วนใหญ่เป็นความผันแปรที่เกิดจากความผิดพลาด ความผิดปกติ ความไม่ได้มาตรฐานของปัจจัยต่าง ๆ เช่น เครื่องจักร วัตถุดิบ และแรงงาน ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว ความผันแปรเหล่านี้มีค่ามากเกินกว่าจะยอมรับ ได้เมื่อเทียบกับความผันแปรโดยธรรมชาติ กระบวนการที่พบสาเหตุที่ระบุได้ ถือได้ว่าเป็นกระบวนการที่ไม่อยู่ในการควบคุม (Out of Control)

จุดประสงค์หลักของการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ คือ ความสามารถในการตรวจพบสาเหตุที่ระบุได้โดยเร็วที่สุดเพื่อหาวิธีป้องกันหรือแก้ไข ก่อนที่ชิ้นส่วนที่ไม่ตรงตามข้อกำหนด (Nonconforming) จะถูกผลิตออกมามากมาย การควบคุมกระบวนการทางสถิติ ประกอบด้วยเครื่องมือในการวิเคราะห์คุณภาพ (Quality Analysis Tools) 7 ชนิด

2.2.1.1 <u>แผ่นตรวจสอบ</u>

แผ่นตรวจสอบ คือ แบบฟอร์มที่ได้รับการออกแบบเพื่อให้กรอกข้อมูลสะดวก ง่าย ไม่ยุ่งยากและเขียนน้อยที่สุดเพื่อลดโอกาสของความผิดพลาด นอกจากนี้ เมื่ออ่านข้อมูลหลังการบันทึกแล้วจะต้องเข้าใจง่ายและนำไปใช้ได้ทันที โดยส่วนใหญ่แผ่นตรวจสอบจะถูกออกแบบตามวัตถุประสงค์ของการเก็บข้อมูลและประโยชน์ใช้สอยของชิ้นงาน รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างของแผ่นตรวจสอบ จากรูปจะพบว่าข้อมูลในแผ่นตรวจสอบสามารถบอกถึงแนวโน้มของข้อมูลได้ ซึ่งแนวโน้มนี้สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุของรอยตำหนิหรือความบกพร่องกับเวลาที่เกิดขึ้นได้ โดยทั่วไป แผ่นตรวจสอบแบ่งออกตามจุดประสงค์ของการเก็บข้อมูลได้เป็น 3 ประเภท คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นตรวจสอบ

ข้อมูลรอยตำหนิหรือความบกพร่องสำหรับปี 2546-2547

หมายเลขชิ้นส่วน: _____

สถานที่: _____

วันที่ตรวจสอบ: _____

ผู้ตรวจสอบ: _____

หมายเหตุ: _____

รอยตำหนิหรือ	2546												2547												รวม
ความบกพร่อง	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
ชิ้นส่วนเสียหาย		3						5		2	1			4					2		3				20
ชิ้นส่วนมีรอยขีดข่วน					2	1	1										2			1					7
ชิ้นส่วนขึ้นสนิม	1											1										5			7
สีไม่สม่ำเสมอ			2	2					5					1	3					5					18
ปัญหาจากเครื่องจักร	1					3	1	1					4				1	1							12
ชิ้นผิวไม่สม่ำเสมอ									1													1			2
ชิ้นส่วนผิดขนาด							1								2										3
รวม	2	3	2	2	2	4	3	6	5	3	1	1	4	5	3	2	3	1	2	6	3	6			69

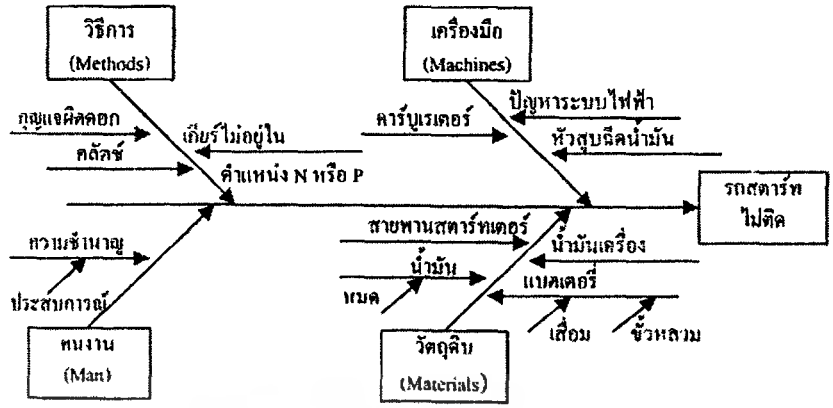
รูปที่ 2.3 แผ่นตรวจสอบ

- แผ่นตรวจสอบสำหรับค่าแจงนับ (Attribute Check Sheet) ใช้สำหรับการเก็บข้อมูลที่เป็นค่าแจงนับ (Attribute Data) โดยส่วนใหญ่เป็นข้อมูลเกี่ยวกับจำนวนรอยตำหนิหรือความบกพร่องต่าง ๆ
- แผ่นตรวจสอบสำหรับค่าวัด (Variable Check Sheet) ใช้สำหรับการเก็บข้อมูลที่เป็นค่าวัด (Variable Data)
- แผ่นตรวจสอบเชิงตำแหน่งของรอยตำหนิหรือความบกพร่อง (Defect Location Check Sheet) ใช้สำหรับการบันทึกตำแหน่งของรอยตำหนิหรือความบกพร่องต่าง ๆ โดยทั่วไปจะเป็นการบันทึกเชิงแผนภาพ

2.2.1.2 <u>ผังแสดงเหตุและผล</u>

ผังแสดงเหตุและผล นิยมเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ผังก้างปลา (Fish-Bone Diagram) นำเข้ามาใช้ในวงการการควบคุมคุณภาพโดย ดร. อิชิกาว่า (Dr. Ishikawa) ชาวญี่ปุ่น ในบางครั้งจึงเรียกผังนี้ว่า ผังอิชิกาว่า (Ishikawa Diagram) นอกจากนี้ยังมีชื่อเรียกอื่น ๆ คือ ผังรากไม้ (Tree-Root Diagram) ผังต้นไม้ (Tree Diagram) หรือผังลำน้ำ (River Diagram) ผังแสดงเหตุและผลเป็นผังที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะทางคุณภาพและปัจจัยต่าง ๆ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ เป็นผังที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัญหาและสาเหตุของปัญหาที่เป็นไปได้ ช่วยให้การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาทางคุณภาพเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ผังแสดงเหตุและผล

ผังแสดงเหตุและผลประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนที่รวบรวมสาเหตุของปัญหา (ส่วนโครงกระดูกที่เป็นตัวปลา) โดยทั่วไปจะอยู่ทางซ้ายมือ และส่วนที่เป็นข้อสรุปของปัญหา (ส่วนหัวปลา) โดยทั่วไปจะอยู่ทางขวามือ การสร้างผังแสดงเหตุและผลจะเริ่มจากการกำหนดคุณลักษณะทางคุณภาพที่เป็นปัญหาแล้วเขียนทางขวามือของผัง (ส่วนหัวปลา) จากนั้นจึงแจกแจงสาเหตุหลักของปัญหาแล้วเขียนลงทางซ้ายมือของผัง (ส่วนโครงกระดูกที่เป็นตัวปลา) ในแต่ละสาเหตุหลักให้แจกแจงสาเหตุรองและในแต่ละสาเหตุรอง (ถ้ามี) ก็ให้แจกแจงสาเหตุย่อย รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างผังแสดงเหตุและผลเมื่อปัญหาคือ สตาร์ทรถไม่ติด

2.3 การเลือกใช้วัสดุและการออกแบบทางวิศวกรรม

เราอาจนิยามคำว่า การออกแบบวิศวกรรม (Engineering design) ว่าเป็นกระบวนการสรรค์สร้างชิ้นส่วนอุปกรณ์หรือระบบใหม่ สำหรับวิศวกรวัสดุ (Materials engineering) จะตั้งคำถามว่า ชิ้นส่วนอุปกรณ์ หรือระบบที่ต้องการจะสามารถสร้างจากวัสดุอะไรและด้วยวิธีไหนได้บ้าง และ แต่ละวิธีการเปรียบเทียบกันแล้วเป็นอย่างไร การที่จะตอบคำถามข้อนี้ได้ เราจำเป็นต้องตอบปัญหาที่เกี่ยวข้องหลายประการด้วยกัน

2.3.1 ข้อกำหนดทางเทคนิคที่ต้องการปฏิบัติตาม

- ข้อกำหนดด้านสมรรถนะการใช้งานของสิ่งที่ต้องการจะสร้างคืออะไร นั้นคือ สมบัติต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานนั้นๆ เช่นสมบัติทางกล ทางกายภาพ ทางไฟฟ้า-แม่เหล็ก และทางเคมีจะต้องเป็นอย่างไร
- ข้อมูลสำหรับการออกแบบมีครบแล้วหรือไม่และครอบคลุมข้อกำหนดทั้งหมดแล้วหรือยัง
- สิ่งที่จะสร้างใหม่สามารถเข้ากันได้กับชิ้นส่วน อุปกรณ์ และระบบที่มีอยู่เดิมหรือไม่

2.3.2 สิ่งที่ต้องพิจารณาในการตัดสินใจเลือกวัสดุและกรรมวิธีการผลิต

- วัสดุที่กำลังพิจารณาหาได้ง่ายเพียงใด เชื่อถือได้แค่ไหนเราจำเป็นต้องทำการตรวจสอบสภาพการใช้งานบ่อยแค่ไหนเสียค่าใช้จ่ายมากน้อยแค่ไหน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ราคาของวัสดุและกระบวนการผลิตในระดับที่ยอมรับได้เป็นเท่าไรการเลือกใช้วัสดุนี้ให้ผลคุ้มค่าทางเศรษฐกิจเท่าไร เมื่อเปรียบเทียบกับระบบอื่นแล้วเป็นอย่างไรบ้าง
- มีวิธีการใดบ้างที่เราสามารถใช้ในการผลิตชิ้นส่วน อุปกรณ์ หรือระบบนั้นได้ แต่ละวิธีความยาก-ง่ายเปรียบเทียบกันอย่างไร
- ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในการเลือกใช้วัสดุนี้เป็นอย่างไร เมื่อชิ้นส่วนหรือระบบหมดอายุแล้ว เราจะจัดการอย่างไร
- และสุดท้ายแต่มีความสำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่าข้ออื่น-ในกรณีที่ชิ้นส่วนหรือระบบเกิดความเสียหายระหว่างการใช้งาน จะมีผลกระทบโดยตรงและผลกระทบต่อเนื่องอย่างไรได้บ้าง จะเกิดอะไรขึ้นในกรณีที่เกิดความเสียหายต่อวัสดุนั้น

จะเห็นได้ว่า ในกระบวนการเลือกวัสดุและการเลือกกรรมวิธีการผลิตนั้น วิศวกรผู้ออกแบบจะต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆหลายประการเช่นข้อกำหนดเกี่ยวกับสมรรถนะของวัสดุ ความทนทานของชิ้นส่วนราคา ความเชื่อถือได้ ความรับผิดชอบต่อการออกแบบ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพและความปลอดภัยของมนุษย์ เป็นต้น

2.3.3 ทำไมจึงต้องมีการเลือกใช้วัสดุ

การเลือกใช้วัสดุอาจมีสาเหตุดังต่อไปนี้

1. การใช้วัสดุชนิดใหม่หรือกรรมวิธีการผลิตแบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพมากกว่าเดิม ตัวอย่างการใช้วัสดุชนิดใหม่มีให้เห็นมากมาย เช่น การใช้วัสดุที่สามารถทนความร้อนสูงสำหรับทำฉนวนผิวนอกของยานกระสวยอวกาศ (Space shuttle) และ การใช้วัสดุที่สามารถทนต่อการสึกกร่อนและมีความแข็งและความเหนียวสูงสำหรับการขุดเจาะหาน้ำมัน เป็นต้น

2. การปรับปรุงสมรรถนะการใช้งาน ตัวอย่างการปรับปรุงสมรรถนะการใช้งาน เช่น การใช้วัสดุเครื่องมือที่สามารถตัดที่ความเร็วสูงเพื่อเพิ่มผลผลิต และการใช้เหล็กล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (High –strength low-alloy steel หรือ HSLA steels) หรืออะลูมินัมผสมเพื่อลดน้ำหนักของรถยนต์ซึ่งจะช่วยลดอัตราการใช้น้ำมัน เป็นต้น

3. การลดค่าใช้จ่ายเพื่อให้สินค้าแข่งขันได้ในตลาด การลดค่าใช้จ่ายอาจเป็นไปเพื่อให้สินค้ามีต้นทุนต่ำลงและสามารถแข่งขันได้ในตลาด อีกทั้งอาจเป็นการเพิ่มกำไรให้กับบริษัทได้ ตัวอย่างการลดค่าใช้จ่าย เช่น การใช้พลาสติกแทนชิ้นส่วนโลหะเพื่อลดต้นทุนของผลิตภัณฑ์ การเลือกใช้กระบวนการที่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ให้มีรูปร่างใกล้เคียงกับรูปร่างสุดท้าย (near-net-shape forming) เช่น การใช้วิธีการหล่อหรือการอัดผงโลหะแทนการทุบขึ้นรูปเพื่อลดขั้นตอนการกัดแต่ง (machining) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่มีการออกแบบและปรับเปลี่ยนวิธีการผลิต ทั้งนี้เราจะต้องคำนึงถึงสมบัติใหม่ของผลิตภัณฑ์ตามที่ได้จากวัสดุและกระบวนการผลิตแบบใหม่ด้วย

4. การแทนที่วัสดุที่มีปัญหาในการใช้งาน สาเหตุที่วัสดุที่มีปัญหาระหว่างการใช้งานมีหลายประการ เช่น การออกแบบที่ผิดพลาด กระบวนการผลิตไม่ถูกต้อง การควบคุมคุณภาพที่ไม่รัดกุม การใช้งานไม่เป็นไปตามข้อกำหนด หรือแม้แต่การเลือกวัสดุที่ไม่เหมาะสมมาตั้งแต่ต้น ตัวอย่างปัญหาที่พบ เช่น ชิ้นส่วนโลหะไม่สามารถทนต่อการกัดกร่อนและการเสียดสีได้ตามที่คาดไว้ วัสดุทางการแพทย์ที่ใช้ในการผ่าตัดไม่สามารถเข้ากับร่างกายคนไข้ได้ หรือชิ้นส่วนของรถยนต์หรือเครื่องบินเกิดการแตกหักเสียหายในระหว่างการใช้งาน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การคิดหาการใช้งานสำหรับวัสดุชนิดใหม่ วัสดุใหม่ที่ได้รับการพัฒนามักจะมีคุณสมบัติบางประการที่น่าสนใจ แต่จำเป็นต้องได้รับการศึกษาและตรวจสอบอย่างรัดกุมก่อนที่จะนำไปใช้งานได้อย่างเหมาะสม เช่น โลหะจำรูป (shape-memory alloys) อินเทร์เมทัลลิกส์ (intermerallics) และเซรามิกส์ขุดใหม่ (advanced ceramics) เป็นต้น ในระยะเริ่มแรก เราอาจหาวิธีการใช้งานวัสดุใหม่บางชนิดได้ไม่ง่ายนัก จนมีคำกล่าวกันเล่น ๆ ว่าวัสดุเหล่านี้เป็น "คำตอบที่ตามหาคำถาม"

อินทิเกรตสมการนี้จะได้

$$N = 2\frac{(a_C^{1-n/2} - a_i^{1-n/2})}{(2-n)CY^n(\Delta\sigma)^n\pi^{n/2}} \qquad (2.1)$$

โดยที่ a_i คือ ขนาดของรอยแตกเริ่มต้น และ a_c คือ ขนาดของรอยแตกวิกฤติ

2.4 การเลือกโลหะและการออกแบบเพื่อทนอุณหภูมิ

2.4.1 การพัฒนาโลหะผสมที่ทนต่อการคืบ

การเพิ่มความต้านทานต่อการคืบมีกลไกบางอย่างคล้ายคลึงกับการเพิ่มความแข็งแรงของโลหะที่อุณหภูมิห้อง ได้แก่ การเพิ่มความแข็งแรงโดยการให้โลหะเป็นสารละลายของแข็ง (Solution hardening) และการเพิ่มความแข็งแรงโดยการใช้การตกตะกอน (Precipitation hardening) ความแตกต่างของความต้านทานต่อการคืบของโลหะแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับว่า กลไกการเพิ่มความแข็งแรงที่ใช้นั้นจะสามารถ "ทน" ต่ออุณหภูมิสูงได้มากน้อยเพียงใด

กลไกการเพิ่มความแข็งแรงโดยทำให้โลหะเป็นสารละลายของแข็ง (Solid solution strengthen) นั้นช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการคืบได้ แม้จะไม่มากนัก การเพิ่มธาตุผสมเข้าไปในสารละลายของแข็งจะใช้ได้ในกรณีที่ความเค้นไม่ใช่ปัจจัยหลัก ธาตุผสมเหล่านี้จะช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงและยังช่วยให้ขึ้นรูปชิ้นงานได้ง่าย ตัวอย่างเช่น โลหะผสม Ni-Cr ซึ่งมี Co, Mo และ W เป็นธาตุผสม และโลหะผสม Fe-Cr-Ni ซึ่งมี C เป็นธาตุผสม เป็นต้น

การเพิ่มความแข็งแรงของโลหะ โดยการทำให้เป็นสารละลายของแข็งแบบแทรก (Interstitial solid solution-strengthening) นั้น ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการคืบ โดยการบ่มที่เกิดจากความเครียด (stringing) ซึ่งหมายถึงการที่โลหะซึ่งผ่านการแปรรูปเย็นมาก่อนนั้นมีความแข็งแรงและความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป สำหรับเหล็กกล้าเฟอร์ริติก เราจะใช้ธาตุไนโตเจนและคาร์บอนเป็นธาตุผสม ยกตัวอย่างเช่น ผลของการบ่มที่เกิดจากความเครียดจะทำให้เหล็กกล้าคาร์บอนเฟอร์ริติก (ferritic carbon steel) ทนอุณหภูมิสูงถึง 350 °C

การใช้งานการแปรรูปเย็นก่อนนั้นก็สามารถช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการคืบได้ อย่างไรก็ตาม ผลของการแปรรูปเย็นจะลดลงถ้าอุณหภูมิสูงประมาณ $0.5T_m$ เนื่องจากการเกิดผลึกใหม่ (recrystallization)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 การออกแบบโดยใช้ลาร์สัน-มิลเลอร์พารามิเตอร์

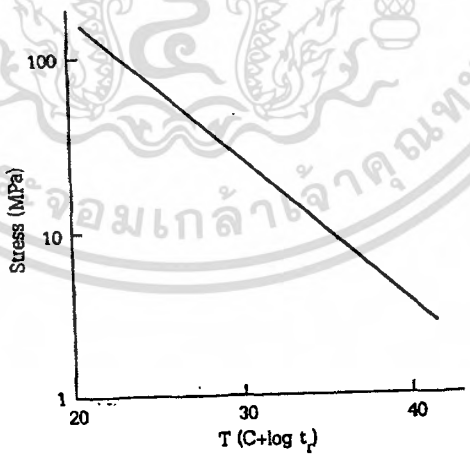
ถ้าหากเราต้องการใช้ชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลานานมาก ๆ (ประมาณ 100,000 ชั่วโมง หรือ 11.4 ปี) แต่เราไม่มีข้อมูลที่สมบูรณ์เกี่ยวกับการคืบของวัสดุที่ใช้ทำชิ้นงานนั้น เราก็จำเป็นต้องใช้การประมาณค่าออกนอกช่วง (Extrapolation) การประมาณนี้จะใช้ได้ดี ถ้าหากโลหะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในช่วงที่ทำการประมาณ แต่ถ้าหากมีการเปลี่ยนแปลงที่ว่านี้ การประมาณก็อาจมีความคลาดเคลื่อนได้เนื่องจากกราฟอาจเปลี่ยนแปลงความชัน วิธีการทดสอบก็คือ เราอาจพล็อต log (ความเครียด) เป็นฟังก์ชันของ log (เวลา) ที่อุณหภูมิสูงกว่าที่ต้องการใช้งานโลหะนั้นหลายร้อยองศา เพื่อดูว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคเกิดขึ้นหรือไม่

ในการประมาณค่าแบบออกนอกช่วงสำหรับค่าที่เกี่ยวข้องกับการคืบนั้น ได้มีการพัฒนาพารามิเตอร์ที่เชื่อมโยงเอาอุณหภูมิและเวลาเข้าด้วยกัน โดยมีสมมติฐานที่ว่าพารามิเตอร์เหล่านี้สามารถใช้ในการทำนายพฤติกรรมการคืบในระยะยาวจากข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิสูงกว่าและระยะเวลาที่สั้นกว่าที่ระดับความเค้นเท่ากัน

พารามิเตอร์ที่นิยมใช้ได้แก่ ลาร์สัน-มิลเลอร์พารามิเตอร์ (Larson-Miller Parameter, LMP) ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$LMP = T\,(C + \log_{10} t_r) \qquad (2.2)$$

โดยที่ T คือ อุณหภูมิทดสอบในหน่วยสัมบูรณ์, t_r คือ เวลาที่เกิดการฉีกขาดออกจากกันในหน่วยชั่วโมง และ C เป็นค่าคงที่ของลาร์สัน-มิลเลอร์ ซึ่งอยู่ในช่วง 17-23 และมักจะใช้ค่า 20 ในการประมาณ รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะกราฟของลาร์สัน-มิลเลอร์



รูปที่ 2.5 กราฟของลาร์สัน-มิลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 การเลือกใช้ชนิดของโลหะ

การเลือกใช้ชนิดของโลหะให้เหมาะสมกับอุณหภูมิใช้งานเป็นสิ่งสำคัญ ตารางที่ 2.1 แสดงค่าอุณหภูมิใช้งานสูงสุดสำหรับโลหะผสมที่สำคัญบางชนิด

ตารางที่ 2.1 อุณหภูมิใช้งานสูงสุดโดยประมาณสำหรับโลหะผสมที่สำคัญบางชนิด

โลหะหลัก	จุดหลอมเหลว	อุณหภูมิสูงสุดที่คาดว่าจะใช้งานได้	อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ได้จริง
Al	660 (933)	620 (350)	0.56 (RR58 ที่ 250 °C)
Cu	1083 (1356)	900 (630)	
Ni	1453 (1726)	1150 (880)	0.74 (นิมอนิก 115 ที่ 980 °C)
Fe	1536 (1809)	1200 (930)	0.47 (เหล็กกล้าเฟอร์ริติกที่ 575 °C)
			0.57 (เหล็กกล้าออสเทนนิติกที่ 750 °C)
Ti	1668 (1941)	1290 (1020)	0.4
Zr	1852 (2125)	1420 (1150)	
Cr	1900 (2173)	1450 (1180)	0.6 (อาจทำได้ถ้าหากปริมาณโครเมียมเหมาะสมที่ทำให้โลหะเหนียวเพียงพอ)
Hf	2222 (2495)	1640 (1370)	
Nb	2648 (2741)	1830 (1550)	0.54 (อาจทำได้ถ้าสามารถหาสารเคลือบที่เหมาะสมได้)
Mo	2610 (2883)	1923 (1650)	
Ta	2996 (3269)	2180 (1910)	
W	3410 (3638)	2433 (2160)	0.76 (ไส้หลอดไฟฟ้าที่ 2500 °C)

1. อุณหภูมิ ถึง 150 °C

ตะกั่ว : เป็นโลหะวิศวกรรมที่ไม่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง แม้แต่ที่อุณหภูมิห้อง ตะกั่วอาจจะเกิดการคืบได้อย่างมาก

ทองแดง : ถ้าเราต้องการโลหะที่ทนการอบอ่อน เราอาจใช้ทองแดงอิเล็กโทรไลติกที่ทนต่อการอบอ่อน (anneal-resistant electrolytic copper) ชนิด C11100 ซึ่งมีแคดเมียม (cadmium, Cd) เป็นธาตุผสมอยู่ในปริมาณเล็กน้อย หรืออาจใช้ทองแดงทัฟพิตช์ซึ่งมีธาตุเงินผสมอยู่ (silver-bearing tough pitch copper) ชนิด C11400 ซึ่งสามารถใช้ที่อุณหภูมิสูงถึง 200 °C ตัวอย่างการใช้งาน ได้แก่ หม้อน้ำ รถยนต์และอุปกรณ์ไฟฟ้า เป็นต้น

2. อุณหภูมิ 150 ถึง 400 °C

แมกนีเซียม : แมกนีเซียมผสมอาจใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 200 °C ตัวอย่างเช่น Mg-Th-Zr และ Mg-Al-Zn เป็นต้น แมกนีเซียมผสมที่มีธาตุทอเรียม (thorium, Th) จะทนต่อการคืบได้ดีที่สุด

อะลูมินัม : อะลูมินัมผสมมีอุณหภูมิใช้งานสูงกว่าแมกนีเซียมผสมประมาณ 20-30 °C อะลูมินัมผสมที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีโลหะผงบางชนิดสามารถใช้งานที่อุณหภูมิ 480 °C ในช่วงเวลาสั้น ๆ อุณหภูมิและเวลามีผลอย่างยิ่งต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะลูมินัมผสมประเภทที่อบชุบได้ (heat treatable alloys) แต่อาจจะไม่ค่อยมีผลมากนักต่ออะลูมินัมประเภทที่อบชุบไม่ได้ (non- heat treatable alloys) เนื่องจากประเภทหลังนี้ไม่มีตะกอนและไม่สามารถเกิดการบ่มเกินขนาด (overaging)

ทองแดง : ทองแดงผสมที่มีธาตุอาร์เซนิก (arsenic, As) ผสมอยู่จะมีความต้านทานต่อการคืบที่อุณหภูมิสูงปานกลาง อะลูมินัมบรอนซ์ (aluminum bronze) ชนิด C95000 สามารถใช้งานได้ที่ 400 °C ในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ โดยที่ความแข็งแรงไม่เปลี่ยนไปมากนัก

เหล็กหล่อและเหล็กกล้า : เหล่อหล่อเกรดสูงบางชนิด (higher grade of cast irons) อาจใช้เป็นโครงตัวถัง (casing) ของเครื่องยนต์กังหันความดันต่ำที่อุณหภูมิต่ำกว่า 250 ที่ อุณหภูมิสูงกว่านี้ เราอาจใช้เหล็กกล้าคาร์บอน (plain-carbon steels) โดยอุณหภูมิสูงสุดที่เหล็กกล้าคาร์บอน หรือเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีแมงกานีสผสม (manganese-carbon steels) สามารถทนได้ประมาณ 425 °C และถ้าจะใช้เป็นเวลานานกว่า 200,000 ชั่วโมง เราอาจใช้เหล็กกล้าผสมต่ำ (low alloy steels) ได้แต่อุณหภูมิใช้งานต้องต่ำกว่านี้มาก

3. อุณหภูมิ 400 ถึง 600 °C

ไทเทเนียม : ไทเทเนียมผสมชนิดอัลฟา (Alpha alloys) มีความต้านทานต่อการคืบที่ดีที่สุด ในขณะที่ชนิดเบต้า (beta alloys) มีความต้านทานต่ำสุด โลหะผสมที่ใช้งานมากตัวหนึ่งคือ Ti-6Al-4V เป็นโลหะผสมชนิดอัลฟา-เบตา (alpha-beta alloy) ซึ่งมีอุณหภูมิใช้งานสูงสุดประมาณ 450 °C เนื่องจากเฟสเบตาทำให้โครงสร้างโดยรวมทนอุณหภูมิสูงได้ลดลง โลหะผสมที่เป็นเฟสอัลฟาเกือบทั้งหมด (near-alpha alloy) จะมีความต้านทานต่อการคืบที่ดีกว่า อย่างไรก็ตาม เราไม่สามารถใช้ไทเทเนียมผสมได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 °C เพราะว่าไทเทเนียมจะเกิดการเปราะ (embrittlement) และเกิดออกซิเดชันที่ผิว (surface oxidation)

เหล็กกล้าเฟอร์ริติกผสมต่ำ : เรามักจะเลือกใช้เหล็กกล้าเฟอร์ริติกผสมต่ำ (low-alloy feritic steels) ถ้าหากราคาไม่ใช่ปัจจัยสำคัญและยอมรับความหนาแน่นที่ค่อนข้างสูงได้ ที่อุณหภูมิสูงกว่า 400 °C การเติมธาตุโมลิบดีนัม (Mo) จะช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการคืบ เหล็กกล้าผสม Cr-Mo และ Cr-Mo-V อาจใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 500 °C สำหรับเทอร์ไบน์โรเตอร์ความดันปานกลางและความดันสูง (intermediate and high-pressure turbine rotors) เหล็กกล้า 0.2C-1Cr-1Mo-0.25V ได้รับการใช้งานโดยทั่วไป เหล็กกล้า 2.25Cr-1Mo ใช้ทำท่อไอน้ำอุณหภูมิสูง (high-temperature steam piping) และในการใช้งานที่ต้องทนต่อการโจมตีของไฮโดรเจนที่ประมาณ 565 °C ที่อุณหภูมิสูงกว่านี้ เหล็กกล้าผสมต่ำอาจเกิดสะเก็ดที่ผิว (Scallin)

