

การลดแม่แบบแก้วเสียในกระบวนการผลิตเลนส์พลาสติกโดยใช้แนวคิดซิกซ์ ซิกมา



นางสาวธีรพร เสนพรหม

สถาบันวิทยบริการ
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

GLASS-MOLD DEFECTIVE REDUCTION IN PLASTIC LENS MANUFACTURING
PROCESS USING SIX SIGMA APPROACH



Miss Teeraporn Senprom

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

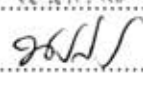
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering
Department of Industrial Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2007
Copyright of Chulalongkorn University

ธีรพร เสนพรหม : การลดแม่แบบแก้วเสียในกระบวนการผลิตเลนส์พลาสติกโดยใช้
แนวทฤษฎีซิกมา. (GLASS-MOLD DEFECTIVE REDUCTION IN PLASTIC LENS
MANUFACTURING PROCESS USING SIX SIGMA APPROACH) อ.ที่ปรึกษา: ผศ.
ดร.นภัตสวงศ์ โรจนโรวรรณ, 216 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์แนวทฤษฎีซิกมาเข้ามาใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตเลนส์
พลาสติก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดของเสียจากข้อตำหนิประเภทรอยขีดข่วนของแม่แบบแก้วที่ใช้
ในการผลิตเลนส์สายตาชนิดบางพิเศษ ซึ่งเป็นแม่แบบที่มีราคาสูงและไม่สามารถซ่อมแก้ไขได้เมื่อ
เกิดรอยตำหนิ จึงกระทบต่อต้นทุนในการผลิตเลนส์ค่อนข้างมาก

การดำเนินงานวิจัยประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอนตามระยะของซิกมา เริ่มจากระยะการ
นิยามปัญหาได้ทำการศึกษาสภาพปัญหา กำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการปรับปรุง ต่อมาใน
ระยะการวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา ได้วิเคราะห์ระบบการวัดสำหรับข้อมูลตามลักษณะซึ่งทำ
การวิเคราะห์ทั้งความถูกต้องและแม่นยำของระบบการวัด และทำการพิจารณาความสามารถของ
กระบวนการผลิตในปัจจุบัน จากนั้นทำการระดมสมองเพื่อหาปัจจัยนำเข้าที่อาจมีผลต่อการเกิดรอย
ขีดข่วนบนแม่แบบโดยใช้แผนภาพแสดงสาเหตุและผล และจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยนำเข้า
โดยใช้ตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล และการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและ
ผลกระทบ จากนั้นในระยะการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาได้ทำการออกแบบการทดลองเพื่อหา
ปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสัดส่วนของเสีย ระยะการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการได้ทำการ
ทดลองเพิ่มบางส่วนจากการออกแบบการทดลองก่อนหน้านี้ เพื่อให้ได้ระดับของปัจจัยที่เหมาะสม
ที่ทำให้ค่าสัดส่วนของแม่แบบเสียต่ำที่สุด และระยะสุดท้ายคือระยะการติดตามควบคุม ได้ทำการ
ทดสอบยืนยันผลเป็นเวลา 1 เดือน และจัดทำแผนควบคุมโดยประยุกต์ใช้เครื่องมือคุณภาพที่
เหมาะสมในการตรวจติดตามและควบคุมทั้งปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนองเพื่อรักษามาตรฐาน
หลังการปรับปรุง

ผลหลังการปรับปรุง พบว่าสัดส่วนของแม่แบบเสียลดลงจาก 0.25% หรือ 2,512 PPM
เหลือ 0.083% หรือ 826 PPM ซึ่งมีค่าลดลง 66.8% เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนของแม่แบบเสียก่อน
การปรับปรุง โดยระดับซิกมาของกระบวนการได้ปรับปรุงจาก 4.31 เป็น 4.65 และจากปริมาณการ
ผลิตที่พยากรณ์ไว้ พบว่าจะสามารถลดมูลค่าความสูญเสียรวมได้เท่ากับ 2,398,621 บาทต่อปี

ภาควิชา.....วิศวกรรมอุตสาหกรรม.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมอุตสาหกรรม.....
ปีการศึกษา.....2550.....
ลายมือชื่อนิสิต.....ธีรพร เสนพรหม.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

4870671421: MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEY WORD: SIX SIGMA/ ATTRIBUTE RESPONSE/ LOW DEFECTIVE RATE/ SCRATCH MOLD

TEERAPORN SENPROM: GLASS-MOLD DEFECTIVE REDUCTION IN PLASTIC LENS MANUFACTURING PROCESS USING SIX SIGMA APPROACH. THESIS ADVISOR: ASST.PROF.NAPASSAVONG ROJANAROWAN, Ph.D., 216 pp.

This thesis applies Six Sigma approach for improving plastic lens production with the aim to reduce proportion of defectives due to scratch of glass mold. In high index lens production, an expensive glass mold used is often scratched and unable to be reworked. Therefore, it considerably raises production cost.

The thesis follows Six Sigma's main five study stages. Firstly, in the Define phase, the problem and objective of the project are identified. Secondly, in the Measure phase, an attribute measurement system is assessed for accuracy and precision by performing an attribute agreement analysis and process capability of the process is determined. Then, the potential causes for the scratching problems are brainstormed by developing Cause and Effect Diagram. After that, the Key Process Input Variables (KPIVs) is prioritized and identified by applying Cause and Effect Matrix and Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). Next, in the Analysis phase, the Design of Experiment (DOE) is applied to test significance of factors affecting the problem. In the Improvement phase, the most suitable factor levels that offer the smallest number of defectives are discovered by adding partial experiments of the Alternate Fraction. Finally, in the Control phase, it employs the chosen levels in a pilot production for a month to confirm the expected result. Furthermore, to maintain standards of the improved production process, a control plan, which applies proper quality tools to monitor and control both KPIVs and responses, is additionally organized.

As a result, it is observed that the defective rate is decreased from 0.25% or 2,512 PPM to 0.083% or 826 PPM and the Sigma Level is improved from 4.31 to 4.65. In addition, according to the production forecast, the improvement can possibly save the company the production cost up to 2,398,621 baht annually.

Department: INDUSTRIAL ENGINEERING
Field of study: INDUSTRIAL ENGINEERING
Academic year: 2007

Student's signature: [Signature]
Advisor's signature: [Signature]

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี โดยความช่วยเหลือและเสียสละเวลาให้คำแนะนำจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภัสดวงค์ โรจนโรวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ระหว่างการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดีโดยตลอด ผู้วิจัยขอถือ โอกาสนี้กราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูติมา ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์จิรพัฒน์ เงามประเสริฐวงศ์ และอาจารย์อังศุมาลิน เสนงจันทร์ฉะไชย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่อง ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ โรงงานกรณีศึกษาเป็นอย่างสูงที่ให้โอกาสในการเข้าไปทำงานวิจัย รวมทั้งให้เข้าร่วมในการฝึกอบรมต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ยังให้ความร่วมมือในการเก็บข้อมูลและการทำการทดลองเป็นอย่างดี และขอขอบพระคุณคณะทำงานที่ช่วยในการระดมสมองให้ความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และให้คำแนะนำจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่มีได้กล่าวไว้ในที่นี้ด้วย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญภาพ	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ข้อมูลเบื้องต้นของโรงงานกรณีศึกษา	1
1.1.1 ผลิตภัณฑ์ของโรงงานกรณีศึกษา.....	1
1.1.2 แม่แบบแก้ว (Glass Mold) ที่ใช้ในกระบวนการผลิตเลนส์	3
1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	4
1.3 วัตถุประสงค์ในการวิจัย.....	7
1.4 ขอบเขตการศึกษาวิจัย	7
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
1.7 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	8
1.8 ระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย.....	11
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12
2.1 ซิกซ์ ซิกมา (Six Sigma).....	12
2.1.1 ความเป็นมาของซิกซ์ ซิกมา.....	12
2.1.2 ความหมายของซิกซ์ ซิกมา	12
2.1.3 ตัววัดระดับของคุณภาพ	14
2.2 การประยุกต์ใช้ซิกซ์ ซิกมา.....	15
2.2.1 ระบะนิยามปัญหา (Define Phase).....	16
2.2.2 ระบะการวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา (Measure Phase)	17
2.2.3 ระบะการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analysis Phase).....	27
2.2.4 ระบะการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ (Improvement Phase).....	32
2.2.5 ระบะการติดตามควบคุม (Control Phase)	34

2.3	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องแก้ว (Glass)	37
2.3.1	แก้ว (Glass).....	37
2.4	ทฤษฎีเกี่ยวข้องกับการโพลิเมอไรเซชันและโพลิเมอร์.....	40
2.4.1	กระบวนการโพลิเมอไรเซชัน (Polymerization)	40
2.4.2	ทฤษฎีเกี่ยวข้องกับการโพลิเมอร์ (Polymer).....	42
2.4.3	เทอร์โมเซตติงพลาสติกพลาสติก (Thermosetting Plastic หรือ Themosets).....	44
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	45
2.5.1	ซิกซ์ ซิกมา (Six Sigma) และการประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรม	45
2.5.2	การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลที่มีตัวแปรตอบสนองเป็นจำนวน ข้อบกพร่อง (Defectives)	49
2.5.3	การควบคุมทางสถิติ (Statistical Control)	53
2.5.4	รอยขีดข่วนบนแก้ว	55
บทที่ 3	ระบะนิยามปัญหา (Define Phase).....	58
3.1	บทนำ	58
3.2	ศึกษากระบวนการผลิต	58
3.3	ผังกระบวนการ (Process Map)	63
3.4	สภาพปัญหาในปัจจุบัน	64
3.5	กำหนดวัตถุประสงค์ เป้าหมายและตัวชี้วัด	66
3.6	จัดตั้งคณะทำงาน.....	67
3.7	สรุประบะนิยามปัญหา.....	67
บทที่ 4	ระบะการวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา (Measure Phase).....	68
4.1	บทนำ	68
4.2	การวิเคราะห์ความถูกต้องและแม่นยำของระบบการวัดแบบข้อมูลตามลักษณะ (Attribute Agreement Analysis)	68
4.2.1	การตรวจสอบแม่แบบและมาตรฐานการตรวจสอบตำหนักบนแม่แบบ.....	69
4.2.2	การวิเคราะห์ระบบการวัดแบบข้อมูลตามลักษณะ (Attribute Agreement Analysis)	71
4.3	สภาพปัญหาของแม่แบบเสียในปัจจุบัน	84
4.3.1	ความสามารถของกระบวนการ	84

4.3.2	ลักษณะของรอยตำหนิประเภทรอยขีดข่วน	85
4.4	การระดมสมองเพื่อหาปัจจัยนำเข้า (Key Process Input Variable หรือ KPIV)	86
4.4.1	การระดมความคิดผังก้างปลาหรือผังกสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)	87
4.4.2	ตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix)	88
4.4.3	การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode & Effects Analysis)	96
4.5	สรุปกระบวนการวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา.....	104
บทที่ 5	ระยะการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analysis Phase).....	105
5.1	บทนำ	105
5.2	การเลือกรูปแบบในการทดลอง.....	105
5.2.1	การทดสอบที่นำมาพิจารณา.....	106
5.2.2	การเปรียบเทียบขนาดตัวอย่างในการทดสอบ.....	106
5.3	การกำหนดระดับของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ	109
5.4	การออกแบบการทดลอง	115
5.5	ตัวแปรตอบสนอง (Response)	118
5.5.1	การกำหนดตัวแปรตอบสนอง (Response).....	118
5.5.2	การแปลงค่าตัวแปรตอบสนอง (Response)	118
5.6	ขนาดตัวอย่าง	119
5.7	การทำกรทดลอง	120
5.7.1	การเตรียมการทดลอง.....	120
5.7.2	ขั้นตอนในการทดลอง	121
5.8	ผลการทดลอง	123
5.9	การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง	124
5.9.1	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....	124
5.9.2	การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	127
5.10	สรุปผลการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา.....	131
บทที่ 6	ระยะการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ (Improvement Phase)	133
6.1	บทนำ	133

6.2 การออกแบบการทดลองเพิ่ม.....	133
6.3 การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง	139
6.3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....	139
6.3.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	142
6.4 การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ	147
6.5 สรุประยะการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ	150
บทที่ 7 ระยะเวลาติดตามควบคุม (Control Phase).....	151
7.1 บทนำ	151
7.2 การทดสอบยืนยันผล.....	151
7.2.1 การทำการทดลอง	152
7.2.2 การตรวจติดตามผลโดยใช้แผนภูมิควบคุม	153
7.2.3 การวิเคราะห์ผลและสรุปการทดสอบยืนยันผล.....	156
7.3 แผนการควบคุม	158
7.3.1 การควบคุมปัจจัยนำเข้า.....	158
7.3.2 การตรวจติดตามคุณภาพของแม่แบบ	169
7.4 ผลการปรับปรุง	171
7.4.1 ผลการควบคุมปัจจัยนำเข้า.....	171
7.4.2 ผลการปรับปรุงสัดส่วนแม่แบบเสีย.....	172
7.4.3 มูลค่าความสูญเสียหลังการปรับปรุง.....	174
7.5 สรุประยะการติดตามควบคุม	174
บทที่ 8 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	176
8.1 บทนำ	176
8.2 บทสรุประบายนิยามปัญหา.....	176
8.3 บทสรุประยะการวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา.....	177
8.4 บทสรุประยะการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา.....	178
8.5 บทสรุประยะการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ	179
8.6 บทสรุประยะการติดตามควบคุม.....	180
8.7 ข้อจำกัดในงานวิจัย	182
8.8 ข้อเสนอแนะ	183

รายการอ้างอิง	185
ภาคผนวก	188
ภาคผนวก ก	189
ภาคผนวก ข	196
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	216



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย	11
ตารางที่ 2.1 จำนวนของเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละ Sigma Quality Level.....	15
ตารางที่ 2.2 ขนาดสิ่งตัวอย่างในการประเมินผลระบบการตรวจสอบข้อมูลนับ.....	21
ตารางที่ 2.3 ค่าสมรรถภาพกระบวนการ (Process Capability, Cpk) ที่ระดับซิกมาต่างๆ	47
ตารางที่ 2.4 สมการการแปลงข้อมูลด้วยวิธีมาตรฐานและวิธีของ Freeman และ Tukey เมื่อ ปัจจัยผลตอบเป็นสัดส่วนของของเสียหรือจำนวนรอยตำหนิ	49
ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างของตารางที่ใช้ในการหาขนาดตัวอย่างสำหรับการทดลองเชิงแฟกทอ เรียลแบบสองปัจจัย ที่มีผลตอบเป็นสัดส่วนของเสีย.....	51
ตารางที่ 2.6 ค่าของกฎการหยุด (Stopping Rule; r) และค่าคงที่ b(r).....	53
ตารางที่ 4.1 เกณฑ์การยอมรับของระบบการวัด	72
ตารางที่ 4.2 ผลลัพธ์ของการตรวจสอบระบบการวัดแบบข้อมูลตามลักษณะ	73
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ระบบการวัดข้อมูลตามลักษณะ โดยโปรแกรม Minitab	74
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ระบบการวัดข้อมูลตามลักษณะ โดยโปรแกรม Minitab หลัง อบรมพนักงานใหม่	76
ตารางที่ 4.5 ผลลัพธ์ของการตรวจสอบระบบการวัดของตำหนิประเภทรอยขีดข่วน	79
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ระบบการวัดข้อมูลตามลักษณะ โดยโปรแกรม Minitab เฉพาะ ตำหนิประเภทรอยขีดข่วน.....	80
ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ระบบการวัดข้อมูลตามลักษณะ โดยโปรแกรม Minitab เฉพาะ ตำหนิประเภทรอยขีดข่วน หลังการอบรมพนักงานใหม่.....	82
ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause & Effect Matrix).....	91
ตารางที่ 4.9 ปัจจัยนำเข้า 15 ปัจจัยที่มีคะแนนสูงกว่า 100 คะแนน	93
ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode & Effects Analysis)	98
ตารางที่ 4.11 ตารางแสดงสาเหตุของปัญหาและค่า RPN	102
ตารางที่ 4.12 ตารางแสดงสาเหตุของปัญหาและค่า RPN ของปัจจัยที่เลือกทั้ง 5 ลำดับ.....	103
ตารางที่ 5.1 ผลการคำนวณขนาดตัวอย่างของการทดสอบสมมติฐานแบบ Two Proportions โดยโปรแกรม Minitab	107

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบขนาดตัวอย่างระหว่างการทดสอบสมมติฐานและการออกแบบการทดลอง.....	108
ตารางที่ 5.3 ปัจจัยและระดับของปัจจัยในการทำการทดลอง	109
ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบสมมติฐาน Z-test.....	113
ตารางที่ 5.5 รายละเอียดของการออกแบบการทดลองโดยโปรแกรม Minitab	116
ตารางที่ 5.6 ตารางการออกแบบการทดลอง (Design Matrix)	117
ตารางที่ 5.7 สมการการแปลงข้อมูลด้วยวิธีมาตรฐานและวิธีของ Freeman และ Tukey เมื่อปัจจัยผลตอบเป็นสัดส่วนของของเสีย.....	118
ตารางที่ 5.8 ตารางการออกแบบการทดลองและผลการแปลงข้อมูลด้วยวิธีมาตรฐานและวิธีของ Freeman และ Tukey.....	123
ตารางที่ 5.9 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab	128
ตารางที่ 6.1 โครงสร้างคู่แฝดแฝด (Alias Structure) ของการออกแบบการทดลอง 2_v^{5-1}	134
ตารางที่ 6.2 เมทริกซ์การออกแบบ (Design Matrix) ของการออกแบบการทดลองครั้งแรก.....	136
ตารางที่ 6.3 เมทริกซ์การออกแบบ (Design Matrix) การออกแบบการทดลองเมื่อเพิ่มการทดลอง.....	137
ตารางที่ 6.4 ผลการทดลองและการแปลงข้อมูลด้วยวิธีของ Freeman และ Tukey	138
ตารางที่ 6.5 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab	142
ตารางที่ 6.6 ผลการวิเคราะห์ Stepwise Regression ด้วยโปรแกรม Minitab	146
ตารางที่ 6.7 ระดับของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญที่เหมาะสมทั้ง 5 ปัจจัย	147
ตารางที่ 6.8 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลอง (เฉพาะปัจจัยที่มีนัยสำคัญ)	148
ตารางที่ 6.9 ผลการหาค่าผลตอบที่เหมาะสมที่สุด (Response Optimization) โดยโปรแกรม Minitab.....	149
ตารางที่ 7.1 ระดับของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญที่เหมาะสมทั้ง 5 ปัจจัยเพื่อใช้ในทดสอบยืนยันผล	151
ตารางที่ 7.2 ขอบเขตควบคุมของ CCC-r เมื่อ r เท่ากับ 1, 2 และ 3 ($p = 0.0025$)	155
ตารางที่ 7.3 แผนควบคุม (เฉพาะกระบวนการและปัจจัยที่เกี่ยวข้อง).....	168
ตารางที่ 7.4 การเปรียบเทียบผลของแม่แบบเสียก่อนและหลังการปรับปรุง.....	173
ตารางที่ 8.1 ระดับของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญที่เหมาะสมทั้ง 5 ปัจจัย	180

สารบัญญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 1.1 แม่แบบแก้วที่ใช้ในการหล่อ (Casting) เกลนส์	4
รูปที่ 1.2 เฟอร์เซนต์แม่แบบเสียในการผลิตเลนส์บางพิเศษรวมทุกเดือนในปี พ.ศ. 2549	5
รูปที่ 1.3 พารโตแสดงชนิดของแม่แบบเสียในการผลิตเลนส์ 1.6FSV ปีพ.ศ. 2549	6
รูปที่ 2.1 เส้นโค้งปกติ (Normal Curve)	13
รูปที่ 2.2 การควบคุมกระบวนการภายในขอบเขต 3 ซิกมา	14
รูปที่ 2.3 การกระจายแบบปกติ และการเคลื่อนตัวออกจากค่าเฉลี่ย 1.5σ	14
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้แผนภาพ SIPOC สำหรับวิเคราะห์	17
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)	23
รูปที่ 2.6 การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่ไม่มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย (A) และการออกแบบ เชิงแฟคทอเรียลที่มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย (B)	30
รูปที่ 2.7 การออกแบบ CCD สำหรับ $k = 2$ และ $k = 3$	33
รูปที่ 2.8 การออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคนสำหรับสามตัวแปร	34
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างแผนผังควบคุมคุณภาพกระบวนการ	35
รูปที่ 2.10 ฟังก์ชันของความแปรปรวนสำหรับขนาดตัวอย่าง $n=20$ และ $n=50$ ของสัดส่วน การแจกแจงทวินามเมื่อไม่มีการแปลงข้อมูล ((a) และ (d)) แปลงข้อมูลด้วยวิธี มาตรฐาน ((b) และ (e)) และวิธีของ Freeman และ Tukey ((c) และ (f))	50
รูปที่ 2.11 ฟังก์ชันของความแปรปรวนสำหรับจำนวนนับการแจกแจงปัวส์ซอง เมื่อไม่มีการ แปลงข้อมูล (a) แปลงข้อมูลด้วยวิธีมาตรฐาน (b) ใช้วิธีของ Freeman และ Tukey (c)	50
รูปที่ 2.12 ช่วงการออกแบบและตำแหน่งของเงื่อนไขของการผลิตในปัจจุบัน	51
รูปที่ 2.13 ลักษณะของรอยขีดข่วนเมื่อสไลด์เพชรด้วยความเร็วต่างๆที่ภาระคงที่	55
รูปที่ 2.14 การเกิดรอยขีดข่วนภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ (Hygrometric) และภาระต่างๆกัน	56
รูปที่ 2.15 รูปแบบรอยขีดข่วนบนแก้ว SLS เมื่อได้รับภาระทางเดียว (Monotonic Load)	56
รูปที่ 2.16 $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ Phase Diagram (% โมล) แสดงแก้ว SLS 4 ชนิดในการทดสอบ	57
รูปที่ 2.17 ความต้านทานการเกิดรอยขีดข่วนของแก้วแต่ละชนิด	57
รูปที่ 3.1 กาสเก็ต (Gasket) และตัวยึด (Clip) สำหรับประกอบแม่แบบ	59
รูปที่ 3.2 แม่แบบที่ประกอบเสร็จแล้ว	60
รูปที่ 3.3 การเติมโมโนเมอร์ในแม่แบบ	60

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.4 สปาตุลา (Spatula) ชนิดรูด (ก) และการรูดแม่แบบออกจากเลนส์ (ข).....	61
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการหล่อ (Casting) เลนส์บางพิเศษ (High Index Lens).....	62
รูปที่ 3.6 ผังกระบวนการ (Process Map) ของกระบวนการหล่อเลนส์	63
รูปที่ 3.7 เพอร์เซ็นต์แม่แบบเสียในการผลิตเลนส์บางพิเศษตั้งแต่เดือน ม.ค.ถึง ธ.ค. พ.ศ. 2549.....	64
รูปที่ 3.8 เพอร์เซ็นต์แม่แบบเสียในการผลิตเลนส์บางพิเศษรวมทุกเดือนในปี พ.ศ. 2549	65
รูปที่ 3.9 พารโตแสดงชนิดของแม่แบบเสียในการผลิตเลนส์ 1.6FSV ปี พ.ศ. 2549.....	66
รูปที่ 4.1 การตรวจสอบแม่แบบด้วยสายตา	69
รูปที่ 4.2 พื้นที่ในการตรวจสอบแม่แบบ	70
รูปที่ 4.3 กราฟ Attribute Agreement ของการตรวจสอบแม่แบบ	75
รูปที่ 4.4 กราฟ Attribute Agreement ของการตรวจสอบแม่แบบหลังอบรมพนักงานใหม่	77
รูปที่ 4.5 กราฟ Attribute Agreement ของการตรวจสอบแม่แบบเฉพาะตำแหน่งประเภทรอย ขีดข่วน	81
รูปที่ 4.6 กราฟ Attribute Agreement ของการตรวจสอบแม่แบบเฉพาะตำแหน่งประเภทรอยขีด ข่วนหลังการอบรมพนักงานใหม่	83
รูปที่ 4.7 แผนภูมิ p ของแม่แบบเสียในการผลิตเลนส์ 1.6FSV ตั้งแต่เดือน ม.ค. ถึง ธ.ค. ปี พ.ศ. 2549	84
รูปที่ 4.8 ชนิดของรอยขีดข่วนบนแม่แบบที่แบ่งตามความรุนแรงและรูปร่างของรอย	85
รูปที่ 4.9 พารโตแสดงชนิดของรอยขีดข่วนที่เกิดจากแม่แบบตัวอย่าง 140 ตัวอย่าง.....	86
รูปที่ 4.10 ผังก้างปลาจากการระดมความคิดเพื่อหาสาเหตุที่เป็นไปได้ของการเกิดรอยขีดข่วน บนแม่แบบ	89
รูปที่ 4.11 ผังก้างปลาจากการระดมความคิดเพื่อหาสาเหตุที่เป็นไปได้ของการเกิดการดีโอดล์ (Demold).....	90
รูปที่ 4.12 กราฟเรียงลำดับคะแนน Cause & Effect Matrix.....	93
รูปที่ 4.13 กราฟเรียงลำดับค่า RPN จาก FMEA	103
รูปที่ 5.1 การให้มีดกรีดในการแยกแม่แบบออกจากเลนส์.....	111
รูปที่ 5.2 สปาตุลาชนิดงัด (ก) และการแกะแม่แบบโดยใช้สปาตุลาชนิดงัด (ข).....	114
รูปที่ 5.3 สปาตุลาชนิดรูด (ก) และแกะแม่แบบโดยใช้สปาตุลาชนิดรูด (ข).....	114

ภาพประกอบ

หน้า

รูปที่ 5.4 ฟังก์ชันของความแปรปรวนของสัดส่วนการแจกแจงทวินาม (ที่ $n=50$) เมื่อ ไม่มี การแปลงข้อมูล (d) แปลงข้อมูลด้วยวิธีมาตรฐาน (e) และใช้วิธีของ Freeman และ Tukey (f)	119
รูปที่ 5.5 แผนภูมิการไหลของวิธีการทดลอง	122
รูปที่ 5.6 ผลลัพธ์ของการทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ	125
รูปที่ 5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและลำดับของการเก็บข้อมูล	126
รูปที่ 5.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและค่าที่ถูกผิด	127
รูปที่ 5.9 กราฟ Normal Plot ของปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง	129
รูปที่ 5.10 แผนภูมิพารโตของปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง	130
รูปที่ 5.11 ผลของปัจจัยหลักที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองคือสัดส่วนของแม่แบบเสียจากรอย ขีดข่วน	130
รูปที่ 5.12 ของอันตรกิริยาที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองคือสัดส่วนของแม่แบบเสียจากรอยขีด ข่วน	131
รูปที่ 6.1 ผลลัพธ์ของการทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ	140
รูปที่ 6.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและลำดับของการเก็บข้อมูล	141
รูปที่ 6.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและค่าที่ถูกผิด	141
รูปที่ 6.4 Normal Plot ของปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมี นัยสำคัญ	144
รูปที่ 6.5 แผนภูมิพารโตของปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมี นัยสำคัญ	144
รูปที่ 6.6 ผลของปัจจัยหลักที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองคือสัดส่วนของแม่แบบเสียจากรอย ขีดข่วน	145
รูปที่ 6.7 ผลของอันตรกิริยาที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองคือสัดส่วนของแม่แบบเสียจากรอย ขีดข่วน	145
รูปที่ 6.8 Optimization Plot จากโปรแกรม Minitab	150
รูปที่ 7.1 แผนภูมิการไหลของวิธีการทดลองในขั้นตอนยืนยันผล	154
รูปที่ 7.2 แผนภูมิการไหลแสดงวิธีการเก็บข้อมูลของแผนภูมิ CCC-2	157
รูปที่ 7.3 แผนภูมิ CCC-2 ของการทดสอบยืนยันผลระยะเวลา 1 เดือน	158
รูปที่ 7.4 ผลของอันตรกิริยาที่มีผลต่อสัดส่วนของแม่แบบเสียจากรอยขีดข่วน	160

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 7.5 ขั้นตอนการแก้ไขเมื่อเวลาเก็บงานในตู้อบไม่เป็นไปตามค่าที่กำหนด	161
รูปที่ 7.6 แผนภูมิ I-MR-R ช่วงการสร้างแผนภูมิควบคุม	163
รูปที่ 7.7 แผนภูมิ I-MR-R ช่วงการสร้างแผนภูมิควบคุมหลังกำจัดจุดออกนอกขอบเขต ควบคุมที่เป็นสาเหตุที่ระบุได้ (Assignable Cause)	164
รูปที่ 7.8 แผนภูมิ I-MR ช่วงการสร้างแผนภูมิควบคุม	164
รูปที่ 7.9 ขั้นตอนการแก้ไขเมื่ออุณหภูมิแม่แบบก่อนแกะคลิปลและกาสเก็ตไม่เป็นไปตามค่าที่ กำหนด	165
รูปที่ 7.10 ขั้นตอนการแก้ไขเมื่ออุณหภูมิก่อนการแกะแม่แบบไม่เป็นไปตามค่าที่กำหนด.....	166
รูปที่ 7.11 สปาทุลาชนิดรูป.....	167
รูปที่ 7.12 ขั้นตอนการบันทึกข้อมูลและการปฏิบัติการเมื่อพบจุดออกนอกขอบเขตควบคุม.....	170
รูปที่ 7.13 แผนภูมิ I-MR-R แสดงผลของการวัดอุณหภูมิก่อนการแกะคลิปลและกาสเก็ต	171
รูปที่ 7.14 แผนภูมิ I-MR แสดงผลของการวัดอุณหภูมิก่อนการแกะแม่แบบ	172
รูปที่ 7.15 แผนภูมิ CCC-2 หลังการปรับปรุงกระบวนการผลิต (เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551)	173

บทที่ 1

บทนำ

ในสภาวะการแข่งขันทางธุรกิจที่รุนแรง องค์กรต่างๆจึงมีความพยายามที่จะสร้างความพึงพอใจและตอบสนองความต้องการของลูกค้า โดยการผลิตสินค้าที่มีคุณภาพและต้นทุนต่ำ เช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรมกรณีศึกษาซึ่งเป็นโรงงานผลิตเลนส์สายตาพลาสติก ที่แม้ว่าไม่ได้เป็นอุตสาหกรรมที่มีการเติบโตทางการตลาดสูงมากนัก แต่ปริมาณการใช้เลนส์ของโลกก็ไม่ได้ลดน้อยลงเลย ในแต่ละปีจะมีความต้องการใช้เลนส์สายตามากถึง 800-850 ล้านชิ้นทั่วโลก และพบว่าคู่แข่งรายใหญ่ในตลาดโลกรวมทั้งในประเทศไทยมีจำนวนไม่น้อยอีกด้วย ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพจึงเป็นสิ่งที่อุตสาหกรรมนี้ควรให้ความสำคัญ เพื่อเพิ่มความสามารถในการแข่งขัน และสร้างความมั่นใจในคุณภาพของสินค้าให้กับลูกค้า

ในการผลิตเลนส์สายตาพลาสติกด้วยวิธีการหล่อ (Casting) ของโรงงานกรณีศึกษา วัตถุประสงค์ หรืออุปกรณ์ที่สำคัญมากอย่างหนึ่งในการผลิตคือแม่แบบแก้ว (Glass Mold) ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีราคาค่อนข้างสูงและง่ายต่อการเกิดตำหนิในระหว่างกระบวนการผลิต โดยแม่แบบที่มีตำหนินั้นจะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของตัวเลนส์ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการประยุกต์ใช้แนวคิดซิกซ์ ซิกมา (Six Sigma) มาช่วยปรับปรุงกระบวนการและช่วยลดปริมาณงานเสียที่เกิดขึ้นกับตัวแม่แบบ เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพอย่างมากในการปรับปรุงคุณภาพและลดต้นทุนในกระบวนการผลิต โดยการนำหลักการทางสถิติมาใช้วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มาจากกระบวนการ เพื่อหาสาเหตุที่แท้จริงและนำไปสู่การแก้ปัญหาที่เกิดผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และลูกค้า ซึ่งการลดปริมาณแม่แบบเสียที่เกิดขึ้นจากการผลิตนี้จะช่วยให้สามารถลดปริมาณเลนส์เสียที่เกิดขึ้นจากตำหนิบนแม่แบบ รวมทั้งยังเป็นการช่วยลดต้นทุนในการผลิตลงอีกด้วย

1.1 ข้อมูลเบื้องต้นของโรงงานกรณีศึกษา

1.1.1 ผลิตภัณฑ์ของโรงงานกรณีศึกษา

โรงงานผลิตเลนส์ซึ่งเป็นโรงงานกรณีศึกษานี้ทำการผลิตเลนส์พลาสติก มีผลิตภัณฑ์หลักแบ่งตามลักษณะต่างๆหลายประเภท ดังนี้

1.1.1.1 แบ่งตามชนิดของโมโนเมอร์ (Monomer) ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต หรือตามลักษณะของกระบวนการผลิต ได้ 3 ประเภท ซึ่งกระบวนการผลิตจะแยกออกจากกันอย่างสิ้นเชิง ดังนี้

- เลนส์ธรรมดา (Orma หรือ CR-39) เป็นเลนส์ที่ผลิตจากโมโนเมอร์ที่มีดัชนีการหักเหของแสง (Index) ที่ 1.5 ใช้ในการผลิตเลนส์สายตาพลาสติกที่ใช้กันอยู่ทั่วไป
- เลนส์บางพิเศษ (High Index Lens) เป็นเลนส์ที่ผลิตจากโมโนเมอร์ที่มีดัชนีหักเหของแสงสูงกว่าเลนส์ธรรมดา เมื่อผลิตเป็นเลนส์จึงได้เลนส์ที่บางเหมาะที่จะใช้ทำเลนส์สายตาสำหรับผู้ที่มีสายตาผิดปกติมากๆ เช่น สายตาสั้นมากหรือยาวมาก โดยเลนส์บางพิเศษของโรงงานกรณีศึกษาที่ผลิตจากโมโนเมอร์ 2 ชนิด คือ MR8 และ MR7 ซึ่งมีดัชนีการหักเหของแสงที่ 1.6 และ 1.67 ตามลำดับ
- เลนส์ทนต่อแรงกระแทกสูง (Polycarbonate Lens) เป็นเลนส์ที่ผลิตจากโมโนเมอร์ที่ทำให้เลนส์จะมีความเหนียว ไม่แตกหักง่ายและไม่เกิดคมเมื่อแตก โดยการผลิตเลนส์ชนิดนี้จะใช้วิธีการฉีด (Injection) ซึ่งต่างกับเลนส์ 2 ประเภทแรก ที่ทำการผลิตด้วยวิธีหล่อ (Casting)

1.1.1.2 แบ่งตามลักษณะรูปแบบของผลิตภัณฑ์ ได้ 2 ประเภท

- เลนส์กึ่งสำเร็จรูป (Semi-Finished Lens) ซึ่งเป็นเลนส์ที่มีการทำความโค้งของผิวเลนส์ด้านนอกเพียงด้านเดียว ลูกค้านำเลนส์กึ่งสำเร็จรูปนี้ไปทำการผลิตต่อตามค่าสายตาที่ต้องการต่อไป
- เลนส์สำเร็จรูป (Finished Lens) เป็นเลนส์สายตาที่มีความโค้งทั้งสองด้านได้ค่าสายตาตามมาตรฐาน ลูกค้านำไปประกอบแว่นตาได้ทันที โดยเลนส์สำเร็จรูปนี้มีทั้งที่ไม่เคลือบผิวและเคลือบผิว ซึ่งการเคลือบผิวที่เคลือบผิวมี 2 ชนิดคือ เลนส์เคลือบแข็ง (Hard Coated) คือเลนส์ที่ทำการเพิ่มคุณสมบัติพิเศษด้วยการเคลือบแข็งบนผิวเลนส์เพื่อให้สามารถทนทานต่อการขีดข่วน และเลนส์เคลือบตัดแสงสะท้อน (Multicoated) คือเลนส์ที่ทำการเพิ่มคุณสมบัติพิเศษด้วยการเคลือบสารเคมีเพื่อตัดเงาหรือแสงสะท้อนบนผิวเลนส์ ซึ่งเลนส์ที่นำมาเคลือบตัดแสงสะท้อนนั้นจะเป็นเลนส์ที่ผ่านการเคลือบผิวแข็งก่อนด้วย (Hard Multicoated)

1.1.1.3 แบ่งประเภทตามการใช้งาน ได้อีก 3 ประเภทคือ

- เลนส์ชั้นเดียว (Single Vision Lens) เป็นเลนส์สำหรับสายตาสั้นหรือสายตายาวอย่างใดอย่างหนึ่ง ซึ่งอาจจะมีสายตาเอียงร่วมอยู่ด้วยก็ได้
- เลนส์สองชั้น (Bifocal Lens) เป็นเลนส์ที่ใช้สำหรับการมองเห็นสองระยะคือระยะไกลและระยะอ่านหนังสือ ซึ่งมักจะพบในผู้สูงอายุ เลนส์สองชั้นนี้จะใช้เทคโนโลยีการผลิตในการนำชั้นเลนส์หลายชั้นมาประกอบกันเป็นตัวเลนส์ ในเนื้อเลนส์จึงมีรอยต่อของการมองเห็นทั้งสองช่วง
- เลนส์หลายชั้นไร้รอยต่อ (Progressive Lens) เป็นเลนส์ที่ใช้สำหรับค่าสายตา 2 ค่า เช่นเดียวกับเลนส์สองชั้น แต่เลนส์หลายชั้นไร้รอยต่อ (Progressive Lens) นี้จะใช้

เทคโนโลยีการผลิต ออกแบบความโค้งของผิวเลนส์ในการกำหนดค่าสายตาให้ค่อยๆมีการปรับระยะการมองระหว่างการมองใกล้และมองไกล ดังนั้นเนื้อเลนส์ของเลนส์ชนิดนี้จะไม่เห็นรอยต่อเลย นอกจากนี้ผู้ใช้จะรู้สึกสบายตากว่าเลนส์สองชั้นเพราะสามารถมองเห็นได้ชัดในทุกระยะ โดยไม่เห็นช่วงรอยต่อของเลนส์

1.1.2 แม่แบบแก้ว (Glass Mold) ที่ใช้ในกระบวนการผลิตเลนส์

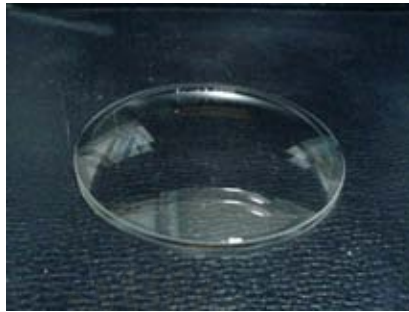
ในการผลิตเลนส์ธรรมดา (Orma หรือ CR-39) และเลนส์บางพิเศษ (High Index Lens) นั้น กระบวนการผลิตจะใช้วิธีการหล่อ (Casting) ซึ่งวัตถุดิบที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ต้องใช้ในการผลิตคือ แม่แบบ (Mold) ซึ่งแม่แบบที่ใช้ในการผลิตเลนส์นั้นทำจากแก้วชนิดพิเศษที่มีความแข็งแรงสูงกว่าแก้วธรรมดาเนื่องจากเป็นแก้วที่ผ่านกระบวนการเพิ่มความแข็งแรงให้กับแก้ว แต่ยังคงมีลักษณะที่ง่ายต่อการขัดข่วนหรือเกิดตำหนิระหว่างการผลิต

แม่แบบที่ใช้ในการผลิตเลนส์บางพิเศษจะมีราคาสูงและมีความแข็งแรงกว่าแม่แบบของเลนส์ธรรมดาหลายเท่า ซึ่งแม่แบบที่ใช้ผลิตเลนส์บางพิเศษนั้นเป็นแก้วที่ผ่านกระบวนการเพิ่มความแข็งแรงโดยการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) เรียกอีกอย่างหนึ่งว่ากระบวนการเคมีเทมเปอร์ (Chemical Tempering) หรือการเพิ่มความแข็งแรงโดยเคมี (Chemical Strengthening) ที่ผิวแก้ว เป็นการทำให้เกิดความเค้นอัดที่ผิวของแก้วโดยการแลกเปลี่ยนไอออน แก้วที่มีไอออนขนาดเล็กจะถูกจุ่มลงในสารละลายที่มีไอออนขนาดใหญ่และไอออนขนาดใหญ่จะเข้าไปแทนที่ไอออนขนาดเล็ก เป็นผลทำให้ผิวนอกของแก้วเกิดความเค้นแบบอัด และภายในแก้วจะเกิดความเค้นแบบดึงขึ้นทำให้แก้วแข็งแรงขึ้น (ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, 2549) ส่วนแม่แบบของเลนส์ธรรมดานั้นจะผ่านกระบวนการเพิ่มความแข็งแรงด้วยกระบวนการเทมเปอร์ (Tempered glass) ซึ่งเป็นวิธีการทำให้แก้วแข็งแรงขึ้นโดยการให้ความร้อนกับแก้วจนถึงช่วงอุณหภูมิเทมเปอร์ (620-640 °C) จากนั้นทำให้แก้วเย็นตัวอย่างรวดเร็วหรือชุบแข็งที่บริเวณผิวหน้าของแก้วโดยใช้อากาศ

1.1.2.1 ชนิดของแม่แบบ

แม่แบบที่ใช้ทำการผลิตเลนส์ ทั้งเลนส์บางพิเศษและเลนส์ธรรมดาสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะของความโค้งคือ

- Spheric Mold คือแม่แบบที่มีความโค้งเพียงค่าเดียว แบ่งเป็น Spheric Concave คือแม่แบบตัวลบหรือแม่แบบที่ใช้งานด้านเว้า และ Spheric Convex คือแม่แบบตัวบวกหรือแม่แบบที่ใช้งานด้านนูน
- Toric Mold คือแม่แบบที่มีค่าความโค้งสองค่า ซึ่งมีเฉพาะแม่แบบตัวบวก (Convex Mold) เท่านั้น แม่แบบชนิดนี้จะใช้ในการผลิตเลนส์สายตาเอียง



รูปที่ 1.1 แม่แบบแก้วที่ใช้ในการหล่อ (Casting) เลนส์

1.1.2.2 ประเภทของตำหนิบนตัวแม่แบบ

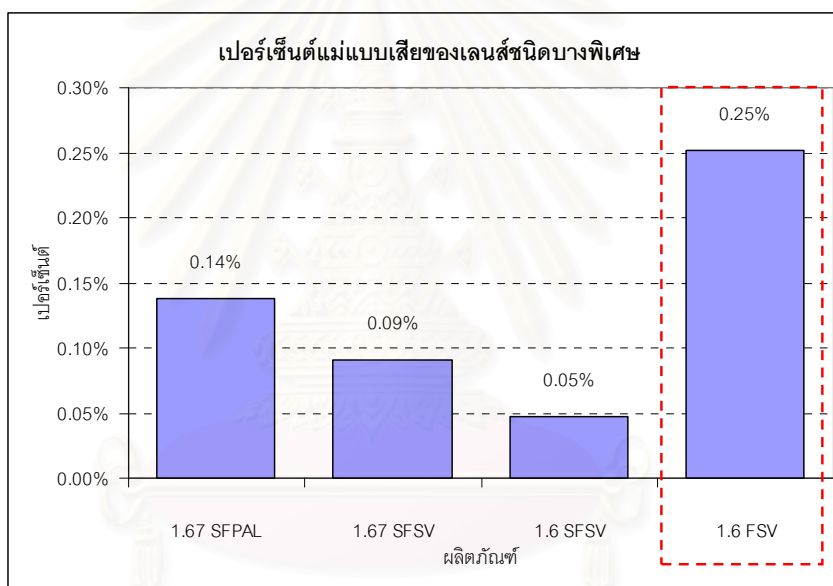
ตำหนิ (Defect) ในงานวิจัยนี้หมายถึง ตำหนิหรือข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับแม่แบบ ซึ่งเป็นตำหนิที่ก่อให้เกิดงานเสียเท่านั้น โดยประเภทของตำหนิบนแม่แบบที่สามารถตรวจพบด้วยการตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Inspection) แบ่งออกเป็น 8 ประเภท ดังนี้

- Scratch คือ รอยขีดข่วนบนผิวแม่แบบ
- Pit คือ ตำหนิที่มีลักษณะจุดอยู่บนผิวแม่แบบ
- Stain คือ รอยเปื้อนจากน้ำยาล้างแม่แบบ
- Haze คือ ลักษณะรอยเปื้อนที่เป็นหมอก
- Straight Wave คือ ตำหนิลักษณะเป็นคลื่นบนหน้าแม่แบบ
- Chip คือ แม่แบบที่มีรอยแตกบิ่นบริเวณขอบ
- Delaminate คือ แม่แบบลอก
- Broken คือ แม่แบบแตก

1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

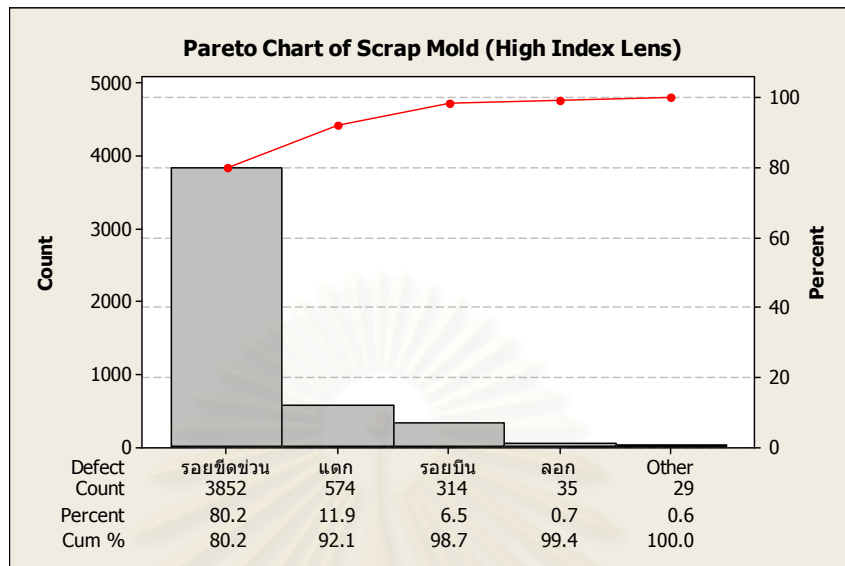
ในการผลิตเลนส์ด้วยวิธีการหล่อนั้น แม่แบบแก้วจะต้องมีการเวียมนใช้งานในกระบวนการ และในระหว่างกระบวนการผลิตนี้แม่แบบอาจเกิดการเสียหายหรือเกิดตำหนิขึ้นได้ ซึ่งแม่แบบที่เป็นตำหนิจะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของตัวเลนส์จึงไม่สามารถนำไปใช้งานต่อได้ นอกจากนี้ราคาของแม่แบบแต่ละตัวนั้นค่อนข้างสูง โดยเฉพาะแม่แบบที่ใช้ในการผลิตเลนส์บางพิเศษ (High Index Lens) ที่นอกจากราคาสูงกว่าแม่แบบของเลนส์ธรรมดาแล้ว ยังไม่สามารถทำซ่อมแก้ไข (Rework) ได้อีกด้วย เมื่อเกิดตำหนิต้องทำการทิ้ง (Scrap) เท่านั้น ซึ่งทำให้เกิดความสูญเสียที่มีผลอย่างมากต่อต้นทุนในการผลิต

จากข้อมูลในปีพ.ศ. 2549 ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงธันวาคม ของกระบวนการผลิตเลนส์บางพิเศษ (High Index Lens) ในผลิตภัณฑ์หลัก 4 ชนิดคือ 1.67SFPAL 1.67SFSV 1.6SFSV และ 1.6FSV พบว่าเปอร์เซ็นต์แม่แบบเสียของผลิตภัณฑ์ 1.6FSV (Index 1.6 Finish Single Vision) มีปริมาณสูงที่สุดในทุกๆเดือน โดยมีเปอร์เซ็นต์แม่แบบเสียรวมทั้งปีคิดเป็น 0.25% ของแม่แบบที่ใช้ผลิตเลนส์ 1.6FSV ทั้งหมด ดังรูปที่ 1.2 แม้ตัวเลขของแม่แบบเสียจะเป็นตัวเลขที่ค่อนข้างต่ำ แต่หากคิดมูลค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการเกิดแม่แบบเสีย พบว่ามูลค่าความสูญเสียรวมของการเกิดแม่แบบเสียนี้มีมูลค่าสูงถึง 3,072,302 บาท ในปี พ.ศ. 2549 ดังนั้นการวิจัยนี้จึงได้มุ่งทำการศึกษาในการลดจำนวนแม่แบบเสียของแม่แบบที่ใช้ผลิตเลนส์บางพิเศษของผลิตภัณฑ์ 1.6FSV เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์ของแม่แบบเสียที่สูงกว่าผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นและยังมีมูลค่าความสูญเสียที่สูงอีกด้วย



รูปที่ 1.2 เปอร์เซ็นต์แม่แบบเสียในการผลิตเลนส์บางพิเศษรวมทุกเดือนในปี พ.ศ. 2549

นอกจากนี้ยังพบว่าแม่แบบเสียที่เกิดขึ้นของผลิตภัณฑ์ 1.6FSV ในปี พ.ศ. 2549 ทั้งปี มีค่าที่เกิดขึ้นนั้น 80.2% เป็นตำหนิประเภทรอยขีดข่วนบนตัวแม่แบบ (Scratch Mold) ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ที่สูงมาก ดังแสดงด้วยพาเรโตในรูปที่ 1.3 ดังนั้นการลดจำนวนแม่แบบเสียจึงทำการมุ่งเน้นในการแก้ปัญหาในเรื่องตำหนิรอยขีดข่วนบนตัวแม่แบบนี้



รูปที่ 1.3 พารโตแสดงชนิดของแม่แบบเสียในการผลิตเลนส์ 1.6FSV ปีพ.ศ. 2549

เมื่อทำวิเคราะห์สาเหตุของการเกิดรอยขีดข่วนบนแม่แบบเบื้องต้น พบว่ารอยขีดข่วนบนแม่แบบมีสาเหตุที่เป็นไปได้หลายสาเหตุ โดยอาจเกิดได้จากทั้งสาเหตุที่เกิดจากวิธีการทำงานของพนักงาน จากเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทำงาน หรือเกิดจากเงื่อนไขในการทำงานที่ไม่เหมาะสม โดยเฉพาะเงื่อนไขเรื่องอุณหภูมินั้นมีผลอย่างมากต่อการเกิดรอยขีดข่วนบนแม่แบบ จึงเห็นว่าการนำแนวคิดซิกซ์ ซิกมาเข้ามาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงเพื่อลดแม่แบบเสียจากการเกิดรอยขีดข่วนนี้ จึงเป็นวิธีการที่เหมาะสม เนื่องจากซิกซ์ ซิกมาเป็น การแก้ไขปัญหาและปรับปรุงกระบวนการ โดยการนำเอาวิธีการทางสถิติ เช่น การทดสอบสมมติฐาน และการออกแบบการทดลอง (DOE) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูล นอกจากนี้การแก้ปัญหาของซิกซ์ ซิกมา ยังมีขั้นตอนการกรองสาเหตุของปัญหาอย่างมีระบบอีกด้วย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3 วัตถุประสงค์ในการวิจัย

เพื่อลดสัดส่วนของเสียจากข้อตำหนิประเภทรอยขีดข่วน (Scratch) ของแม่แบบแก้ว (Glass Mold) ที่ใช้การผลิตเลนส์สายตาชนิดบางพิเศษ (High Index Lens)

1.4 ขอบเขตการศึกษาวิจัย

1. งานวิจัยนี้ทำการศึกษาวิจัยเฉพาะแม่แบบแก้วที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์เลนส์สำเร็จรูปประเภทเลนส์ชั้นเดียวที่มีค่าดัชนีการหักเหของแสง 1.6 หรือ 1.6FSV (Finished Single Vision) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีเปอร์เซ็นต์แม่แบบเสียสูงที่สุด
2. ทำการศึกษาวิจัยเพื่อลดตำหนิประเภทรอยขีดข่วนบนตัวแม่แบบ (Scratch Mold) เท่านั้น
3. ทำการศึกษาระบวนการผลิตเลนส์เฉพาะในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานแม่แบบ คือ กระบวนการหล่อเลนส์ (Casting) เท่านั้น ไม่รวมถึงกระบวนการเคลือบเลนส์เนื่องจากกระบวนการที่นอกเหนือจากการหล่อเลนส์ไม่มีความเกี่ยวข้องกับการใช้งานของแม่แบบ และไม่รวมถึงกระบวนการผลิตแม่แบบเนื่องจากโรงงานกรณีศึกษาไม่ได้ทำการผลิตแม่แบบที่ใช้ในการผลิตเลนส์บางพิเศษเอง
4. ดัชนีที่ใช้วัดปริมาณแม่แบบเสียใช้ในหน่วยเปอร์เซ็นต์แม่แบบเสีย
5. ใช้โปรแกรม MINITAB Release 15 ช่วยในการคำนวณข้อมูลที่ต้องใช้การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สมการความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของเสียกับปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อสัดส่วนของเสียประเภทรอยขีดข่วนบนตัวแม่แบบแก้ว
2. ระดับของปัจจัยนำเข้าที่เหมาะสมที่ทำให้สัดส่วนของเสียประเภทรอยขีดข่วนบนตัวแม่แบบแก้วลดลงมากที่สุด

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ลดปริมาณแม่แบบเสียประเภทรอยขีดข่วนบนตัวแม่แบบในกระบวนการผลิตเลนส์บางพิเศษ (High Index Lens) ซึ่งจะส่งผลให้สามารถลดปริมาณแม่แบบเสียโดยรวมในกระบวนการผลิตเลนส์บางพิเศษ (High Index Lens) ได้
2. ลดต้นทุนความสูญเสียจากการทิ้งแม่แบบแก้วที่มีรอยขีดข่วน
3. ลดปริมาณเลนส์เสียที่เกิดขึ้นจากตำหนิบนตัวแม่แบบแก้ว
4. สามารถนำการแก้ปัญหานี้มาประยุกต์ใช้เพื่อเป็นแนวทางในการลดปริมาณแม่แบบเสียจากการขีดข่วนที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์เลนส์ชนิดอื่นๆต่อไป

1.7 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การลดปริมาณของเสียประเภทรอยขีดข่วนบนตัวแม่แบบ (Scratch Mold) ได้ดำเนินการวิจัยตามแนวทางทางของซิกซ์ ซิกมาทั้ง 5 ระยะ ดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง
2. ระบายนิยามปัญหา (Define Phase)
 - 2.1 ศึกษากระบวนการผลิตเลนส์สายตานิคมบางพิเศษ (High Index Lens) และการผลิตในกระบวนการเกี่ยวข้องกับแม่แบบแก้ว รวมทั้งรวบรวมข้อมูลศึกษาสภาพปัญหาที่เกิดขึ้นในปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับแม่แบบเสีย และทำผังกระบวนการ (Process Map)
 - 2.2 กำหนดปัญหา วัตถุประสงค์ เป้าหมาย ตัวชี้วัด และระยะเวลาของโครงการ
 - 2.3 จัดตั้งคณะทำงานเพื่อเข้าร่วมในโครงการ โดยการกำหนดคณะทำงานจะทำการคัดเลือกจากผู้ที่มีความรู้ ความชำนาญในส่วนของกระบวนการที่เลือกทำการปรับปรุงคือกระบวนการหล่อเลนส์บางพิเศษ
3. ระยะการวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา (Measure Phase)
 - 3.1 เก็บรวบรวมข้อมูลและพิจารณาความสามารถของกระบวนการผลิตในปัจจุบัน เช่นปริมาณแม่แบบเสียปัจจุบัน ลักษณะของตำหนิบนตัวแม่แบบ หรือธรรมชาติของงานเสียที่เกิดขึ้นเพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์หาสาเหตุ

3.2 วิเคราะห์ความถูกต้องและแม่นยำของระบบการวัด (Gauge R&R) ในการตรวจสอบแม่แบบด้วยสายตา

3.3 ระดมสมองเพื่อหาปัจจัยนำเข้า (Key Process Input Variable หรือ KPIV)

3.3.1 หาสาเหตุที่เป็นไปได้ของรอยขีดข่วนบนแม่แบบโดยใช้ผังก้างปลา (Cause & Effect Diagram)

3.3.2 กำหนดปัจจัยนำเข้าที่อาจมีผล (KPIV) โดยใช้ตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause & Effect Matrix) และทำการเรียงลำดับความสำคัญของปัจจัยโดยการระดมสมองเพื่อทำการตัดปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลน้อยต่อการเกิดรอยขีดข่วนบนแม่แบบ และทำการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode & Effects Analysis) โดยใช้การระดมสมองจากสมาชิกในทีมและพนักงานที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งใช้ข้อมูลทางสถิติที่มีอยู่ด้วย

3.4 วางแผนการทดลองและการเก็บข้อมูลในขั้นตอนต่อไป

4. ระยะการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analysis Phase)

4.1 นำปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ (KPIV) ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA) ในขั้นตอนก่อนหน้ามาทำการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment หรือ DOE) เพื่อหาปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อสัดส่วนของเสีย

4.2 กำหนดปัจจัยและพิจารณาปัญหาข้อจำกัดต่างๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อ การทดลอง และกำหนดระดับของปัจจัยที่จะนำมาทดลองแต่ละตัวตามความเหมาะสม

4.3 พิจารณาเลือกรูปแบบการทดลอง และขนาดตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง จากนั้นวางแผนการทดลองโดยกำหนดขั้นตอนการทดลอง และวิธีการเก็บข้อมูลของแม่แบบเสีย

4.4 ทำการทดลองตามแผนที่ได้กำหนดไว้

4.5 สรุปผลและวางแผนขั้นตอนต่อไป

5. ระยะการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ (Improvement Phase)

5.1 หลังจากทำการทดลองปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญ ด้วยการออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลสองระดับแบบเพิ่มจุดศูนย์กลาง (Center-Point) จากนั้นวิเคราะห์ข้อมูลที่มีอยู่และเลือกทำการทดลองเพิ่มโดยคำนึงถึงความเหมาะสมของข้อมูลและข้อจำกัดที่มีอยู่ด้วย เช่น หากพบปัจจัยที่แสดงผลตอบที่มีลักษณะเป็นส่วนโค้ง (Curvature) จะนำไปออกแบบการทดลองเพื่อการกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อไป โดยการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology, RSM) หรือหากการออกแบบการทดลองไม่สามารถสรุปผลของการคอนฟิวต์ได้ จะทำการการทดลองเพิ่มหรือการ Fold Over

- 5.2 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
 - 5.3 จากผลการทดลอง ทำการกำหนดปัจจัยและระดับที่สามารถปรับปรุงปริมาณแม่แบบเสียให้ลดลงได้เพื่อนำไปปรับปรุงจริงในกระบวนการผลิตในขั้นตอนต่อไป
6. ระยะเวลาติดตามควบคุม (Control Phase)
 - 6.1 ทำการทดสอบยืนยันผลโดยการเก็บข้อมูลหลังการใช้ระดับของปัจจัยที่สรุปได้จากการทดลองเป็นระยะเวลา 1 เดือน
 - 6.2 จัดทำแผนควบคุม (Control Plan) โดยพิจารณาถึงลักษณะและข้อจำกัดของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญที่จะทำการควบคุมด้วย
 - 6.3 พิจารณาเลือกแผนภูมิควบคุมที่เหมาะสมกับตัวแปรนั้นๆ
 - 6.4 กำหนดวิธีการวัด ขนาดตัวอย่าง และความถี่ในการวัด
 - 6.5 สรุปผลการปรับปรุงที่ได้ โดยพิจารณาเปรียบเทียบผลการปรับปรุงจากสัดส่วนแม่แบบเสียที่สามารถลดลงได้ และพิจารณามูลค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการเกิดแม่แบบเสียหลังการปรับปรุงด้วย
 - 6.6 จัดทำเป็นมาตรฐานในการผลิต
 7. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ
 8. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.8 ระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอน	ระยะเวลาดำเนินงาน (เดือน)											
	เม.ช.	พ.ค.	มี.ช.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	
1. ระยะเวลาศึกษาข้อมูล และระยะการนิยามปัญหา (Define : D)	■											
2. ระยะการวัดและเก็บข้อมูลเกี่ยวกับสภาพปัญหา (Measure : M)				■								
3. ระยะการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analysis: A)					■							
4. ระยะการปรับปรุงแก้ไขปัญหา (Improve: I)								■				
5. ระยะการตรวจติดตามควบคุม และปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง (Control: C)										■		
6. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ											■	
7. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์									■			

