หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. ทฤษฎีเกี่ยวกับการควบคุมคุณภาพ

<u>การจัดการระบบควบคุมคุณภาพ</u>

วัตถุประสงค์ในการจัดการระบบคุณภาพ คือ การผลิตสินค้าที่มีคุณภาพหรือคุณสมบัติตรงตามที่ลูกค้าต้องการอย่างสม่ำเสมอ โดยอยู่ภายใต้ต้นทุนและเวลาที่เหมาะสมตามแนวทางการบริหารงานสมัยใหม่ที่สร้างความพึงพอใจให้กับลูกค้า นั่นคือ การมอบคุณภาพของสินค้าให้แก่ลูกค้า ดังนั้นไม่ว่าธุรกิจหรืออุตสาหกรรมใดจึงให้ความสำคัญต่อกิจกรรมการจัดการระบบควบคุมคุณภาพ

<u>การควบคุมคุณภาพ</u>

ในส่วนของการควบคุมคุณภาพ เป็นส่วนของการวางแผนและควบคุมการดำเนินการเพราะกระบวนการผลิตสินค้าใด ๆ ส่วนประกอบสำคัญที่ทำให้เกิดผลผลิตที่ดีจะประกอบไปด้วย คน เครื่องจักร วัตถุดิบ และวิธีการ กล่าวคือ ถ้าส่วนประกอบทั้งสี่ไม่เกิดข้อบกพร่อง สินค้าที่ผลิตออกมาจะอยู่ในระดับถูกต้องตรงตามมาตรฐาน แต่ในความเป็นจริงแล้วในกระบวนการผลิตมักเกิดความผันแปรอยู่เสมอ เป็นผลให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ไม่คงที่ จึงจำเป็นที่จะต้องหาวิธีการใช้ในการควบคุมคุณภาพของสินค้า

สำหรับนิยามของการควบคุมคุณภาพ กล่าวว่า "การควบคุมคุณภาพ คือการบริหารงานในด้านการควบคุมวัตถุดิบ และการควบคุมการผลิต เพื่อเป็นการป้องกันมิให้ผลิตภัณฑ์ที่สำเร็จออกมามีข้อบกพร่องและเสียหายได้" จะเห็นว่าการควบคุมคุณภาพจะต้องจัดรูปแบบการบริหารในการป้องกัน ค้นหาและแก้ไขข้อบกพร่องซึ่งจะนำไปสู่การผลิตที่ไม่ดี ดังนั้นการควบคุมคุณภาพจะต้องเริ่มต้นด้วยการกำหนดมาตรฐานคุณภาพและวิธีการวัดคุณภาพขึ้นมาก่อน ซึ่งตัวคุณภาพหมายถึง การกำหนดขนาด คุณสมบัติทางเคมี ทางกล ความสวยงาม เป็นต้น

และเนื่องจากระบบการผลิตได้แบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ วัตถุดิบ กระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป การควบคุมคุณภาพในระบบการผลิตจึงต้องควบคุมทั้ง 3 ส่วนดังกล่าว

มาตรการในการควบคุมคุณภาพในระบบการผลิต แบ่งออกเป็น 2 มาตรการ คือ

1. มาตรการที่ต้องทำเป็นประจำในกระบวนการผลิต

เป็นมาตรการที่ทำเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพตรงตามที่ต้องการ คุณสมบัติสม่ำเสมอ โดยมีของเสียน้อยที่สุด ได้แก่

1.1 การควบคุมวัตถุดิบ

1.2 การควบคุมกระบวนการขั้นตอนการผลิต

1.3 การตรวจสอบผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป

2. มาตรการเพื่อการปรับปรุงหรือการพัฒนา

เป็นมาตรการที่ทำเพื่อการปรับปรุงหรือพัฒนาผลิตภัณฑ์ไม่ให้มีของเสียหรือลดปริมาณของเสีย ได้แก่

2.1 การจัดเก็บสถิติการผลิต ข้อมูลปัญหาต่าง ๆ เพื่อเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ปัญหา

2.2 การวิเคราะห์หาต้นเหตุของปัญหา และกำหนดวิธีการแก้ไขและป้องกันต่อไป

เครื่องมือสำหรับระบบคุณภาพ

แนวทางปฏิบัติของการสร้างระบบคุณภาพ เพื่อให้บรรลุผลสำเร็จตามจุดมุ่งหมายนั้น จำเป็นต้องมีการวางแผนและกำหนดเป้าหมายไว้อย่างชัดเจน ทั้งนี้โดยอาศัยการเก็บรวบรวมข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูลอย่างถูกต้อง จึงจะทำให้เข้าใจถึงสถานภาพการดำเนินงานของแต่ละกระบวนการได้อย่างแท้จริง เพื่อสามารถนำมาประยุกต์ให้ระบบบริหารคุณภาพมีความสอดคล้องและเหมาะสมกับการดำเนินงานตามสภาพที่เป็นจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ การใช้เครื่องมือที่เป็นเทคนิค วิธีการ ผัง แผนภูมิ ตาราง และอื่น ๆ จะช่วยในการค้นหาข้อเท็จจริง การรวบรวมและจัดการกับข้อมูลให้มีประสิทธิภาพ การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของเหตุและผลรวมถึงการตัดสินใจ ดังนี้

1. ใบตรวจสอบ (Check Sheets)

ใบตรวจสอบเป็นเอกสารที่อยู่ในรูปของตาราง แบบฟอร์ม หรือแผนภาพใดๆ ที่ออกแบบให้มีลักษณะง่ายต่อการจดบันทึกข้อมูล การจำแนกข้อมูลและการวิเคราะห์ผลหรืออาจจะมีลักษณะเป็นตารางแสดงรายละเอียดต่าง ๆ ที่ต้องการตรวจสอบไว้พร้อมแล้ว สามารถนำไปใช้งานโดยไม่ต้องใส่รายละเอียดใหม่ เพียงแต่กาเครื่องหมายลงไปในช่องที่ตรงกับรายละเอียดที่จัดไว้เท่านั้น โดยมีวัตถุประสงค์ที่สำคัญ 2 ประการ คือ

1. สามารถเก็บข้อมูลได้ง่ายและถูกต้อง
2. สามารถมองดูเข้าใจง่าย และนำไปใช้ประโยชน์ต่อได้ง่าย

อีกทั้งยังเป็นเครื่องมือที่ถูกนำมาใช้เพื่อบันทึกเก็บรวบรวมข้อมูลว่าตรวจสอบพบจุดบกพร่องเป็นเท่าไรอย่างไร หรือเพื่อใช้ตรวจสอบตามหัวข้อที่กำหนดไว้ให้ตรวจสอบล่วงหน้า ดังนั้นจึงควรออกแบบแผ่นตรวจสอบให้สอดคล้องกับจุดมุ่งหมายของการเก็บรวบรวมข้อมูลและลักษณะของข้อมูลให้ชัดเจน ควรลำดับหัวข้อการตรวจสอบให้สอดคล้องกับการทำงาน นอกจากนี้ควรระบุที่มาหรือภูมิหลังของข้อมูลในใบตรวจสอบ เช่น ชื่อผลิตภัณฑ์ ขั้นตอนการผลิต วันเวลา และชื่อผู้ตรวจสอบ เป็นต้น

สรุปใบตรวจสอบมี 2 ประเภทใหญ่ ๆ ตามลักษณะการใช้งาน คือ

1. ใช้บันทึก
2. ใช้ตรวจสอบยืนยัน

2. ผังพาเรโต (Pareto Diagrams)

ผลของปัญหาด้านคุณภาพการผลิต จะปรากฏออกมาในรูปของความสูญเสีย (Loss) ซึ่งคำนวณได้จากจำนวนชิ้นของเสียคูณด้วยราคาต้นทุนต่อชิ้น และของเสียแต่ละชิ้นจะมีจุดบกพร่องที่ต่างกันออกไป และอาจมาจากสาเหตุ (Cause) จำนวนมากมายในสายการผลิตหนึ่ง ๆ แต่หากวิเคราะห์ลึกลงไปกลับพบว่าจุดบกพร่องเพียงไม่กี่ชนิดทำให้เกิดความสูญเสียมากมาย ขณะที่ความสูญเสียเล็ก ๆ น้อย ๆ ที่เหลือนั้นมีสาเหตุจากจุดบกพร่องหลายชนิดมาก จึงมีคำกล่าวเรียกชนิดของจุดบกพร่อง 2 ประเภทนี้ว่า

1. ประเภทน้อยชนิดแต่มีผลมาก (The Vital Few)
2. ประเภทมากชนิดแต่มีผลน้อย (The Trivial Many)

ดร.จูรัน (Dr.J.M.Juran) ชาวอเมริกันก็ได้นำเอาหลักการของพาเรโตนี้มาใช้ในวิชาการควบคุมคุณภาพเพื่อแสดงให้เห็นว่า สาเหตุ ความบกพร่องเพียงไม่กี่สาเหตุกลับก่อความสูญเสียให้มากมาย ขณะที่ความสูญเสียเล็ก ๆ น้อย ๆ ที่เหลือนั้น กลับมาจากสาเหตุจำนวนมากมาย และได้เรียกวิธีการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุของความบกพร่องกับมูลค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นนี้ว่า การวิเคราะห์แบบพาเรโต (Pareto Analysis) และเรียกรูปวาดหรือแผนภูมิที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ว่า ผังพาเรโต (Pareto Diagram)