ที่อุณหภูมิสูง โลหะผสมที่แข็งแรงด้วยกลไกการตกตะกอน (precipitation-hardened alloys) นั้นไม่เสถียรในเชิงเทอร์ไดนามิกส์ ดังนั้นที่อุณหภูมิที่ใช้งานจะต้องต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้บ่ม อย่างมาก ถ้าไม่เช่นนั้น จะเกิดการเพิ่มขนาดของอนุภาค (particle coarsening) ซึ่งมีผลทำให้ความต้านทานต่อการคืบลดลง การลดแนวโน้มการเกิดการเพิ่มขนาดของอนุภาคอาจทำได้โดยวิธีการต่าง ๆ เช่น การเลือกส่วนผสมให้ซับซ้อนที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ การใช้อนุภาคที่ไม่สามารถละลายในเมทริกซ์ได้ดีนักและการใช้อนุภาคมีความแตกต่างของขนาดแลตทิช (lattice mismatch) ต่ำสุด นอกจากนี้ ยังมีอีกวิธีหนึ่ง คือการใช้อนุภาค "ตัวสำรอง" กล่าวคือ เมื่ออนุภาคของเฟสแบบแรกเกิดการบ่มเกินขนาดนั้น อนุภาคชนิดที่สองซึ่งเป็น "ตัวสำรอง" จะเกิดขึ้นมาทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงแก่โครงสร้างของชิ้นงานแทน

4. อุณหภูมิ 575 ถึง 650 °C

เหล็กกล้าสเตนเลสเฟอร์ริติก : ในช่วงอุณหภูมินี้ ความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันสำคัญพอ ๆ กับความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ต้านทานต่อการคืบ จะเติมธาตุโครเมียมเข้าไปในเหล็กเพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการเกิดสะเก็ดที่ผิว (scaling) และปริมาณโครเมียมอย่างน้อย 8% จำเป็นสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิ 650 °C เหล็กกล้าสเตนเลสเฟอร์ริติกกลุ่ม 400 มีราคาต่ำกว่าเกรดที่เป็นออสเทนนิติกมาก เกรดนี้เกิดการเปราะที่อุณหภูมิ 475 °C ถ้าปริมาณโครเมียมสูงกว่า 13% จะทำให้ความต้านทานต่อการคืบและความต้านทานต่อการฉีกขาดออกจากกัน (Rupture and creep strength) มีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับเกรดออสเทนนิติก ข้อได้เปรียบของเหล็กกล้าเฟอร์ริติก คือ มีความต้านทานต่อออกซิเดชันดี ซึ่งใกล้เคียงกับชนิดออสเทนนิติก เหล็กชนิดนี้ได้รับการใช้งานเนื่องจากมีปริมาณธาตุผสมน้อยทำให้ราคาค่อนข้างต่ำ แม้ว่าจะเชื่อมได้ยากก็ตาม

5. อุณหภูมิ 600 ถึง 1000 °C

มีโลหะผสม 3 กลุ่มซึ่งใช้งานในช่วงนี้ ได้แก่ (1) เหล็กกล้าสเตนเลสออสเทนนิติก (2) โลหะผสม Ni-Cr และ Ni-Cr-Fe และ (3) โคบอลต์ผสม

อุณหภูมิขีดจำกัดสูงสุดของเหล็กกล้าสเตนเลสออสเทนนิติกมาตรฐานประมาณ 750 °C เหล็กกล้าสเตนเลสชนิด 316 ซึ่งมี Mo 2.5% มีค่าความเค้นที่ทำให้เกิดการฉีกขาดออกจากกัน (stress-rupture) สูงสุดในตระกูล 300 โลหะผสมที่มีธาตุผสม เช่น Mo, Ti, W และ Nb มากกว่า (เช่น 19-9DL และ 9DX) มีความเค้นที่ทำให้เกิดการฉีกขาดออกจากกันสูงกว่าตระกูล 300 ในช่วงอุณหภูมิ 540 – 815 °C โลหะ Fe-Cr-Ni-Mn นั้นแข็งแรงกว่าโลหะผสมในตระกูล 300 ส่วนใหญ่

เหล็ก-นิกเกิลซูเปอร์อัลลอย : โลหะกลุ่มนี้มีเหล็กค่อนข้างมาก ($\geq$ 10%) และเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอนของคาร์ไบด์และสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิก (intermetallic compound) ในเมทริกซ์ที่มีโครงสร้างเป็นลูกบาศก์แบบเฟซเซ็นเตอร์ (face-center cubic, fcc) ตะกอนที่ใช้กันมากที่สุดคือ γ' ในโลหะผสม เช่น A-286 , V-57 หรือ Incoloy 901 โลหะผสมบางชนิดมีเฟส γ'' เช่น Inconel 718, ซูเปอร์อัลลอย-นิกเกิล ตัวอื่น ๆ เกิดจากการดัดแปลงเหล็กกล้าสเตนเลสซึ่งแข็งแรงขึ้นโดยการใช้กลไกการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอน เช่น Incoloy 800H ซึ่งมี Ti และ Al เล็กน้อยซึ่งให้เฟส γ'

นิกเกิลซูเปอร์อัลลอย : มีนิกเกิลในช่วง 30-35 % และอาจมีโครเมียมสูงถึง 30 % ธาตุผสมอื่น ๆ เช่น Al, Ti, Nb, Mo, Hf และ W นั้นใส่เข้าไปเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความต้านทานต่อการกัดกร่อนกลุ่มที่สำคัญมากกลุ่มหนึ่งคือซูเปอร์อัลลอยที่แข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วยตะกอน γ' เช่น โลหะผสมชนิด Waspalloy หรือ Udimet 700 โลหะผสมกลุ่มอื่น เช่น Hasteakkoy X นั้น แข็งแรงขึ้นด้วยกลไกสารละลายของแข็งกลุ่มที่ 3 แข็งแรงขึ้นด้วยการใช้อนุภาคออกไซด์กระจายไปในเนื้อเมทริกซ์ (oxide dispersion strength-ened, ODS) เช่น โลหะผสมชนิด IN MA-6000E และ โลหะผสมเหล่านี้แข็งแรงเพิ่มขึ้นจากอนุภาคที่ "เฉื่อย" เช่น อิทเทรีย (yttria)

โคบอลต์ซูเปอร์อัลลอย : โลหะกลุ่มนี้แข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วยการใช้คาร์ไบด์ร่วมกับกลไกสารละลายของแข็ง ในโลหะผสมกลุ่มนี้จะไม่มีสารประกอบอินเทอร์ทัลลิก ซึ่งใช้ได้ในระดับเดียวกับเฟส γ' ในนิกเกิลซูเปอร์อัลลอยและเหล็กซูเปอร์อัลลอย ในแง่ความแข็งแรง โคบอลต์ผสมจะไม่สามารถเทียบได้กับนิกเกิลผสมได้ยกเว้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 980 °C

83171

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. อุณหภูมิ 1000 °C และสูงกว่านั้น

ในบรรดาโลหะรีแฟรกทอรี (refractory metals) หรือโลหะทนความร้อนสูงนั้น โลหะรีเนียม (rhenium) มีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงและทนต่อการสึกกร่อนและการสึกกร่อนแบบกัดเซาะได้ดีที่อุณหภูมิ สูง รีเนียมมีความต้านทานแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดออกจากกันโดยการคืบสูงสุดในบรรดาโลหะรีแฟรกทอรีทั้งหมด กระบวนการที่ใช้ในการขึ้นรีเนียมมี 2 วิธี ได้แก่ เทคโนโลยีโลหะผง (Powder metallurgy) และการสร้างฟิล์มโดยการตกเคลือบผิวด้วยไอเชิงเคมี (Chemical vapor deposition, CVD)

โลหะรีแฟรกทอรีอื่น ๆ เช่น ทังสเตน แทนทาลัม ไนโอเบียม และโมลิบดีนัม นั้นมีใช้ในเชิงพาณิชย์ อย่างไรก็ตาม โลหะเหล่านี้จะใช้ได้เฉพาะในสภาพแวดล้อมที่ได้รับการปกป้องเท่านั้น ยกตัวอย่างเช่น โลหะทังสเตนใช้เป็นหลอดไฟ และโมลิบดีนัมใช้เป็นตัวกันรังสี (radiation hielding) ในเตาอุณหภูมิสูง ทังสเตนและแทนทาลัมนั้นมักจะหนักเกินกว่าจะใช้ในเครื่องยนต์กังหันแก๊ส ในสภาพที่ได้รับการปกป้อง โลหะกลุ่มนี้อาจใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 1,500 °C

2.4.4 การป้องกันการเกิดการกัดกร่อนเชิงไฟฟ้า–เคมี

เทคนิคในการป้องกันและควบคุมการกัดกร่อนเชิงไฟฟ้า-เคมีมีหลายประเภท ได้แก่ การออกแบบระบบให้เหมาะสม การใช้สารเคลือบผิว การใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน การป้องกันแบบแคโทดิก การป้องกันแบบแอโนดิก และการเลือกใช้วัสดุและกรรมวิธีการผลิตที่เหมาะสม

1. การออกแบบระบบให้เหมาะสม การออกแบบโครงสร้างของระบบให้เหมาะสมสามารถช่วยหลีกเลี่ยงหรือชะลอการกัดกร่อนได้ หลักในการออกแบบเพื่อป้องกันการกัดกร่อนมีดังนี้

(1) ป้องกันการเกิดเซลล์กัลป์วานิก ตัวอย่างเช่น ท่อเหล็กกล้าที่ต่อกับฟิกซ์เจอร์ทองเหลืองจะเกิดเป็นเซลล์กัลวานิกซึ่งทำให้ท่อเหล็กเกิดการกัดกร่อน แต่ถ้าเราใช้พลาสติกเป็นฉนวนไฟฟ้ากั้นระหว่างเหล็กกล้าและทองเหลือง ปัญหานี้อาจบรรเทาลงได้

(2) ออกแบบให้แอโนดมีพื้นที่ใหญ่กว่าแคโทดมาก ๆ ตัวอย่างที่ถูกต้อง เช่น ถ้าเราใช้หมุดยึดทำจากทองแดง (copper rivet) ยึดแผ่นเหล็กกล้า หมุดยึดทองแดงซึ่ง (แคโทด) จะรับอิเล็กตรอนได้ไม่เร็วมากนัก ทำให้การกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้า (แอโนด) เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ แต่ถ้าเราทำผิดโดยใช้หมุดยึดที่ทำจากเหล็กกล้า (steel rivet) ยึดแผ่นทองแดง หมุดยึดเหล็กกล้าซึ่งเป็นแอโนดและมีพื้นที่ เล็ก ๆ จะสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับทองแดงในปริมาณมากอย่างรวดเร็ว นั่นคือ หมุดยึดจะเกิดการกัดกร่อนและอาจไปสู่ความเสียหายของโครงสร้างในบริเวณนั้น

(3) ออกแบบชิ้นส่วนของระบบที่ทำให้ระบบของเหลวเป็น "ระบบปิด" ภาชนะเก็บน้ำซึ่งมีน้ำอยู่ไม่เต็มจะเกิดการกัดกร่อนตามแนวขอบน้ำ ระบบเปิดจะละลายแก๊สได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้มีไอออนซึ่งจะเข้าไปร่วมในปฏิกิริยาแคโทดิกและช่วยให้เกิดเซลล์ความเข้มข้น (concentration cell) ได้

(4) หลีกเลี่ยงมุมอับระหว่างวัสดุที่อยู่ติดกัน การเชื่อม (welding) อาจจะเป็นวิธีการยึดต่อที่ดีกว่าการบัดกรีแข็ง (brazing) การบัดกรี (soldering) หรือ การยึดรัดทางกล (mechanical fastening) เซลล์กัลวานิกจะเกิดขึ้นในการบัดกรีแข็งหรือการบัดกรี เนื่องจากโลหะเติม (filler metals) ซึ่งเป็นโลหะที่ใช้ในการเชื่อมมีส่วนผสมทางเคมีที่แตกต่างจากโลหะหลักที่เชื่อมต่อเข้าด้วยกัน ตัวยึดรัดด้วยแรงกล (mechanical fasteners) ทำให้เกิดมุมอับซึ่งนำไปสู่การเกิดเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้น (concentration cell) อย่างไรก็ตาม ถ้าหากโลหะตัวเติมใกล้เคียงกับโลหะหลัก ก็อาจจะไม่เกิดเซลล์ไฟฟ้าเคมี แบบนี้

(5) ออกแบบระบบเพื่อให้สามารถเปลี่ยนชิ้นส่วนที่เกิดการกัดกร่อนได้ ในกรณีที่เราไม่สามารถลดอัตราการเกิดการกัดกร่อนจนถึงระดับที่ไม่รบกวนอายุการใช้งานของชิ้นส่วนหนึ่ง ๆ ได้ เราจะเป็นต้องออกแบบระบบเพื่อให้สามารถเปลี่ยนชิ้นส่วนที่เกิดการกัดกร่อนได้โดยง่ายและประหยัด

2. การใช้สารเคลือบผิว เป็นการแยกแอโนดและแคโทดออกจากกัน สารเคลือบชั่วคราว เช่น จาระบีหรือน้ำมันนั้น อาจช่วยป้องกันการกัดกร่อนได้บ้าง แต่ก็สูญหายไปได้โดยง่าย สารเคลือบอินทรีย์ เช่น สี หรือเคลือบเซรามิกส์ เช่น เอนาเมล (enamel) หรือแก้ว (glass) จะสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีกว่า แต่ถ้าผิวเคลือบเหล่านี้ถูกทำให้เสียหายแม้เพียงบางส่วน บริเวณแอโนดขนาดเล็ก ๆ จะเกิดการกัดกร่อนเฉพาะแห่งอย่างรวดเร็ว

กรณีของเหล็กกล้าเคลือบโลหะที่นิยมใช้ ได้แก่ เหล็กเคลือบดีบุก (tin-plate) และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี (galvanized steel) ในทั้งสองกรณี ถ้าผิวเคลือบมีความต่อเนื่องก็จะช่วยปกป้องเหล็กกล้าจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ แต่ถ้าผิวเคลือบถูกขีดข่วนจนถึงชั้นเหล็ก ผิวเคลือบทั้งสองชนิดนี้จะมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิงดังนี้

- ผิวเคลือบสังกะสีจะยังคงทำหน้าที่ได้ดีต่อไประยะหนึ่ง เนื่องจากสังกะสีเป็นแอโนดเมื่ออยู่ติดกับเหล็กกล้า และเนื่องจากบริเวณแคโทด (เหล็กกล้า) มีขนาดเล็ก เคลือบสังกะสีจะเกิดการกัดกล่อนอย่างช้าๆทำให้แผ่นเหล็กกล้ายังได้รับการปกป้อง

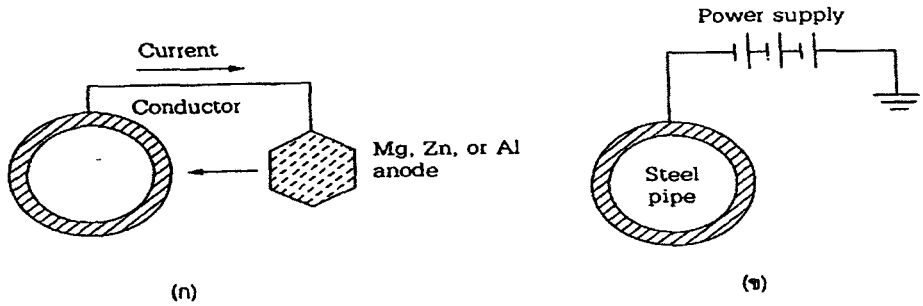
- ผิวเคลือบดีบุกนั้นเป็นแคโทดเมื่ออยู่กับเหล็ก ดังนั้นเมื่อเกิดรอยขีดข่วน เนื้อเหล็กในบริเวณรอยขีดข่วนจะเป็นแอโนดขนาดเล็กและเกิดการกัดกร่อนอย่างรวดเร็ว

3. การใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน สารเคมีบางชนิดเมื่ออยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์มักจะเคลื่อนย้ายไปยังบริเวณผิวของแอโนดหรือแคโทด และสามารถยับยั้งปฏิกิริยาการกัดกร่อนได้ ตัวอย่างเช่น

- เกลือโครเมต (chromate salts) ทำหน้าที่เป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนในหม้อน้ำรถยนต์สารเคมีบางประเภท เช่น โครเมต (chromates) ฟอสเฟส (phosphates) และ โมลิบเดต (molybdates) จะทำให้เกิดฟิล์มบนผิวของแอโนดหรือแคโทด สารประเภทนี้มีการใช้งานในโรงไฟฟ้าและอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

4. การป้องกันแบบแคโทดิก เราอาจป้องกันการกัดกร่อนได้โดยการป้อนกระแสอิเล็กตรอนให้กับโลหะเพื่อ" บังคับ" ให้โลหะนั้นกลายเป็นแคโทด การป้องกันแบบแคโทดิกอาจใช้แซ็กคริฟีเชียลแอโนด (sacrificial anode) หรืออิมเพรสโวลเตจ (impressed voltage) รูปที่ 2.6 แสดงตัวอย่างการป้องกันแบบแคโทดิกทั้งสองแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.6 แผนภาพแสดงตัวอย่างการป้องกันแบบแคโทดิกแบบ

(ก) แซ็กคริฟิเชียลแอโนด (Sacrificial Anode)

(ข) อิมเพรสโวลเตจ (Impressed Voltage)

- แซ็กคริฟิเชียลแอโนด มักจะเป็นสังกะสีหรือแมกนีเซียมติดกับโลหะที่เราต้องการป้องกัน โดยต้องทำให้ไฟฟ้าครบวงจร แซ็กคริฟิเชียลแอโนดจะ "เสียสละยอมตายแทน" โลหะที่เราต้องการป้องกัน นั่นคือ จะเกิดการกัดกร่อนและจ่ายอิเล็กตรอนให้กับโลหะที่ได้รับการป้องกันอย่างไรก็ตาม แอโนดนี้จะค่อยๆ หมดไปและต้องเปลี่ยนใหม่ ตัวอย่างการใช้งาน เช่น การป้องกันการกัดกร่อนของท่อที่ฝังอยู่ใต้ดิน โครงสร้างของลำเรือ แท่นขุดเจาะนอกชายฝั่งทะเล (off-shore drilling platforms) และอุปกรณ์ทำน้ำร้อน (water heaters) เป็นต้น

- อิมเพรสโวเตจ จะใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าต่อในลักษณะที่จ่ายอิเล็กตรอนให้กับโลหะเพื่อ"บังคับ"ให้โลหะกลายเป็นแคโทด โดยเราอาจใช้เศษเหล็กเป็นแอโนด เป็นต้น

5. การป้องกันแบบแอโนดิก โลหะในกลุ่มที่อยู่ใกล้ทางฝั่งแอโนดิกของอนุกรมกัลวานิกนั้นจะเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายและมักจะทำตัวเป็นแอโนดในเซลล์กัลวานิกอย่างไรก็ตาม ถ้าหากโลหะเหล่านี้ได้ได้รับการทำให้อยู่ในสภาพแพสซีฟ(passive)หรือมีความเป็นแคโทดมากขึ้น มันจะเกิดมากว่าปกติ เราสามารถสร้างสภาพแพสซิเวชันได้โดยการสร้างแอโนดิกโพลาไรเซชันอย่างแรง (strong anodic polarization) ซึ่งจะช่วยป้องกันปฏิกิริยาแอโนดิก วิธีการนี้จึงเรียกว่าการป้องกันแบบแอโนดิกการสร้างสภาพแพสซิเวชันสภาพแพสซิเวชั้นอาจเกิดจากเหตุดังต่อไปนี้

- การที่โลหะสัมผัสกับสารละลายออกซิไดซิงเข้มข้นอย่างแรง ตัวอย่างเช่น ถ้าจุ่มชิ้นเหล็กลงในกรดไนตริกเข้มข้น เหล็กจะเกิดการกร่อนอย่างรวดเร็วและทั่วทั้งผิวจะกลายเป็นฟิล์มของเหล็กไฮดรอกไซด์ (iron hydroxide) ฟิล์มที่เกิดนี้จะเคลือบปกป้องเนื้อเหล็กข้างในไม่ให้เหล็กเกิดการ

- การเพิ่มศักย์ที่แอโนดให้เกิดค่าวิกฤติ ฟิล์มที่อยู่บนผิวโลหะทำให้เกิดแอโนดิกโพลาไรเซชันอย่างแรงและกระแสจะลดลงไปที่ระดับต่ำมาก ๆ ตัวอย่างเช่น การเกิดสภาพแพสซิเวชันของโลหะอะลูมินัมเรียกว่า อะโนไดซิง (anodizing) ซึ่งฟิล์มออกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้สามารถทำให้มีสีสันสวยงามได้

6. การเลือกใช้วัสดุและการผลิตที่เหมาะสม การเลือกใช้วัสดุและการใช้กระบวนการทางความร้อนที่เหมาะสมกับโลหะจะช่วยป้องกันหรือชะลอการกัดกร่อนได้ ตัวอย่างเช่น

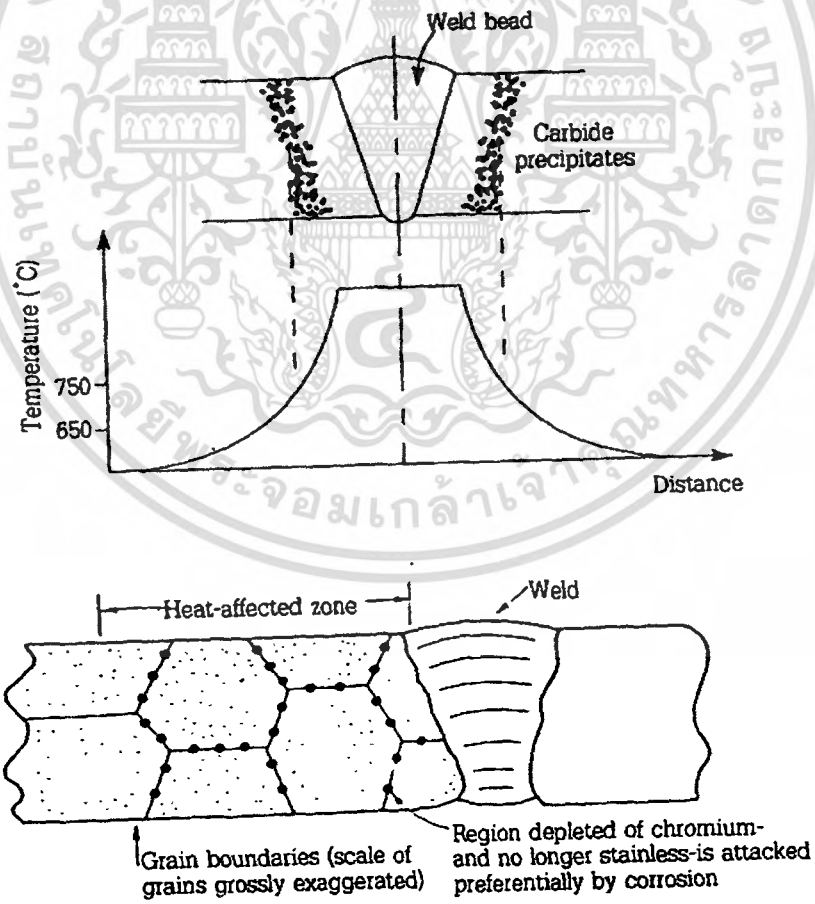
- ในกรณีของงานหล่อ การกระจายตัวขององค์ประกอบทางเคมีอย่างไม่สม่ำเสมอในโครงสร้างจุลภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะทำให้เกิดเซลล์กัลวานิกเฉพาะแห่งขนาดเล็ก ซึ่งเป็นจุดที่การกัดกร่อนมีแนวโน้มจะเกิดได้ง่ายและรวดเร็ว ในกรณีเช่นนี้ เราอาจใช้การอบให้โลหะมีสภาพเป็นเนื้อเดียว หรือโฮโมจีไนเซชัน (homogenization heat reatment)เพื่อช่วยเพิ่มความต้านทานในการกัดกร่อนได้

- ในกรณีที่ชิ้นงานโลหะผ่านกระบวนการขึ้นรูปทางกล เช่น การโค้งงอ (bending) มานั้นความแตกต่างของปริมาณการแปรรูปเย็นและความเค้นตกค้างจะทำให้เกิดเซลล์ความเค้นเฉพาะแห่ง (localized stress cell) ในกรณีเช่นนี้ เราอาจใช้การอบอ่อนเพื่อลดความเครียด ซึ่งจะช่วยบรรเทาปัญหาได้

- ในกรณีของเหล็กกล้าสเตนเลสออสเทนนิติก (austenitic stainless steels) การอบชุบที่ถูกต้องมีความสำคัญอย่างยิ่ง ถ้าหากเหล็กกล้าสเตนเลสชนิดนี้เย็นตัวอย่างช้าๆจากช่วงอุณหภูมิ 870 °C มาที่ 425 °C จะเกิดการตกตะกอนของเฟสโครเมียมคาร์ไบด์ (chromium caride) บริเวณขอบเกรน ทำให้เฟสออสเทนไนต์ที่บริเวณขอบเกรนเกิดการ"ขาดแคลน"ธาตุโครเมียมซึ่งถ้าหากปริมาณโครเมียมลดลงต่ำกว่า 12% ฟิล์มโครเมียมออกไซด์ซึ่งทำหน้าที่ปกป้องเหล็กกล้าสเตนเลสก็จะ ไม่สามารถเกิดได้ ดังนั้น บริเวณขอบเกรนซึ่งเป็นแอโนและมีขนาดเล็กมากจึงเกิดการกัดกร่อนอย่างรวดเร็ว ในกรณีเช่นนี้เราเรียกว่าเกิดสภาพเซนซิไทเซชั่น (sensitization) และจะกล่าวว่าเหล็กกล้าถูกเซนซิไทซ์ (sensitized) รูปที่ 2.7 แสดงภาพเซนซิไทเซชันของเหล็กกล้าสเตนเลส



รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงสภาพเซนซิไทเซชันของเหล็กกล้าสเตนเลส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคในการป้องกันการกัดกร่อนที่เกิดจากสภาพเซนซิไทเซชันมีหลายวิธี ได้แก่

(1) ถ้าหากเหล็กกล้าสเตนเลสมีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่า 0.03% ก็จะไม่เกิดเฟสโครเมียมคาร์ไบด์ เช่น ในกรณีระหว่างเหล็กกล้าสเตนเลสเกรด 316(0.08%) และ 316L (0.03%) เป็นต้น

(2) ถ้าหากมีโครเมียมสูง เฟสออสเทนไนต์จะยังคงมีโครเมี่ยมเหลืออยู่เพียงพอมากกว่า 12% แม้ว่าจะเกิดการตกตะกอนของโครเมี่ยมคาร์ไบต์ก็ตาม

(3) การเติมไทเทเนียมหรือไนโอเบียมจะดึงคาร์บอนบางส่วนไปเกิดเป็นเฟส TiC และ NbC ซึ่งลดการเกิดเฟสโครเมียมคาร์ไบด์ ในกรณีเช่นนี้เรากล่าวว่าเหล็กกล้าสเตนเลสได้รับการทำให้มีเสถียรภาพ

(4) การหลีกเลี่ยงช่วงอุณหภูมิเซนซิไทเซชัน ได้แก่ ช่วง425-87 °C ในกระบวนการผลิตและในระหว่างการใช้งาน

(1) การอบชุบเพื่อละลายเฟสโครเมี่ยมไบด์(quench anneal)ซึ่งทำได้โดยการรอบเหล็กกล้าสเตนเลสที่อุณหภูมิสูงกว่า 870 °C (เช่น ในช่วง 1050-1100 °C)สัมมนา-การกัดกร่อน ซึ่งจะสลายโครเมียมคาร์ไบด์ในออสเทนไนต์ จากนั้นจึงทำการชุบอย่างรวดเร็วเพื่อป้องกันการเกิดเฟสโครเมี่ยมคาร์ไบด์

2.4.5 การป้องกันการกัดกร่อนที่มีความเค้นเกี่ยวข้อง

1. <u>การป้องกันการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นและการกัดกร่อน</u> เราสามารถป้องกันหรือลดความรุนแรงที่เกิดจากการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นและการกัดกร่อน (Stress Corrosion Cracking SCC) ได้ด้วยวิธีดังต่อไปนี้