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ซิกซ์ ซิกมา (Six Sigma)

2.1.1 ความเป็นมาของซิกซ์ ซิกมา

จุดกำเนิดของวิธีซิกซ์ ซิกมา เริ่มขึ้นเมื่อ บริษัท โมโตโรล่า (Motorola) ได้พัฒนาและสร้างโครงการเพื่อปรับปรุงคุณภาพสินค้า ภายใต้การนำของ มิเกล เจ แฮร์รี่ (Mikel J. Harry) ในปี 1988 บริษัท โมโตโรล่า ได้ตีพิมพ์และเปิดเผยวิธีปรับปรุงคุณภาพของสินค้าวิธีใหม่ที่ชื่อว่า “วิธีซิกซ์ ซิกมา (Six Sigma)” คำว่า ซิกซ์ ซิกมา หรือตัวอักษรกรีก คือ σ ที่มีความหมายนัยทางสถิติคือระดับความผันแปรของกระบวนการ ซึ่งบริษัท โมโตโรล่า ได้รับผลสำเร็จที่วัดออกมาเป็นตัวเงินมหาศาลจากการดำเนินงานตามแนวทางของซิกซ์ ซิกมา

ต่อมาบริษัทจีอี (GE) โดย Jack Welch ปรับเปลี่ยนรูปแบบดั้งเดิมของซิกซ์ ซิกมา ให้เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้มากขึ้น โดยปรับแก้รูปแบบซิกซ์ ซิกมา ของโมโตโรล่าให้เป็นลักษณะของ Project Based Approach คือเน้นทำเป็นเรื่องๆ ในระยะเวลาที่กำหนดไว้ (โดยประมาณ 6 เดือน) นอกจากนี้ยังเพิ่มเติมในส่วนของการบริหาร โครงการ และแนวทางในการมุ่งใจให้ผู้บริหารทุกระดับเล็งเห็นความสำคัญของการดำเนินงาน และยังเพิ่มในส่วนของวิธีการประเมินผลสำเร็จที่สามารถวัดผลออกมาได้ในรูปของการเงินที่ดีขึ้นของบริษัท ด้วยรูปแบบใหม่ของซิกซ์ ซิกมา จึงเป็นที่นิยมมากในบรรดาบริษัททั่วไป โดยในปัจจุบันเทคนิคของซิกซ์ ซิกมา ไม่ได้จำกัดการประยุกต์ใช้เฉพาะกับบริษัทขนาดใหญ่เท่านั้นแต่นำไปประยุกต์ใช้กับภาคธุรกิจมากมายไม่ว่าจะเป็น SMEs องค์กรขนาดใหญ่ กระบวนการผลิต ตลอดจนงานบริการ โดยลักษณะการประยุกต์ใช้แตกต่างกันบ้างตามรูปแบบของธุรกิจ

2.1.2 ความหมายของซิกซ์ ซิกมา

ได้มีหลายๆท่าน ได้กล่าวถึงความหมายของซิกซ์ ซิกมาได้ ดังนี้

Breyfogle (2001) ได้ให้ความหมายของซิกซ์ ซิกมาไว้ว่า ซิกซ์ ซิกมาคือส่วนผสมอันกลมกลืนระหว่างความฉลาดหลายๆด้านในการบริหารองค์กร โดยการพัฒนากลวิธีทางสถิติเพื่อใช้เป็นอาวุธขององค์กร โดยเป้าหมายสูงสุดของซิกซ์ ซิกมานี้ ได้เน้นไปที่การนำเอาซิกซ์ ซิกมา มาใช้เป็นกลยุทธ์ของกิจการมากกว่าที่จะเป็นวิธีการควบคุมคุณภาพในกระบวนการ หรือกล่าวอีก

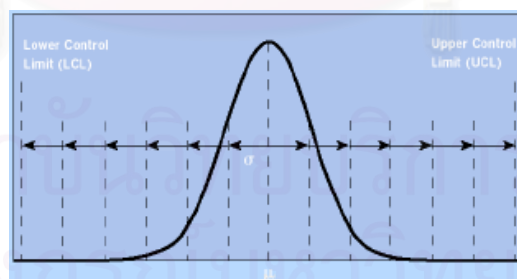
นัยหนึ่งได้ว่า ซิกซ์ ซิกมา คือวิธีการและการประยุกต์ใช้กลวิธีทางสถิติในองค์กรเพื่อที่จะช่วยให้ องค์กรสามารถทำกำไรได้เพิ่มขึ้น ได้ผลผลิตมากขึ้น สามารถนำมาใช้ได้ทั้งส่วนสินค้าและบริการ

Harry และ Schroeder (2000) กล่าวว่า ซิกซ์ ซิกมา เป็นกลยุทธ์ที่มีประสิทธิภาพอย่างมาก ในการบริหาร ซึ่งมีเป้าหมายอยู่ที่ความผิดพลาดหรือของเสียที่น้อยกว่า 4 ใน 1 ล้านครั้งของการทำงาน โดยรวมเอาวิถีทางแห่งระบบคุณภาพแบบหลายมิติ ซึ่งประกอบด้วย รูปแบบที่เป็นมาตรฐาน การจัดการที่เหมาะสม และการตอบสนองภารกิจขององค์กร ซึ่งทำให้ทั้งลูกค้าและผู้ผลิต ได้ผลตอบแทนทั้งสองฝ่าย ไม่ว่าจะเป็นด้านอรรถประโยชน์ ทรัพยากร และคุณค่าของผลิตภัณฑ์

Evans และ Lindsay (2005) กล่าวว่า ซิกซ์ ซิกมา เป็นวิธีการปรับปรุงกระบวนการทางธุรกิจเพื่อหาหนทางและกำจัดต้นเหตุของปัญหาในการเกิดของเสียและความผิดพลาด ลดรอบเวลาการผลิตและต้นทุนการผลิต ปรับปรุงผลผลิต เพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ดีขึ้น สามารถเพิ่มการใช้ประโยชน์ในทรัพย์สินและผลตอบแทนในกระบวนการผลิตและการบริการ โดยปรับปรุงบนพื้นฐานกระบวนการแก้ปัญหา DMAIC หรือ Define Measure Analyze Improve และ Control ที่ได้มีการรวบรวมเครื่องมือทางสถิติและเครื่องมือในการปรับปรุงการผลิตไว้มากมาย

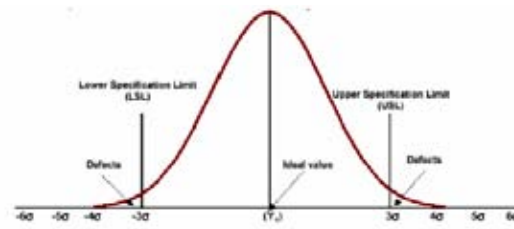
Cherry และ Seshadri (2000) ซิกซ์ ซิกมา คือวิธีการในการจัดการคุณภาพโดยมีพื้นฐานบนการใช้วิธีการทางสถิติที่เข้มงวด ควบคุมกระบวนการใช้เครื่องมือทางสถิติดั้งเดิมด้วยการวิเคราะห์ทางสถิติที่เคร่งครัดและวิธีการแก้ปัญหาที่เป็นระบบ เป้าหมายอยู่ที่รากของปัญหาของความแปรปรวน และให้นิยามความหมายของกระบวนการใหม่สำหรับผลในระยะยาว

ในความหมายทางสถิติ ระดับของ Sigma ที่สูงขึ้นวัดอัตราของของเสียที่ลดลงและประสิทธิภาพของกระบวนการที่สูงขึ้น ภายใต้เส้นโค้งปกติ (Normal Curve) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



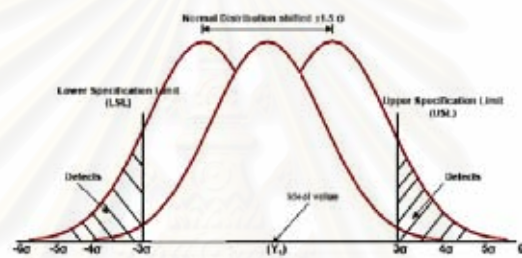
รูปที่ 2.1 เส้นโค้งปกติ (Normal Curve)

เริ่มต้นในทศวรรษที่ 20 Walter Shewhart แสดง 3 ซิกมาจากค่าเฉลี่ยไปถึงจุดที่กระบวนการต้องการ และมีหลายมาตรฐานการวัด เช่น Zero Defects ที่เป็นวิธีการควบคุมคุณภาพ ต่อมา โดยแสดงการควบคุมของกระบวนการในขอบเขต 3 ซิกมาในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การควบคุมกระบวนการภายในขอบเขต 3 ซิกมา

ระดับของการควบคุมของซิกซ์ ซิกมา เกิดจากการดำเนินกระบวนการจนกระทั่งอยู่ในสภาพเสถียร ค่าเฉลี่ยของกระบวนการจะเลื่อน (Shift) ออกไปทั้ง 2 ฝั่งของค่าเฉลี่ยเดิมของกระบวนการ เป็นระยะทาง 1.5σ (Breyfogle, 2001) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การกระจายแบบปกติ และการเคลื่อนตัวออกจากค่าเฉลี่ย 1.5σ

ซิกซ์ ซิกมา ถูกพัฒนาและประยุกต์ใช้โดยใช้ความรู้ทางสถิติ ตั้งประเด็นในเชิงสถิติ และปริมาณของซิกซ์ ซิกมา ในมุมมองของทางสถิติ รูปแบบของซิกซ์ ซิกมาให้คำจำกัดความถึงโอกาสความผิดพลาดที่น้อยกว่า 3.4 Defects per Million Opportunities (DPMO) หรืออัตราของความสำเร็จเท่ากับ 99.999966% เป้าหมายของซิกซ์ ซิกมาเป็นระดับคุณภาพที่เข้มงวดมากๆ และนำเสนอจุดมุ่งหมายอย่างเปิดเผยภายในองค์กร (Organizations) เทคโนโลยี (Technology) การปฏิบัติการ (Operation) กระบวนการ (Process) และ โครงการ (Project) มากมาย

2.1.3 ตัววัดระดับของคุณภาพ

ในการเลือกตัววัดระดับคุณภาพของกระบวนการผลิตเพื่อที่จะบ่งบอกถึงคุณภาพของกระบวนการมีอยู่หลายทางเลือก เช่น Yield, Rolled Throughput Yield, ดัชนีวัดความสามารถของกระบวนการ C_p , C_{pk} , อัตราส่วนของของเสียที่เกิดขึ้นต่อล้านหน่วย (Part Per Million: PPM) หรือค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากคุณภาพที่ไม่ดีของผลิตภัณฑ์ (Cost of Poor Quality) และค่า Sigma Quality Level เป็นต้น

ในแนวคิดทางซิกซ์ ซิกมานี้จะอ้างอิงถึงค่า Sigma Quality Level เพื่อบ่งบอกถึงระดับของคุณภาพของกระบวนการ ซึ่งต่างจากคำว่า Sigma ที่หมายถึงค่าของความเบี่ยงเบนมาตรฐานในการ

กระจายตัวของข้อมูลในทางสถิติ กล่าวคือค่าระดับ Sigma Quality Level ยังมีค่าที่มากขึ้นจะบ่งบอกถึงโอกาสในการเกิดของของเสียในกระบวนการผลิตเป็นจำนวนเท่ากับ 0.002 ชิ้นต่อหนึ่งล้านหน่วยผลิตเมื่อคิดที่ค่าเฉลี่ยของกระบวนการอยู่ตรงจุดกึ่งกลาง และเมื่อคิดที่ค่าเฉลี่ยของกระบวนการเลื่อนไปจากจุดกึ่งกลางเท่ากับ $\pm 1.5\sigma$ จะมีของเสียเกิดขึ้นเป็นจำนวน 3.4 ชิ้นต่อหนึ่งล้านชิ้น โดยรายละเอียดจำนวนของเสียที่เกิดขึ้นเทียบกับค่า Sigma Quality Level ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 จำนวนของเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละ Sigma Quality Level

Sigma Quality Level	Mean at Center		Mean Shifted 1.5s	
	Percentage	DPPM	Percentage	DPPM
1	68.27	317300	30.23	697700
2	95.45	45500	69.13	308700
3	99.73	2700	93.32	66810
4	99.9937	63	99.379	6210
5	99.999943	0.57	99.9767	233
6	99.9999998	0.002	99.99966	3.4

หรือหากคำนวณเป็นค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการจะได้ค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการที่ 6 ซิกมา มีค่าเท่ากับ $C_p = 2.0$ และ $C_{pk} = 1.5$ (คิดค่าเฉลี่ยของข้อมูลเลื่อนไปจากจุดกึ่งกลางของการกระจายเท่ากับ $\pm 1.5\sigma$)

2.2 การประยุกต์ใช้ซิกซ์ ซิกมา

การดำเนินการตามแนวทางของซิกซ์ ซิกมาแบ่งออกเป็น 5 ระยะ โดยเป็นไปตามกระบวนการ DMAIC ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดวงจรคุณภาพ PDCA ของเดมมิง นั่นคือ ระบุนิยามปัญหา (Define Phase) ระยะการวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา (Measure Phase) ระยะการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analysis Phase) ระยะการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ (Improvement Phase) และระยะการติดตามควบคุม (Control Phase) ซึ่งในแต่ละระยะมีรายละเอียดและเครื่องมือที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ดังต่อไปนี้

2.2.1 ระยษณียามปัญหา (Define Phase)

เป็นช่วงที่มีความสำคัญที่สุดในกระบวนการ DMAIC โดยมีการกำหนดความต้องการของลูกค้าและเป้าหมายของกระบวนการ/ผลิตภัณฑ์/บริการ รวมทั้งการระบุรายละเอียดปัญหาและผลกระทบต่อธุรกิจ ซึ่งระยษณียามปัญหานี้มีรายละเอียดและเครื่องมือที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

2.2.1.1 รายละเอียดเอกสารโครงการ (Project charter)

เอกสารโครงการควรประกอบด้วยรายการต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

- กรณีทางธุรกิจสำหรับการคัดเลือกโครงการ (Business Case for the Project Selection) โดยระบุถึงลำดับความสำคัญของโครงการ

- ข้อความแสดงถึงปัญหาเบื้องต้น (Preliminary Problem Statement) โดยแสดงความแตกต่างระหว่างผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นกับเป้าหมายหรือสิ่งที่ลูกค้าคาดหวัง ซึ่งข้อความแสดงถึงปัญหาจะต้องสัมพันธ์กับกรณีธุรกิจ และต้องสามารถวัดผลได้

- กำหนดขอบเขตของโครงการ (Project Scope) ใ้อย่างชัดเจน

- กำหนดเป้าหมายและระยะเวลาตามเป้าหมาย เพื่อใช้ติดตามและประเมินความคืบหน้าของโครงการ

- บทบาทและความรับผิดชอบของคณะทำงาน

2.2.1.2 ปัจจัยหลักทางคุณภาพสำหรับลูกค้า หรือ Critical to Quality (CTQ)

โดยมุ่งศึกษาความต้องการหรือสิ่งที่ลูกค้าคาดหวัง ดังนั้นงานแรกที่ต้องดำเนินการนั้นคือ การระบุว่าใครคือลูกค้า และปัจจัยที่สามารถตอบสนองให้ลูกค้าเกิดความพึงพอใจสูงสุดหรือที่เรียกว่า Voice of the Customer (VOC) ซึ่งประกอบด้วยเครื่องมือต่างๆ ที่สำคัญ เช่นการกระจายหน้าที่ทางคุณภาพ (Quality Function Deployment) หรือ QFD การเทียบเคียง (Benchmarking) การสำรวจ การสัมภาษณ์ และข้อมูลประวัติที่ผ่านมานอกจากนี้ ยังได้มีการใช้แบบจำลองคาโนสำหรับวิเคราะห์ เรียกว่า Kano Analysis ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดผลทางคุณภาพ (Quality Measurement Tool) เพื่อใช้สำหรับจำแนกและจัดลำดับความสำคัญความต้องการของลูกค้าที่มีผลกระทบต่อความพึงพอใจของลูกค้า นอกจากนี้ยังใช้ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์จำแนกส่วนของลูกค้าเพื่อเป็นแนวทางกำหนดปัจจัยที่สามารถตอบสนองให้เกิดความพึงพอใจในแต่ละกลุ่มลูกค้า ตามลำดับความสำคัญ (Segment's Priorities)

2.2.1.3 แผนภาพ SIPOC (SIPOC Diagram)

กระบวนการประกอบด้วยกิจกรรมต่างๆ ที่สร้างมูลค่าเพิ่มด้วยการแปรรูปจากปัจจัยนำเข้าเป็นผลิตผลในรูปของสินค้า/บริการและนำมาเขียนเป็นแผนภาพ SIPOC ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบที่เกี่ยวข้อง นั่นคือ

- ผู้ส่งมอบ (S: Suppliers) คือ ผู้ทำหน้าที่จัดหาทรัพยากร/วัตถุดิบเพื่อป้อนเข้าสู่กระบวนการ
- ปัจจัยนำเข้า (I: Inputs) คือ ทรัพยากร/วัตถุดิบ และข้อมูล ที่จำเป็นต่อกระบวนการ
- กระบวนการ (P: Process) คือ ขั้นตอนแปรรูปปัจจัยนำเข้าให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์
- ผลผลิต (O: Outputs) คือ ผลลัพธ์จากกระบวนการและแสดงในรูปของผลิตภัณฑ์/บริการเพื่อส่งมอบให้กับลูกค้า
- ลูกค้า (C: Customer) คือ บุคคล องค์กร หรือ กระบวนการถัดไปที่รับปัจจัยที่ออกจากกระบวนการก่อนหน้า

แผนภาพ SIPOC เป็นเครื่องมือที่ถูกใช้สำหรับระบุองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับโครงการปรับปรุงก่อนที่จะเริ่มดำเนินการและจะถูกใช้ใน ช่วงวัดผล (Measure phase) ต่อไป ซึ่งรายละเอียดแผนภาพ SIPOC จะสามารถช่วยให้มองเห็นภาพของกระบวนการธุรกิจได้ในมุมมองของกระบวนการ และทำให้ทราบว่า ใครคือผู้ส่งมอบปัจจัยนำเข้าสู่กระบวนการ อะไรคือข้อกำหนด/คุณสมบัติ (Specification) สำหรับปัจจัยนำเข้า ใครบ้างคือลูกค้าของกระบวนการ อะไรคือความต้องการของลูกค้า แสดงไว้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้แผนภาพ SIPOC สำหรับวิเคราะห์

2.2.2 ระยะเวลาวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา (Measure Phase)

การวัด (Measure) เป็นช่วงที่มีการเก็บข้อมูลเพื่อทำการประเมินและวัดผลของการปฏิบัติงาน ตัวชี้วัดในรูปต่างๆ เช่น อัตราส่วนของดีที่ผลิตได้ (Rolled Throughput Yield) โอกาสเกิด

ข้อบกพร่องในล้านหน่วย (DPMO) ความสามารถกระบวนการ (Process Capability) เป็นต้น และต้องทำการวิเคราะห์ระบบการวัดโดยการทำ GR&R จากนั้นศึกษาแหล่งที่มาของสาเหตุของปัญหา รวมทั้งมีการวิเคราะห์และจัดลำดับความสำคัญของสาเหตุที่เป็นไปได้เพื่อเลือกปัญหาที่คาดว่าจะมีผลกระทบรุนแรงมาทำการแก้ไข

2.2.2.1 การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ

กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ (2549) ได้ให้ความหมายของการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ (Process Capability Study) ไว้ว่า การกำหนดตัวพารามิเตอร์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากกระบวนการแล้วทำการวัดเพื่อการรวบรวมข้อมูลที่แสดงถึงพารามิเตอร์ดังกล่าว และถ้าข้อมูลอยู่ในสภาวะภายใต้การควบคุมก็จะทำการอนุมานทางสถิติสำหรับกระบวนการที่ศึกษาต่อไปและอาจเรียกการศึกษานี้ว่าการกำหนดลักษณะของผลิตภัณฑ์ (Product Characterization)

ส่วนการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ (Process Capability Analysis) หมายถึง การประเมินความผันแปรของกระบวนการ (อาจอยู่ในรูปของฟังก์ชันความน่าจะเป็นที่จะระบุทั้งรูปทรง ค่ากลาง และปริมาณการกระจายของการแจกแจง) และวิเคราะห์ความผันแปรนี้กับข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ ตลอดจนพิจารณาถึงแหล่งความผันแปรต่างๆเพื่อหาทางลดความผันแปรที่ศึกษาต่อไป

ในการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการมีขั้นตอนหลักๆดังนี้

- การทดสอบข้อกำหนดเฉพาะ (Specification) ซึ่งสามารถดำเนินการได้จากการทวนสอบแบบ (design output) ของผลิตภัณฑ์และทบทวนข้อตกลงกับลูกค้าว่ายอมรับข้อกำหนดเฉพาะดังกล่าวหรือไม่
- การชักสิ่งตัวอย่างจากกระบวนการ ทั้งแบบระยะสั้นและระยะยาว
- การทวนสอบสถานะเสถียรภาพของกระบวนการ โดยอาศัยแผนภูมิควบคุมเพื่อพิจารณาว่าข้อมูลที่ได้จากสิ่งตัวอย่างอยู่ภายใต้การควบคุมเชิงสถิติสำหรับกำหนดคุณสมบัติในด้านความสามารถการคาดการณ์ได้หรือไม่
- การประเมินค่ามาตรฐานข้อกำหนด (Z-score)
- การประเมินค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการ พร้อมการวิเคราะห์สาเหตุของความผันแปรเพื่อดำเนินการแก้ไขต่อไป

การประเมินความสามารถของกระบวนการที่มีข้อมูลแบบนับ

ข้อมูลแบบนับเป็นข้อมูลที่ไม่มีคุณสมบัติอธิบายความผันแปรจึงมีความจำเป็นต้องกำหนดข้อมูลนับให้อยู่ในรูปของจำนวนผลิตภัณฑ์บกพร่องเพื่อการเปรียบเทียบให้อยู่ในรูปของสเกลของการแจกแจงแบบปกติมาตรฐาน (Z) สำหรับการแปลงให้เป็นดัชนีแสดงความสามารถของกระบวนการ

ในการกำหนดค่าความสามารถของกระบวนการในกรณีในการกำหนดค่าความสามารถของกระบวนการในกรณีข้อมูลแบบนี้ จะขึ้นอยู่กับเกณฑ์การตัดสินใจของผู้วิเคราะห์เป็นสำคัญ เช่น ถ้าหากต้องการประเมินถึงความสามารถของกระบวนการในรูปแบบของสัดส่วนผลิตภัณฑ์บกพร่องที่เกิดขึ้นแล้ว ก็สามารถใช้ค่าสัดส่วนโดยเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์บกพร่อง (\bar{p}) เป็นตัววัดความสามารถของกระบวนการได้ แต่ถ้าหากต้องการประเมินในรูปดัชนีแสดงความสามารถของกระบวนการเพื่อการเปรียบเทียบผลการปรับปรุงกระบวนการก็สามารถแสดงในรูปของดัชนี Pp, Ppk ดังนั้นในการประเมินความสามารถของกระบวนการสำหรับข้อมูลแบบนี้จะต้องเริ่มต้นจากการหาค่า \bar{p} ก่อนเสมอโดย

$$\bar{p} = \frac{\text{จำนวนผลิตภัณฑ์บกพร่องโดยรวม} \sum np}{\text{จำนวนตรวจสอบโดยรวม} \sum n} \quad (2.1)$$

ดังนั้นในการประเมินค่า \bar{p} จะต้องประเมินจากข้อมูลโดยรวมค่าดัชนีที่ประเมินจากค่า \bar{p} จึงถือเป็นดัชนีความสามารถของกระบวนการแบบระยะยาวเสมอ โดยความสามารถด้านศักยภาพของกระบวนการอาจจะประเมินได้ในรูปอัตราส่วนความสามารถ (P_R) หรือดัชนีความสามารถ (P_p) สำหรับความสามารถด้านสมรรถนะของกระบวนการจะประเมินได้ในรูปดัชนีความสามารถ (P_{pk})

$$P_{o \text{ Bench}} = \frac{1}{3} Z_{\text{Bench}} \quad (2.2)$$

โดยที่ Z_{Bench} จะได้จากกรณีกำหนดสัดส่วนผลิตภัณฑ์บกพร่องมีค่าเท่ากันทั้งสองด้าน

$$P_{R \text{ Bench}} = \frac{1}{Pp \text{ Bench}} \quad (2.3)$$

$$\text{และ } P_{ok \text{ Bench}} = \frac{1}{3} Z_{\text{Bench}} \quad (2.4)$$

โดยที่ Z_{Bench} ได้จากการกำหนดให้สัดส่วนผลิตภัณฑ์บกพร่องอยู่ที่ด้านใดด้านหนึ่งของค่ากลางเพียงด้านเดียว

2.2.2.2 การวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis, MSA)

การวิเคราะห์ระบบการวัด มีจุดประสงค์ในการวิเคราะห์ถึงแหล่งที่มาของความคลาดเคลื่อนในระบบการวัด เพื่อยืนยันความถูกต้องและความแม่นยำของข้อมูลที่ได้จากการวัด ก่อนทำการทดลอง โดยทั่วไปจะทดสอบความแม่นยำของระบบการวัดโดยวิธีการ Gage Repeatability and Reproducibility หรือ GR&R โดยค่าความผันแปรของระบบการวัดในรูปความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มของระบบการวัด สามารถแบ่งเป็น 2 องค์ประกอบ คือ

ความผันแปรภายในได้เงื่อนไขของระบบการวัด (Repeatability) หมายถึงความผันแปรของค่าวัดรอบค่าที่ควรจะเป็น (Expected Value) ของระบบการวัดที่ทำการวัดโดยการใช้พนักงานวัดคน

เดียว อุปกรณ์วัดเดียวกันในการวัดงานชิ้นเดียวกันซ้ำๆ โดยทั่วไปจะหมายถึงความผันแปรของอุปกรณ์ แต่ในบางครั้งอาจเกิดมาจากสาเหตุหลักอื่นๆเช่น ทักษะของพนักงาน หรือปัจจัยแวดล้อม

ความผันแปรระหว่างเงื่อนไขของระบบการวัด (Reproducibility) หมายถึงความผันแปรที่แสดงถึงค่าเฉลี่ยของค่าวัดจากการใช้อุปกรณ์วัดตัวเดียวกันในการวัดชิ้นงานเดียวกันด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปมักจะหมายถึงความแตกต่างระหว่างพนักงานวัด จึงอาจเรียกว่าความผันแปรระหว่างพนักงานวัด (Appraiser Variation; AV) แต่ในบางครั้งความผันแปรนี้อาจมีสาเหตุมาจากปัจจัยอื่นที่ไม่ใช่พนักงานวัด เช่น ความผันแปรระหว่างวิธีการวัด ความผันแปรระหว่างสิ่งแวดล้อม

การวิเคราะห์ระบบการวัดของข้อมูลนับ (MSA for Attribute)

การประเมินผลและวิเคราะห์ระบบการตรวจสอบเมื่อเป็นข้อมูลนับซึ่งเป็นการประเมินผลเมื่อคุณลักษณะที่ศึกษาเป็นคุณลักษณะเชิงคุณภาพ (Attribute Characteristics) เช่น รสชาติ ความสวยงาม ความเรียบร้อย หรือบางครั้งพารามิเตอร์อาจเป็นลักษณะเชิงผันแปร (Variable Characteristics) แต่ทำการนับเมื่อทำการเปรียบเทียบกับข้อกำหนดเฉพาะ หรือ GO/ No Go Gauge

การศึกษาความสามารถของกระบวนการวัดแบบอาศัยข้อมูลนับ จะเป็นการประเมินโดยการเปรียบเทียบชิ้นงานที่ทำการตรวจสอบกับพิคัดของข้อจำกัดเฉพาะ ทำให้สามารถประเมินผลของข้อมูลออกมาเป็น ยอมรับหรือปฏิเสธ และผ่านหรือไม่ผ่าน จึงไม่สามารถประเมินผลได้ว่าคุณภาพของงานที่ตรวจสอบได้นั้นดีหรือไม่ดีอย่างไร

การศึกษาความสามารถของกระบวนการวัดสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ วิธีการประเมินผลในระยะสั้น (Short Method) และวิธีประเมินผลในระยะยาว (Long Method) การประเมินผลระยะยาวนั้นจะอาศัยกราฟแสดงสมรรถนะของระบบการวัด (Gauge Performance Curve; GPC) ที่แสดงถึงโอกาสในการตรวจสอบแล้วยอมรับคุณภาพของสิ่งตัวอย่าง ที่แต่ละค่าของสิ่งตัวอย่างมีการกำหนดในรูปค่าอ้างอิงเพื่อพิจารณาค่าไบอัสและค่ารีพิทเทบิลิตี โดยทำการตัดสินใจว่าค่าไบอัสมีความแตกต่างจากค่าศูนย์อย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ โดยอาศัยตัวสถิติทดสอบ t โดยที่

$$t = \frac{31.3 \times |\text{ค่าไบอัส}|}{\text{ค่ารีพิทเทบิลิตี}} \quad (2.5)$$

ค่ารีพิทเทบิลิตีพิจารณาได้จากค่าความแตกต่างของค่าวัดค่าอ้างอิงที่สอดคล้องกับความน่าจะเป็นในการตรวจสอบแล้วยอมรับ (Pa) 0.995 กับค่าวัดค่าอ้างอิงที่สอดคล้องกับความน่าจะเป็นในการตรวจสอบแล้วยอมรับ (Pa) 0.005 หารด้วยตัวประกอบเพื่อการปรับค่า (Adjustment Factor) (AIAG, 2002)

การประเมินผลระบบการวัดในระยะสั้นนั้นไม่มีวิธีในการประเมินผลดังนี้

1. เลือกผู้ชำนาญการซึ่งเป็นบุคคลที่มีความสามารถเป็นพิเศษในการแยกแยะคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ดีหรือเสีย และลูกค้ำให้ยอมรับในผลการตรวจสอบดังกล่าว

2. กำหนดล็อตมาตรฐาน (Standard Lot) สำหรับใช้ในการตรวจสอบ เพื่อประเมินความสามารถของระบบการวัด โดยล็อตดังกล่าวควรประกอบด้วยสิ่งตัวอย่างที่มีคุณภาพดี สิ่งตัวอย่างที่มีคุณภาพไม่ดี และสิ่งตัวอย่างคุณภาพก้ำกึ่งอย่างละ 1 ใน 3 ของสิ่งตัวอย่างทั้งหมด โดยงานก้ำกึ่งควรประกอบด้วยงานดีแบบก้ำกึ่ง และงานไม่ดีแบบก้ำกึ่งอย่างละครึ่ง (Fasser and Brettner, 1992)

3. เลือกพนักงานวัดหรือพนักงานตรวจสอบ 2- 4 คน โดยพนักงานที่เลือกมาต้องเป็นพนักงานที่มีหน้าที่ประจำในการตรวจสอบคุณภาพและได้ผ่านการฝึกอบรมมาอย่างดีและผ่านการทดสอบประเมินผลแล้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งการตรวจสอบที่อาศัยความรู้สึก

4. กำหนดจำนวนชิ้นตัวอย่าง และจำนวนครั้งในการทดสอบซ้ำโดยจำนวนดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับจำนวนของพนักงานทดสอบดังกล่าว

ตารางที่ 2.2 ขนาดสิ่งตัวอย่างในการประเมินผลระบบการตรวจสอบข้อมูลนับ

(Fasser and Brettner, 1992)

จำนวนพนักงาน ตรวจสอบ	จำนวนชิ้นงานตัวอย่างที่ ต่ำสุด	จำนวนทดสอบซ้ำที่ ต่ำสุด
1	24	5
2	18	4
≥ 3	12	3

5. สุ่มพนักงานตรวจสอบขึ้นมาคนหนึ่งแล้วตรวจสอบตัวอย่างงานแบบสุ่มเพื่อประเมินผลคุณภาพของสิ่งตัวอย่างว่าผ่าน (Good-G) หรือ ไม่ผ่าน (No Good-NG) และทำเช่นนี้จนครบจำนวนพนักงานที่จะทำการทดสอบ

6. ประเมินผลด้วยดัชนีต่างๆ ดังนี้

$$\% \text{ วิธีที่หะบิลิติของพนักงานตรวจสอบ} = \frac{\text{จำนวนครั้งที่ผลการตรวจสอบเหมือนกัน}}{\text{จำนวนชิ้นงานตรวจสอบ}} \quad (2.6)$$

$$\% \text{ ความไม่ไอบัสของพนักงานตรวจสอบ} = \frac{\text{จำนวนครั้งที่ผลการตรวจสอบเหมือนกันและถูกต้อง}}{\text{จำนวนชิ้นงานตรวจสอบ}} \quad (2.7)$$

$$\% \text{ ประสิทธิภาพด้านวิธีพิหะบิลิตีของการตรวจสอบ} = \frac{\text{จำนวนครั้งที่ผลการตรวจสอบทุกคนเหมือนกัน}}{\text{จำนวนชิ้นงานตรวจสอบ}} \quad (2.8)$$

$$\% \text{ ประสิทธิภาพด้านไปอัสของการตรวจสอบ} = \frac{\text{จำนวนครั้งที่พนักงานทุกคนตรวจสอบได้ถูกต้องเหมือนกัน}}{\text{จำนวนชิ้นงานตรวจสอบ}} \quad (2.9)$$

7. หากค่า % วิธีพิหะบิลิตีของพนักงานตรวจสอบที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดแล้วให้ทำการอบรมพนักงานใหม่รวมทั้งประเมินผลของพนักงานใหม่เพื่อปรับปรุงค่าวิธีพิหะบิลิตีให้ดีขึ้น แต่หาก % ความไปอัสของพนักงานตรวจสอบ (% Attribute Score) ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดแล้วจะต้องปรับปรุงวิธีการตรวจสอบใหม่หรือต้องกำหนดให้ชิ้นงานได้รับการตรวจสอบโดยผู้ชำนาญการเฉพาะเท่านั้น สำหรับ % ประสิทธิภาพด้านวิธีพิหะบิลิตีของการตรวจสอบ (% Screen Effective Score) และ % ประสิทธิภาพด้านไปอัสของการตรวจสอบ (% Attribute Effective Score) ถ้าไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดแล้วมีความจำเป็นต้องค้นหาสาเหตุจากดัชนีข้างต้น แล้วปรับปรุงให้ได้ค่าที่ดีขึ้น

2.2.2.3 การระดมความคิด (Brainstorming)

การระดมความคิดเป็นวิธีการรวบรวมความคิดเห็นจากกลุ่มคนให้มากที่สุดภายในระยะเวลาอันสั้น การระดมความคิดเป็นวิธีการประชุมชนิดหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพมาก สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น ใช้ในการเลือกปัญหา หาสาเหตุของปัญหา และวิธีการแก้ปัญหา หรือหาข้อยุติในเรื่องใดเรื่องหนึ่ง โดยอาศัยความคิดของกลุ่มบุคคลเป็นเครื่องตัดสิน

หลักของการระดมความคิด มีดังนี้

- หัวข้อที่จะใช้ในการระดมความคิดจะต้องมีความชัดเจน
- ให้ผู้ร่วมระดมความคิดได้เสนอแนะมีโดยอิสระทางความคิดไม่ต้องระวังหรือกลัวที่จะถูกวิพากษ์วิจารณ์

กั้วที่จะถูกวิพากษ์วิจารณ์

- การเสนอและควรรวดเร็วเพื่อการระดมความคิดที่รวดเร็ว
- เป้าหมายหลักของการระดมความคิดคือปริมาณของข้อเสนอแนะทางความคิด
- มุ่งไปที่การเพิ่มเติมข้อเสนอแนะของบุคคลอื่นรวมทั้งการเสนอแนวคิดใหม่ๆ
- บรรยากาศในการระดมความคิดควรทำให้เกิดการเสนอแนะความคิดที่สร้างสรรค์และสิ่งใหม่ๆ

2.2.2.4 ผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)

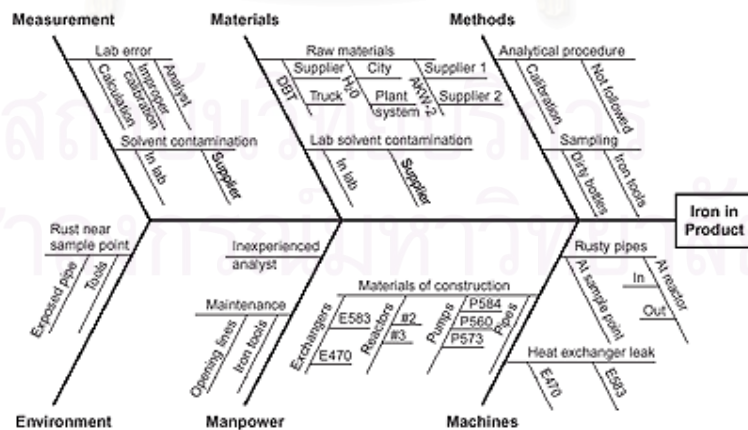
ผังแสดงเหตุและผล เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า แผนภูมิก้างปลา (Fish Bone Diagram) หรือ แผนภาพของอิชิกาวา (Ishikawa Diagram) เป็นแผนภาพที่แสดงสาเหตุ (Cause) และผล

(Effect) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของคุณภาพกับสาเหตุของมัน โดยการดึงเอาเหตุที่เป็นไปได้ทั้งหมดออกมาเรียบเรียงสาเหตุที่มีผลต่อคุณภาพ มีประโยชน์ในการใช้เป็นเครื่องมือในการระดมสมองจากสมาชิกภายในกลุ่ม ทำให้เห็นปัญหาอย่างเป็นระบบและทราบสาเหตุของผลที่เกิดขึ้น ซึ่งสาเหตุที่ได้นั้นจะละเอียดลึกซึ้งและมีขั้นตอนตามเหตุตามผล สะดวกที่จะนำสาเหตุนั้นๆ ไปพิจารณาแก้ไข อีกทั้งยังเป็นเครื่องมือที่สามารถนำไปประยุกต์ในการวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ได้มากมาย ช่วยชี้แนะหรือช่วยในการอภิปราย รวบรวมประเด็นในการอภิปรายให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

การวิเคราะห์ผังก้างปลา จะพิจารณาแยกสาเหตุของปัญหาออกเป็นหัวข้อหลักทั้งหมด 6 กลุ่ม ดังนี้

- สาเหตุที่เกิดจากพนักงาน (Man)
- สาเหตุจากเครื่องจักร (Machine)
- สาเหตุจากวัตถุดิบ (Material)
- สาเหตุจากวิธีการทำงาน (Method)
- สาเหตุจากระบบการวัด (Measurement)
- สาเหตุจากสภาพแวดล้อมในกระบวนการผลิต (Environment)

การใช้แผนภูมิก้างปลาต้องอาศัยการระดมความคิดจากบุคคลหลายๆฝ่าย ถือเป็นเทคนิคหนึ่งของการระดมความคิด (Brainstorming) อย่างไรก็ตามการระดมความคิดแบบใช้แผนภูมิก้างปลาถึงแม้จะให้ผลดี แต่ก็ทำได้ยากเพราะการเขียนก้างปลาให้ถูกต้องและครอบคลุมสาเหตุของปัญหาให้กว้างขวางนั้น จำเป็นต้องอาศัยผู้นำกลุ่มหรือประธานในการระดมความคิดที่ดี มีความสามารถและมีประสบการณ์มาก



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)

2.2.2.5 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause & Effect Matrix)

เป็นตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองที่ทำการศึกษา (KPOVs) กับปัจจัยนำเข้าที่สำคัญต่างๆ ที่ได้จากการระดมสมองโดยใช้ผังแสดงเหตุและผล โดยจะวิเคราะห์ถึงระดับความสำคัญของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญนี้ที่มีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองต่างๆ ที่พิจารณา โดยใช้ความรู้ความชำนาญและประสบการณ์ในการปฏิบัติงานของผู้ร่วมทำการระดมสมอง ผลลัพธ์ที่สำคัญของการทำตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผลจะต้องทำแผนภูมิพาเรโต เพื่อเรียงปัจจัยตามลำดับผลกระทบที่มีต่อปัญหาที่ทำการพิจารณา ทำให้สามารถพิจารณาเลือกปัจจัยนำเข้าที่สำคัญในระดับต้นๆ มาทำการแก้ไขก่อน หรือนำผลที่ได้มาใช้ในการประเมินแผนการควบคุมคุณภาพของกระบวนการผลิต

ตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผลจะมีการกำหนดคะแนนตามความสำคัญของต่อลูกค้าและเป้าหมายเชิงกลยุทธ์ทางธุรกิจ ตัวเลขที่สูงจะแสดงถึงความสำคัญที่มาก ในแต่ละแถวจะแสดงตัวแปรจากผังกระบวนการหรือสาเหตุจาก แผนภาพสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) ส่วนจุดตัดของแต่ละแถวกับแต่ละคอลัมน์จะใช้สำหรับป้อนค่าระดับความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่อยู่ในแถว (นอน) และคอลัมน์ ถ้าหากมีความสัมพันธ์กันมากน้ำหนักในที่นี้ก็จะมีความสูงขึ้น จำนวนค่าของความสัมพันธ์ที่ป้อนในแต่ละช่องตามแนวนอน เมื่อนำมาคูณกับค่าความสำคัญในแถวบนแล้วรวมผลคูณที่ได้ไว้ในช่องขวามือสุดก็จะเป็นการบ่งบอกถึงความรุนแรงของผลกระทบที่จะมีต่อผลผลิตค่าที่มีระดับคะแนนอยู่ในระดับสูงสุดจะสามารถอนุมานได้ว่าเป็นตัวแปรหลักที่จะนำเข้าสู่กระบวนการผลิต (KPIVs) ซึ่งควรจับตามองและศึกษาเพิ่มเติมเพื่อปรับปรุงกระบวนการให้ดียิ่งขึ้น

2.2.2.6 การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode & Effect Analysis, FMEA)

เป็นตารางที่ช่วยบอกว่าข้อบกพร่องใดที่มีคะแนนความเสี่ยงสูง เพื่อนำมาจัดลำดับว่าควรปรับปรุงการออกแบบหรือกระบวนการใดก่อน โดยมีจุดมุ่งหมายในการปรับปรุงคือ ลดคะแนนความเสี่ยงและโอกาสการเกิดลักษณะบกพร่อง รวมถึงลดความรุนแรงของผลอันเกิดจากลักษณะของข้อบกพร่อง นิยมนำมาช่วยในการคัดกรองปัจจัยในการทำซิกซ์ ซิกมา

ขั้นตอนการทำวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ

โดยระดมความคิดเห็นจากสมาชิกตั้งแต่เริ่มกระบวนการจนถึงสิ้นสุดกระบวนการ ดังนี้

1. ศึกษากระบวนการผลิต โดยเครื่องมือที่จะช่วยศึกษาคือ แผนภาพกระบวนการผลิต (Process Flow Diagram) เพื่อให้ทราบถึงกระบวนการดังกล่าว

2. พิจารณาแจกแจงปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ หรือ KPIV ที่มีความเกี่ยวข้องกับปัญหาในแต่ละกระบวนการย่อย โดยอาศัยเครื่องมือช่วยในการศึกษาได้แก่ แผนภูมิแก๊งปลา (Cause and Effect Diagram)

3. พิจารณาแจกแจง Potential Failure Mode หรือ PFM สำหรับแต่ละ KPIV ที่ได้จากขั้นตอนก่อนหน้า โดยอธิบายลักษณะของความผิดปกติที่เกิดขึ้น ซึ่งควรจะพิจารณาถึงลักษณะความผิดปกติดังกล่าวของกระบวนการในขั้นตอนย่อยที่อาจเป็นสาเหตุของลักษณะความผิดปกติในกระบวนการถัดไปด้วย รวมทั้งพิจารณาลักษณะความผิดปกติในระดับนี้ซึ่งเป็นผลกระทบมาจากกระบวนการก่อนหน้า แนวทางหนึ่งที่ใช้พิจารณาลักษณะของข้อบกพร่องในกระบวนการผลิตคือการศึกษาค่าผลผลิต (Output) ของแต่ละขั้นตอนย่อยในกระบวนการผลิตจากแผนภาพกระบวนการผลิต และพิจารณาว่ากระบวนการจะทำให้ผลลัพธ์ดังกล่าวไม่ได้ตามต้องการหรือข้อกำหนดอย่างไร

เมื่อจบขั้นตอนนี้แล้วจะได้ตาราง FMEA ที่ประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆของกระบวนการผลิต หรือส่วนประกอบต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ที่อาจมีผลกระทบต่อปัญหาที่ทำการศึกษา รวมถึงปัจจัยนำเข้าที่สำคัญและ Potential Failure Effects ที่สัมพันธ์กับกระบวนการผลิตนั้นๆ

4. พิจารณาแจกแจง Potential Failure Effects ของ Potential Failure Mode แต่ละตัวจากขั้นตอนที่แล้วโดยจะพิจารณาถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นได้ที่มีผลต่อการทำงานของผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นสาเหตุของปัญหาที่ทำการศึกษา โดย PFMs แต่ละตัวอาจทำให้เกิดผลกระทบขึ้นจำนวนหนึ่งผลกระทบหรือมากกว่าก็ได้

5. การให้คะแนนความร้ายแรง (Severity Score: SEV) เป็นการประเมินความร้ายแรงที่เกิดขึ้นของผลกระทบในแต่ละ Potential Failure Mode ที่มีต่อกระบวนการถัดไปซึ่งอาจจะมาจากการประเมินผลจากข้อมูลที่มีอยู่ หรือหากเป็นกระบวนการผลิตใหม่จะต้องอาศัยความรู้และความชำนาญทางวิศวกรรมช่วยในการวิเคราะห์ โดยทั่วไปการประเมินคะแนนของความร้ายแรงที่มีของแต่ละผลกระทบดังกล่าวมักอยู่ในช่วงคะแนน 1 ถึง 10 ซึ่งขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้ในการแต่ละลักษณะปัญหาที่ทำการศึกษา วิธีการสร้างช่วงของคะแนนความร้ายแรง คะแนนที่มีค่ามากจะบอกถึงลักษณะของผลกระทบที่มีความรุนแรงมากตามลำดับคะแนน โดยทั่วไปการแก้ไขเพื่อลดระดับความรุนแรงของผลกระทบสามารถทำได้โดยการแก้ไขการออกแบบที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

6. พิจารณาสาเหตุของแต่ละ Potential Failure Mode (Potential Cause of Failure) เป็นการบอกถึงจุดด้อยของการออกแบบที่เป็นสาเหตุของการเกิดลักษณะข้อบกพร่องนั้น จะต้องประกอบด้วยรายละเอียดที่บ่งบอกถึงสาเหตุที่แท้จริงอย่างรัดกุมและสมบูรณ์ เครื่องมือหนึ่งที่น่ามาใช้พิจารณาสาเหตุของปัญหาคือ Fault Tree Analysis (FTA) ซึ่งจะมุ่งพิจารณาที่สาเหตุโดยการหาความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกันในกระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้เครื่องมือที่ช่วยในการพิจารณาสาเหตุของปัญหาคือ แผนภูมิแก๊งปลา (Cause and Effect Diagram) ซึ่งในกรณีนี้จะ

กำหนดว่า Potential Failure Mode หรือลักษณะข้อบกพร่องเป็นผลกระทบของปัญหาที่เกิดขึ้น และ Potential Cause หรือสาเหตุของปัญหาก็คือสิ่งที่ทำให้ลักษณะข้อบกพร่องเหล่านี้เกิดขึ้น ข้อสังเกตคือ Potential Failure Mode แต่ละตัวสามารถที่จะมาจากสาเหตุที่มากกว่าหนึ่งสาเหตุได้

7. การให้คะแนนความถี่ในการเกิด (Occurrence Score: OCC) เป็นการคาดคะเนความน่าจะเป็นที่สาเหตุของปัญหาที่ระบุจะเกิดขึ้น ซึ่งควรมาจากข้อมูลในอดีตที่เป็นจริง แต่หากเป็นการศึกษา FMEA สำหรับผลิตภัณฑ์ใหม่จะต้องใช้ความรู้ทางวิศวกรรม การคาดคะเน หรือถ้าเป็นไปได้อาจมาจากผลการทดลอง (Design of Experiment) แต่ไม่ว่าจะใช้วิธีการใดในการพิจารณาก็ตาม ช่วงของคะแนนความถี่นี้ควรที่จะเป็นช่วงของตัวเลขที่เหมือนกับการสร้างช่วงคะแนนของความร้ายแรง

พิจารณาระบบการตรวจจับในปัจจุบัน (Current Design Control) เป็นการอธิบายการควบคุมที่สามารถจะป้องกันไม่ให้ Potential Failure Mode เกิดขึ้นหรือตรวจจับการเกิดขึ้นของ Potential Failure Mode เพื่อที่จะพิจารณาหรือกำจัดสาเหตุของลักษณะข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นก่อนที่ผลิตภัณฑ์จะออกจากหน่วยการผลิตไปสู่ลูกค้า ซึ่งเครื่องมือที่ใช้มีอยู่หลายชนิดเช่น ใบบทตรวจสอบ แผนภูมิควบคุม และ Poke-Yoke เป็นต้น

8. การให้คะแนนการตรวจจับ (Detection Score: DET) เป็นการประเมินคะแนนของความสามารถของการหลุดรอดจากการตรวจจับ Potential Failure Mode ของระบบการควบคุมที่ได้ระบุไว้ คะแนนนี้จะทำให้เห็นประสิทธิภาพของระบบการควบคุมที่ใช้ในปัจจุบันในการตรวจจับข้อบกพร่องต่างๆที่เกิดขึ้นก่อนที่ผลิตภัณฑ์จะออกจากหน่วยการผลิต

9. การคำนวณค่า RPN (Risk Priority Number) ในแต่ละแถวของตาราง FMEA ซึ่งเป็นผลคูณระหว่างคะแนน SEV OCC และ DET ในแต่ละแถว ดังนี้

$$RPN = SEV \times OCC \times DET \quad (2.10)$$

เมื่อได้คะแนน RPN ในแต่ละแถวแล้ว ให้ทำการรวมคะแนนทั้งหมดเป็นคะแนน RPN รวม ซึ่งจะนำไปใช้ในขั้นตอนถัดไป

10. จัดเรียงลำดับ Potential Failure Mode และ Potential Cause of Failure ตามคะแนน RPN ที่ได้ คะแนน RPN ที่มีค่ามากจะบอกถึง Failure Mode และ Cause ที่มีความวิกฤตมาก และเนื่องจากค่า RPN เป็นการวัดค่าวิกฤตรวมของขั้นตอนการผลิตหรือชิ้นส่วนของผลิตภัณฑ์ จึงได้ว่าคะแนน RPN ที่มีค่ามาก ลำดับความสำคัญในการแก้ไขจะต้องมาก่อนขั้นตอนการผลิตที่มีค่า RPN น้อยกว่า เครื่องมือที่นำมาใช้ช่วยในการพิจารณาลำดับ Failure Mode หรือ Cause ด้วยคะแนน RPN จะใช้แผนภูมิพารโตเข้ามาช่วยในการพิจารณา

กำหนดกิจกรรมเพื่อทำการลดระดับค่าคะแนนของ SEV OCC และ/หรือ DET ของ Failure Mode โดยเริ่มจากค่า RPN สูงสุดจากแผนภูมิพารโต ซึ่งจากหลักการของพารโตคือจะเลือกจำนวน

Failure Mode หรือ Cause ที่มีค่าคะแนน RPN เป็น 80 เปอร์เซนต์เมื่อเทียบกับคะแนน RPN รวมของทั้งหมด ควรพิจารณาเลือกกิจกรรมที่จะนำไปสู่การป้องกันข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น (หรือลดคะแนน OCC) มากกว่าที่จะปรับปรุงระบบการควบคุมเพื่อตรวจสอบจับข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น (หรือลดคะแนน DET)

11. หลังจากที่ได้กำหนดกิจกรรมในการลดค่าคะแนนทั้งสามแล้ว ให้จัดทำเอกสารสำหรับกิจกรรมเหล่านี้ในรูปของ FMEA และพิจารณาแผนการนำกิจกรรมเหล่านี้ไปใช้ รวมทั้งคำนวณค่าคะแนน RPN ใหม่ตามแผนการแก้ไขปัญหานี้ ซึ่งทำให้สามารถที่จะประเมินผลการปรับปรุงได้จากการหาค่าความแตกต่างระหว่างคะแนน RPN เดิม และคะแนน RPN ตามแผนการแก้ไขที่วางไว้ นอกจากนี้ยังรวมถึงการกำหนดผู้ที่ทำการรับผิดชอบในแต่ละกิจกรรมรวมถึงระยะเวลาในการดำเนินการปรับปรุงด้วย

2.2.3 ระยะการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analysis Phase)

ระยะนี้เป็นการวิเคราะห์ (Analyze) โดยมุ่งวิเคราะห์จำแนกหาสาเหตุหลักของปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น โดยใช้ข้อมูลที่ได้รับจากในช่วงก่อน เพื่อใช้ระบุปัจจัยที่เป็นสาเหตุหลักของความผันแปรที่เกิดขึ้นในกระบวนการ โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ดังเช่นการทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing) การวิเคราะห์ความผันแปร (Analysis of Variance) หรือ ANOVA รวมทั้งแผนภูมิพาเรโต แผนภูมิแก๊งปลา การใช้คำถามทำไม 5 ครั้ง (5 Whys ?) แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment หรือ DOE) ในระยะการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา ดังนั้นจึงได้นำเสนอทฤษฎีเกี่ยวกับการออกแบบการทดลองในระยะนี้

2.2.3.1 การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments) เป็นกระบวนการวางแผนการทดลองและนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ด้วยหลักการทางสถิติและหาข้อสรุปว่าปัจจัยนำเข้า (Input Variable) ใดมีผลต่อสิ่งที่ให้ความสนใจในผลิตภัณฑ์หรือสิ่งที่ออกมาจากระบบ (Output Response) โดยทั่วไปการทดลองจะถูกใช้เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการหรือระบบ โดยส่วนใหญ่ลักษณะของกระบวนการเริ่มจากการรวมกันของปัจจัยป้อนเข้า (Input) อันประกอบด้วย เครื่องจักร คน วิธีการ วัตถุดิบ และทรัพยากรอื่นๆ ผ่านเข้าไปยังกระบวนการและปัจจัยป้อนเข้าเหล่านั้นจะเปลี่ยนรูปออกมาเป็นผลลัพธ์ (Output)

ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

1. การนิยามปัญหา (Recognition and Statement of Problem) เป็นการระบุว่าความต้องการในการผลิตคืออะไร และต้องการเรียนรู้อะไรบ้างในการผลิต ซึ่งการนิยามปัญหานี้จะเกี่ยวข้องไปยังวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2. การเลือกปัจจัยและระดับของปัจจัย (Choice of Factors Levels and Ranges) เป็นการให้หลักการทางทฤษฎีและประสบการณ์จากงานวิจัยต่างๆ เพื่อระบุว่าปัจจัยบ้างที่น่าจะมีผลต่อการทดลองและในแต่ละปัจจัยนั้นควรจะมีช่วงในการทดลองอย่างไร สุดท้ายคือระบุว่าระดับที่ใช้เป็นแบบกำหนด (Fixed Effect) หรือแบบผสม

- แบบกำหนด (Fixed Effect) หมายถึงระดับของปัจจัยที่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าได้แน่นอน
- แบบสุ่ม (Random Effect) หมายถึงระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าได้แน่นอน
- แบบผสม (Mixed Effect) หมายถึงการผสมผสานระดับของปัจจัยที่เป็นทั้งแบบกำหนดและแบบสุ่ม

3. การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Selection of Response Variable) ในการเลือกตัวแปร ต้องทำการเลือกตัวแปรที่ให้ข้อมูลที่มีประโยชน์ในการศึกษาและการวัดค่านั้นจะต้องมีความแม่นยำและถูกต้องด้วย

4. การเลือกแบบการทดลอง (Choice of Experimental Design) เมื่อกำหนดทริทเมนต์และตัวแปรตอบสนองแล้วต้องทำการตัดสินใจเกี่ยวกับขนาดของการทดลองซึ่งหมายถึงจำนวนซ้ำของการทดลอง ความเหมาะสม ข้อจำกัดในการสุ่มและการบล็อกที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้ต้องนำมาเกี่ยวข้องกันในด้านความเสี่ยงและต้นทุนที่ใช้ในการทดลองสำหรับการเลือกปัจจัย

5. ดำเนินการทดลอง (Performing the Experiment) ในระหว่างดำเนินการทดลอง ต้องศึกษาและดูแลอย่างใกล้ชิด ปฏิบัติตามหลักการที่ได้ออกแบบการทดลองไว้

6. การวิเคราะห์ข้อมูล (Statistical Analysis of Data) จะใช้ความรู้ทางด้านสถิติเข้ามาวิเคราะห์และสรุปผล รวมทั้งตัดสินใจความถูกต้องของข้อมูลที่เกิดขึ้น

7. สรุปผลและข้อเสนอแนะ (Conclusions and Recommendations) เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลแล้ว จะต้องสรุปผลการวิเคราะห์ อาจแสดงในรูปกราฟ ตาราง แผนภูมิ ฯลฯ และให้ข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตให้ดีขึ้น

การเลือกแบบการทดลอง

- **แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design)** เป็นแผนการทดลองที่ง่ายที่สุด เหมาะกับการทดลองที่แยกได้ว่าหน่วยทดลองที่นำมาใช้นั้นมีลักษณะแตกต่างกันอย่างไรก่อนการทดลอง การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับแผนการทดลองนี้จะแยกสาเหตุความแปรผันของข้อมูลทั้งหมดว่า เนื่องมาจากอิทธิพลของทริทเมนต์แต่เพียงอย่างเดียว ไม่มีสาเหตุของปัจจัยอื่นอีก จึงเรียกข้อมูลนี้ว่าข้อมูลแจกแจงทางเดียว (One –Way Classification)

ตามแผนการทดลองนี้แสดงว่า เมื่อหน่วยการทดลองได้รับทริทเมนต์ที่ต้องการทดสอบ แล้วความแตกต่างของข้อมูลที่เก็บได้จากแต่ละหน่วยการทดลองจะต้องเกิดจากอิทธิพลของทริทเมนต์ที่ต่างกันเท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้แผนการทดลองนี้มีประสิทธิภาพสูงสุด หน่วยทดลองที่นำมาใช้จึงสมควรมีลักษณะที่สม่ำเสมอหรือคล้ายคลึงกันมากที่สุด (Homogenous) หรือมีความผันแปรระหว่างหน่วยทดลองให้แก่ทริทเมนต์จะต้องเป็นอย่างสม่ำเสมอและไม่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับการสุ่ม