2.1 ขั้นตอนการสร้างผังพาเรโต

ขั้นที่ 1 : ตัดสินว่าจะลงมือศึกษาปัญหาอะไร และต้องการเก็บข้อมูลชนิดใดโดย

1. ตกลงว่าจะลงมือศึกษาปัญหาชนิดใด

2. ตัดสินใจว่าข้อมูลชนิดใดที่จำเป็นต้องรวบรวมพร้อมวิธีการจำแนกประเภทของข้อมูลเหล่านั้น
3. กำหนดวิธีการเก็บข้อมูล และช่วงเวลาที่จะทำการเก็บข้อมูล

ขั้นที่ 2 : ออกแบบแผ่นบันทึกความบ่อยของข้อมูลที่ตรวจพบ (Data Tally Sheet) (ดูตารางที่ 2.1)

ตารางที่ 2.1 แผ่นบันทึกความบ่อยของข้อมูลที่ตรวจพบ

รหัส	ชนิดของความบกพร่อง	จำนวนที่ตรวจพบ	รวม
A	รอยแตก	𝍸 𝍸	10
B	รอยข่วน	𝍸 𝍸 𝍸 𝍸 ..... 𝍸 //	42
C	คราบสกปรก	𝍸 /	6
D	รอยย่น	𝍸 𝍸 𝍸 𝍸 ..... 𝍸 ////	104
E	ช่องว่าง	////	4
F	รูเข็ม	𝍸 //// 𝍸 ////	20
G	อื่น ๆ	𝍸 𝍸 𝍸	14
			200

ตารางที่ 2.2 ใบสรุปข้อมูลสำหรับผังพาเรโต

รหัส	a	b	c	d	e
	ชนิดของความบกพร่อง	จำนวนจุดบกพร่อง	จำนวนจุดบกพร่องสะสม	% เทียบกับค่ารวม	% สะสม
D	รอยย่น	104	104	52	52
B	รอยข่วน	42	146	21	73
F	รูเข็ม	20	166	10	83
A	รอยแตก	10	176	5	88
C	คราบสกปรก	6	182	3	91
E	ช่องว่าง	4	186	2	93
G	อื่น ๆ	14	200	7	100
รวม		200	-	100	-

ขั้นที่ 3 : ไปทำการตรวจสอบแล้วเติมข้อมูลลงในแผ่นบันทึกความบ่อยของข้อมูลที่ตรวจพบ แล้วคำนวณหายอดรวมของแต่ละรายการ

ขั้นที่ 4 : นำตัวเลขที่บวกรวมได้จากแผ่นบันทึกในขั้นที่ 3 ไปใส่ลงในใบสรุปข้อมูลสำหรับผังพาเรโต (Data Sheet for Pareto Diagram) (ดูตารางที่ 2.2)

ขั้นที่ 5 : นำข้อมูลจากตารางที่ 2.1 มากรอกลงในตารางที่ 2.2 โดยต้องเรียงรายการชนิดของความบกพร่องใหม่ โดยเรียงจากรายการที่ตรวจพบจำนวนจุดบกพร่องมากที่สุดก่อนแล้วมากรอกตามลำดับลงมาจากมากที่สุดไปน้อยที่สุด ยกเว้นรายการอื่น ๆ ให้เอาไว้ท้ายที่สุดเสมอ

ขั้นที่ 6 : เขียนกรอบของแผ่นกราฟโดยมีแกนตั้ง 2 แกน แกนนอน 1 แกน

ขั้นที่ 7 : เขียนแผนภูมิหรือกราฟแท่งโดยเริ่มทีละแท่งตามลำดับจากซ้ายมาขวา โดยเอาข้อมูลจาก ตารางที่ 2.2 มาใช้

ขั้นที่ 8 : เขียนเส้นกราฟพาเรโตโดย

1. กำหนดจุดจำนวนจุดบกพร่องสะสมจากคอลัมน์ (C) ในตาราง 2.2 (โดยเล็งแนวลงจุดจากเส้นขวามือของแต่ละแท่งกราฟ)
2. ลากเส้นตรงเป็นเส้นหนักเชื่อมจุดต่าง ๆ ในข้อ 1

ขั้นที่ 9 : เติมข้อความต่าง ๆ เพื่ออธิบายข้อมูลที่จำเป็นต้องลงให้ครบ

1. ข้อมูลแสดงที่มา ชื่อผู้วาด ชื่อผัง
2. ข้อมูลแสดงเกี่ยวกับการประมูล เช่น ระยะเวลาการตรวจสอบ จุดสถานที่ที่มาของข้อมูล จำนวนข้อมูลที่เก็บมา เป็นต้น

ตามที่ทราบแล้วว่า ผังพาเรโตใช้เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างต้นเหตุและผลที่ตรวจพบโดยแยกประเภท/ชนิดของต้นเหตุ และเรียงลำดับตามความสำคัญของผลกระทบที่เกิดจากแต่ละต้นเหตุนั้น ๆ อาจแบ่งผังพาเรโตออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. ผังพาเรโตจากปรากฏการณ์ (หรือผลของปัญหา)

ผังชนิดนี้เขียนขึ้นจากการตรวจสอบหาประเภทต่าง ๆ ของปรากฏการณ์ความบกพร่องต่าง ๆ ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่พึงปรารถนาเพื่อการค้นหาสาเหตุต่อไป อาทิ

1.1 ด้านคุณภาพ : จุดบกพร่อง ความผิดพลาด ความล้มเหลว ข้อร้องเรียน จำนวนของตีคืนและจำนวนของซ่อม

1.2 ด้านต้นทุน : ค่าใช้จ่ายส่วนเพิ่ม และมูลค่าความสูญเสียในแต่ละรายการ

1.3 ด้านการจัดส่ง : ความล่าช้าในการส่ง การส่งผิด และสต็อกขาดมือ

1.4 ด้านความปลอดภัย : จำนวนอุบัติเหตุแยกตามลักษณะการบาดเจ็บ ความเสียหายชำรุดของวัตถุ และเครื่องจักรกล

2. ผังพาเรโตจากสาเหตุแห่งปัญหา

ผังชนิดนี้จะพบมากในการผลิต ใช้บอกที่มา สถานที่เกิด หรือจุดที่เป็นต้นตอของความบกพร่องใด ๆ ที่เกิดขึ้นพร้อมทั้งตรวจพบ

2.1 ข้อสังเกตเกี่ยวกับผังพาเรโต (Note on Pareto Diagrams)

2.1.1 ข้อสังเกตในการสร้างผังพาเรโต

2.1.1.1 จากปัญหาเดียวกัน ควรเขียนผังพาเรโตหลาย ๆ แบบ โดยแยกตามชนิดของข้อมูล จากการทำเช่นนี้จะพบข้อมูลหรือข้อเท็จจริงบางอย่างที่ซ่อนเร้นอยู่ จะช่วยให้การค้นหาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหามีความกระจ่างมากขึ้น

2.1.1.2 กรณีแบ่งประเภทหรือชนิดของสาเหตุแล้ว กลับพบว่าในช่องสาเหตุอื่น ๆ กลับมีเปอร์เซ็นต์สูง (เช่น มากกว่า 10%) แสดงว่าสาเหตุอื่น ๆ ที่อ้างนั้นยังแยกออกมาไม่ดี เพราะอาจมีสาเหตุบางตัวที่ถูกนับรวมในกลุ่มสาเหตุอื่น ๆ นี้ทำให้ผลการวิเคราะห์คลาดเคลื่อนได้ ควรทำการจำแนกใหม่เพื่อให้เปอร์เซ็นต์ในกลุ่มอื่น ๆ ลดลง

2.1.1.3 หากว่ามูลค่าทางการเงินสามารถกำหนดลงไปได้ในข้อมูลนั้น ก็ควรเขียนไว้บนกราฟแกนตั้ง ต้องให้เห็นได้ชัดเจน เพราะในที่สุดแล้วความสูญเสียหรือผลการปฏิบัติงานย่อมวัดออกมาเป็นตัวเงินเสมอ

2.1.2 ข้อสังเกตในการใช้ผังพาเรโต

2.1.2.1 แก้ไขสาเหตุนั้นไปเลย แม้ว่าผลของสาเหตุนั้นอาจไม่สำคัญมากนักก็ตาม การใช้ผังพาเรโตก็เพื่อจำแนก พร้อมทั้งชี้ให้เห็นชัดเจนขึ้นว่าสาเหตุหลัก ๆ ของปัญหาคืออะไร การแก้ปัญหาคืออะไร การแก้ปัญหาแต่ละสาเหตุที่เห็นแจ้งชัดเจนจะเป็นการเสริมทักษะในการเป็นนักแก้ปัญหาต่อไป

2.1.2.2 อย่าละเลยที่จะเขียนผังพาเรโตจากสาเหตุ หลังจากได้เขียนผังพาเรโตจากปรากฏการณ์แล้ว ทั้งนี้เพราะว่าการเขียนเช่นนี้จะช่วยให้มองเห็นภาพการเกิดความบกพร่องได้ ชัดเจนกว่า ผลคือการนำไปสู่การแก้ไขความบกพร่อง

3. กราฟ (Graph)

กราฟคือเครื่องมือในการถ่ายทอดข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลที่ดีเยี่ยมที่สุด โดยมีลักษณะพิเศษดังนี้ คือ

- เขียนง่าย
- เข้าใจง่าย และอ่านข้อมูลได้รวดเร็วขึ้น
- เปรียบเทียบข้อมูลแต่ละข้อมูลได้ชัดเจน