(1) ลดระดับความเค้นลงให้ต่ำกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยน(Threshold) โดยการกำจัดความเค้นตกค้างหรือลดความเค้นที่กระทำจากภายนอก

(2) กำจัดสารเคมีตัวการที่เกี่ยวข้อง

(3) เลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม เช่น ใช้เหล็กกล้าคาร์บอนแทนเหล็กกล้าสเตนเลสในการสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ต้องสัมผัสกับน้ำทะเล เนื่องจากเหล็กกล้าคาร์บอนทนต่อ SCC ได้ดีกว่า

(4) ใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน

(5) ใช้สารเคลือบป้องกัน

(6) ใช้การป้องกันแบบแคโทดิก

(7) ทำให้ผิวของวัสดุมีความเค้นตกค้างแบบอัด เช่น ใช้การยิงผิวด้วยเม็ดโลหะ(Shot preening) เป็นต้น

2. <u>การป้องกันการกัดกร่อนร่วมกับความล้า</u> เราสามารถป้องกันหรือลดความรุนแรงที่เกิดจากการกัดกร่อนร่วมกับความล้าได้ด้วยวิธีการที่ใช้ในการป้องกันการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นและการกัดกร่อน

2.4.6 พฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะวิศวกรรมที่สำคัญบางชนิด

1. โลหะกลุ่มเหล็ก

(1) เหล็กหล่อ ความต้านทาต่อการกัดกร่อนของเหล็กหล่อเทา (gray cast iron) ซึ่งจมอยู่ในน้ำจะดีกว่าเหล็กละมุน (Mils steel) ถ้าหากเราเติมนิกเกิลลงไปจนถึงประมาณ 3% ก็จะช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนและเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแข็งแรง นอกจากนี้เรายังสามารถเพิ่มความต้านทานการกระแทกได้โดยการปรับองค์ประกอบทางเคมีและเงื่อนไขในการหล่อเพื่อให้ได้แกรไฟต์รูปร่างกลม (graphite spheroids)

เกล็ดแกรไฟต์ในเหล็กหล่อนั้นเชื่อมต่อกันใน 3 มิติ (interconnected) และทนการกัดกร่อนได้ดีกว่าเมทริกซ์หรือเนื้อเหล็กหล่อโดยรอบ ดังนั้น ถ้าหากเหล็กหล่อเกิดการกัดกร่อน เกล็ดแกรไฟต์จะเหลือตกค้างอยู่บนผิวของเหล็กหล่อ แกรไฟต์ ที่เฉื่อยต่อการกัดกร่อนนี้จะทำตัวเป็นแคโทด ดังนั้น ถ้าหากมีโลหะอื่นมาสัมผัสกับเหล็กหล่อโลหะนั้นก็อาจจะเป็นแอโนดและเกิดการกัดกร่อนได้ ทั้งที่เหล็กหล่อควรจะทำตัวเป็นแอโนดและเกิดการกัดกร่อนถ้าดูจากอนุกรมกัลวานิกก็ตาม การที่เกิดการสลับหน้าที่กันในลักษณะนี้เรียกว่าเกิด แกรฟิไทเซชัน (Graphitization) อย่างไรก็ตาม เหล็กหล่อแกรไฟต์กลมจะไม่มีปัญหานี้มากนักเนื่องจากแกรไฟต์กลมไม่ได้เชื่อมต่อถึงกันใน 3 มิติ

ถ้าเติมนิกเกิลในช่วง 13-36% จะทำให้โครงสร้างเมทริกซ์กลายเป็นออสเทนไนต์ โลหะผสมในกลุ่มนี้จะเรียกว่า Ni-Resist ซึ่งเป็นกลุ่มที่ทนต่อการกัดกร่อนดีกว่าเหล็กหล่อเทา ตัวอย่างเช่น ในน้ำทะเลขณะที่กำลังเคลื่อนไหวอยู่นั้น อัตราการกัดกร่อนของเหล็ก Ni-Resist จะมีค่าเพียง 1 ใน 10 ของอัตราการกัดกร่อนของเหล็กหล่อเทาหรือเหล็กกล้าผสมต่ำ เหล็กโครงสร้างออสเทนนิติกสามารถใช้ทำตัววาล์วและปั๊มและใช้ทำเครื่องควบแน่นน้ำ (condenser water boxes) ในระบบการกลั่น ในสภาพแวดล้อมน้ำทะเล และในระบบกำเนิดพลังงานไฟฟ้า เหล็กกลุ่มนี้ยังไม่เกิดแกรฟิไทเซชันอีกด้วย ในกรดซัลฟูริกเข้มข้น (สูงกว่า 65%) จะเกิดชั้นฟิล์มเหล็ก (II) ซัลเฟตซึ่งไม่ละลายบนผิวของเหล็กหล่อเทา ซึ่งฟิล์มนี้จะป้องกันเหล็กหล่อเทาจากการเกิดการกัดกร่อนเพิ่มเติม อย่างไรก็ตาม หากมีสาเหตุใดก็ตามที่ทำลายฟิล์ม เช่น อัตราการไหลของตัวกลางเพิ่มขึ้น เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ หรือมีอนุภาคมาขัดสี จะทำให้เกิดการโจมตีแบบรูเข็ม (pitting attack) บนผิวได้ กรดซัลฟูริกเจือจางและกรดอื่น ๆ จะทำให้เหล็กที่ไม่ได้รับการผสมธาตุเกิดการกัดกร่อนได้โดยง่าย

เหล็กหล่อโครงสร้างออสเทนนิติกจะมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนดีกว่าเหล็กที่ไม่ได้รับการผสมหรือผสมเล็กน้อย ในกรดซัลฟูริกเจือจางและกรดอื่น ๆ อีกหลายชนิด รวมทั้งสารละลายที่เป็นด่าง (caustic solution) แต่เหล็กหล่อออสเทนนิติกมีความต้านทานการกัดกร่อนต่อกรดไนตริกต่ำกว่าเหล็กหล่อโครงสร้างออสเทนนิติกสามารถใช้ทำวาล์วและตัวปั๊มได้

(2) เหล็กและเหล็กกล้า เหล็กและเหล็กกล้าซึ่งเป็นโลหะที่ใช้กันมากที่สุดนั้นเกิดการกัดกร่อนได้ในตัวกลางหลายประเภท รวมทั้งภายใต้บรรยากาศภายนอกอาคารสถานที่ ตามปกติเรามักจะเลือกเหล็กและเหล็กกล้าเนื่องจากสมบัติด้านอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ความต้านทานต่อการกัดกร่อน (เช่น ความแข็งแรง การขึ้นรูปได้ง่าย และราคาไม่สูงมากนัก) เนื่องจากเหล็กและเหล็กกล้าเป็นโลหะที่ไม่จัดว่าทนการกัดกร่อนได้ดีนัก

เหล็กและเหล็กกล้ายังทนทานต่อการกัดกร่อนได้ไม่เท่ากันในสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน ซึ่งความแตกต่างนี้จะวัดได้จากอัตราการสูญเสียเนื้อโลหะอันเนื่องมาจากการเกิดสนิม เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมต่ำทุกชนิดเกิดสนิมในบรรยากาศที่ชื้น

ในบางกรณี การเติมทองแดงประมาณ 0.3% ในเหล็กกล้าคาร์บอนสามารถช่วยลดอัตราการเกิดสนิมให้เหลือประมาณ 1 ใน 4 หรืออาจถึงครึ่งหนึ่งได้ ได้มีการแสดงให้เห็นว่าธาตุผสมบางอย่าง เช่น ทองแดง ฟอสฟอรัส โครเมียม และนิกเกิล นั้นช่วยเพิ่มท

ความต้านทานการกัดกร่อนในบรรยากาศ เหตุผลในการลดอัตราการกัดกร่อนเนื่องจากการเกิดเกล็ดสนิม (rust scale) ซึ่งมีเนื้อแน่นและยึดติดแน่นบนผิว การปรับปรุงนี้อาจจะเพียงพอที่จะช่วยให้มีการใช้งานโดยไม่ต้องมีการป้องกัน (ที่เรียกกันว่า "Weathering steels") และสามารถช่วยยืดอายุของสีเคลือบโดยลดอัตราการกัดกร่อนในบริเวณใต้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สีเคลือบนั้น ในช่วงระยะปีแรก อัตราการเกิดสนิมในบรรยากาศจะสูงแต่จะลดลงในปีถัดไป และอัตราการเกิดสนิมจะสูงเพิ่มขึ้นอย่างมากตามปริมาณมลภาวะและความชื้นในอากาศ

เหล็กกล้าทนต่อสารเคมีบางประเภท เช่น อัลคาไล (alkalis) สารอินทรีย์ (organics) หลายชนิด และกรดออกซิไดซิงอย่างแรง (strong oxidizing acids) เป็นต้น

(3) เหล็กละมุน อาจเกิดการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นและการกัดกร่อน (SCC) ได้ในตัวกลางที่มีไนไตรด์ (nitrides) ไฮดรอกไซด์ (hydroxides) แอมโมเนีย (ammonia) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (hydrogen sulfide) ถ้ามีแก๊สไฮโดรเจนเกิดขึ้นอาจทำให้เกิดการเปราะ (embrittlement) และการบวมที่ผิว (blistering) ได้

(4) เหล็กกล้าผสมต่ำ เหล็กกล้าผสมต่ำ (low-alloy steels) มีปริมาณธาตุผสมหลักรวมกันไม่เกิน 5% โดยประมาณ เหล็กกล้าผสมต่ำได้รับการออกแบบเพื่อให้มีความแข็งแรงสูงขึ้น แต่มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนคล้ายคลึงกับเหล็กกล้าที่ไม่มีธาตุผสม ยกเว้นในกรณีในบรรยากาศซึ่งมีการปรับปรุงความต้านทานบ้าง เช่น เหล็กกล้าผสมอาจเกิดสนิมช้ากว่าเหล็กกล้าคาร์บอนปกติที่ไม่มีทองแดงประมาณ 3 เท่า

(5) เหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง เหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (High-Strength Low-Alloy หรือ HSLA steels) ในสภาพที่แข็งที่สุดสามารถเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากความเค้นในตัวกลางที่ไม่รุนแรงมากนัก เช่น ในบรรยากาศที่มีความชื้นสูง

(6) เหล็ก- ซิลิคอน เหล็กมีซิลิคอนประมาณ 15% นั้นทนต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่าเหล็กกล้า และทนต่อกรดออกซิไดซิง (oxidizing acids) และกรดรีดิวซิง (reducing acids) ยกเว้นกรดไฮโดรฟลูออริก (hydrofluoric acid) และใช้งานได้ดีในน้ำดิน (slurries) เนื่องจากทนต่อการกัดกร่อนแบบกัดเซาะ (erosion corrosion) ได้ดีด้วย อย่างไรก็ตามโลหะชนิดนี้มีเฉพาะที่เป็นชิ้นงานหล่อและค่อนข้างเปราะ

(7) เหล็กกล้าสเตนเลส (stainless steel) หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า "สเตนเลส" ได้รับการพัฒนาขึ้นมาเพื่อให้เป็นวัสดุที่ทนทานต่อการกัดกร่อนและทดแทนเหล็กกล้าคาร์บอน (carbon steels) และเหล็กกล้าผสมต่ำ (low-alloy steels) เหล็กกล้าสเตนเลสมีโครเมียมประมาณ 10-30% และอาจมีนิกเกิล โมลิบดีนัม และทองแดงเป็นธาตุผสมหลักประกอบอยู่ด้วย

- โครเมียมช่วยเพิ่มความทนทานต่อตัวกลางออกซิไดซิงและปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง
- โมลิบดีนัมช่วยลดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting) โดยคลอไรด์
- นิกเกิล (อาจได้สูงถึง 35%) ทองแดง (2-3%) และโมลิบดีนัม (1-4%) ช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนในตัวกลางอื่น ๆ ที่ออกซิไดซ์ได้ไม่มากนัก (less oxidizing media) ธาตุเหล่านี้ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อซัลฟุริกและกรดอินทรีย์หลายชนิด

<u>การแบ่งชนิดเหล็กกล้าสเตนเลส</u>

เหล็กกล้าสเตนเลสมีมากกว่า 70 ชนิด หลายชนิดมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนคล้ายคลึงกันแต่ได้รับการออกแบบมาเพื่อให้มีสมบัติอื่น ๆ ที่ต้องการ เช่น มีความแข็งแรงสูง หรือกัดแต่งได้ง่าย

โดยทั่วไป เรามักจะแบ่งเหล็กกล้าสเตนเลสตามโครงสร้างจุลภาคเป็น 5 กลุ่มหลัก ได้แก่ (1) เหล็กกล้าสเตนเลสออสเทนนิติก (austenitic stainless steel) (2) เหล็กกล้าสเตนเลสมาร์เทนซิติก (martensitic stainless steel) (3) เหล็กกล้าสเตนเลสเฟอร์ริติก (ferritic stainless steel) (4) เหล็กกล้าสเตนเลสดูเพล็กซ์ (duplex stainless steel) และ (5) เหล็กกล้าสเตนเลสที่เพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอน (precipitation-hardening stainless steel)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบการแบ่งแบบนี้มีเหตุผลมาจากข้อเท็จจริงที่ว่าความยากง่ายในการผลิตโลหะนั้นมักจะขึ้นกับลักษณะโครงสร้างจุลภาค อย่างไรก็ตาม การจัดแบ่งในลักษณะนี้ก็มีจุดด้อยในแง่ที่ว่าไม่ได้แบ่งเหล็กกล้าสเตนเลสโดยใช้ความทนทานต่อการกัดกร่อนโดยตรง (แม้ว่าวัสดุในแต่ละกลุ่มจะมีสมบัติทางกลและความต้านทานต่อการกัดกร่อนแตกต่างกันออกไปก็ตาม

วิธีการหนึ่งที่สามารถใช้ในการเลือกเหล็กกล้าสเตนเลสได้ เรียกว่า ระบบ Selectaloy หลักการของระบบนี้ได้แก่การแบ่งชนิดของเหล็กกล้าสเตนเลสตามการใช้งานมากกว่าการแบ่งตามลักษณะโครงสร้างหรือองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งจะเป็นประโยชน์โดยตรงต่อผู้เลือกใช้วัสดุมากกว่า ในกรณีทั่วไป การเลือกใช้โลหะมักจะต้องคำนึงถึงสมบัติของโลหะเป็นอันดับแรก ๆ สำหรับเหล็กกล้าสเตนเลสสมบัติที่สำคัญที่สุดคือความทนทานต่อการกัดกร่อน เรามักจะเลือกเหล็กกล้าสเตนเลส เนื่องจากเหล็กชนิดอื่น ๆ ไม่สามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดี หรือสูญเสียความสวยงามไป

2. โลหะนอกกลุ่มเหล็ก

(1) อะลูมินัม ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะอะลูมินัมที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการทางกล (wrought aluminum alloys) เท่านั้น

อะลูมินัมผสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งอะลูมินัมตระกูล 2XXX (Al-Cu) จะทนต่อการกดักร่อนได้ไม่ดีเท่าอะลูมินัมบริสุทธิ์เชิงพาณิชย์ (commercial-purity aluminum) ธาตุผสมในอะลูมินัมนั้นมีหน้าที่หลัก คือ ปรับโครงสร้างจุลภาคและสมบัติต่าง ๆ โดยเฉพาะสมบัติทางกลของชิ้นงาน

ความต้านทานต่อการกัดกร่อนของอะลูมินัมขึ้นอยู่กับฟิล์มออกไซด์ที่ผิวปกป้องชิ้นงานอยู่ ฟิล์มนี้เสถียรในตัวกลางที่มีน้ำเป็นตัวทำลาย (aqueous media) เมื่อค่า pH อยู่ระหว่าง 4.5 – 8.5 สำหรับค่า pH นอกช่วงนี้จะทำให้อะลูมินัมมีแนวโน้มที่จะเกิดการกัดกร่อน ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่า pH จึงเป็นเรื่องสำคัญ

อะลูมินัมนั้นใช้ระบบน้ำความบริสุทธิ์สูง (high-purity-water systems) เพื่อที่จะเก็บกักและส่งสารละลายอินทรีย์หลายชนิด สารเคมีที่อาจก่อให้เกิดปัญหาและควรหลีกเลี่ยง เช่น สารปรอท สารเฮไลด์ อินทรีย์ (organic halides) กรดอินทรีย์แอนไฮดรัส (anhydrous organic acids) และสารละลายเหลือของโลหะหนัก เป็นต้น

อะลูมินัมผสมบางชนิดอาจเกิดการกัดกร่อนตามแนวขอบเกรน เนื่องมาจากผลของการบ่มที่อุณหภูมิต่ำและการตกตะกอนที่ขอบเกรน การกัดกร่อนตามแนวขอบเกรนจะเป็นการกัดกร่อนแบบหลุดล่อนเป็นชั้น (exfoliation) และการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นและการกัดกร่อน

การกัดกร่อนแบบหลุดล่อนเป็นชั้นและการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นและการกัดกร่อนนั้นไม่เป็นปัญหากับอะลูมินัมกลุ่ม 1XXX (pure Al), 3XXX (Al-Mn), 4XXX (Al-Si), 6XXX (Al-Mg-Si) และกลุ่ม 5XXX (Al-Mg) ที่มีแมกนีเซียมต่ำกว่า 3% สำหรับโลหะกลุ่มที่มีปัญหาการกัดกร่อนในสองลักษณะนี้ ได้แก่ กลุ่ม 2XXX (Al-Cu) , 7XXX (Al-Zn-Mg และ Al-Zn-Mg-Cu) และ 5XXX (Al-Mg) ที่มีปริมาณแมกนีเซียมสูงกว่า 3% อย่างไรก็ตาม กระบวนการทางความร้อนบางอย่าง เช่น การบ่มเกินขนาด (overaging) อาจช่วยปรับปรุงโลหะที่มีปัญหาได้ ในอดีตโลหะ Al-Zn-Mg เป็นกลุ่มที่เกิดการแตกหักมากที่สุด

การกัดกร่อนแบบกัลวานิก จะเป็นปัญหาเมื่อมีการใช้อะลูมินัมในโครงสร้างที่ซับซ้อน เนื่องจากอะลูมินัมนั้นจะเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายเมื่อเทียบกับโลหะอื่น ๆ ที่ใช้ในการก่อสร้าง เช่น เหล็ก เหล็กกล้าสเตนเลส ไทเทเนียมผสม ทองแดงผสม และนิกเกิลผสม เป็นต้น ถ้าหากเกิดปฏิกิริยากัลวานิกขึ้น อะลูมินัมจะเกิดการกัดกร่อนมากกว่าและอาจจะทำให้เกิดผลเสียข้างเคียงตามมาได้อีก เช่น โลหะส่วนอื่นที่เป็นแคโทดอาจจะให้แก๊สไฮโดรเจนออกมาและทำให้เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแตกเนื่องจากไฮโดรเจน (hydrogen cracking) ในโครงสร้างที่ทำจากเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงและเหล็กกล้าสเตนเลสได้

(2) ไทเทเนียม เริ่มมีการใช้งานในเชิงพาณิชย์ตั้งแต่ทศวรรษที่ 1950 และวัสดุที่ใช้งานที่ต้องการความทนทานต่อการกัดกร่อน ในอุตสาหกรรมเคมี ไทเทเนียมชนิดที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ ระดับความบริสุทธิ์เชิงพาณิชย์ (commercial purity)

ความทนทานต่อการกัดกร่อนของไทเทเนียมขึ้นอยู่กับฟิล์มออกไซด์บนผิวชิ้นงานด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับเหล็กกล้าสเตนเลส ดังนั้น ไทเทเนียมจึงมีประสิทธิภาพสูงในตัวกลางออกซิไดซิง (oxidizing media) เช่นกรดไนตริกร้อน (hot nitric acid) ฟิล์มออกไซด์ของไทเทเนียมนั้นสามารถป้องกันได้ดีกว่าฟิล์มของเหล็กกล้าสเตนเลส และมักจะทำหน้าที่ได้ดีในตัวกลางที่มักจะเป็นสาเหตุของการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting) และการกัดกร่อนที่มุมอับ (crevice corrosion) ที่เกิดกับเหล็กกล้าสเตนเลส ตัวกลางดังกล่าว เช่น น้ำทะเล เว็ทคลอรีน (wet chlorine) และคลอไรด์อินทรีย์ (organic chlorides) เป็นต้น อย่างไรก็ตามถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ไทเทเนียมก็อาจเกิดการกัดกร่อนโดยกลไกทั้งสองแบบที่กล่าวถึงแล้วได้เช่นกัน เช่น การกัดกร่อนในน้ำทะเลที่อุณหภูมิสูงกว่า 121 °C ถ้าหากมีมุมอับอยู่ในบริเวณนั้น

ไทเทเนียมทนต่อกรดซัลฟุริกและไฮโดรคลอริกเจือจางได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ ถ้าเราเติมแพลเลเดียม (palladium) ลงไปประมาณ 0.2% จะช่วยเพิ่มความต้านทานต่อกรดไฮโดรคลอริกและตัวกลางรีดิวซิง (reducing media) ชนิดอื่นได้

แม้ว่าไทเทเนียมจะไม่ใช่โลหะต้านทานการกัดกร่อนสารพัดนึกสำหรับปัญหาทุกอย่างแต่การปรับปรุงประสิทธิภาพในเทคนิคการผลิตได้ทำให้ราคาของไทเทเนียมลดลงมาจนในหลายกรณีสามารถแข่งขันกับนิกเกิลผสมและเหล็กกล้าสเตนเลสบางชนิดได้ นอกจากนี้ ไทเทเนียมมีจุดเด่นอีกประการหนึ่ง คือ ความหนาแน่นค่อนข้างต่ำ (ประมาณ 4.51 g/cm^3) ซึ่งทำให้ราคาที่สูงไม่เป็นปัญหามากนัก และความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ดียังช่วยให้สามารถนำไทเทเนียมไปใช้ทำท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger tubes) ที่บางขึ้นได้ด้วย

(3) เซอร์โคเนียม ทนทานต่อกรดแร่ (mineral acids) อัลคาไลเหลว (molten alkalies) สารละลายอัลคาไลน์ (alkalies solutions) และทนต่อสารละลายอินทรีย์ (organic solutions) และสารละลายเกลือ (salt solution) ส่วนใหญ่

เซอร์โคเนียมต้านทานต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีเยี่ยมในสภาวะต่าง ๆ ได้แก่ อากาศ ไปน้ำ และแก๊สชนิดต่าง ๆ เช่น CO_2, SO_2, N_2 และ O_2 ที่อุณหภูมิสูงถึง 400 °C ความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยมนี้เป็นผลมาจากฟิล์มออกไซด์ซึ่งเคลือบบนผิวของเซอร์โคเนียม

เซอร์โคเนียมถูกทำลายได้โดยกรดไฮโดรฟลูออริก (hydrofluoric acid) เว็ทคลอรีน (wet chlorine) กรดซัลฟุริกเข้มข้น (concentrated sulfuric acid) เฟอร์ริกคลอไรด์ (ferric chloride) สารละลายคิวปริกคลอไรด์ (cupric chloride solutions) และอะควารีเจีย (aqua regia) (อะควารีเจีย เป็นสารละลายระหว่างกรดไนตริกเข้มข้นและกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นในอัตราส่วน 1 : 3 โดยปริมาตร

(4) แทนทาลัม ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 150 °C โลหะแทนทาลัมเฉื่อยต่อสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์แทบทุกชนิด โดยมีข้อยกเว้นคือ กรดไฮโดรฟลูออริก (hydrofluoric acid) และไอระเหยของกรดซัลฟุริก (fuming sulfuric acids) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 150 °C แทนทาลัมเฉื่อยต่อกรดไฮโดรคลอริกและกรดไนตริกทุกความเข้มข้น และเฉื่อยต่อกรดซัลฟุริก 98% และกรดฟอสฟอริก 85% และของเหลวอีกเป็นจำนวนมาก

ในทางกลับกัน กรดใด ๆ ก็ตามที่มีฟลูออไรด์ไอออน (fluoride ion) (ยกเว้น chromium plating baths) จะโจมตีแทนทาลัมอย่างรวดเร็ว กรดออกซาลิกร้อน (hot oxalic acid) เป็นกรดอินทรีย์เพียงชนิดเดียวที่สามารถทำลายแทนทาลัมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(5) นิกเกิลผสมและโลหะผสมที่มีนิกเกิลในปริมาณมาก นิกเกิลมีสมบัติเด่นประการหนึ่งคือสามารถต้านทานต่ออัลคาไลร้อนและเย็น (hot and cold alkalies) ได้ดี และเป็นรองก็เฉพาะแต่คลหะเงินและเซอร์โคเนียมเท่านั้น นิกเกิลยังสามารถต้านทาต่อการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นและการกัดกร่อน (SCC) ในสภาวะที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบอยู่ได้ แต่อาจเกิดการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมที่เป็นด่าง ถ้าหากชิ้นงานมีความเค้นมาก การทดสอบการกัดกร่อนควรจะใช้เวลานานเพียงพอเพื่อให้ได้ข้อมูลอัตราการกัดกร่อนที่ถูกต้องแม่นยำ เนื่องจากฟิล์มออกไซด์ที่ผิวของนิกเกิลจะช่วยป้องกันเนื้อภายในจากการกัดกร่อนได้

เนื่องจากนิกเกิลไม่อาจปลดปล่อยไฮโดรเจนออกมาจากกรดชนิดนอน – ออกซิไดซิง (nonoxidizing acid) ได้โดยง่าย ทำให้เราสามารถใช้นิกเกิลกับกรดซัลฟุริก กรดไฮโดรคลอริกและกรดฟอสฟอริกเจือจางได้ไฮโดรคลอริก นิกเกิลยังสามารถใช้ได้ในสภาวะที่มีแอนไฮดรัสแอมโมเนีย (anhydrous ammonia) และสารละลายแอมโมเนียไฮดรอกไซด์ (ammonium hydroxide solutions) ที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า 1%

(6) นิกเกิล-ทองแดง การเติมทองแดงประมาณ 30-40% ลงในนิกเกิลจะช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการของนิกเกิล เช่นทำให้สามารถใช้คลหะนี้ได้กับน้ำทะเล (sea water) และน้ำกร่อย (brackish waters) ได้ และช่วยเพิ่มสมรรถนะของชิ้นงานเมื่อใช้ในตัวกลางที่ของไหลความเร็วสูง ๆ

โลหะผสมกลุ่มนี้มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนต่อกรดชนิดนอน – ออกซิไดซิง (nonoxidizing acids) ดีกว่านิกเกิลบริสุทธิ์ และทนต่อกรดไฮโดรฟลูออริกดีมาก อย่างไรก็ตาม โลหะกลุ่มนี้จะไม่ทนต่อตัวกลางออกซิไดซิง (oxidizing media) เช่น กรดไนตริก (nitric acid) เฟอร์ริกคลอไรด์ (ferric chloride) เว็ทคลอรีน (wet chlorine) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (sulfur dioxide) และแอมโมเนีย (ammonia) เป็นต้น

(7) นิกเกิล-โมลิบดีนัม โลหะผสมกลุ่มนี้มีนิกเกิลประมาณ 70% และมีคาร์บอนและซิลิคอนอยู่ในปริมาณต่ำแต่ไม่มีโครเมียม โมลิบดีนัมซึ่งเป็นธาตุผสมหลักจะให้ความต้านทานต่อการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมรีดิวซิง (reducing atmosphere) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรดไฮโดรคลอริก

(8) นิกเกิล-โครเมียม-เหล็ก โลหะผสมกลุ่มนี้ต้านทานต่อบรรยากาศกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง บางชนิดสามารถขึ้นรูปและเชื่อมได้ง่าย บางชนิดสามารถใช้ในอากาศที่อุณหภูมิสูงถึง 1,100 °C โลหะผสมกลุ่มนี้ต้านทานต่อกรดซัลฟุริก คงความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงและต้านทานต่อการกัดกร่อนในสารละลายที่มีน้ำเป็นทำละลาย (aqueous corrosion)

(9) ทองแดงและทองแดงผสม ทองแดงจัดได้ว่าเป็นโลหะมีตระกูล เนื่องจากมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ดีมาก เราสามารถใช้ทองแดงได้ในบรรยากาศหลายแบบ เช่น ในเขตอุตสาหกรรม ในเมือง และในทะเล นอกจากนี้การที่ทองแดง สามารถนำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดีทำมีการใช้งานด้านต่าง ๆ อย่างกว้างขวางอย่างไรก็ตาม เนื่องจากทองแดงบริสุทธิ์มีความแข็งแรงไม่สูงมากนัก ทำให้บางครั้งเราต้องเติมธาตุผสมอื่น ๆ ลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกล ธาตุผสมที่อาจใช้ได้ เช่น สังกะสี ดีบุก หรือนิกเกิล เป็นต้น