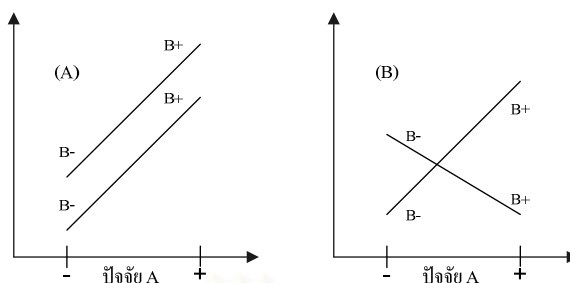
- **การทดลองแบบบล็อกสุ่มสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design)** ในบางการทดลองอาจเกิดปัญหาเกี่ยวกับหน่วยการทดลองที่ใช้ไม่มีความสม่ำเสมอ ทำให้การใช้แผนการทดลองแบบสุ่มตลอดไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควรจะเป็น เนื่องจากความผันแปรที่เกิดจากหน่วยทดลองรวมมูลจะไม่ใช่ผลของทริทเมนต์เพียงอย่างเดียวแต่อาจมีความผันแปรที่เกิดจากหน่วยทดลองรวมอยู่ด้วยซึ่งความแปรผันส่วนหลังนี้จะไปรวมอยู่กับความคลาดเคลื่อนของการทดลอง ทำให้ยอดรวมของผลบวกของกำลังสองความคลาดเคลื่อนมีค่าสูงขึ้น มีผลต่อการทดสอบทำให้ผิดพลาดได้ ดังนั้นจึงต้องพยายามแยกผลอันเกิดจากอิทธิพลอื่นที่ไม่ใช่ทริทเมนต์ออกจากความแปรปรวนทั้งหมด เพื่อให้แน่ใจว่าผลที่นำมาวิเคราะห์นั้นเป็นอิทธิพลของทริทเมนต์ (Treatment Effect) แต่เพียงอย่างเดียว ดังแสดง

แผนการทดลองแบบสุ่มบล็อกเป็นวิธีหนึ่งในหลายวิธีการจำแนกแบบ 2 ทาง (One – Way Classification) จะใช้เมื่อหน่วยทดลองมีความแตกต่างกัน 2 ลักษณะคือทางแนวนอน (Row) และแนวตั้ง (Column) มีหลักการคือพยายามจัดหน่วยทดลองที่มีความคล้ายคลึงกันให้อยู่ในกลุ่มเดียวกันซึ่งเรียกว่าบล็อก ดังนั้นความแปรปรวนระหว่างหน่วยทดลองในบล็อกเดียวกันจึงมีค่าต่ำและให้ค่าความแตกต่างระหว่างบล็อกมีค่าสูง ในแต่ละบล็อกจะมีครบทุกทริทเมนต์การจะให้ ทริทเมนต์ใดหน่วยการทดลองใดภายในแต่ละบล็อกกระทำโดยการสุ่ม กรณีนี้จะทำให้เราแยกความแตกต่างระหว่างบล็อกออกมาจากยอดรวมของผลบวกกำลังสองได้

- **แผนการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design)**

การทดลองแบบแฟกทอเรียล เป็นการศึกษาผลที่เกิดขึ้นกับตัวแปรตอบสนองในทุกๆระดับของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ (Treatment Combination) ที่มีจำนวน 2 ปัจจัยขึ้นไปโดยทุกๆ Treatment Combination ของปัจจัยนำเข้าทุกตัว จะได้รับการศึกษาไปพร้อมๆกัน

ผลกระทบจากปัจจัยนำเข้าจะนิยามด้วยการตรวจสอบค่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตอบสนองที่ศึกษาที่เกิดขึ้นโดยการเปลี่ยนระดับของปัจจัยนำเข้านี้ เรียกว่า “อิทธิพลหลัก (Main Effect)” ส่วนอิทธิพลร่วม (Interaction) จะหมายถึงค่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตอบสนองในระดับของปัจจัยนำเข้าตัวหนึ่งจะมีค่าไม่เท่ากันในระดับต่างๆของปัจจัยนำเข้าตัวอื่นๆ ซึ่งแสดงได้โดยพิจารณาจากแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนอง ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่ไม่มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย (A) และการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย (B)

จากรูปที่ 2.6A จะเห็นได้ว่า เส้นของ B- และ B+ จะประมาณได้ว่าขนานกัน ซึ่งลักษณะของกราฟเช่นนี้จะบ่งบอกถึงการไม่มีอันตรกิริยาซึ่งกันและกันของปัจจัยทั้งสอง ในทำนองเดียวกันจากรูปที่ 2.6B จะเห็นได้ว่า เส้นของ B- และ B+ ไม่ขนานกัน และสามารถกล่าวได้ว่าปัจจัยทั้งสองมีอันตรกิริยาต่อกัน บ่อยครั้งที่กราฟลักษณะเช่นนี้จะถูกนำมาใช้เพื่อแสดงถึงการมีนัยสำคัญ (Significant) ของอันตรกิริยา อย่างไรก็ตามกราฟเช่นนี้ไม่ควรนำมาใช้แทนเทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลในทางสถิติ เพราะว่าการตีความจากกราฟค่อนข้างที่จะขึ้นกับความคิดเห็นส่วนบุคคล ซึ่งอาจทำให้เกิดการเข้าใจผิดหรือวิเคราะห์ผิดพลาดได้รูปแบบของแผนการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลยังแบ่งย่อยในกรณีที่แผนการทดลองมีลักษณะเฉพาะตัวอีกดังต่อไปนี้

○ **การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k (2^k Factorial Design)**

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k เป็นการทดลองที่มี k ปัจจัย แต่ละปัจจัยจะมีระดับของปัจจัยอยู่ 2 ระดับ คือ ระดับต่ำ ใช้สัญลักษณ์ -1 หรือ $(-)$ และระดับสูง ใช้สัญลักษณ์ 1 หรือ $(+)$ การทดลองแบบนี้เหมาะสำหรับการทดลองที่มีปัจจัยมากๆ เป็นการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลเบื้องต้นจะช่วยให้การทดลองที่เจาะลึกต่อไป

○ **การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 3^k (3^k Factorial Design)**

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 3^k เป็นการทดลองที่มี k ปัจจัย แต่ละปัจจัยจะมีระดับของปัจจัยอยู่ 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ ใช้สัญลักษณ์ -1 หรือ $(-)$ ระดับกลาง ใช้สัญลักษณ์ 0 หรือ (0) และระดับสูง ใช้สัญลักษณ์ 1 หรือ $(+)$ การทดลองแบบนี้เหมาะสมเมื่อผู้ทดลองกำลังสนใจกับผลตอบสนองที่มีลักษณะเป็นส่วนโค้ง

○ **การออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล (Fractional Factorial Design)**

การออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล เป็นการทดลองที่ใช้ในกรณีเมื่อการทดลองมีหลายปัจจัย ทำให้ต้องเสียเวลาในการเก็บข้อมูลมาก ดังนั้นจะทำให้ความสัมพันธ์ของทริท

เมนต์ (Treatment Combination) บางตัวถูกคัดออกไปโดยอาศัยหลักการของการคอนฟาวด์ (Confound) ซึ่งจะทำให้ข้อมูลที่ใช้ในการทดลองนั้นลดลง

ประโยชน์ของการทดลองแบบแฟกทอเรียล

1. ในกรณีที่ต้องการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยนำเข้าจำนวนหลายตัว จะใช้จำนวนสิ่งตัวอย่างในการทดลองจำนวนที่น้อยกว่าการทดลองทีละ 1 ปัจจัย (One-Factor-at-a-Time)
2. ใช้เวลาการทดลองที่น้อยกว่า เนื่องจากเป็นการศึกษาปัจจัยหลายตัวพร้อมๆกัน
3. ผลสรุปจากการทดลองแบบแฟกทอเรียลสามารถสรุปได้ครอบคลุมมากกว่า เนื่องจากสามารถพิจารณาในส่วนของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยในการทดลองด้วย

หลักการทางสถิติที่จำเป็นในการวิเคราะห์ข้อมูล

1. การทดสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square) เป็นการวิเคราะห์ว่าการออกแบบที่ได้ออกแบบขึ้นมาใช้ในการทดลองนั้นมีความเหมาะสมเพียงใด ซึ่งในการทดลองทุกครั้งจะมีความผันแปรที่ไม่สามารถอธิบายได้ (Unexplained Variable) หรือความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเสมอ การออกแบบที่ดีนั้นจะต้องทำให้เกิดความผันแปรที่ไม่สามารถอธิบายได้น้อยที่สุด

$$\text{สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Square)} = \frac{\text{ความผันแปรที่อธิบายได้} \times 100\%}{\text{ความผันแปรทั้งหมด}} \quad (2.11)$$

ถ้าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Square) มีค่าต่ำ สามารถแก้ไขได้โดย

- เพิ่มจำนวนซ้ำของการทดลอง
- ตรวจสอบปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง แล้วออกแบบการทดลองใหม่
- ถ้าทำการเพิ่มปัจจัยอื่นแล้วค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจยังมีค่าต่ำอยู่ แสดงว่าผลจาก

ปัจจัยรบกวน (Noise Factor) มีอยู่มาก ต้องทำการบล็อกเพื่อลดปัจจัยรบกวน

2. การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking) จากสมการ

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ijk} \quad (2.12)$$

โดย μ คือค่าเฉลี่ย

τ_i คืออิทธิพลที่เกิดจากปัจจัย

ε_{ij} คือความคลาดเคลื่อน

ในการออกแบบการทดลองส่วนใหญ่จะตั้งสมมติฐานในการวิเคราะห์โดยที่ Y ซึ่งเป็นตัวแปรตาม มีการกระจายแบบปกติ (Normal Distribution) ซึ่ง Y จะมีการกระจายแบบปกติได้นั้นจะต้องให้ ε_{ijk} มีการกระจายแบบปกติด้วย และต้องเป็นการกระจายที่เป็นอิสระตามสมมติฐาน $\varepsilon_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$ การตรวจสอบ ε_{ij} มี 3 ขั้นตอนคือ

1. การตรวจสอบการกระจายว่าเป็นการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ โดยใช้วิธีตรวจสอบต่อไปนี้

- การทดสอบแบบไคร์สแควร์ (χ^2 - Goodness of Fit Test)
- การทดสอบแบบ Kolmogorov – Smirnov
- การตรวจสอบโดยใช้กระดาษตรวจสอบการแจกแจงปกติ (NOPP)

2. การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) โดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) แล้วดูลักษณะการกระจายที่แทนข้อมูลในแผนภูมิว่าเป็นรูปแบบที่อิสระหรือไม่

3. การตรวจสอบความคงที่ของความแปรปรวน (Variance Stability) โดยใช้แผนภูมิการกระจาย ซึ่งเป็นแผนภูมิแสดงการกระจายค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) ในแต่ละระดับของปัจจัย ถ้ารูปร่างการกระจายของข้อมูลที่ออกมา ไม่เป็นลักษณะของการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความแปรปรวนแสดงว่าข้อมูลมีความคงที่ของความแปรปรวน

2.2.4 ระยะเวลาปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ (Improvement Phase)

ระยะปรับปรุง (Improve) เป็นระยะที่หาระดับที่เหมาะสม โดยการออกแบบการทดลอง ด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology, RSM) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.2.4.1 การออกแบบการทดลองสำหรับพื้นผิวผลตอบ

วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology, RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลอง และการวิเคราะห์ปัญหาโดยที่ผลตอบที่เราสนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และเรามีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบนี้

การฟิตและวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบจะทำได้ง่ายถ้าเราเลือกการออกแบบการทดลองที่เหมาะสม ซึ่งลักษณะของการออกแบบที่ต้องพิจารณาบางประการคือ

- ทำให้เกิดการแจกแจงที่เหมาะสมของข้อมูลตลอดบริเวณที่ทำการพิจารณา
- ทำให้สามารถตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลอง และ Lack of Fit ได้
- ทำให้การทดลองสามารถเกิดขึ้นได้ในบล็อกร
- ทำให้การออกแบบที่มีอันดับ (Order) สูงขึ้น สามารถสร้างขึ้นได้ตามลำดับ
- ให้ค่าประมาณภายในของความผิดพลาด
- ไม่ต้องรันการทดลองจำนวนมาก
- ไม่ต้องมีหลายระดับของตัวแปรอิสระ
- คำนวณพารามิเตอร์ในแบบจำลองได้ง่าย

การออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่หนึ่ง (First Order Model)

สมมติว่าเราต้องการพิตแบบจำลองอันดับหนึ่งที่มี k ตัวแปร

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (2.13)$$

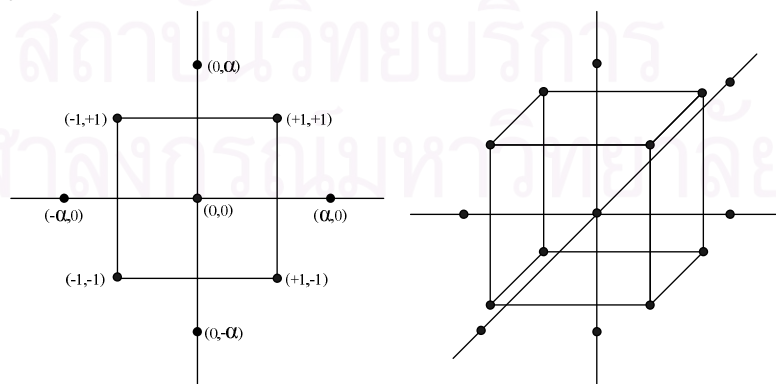
ซึ่งเป็นประเภทของการออกแบบพิเศษชนิดหนึ่ง ที่จะทำให้ความแปรปรวนของสัมประสิทธิ์ของการถดถอยมีค่าต่ำสุด และเรียกว่า การออกแบบเชิงตั้งฉากอันดับที่หนึ่ง (Orthogonal First-Order Model) โดยการออกแบบชนิดนี้สามารถทำได้โดยการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล

การออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่สอง

เนื่องจากการออกแบบแบบจำลองอันดับที่สองไม่สามารถใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 2 (ยกเว้น การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 3^k) ดังนั้นในการออกแบบการทดลองจึงเพิ่มการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลให้มีจุดเพียงพอที่จะหาแบบจำลองอันดับที่สองได้ ซึ่งการออกแบบลักษณะนี้มีหลายประเภทดังนี้

- การออกแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Design: CCD)

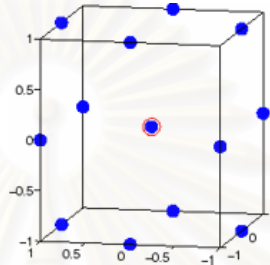
โดยทั่วไป CCD จะประกอบไปด้วย 2^k แฟคทอเรียลที่มี n_f รัน, 2^k รันในแนวแกนหรือในแนวรูปดาว และ n_c รันที่จุดศูนย์กลาง การพัฒนา CCD ในทางปฏิบัติส่วนมากจะเกิดจากการทดลองแบบเป็นอันดับ นั่นคือ การออกแบบ 2^k ถูกนำมาใช้เพื่อพิตแบบจำลองอันดับหนึ่งแล้วพบว่า แบบจำลองนี้ไม่เหมาะสมกับข้อมูลนี้ ดังนั้นจึงได้มีการรันเพิ่มขึ้นในแนวแกน เพื่อให้สามารถใส่พจน์ควอดราติกลงในแบบจำลองได้ CCD เป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพมากในการพิตแบบจำลองอันดับที่สอง มีพารามิเตอร์อยู่สองตัวในการออกแบบที่จะต้องถูกกำหนด นั่นคือระยะทาง α ของการรันในแนวแกนของจุดศูนย์กลางในการออกแบบ และจำนวนของจุดศูนย์กลาง n_c



รูปที่ 2.7 การออกแบบ CCD สำหรับ $k = 2$ และ $k = 3$

- การออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน (Box – Behnken Design)

การออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน เป็นการออกแบบสามระดับสำหรับพื้นผิวผลตอบ การออกแบบถูกสร้างขึ้นจากการรวมเอาการออกแบบแฟกทอเรียล 2^k กับการออกแบบบล็อกไม่ บริบูรณ์ ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพมากในด้านจำนวนของการรันที่ต้องการ และการ ออกแบบนี้ยังมีความสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้อีกด้วย



รูปที่ 2.8 การออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคนสำหรับสามตัวแปร

จากรูปแสดงให้เห็นถึงการออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคนที่มีตัวแปร 3 ตัวแปร รูปทาง เรขาคณิตของการออกแบบ จะสังเกตเห็นว่า การออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคนเป็นการออกแบบ รูปทรงกลม ที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี $\sqrt{2}$ นอกจากนั้น การออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน ไม่ได้รวมเอาจุดใดๆ ที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากขีดจัดบนและล่างของแต่ละตัว แปรเอาไว้ การกระทำเช่นนี้เป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อจุดที่อยู่บนมุมของลูกบาศก์ คือ การรวมของ ปัจจัยระดับ (Factor Level Combination) ที่แพงมากหรือเป็นไปได้ที่จะทำการทดลอง เนื่องจาก ข้อจำกัดทางด้านกายภาพของกระบวนการ

2.2.5 ระยะเวลาติดตามควบคุม (Control Phase)

ระยะเวลาควบคุม (Control) เป็นช่วงสุดท้ายของกระบวนการ DMAIC โดยมีการจัดทำ มาตรฐานสำหรับปัจจัยนำเข้า กระบวนการ และผลลัพธ์ เพื่อรักษามาตรฐานหลังจากที่ได้ดำเนิน โครงการปรับปรุง โดยมีการวางแผนควบคุมกระบวนการ เพื่อมุ่งป้องกันไม่ให้เกิดขึ้น ซ้ำอีก ดังเช่นการปรับปรุงวิธีการทำงาน จัดทำคู่มือการปฏิบัติงาน การจัดทำแผนการฝึกอบรม กำหนดตัวชี้วัดสำหรับการควบคุม การตรวจสอบกระบวนการ การใช้กลไกสำหรับตรวจจับความ บกพร่องและการติดตามควบคุมกระบวนการด้วยการใช้แผนภูมิควบคุมหรือการควบคุม กระบวนการเชิงสถิติ (Statistical Process Control) รวมทั้งการประเมินและสรุปผลการดำเนิน โครงการ

2.2.5.1 การจัดทำเอกสารและสร้างมาตรฐาน

การดำเนินงานกับกระบวนการที่เปลี่ยนแปลงต้องมีการจัดทำเอกสารขึ้นมาใหม่หรือแก้ไขเอกสารเดิม และอบรมแนะนำให้กับพนักงานได้เข้าใจและนำไปปฏิบัติได้จริง เอกสารที่ควรจะเปลี่ยนแปลงได้แก่ เอกสารคู่มือการปฏิบัติงาน เอกสารหลักสูตรการฝึกอบรม เอกสารการติดตามงาน เป็นต้น

			วันที่ออกเอกสาร : ออกโดย : อนุมัติโดย :		
ชื่อผลิตภัณฑ์					
ชื่อกระบวนการ					
รหัสกระบวนการ					
ผังการไหล กระบวนการ	คำแนะนำ	รหัส	จุดควบคุม/ ตรวจสอบ	การตอบสนอง ต่อความผิดปกติ	หมายเหตุ
▽					
▽					
□					
▽					
□					
□					

รูปที่ 2.9 ตัวอย่างแผนผังควบคุมคุณภาพกระบวนการ

2.2.5.2 แผนภูมิควบคุม

แผนภูมิควบคุม (Control Chart) คือแผนภูมิหรือกราฟที่เขียนขึ้นล่วงหน้าโดยอาศัยข้อมูลจากข้อกำหนดทางเทคนิค (Specification) ที่ระบุคุณสมบัติทางคุณภาพข้อใดข้อหนึ่งของชิ้นงานที่ทำการผลิตและต้องการจะควบคุมนั้นเพื่อเป็นแนวทางในการติดตามผลการผลิตจากกระบวนการผลิตขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งโดยการตรวจวัดค่าซึ่งวัดได้ (Variable) ที่เรียกว่าค่าวัดหรือการนับจำนวนขอค่าที่เป็นหน่วยนับ (Attribute) แล้วเขียนบันทึกลงในแผนภูมินั้นๆ ซึ่งโดยปกติจะมี 3 เส้น ได้แก่ เส้นค่ากลาง คือเส้นที่แสดงขนาดหรือจำนวนที่เป็นข้อกำหนดหรือเป้าหมายของการผลิต พร้อมกับเส้นแสดงขอบเขตควบคุมค่าสูงและเส้นแสดงขอบเขตควบคุมค่าต่ำที่อนุญาตให้มีความคลาดเคลื่อนในการผลิตเกิดขึ้นได้และหากอยู่ในขอบเขตควบคุมนี้ก็ถือว่า ผลการผลิตยอมรับได้ แต่หากว่าค่าที่ได้อยู่นอกเหนือขอบเขตควบคุม ถือว่าการผลิตในขณะนั้นยอมรับไม่ได้จะต้องมีการปรับปรุงแก้ไขจุดบกพร่องโดยทันทีต่อไป

ความผันแปรต่างๆมีผลมาจากสาเหตุสำคัญ 2 ชนิดคือ

- สาเหตุปกติวิสัย หรือสาเหตุโดยบังเอิญ (Chance Cause) เป็นกลุ่มสาเหตุของความผันแปรที่ไม่มีความรุนแรงและไม่มีผลต่อคุณภาพของสินค้าที่ผลิตได้ เกิดจากความผันแปรหรือ

ความแตกต่างเล็กน้อยๆของวัตถุดิบและปัจจัยต่างๆซึ่งไม่มีสองสิ่งๆที่เหมือนกันทุกประการ ความผันแปรในคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากสาเหตุที่เป็นปกติวิสัยของการผลิตจึงเป็นสิ่งที่ยอมรับได้

- สาเหตุที่ระบุได้ หรือสาเหตุที่กำจัดได้ (Assignable Cause) เป็นกลุ่มสาเหตุของความผันแปรที่เกิดจากความผิดพลาด ความผิดปกติ ชำรุด ความไม่ได้เกณฑ์ ของปัจจัยการผลิตต่างๆที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และไม่ใช่เป็นปกติวิสัยหรือธรรมชาติของการผลิต จำเป็นจะต้องได้รับการกำจัดหรือแก้ไขจึงจะทำให้คุณภาพของงานผลิตกลับเข้าสู่สภาวะปกติอีกครั้งได้

แผนภูมิควบคุมแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ โดยพิจารณาจากคุณลักษณะของตัวแปรที่ใช้เขียนแผนภูมิ คือ

- แผนภูมิควบคุมชนิดข้อมูลมีค่าต่อเนื่องหรือเป็นข้อมูลจากหน่วยวัด (Continuous Value) ประกอบไปด้วยแผนภูมิ \bar{x} -R และ แผนภูมิ x
- แผนภูมิควบคุมชนิดข้อมูลมีค่าเป็นค่าแฉกนับ (Discrete Value) เป็นข้อมูลจากหน่วยนับ ประกอบไปด้วยแผนภูมิ np แผนภูมิ p แผนภูมิ c และแผนภูมิ u

แผนภูมิควบคุมแบบ p (p chart)

เนื่องจากงานวิจัยนี้มีลักษณะของข้อมูลเป็นแบบสัดส่วนของเสีย จึงเลือกพิจารณาเฉพาะแผนภูมิควบคุมแบบ p ซึ่งใช้วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์โดยแยกว่าผลิตภัณฑ์นั้นตรงกับที่ต้องการหรือไม่ กล่าวคือ ใช้ได้ (Accept) หรือใช้ไม่ได้ (Reject) ซึ่งดูได้จากการเห็นหรือจากการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ที่ใช้ไม่ได้นี้จะหมายถึงผลิตภัณฑ์ที่มีข้อบกพร่องซึ่งรวมทั้งผลิตภัณฑ์ซึ่งอาจจะแก้ไขใหม่ได้ (Rework) และแก้ไขไม่ได้แล้ว (Spoilage) ด้วยการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ อาจจะทำการตรวจสอบทุกชิ้นหรือจะเลือกตัวอย่างมาตรวจสอบก็ได้แต่กรณี อัตราส่วนของจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ใช้ไม่ได้กับจำนวนผลิตภัณฑ์ที่นำมาตรวจสอบ (p) ซึ่งจะนำไปใช้เขียนแผนควบคุมเพื่อดูว่าผลิตภัณฑ์ที่ผลิตขึ้นชุดนี้ใช้ได้ดีหรือมีความผันแปร (Variation) เพื่อจะได้ทราบว่ามีอะไรที่ควรปรับปรุงแก้ไข การสร้างแผนภูมิแบบนี้ใช้หลักการของการแจกแจงทวินาม (Binomial Distribution) เพื่อจะดูการเปลี่ยนแปลงของค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ถือว่ามิชอบบกพร่อง โดย

$$p = \frac{\text{จำนวนผลิตภัณฑ์ที่มีบกพร่องจากการตรวจสอบ}}{\text{จำนวนตัวอย่างทั้งหมดที่ทำการตรวจสอบ}} \quad (2.14)$$

ค่าสัดส่วนของเสียโดยทั่วไปจะมีค่าน้อย เนื่องจากค่าของ p มีค่าน้อย ดังนั้นจำนวนตัวอย่างในแต่ละกลุ่มตัวอย่างจึงมักต้องมีค่ามากจึงจะสร้างแผนภูมิควบคุมได้ดี ซึ่งข้อมูลสำหรับการสร้างแผนภูมิ p นิยมซึ่งสมการในการคำนวณเพื่อสร้างแผนภูมิควบคุมแบบ p มีดังนี้

$$UCL = \bar{p} + 3\sqrt{\bar{p}(1-\bar{p})/n} \quad (2.15)$$

$$CL = \bar{p} \quad (2.16)$$

$$LCL = \bar{p} - 3\sqrt{\bar{p}(1-\bar{p})/n} \quad (2.17)$$

ในการแก้ไขขอบเขตการควบคุม ถ้าจุดใดอยู่นอกเขตการควบคุมให้ทำการตรวจสอบหาสาเหตุแล้วทำการแก้ไข เช่นเดียวกับแผนภูมิควบคุมความแปรผัน หากขอบเขตการควบคุมใหม่ โดยลบลจุดที่อยู่นอกเขตการควบคุมออก ถ้าจุดใดหาสาเหตุที่บกพร่องไม่ได้ไม่ต้องลบลจุดนั้นออก

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องแก้ว (Glass)

เนื่องจากของแม่แบบที่ใช้ผลิตเลนส์บางของโรงงานกรณีศึกษา เป็นแม่แบบแก้ว ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแก้ว มีรายละเอียดดังนี้

2.3.1 แก้ว (Glass)

แก้วคือวัสดุเซรามิกที่ถูกทำขึ้นจากสารอนินทรีย์ที่อุณหภูมิสูง แก้วแตกต่างจากวัสดุเซรามิกอื่นๆคือ เมื่อองค์ประกอบถูกหลอมเหลวโดยให้ความร้อนและทำให้เย็นตัวลงแล้ว แก้วจะแข็งตัวโดยไม่เกิดโครงสร้างผลึก ดังนั้นแก้วจึงเป็นวัสดุที่ไม่มีผลึกหรืออสัณฐาน โมเลกุลของแก้วจะไม่มีระเบียบเป็นระยะๆ พฤติกรรมการแข็งตัวของแก้วจะแตกต่างกับของแข็งที่มีโครงสร้างผลึก โลหะบริสุทธิ์เมื่อแข็งตัวที่จุดหลอมเหลวจะเกิดผลึกในโครงสร้างทำให้ปริมาตรจำเพาะลดลง ในทางตรงกันข้ามเมื่อของเหลวของแก้วถูกทำให้เย็นลงจะไม่เกิดผลึกขึ้นในโครงสร้างและไม่เกิดการลดลงของปริมาตรจำเพาะ เมื่ออุณหภูมิลดลงของเหลวจะหนืดขึ้นและมีสภาพแข็งขึ้น

2.3.1.1 โครงสร้างของแก้ว

ในการศึกษาโครงสร้างของแก้วจะเริ่มต้นจากโครงสร้างซิลิเกต ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างซิลิเกตเป็นพื้นฐานที่จะประกอบเป็นโครงสร้างซิลิเกตคือ รูปทรงสี่หน้า (Tetrahedron) ของ $(\text{SiO}_4)^4$ โดยมีซิลิกอนอยู่ศูนย์กลางของไอออนของออกซิเจนที่มีการจัดเรียงตัวอย่างสมมาตร $(\text{SiO}_4)^4$ หนึ่งหน่วยอาจเชื่อมต่อกับแคตไอออนหรือไอออนของออกซิเจนตัวอื่นและเกิดเป็นซิลิเกตชนิดต่างๆ

อาจแบ่งโครงสร้างของแก้วตามชนิดของแก้วได้เป็น 3 กลุ่ม ได้ดังนี้

- Glass-Forming Oxide แก้วที่ทำมาจากสารอนินทรีย์ส่วนใหญ่มักจะเป็นซิลิกา (SiO_2) หน่วยย่อยพื้นฐานของแก้วซิลิกา คือ SiO_4^{4-} เกิดพันธะเป็น โครงสร้างโครงข่ายอย่างหลวมๆ และไม่เป็นระเบียบ

- Glass-Modifying Oxides เมื่อเติมสารบางชนิดลงไปในแก้วจะทำให้ โครงสร้างโครงข่ายแก้วบางส่วนถูกทำลาย เราเรียกสารเหล่านี้ว่า Network Modifier เช่น แอลคาไล ออกไซด์ เช่น Na_2O , K_2O และแอลคาไลน์เอิร์ทออกไซด์ เช่น CaO และ MgO เป็นต้น เมื่อ โครงสร้างโครงข่ายของแก้วบางส่วนแตกออกทำให้ความหนืดของแก้วลดลงและสามารถขึ้นรูปได้

- Intermediate Oxides ในแก้ว ออกไซด์ของสารประกอบไม่สามารถสร้าง โครงสร้างโครงข่ายของแก้วได้ด้วยตัวเอง แต่สามารถเข้าไปร่วมกับ โครงสร้างโครงข่ายที่มีอยู่ ออกไซด์เหล่านี้จะถูกเรียกว่า Intermediate Oxides ทำให้แก้วมีสมบัติพิเศษ เช่น แก้ว Aluminosilicate จะทนต่ออุณหภูมิที่สูงๆ ได้ดีกว่าแก้วธรรมดา

2.3.1.2 สมบัติของแก้ว

แก้วเป็นวัสดุเปราะ ดังนั้นความแข็งแรงของแก้วจึงขึ้นอยู่กับขนาดของรอย แตกร้าวระดับไมโคร ปริมาตร สภาพแวดล้อม และแฟร็กเจอร์ทัพเนนส์ ค่าความแข็งแรงของซิลิกา บริสุทธิ์จะมีค่าประมาณ 6 Gpa และค่าความแข็งแรงของแก้วของกลุ่มซิลิเกตจะมีค่าอยู่ในช่วง 30% ของ ค่านี้ ส่วนแก้วที่มีส่วนประกอบของอะลูมินาและซิลิกอนไนไตรด์จะมีความแข็งแรงมากกว่า ส่วนกลุ่ม ที่ไม่มีออกไซด์นั้นจะอ่อนกว่า

การเติมสารบางชนิดเข้าไปในแก้วเพื่อเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปของแก้วให้ ดีขึ้น โดยสารที่เพิ่มเข้าป็นั้นจะช่วยให้อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำลงและลดความหนืดในการไหลให้น้อยลง ปกติแล้วแก้วจะมีความหนืดที่อุณหภูมิเหนืออุณหภูมิทรานซิชัน (Transition Temperature) เนื่องจากพันธะระหว่างอะตอมสามารถต้านทานการเปลี่ยนรูปของแก้วที่อุณหภูมิเหนืออุณหภูมิ ทรานซิชัน และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความหนืดจะลดลง

ในกระบวนการผลิตแก้วจะมีอุณหภูมิที่มีผลต่อความหนืดของแก้วประกอบด้วย

- จุดหลอมเหลว (Melting Point)
- จุดขึ้นรูป (Working Point) เป็นจุดที่แก้วมีความสามารถในการไหลเพียงพอ ในการขึ้นรูป
- จุดอ่อนตัว (Softening Point) เป็นจุดที่แก้วเกิดการเปลี่ยนรูปโดยน้ำหนักของ ตัวมันเอง
- จุดอบอ่อน (Annealing Point) เป็นจุดที่มีความเค้นภายในลดลง

- จุดความเครียด (Strain Point) เป็นจุดที่มีความเครียดภายในลดลงถึงค่าต่ำสุดภายในหลัง 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดนี้แก้วจะเกิดการแข็งตัว

แก้วชนิดแข็ง (Hard Glass) จะมีจุดอ่อนตัวที่สูงกว่าแก้วชนิดอ่อน (Soft Glass) และแก้วชนิดลอมกลาส (Long Glass) จะมีความแตกต่างระหว่างจุดอ่อนตัวและจุดความเครียดค่อนข้างมาก หมายความว่า ลอมกลาสจะแข็งตัวได้ช้ากว่าชอร์ตกลาส (Short Glass) เมื่ออุณหภูมิลดลง

2.3.1.3 กระบวนการผลิตแก้ว

ผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากแก้วจะถูกผลิตขึ้น โดยการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงจนกระทั่งหลอมละลายและตามด้วยกระบวนการขึ้นรูปต่างๆ เช่น Molding Drawing และ Rolling เพื่อให้ได้รูปร่างตามต้องการ จุดหลอมเหลวของซิลิกาบริสุทธิ์ที่ใช้ในการหลอมแก้วจะอยู่ประมาณ 1700°C การเติมหินปูน (Lime) และโซดาแอส (Soda Ash) เข้าไปจะช่วยให้จุดหลอมเหลวต่ำลง ทั้งหินปูน (CaO) และ โซดาแอส (Na_2O) ทำหน้าที่เป็นฟลักซ์ของซิลิกาและลดอุณหภูมิการหลอมเหลวลง ดังนั้นการเตรียมวัตถุดิบให้มีน้ำหนักสอดคล้องกับส่วนผสมจึงเป็นเรื่องที่จำเป็นอย่างยิ่ง

2.3.1.4 การเพิ่มความแข็งแรงให้กับแก้ว

แก้วถูกทำให้แข็งแรงได้ดังนี้

- การเพิ่มความแข็งแรงด้วยกระบวนการเทมเปอร์ (Tempered Glass) เป็นวิธีการทำให้แก้วแข็งแรงขึ้นโดยการใช้ความร้อนกับแก้วจนถึงช่วงอุณหภูมิเทมเปอร์ระหว่าง $620-640^{\circ}\text{C}$ จากนั้นทำให้แก้วเย็นตัวอย่างรวดเร็วหรือชุบแข็งที่บริเวณผิวหน้าของแก้วโดยใช้อากาศ ในระหว่างการเย็นตัวนี้ ที่ผิวภายนอกของแก้วจะเย็นตัวก่อนอย่างรวดเร็วทำให้อุณหภูมิต่ำกว่าจุดความเครียด (Strain Point) ดังนั้นผิวนอกจึงหดตัว ส่วนด้านในของแก้วยังคงร้อนอยู่เหนือจุดความเครียดที่ผิวหน้า เป็นผลทำให้เกิดความเค้นแบบดึง (Tensile Stress) ขึ้นภายในของแก้วและเกิดความเค้นแบบอัด (Compressive Stress) ที่ผิวนอก ทำให้แก้วแข็งแรงขึ้น Tempered Glass จะมีความต้านทานต่อแรงกระแทกได้สูงกว่า Annealed Glass และมีความแข็งแรงมากกว่า Annealed Glass ถึง 4 เท่า แก้วประเภทนี้มักจะถูกใช้เป็นที่กระจกหน้าต่างรถยนต์

- การเพิ่มความแข็งแรงโดยการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) เป็นการทำให้เกิดความเค้นอัดที่ผิวของแก้ว โดยการแลกเปลี่ยนไอออน อาจเรียกวิธีนี้ว่ากระบวนการเคมีเทมเปอร์ (Chemical Tempering) หรือการเพิ่มความแข็งแรงโดยเคมี (Chemical Strengthening) ที่ผิวแก้วที่มีไอออนขนาดเล็กจะถูกจุ่มลงในสารละลายที่มีไอออนขนาดใหญ่และไอออนขนาดใหญ่นี้จะเข้าไปแทนที่ไอออนขนาดเล็ก เป็นผลทำให้ผิวนอกของแก้วเกิดความเค้นแบบอัด และภายในแก้วจะเกิดความเค้นแบบดึงขึ้นทำให้แก้วแข็งแรงขึ้น การแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะทำที่อุณหภูมิต่ำกว่า

อุณหภูมิทรานซิชัน (T_g) ทำให้โครงสร้างที่เป็นตาข่ายของแก้วไม่สามารถยับเขยื้อนหรือผ่อนคลายตัวได้โดยง่ายส่งผลให้เกิดความแข็งแรงที่ผิว ธาตุที่เป็นคู่แลกเปลี่ยนไอออนระหว่างกันในแก้วคือโซเดียมไอออน (Na^+) ลิเทียมไอออน (Li^+) และโพแทสเซียมไอออน (K^+) ช่วงอุณหภูมิที่เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้คืออยู่ที่ประมาณ $200\text{ }^\circ\text{C}$ ถึงเหนือจุดอบอ่อน (Annealing Point) ในทางปฏิบัติจะทำได้โดยการจุ่มแก้วลงในโซเดียมไนเตรดหลอมเหลวสูง (จุดหลอมเหลว $310\text{ }^\circ\text{C}$) หรือโพแทสเซียมไนเตรดหลอมเหลว (จุดหลอมเหลว $337\text{ }^\circ\text{C}$) โดยอุณหภูมิในอ่างโซเดียมอาจสูงได้ถึง $450\text{ }^\circ\text{C}$ ได้ และอ่างโพแทสเซียมอุณหภูมิอาจสูงถึง $525\text{ }^\circ\text{C}$ ทั้งนี้ที่อุณหภูมิสูงจะช่วยให้เกิดอัตราการแลกเปลี่ยนไอออนได้เร็วขึ้น แก้วที่เหมาะสมที่จะทำการเพิ่มความแข็งแรงด้วยวิธีนี้ได้แก่ แก้วที่มีส่วนผสมอะลูมินา-ซิลิกา ส่วนโบโรซิลเกตจะให้ความแข็งแรงไม่ดีเพราะไม่สามารถรักษาไอออนของอัลคาไลนี้ได้ ส่วนแก้วชนิดโซดา-ไลม์จะมีความผ่อนคลายโครงสร้างตาข่ายได้สูงจึงไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ นอกจากนี้วิธีนี้จะเหมาะกับแก้วขนาดบางที่ไม่สามารถทำให้แข็งแรงขึ้นโดยวิธีเทมเปอร์ได้ แก้วที่ผ่านการทำให้แข็งแรงขึ้นด้วยวิธีทางเคมีนี้จะถูกนำไปใช้เป็นกระจกของเครื่องบินความเร็วเหนือเสียง (Supersonic) หรือทำเลนส์ที่เกี่ยวกับโรคตา

2.4 ทฤษฎีเกี่ยวข้องกับการโพลิเมอไรเซชันและโพลิเมอร์

ในการผลิตเลนส์มีกระบวนการหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่ากระบวนการโพลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ซึ่งเป็นกระบวนการสังเคราะห์โพลิเมอร์จากโมโนเมอร์อย่างน้อยสองชนิด ซึ่งรายละเอียดของโพลิเมอร์และกระบวนการโพลิเมอไรเซชัน (Polymerization) มีดังนี้

2.4.1 กระบวนการโพลิเมอไรเซชัน (Polymerization)

กระบวนการทางเคมีที่ทำให้เกิดพันธะระหว่างหน่วยย่อยหรือโมโนเมอร์เรียกว่ากระบวนการโพลิเมอไรเซชัน (Polymerization) หรือกระบวนการสังเคราะห์โพลิเมอร์ โดยออกเป็น 3 ประเภทใหญ่คือ โพลิเมอไรเซชันแบบรวมตัว (Addition Polymerization) เป็นปฏิกิริยาแบบสายโซ่ ประเภทที่ 2 คือ โพลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (Condensation Polymerization) เป็นปฏิกิริยาควบแน่นระหว่างโมโนเมอร์สองชนิดขึ้นไปที่มีหมู่ฟังก์ชันตรงปลายแตกต่างกัน และประเภท 3 คือ โพลิเมอไรเซชันแบบผสม (Combination Polymerization) เป็นกระบวนการเกิดโพลิเมอไรเซชันทั้งแบบรวมตัวและควบแน่นรวมกัน

2.4.1.1 โพลีเมอไรเซชันแบบรวมตัว (Addition Polymerization) กระบวนการนี้เกิดจากโมโนเมอร์ที่ไม่อิมตัวทำปฏิกิริยาซึ่งกันและกันกลายเป็นสายโซ่ยาวในขณะที่เกิดปฏิกิริยาร่วมกัน จะทำให้เกิดหน่วยที่มีความไวต่อการทำปฏิกิริยาหรือพันธะคู่โมโนเมอร์เปิดออกเป็นพันธะเดี่ยวที่มีความไวต่อการทำปฏิกิริยากับโมโนเมอร์ที่มีอยู่ไปจนถึงขั้นเกิดเป็นโพลีเมอร์ กระบวนการแบบรวมตัวนี้จะไม่มียผลพลอยได้ (By Product) หรือสิ่งหลงเหลือออกมาจากปฏิกิริยา นอกเสียจากโมเลกุลของสายโซ่ของโพลีเมอร์เท่านั้น

กระบวนการโพลีเมอไรเซชันแบบรวมตัวเกิดขึ้นได้ 3 ทาง ได้แก่

- ปฏิกิริยารวมตัวเกิดขึ้นจากการกระตุ้นทางเคมีเกิดขึ้นจากภายนอก ทำให้โมเลกุลเกิดการรวมตัวกันขึ้นเป็นปฏิกิริยาแบบสายโซ่ เป็นกระบวนการโพลีเมอไรเซชันของเอทิลีนจากการรวมตัวด้วยวิธีนี้
- คือการจัดเรียงตัวของอะตอมใหม่ภายใต้ปฏิกิริยาของคูโมเลกุล เป็นกระบวนการโพลีเมอไรเซชันของโพลียูรีเทน
- เกิดจากวงแหวนของโมเลกุลเกิดการเปิดและเชื่อมต่อกับ โมเลกุลอื่น

โพลีเมอไรเซชันแบบรวมตัวโดยมีตัวกระตุ้นจะมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา 3 ขั้นตอนคือ **ขั้นริเริ่ม (Initiation)** การเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นโดยมีการใช้ตัวกระตุ้นหรือตัวเร่ง (Catalyst) เข้าไปในโมโนเมอร์เพื่อทำให้เกิดการแตกตัวของอนุมูลอิสระ (Free-Radical) ซึ่งเป็นกลุ่มอะตอมที่มีอิเล็กตรอนขาดคู่หรืออิเล็กตรอนอิสระ จะเป็นตัวที่เกิดพันธะโควาเลนต์กับโมเลกุลอื่นที่ขาดคู่เช่นกัน

ขั้นแผ่ขยาย (Propagation) เป็นกระบวนการที่อนุมูลอิสระของโมโนเมอร์ที่เกิดขึ้นเข้าทำปฏิกิริยากับโมโนเมอร์โมเลกุลอื่นอย่างต่อเนื่อง โดยที่หัวท้ายของโมเลกุลจะเปิดออกเพื่อให้อิเล็กตรอนอิสระเกิดพันธะโควาเลนต์กับโมเลกุลอื่นต่อไป

ขั้นสิ้นสุดปฏิกิริยา (Termination) เป็นกระบวนการที่ทำให้กระบวนการโพลีเมอไรเซชันสิ้นสุดลงโดยการเติมสารเทอร์มิเนเตอร์ (Terminator) เพื่อหยุดการเกิดอิเล็กตรอนอิสระ หรืออาจใช้วิธีทำให้อนุมูลอิสระเกิดการรวมกันหรืออาจเติมสารเจอปน (Impurity) ลงไปเพื่อให้กระบวนการโพลีเมอไรเซชันสิ้นสุดลง

2.4.1.2 โพลีเมอไรเซชันแบบควบแน่น (Condensation Polymerization) ปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันแบบนี้เกิดจากการรวมตัวของหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในโมโนเมอร์ เพื่อขยายโมเลกุลให้ใหญ่ขึ้นและภายหลังการเกิดปฏิกิริยาจะมีสารโมเลกุลเล็กๆเป็นผลพลอยได้ (By Product) ซึ่งบางครั้งโมเลกุลเหล่านี้ อาจเป็นตัวกำเนิดโพลีเมอไรเซชันในอนาคต หรืออาจเป็นเพียงสารมลทินที่ไม่ต้องการปนอยู่ในผลิตภัณฑ์โพลีเมอร์สำเร็จ

2.4.1.3 โพลีเมอไรเซชันแบบผสม (Combination Polymerization) กระบวนการโพลีเมอไรเซชันที่รวมการเกิดทั้งแบบรวมตัวและแบบควบแน่นอาจเกิดขึ้นได้ เช่น กลไกการเกิดของโพลีเอสเทอร์ของโพลียูรีเทน ในกระบวนการนี้จะเริ่มต้นจากโพลีเมอไรเซชันแบบควบแน่นก่อน ซึ่งจะทำให้เกิดโพลีเมอร์กลุ่มเล็กๆมีความสามารถที่จะเกิดปฏิกิริยาและทำให้เกิดโพลีเมอไรเซชันแบบรวมตัวกับโมเลกุลกลุ่มอื่น เกิดเป็นโมเลกุลของโพลีเมอร์กลุ่มใหม่ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

2.4.2 ทฤษฎีเกี่ยวข้องกับโพลีเมอร์ (Polymer)

โพลีเมอร์ที่ใช้งานอยู่ในอุตสาหกรรมส่วนมากได้จากการสังเคราะห์โดยกระบวนการที่ทำให้โมเลกุลขนาดเล็กมาเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ด้วยพันธะโคเวเลนต์จนโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่และยาวขึ้น โมเลกุลขนาดเล็กที่เป็นตัวเริ่มต้นเรียกว่า โมโนเมอร์ (Monomer) ซึ่งมาจากภาษากรีกมีความหมายว่า ส่วนเดียว หน่วยเดียว หรือหน่วยย่อย โมโนเมอร์ที่มาต่อกันเป็นสายโซ่ยาวเรียกว่า โพลีเมอร์ (Polymer) หมายถึงหลายๆส่วน หรือหลายๆหน่วยมาต่อเชื่อมกันด้วยพันธะเคมีกลายเป็นของแข็ง หน่วยย่อยพื้นฐานโดยมากจะเป็นโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ซึ่งประกอบไปด้วยพื้นฐานคือ ไฮโดรเจนและคาร์บอน พันธะที่ยึดเหนี่ยวระหว่างคาร์บอนและไฮโดรเจนคือพันธะโคเวเลนต์ มีทั้งที่เป็นพันธะเดี่ยว (Single Bond) และพันธะคู่ (Double Bond)

2.4.2.1 รูปร่างของโมเลกุล

การเชื่อมต่อของโมเลกุลของเมอร์แล้วเป็นสายโซ่โพลีเมอร์จะมีลักษณะการจัดเรียงตัวแบบซิกแซก (Zigzag) การต่อกันของโมเลกุลยาวขึ้นเป็นสายโซ่จะไม่ใช่เป็นเส้นตรงตลอด แต่จะมีการโค้งงอหรือเกิดการบิดเบี้ยวเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากอะตอมในสายโซ่เกิดการหมุนไปยังตำแหน่งต่างๆได้ทำให้สายโซ่โพลีเมอร์ที่เกิดขึ้นมีการจัดเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบคล้ายเส้นบะหมี่ คุณลักษณะแบบนี้ทำให้โพลีเมอร์มีการยืดตัวได้สูงมาก

2.4.2.2 โครงสร้างโมเลกุล

คุณลักษณะทางกายภาพของโพลีเมอร์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับน้ำหนักและรูปร่างของโมเลกุลแต่เพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของโซ่โพลีเมอร์ที่แตกต่างกันด้วย ปัจจุบันการสังเคราะห์โพลีเมอร์ที่ทันสมัยสามารถควบคุมลักษณะโครงสร้างของโพลีเมอร์ได้เป็นอย่างดี ลักษณะของโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยโครงสร้างแบบเส้น แบบกิ่งก้าน แบบเชื่อมขวาง และแบบตาข่าย

2.4.2.3 การจำแนกชนิดของโพลีเมอร์

วิธีการจำแนกชนิดของโพลีเมอร์แบ่งออกเป็นหลายวิธี ทั้งการอาศัยการจำแนกโดยวิธีการสังเคราะห์โมเลกุลโดยอาศัยโครงสร้างโมเลกุล หรือโดยอาศัยลักษณะทางเคมีของโพลีเมอร์แต่ละชนิดเป็นตัวจำแนก มีวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้คือ อาศัยโครงสร้างหรือรูปร่างของโมเลกุลซึ่ง

แบ่งเป็นโพลิเมอร์ที่มีโมเลกุลแบบเส้นและโพลิเมอร์ที่มีโมเลกุลแบบกิ่งก้าน โพลิเมอร์แบบเส้นจะมีสายโซ่ของโมเลกุลคล้ายเส้นสปาเกตตี ส่วนโพลิเมอร์แบบกิ่งก้านจะมีสายโซ่โมเลกุลหลัก จากนั้นจะมีสายโซ่แตกกิ่งก้านออกมาคล้ายกิ่งไม้ โพลิเมอร์จำแนกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่ พลาสติก และ อีลาสโตเมอร์

พลาสติกเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่กลุ่มใหญ่อาจมีหมู่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบแตกต่างกัน ทำให้รวมตัวกันหรือเข้าแบบให้มีรูปร่างตามที่ต้องการ โดยแบ่งพลาสติกออกเป็น 2 ประเภทตามพันธะเคมีที่กระทำได้ออกมาเป็นโครงสร้างและลักษณะเฉพาะเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น คือ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) และเทอร์โมเซตติงพลาสติก (Thermosetting Plastic) ส่วนอีลาสโตเมอร์หรือยาง เป็นโพลิเมอร์ที่มีลักษณะยืดหยุ่น (Elastical) ได้มากเมื่อออกแรงดึงและจะกลับมาอยู่ในสภาพเดิมเมื่อปล่อยแรงดึง

1. เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ประกอบไปด้วยสายโซ่โพลิเมอร์ขนาดยาวซึ่งเกิดจากการเชื่อมต่อเข้าด้วยกันของโมโนเมอร์ เป็นพลาสติกที่มีความเหนียว สายโซ่อาจมีกิ่งก้านหรือไม่ก็ได้ การเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่จะเกิดขึ้นจากพันธะแวนเดอร์วาลที่มีพลังงานพันธะอ่อนแอ เทอร์โมพลาสติกอาจมีระบบผลิดหรือสภาพอสัญฐานก็ได้ การเปลี่ยนสภาพของเทอร์โมพลาสติกจะขึ้นอยู่กับความร้อน โดยสามารถหลอมเหลวหรือเปลี่ยนรูปร่างได้ด้วยความร้อนและแข็งตัวเมื่อทำให้เย็น จึงทำการขึ้นรูปโดยการให้ความร้อนสูงๆ อีกทั้งยังสามารถรีไซเคิลได้โดยสมบัติไม่เปลี่ยนแปลง

2. เทอร์โมเซตติงพลาสติก (Thermosetting Plastic หรือ Thermosets) เกิดขึ้นจากสายโซ่โมเลกุลขนาดยาวซึ่งอาจเป็นแบบเส้นหรือกิ่งก้านก็ได้ และเชื่อมต่อกับสายโซ่แบบเชื่อมขวางทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นตาข่ายสามมิติ ส่งผลให้มีความแข็งแรงและเปราะกว่าเทอร์โมพลาสติก เทอร์โมเซตติงจะเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันครั้งเดียว เป็นพลาสติกที่ไม่สามารถทำให้หลอมเหลวได้ด้วยความร้อน โดยจะคงรูปร่างอย่างถาวรได้ด้วยการบ่ม (Set หรือ Cured) ด้วยปฏิกิริยาเคมีด้วยความร้อน เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการสลายตัวหรือไหม้ได้ จึงไม่สามารถหลอมใหม่อีกครั้งหรือทำการรีไซเคิลได้

3. อีลาสโตเมอร์ (Elastomer) จะมีการเปลี่ยนรูปในสภาวะยืดหยุ่นได้มากกว่า 20% อาจมีคุณลักษณะแบบเดียวกับเทอร์โมพลาสติกหรือเป็นแบบเชื่อมขวางแบบเทอร์โมเซตติงก็ได้ ลักษณะของสายโซ่โพลิเมอร์จะเป็นโมเลกุลแบบขดซึ่งสามารถยืดตัวออกได้เมื่อมีแรงกระทำ

4. เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Elastomer) เป็นโพลิเมอร์กลุ่มพิเศษมีกระบวนการผลิตเหมือนเทอร์โมพลาสติก และมีพฤติกรรมเหมือนอีลาสโตเมอร์

2.4.3 เทอร์โมเซตติงพลาสติกพลาสติก (Thermosetting Plastic หรือ Thermosets)

เนื่องจากผลิตภัณฑ์เลนส์ที่ทำการศึกษา มีลักษณะเป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติงพลาสติก ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการศึกษาเฉพาะส่วนที่เป็นเทอร์โมเซตติงโพลีเมอร์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

เทอร์โมเซตติงจะมีการเชื่อมขวางของสายโซ่โพลีเมอร์ที่สูงมาก การเชื่อมขวางจะทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นโครงข่ายสามมิติ และเนื่องจากว่าสายโซ่โพลีเมอร์แบบนี้จะไม่สามารถหมุนหรือเลื่อนได้ง่ายๆ จึงทำให้โพลีเมอร์มีความแข็งแรงและความแข็งสูง แต่สมบัติด้านความเหนียว ความทนทานแรงกระแทกจะมีน้อยมาก และเมื่ออุณหภูมิกลาสสูงในการทดสอบแรงดึง เทอร์โมเซตติงโพลีเมอร์จะแสดงพฤติกรรมคล้ายโลหะเปราะหรือเซรามิก

เทอร์โมเซตติงโพลีเมอร์หลายชนิดจะเริ่มต้นจากสายโซ่โพลีเมอร์เส้นตรงทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของหน่วยซ้ำและคีรีโพลีเมอร์ไรเซชันของโพลีเมอร์นั้นๆ โพลีเมอร์อาจผลิตจากเรซินที่เป็นของเหลวหรือของแข็ง และมีบางชนิดที่ต้องใช้เรซินเหลวมากกว่า 2 ชนิด เช่น กาวอีพอกซีที่มี 2 หลอดและต้องผสมกันก่อนใช้ ตัวที่ทำให้เกิดการเชื่อมขวางของโพลีเมอร์อาจจะเป็นความร้อน ความดัน หรือการผสมเรซินชนิดต่างๆด้วยกัน การเชื่อมขวางของโพลีเมอร์จะเกิดขึ้นได้เพียงครั้งเดียวไม่สามารถย้อนกลับเหมือนเทอร์โมพลาสติก ดังนั้นเทอร์โมเซตติงจึงไม่สามารถนำกลับมารีไซเคิลได้

กระบวนการผลิตเทอร์โมเซตติงโพลีเมอร์

กระบวนการผลิตโพลีเมอร์ของเทอร์โมเซตติงนั้นมีการขึ้นรูปที่ไม่หลากหลาย เพราะข้อจำกัดเรื่องของการเกิดเชื่อมขวางของสายโซ่โพลีเมอร์ที่จะเกิดขึ้นได้เพียงครั้งเดียว

การขึ้นรูปของเทอร์โมเซตติงพลาสติก

1. การขึ้นรูปโดยการอัดเข้าแบบ (Compression Molding) เริ่มต้นจากการใส่เรซินที่เป็นผงหรือเม็ดลงไปแม่พิมพ์ร้อน จากนั้นใช้แรงดันแม่พิมพ์ปิดเข้าหากันและอัดให้เนื้อเรซินแน่น และความร้อนของแม่พิมพ์จะทำให้เรซินหลอมตัวเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชัน จากนั้นปล่อยให้แม่พิมพ์เย็นตัวลงโดยการหล่อเย็น ทำให้โพลีเมอร์แข็งตัวจะได้ชิ้นงานออกมา ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปโดยวิธีนี้ เช่น ชิ้นส่วนรถยนต์ ชิ้นส่วนงานไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

2. การขึ้นรูปโดยการฉีดเข้าแบบ (Injection Molding) เทอร์โมเซตติงสามารถขึ้นรูปโดยวิธีการฉีด ซึ่งให้อัตราการผลิตที่สูงมาก โดยโพลีเมอร์จะถูกฉีดเข้าแม่พิมพ์ในสภาวะหลอมเหลวและปล่อยให้เซตตัว จากนั้นจึงนำชิ้นงานออกมา การฉีดโพลีเมอร์หลอมเหลวนั้นช่วงแรกความหนืดของโพลีเมอร์จะลดลงเมื่อได้รับความร้อน แต่เมื่อเวลาผ่านไปความหนืดจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากโพลีเมอร์เกิดการเชื่อมขวาง ดังนั้นการฉีดโพลีเมอร์เข้าแม่พิมพ์จะต้องฉีดในสภาวะที่ความหนืดยังต่ำอยู่ และขณะที่โพลีเมอร์อยู่ในแม่พิมพ์ต้องมีเวลามากพอที่จะทำให้เกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่โพลีเมอร์สมบูรณ์จนกระทั่งเกิดการแข็งตัว

3. การขึ้นรูปโดยวิธี RIM (Reaction Injection Molding) เริ่มต้นจากโพลีเมอร์ที่อยู่ในสถานะเป็นเรซินเหลว 2 ชนิดหรือชนิดเดียวแต่มีตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยา ถูกฉีดเข้าไปผสมกันที่ห้องผสมแล้วจึงไหลต่อไปยังแม่พิมพ์ เกิดปฏิกิริยาขึ้นภายในและเกิดการเซตตัว

4. การขึ้นรูปโดยวิธีทรานส์เฟอร์โมลดิ้ง (Transfer Molding) จะมีห้องที่ทำให้ความร้อนกับเรซินจนหลอมเหลว จากนั้นใช้กระบอกสูบอัดเรซินเหลวให้ผ่านไป

5. การขึ้นรูปโดยการหล่อ เริ่มจากการผสมเรซินเหลวกับส่วนผสมอื่น จากนั้นเทลงแบบหล่อโดยไม่ต้องอาศัยแรงดันใดๆช่วย จากนั้นปล่อยให้แข็งตัวตามปกติ วิธีนี้นิยมใช้ผลิตพวกยูรีเทนหรือซิลิโคน และยังนิยมใช้ผลิตจิกและฟิกเจอร์จากอีพอกซีและโพลีเอสเตอร์ด้วย

ข้อได้เปรียบของเทอร์โมเซตติงพลาสติก มีดังต่อไปนี้

- มีความเสถียรต่อความร้อนสูง
- มีความแข็งสูงไม่งอได้ง่าย
- มีความเสถียรเชิงมิติสูง
- มีความทนทานต่อการเกิดคืบ (Creep) และการเปลี่ยนรูปภายใต้การใช้งาน
- มีน้ำหนักเบา
- มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าและความร้อนที่ดี

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 ซิกซ์ ซิกมา (Six Sigma) และการประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรม

วิธีการซิกซ์ ซิกมา (Six Sigma) ได้มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในการลดของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ซึ่งตัวอย่างงานวิจัยมีดังนี้

Raisinghani, Ette, Pierce, Cannon และ Daripaly (2005) ได้กล่าวถึง เครื่องมือต่างๆของซิกซ์ ซิกมา ดังนี้

- การวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis, MSA)

สิ่งแรกที่จะทำในการนำซิกซ์ ซิกมาไปใช้ในการแก้ปัญหาคือการวิเคราะห์ความสามารถของการวัด หรือการทำกรวิเคราะห์เครื่องมือวัด ซึ่งแยกวิเคราะห์เป็น ความผันแปรภายใต้เงื่อนไขของระบบการวัด (Repeatability) หรือความผันแปรที่เกิดจากของอุปกรณ์ และความผันแปรระหว่างเงื่อนไขของระบบการวัด (Reproducibility) หรือความผันแปรที่เกิดจากความแตกต่างระหว่างพนักงานวัด

- การควบคุมกระบวนการ (Process Control)

คือการค้นหาความเบี่ยงเบนของผลลัพธ์ และใช้ในการควบคุมค่าเฉลี่ยเพื่อหากระบวนการที่เบี่ยงเบนไปในกระบวนการผลิต ก่อนการยอมรับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยเครื่องมือที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ การควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ (Statistical Process Control, SPC) เป็นการใช้แผนภูมิควบคุม (Control Chart) เพื่อวัดและควบคุมกระบวนการ

- การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments, DOE)

ในกรณีที่กระบวนการผลิตค่อนข้างซับซ้อนและเกี่ยวข้องกับตัวแปรนำเข้าหลายตัว การทดลองแบบครั้งละปัจจัย (One Factor at a Time, OFAT) อาจจะไม่เหมาะสมเนื่องจากไม่สามารถวิเคราะห์อันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างตัวแปรได้ การออกแบบการทดลองจึงถูกนำมาใช้เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรออกและตัวแปรนำเข้า ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ อาจแสดงความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเส้นตรง และอันตรกิริยาระหว่างตัวแปร ผลลัพธ์ของการทำออกแบบการทดลองที่ดีจะได้ตัวแบบคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายผลของตัวแปรตอบสนอง (Response) เพื่อทำการหาค่าที่ดีที่สุด รวมทั้งลดความเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้นในกระบวนการลงด้วย

- การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA)

เป็นเทคนิคที่ใช้ในการกำหนดและจัดความล้มเหลวและความผิดพลาดต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการ โดยเริ่มจากการทำผังกระบวนการและการวิเคราะห์แต่ละขั้นตอนของกระบวนการถึงความเป็นไปได้ของการเกิดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ ขึ้นอยู่กับความรุนแรงของการเกิด ความเป็นไปได้ของการเกิด และความสามารถในการตรวจจับความล้มเหลวนั้นๆ ซึ่งจะได้ค่า Relative Priority Number (RPN) ออกมา หากค่า RPN มีค่าสูง (ปกติกำหนดให้สูงกว่า 120) ต้องมีการทำการแก้ไขในขั้นตอนหรือกระบวนการนั้น การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA) ที่ดีต้องสามารถทำนายและกำจัดสาเหตุของปัญหาออกไปก่อนที่จะเกิดขึ้น และอาจช่วยในการกำหนดกระบวนการที่ต้องการการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่ดีที่สุด

- การควบคุมคุณภาพและการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ (Quality Control and Capability Analysis)

การวัดคุณภาพสุดท้ายของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการผลิตควรได้รับการทำเพื่อวัดระดับคุณภาพ โดยมาตรฐานที่วัดได้แก่ค่า สมรรถภาพกระบวนการ (Process Capability, Cpk) ซึ่งเป็นค่าที่วัดว่ามีความผันแปรเท่าไรในกระบวนการผลิตหรือผลิตภัณฑ์เทียบกับความต้องการหรือข้อกำหนด ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งกระบวนการผลิตหรือผลิตภัณฑ์ที่มีค่าสมรรถภาพกระบวนการต่ำกว่าที่กำหนดควรจะได้รับแก้ไข

ตารางที่ 2.3 ค่าสมรรถภาพกระบวนการ (Process Capability, Cpk) ที่ระดับซิกมาต่างๆ

Process	Cpk	Spec range	Ppm defective
Not capable	<1	± 3 Sigma	2700
Capable	1.33	± 4 Sigma	63.5
Very capable	1.67	± 5 Sigma	0.6
Six Sigma	2	± 6 Sigma	0.002

นอกจากนี้บทความยังได้กล่าวถึงการนำซิกซ์ ซิกมาไปประยุกต์ใช้ในองค์กรที่มีชื่อเสียง เช่น Motorola, Allied Signal, GE เป็นต้น

ในอุตสาหกรรมการผลิตนั้นมีการนำซิกซ์ ซิกมาไปประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายและมีบทความตีพิมพ์มากมาย แต่โดยส่วนใหญ่แล้วตัวแปรตอบสนอง (Response) ในบทความเหล่านั้นจะเป็นข้อมูลแปรผัน (Variable) เนื่องจากเป็นข้อมูลที่มีเครื่องมือทางสถิติให้นำมาประยุกต์ใช้ได้หลากหลายกว่าตัวแปรตอบสนองที่เป็นข้อมูลตามลักษณะ (Attribute) รวมทั้งขนาดตัวอย่างที่ใช้มีจำนวนน้อยกว่า ในขณะที่ให้ข้อมูลในการวิเคราะห์ที่มากกว่าอีกด้วย จึงพบว่าในบางงานวิจัยที่มีตัวแปรตอบสนองหรือค่า Y เป็นข้อมูลตามลักษณะจะมีการพยายามแปลงค่าข้อมูลเหล่านั้นให้เป็นข้อมูลแปรผันก่อนดำเนินการทดสอบของเสียด้วยวิธีการซิกซ์ ซิกมาต่อไป เช่นในงานวิจัยของ Banuelas, Antony และ Brace (2005) ได้นำซิกซ์ ซิกมาไปประยุกต์ใช้ในการลดของเสียในกระบวนการเคลือบผิว (Coating) โดยได้กำหนดให้ตัวชี้วัดสมรรถนะของสายการผลิตคือ จำนวนครั้งของการหยุดสายการผลิตในสายการผลิตเคลือบฟิล์ม และกำหนดให้ข้อบกพร่องคือความขัดข้องของการเปลี่ยนสปินเดิล (Spindle) ของเครื่อง Re-winder ที่มีชนิดของข้อมูลเป็นข้อมูลตามลักษณะ ซึ่งเป็นข้อมูลที่ไม่เป็นที่ต้องการ เนื่องจากการใช้ข้อมูลแปรผันจะให้ข้อมูล (Information) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์มากกว่า รวมทั้งข้อมูลตามลักษณะยังต้องใช้ขนาดตัวอย่างจำนวนมากโดยเฉพาะในกรณีที่อัตราส่วนของเสียต่ำๆ ดังนั้นจึงได้ทำการเปลี่ยนข้อมูลตามลักษณะ ให้เป็นข้อมูลแปรผันโดยการทำการทดสอบสมมติฐาน t-test ว่ารอบเวลาของการตัดมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลของความขัดข้องของ Winder หรือไม่ ซึ่งได้ผลว่ารอบเวลาของการตัดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อการทำงานขัดข้องที่ระดับนัยสำคัญ 5% ดังนั้นจึงใช้ค่ารอบเวลาของการตัดเป็นตัวแปรตอบสนองเนื่องจากเป็นตัวทำนายที่ดีของดำเนินงานของ Winder นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Su, Chiang และ Chiao (2005) ที่ได้นำวิธีการซิกซ์ ซิกมา มาทำการปรับปรุงกระบวนการประกอบเพื่อลดการเกิดตำหนิประเภท Delamination บนวงจรรวม (Integrated Circuit; IC) ซึ่งตำหนิประเภท Delamination เป็นข้อมูลตามลักษณะ จึงได้ทำการแปลงตัวแปรตอบสนองนี้ให้เป็นค่าที่สามารถวัดได้ โดยทำการสุ่มตัวอย่างทดสอบจำนวน 100 ชิ้นในแต่ละเงื่อนไข พบว่าค่ามุมสัมผัส (Contact Angle) ของ Wafer มี

ความสัมพันธ์อย่างยิ่งกับจำนวนของ Delamination ดังนั้นจึงได้กำหนดให้ค่ามุมสัมผัส เป็นค่า Y ที่วัดค่าได้ในการลดตำหนิประเภท Delamination และทั้งสองงานวิจัยนี้เมื่อทำการแปลงค่าตัวแปรตอบสนองหรือค่า Y จากข้อมูลตามลักษณะให้เป็นข้อมูลแปรผันแล้ว จึงทำการดำเนินการตามวิธีการซิกซ์ ซิกมาต่อไปโดยใช้เครื่องมือทางสถิติที่ให้กับข้อมูลแปรผันในการทำการทดลองและวิเคราะห์ผลนั่นเอง

สำหรับงานวิจัยที่ใช้ตัวแปรตอบสนอง (Response) เป็นข้อมูลตามลักษณะ (Attribute) นั้นมีอยู่น้อยมาก อีกทั้งยังพบว่าเครื่องมือทางสถิติที่นำมาประยุกต์ใช้กับข้อมูลชนิดนี้ก็ยังไม่หลากหลายและอาจไม่เหมาะสมกับลักษณะของข้อมูล ดังจะเห็นได้จากงานวิจัยของ อุษณีย์ ถิ่นเกาะแก้ว (2545) ที่ได้ทำการประยุกต์ใช้แนวทางของ Six Sigma เพื่อลดของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตกระป๋อง ซึ่งลักษณะของข้อมูลเป็นข้อมูลตามลักษณะที่มีสัดส่วนของเสียต่ำ (สัดส่วนของเสียก่อนการปรับปรุงมีค่า 0.0044 และหลังการปรับปรุงมีค่า 0.0028) พบว่าในขั้นตอนการควบคุมกระบวนการผลิตได้ใช้แผนภูมิควบคุม p ในการควบคุมสัดส่วนของเสียที่จะเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตโดยได้ทำการตรวจติดตามเป็นรายวัน มีขนาดตัวอย่างในแต่ละวันอยู่ระหว่าง 10,000 ถึง 70,000 กระป๋อง ซึ่งการใช้ขนาดตัวอย่างที่มากเช่นนี้เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นกับกระบวนการอาจทำให้การตัดสินใจล่าช้าได้ เนื่องจากต้องรอให้ผลิตจนครบ 1 วันจึงจะทราบค่าสัดส่วนของเสีย ส่วนงานวิจัยของ ศิริวิดี เอื้ออรรณูโชติ (2546) ได้ใช้แนวทางของซิกซ์ ซิกมาเพื่อปรับปรุงข้อบกพร่องจากคราบสกปรก (Contamination) ของกระบวนการผลิตหัวอ่าน-เขียนสำหรับคอมพิวเตอร์ ซึ่งลักษณะของข้อมูลเป็นแบบข้อมูลตามลักษณะหรือ ผ่าน/ไม่ผ่าน ในขั้นตอนการปรับปรุงได้ทำการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^5 แบบทำซ้ำ 2 ครั้ง แต่ขนาดตัวอย่างที่ใช้ในการออกแบบการทดลองนั้นกลับทำการคำนวณจากการหาขนาดตัวอย่างของการทดสอบสมมติฐานแบบ Two Proportion ซึ่งการคำนวณขนาดตัวอย่างด้วยวิธีนี้ต้องใช้ขนาดตัวอย่างจำนวนมาก กล่าวคือใช้อย่างน้อย 11,472 ชิ้นงานในแต่ละการทดลอง มีการทดลองทั้งหมดจำนวน 64 การทดลอง (สัดส่วนของเสียก่อนการปรับปรุงมีค่า 0.25) ซึ่งการใช้ขนาดตัวอย่างจำนวนมากนี้อาจส่งผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายในการทดลองได้

จากงานวิจัยข้างต้นพบว่าในการดำเนินการลดของเสียด้วยวิธีการซิกซ์ ซิกมานั้น กรณีที่มีค่าตัวแปรตอบสนองเป็นข้อมูลตามลักษณะ (Attribute) หากสามารถทำได้ควรแปลงข้อมูลตามลักษณะนั้นให้เป็นข้อมูลแปรผัน (Variable) เพื่อให้การนำไปวิเคราะห์และการทำการทดลองมีความง่ายและสะดวกขึ้น แต่ถ้าไม่สามารถทำการแปลงค่าได้ อาจประยุกต์ใช้เครื่องมือทางสถิติในงานวิจัยที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้การวิเคราะห์ข้อมูลในกรณีที่ตัวแปรตอบสนองเป็นข้อมูลตามลักษณะรวมทั้งในกรณีที่มีสัดส่วนของเสียต่ำได้

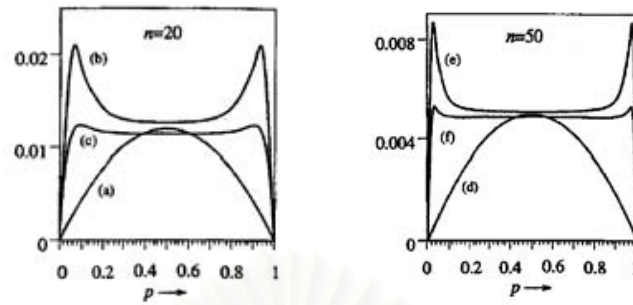
2.5.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลที่มีตัวแปรตอบสนองเป็นจำนวนข้อบกพร่อง (Defectives)

Bisgaard และ Fuller (1994) ได้นำเสนอการแปลงข้อมูล (Transform Data) เมื่อตัวแปรตอบสนอง (Response) ของการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเป็นจำนวนรอยตำหนิหรือจำนวนงานเสีย (Defects or Defectives) ซึ่งตัวแปรตอบสนองชนิดนี้หากนำมาวิเคราะห์โดยตรงจะทำให้ข้อมูลไม่เป็นไปตามสมมติฐานความแปรปรวนคงที่ (Constant Variance) ของตัวแปรตอบสนอง การแก้ปัญหาสามารถทำได้โดยการแปลงข้อมูลก่อนการนำไปวิเคราะห์ ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์ผลของการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อตัวแปรตอบสนองมีความถูกต้องยิ่งขึ้น Bisgaard และ Fuller ได้นำเสนอการแปลงข้อมูล 2 วิธีคือ การแปลงข้อมูลแบบมาตรฐาน (Standard Transformations หรือ Arcsine Square Root Transformations) และการแปลงข้อมูลด้วยวิธีของ Freeman และ Tukey (Freeman and Tukey's (F & T) Modifications) ซึ่งมีสมการการแปลงข้อมูลทั้งสองวิธีดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สมการการแปลงข้อมูลด้วยวิธีมาตรฐานและวิธีของ Freeman และ Tukey เมื่อปัจจัยผลตอบเป็นสัดส่วนของของเสียหรือจำนวนรอยตำหนิ

Table 1. The standard transformations and Freeman and Tukey's (F & T) modifications when using proportion of defectives or count of defects as the response			
TYPE OF DATA	TYPE OF DISTRIBUTION	TRANSFORMATION	F & T'S MODIFICATION
Proportions (\hat{p}) (Defective units in a sample of n units)	Binomial	$\arcsin\sqrt{\hat{p}}$	$\frac{\left(\arcsin\sqrt{\frac{n\hat{p}}{n+1}} + \arcsin\sqrt{\frac{n\hat{p}+1}{n+1}}\right)}{2}$
Counts (\hat{c}) (Defects on a unit)	Poisson	$\sqrt{\hat{c}}$	$(\sqrt{\hat{c}} + \sqrt{\hat{c}+1})/2$

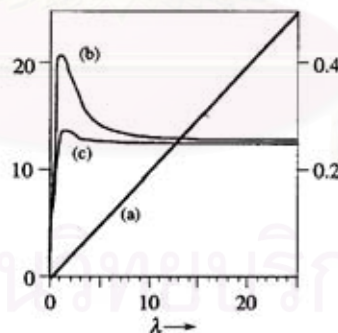
โดยข้อมูลที่เป็นสัดส่วนของเสีย (Proportion Defectives) มีลักษณะการแจกแจงของข้อมูลแบบทวินาม (Binomial Distribution) ค่าของความแปรปรวนเมื่อสัดส่วนของเสียเปลี่ยนแปลงไปแสดงดังรูปที่ 2.10 ที่ขนาดตัวอย่างแตกต่างกัน ($n = 20$ และ $n = 50$) พบว่าหลังการแปลงข้อมูลด้วยวิธีมาตรฐาน และวิธีของ Freeman และ Tukey จะทำให้ความแปรปรวนมีค่าคงที่ขึ้น โดยเฉพาะวิธีของ Freeman และ Tukey จะให้ค่าความแปรปรวนที่คงที่กว่าวิธีมาตรฐานเมื่อสัดส่วนของเสีย (p) มีค่าเข้าใกล้ 0 หรือ 1 และเมื่อขนาดตัวอย่าง (n) มีจำนวนมากจะทำให้สัดส่วนของเสีย (p) ที่มีค่าเข้าใกล้ 0 หรือ 1 มีค่าความแปรปรวนคงที่มากกว่าเมื่อขนาดตัวอย่างมีจำนวนน้อย



รูปที่ 2.10 ฟังก์ชันของความแปรปรวนสำหรับขนาดตัวอย่าง $n=20$ และ $n=50$

ของสัดส่วนการแจกแจงทวินาม เมื่อ ไม่มีการแปลงข้อมูล ((a) และ (d))
แปลงข้อมูลด้วยวิธีมาตรฐาน ((b) และ (e)) และวิธีของ Freeman และ Tukey ((c) และ (f))

สำหรับข้อมูลประเภทจำนวนของรอยตำหนิ (Count of Defects) ซึ่งมีลักษณะการแจกแจงของข้อมูลแบบปัวส์ซอง (Poisson Distribution) หลังจากมีการแปลงข้อมูลแล้วจะให้ค่าความแปรปรวนที่คงที่กว่าข้อมูลปกติ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยเฉพาะการแปลงข้อมูลด้วยวิธีของ Freeman และ Tukey จะให้ค่าความแปรปรวนที่คงที่กว่าวิธีมาตรฐานเมื่อสัดส่วนของเสีย (p) มีค่าเข้าใกล้ 0 และในทางปฏิบัติ เมื่อจำนวนของรอยตำหนิมีค่าน้อยมากๆ จะทำให้ค่าความแปรปรวนอยู่ในช่วงที่ไม่คงที่ สามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยการกำหนดจำนวนหน่วยของการนับต่อหน่วยให้มากขึ้นได้



รูปที่ 2.11 ฟังก์ชันของความแปรปรวนสำหรับจำนวนนับการแจกแจงปัวส์ซอง เมื่อ

(a) ไม่มีการแปลงข้อมูล (b) แปลงข้อมูลด้วยวิธีมาตรฐาน (c) ใช้วิธีของ Freeman และ Tukey

นอกจากนี้ในการทดลองเชิงแฟกทอเรียลนั้น สิ่งหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ ขนาดตัวอย่าง (Sample Size) ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งขนาดตัวอย่างนี้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ระดับคุณภาพหรือจำนวนงานเสียในการผลิตในปัจจุบัน ช่วงของการเปลี่ยนแปลงที่เราต้องการตรวจจับ รวมทั้งชนิดของผลตอบในการทดลองด้วย ซึ่งในกรณีที่ผลตอบ (Response) เป็นข้อมูลประเภทฐานสอง (Binary Data) หรือข้อมูลที่เป็นการตรวจสอบว่าผ่านหรือไม่ผ่านดังเช่นงานวิจัยนี้

Bisgaard และ Fuller (1995) ได้เสนอว่าหากเป็นไปได้ควรใช้ตัววัดอื่นๆแทนข้อมูลชนิดนี้ แต่หากไม่สามารถทำการวัดด้วยทางเลือกอื่นๆได้ เขาได้นำเสนอตารางอย่างง่ายในการหาขนาดตัวอย่างสำหรับการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองปัจจัย 8, 16 และ 32 รัน ในกรณีที่มีผลตอบเป็นข้อมูลประเภทฐานสอง หรือสัดส่วนของของเสีย ดังแสดงในตารางที่ 2.5

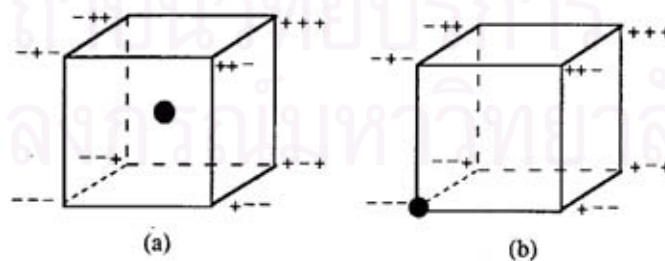
ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างของตารางที่ใช้ในการหาขนาดตัวอย่าง
สำหรับการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองปัจจัย ที่มีผลตอบเป็นสัดส่วนของเสีย

Table 1
Two-sided test tables for process conditions centered in the design space for $\alpha=5%$, $\beta=10%$ with the shift expressed as a percent of p_0 .

TABLE 1a

N=8	10%		20%		30%		40%		50%		60%		70%		80%		90%	
P_0	Δ	n	Δ	n	Δ	n	Δ	n	Δ	n	Δ	n	Δ	n	Δ	n	Δ	n
.50	.050	525	.100	131	.150	58	.200	32	.250	21	.300	14	.350	10	.400	8	.450	6
.45	.045	642	.090	160	.135	71	.180	40	.225	25	.270	17	.315	13	.360	10	.405	7
.40	.040	788	.080	197	.120	87	.160	49	.200	31	.240	21	.280	16	.320	12	.360	9
.35	.035	975	.070	243	.105	108	.140	60	.175	38	.210	27	.245	19	.280	15	.315	11
.30	.030	1226	.060	306	.090	136	.120	76	.150	48	.180	33	.210	24	.240	18	.270	14
.25	.025	1576	.050	393	.075	174	.100	98	.125	62	.150	43	.175	31	.200	24	.225	19
.20	.020	2101	.040	524	.060	232	.080	130	.100	83	.120	57	.140	42	.160	32	.180	25
.15	.015	2976	.030	743	.045	329	.060	184	.075	117	.090	81	.105	59	.120	45	.135	35
.10	.010	4727	.020	1180	.030	523	.040	293	.050	186	.060	129	.070	94	.080	71	.090	55
.05	.005	9979	.010	2490	.015	1103	.020	618	.025	393	.030	271	.035	198	.040	150	.045	117

การใช้ตารางการประมาณขนาดตัวอย่างนั้น สิ่งที่จะต้องทำการพิจารณาในการเปิดตารางคือ เงื่อนไขของการผลิต (Process Condition) ในปัจจุบันโดยประมาณว่าอยู่ในส่วนใดช่วงของการออกแบบ (Design Space) ซึ่งตารางได้เตรียมไว้สำหรับเงื่อนไขสองแบบคือ เงื่อนไขที่อยู่กึ่งกลางของช่วงของการออกแบบ และเงื่อนไขที่อยู่จุดยอด (Vertex) ของช่วงของการออกแบบ ดังรูปที่ 2.12(a) และ 2.12(b) ตามลำดับ นอกจากนี้ยังต้องทราบ จำนวนของการทดลอง (N) สัดส่วนของเสียโดยประมาณในปัจจุบัน (p_0) ความเปลี่ยนแปลงที่ต้องการตรวจจับได้ (Δ) โดยตารางได้กำหนดให้ค่า $\alpha = 5\%$ $\beta = 10\%$



รูปที่ 2.12 ช่วงการออกแบบและตำแหน่งของเงื่อนไขของการผลิตในปัจจุบัน

หากค่าในตารางไม่ครอบคลุมเงื่อนไขที่ต้องการหา สามารถคำนวณขนาดตัวอย่างโดยใช้สมการที่ 2.18 ซึ่งเป็นการทดสอบสองหาง (Two-Sided Test) ในกรณีที่เงื่อนไขของการผลิต (Process Condition) ในปัจจุบันอยู่ที่กึ่งกลางของช่วงของการออกแบบ

$$n = (z_{1-\alpha/2} + z_{1-\beta})^2 / (N\delta^2) \quad (2.18)$$

โดย n คือ ขนาดตัวอย่างที่ต้องใช้

N คือ จำนวนการทดลองเชิงแฟกทอเรียลที่ทำการทดลอง

δ คือ ค่าความแตกต่างของข้อบกพร่องที่ได้แปลงค่าแล้ว

และจากการแปลงข้อมูลของตัวแปรตอบสนองเพื่อให้ความแปรปรวนคงที่ด้วยวิธีรากที่สองของ Arcsin (Arcsin Square Root) ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จะได้ค่าความแตกต่างของค่าที่ได้รับการแปลงข้อมูลแล้ว ดังสมการที่ 2.19

$$\delta = \arcsin(\sqrt{p_0 + \Delta/2}) - \arcsin(\sqrt{p_0 - \Delta/2}) \quad (2.19)$$

ในกรณีที่เงื่อนไขของการผลิตในปัจจุบันอยู่ที่จุดยอด (Vertex) ของช่วงของการออกแบบ จะใช้สมการที่ 2.18 ในการคำนวณขนาดตัวอย่างโดยการทดสอบด้านเดียว (One-Sided Test) และค่าความแตกต่างของค่าที่ได้รับการแปลงข้อมูลแล้วเป็นดังสมการที่ 2.20

$$\delta' = \arcsin \sqrt{p_0 + \Delta} - \arcsin \sqrt{p_0 - \Delta} \quad (2.20)$$

แต่ในกรณีที่อัตราส่วนของเสียมีค่าต่ำมากๆ ขนาดตัวอย่างที่ต้องใช้ในการทดลองโดยการคำนวณจากวิธีข้างต้นจะมีค่ามากตามไปด้วย ซึ่งอาจเป็นไปได้ยากในการทำการทดลองจริง Bisgaard และ Gertsbakh (2000) จึงได้เสนอแนวทางในการทดลองอีกแบบในกรณีที่อัตราส่วนของเสียมีค่าต่ำมากๆ เรียกว่าการสุ่มแบบส่วนกลับของทวินาม (Inverse Binomial Sampling) ซึ่งเป็นการทำการทดลองจนกระทั่งได้ของเสียเท่ากับค่าหนึ่งที่กำหนด (r) ดังนั้นค่าตัวแปรตอบสนองที่วัดคือจำนวนที่ทำการผลิตจนกระทั่งได้ของเสียเท่ากับ r ขึ้นนั่นเอง โดยข้อดีของการสุ่มแบบนี้คือ ผู้ทำการทดลองสามารถแน่ใจได้ว่าจะไม่ผลิตงานเสียออกมาจำนวนมากกว่าค่าที่กำหนดไว้ โดยเฉพาะการจัดหมู่ของปัจจัย (Factor Combination) บางการทดลองที่อาจผลิตของเสียออกมาจำนวนมาก

ซึ่งการเลือกค่ากฎการหยุด (Stopping Rule; r) มีวิธีการดังนี้

- คำนวณค่า $b(r)$ ซึ่งเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งที่แปรผันไปตามค่าของ r จากสมการที่ 2.21

$$b(r) = \frac{\Delta\sqrt{N}}{2(z_{1-\alpha/2} + z_{1-\beta})\theta_0\sqrt{1-\theta_0}} \quad (2.21)$$

โดย Δ คือ ค่าเปลี่ยนแปลงค่าที่สุดของอัตราส่วนของเสียที่ต้องการตรวจจับ

N คือ จำนวนการทดลองเชิงแฟกทอเรียลที่ทำการทดลอง

θ_0 คือ ค่าประมาณของเปอร์เซ็นต์ของเสียในปัจจุบัน

- จากนั้นเปิดตารางเพื่อหาค่า r ที่ใกล้เคียงที่สุดจากค่า $b(r)$ ที่คำนวณได้ข้างต้น แสดงไว้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ค่าของกฎการหยุด (Stopping Rule; r) และค่าคงที่ $b(r)$

r	$b(r)$	r	$b(r)$	r	$b(r)$
2	1.315	22	0.222	60	0.131
3	0.853	24	0.212	62	0.129
4	0.659	26	0.203	64	0.126
5	0.553	28	0.193	66	0.124
6	0.485	30	0.189	68	0.123
7	0.436	32	0.182	72	0.119
8	0.401	34	0.176	76	0.116
9	0.372	36	0.171	80	0.113
10	0.349	38	0.167	84	0.110
11	0.329	40	0.161	88	0.108
12	0.313	42	0.158	92	0.105
13	0.298	44	0.154	96	0.103
14	0.286	46	0.151	100	0.101
15	0.275	48	0.148	110	0.096
16	0.265	50	0.144	120	0.092
17	0.256	52	0.141	130	0.088
18	0.249	54	0.138	140	0.085
19	0.241	56	0.136	150	0.082
20	0.234	58	0.133	160	0.080

และในกรณีที่ค่าที่ต้องการหาอยู่นอกเหนือจากตารางที่ 2.6 ($r > 160$) ผู้ทำการทดลองสามารถคำนวณค่าของกฎการหยุด (r) ได้จากสมการที่ 2.22

$$r \approx \frac{4(z_{1-\alpha/2} + z_{1-\beta})^2 \theta_0^2 (1 - \theta_0)}{\Delta^2 N} + 2 \quad (2.22)$$

แต่เนื่องจากการใช้วิธีการสุ่มแบบส่วนกลับของทวินามนี้เหมาะสมกับการผลิตที่เป็นลักษณะต่อเนื่อง (Ongoing Production Process) ซึ่งการผลิตที่เป็นลักษณะผลิตแบบชุด (Batch) หรือขนาดของรุ่น (Lot Size) ใหญ่ๆ เช่น จำนวนผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในตู้อบมีจำนวนมาก ดังเช่นงานวิจัยนี้อาจไม่เหมาะกับวิธีการที่ได้กล่าวมา

2.5.3 การควบคุมทางสถิติ (Statistical Control)

Goh และ Xie (2003) ได้กล่าวถึงทางเลือกของแผนภูมิควบคุมที่นำมาประยุกต์ใช้ในระหว่างการติดตามควบคุม (Control Phase) ในกรณีที่ข้อมูลอยู่ในรูปของจำนวนข้อบกพร่อง (Defective) แผนภูมิควบคุมที่นิยมนำมาใช้กับข้อมูลลักษณะนี้คือแผนภูมิควบคุมตามลักษณะ (Attribute Control Chart) ซึ่งได้แก่ แผนภูมิ np หรือแผนภูมิ p แต่ในกรณีที่ข้อมูลมีค่าสัดส่วนของเสียต่ำมาก หรือกระบวนการที่มีระดับซิกมาสูง จะมีข้อเสียเมื่อใช้แผนภูมิ np หรือแผนภูมิ p คือ หากใช้ขนาดตัวอย่างไม่มากพอ LCL จะมีค่าติดลบ ซึ่งทำให้ไม่สามารถทราบได้เลยว่ากระบวนการปรับปรุงขึ้นหรือไม่ นอกจากนี้หากขนาดตัวอย่างไม่มากพอ UCL อาจมีค่าต่ำกว่า 1 สำหรับแผนภูมิ np หรือค่า

กว่า $1/n$ สำหรับแผนภูมิ p ซึ่งหมายถึงการออกนอกขอบเขตควบคุมทุกครั้งที่มีของเสีย 1 ชิ้น รวมทั้งความน่าจะเป็นของความผิดพลาดในเตือน (False Alarm) ในกรณีที่สัดส่วนของเสียต่ำมาก จะมีสูงกว่า 0.0027 (ค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดในเตือนของแผนภูมิควบคุมตามหลักการของ 3 ซิกมา) เนื่องจากการประมาณค่าตามสมมติฐานการแจกแจงปกติจะไม่สมเหตุสมผลในกรณีนี้ แต่หากใช้ขนาดตัวอย่างที่มากก็อาจเกิดการตัดสินใจที่ล่าช้าได้ ดังนั้น Goh และ Xie จึงได้นำเสนอแผนภูมิควบคุมตามลักษณะอื่น ที่เหมาะสมในกรณีที่สัดส่วนของเสียมีค่าต่ำ ได้แก่ แผนภูมิ Cumulative Count of Conforming (CCC Chart) เพื่อการตัดสินใจในการแก้ไขปัญหาที่เหมาะสม และทันต่อเหตุการณ์ ซึ่งแผนภูมิ CCC นี้เป็นแผนภูมิที่นำเอาจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ตรวจสอบทั้งหมดจนพบผลิตภัณฑ์บกพร่อง 1 ชิ้นมาพลอตค่าแทนสัดส่วนของเสียในแผนภูมิ p หรือแทนจำนวนผลิตภัณฑ์บกพร่องในแผนภูมิ np โดยขอบเขตควบคุมสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.23 ถึง 2.25 (Xie and Goh, 1997)

$$UCL = \ln(\alpha/2)/\ln(1-p) \quad (2.23)$$

$$CL = \ln(0.5)/\ln(1-p) \quad (2.24)$$

$$LCL = \ln(1-\alpha/2)/\ln(1-p) \quad (2.25)$$

นอกจากนี้ Goh และ Xie ยังได้เสนอว่ามีเทคนิคขั้นสูงที่อาจเหมาะสมในกรณีอื่นๆ เช่น Cumulative Sum (CUSUM), Exponentially Weighted Moving Average (EWMA) และแผนภูมิ CCC-r ซึ่งเป็นแผนภูมิที่พัฒนามาจากแผนภูมิ CCC โดยแผนภูมิ CCC-r นี้เป็นแผนภูมิที่นำเอาจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ตรวจสอบทั้งหมดจนพบผลิตภัณฑ์บกพร่อง r ชิ้นมาพลอตค่าแทนสัดส่วนของเสียในแผนภูมิ p หรือแทนจำนวนผลิตภัณฑ์บกพร่องในแผนภูมิ np ขอบเขตควบคุมของแผนภูมิ CCC-r สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.26 ถึง 2.28 หรือสามารถเปิดได้จากตารางขอบเขตควบคุมของแผนภูมิ CCC-r ซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก ข (Xie et al., 1998)

$$F(UCL_r, r, p) = \sum_{i=r}^{UCL_r} \binom{i-1}{r-1} p^r (1-p)^{i-r} = 1 - \alpha/2 \quad (2.26)$$

$$F(UL_r, r, p) = \sum_{i=r}^{CL_r} \binom{i-1}{r-1} p^r (1-p)^{i-r} = 0.5 \quad (2.27)$$

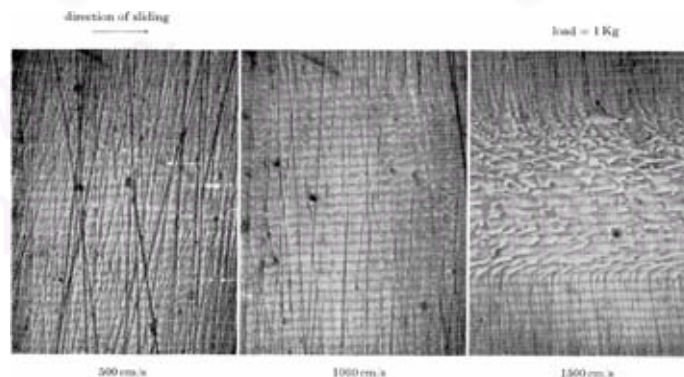
$$F(LCL_r, r, p) = \sum_{i=r}^{LCL_r} \binom{i-1}{r-1} p^r (1-p)^{i-r} = \alpha/2 \quad (2.28)$$

วิธีการตีความเพื่อการตัดสินใจของแผนภูมิ CCC และ CCC-r นี้จะตรงข้ามกับการตีความแผนภูมิ np หรือแผนภูมิ p คือ เมื่อจุดอยู่เหนือขอบเขตควบคุมบน (UCL) หมายถึง กระบวนการปรับปรุงขึ้น และในทางตรงกันข้ามกันเมื่อจุดอยู่ใต้ขอบเขตควบคุมล่าง (LCL) หมายถึง กระบวนการแยกลงนั่นเอง

นอกจากนี้แผนภูมิที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้อีกแผนภูมิหนึ่งคือ แผนภูมิควบคุมสามทาง (Three-Way Control Chart) หรือแผนภูมิ I-MR-R ซึ่งเป็นแผนภูมิที่ใช้ในการประเมินความมีเสถียรภาพของตำแหน่งของกระบวนการ (Process Location) รวมทั้งความแปรผันระหว่างกลุ่มตัวอย่างและภายในกลุ่มตัวอย่างด้วย โดยแผนภูมิจะประกอบไปด้วย 3 แผนภูมีย่อย สองแผนภูมิแรกคือ แผนภูมิควบคุมเชิงเดี่ยว (Individual Chart) และแผนภูมิควบคุมพิสัยเคลื่อนที่ (Moving Range Chart) ของค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มตัวอย่าง ซึ่งจะใช้ค่าพิสัยเคลื่อนที่ระหว่างค่าเฉลี่ยที่ติดกันมาคำนวณขอบเขตควบคุม แผนภูมิสองชนิดนี้ใช้เพื่อติดตามตำแหน่งและความแปรผันของกระบวนการ ส่วนอีกแผนภูมิหนึ่งคือ แผนภูมิควบคุมพิสัย (R Chart) ใช้ในการติดตามความแปรผันภายในกลุ่มตัวอย่าง (Breyfogle, 2001)

2.5.4 รอยขีดข่วนบนแก้ว

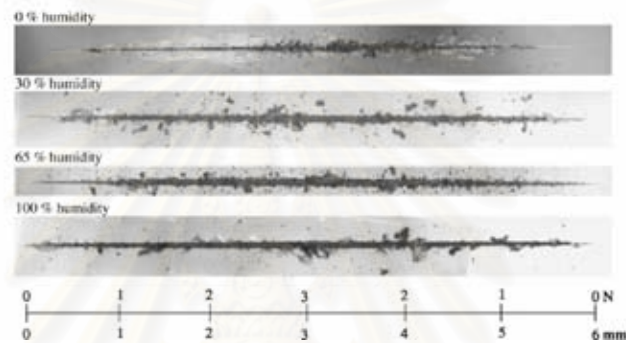
Bowden และ Scott (1958) ได้ทำการทดลองการเกิดรอยขีดข่วนบนผิวแก้วโดยได้ทำการทดลองใช้เพชรขัดบนผิวแก้ว พบว่าสิ่งที่มีผลต่อการเกิดรอยขีดข่วนบนผิวแก้วคืออุณหภูมิของแก้ว เนื่องจากแก้วอุณหภูมิสูงจะมีความอ่อนตัวมากจึงทำให้เกิดรอยขีดข่วนได้ง่ายซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bowden และ Hughes (1937) (อ้างถึงใน Bowden and Scott, 1958) ที่ได้ทำการวิจัยมาก่อนหน้านี้ถึงเรื่องการอ่อนตัวของแก้วเมื่อความร้อนสูงที่จะมีผลต่อการขัดแก้ว (Polishing) นอกจากนี้ Bowden และ Scott ยังได้นำเสนออีกว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปของแก้วจากการทดลองนี้ยังขึ้นอยู่กับความเร็วในการสไลด์ (Slide) และภาระ (Load) ที่กระทำบนแก้ว ซึ่งพบว่าที่ความเร็วสูงจะทำให้ผิวแก้วมีรอยขีดข่วนที่รุนแรงกว่าความเร็วต่ำที่ที่ภาระเท่ากัน แต่ลักษณะของรอยขีดข่วนไม่มีความแตกต่างกันมากนัก ดังรูปที่ 2.13



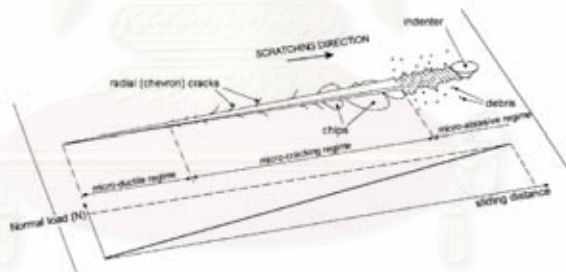
รูปที่ 2.13 ลักษณะของรอยขีดข่วนเมื่อสไลด์เพชรด้วยความเร็วต่างๆที่ภาระคงที่

ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Houerou, Sangleboeuf, Deriano, Rouxel และ Duisit (2003) ที่ได้ทำการทดลองเพื่อหาพฤติกรรมของรอยขีดข่วน (Scratch) บนแก้ว Soda-Lime-Silica (SLS)

โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลองคือ การทดสอบเกี่ยวกับภาระ (Load) ความชื้น และ องค์ประกอบของแก้ว ซึ่งการทดสอบเกี่ยวกับภาระ (Load) ได้ทำการให้ภาระปกติ (Normal Load) กับแก้วตามแนวสัมผัสโดยสไลด์จาก 0 N ไปจนภาระสูงสุด จากนั้นลดภาระลงจนถึง 0 N อีกครั้ง (Loading/ Unloading) ผลทดสอบพบว่ารอยแตกที่งอกขึ้นมีความสัมพันธ์อย่างมากกับขนาดของ ภาระ แสดงดังรูปที่ 2.14 (พิจารณาตามแนวแกน X) โดยสามารถแบ่งลักษณะของรอยขีดข่วนได้ เป็น 3 แบบคือ Micro-Ductile Regime, Micro-Cracking Regime และ Micro-Abrasive Regime แสดงดังรูปที่ 2.15



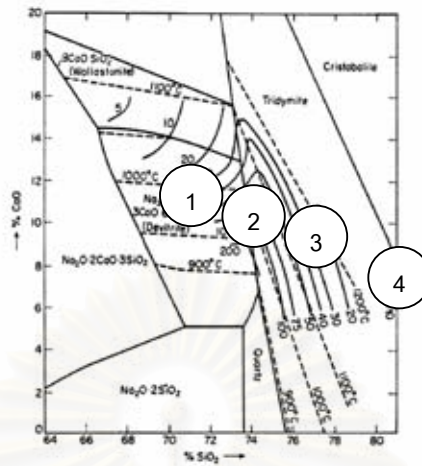
รูปที่ 2.14 การเกิดรอยขีดข่วนภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ (Hygrometric) และภาระ (Load) ต่างๆกัน



รูปที่ 2.15 รูปแบบรอยขีดข่วนบนแก้ว SLS เมื่อได้รับภาระทางเดียว (Monotonic Load)

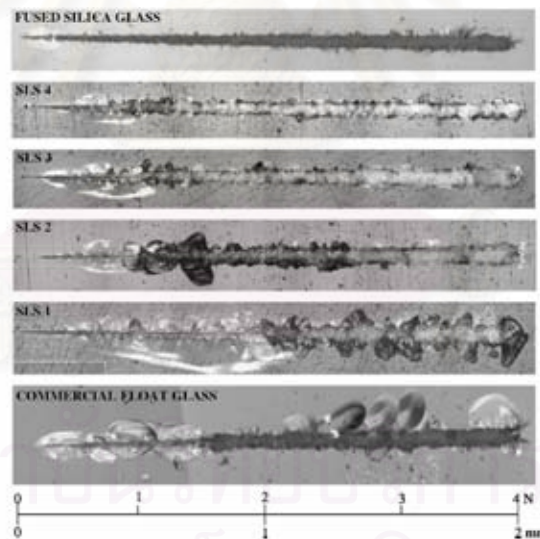
การทดสอบที่สองทำการทดสอบเกี่ยวกับความชื้น โดยการให้ภาระกับแก้วที่ความชื้นระดับ ต่างๆ (0% 30% 65% และ 100%) ซึ่งผลของการทดสอบพบว่ารูปแบบของการเกิดรอยขีดข่วน ขึ้นอยู่กับระดับของความชื้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ความชื้นเท่ากับ 0% มีรอยขีดข่วนที่ร้ายแรงน้อย ที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.14 (พิจารณาตามแนวแกน Y)

การทดสอบสุดท้ายคือ การทดสอบเกี่ยวกับองค์ประกอบของแก้วซึ่งทำการให้ภาระกับแก้ว SLS ที่มีองค์ประกอบของ $\%SiO_2$ ต่างๆกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ Phase Diagram (% โมล) แสดงแก้ว SLS 4 ชนิดในการทดสอบ

ผลการทดสอบพบว่า SLS1 และ SLS2 ซึ่งมีส่วนผสมของซิลิกาที่ต่ำ (ระยะ Devitrite) ง่ายต่อการเกิดการเกิดรอยบิ่นมากกว่า หรือมีความต้านทานการเกิดรอยขีดข่วนน้อยกว่า SLS3 และ SLS4 ที่มีส่วนผสมของซิลิกาสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ความต้านทานการเกิดรอยขีดข่วนของแก้วแต่ละชนิด

บทที่ 3

ระยษณียามปัญหา (Define Phase)

3.1 บทนำ

ระยษณียามปัญหามีความสำคัญอย่างมากในวิธีซิกซ์ ซิกมา เนื่องจากเป็นขั้นตอนเริ่มแรกที่กำหนดทิศทางของการปรับปรุงว่าจะไปในทิศทางใด เริ่มต้นจากการศึกษากระบวนการผลิตและสภาพปัญหาในปัจจุบันของโรงงาน เพื่อให้เห็นถึงลักษณะของปัญหาและนำไปสู่การกำหนดปัญหาที่จะทำการปรับปรุง กำหนดเป้าหมาย รวมทั้งจัดตั้งคณะทำงานในการระดมสมองวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.2 ศึกษากระบวนการผลิต

กระบวนการผลิตเลนส์โดยวิธีการหล่อ (Casting) ของโรงงานกรณีศึกษานี้ จะแบ่งออกเป็น การหล่อเลนส์ธรรมดา (Orma หรือ CR-39) และการหล่อเลนส์บางพิเศษ (High Index Lens) ซึ่งมีกระบวนการผลิตที่ค่อนข้างแตกต่างกัน แต่เนื่องจากต้นทุนในการผลิตเลนส์และต้นทุนแม่แบบของเลนส์บางพิเศษ (High Index Lens) มีราคาที่สูงกว่าเลนส์ธรรมดาหลายเท่า ดังนั้นในการศึกษาวิจัยนี้ จึงได้มุ่งเน้นในการศึกษากระบวนการผลิตของเลนส์บางพิเศษเท่านั้น โดยได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตเลนส์สายตาสายตาชนิดบางพิเศษ (High Index Lens) ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตเลนส์ที่สนใจ โดยเน้นไปที่กระบวนการหล่อเลนส์ (Casting) ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตเลนส์ด้วยการหล่อโมโนเมอร์ (Monomer) หรือสารตั้งต้นของการผลิต ในแม่แบบแก้ว (Glass Mold) รายละเอียดของกระบวนการผลิตเลนส์โดยการหล่อ โดยมีขั้นตอนของกระบวนการหล่อเลนส์บางพิเศษแสดงในรูปที่ 3.5 และรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

1. เตรียมแม่แบบ (Prepare Molds) ในกระบวนการผลิตเลนส์นั้นจะทำการผลิตเลนส์หลากหลายค่าสายตาและขนาด หรือ SKU (Stock Keeping Unit) โดยโรงงานกรณีศึกษานี้ผลิตเลนส์บางพิเศษที่มีค่าสายตา (Lens Power) ตั้งแต่ -1000 ถึง +600 ความเอียงตั้งแต่ 000 ถึง 200 เพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ครั้งละ 25 นอกจากนี้ยังมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) 65 70 และ 75 มิลลิเมตร (ใช้แม่แบบขนาด 76, 81 และ 86 มิลลิเมตร) ดังนั้นเพื่อการผลิตเลนส์ให้ได้หลากหลาย SKU จึงได้มีการเขียนแผนการผลิตทุกสัปดาห์ การเขียนแผนการผลิตนั้นวัตถุดิบหลักที่ต้องทำการเปลี่ยนคือ แม่แบบ โดยทำการเปลี่ยนแม่แบบเป็นความโค้งต่างๆ เพื่อให้ได้เลนส์ค่าสายตาและ

ที่ต้องการ ซึ่งการเปลี่ยนแม่แบบนี้ไม่ได้ทำการเปลี่ยนแปลงทั้งหมด จะทำเปลี่ยนแปลงบางส่วนตามแผนการผลิตเท่านั้น สมการคำนวณค่าสายตาของเลนส์ (Lens Power) จากแม่แบบตัววอกและตัวลบบ่อย่างง่ายเป็นดังนี้

$$\text{ค่าสายตาของเลนส์} = \text{ค่าความโค้งของแม่แบบตัวลบบ} - \text{ค่าความโค้งของแม่แบบตัววอก} \quad (3.1)$$

2. ล้างแม่แบบ (Clean Molds) เมื่อทำการเตรียมแม่แบบตามแผนการผลิตของสัปดาห์นั้นๆแล้ว กระบวนการถัดไปคือการล้างแม่แบบ โดยผ่านเครื่องล้างแม่แบบ (Mold Cleaning Machine) เครื่องล้างแม่แบบนี้จะมีลักษณะเป็นเครื่องล้างอัตโนมัติ ซึ่งมีถังล้างต่อเนื่องกันจำนวน 7 ถัง โดยแต่ละถังมีสารเคมีต่างๆกันไป

3. ตรวจสอบแม่แบบ (Inspect Molds) ทำการตรวจสอบแม่แบบด้วยสายตา โดยการส่องแม่แบบผ่านไฟ R-17 คำหน้าที่ทำการตรวจสอบนั้นจะเป็นคำหน้าที่มองเห็นด้วยสายตา หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า คำหนีประเภทคอสมติก (Cosmetic) เท่านั้น

4. ประกอบแม่แบบ (Assemble Molds) แม่แบบที่ผ่านการตรวจสอบด้วยสายตาแล้วจะนำแม่แบบตัววอกและตัวลบบมาประกอบ โดยมีกาสเก็ต (Gasket) และตัวยึด (Clip) ยึดแม่แบบเข้าด้วยกัน แสดงในรูปที่ 3.1 (ก) และ 3.1 (ข) ตามลำดับ ได้แม่แบบที่ประกอบเสร็จ ดังรูปที่ 3.2



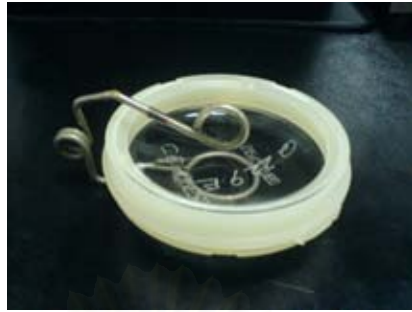
(ก)



(ข)

รูปที่ 3.1 กาสเก็ต (Gasket) และตัวยึด (Clip) สำหรับประกอบแม่แบบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 แม่แบบที่ประกอบเสร็จแล้ว

5. เติมโมโนเมอร์ในแม่แบบ (Fill Monomer) ทำการเติมโมโนเมอร์ 2 ชนิดที่ได้รับการผสมมาแล้วให้เต็มแม่แบบ ดังรูปที่ 3.3



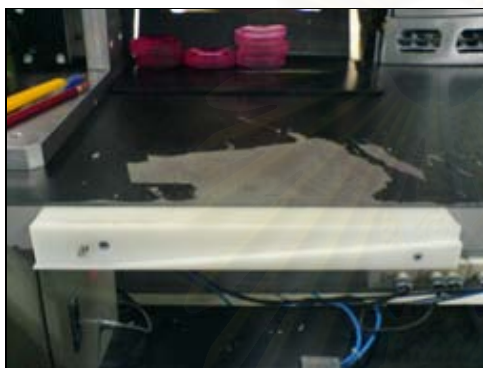
รูปที่ 3.3 การเติมโมโนเมอร์ในแม่แบบ

6. โพลิเมไรซ์ หรือการสังเคราะห์โพลิเมอร์ (Polymerize) เป็นกระบวนการทางเคมีที่ทำให้เกิดพันธะระหว่างโมโนเมอร์ โมโนเมอร์จะแข็งตัวกลายเป็นเลนส์โดยการอบในตู้อบด้วยความร้อนสูงสุด 120 °C หรือ 130 °C เป็นเวลา 15 - 19 ชั่วโมง ตามชนิดของโมโนเมอร์

7. แกะตัวยึด (Declip) เมื่อ โมโนเมอร์เกิดปฏิกิริยาโพลิเมไรเซชันเป็นโพลิเมอร์ที่สมบูรณ์ หรือเกิดการแข็งตัวกลายเป็นเลนส์แล้ว จะนำไปแกะตัวยึด โดยการแกะนั้นทำได้สองแบบ คือใช้เครื่องจักรและใช้คน

8. แกะกาส์เก็ต (Degasket) การแกะมีการใช้ทั้งเครื่องจักรและคนเช่นเดียวกับการแกะตัวยึด แม่แบบที่ยังติดกับตัวเลนส์หลังการแกะตัวยึด และกาส์เก็ตนั้นจะเรียกว่า แม่แบบแซนด์วิช (Sandwich Mold)

9. แกะแม่แบบออกจากเลนส์ (Disassemble) โดยจะทำการรูดแม่แบบแซนดวิชกับ สปาทุลา (Spatula) ให้แม่แบบหลุดออกจากเลนส์ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ส่วนตัวเลนส์ที่ยังติดกับแม่แบบอีก ด้านนั้นจะทำการแยกออกจากกันโดยใช้มีดกรีดนำลมเข้าและใช้นิ้วดึงออก จากนั้นเลนส์จะถูกส่งไปยังกระบวนการถัดไป (กระบวนการตัดขอบ) แม่แบบจะถูกนำไปล้างและตรวจสอบเพื่อเข้าสู่กระบวนการประกอบต่อไป และใช้ทำการผลิตวนต่อไปเรื่อยๆจนกว่าแม่แบบนั้นจะเกิดรอยตำหนิแตก หรือมีการเปลี่ยนแปลงการผลิต

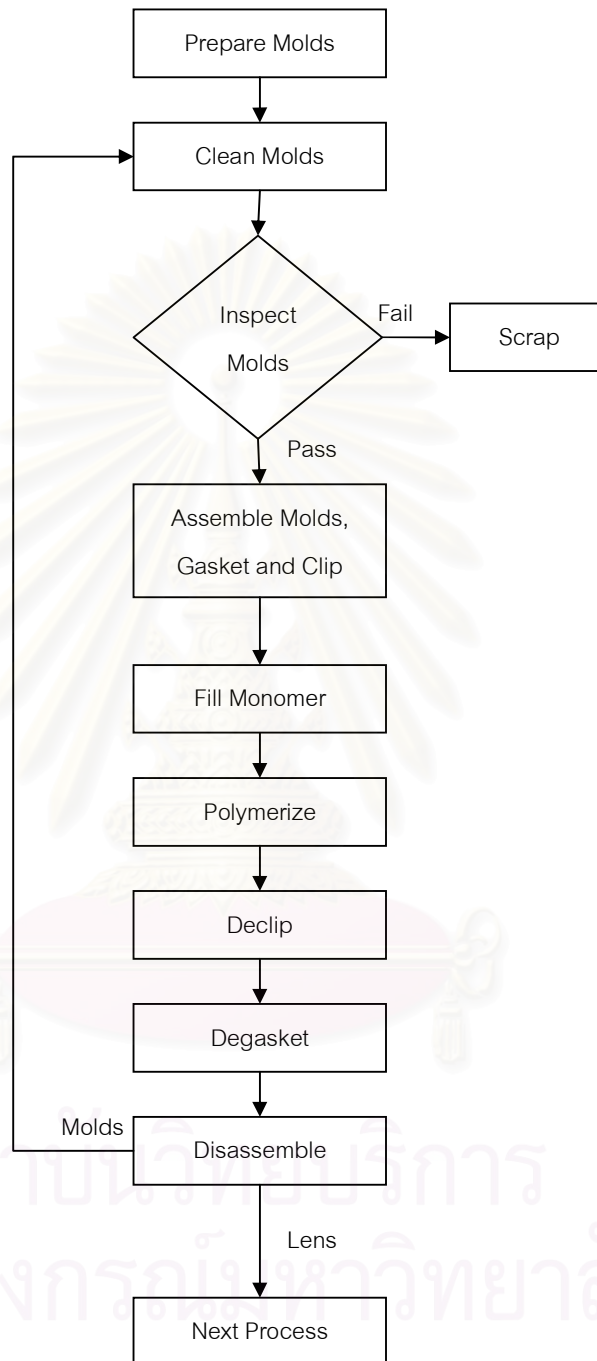


(ก)



(ข)

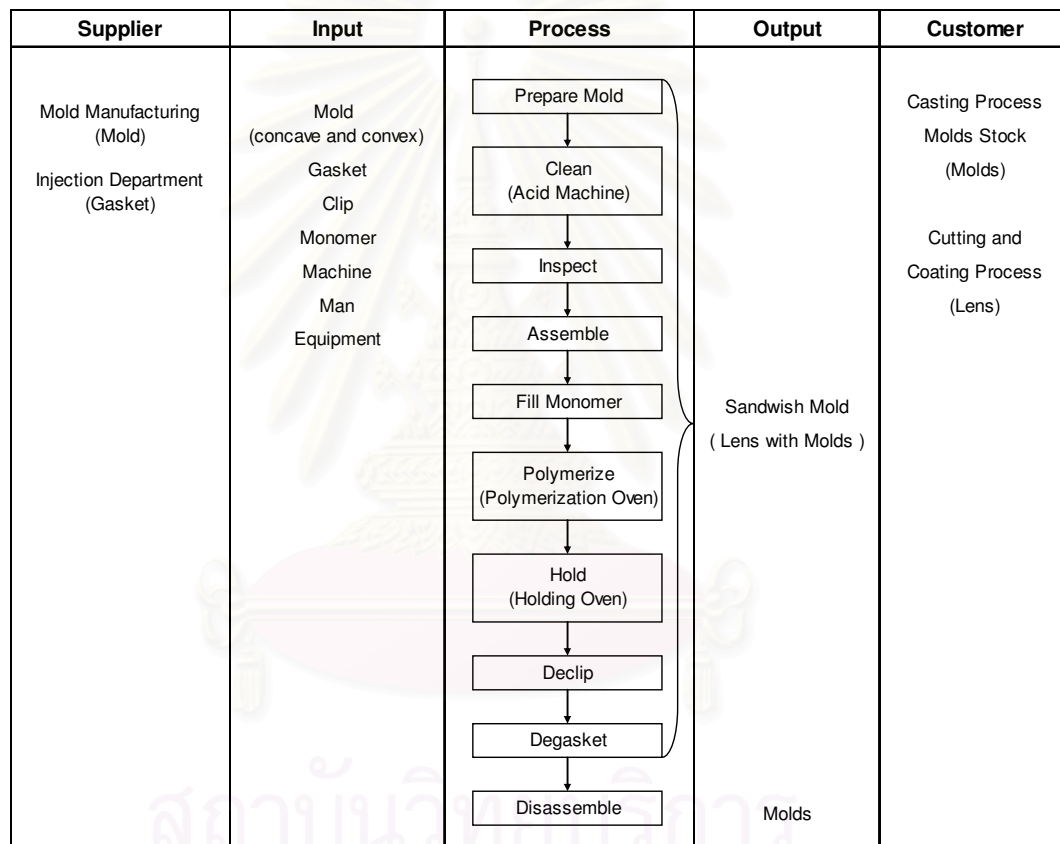
รูปที่ 3.4 สปาทุลา (Spatula) ชนิดรูด (ก) และการรูดแม่แบบออกจากเลนส์ (Disassemble) (ข)



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการหล่อ (Casting) เลนส์บางพิเศษ (High Index Lens)

3.3 แผนผังกระบวนการ (Process Map)

หลังจากการศึกษาระบวนการผลิตเลนส์ ได้ทำผังกระบวนการ (Process Map) เพื่อช่วยให้มองเห็นภาพในมุมมองของกระบวนการได้ชัดเจนขึ้น และทำให้ทราบว่า ใครคือผู้ส่งมอบปัจจัยนำเข้าสู่กระบวนการ อะไรคือปัจจัยนำเข้า ใครบ้างคือลูกค้าของกระบวนการ และอะไรคือความต้องการของลูกค้า ดังรูปที่ 3.6