- เป็นแนวทางไปสู่การวิเคราะห์ขั้นสูงต่อไป

ในจำนวน QC เทคนิคทั้งหมด ตัวที่ง่ายที่สุดและเป็นที่คุ้นเคยมากที่สุด มีโอกาสได้เห็นและได้ใช้เกือบทุกวัน ก็คือกราฟนั่นเอง

ข้อมูลทุกประเภทสามารถเสนอในรูปกราฟได้ โดยมีวัตถุประสงค์หลัก 4 ประการ คือ

1. ใช้วิเคราะห์ข้อมูล กราฟจะแสดงความหมายของตัวเลขออกมาและสามารถชี้ให้เห็นข้อเท็จจริง ซึ่งอาจมองข้ามไปได้หากดูจากตัวเลขโดยตรง ดังนั้นกราฟจึงมีประโยชน์มากในการวิเคราะห์สภาพของข้อมูลในอดีตและปัจจุบัน เพื่อขุดค้นหาสาเหตุและมาตรการในการแก้ไขปรับปรุง
2. ใช้อธิบาย กราฟช่วยให้สามารถอธิบายหรือชี้แจงเรื่องราวหรือเหตุการณ์ให้แก่ผู้อื่นเข้าใจได้ง่ายดีกว่าการอธิบายโดยใช้ข้อมูลหรือตัวเลขโดยตรง
3. ใช้ควบคุม กราฟที่เขียนแสดงอัตราการหยุดงานหรือของเสียตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งทำให้กราฟเป็นอุปกรณ์สำคัญในการควบคุมงานต่าง ๆ ได้ ทั้งในด้านกระบวนการผลิตและการควบคุมกำหนดการต่าง ๆ ด้วย
4. ใช้บันทึก ข้อมูลที่เก็บได้ สามารถบันทึกลงเป็นกราฟได้เลย และเมื่อต้องการใช้ สามารถดูจากกราฟได้ทันที

<u>ประโยชน์ของกราฟ</u>

1. สามารถยึดกุมสภาพปัญหาในปัจจุบันและจุดของปัญหาได้ โดยการแสดงสภาพปัญหาด้วยกราฟเส้นตรง จะทำให้สามารถเข้าถึงสภาพปัญหาในปัจจุบันได้ เพื่อที่จะพิจารณาดูว่ามาตรฐานที่เป็นอยู่ในปัจจุบันดีแล้วหรือไม่ว่า จำเป็นต้องมีกิจกรรมปรับปรุงเพื่อยกระดับมาตรฐานที่เป็นอยู่ให้สูงขึ้น
2. ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหามาตรการปรับปรุงแก้ไข ในสถานประกอบการจะมีปัญหาต่าง ๆ มากมายเป็นต้นว่า "อุณหภูมิลดลง" "สินค้าด้อยคุณภาพ" "เกิดการผิดพลาดในการทำงานบ่อย" ถ้าหากนำเอาการเคลื่อนไหวของจุดบนกราฟเส้นตรงมาเทียบดูกับสภาพของขบวนการผลิตแล้วทำการวิเคราะห์จะสามารถค้นหาสาเหตุของความผิดปกติเพื่อที่จะนำมาพิจารณาจัดทำกิจกรรมเพื่อการปรับปรุงแก้ไขได้
3. สามารถตรวจสอบผลจากมาตรการเพื่อการแก้ไข โดยการจัดทำกราฟเส้นเพื่อเปรียบเทียบข้อมูลก่อนกับหลังการกำหนดมาตรการเพื่อแก้ไขทำให้สามารถตรวจสอบผลของมาตรการที่วางเอาไว้ได้

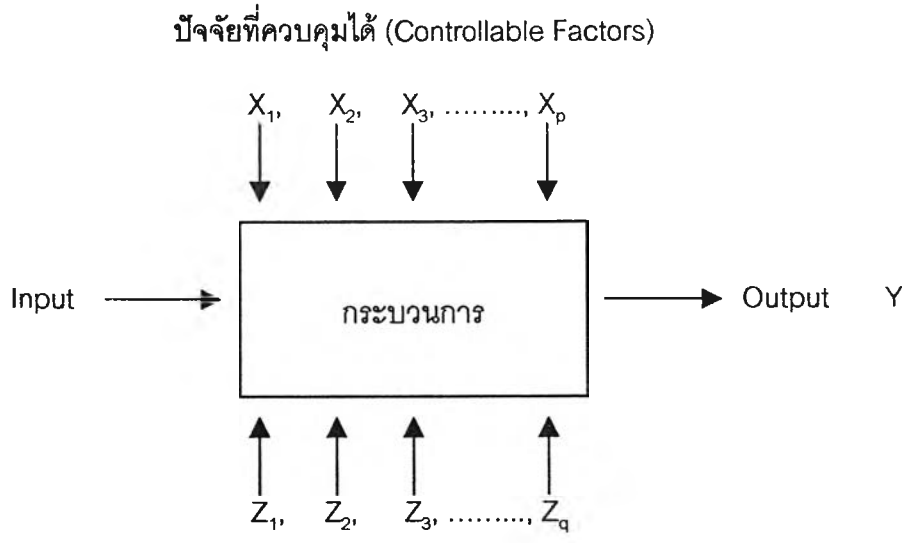
4. ใช้เป็นประโยชน์สำหรับการเขียนรายงาน ในการจัดทำหนังสือรายงานเกี่ยวกับการทำกิจกรรมกลุ่มควบคุมคุณภาพ (QC Circle) หรือ ในการรวบรวมผลการทดลองเป็นต้นนั้น อาจใช้กราฟเส้นให้เป็นประโยชน์เพื่อที่จะสรุปรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ ได้มากขึ้น ขณะเดียวกันก็อยู่ในสภาพที่เรียบร้อยอ่านได้ชัดเจน

2. การออกแบบการทดลอง

<u>การออกแบบการทดลองคืออะไร</u>

การออกแบบการทดลอง คือ การทดสอบหรืออนุกรมของการทดสอบ ซึ่งมีจุดมุ่งหมายเพื่อเปลี่ยนแปลงในส่วนของตัวแปรนำเข้า (Input Variable) ของกระบวนการหรือระบบ ซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสิ่งที่สนใจ (Output Response)

<u>องค์ประกอบของการออกแบบการทดลอง</u>



รูปที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบของการออกแบบการทดลอง

<u>วัตถุประสงค์ของการทำการออกแบบการทดลอง</u>

1. วิเคราะห์หาว่าปัจจัยหรือ Factor ใดที่มีผลต่อ y มากที่สุด
2. วิเคราะห์หาว่าควรกำหนดให้ปัจจัย x แต่ละตัวมีค่าเท่าใดจึงจะทำให้ y มีค่าดีที่สุด

3. วิเคราะห์หาว่าควรกำหนดให้ปัจจัย x แต่ละตัวมีค่าเท่าใดจึงจะทำให้ y มีค่าความแปรปรวนน้อยที่สุด
4. วิเคราะห์หาว่าควรกำหนดให้ปัจจัย x แต่ละตัวมีค่าเท่าใดจึงจะทำให้ผลกระทบของปัจจัย $Z_1, Z_2, \ldots\ldots, Z_q$ มีค่าน้อยที่สุด

<u>การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง</u>

การออกแบบการทดลองได้มีประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางทั้งในแง่ของกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ และเป็นส่วนหนึ่งของงานด้านการปรับปรุงกระบวนการผลิต ซึ่งการออกแบบการทดลองเป็นเครื่องมือที่ช่วยในการปรับปรุงและพัฒนางานด้านต่าง ๆ เช่น

- ปรับปรุงผลได้ (Yield) ของกระบวนการ
- ลดความผันแปร
- ลดเวลาในการพัฒนา
- ลดต้นทุนโดยรวม เป็นต้น

วิธีการออกแบบการทดลองมีบทบาทอย่างสูงในกิจกรรมการออกแบบด้านวิศวกรรม รวมถึงการพัฒนาและปรับปรุงผลิตภัณฑ์ เช่น

- การประเมินและเปรียบเทียบคุณลักษณะของการออกแบบ
- การประเมินทางเลือกด้านวัสดุ
- การพิจารณาพารามิเตอร์ของผลิตภัณฑ์
- รวมไปถึงการออกแบบพารามิเตอร์ของผลิตภัณฑ์ที่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น

<u>แนวคิดพื้นฐานการออกแบบการทดลอง</u>

แนวคิดพื้นฐานในการออกแบบการทดลองประกอบด้วยสิ่งสำคัญ 3 สิ่ง ได้แก่ การทำซ้ำ (Replication) การสุ่ม (Randomization) และการบล็อก (Blocking)

การทำซ้ำ จะช่วยให้ผู้ทำการทดลองสามารถประเมินค่าความผิดพลาดของการทดลองได้ และช่วยให้ผู้ทำการทดลองสามารถประมาณค่าของผลกระทบได้ถูกต้องมากขึ้น

การสุ่ม จะทำให้ข้อมูลมีความเป็นอิสระซึ่งกันและกัน ซึ่งสามารถทำการพิสูจน์ได้ โดยใช้กราฟเพื่อทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