(10) ทองแดง-สังกะสี (ทองเหลือง) ถ้าเราเติมสังกะสีในปริมาณ 15% หรือสูงกว่าลงในทองแดงอาจเกิดการสูญเสียสังกะสี (dezincification) ในบางสภาวะแวดล้อม แต่ถ้ามีดีบุกประมาณ 1% อาจจะช่วยบรรเทาปัญหานี้ได้บ้าง ทองเหลืองที่มีสังกะสีในปริมาณมากนั้นจะทนทานต่อซัลไฟด์ (sulfide) ได้ดีกว่าทองเหลืองที่มีสังกะสีต่ำ

(11) ทองแดง-ดีบุก หรือบรอนซ์ โลหะทองแดง-ดีบุก หรือบรอนซ์ (bronze) จะมีธาตุฟอสฟอรัสเพื่อช่วยเพิ่มความต้านทานต่อออกซิเดชัน บรอนซ์เป็นโลหะผสมที่เราใช้กันมานานมากที่สุดชนิดหนึ่ง และการค้นพบวัตถุโบราณอายุนับร้อย ๆ ปี ที่ทำจากบรอนซ์นั้นเป็นตัวอย่างยืนยันความสามารถของบรอนซ์ในการทนทานต่อสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ไม่ว่า อากาศ น้ำ และดินได้เป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(12) ทองแดง-อะลูมินัม สมรรถนะทางด้านการกัดกร่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งความต้านทานต่อการสูญเสียธาตุผสม (dealloying resistance) ของโลหะกลุ่มนี้จะขึ้นกับโครสร้างจุลภาคเป็นอย่างมาก โลหะผสมที่มีโครงสร้างจุลภาคเป็นเฟสอัลฟาทั้งหมด (all-alpha single phase) นั้นมักจะไม่เกิดการสูญเสียธาตุผสม (dealloying) ยกเว้นภายใต้ อุณหภูมิที่สูงมากและสภาวะที่เป็นกรด โครงสร้างจุลภาคแบบเฟสเดียวจะพบได้ในโลหะทองแดง-อะลูมินัม ที่มีอะลูมินัมต่ำกว่า 8% กระบวนการทางความร้อนสามารถปรับปรุงความต้านทานต่อการสูญเสียธาตุผสมของโลหะกลุ่มนี้ซึ่งเรียกกันว่าเป็น อะลูมินัมบรอนซ์ (aluminum bronze) เราอาจเติมดีบุกลงไปเล็กน้อยเพื่อยับยั้งการกัดกร่อนตามแนวขอบเกรนอันเนื่องมาจากความเค้น (intergranular stress corrosion)

อะลูมินัมบอรอนซ์โดยทั่วไปจะทนต่อการกัดกร่อนจากสารละลายคลอไรด์โพแทช (chloride potash solutions) กรดแร่แบบนอน-ออกซิไดซิง (nonoxidizing mineral acid) และกรดอินทรีย์ (organic acids) หลายชนิด

(13) ทองแดง-นิกเกิล โลหะคิวโพรนิกเกิล (cupronickel) นั้นมีใช้กันมากในน้ำทะเล ต้านทานต่อความสกปรกทางชีวภาพ (biofouling) และการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นและการกัดกร่อน ได้ดีเยี่ยม กล่าวกันว่าโลหะชนิดนี้มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบเค้นในแอมโมเนีย และสภาพที่มีแอมโมเนีย (ammoniacal) สูงกว่าทองแดงผสมชนิดอื่น ๆ

2.4.7 การเลือกโลหะเพื่อการทนสึกหรอ

ปัจจัยหลักซึ่งมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการสึกหรอของวัสดุสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ

1. ตัวแปรของวัสดุ ได้แก่ ความแข็ง ความเหนียว (toughness) องค์ประกอบทางเคมี และ โครงสร้างจุลภาค

2. ตัวแปรในการใช้งาน ได้แก่ วัสดุที่สัมผัสกัน ความดันในการสัมผัส อัตราเร็วในการเลื่อนไถลผ่านกัน อุณหภูมิในการใช้งาน ผิวสำเร็จ การหล่อลื่น และการกัดกร่อน

แม้ว่าสมบัติทางกลของวัสดุจะมีผลอย่างมากต่อสมรรถนะของวัสดุหนึ่ง ๆ ภายใต้เงื่อนไขที่ทำให้เกิดการสึกหรอก็ตาม แต่เราไม่สามารถเชื่อมโยงความต้านทานการสึกหรอกับสมบัติใดสมบัติหนึ่งโดยเฉพาะได้ ในกรณีทั่วไปความต้านทานการสึกหรอจะไม่เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความแข็งหรือความต้านทานแรงดึง โดยที่ปัจจัยอื่น ๆ คงที่ ค่าความแข็งของวัสดุเป็นค่าที่ใช้ประมาณพฤติกรรมด้านการสึกหรอสัมพัทธ์ระหว่างวัสดุต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานที่มีการเสียดสีระหว่างโลหะกับโลหะในกรณีนี้ การเพิ่มความแข็งจะเพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอเนื่องจากจะช่วยลดปริมาณการเจาะลึก (penetration) การขีดข่วน (scratching) และการเปลี่ยนรูป (deformation) ส่วนการเพิ่มความเหนียว (toughnes) ก็อาจช่วยเพิ่มความต้านทานการสึกหรอได้เนื่องจากอนุภาคที่ผิวจะหลุดออกจากชิ้นงานได้ยากขึ้น

เนื่องจากการสึกหรอเป็นปรากฏการณ์ที่ผิว การใช้สารเคลือบและการอบชุบผิวของโลหะจึงเป็นวิธีการป้องกันที่สำคัญ

- การใช้สารเคลือบผิว เช่น การใช้พ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน (thermal spray coating)
- การใช้การอบชุบผิว เช่น การทำคาร์เบอร์ไรซิง (carburizing) ไนไตรดิง (nitriding) และ คาร์โบไนไตรดิง (carbonitriding)

อย่างไรก็ตาม การใช้สารเคลือบผิวก็อาจมีปัญหาการหลุดล่อน และการอบชุบผิวก็ไม่สามารถใช้กับโลหะทุกชนิดได้ ดังนั้น ในการใช้งานหลายประเภท เราจึงจำเป็นต้องเลือกชนิดของวัสดุให้ถูกต้องกับลักษณะของงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.7.1 <u>โลหะกลุ่มเหล็กสำหรับงานที่ต้องทนต่อการสึกหรอ</u>

1. เหล็กกล้า แม้ว่าเหล็กละมุน จะเป็นวัสดุราคาถูกที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป แต่มีความต้านทานต่อการสึกหรอไม่ดีนักและอาจมีความเสียหายของผิวเนื่องจากการไถลเสียดสีของผิวสัมผัสที่แห้งปัญหานี้อาจบรรเทาได้ด้วยการเลือกใช้ "คู่วัสดุ" ให้ถูกต้อง เช่น ใช้แบ็บบิตอัลลอย (Babbitt alloy) ช่วยหล่อลื่นผิว (แบบบิตอัลลอย หรือโลหะขาว (white metal) เป็นชื่อเรียกกลุ่มโลหะ ผสมที่มีผิวสีออกขาวและมีจุดหลอมเหลวค่อนข้างต่ำ เช่น ตะกั่ว พลวง บิสมัท ดีบุก แคดเมียม และสังกะสี การเพิ่มปริมาณคาร์บอนในเหล็กกล้าก็อาจช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอได้เช่นกัน แต่จะทำให้โลหะมีราคาสูงขึ้น เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมต่ำซึ่งผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวมาแล้วก็เป็นโลหะที่ทนต่อการสึกหรอได้ดีกว่าเหล็กละมุน ชิ้นส่วนที่ทำจากเหล็กกลุ่มนี้สามารถชุบแข็งผิวได้โดยกระบวนการคาร์เบอร์ไรซิง ไซยาไนดิง และคาร์โบไนไตรดิง เพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอ แต่ก็จะมีราคาแพงมากขึ้นด้วยเช่นกัน

เหล็กกล้ากลุ่มที่ทนต่อการสึกหรอได้ดีมากขึ้นไปอีก ได้แก่ เหล็กกล้าโครเมียมที่มีคาร์บอนปานกลาง (medium-carbon chromium steels) และเหล็กกล้าโครเมียม-อะลูมินัม (chromium-aluminum steels) ซึ่งผ่านกระบวนการไนไตรดิง นอกจากนี้ยังมีเหล็กกล้าสเตนเลสที่ผ่านการตกตะกอนเพื่อเพิ่มความแข็งแรง (precipitation hardenend stainless steel) ซึ่งสามารถใช้ในงานที่ต้องทนต่ออุณหภูมิสูง รวมทั้งทนต่อการสึกหรอและการกัดกร่อน

เหล็กกล้าแมงกานีสออสเทนนิติก (austenitic manganese steels) ใช้ในงานที่ต้องการความทนทานต่อการขัดถู (abrasion) สำหรับเหล็กในกลุ่มนี้ เหล็กแฮดฟิลด์ (Hadfield steel) เป็นเหล็กกล้าชนิดนี้ชนิดแรก ๆ ที่ได้รับการพัฒนา โดยมี 1.2%C และ 12%Mn อย่างไรก็ตาม มาตรฐาน ASTM A128 ได้ให้ตัวเลือกโลหะผสมไว้หลายชนิด โดยมีปริมาณคาร์บอนในช่วง 0.7-1.45% และแมงกานีส 11-14% โดยอาจมี (หรือไม่มี) โครเมียม โมลิบดีนัม นิกเกิล สาเนเดียม และไทเทเนียม เป็นธาตุผสมอยู่ด้วยก็ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะกลุ่มเหล็กที่ทนต่อการสึกหรอชนิดอื่น แล้ว เหล็กกล้าแมงกานีสออสเทนนิติกจะมีความทนทานต่อการแตกหักที่ดีและราคาไม่แพงมากนัก เหล็กชนิดนี้มีความต้านทานต่อการเสียดสีระหว่างโลหะกับโลหะที่ดีเยี่ยม เช่น ในลูกล้อเล็ก ๆ ซึ่งอยู่ในรอก (sheave wheels) รางรถไฟ และชิ้นงานหล่อ สำหรับรางรถไฟ เหล็กกล้าแมงกานีสมีการใช้งานในสายพานลำเลียงและโซ่ ซึ่งต้องทนต่อการขัดถูและต้องรับน้ำหนักบรรทุกมาก ๆ

2. เหล็กหล่อ เหล่อเทามีความต้านทานการสึกหรอดีเพียงพอสำหรับงานบางประเภท เช่น รางซึ่งเลื่อนไป-มา ได้ของเครื่องมือกลและชิ้นส่วนอื่น ๆ

เหล็กหล่อเพรีลลิติกและมาร์เทนซิติก มีความต้านทานต่อการสึกหรอดีกว่าและใช้ในลูกกลิ้งรีดเย็น (chilled cast irons) และลูกบด (griding balls) สำหรับเหล็กหล่อขาวผสม (alloy white irons) นั้นมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนดีมาก แต่ก็มีราคาสูงมากเช่นกัน

2.4.7.2 <u>โลหะนอกกลุ่มสำหรับงานที่ต้องทนต่อการสึกหรอ</u>

1. อะลูมินัมบรอนซ์ เป็นทองแดงอะลูมินัม ซึ่งมีอะลูมินัมประมาณ 4-11% และอาจมีธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่ด้วย เช่น เหล็ก นิกเกิล แมงกานีส และซิลิคอน เป็นต้น อะลูมินัมบรอนซ์ที่มีอะลูมินัมต่ำกว่า 7.5% มักจะมีโครงสร้างเฟสเดียว (single phase) ปริมาณ อะลูมินัมยิ่งมาก โลหะผสมชนิดนี้จะยิ่งแข็งขึ้น อะลูมินัมบรอนซ์เป็นโลหะที่ไม่สามารถหล่อลื่นตัวเองได้ ดังนั้น ในการใช้งานจึงต้องมีการใช้สารหล่อลื่นช่วย โลหะกลุ่มนี้เหมาะสมสำหรับงานที่ต้องรับภาระสูง โดยมีความเร็วในการเสียดสีต่ำหรือปานกลาง

2. ทองแดง-เบริลเลียม ทองแดงผสมเบริลเลียมเป็นโลหะและแข็งแรงที่สุดในกลุ่มของทองแดงผสมทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และถ้าหากมีการหล่อลื่นที่ดี โลหะกลุ่มนี้จะทนต่อการสึกหรอได้ดีกว่าทองแดงชนิดอื่น ๆ และดลหะกลุ่มเหล็กหลายชนิด ทองแดงผสมเบริลเลียมมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนดีในสภาพแวดล้อมแบบอุตสาหกรรมและน้ำทะเล

เราสามารถเพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอของชิ้นส่วนที่ทำจากทองแดงผสมเบริลเลียมได้ โดยการออกซิไดซ์ผิว ใส่แกรไฟต์ที่ผิว และ/หรือ ใช้ชิ้นงานหล่อ (แทนชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยใช้แรงและกัดแต่ง)

ทองแดงผสมเบริลเลียมซึ่งมี Be 1.9% และ Co 0.2% มักได้รับการใช้งานที่ทนต่อการสึกหรอ และสามารถรับแรงสูงกว่าทองแดงผสมอื่น ๆ

3. โคบอลต์ผสม ทนต่อการสึกหรอที่ผ่านการขึ้นรูปโดยใช้แรง มีความทนทานต่อการสึกหรอดีเยี่ยม นอกจากนี้ยังมีสมบัติอื่น ๆ อีก เช่น ทนต่อการกระแทก (impact) และการเปลี่ยนอุณหภูมิอย่างฉับพลัน (thermal shock) ทนต่อความร้อนและออกซิเดชัน ทนต่อการกัดกร่อน และยังคงความแข็งได้ดีที่อุณหภูมิสูง (high hot hardness) ทนต่อการขัดถู (abrasive wear) ได้ดี ในขณะที่ Haynes ทนต่อการสึกหรอแบบเกาะติด (adhesive wear) ได้ดี

ตารางที่ 2.2 โคบอลต์ผสมสำหรับงานที่ต้องการความต้านทานการสึกกร่อน

	C	Cr	Ni	Mo	W	Fe	Mn	Si
Stellite 6B	0.9-1.4	28-32	3	1.5	3.5-5.5	3	2	2
Stellite 6K	1.4-2.2	28-32	3	1.5	3.5-5.5	3	2	2
Haynes 25	0.05-0.10	19-21	9-11	-	14-16	3	1-2	1

2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ และการนำไปใช้

2.5.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Present Value, Future Value, และ Annual Value

ในส่วนนี้เริ่มต้นด้วยการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Present Value (P), Future Value (F), และ Annual Value (A) อัตราดอกเบี้ยแบบ Compound Interest มีค่าเท่ากับ i% ต่อปี ทบต้นทุกปี

เริ่มต้นด้วยการมีเงินอยู่ที่จำนวน P ณ เวลาที่ 0

ดังนั้น เมื่อเวลาผ่านไป n ปี (n = n) จะได้ $F_n = (1 + i)^n P$

สรุปได้ว่า

$$F = P(1 + i)^n \qquad (2.1)$$

$$P = \frac{F}{(1+i)^n} \qquad (2.2)$$

ถ้ามีเงินอยู่ที่ เวลา n = 1 ถึง n เป็นจำนวนเท่ากันทุก ๆ เวลา โดยแต่ละเวลามีเงินเท่ากับ A

ย้ายเงินที่เวลา n = 1 มาที่ n = 0 โดยใช้สมการ (2.2) จะได้เท่ากับ $\frac{A}{(1+i)}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ย้ายเงินที่เวลา n = 2 มาที่ n = 0 โดยใช้สมการ (2.2) จะได้เท่ากับ $\frac{A}{(1+i)^2}$

ทำไปเรื่อย ๆจนถึงเวลาที่ n = n เสร็จแล้วนำค่าที่ได้ทั้งหมดมารวมกันก็จะได้เป็นค่า P ทั้งหมดของเงิน ที่เวลา n = 1 ถึง n โดย

$$P = \frac{A}{(1+i)} + \frac{A}{(1+i)^2} + \frac{A}{(1+i)^3} + \ldots\ldots + \frac{A}{(1+i)^n}$$

จากสมการข้างบนพบว่าค่า P เป็นผลรวมของอนุกรมเรขาคณิต เมื่อทำการรวมอนุกรมเรขาคณิต ก็ จะได้ว่า

$$P = A = A\left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}\right] \text{ เมื่อ } i \neq 0 \qquad (2.3)$$

$$A = A = P\left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}\right] \qquad (2.4)$$

จากสมการ (2..3) และ (2.4) ถ้าแทนค่า $P = \left[\frac{F}{(1+i)^n}\right]$ จากสมการ (2..2) เข้าไปแล้วจัดรูปใหม่ก็จะได้ ความสัมพันธ์ระหว่าง A กับ F ดังนี้

$$F = A\left[\frac{(1+i)^n - 1}{i}\right] \text{ เมื่อ } i \neq 0 \qquad (2.5)$$

$$A = F\left[\frac{i}{(1+i)^n - 1}\right] \qquad (2.6)$$

จากสมการ (2.1) ถึง (2.6) สามารถที่จะนิยามตัวแปรต่าง ๆ ขึ้นมาได้เพื่อสะดวกต่อการเรียกหรือนำไปใช้งานดังนี้

$(1+i)^n$ แทนด้วย(F/P, i%, n) เรียกกว่า Single-payment compound-amount (SPCAF)

$\frac{1}{(1+i)^n}$ แทนด้วย(P/F, i%, n) เรียกกว่า Single-payment present-worth (SPPWF)

$\left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}\right]$ แทนด้วย(P/A, i%, n) เรียกกว่า Uniform-series present-worth (USPWF)

$\left[\frac{i(1+i)^n}{i(1+i)^n - 1}\right]$ แทนด้วย(A/P, i%, n) เรียกกว่า Capital-recovery (CRF)

$\left[\frac{(1+i)^n - 1}{i}\right]$ แทนด้วย(F/A, i%, n) เรียกกว่า Uniform-series compound-amount (USPWF)

$\left[\frac{i}{(1+i)^n - 1}\right]$ แทนด้วย(A/F, i%, n) เรียกกว่า Sinking-fund (SFF)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำค่าตัวแปรใหม่ที่ได้ไปแทนในสมการ (2.1) ถึง (2.6) ก็จะสามารถเขียนสมการอย่างง่ายได้ดังนี้

$$F = P(F/P, i\%, n) \quad (2.7)$$

$$P = F(P/F, i\%, n) \quad (2.8)$$

$$P = A(P/A, i\%, n) \quad (2.9)$$

$$A = P(A/P, i\%, n) \quad (2.10)$$

$$F = A(F/A, i\%, n) \quad (2.11)$$

$$A = F(A/F, i\%, n) \quad (2.12)$$

ส่วนกรณีที่ ช่วงเวลา n มีค่ายาวนานมาก หรือ $n = \infty$ นั้น จะพบว่า

$$F = P(1+i)^n = \infty \quad (2.13)$$

$$P = \frac{F}{(1+i)^n} = 0 \quad (2.14)$$

$$P = A\left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}\right] = \frac{A}{i} \text{ เมื่อ } i \neq 0 \quad (2.15)$$

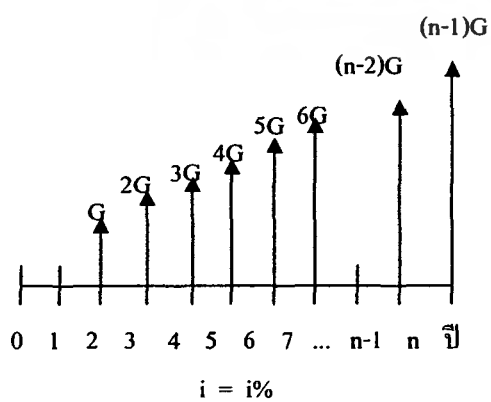
$$A = P\left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}\right] = Pi \quad (2.16)$$

$$F = A\left[\frac{(1+i)^n - 1}{i}\right] = \infty \text{ เมื่อ } i \neq 0 \quad (2.17)$$

$$A = F\left[\frac{i}{(1+i)^n - 1}\right] = 0 \quad (2.18)$$

2.5.2 การคำนวณหาค่า Present Value สำหรับกระแสเงินสดที่อยู่ในรูปแบบของอนุกรม Uniform Gradient

สำหรับกระแสเงินสดที่อยู่ในรูปของอนุกรม Uniform Gradient นั้นเป็นอนุกรมของกระแสเงินสดที่เริ่มต้นด้วยค่าคงที่ G ค่าหนึ่งหลังจากนั้น เงินสด ณ เวลาถัดไปก็จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงครั้งละ G ตัวอย่างของกระแสเงินสดลักษณะนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างกระแสเงินที่อยู่ในรูปของอนุกรม Uniform Gradient

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การหาจุดคุ้มทุน ระยะเวลาในการคืนทุนค่าคาดหมายของโครงการ การวิเคราะห์ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรและการวางแผนการลงทุนในกรณีที่มีข้อจำกัดทางด้านการเงิน

ในบทนี้ จะเป็นการนำเอาวิธีการต่างๆ ทางด้านเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม มาประยุกต์ใช้ซึ่งจะทำให้สามารถนำไปวิเคราะห์และประเมินคุณค่าของโครงการที่มีระยะละเอียดซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งปัญหาการวิเคราะห์ที่น่าสนใจที่จะกล่าวถึงในที่นี้คือ 1) การหาจุดคุ้มทุน (Breakeven Point) 2) การหาระยะเวลาในการคืนทุนของโครงการ (Payback Period 3) การหาค่าคาดหมายของโครงการ (Expected value 4) การวิเคราะห์ผลที่กระทบจากการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร (Sensitivity Analysis และ 5) การวางแผนการลงทุนในกรณีที่มีข้อจำกัดทางด้านเงินทุน (Capital Rationing under Budget Constraint)

2.6.1 การหาจุดคุ้มทุน

ในการบริหารงานของโครงการหรือกิจกรรมต่างๆ แน่นอนว่า ผู้ลงทุนต้องการกผลกำไรจากการทำโครงการหรือกิจกรรม ดังนั้นสิ่งที่ต้องนำคำนึงถึงเป็นสิ่งแรกก็คือ ต้นทุน (Cost) สิ่งต่อมาก็คือ ผลการผลิต ถ้าผู้ลงทุนสามารถวางแผนงานบริหารได้อย่างมีประสิทธิภาพก็จะสามารถทราบว่าควรจะจำกัดต้นทุนไว้ที่เท่าไร เพื่อที่จะสามารถได้ผลผลิตที่เพียงพอและทำให้เกิดรายได้มากกว่าต้นทุนการผลิต ซึ่งก็หมายถึงผลกำไรที่เกิดขึ้น จุดประสงค์ในการวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุนนี้ก็เพื่อให้ทราบว่า จุดใดของการลงทุนที่ทำให้ได้ รายได้เท่ากับต้นทุนพอดีเพื่อใช้เป็นจุดอ้างอิงในการบริหารงานไม่ให้เกิดการขาดทุน

ก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ต้นทุน เริ่มต้นจะต้องทราบว่า ต้นทุนประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ ต้นทุนคงที่ (fixed Cost) และต้นทุนผันแปร (Variable Cost)

ต้นทุนคงที่ (Fixed Cost) ก็คือต้นทุนที่จะต้องจ่ายในการดำเนินงานไม่ว่าจะจะผลิตผลผลิตออกมาเท่าไรก็ตามก็จะต้องจ่ายเงินในส่วนนี้อยู่ดี ซึ่งต้นทุนในส่วนนี้ก็จะเป็นค่าใช้จ่ายที่คงที่ เช่น ในการดำเนินกิจการต้องทำการเช่าอาคารเป็นเงิน 15,000 บาท/เดือน จะเห็นว่าไม่ว่าจะทำการผลิตสินค้าหรือไม่ผลิตสินค้าก็ยังต้องจ่ายค่าใช้จ่ายในส่วนนี้อยู่ดีและเป็นค่าที่คงที่ทุกเดือน

ต้นทุนผันแปร (Variable Cost) ก็คือต้นทุนที่แปรผันตามจำนวนการผลิตสินค้าหรือบริการ เช่น ต้นทุนผันแปรในการผลิตสินค้าเท่ากับ 5 บาท/ชิ้น หรือต้นทุนในการจ้างคนงานมาเสิร์ฟอาหารในร้านเท่ากับ 75 บาท/ชั่วโมง เป็นต้น

ถ้ากำหนดให้ F คือ ต้นทุนที่คงที่ (หน่วยคือ บาท)
V คือ ต้นทุนผันแปร (หน่วยคือ บาท/ชิ้น, บาท/ชั่วโมง ฯลฯ)
Q คือ ปริมาณสินค้าหรือบริการที่ต้องทำการผลิต
(หน่วยคือ ชิ้น, ชั่วโมง ฯลฯ)
TC คือ ต้นทุนรวมทั้งหมดของการผลิตสินค้าและบริการ หรือ
Total Cost (หน่วยคือ บาท)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$TC = F + VQ \qquad (2.19)$$

2.6.2 ระยะเวลาการคืนทุน (Payback Period)

คือ การคำนวณหาว่าในการลงทุนในโครงการใดๆ จะต้องลงทุนเป็นเวลาอย่างน้อยเท่าไรถึงจะคืนทุนได้พอดี และหลังจากนั้นคืนทุนไปแล้วการลงทุนก็จะได้ผลของการดำเนินงานที่ดีมีผลกำไร

โครงการที่ดีก็คือ โครงการที่มีระยะเวลาในการคืนทุนเร็ว ส่วนโครงการที่มีดีก็คือโครงการที่มีระยะเวลาในการคืนทุนช้า หรือไม่มีทางหาระยะเวลาในการคืนทุนได้เลย (ขาดทุนตลอดเวลา)

ขั้นตอนในการคำนวณหาระยะเวลาในการคืนทุน (มีดังนี้

1. **เริ่มจากคิดว่าถ้าลงทุนไป 1 ปี เมื่อหาค่า NPW หรือ EUAW ต่อไปเมื่อลงทุนไปแล้ว 2 ปี แล้ว**
2. **ได้ผลประกอบการเป็นบวกหรือไม่ (ผลเป็นบวก หมายถึง กำไร และ ผลเป็นลบ หมายถึง ขาดทุน) ถ้าผลประกอบการเป็นบวกก็หมายถึงระยะเวลาคืนทุนอยู่ระหว่างปีที่ 0 ถึง 1 ถ้าผลประกอบการเป็นลบก็ให้ทำการคิดค่า NPW หรือ EUAW ต่อไปเมื่อลงทุนไป 2 ปี**
3. **ตรวจสอบดูตามวิธีในขั้นที่ 2 ว่าสามารถหาระยะเวลาคืนทุนได้หรือไม่ถ้ายังไม่ได้ ให้ทำการคิดค่า NPW หรือ EUAW ต่อไปเมื่อลงทุนไป 3 ปี**
4. **ทำซ้ำขั้นตอนการตรวจสอบไปเรื่อยๆ จนกว่าจะพบว่าระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ใด**

<u>ข้อสังเกต</u> **ในการหาระยะเวลาคืนทุนจำเป็นต้องใช้วิธีการประมาณค่าเพื่อให้ได้เวลาลงทุนที่ทำให้ค่า NPW หรือ EUAW เท่ากับ ศูนย์**

2.6.3 การหาค่าคาดหมาย

ในสถานการณ์จริงนั้น แผนการลงทุนที่ผู้ลงทุนวางแผนการลงทุนในโครงการต่าง ๆไว้อาจจะไม่เป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้ก็ได้ เนื่องจากมีปัจจัยเสี่ยงในระบบธุรกิจอยู่ การที่จะลดค่าความเสี่ยงในการลงทุนให้น้อยที่สุดนั้น จำเป็นที่จะต้องมีการคาดการณ์ผลการดำเนินการในสถานการณ์ต่างๆ เอาไว้ด้วย เช่น การดำเนินการลงทุนในสถานการณ์ ปกติ การดำเนินการลงทุนในสถานการณ์ที่เศรษฐกิจตกต่ำ การดำเนินการลงทุนในสถานการณ์ที่เศรษฐกิจกำลังรุ่งเรือง ฯลฯ ต่อจากนั้นจะต้องนำผลการดำเนินการในสถานการณ์ต่าง ๆ มาทำการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยของการลงทุน ผลลัพธ์ที่ได้ออกมานี้ก็คือ ค่าคาดหมาย (Expected value) ของการลงทุน นั่นเอง