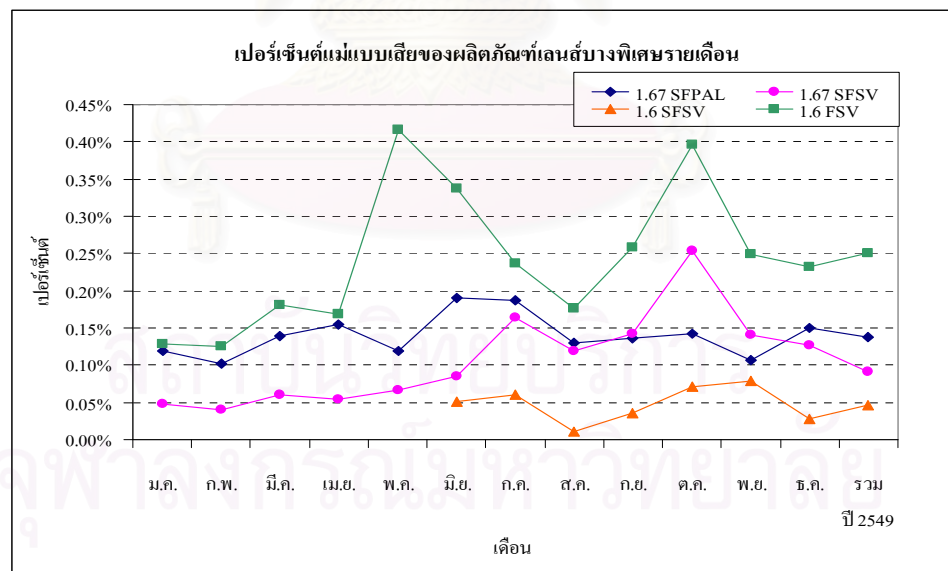


รูปที่ 3.6 แผนผังกระบวนการ (Process Map) ของกระบวนการหล่อเลนส์

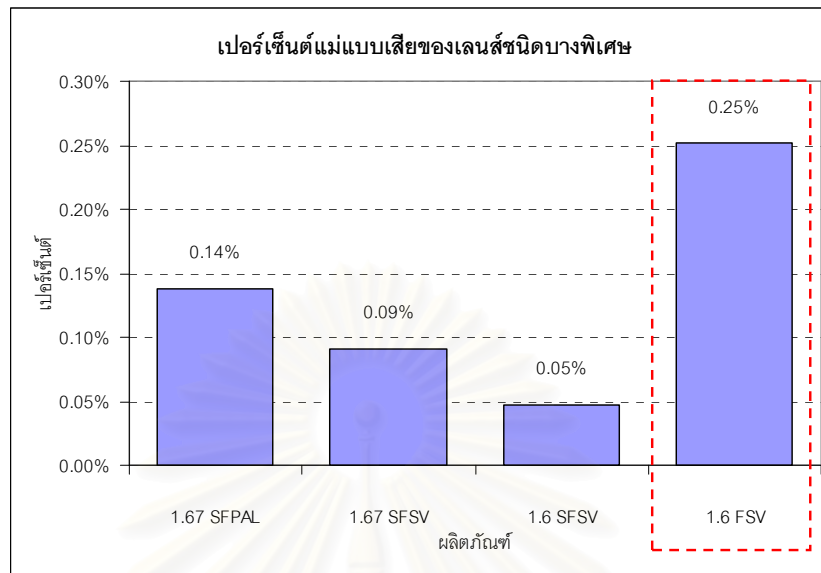
3.4 สภาพปัญหาในปัจจุบัน

หลังจากได้ทำการศึกษาระบวนการผลิตแล้ว จึงทำการรวบรวมข้อมูล และศึกษาสภาพปัญหาที่เกิดขึ้นในปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหล่อเลนส์ พบว่าปัญหาที่กระทบกับต้นทุนการผลิตปัจจุบันอย่างมากอย่างหนึ่งคือ ต้นทุนจากการทิ้งแม่แบบที่เกิดตำหนิในการผลิต เนื่องจากแม่แบบแล้วจะต้องมีการเวียนใช้งานในกระบวนการ และในระหว่างกระบวนการผลิตนี้แม่แบบอาจเกิดการเสียหายหรือเกิดตำหนิขึ้นได้ง่าย รวมทั้งราคาของแม่แบบแต่ละตัวนั้นค่อนข้างสูง โดยเฉพาะแม่แบบที่ใช้ในการผลิตเลนส์บางพิเศษ (High Index Lens) ที่นอกจากราคาสูงกว่าแม่แบบของเลนส์ธรรมดาแล้ว ยังไม่สามารถทำซ่อมแก้ไข (Rework) ได้อีกด้วย เมื่อเกิดตำหนิต้องทำการทิ้ง (Scrap) เท่านั้น จึงทำให้เกิดความสูญเสียที่มีผลอย่างมากต่อต้นทุนในการผลิต

จากการศึกษาข้อมูลในปี พ.ศ. 2549 ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงธันวาคม ของกระบวนการผลิตเลนส์บางพิเศษ (High Index Lens) ในผลิตภัณฑ์หลัก 4 ชนิดคือ 1.67SFPAL 1.67SFSV 1.6SFSV และ 1.6FSV พบว่าเปอร์เซ็นต์แม่แบบเสียของผลิตภัณฑ์ 1.6FSV (Index 1.6 Finish Single Vision) มีปริมาณสูงที่สุดในทุกๆเดือน ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยมีเปอร์เซ็นต์แม่แบบเสียรวมทั้งปีคิดเป็น 0.25% ของแม่แบบที่ใช้ผลิตเลนส์ 1.6FSV ทั้งหมด ดังรูปที่ 3.8



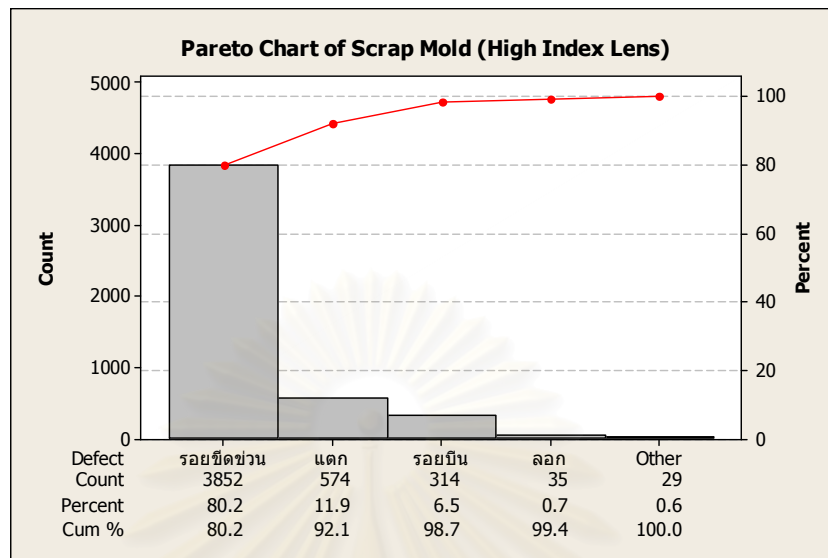
รูปที่ 3.7 เปอร์เซ็นต์แม่แบบเสียในการผลิตเลนส์บางพิเศษตั้งแต่เดือน ม.ค. ถึง ธ.ค. ปี พ.ศ. 2549



รูปที่ 3.8 เปอร์เซ็นต์แม่แบบเสียในการผลิตเลนส์บางพิเศษรวมทุกเดือนในปี พ.ศ. 2549

หากคิดมูลค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการเกิดแม่แบบเสีย มูลค่าสูญเสียรวมคือ ต้นทุนของวัตถุดิบแม่แบบแก้วรวมกับต้นทุนจากการผลิตเลนส์เสีย ซึ่งมูลค่าความสูญเสียนี้จะไม่รวมต้นทุนจากการแก้ไขงานที่บกพร่อง (Rework) เนื่องจากแม่แบบเสียไม่สามารถนำไปแก้ไขได้ และการปฏิเสธ (Reject) แม่แบบเสียเนื่องจากแม่แบบมีรอยขีดข่วน รอยบิ่น หรือรอยตำหนิอื่นๆ นั้นจะกระทำต่อเมื่อแม่แบบนั้นผลิตเลนส์ที่มีตำหนิออกมาเท่านั้น จึงทำให้มีต้นทุนที่เกิดขึ้นจากการผลิตเลนส์เสียออกมาด้วย จากการคิดมูลค่าความสูญเสียข้างต้นพบว่าต้นทุนจากแม่แบบเสียของผลิตภัณฑ์ 1.6FSV ในปี พ.ศ. 2549 คิดเฉพาะวัตถุดิบแม่แบบแก้วคิดเป็น 2,678,422 บาท ในส่วนที่เป็นต้นทุนเนื่องจากการผลิตเลนส์เสียออกมาคิดเป็น 393,880 บาท ดังนั้นมูลค่าความสูญเสียรวมของการเกิดแม่แบบเสียนี้มีมูลค่าสูงถึง 3,072,302 บาท ในปี พ.ศ. 2549 พบว่าผลิตภัณฑ์ 1.6FSV นอกจากจะมีเปอร์เซ็นต์ของแม่แบบเสียที่สูงกว่าผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นแล้วยังมีมูลค่าความสูญเสียที่สูงด้วย ดังนั้นการวิจัยนี้จึงได้มุ่งทำการศึกษาในการลดสัดส่วนแม่แบบเสียของแม่แบบที่ใช้ผลิตเลนส์บางพิเศษของผลิตภัณฑ์ 1.6FSV

และเมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นของแม่แบบเสียที่เกิดขึ้นของผลิตภัณฑ์ 1.6FSV ในปี พ.ศ. 2549 พบว่าตำหนิที่เกิดขึ้นนั้น 80.2% เป็นตำหนิประเภทรอยขีดข่วนบนตัวแม่แบบ (Scratch Mold) ดังแสดงด้วยพาเรโตในรูปที่ 3.9 ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ที่สูงมาก ดังนั้นการลดจำนวนแม่แบบเสียจึงทำการมุ่งเน้นในการแก้ปัญหาในเรื่องรอยขีดข่วนบนตัวแม่แบบ



รูปที่ 3.9 พารโตแสดงชนิดของแม่แบบเสียในการผลิตเลนส์ 1.6FSV ปี พ.ศ. 2549

3.5 กำหนดวัตถุประสงค์ เป้าหมาย และตัวชี้วัด

จากสภาพปัญหาที่พบ จึงได้ทำการกำหนดปัญหาที่จะทำการปรับปรุง คือ การลดสัดส่วนของเสียจากตำหนิประเภทรอยขีดข่วน (Scratch) ของแม่แบบแก้ว (Glass Mold) ที่ใช้การผลิตเลนส์สายตาศูนย์ 1.6FSV จากเปอร์เซ็นต์ของแม่แบบเสียในปัจจุบัน 0.25% มีเป้าหมาย (Target) ที่จะลดให้ได้เหลือ 0.15% ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ที่สามารถทำได้ในช่วง 2 เดือนแรกของปี 2549

ตัวเลขที่ใช้ชี้วัดปริมาณแม่แบบเสียภายในโรงงานกรณีศึกษาไว้ค่านั้นเป็นเปอร์เซ็นต์ ซึ่งทำการเทียบจำนวนแม่แบบเสียกับจำนวนครั้งที่แม่แบบทั้งหมดถูกใช้งาน ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์แม่แบบเสีย} = \frac{\text{จำนวนแม่แบบเสีย}}{\text{จำนวนครั้งที่แม่แบบทั้งหมดถูกใช้งาน}} \times 100\% \quad (3.2)$$

โดยจำนวนครั้งที่แม่แบบทั้งหมดถูกใช้งาน จะคิดจากปริมาณสองเท่าของเลนส์ที่ทำการผลิตทั้งหมดในช่วงเวลานั้นๆ เนื่องจากการผลิตเลนส์ 1 ชิ้นนั้นจะต้องใช้แม่แบบจำนวน 2 ตัวในการหล่อ (Casting) คือ แม่แบบตัวบวก (Convex Mold) และ แม่แบบตัวลบ (Concave Mold) อย่างละ 1 ตัว มาประกอบกัน ซึ่งการเกิดตำหนิของแบบตัวบวกและตัวลบนี้นี้มีความเป็นอิสระต่อกัน

3.6 จัดตั้งคณะทำงาน

ทำการจัดตั้งคณะทำงานเพื่อเข้าร่วมในโครงการ โดยการกำหนดคณะทำงานจะทำการคัดเลือกจากผู้ที่มีความรู้ ความชำนาญในส่วนของกระบวนการที่เลือกทำการปรับปรุงคือ กระบวนการหล่อเลนส์บางพิเศษ ซึ่งประกอบไปด้วย

- ผู้จัดการฝ่ายผลิต
- วิศวกรฝ่ายผลิต
- หัวหน้าพนักงานฝ่ายผลิตของแต่ละกะทำงาน
- รองหัวหน้างานฝ่ายผลิตของแต่ละกะทำงาน
- ผู้ดำเนินงานวิจัย

คณะทำงานมีหน้าที่ช่วยในการระดมสมองด้วยเครื่องมือและเทคนิคต่างๆ เพื่อหาปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อการเกิดรอยขีดข่วนบนแม่แบบ รวมทั้งให้การสนับสนุนการทดลองต่างๆ

ส่วนหน้าที่หลักของผู้ดำเนินการวิจัย มีดังนี้

- ติดต่อประสานงาน
- เก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องต่างๆ
- ทำการวิเคราะห์ความถูกต้องและแม่นยำของระบบการวัด (Gauge R&R)
- จัดประชุมร่วมกับคณะทำงานที่มีส่วนเกี่ยวข้องเพื่อระดมสมอง
- ออกแบบและวางแผนการทดลอง
- วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
- จัดทำแผนควบคุม เพื่อรักษามาตรฐานหลังการปรับปรุง

3.7 สรุประยะนิยามปัญหา

ในขั้นตอนนิยามปัญหานี้ หลังจากศึกษากระบวนการผลิตและสภาพปัญหาในปัจจุบันของโรงงานแล้วจึงได้กำหนดปัญหาและเป้าหมายที่จะทำการปรับปรุง คือ การลดสัดส่วนของเสียจากตำหนิประเภทรอยขีดข่วนของแม่แบบแก้วที่ใช้การผลิตเลนส์สายตาชนิด 1.6FSV โดยมีเป้าหมายที่จะลดแม่แบบเสียให้ได้เหลือ 0.15% จากแม่แบบเสียในปัจจุบัน 0.25% จากนั้นทำการจัดตั้งคณะทำงานเข้าร่วมในโครงการเพื่อช่วยในการระดมสมองวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาและหาปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อการเกิดรอยขีดข่วนบนแม่แบบ รวมทั้งให้การสนับสนุนการทดลองต่างๆด้วย

บทที่ 4

ระยะการวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา (Measure Phase)

4.1 บทนำ

หลังจากได้ทำการนิยามปัญหาที่เกิดขึ้นแล้ว ในบทนี้จะเป็นการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา โดยอาศัยเครื่องมือทางคุณภาพและสถิติมาช่วยในการวิเคราะห์หาสาเหตุที่เป็นไปได้ เริ่มจากการวิเคราะห์ความถูกต้องและแม่นยำของระบบการวัด (Gauge R&R) ในการตรวจสอบแม่แบบด้วยสายตา และทำการเก็บรวบรวมข้อมูล พิจารณาความสามารถของกระบวนการผลิตในปัจจุบันเพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์หาสาเหตุ จากนั้นจึงทำการระดมสมองเพื่อหาปัจจัยนำเข้าที่อาจมีผล (Key Process Input Variable หรือ KPIV) โดยใช้เครื่องมือต่างๆเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ เช่น ฟังก้างปลา (Cause & Effect Diagram) ตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause & Effect Matrix) และการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode & Effects Analysis หรือ FMEA)

4.2 การวิเคราะห์ความถูกต้องและแม่นยำของระบบการวัดแบบข้อมูลตามลักษณะ (Attribute Agreement Analysis)

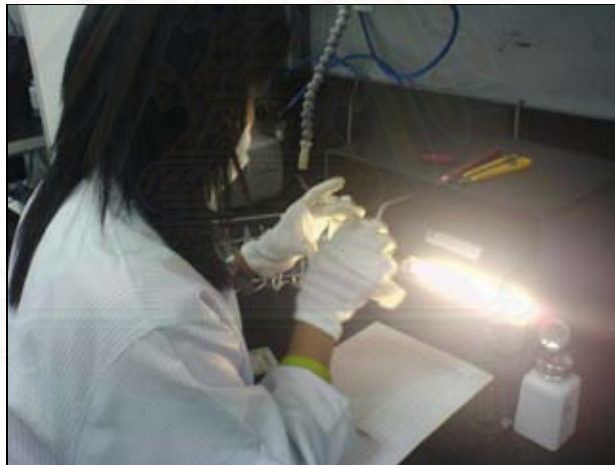
การวิเคราะห์ความถูกต้องและแม่นยำของระบบการวัดมีความสำคัญมาก เนื่องจากการแก้ไขปัญหาด้านคุณภาพหรือการป้องกันปัญหาอย่างมีประสิทธิภาพนั้น ต้องมีความมั่นใจในเรื่องของเสถียรภาพของระบบการวัด ด้วยการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของระบบการวัดในกระบวนการผลิตว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้หรือไม่

ระบบการวัดหรือการตรวจสอบแม่แบบของโรงงานกรณีศึกษา มีลักษณะเป็นการประเมินผลแบบข้อมูลตามลักษณะ (Attribute Data) คือทำการตรวจสอบและประเมินผลโดยทำการเปรียบเทียบกับข้อกำหนดเฉพาะแล้วได้ผลของข้อมูลออกมาเป็น ยอมรับ/ปฏิเสธ หรือ ผ่าน/ไม่ผ่าน จึงทำการวิเคราะห์ระบบการวัดแบบข้อมูลตามลักษณะ (Attribute Agreement Analysis) ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์ทั้งความถูกต้องและแม่นยำของระบบการวัด

- ความถูกต้อง (Accuracy) ตรวจสอบ โดยเปรียบเทียบผลการตรวจสอบของพนักงานกับค่าอ้างอิง
- ความแม่นยำ (Precision) ตรวจสอบ โดยเปรียบเทียบผลการตรวจสอบซ้ำของพนักงานคนนั้นๆ

4.2.1 การตรวจสอบแม่แบบและมาตรฐานการตรวจสอบตำหนิบนแม่แบบ

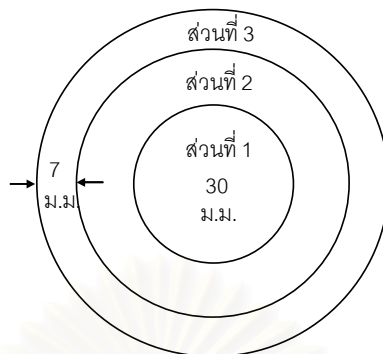
การตรวจสอบแม่แบบของโรงงานกรณีศึกษาจะทำการตรวจสอบ 100% ด้วยสายตา (Visual Inspection) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การตรวจสอบงานเสียประเภทคอสมติก (Cosmetic) ซึ่งจะทำการส่องแม่แบบได้หลอดไฟ Referential 17 (R-17) ดังรูปที่ 4.1 การตรวจสอบนี้จะทำหลังจากทำการล้างแม่แบบแล้ว เพื่อตรวจสอบว่าแม่แบบนั้นมีตำหนิหรือเป็นงานเสียหรือไม่ ก่อนนำไปทำการประกอบ (Assemble) ซึ่งแม่แบบที่มีตำหนิเกินจากข้อกำหนดจะทำการทิ้ง (Scrap) ไม่สามารถนำมาแก้ไข (Rework) ได้



รูปที่ 4.1 การตรวจสอบแม่แบบด้วยสายตา

มีการแบ่งพื้นที่การตรวจสอบออกเป็น 3 ส่วน (Zone) เนื่องจากระดับการยอมรับตำหนิของพื้นที่แต่ละส่วนมีความแตกต่างกัน พื้นที่การแบ่งส่วนมีรายละเอียดดังนี้

- ส่วนที่ 1 มีระยะบริเวณเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร จากจุดศูนย์กลางแม่แบบ
- ส่วนที่ 3 พื้นที่บริเวณ 7 มิลลิเมตรจากขอบแม่แบบ
- ส่วนที่ 2 พื้นที่ที่เหลือจากส่วนที่ 1 และส่วนที่ 3



รูปที่ 4.2 พื้นที่ในการตรวจสอบแม่แบบ

ลักษณะตำหนิและมาตรฐานการตรวจสอบ แบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ

1. ตำหนิประเภทจุด (Spot Defect) หมายถึงข้อบกพร่องที่มีขนาดวัดได้ คือ Pit และ Scratch โดยแบ่งได้ 4 ขนาด เรียงลำดับจากเล็กไปใหญ่คือ ขนาด B2 B3 C1 และ C2 ตามลำดับ สามารถเทียบได้จากแม่แบบต้นแบบ (Master Mold)

- ส่วนที่ 1 ยอมรับตำหนิที่เล็กกว่าหรือเท่ากับ B2 ได้ 1 จุด
- ส่วนที่ 2 ยอมรับตำหนิขนาด B2 B3 หรือเล็กกว่า ได้ 4 จุด
- ส่วนที่ 3 ยอมรับตำหนิขนาด C1 และ C2 ได้ 5 จุด ส่วนตำหนิขนาด B2 และ B3 ที่มีลักษณะกระจายตัว ยอมรับทุกกรณี

ตำหนิประเภทรอยขีดข่วน (Scratch) ของแม่แบบ FSV ที่มีลักษณะเป็นรอยขีดหรือเส้น ในส่วนที่ 1 และ 2 สามารถยอมรับได้เมื่อทำการหมุนให้ตั้งฉากแล้วไม่เห็นรอย ส่วนรอยขีดข่วนบริเวณส่วนที่ 3 สามารถยอมรับได้ทุกกรณี สำหรับแม่แบบประเภทอื่นให้เทียบขนาดกับแม่แบบต้นแบบ (Master Mold) ความเข้มไม่เกิน C2

2. ตำหนิประเภทแผ่กระจาย (Spread Defect) หมายถึงข้อบกพร่องที่มีลักษณะกระจายตัว คือ Stain, Haze, Straight Wave และ Delaminate

- ส่วนที่ 1 และ 2 ยอมรับได้เมื่อความเข้มไม่เกินแม่แบบต้นแบบ (Master Mold)
- ส่วนที่ 3 ยอมรับได้ทุกกรณี

สำหรับตำหนิประเภท Delaminate หรือแม่แบบลอก ของผลิตภัณฑ์ FSV จะไม่ยอมรับในทุกกรณี แต่ผลิตภัณฑ์ SFSV สามารถยอมรับได้เฉพาะส่วนที่ 3

3. ตำหนิบริเวณขอบ หมายถึงข้อบกพร่องที่เกิดบริเวณขอบ เช่น Chip ยอมรับความลึกของรอยบิ่นได้ไม่เกิน 2 มิลลิเมตร ความยาวไม่จำกัด ส่วนตำหนิประเภท Broken หรือแม่แบบแตก ไม่ยอมรับในทุกกรณี

4.2.2 การวิเคราะห์ระบบการวัดแบบข้อมูลตามลักษณะ (Attribute Agreement Analysis)

4.2.2.1 การวิเคราะห์ระบบการตรวจสอบแม่แบบประเภทคำหนิทั่วไป

การวิเคราะห์ระบบการวัดแบบข้อมูลตามลักษณะ (Attribute Agreement Analysis) โดยการตรวจสอบแม่แบบด้วยสายตาของโรงงานกรณีศึกษามีขั้นตอนดังนี้

1. คัดเลือกทีมงานผู้ชำนาญการ เป็นบุคคลที่สามารถแยกแยะคุณภาพของแม่แบบได้และถูกค่าให้การยอมรับ ในที่นี้คือผู้ทำการฝึกอบรมพนักงานตรวจสอบแม่แบบ ซึ่งเป็นผู้ชำนาญด้านการตรวจสอบแม่แบบ และทราบถึงข้อกำหนดที่ถูกค่าต้องการ ทำการตรวจสอบชิ้นงานที่ถูกคัดเลือกในกระบวนการผลิตทั้ง 40 ชิ้นเพื่อเป็นกลุ่มตัวอย่างในการตรวจสอบ

2. กำหนดกลุ่มงานตัวอย่าง โดยทำการคัดเลือกแม่แบบในกระบวนการผลิต 40 ชิ้น ประกอบไปด้วยแม่แบบที่มีคุณภาพ 14 ชิ้น แม่แบบที่ไม่มีคุณภาพ 14 ชิ้น และแม่แบบที่มีคุณภาพก้ำกึ่งจำนวน 12 ชิ้น แยกเป็นแม่แบบดีแบบก้ำกึ่งและแม่แบบดีแบบไม่ก้ำกึ่งอย่างละครึ่ง ซึ่งลักษณะของคำหนิที่คัดเลือกมา เป็นคำหนิที่เกิดขึ้นบนแม่แบบทั้ง 8 ชนิด แล้วทำการบันทึกผลการตรวจสอบที่ถูกต้องของทั้ง 40 ชิ้น

3. ทำการสุ่มผู้ชำนาญการในการตรวจสอบแม่แบบชิ้นมาคนหนึ่งแล้วให้ตรวจสอบตัวอย่างงานแบบสุ่มเพื่อประเมินผลคุณภาพของตัวอย่างว่าผ่าน หรือไม่ผ่าน

4. ทำการคัดเลือกพนักงานที่ทักษะ ความชำนาญในการตรวจสอบแม่แบบในกระบวนการผลิตจำนวน 3 คน เป็นบุคคลที่สามารถแยกแยะคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้

5. เมื่อทำการทดลองโดยศึกษาพนักงานทีละคน ทำการตรวจสอบชิ้นงานและวัดชิ้นงานตัวอย่างต้องเป็นแบบสุ่ม และให้พนักงานประเมินผลชิ้นงานตัวอย่างนั้นว่าผ่านหรือไม่ผ่าน ทำการบันทึกข้อมูลลงในแบบฟอร์ม ในการตรวจวัดของพนักงานแต่ละคนจะทำซ้ำ 2 ครั้ง โดยการทำซ้ำแต่ละครั้งนั้นเว้นช่วงการตรวจสอบ 1 สัปดาห์ รวมทั้งการทำซ้ำแต่ละครั้งจะทำการสลับตำแหน่งของแม่แบบ เพื่อให้พนักงานจดจำกลุ่มงานตัวอย่างได้

6. บันทึกค่าลงในแบบฟอร์ม เพื่อทำการวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบการวัดแบบข้อมูลตามลักษณะประกอบไปด้วยดัชนี เปอร์เซนต์ความสามารถในการวัดซ้ำของพนักงาน เปอร์เซนต์ความไม่ไบอัสของพนักงาน เปอร์เซนต์ประสิทธิผลด้านความสามารถในการวัดซ้ำของการตรวจสอบ และเปอร์เซนต์ประสิทธิผลด้านไบอัสของการตรวจสอบซึ่งสมการการคำนวณแสดงดังสมการที่ 2.6 ถึง 2.9 (กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, 2549)

เกณฑ์การยอมรับของระบบการวัด

เกณฑ์การยอมรับของระบบการวัดด้วยวิธีการตรวจสอบแม่แบบด้วยตาเปล่า เนื่องจากเปอร์เซ็นต์แม่แบบเสียในปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษามีเปอร์เซ็นต์ที่ต่ำมาก ดังนั้นความแม่นยำของระบบการวัดที่ต้องการจึงมีค่าที่สูง หรือไม่ต้องการให้มีความผิดพลาดเลย ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เกณฑ์การยอมรับของระบบการวัด

ดัชนี	เกณฑ์การยอมรับ
%ความสามารถในการวัดซ้ำของพนักงาน	100%
%ความไม่ไบอัสของพนักงาน	100%
%ประสิทธิภาพผลความสามารถในการวัดซ้ำของการตรวจสอบ	100%
%ประสิทธิภาพความไม่ไบอัสของการตรวจสอบ	100%

ผลของการตรวจสอบของพนักงานทั้ง 3 คนแสดงดังตารางที่ 4.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 ผลลัพธ์ของการตรวจสอบระบบการวัดแบบข้อมูลตามลักษณะ (ต่อ)

ตัวอย่างที่	คุณภาพงานที่แท้จริง	พนักงานตรวจ สอบคนที่ 1		พนักงานตรวจ สอบคนที่ 2		พนักงานตรวจ สอบคนที่ 3		พนักงานตรวจได้เหมือนกันทุกครั้งและทุกคน	พนักงานตรวจได้เหมือนกันอย่างถูกต้อง
		1	2	1	2	1	2		
30	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	Y	Y
31	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	Y	Y
32	G	G	G	G	G	G	G	Y	Y
33	G	G	G	G	G	G	G	Y	Y
34	G	G	G	G	G	G	G	Y	Y
35	G	G	G	G	G	G	G	Y	Y
36	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	Y	Y
37	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	Y	Y
38	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	Y	Y
39	G	G	G	G	G	G	G	Y	Y
40	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	Y	Y

ผลการตรวจสอบความสามารถของระดับการวัดของพนักงานตรวจสอบ จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม Minitab แสดงดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ระบบการวัดข้อมูลตามลักษณะ โดยโปรแกรม Minitab

Within Appraisers				
Assessment Agreement				
Appraiser	# Inspected	# Matched	Percent	95 % CI
1	40	39	97.50	(86.84, 99.94)
2	40	40	100.00	(92.78, 100.00)
3	40	38	95.00	(83.08, 99.39)
# Matched: Appraiser agrees with him/herself across trials.				
Each Appraiser vs Standard				
Assessment Agreement				
Appraiser	# Inspected	# Matched	Percent	95 % CI
1	40	38	95.00	(83.08, 99.39)
2	40	39	97.50	(86.84, 99.94)
3	40	38	95.00	(83.08, 99.39)
# Matched: Appraiser's assessment across trials agrees with the known standard.				

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ระบบการวัดข้อมูลตามลักษณะโดยโปรแกรม Minitab (ต่อ)

Assessment Disagreement

Appraiser	# NG / G	Percent	# G / NG	Percent	# Mixed	Percent
1	1	5.00	0	0.00	1	2.50
2	1	5.00	0	0.00	0	0.00
3	0	0.00	0	0.00	2	5.00

NG / G: Assessments across trials = NG / standard = G.
 # G / NG: Assessments across trials = G / standard = NG.
 # Mixed: Assessments across trials are not identical.

Between Appraisers

Assessment Agreement

# Inspected	# Matched	Percent	95 % CI
40	37	92.50	(79.61, 98.43)

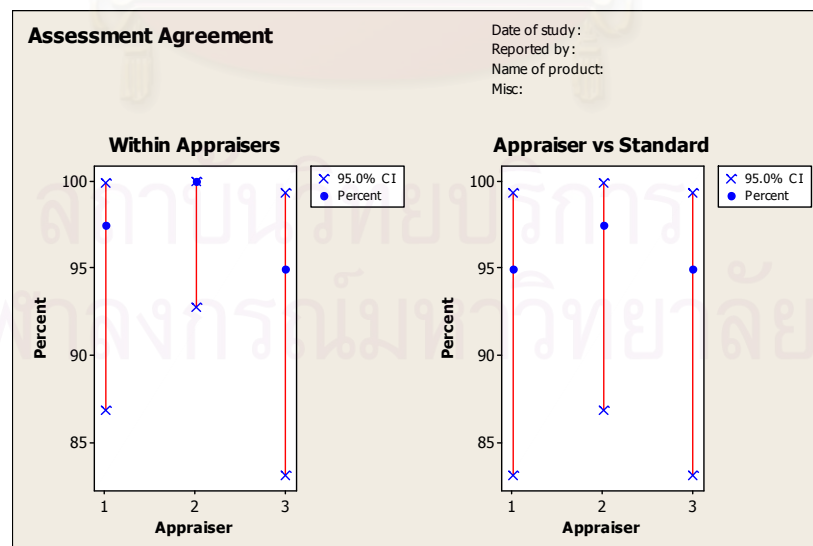
Matched: All appraisers' assessments agree with each other.

All Appraisers vs Standard

Assessment Agreement

# Inspected	# Matched	Percent	95 % CI
40	37	92.50	(79.61, 98.43)

Matched: All appraisers' assessments agree with the known standard.



รูปที่ 4.3 กราฟ Attribute Agreement ของการตรวจสอบแม่แบบ

สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังนี้

เปอร์เซ็นต์ความสามารถในการวัดซ้ำของพนักงานคนที่ 1 เท่ากับ 97.5 % พนักงานคนที่ 2 เท่ากับ 100 % และพนักงานคนที่ 3 เท่ากับ 95 %

เปอร์เซ็นต์ความไม่ไบอัสของพนักงานคนที่ 1 เท่ากับ 95 % พนักงานคนที่ 2 เท่ากับ 97.5 % และพนักงานคนที่ 3 เท่ากับ 95 %

เปอร์เซ็นต์ประสิทธิผลความสามารถในการวัดซ้ำของการตรวจสอบ เท่ากับ 92.5 %

เปอร์เซ็นต์ประสิทธิผลความไม่ไบอัสของการตรวจสอบ เท่ากับ 92.5 %

จากผลการตรวจสอบที่ได้นี้พบว่าค่า เปอร์เซ็นต์ความสามารถในการวัดซ้ำของพนักงานตรวจสอบ เปอร์เซ็นต์ความไม่ไบอัสของพนักงานตรวจสอบ (% Attribute Score) เปอร์เซ็นต์ประสิทธิผลด้านความสามารถในการวัดซ้ำของการตรวจสอบ (% Screen Effective Score) และ เปอร์เซ็นต์ประสิทธิผลความไม่ไบอัสของการตรวจสอบ (% Attribute Effective Score) ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด จึงต้องทำการอบรมพนักงานใหม่รวมทั้งประเมินผลของพนักงานใหม่เพื่อปรับปรุงค่าให้ดีขึ้น

จากการที่ครั้งแรกมีผลการทดสอบความสามารถของระดับการวัดซ้ำของพนักงานต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ จึงต้องมีการอบรมพนักงานวัดใหม่ทั้งหมด ซึ่งผลการทดสอบของพนักงานตรวจสอบทั้ง 3 คนหลังการอบรมใหม่ มีผลของการตรวจสอบจากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม Minitab แสดงดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ระบบการวัดข้อมูลตามลักษณะ

โดยโปรแกรม Minitab หลังอบรมพนักงานใหม่

Within Appraisers					
Assessment Agreement					
Appraiser	# Inspected	# Matched	Percent	95 % CI	
1	40	40	100.00	(92.78, 100.00)	
2	40	40	100.00	(92.78, 100.00)	
3	40	40	100.00	(92.78, 100.00)	

Each Appraiser vs Standard					
Assessment Agreement					
Appraiser	# Inspected	# Matched	Percent	95 % CI	
1	40	40	100.00	(92.78, 100.00)	
2	40	40	100.00	(92.78, 100.00)	
3	40	40	100.00	(92.78, 100.00)	

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ระบบการวัดข้อมูลตามลักษณะ
โดยโปรแกรม Minitab หลังอบรมพนักงานใหม่ (ต่อ)

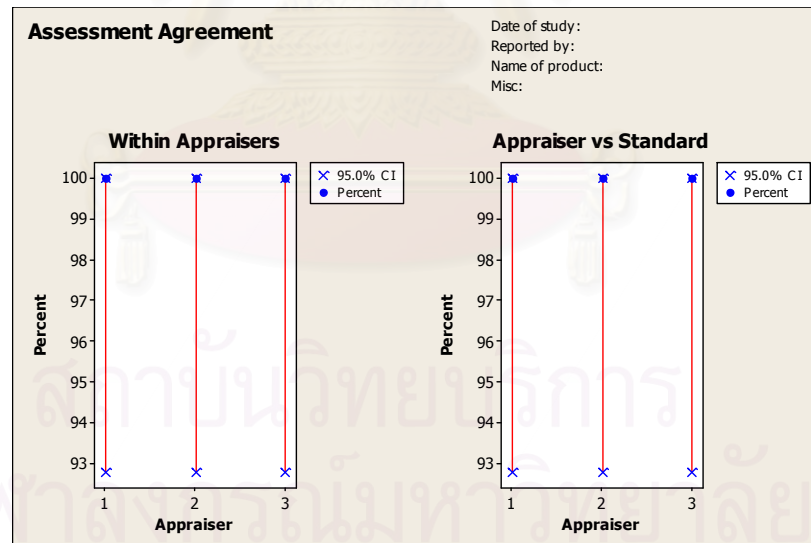
Assessment Disagreement							
Appraiser	# NG / G	Percent	# G / NG	Percent	# Mixed	Percent	
1	0 / 0	0.00	0 / 0	0.00	0	0.00	
2	0 / 0	0.00	0 / 0	0.00	0	0.00	
3	0 / 0	0.00	0 / 0	0.00	0	0.00	

Between Appraisers

Assessment Agreement				
# Inspected	# Matched	Percent	95 % CI	
40	40	100.00	(92.78, 100.00)	

All Appraisers vs Standard

Assessment Agreement				
# Inspected	# Matched	Percent	95 % CI	
40	40	100.00	(92.78, 100.00)	



รูปที่ 4.4 กราฟ Attribute Agreement ของการตรวจสอบแม่แบบหลังอบรมพนักงานใหม่

สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังนี้
 เปอร์เซ็นต์ความสามารถในการวัดซ้ำของพนักงาน เท่ากับ 100 %
 เปอร์เซ็นต์ความไม่ไบอัสของพนักงาน เท่ากับ 100 %
 เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพผลความสามารถในการวัดซ้ำของการตรวจสอบ เท่ากับ 100 %
 และเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพผลความไม่ไบอัสของการตรวจสอบ เท่ากับ 100 %
 ดังนั้นความสามารถของกระบวนการวัดแบบข้อมูลตามลักษณะในการทดสอบครั้งที่สอง
 อยู่ในเกณฑ์การยอมรับได้ เนื่องจากพนักงานตรวจสอบสามารถตัดสินใจแม่แบบได้ถูกต้องทั้งหมด
 ทุกคน

4.2.2.2 การวิเคราะห์ระบบการตรวจสอบแม่แบบดำเนินประเภทรอยขีดข่วน

เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นไปที่ดำเนินประเภทรอยขีดข่วน ซึ่งมีปริมาณเป็น 80.2% ของรอยตำหนิทั้งหมดเพื่อให้แน่ใจได้ว่าพนักงานตรวจสอบสามารถตรวจสอบดำเนินประเภทรอยขีดข่วนได้ถูกต้อง จึงได้ทำการตรวจสอบความสามารถของระบบการวัดเฉพาะดำเนินประเภทรอยขีดข่วน ของผลิตภัณฑ์ FSV ซึ่งมีมาตรฐานการตรวจสอบดำเนินประเภทรอยขีดข่วน แตกต่างจากผลิตภัณฑ์อื่นๆ ซึ่งมีขั้นตอนในการวิเคราะห์ระบบการวัดคล้ายกับขั้นตอนกับการวิเคราะห์ที่ได้ทำไปก่อนหน้านี้

1. คัดเลือกทีมงานผู้ชำนาญการ เป็นบุคคลที่สามารถแยกแยะคุณภาพของแม่แบบได้และถูกค่าให้การยอมรับ ในที่นี้คือผู้ทำการฝึกอบรมพนักงานตรวจสอบแม่แบบ ซึ่งเป็นผู้ชำนาญด้านการตรวจสอบแม่แบบ และทราบถึงข้อกำหนดที่ถูกค่าต้องการ ทำการตรวจสอบชิ้นงานที่ถูกคัดเลือกในกระบวนการผลิตทั้ง 20 ชิ้นเพื่อเป็นกลุ่มตัวอย่างในการตรวจสอบ

2. กำหนดกลุ่มงานตัวอย่าง โดยทำการคัดเลือกแม่แบบในกระบวนการผลิต 20 ชิ้น ประกอบไปด้วยแม่แบบที่มีคุณภาพ 7 ชิ้น แม่แบบที่ไม่มีคุณภาพ 7 ชิ้น และแม่แบบที่มีคุณภาพก้ำกึ่งจำนวน 6 ชิ้น แยกเป็นแม่แบบดีแบบก้ำกึ่งและแม่แบบดีแบบไม่ก้ำกึ่งอย่างละครึ่ง ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่นำมาตรวจสอบเป็นผลิตภัณฑ์ FSV และมีรอยดำเนินประเภทรอยขีดข่วนเท่านั้น (ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการตัดสินใจดำเนินประเภทรอยขีดข่วนแตกต่างจากผลิตภัณฑ์อื่นๆ ดังที่ได้อ้างถึงในมาตรฐานการตรวจสอบแม่แบบหัวข้อ 4.2.1) แล้วทำการบันทึกผลการตรวจสอบที่ถูกต้องของทั้ง 20 ชิ้น

3. ทำการสุ่มผู้ชำนาญการในการตรวจสอบแม่แบบ FSV ขึ้นมาคนหนึ่งแล้วให้ตรวจสอบตัวอย่างงานแบบสุ่มเพื่อประเมินผลคุณภาพของตัวอย่างว่าผ่าน หรือไม่ผ่าน

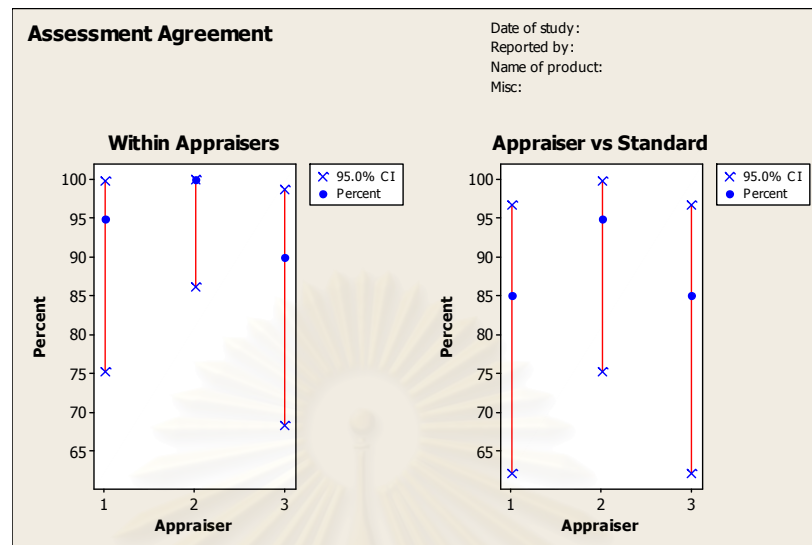
4. ทำการคัดเลือกพนักงานที่ทักษะ ความชำนาญในการตรวจสอบแม่แบบในกระบวนการผลิตจำนวน 3 คน เป็นบุคคลที่สามารถแยกแยะคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้

ผลการตรวจสอบความสามารถของระดับการวัดของพนักงานตรวจสอบ จากการวิเคราะห์
โดยโปรแกรม Minitab แสดงดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.5

หมายเหตุ เกณฑ์การยอมรับของระบบการวัดนี้ ใช้เกณฑ์เดียวกับตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ระบบการวัดข้อมูลตามลักษณะ
โดยโปรแกรม Minitab เฉพาะตำหนิประเภทรอยขีดข่วน

Within Appraisers							
Assessment Agreement							
Appraiser	# Inspected	# Matched	Percent	95 % CI			
1	20	19	95.00	(75.13, 99.87)			
2	20	20	100.00	(86.09, 100.00)			
3	20	18	90.00	(68.30, 98.77)			
Each Appraiser vs Standard							
Assessment Agreement							
Appraiser	# Inspected	# Matched	Percent	95 % CI			
1	20	17	85.00	(62.11, 96.79)			
2	20	19	95.00	(75.13, 99.87)			
3	20	17	85.00	(62.11, 96.79)			
Assessment Disagreement							
Appraiser	# NG / G	Percent	# G / NG	Percent	# Mixed	Percent	
1	1	10.00	1	10.00	1	5.00	
2	1	10.00	0	0.00	0	0.00	
3	1	10.00	0	0.00	2	10.00	
Between Appraisers							
Assessment Agreement							
# Inspected	# Matched	Percent	95 % CI				
20	18	90.00	(68.30, 98.77)				
All Appraisers vs Standard							
Assessment Agreement							
# Inspected	# Matched	Percent	95 % CI				
20	17	85.00	(62.11, 96.79)				



รูปที่ 4.5 กราฟ Attribute Agreement ของการตรวจสอบแม่แบบเฉพาะคำหุ้ประเภทรอยขีดข่วน

ผลการตรวจสอบความสามารถของระดับการวัดคำหุ้ประเภทรอยขีดข่วนของพนักงานตรวจสอบ เป็นดังนี้

เปอร์เซ็นต์ความสามารถในการวัดซ้ำของพนักงานคนที่ 1 เท่ากับ 95 % พนักงานคนที่ 2 เท่ากับ 100 % และพนักงานคนที่ 3 เท่ากับ 90 %

เปอร์เซ็นต์ความไม่ไบอัสของพนักงานคนที่ 1 เท่ากับ 85 % พนักงานคนที่ 2 เท่ากับ 95 % และพนักงานคนที่ 3 เท่ากับ 85 %

เปอร์เซ็นต์ประสิทธิผลความสามารถในการวัดซ้ำของการตรวจสอบ เท่ากับ 90 %

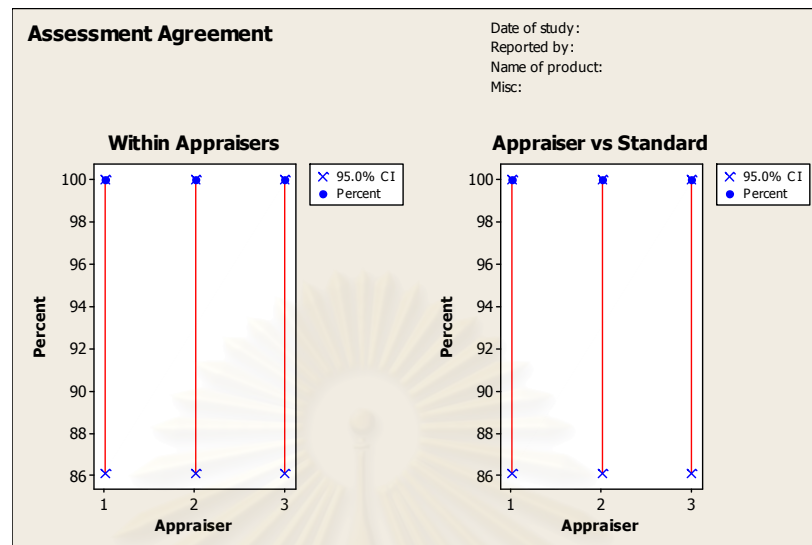
เปอร์เซ็นต์ประสิทธิผลความไม่ไบอัสของการตรวจสอบ เท่ากับ 85 %

ซึ่งจากผลการตรวจสอบที่ได้พบว่าค่า เปอร์เซ็นต์ความสามารถในการวัดซ้ำของพนักงานตรวจสอบ เปอร์เซ็นต์ความไม่ไบอัสของพนักงานตรวจสอบ (% Attribute Score) เปอร์เซ็นต์ประสิทธิผลด้านความสามารถในการวัดซ้ำของการตรวจสอบ (% Screen Effective Score) และ เปอร์เซ็นต์ประสิทธิผลความไม่ไบอัสของการตรวจสอบ (% Attribute Effective Score) ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด จึงต้องทำการอบรมพนักงานใหม่รวมทั้งประเมินผลของพนักงานใหม่เพื่อปรับปรุงค่าให้ดีขึ้น โดยเฉพาะการตรวจสอบแม่แบบที่มีลักษณะของคำหุ้เหมือนกับตัวอย่างที่ 12 ซึ่งพนักงานทำการตัดสินใจงานผิด ทั้ง 3 คน

เนื่องจากการทดสอบครั้งแรกมีผลการทดสอบความสามารถของกระบวนการต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ดังนั้นจึงได้ทำการอบรมพนักงานใหม่ ผลของการตรวจสอบหลังมีการอบรมพนักงานทั้ง 3 คนใหม่ จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม Minitab แสดงดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ระบบการวัดข้อมูลตามลักษณะโดยโปรแกรม Minitab
เฉพาะตำหนิประเภทรอยขีดข่วน หลังการอบรมพนักงานใหม่

Within Appraisers							
Assessment Agreement							
Appraiser	# Inspected	# Matched	Percent	95 % CI			
1	20	20	100.00	(86.09, 100.00)			
2	20	20	100.00	(86.09, 100.00)			
3	20	20	100.00	(86.09, 100.00)			
Each Appraiser vs Standard							
Assessment Agreement							
Appraiser	# Inspected	# Matched	Percent	95 % CI			
1	20	20	100.00	(86.09, 100.00)			
2	20	20	100.00	(86.09, 100.00)			
3	20	20	100.00	(86.09, 100.00)			
Assessment Disagreement							
Appraiser	# NG / G	Percent	# G / NG	Percent	# Mixed	Percent	
1	0	0.00	0	0.00	0	0.00	
2	0	0.00	0	0.00	0	0.00	
3	0	0.00	0	0.00	0	0.00	
Between Appraisers							
Assessment Agreement							
# Inspected	# Matched	Percent	95 % CI				
20	20	100.00	(86.09, 100.00)				
All Appraisers vs Standard							
Assessment Agreement							
# Inspected	# Matched	Percent	95 % CI				
20	20	100.00	(86.09, 100.00)				



รูปที่ 4.6 กราฟ Attribute Agreement ของการตรวจสอบแม่แบบ
เฉพาะตำหนิประเภทรอยขีดข่วนหลังการอบรมพนักงานใหม่

ผลของการวิเคราะห์ระบบการวัดเป็นดังนี้

เปอร์เซ็นต์ความสามารถในการวัดซ้ำของพนักงาน เท่ากับ 100 %

เปอร์เซ็นต์ความไม่ไบอัสของพนักงาน เท่ากับ 100 %

เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพผลความสามารถในการวัดซ้ำของการตรวจสอบ เท่ากับ 100 %

และเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพผลความไม่ไบอัสของการตรวจสอบ เท่ากับ 100 %

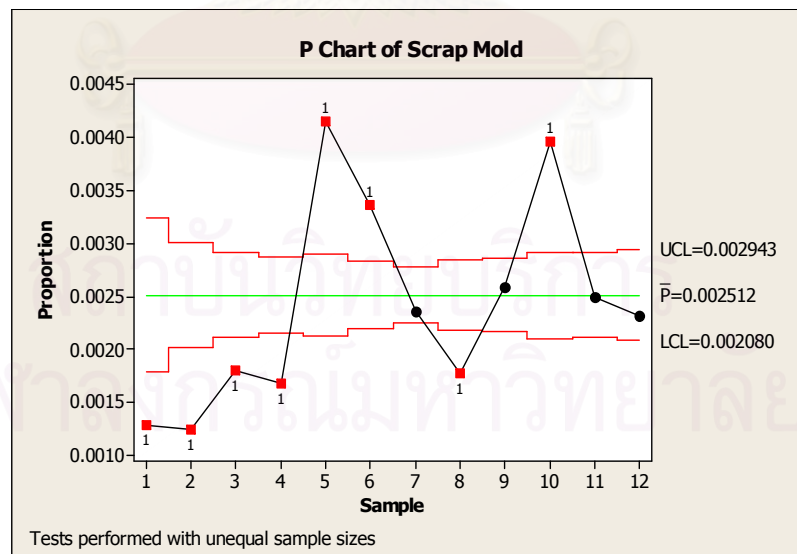
ดังนั้นสรุปได้ว่าความสามารถของกระบวนการวัดแบบข้อมูลตามลักษณะของตำหนิประเภทรอยขีดข่วนในการทดสอบครั้งที่สองอยู่ในเกณฑ์การยอมรับได้ เนื่องจากพนักงานตรวจสอบทุกคนสามารถตัดสินแม่แบบได้ถูกต้องทุกตัว และหลังจากมีความมั่นใจในเรื่องความสามารถของกระบวนการวัดแบบข้อมูลตามลักษณะแล้ว จึงได้ทำการวิเคราะห์หาสาเหตุเพื่อแก้ปัญหาการเกิดรอยขีดข่วนบนแม่แบบต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 สภาพปัญหาของแม่แบบเสียในปัจจุบัน

4.3.1 ความสามารถของกระบวนการ

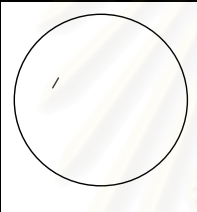
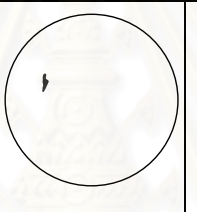
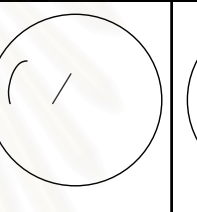
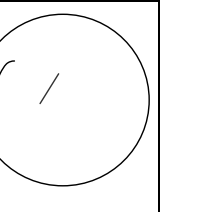
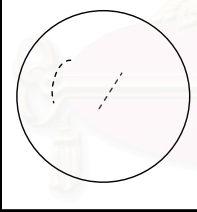
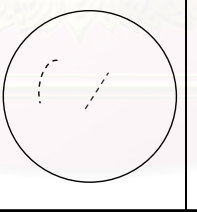

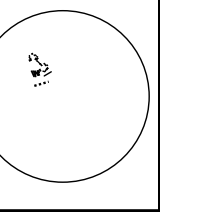
จากการศึกษาความสามารถของกระบวนการของแม่แบบที่ใช้ผลิตเลนส์บางพิเศษของผลิตภัณฑ์ 1.6FSV สามารถศึกษาได้จากจำนวนแม่แบบเสียต่อล้านชิ้นของการใช้งาน และสัดส่วนของเสียที่เกิดขึ้นจากแม่แบบเสียที่ผลิตเลนส์เสียออกมาต่อจำนวนครั้งของแม่แบบที่ใช้ในการผลิตทั้งหมด ผลจากการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการผลิตด้วยข้อมูลในปี พ.ศ. 2549 ซึ่งทำการเก็บข้อมูลเป็นรายเดือน โดยทำการตรวจสอบแม่แบบที่ถูกใช้ในการผลิตทั้งหมด 100% ดังนั้นขนาดตัวอย่างในแต่ละเดือน จะเป็นจำนวนครั้งของแม่แบบที่ใช้ผลิตเลนส์ในเดือนนั้นๆ นั่นเอง ดังรูปที่ 4.7 แผนภูมิ p พบว่าเปอร์เซ็นต์แม่แบบเสียในแต่ละเดือนมีความแปรผัน (Variation) ค่อนข้างสูง โดยสัดส่วนของเสียมีค่าเป็น 0.25% และมีจำนวนแม่แบบเสีย 2,512 ตัวในหนึ่งล้านตัว (Part per Million หรือ PPM) นอกจากนี้เมื่อทำการศึกษาค่าคะแนนมาตรฐาน (Z Score) หรือค่า σ -Level พบว่าค่า Z Long-Term (Z_{LT}) มีค่า 2.81 และ Z Short-Term (Z_{ST}) มีค่า 4.31 (จาก $Z_{ST} = Z_{LT} + 1.5_{shift}$) และหากนำมาคำนวณค่าประมาณของ Ppk และ Cpk จะได้ 0.94 และ 1.44 ตามลำดับ (จาก $Ppk = Z_{LT}/3$ และ $Cpk = Z_{ST}/3$) (Breyfogle, 2001; Sleeper, 2006) โดย 80.2% ของแม่แบบเสียทั้งหมดเป็นตำหนิประเภทรอยขีดข่วน (Scratch Mold)



รูปที่ 4.7 แผนภูมิ p ของแม่แบบเสียในการผลิตเลนส์ 1.6FSV ตั้งแต่เดือน ม.ค. ถึง ธ.ค. ปีพ.ศ. 2549

4.3.2 ลักษณะของรอยตำหนิประเภทรอยขีดข่วน

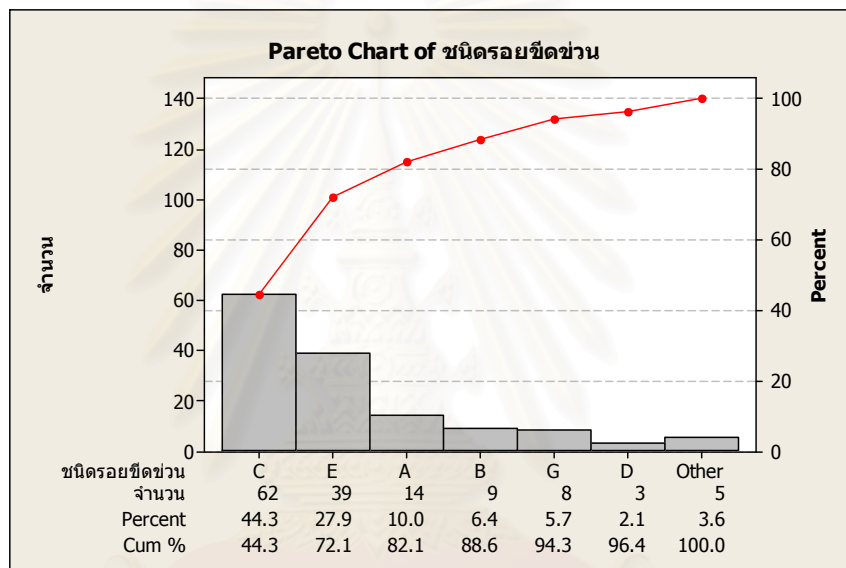
ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับแม่แบบเสียเพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์หาสาเหตุ ด้วยการเก็บรวบรวมข้อมูลลักษณะของแม่แบบเสีย โดยให้พนักงานตรวจสอบเก็บตัวอย่างของแม่แบบเสียที่มีตำหนิประเภทรอยขีดข่วน และทำการบันทึกลักษณะของรอยตำหนิที่เกิดขึ้น โดยใช้แผ่นรายการตรวจสอบ (Check Sheet) ดังภาคผนวก ก ที่ได้ทำการแบ่งลักษณะของรอยขีดข่วนตามความรุนแรงของรอยและรูปร่างที่เกิด แบ่งเป็น 8 ชนิด คือ A ถึง H ดังรูปที่ 4.8 เพื่อเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์หาสาเหตุของการเกิดรอยขีดข่วนต่อไป

SM Category				
Type	A	B	C	D
	รอยขีดสั้น (< 4 mm) มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า	รอยกระแทกลึก มองเห็นด้วยตาเปล่า	รอยขีดยาว (≥ 4 mm) มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า	รอยขีดยาว (≥ 4 mm) มองเห็นด้วยตาเปล่า
Map				
Type	E	F	G	H
	จุดไขปลายาว (≥ 4 mm) มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า	จุดไขปลายาว (≥ 4 mm) มองเห็นด้วยตาเปล่า	รอยกระแทกเป็นริ้วๆ หรือเป็นกลุ่ม	ไม่มีรูปแบบ
Map				

รูปที่ 4.8 ชนิดของรอยขีดข่วนบนแม่แบบที่แบ่งตามความรุนแรงและรูปร่างของรอย

และข้อมูลจากการสุ่มตัวอย่างของรอยตำหนิประเภทรอยขีดข่วนจำนวน 140 ตัวอย่าง พบว่า 72% ของงานเสียประเภทรอยขีดข่วน มีลักษณะเป็นรอยขีดบางยาว ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (รอยขีดข่วนชนิด C และ E) แสดงในผังพาเรโตรูปที่ 4.9 ซึ่งลักษณะของรอยที่เกิดขึ้นนี้มีลักษณะเช่นเดียวกับรอยขีดข่วนบนตัวเลนส์ สันนิษฐานว่าอาจเกิดจากการเสียดสีกันของแม่แบบและเลนส์ ซึ่งกระบวนการที่มีโอกาสทำให้เกิดการเสียดสี รวมทั้งการกระแทกของแม่แบบได้นั้น เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของพนักงาน คือ กระบวนการประกอบแม่แบบ (Assembly) และกระบวนการแกะแม่แบบ (Disassembly) แต่เนื่องจากแม่แบบที่ใช้ในการผลิตเลนส์บางพิเศษนี้ผลิตมาจากแก้วที่ทำการเพิ่มความแข็งแรงด้วยกระบวนการเคมีเทมเปอร์ (Chemical

Tempering) ทำให้แม่แบบเหล่านี้ยากต่อการเกิดรอยขีดข่วนในสภาวะปกติที่ไม่มีปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของแก้วมากระทำ ซึ่งปัจจัยหนึ่งที่สำคัญมากต่อความแข็งแรงของแก้วก็คือ อุณหภูมิ โดยแก้วที่มีอุณหภูมิสูงจะมีความอ่อนตัวมากกว่าแก้วที่อุณหภูมิต่ำ จึงทำให้เกิดรอยขีดข่วนได้ง่ายกว่าหากมีการเสียดสีหรือการกระทบ (Bowden and Scott, 1958) ดังนั้นที่กระบวนการแกะแม่แบบ (Disassembly) ซึ่งแม่แบบเป็นแม่แบบที่มีอุณหภูมิสูงเนื่องจากเพิ่งผ่านกระบวนการ โพลีเมอร์ไรเซชันโดยการอบที่อุณหภูมิสูงมา จึงง่ายต่อการเกิดรอยขีดข่วนมากกว่ากระบวนการประกอบแม่แบบ (Assembly) ที่จะทำการประกอบที่อุณหภูมิต่ำกว่ามาก



รูปที่ 4.9 พารेटโตแสดงชนิดของรอยขีดข่วนที่เกิดจากแม่แบบตัวอย่าง 140 ตัวอย่าง

4.4 การระดมสมองเพื่อหาปัจจัยนำเข้า (Key Process Input Variable หรือ KPIV)