การบล็อก เป็นเทคนิคที่ใช้ในการเพิ่มความแม่นยำของการทดลอง

<u>แนวทางในการออกแบบการทดลอง</u>

1. การระบุถึงปัญหา ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในการออกแบบการทดลอง ซึ่งในขั้นตอนนี้ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องระบุหัวข้อของปัญหาให้กระจ่างชัดและครอบคลุม
2. การเลือกปัจจัยและระดับของปัจจัย ในขั้นตอนนี้ ความรู้ในกระบวนการของผู้ทดลองเป็นสิ่งที่สำคัญยิ่ง ซึ่งความรู้ ดังกล่าวจะประกอบไปด้วยประสบการณ์และความเข้าใจในทฤษฎีของกระบวนการของผู้ทำการทดลอง
3. การเลือกตัวแปรตอบสนอง ผู้ทำการทดลองควรเลือกตัวแปรที่สามารถบอกถึงสารสนเทศของกระบวนการที่ศึกษาได้ดี
4. การเลือกรูปแบบการทดลอง การเลือกรูปแบบของการทดลอง ควรพิจารณาถึงจำนวนตัวอย่างที่สามารถปฏิบัติได้ การเลือกจำนวนซ้ำที่เหมาะสม รวมถึงการพิจารณาถึงการบล็อกและวิธีการสุ่ม
5. การทำการทดลอง ในการทำการทดลอง ผู้ทำการทดลองควรจะมั่นใจว่าทุกสิ่งทุกอย่างเป็นไปตามแผนที่วางไว้ ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนนี้จะทำลายความถูกต้องของผลการทดลอง
6. การวิเคราะห์ข้อมูล วิธีการทางสถิติจะถูกใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลมากกว่าการตัดสินและวิเคราะห์โดยใช้สามัญสำนึก ซึ่งในการวิเคราะห์ข้อมูลนี้ปัจจุบันสามารถใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติที่มีอยู่มากมายในการวิเคราะห์ได้
7. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ หลังจากได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลแล้ว ผู้ทำการทดลองควรจะทำการสรุปผลการทดลอง ซึ่งวิธีการนำเสนอด้วยกราฟจะถูกใช้มากในขั้นตอนนี้ นอกจากนี้ควรจะมีการทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองที่ได้ทำมา

<u>รูปแบบของการออกแบบการทดลอง</u>

รูปแบบในการออกแบบการทดลอง สามารถแบ่งได้กว้าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. การออกแบบการทดลองเมื่อมีปัจจัยเดียว (Single Factor Experiment)

ในการออกแบบการทดลองนี้ จะเป็นการเปรียบเทียบผลของตัวแปรที่สนใจเมื่อมีเพียงปัจจัยเดียวที่สนใจ และระดับของปัจจัยมีมากกว่า 2 ระดับ

เราสามารถอธิบายการทดลองนี้โดยใช้สมการทางสถิติเชิงเส้นตรงได้ ดังนี้

$$Y_{ij} = \mu + \tau + \varepsilon_{ij}$$

2. การออกแบบการทดลองหลายปัจจัยแบบแฟคตอเรียล (Factorial Design Experiment)

ในการออกแบบการทดลองพบว่า หลาย ๆ การทดลองจำเป็นต้องศึกษาปัจจัยมากกว่า 2 ปัจจัย ซึ่งในการศึกษาดังกล่าว จะทำให้เราสามารถทราบถึงอิทธิพลหลัก (Main Effect) และรวมถึงอิทธิพลของปฏิกิริยาสัมพันธ์ (Interaction Effect) ซึ่งจะสามารถอธิบายถึงความแตกต่างของผลกระทบระหว่างระดับของปัจจัยหนึ่งไม่เท่ากันเมื่อเปรียบเทียบกับระดับหนึ่งไปอีกระดับหนึ่งของอีกปัจจัย

ตัวแบบทางสถิติของการทดลองเมื่อมีปัจจัย 2 ปัจจัย สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

3. การออกแบบการทดลองหลายปัจจัยเมื่อแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ (2^k Factorial Design Experiment)

การออกแบบการทดลองนี้ เป็นการทดลองที่มีจำนวนของปัจจัย K ปัจจัย ซึ่งในแต่ละปัจจัยจะมี 2 ระดับ จึงเรียกการออกแบบการทดลองนี้ว่า 2^k แฟคตอเรียล โดยปกติแล้วการออกแบบการทดลองแบบนี้ มักใช้ในขั้นตอนการทดลองเริ่มต้น เมื่อมีจำนวนของปัจจัยหลาย ๆ ปัจจัย ซึ่งในการทดลองนี้ จะใช้จำนวนตัวอย่างที่น้อย เมื่อเทียบกับการทดลองแบบแฟคตอเรียล

3. ทฤษฎีเกี่ยวกับการควบคุมของเสียที่เกิดขึ้นจากการหล่อ

3.1 สิ่งแปลกปลอมในเนื้อวัสดุ (Inclusions)

สาเหตุของสิ่งแปลกปลอมทั้งหมด สามารถแยกเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้

3.1.1 มีสิ่งแปลกปลอมเล็ก ๆ (Particle) จากภายนอกมาปน เช่น ชิ้นส่วนของปูนทำแบบ (Particle of Investment)

3.1.2 สิ่งแปลกปลอมที่เกิดจากปฏิกิริยาของโลหะของธาตุอื่น ๆ (เช่น ออกไซด์ และซัลไฟด์ ของเงิน และทองแดง)

ชิ้นส่วนแปลกปลอมมักทำให้เกิดจุดแข็งบ่อย และมีรอยเป็นทางยาว (Comet Tracy) เมื่อขัดถูชิ้นส่วนของปูนแบบ มีต้นกำเนิดมาจาก

1. การนำโลหะมาหลอมใหม่ของวัสดุที่ปนเปื้อน
2. แบบปูนที่ไม่แข็งแรงหรือปูนที่มีคุณภาพต่ำ
3. ขอบเบ้าที่เจาะรูสำหรับเทน้ำโลหะแหลมคม จะทำให้ขอบแตกชำรุดเมื่อน้ำโลหะไหลมากระทบ

สาเหตุอีกอย่างหนึ่งที่เกิดเสมอ คือ การใช้เบ้าที่ไม่สะอาด เศษของตะกรันสามารถทำให้เกิดปัญหานี้ และเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดการแตกร้าวของชิ้นผลิตภัณฑ์ ตะกรันที่พบอาจจะเป็นสารผสมของอลูมิเนียม และทองแดงซิลิเกต เป็นต้น

การหลีกเลี่ยงการเกิดสิ่งแปลกปลอม

ปัจจัยสำคัญเพื่อหลีกเลี่ยงการชำรุด คือ

1. มีแบบหล่อที่แข็งแรง (Sufficient Strength of Investment)
2. ต้นเทียนมีบริเวณแหลมคมน้อย
3. ทำความสะอาดวัสดุที่จะหลอมใหม่
4. เบ้าหลอมต้องสะอาดและแข็งแรง

3.2 ของเสียที่สืบเนื่องจากการหล่อแบบแทนชี้ผึ้ง (Investment Casting)

ของเสียหรือข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในชิ้นงานจากการหล่อแบบนี้ ที่ไม่ได้มีสาเหตุมาจากสิ่งแปลกปลอมหรือสารปนเปื้อนตามที่ได้กล่าวมาแล้ว สามารถแยกได้เป็น 2 กลุ่มหลัก ๆ คือ

Group A	Group B
ผิวหยาบ (Sandy Surface)	รูพรุน
มีครีบ (Fins)	

กลุ่ม A เกือบทั้งหมดเป็นผลจากกรรมวิธีผลิตที่ไม่สมบูรณ์

กลุ่ม B เป็นปัญหาที่สำคัญมากที่สุด และไม่สามารถเชื่อมโยงถึงแหล่งกำเนิดเพียงอย่างเดียว (Single Origin)

3.2.1 ผิวหน้าหยาบและมีครีบ (Sandy Surface and Fins)

สาเหตุของการเกิดผิวหยาบ

ในกรณีที่โลหะหลอมไหลในรูพรุนของปูน (Investment) ผิวของชิ้นงานหล่อจะมีลักษณะหยาบ และในกรณีที่ปูนหล่อแตก เนื่องจากมีแรงดันในน้ำโลหะมาก จะส่งผลให้ชิ้นงานหล่อมีครีบเกิดขึ้น อันเนื่องมาจากน้ำโลหะซึมลงในรอยร้าวของแบบหล่อ และครีบมักเกิดขึ้นบ่อยตรงตำแหน่งด้านหน้าตัดหนาของชิ้นงานหล่อ ความเสียหายทั้งสองอย่างเกิดจากการใช้ปูนหล่อที่มีแรกยึดตัวต่ำ และหรือใช้แรงอัดของโลหะมากเกินไประหว่างการหลอม

สาเหตุและการป้องกัน

ส่วนใหญ่การชำรุดเกิดจากการใช้ปูนหล่อที่มีลักษณะเหลวมากเกินไป ซึ่งมีสาเหตุคือ

1. อัตราส่วนของน้ำกับปูนสูงเกินไป
2. อุณหภูมิในการเผาปูนยิบซัมสูงกว่า 750 ^{o}C

3. ผงปูนรุ่นนั้นเสื่อมคุณภาพ

3.2.2 รูพรุน (Porosity)

รูพรุนที่เกิดขึ้นไม่มีรูปแบบทั้งในรูปร่างหรือต้นกำเนิด แบ่งชนิดอย่างคร่าว ๆ ได้ 2 ชนิด คือ

- รูพรุนจากฟองอากาศ
- รูพรุนจากการหดตัว (Shrinkage Porosity)