ในการประมาณคุณค่าของโครงการด้วยวิธีนี้ จะสามารถวิเคราะห์ด้วยค่าใด ๆ ก็ตามหลักเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม แต่ที่นิยมกันมาก คือใช้ค่า NPW หรือ EUAW และจะประเมินสถานการณ์การลงทุนออกเป็น 3 สถานการณ์ คือ สถานการณ์ปกติ (Reasonable Situation) สถานการณ์ที่ดี (Optimistic Situation) และสถานการณ์ที่ย่ำแย่ (pessimistic situation) ต่อจากนั้นก็จะทำการประเมินโอกาสที่จะเกิดสถานการณ์ต่าง ๆ ออกมา และในที่สุดก็จะนำมาคำนวณหาค่าคาดหมายของการลงทุน สมการที่จะใช้ในการคำนวณเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงาน

3.1 การศึกษาขั้นตอนการทำงานโดยละเอียด

การศึกษาขั้นตอนการทำงานโดยละเอียดของกระบวนการผลิต โดยหลักการส่วนใหญ่ไม่ต่างจากกระบวนการผลิตอื่นๆโดยทั่วไป คือมีการเตรียมวัตถุดิบ ตรวจสอบวัตถุดิบ นำวัตถุดิบเข้าสู่ขั้นตอนการผลิต เป็นต้น ซึ่งในการผลิต Spherical Lens หรือ Projector Lens นี้ จะกล่าวถึงวิธีการผลิตในรูปแบบผลิตภัณฑ์แบบกึ่งอัตโนมัติ (Semi auto) ซึ่งมีลักษณะเด่นกว่ากรรมวิธีอัตโนมัติ (Automatics) คือต้นทุนต่ำ คุณภาพที่ได้ไม่แตกต่างจากกระบวนการ Automatics มากนัก

3.1.1 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ

การเตรียมวัตถุดิบเป็นขั้นตอนแรกที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากขั้นตอนนี้หากมีการเตรียมวัตถุไม่ดีพอ จะทำให้เสียเวลา เพิ่มต้นทุน ลดประสิทธิภาพ และลดคุณภาพของผลิตภัณฑ์ลงได้ การเตรียมวัตถุดิบนั้นเริ่มจากการเบิกหรือการบันทึกการนำไปใช้ เหตุที่ต้องบันทึกนั้นเนื่องจากข้อมูลที่เก็บไว้จะมีประโยชน์อย่างมาก เมื่อมีปัญหาเกิดขึ้นในขั้นตอนการผลิต สาเหตุเนื่องจาก วัตถุดิบ ประโยชน์ด้านการจัดการการเก็บรักษาวัตถุดิบ ป้องกันการขาดวัตถุดิบ และยังส่งถึงประโยชน์การลดต้นทุนอีกด้วย อาจจะกล่าวได้ว่าในจุดนี้เป็นจุดเริ่มต้นต้นทุนของผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย ดังนั้นนอกจากการเก็บข้อมูลบันทึกแล้วต้องมีการตรวจรับตรวจสอบอีกด้วย เพื่อยืนยันคุณภาพเบื้องต้นและป้องกันไม่ให้เป็นสาเหตุของงานเสียของผลิตภัณฑ์ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการผลิตในขั้นตอนถัดไป

รูปที่ 3.1 การจัดเบิกใช้ของวัตถุดิบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.2 การตรวจสอบคุณภาพของวัตถุดิบ

3.1.2 ขั้นตอนการทำความสะอาดวัตถุดิบ

ขั้นตอนนี้อาจดูเหมือนง่ายๆ ไม่สำคัญ แต่ความเป็นจริงเป็นขั้นตอนที่ละทิ้งหรือข้ามผ่านไปไม่ได้ เนื่องด้วยคราบต่างๆ หรือไขมันจากมือพนักงานจะยิ่งชัดขึ้นเมื่อวัตถุดิบผลิตเป็นชิ้นงานออกมาแล้ว นอกจากนี้ยังมีผลต่อการหักเหแสงของผลิตภัณฑ์อีกด้วย

รูปที่ 3.3 การทำความสะอาดวัตถุดิบ

3.1.3 การให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัตถุดิบ

การให้ความร้อนหรือการอุ่นวัตถุดิบ วัตถุประสงค์ในขั้นตอนนี้คือ การให้ความร้อนที่ไม่สูงมากประมาณ 800-1000 °C กับวัตถุดิบก่อนเข้าสู่การรับอุณหภูมิระดับสูง เพื่อป้องกันการ ที่วัตถุดิบได้รับความร้อนอุณหภูมิสูงเข้าไปทันทีทำเกิดปฏิกิริยากับวัตถุดิบ (Thermal Shock) ซึ่งจะทำให้เสียหายหรือเป็นอันตรายแก่พนักงานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.4 การให้ความร้อนต่ำขั้นต้นแก่วัตถุดิบประมาณ 800-1000 °C

3.1.4 ขั้นตอนการผลิต

เริ่มต้นจากการนำวัตถุดิบเข้าสู่ในแต่ละช่องของเตาให้ความร้อนเพื่อให้วัตถุดิบเกิดการอ่อนตัวโดยอุณหภูมิในช่วง 1000–1180 °C ต่อจากนั้นให้นำวัตถุดิบป้อนเข้าสู่แม่พิมพ์ แล้วนำส่วนที่เหลือกลับสู่เตาให้ความร้อนอีกครั้ง แล้วป้อนวัตถุดิบชิ้นต่อไปเข้าสู่เตาให้ความร้อนอีก ซึ่งในการนำวัตถุดิบป้อนเข้าสู่เตานี้จะต้องรอสัญญาณเวลาทุกครั้ง เพื่อที่จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มาจากการปฏิบัติงานที่คงที่ (นำมาซึ่งคุณภาพของงาน และการเก็บข้อมูลที่ถูกต้องเพื่อเป็นแนวทางพัฒนาต่อไป) ป้อนวัตถุดิบอย่างต่อเนื่องจนหมด แล้วจึงนำวัตถุดิบชุดใหม่เข้ามาให้ความร้อนอีกครั้ง

รูปที่ 3.5 การให้ความร้อนในอุณหภูมิ 1000-1180 °C เพื่อให้วัตถุดิบอ่อนตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการปั๊มขึ้นรูป

3.1.5 การอบคลายความเครียด

หลังจากนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์แล้วต้องนำไปอบคลายความเครียดทุกครั้งเพื่อให้วัตถุดิบไม่เกิดการแตกร้าวหลังการเย็นตัว โดยตู้อบจะมีทั้งหมด 7 ช่วงซึ่งใช้สายพานลำเลียงผ่านในแต่ละช่วง โดยค่อยๆลดอุณหภูมิลงตั้งแต่อุณหภูมิที่ 610 °C จนลดลงมาถึง 120 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 40 นาที

รูปที่ 3.7 การอบคลายความเครียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.6 การตรวจสอบชิ้นงาน

หลังจากกระบวนการคลายความเครียดของผลิตภัณฑ์แล้ว จะต้องตรวจสอบคุณภาพอีกครั้งต่อจากนั้นจะทำการตัดคีบหรือตัดส่วนที่เกินของผลิตภัณฑ์ออกเพื่อที่จะเตรียมการเข้าสู่ขั้นตอนการขัดผลิตภัณฑ์ต่อไป แล้วส่งผลิตภัณฑ์เข้าสู่ขั้นตอนการตรวจสอบเพื่อตรวจวัดขนาดในส่วนต่างๆของชิ้นผลิตภัณฑ์ ตรวจสอบคุณภาพในตัวชิ้นงานและสุดท้ายคือ QA หรือในส่วนการรับรองคุณภาพ

รูปที่ 3.8 การตรวจสอบชิ้นงาน

รูปที่ 3.9 การตัดคีบที่เป็นส่วนเกิน

รูปที่ 3.10 การขัดและทำความสะอาดผลิตภัณฑ์โดยวิธี อัลตรา โซนิค

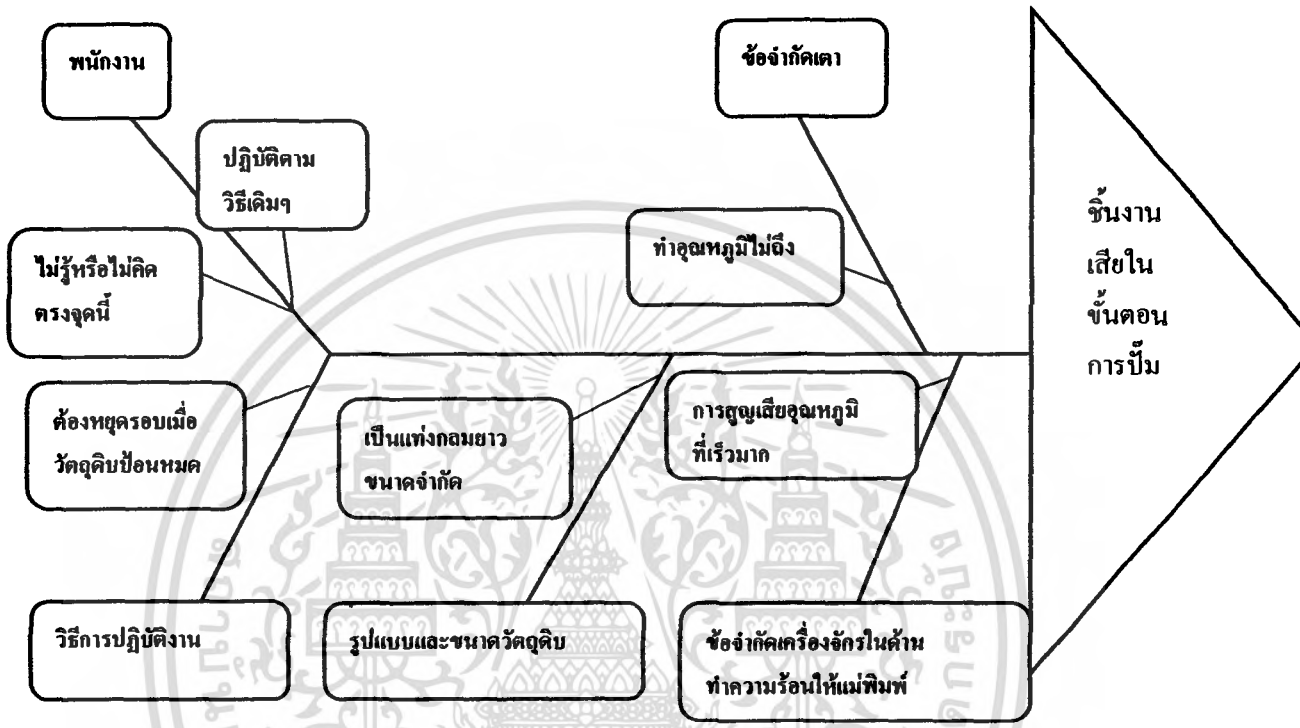
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.11 แผนผังแสดงการทำงานเมื่อ NG คือ งานเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การหาสาเหตุของปัญหา

เริ่มจากการหาสาเหตุการเกิดของเสียในสายการผลิตที่กำลังศึกษา โดยใช้ทฤษฎีแผนผังก้างปลา (Fish Bone Diagram) ของเสียที่พิจารณาคือชิ้นงานเสียในขั้นตอนการปั๊ม โดยสาเหตุการเกิดของเสียได้แสดงดังรูป 3.12



รูปที่ 3.12 แผนผังก้างปลาเพื่อหาสาเหตุของการเกิดของเสียในขั้นตอนการปั๊ม

เนื่องจากสาเหตุอื่นสามารถแก้ได้แต่ต้นทุนสูง โดยพิจารณา ดังนี้

1. ข้อจำกัดเตา ถ้าต้องการไม่ให้เกิดของเสีย จะต้องสั่งซื้อเตาใหม่ซึ่งมีราคาแพงมาก
2. ปัญหาวัตถุดิบหากเปลี่ยนเป็นแบบก้อนรูปทรงกลมซึ่งมีคุณสมบัติอ่อนตัวได้เร็วกว่าเป็นแท่ง และ ไม่ต้องหยุดรอบการทำงานแต่ต้องเพิ่มต้นทุนขึ้นอีกเป็นเท่าตัว
3. ข้อจำกัดของเครื่องปั๊มขึ้นรูปในด้านการทำความร้อน โดยในตัวเครื่องเองมีชุดทำความร้อนอยู่แล้วแต่ไม่สามารถทำอุณหภูมิที่ต้องการได้เนื่องจากเป็นเครื่องจักรเก่า ถ้าจะปรับปรุงใหม่ต้องใช้ต้นทุนสูงมาก
4. วิธีปฏิบัติงานเป็นขั้นตอนที่ถูกบังคับ โดยเครื่องจักรและวัตถุดิบจะเปลี่ยนได้ก็ต่อเมื่อเปลี่ยนเครื่องจักและวัตถุดิบ
5. พนักงาน เป็นปัญหาส่วนน้อยซึ่งมีผลกระทบน้อยมาก

จากรูปที่ 3.12 เมื่อนำมาพิจารณาแล้วจึงสรุปได้ว่าว่าการแก้ปัญหาที่ดีที่สุดโดยใช้ค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดคือการสร้างตัวทำความร้อนให้กับแม่พิมพ์เพื่อคงอุณหภูมิไว้ในระดับที่ต้องการจึงเริ่มทำการศึกษาเกี่ยวกับอุณหภูมิของหัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม่พิมพ์และจำนวนของเสียที่เกิดขึ้นในสายการผลิต โดยการเก็บข้อมูล อุณหภูมิของหัวแม่พิมพ์ซึ่งเป็นสาเหตุของของเสียในสายการผลิตโดยจะได้ตามตารางดังนี้

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจากการบันทึกอุณหภูมิของแม่พิมพ์ก่อนใช้ชุด Hot Set

ตารางบันทึกอุณหภูมิแม่พิมพ์ตัวผู้และตัวเมีย						
วัน/เดือน/ปี:	25/3/2007	เครื่องจักร No.	A2			
เวลา	9:30 AM	อุณหภูมิเตาที่ตั้งไว้		1180°C		
รุ่นการผลิต	S64WN1-US	ช่วงระหว่าง		ช่วงเปลี่ยนรอบการทำงาน		
ทดสอบครั้งที่	01	ช่วงเวลาการขึ้นรูป		15 วินาที		
ผู้จดบันทึก	นาย ภฤศดา	ตรวจสอบโดย		นาย วิทยา		

เลขที่แม่พิมพ์ของแต่ละหัวกด		อุณหภูมิที่ตั้งในแต่ละส่วน		
เลขที่แม่พิมพ์ของหัวที่ 1	15	อุณหภูมิแม่พิมพ์ตัวผู้ที่ตั้งไว้	460	°C
เลขที่แม่พิมพ์ของหัวที่ 2	14	อุณหภูมิแม่พิมพ์ตัวเมียที่ตั้งไว้	450	°C
		อุณหภูมิ Heater ที่ตั้งไว้	550	°C

ข้อมูลการขึ้นรูป		อุณหภูมิที่วัดได้				หมายเหตุ
		Head 1		Head 2		
ช่วงการทำงาน	ลำดับการทำงาน	Plg.	Mold	Plg.	Mold	
ก่อนหยุดรอบ 3 shot	1	458	465	460	461	อุณหภูมิใช้งานได้
ก่อนหยุดรอบ 2 shot	2	460	467	458	467	อุณหภูมิใช้งานได้
ก่อนหยุดรอบ 1 shot	3	462	465	462	462	อุณหภูมิใช้งานได้
Shot สุดท้าย	4	459	468	464	464	อุณหภูมิใช้งานได้
ช่วงระหว่างหยุด	5	420	415	415	425	
ช่วงก่อนเริ่มรอบต่อไป	6	382	390	385	381	
Shot ที่1	7	402	412	399	400	อุณหภูมิต่ำเกินไป
Shot ที่2	8	420	435	419	417	อุณหภูมิต่ำเกินไป
Shot ที่3	9	445	446	443	438	อุณหภูมิต่ำเกินไป
Shot ที่4	10	455	452	456	458	อุณหภูมิใช้งานได้
Shot ที่5	11	462	463	465	460	อุณหภูมิใช้งานได้

** shot คือ การที่แม่พิมพ์ตัวผู้กดลงแม่พิมพ์ตัวเมีย 1 ครั้ง ของแต่ละหัวกด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 จำนวนเงินที่สูญเปล่าในแต่ละช่วงเวลา

จำนวนชิ้นงานเสียเนื่องจากอุณหภูมิไม่ถึงค่าที่ตั้งไว้		
เวลา	จำนวนชิ้นงานเสีย (ชิ้น)	คิดเป็นมูลค่า (บาท)
หนึ่งรอบการทำงาน	8	320
หนึ่งวัน	24	960
หนึ่งปี	8760	350400

จากตารางที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าวัตถุดิบที่เสียไปในช่วงเปลี่ยนรอบการทำงานนั้นจะต้องสูญเสียทุกรอบการทำงานและถ้าคิดเป็นมูลค่าต่อปีแล้วจะมีมูลค่าที่สูงมากดังตารางที่ 3.2 จึงได้มีการคิดหาวิธีแก้ไขปัญหาโดยจะทำการสร้างชุดทำความร้อนให้กับแม่พิมพ์เพื่อคงอุณหภูมิที่เหมาะสมไว้ระหว่างหยุดรอบการทำงานทั้งนี้จะต้องคำนึงถึงต้นทุนในการสร้างชุดทำความร้อนนี้ด้วยเป็นสำคัญ

3.3 ขั้นตอนการออกแบบ

การออกแบบแบ่งได้เป็น 3 ส่วนหลักๆดังนี้

1. ชุดควบคุมอุณหภูมิ
2. ชุดทำความร้อนให้กับแม่พิมพ์ (Hot Set)
3. ชุดฐานรองชุด Hot Set

3.3.1 ชุดควบคุมอุณหภูมิ

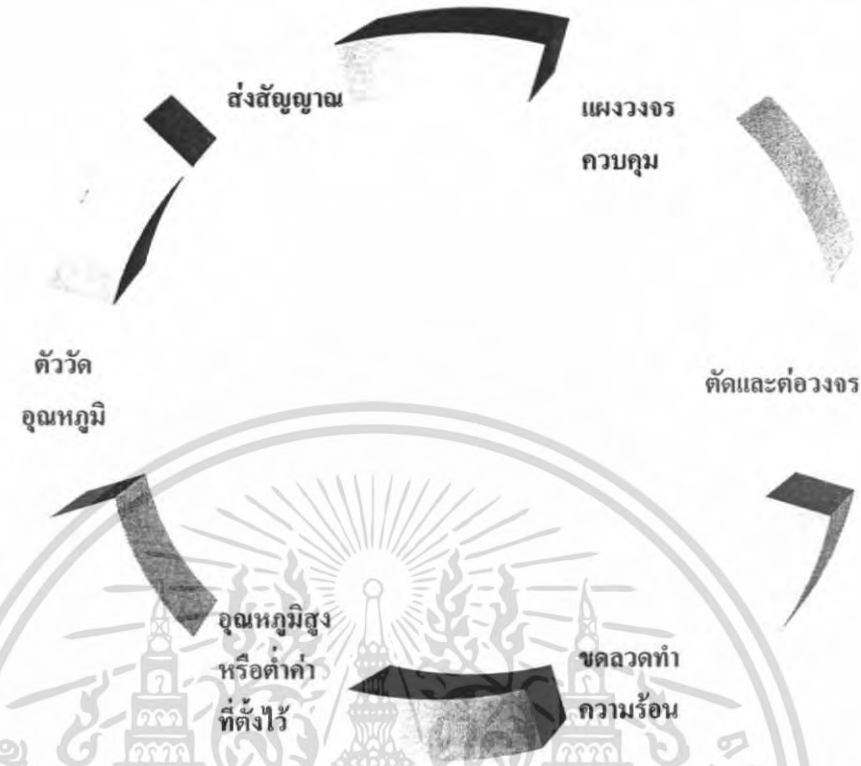
ชุดควบคุมอุณหภูมินี้จะปรับทำอุณหภูมิตามค่าที่ตั้งไว้ในแผงวงจรควบคุม (Control Panel) ซึ่งชุดแผงควบคุมวงจร (Control Panel) นี้ จะรับสัญญาณจาก ตัววัดอุณหภูมิ (Thermo Couple) ซึ่งติดตั้งไว้ที่ชุดขดลวด (Heater Coil) และ Control Panel จะสั่งให้จ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าชุดขดลวด แปลงเป็นความร้อน เมื่อความร้อนได้ตามที่ตั้งไว้ ชุดควบคุมจะสั่งตัดกระแสไฟฟ้า และจะทำงานเป็นรอบๆ ตามเข็มนาฬิกา

3.3.1.1 <u>ส่วนประกอบของชุดควบคุมอุณหภูมิ</u>

ส่วนประกอบหลักของชุดควบคุมอุณหภูมิ

1. ชุดแผงควบคุมวงจร (Control panel)
2. ชุดขดลวดทำความร้อน (Hot flex)
3. ชุดรับอุณหภูมิเพื่อแปลงสัญญาณ (Thermocouple)
4. อุปกรณ์ตัดต่อวงจรอัตโนมัติ (Semiconductor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 วงจรการทำงานของชุดควบคุมอุณหภูมิ

รูปที่ 3.14 ชุดควบคุมอุณหภูมิ

3.3.2 ชุดทำความร้อนให้แม่พิมพ์

ในการทำชุดทำความร้อนให้กับหัวแม่พิมพ์นั้น ทางผู้จัดทำได้ทำการออกแบบมาทั้งหมด 3 รุ่นด้วยกันดังนี้

1. รุ่นที่ 1
2. รุ่นที่ 2
3. รุ่นที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 ชุด Hot Set รุ่นที่ 1

เริ่มจากการออกแบบซึ่งปัญหาในขั้นตอนนี้คือ ขนาดของหัวแม่พิมพ์ที่มีพื้นที่จำกัด และ การวางสาย ขดลวดทำความร้อนซึ่งมีความยาวมาตรฐานจึงไม่สามารถเลือกรูปแบบได้จึงออกแบบมาให้เท่ากับหัวแม่พิมพ์โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. ซื้อเหล็กกล้าสเตนเลส ชนิด 316 เส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตรซึ่งสามารถนำมาทำชุด Hot Set ได้ 2 ชิ้น
2. นำมาขึ้นรูปโดยวิธีการ เจาะ กลึง และ กัด ให้ได้ตามแบบ (สามารถดูจากภาคผนวก ก.)
3. ซื้อขดลวดทำความร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.5 มิลลิเมตร
4. นำขดลวดทำความร้อนมาดัดให้พอดีกับชุด Hot Set
5. นำชิ้นงานที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 และ 4 ประกบเข้าด้วยกัน

รูปที่ 3.15 ชุด Hot Set รุ่นที่ 1

3.3.4 ชุด Hot Set รุ่นที่ 2

การออกแบบชุดที่ 2 นี้เพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดของชุดที่ 1 ได้แก่

1. ทำความร้อนได้ช้าไม่ได้ตามต้องการทำให้ไม่สามารถลดของเสียได้
2. อายุการใช้งานน้อยเนื่องจาก ขดลวดทำความร้อนมีประสิทธิภาพต่ำและขาดง่าย

โดยการออกแบบชุดที่ 2 นี้มีการเปลี่ยนชนิดของขดลวดทำความร้อนรวมถึงขนาดของเหล็กที่ใช้ประกบ โดยมีขั้นตอนการทำดังนี้

1. ซื้อเหล็กกล้าสเตนเลส ชนิด 316 เส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร
2. นำมาขึ้นรูปโดยวิธีการ เจาะ กลึง และ กัด ให้ได้ตามแบบ (สามารถดูจากภาคผนวก ข.)
3. ซื้อขดลวดทำความร้อนชนิดใหม่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.5 มิลลิเมตร
4. นำขดลวดทำความร้อนมาดัดให้พอดีกับชุด Hot Set

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ประกอบเข้ากับชุดฐานรอง (ในหัวข้อ 3.3.6)

รูปที่ 3.16 ชุด Hot set รุ่นที่2

3.3.5 ชุด Hot Set รุ่นที่ 3

รูปที่ 3.17 Hot set รุ่นที่3

การออกแบบชุดที่ 2 นี้เพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดของชุดที่ 2 ได้แก่

1. อายุการใช้งานได้แค่เพียง 1 เดือน
2. ยังมีงานที่เสียอยู่จาก Hot Set ชุดที่ 2

มีขั้นตอนการทำดังนี้

1. ซื้อเหล็กกล้าสเตนเลส ชนิด 316 เส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร
2. นำมาขึ้นรูปโดยวิธีการ เจาะ กลึง และกัด ให้ได้ตามแบบ (สามารถดูจากภาคผนวก ค.)
3. ซื้อขดลวดทำความร้อนชนิดใหม่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.5 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

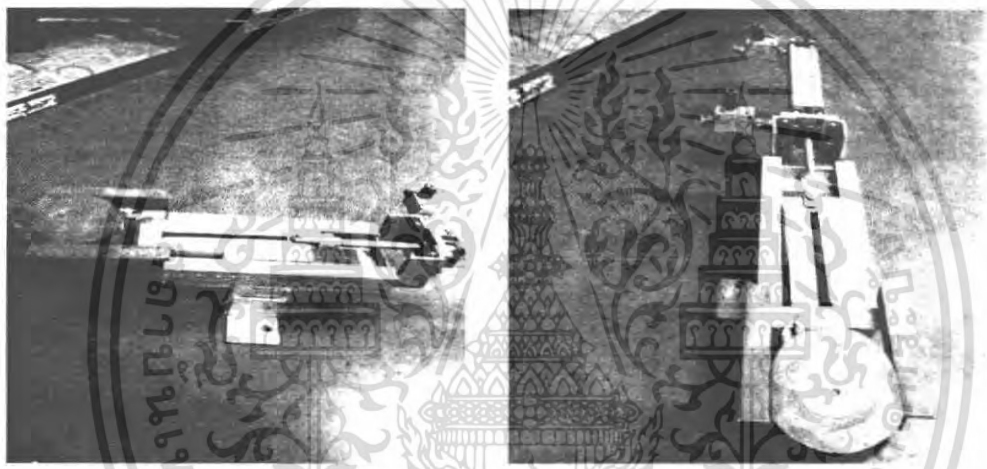
4. นำขดลวดทำความร้อนมาดัดให้พอดีกับชุด Hot Set

5. ประกอบเข้ากับชุดฐานรอง (ในหัวข้อ 3.3.6)

3.3.6 ฐานรองชุด Hot Set

การออกแบบฐานรองนี้คำนึงถึงการใช้วัสดุพื้นฐานง่ายต่อการประกอบและซ่อมบำรุง โดยการเคลื่อนที่สามารถทำได้โดยใช้ กระบอกสูบลม (Pneumatic system) โดยเมื่อหมดรอบการทำงาน พนักงานจะกดสวิตช์ ให้กระบอกสูบลมทำงาน โดยจะเลื่อนชุด Hot Set เข้าไปอยู่ตรงกลางระหว่างแม่พิมพ์ โดยมีขั้นตอนการทำดังนี้

1. ออกแบบโดยคำนึงถึงพื้นที่และการใช้งานที่ง่ายไม่ซับซ้อน
2. จัดซื้อวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการประกอบ
3. ประกอบโดยวิธีการเชื่อมและการใช้น็อตยึด (สามารถดูจากภาคผนวก ง.)