ทำการระดมความคิดเพื่อหาสาเหตุที่เป็นไปได้ของรอยขีดข่วนบนแม่แบบ จากสมาชิกในทีมที่ทำการคัดเลือกจากจากระยะนิยามปัญหา ซึ่งประกอบไปด้วย ผู้จัดการฝ่ายผลิต วิศวกรฝ่ายผลิต หัวหน้าพนักงานฝ่ายผลิตของแต่ละกะทำงาน รองหัวหน้างานฝ่ายผลิตของแต่ละกะทำงาน และผู้ดำเนินงานวิจัย โดยมีขั้นตอนต่างๆในการระดมความคิดเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดรอยขีดข่วนบนแม่แบบ ดังต่อไปนี้

- ใช้ผังก้างปลาหรือผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) ในการการระดมความคิดเพื่อหาสาเหตุที่เป็นไปได้ของรอยขีดข่วนบนแม่แบบ เนื่องจากผังก้างปลานี้จะทำให้ง่ายใน

การเสนอความคิดของสมาชิกในทีม การระดมความคิดที่เป็นอิสระต่อกัน และสามารถรวบรวมหรือแยกประเด็นความคิดต่างๆอย่างมีประสิทธิภาพ

- จากนั้นนำปัจจัยต่างๆที่ได้จากการระดมความคิดโดยใช้ผังก้างปลาหรือผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) นั้นมาทำการวิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยนำเข้าที่อาจมีผล (KPIV) โดยใช้ตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause & Effect Matrix) และทำการเรียงลำดับความสำคัญของปัจจัยโดยการระดมสมองเพื่อทำการตัดปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลน้อยต่อการเกิดรอยขีดข่วนบนแม่แบบ

- ทำการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode & Effects Analysis) โดยใช้การระดมสมองจากสมาชิกในทีมและพนักงานที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งใช้ข้อมูลทางสถิติที่มีอยู่

4.4.1 การระดมความคิดผังก้างปลาหรือผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)

การระดมความคิดโดยใช้ผังก้างปลา จะทำการวิเคราะห์โดยพิจารณาแยกสาเหตุของปัญหาที่อาจทำให้เกิดรอยขีดข่วนบนแม่แบบออกเป็นหัวข้อหลัก 6 กลุ่ม คือ

- สาเหตุที่เกิดจากพนักงาน (Man)
- สาเหตุจากเครื่องจักร (Machine)
- สาเหตุจากวัตถุดิบ (Material)
- สาเหตุจากวิธีการทำงาน (Method)
- สาเหตุจากระบบการวัด (Measurement)
- สาเหตุจากสภาพแวดล้อมในกระบวนการผลิต (Environment)

ผลจากการระดมความคิดเพื่อหาสาเหตุของการเกิดรอยขีดข่วนบนแม่แบบด้วยผังก้างปลา (Cause and Effect Diagram) แสดงดังรูปที่ 4.10 จากการระดมความคิดโดยใช้ผังก้างปลา (Cause & Effect Diagram) นี้ พบว่าสาเหตุของการเกิดรอยขีดข่วนบนตัวแม่แบบอาจเกิดได้จากทั้งสาเหตุที่เกิดจากการทำงานของพนักงาน จากเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทำงาน หรือเกิดจากเงื่อนไขของการทำงานที่ไม่เหมาะสม นอกจากนี้ยังพบว่าสาเหตุอย่างหนึ่งที่เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการเสียดสีของแม่แบบกับหน้าเลนส์ ขณะทำการแกะแม่แบบ ตั้งแต่การแกะกาสเก็ตออกจากแม่แบบ และการแกะแม่แบบออกจากเลนส์โดยการรูดแม่แบบแซนดวิชกับสปาหูลา (Spatula) คือการดีโม่ลด์ (Demold หรือ Loose Top) หรือการที่แม่แบบหลุดออกจากหน้าเลนส์ก่อนที่จะทำการแกะ ซึ่งจะทำให้เกิดการเสียดสีระหว่างแม่แบบกับเลนส์ได้ง่าย ส่งผลให้เกิดรอยขีดข่วนบนแม่แบบได้นั่นเอง ดังนั้นจึงได้ทำการระดมความคิดเพื่อหาสาเหตุของการเกิดการดีโม่ลด์ด้วย ซึ่งสาเหตุการเกิดการดีโม่ลด์นั้น เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ (Parameter) ต่างๆในการผลิตได้หลายอย่าง เช่น อุณหภูมิ

ในการอบงานที่ไม่เหมาะสม ระยะเวลาที่เก็บแม่แบบในตู้โพลีเมอร์ไรเซชัน ปริมาณของตัวเร่ง (Catalyst) ที่ผสมลงใน โมนาเมอร์ เป็นต้น ดังแสดงดังรูปที่ 4.11

4.4.2 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix)

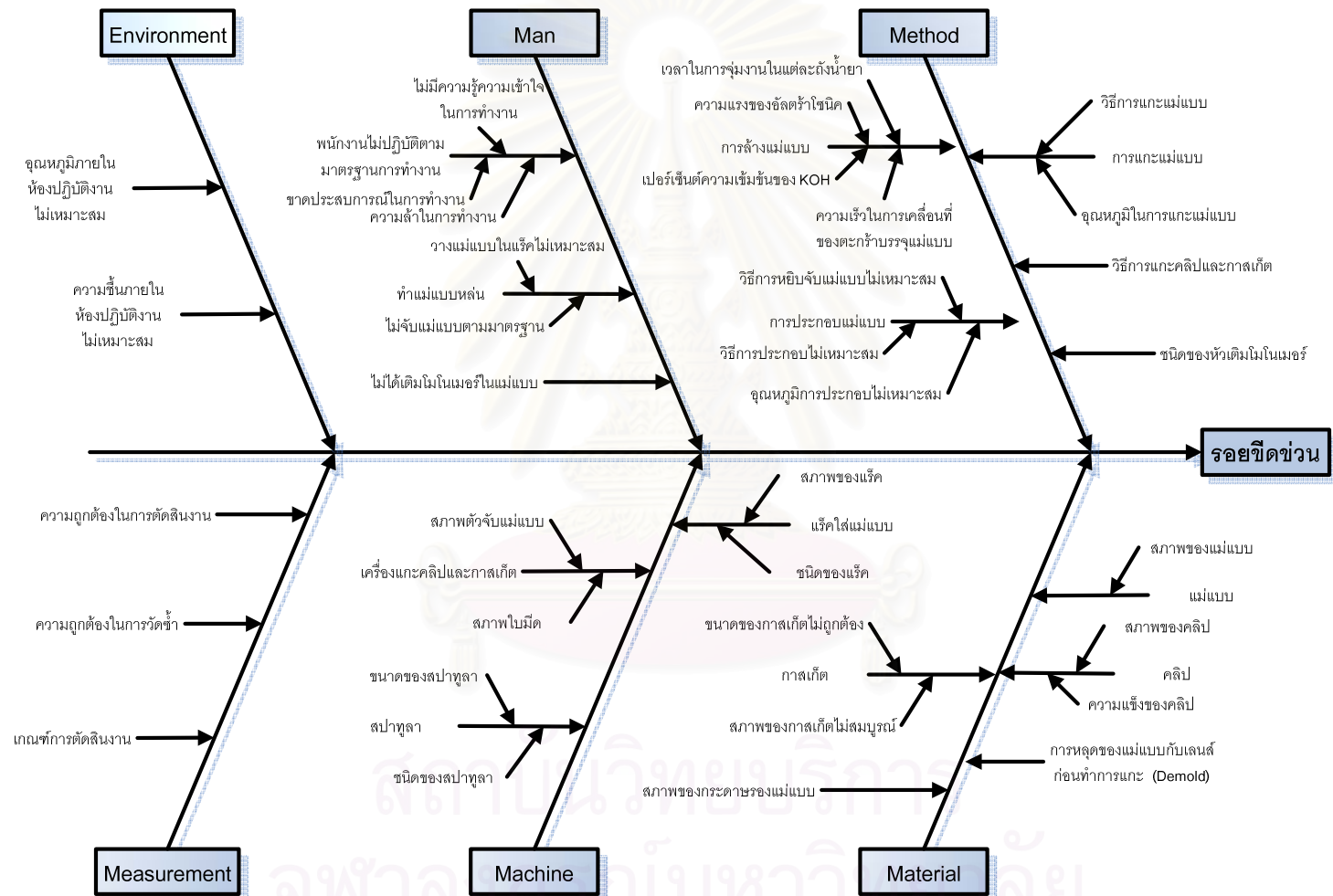
หลังจากที่ได้ปัจจัยต่างๆที่อาจมีผลต่อการเกิดตำหนิประเภทรอยขีดข่วนบนแม่แบบจากการระดมสมองแล้ว จากนั้นทำการกำหนดปัจจัยนำเข้าที่อาจมีผล (KPIV) โดยใช้ตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) โดยนำข้อมูลจากผังก้างปลาที่ได้จากการระดมความคิดมาใส่ลงในตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) ซึ่งได้กำหนดอัตราความสำคัญเท่ากับ 10 สำหรับสาเหตุที่อาจทำให้เกิดรอยขีดข่วนบนแม่แบบโดยตรง และอัตราความสำคัญเท่ากับ 8 สำหรับสาเหตุที่อาจทำให้เกิดการดีโม่ลด์ (Demold) ของแม่แบบแซนด์วิช เนื่องจากพบว่าประมาณ 83% ของแม่แบบแซนด์วิชที่เกิดการดีโม่ลด์จะก่อให้เกิดรอยขีดข่วนบนแม่แบบและเลนส์เนื่องจากการเสียดสี

และในแต่ละปัจจัยให้กลุ่มสมาชิกทำการลงคะแนนความสำคัญ ซึ่งจะให้คะแนนในช่วง 1 ถึง 10 คะแนน โดยการกำหนดอัตราส่วนที่จะส่งผลต่อการเกิดรอยขีดข่วน และดีโม่ลด์บนแม่แบบโดยที่

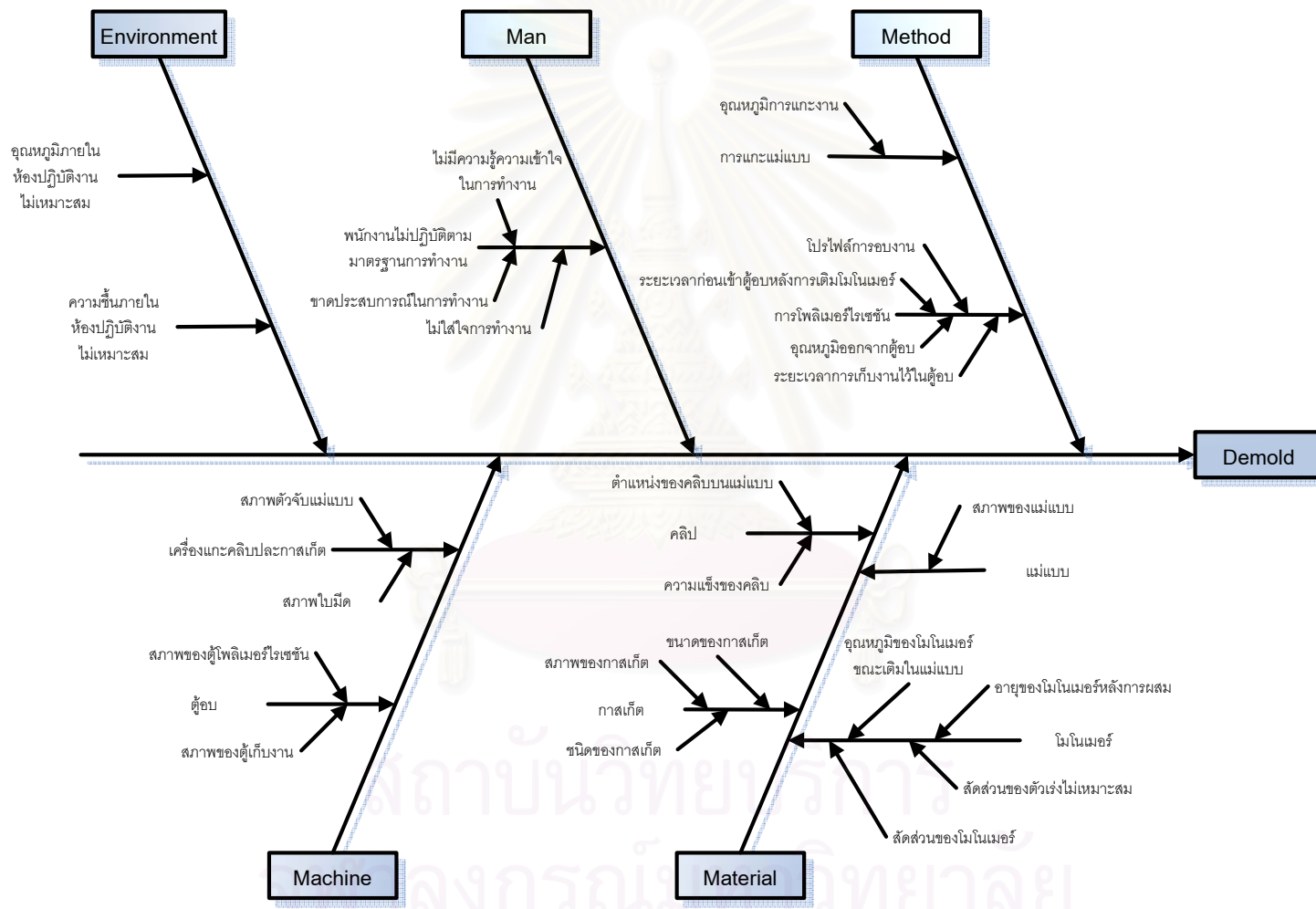
0 = ไม่มีความสำคัญต่อการเกิดรอยขีดข่วน หรือ ไม่มีผลกระทบต่อของเสีย

10 = มีความสำคัญต่อรอยขีดข่วน หรือ มีผลกระทบต่อของเสียอย่างยิ่ง

จากนั้นผู้วิจัยจึงทำการรวบรวมคะแนนรวมได้จากการคูณคะแนนความสำคัญของแต่ละปัจจัยกับอัตราความสำคัญของการเกิดรอยขีดข่วนหรือการเกิดการดีโม่ลด์ และทำการสรุปผลคะแนนในตาราง Cause and Effect Matrix ดังตารางที่ 4.8 แล้วทำการเรียงลำดับความสำคัญของปัจจัยเพื่อเลือกปัจจัยที่คาดว่ามีผลต่อการเกิดรอยขีดข่วนบนแม่แบบไปทำการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป โดยใช้กราฟแท่งเรียงลำดับคะแนนจากมากไปน้อย ดังรูปที่ 4.12 ซึ่งปัจจัยที่จะนำไปวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode & Effects Analysis หรือ FMEA) คือ ปัจจัยที่มีคะแนนสูง ในกรณีนี้คือสูงกว่า 100 คะแนน มีทั้งหมด 15 ปัจจัย ดังแสดงในตารางที่ 4.9



รูปที่ 4.10 ฟังก้างปลาจากการระดมความคิดเพื่อหาสาเหตุที่เป็นไปได้ของการเกิดรอยขีดข่วนบนแม่แบบ



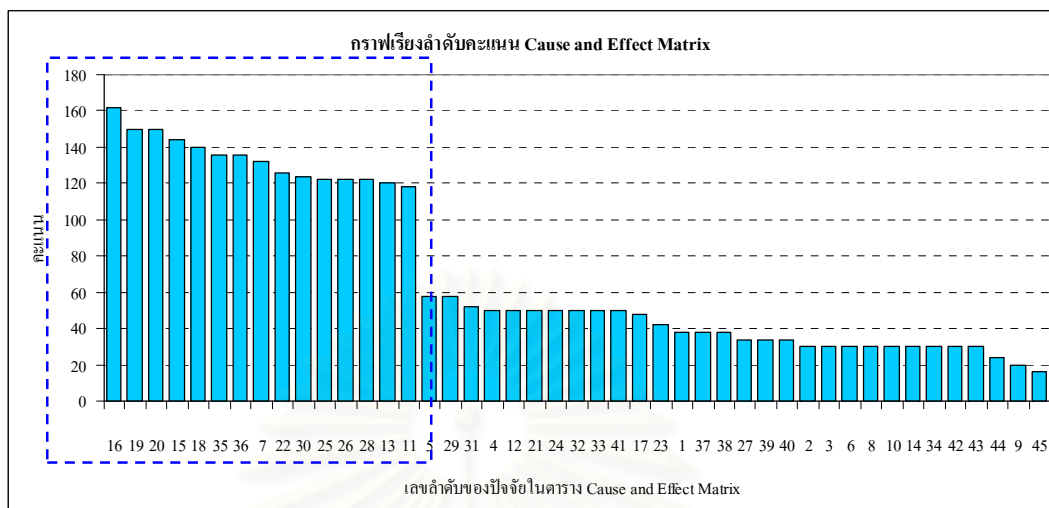
รูปที่ 4.11 ปัจจัยที่ก่อให้เกิดการระดมความคิดเพื่อหาสาเหตุที่เป็นไปได้ของการเกิดการดีโมลด์ (Demold)

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause & Effect Matrix)

Cause and Effect Matrix								
No.	Area Cause	Process Input		Scratch	Demold	คะแนน	เปอร์เซ็นต์	
				10	8			
1	Man	พนักงาน ไม่ปฏิบัติตามมาตรฐานการทำงาน	พนักงาน ไม่มีความรู้ความเข้าใจในการทำงาน	3	1	38	1.2%	
2			พนักงานขาดประสบการณ์ในการทำงาน	3	0	30	0.9%	
3			ความล่าช้าในการทำงานของพนักงาน	3	0	30	0.9%	
4		ทำแม่แบบหล่น	วางแม่แบบในเร็คไม่เหมาะสม	5	0	50	1.6%	
5			พนักงาน ไม่จับแม่แบบตามมาตรฐาน	5	1	58	1.8%	
6			ไม่ได้เติมโมโนเมอร์ในแม่แบบ	พนักงาน ลืมเติม โมโนเมอร์	3	0	30	0.9%
7	Method	การล้างแม่แบบ	เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของ KOH	6	9	132	4.2%	
8				ความแรงของอัลตราโซนิก	3	0	30	0.9%
9				เวลาในการจุ่มงานลงในแต่ละถัง	2	0	20	0.6%
10				ความเร็วในการเคลื่อนที่ของตระกร้าบรรจุแม่แบบ	3	0	30	0.9%
11		การประกอบแม่แบบ	วิธีการประกอบไม่เหมาะสม	7	6	118	3.7%	
12				วิธีการหยิบจับแม่แบบไม่เหมาะสม	5	0	50	1.6%
13			อุณหภูมิในการประกอบแม่แบบ	8	5	120	3.8%	
14		การเติมโมโนเมอร์	ชนิดหัวเติมโมโนเมอร์	3	0	30	0.9%	
15		การแกะแม่แบบ	วิธีการแกะแม่แบบ	8	8	144	4.6%	
16				อุณหภูมิในการแกะแม่แบบ	9	9	162	5.1%
17			การแกะคลิบและกาสเก็ต	วิธีการแกะคลิบและกาสเก็ต	4	1	48	1.5%
18		การโพลีเมอร์ไรเซชัน	โปรไฟล์การอบงาน		6	10	140	4.4%
19					อุณหภูมิออกจากตู้อบ	7	10	150
20				ระยะเวลาที่เก็บงานไว้ในตู้หลังการโพลีเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์	7	10	150	4.7%
21			ระยะเวลาก่อนเข้าตู้อบหลังเติมโมโนเมอร์	1	5	50	1.6%	

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause & Effect Matrix) (ต่อ)

Cause and Effect Matrix								
No.	Area Cause	Process Input		Scratch	Demold	คะแนน	เปอร์เซ็นต์	
				10	8			
22	Material	แม่แบบ (Mold)	สภาพของแม่แบบ	7	7	126	8.1%	
23		โมโนเมอร์ (Monomer)	อุณหภูมิของโมโนเมอร์ขณะเติม โมโนเมอร์	1	4	42	2.7%	
24			สัดส่วนของโมโนเมอร์ไม่เป็นไป ตามมาตรฐาน	1	5	50	3.2%	
25			อายุของโมโนเมอร์หลังจากทำการ ผสม	5	9	122	7.9%	
26			ส่วนผสมของตัวเร่ง (Catalyst) ไม่ เหมาะสม	5	9	122	7.9%	
27		กาส์เก็ต (Gasket)		สภาพของกาส์เก็ตไม่สมบูรณ์	1	3	34	2.2%
28				ชนิดของกาส์เก็ต	5	9	122	7.9%
29				ขนาดของกาส์เก็ต	5	1	58	3.7%
30		คลิป (Clip)		ความแข็งของคลิป	6	8	124	8.0%
31				ตำแหน่งของคลิปบนแม่แบบ	2	4	52	3.4%
32			กระดาดรองแม่แบบ	สภาพของกระดาดรองแม่แบบ	5	0	50	3.2%
33		Machine/ Equipment	แร็ค (Rack) ใส่แม่แบบ	สภาพของแร็คใส่แม่แบบ	5	0	50	3.2%
34	ชนิดของแร็คใส่แม่แบบ			3	0	30	1.9%	
35	สปาทุลา (Spatula)			ชนิดของสปาทุลา	8	7	136	8.8%
36				ขนาดของสปาทุลา	8	7	136	8.8%
37	เครื่องแกะตัวยึด (Clip) และ กาส์เก็ต (Gasket)			สภาพใบมีดเครื่องแกะตัวยึด	3	1	38	2.5%
38				สภาพตัวจับแม่แบบของเครื่องแกะ ตัวยึดและกาส์เก็ต	3	1	38	2.5%
39	ตู้อบโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization Machine) และ ตู้เก็บงาน (Keeping Oven)			สภาพของตู้โพลิเมอร์ไรเซชัน	1	3	34	2.2%
40				สภาพของตู้เก็บงาน	1	3	34	2.2%
41	Measurement	เกณฑ์ในการตัดสีงาน	เกณฑ์การตัดสีไม่เหมาะสม	5	0	50	3.2%	
42		ความถูกต้องในการตัดสีงาน	ความถูกต้องในการตัดสีใจของ พนักงานตรวจสอบคุณภาพ	3	0	30	1.9%	
43		ความถูกต้องในการวัดซ้ำ	ความถูกต้องในการวัดซ้ำของ พนักงานตรวจสอบคุณภาพ	3	0	30	1.9%	
44	Environment	อุณหภูมิห้อง	อุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติงาน	0	3	24	1.6%	
45		ความชื้น	ความชื้นภายในห้องปฏิบัติงาน	0	2	16	1.0%	



รูปที่ 4.12 กราฟเรียงลำดับคะแนน Cause & Effect Matrix

ตารางที่ 4.9 ปัจจัยนำเข้า 15 ปัจจัยที่มีคะแนนสูงกว่า 100 คะแนน

ลำดับ	ปัจจัย	คะแนน
1	อุณหภูมิในการแกะแม่แบบ	162
2	อุณหภูมิออกจากตู้อบ	150
3	ระยะเวลาที่เก็บงานไว้ในตู้หลังการโพลีเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์	150
4	วิธีการแกะแม่แบบ	144
5	โปรไฟล์การอบงาน	140
6	ชนิดของสปาทูลา	136
7	ขนาดของสปาทูลา	136
8	เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของ KOH ในเครื่องล้างโมลด์	132
9	สภาพของแม่แบบ	126
10	ความแข็งของคลิบ	124
11	อายุของโมโนเมอร์หลังจากทำการผสม	122
12	ส่วนผสมของตัวเร่ง (Catalyst) ในการผสมโมโนเมอร์	122
13	ชนิดของกาสเก็ต	122
14	อุณหภูมิในการประกอบแม่แบบ	120
15	วิธีการประกอบ	118

ซึ่งปัจจัยทั้ง 15 ปัจจัยนี้คาดว่าจะมีความสัมพันธ์กับผลตอบ (Response) คือจำนวนตำหนิประเภทรอยขีดข่วน โดยมีรายละเอียดดังนี้

- อุณหภูมิของการแกะงานและการประกอบงานมีผลต่อการเกิดรอยขีดข่วนกับแม่แบบเนื่องจากแม่แบบทำมาจากแก้ว ซึ่งสิ่งที่มีผลโดยต่อความแข็งแรงแก้วอย่างหนึ่งคือ อุณหภูมิของแก้ว เพราะแก้วที่อุณหภูมิสูงจะมีความอ่อนตัวมากกว่าแก้วที่อุณหภูมิต่ำจึงทำให้เกิดรอยขีดข่วนได้ง่ายกว่า (Bowden and Scott, 1958) รวมทั้งอุณหภูมิที่สูงเกินไปจะทำให้แม่แบบแกะออกจากเลนส์ยาก แต่อุณหภูมิที่ต่ำเกินไปจะทำให้เกิดการดีโมลด์ได้

- วิธีการแกะและวิธีการประกอบแม่แบบ อาจมีผลต่อการเกิดรอยขีดข่วนเนื่องจากวิธีการแกะไม่เหมาะสมอาจทำให้หน้าแม่แบบเสียดสีกับหน้าเลนส์ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแกะแม่แบบที่อุณหภูมิสูงดังเช่น ในการทำงานนี้ ส่วนวิธีการประกอบนั้นหากไม่เหมาะสมอาจทำให้แม่แบบเกิดการกระแทกกันได้

- ชนิดของสปาทูลา และขนาดของสปาทูลา มีผลต่อการเกิดรอยขีดข่วนเนื่องจากมีความเกี่ยวข้องกับภาระ (Load) ที่กระทำต่อตัวแม่แบบซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความรุนแรงการเกิดรอยขีดข่วนบนผิวแก้ว (Bowden and Scott, 1958; Houerou et al., 2003)

- เปอร์เซนต์ความเข้มข้นของ KOH (ชื่อทางเคมีคือ Potassium Hydroxide) ในการล้างแม่แบบ ซึ่ง KOH มีคุณสมบัติเป็นเบส (Base) มีความเกี่ยวข้องกับความยากง่ายในการแกะแม่แบบ หรืออีกนัยหนึ่งคือเกี่ยวข้องกับความเหนียวในการยึดติดระหว่างผิวเลนส์กับหน้าแม่แบบ รวมทั้งอาจเกิดการดีโมลด์ได้ถ้าล้างแม่แบบในความเข้มข้นที่ไม่เหมาะสม

- สภาพของแม่แบบ เนื่องจากแม่แบบที่ทำการผลิตอยู่ในกระบวนการนั้นมีแม่แบบที่เกิดตำหนิระหว่างกระบวนการหล่อเลนส์แต่เป็นตำหนิที่ยอมรับได้ปนอยู่ด้วย โดยเฉพาะตำหนิประเภทรอยบิ่น (Chip) ซึ่งแม่แบบเหล่านี้จะมีความแข็งแรงน้อยกว่าแม่แบบที่ไม่มีตำหนิ อาจส่งผลให้เกิดการเกิดรอยขีดข่วนได้ ทั้งจากการเกิดการดีโมลด์ และการแตกของแม่แบบไปกระแทกแม่แบบอีกด้าน เนื่องจากแก้วจะเกิดการโค้งงอที่อุณหภูมิสูง (Uhlmann and Kreidl, 1980) แต่ในการผลิตเลนส์นี้จะแม่แบบถูกต่อต้านการโค้งงอด้วยกาสเก็ทที่ยึดขอบแม่แบบไว้ ดังนั้นแม่แบบที่ไม่แข็งแรงจะเกิดการแตกหักได้

ส่วนปัจจัย อุณหภูมิที่ออกจากตู้อบ ระยะเวลาที่เก็บงานไว้ในตู้หลังการ โพลีเมอร์ไรเซชัน สมบูรณ์ โปรไฟล์การอบงาน ความแข็งของคลิป อายุของโมโนเมอร์หลังจากทำการผสม ส่วนผสมของตัวเร่ง (Catalyst) และชนิดของกาสเก็ท ไม่ได้เป็นปัจจัยที่จะทำให้เกิดรอยขีดข่วนบนแม่แบบโดยตรง แต่เป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการดีโมลด์ (Demold) ของแม่แบบ ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการเสียดสีของแม่แบบกับผิวเลนส์ทำให้เกิดรอยขีดข่วนขึ้นได้

- อุณหภูมิออกจากตู้อบ ระยะเวลาที่เก็บงานไว้ในตู้หลังการ โพลีเมอร์ไรเซชัน สมบูรณ์ และ โปรไฟล์การอบงาน เกี่ยวข้องกับการตีโมลด์เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จะเกี่ยวข้องกับการหดและขยายตัวของแก้ว ที่อุณหภูมิสูงแก้วจะขยายตัว ส่วนที่อุณหภูมิต่ำแก้วจะ หดตัว (Uhlmann and Kreidl, 1980) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระยะเวลาที่ไม่เหมาะสมจะ ทำให้แก้วขยายหรือหดตัวอย่างรวดเร็ว ผิวหน้าของเลนส์ไม่สามารถปรับตัวได้ทัน แม่แบบและ เลนส์จึงหลุดออกจากกัน (Demold)

- ชนิดของกาสเกิด เกี่ยวข้องกับความยืดหยุ่นของกาสเกิด กาสเกิดผลิตจากการผสม กาสเกิดเท่ากับเมล็ดพลาสติกใหม่จะมีความยืดหยุ่นน้อยกว่ากาสเกิดที่ผลิตจากเมล็ดพลาสติกใหม่ ทั้งหมด โดยในการ โพลีเมอร์ไรเซชันนั้น แม่แบบแก้วจะได้รับอุณหภูมิที่สูงขึ้นซึ่งจะเกิดการ โกงงอ และขยายตัว แต่จะถูกต่อต้านโดยกาสเกิดที่ยึดไว้ที่ขอบ กาสเกิดที่มีความยืดหยุ่นมากจะยอมให้แก้ว ขยายตัวได้อย่างอิสระกว่านั่นเอง

- ความแข็งของคลิบ (Clip) เกี่ยวข้องกับแรงต้านในการขยายตัวของแม่แบบหลัง ได้รับความร้อน หากคลิบที่ยึดแม่แบบหลวม ประกอบกับกาสเกิดที่ยืดหยุ่นน้อยจะทำให้แม่แบบไม่ สามารถขยายตัวจะทำให้แม่แบบไม่สามารถขยายตัวออกทางขอบได้แต่สามารถโก่งตัวออกได้อย่าง อิสระอาจทำให้เกิดการตีโมลด์ได้ แต่หากคลิบแน่นมากเกินไปและกาสเกิดยืดหยุ่นน้อย แม่แบบจะถูก ต้านทานการขยายตัวจากทุกด้าน ทำให้แม่แบบแตกได้

- อายุของโมโนเมอร์หลังจากทำการผสม โมโนเมอร์ที่ทำการผสมไว้เวลานานจะมี ความหนืดมากขึ้นเนื่องจาก โมโนเมอร์เกิดพันธะระหว่างกันก่อนการ โพลีเมอร์ไรเซชันในตู้อบ ซึ่ง เมื่อนำไปอบในตู้จะเกิดการตีโมลด์ได้เช่นกัน

- ส่วนผสมของตัวเร่ง (Catalyst) ในการผสมโมโนเมอร์ ปริมาณของตัวเร่งนี้มีผลต่อ การตีโมลด์ เนื่องจากตัวเร่งเป็นตัวที่เร่งให้โมโนเมอร์เกิดพันธะระหว่างกันหากผสมในปริมาณที่ มากเกินไปอาจเกิดปฏิกิริยาระหว่างกันก่อนการก่อนการ โพลีเมอร์ไรเซชันในตู้อบ หรือหากผสมใน ปริมาณที่น้อยเกินไปอาจจะทำให้การ โพลีเมอร์ไรเซชันในตู้อบตามเวลาที่ตั้งไว้ไม่สมบูรณ์ได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4.3 การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode & Effects Analysis)

หลังจากที่ทำการวิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยนำเข้าที่อาจมีผล (KPIV) โดยใช้ตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause & Effect Matrix) ทำให้ได้ซึ่งปัจจัยทั้งหมด 15 ปัจจัยที่คาดว่าจะมีความสัมพันธ์กับผลตอบ (Response) คือจำนวนตำหนิประเภทรอยขีดข่วน จากนั้นจึงนำปัจจัยเหล่านี้มาวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA) เพื่อกลับกรองให้เหลือแต่ปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ ก่อนจะนำไปทดลองในขั้นตอนถัดไป โดยขั้นตอนในการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA) มีดังนี้

1. ทำการระดมความคิดจากกลุ่มสมาชิก ซึ่งเป็นกลุ่มเดียวกับที่ทำการวิเคราะห์ตารางความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause & Effect Matrix) โดยนำปัจจัยปัจจัยนำเข้าที่อาจมีผล (KPIV) ต่อการเกิดรอยขีดข่วนบนแม่แบบที่ได้จากตารางความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล ทั้ง 15 ปัจจัย มาทำการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA)

2. ระดมความคิดในการแจกแจง การเกิดความเสียหายหรือข้อบกพร่อง (Potential Failure Mode) ทั้ง 15 ปัจจัย ที่อาจมีผลกระทบต่อรอยขีดข่วนบนแม่แบบ รวมทั้งผลกระทบที่เกิดความเสียหายนั้น (Potential Failure Effects) ซึ่งก็คือผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นได้ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์หรือแม่แบบเมื่อเกิดความเสียหายขึ้นกับกระบวนการผลิตนั้นๆ จากนั้นให้คะแนนความร้ายแรง (Severity Score: S) ซึ่งเป็นการประเมินความร้ายแรงที่เกิดขึ้นของผลกระทบในแต่ละความเสียหาย (Potential Failure Mod) ที่มีต่อการเกิดของเสียประเภทรอยขีดข่วนบนแม่แบบ ซึ่งมาจากการประเมินผลจากข้อมูลที่มีอยู่

การประเมินคะแนนของความร้ายแรงของแต่ละผลกระทบดังกล่าวอยู่ในช่วงคะแนน 1 ถึง 10 คะแนนที่มีค่ามากจะบอกถึงลักษณะของผลกระทบที่มีความรุนแรงมากตามลำดับคะแนน เกณฑ์การสร้างช่วงคะแนนความร้ายแรง ได้กำหนดโดยประยุกต์ให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์และลักษณะปัญหาที่ทำการศึกษา

3. วิเคราะห์สาเหตุที่เป็นไปได้ของแต่ละความเสียหาย (Potential Causes) ที่เป็นที่มาของการเกิดรอยขีดข่วนบนแม่แบบ และให้คะแนนความถี่ในการเกิด (Occurrence Score: O) ซึ่งเป็นการคาดคะเนความน่าจะเป็นที่สาเหตุของปัญหาที่ระบุเกิดขึ้น ในที่นี้มาจากข้อมูลที่เป็นจริงที่ทำการเก็บสถิติไว้ในแต่ละกระบวนการนั่นเอง โดยช่วงของคะแนนความถี่นี้เป็นช่วงของตัวเลขที่เหมือนกับการสร้างช่วงคะแนนของความร้ายแรงคือ 1 ถึง 10

4. พิจารณาระบบการตรวจจับในปัจจุบัน (Current Control) เป็นการอธิบายการควบคุมที่สามารถจะป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหาย หรือเป็นการตรวจจับการเกิดขึ้นของความเสียหาย เพื่อที่จะพิจารณาหรือกำจัดสาเหตุของความเสียหายนั้น จากนั้นให้คะแนนการตรวจจับ (Detection

Score: D) ซึ่งเป็นการประเมินคะแนนของความสามารถของระบบการควบคุมที่ใช้ในปัจจุบันในการตรวจจับข้อบกพร่องต่างๆที่เกิดขึ้นก่อนที่ผลิตภัณฑ์จะออกจากกระบวนการผลิต ช่วงคะแนนของการตรวจจับอยู่ระหว่าง 1 ถึง 10 เช่นกัน

5. ทำการคำนวณค่า RPN (Risk Priority Number) ซึ่งได้มาจากผลคูณค่าคะแนนที่ได้ 3 ตัว ในแต่ละแถวของตาราง ดังสมการ $RPN = S \times O \times D$

หมายเหตุ เกณฑ์การให้คะแนนของทั้ง 3 ค่า คือ คะแนนระดับความรุนแรง คะแนนความถี่ และคะแนนระดับความสามารถในการตรวจจับปัญหา แสดงในภาคผนวก ก เป็นเกณฑ์การให้คะแนนที่ได้ทำการอ้างอิงมาจากตัวอย่างเกณฑ์การให้คะแนนของ AIAG (2001) ซึ่งเป็นเกณฑ์ที่ใช้สำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ ดังนั้นในการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมที่แตกต่างออกไปจึงได้ทำการปรับเกณฑ์ให้เหมาะสมกับลักษณะของอุตสาหกรรม รวมทั้งปริมาณของเสียที่พบในปัจจุบันด้วย ซึ่งการปรับเกณฑ์นี้ได้กระทำโดยการระดมสมองจากคณะทำงานของโครงการซึ่งมีประสบการณ์ความรู้ และความชำนาญเกี่ยวกับกระบวนการหล่อเลนส์ เพื่อให้ได้เกณฑ์การให้คะแนนที่เหมาะสมกับสภาพปัญหาที่พบและสามารถนำมาใช้งานจริงได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode & Effects Analysis)

No.	Key Process Input	Potential Failure Mode	Potential Failure Effects	SEV	Potential Causes	OCC	Current Controls	DET	RPN	Actions Recommended
1.	อุณหภูมิในการแกะแม่แบบ	อุณหภูมิในการแกะแม่แบบสูงหรือต่ำเกินไป	แม่แบบแกะยากหรือ เกิดการดีโม่ลด์ (Demold)	8	ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการแกะงาน	7	ไม่มีเอกสารควบคุมอุณหภูมิในการแกะงานและไม่มีมาตรฐานการตรวจสอบ แต่ควบคุมอุณหภูมิที่ผู้ปฏิบัติงานก่อนแกะ	6	336	ทำการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิในการแกะงานที่เหมาะสม พร้อมทำเอกสารเพื่อควบคุมอุณหภูมิในการแกะ
2.	อุณหภูมิออกจากตู้อบ	อุณหภูมิกออกจากตู้อบต่ำเกินไป	เกิดการดีโม่ลด์ (Demold)	8	ไม่มีการควบคุมและกำหนดมาตรฐานของอุณหภูมิที่จะนำงานออกจากตู้อบ	8	ไม่มีเอกสารควบคุมอุณหภูมิกออกจากตู้อบและไม่มีมาตรฐานการตรวจสอบ	8	512	ทำการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิในการออกจากตู้อบที่เหมาะสม พร้อมทำเอกสารเพื่อควบคุม
3.	ระยะเวลาที่เก็บงานไว้ในตู้หลังการโพลีเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์	ระยะเวลาในการเก็บงานในตู้สั้นหรือมากเกินไป	เกิดการดีโม่ลด์ (Demold)	8	ไม่มีการควบคุมและกำหนดมาตรฐานของระยะเวลาการเก็บงานในตู้อบ	6	ไม่มีเอกสารควบคุมระยะเวลาในการเก็บงานในตู้อบและไม่มีมาตรฐานการตรวจสอบ	8	384	ทำการทดลองเพื่อหาเก็บงานในตู้อบที่เหมาะสม พร้อมทำเอกสารเพื่อควบคุม

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode & Effects Analysis) (ต่อ)

No.	Key Process Input	Potential Failure Mode	Potential Failure Effects	SEV	Potential Causes	OCC	Current Controls	DET	RPN	Actions Recommended
4.	วิธีการแกะแม่แบบ	วิธีการแกะแม่แบบไม่เหมาะสม	เกิดการเสียดสีระหว่างแม่แบบและเลนส์	10	วิธีการแกะงานไม่เหมาะสม แกะงานผิดวิธี	6	มีมาตรฐานการทำงานแต่ไม่ละเอียดเพียงพอ	6	360	ออกแบบและทดลองหาวิธีการแกะงานที่เหมาะสม พร้อมทำเป็นมาตรฐาน
5.	โปรไฟล์การอบงาน	โปรไฟล์การอบงานไม่เหมาะสมกับชนิดของโมโนเมอร์	เกิดการดีโม่ (Demold)	8	ใช้โปรไฟล์การอบงานไม่ตรงชนิดของโมโนเมอร์	4	มีมาตรฐานการทำงานและเอกสารควบคุม	1	32	
6.	ชนิดของสปาทุลา	ชนิดของสปาทุลาไม่เหมาะสมกับการแกะแม่แบบ	เกิดการเสียดสีระหว่างแม่แบบและเลนส์ เกิดรอยขีดข่วน	10	ใช้ชนิดของสปาทุลาไม่เหมาะสมกับการแกะงาน	5	มีมาตรฐานการทำงานแต่ไม่มีเอกสารควบคุม	5	250	ทดลองหาชนิดของสปาทุลาที่เหมาะสมกับการแกะงาน พร้อมทำเป็นมาตรฐาน
7.	ขนาดของสปาทุลา	ขนาดของสปาทุลาใหญ่หรือเล็กเกินไป	เกิดการเสียดสีระหว่างแม่แบบและเลนส์	10	ใช้ขนาดสปาทุลาไม่เหมาะสมกับความหนาเลนส์	5	มีมาตรฐานการทำงานและเอกสารควบคุม	1	50	

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode & Effects Analysis) (ต่อ)

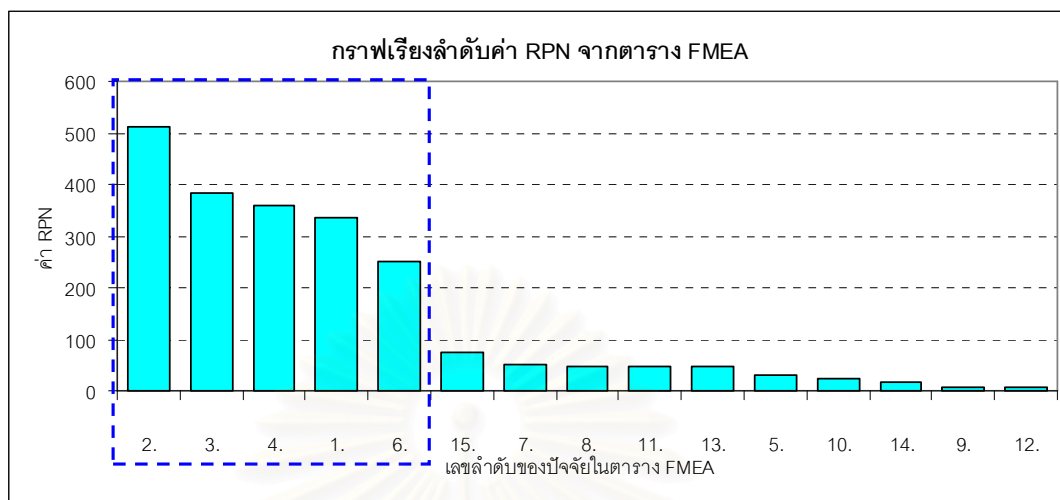
No.	Key Process Input	Potential Failure Mode	Potential Failure Effects	SEV	Potential Causes	OCC	Current Controls	DET	RPN	Actions Recommended
8.	เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของ KOH ในเครื่องล้างโมลด์	เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของ KOH น้อยหรือมากเกินไป	แม่แบบแกะออกจากเลนส์ยาก หรือ ง่ายเกินไป	6	ไม่ตรวจสอบเปอร์เซ็นต์ของ KOH ในถังเครื่องล้างตามมาตรฐาน	4	มีมาตรฐานการตรวจสอบทุกกะการทำงาน	2	48	จัดทำเอกสารเพื่อควบคุมการวัดเปอร์เซ็นต์ของ KOH
9.	สภาพของแม่แบบ	สภาพของแม่แบบไม่เหมาะกับการหล่อเลนส์ เช่น เกิดรอยบิ่นเกินขนาด	เกิดการดีโมลด์ หรือ แม่แบบแตกกระเทกกัน	8	ไม่ตรวจสอบสภาพของแม่แบบก่อนทำการประกอบ	1	มีการตรวจสอบสภาพหรือตำหนิของแม่แบบก่อนการประกอบโดยพนักงานตรวจสอบแม่แบบ	1	8	
10.	ความแข็งของคลิป์	คลิป์แข็งหรือ หลวมเกินไป	แม่แบบแตกหรือเกิดการดีโมลด์ (Demold)	8	ไม่ตรวจสอบความแข็งของคลิป์ก่อนทำการประกอบ	1	มีการตรวจสอบความแข็งของคลิป์อาทิตย์ละครั้ง แต่ไม่มีเอกสารควบคุม	3	24	
11.	อายุของโมโนเมอร์หลังจากทำการผสม	โมโนเมอร์ถูกผสมไว้นานเกินไป	เกิดการดีโมลด์ (Demold)	8	ใช้โมโนเมอร์ที่ถูกผสมไว้นาน	3	มีมาตรฐานการทำงาน และมีเอกสารควบคุม	2	48	

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode & Effects Analysis) (ต่อ)

No.	Key Process Input	Potential Failure Mode	Potential Failure Effects	SEV	Potential Causes	OCC	Current Controls	DET	RPN	Actions Recommended
12.	ส่วนผสมของตัวเร่ง (Catalyst) ในการผสมโมโนเมอร์	ตัวเร่งมีปริมาณมากหรือน้อยเกินไป	เกิดการดีโม่ลด์ (Demold) หรือเกิดการโพลีเมอไรเซชัน ไม่สมบูรณ์	8	ปริมาณของตัวเร่งที่ผสมไม่เป็นไปตามมาตรฐาน	1	มีมาตรฐานการทำงาน และมีเอกสารควบคุม	1	8	
13.	ชนิดของกาสเก็ท	กาสเก็ทยึดหยุ่นน้อยเกินไป	เกิดการดีโม่ลด์ (Demold)	8	ใช้ชนิดของกาสเก็ทไม่เหมาะสมกับชนิดของเลนส์และโมโนเมอร์	3	มีมาตรฐานการทำงาน และมีเอกสารควบคุม	2	48	
14.	อุณหภูมิในการประกอบแม่แบบ	อุณหภูมิแม่แบบสูงเกินไป	เกิดการยัดเขว่นได้ง่าย	3	ไม่ตรวจสอบอุณหภูมิแม่แบบก่อนการประกอบ	2	มีมาตรฐานการทำงาน และตรวจสอบก่อนการประกอบ	3	18	
15.	วิธีการประกอบ	วิธีการประกอบแม่แบบไม่เหมาะสม	แม่แบบเกิดการกระแทกกัน	3	วิธีการประกอบไม่เหมาะสม ประกอบผิดวิธี	5	มีมาตรฐานการทำงาน และเอกสารควบคุม	5	75	

ตารางที่ 4.11 ตารางแสดงสาเหตุของปัญหาและค่า RPN

ลำดับ	Key Process Input	RPN
1	อุณหภูมิออกจากตู้อบ	512
2	ระยะเวลาที่เก็บงานไว้ในตู้หลังการโพลีเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์	384
3	วิธีการแกะแม่แบบ	360
4	อุณหภูมิในการแกะแม่แบบ	336
5	ชนิดของสปาทูลา	250
6	วิธีการประกอบ	75
7	ขนาดของสปาทูลา	50
8	เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของ KOH ในเครื่องล้าง โมลด์	48
9	อายุของโมโนเมอร์หลังจากทำการผสม	48
10	ชนิดของกาสเก็ต	48
11	โปรไฟล์การอบงาน	32
12	ความแข็งของคลิป	24
13	อุณหภูมิในการประกอบแม่แบบ	18
14	สภาพของแม่แบบ	8
15	ส่วนผสมของตัวเร่ง (Catalyst) ในการผสมโมโนเมอร์	8



รูปที่ 4.13 กราฟเรียงลำดับค่า RPN จาก FMEA

จากการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode & Effects Analysis) และทำการจัดเรียงลำดับลักษณะความเสียหาย (Potential Failure Mode) หรือปัจจัย ตามคะแนน RPN ที่ได้ จากมากไปน้อย โดยใช้กราฟแท่งเข้ามาช่วยในการพิจารณา ดังรูปที่ 4.13 พบว่าปัจจัย 5 ลำดับแรกซึ่งมีคะแนนมากกว่า 250 คะแนน มีคะแนนรวมเท่ากับ 1,842 คะแนน จากคะแนนรวมทั้งหมด 2,201 คะแนน ซึ่งคิดเป็น 83.7 เปอร์เซ็นต์ของคะแนนทั้งหมด ดังนั้นจึงได้เลือกเป็นปัจจัยนำเข้า (KPIVs) ที่จะนำไปวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป ดังแสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ตารางแสดงสาเหตุของปัญหาและค่า RPN ของปัจจัยที่เลือกทั้ง 5 ลำดับ

ลำดับที่	Key Process Input	RPN
1	อุณหภูมิออกจากตู้อบ	512
2	ระยะเวลาที่เก็บงานไว้ในตู้หลังการโพลีเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์	384
3	วิธีการแกะแม่แบบ	360
4	อุณหภูมิในการแกะแม่แบบ	336
5	ชนิดของสปาทุลา	250

4.5 สรุประยะเวลาการวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา

- ในขั้นตอนแรกของการวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา ได้ทำการวิเคราะห์ระบบการวัดแบบข้อมูลตามลักษณะ (Attribute Agreement Analysis) โดยทดสอบพนักงานตรวจสอบแม่แบบ 3 คน แบ่งเป็นการวิเคราะห์ระบบการตรวจสอบแม่แบบประเภทคำนิยามทั่วไป และการวิเคราะห์เฉพาะคำนิยามประเภทรอยขีดข่วน เนื่องจากเป็นคำนิยามที่ทำการศึกษาและยังมีเปอร์เซ็นต์มากถึง 80.2% ของแม่แบบเสียทั้งหมด ผลจากการวิเคราะห์พบว่าค่า เปอร์เซ็นต์ความสามารถในการวัดซ้ำของพนักงานตรวจสอบ เปอร์เซ็นต์ความไว้อัสของพนักงานตรวจสอบ เปอร์เซ็นต์ประสิทธิผลด้านความสามารถในการวัดซ้ำของการตรวจสอบ และเปอร์เซ็นต์ประสิทธิผลด้านไว้อัสของการตรวจสอบ ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดในการทดสอบครั้งแรกในการวิเคราะห์ทั้งสองแบบ (เกณฑ์การยอมรับของระบบการวัดของทั้ง 4 ค่า คือ 100%) ดังนั้นจึงทำการอบรมพนักงานตรวจสอบใหม่ทั้งหมด และทำการทดสอบอีกครั้งได้ผลการทดสอบว่าความสามารถของกระบวนการวัดแบบข้อมูลตามลักษณะของทดสอบครั้งที่ 2 ผ่านเกณฑ์การทดสอบ เนื่องจากพนักงานตรวจสอบทุกคนสามารถตัดสินแม่แบบได้ถูกต้องทุกตัว

- จากนั้นจึงศึกษาความสามารถของกระบวนการ และทำการเก็บข้อมูลลักษณะรอยขีดข่วนประเภทขีดข่วนเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์หาสาเหตุของการเกิดต่อไป พบว่า 72% ของงานเสียประเภทรอยขีดข่วน มีลักษณะเป็นรอยขีดข่วนยาว ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งอาจเกิดจากการเสียดสีระหว่างเลนส์และแม่แบบ

- ทำการระดมสมองสมาชิกในทีมเพื่อหาสาเหตุที่เป็นไปได้ของการเกิดรอยขีดข่วนบนแม่แบบ โดยใช้ผังก้างปลาหรือผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) พบว่าสาเหตุที่สำคัญอย่างหนึ่งเกิดจากการเกิดการดีโม่ (Demold) คือแม่แบบหลุดออกจากเลนส์ก่อนการแกะ ทำให้แม่แบบเกิดการเสียดสีกับเลนส์เกิดรอยขีดข่วนขึ้น จึงได้ทำการระดมสมองเพื่อหาสาเหตุของการเกิดการดีโม่ (Demold) ด้วย จากนั้นนำปัจจัยต่างๆที่ได้มาทำการวิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยนำเข้าที่อาจมีผล (KPIV) โดยใช้ตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause & Effect Matrix) ผลจากการให้คะแนนพบว่า มี 15 ปัจจัยมีคะแนนสูง (สูงกว่า 100 คะแนน) จึงได้นำปัจจัยเหล่านี้ไปทำการวิเคราะห์หลักขงข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode & Effects Analysis) ต่อไป ได้ปัจจัยที่มีค่าคะแนน RPN ที่มีค่าสูงจำนวน 5 ปัจจัยเพื่อนำไปทดสอบและวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป คือ อุณหภูมิออกจากตู้โพลีเมอร์ไรเซชัน ระยะเวลาที่เก็บงานไว้ในตู้หลังการโพลีเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์ วิธีการแกะแม่แบบออกจากเลนส์ อุณหภูมิในการแกะแม่แบบ และชนิดของสปาทุลา (Spatula) ที่ใช้ในการแกะแม่แบบ

บทที่ 5

ระยะการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analysis Phase)

5.1 บทนำ

ในขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา โดยการทดลองเพื่อวิเคราะห์และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย รวมทั้งแนวโน้มอิทธิพลของปัจจัยนำเข้าที่ทำการคัดเลือกมาจากขั้นตอนก่อนหน้า ต่อตัวแปรตอบสนองหรือสัดส่วนแม่แบบเสียจากการเกิดตำหนิประเภทรอยขีดข่วน เพื่อคัดเลือกปัจจัยและกำหนดแนวทางในการปรับปรุงต่อไป

หลังจากทำการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode & Effect Analysis หรือ FMEA) ในขั้นต้นก่อนหน้า ทำให้ได้ปัจจัยนำเข้าที่สำคัญในการนำไปทดสอบและวิเคราะห์ในขั้นต่อไป เพื่อลดแม่แบบเสียเนื่องจากการเกิดตำหนิประเภทรอยขีดข่วน ทั้งหมด 5 ปัจจัยคือ

- อุณหภูมิออกจากตู้โพลีเมอร์ไรเซชัน
- ระยะเวลาที่เก็บงานไว้ในตู้หลังการโพลีเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์
- วิธีการแกะแม่แบบออกจากเลนส์
- อุณหภูมิในการแกะแม่แบบ
- ชนิดของสปาทุลา (Spatula) ที่ใช้ในการแกะแม่แบบ

5.2 การเลือกรูปแบบในการทดลอง

เนื่องจากแม่แบบมีราคาสูง และสัดส่วนของแม่แบบเสียในการผลิตปัจจุบันของโรงงาน กรณีศึกษาที่มีค่าที่ค่อนข้างต่ำ การที่ตัวแปรตอบสนองเป็นสัดส่วนของเสียนี้ เพื่อให้สามารถตรวจจับความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในการทดลองได้ จำเป็นต้องใช้ขนาดตัวอย่างในการทดลองมากตามไปด้วย ดังนั้นขนาดตัวอย่างจึงเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงอย่างมากในการทำการทดลองนี้ ผู้วิจัยจึงได้ทำการประมาณค่าและเปรียบเทียบขนาดตัวอย่างเพื่อเป็นข้อมูลในการตัดสินใจเลือกชนิดของการทดลอง โดยจะทำการเลือกการทดลองที่ประหยัดขนาดตัวอย่างและให้ข้อมูลในการวิเคราะห์มากที่สุด ทั้งนี้เพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาในการทดลอง

5.2.1 การทดสอบที่นำมาพิจารณา

5.2.1.1 การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Test) แบบ Two Proportions เพื่อทำการตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญต่อผลตอบหรือการเกิดรอยขีดข่วนบนแม่แบบออกไป ก่อนที่จะทำการทดลองเพื่อปรับปรุงในขั้นต่อไป

5.2.1.2 ทำการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) โดยเลือกทำการออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบมีจุดศูนย์กลางสำหรับปัจจัยที่เป็นปัจจัยแบบแปรผัน (Variable Factor) (2_v^{-1}) การใช้การออกแบบการทดลองนี้ นอกจากทำให้สามารถทราบถึงอิทธิพลหลัก (Main Effect) และอิทธิพลร่วม (Interaction) ระหว่างปัจจัย ยังทำให้ทราบถึงการมีความโค้งของผลตอบ (Curvature) ของปัจจัยที่เป็นปัจจัยแปรผันด้วย ยิ่งไปกว่านั้นการออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลนี้สามารถทำการฉายการออกแบบ (Projection) ให้อยู่ในรูปการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบบริบูรณ์ที่มีเรพลิเคตได้โดยการตัดปัจจัยที่สามารถละเลยได้ทิ้ง และยังสามารถทำการทดลองต่อเนื่องไปสู่การทดลองที่ใหญ่ขึ้น โดยการรวมผลการทดลองที่เพิ่มขึ้นมาเข้าด้วยกันเพื่อให้สามารถประมาณผลของปัจจัยหรืออันตรกิริยาที่สนใจได้ดียิ่งขึ้น

5.2.2 การเปรียบเทียบขนาดตัวอย่างในการทดสอบ

5.2.2.1 การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Test)

การหาขนาดตัวอย่างสำหรับการทดสอบสมมติฐานแบบ Two Proportions สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5.1

$$n = \frac{(z_{1-\alpha/2} \sqrt{2pq} + z_{1-\beta} \sqrt{p_1q_1 + p_0q_0})^2}{(p_1 - p_0)^2} \quad (5.1)$$

หรือสามารถคำนวณได้จากโปรแกรม Minitab ดังรายละเอียดต่อไปนี้

Stat > Power and Sample Size > 2 Proportions

Proportion 1 Values: 0.0025

Proportion 2: 0.0015

Power Values: 0.9

Significance level: 0.05

เนื่องจากงานวิจัยนี้ ไม่มีข้อมูลของแม่แบบเสียที่แต่ละระดับของแต่ละปัจจัย จึงใช้ตัวเลขของสัดส่วนของเสียโดยรวมในปัจจุบันแทน Proportion 1 คือ 0.0025 และใช้ค่าของสัดส่วนของเสียที่ต้องการลดลงได้เป็นอย่างน้อย (Target) แทนค่า Proportion 2 คือ 0.0015 ที่ค่ากำลัง (Power) ที่ 0.9 และระดับนัยสำคัญ (Alpha) เท่ากับ 0.05 ผลการคำนวณขนาดตัวอย่างจากโปรแกรม Minitab ได้ผลดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ผลการคำนวณขนาดตัวอย่างของการทดสอบสมมติฐาน

แบบ Two Proportions โดยโปรแกรม Minitab

Power and Sample Size			
Test for Two Proportions			
Testing proportion 1 = proportion 2 (versus not =)			
Calculating power for proportion 2 = 0.0015			
Alpha = 0.05			
Proportion 1	Sample Size	Target Power	Actual Power
0.0025	41944	0.90	0.900003

จากการคำนวณสามารถสรุปได้ว่าขนาดตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองที่กำลังของการทดสอบ (Power of Test) เท่ากับ 0.9 และระดับความเชื่อมั่น 95% อย่างน้อยต้องใช้ขนาดตัวอย่างเท่ากับ 41,944 ตัว และเมื่อคำนวณขนาดตัวอย่างที่ต้องใช้ทั้งหมดในการทำการทดสอบสมมติฐานนี้จะได้ 419,440 ตัว (ปัจจัยจำนวน 5 ปัจจัย จะต้องใช้การทดลองทั้งหมด 10 การทดลองเนื่องจากทำการทดลอง 2 ระดับเปรียบเทียบกันในแต่ละปัจจัย)

5.2.2.2 การออกแบบการทดลอง (DOE)

การออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล แบบมีจุดศูนย์กลางสำหรับปัจจัยที่เป็นปัจจัยแบบแปรผัน สามารถคำนวณขนาดตัวอย่างได้จากสมการที่ 2.18 และที่ 2.19 ที่นำเสนอโดย Bisgaard และ Fuller (1995) ซึ่งเป็นสมการในการหาขนาดตัวอย่างสำหรับการทดลองเชิงแฟกทอเรียล ในกรณีที่ตัวแปรตอบสนองเป็นข้อมูลประเภทสัดส่วนของเสีย และการทดลองมีเงื่อนไขของการผลิต (Process Condition) ในปัจจุบันอยู่ที่กึ่งกลางของช่วงการออกแบบ