การเสียหายแบบฟองอากาศเกิดจากการหล่อที่ไม่ถูกต้อง เช่น ความบริสุทธิ์ และคุณสมบัติของปูนซึ่งเราสามารถแก้ไขได้ ส่วนรูพรุนจากการหดตัว เกิดจากคุณสมบัติคงที่ทางฟิสิกส์ของโลหะเหลว รวมกับคุณสมบัติทางฟิสิกส์ เช่น การถ่ายเทความร้อน เราอาจจะลดการเสียหายโดยการควบคุมกระบวนการหลอม บางทีเราก็ไม่สามารถเลี่ยงได้อย่างสมบูรณ์

<u>รูพรุนจากฟองอากาศหรือก๊าซ</u> (Gas Porosity)

ฟองอากาศ (Gas Pores) ทำให้เกิดรูเข็มบนผิวหน้าโลหะเพราะรูเข็มอาจจะมีหลายสาเหตุ สาเหตุของการเสียหายสามารถพิสูจน์ได้โดยการดูด้วยกล้องขยาย อาจมีรูปร่างพรุนคล้ายเนยแข็ง บางครั้งรูพรุนรวมกันอยู่เป็นชั้นใกล้กับผิวโลหะ บางครั้งชิ้นงานที่ดูว่าเรียบร้อยกลับปรากฏรอยพรุนเมื่อขัดหรือปอกผิว สาเหตุของการเกิดรูพรุนชนิดนี้มีดังนี้

1. รูพรุนจากฟองอากาศ (ก๊าซ) เกิดจากปฏิกิริยากับปูนหล่อ

ปูนยิบซัม ซึ่งประกอบด้วยสารประกอบซิลิกาเป็นตัวสำคัญ และแคลเซียมซัลเฟต (ยิบซัม) เป็นตัวยึด แคลเซียมซัลเฟตสามารถมีปฏิกิริยากับโลหะเหลวหลายรูปแบบ แต่ปฏิกิริยาสุดท้ายทำให้เกิดรูพรุนเนื่องจากซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นค่อนข้างซับซ้อน และจะไม่กล่าวถึงในที่นี้

2. รูพรุนฟองอากาศจากสาเหตุความปนเปื้อนไม่บริสุทธิ์ของวัตถุดิบ

เงินเก่าที่ใช้แล้วหลายครั้ง และไม่ได้รับการล้างอย่างถูกต้องเป็นตัวพาให้เกิดออกไซด์ในปริมาณค่อนข้างสูง บางครั้งทำให้เกิดรูพรุนใหม่ ๆ ขึ้น

วิธีการแก้ไขปัญหารูพรุน (Gas Porosity) มีวิธีแก้ไขป้องกันอยู่หลายวิธี คือ

- ใช้โลหะสะอาด
- รักษาอุณหภูมิเบ้าและอุณหภูมิหลอมให้อยู่ภายในกำหนด
- หลีกเลี่ยงการใช้ส่วนผสม Alloy ที่มีสังกะสีสูง (อย่าให้เกิน 2-3 %)

รูพรุนแบบหดตัว (Shrinkage Porosity)

รูพรุนแบบหดตัวที่มีรูปร่างผิวเดนไดรท์ จัดว่าเป็นรูพรุนแบบหดตัวที่รุนแรง ทำให้โลหะมีคุณสมบัติทางกลที่ต่ำ หรือไม่แข็งแรง และเมื่อมีแรงเพียงเล็กน้อยมากระทบกับชิ้นงานก็จะเกิดการแตกหักได้ง่าย การวิเคราะห์ตรวจสอบว่าเป็นรูพรุนลักษณะนี้สามารถทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งเป็นวิธีที่ดีในการตรวจสอบลักษณะและสาเหตุของรูพรุน

ต้นกำเนิด (Origin)

รูพรุนชนิดนี้มีสาเหตุหรือการกำเนิดจากการหดตัวอย่างรวดเร็วของโลหะในขณะที่เปลี่ยนสภาวะจากการเป็นของเหลวไปเป็นของแข็ง การหดตัวคือ การเปลี่ยนปริมาตรของวัสดุในช่วงของการเปลี่ยนสถานะ โดยเฉพาะในขั้นตอนของการแข็งตัว ซึ่งจัดเป็นคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของโลหะบริสุทธิ์ และโลหะผสมเป็นส่วนมาก เมื่อเป็นธรรมชาติของโลหะตัวนั้นจะไม่สามารถแก้ไขไม่ให้เกิดการหดตัว อย่างไรก็ดีผลกระทบจากการหดตัวของวัสดุสามารถจำกัดให้อยู่ภายใต้ขอบเขตที่ต้องการได้

การหลีกเลี่ยงปัญหาการเกิดรูพรุนในระหว่างการแข็งตัว สามารถทำได้โดยปริมาตรของชิ้นงานที่หดตัวไปเมื่อโลหะเปลี่ยนเป็นก้อนแข็งจะต้องได้รับการชดเชยจากโลหะที่ไหลเข้าไปแทนที่ช่องว่างให้ทันท่วงที การติดตั้งรูเติมหรือทางเดินน้ำโลหะสามารถช่วยแก้ไขปัญหานี้ได้

ปัจจัยที่มีอิทธิพล (Influencing Factors)

ผลกระทบของปัจจัยชนิดหนึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในปัจจัยอีกชนิดหนึ่ง ตัวอย่างการลดอุณหภูมิเบ้าลงจะมีผลกระทบต่างออกไป เช่นการเทที่อุณหภูมิต่ำในสภาวะที่ชิ้นงานหล่อหนา การหล่อที่อุณหภูมิต่ำจะส่งผลให้งานไม่เกิดฟองอากาศ แต่ถ้าชิ้นงานนั้นมีส่วนที่บางหรือมีบริเวณที่ชิ้นงานเปลี่ยนรูปทรงและขนาด ก็จะเกิดปัญหาการเติมไม่เต็มแบบหรือเกิดโพรงที่มาจากการหดตัว เนื่องจากปัจจัยแต่ละชนิดมีความสัมพันธ์ในลักษณะซับซ้อน ทำให้การวิเคราะห์ของเสียและได้ข้อมูลที่น่าเชื่อถือ จำเป็นต้องใช้การศึกษาอย่างละเอียดรอบคอบ และชิ้นงานจำนวนมาก ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการหล่อโลหะมีดังนี้

1. การออกแบบ (Influence of Design) งานชิ้นใหญ่จะมีโอกาสเกิดรูพรุนได้มากกว่าชิ้นงานที่เล็กกว่า การออกแบบที่ดีควรคำนึงถึงขนาด รูปร่างของชิ้นงาน ขนาดและรูปทรงของทางเดินน้ำโลหะ การติดตั้งทางเดินน้ำโลหะเข้ากับตัวเรือน การติดตั้งรูเติม (Riser) เพื่อช่วยให้ชิ้นงานเต็มแบบ
2. ส่วนผสมโลหะ (Alloy Composition) การใช้เงินที่มีค่าบริสุทธิ์สูง จะหลีกเลี่ยงความยุ่งยากและปัญหาข้อบกพร่องต่าง ๆ รวมทั้งการเกิดรูพรุน

3. อุณหภูมิ อุณหภูมิที่ส่งผลต่องานหล่อ มีทั้งอุณหภูมิการหลอม อุณหภูมิการเทของโลหะหลอมเหลว และอุณหภูมิของเบ้าปูน การใช้อุณหภูมิทั้ง 3 ชนิดให้เหมาะสมจะมีส่วนช่วยควบคุมคุณภาพของชิ้นงานได้เป็นอย่างดี หลักการที่ใช้คือ อุณหภูมิการหลอมไม่ควรสูงเกินไป ไม่ควรเพิ่มอุณหภูมิการหลอมเพื่อให้การไหลของโลหะเต็มแบบมากขึ้น เพราะจะส่งผลให้มีโอกาสพบการหดตัวที่สูงขึ้นและยังทำให้ก๊าซต่าง ๆ สามารถละลายเข้าไปในน้ำโลหะได้ง่ายขึ้น รวมทั้งการเกิดโพรงอากาศชนิดต่าง ๆ ได้มากขึ้นอีกด้วย อุณหภูมิการเทควรสัมพันธ์กับอุณหภูมิการหลอมโดยปกติไม่ควรเกิน 50-100 ^{o}C การตั้งอุณหภูมิของเบ้าปูนเป็นตัวแปรที่สามารถดัดแปลงและปรับเปลี่ยนได้ เพราะการตั้งให้สูงขึ้นจะช่วยให้การไหลของน้ำโลหะดีขึ้นและไหลได้เต็มแบบ แต่ไม่ควรตั้งสูงเกินไปโดยเฉพาะในกรณีใช้ปูนที่มียิปซัมผสมอยู่ เพราะจะก่อให้เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ง่าย

<u>การหลีกเลี่ยงโพรงอากาศที่เกิดจากการหดตัว</u>

เป็นไปไม่ได้ที่จะไม่ให้เกิดรูพรุนจากการหดตัวอย่างสมบูรณ์ สิ่งที่สามารถทำได้คือลดจำนวนให้น้อยลง นอกจากนี้ยังเป็นไปไม่ได้ที่จะจัดทำสูตรการหลอมโลหะชนิดครอบจักรวาลเพื่อลดจำนวนของเสีย อย่างไรก็ดีมีข้อปฏิบัติที่อาจจะใช้ประกอบหรือแก้ไขงานหล่อ คือ