รูปที่ 3.18 ฐานรองชุด Hot Set

3.3.7 การเลือกใช้วัสดุในการทำชุดทำความร้อนให้กับหัวแม่พิมพ์

หลักในการเลือกวัสดุที่จะนำมาทำชุด Hot set ซึ่งต้องเลือกชนิดของโลหะให้เหมาะสมกับอุณหภูมิใช้งานเป็นสำคัญ ในที่นี้อุณหภูมิที่ใช้งานคือ ตั้งแต่ 350-700 องศาเซลเซียส และมีความคงทนต่อความร้อนและยังต้องสามารถรับแรงอัดที่เกิดจากแรงกดของแม่พิมพ์ ซึ่งโลหะที่เหมะสมต่อการใช้งานนี้มีด้วยกัน 3 ชนิด

1. เหล็กกล้าสเตนเลสออสเทนติก อุณหภูมิขีดจำกัดของเหล็กกล้าสเตนเลสออสเทนติก มาตรฐานประมาณ 750 องศาเซลเซียส เหล็กกล้าสเตนเลสชนิด 316 ซึ่งมี Mo 2.5% มีค่าความเค้นที่ทำให้เกิดการฉีกขาดออกจากกัน สูงที่สุดในตระกูล 300 โลหะผสมที่มีธาตุผสมเช่น Mo, Ti, W และ Nb มากกว่า มีค่าความเค้นที่ทำให้เกิดการฉีกขาดออกจากกันสูงกว่าตระกูล 300 ในช่วงอุณหภูมิ 540-815 องศาเซลเซียสและมีความแข็งแรงกว่าตระกูล 300 ส่วนใหญ่

2. เหล็ก-นิเกิลซูเปอร์อัลลอย โลหะกลุ่มนี้มีเหล็กข้อนข้างมาก (มากกว่าหรือเท่ากับ10%) และเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอนของคาร์ไบด์และสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิก ในเมทริกซ์ที่มีโครงสร้างเป็นลูกบาศก์แบบเซ็นเตอร์ หรือ BCC (Body Center Cubic) ตะกอนที่ใช้กันมากที่สุดคือ γ' ในโลหะผสมเช่น A-286, V-57หรือ Inconal

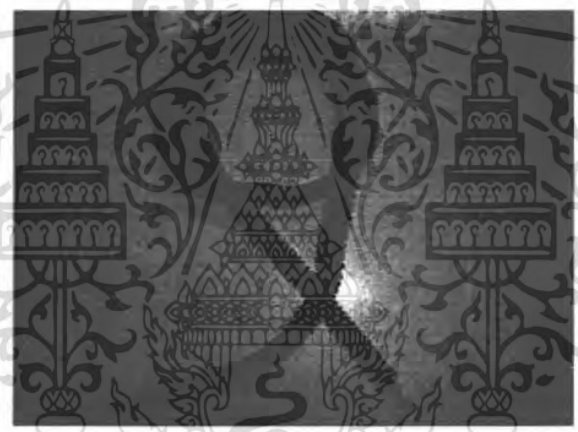
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

718, ซูเปอร์อัลลอยเหล็ก-นิเกิล ตัวอื่นๆ เกิดจากการดัดแปลงเหล็กกล้าสเตนเลสซึ่งแข็งแรงขึ้นโดยการใช้กลไกการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอน เช่น Incoloy 800H ซึ่งมี Ti และ Al เล็กน้อยซึ่งให้เฟส γ'

3. นิกเกิลซูเปอร์อัลลอย มีนิเกิลในช่วง 30-50% และอาจมีโครเมียมสูงถึง 30% ธาตุผสมอื่นๆเช่น Al , Ti , Nb และ W นั้นใส่เข้าไปเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความต้านทานต่อการกัดกร่อน กลุ่มที่สำคัญมากกลุ่มหนึ่งคือ ซูเปอร์อัลลอยที่แข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วยตะกอน γ' เช่นโลหะผสมชนิด Waspalloy หรือ Udimet 700 โลหะกลุ่มอื่นเช่น Hastealloy X นั้นแข็งแรงขึ้นด้วยกลไกสารละลายของแข็งกลุ่มที่ 3 แข็งแรงขึ้นด้วยการใช้อนุภาคออกไซด์กระจายไปในเนื้อเมทริกซ์ เช่นโลหะผสมชนิด IN MA-6000E

ในโครงงานชิ้นนี้ วัสดุที่เหมาะสมกับงานที่สุดและมีราคาถูกที่สุด จึงเลือกใช้เหล็กกล้า สเตนเลส ออสเทนติก หรือ ที่เรียกอีกอย่างว่าเหล็กกล้าสเตนเลสชนิด 316 ซึ่งมีขีดจำกัดของอุณหภูมิที่ 750 องศาเซลเซียส ซึ่งมีคุณสมบัติการนำความร้อนเหมาะสมที่สุดในหมู่เหล็กกล้าสเตนเลส แล้วจึงนำมาขึ้นรูปและใช้งาน

3.3.8 หลักในการเลือกชุดขดลวดทำความร้อน



รูปที่ 3.19 ขดลวดทำความร้อน

หลักในการเลือก ชุด Hot flex ซึ่งมีให้เลือกไม่มากนักโดยส่วนประกอบของชุด Hot flex คือ Electric coil, ผงเซรามิค, Copper pipe และ Flex หุ้มวัสดุทั้งหมดไว้โดยทั้ง 3 แบบนี้จะแตกต่างกันที่เส้นผ่านศูนย์กลางและอุณหภูมิที่ทำได้

1. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.2 มิลลิเมตร 800-1400 W สามารถทำอุณหภูมิสูงสุดได้ 500 องศาเซลเซียส
2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.6 มิลลิเมตร 1600-2200 W สามารถทำอุณหภูมิสูงสุดได้ 850 องศาเซลเซียส
3. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.00 มิลลิเมตร 2200-3000 W สามารถทำอุณหภูมิสูงสุดได้ 1000 องศาเซลเซียส

ซึ่งได้เลือกใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.6 มิลลิเมตร เนื่องจากสามารถทำอุณหภูมิได้ตามต้องการ

3.4 การตรวจสอบขณะทำงานจริง

ทางผู้จัดทำได้มีการจัดทำแบบตรวจสอบอุปกรณ์เครื่องมือเครื่องจักรขึ้นมาเพื่อให้พนักงานคอยตรวจเช็คสภาพการทำงานของชุด Hot Set ในแต่ละวันหากมีชิ้นส่วนใดชำรุดหรือเสียหายก็จะทำการบันทึกของวันนั้นๆไปและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากการบันทึกส่วนใหญ่ไม่มีปัญหาที่ร้ายแรงที่จะส่งผลกับผลิตภัณฑ์แต่จะเป็นปัญหาเกี่ยวกับรอยรั่วของข้อต่อลม ซึ่งทำจากพลาสติกซึ่งมีราคาถูกกว่าที่ทำจากโลหะ

3.5 สรุปผลการดำเนินงาน

จากการศึกษาขั้นตอนการทำงานและเริ่มทำชุดให้ความร้อนกับหัวแม่พิมพ์ (Hot Set) จนถึง รุ่นที่ 3 ซึ่งยังใช้งานอยู่ในปัจจุบันและได้มีการบันทึกข้อมูลการทำงานเรื่อยมาพบว่า รุ่นที่ 3 สามารถทำได้ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ และผลที่ได้จะนำไปแสดงในบทต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการดำเนินงาน

4.1 การทดสอบการสร้างชุดทำความร้อนให้กับแม่พิมพ์

การดำเนินงานได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจะกล่าวถึงการทดสอบชุดทำความร้อนให้กับแม่พิมพ์ทั้งสามรุ่นด้วยกัน ส่วนที่สองเป็นการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนซึ่งในแต่ละรุ่นมีขั้นตอนการทำงานที่เหมือนกันแต่แตกต่างกันที่อุณหภูมิที่สามารถทำได้และอายุการใช้งาน

4.1.1 รุ่นที่ 1

วัสดุที่นำมาใช้ทำตัว Body คือเหล็กกล้าสเตนเลสชนิด 316 และขดลวดทำความร้อน ลักษณะจะมีขดลวดอยู่ด้านในซึ่งหุ้มด้วยผงเซรามิคและถูกผนึกด้วยอลูมิเนียม ซึ่งจากการทดลองใช้งานในเบื้องต้น จะพบว่าขดลวดชนิดนี้สามารถทำความร้อนได้สูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ 550 °C และสามารถจะส่งถ่ายอุณหภูมิให้กับ แม่พิมพ์ตัวผู้ (Plunger) และแม่พิมพ์ตัวเมีย (Mold) ได้อุณหภูมิในช่วงประมาณ 380-400 °C ซึ่งจากตารางที่ 4.1 จะพบว่าอุณหภูมิในช่วงระหว่างหยุดรอบการทำงานจนถึงการปั๊มครั้งที่ 3 (shot 3) ต่ำกว่าที่กำหนดทำให้เสียชิ้นงานไป 3 ชิ้นในทุก 1 รอบการทำงานนอกจากนั้นชุดขดลวดทำความร้อนที่นำมาใช้กับชุดนี้มีอายุการใช้งานเพียง 24 ชั่วโมง

รูปที่ 4.1 Hot Set ชุดที่ 1 ขณะประกอบพร้อมใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตารางการทดสอบชุดทำความร้อนแม่พิมพ์รุ่นที่ 1

ตารางบันทึกอุณหภูมิแม่พิมพ์ตัวผู้และตัวเมีย						
วัน/เดือน/ปี:	28/3/2007		เครื่องจักร No.	A2		
เวลา	9:30 AM		อุณหภูมิเตาที่ตั้งไว้		1180°C	
รุ่นการผลิต	S64WN1-US		ช่วงระหว่าง		ช่วงเปลี่ยนรอบการทำงาน	
ทดสอบครั้งที่	06		ช่วงเวลาการขึ้นรูป	15	วินาที	
ผู้จดบันทึก	นาย ภฤศดา		ตรวจสอบโดย		นาย วิทยา	

เลขที่แม่พิมพ์ของแต่ละหัวกด		อุณหภูมิที่ตั้งในแต่ละส่วน		
เลขที่แม่พิมพ์ของหัวที่ 1	11	อุณหภูมิแม่พิมพ์ตัวผู้ที่ตั้งไว้	460	°C
เลขที่แม่พิมพ์ของหัวที่ 2	13	อุณหภูมิแม่พิมพ์ตัวเมียที่ตั้งไว้	450	°C
		อุณหภูมิ Heater ที่ตั้งไว้	550	°C

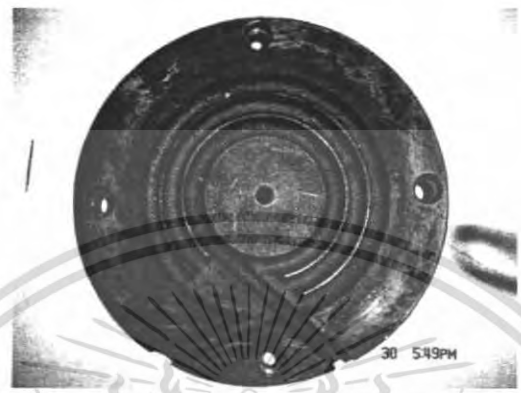
ข้อมูลการขึ้นรูป		อุณหภูมิที่วัดได้				หมายเหตุ
		Head 1		Head 2		
ช่วงการทำงาน	ลำดับการทำงาน	Plg	Mold	Plg	Mold	
ก่อนหยุดรอบ 3 shot	1	463	454	461	456	อุณหภูมิใช้งานได้
ก่อนหยุดรอบ 2 shot	2	465	453	453	463	อุณหภูมิใช้งานได้
ก่อนหยุดรอบ 1 shot	3	459	457	458	451	อุณหภูมิใช้งานได้
Shot สุดท้าย	4	458	454	460	456	อุณหภูมิใช้งานได้
ช่วงระหว่างหยุด	5	422	414	417	421	
ช่วงก่อนเริ่มรอบต่อไป	6	399	395	395	397	
Shot ที่1	7	411	419	420	413	อุณหภูมิต่ำเกินไป
Shot ที่2	8	431	435	427	425	อุณหภูมิต่ำเกินไป
Shot ที่3	9	442	444	441	435	อุณหภูมิต่ำเกินไป
Shot ที่4	10	454	453	455	452	อุณหภูมิใช้งานได้
Shot ที่5	11	460	451	458	455	อุณหภูมิใช้งานได้

หมายเหตุ: ในช่วงระหว่างการเปลี่ยนรอบงานผลิตจำเป็นต้องหยุดการปั๊ม (Press) เนื่องจากจะต้องเสียเวลาในการให้ความร้อนแก่วัตถุดิบเป็นเวลา 3-5 นาที ดังนั้นจึงทำให้อุณหภูมิช่อง แม่พิมพ์ตัวผู้และแม่พิมพ์ตัวเมียลดลงจนต่ำกว่ามาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

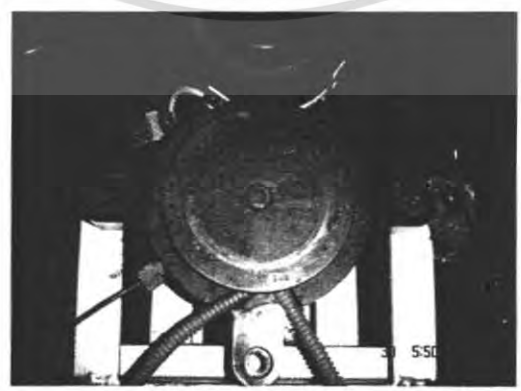
4.1.2 รุ่นที่ 2

รุ่นนี้มีการเปลี่ยนแปลงทั้งทางด้านรูปทรง และขดลวดทำความร้อนซึ่งจากผลการทดลองชุดทำความร้อนแม่พิมพ์สามารถเพิ่มความร้อนได้แต่อยู่ในระดับหนึ่งซึ่งยังไม่ดีที่สุด ถ้าดูจากตารางการทดสอบที่ 4.2, 4.3, 4.4 จะเห็นว่าในช่วง Shotที่ 1 ชุดทำความร้อนให้กับแม่พิมพ์ไม่สามารถทำอุณหภูมิได้ทัน ทำให้ชิ้นงานชิ้นที่ 1 ถึงชิ้นที่ 2 ต้องเสียไป



รูปที่ 4.2 Hot Set ชุดที่ 2 และร่องสำหรับใส่ขดลวดทำความร้อน

รูปที่ 4.3 Hot Set ชุดที่ 2 เมื่อประกบเข้าด้วยกัน



รูปที่ 4.4 Hot Set ชุดที่ 2 ประกอบกับฐานรองขณะทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ตารางการทดสอบชุดทำความร้อนแม่พิมพ์รุ่นที่ 2

ตารางบันทึกอุณหภูมิแม่พิมพ์ตัวผู้และตัวเมีย			
วัน/เดือน/ปี:	3/4/2007	เครื่องจักร No.	A2
เวลา	9:30 AM	อุณหภูมิเตาที่ตั้งไว้	1180°C
รุ่นการผลิต	S64WN1-US	ช่วงระหว่าง	ช่วงเปลี่ยนรอบการทำงาน
ทดสอบครั้งที่	07	ช่วงเวลาการขึ้นรูป	15 วินาที
ผู้จดบันทึก	นาย ภฤศดา	ตรวจสอบโดย	นาย วิทยา

เลขที่แม่พิมพ์ของแต่ละหัวกด		อุณหภูมิที่ตั้งในแต่ละส่วน		
เลขที่แม่พิมพ์ของหัวที่ 1	11	อุณหภูมิแม่พิมพ์ตัวผู้ที่ตั้งไว้	460	°C
เลขที่แม่พิมพ์ของหัวที่ 2	13	อุณหภูมิแม่พิมพ์ตัวเมียที่ตั้งไว้	450	°C
		อุณหภูมิ Heater ที่ตั้งไว้	750	°C

ข้อมูลการขึ้นรูป		อุณหภูมิที่วัดได้				หมายเหตุ
		Head 1		Head 2		
ช่วงการทำงาน	ลำดับการทำงาน	Plg	Mold	Plg	Mold	
ก่อนหยุดรอบ 3 shot	1	460	454	461	450	อุณหภูมิใช้งานได้
ก่อนหยุดรอบ 2 shot	2	463	453	465	452	อุณหภูมิใช้งานได้
ก่อนหยุดรอบ 1 shot	3	458	451	456	455	อุณหภูมิใช้งานได้
Shot สุดท้าย	4	461	454	459	451	อุณหภูมิใช้งานได้
ช่วงระหว่างหยุด	5	427	440	428	439	
ช่วงก่อนเริ่มรอบต่อไป	6	423	451	421	450	
Shot ที่1	7	441	452	438	456	อุณหภูมิต่ำเกินไป
Shot ที่2	8	458	460	452	465	อุณหภูมิใช้งานได้
Shot ที่3	9	460	462	458	460	อุณหภูมิใช้งานได้
Shot ที่4	10	454	453	465	458	อุณหภูมิใช้งานได้
Shot ที่5	11	463	455	457	455	อุณหภูมิใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ตารางการทดสอบชุดทำความร้อนแม่พิมพ์รุ่นที่ 2

ตารางบันทึกอุณหภูมิแม่พิมพ์ตัวผู้และตัวเมีย						
วัน/เดือน/ปี:	3/4/2007		เครื่องจักร No.	A2		
เวลา	11:30 AM		อุณหภูมิเตาที่ตั้งไว้	1180°C		
รุ่นการผลิต	S64WN1-US		ช่วงระหว่าง	ช่วงเปลี่ยนรอบการทำงาน		
ทดสอบครั้งที่	09		ช่วงเวลาการขึ้นรูป	15 วินาที		
ผู้จดบันทึก	นาย ภฤศคา		ตรวจสอบโดย	นาย วิทยา		
เลขที่แม่พิมพ์ของแต่ละหัวกด			อุณหภูมิที่ตั้งในแต่ละส่วน			
เลขที่แม่พิมพ์ของหัวที่ 1	11		อุณหภูมิแม่พิมพ์ตัวผู้ที่ตั้งไว้	460 °C		
เลขที่แม่พิมพ์ของหัวที่ 2	13		อุณหภูมิแม่พิมพ์ตัวเมียที่ตั้งไว้	450 °C		
			อุณหภูมิ Heater ที่ตั้งไว้	750 °C		

ข้อมูลการขึ้นรูป		อุณหภูมิที่วัดได้				หมายเหตุ
		Head 1		Head 2		
ช่วงการทำงาน	ลำดับการทำงาน	Plg	Mold	Plg	Mold	
ก่อนหยุดรอบ 3 shot	1	458	451	461	450	อุณหภูมิใช้งานได้
ก่อนหยุดรอบ 2 shot	2	459	456	457	453	อุณหภูมิใช้งานได้
ก่อนหยุดรอบ 1 shot	3	463	460	452	456	อุณหภูมิใช้งานได้
Shot สุดท้าย	4	461	458	459	459	อุณหภูมิใช้งานได้
ช่วงระหว่างหยุด	5	426	440	429	440	
ช่วงก่อนเริ่มรอบต่อไป	6	428	442	426	441	
Shot ที่1	7	441	455	438	456	อุณหภูมิต่ำเกินไป
Shot ที่2	8	456	460	450	452	อุณหภูมิใช้งานได้
Shot ที่3	9	460	457	455	460	อุณหภูมิใช้งานได้
Shot ที่4	10	465	452	462	453	อุณหภูมิใช้งานได้
Shot ที่5	11	464	451	465	450	อุณหภูมิใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ตารางการทดสอบชุดทำความร้อนแม่พิมพ์รุ่นที่ 2

ตารางบันทึกอุณหภูมิแม่พิมพ์ตัวผู้และตัวเมีย			
วัน/เดือน/ปี:	6/4/2007	เครื่องจักร No.	A2
เวลา	13:30 AM	อุณหภูมิเตาที่ตั้งไว้	1180°C
รุ่นการผลิต	S64WN1-US	ช่วงระหว่าง	ช่วงเปลี่ยนรอบการทำงาน
ทดสอบครั้งที่	10	ช่วงเวลาการขึ้นรูป	15 วินาที
ผู้จดบันทึก	นาย ภฤศดา	ตรวจสอบโดย	นาย วิทยา

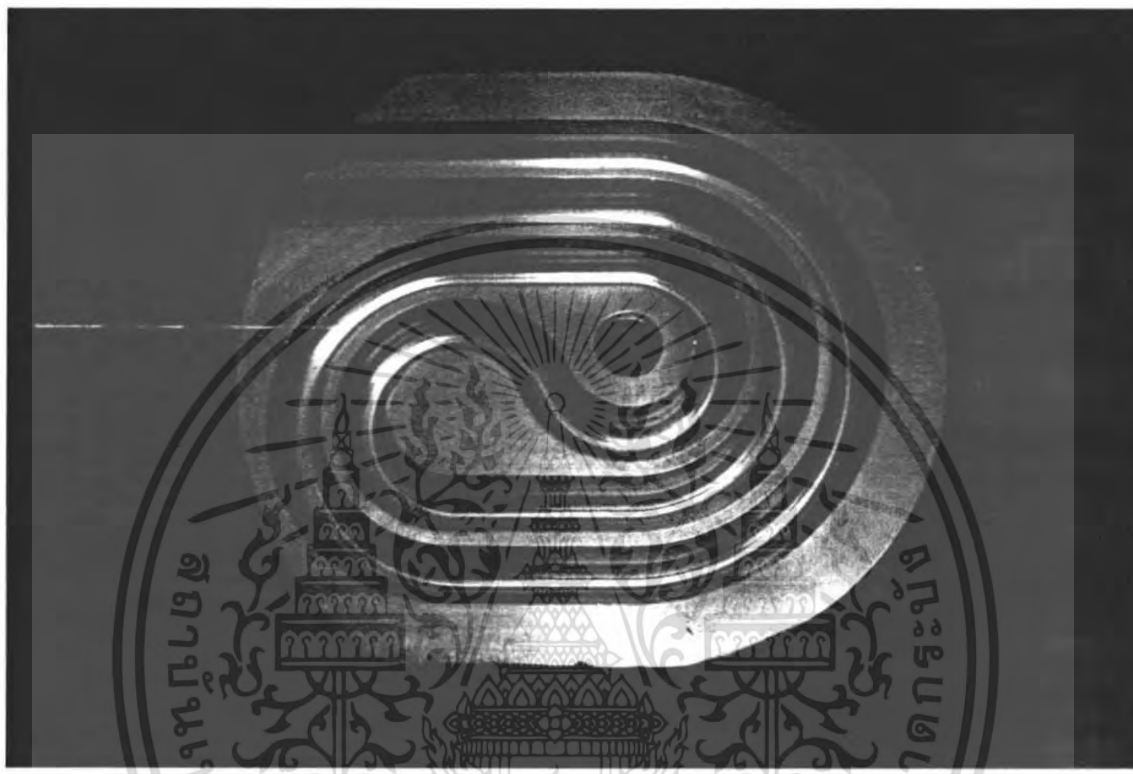
เลขที่แม่พิมพ์ของแต่ละหัวกด		อุณหภูมิที่ตั้งในแต่ละส่วน		
เลขที่แม่พิมพ์ของหัวที่ 1	11	อุณหภูมิแม่พิมพ์ตัวผู้ที่ตั้งไว้	460	°C
เลขที่แม่พิมพ์ของหัวที่ 2	13	อุณหภูมิแม่พิมพ์ตัวเมียที่ตั้งไว้	450	°C
		อุณหภูมิ Heater ที่ตั้งไว้	750	°C

ข้อมูลการขึ้นรูป		อุณหภูมิที่วัดได้				หมายเหตุ
		Head 1		Head 2		
ช่วงการทำงาน	ลำดับการทำงาน	Plg	Mold	Plg	Mold	
ก่อนหยุดรอบ 3 shot	1	465	450	460	452	อุณหภูมิใช้งานได้
ก่อนหยุดรอบ 2 shot	2	462	448	462	450	อุณหภูมิใช้งานได้
ก่อนหยุดรอบ 1 shot	3	460	451	459	453	อุณหภูมิใช้งานได้
Shot สุดท้าย	4	463	456	463	455	อุณหภูมิใช้งานได้
ช่วงระหว่างหยุด	5	423	444	422	441	
ช่วงก่อนเริ่มรอบต่อไป	6	421	443	424	440	
Shot ที่1	7	438	456	443	453	อุณหภูมิต่ำเกินไป
Shot ที่2	8	456	456	457	456	อุณหภูมิใช้งานได้
Shot ที่3	9	460	458	460	450	อุณหภูมิใช้งานได้
Shot ที่4	10	462	452	464	454	อุณหภูมิใช้งานได้
Shot ที่5	11	465	451	466	453	อุณหภูมิใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 รุ่นที่ 3

รุ่นที่สามเป็นรุ่นที่เมื่อนำไปใช้งานแล้วมีประสิทธิภาพมากที่สุดอีกทั้งยังมีอายุการใช้งานที่นานมาก ซึ่งจนถึงปัจจุบันยังสามารถใช้งานได้ตามปกติ รูปที่ 4.5 เพื่อแก้ปัญหาขดลวดทำความร้อนทับกันจากรุ่นที่ 2 ทำให้มีอายุการใช้งานน้อยจึงมีการแก้ไขแบบขดลวดทำความร้อนให้ขนานกัน



รูปที่ 4.5 Hot Set รุ่นที่ 3 และร่องใส่ชุดขดลวดทำความร้อนที่ออกแบบใหม่

จากการทดสอบใช้งานจริงของชุด Hot Set รุ่นที่ 3 เมื่อนำผลของการทำอุณหภูมิให้กับหัวแม่พิมพ์ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.5, 4.6, 4.7 จะพบว่า Hot Set รุ่นที่ 3 สามารถทำอุณหภูมิให้กับหัวแม่พิมพ์ได้อย่างดีทำให้ไม่มีของเสียเกิดขึ้นในสายการผลิตนี้อีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ตารางการทดสอบชุดทำความร้อนแม่พิมพ์รุ่นที่ 3

ตารางบันทึกอุณหภูมิแม่พิมพ์ตัวผู้และตัวเมีย							
วัน/เดือน/ปี:	16/4/2007		เครื่องจักร No.	A2			
เวลา	9:30 AM		อุณหภูมิเตาที่ตั้งไว้	1180°C			
รุ่นการผลิต	S64WN1-US		ช่วงระหว่าง	ช่วงเปลี่ยนรอบการทำงาน			
ทดสอบครั้งที่	12		ช่วงเวลาการขึ้นรูป	15 วินาที			
ผู้จดบันทึก	นาย ภฤศดา		ตรวจสอบโดย	นาย วิทยา			
เลขที่แม่พิมพ์ของแต่ละหัวกด			อุณหภูมิที่ตั้งในแต่ละส่วน				
เลขที่แม่พิมพ์ของหัวที่ 1	09		อุณหภูมิแม่พิมพ์ตัวผู้ที่ตั้งไว้	460 °C			
เลขที่แม่พิมพ์ของหัวที่ 2	07		อุณหภูมิแม่พิมพ์ตัวเมียที่ตั้งไว้	450 °C			
			อุณหภูมิ Heater ที่ตั้งไว้	550 °C			
ข้อมูลการขึ้นรูป			อุณหภูมิที่วัดได้				หมายเหตุ
			Head 1		Head 2		
ช่วงการทำงาน	ลำดับการทำงาน		Plg	Mold	Plg	Mold	
ก่อนหยุดรอบ 3 shot	1		462	451	461	451	อุณหภูมิใช้งานได้
ก่อนหยุดรอบ 2 shot	2		459	456	456	448	อุณหภูมิใช้งานได้
ก่อนหยุดรอบ 1 shot	3		460	452	461	456	อุณหภูมิใช้งานได้
Shot สุดท้าย	4		461	453	452	458	อุณหภูมิใช้งานได้
ช่วงระหว่างหยุด	5		445	450	443	452	
ช่วงก่อนเริ่มรอบต่อไป	6		442	460	445	459	
Shot ที่1	7		455	465	456	462	อุณหภูมิใช้งานได้
Shot ที่2	8		460	468	460	464	อุณหภูมิใช้งานได้
Shot ที่3	9		462	463	459	461	อุณหภูมิใช้งานได้
Shot ที่4	10		461	455	461	452	อุณหภูมิใช้งานได้
Shot ที่5	11		463	450	464	450	อุณหภูมิใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ตารางการทดสอบชุดทำความร้อนแม่พิมพ์รุ่นที่ 3

ตารางบันทึกอุณหภูมิแม่พิมพ์ตัวผู้และตัวเมีย							
วัน/เดือน/ปี:	16/4/2007		เครื่องจักร No.	A2			
เวลา	11:30 AM		อุณหภูมิเตาที่ตั้งไว้		1180°C		
รุ่นการผลิต	S64WN1-US		ช่วงระหว่าง		ช่วงเปลี่ยนรอบการทำงาน		
ทดสอบครั้งที่	13		ช่วงเวลาการขึ้นรูป		15 วินาที		
ผู้จดบันทึก	นาย ภฤศดา		ตรวจสอบ โดย		นาย วิทยา		
เลขที่แม่พิมพ์ของแต่ละหัวกด			อุณหภูมิที่ตั้งในแต่ละส่วน				
เลขที่แม่พิมพ์ของหัวที่ 1	09		อุณหภูมิแม่พิมพ์ตัวผู้ที่ตั้งไว้		460 °C		
เลขที่แม่พิมพ์ของหัวที่ 2	07		อุณหภูมิแม่พิมพ์ตัวเมียที่ตั้งไว้		450 °C		
			อุณหภูมิ Heater ที่ตั้งไว้		550 °C		
ข้อมูลการขึ้นรูป			อุณหภูมิที่วัดได้				หมายเหตุ
			Head 1		Head 2		
ช่วงการทำงาน	ลำดับการทำงาน		Plg	Mold	Plg	Mold	
ก่อนหยุดรอบ 3 shot	1		462	448	460	452	อุณหภูมิใช้งานได้
ก่อนหยุดรอบ 2 shot	2		460	451	458	450	อุณหภูมิใช้งานได้
ก่อนหยุดรอบ 1 shot	3		461	452	463	459	อุณหภูมิใช้งานได้
Shot สุดท้าย	4		463	454	459	457	อุณหภูมิใช้งานได้
ช่วงระหว่างหยุด	5		443	451	445	455	
ช่วงก่อนเริ่มรอบต่อไป	6		444	455	446	455	
Shot ที่1	7		454	462	456	462	อุณหภูมิใช้งานได้
Shot ที่2	8		458	465	463	456	อุณหภูมิใช้งานได้
Shot ที่3	9		461	461	468	459	อุณหภูมิใช้งานได้
Shot ที่4	10		460	458	460	452	อุณหภูมิใช้งานได้
Shot ที่5	11		464	455	461	451	อุณหภูมิใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ตารางการทดสอบชุดทำความร้อนแม่พิมพ์รุ่นที่ 3