สำหรับงานวิจัยนี้พบว่าการคำนวณขนาดตัวอย่างขั้นต่ำที่ต้องใช้ในแต่ละการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

$$p_0 = 0.0025$$

$$\Delta = 0.0010 \text{ (จากเป้าหมายที่ต้องการลดสัดส่วนของเสียจาก 0.0025 เป็น 0.0015)}$$

$$N = 20 \text{ การทดลอง}$$

$$\alpha = 5\% \text{ จะได้ } z_{1-\alpha/2} = 1.96 \text{ และ } \beta = 10\% \text{ จะได้ } z_{1-\beta} = 1.282$$

จากสมการที่ 2.19 จะได้

$$\delta = \arcsin(\sqrt{0.0025 + 0.001/2}) - \arcsin(\sqrt{0.0025 - 0.001/2})$$

$$\delta = 0.010063$$

จากสมการที่ 2.18 จะได้

$$n = (1.96 + 1.282)^2 / (20(0.010063)^2)$$

$$n = 5190 \quad \text{ตัว}$$

พบว่าขนาดตัวอย่างที่ใช้ในแต่ละการทดสอบ (Run) ของการออกแบบการทดลองที่กำลังของการทดสอบ (Power of Test) เท่ากับ 0.9 และระดับความเชื่อมั่น 95% อย่างน้อยต้องมีค่าเท่ากับ 5,190 ตัว ดังนั้นขนาดตัวอย่างที่ต้องการทั้งหมดในการออกแบบทดลองที่มีจำนวนการทดลองทั้งหมด 20 การทดลอง (N) จะต้องใช้แม่แบบอย่างน้อย 103,800 ตัว

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบขนาดตัวอย่างระหว่างการทดสอบสมมติฐานและการออกแบบการทดลอง

ชนิดของการทดลอง		จำนวนการทดลอง (N)	ขนาดตัวอย่าง ต่อ 1 การทดลอง (n)	ขนาดตัวอย่าง ที่ต้องใช้ทั้งหมด (n x N)
การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Test)	Two Proportion	10	41,944	419,440
การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)	Half Fractional Factorial Design with Center Point	20	5,190	103,800

จากการเปรียบเทียบขนาดตัวอย่างของการทดลองทั้งสองดังตารางที่ 5.2 พบว่าขนาดตัวอย่างที่ใช้ในการทำการทดสอบโดยการออกแบบการทดลอง มีจำนวนน้อยกว่าการทดสอบสมมติฐานถึงประมาณ 4 เท่า ทำให้ประหยัดเวลาและทรัพยากรในการทดลอง นอกจากนี้การทดสอบโดยการออกแบบการทดลองยังสามารถสรุปผลการทดลองได้ครอบคลุมมากกว่า เนื่องจากสามารถพิจารณาในส่วนของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยในการทดลอง และความสัมพันธ์ (Curvature) ของปัจจัยแปรผันด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกทำการทดสอบโดยการออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล แบบมีจุดศูนย์กลางสำหรับปัจจัยที่เป็นปัจจัยแบบแปรผัน ในการวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อสัดส่วนของเสีย

5.3 การกำหนดระดับของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ

จากปัจจัยนำเข้าที่สำคัญจำนวน 5 ปัจจัย คือ อุณหภูมิออกจากตู้โพลิเมอร์ไรเซชัน, ระยะเวลาที่เก็บงานไว้ในตู้หลังการโพลิเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์, วิธีการแกะแม่แบบออกจากเลนส์, อุณหภูมิในการแกะแม่แบบ และชนิดของสปาหูลา (Spatula) ที่ใช้ในการแกะแม่แบบ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะถูกนำมาศึกษาเพื่อหาผลกระทบต่อการเกิดแม่แบบเสียเนื่องจากคำนิบัติประเทรรอยขีดข่วน โดยการออกแบบการทดลอง (DOE) เศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลแบบเพิ่มจุดศูนย์กลางสำหรับปัจจัยที่เป็นปัจจัยแบบแปรผัน (Variable Factor)

การกำหนดระดับการทดลองของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ จะกำหนดตามข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์หรือช่วงของการใช้งานที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน โดยแต่ละปัจจัยแบ่งเป็น 2 ระดับ คือ ระดับต่ำ (-1) และระดับสูง (+1) สำหรับปัจจัยแปรผัน (Variable Factor) จะมีการทดสอบที่จุดศูนย์กลาง (Center Point) ด้วย ระดับของแต่ละปัจจัยในการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ปัจจัยและระดับของปัจจัยในการทำการทดลอง

สัญลักษณ์ของปัจจัย	คำอธิบาย	ชนิดของปัจจัย	ระดับต่ำ (-1)	จุดศูนย์กลาง	ระดับสูง (+1)
A	อุณหภูมิออกจากตู้โพลิเมอร์ไรเซชัน	ปัจจัยแปรผัน	80 °C	105 °C	130 °C
B	ระยะเวลาที่เก็บงานไว้ในตู้หลังการโพลิเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์	ปัจจัยแปรผัน	2 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง
C	วิธีการแกะแม่แบบออกจากเลนส์	ปัจจัยคุณลักษณะ	วิธีที่ 1	-	วิธีที่ 2
D	อุณหภูมิในการแกะแม่แบบ	ปัจจัยแปรผัน	90 °C	100 °C	110 °C
E	ชนิดของสปาหูลา	ปัจจัยคุณลักษณะ	ชนิดงัด	-	ชนิดรูด

ในการเลือกระดับในการทดลองของแต่ละปัจจัย มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- อุณหภูมิออกจากตู้โพลิเมอร์ไรเซชัน

อุณหภูมิที่แม่แบบออกจากตู้โพลิเมอร์ไรเซชัน เป็นปัจจัยที่อาจส่งผลให้แม่แบบเกิดการดีโม่ลด์ (Demold) ได้ เนื่องจากอุณหภูมิของแม่แบบซึ่งเป็นวัสดุที่ทำจากแก้วนี้จะทำให้แม่แบบมีการหดและขยายตัว โดยที่อุณหภูมิสูงแก้วจะมีการขยายตัว ส่วนที่อุณหภูมิต่ำแก้วจะหดตัว (Uhlmann and Kreidl, 1980) ดังนั้นการกำหนดอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมจะทำให้แก้วขยายหรือหด

ตัวอย่างรวดเร็ว ผิวหน้าของเลนส์ไม่สามารถปรับตัวได้ทัน แม่แบบและเลนส์จึงหลุดออกจากกัน ก่อนกระบวนการแกะได้ ส่งผลให้เกิดการเสียดสีระหว่างแม่แบบกับเลนส์และเกิดรอยขีดข่วนได้

อุณหภูมิในการ โพลีเมอร์ไรเซชันนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารตั้งต้น (Initiator) ที่มีความแตกต่างกันโดยธรรมชาติ ซึ่งจะส่งผลกับอุณหภูมิในการ โพลีเมอร์ไรเซชันทั้งอุณหภูมิเริ่มต้น และอุณหภูมิสุดท้าย (Dial, 1995) สารตั้งต้นในที่นี้คือโมโนเมอร์ โดยโมโนเมอร์ที่ใช้ผลิตในโรงงานกรณีศึกษา มีอยู่หลายประเภทแตกต่างกันตามชนิดของเลนส์ เลนส์ต่างชนิดกันอุณหภูมิที่ใช้ในการ โพลีเมอร์ไรเซชันรวมทั้งอุณหภูมิสุดท้ายจึงแตกต่างกันไปด้วย และเพื่อไม่ให้กระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในส่วนอื่นๆ เช่น เลนส์เหลือง เกิดรอยร้าวบนเลนส์ หรือแม่แบบแตก เป็นต้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการเลือกระดับของปัจจัยให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ทำการผลิตของผลิตภัณฑ์ 1.6FSV ในปัจจุบัน ซึ่งในการอบงานในตู้โพลีเมอร์ไรเซชันนั้นจะต้องทำการอบให้ครบรอบ (Cycle) ของการทำงานของตู้ก่อน เพื่อให้โมโนเมอร์เกิดการแข็งตัวกลายเป็นเลนส์อย่างสมบูรณ์ โดยทำการทิ้งงานไว้ในตู้อย่างน้อย 2 ชั่วโมงหลังการ โพลีเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์ ทำให้เลนส์แข็งตัวเต็มที่และสามารถแกะออกจากแม่แบบได้ง่าย สำหรับผลิตภัณฑ์ 1.6FSV อุณหภูมิสูงสุดหลังการ โพลีเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์คือ 130 องศาเซลเซียส จากนั้นอุณหภูมิจะลดลงเรื่อยๆจนกระทั่งถึง 80 องศาเซลเซียสก็จะคงระดับอุณหภูมิเช่นนี้ไปเรื่อยๆ เรียกอุณหภูมินี้ว่าอุณหภูมิเก็บรักษางาน (Holding Temperature) ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองจึงได้แก่ อุณหภูมิต่ำที่สุดที่ตู้อบคงไว้หลังการ โพลีเมอร์ไรเซชัน คือ 80 องศาเซลเซียส เป็นระดับต่ำ (-1) และอุณหภูมิหลังการ โพลีเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์ที่ 130 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงที่สุดที่สามารถนำเอาแม่แบบออกจากตู้ได้ เป็นระดับสูง (+1) นอกจากนี้พบว่าปัจจัยนี้เป็นปัจจัยชนิดแปรผัน จึงได้ทำการทดลองโดยเพิ่มจุดศูนย์กลางเข้าไปด้วย ที่ 105 องศาเซลเซียส เพื่อทดสอบการมีความโค้งของผลตอบ (Curvature) ของปัจจัย

- ระยะเวลาที่เก็บงานไว้ในตู้หลังการ โพลีเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์

ระยะเวลาที่เก็บแม่แบบไว้ในตู้หลังการ โพลีเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์ เมื่อมีอันตรกิริยากับอุณหภูมิ จะส่งผลกับอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแม่แบบ ซึ่งทำให้แม่แบบมีการหดหรือขยายตัวในอัตราต่างๆ และอาจเกิดการคิโมลต์ได้

ระยะเวลาที่เก็บแม่แบบไว้ในตู้หลังการ โพลีเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์นี้ อาจเรียกว่าระยะเวลาการบ่ม (Curing Time) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ ความหนา ส่วนโค้งของเลนส์ รวมทั้งปฏิกิริยาของอุณหภูมิ (Dial, 1995) ดังนั้นในการกำหนดระดับเพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสม จึงทำการกำหนดให้อยู่ในช่วงของการทำงานในปัจจุบันเพื่อ ไม่ให้กระทบกับคุณภาพของงานในส่วนอื่นๆ และดังที่ได้กล่าว ไปแล้วว่าหลังจากที่การ โพลีเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์ จะมีการปล่อยงานไว้ในตู้อบเพื่อให้เลนส์เกิดการ

แข็งตัวอย่างเต็มที่ก่อนอย่างน้อยเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และรอบระยะเวลาทำงานของพนักงานตามปกติ พนักงานจะทำการทิ้งงานไว้ในตู้อบได้นานประมาณ 4 ชั่วโมง จึงได้กำหนดระดับต่ำ (-1) ไว้ที่ 2 ชั่วโมง ระดับสูง (+1) ที่ 4 ชั่วโมง และจุดศูนย์กลางที่ 3 ชั่วโมง

- วิธีการแกะแม่แบบออกจากเลนส์

วิธีการแกะแม่แบบออกจากเลนส์ มีผลต่อการเกิดรอยขีดข่วนบนแม่แบบเนื่องจากวิธีการแกะไม่เหมาะสมอาจทำให้หน้าแม่แบบเสียดสีกับหน้าเลนส์เกิดรอยขีดข่วนได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแกะแม่แบบที่อุณหภูมิสูงมากดังเช่นกระบวนการแกะแม่แบบในงานวิจัยนี้

ในกระบวนการแกะแม่แบบ พบว่าหลังจากที่พนักงานแกะแม่แบบออกจากเลนส์โดยใช้ สปาตุลาแล้ว เลนส์จะติดอยู่กับแม่แบบอีกด้านหนึ่ง ซึ่งการทำงานของพนักงานในปัจจุบันที่พบเห็นอยู่มีอยู่สองแบบ แต่ยังไม่ได้มีการกำหนดเป็นมาตรฐานที่แน่นอนคือ

วิธีที่ 1 คือการแกะแม่แบบที่ติดกับเลนส์หลังจากทำการจัดหรือรูดด้วยสปาตุลา (Spatula) ด้วยการใช้นิ้วกลางและนิ้วชี้ดึงออก ซึ่งหากไม่หลุดออกจะใช้มีดกรีดนำลมเข้าในการแยกแม่แบบกับเลนส์ออกจากกันดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 การให้มีดกรีดในการแยกแม่แบบออกจากเลนส์

วิธีที่ 2 คือ การแกะแม่แบบที่ติดกับเลนส์หลังจากทำการจัดหรือรูดด้วยสปาตุลา (Spatula) ด้วยการใช้นิ้วชี้ที่มีความดันเบา เพื่อให้อากาศ เข้าไปแทนที่ระหว่างเลนส์และแม่แบบ จนกว่าเลนส์จะหลุดออกจากแม่แบบเอง

จึงได้กำหนดระดับของปัจจัยนี้โดย การแกะแม่แบบวิธีที่ 1 เป็นระดับต่ำ (-1) และการแกะแม่แบบวิธีที่ 2 เป็นระดับสูง (+1)

- อุณหภูมิในการแกะแม่แบบ

อุณหภูมิในการแกะแม่แบบเป็นปัจจัยที่อาจมีผลต่อการเกิดรอยขีดข่วนกับแม่แบบ เนื่องจากแม่แบบเป็นวัสดุประเภทแก้ว และสิ่งที่มีผลต่อความแข็งแรงแก้วอย่างหนึ่งคือ อุณหภูมิ

โดยแก้วที่มีอุณหภูมิสูงจะมีความอ่อนตัวมากกว่าแก้วที่อุณหภูมิต่ำ จึงทำให้เกิดรอยขีดข่วนได้ง่ายกว่า (Bowden and Scott, 1958) นอกจากนี้ในกระบวนการผลิตเลนส์ยังพบว่า แม่แบบที่อุณหภูมิสูงเกินไปจะแกะออกจากเลนส์ได้ยาก แต่แม่แบบที่อุณหภูมิต่ำเกินไปจะทำให้เกิดการดีโมลต์ได้ ดังนั้นอุณหภูมิการแกะแม่แบบจึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่น่าสนใจเพื่อหาอุณหภูมิในการแกะแม่แบบที่เหมาะสม

ซึ่งอุณหภูมิการแกะแม่แบบทำการกำหนดระดับของปัจจัย จากค่าสูงสุดและต่ำสุดของข้อกำหนด (Specification) ที่ใช้อยู่ในกระบวนการผลิตในปัจจุบัน คือช่วงระหว่าง 90 องศาเซลเซียสและ 110 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมกับการแกะแม่แบบของเลนส์สำเร็จรูปนี้

แต่การควบคุมอุณหภูมิของการแกะโดยการวัดอุณหภูมิแม่แบบโดยตรงสามารถทำได้ยาก เนื่องจากจะทำให้พนักงานเสียเวลาการปฏิบัติงาน อาจจะกระทบต่อกำลังการผลิตได้ จึงให้กำหนดให้ทำการควบคุมที่แม่แบบแซนด์วิช (Sandwich Mold) ที่ออกจากตู้เก็บงาน (Holding Oven) แทน ตู้เก็บงานนี้เป็นตู้ที่ทำการเก็บแม่แบบแซนด์วิชหลังจากตู้โพลีเมอร์ไรเซชัน เพื่อทำการรักษาอุณหภูมิของแม่แบบแซนด์วิชให้ได้อุณหภูมิที่กำหนดไว้ก่อนการแกะนั่นเอง ซึ่งจากการทดสอบวัดอุณหภูมิหลังจากออกจากตู้เก็บงานมาระหว่างการแกะ 30 ค่า พบว่าอุณหภูมิจะต่ำลงเฉลี่ย 9.71 องศาเซลเซียส ดังนั้นในการทดลองนี้ จากอุณหภูมิการแกะงานที่กำหนดไว้ทั้ง 3 ค่า (ระดับต่ำ จุดศูนย์กลาง และระดับสูง) จะต้องทำการปรับตั้งอุณหภูมิที่ตู้เก็บงานให้สูงกว่าค่าของอุณหภูมิการแกะงานที่กำหนด 10 องศาเซลเซียส เพื่อช่วยในการปรับตั้งค่าที่ตัวเครื่อง คือจาก 90, 100 และ 110 องศาเซลเซียส เพิ่มเป็น 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งเป็นระดับต่ำ (-1) จุดศูนย์กลาง (0) และระดับสูง (+1) นั่นเอง

เพื่อความถูกต้องในการปรับตั้งค่า จึงได้ทำการทดสอบสมมติฐานของอุณหภูมิที่ลดลงทั้ง 30 ค่า โดยใช้การทดสอบสมมติฐาน One-Sample Z Test ทดสอบค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ลดลงของกลุ่มตัวอย่างที่เก็บมาได้ว่ามีความแตกต่างไปจาก 10 องศาเซลเซียสหรือไม่ ดังนี้

$H_0 : \mu = 10$; ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ลดลงของกลุ่มตัวอย่างไม่มีความแตกต่างกับ 10 °C

$H_1 : \mu \neq 10$; ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ลดลงของกลุ่มตัวอย่างมีความแตกต่างกับ 10 °C

โดย μ คือ ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ลดลงของกลุ่มตัวอย่าง

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบสมมติฐาน Z-test

One-Sample Z: Temp								
Test of mu = 10 vs not = 10								
The assumed standard deviation = 1								
Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	Z	P	
Temp	30	9.710	0.987	0.183	(9.352, 10.068)	-1.59	0.112	

จากผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรม Minitab ในตารางที่ 5.4 พบว่า อุณหภูมิที่ 10 องศาเซลเซียสไม่แตกต่างกับค่าอุณหภูมิค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ลดลงของกลุ่มตัวอย่าง ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้กำหนดให้มีการปรับตั้งอุณหภูมิที่ผู้เก็บงานให้สูงกว่าอุณหภูมิแคะงานที่กำหนด 10 องศาเซลเซียส

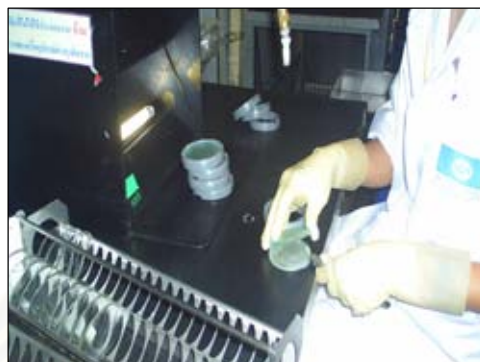
- ชนิดของสปาทุลา (Spatula)

ชนิดของสปาทุลา เป็นปัจจัยที่อาจมีผลต่อการเกิดรอยขีดข่วนเนื่องจากมีความเกี่ยวข้องกับภาระ (Load) และความเค้น (Stress) ที่กระทำต่อตัวแม่แบบซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความรุนแรงการเกิดรอยขีดข่วนบนผิวแก้ว (Bowden and Scott, 1958; Houerou et al., 2003) โดยสปาทุลาทั้ง 2 ชนิดนี้มีวิธีการแคะแม่แบบแตกต่างกัน วิธีแรกใช้สปาทุลาชนิดจัดจัดแม่แบบตัวบนออกจากเลนส์ ส่วนอีกวิธีจะใช้ร่องด้านข้างระหว่างแม่แบบกับเลนส์รูคกับสปาทุลาชนิดรูค เพื่อให้แม่แบบตัวใดตัวหนึ่งหลุดออกจากเลนส์ ดังนั้นวิธีการแคะแม่แบบโดยใช้สปาทุลาต่างชนิดกันนี้จึงอาจมีผลต่อการเกิดรอยขีดข่วนบนแม่แบบได้

ในโรงงานกรณีศึกษา มีชนิดของสปาทุลาที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน 2 ชนิดคือ สปาทุลาแบบใช้จัดซึ่งเป็นสปาทุลาที่ใช้ในการแคะเลนส์ผลิตภัณฑ์ CR39 และสปาทุลาแบบใช้รูคซึ่งเป็นสปาทุลาชนิดที่ใช้ในการแคะเลนส์ผลิตภัณฑ์ 1.6FSV ในปัจจุบัน สปาทุลาทั้ง 2 ชนิดแสดงในรูปที่ 5.2 และ 5.3 การกำหนดระดับของปัจจัยนี้ได้กำหนดให้ ระดับต่ำ (-1) คือสปาทุลาชนิดจัด และระดับสูง (+1) คือ สปาทุลาชนิดรูค

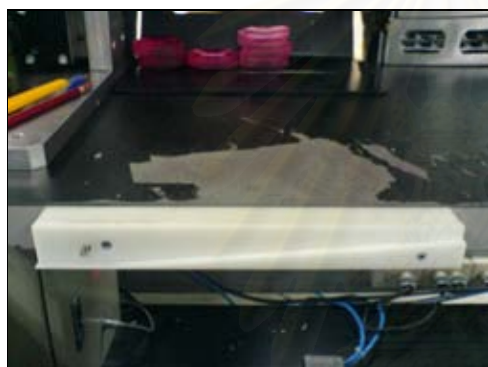


(ก)



(ข)

รูปที่ 5.2 สปาทุลาชนิดงัด (ก) และการแกะแม่แบบโดยใช้спаทุลาชนิดงัด (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.3 สปาทุลาชนิดรูด (ก) และแกะแม่แบบโดยใช้спаทุลาชนิดรูด (ข)

ซึ่งในการวิเคราะห์ผลการทดลองของปัจจัยทั้ง 5 ปัจจัยนี้ หากผลการวิเคราะห์แสดงว่า ปัจจัยใดมีผลต่อผลตอบหรือสัดส่วนของแม่แบบเสียประเภทรอยขีดข่วนอย่างมีนัยสำคัญ จะทำการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของปัจจัยนั้น โดยการวิเคราะห์ผลการออกแบบการทดลองด้วยการหาค่าตัวแปรตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด (Response Optimization) สำหรับปัจจัยแสดงผลตอบเชิงเส้น (Linear) หรือนำปัจจัยนั้นไปออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อไปด้วยการออกแบบส่วนประสมกลาง หรือ CCD (Central Composite Design) หากพบว่าปัจจัยชนิดแปรผัน (Variable Factors) ที่ได้ทำการทดลอง โดยเพิ่มจุดศูนย์กลางเข้าไป แสดงผลตอบที่มีลักษณะเป็นส่วนโค้ง (Curvature) แต่ถ้าหากผลการทดลองพบว่าปัจจัยนั้นไม่มีผลต่อผลตอบ ผู้วิจัยจะทำการกำหนดค่าของปัจจัยที่ใช้ในการผลิตเป็นค่าใดค่าหนึ่งที่อยู่ในช่วงที่กำหนด โดยคำนึงถึงความสะดวกต่อการผลิต ง่ายต่อการควบคุมหรือปรับตั้งค่านั้นเอง

5.4 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองสำหรับการทดลองนี้จะใช้การออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล แบบมีจุดศูนย์กลางสำหรับปัจจัยที่เป็นปัจจัยแบบแปรผัน (Half-Fraction Factorial Design with Center Point) (2_{v-1}^{v-1}) ซึ่งจะทำให้ทราบถึงการมีอิทธิพลร่วม (Interaction) ระหว่างปัจจัยและการมีความโค้ง (Curvature) ของปัจจัยแปรผันด้วย

การออกแบบการทดลอง จะกระทำโดยใช้โปรแกรม Minitab ในการสร้างเมทริกซ์การออกแบบ (Design Matrix) โดยกำหนดให้มีการสุ่มลำดับการทดลอง (Randomization) เพื่อให้ค่าสังเกตจากการทดลองต้องมีความเป็นอิสระต่อกัน ในงานวิจัยนี้มีปัจจัยที่ทำการศึกษากำหนดจำนวน 5 ปัจจัย เป็นปัจจัยแปรผัน (Variable Factors) จำนวน 3 ปัจจัย และปัจจัยคุณลักษณะ (Attribute Factors) จำนวน 2 ปัจจัย จึงได้การทดลองจำนวนทั้งสิ้น 20 ลำดับการทดลอง (20 runs) รายละเอียดของการออกแบบการทดลองและเมทริกซ์การออกแบบ (Design Matrix) แสดงดังตารางที่ 5.5 และตารางที่ 5.6

- **การออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (Fractional Factorial Design)** เป็นการทดลองที่ใช้ในกรณีเมื่อการทดลองมีหลายปัจจัย ทำให้ต้องเสียเวลาในการเก็บข้อมูลมาก ดังนั้นจะทำให้ความสัมพันธ์ของทรีทเมนต์ (Treatment Combination) บางตัวถูกตัดออกไปโดยอาศัยหลักการของการคอนฟาวด์ (Confound) ซึ่งทำให้จำนวนการทดลอง นอกจากนี้ออกแบบการทดลองจะใช้ขนาดตัวอย่างในการทดลองมีจำนวนน้อยกว่าการทดลองที่ละ 1 ปัจจัย (One Factor at a Time) และใช้เวลาการทดลองที่น้อยกว่า เนื่องจากการศึกษาปัจจัยหลายตัวพร้อมๆ กัน โดยผลสรุปจากการทดลองแบบแฟกทอเรียลสามารถสรุปได้ครอบคลุมมากกว่า เนื่องจากสามารถพิจารณาในส่วนของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยในการทดลองด้วย

- **การเพิ่มจุดศูนย์กลาง (Center Point)** การเพิ่มจุดศูนย์กลางเข้าไปในการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล จะช่วยให้ประหยัดจำนวนครั้งการทดลองเพื่อทดสอบสมมติฐานเชิงเส้น (Linearity) ของผลที่จะเกิดขึ้นจากปัจจัยต่างๆ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือการทดสอบการมีความโค้งของผลตอบ (Curvature) ของปัจจัย และการประมาณค่าผิดพลาดจากการทดลองจะได้มาจากการเพิ่มจุดศูนย์กลางให้แก่การทดลอง

- **การสุ่ม (Randomization)** หมายถึงการลำดับการทดลองให้เป็นไปโดยสุ่ม ซึ่งทำให้ผลการทดลองตรงกับข้อกำหนดทางสถิติว่า ค่าสังเกตจากการทดลองต้องมีความเป็นอิสระต่อกัน การสุ่มยังสามารถที่จะเฉลี่ยออกความผันแปรภายนอกที่ไม่ได้เกิดจากสาเหตุโดยธรรมชาติออกไปได้ ทำให้การวิเคราะห์ผลจากการทดลองมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 5.5 รายละเอียดของการออกแบบการทดลองโดยโปรแกรม Minitab

Fractional Factorial Design

Factors:	5	Base Design:	5, 16	Resolution:	V
Runs:	20	Replicates:	1	Fraction:	1/2
Blocks:	1	Center pts (total):	4		

Design Generators: E = ABCD

Alias Structure

I + ABCDE

A + BCDE

B + ACDE

C + ABDE

D + ABCE

E + ABCD

AB + CDE

AC + BDE

AD + BCE

AE + BCD

BC + ADE

BD + ACE

BE + ACD

CD + ABE

CE + ABD

DE + ABC

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.6 ตารางการออกแบบการทดลอง (Design Matrix)

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A	B	C	D	E
13	1	1	1	-1	-1	1	1	1
4	2	1	1	1	1	-1	-1	1
3	3	1	1	-1	1	-1	-1	-1
5	4	1	1	-1	-1	1	-1	-1
16	5	1	1	1	1	1	1	1
2	6	1	1	1	-1	-1	-1	-1
18	7	0	1	0	0	1	0	-1
7	8	1	1	-1	1	1	-1	1
8	9	1	1	1	1	1	-1	-1
15	10	1	1	-1	1	1	1	-1
9	11	1	1	-1	-1	-1	1	-1
14	12	1	1	1	-1	1	1	-1
10	13	1	1	1	-1	-1	1	1
20	14	0	1	0	0	1	0	1
11	15	1	1	-1	1	-1	1	1
12	16	1	1	1	1	-1	1	-1
19	17	0	1	0	0	-1	0	1
6	18	1	1	1	-1	1	-1	1
1	19	1	1	-1	-1	-1	-1	1
17	20	0	1	0	0	-1	0	-1

เมื่อ สัญลักษณ์ -1 หมายถึง ระดับของปัจจัยที่มีระดับต่ำ (Low)

สัญลักษณ์ +1 หมายถึง ระดับของปัจจัยที่มีระดับสูง (High)

สัญลักษณ์ 0 หมายถึง จุดศูนย์กลางของปัจจัย (Center Point)

5.5 ตัวแปรตอบสนอง (Response)

5.5.1 การกำหนดตัวแปรตอบสนอง (Response)

ตัวแปรตัวแปรตอบสนอง (Response) ในการทดลองนี้ ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะพิจารณาผลกระทบของการเกิดแม่แบบเสียจากรอยขีดข่วนในกระบวนการผลิตเลนส์สายตาพลาสติก และเนื่องจากการตรวจสอบแม่แบบของโรงงานกรณีศึกษานี้ เป็นการตรวจสอบด้วยสายตา และทำการประเมินผลแบบ ขอมรับ/ปฏิเสธ หรือ ผ่าน/ไม่ผ่าน ซึ่งเป็นแบบข้อมูลตามลักษณะ (Attribute Data) ดังนั้นตัวแปรตอบสนองที่ทำการศึกษาจึงเป็น สัดส่วนของแม่แบบเสียประเภทรอยขีดข่วน นั่นเอง

5.5.2 การแปลงค่าตัวแปรตอบสนอง (Response)

เนื่องจากตัวแปรตอบสนอง (Response) ของงานวิจัยนี้เป็นข้อมูลประเภทสัดส่วนของเสีย ดังนั้นในขั้นตอนก่อนการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อตัวแปรตอบสนองของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล จะต้องมีการแปลงค่าของตัวแปรตอบสนองเสียก่อน เนื่องจากเนื่องจากตัวแปรตอบสนองแบบที่เป็นสัดส่วนของของเสียนี้ หากนำมาวิเคราะห์โดยตรง จะทำให้ข้อมูลไม่เป็นไปตามสมมติฐานความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Variance Stability) ของตัวแปรตอบสนอง และอาจทำให้การวิเคราะห์ผลมีความคลาดเคลื่อนขึ้นได้ (Bisgaard and Fuller, 1994)

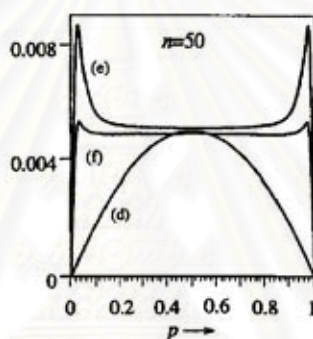
โดยการแปลงข้อมูลที่ Bisgaard และ Fuller (1994) นำเสนอมี 2 วิธีคือ การแปลงข้อมูลแบบมาตรฐาน (Standard Transformations หรือ Arcsine Square Root Transformations) และการแปลงข้อมูลด้วยวิธีของ Freeman และ Tukey (Freeman and Tukey's (F & T) Modifications) ซึ่งมีสมการการแปลงข้อมูลทั้งสองวิธีดังแสดงในตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 สมการการแปลงข้อมูลด้วยวิธีมาตรฐานและวิธีของ Freeman และ Tukey
เมื่อปัจจัยผลตอบเป็นสัดส่วนของของเสีย

Type of Data	Type of Distribution	Transformation	F & T Modification
Proportions (\hat{p}) (Defective Unit in a sample of n units)	Binomial	$\arcsin \sqrt{\hat{p}}$	$\left(\arcsin \sqrt{\frac{n\hat{p}}{n+1}} + \arcsin \left(\sqrt{\frac{n\hat{p}+1}{n+1}} \right) \right) / 2$

จากรูปที่ 5.4 พบว่าข้อมูลที่เป็นสัดส่วนของเสีย (Proportion Defectives) หลังการแปลงข้อมูลจะทำให้ความแปรปรวนมีค่าคงที่มากขึ้น และเมื่อสัดส่วนของเสีย (p) มีค่าเข้าใกล้ 0 หรือ 1 จะเห็นว่าวิธีของ Freeman และ Tukey (เส้น f) ให้ค่าความแปรปรวนที่คงที่กว่าวิธีมาตรฐาน (เส้น e) และเนื่องจากงานวิจัยนี้สัดส่วนของเสียของตัวแปรตอบสนองมีค่าที่ต่ำเข้าใกล้ 0 กล่าวคือ ข้อมูลสัดส่วนของเสียก่อนการปรับปรุงในปี 2549 มีค่าเท่ากับ 0.25% เท่านั้น ดังนั้นจึงได้ใช้วิธีการแปลงข้อมูลด้วยวิธีของ Freeman และ Tukey ในงานวิจัยนี้

หมายเหตุ การแปลงข้อมูลด้วยวิธีของ Freeman และ Tukey นั้นนอกจากการคำนวณจากสมการในตารางที่ 5.7 แล้วยังสามารถคำนวณจากฟังก์ชัน Transform Proportion ในเครื่องคำนวณ (Calculator) ของโปรแกรม Minitab ได้อีกด้วย



รูปที่ 5.4 ฟังก์ชันของความแปรปรวนของสัดส่วนการแจกแจงทวินาม (ที่ $n=50$) เมื่อ ไม่มีการแปลงข้อมูล (d) แปลงข้อมูลด้วยวิธีมาตรฐาน (e) และใช้วิธีของ Freeman และ Tukey (f)

5.6 ขนาดตัวอย่าง

ในกรณีที่อัตราส่วนของเสียมีค่าต่ำมากๆ และแม่แบบที่ใช้มีราคาสูงดังเช่นงานวิจัยนี้ ขนาดตัวอย่างที่ใช้จึงเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงอย่างมาก และจากการศึกษาของงานวิจัยของ Bisgaard และ Gertsbakh (2000) ได้นำเสนอแนวทางการทดลองอีกวิธีสำหรับการทดลอง 2^{k-q} ที่มีผลตอบเป็นสัดส่วนของเสีย โดยสามารถทำให้ผู้ทำการทดลองมั่นใจได้ว่าการทดลองแต่ละการจัดหมู่ของทรีทเมนต์ (Treatment Combination) จะไม่ผลิตงานเสียออกมามากกว่าค่าที่กำหนดไว้ เรียกว่า การสุ่มแบบส่วนกลับของทวินาม (Inverse Binomial sampling) ซึ่งเป็นการทำการทดลองจนกระทั่งได้ของเสียเท่ากับค่าคงที่ค่าหนึ่งหรือค่าของกฎการหยุด (Stopping Rule; r) ซึ่งได้จากการคำนวณจากสมการหรือจากการเปิดตาราง ดังนั้นผู้ทำการทดลองจะสามารถหยุดการทดลองในการจัดหมู่

ของทรีทเมนต์ ที่ทำให้เกิดผลเสียต่อผลิตภัณฑ์ก่อนที่จะผลิตของเสียออกมาจำนวนมากได้ และค่าตัวแปรตอบสนองที่วัดคือจำนวนที่ทำการผลิตจนกระทั่งได้ของเสียเท่ากับ r ชิ้นนั่นเอง

แต่เนื่องจากผู้วิจัยเห็นว่าการใช้วิธีการสุ่มแบบส่วนกลับของทวินามนี้เหมาะสมกับการผลิตที่เป็นลักษณะแบบต่อเนื่อง (Ongoing Production Process) แต่ไม่เหมาะสมการทดลองในงานวิจัยนี้ที่บางกระบวนการต้องทำการทดลองโดยใช้ตู้อบ ซึ่งมีจำนวนผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในตู้อบในการอบ 1 ครั้งจำนวนมาก ทำให้ไม่สามารถหยุดการทดลองเมื่อมีงานเสียเท่ากับค่าหนึ่งตามหลักการนี้ได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการคำนวณขนาดตัวอย่างดังที่ Bisgaard และ Fuller (1995) ได้นำเสนอในอีกงานวิจัยหนึ่ง ซึ่งเป็นสมการในการหาขนาดตัวอย่างสำหรับการทดลองเชิงแฟกทอเรียล ในกรณีที่ผลตอบเป็นข้อมูลประเภทสัดส่วนของของเสีย ดังที่ได้อ้างถึงแล้วในการเปรียบเทียบขนาดตัวอย่างของการออกแบบการทดลอง ในหัวข้อที่ 5.2.2.2 ซึ่งสรุปได้ว่าขนาดตัวอย่างที่ต้องใช้ในการทดลองแต่ละการจัดหมู่ของทรีทเมนต์ (Treatment Combination) คือ 5,190 ตัว

ซึ่งในการผลิตเลนส์ 1 ชิ้น จะต้องใช้แม่แบบในการหล่อ 2 ตัว ดังนั้นจากขนาดตัวอย่างที่ต้องการที่ได้จากการคำนวณคือ 5,190 ตัวต่อการทดลอง จึงหมายถึงจำนวนแม่แบบในการผลิตเลนส์ 2,595 เลนส์ หากคิดเป็นจำนวนตู้อบในกระบวนการโพลีเมอร์ไรเซชันซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญอย่างหนึ่งในการทดลอง ต้องใช้แม่แบบ 3 ตู้อบ ใน 1 การทดลอง เนื่องจาก 1 ตู้อบ สามารถอบผลิตภัณฑ์ได้ตู้อบละ 960 เลนส์ ดังนั้นใน 1 การทดลองจึงใช้แม่แบบทั้งหมด 5,760 ตัว

โดยช่วงเวลาที่ทำการศึกษานี้ ในกระบวนการโพลีเมอร์ไรเซชัน จะทำการผลิตผลิตภัณฑ์ 1.6FSV ปริมาณวันละ 5-6 ตู้อบ เพื่อเป็นการป้องกันการสับสนของพนักงานและง่ายต่อการควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ ผู้วิจัยจึงทำการทดลองวันละ 1 การทดลอง โดยตู้อบที่จะทำการทดลองนั้นได้ทำการกำหนดไว้ด้วยตัวทั้ง 3 ตู้ คือตู้ที่ 1, 2 และ 3 เพื่อป้องกันความแตกต่างที่อาจเกิดจากตู้อบ

5.7 การทำการทดลอง

5.7.1 การเตรียมการทดลอง

ทำการเตรียมการทดลองโดยการเตรียมเครื่องมือและเครื่องจักรที่จำเป็นต้องใช้ในการทดลองให้พร้อม จากนั้นจึงทำการอบรมพนักงานที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง ให้เข้าใจถึงการปรับตั้งพารามิเตอร์ วิธีการทำงาน รวมถึงการใช้เครื่องมือต่างๆ ในการทดลองให้ถูกต้องกับระดับที่ต้องการ เช่น ชนิดของ สปาฆูลาที่ใช้ในการทดลองนั้นๆ รวมทั้งการควบคุมผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการทดลองให้แต่ละการทดลองไม่ปะปนกับงานปกติที่ทำการผลิตอยู่ โดยการทำเครื่องหมายบนตั๋วงาน (Ticket) ที่มากับงานตัวอย่างก่อนการอบในตู้โพลีเมอร์ไรเซชัน

5.7.2 ขั้นตอนในการทดลอง

ทำการทดลอง โดย ตามลำดับการทดลองที่ทำการสุ่มไว้โดย โปรแกรม Minitab คือทำการทดลองตามลำดับที่กำหนดไว้ในช่อง “Run Order” ซึ่งขั้นตอนของการทดลองแสดงดังแผนภูมิการไหล รูปที่ 5.5 และมีรายละเอียดดังนี้

1. เตรียมแม่แบบที่ประกอบเสร็จแล้วของผลิตภัณฑ์ 1.6FSV ที่จะทำการทดลอง และนำเครื่องหมายบนตัวที่มากับงานด้วยโดยระบุว่าเป็นงาน “TEST”

2. เติมโมโนเมอร์ในแม่แบบและเมื่อมีปริมาณครบความจุของตู้โพลีเมอร์ไรเซชัน คือ 960 เกลนส์ จึงทำการอบในตู้ โดยใช้โปรแกรมไฟล์การอบงานให้ถูกต้องกับงาน 1.6FSV (1 การทดลองจะใช้ผลิตภัณฑ์ในการทดลองจำนวน 3 ตู้อบ หรือ 2,880 เกลนส์)

3. จากนั้นทำเข้าสู่ขั้นตอนทำการทดลอง โดยทำการผลิตตามปัจจัยและระดับที่กำหนดไว้ คือ อุณหภูมิออกจากตู้โพลีเมอร์ไรเซชัน โดยปรับตั้งอุณหภูมิสุดท้ายหลังการโพลีเมอไรเซชันสมบูรณ์ที่ตัวเครื่อง และทำการเก็บงานตามระยะเวลาที่เก็บงานที่กำหนดไว้ในแต่ละการทดลอง

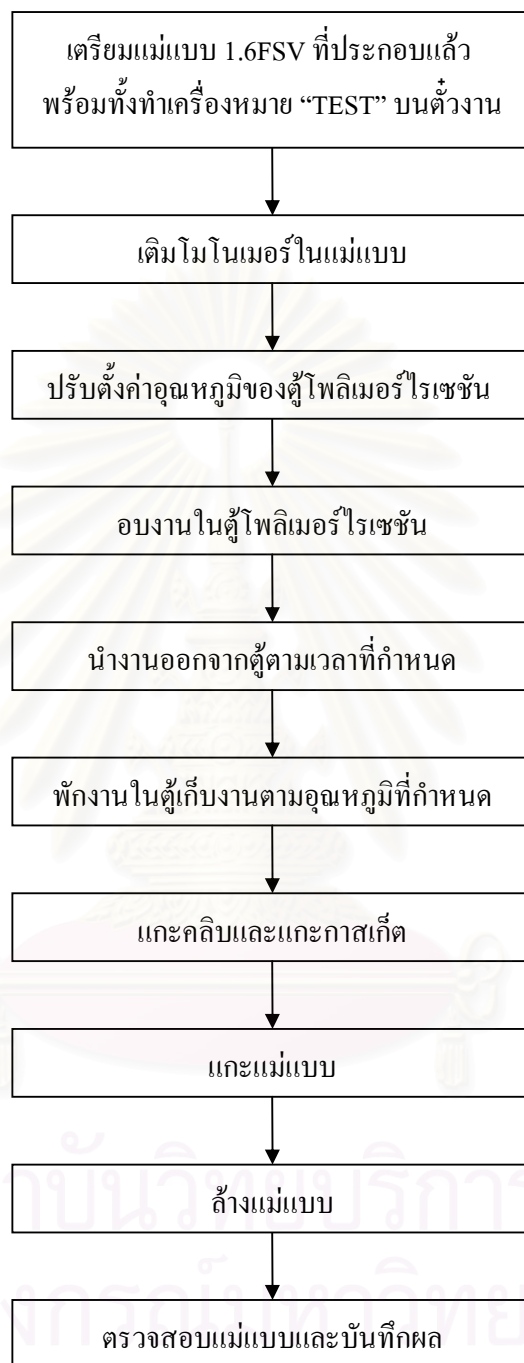
4. เมื่อนำงานออกจากตู้โพลีเมอร์ไรเซชัน ตามอุณหภูมิและระยะเวลาที่กำหนดแล้ว นำงานไปใส่ในตู้เก็บงานเพื่อรักษาอุณหภูมิการแ่งงานให้ เป็นไปตามที่กำหนดโดยปรับตั้งค่าอุณหภูมิของตู้เก็บงานให้สูงกว่าอุณหภูมิแ่งงาน 10 องศาเซลเซียส กล่าวคือ เพิ่มจากอุณหภูมิแ่งงานที่ 90, 100 และ 110 องศาเซลเซียส เป็นค่าปรับตั้งอุณหภูมิของตู้เก็บงานที่ 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

5. แกะตัวยึด (Clip) และกาสเก็ต (Gasket) ออกจากแม่แบบแซนวิช (Sandwich Mold)

6. แกะแม่แบบออกจากเลนส์โดยใช้สปาทุลาตามชนิดที่กำหนดในแต่ละการทดลอง รวมทั้งแกะเลนส์ที่ติดกับแม่แบบอีกด้านด้วยวิธีการแกะที่กำหนดในแต่ละการทดลองด้วย

7. ล้างแม่แบบด้วยเครื่องล้างแม่แบบ

8. ตรวจสอบแม่แบบด้วยสายตา และบันทึกข้อมูลแม่แบบเสียในแผ่นรายการตรวจสอบ



รูปที่ 5.5 แผนภูมิการไหลของวิธีการทดลอง

5.8 ผลการทดลอง

หลังจากการทำการทดลองตามขั้นตอนการทดลองที่ได้กำหนดไว้ ได้ผลการทดลองเป็นสัดส่วนของแม่แบบเสียจากการเกิดรอยขีดข่วน และทำการแปลงค่าสัดส่วนแม่แบบเสียที่ได้ในแต่ละการทดลอง ด้วยวิธีมาตรฐานและวิธีของ Freeman และ Tukey (F&T) ได้ผลดังตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 ตารางการออกแบบการทดลองและผลการแปลงข้อมูล
ด้วยวิธีมาตรฐานและวิธีของ Freeman และ Tukey

RunOrder	A	B	C	D	E	\hat{p}	$\arcsin\sqrt{\hat{p}}$	F&T
1	-1	-1	1	1	1	0.0017	0.0417	0.0427
2	1	1	-1	-1	1	0.0014	0.0373	0.0384
3	-1	1	-1	-1	-1	0.0040	0.0632	0.0639
4	-1	-1	1	-1	-1	0.0021	0.0457	0.0466
5	1	1	1	1	1	0.0021	0.0457	0.0466
6	1	-1	-1	-1	-1	0.0028	0.0527	0.0535
7	0	0	1	0	-1	0.0017	0.0417	0.0427
8	-1	1	1	-1	1	0.0031	0.0559	0.0567
9	1	1	1	-1	-1	0.0021	0.0457	0.0466
10	-1	1	1	1	-1	0.0033	0.0575	0.0582
11	-1	-1	-1	1	-1	0.0016	0.0395	0.0406
12	1	-1	1	1	-1	0.0009	0.0295	0.0309
13	1	-1	-1	1	1	0.0028	0.0527	0.0535
14	0	0	1	0	1	0.0021	0.0457	0.0466
15	-1	1	-1	1	1	0.0036	0.0604	0.0611
16	1	1	-1	1	-1	0.0019	0.0437	0.0447
17	0	0	-1	0	1	0.0031	0.0559	0.0567
18	1	-1	1	-1	1	0.0007	0.0264	0.0279
19	-1	-1	-1	-1	1	0.0017	0.0417	0.0427
20	0	0	-1	0	-1	0.0024	0.0493	0.0502

5.9 การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองในขั้นตอนนี้ จะทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองก่อนการวิเคราะห์ผลการทดลอง จากนั้นหากข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์ผลเป็นไปตามสมมติฐานที่กำหนดจึงจะทำการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญและใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสมในขั้นตอนต่อไป ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

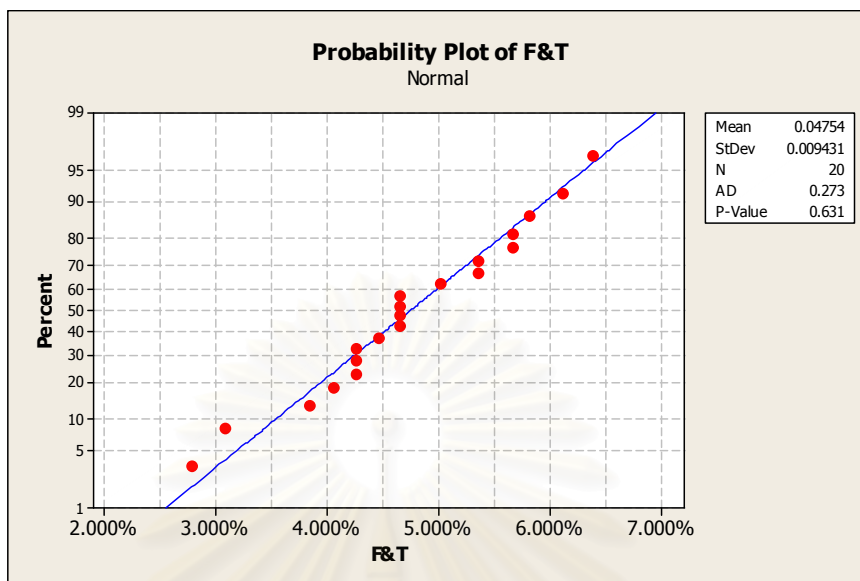
5.9.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การวิเคราะห์ผลของการออกแบบการทดลองนั้น จะต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) ซึ่งเป็นการตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของข้อมูลก่อนนำมาวิเคราะห์ โดยตรวจสอบว่าข้อมูลมีรูปแบบของความผิดพลาดเป็นไปตามหลักการ $\varepsilon_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$ หรือไม่ ด้วยการทดสอบข้อกำหนดเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนของการทดลองตามสมมติฐาน 3 ข้อ คือ สมมติฐานของการแจกแจงปกติ สมมติฐานของความเป็นอิสระ และสมมติฐานของความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน ก่อนที่จะนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์และสรุปผลของการออกแบบการทดลอง ดังนี้

5.9.1.1 การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ

การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality Assumption) สามารถตรวจสอบได้โดยการพิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) ของค่าตัวแปรตอบสนอง ว่ามีการแจกแจงปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ หากพิจารณา Normal Probability Plot ควรมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง และหากทดสอบโดยการทดสอบความเป็นปกติ (Normality Test) จะมีค่า P-Value มากกว่า 0.05

จากการทดสอบค่าตัวแปรตอบสนอง ในที่นี้ก็คือสัดส่วนของแม่แบบเสียเนื่องจากตำหนิประเภทรอยขีดข่วนหลังการแปลงข้อมูลด้วยวิธีของ Freeman และ Tukey พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวเป็นแบบปกติ คือมีลักษณะเป็นเส้นตรง และมีค่า P-Value เท่ากับ 0.631 ซึ่งมากกว่า 0.05 ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐานของการแจกแจงปกติ แสดงดังรูปที่ 5.6



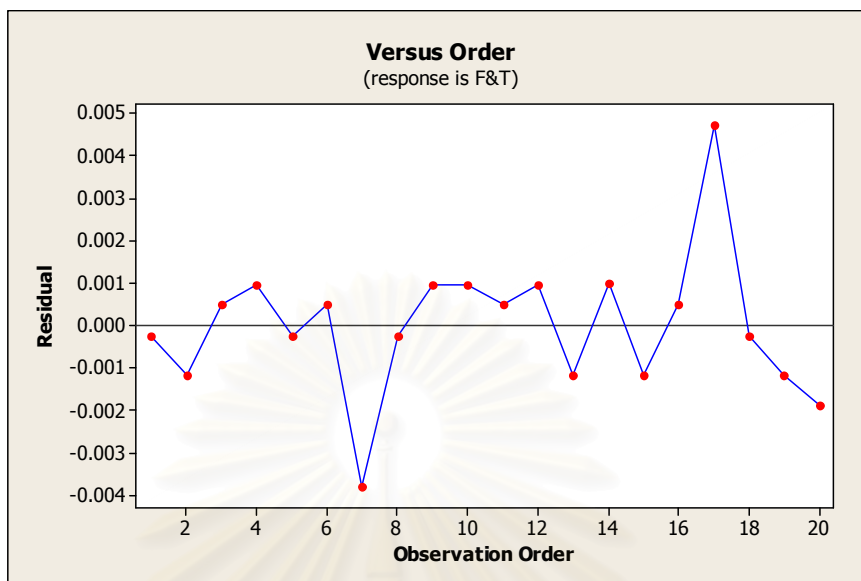
รูปที่ 5.6 ผลลัพธ์ของการทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ

5.9.1.2 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independence)

การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของส่วนตกค้าง (Independence of Residual) สามารถตรวจสอบได้โดยการพิจารณาจากแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับของการเก็บข้อมูล (Observation Order) โดยการกระจายตัวของส่วนตกค้างควรมีรูปแบบที่เป็นอิสระต่อกัน ไม่ควรมีลักษณะของข้อมูลที่เป็นแนวโน้ม หรือมีรูปแบบที่แน่นอน

จากรูปที่ 5.7 แสดงให้เห็นว่าค่าส่วนตกค้างมีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



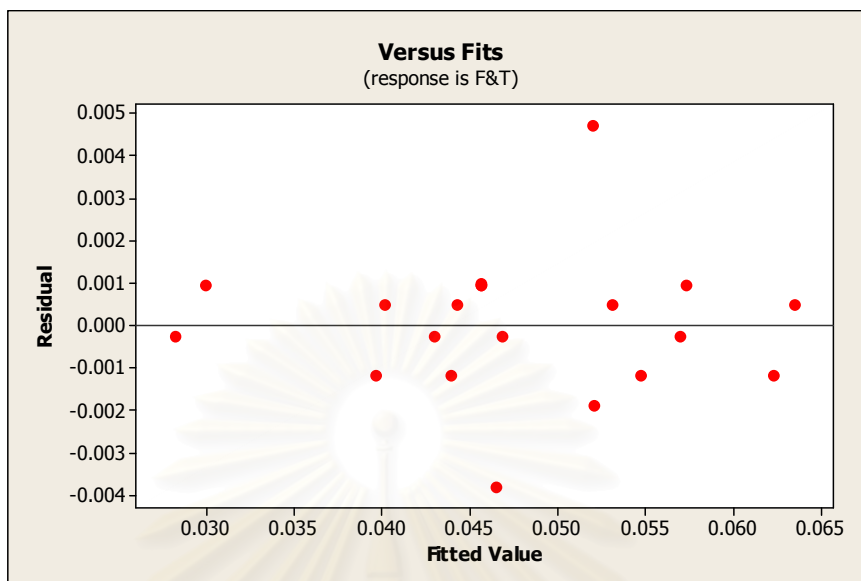
รูปที่ 5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและลำดับของการเก็บข้อมูล

5.9.1.3 ความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Variance Stability)

ผู้วิจัยได้ทำการแปลงข้อมูลของตัวแปรตอบสนองซึ่งเป็นข้อมูลประเภทสัดส่วนของเสียให้เป็นไปตามสมมติฐานเรื่องความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Variance Stability) ดังที่งานวิจัยของ Bisgaard และ Fuller (1994) ได้นำเสนอไว้ ซึ่งรายละเอียดของการแปลงข้อมูลได้อ้างไว้ในหัวข้อที่ 5.5.2

และการตรวจสอบความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนนี้ สามารถตรวจสอบได้โดยการพิจารณาแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าที่ถูกฟิต (Fitted value) ซึ่งแผนภาพการกระจายไม่ควรมีลักษณะของข้อมูลที่เป็นแนวโน้ม หรือมีการกระจายตัวที่มีรูปแบบกรวยปากเปิด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและค่าที่ถูกฟิต

จากกราฟรูปที่ 5.8 จะเห็นว่าค่าส่วนตกค้าง ไม่มีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นรูปแบบกรวยปากเปิด จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแปรตอบสนอง สรุปได้ว่าข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์ผลของการออกแบบการทดลอง เป็นไปตามสมมติฐานที่กำหนดทั้ง 3 ข้อ คือ มีการกระจายแบบปกติ มีความเป็นอิสระต่อกัน และมีความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน จึงเป็นไปตามเงื่อนไข $\varepsilon_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$ ของการออกแบบการทดลอง ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์ผลการทดลองในขั้นตอนต่อไป

5.9.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อข้อมูลผ่านการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) แล้ว จึงทำการวิเคราะห์ผลการออกแบบการทดลองเบื้องต้น ด้วยโปรแกรม Minitab ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลอง ดังตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab

Factorial Fit: F&T versus A, B, C, D, E					
Estimated Effects and Coefficients for F&T (coded units)					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		0.047164	0.001035	45.57	0.000
A	-0.008799	-0.004400	0.001035	-4.25	0.024
B	0.009721	0.004860	0.001035	4.70	0.018
C	-0.005995	-0.002997	0.000926	-3.24	0.048
D	0.000249	0.000124	0.001035	0.12	0.912
E	-0.000494	-0.000247	0.000926	-0.27	0.807
A*B	-0.007118	-0.003559	0.001035	-3.44	0.041
A*C	-0.004257	-0.002128	0.001035	-2.06	0.132
A*D	0.002062	0.001031	0.001035	1.00	0.393
A*E	-0.000392	-0.000196	0.001035	-0.19	0.862
B*C	0.005283	0.002642	0.001035	2.55	0.084
B*D	0.001004	0.000502	0.001035	0.48	0.661
B*E	-0.000726	-0.000363	0.001035	-0.35	0.749
C*D	-0.000103	-0.000052	0.001035	-0.05	0.963
C*E	-0.000401	-0.000201	0.000926	-0.22	0.842
D*E	0.009312	0.004656	0.001035	4.50	0.021
Ct Pt		0.001875	0.002314	0.81	0.477

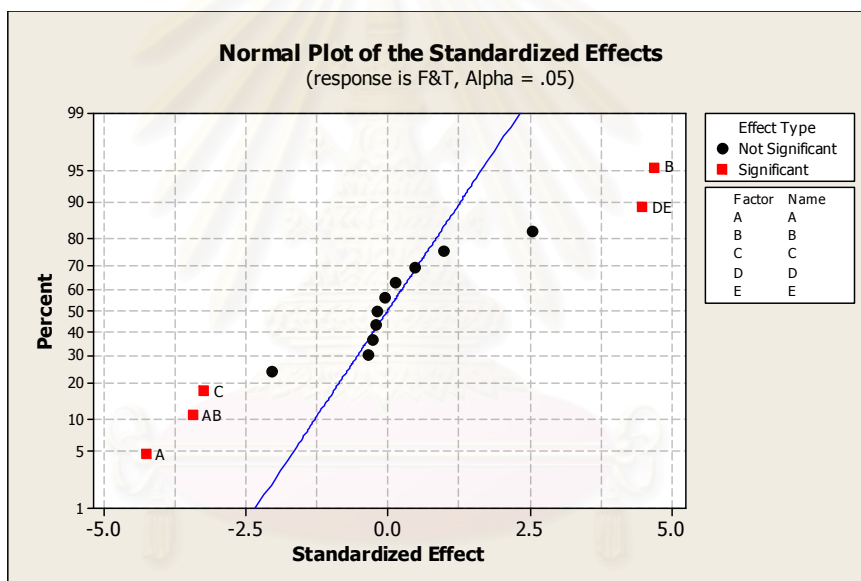
S = 0.00413990
R-Sq = 96.96% R-Sq(adj) = 80.73%

Analysis of Variance for F&T (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	5	0.00086882	0.00086882	0.00017376	10.14	0.043
2-Way Interactions	10	0.00075827	0.00075827	0.00007583	4.42	0.124
Curvature	1	0.00001125	0.00001125	0.00001125	0.66	0.477
Residual Error	3	0.00005142	0.00005142	0.00001714		
Total	19	0.00168975				

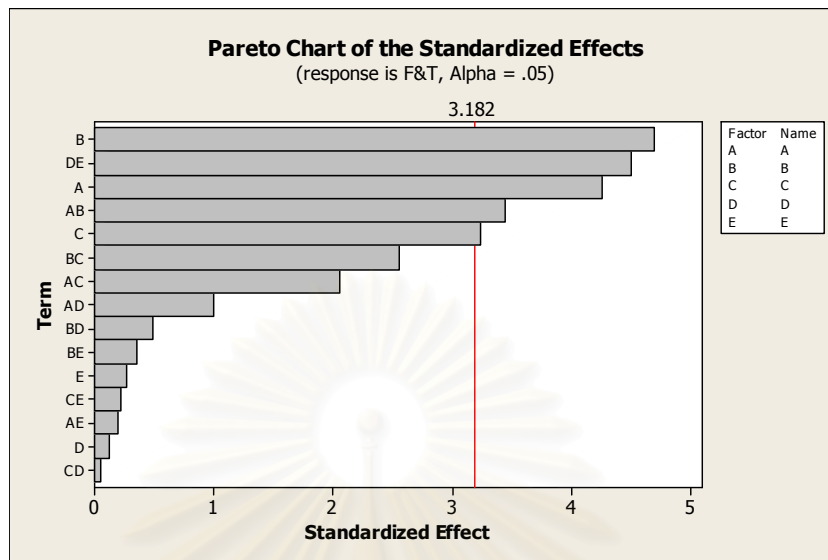
การวิเคราะห์ผลการออกแบบการทดลองเบื้องต้นจากโปรแกรม Minitab เพื่อพิจารณาเทอมของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญที่มีผลต่อสัดส่วนของแม่แบบเสียประเภทรอยขีดข่วนในกระบวนการผลิตเลนส์พลาสติก พบว่าที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ซึ่งก็คือปัจจัยที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 แบ่งเป็น ปัจจัยหลัก (Main Effect) ที่คู่แฝงแฝดกับอันตรกิริยาสี่ปัจจัย จำนวน 3 เทอม และอันตรกิริยาสองปัจจัยที่คู่แฝงแฝดกับอันตรกิริยาสามปัจจัย จำนวน 2 เทอม นอกจากนี้ยังพบว่าไม่มีอิทธิพลเนื่องจากความโค้ง (Curvature) เกิดขึ้นกับตัวแบบนี้ ซึ่งปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ A + BCDE, B + ACDE, C + ABDE, AB + CDE และ DE + ABC