- ออกแบบชิ้นงานที่หล่อให้ง่าย หลีกเลี่ยงที่จะมีส่วนที่จะมีการเปลี่ยนขนาดหน้าตัดอย่างฉับพลัน
- ระมัดระวังการทำรูหยอดโลหะ (Spur) อย่างถูกต้อง รูหยอดโลหะต้องไม่ยาวและเล็กเกินไป อย่างไรก็ดีรูหยอดถ้าสั้นและหนาทำให้งานเสียหาย ให้ทำรูหยอดใกล้กับชิ้นงานหล่อบริเวณที่หนา เมื่อสามารถทำให้รูหยอดซ้อน 2 ตัวหรือหลายตัวอาจเป็นประโยชน์ แต่ต้องไม่ยาวและบางเกินไป ความเข้าใจผิดบ่อย ๆ เกิดจากการใช้รูหยอดบางและยาวหลายตัว เมื่อทำที่หยอดเพียงอันเดียวไม่ได้
- ใช้อุณหภูมิที่ถูกต้อง โดยเฉพาะอุณหภูมิของเบ้าให้ผลมากกับการเกิดโพรงขณะที่อุณหภูมิน้ำโลหะมีอิทธิพลมากกับการไหลของน้ำโลหะ
- อย่าหล่องานหนาและบางบนต้นเทียนเดียวกัน เพราะจะไม่มีอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการหล่อชิ้นงานทั้งสองรูปแบบ
- ใช้โลหะผสมที่หล่อง่าย (ความบริสุทธิ์ของเงินสูง)
- การเพิ่มสังกะสีจะทำให้เกิดการหดตัวมากขึ้น แม้ว่าการไหลตัวของโลหะจะดีขึ้น ให้พิจารณาปริมาณงานที่เสียไปเทียบกับมูลค่าของโลหะที่เพิ่มขึ้น

4. ทฤษฎีเกี่ยวกับการขัดตัวเรือน (Polishing Processes)

วิธีการขัดตัวเรือนนั้น แบ่งออกเป็น 3 วิธี คือ

1. การขัดโดยช่างฝีมือ (Hand polishing and buffing)
2. การขัดโม่ด้วยเครื่อง (Mechanized polishing)
3. การขัดแบบ Electrochemical polishing

4.1 การขัดโดยช่างฝีมือ

Polishing เป็นกระบวนการที่ทำให้ชิ้นงานเรียบ และ เงางาม ซึ่งขั้นตอนแรกทำให้เรียบ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า cutting down เริ่มต้นตั้งแต่กำจัดร่องรอยต่าง ๆ (scratches) บริเวณผิวของโลหะ โดยใช้ยาขัด (abrasive compound) ที่เรียกว่า ยาดิน (Tripoli) ซึ่งจะทำให้ผิวของโลหะเรียบแต่ยังด้าน

Buffing เป็นขั้นตอนผสมของ cutting down กับ burnishing action (ทำให้เกิดความเรียบและเงางาม แวววาว) โดยใช้ยาขัดที่เรียกว่า ยาแดง (rouge)

ชนิดของยาขัด (Compound)

ก. Tripoli เป็นสารจำพวก silicon (เกิดจาก decomposition ของ siliceous sandstone) มีสีน้ำตาล (ถ้า tripoli สีขาว จะใช้ขัด platinum และ white gold)

ข. Rouge เป็น synthetic iron oxide มีสีแดง (ถ้า rouge สีขาวใช้สำหรับ platinum และ white gold แต่ช่างขัดบางคนอาจใช้ rouge สีเขียวขัดเพิ่มเติมได้)

ค. White diamond เป็นสารประกอบที่มาจาก amorphous silica ช่างขัดบางคนนำมาขัดระหว่างขั้นตอนขัด tripoli กับ rouge

ปัจจัยสำคัญที่ทำให้การขัดชิ้นงานเกิดเป็นรอยก็คือการใช้แปรงขัดและยาขัดที่ไม่เหมาะสมในแต่ละขั้นตอน

4.2 การขัดโม่ด้วยเครื่อง

เป็นการขัดผิวชิ้นงานจำนวนมากโดยใช้เครื่องโม่ (Tumbler) เป็นการขัดโม่ทีละขั้นตอน โดยให้วัสดุขัดโม่ (media) เสียดสีผิวโลหะทีละน้อยและใช้สารละลายเป็นตัวหล่อลื่นระหว่างชิ้นงานกับวัสดุขัดโม่ โดยทั่วไปการขัดโม่แบ่งเป็น 4 ประเภทคือ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. การขัดหยาบ (Heavy Cut Cycle)
2. การขัดปานกลาง (Medium Cut Cycle)
3. การขัดละเอียด (Fine Cut Cycle)
4. การขัดเงา (Burnishing หรือ Final Polish Cycle)

ชิ้นงานบางประเภทก็ต้องใช้การขัดโม่ทั้ง 4 ประเภท บางประเภทต้องอาศัยการขัดด้วยช่างฝีมือเล็กน้อย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปแบบและความต้องการของลูกค้า

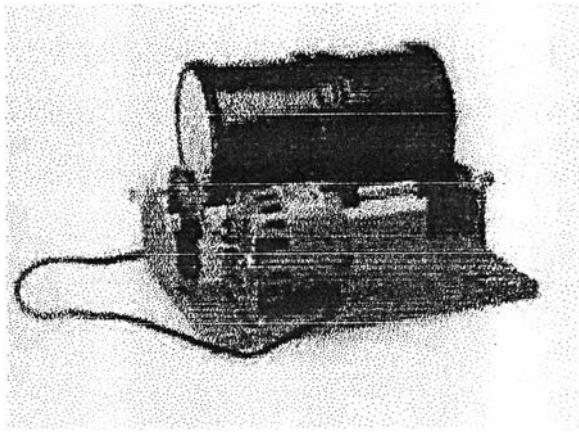
เนื่องจากชิ้นงานมีความหลากหลายทั้งประเภทของชิ้นงานและขนาดของชิ้นงาน จึงทำให้มีการประดิษฐ์รูปแบบของเครื่องมือ, วัสดุขัดโม่ และสารละลายหลายชนิดหลายแบบ เพื่อให้เลือกใช้กับชิ้นงานให้เกิดความเหมาะสมที่สุด ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับความรอบคอบของผู้ปฏิบัติงานขัดโม่ในการที่จะปรับแต่งกระบวนการขัดโม่ให้ได้ผลออกมาดีที่สุดและมีต้นทุนต่ำสุด ในบางครั้งวิธีการขัดโม่อาจจะไม่สามารถใช้กับชิ้นงานได้ทุกรูปแบบ เพราะมีข้อจำกัดที่ตัวชิ้นงานเอง เช่น ข้อจำกัดทางด้านลักษณะของชิ้นงานภายหลังการขัดโม่แล้ว ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการที่จะกำหนดวิธีหรือขั้นตอนการขัดโม่

<u>เครื่องมือ</u>

การเลือกใช้เครื่องมือขัดโม่ให้เหมาะสมกับชิ้นงานนั้นควรจะคำนึงถึงความประหยัดของการใช้เครื่องมือ โดยพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆ เช่น รูปแบบของชิ้นงาน, ปริมาณของชิ้นงาน, ระยะเวลาที่ใช้, คุณภาพที่ต้องการภายหลังการขัดโม่ เป็นต้น ปัจจุบันมีเครื่องมือขัดโม่ 4 แบบ ดังนี้

1. เครื่องขัดโม่แบบหมุนด้วยแกน (Rotary Barrel Tumbler, RT)

เครื่องขัดโม่แบบหมุนด้วยแกนนี้เป็นเครื่องที่มีราคาถูก แต่การขัดโม่ก็ค่อนข้างช้าและใช้เวลานานมาก ลักษณะของเครื่องเป็นรูปทรงกระบอกหมุนอยู่บนแกน ลักษณะการขัดผิวชิ้นงานจะเรียกว่า down slide tumbling action เนื่องจากต้องปิดฝารูปทรงกระบอกขณะกำลังขัดโม่ ดังนั้นจึงไม่สามารถหยิบชิ้นงานมาตรวจได้ (ยกเว้นหยุดเดินเครื่อง แล้วเปิดฝาออกเพื่อตรวจสอบชิ้นงาน) เครื่องขัดโม่ชนิดนี้อาจจะมีเพียง 1 เครื่องหรือหลายเครื่องหมุนบนแกนเดียวกันก็ได้ ปัจจัยขัดโม่ที่สำคัญคือ วัสดุขัดโม่และชิ้นงานควรจะมีปริมาตร 50 – 60% ของตัวเครื่อง แล้วเติมสารละลายจนมีปริมาตรสูงกว่าวัสดุ (วัสดุขัดโม่ + ชิ้นงาน) ประมาณ 1 นิ้ว ถ้าน้ำยามากเกินไปการขัดโม่จะไม่ได้ผลเต็มที่แต่ถ้าน้อยเกินไปอาจจะทำให้ชิ้นงานเสียหายได้ เครื่องขัดโม่ชนิดนี้ใช้กับวัสดุขัดโม่ที่เป็นลูกเหล็ก



รูปที่ 2.2 เครื่องขัดโม่แบบหมุนด้วยแกน

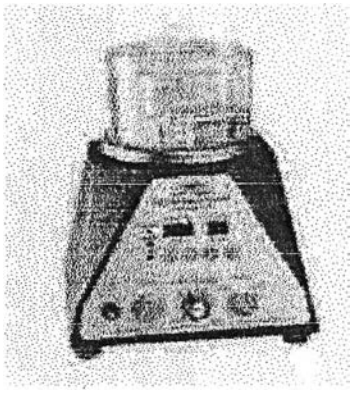
2. เครื่องขัดโม่แบบเขย่าหรือสั่น (Vibratory Tumbler, VT)