ตารางบันทึกอุณหภูมิแม่พิมพ์ตัวผู้และตัวเมีย							
วัน/เดือน/ปี:	16/4/2007		เครื่องจักร No.	A2			
เวลา	13:30 AM		อุณหภูมิเตาที่ตั้งไว้	1180°C			
รุ่นการผลิต	S64WN1-US		ช่วงระหว่าง	ช่วงเปลี่ยนรอบการทำงาน			
ทดสอบครั้งที่	14		ช่วงเวลาการขึ้นรูป	15 วินาที			
ผู้จดบันทึก	นาย ภฤศดา		ตรวจสอบโดย	นาย วิทยา			
เลขที่แม่พิมพ์ของแต่ละหัวกด			อุณหภูมิที่ตั้งในแต่ละส่วน				
เลขที่แม่พิมพ์ของหัวที่ 1	09		อุณหภูมิแม่พิมพ์ตัวผู้ที่ตั้งไว้	460 °C			
เลขที่แม่พิมพ์ของหัวที่ 2	07		อุณหภูมิแม่พิมพ์ตัวเมียที่ตั้งไว้	450 °C			
			อุณหภูมิ Heater ที่ตั้งไว้	550 °C			
ข้อมูลการขึ้นรูป			อุณหภูมิที่วัดได้				หมายเหตุ
			Head 1		Head 2		
ช่วงการทำงาน	ลำดับการทำงาน		Plg	Mold	Plg	Mold	
ก่อนหยุดรอบ 3 shot	1		463	450	464	453	อุณหภูมิใช้งานได้
ก่อนหยุดรอบ 2 shot	2		465	456	465	452	อุณหภูมิใช้งานได้
ก่อนหยุดรอบ 1 shot	3		462	452	462	456	อุณหภูมิใช้งานได้
Shot สุดท้าย	4		460	451	461	451	อุณหภูมิใช้งานได้
ช่วงระหว่างหยุด	5		444	450	441	449	
ช่วงก่อนเริ่มรอบต่อไป	6		442	456	442	453	
Shot ที่1	7		460	462	459	456	อุณหภูมิใช้งานได้
Shot ที่2	8		455	458	461	461	อุณหภูมิใช้งานได้
Shot ที่3	9		458	451	465	452	อุณหภูมิใช้งานได้
Shot ที่4	10		462	450	460	458	อุณหภูมิใช้งานได้
Shot ที่5	11		461	453	462	451	อุณหภูมิใช้งานได้

4.2 ผลการดำเนินงานตรวจสอบระหว่างการทำงานจริง

จากการทำแผ่นตรวจสอบการทำงานของชุดทำความร้อนให้กับหัวแม่พิมพ์พบว่าไม่มีปัญหาที่ส่งผลกับวัตถุดิบหรือไม่เกิดงานเสียเลยแต่ส่วนใหญ่จะเป็นการเสียในส่วนของข้อต่อลมของฐานรองซึ่งทำจากพลาสติกซึ่งใบตรวจสอบที่จัดทำขึ้นมามีรายละเอียดตามตารางที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจำเดือน _____ ปี ค.ศ. _____ ไลน์ผลิต _____ แผนก _____

วันที่และรายละเอียด	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
การทำอุณหภูมิได้ตามที่ตั้งไว้+5°C																				
อายุการใช้งานของขดทำความร้อน																				
การแตกร้าวบิดเบี้ยวของขดทำความร้อน																				
สภาพการต่อสายไฟกับชุดขดลวด																				
ชุดปรับตั้งอุณหภูมิ																				
สภาพทั้งหมดของชุดแผงควบคุม																				
การเคลื่อนที่ของฐานชุดทำความร้อน																				
จุดรอยต่อข้อต่อลมของจุดต่างๆ(รอยรั่ว)																				
ผู้ตรวจเช็ค																				
วันที่และรายละเอียด	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31									
การทำอุณหภูมิได้ตามที่ตั้งไว้+5°C																				
อายุการใช้งานของขดทำความร้อน																				
การแตกร้าวบิดเบี้ยวของขดทำความร้อน																				
สภาพการต่อสายไฟกับชุดขดลวด																				
ชุดปรับตั้งอุณหภูมิ																				
สภาพทั้งหมดของชุดแผงควบคุม																				
การเคลื่อนที่ของฐานชุดทำความร้อน																				
จุดรอยต่อข้อต่อลมของจุดต่างๆ(รอยรั่ว)																				
ผู้ตรวจเช็ค																				

รับทราบโดย

ตำแหน่ง

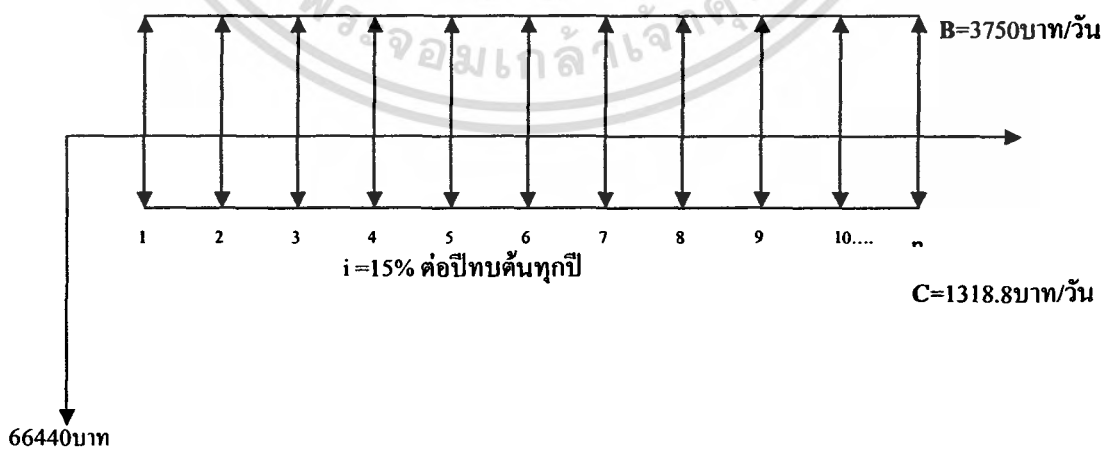
ตารางที่ 4.8 แผ่นตรวจสอบการทำงาน

4.3 การคำนวณหาจุดคุ้มทุน

ตารางที่ 4.9 รายการค่าใช้จ่ายวัสดุ

วัสดุ	ราคา/ชิ้น (บาท)	จำนวนชิ้น	รวมเป็นเงิน(บาท)
Stanlessteel 316 100 x Ø130	3500	1	3500
Hot Flex	7200	2	14400
ท่อลมยาง	40	4	160
กระบอกสูบ 10 bar x150mm	3500	2	7000
Thermocouple 3 mm	1200	2	2400
ข้อต่อ เซรามิค	150	4	600
สายไฟ 2.5	45	4	180
ชุดควบคุมการจ่ายลม (Solinoivalue)	750	8	6000
Bearing 33 x 20 mm	450	8	3600
Magnetic	4500	2	9000
Temp. Control	6700	2	13400
Bottom Switch	2500	2	5000
Lamp Alarm	150	2	300
หม้อแปลงไฟ 220V	450	2	900
		รวม	66440

การหาจุดคุ้มทุนและระยะเวลาในการคืนทุน



รูปที่ 4.7 แผนผังกระแสเงินสด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MARR = i% ต่อวันทบต้นทุกวัน

จากสูตร

$$y,y = (1 + i_{d,d})^{m} - 1 \quad (3\text{-}1)$$

$$0.15 = (1 + i_{d,d})^{360} - 1$$

$$i_{d,d} = 0.038\% \text{ ต่อวันทบต้นทุกวัน}$$

C คำนวณได้จาก

ค่าไฟฟ้า

$$V = ((WxT)/1000)\ x2\ x3 \quad (3\text{-}2)$$

V = (2200W x (24ชม.)/1000) x2 เครื่องx3 บาท/หน่วย

V = 316.8บาทต่อวัน

ค่าแรง

คนละ10000 บาท/เดือน มี 3 กะๆละ 1 คน = $\frac{30000}{30}$ = 1000 บาท/วัน

B คำนวณได้จาก

ชิ้นงานที่ลดได้ 7200 ชิ้น/เดือน

1 แท่งสามารถทำได้ 32 ชิ้น = $\frac{7200}{32}$ = 225 แท่ง/เดือน

1 แท่งราคา 500 บาท = 225x500 =112500 บาท/เดือน

คิดเป็นต่อวัน = $\frac{112500}{30}$ = 3750 บาท/วัน

หาจุดคุ้มทุนจากสูตร

$$NPW = 0 = -66440 + (B-C)(P/A,i\%,n) \quad (3\text{-}3)$$

$$0 = -66440 + 2433.2\left[\frac{1.0388^{n} - 1}{0.0388(1.0388)^{n}}\right]$$

$$27.305 = \left[\frac{1.0388^{n} - 1}{0.0388(1.0388)^{n}}\right]$$

$$1.059(1.0388)^{n} - 1.0388^{n} = -1$$

$$1.0388^{n}(1.059 - 1) = -1$$

$$1.0388^{n} = \frac{-1}{0.059}$$

$$n \ln 1.0388 = \ln 16.95$$

$$n = 74.35 \text{ วัน}$$

เพราะฉะนั้นจะได้จุดคุ้มทุนอยู่ที่ 75 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

แบ่งออกเป็นสามรุ่นด้วยกัน

รุ่นที่หนึ่ง ในส่วนของรุ่นที่หนึ่งนี้สามารถให้ความร้อนกับหัวแม่พิมพ์ได้แต่ประสิทธิภาพต่ำและอายุการใช้งานสั้นเนื่องจากขดลวดทำความร้อนที่ไม่มีประสิทธิภาพ

รุ่นที่สอง ในการใช้งานรุ่นที่สองนี้สามารถให้ความร้อนได้แต่เนื่องจากขนาดของชุดทำความร้อนที่ใหญ่เกินไปทำให้ใช้เวลานานกว่าที่จะส่งผ่านความร้อนไปถึงหัวแม่พิมพ์ทำให้ยังคงมีชิ้นงานเสียอยู่ประมาณ 2-3 ชิ้นอีกทั้งการออกแบบที่ให้ขดลวดทำความร้อนตัดผ่านกันทำให้เกิดความร้อนเกินที่สายหุ้มจะทนได้และขาดภายในเวลาสองอาทิตย์

รุ่นที่สาม เป็นรุ่นที่มีประสิทธิภาพการทำงานดีที่สุดจากการแก้ไขขนาดของชุดทำความร้อนและการวางตัวของขดลวดทำความร้อนส่งผลให้ชุดที่สามสามารถทำความร้อนได้ตามต้องการอีกทั้งมีอายุการที่ยาวนานซึ่งจนถึงปัจจุบันนับเป็นเวลา 5 เดือนชุดทำความร้อนก็ยังทำงานได้ตามปกติและยังสามารช่วยไม่ให้เกิดของเสียในสายการผลิตที่ทำการทดสอบชุดทำความร้อนให้กับแม่พิมพ์รวมถึงจากการคำนวณหาจุดคุ้มทุนแล้วซึ่งอยู่ที่ประมาณวันที่ 75 หลังจากใช้งานชุดทำความร้อนทำเป็นที่พอใจของบริษัทเป็นอย่างมาก

5.2 สรุปปัญหาจากการทดลอง

ปัญหาที่เกิดสามารถสรุปได้เป็นข้อๆ ดังนี้

1. ปัญหาจากข้อมูลที่เป็นความลับของบริษัทของบริษัท เช่น ค่าไฟ หรือต้นทุนของวัตถุดิบที่แน่นอน ทำให้ไม่สามารถคำนวณหาจุดคุ้มทุนที่แน่นอนได้
2. ปัญหาจากการออกแบบชุดทำความร้อนรุ่นที่สอง ที่ไม่สัมพันธ์กับหัวแม่พิมพ์ทำให้สูญเสียความร้อนไปทำให้ไม่สามารถทำความร้อนให้ได้ตามต้องการได้
3. ปัญหาการใช้ขดลวดทำความร้อนที่ไม่ถูกต้องทำให้ไม่สามารถทำความร้อนให้ถึงเป้าหมายได้
4. ปัญหาการออกแบบการวางตัวทับกันของขดลวดในรุ่นที่สองทำให้ขดลวดขาดภายในเวลา 2 อาทิตย์

5.3 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทำโครงงาน พบว่าปัญหาสวนใหญ่มาจากการออกแบบฉะนั้นถ้าเรามีการออกแบบที่ดีและได้มาตรฐานและสัมพันธ์กับทุกส่วนการทำงานแล้วจะไม่ต้องเสียเวลากลับมาแก้ไขใหม่อีกทั้งยังประหยัดค่าใช้จ่ายที่สูญเสียไปในรุ่นที่หนึ่งและรุ่นที่สอง แต่สุดท้ายแล้วเมื่อได้สร้างชุดทำความร้อนรุ่นที่สามมาและใช้งานเรื่อยมาทำให้สามารถลดของเสียในกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมากซึ่งเป็นที่น่าพอใจและตรงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

http://www.pea.co.th/rates/rates_tou_tod_ft.htm

ดร.บัญชา ธนบุญสมบัติ การออกแบบทางวิศวกรรม การเลือกใช้วัสดุและกรรมวิธีการผลิต พิมพ์ครั้งที่2 กรุงเทพฯ : ส.ส.ท., 2543

ดร.สกนธ์ คล่องบุญจิต เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม พิมพ์ครั้งที่1 กรุงเทพฯ: ส.จ.ล., 2549

ผศ.ดร.ฤดี มาสุจันท์ การควบคุมคุณภาพ พิมพ์ครั้งที่1 กรุงเทพฯ : ส.จ.ล., 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

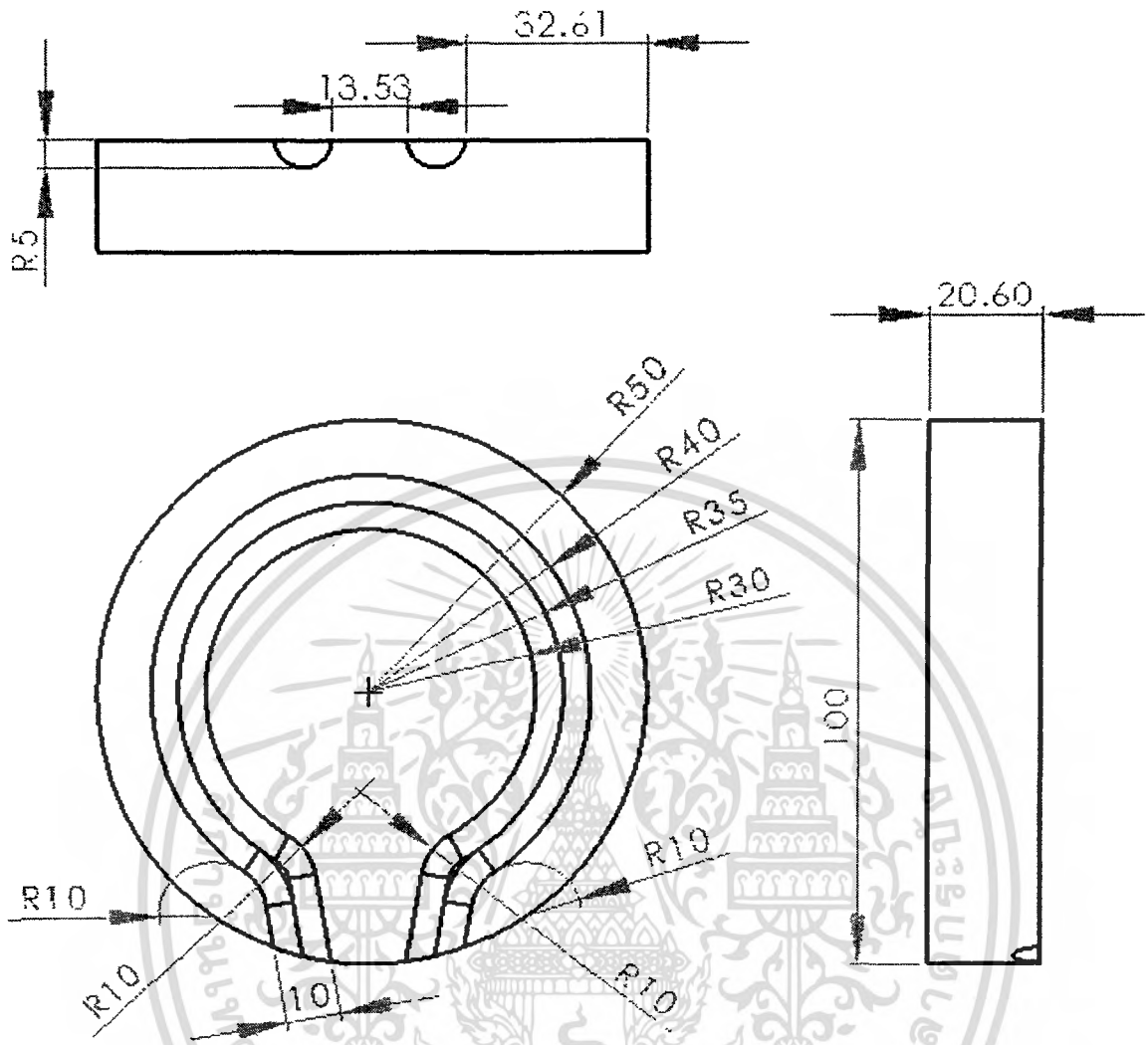
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบของชุดทำความร้อนให้กับแม่พิมพ์ รุ่นที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 ชุดทำความร้อนให้กับแม่พิมพ์ รุ่นที่ 1

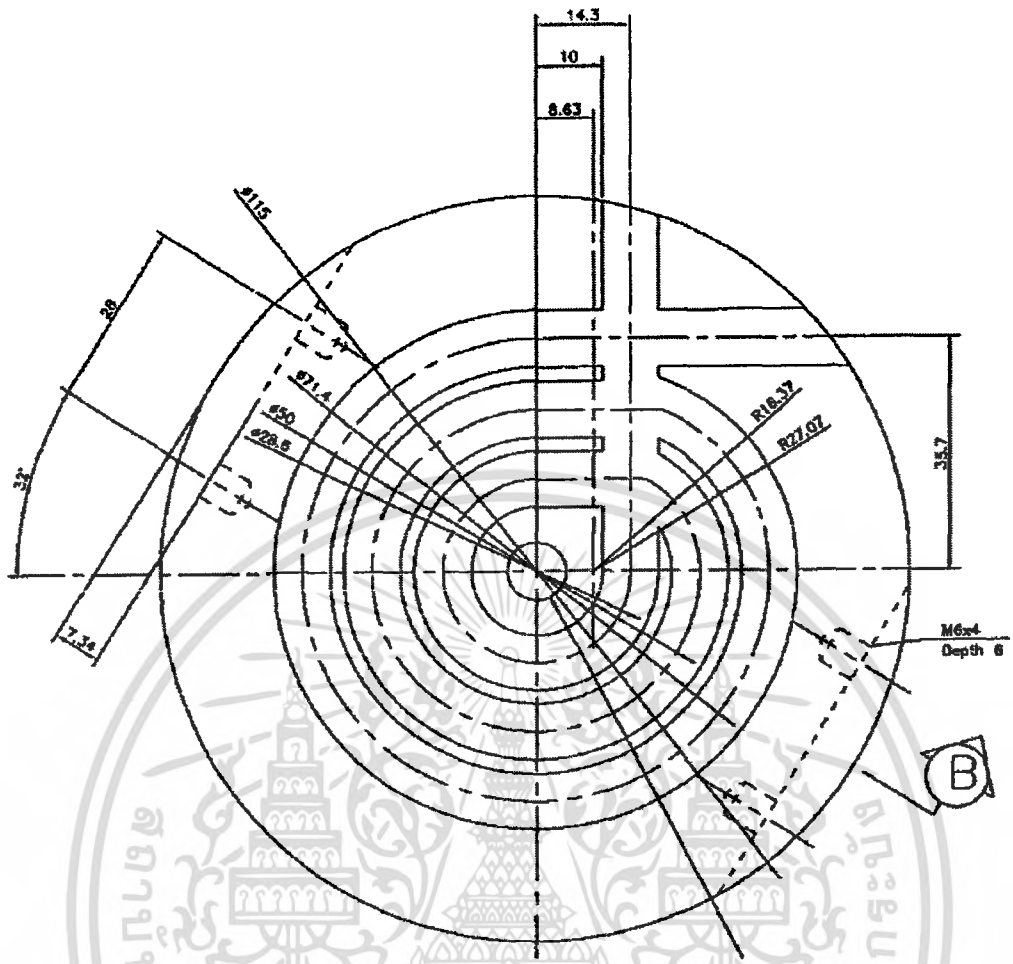
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบของชุดทำความร้อนให้กับแม่พิมพ์ รุ่นที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 ชุดทำความร้อนให้กับแม่พิมพ์ รุ่นที่ 2

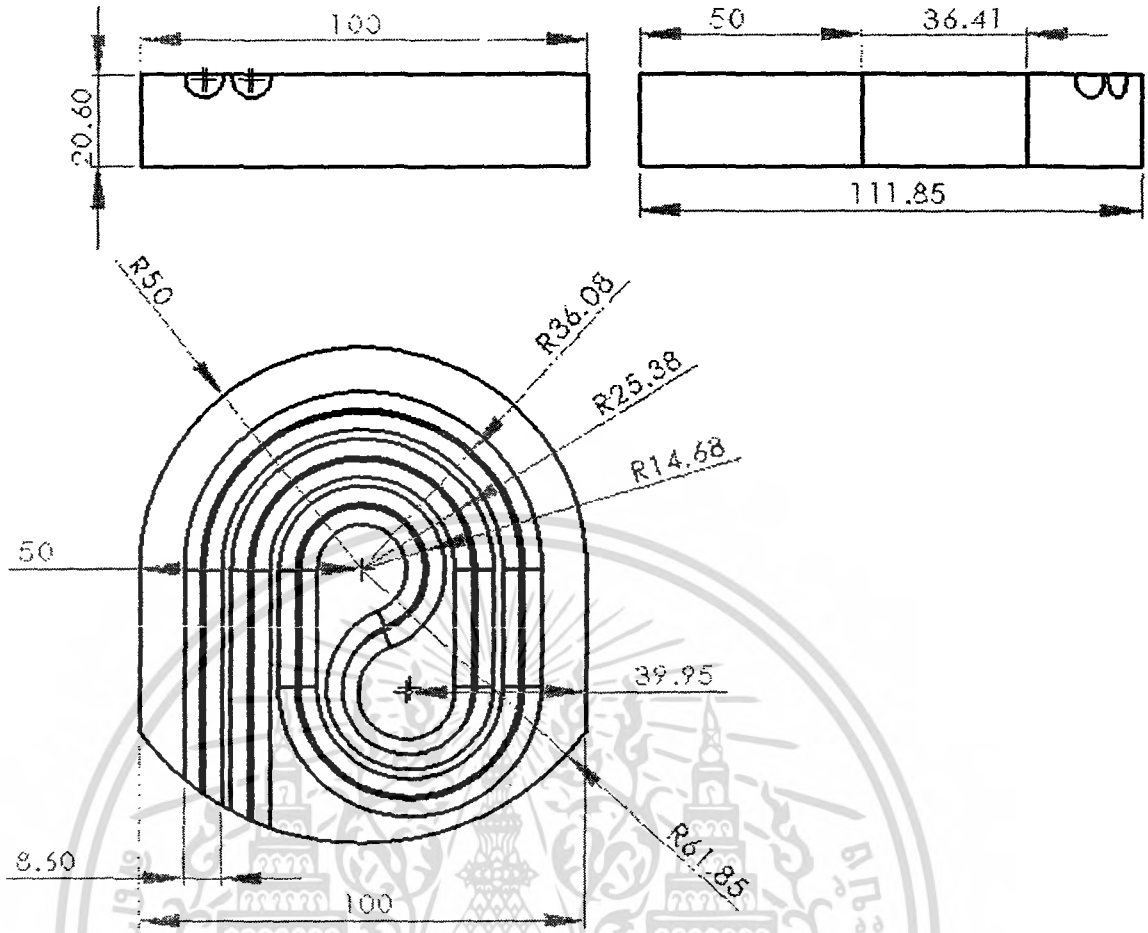
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบของชุดทำความร้อนให้กับแม่พิมพ์ รุ่นที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 ชุดทำความร้อนให้กับแม่พิมพ์ รุ่นที่ 3

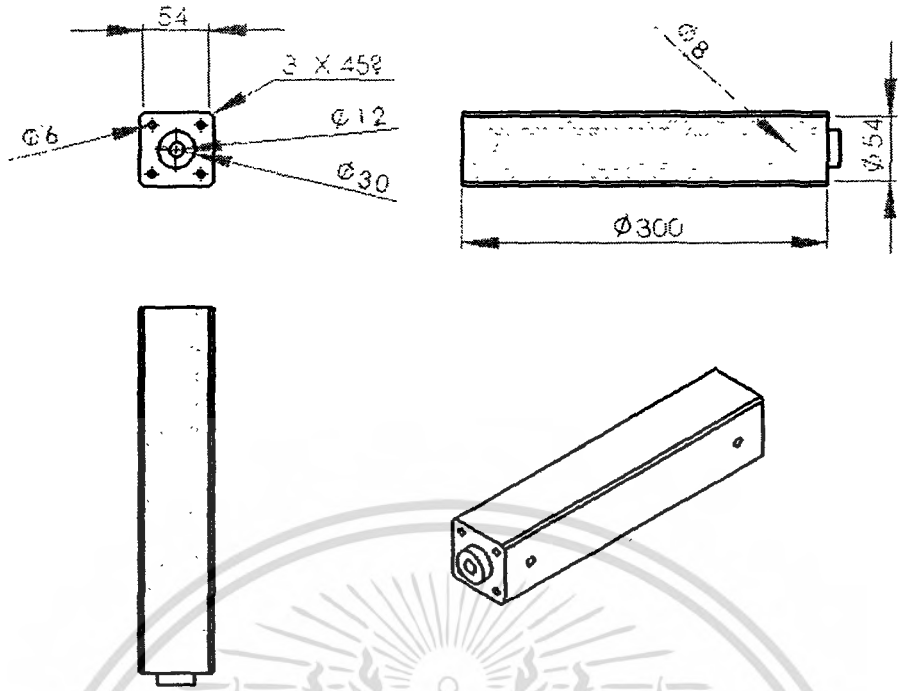
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

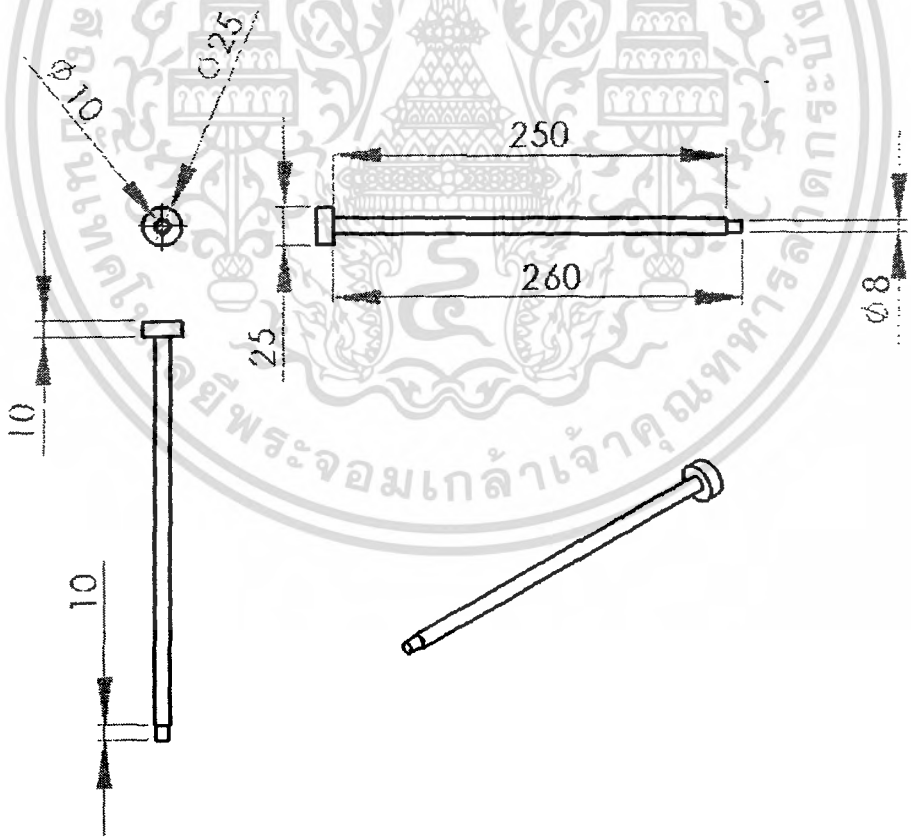
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบของชุดฐานรองทำความร้อนให้กับแม่พิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