เครื่องขัดโม่ชนิดนี้เป็นตัวถังกลมมีแกนตรงกลางดูคล้ายโดนัท (Round Donut Shape Vessel) ส่วนฐานจะเป็นส่วนของมอเตอร์ที่ทำหน้าที่เขย่าหรือสั่นตัวถังท่อนบน การขัดโม่ลักษณะนี้จะขัดได้ดีเมื่อมีวัสดุขัดโม่และชิ้นงานประมาณ 80 – 90% ของปริมาตรถัง และมีระบบท่อระบายน้ำออกและท่อเติมน้ำยาเข้าเป็นระยะๆ เพื่อให้ชิ้นงานสะอาดโดยไม่ต้องหยุดเครื่อง เรียกระบบนี้ว่า Flow Through System บางรุ่นจะมีปั๊มตัวเล็กๆ เพื่อคอยควบคุมการไหลเวียนการเข้าหรือออกของน้ำยา เรียกระบบนี้ว่า Recirculating System ซึ่งสามารถปรับปริมาณการไหลของน้ำยาได้ด้วยวาล์ว เพื่อให้มีปริมาณน้ำยาที่เหมาะสม ถ้าตัวถังขนาด 5 แกลลอนควรจะมีการเปลี่ยนน้ำยา 4 รอบ ซึ่งวัสดุขัดโม่ต่างชนิดกันมักจะใช้น้ำยาแตกต่างกันด้วย ถ้าชิ้นงานที่ขัดโม่เป็นโลหะที่มีค่าสามารถนำน้ำยาที่ระบายทิ้งไปมาสกัดโลหะมีค่ากลับคืนมาได้

รูปที่ 2.3 เครื่องขัดโม่แบบเขย่าหรือสั่น

3. เครื่องขัดโม่แบบแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Disc, CD)

เครื่องขัดโม่ชนิดนี้จะมีจานหมุนอยู่ที่ก้นถัง เมื่อจานหมุนหมุนด้วยความเร็วสูงจะทำให้วัสดุขัดโม่และชิ้นงานเคลื่อนที่ไปตามแรงหนีศูนย์กลางไปยังผนังรอบๆ ถัง วนเป็นวงกลม เครื่องชนิดนี้ทำงานได้รวดเร็วกว่าเครื่องเขย่า (Vibratory Tumbler) ประมาณ 10 – 15 เท่า น้ำยาจะเปิดเข้าถังทางด้านล่างและจะเคลื่อนขึ้นสู่ด้านบนผิวของวัสดุขัดโม่เพื่อระบายออก เครื่องชนิดนี้จะเหมาะกับการขัดโม่เพื่อให้ผิวเรียบอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.4 เครื่องขัดโม่แบบแรงหนีศูนย์กลาง

4. เครื่องขัดโม่แบบผสม (Centrifugal Rotary Tumbler, CRT)

เครื่องขัดโม่ชนิดนี้เป็นลักษณะผสมผสานระหว่างการหมุนแบบแรงหนีศูนย์กลางกับการหมุนด้วยแกนหมุน ทำให้เกิดแรงเหวี่ยงและแรงกดต่อชิ้นงานที่อยู่ในถัง ถังที่ใช้จะเป็นถังทรงกระบอกปิดหัวท้าย เครื่องขัดโม่ชนิดนี้มีประสิทธิภาพต่อการขัดชิ้นงานจำนวนมาก (เครื่อง 1 เครื่อง จะมีถังทรงกระบอกประมาณ 3 – 4 ถัง)

เครื่องมือทั้ง 4 แบบให้ผลการขัดโม่ที่ดี แต่เนื่องจากต้นทุนในการขัดโม่แต่ละเครื่องแตกต่างกัน ดังนั้นความเหมาะสมในการเลือกมาใช้งานจึงมีความแตกต่างกันไป เช่น เครื่องแบบหมุนด้วยแกนเป็นเครื่องขัดโม่ที่มีต้นทุนต่ำที่สุด แต่ระยะเวลาการขัดโม่ใช้เวลานานที่สุด ส่วนเครื่องแบบแรงหนีศูนย์กลางเป็นเครื่องขัดโม่ที่มีต้นทุนสูง แต่ขัดโม่ได้ผลที่รวดเร็ว

นอกจากนี้เครื่องมือแบบเดียวกันก็ยังมีขนาดของเครื่องหลายขนาดเพื่อให้เลือกใช้กับงานที่เหมาะสม เพราะถ้าใส่ชิ้นงานมากจนเกินไปจะทำให้ชิ้นงานเกิดการชำรุดเสียหายได้ หรือในกรณีที่ชิ้นงานใหญ่แต่เครื่องมีขนาดเล็กก็จะทำให้ตัวชิ้นงานเสียหายได้ หลักทั่วไปของการขัดโม่ คือ ชิ้นงานควรจะหมุนวนไปได้อย่างดีในวัสดุขัดโม่ ดังนั้นชิ้นงานที่ใส่ในเครื่องโม่ควรเกิน 10 – 15% โดยปริมาตรของกำลังงานของเครื่อง

วัสดุขัดโม่ (Media)

การเลือกใช้วัสดุขัดโม่นั้น ปัจจัยสำคัญขึ้นอยู่กับขนาดและความซับซ้อนของชิ้นงานที่ต้องการขัดโม่ ซึ่งปัจจัยนี้จะเป็นตัวกำหนดชนิดและขนาดของวัสดุขัดโม่ โดยวัสดุขัดโม่มีหน้าที่ในการขัดให้ผิวของชิ้นงานเรียบและเงางามทั้งในสภาวะการขัดในสารละลายหรือการขัดในสภาวะแบบแห้ง

วัสดุขัดโม่ที่ใช้ในการขัดผิวให้เรียบจะทำมาจากเซรามิกส์, พลาสติก และสารเรซินอื่นๆ โดยทั่วไปแบ่งวัสดุขัดโม่ออกเป็น 3 ชนิด คือ

1. วัสดุขัดโม่สำหรับขัดหยาบ (Heavy Cut Media) จะช่วยลดความหยาบของผิวชิ้นงาน
2. วัสดุขัดโม่สำหรับขัดผิวปานกลาง (Medium Cut Media) จะช่วยลดความหยาบของผิวชิ้นงานและทำให้เกิดรอยขัดโม่ที่สม่ำเสมอ
3. วัสดุขัดโม่สำหรับขัดละเอียด (Fine Cut Media) จะช่วยลดรอยขีดข่วนที่เกิดจากการขัดผิวปานกลาง

โดยทั่วไปจะต้องคำนึงถึงจำนวนขั้นตอนการใช้วัสดุขัดโม่ซึ่งสัมพันธ์กับความหยาบของผิวชิ้นงาน ซึ่งอย่างน้อยควรใช้การขัดโม่ 2 ขั้นตอนก่อนที่จะถึงขั้นตอนการขัดเงาครั้งสุดท้าย ในบางครั้งถ้าผิวชิ้นงานหยาบมากอาจจะต้องใช้วัสดุขัดโม่สำหรับขัดหยาบแทนวัสดุขัดโม่สำหรับขัดปานกลาง แต่อย่างไรก็ตามในกรณีนี้จะต้องคำนึงถึงรายละเอียดหรือลวดลายของชิ้นงานด้วย เพราะอาจจะถูกขัดจนลวดลายลบเลือนไปได้ ชิ้นงานหล่อมักจะใช้วัสดุขัดโม่สำหรับขัดหยาบหรือวัสดุขัดโม่สำหรับขัดผิวปานกลาง แต่ถ้าเป็นงานช่างฝีมือขึ้นรูปก็ใช้วัสดุขัดโม่สำหรับขัดละเอียดได้เลย

ส่วนขั้นตอนสุดท้ายคือการขัดเงา (Burnishing หรือ Final Polish Cycle) นั้น ความเงางามของชิ้นงานที่ได้ก็ขึ้นอยู่กับความพอใจของผู้ซื้อและผู้ขายที่ได้ตกลงกันไว้ บางครั้งอาจจะต้องขัดเงาเพิ่มเติมโดยช่างขัดมอเตอร์ (แปรงผ้าหรือแปรงแถวก็ได้ให้แล้วแต่ลักษณะงาน) ถ้าต้องการให้ชิ้นงานมีคุณภาพมากขึ้น

การนำวัสดุขัดโม่มาใช้ขัดโม่นั้นมักจะใช้คู่กับน้ำยาหรือสารละลาย ซึ่งน้ำยาจะทำหน้าที่หล่อลื่นในขณะขัดโม่และช่วยทำความสะอาดชิ้นงานไปในตัวด้วย ในกรณีของการขัดขั้นสุดท้ายหรือการขัดเงา (Burnishing หรือ Final Polish Cycle) มีทั้งการขัดแบบแห้งโดยใช้น้ำยาลักษณะ paste compound ซึ่งวัสดุขัดโม่ที่ใช้กับการขัดเงาแบบแห้ง เช่น ขี้เลื่อย, walnut shell เป็นต้น ส่วนการขัดเงาในสารละลายวัสดุขัดโม่ที่ใช้ เช่น ลูกเหล็ก การขัดเงานี้จะต้องระมัดระวังอย่าให้ชิ้นงานมากจนเกินไป เพราะจะทำให้เกิดความเสียหายได้

โดยทั่วไปรูปร่างและปริมาณของชิ้นงานจะต้องสัมพันธ์กับชนิด, ขนาด และปริมาณของวัสดุขัดโม่ รวมถึงชนิดของเครื่องมือที่ใช้ขัดโม่ด้วย หลักทั่วๆ ไปของสัดส่วนระหว่างวัสดุขัดโม่ต่อชิ้นงานแสดงไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สัดส่วนการใช้วัสดุขัดโม่สำหรับชิ้นงานของเครื่องโม่แบบต่างๆ

เครื่องขัดโม่	วัสดุขัดโม่ : ชิ้นงาน (โดยปริมาตร)
เครื่องขัดโม่แบบหมุนด้วยแกน (RT)	8 : 1
เครื่องขัดโม่แบบเขย่าหรือสั่น (VT)	8 : 1
เครื่องขัดโม่แบบแรงหนีศูนย์กลาง (CD)	10 : 1
เครื่องขัดโม่แบบผสม (CRT)	10 : 1

ขนาดและรูปร่างลักษณะของชิ้นงานมีความสำคัญต่อการเลือกใช้วัสดุขัดโม่ เช่น ชิ้นงานที่มีผิวหน้าเป็นร่องหรือหลุมขรุขระควรใช้วัสดุขัดโม่รูปพีระมิดดีกว่าวัสดุขัดโม่รูปกรวย เพื่อให้มุมแหลมของพีระมิดขัดตามร่องหรือตามมุมขรุขระได้ ส่วนวัสดุขัดโม่รูปกรวยก็เหมาะกับชิ้นงานประเภทผิวเรียบและโค้งมน นอกจากนี้ชิ้นงานและวัสดุขัดโม่ควรจะมีขนาดแตกต่างกันอย่างชัดเจน เพื่อความสะดวกในการแยกชิ้นงานออกจากวัสดุขัดโม่

น้ำยาหรือสารละลาย (Solution)

น้ำยาเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในกระบวนการขัดโม่ ชนิดของน้ำยาเกี่ยวข้องกับการทำให้เกิดปฏิกิริยาในการขัด, หล่อลื่น และการทำความสะอาด โดยปกติน้ำยาจะอยู่ในรูปของสารละลายเข้มข้น ชนิดของวัสดุขัดโม่ก็เป็นตัวกำหนดการเลือกใช้น้ำยาด้วย น้ำยามี 3 ประเภท ดังนี้

1. Deburing Solution เป็นน้ำยาที่อยู่ในรูปของด่างอัลคาไลน์ ซึ่งจะช่วยควบคุมปริมาณฟอง ตลอดจนแขวนลอยพวกเศษโลหะและขี้โคลน ในระหว่างการขัดโม่มีน้ำยาหลายชนิดให้เลือกใช้งานขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและชนิดของวัสดุขัดโม่ที่ใช้งาน น้ำยาชนิดนี้จะใช้ในขั้นตอนการโม่เพื่อให้ผิวเกลี้ยง ใช้กับวัสดุขัดโม่ประเภทพลาสติกและเซรามิกส์

2. Descaler Solution เป็นน้ำยาที่อยู่ในรูปของกรดอะซิติก ช่วยในการลด firescale และออกไซด์ที่ผิวโลหะในขณะขัดโม่ น้ำยานี้ควรใช้กับวัสดุขัดโม่ประเภทที่ไม่ใช้สารอินทรีย์ และไม่ควรใช้กับวัสดุขัดโม่ประเภทลูกเหล็ก วัตถุประสงค์ของการใช้น้ำยาชนิดนี้คือการขัดผิวให้เกลี้ยงหรือขัดให้เงาก็ได้

3. Burnishing Solution เป็นน้ำยาที่อยู่ในรูปของด่างอัลคาไลน์ ใช้ในการขัดทำความสะอาดและควบคุมปริมาณฟอง โดยใช้กับวัสดุขัดโม่ประเภทลูกเหล็กและโพรซีลีนสำหรับขั้นตอนการขัดเงา

4.3 การขัดแบบ Electrochemical polishing

วิธีการขัดลอกผิวชิ้นงานด้วยขั้วไฟฟ้าภายในภาชนะที่มีสารละลายเคมีบรรจุอยู่ (Electrolytic cell) โดยชิ้นงานแขวนที่ขั้ว anode และมีแผ่น stainless steel ที่ขั้ว cathode จะทำให้ผิวของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการนี้มีผิวเรียบและเงา

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าการจัดการเพื่อการปรับปรุงระบบการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมมีการวิจัยค้นคว้าและปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง โดยใช้เทคนิคต่าง ๆ แตกต่างกันไป ซึ่งส่วนใหญ่มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพ และลดต้นทุนในการผลิต ได้แก่ การนำเสนอระบบสารสนเทศ สำหรับควบคุมต้นทุนการผลิตของอุตสาหกรรมเครื่องประดับ โดยมีการประมาณต้นทุนการผลิตตามกลุ่มชนิดของเครื่องประดับ และออกแบบปรับปรุงระบบสารสนเทศทางการผลิต อันประกอบด้วยรายงานและแบบบันทึกต่าง ๆ สำหรับใช้ควบคุมงานการผลิตให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น (จันทร์เพ็ญ อนุรัตนานนท์, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534) การปรับปรุงระบบการควบคุมการผลิตในโรงงานเครื่องประดับ เพื่อพัฒนาระบบการควบคุมการผลิตของโรงงานประเภทนี้ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการจัดโครงสร้างองค์กร การควบคุมการผลิต การพัฒนาระบบการควบคุมเกี่ยวกับวัตถุดิบ งานระหว่างการผลิตและสินค้าสำเร็จรูป (นุชสรา รักอำนวยกิจ, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537) การพัฒนาระบบควบคุมคุณภาพของกระบวนการประกอบเตาอบไมโครเวฟ โดยการจัดผังโครงสร้างองค์กรการควบคุมคุณภาพ กำหนดให้มีการควบคุมคุณภาพในขั้นตอนการประกอบที่สำคัญและจัดทำรูปแบบบันทึกใบรายงานที่ใช้ควบคุมคุณภาพในขั้นตอนต่าง ๆ (สมควร เทสาภิรัติ, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538) การปรับปรุงระบบควบคุมคุณภาพแม่พิมพ์เจาะสำหรับกระบวนการผลิตกระสุนปืนเล็ก โดยการปรับปรุงผังองค์กรคุณภาพ การตรวจสอบคุณภาพวัตถุดิบนำเข้า ปรับปรุงระบบควบคุมคุณภาพภายในกระบวนการผลิตและในขั้นตอน

สุดท้าย และจัดทำเอกสารบันทึกคุณภาพให้สอดคล้องกับระบบควบคุมที่จัดทำขึ้น (นิวัฒน์ ประดับวงศ์, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539) การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อโฟลว์ไลน์และโคลด์ชัตในกระบวนการฉีดอะลูมิเนียมแบบไดแคสติง โดยนำปัจจัยที่คาดว่าน่าจะมีผลต่ออุณหภูมิของแม่พิมพ์ซึ่งมีผลต่อการเกิดโฟลว์ไลน์และโคลด์ชัต มาทำการออกแบบการทดลองแบบฟิกซ์เอฟเฟก (โฆษิต สุขก้องวารี, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541) การออกแบบการทดลองในการปรับปรุงคุณภาพของแรงดึงของหัวอ่านเขียนข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อแรงดึงระหว่าง Slider และ Flexure ของหัวอ่านเขียนข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ และเสนอแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงคุณภาพของแรงดึงของหัวอ่าน โดยนำการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลมาใช้วิเคราะห์เพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่จะทำให้ได้ค่าแรงดึงสูงสุด (ทรงพล พิเชษฐ์วัฒนา, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541) การวิเคราะห์ความสูญเปล่าในกระบวนการผลิตของโรงงานผลิตชิ้นส่วนและประกอบรถยนต์บรรทุก โดยทำการศึกษาถึงปัญหาของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการพ่นสีรถยนต์ โดยใช้เครื่องมือทางด้านคุณภาพ และการออกแบบการทดลองในการแก้ปัญหา (พิพัฒน์ ศรีธรรมวงศ์, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541) การพัฒนาระบบควบคุมคุณภาพของโรงงานผลิตชิ้นส่วนยาง โดยนำระบบบริหารคุณภาพ ISO 9000 เข้ามาประยุกต์ใช้ในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในแต่ละกระบวนการผลิต เพื่อพัฒนาระบบการควบคุมคุณภาพในการที่จะนำไปสู่การประกันว่าชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปที่ผ่านการผลิตในแต่ละขั้นตอนจนถึงลูกค้าจะมีคุณภาพที่ดีขึ้น และใช้ QC 7 TOOLS และ FMEA ในการดำเนินการแก้ไขและป้องกัน และจัดทำมาตรฐานสำหรับการปฏิบัติงาน (ธนะศักดิ์ ทุเรียน, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543) การลดปัญหาส่งสินค้าล่าช้าในโรงงานเครื่องประดับ โดยทำการศึกษาขั้นตอนการไหลของงาน และทำการปรับปรุงในหลาย ๆ ด้าน ได้แก่ การทำให้ขั้นตอนการไหลของงานสั้นลงโดยทำการตัดงานที่ไม่ก่อให้เกิดคุณค่าบางส่วนออกไป พัฒนาปรับเปลี่ยนระบบเอกสารและการไหลเพื่อให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนขั้นตอนการไหลของงาน และมีการจัดทำแผนการผลิตเบื้องต้นเพื่อให้การผลิตเป็นไปตามแผนที่จัดทำ (นันทิยา จิรวรรณกูล, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543)