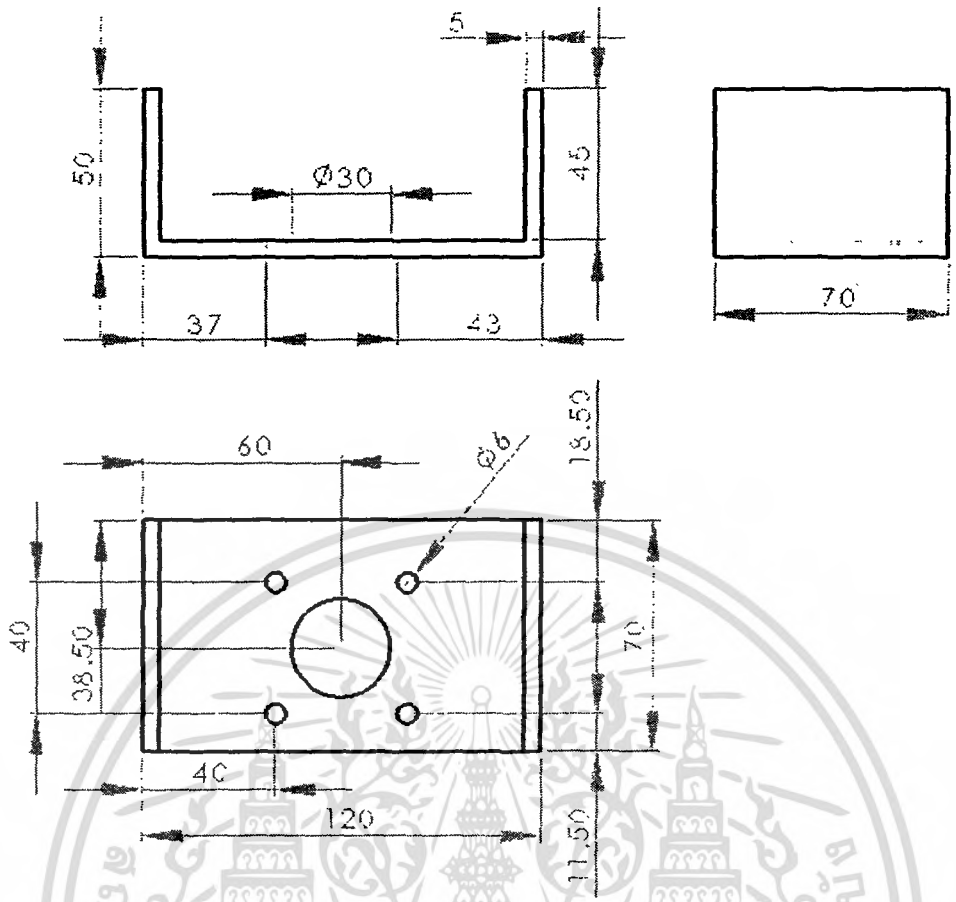


รูปที่ 1 กระบอกสูบ

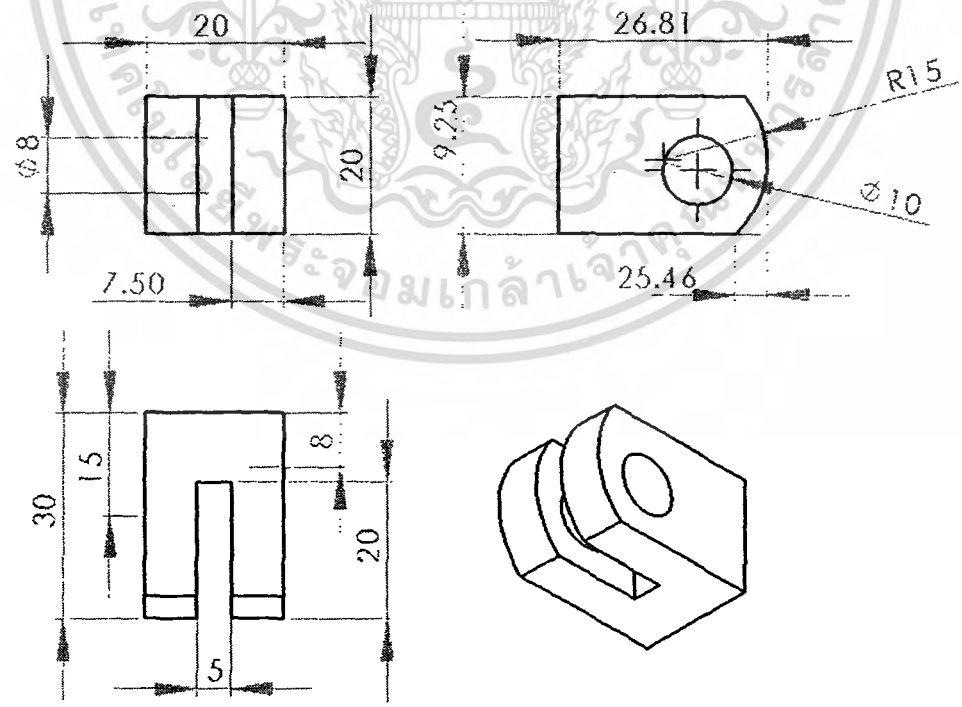


รูปที่ 2 แกนกระบอกสูบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

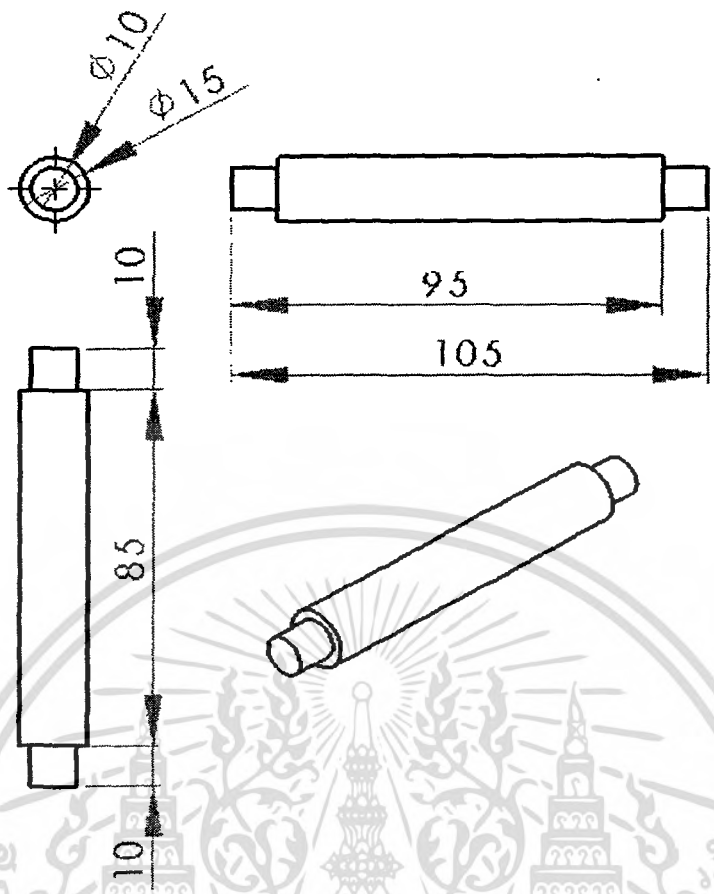


รูปที่ 3 ข้อต่อ

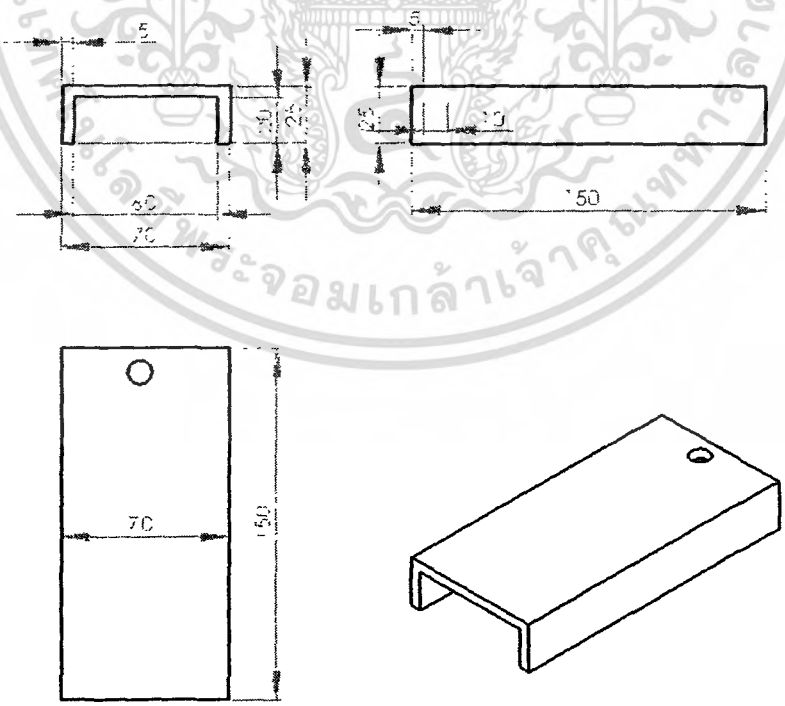


รูปที่ 4 ข้อต่อยึดกระบอกสูบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

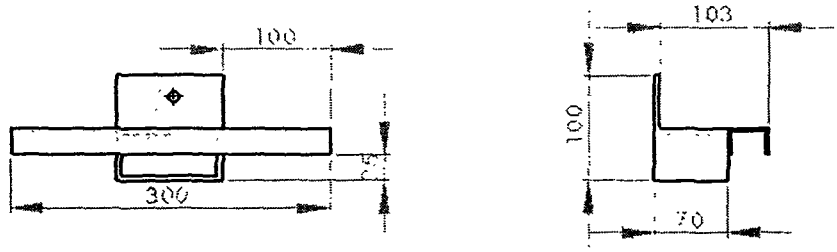


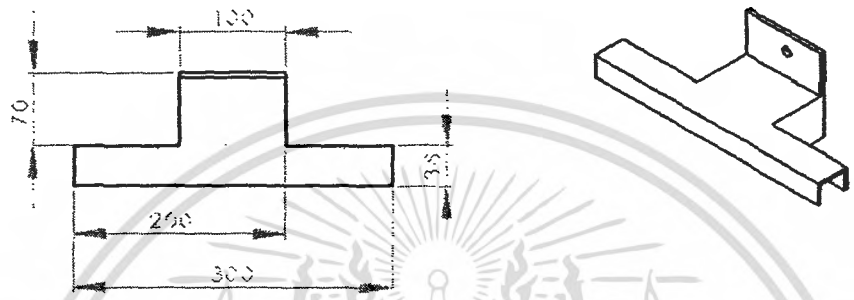
รูปที่ 5 แกนล้อ



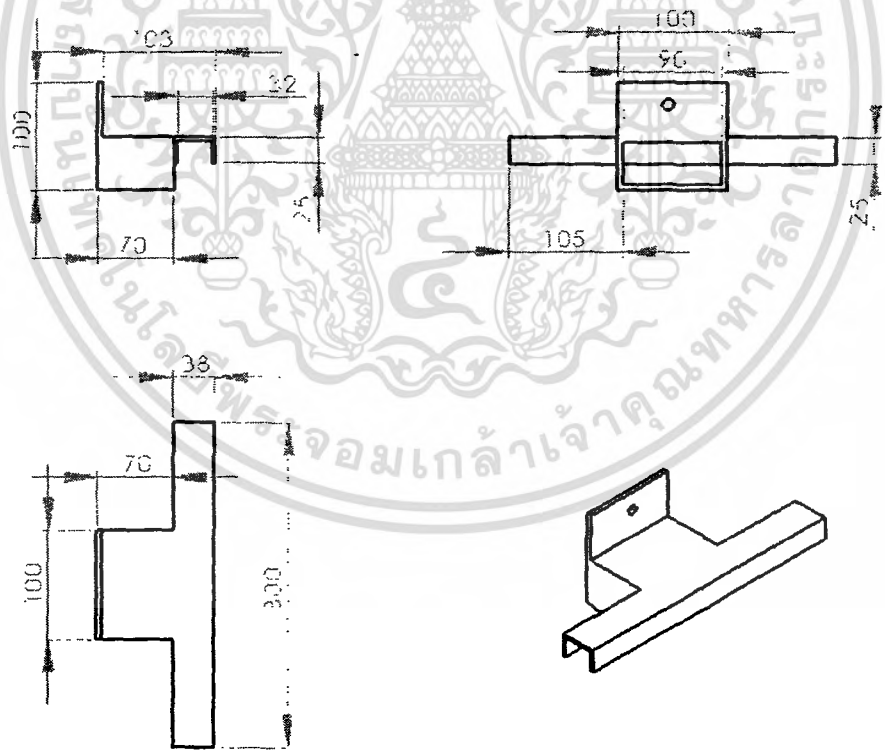
รูปที่ 6 ฐานประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



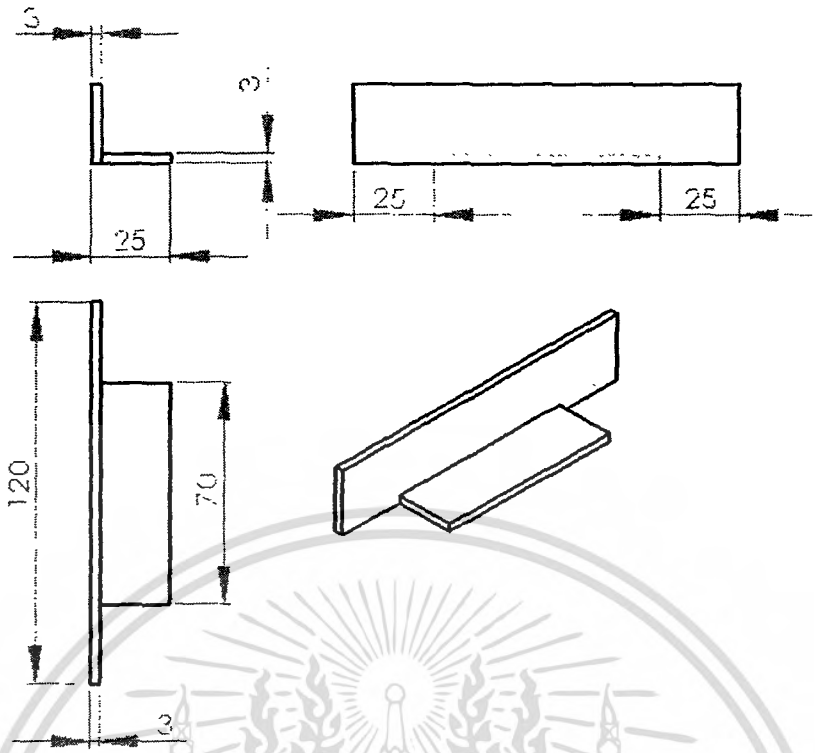


รูปที่ 7 ฐานรองด้านขวา

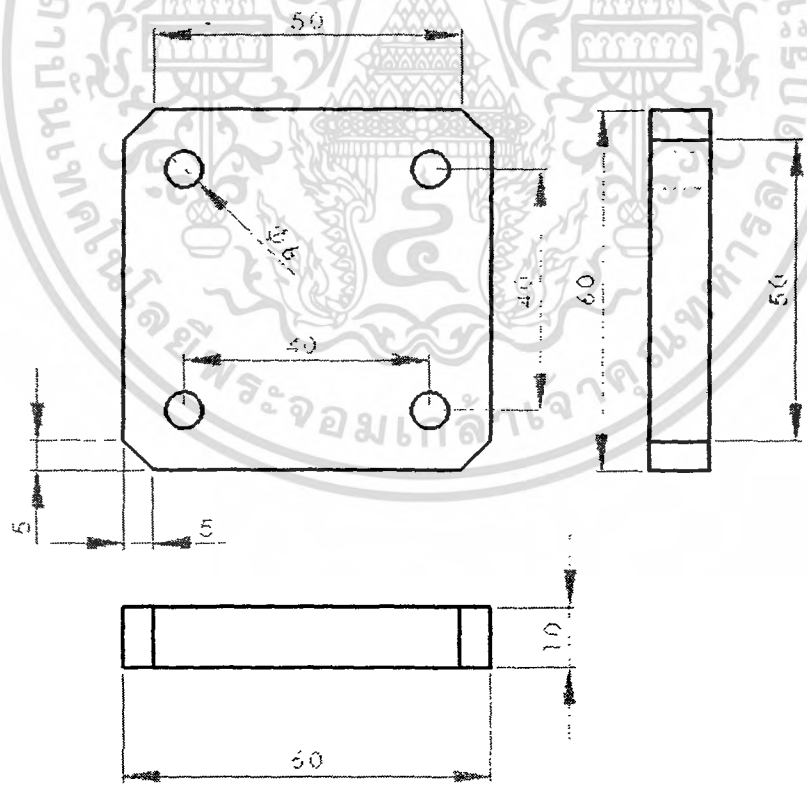


รูปที่ 8 ฐานรองด้านซ้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

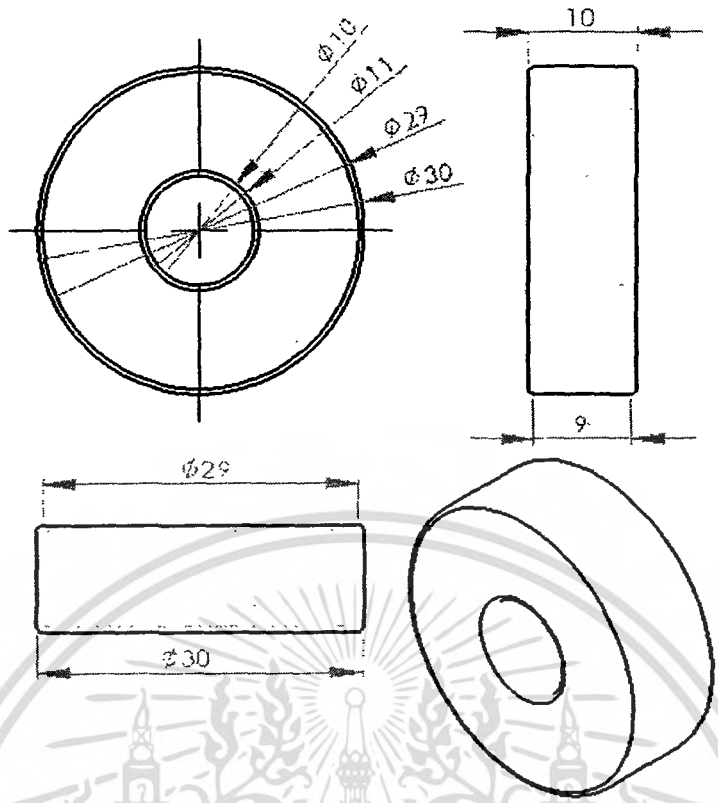


รูปที่ 9 ตั้งกัน

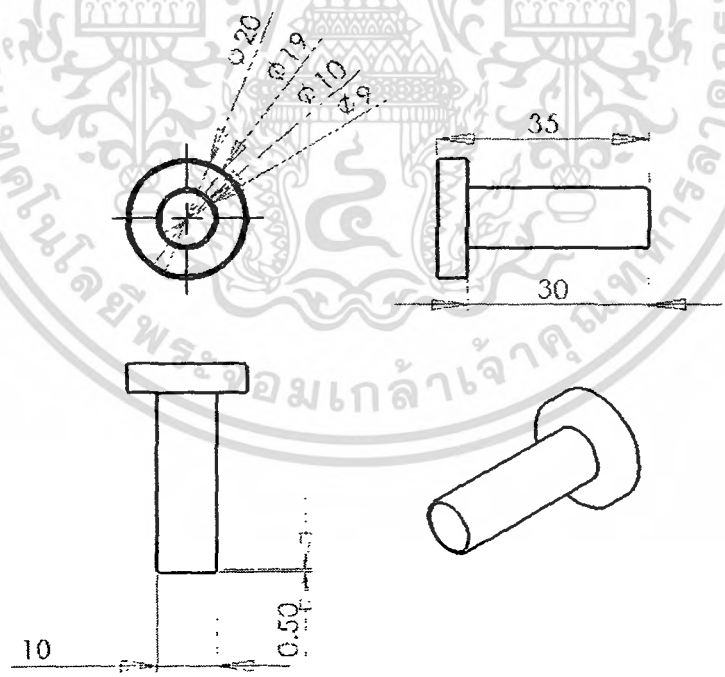


รูปที่ 10 แผ่นปิดกระบอกสูบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

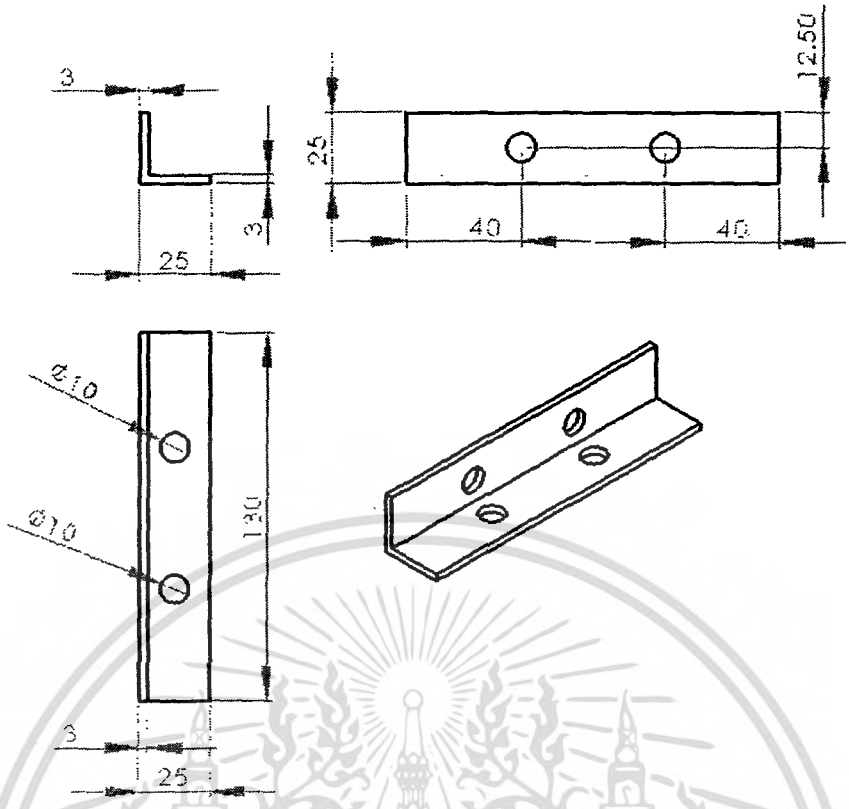


รูปที่ 11 ล้อ

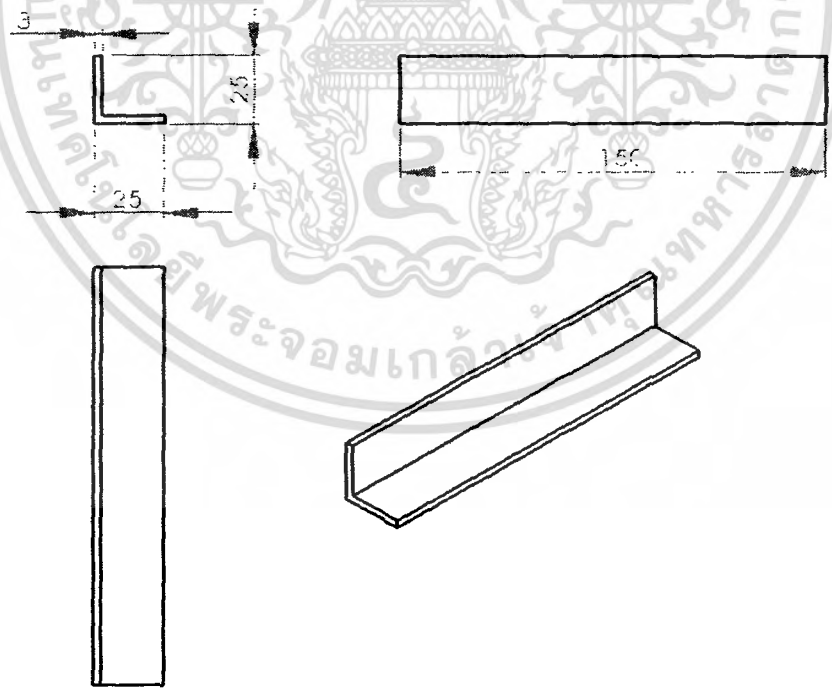


รูปที่ 12 สลักยึด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

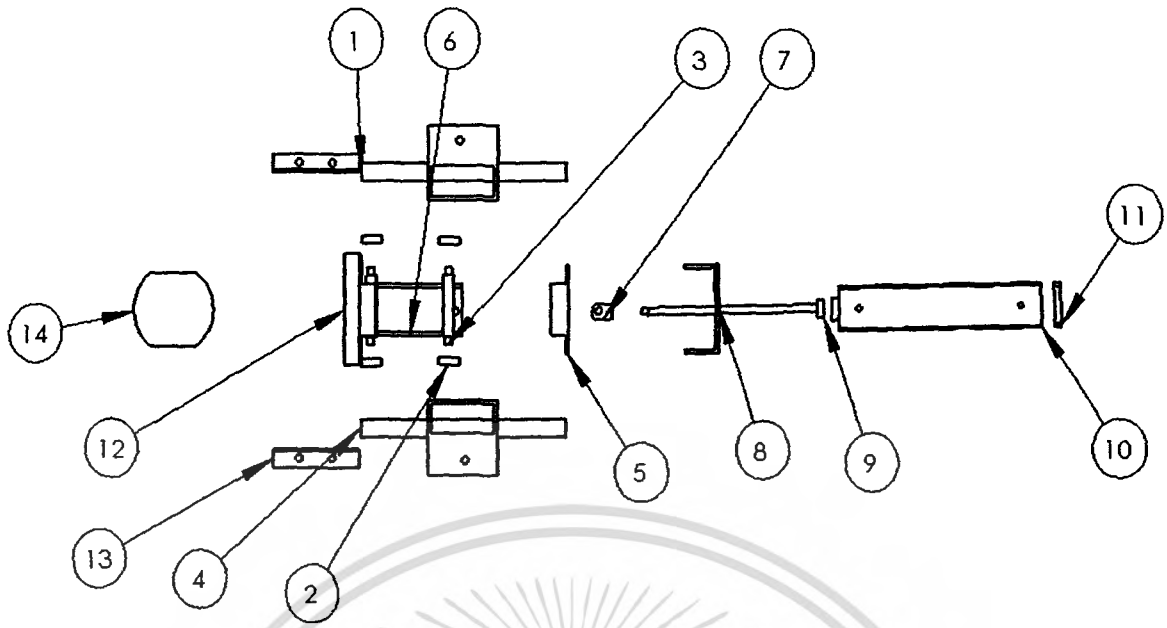


รูปที่ 13 เหล็กฉาก 1



รูปที่ 14 เหล็กฉาก 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 15 รูปแสดงตำแหน่งชิ้นส่วนฐานรอง ชุด Hot set

ตารางที่ 1 ตารางแสดง ส่วนประกอบฐานรอง ชุด Hot set

เลขชิ้นส่วน	ชื่อชิ้นส่วน	จำนวน
1	ฐานรองด้านซ้าย	1
2	ล้อ	4
3	แกนล้อ	2
4	ฐานรองด้านขวา	1
5	ตัวกั้น	1
6	ฐานประกอบ	1
7	ข้อต่อยึดกระบอกสูบ	1
8	ข้อต่อ	1
9	แกนกระบอกสูบ	1
10	กระบอกสูบ	1
11	แผ่นปิดกระบอกสูบ	1
12	เหล็กฉาก 2	1
13	เหล็กฉาก 1	2
14	ชุด Hotset	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้