- โดยที่ A คือ อุณหภูมิออกจากตู้โพลีเมอร์ไรเซชัน
 B คือ ระยะเวลาที่เก็บงานไว้ในตู้หลังการโพลีเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์
 C คือ วิธีการแกะแม่แบบออกจากเลนส์
 D คือ อุณหภูมิในการแกะแม่แบบ
 E คือ ชนิดของสปาทูลา

ซึ่งโปรแกรม Minitab สามารถแสดงผลของปัจจัยหลักและอันตรกิริยา ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญออกมาในรูปแบบกราฟ Normal Plot และ แผนภูมิพารโต ดังรูปที่ 5.9 และ 5.10 (โดยการแสดงผลความมีนัยสำคัญใน โปรแกรม Minitab ในกรณีปัจจัยที่มีคู่แฝงแฝดจะทำการแสดงผลเฉพาะอันตรกิริยาที่ต่ำกว่าหรือลำดับตัวอักษรที่มาก่อนเพียงค่าเดียวเท่านั้น)

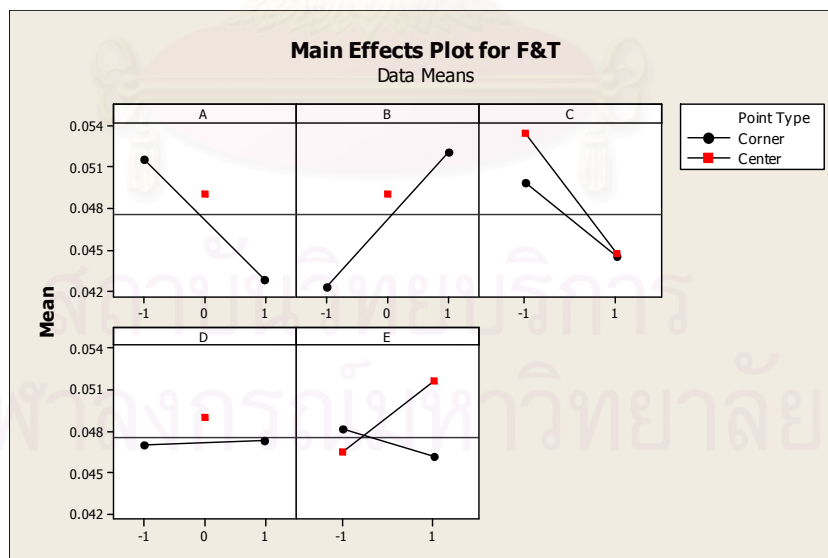


รูปที่ 5.9 กราฟ Normal Plot ของปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง

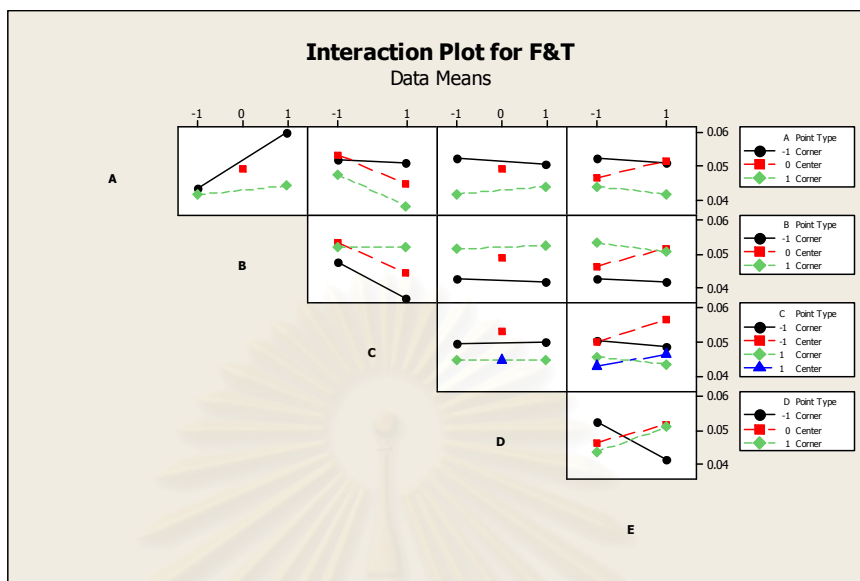


รูปที่ 5.10 แผนภูมิพารेटอของปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง

นอกจากนี้การวิเคราะห์ผลการออกแบบการทดลองเบื้องต้นด้วยโปรแกรม Minitab ยังสามารถแสดงแผนภาพผลของการออกแบบการทดลองของปัจจัยหลักที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง และ ผลของอันตรกิริยาที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองหรือสัดส่วนของแม่แบบเสียเนื่องจากรอยขีดข่วน ดังรูปที่ 5.11 และ 5.12 ตามลำดับ



รูปที่ 5.11 ผลของปัจจัยหลักที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองคือสัดส่วนของแม่แบบเสียจากรอยขีดข่วน



รูปที่ 5.12 ผลของอันตรกิริยาที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองคือสัดส่วนของแม่แบบเสียจากรอยขีดข่วน

5.10 สูตรระยะการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการเลือกการทดลองที่จะทำให้ใช้ขนาดตัวอย่างต่ำที่สุด เนื่องจากแม่แบบที่ใช้ในการทดลองมีราคาแพง และสัดส่วนของแม่แบบเสียในกระบวนการผลิตในปัจจุบันมีค่าค่อนข้างต่ำ ทำให้ต้องใช้ขนาดตัวอย่างจำนวนมากเพื่อให้สามารถตรวจจับความแตกต่างของการทดลองได้ โดยได้ทำการเปรียบเทียบขนาดตัวอย่างระหว่างการทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Test) และการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) พบว่าขนาดตัวอย่างที่ต้องใช้ในการออกแบบการทดลองมีปริมาณน้อยกว่าการทดสอบสมมติฐานถึง 4 เท่า ดังนั้นในขั้นตอนนี้จึงได้เลือกทำการออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลแบบมีจุดศูนย์กลางสำหรับปัจจัยที่เป็นปัจจัยแบบแปรผัน (2^{5-1}) เนื่องจากใช้ขนาดตัวอย่างน้อยกว่ามากและสามารถพิจารณาอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยในการทดลอง และความมีส่วนโค้งของปัจจัยได้ด้วย ซึ่งการออกแบบการทดลองนี้ใช้การทดลองทั้งหมด 20 รัน (Runs)

จากนั้นเมื่อได้ผลการทดลองแล้วจึงนำมาวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง โดยมีการแปลงค่าของตัวแปรตอบสนองให้เป็นไปตามสมมติฐานเรื่องความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนของการออกแบบการทดลอง ด้วยวิธีของ Freeman และ Tukey เนื่องจากตัวแปรตอบสนองเป็นสัดส่วนของเสีย และทำการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบจำลอง (Model Adequacy

Checking) เมื่อพบว่าข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ จึงได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองในขั้นต่อไป

ผลจากการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองเบื้องต้น พบว่าที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญเพื่อนำไปปรับปรุงหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสม คือ $A + BCDE$, $B + ACDE$, $C + ABDE$, $AB + CDE$ และ $DE + ABC$ นอกจากนี้ยังพบว่าไม่มีอิทธิพลเนื่องจากความโค้ง (Curvature) เกิดขึ้นกับตัวแบบนี้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

ระยะการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ (Improvement Phase)

6.1 บทนำ

หลังจากทำออกแบบการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่มีนัยสำคัญด้วยการออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล แบบมีจุดศูนย์กลางสำหรับปัจจัยที่เป็นปัจจัยแบบแปรผัน (Half-Fraction Factorial Design with Center Point) (2^{5-1}) ในขั้นตอนการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาแล้ว ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม Minitab แสดงให้เห็นว่าปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ คือ $A + BCDE$, $B + ACDE$, $C + ABDE$, $AB + CDE$ และ $DE + ABC$ โดยที่ A คืออุณหภูมิออกจากตู้โพลีเมอร์ไรเซชัน B คือระยะเวลาที่เก็บงานไว้ในตู้หลังการโพลีเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์ C คือวิธีการแกะแม่แบบออกจากเลนส์ D คืออุณหภูมิในการแกะแม่แบบ และ E คือชนิดของสปาทูลา นอกจากนี้ยังไม่มีอิทธิพลเนื่องจากความโค้ง (Curvature) เกิดขึ้นกับตัวแบบนี้ สำหรับขั้นตอนปรับปรุงแก้ไขกระบวนการนี้จะเป็นการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนของแม่แบบเสียจากการเกิดตำหนิประเภทรอยขีดข่วน เพื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ได้สัดส่วนของแม่แบบเสียต่ำที่สุด โดยการวิเคราะห์ผลการทดลองจากข้อมูลที่มีอยู่ ซึ่งหากพบว่าข้อมูลไม่เพียงพอก็จะเลือกทำการทดลองที่เหมาะสมเพิ่มต่อไปโดยคำนึงถึงข้อจำกัดที่มีอยู่ด้วย

6.2 การออกแบบการทดลองเพิ่ม

จากผลการทดลองในขั้นตอนก่อนหน้าพบว่าไม่มีอิทธิพลเนื่องจากความโค้ง (Curvature) เกิดขึ้นกับตัวแบบนี้ การออกแบบการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology; RSM) จึงไม่มีความจำเป็นสำหรับขั้นตอนนี้ ผู้วิจัยจึงทำการวิเคราะห์ผลการออกแบบทดลองที่ได้ทำการทดลองไปแล้วเพื่อทำการกำหนดปัจจัยและระดับที่สามารถปรับปรุงปริมาณแม่แบบเสียให้ลดลง แต่เนื่องจากการออกแบบการทดลองนี้เป็น การออกแบบมิติ V (Resolution V) ซึ่งการออกแบบเหล่านี้ปัจจัยหลัก (Main Effect) จะเป็นคู่แฝงแฝด (Alias) กับอันตรกิริยาสี่ปัจจัย และอันตรกิริยาสองปัจจัยจะเป็นคู่แฝงแฝดกับอันตรกิริยาสามปัจจัย โดยโครงสร้างคู่แฝงแฝด (Alias Structure) ของการออกแบบการทดลองนี้ แสดงในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 โครงสร้างคู่แฝด (Alias Structure) ของการออกแบบการทดลอง 2_V^{5-1}

Design Generators: E = ABCD
Alias Structure
I + ABCDE
A + BCDE
B + ACDE
C + ABDE
D + ABCE
E + ABCD
AB + CDE
AC + BDE
AD + BCE
AE + BCD
BC + ADE
BD + ACE
BE + ACD
CD + ABE
CE + ABD
DE + ABC

จากผลการวิเคราะห์การทดลองในขั้นตอนก่อนหน้าพบว่าโดยทั่วไปแล้วสามารถตั้งสมมติฐานได้ว่าอันตรกิริยาชั้นสูงบางตัวคืออันตรกิริยาดั้งแต่สามปัจจัยขึ้นไปสามารถละเลยได้ ดังนั้นปัจจัยหลัก (Main Effect) ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญคือ A B และ C ส่วนอันตรกิริยา (Interaction) ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ คือ AB และ DE แต่จากโครงสร้างคู่แฝดตารางที่ 6.1 พบว่า DE มีคู่แฝดเป็น ABC โดยที่ปัจจัยหลัก (Main Effect) ที่มีนัยสำคัญคือ A B และ C ดังนั้นอันตรกิริยาที่มีนัยสำคัญในกรณีนี้จึงมีความเป็นไปได้ที่จะเป็น ABC ที่มีนัยสำคัญ ซึ่งหากสามารถสรุปได้ว่าอันตรกิริยาที่มีนัยสำคัญคืออันตรกิริยา ABC จะทำให้มีปัจจัยนำเข้าที่สำคัญเพียง 3 ปัจจัยในการกำหนดระดับ กล่าวคือสามารถละเลยปัจจัย D และ E ได้ ซึ่งจะทำได้ง่ายต่อการควบคุมโดยไม่ต้องไปทำการควบคุมปัจจัยที่ไม่เกี่ยวข้องให้ยุ่งยาก เสียเวลา หรือเสียค่าใช้จ่าย รวมทั้งในการวิเคราะห์ผลยังสามารถทำการฉายการออกแบบ (Projection) ให้อยู่ในรูปการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบบริบูรณ์ที่มี 3 ปัจจัย 2 เรพลิเคตได้โดยการตัดปัจจัย D และ E ทิ้งนั่นเอง หรือในทางกลับกันหากพบว่าอันตรกิริยาที่มีนัยสำคัญเป็น DE ก็จะทำให้การกำหนดระดับของปัจจัยและการสรุปผลมีความถูกต้องยิ่งขึ้น

ในทางทฤษฎีนั้นหากต้องการจะทราบว่าอันตรกิริยาตัวใดที่มีนัยสำคัญสำหรับการออกแบบการทดลอง 2_V^{5-1} จะต้องทำการทดลองอีกครั้งที่เหลือ เพื่อให้เป็นการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2^5 แบบบริบูรณ์ วิธีการนี้เรียกว่าการ Fold Over ซึ่งจะทำให้ได้ตัวประมาณ De-Alias ของผล

ทั้งหมด โดยจะทำการวิเคราะห์การทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมดเหมือนกับการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2^2 แบบบริบูรณ์ที่ประกอบด้วย 2 บล็อก (การทดลองครั้งแรกและครั้งหลังเป็นแต่ละบล็อก) ซึ่งการทดลองเพิ่มอีกหนึ่งครั้งนี้จะทำให้ทุกพจน์เป็นอิสระจากการการมีคู่แฝงแฝด หรืออาจทำการทดลองเพียงครั้งหนึ่งของการ Fold Over แบบบริบูรณ์ เรียกว่า Partial Fold Over

แต่เนื่องจากการทำการทดลองเพิ่มแบบบริบูรณ์ (Fold Over) และ Partial Fold Over ในการออกแบบการทดลอง 2_v^{s-1} นั้นจะต้องทำการทดลองเพิ่มถึง 16 รัน และ 8 รัน ตามลำดับ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายเนื่องจากแม่แบบมีราคาสูง รวมถึงผลกระทบต่อระยะเวลาในการทดลอง ดังนั้นผู้ทำการวิจัยจึงเลือกทำการทดลองเพิ่มเฉพาะบางส่วนเพื่อให้ทราบเฉพาะอันตรกิริยาที่สนใจเท่านั้น (Montgomery, 2005) ในที่นี้อันตรกิริยาที่สนใจคือ DE มีคู่แฝงแฝดเป็น ABC ซึ่งการทำการ De-Alias อันตรกิริยา DE และ ABC ด้วยการทำการทดลองเพิ่มน้อยกว่า 16 รัน นั่นก็คือการพิดตัวแบบ

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_4x_4 + \beta_5x_5 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{45}x_4x_5 + \beta_{123}x_1x_2x_3 + \varepsilon \quad (6.1)$$

$$\text{โดยที่ } \hat{\beta} = (X'X)^{-1} X'y \quad (6.2)$$

จากเมทริกซ์การออกแบบ (Design Matrix) ของการออกแบบการทดลองในขั้นตอนการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา ซึ่งแสดงดังตารางที่ 6.2 พบว่าคอลัมน์ DE ไม่แตกต่างกับคอลัมน์ ABC เนื่องจาก DE (x_4x_5) เป็นคู่แฝงแฝดกับ ABC ($x_1x_2x_3$) จึงไม่สามารถประมาณค่าของ β_{45} และ β_{123} ในตัวแบบได้ ดังนั้นเราจึงได้ทำการเพิ่มการทดลองด้วยการสุ่มจากเศษส่วนอีกครั้งหนึ่งที่เหลือ (Alternate Fraction) เข้าไปในการทดลองครั้งแรกจำนวน 2 รัน ซึ่งการทดลองที่เพิ่มเข้าไปนั้น อันตรกิริยาที่สนใจจะมีระดับทั้งสูงและต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 6.3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.2 เมทริกซ์การออกแบบ (Design Matrix) ของการออกแบบการทดลองครั้งแรก

RunOrde r	Block s	CenterP t	A	B	C	D	E	<i>DE</i>	<i>ABC</i>
1	1	1	-1	-1	1	1	1	<i>1</i>	<i>1</i>
2	1	1	1	1	-1	-1	1	<i>-1</i>	<i>-1</i>
3	1	1	-1	1	-1	-1	-1	<i>1</i>	<i>1</i>
4	1	1	-1	-1	1	-1	-1	<i>1</i>	<i>1</i>
5	1	1	1	1	1	1	1	<i>1</i>	<i>1</i>
6	1	1	1	-1	-1	-1	-1	<i>1</i>	<i>1</i>
7	1	0	0	0	1	0	-1	<i>0</i>	<i>0</i>
8	1	1	-1	1	1	-1	1	<i>-1</i>	<i>-1</i>
9	1	1	1	1	1	-1	-1	<i>1</i>	<i>1</i>
10	1	1	-1	1	1	1	-1	<i>-1</i>	<i>-1</i>
11	1	1	-1	-1	-1	1	-1	<i>-1</i>	<i>-1</i>
12	1	1	1	-1	1	1	-1	<i>-1</i>	<i>-1</i>
13	1	1	1	-1	-1	1	1	<i>1</i>	<i>1</i>
14	1	0	0	0	1	0	1	<i>0</i>	<i>0</i>
15	1	1	-1	1	-1	1	1	<i>1</i>	<i>1</i>
16	1	1	1	1	-1	1	-1	<i>-1</i>	<i>-1</i>
17	1	0	0	0	-1	0	1	<i>0</i>	<i>0</i>
18	1	1	1	-1	1	-1	1	<i>-1</i>	<i>-1</i>
19	1	1	-1	-1	-1	-1	1	<i>-1</i>	<i>-1</i>
20	1	0	0	0	-1	0	-1	<i>0</i>	<i>0</i>

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.3 เมทริกซ์การออกแบบ (Design Matrix) การออกแบบการทดลองเมื่อเพิ่มการทดลอง

RunOrder	Blocks	CenterPt	A	B	C	D	E	DE	ABC
1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1
3	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1
4	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
7	1	0	0	0	1	0	-1	0	0
8	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1
9	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1
10	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1
11	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1
12	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	-1
13	1	1	1	-1	-1	1	1	1	1
14	1	0	0	0	1	0	1	0	0
15	1	1	-1	1	-1	1	1	1	1
16	1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
17	1	0	0	0	-1	0	1	0	0
18	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1
19	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1
20	1	0	0	0	-1	0	-1	0	0
21	2	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1
22	2	1	-1	1	1	1	1	1	-1

จากตารางที่ 6.3 พบว่าเครื่องหมายในคอลัมน์ DE ไม่เหมือนกันกับคอลัมน์ ABC ในการทดลองที่ 21 และ 22 (2 แถวสุดท้าย) ดังนั้นเราจึงสามารถพืดัวแบบที่ประกอบไปด้วยอันตรกิริยาของ DE (x_4, x_5) และ ABC (x_1, x_2, x_3) ได้

จากเหตุผลข้างต้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองเพิ่มอีก 2 รัน เพื่อให้ทราบถึงผลที่แท้จริงว่าอันตรกิริยา DE หรือ ABC มีผลกับตัวแปรตอบสนองหรือสัดส่วนแม่แบบเสียอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ การทดลองทั้งครั้งแรกและการทดลองเพิ่มจะควรเป็นสภาวะที่สามารถเทียบเคียงกันได้ (Homogenous) เพื่อลดผลของเวลาหรือผลของบล็อก ในการทดลองที่ทำเพิ่มจึงได้ทำการควบคุม

สภาวะต่างๆให้เหมือนกับการทดลองในครั้งแรกมากที่สุดเพื่อให้การวิเคราะห์ผลการทดลองมีความถูกต้อง ส่วนขนาดตัวอย่าง และขั้นตอนการทดลองอ้างอิงจากหัวข้อ 5.6 และ 5.7 (ในบทที่ 5) ตามลำดับ ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 ผลการทดลองและการแปลงข้อมูลด้วยวิธีของ Freeman และ Tukey

RunOrder	A	B	C	D	E	DE	ABC	\hat{p}	F&T
1	-1	-1	1	1	1	1	1	0.0017	0.0427
2	1	1	-1	-1	1	-1	-1	0.0014	0.0384
3	-1	1	-1	-1	-1	1	1	0.0040	0.0639
4	-1	-1	1	-1	-1	1	1	0.0021	0.0466
5	1	1	1	1	1	1	1	0.0021	0.0466
6	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0.0028	0.0535
7	0	0	1	0	-1	0	0	0.0017	0.0427
8	-1	1	1	-1	1	-1	-1	0.0031	0.0567
9	1	1	1	-1	-1	1	1	0.0021	0.0466
10	-1	1	1	1	-1	-1	-1	0.0033	0.0582
11	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	0.0016	0.0406
12	1	-1	1	1	-1	-1	-1	0.0009	0.0309
13	1	-1	-1	1	1	1	1	0.0028	0.0535
14	0	0	1	0	1	0	0	0.0021	0.0466
15	-1	1	-1	1	1	1	1	0.0036	0.0611
16	1	1	-1	1	-1	-1	-1	0.0019	0.0447
17	0	0	-1	0	1	0	0	0.0031	0.0567
18	1	-1	1	-1	1	-1	-1	0.0007	0.0279
19	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	0.0017	0.0427
20	0	0	-1	0	-1	0	0	0.0024	0.0502
21	<i>1</i>	<i>-1</i>	<i>-1</i>	<i>-1</i>	<i>1</i>	<i>-1</i>	<i>1</i>	<i>0.0010</i>	<i>0.0336</i>
22	<i>-1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>-1</i>	<i>0.0033</i>	<i>0.0582</i>

6.3 การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

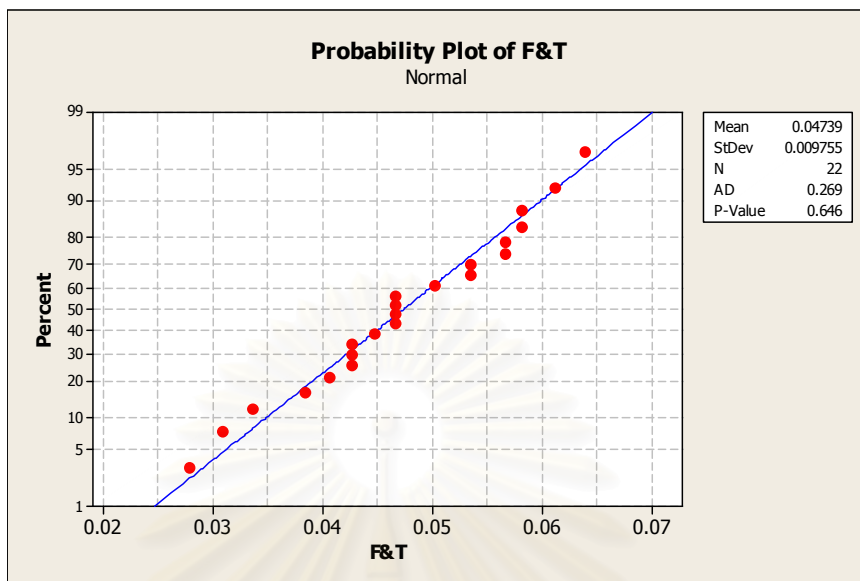
การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองมีรายละเอียด 3 ส่วนคือ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง การวิเคราะห์ผลการทดลอง และการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

6.3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การวิเคราะห์ผลของการออกแบบการทดลองนั้น จะต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) ดังเช่นในบทที่ 5 โดยตรวจสอบว่าข้อมูลมีรูปแบบของความผิดพลาดเป็นไปตามหลักการ $\varepsilon_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$ หรือไม่ ด้วยการทดสอบข้อกำหนดเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนของการทดลองตามสมมติฐาน 3 ข้อ ก่อนที่จะนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์และสรุปผลของการออกแบบการทดลอง ดังนี้

6.3.1.1 การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ

การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality Assumption) สามารถตรวจสอบได้โดยการพิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) ของค่าตัวแปรตอบสนอง ว่ามีการแจกแจงปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ หากพิจารณา Normal Probability Plot ควรมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง และหากทดสอบโดยการทดสอบความเป็นปกติ (Normality Test) จะมีค่า P-Value มากกว่า 0.05 ซึ่งจากผลการทดสอบค่าตัวแปรตอบสนอง ในที่นี้ก็คือสัดส่วนของแม่แบบเสียเนื่องจากตำหนิประเภทรอยขีดข่วนหลังการแปลงข้อมูลด้วยวิธีของ Freeman และ Tukey พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวเป็นแบบปกติ คือมีลักษณะเป็นเส้นตรง และมีค่า P-Value เท่ากับ 0.646 ซึ่งมากกว่า 0.05 ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐานของการแจกแจงปกติ แสดงดังรูปที่ 6.1

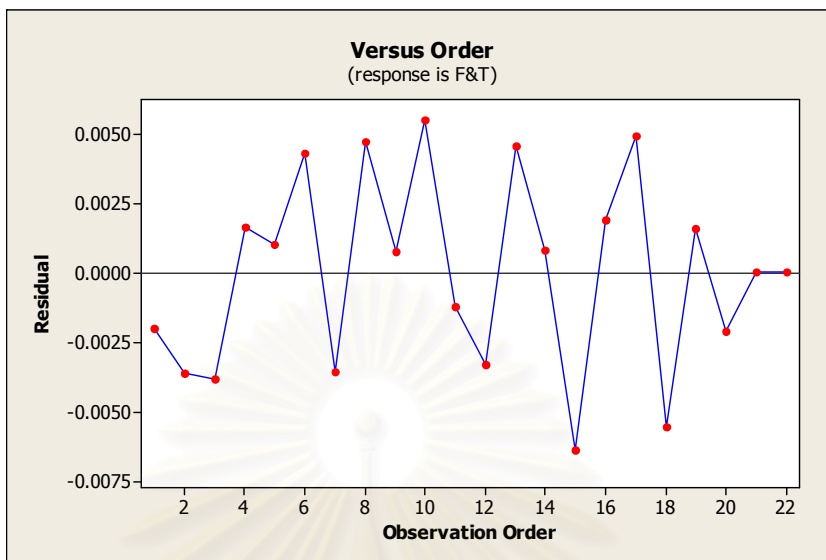


รูปที่ 6.1 ผลลัพธ์ของการทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ

6.3.1.2 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independence)

การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของส่วนตกค้าง (Independence of Residual) สามารถตรวจสอบได้โดยการพิจารณาจากแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับของการเก็บข้อมูล (Observation Order) โดยการกระจายตัวของส่วนตกค้างควรมีรูปแบบที่เป็นอิสระต่อกัน ไม่ควรมีลักษณะของข้อมูลที่เป็นแนวโน้ม หรือมีรูปแบบที่แน่นอน จากรูปที่ 6.2 แสดงให้เห็นว่าค่าส่วนตกค้างมีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

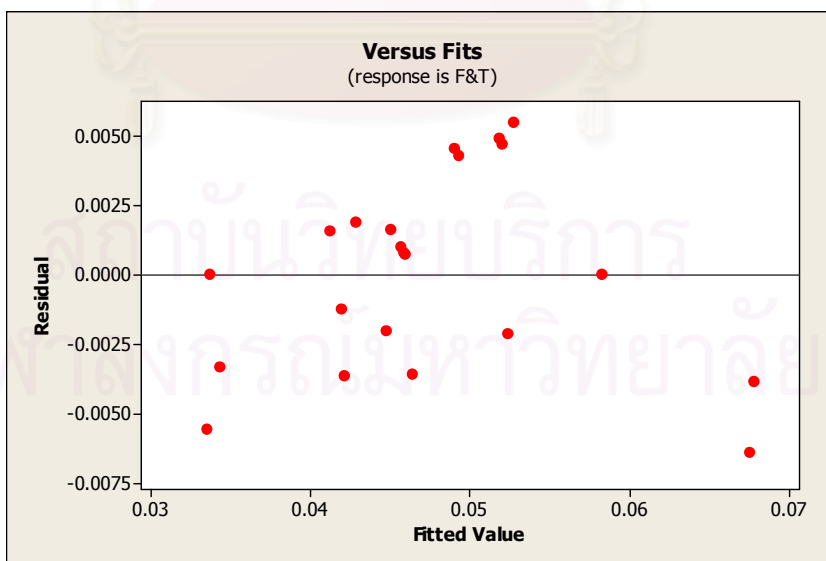
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและลำดับของการเก็บข้อมูล

6.3.1.3 ความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Variance Stability)

การตรวจสอบความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนตรวจสอบได้โดยพิจารณาแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ซึ่งการกระจายไม่ควรมีลักษณะของข้อมูลที่เป็นแนวโน้ม หรือมีการกระจายตัวที่มีรูปแบบกรวยปากเปิด



รูปที่ 6.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและค่าที่ถูกฟิต

จากกราฟรูปที่ 6.3 จะเห็นว่าค่าส่วนตกค้าง ไม่มีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นรูปแบบกรวย ปากเปิด จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแปรตอบสนอง สรุปได้ว่าข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ ผลของการออกแบบการทดลอง เป็นไปตามสมมติฐานที่กำหนดทั้ง 3 ข้อ คือ มีการกระจายแบบปกติ มีความเป็นอิสระต่อกัน และมีความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน จึงเป็นไปตามเงื่อนไข $\varepsilon_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$ ของการออกแบบการทดลอง ดังนั้นจึงนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์และสรุปผลของการออกแบบการทดลอง

6.3.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อข้อมูลผ่านการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) แล้ว จึงทำการวิเคราะห์ผลการออกแบบการทดลองเบื้องต้น ด้วยโปรแกรม Minitab ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลอง ดังตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองด้วย โปรแกรม Minitab

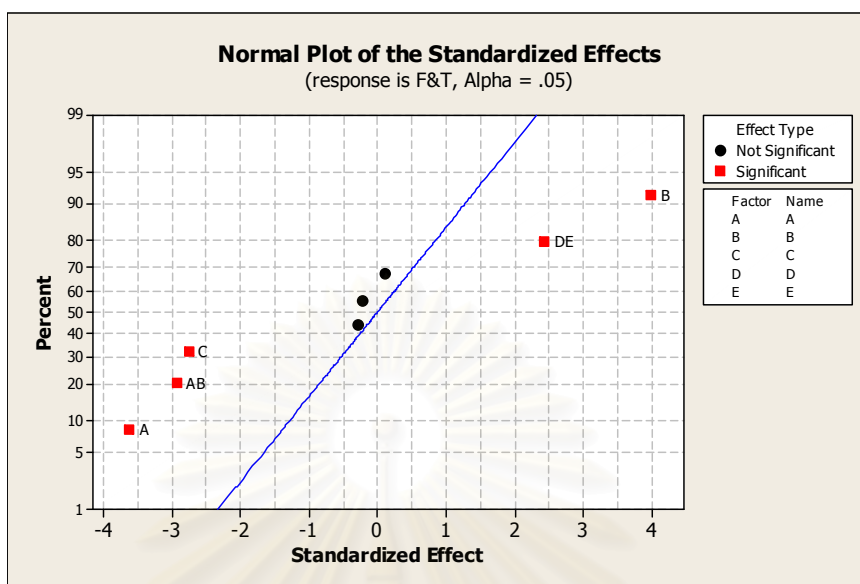
Factorial Fit: F&T versus Block, A, B, C, D, E						
Estimated Effects and Coefficients for F&T (coded units)						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P	
Constant		0.044871	0.001998	22.46	0.000	
Block		0.002293	0.001998	1.15	0.275	
A	-0.008799	-0.004400	0.001216	-3.62	0.004	
B	0.009721	0.004860	0.001216	4.00	0.002	
C	-0.005995	-0.002997	0.001087	-2.76	0.019	
D	0.000249	0.000124	0.001216	0.10	0.920	
E	-0.000494	-0.000247	0.001087	-0.23	0.824	
A*B	-0.007118	-0.003559	0.001216	-2.93	0.014	
D*E	0.010587	0.005294	0.002175	2.43	0.033	
A*B*C	-0.001275	-0.000638	0.002175	-0.29	0.775	
Ct Pt		0.001875	0.002719	0.69	0.505	
S = 0.00486327						
R-Sq = 86.98% R-Sq(adj) = 75.14%						
Analysis of Variance for F&T (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Blocks	1	0.00000495	0.00003117	0.00003117	1.32	0.275
Main Effects	5	0.00112459	0.00086882	0.00017376	7.35	0.003
2-Way Interactions	2	0.00059519	0.00034277	0.00017138	7.25	0.010
3-Way Interactions	1	0.00000203	0.00000203	0.00000203	0.09	0.775
Curvature	1	0.00001125	0.00001125	0.00001125	0.48	0.505
Residual Error	11	0.00026017	0.00026017	0.00002365		
Total	21	0.00199817				

จากตารางที่ 6.5 แสดงให้เห็นว่าผลของการออกแบบการทดลองหลังจากการทำการทดลองเพิ่ม เพื่อพิจารณาอันตรกิริยาที่สนใจคือ DE ซึ่งเป็นคู่แฝงแฝดกับ ABC ว่าอันตรกิริยาเทอมใดที่มีผลต่อสัดส่วนของแม่แบบเสียประเภทรอยขีดข่วนในกระบวนการผลิตเลนส์พลาสติก พบว่าที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 อันตรกิริยาที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 คือ DE มีค่า P-Value เท่ากับ 0.033 ส่วน ABC นั้นมีค่า P-Value เท่ากับ 0.77 จึงสามารถละเลยได้ในการพิตตัวแบบ นอกจากนี้ยังพบว่าได้ว่าอิทธิพลจากบล็อกหรือเวลาในการทดลองไม่มีผลกระทบต่อสัดส่วนของแม่แบบเสียโดยมีค่า P-Value เท่ากับ 0.275

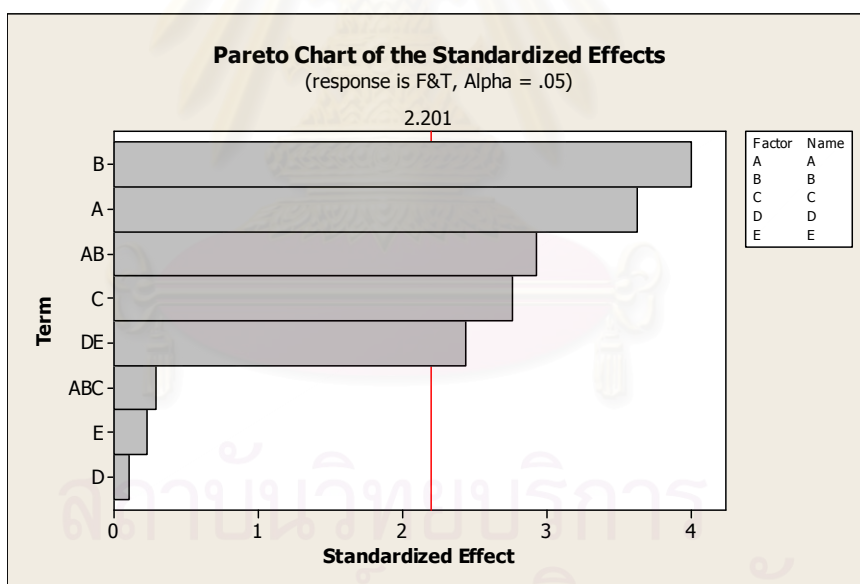
ดังนั้นในการทดลองนี้สรุปได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อสัดส่วนของแม่แบบเสียประเภทรอยขีดข่วนในกระบวนการผลิตเลนส์พลาสติก แบ่งเป็นปัจจัยหลัก (Main Effect) จำนวน 3 ปัจจัย และอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย 2 เทอม คือ

- A: อุณหภูมิออกจากตู้โพลีเมอร์ไรเซชัน
- B: ระยะเวลาที่เก็บงานไว้ในตู้หลังการโพลีเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์
- C: วิธีการแกะแม่แบบออกจากเลนส์
- AB: อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิออกจากตู้โพลีเมอร์ไรเซชัน และระยะเวลาที่เก็บงานไว้ในตู้หลังการโพลีเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์
- DE: อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิในการแกะแม่แบบและชนิดของสปาทูลา

ซึ่งโปรแกรม Minitab สามารถแสดงผลของปัจจัยหลักและอันตรกิริยา ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญออกมาในรูปแบบกราฟ Normal Plot และ แผนภูมิพารโต ดังรูปที่ 6.4 และ 6.5 ตามลำดับ

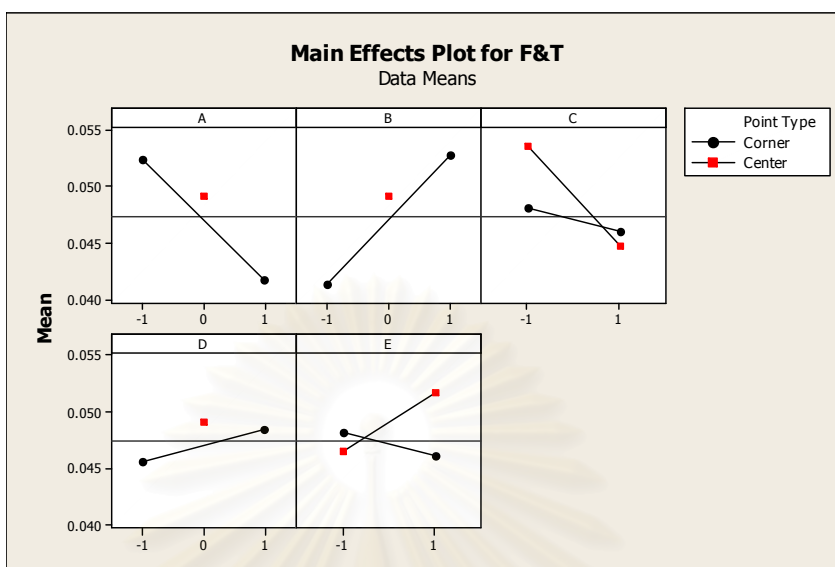


รูปที่ 6.4 Normal Plot ของปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ

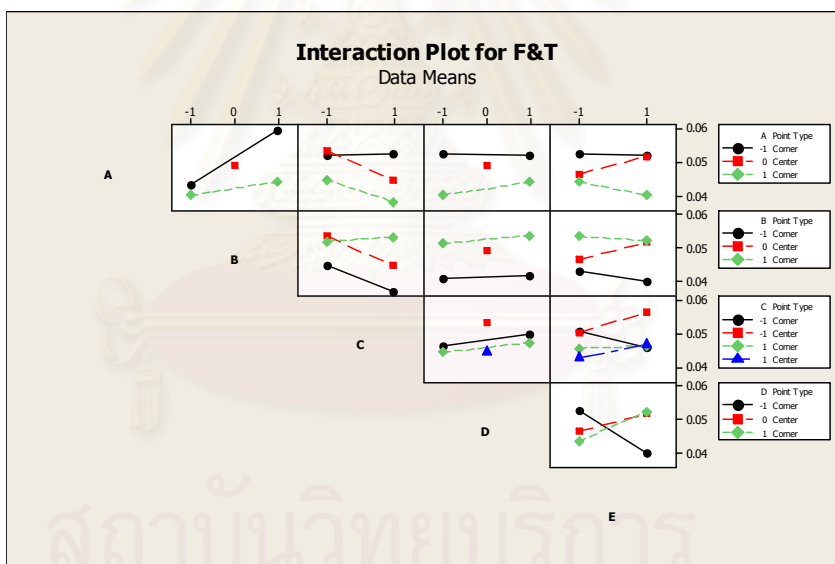


รูปที่ 6.5 แผนภูมิพารेटอของปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากนี้การวิเคราะห์ผลการออกแบบการทดลองเบื้องต้นด้วยโปรแกรม Minitab ยังสามารถแสดงแผนภาพผลของการออกแบบการทดลองของปัจจัยหลักที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง และผลของอันตรกิริยาที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองหรือสัดส่วนของแม่แบบเสียเนื่องจากรอยขีดข่วน ดังรูปที่ 6.6 และ 6.7 ตามลำดับ



รูปที่ 6.6 ผลของปัจจัยหลักที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองคือสัดส่วนของแม่แบบเสียจากรอยขีดข่วน



รูปที่ 6.7 ผลของอันตรกิริยาที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองคือสัดส่วนของแม่แบบเสียจากรอยขีดข่วน

และเพื่อเป็นการตรวจสอบว่าการวิเคราะห์ปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญด้วยวิธีการออกแบบการทดลองนี้สามารถเลือกปัจจัยนำเข้าได้อย่างถูกต้อง จึงได้ทำการตรวจสอบผลการวิเคราะห์ด้วยการเลือกตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับสมการถดถอยโดยใช้วิธี Stepwise Regression ซึ่งเป็นวิธีเลือกตัวแปรอิสระเข้าสมการถดถอยที่สามารถป้องกันการเกิดปัญหา Multicollinearity หรือการที่ตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กันได้ ซึ่งการเกิดปัญหานี้จะทำให้สมการถดถอยและการวิเคราะห์ความถดถอยไม่ถูกต้อง วิธีการนี้มีหลักเกณฑ์คือ นำตัวแปรอิสระเข้าสมการถดถอยครั้งละ 1 ตัว ถ้าตัว

แปรอิสระที่นำเข้ามามีความสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระที่มีอยู่แล้วในสมการถดถอย จะทำการตัดตัวแปรอิสระที่สัมพันธ์กันตัวใดตัวหนึ่งออกจากสมการถดถอย (กัลยา วานิชย์บัญชา, 2545) จากสมการถดถอยที่ 6.1 ซึ่งเป็นตัวแบบที่ต้องการฟิต เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปทำการวิเคราะห์วิธี Stepwise Regression ด้วยโปรแกรม Minitab ได้ผลดังตารางที่ 6.6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จากปัจจัยที่คาดว่าจะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตอบสนอง (y) จำนวน 8 พจน์ มีปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตอบสนองที่ถูกเลือกเข้าสมการถดถอยจำนวน 5 พจน์ คือ A, B, C, AB และ DE ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยการออกแบบการทดลองข้างต้น จึงทำการตัดอันตรกิริยา ABC ออกจากสมการถดถอยที่ 6.1 ได้สมการถดถอยที่เหมาะสมดังนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{45}x_4x_5 + \varepsilon \quad (6.3)$$

ตารางที่ 6.6 ผลการวิเคราะห์ Stepwise Regression ด้วยโปรแกรม Minitab

Stepwise Regression: F&T versus A, B, C, D, E, AB, DE, ABC					
Alpha-to-Enter: 0.05 Alpha-to-Remove: 0.05					
Response is F&T on 8 predictors, with N = 22					
Step	1	2	3	4	5
Constant	0.04739	0.04739	0.04739	0.04739	0.04712
B	0.0057	0.0051	0.0047	0.0050	0.0050
T-Value	2.87	3.02	3.26	3.91	4.66
P-Value	0.009	0.007	0.004	0.001	0.000
DE		0.0049	0.0045	0.0048	0.0048
T-Value		2.89	3.12	3.74	4.46
P-Value		0.009	0.006	0.002	0.000
A			-0.0043	-0.0045	-0.0045
T-Value			-2.94	-3.55	-4.23
P-Value			0.009	0.002	0.001
C				-0.00290	-0.00290
T-Value				-2.52	-3.00
P-Value				0.022	0.008
AB					-0.0030
T-Value					-2.85
P-Value					0.011
S	0.00840	0.00718	0.00606	0.00532	0.00447
R-Sq	29.20	50.85	66.82	75.84	83.99
R-Sq(adj)	25.66	45.68	61.29	70.16	78.99
Mallows Cp	41.6	25.4	13.9	8.3	3.5

6.4 การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ

การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญในกรณีที่ไม่มียทธิพลเนื่องจากความโค้ง (Curvature) เกิดขึ้นกับตัวแบบ สามารถทำการเลือกสรุประดับของปัจจัยที่มีนัยสำคัญจาก Main Effects Plot หรือ Interaction Plot ได้ทันทีโดยทำการเลือกระดับของปัจจัยที่แสดงผลของตัวแปรตอบสนองหรือสัดส่วนของแม่แบบเสียจากรอยขีดขวางที่มีค่าต่ำที่สุด จาก Main Effects Plot รูปที่ 6.6 แสดงให้เห็นว่าระดับของปัจจัย C ที่ให้ค่าของตัวแปรตอบสนองต่ำที่สุดคือ ระดับสูง (+1) และจาก Interaction Plot รูปที่ 6.7 พบว่าระดับของปัจจัยจากอันตรกิริยา AB ที่ให้ค่าของตัวแปรตอบสนองต่ำที่สุด คือ A ที่ระดับสูง (+1) และ B ที่ระดับต่ำ (-1) ส่วนอันตรกิริยา DE พบว่าระดับของปัจจัยที่แสดงค่าของตัวแปรตอบสนองต่ำที่สุดคือ D ที่ระดับต่ำ (-1) และ E ที่ระดับสูง (+1) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.7 ระดับของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญที่เหมาะสมทั้ง 5 ปัจจัย

สัญลักษณ์ของปัจจัย	คำอธิบาย	ระดับ (Coded Units)	ระดับที่เหมาะสม	หน่วย
A	อุณหภูมิออกจากตู้โพลีเมอร์ไรเซชัน	1	130	องศาเซลเซียส
B	ระยะเวลาที่เก็บงานไว้ในตู้หลังการโพลีเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์	-1	2	ชั่วโมง
C	วิธีการแกะแม่แบบออกจากเลนส์	1	วิธีที่ 2	-
D	อุณหภูมิในการแกะแม่แบบ	-1	90	องศาเซลเซียส
E	ชนิดของสปาทูลา	1	ชนิดรูป	-

นอกจากนี้ยังสามารถหาระดับที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยโดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimization ของโปรแกรม Minitab ซึ่งจะแสดงระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยเป็นค่าที่จุดยอด เนื่องจากไม่มีอิทธิพลเนื่องจากความโค้ง และวิธีการนี้ยังสามารถทำการคำนวณค่าทำนาย (Predictive Value) ของตัวแปรตอบสนองได้ โดยมีที่มาจากสมการของตัวแบบถดถอย (Regression Models) ซึ่งหาได้จากการนำค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient) ที่ได้จากการวิเคราะห์ Stepwise Regression หรือจากการวิเคราะห์ผลการออกแบบการทดลอง ของปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ แสดงดังตารางที่ 6.6 และตารางที่ 6.8 ตามลำดับ มาเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของเสียกับปัจจัยนำเข้า เพื่อทำการหาระดับของปัจจัยที่

เหมาะสมที่ทำให้ได้ค่าตัวแปรตอบสนองหรือสัดส่วนแม่แบบเสียที่ต่ำที่สุด ได้สมการทำนายดังสมการที่ 6.4 ซึ่งแสดงสมการถดถอยแบบเข้ารหัส (Coded Units) และสมการที่ 6.5 แสดงสมการถดถอยแบบค่าธรรมชาติ (Natural Units หรือ Uncoded Units)

$$\begin{aligned} \text{Defective Rate (F\&T)} = & 0.044871 - 0.004499 A + 0.004960 B - 0.002918 C + 0.000224 D \\ & - 0.000247 E - 0.003559 AB + 0.004756 DE \end{aligned} \quad (6.4)$$

$$\begin{aligned} \text{Defective Rate (F\&T)} = & 0.0018071 + 0.000247099 A + 0.0199074 B - 0.00291767 C \\ & + 0.000022388 D - 0.0478041 E - 0.000142357 AB + 0.000475570 DE \end{aligned} \quad (6.5)$$

โดยตัวแบบถดถอยนี้มีค่า $R^2(\text{adj})$ เท่ากับ 77.04% ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ และจากตัวแบบนี้ ถึงแม้ว่าผลของปัจจัยหลัก D และ E จะไม่มีผลกับตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ แต่พบว่าอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย 2 ปัจจัยนี้ผลกับตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงนำปัจจัย D และ E มาทำการวิเคราะห์ผลด้วย

ตารางที่ 6.8 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลอง (เฉพาะปัจจัยที่มีนัยสำคัญ)

Factorial Fit: F&T versus Block, A, B, C, D, E					
Estimated Effects and Coefficients for F&T (coded units)					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		0.044871	0.001920	23.37	0.000
Block		0.002293	0.001920	1.19	0.255
A	-0.008999	-0.004499	0.001122	-4.01	0.002
B	0.009920	0.004960	0.001122	4.42	0.001
C	-0.005835	-0.002918	0.001012	-2.88	0.014
D	0.000448	0.000224	0.001122	0.20	0.845
E	-0.000494	-0.000247	0.001045	-0.24	0.817
A*B	-0.007118	-0.003559	0.001169	-3.05	0.010
D*E	0.009511	0.004756	0.001122	4.24	0.001
Ct Pt		0.001875	0.002613	0.72	0.487

S = 0.00467438
R-Sq = 86.88% R-Sq(adj) = 77.04%

ในการหาค่าตัวแปรตอบสนองที่เหมาะสมที่สุดจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab ค่าสัดส่วนของแม่แบบเสียที่ต่ำที่สุดที่ได้จะมีค่าเท่ากับการคำนวณจากสมการของตัวแบบถดถอยข้างต้น ผลการวิเคราะห์เพื่อหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญทั้ง 5 ปัจจัย แสดงดังตารางที่ 6.9 และรูปที่ 6.8 โดยข้อมูลที่น่าวิเคราะห์ในตารางที่ 6.10 ยังคงเป็นข้อมูลสัดส่วนของเสียที่ได้

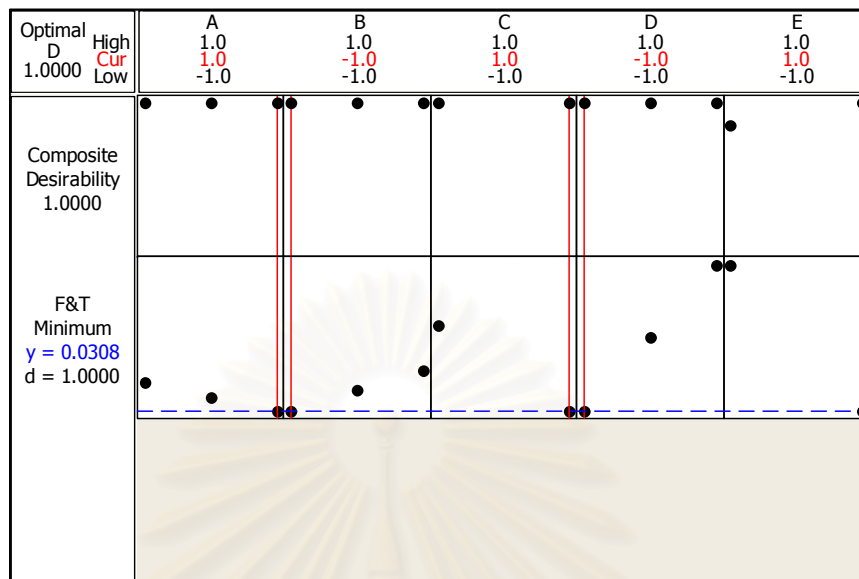
ทำการแปลงค่าด้วยวิธี Freeman และ Tukey ดังนั้น ค่าเป้าหมาย (Target) ที่ 0.039 จึงเป็นข้อมูลที่ได้ทำการแปลงค่าเช่นกัน

ผลจากการวิเคราะห์หาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดด้วยฟังก์ชัน Response Optimization ของโปรแกรม Minitab พบว่าได้ระดับของปัจจัยเช่นเดียวกับวิธีการเลือกจาก Main Effects Plot และ Interaction Plot ดังแสดงในตารางที่ 6.7 และได้ค่าทำนายของสัดส่วนแม่แบบเสียจากคำหนิประเภทรอยขีดข่วน (y) มีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 0.0308 ซึ่งเป็นค่าที่แปลงค่าโดยวิธี Freeman และ Tukey หากแปลงค่ากลับเป็นค่าสัดส่วนของเสียจะได้ 0.09% ซึ่งต่ำกว่าเป้าหมายที่กำหนดไว้ที่ 0.15%

ตารางที่ 6.9 ผลการหาค่าผลตอบที่เหมาะสมที่สุด (Response Optimization) โดยโปรแกรม Minitab

Response Optimization						
Parameters						
	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
F&T	Minimum	0.039	0.039	0.051	1	1
Global Solution						
A	=	1				
B	=	-1				
C	=	1				
D	=	-1				
E	=	1				
Predicted Responses						
F&T	=	0.0308263	,	desirability =	1.000000	
Composite Desirability = 1.000000						

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.8 Optimization Plot จากโปรแกรม Minitab

6.5 สรุประยะการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการออกแบบการทดลองเพิ่มจากการออกแบบการทดลองในขั้นตอนก่อนหน้า โดยเลือกทำการทดลองเพิ่มเฉพาะบางส่วนเพื่อให้ทราบเฉพาะอันตรกิริยาที่สนใจเท่านั้น (De-aliasing Interaction) นั่นคือทำการ De-alias อันตรกิริยา DE และ ABC จากนั้นจึงนำผลการทดลองทั้งในขั้นตอนก่อนหน้าและในการทดลองเพิ่มมาวิเคราะห์ โดยมีการแปลงค่าของตัวแปรตอบสนองให้เป็นไปตามสมมติฐานเรื่องความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนของการออกแบบการทดลองด้วยวิธีของ Freeman และ Tukey ดังเช่นในบทที่ 5 และทำการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) เมื่อพบว่าข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ จึงได้ทำการวิเคราะห์ผลพบว่าอันตรกิริยาที่ทำการ De-alias นั้นอันตรกิริยา DE มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นเทอมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญจึงประกอบไปด้วย A, B, C, AB และ DE จึงนำไปปรับปรุงหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสม โดยการคำนวณค่าทำนายของตัวแปรตอบสนองจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ เพื่อหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ค่าตัวแปรตอบสนองหรือสัดส่วนแม่แบบเสียที่ต่ำที่สุด ได้ระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยดังตารางที่ 6.7 เพื่อนำไปปรับปรุงกระบวนการผลิตให้ดีขึ้นและใช้งานจริงต่อไป

บทที่ 7

ระยะการติดตามควบคุม (Control Phase)

7.1 บทนำ

ระยะติดตามควบคุมนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายของงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบไปด้วยการทดสอบยืนยันผลเป็นระยะเวลา 1 เดือน โดยปรับค่าปัจจัยนำเข้าที่สำคัญตามค่าที่ได้กำหนดไว้ เพื่อตรวจสอบว่าสัดส่วนของเสียเป็นไปตามผลการทดลองหรือไม่ จากนั้นจัดทำแผนควบคุม (Control Plan) แผนภูมิควบคุมที่เหมาะสมกับลักษณะของข้อมูลที่มีอยู่ และทำเป็นมาตรฐานเพื่อรักษามาตรฐานหลังจากที่ได้ดำเนินการปรับปรุง และป้องกันไม่ให้เกิดข้อบกพร่องซ้ำอีก รวมทั้งทำการประเมินและสรุปผลการปรับปรุงด้วย

7.2 การทดสอบยืนยันผล

เป็นการทดสอบเพื่อยืนยันผลสรุปของค่าปัจจัยนำเข้าที่สำคัญทั้งหมด โดยศึกษาปริมาณสัดส่วนของเสีย หลังจากปรับค่าปัจจัยนำเข้าตามค่าที่เหมาะสมที่ได้จากขั้นตอนการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ ดังแสดงในตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 ระดับของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญที่เหมาะสมทั้ง 5 ปัจจัยเพื่อใช้ในการทดสอบยืนยันผล

สัญลักษณ์ของปัจจัย	คำอธิบาย	ระดับที่เหมาะสม	หน่วย
A	อุณหภูมิออกจากตู้โพลีเมอร์ไรเซชัน	130	องศาเซลเซียส
B	ระยะเวลาที่เก็บงานไว้ในตู้หลังการโพลีเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์	2	ชั่วโมง
C	วิธีการแกะแม่แบบออกจากเลนส์	วิธีที่ 2	-
D	อุณหภูมิในการแกะแม่แบบ	90	องศาเซลเซียส
E	ชนิดของสปาทุลา	ชนิดกรด	-

7.2.1 การทำการทดลอง

ทำการเตรียมการทดลองโดยการเตรียมเครื่องมือและเครื่องจักรที่จำเป็นต้องใช้ในการทดลองให้พร้อม รวมทั้งทำการอบรมพนักงานที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง ให้เข้าใจถึงการปรับตั้งพารามิเตอร์ วิธีการทำงาน รวมถึงการใช้เครื่องมือต่างๆ ในการทดลองให้ถูกต้องกับระดับที่ต้องการ รวมทั้งวิธีการเก็บข้อมูลด้วย โดยทำการทดลองกับผลิตภัณฑ์ 1.6FSV ที่ทำการผลิตปกติในแต่ละวันเป็นเวลา 1 เดือน ซึ่งขั้นตอนของการทดลองแสดงดังแผนภูมิการไหล รูปที่ 7.1 และมีรายละเอียดในการทดลองดังนี้

1. ทำการประกอบแม่แบบสำหรับผลิตภัณฑ์ 1.6FSV และเติมโมโนเมอร์ลงในแม่แบบโดยวิธีการผลิตเดิมที่มีอยู่
2. จากนั้นนำงานเหล่านั้นมาทำการอบในตู้โพลีเมอร์ไรเซชัน โดยใช้โปรไฟล์การอบงานให้ถูกต้องกับงาน 1.6FSV คือโปรไฟล์แบบที่ 55 (Profile Pattern No.55)
3. เมื่อเริ่มการโพลีเมอร์ไรเซชัน ให้ทำการตรวจสอบอุณหภูมิของตู้อบทุกๆ 1 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่าการโพลีเมอร์ไรเซชัน ได้อุณหภูมิที่ต้องการ โดยเปรียบเทียบอุณหภูมิจริง (PV; Present Value) กับอุณหภูมิปรับตั้ง (SV; Set Value) รวมทั้งกราฟการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ
4. เมื่อการโพลีเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์ 17 ชั่วโมงที่ระดับอุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียสแล้ว ให้ทำการปรับตั้งอุณหภูมิออกจากตู้โพลีเมอร์ไรเซชัน โดยปรับตั้งอุณหภูมิสุดท้ายหลังการโพลีเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์ด้วยการปรับตั้งอุณหภูมิที่ตัวเครื่องให้เท่ากับ 130 °C จาก Manual Switch และทำการเก็บงานไว้ในตู้อบเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนนำงานออกจากตู้อบให้ทำการตรวจสอบที่ตัวเครื่องให้อุณหภูมิจริง (PV; Present Value) เท่ากับอุณหภูมิปรับตั้ง (SV; Set Value) ด้วย คือที่ 130 °C ด้วยจากนั้นนำงานออกจากตู้อบ
5. เมื่อนำงานออกจากตู้โพลีเมอร์ไรเซชัน ตามอุณหภูมิและระยะเวลาที่กำหนดแล้ว นำงานไปใส่ในตู้เก็บงาน (Holding Oven) เพื่อรักษาอุณหภูมิการแคะงานให้เป็นไปตามที่กำหนด โดยปรับตั้งค่าอุณหภูมิของตู้เก็บงานให้สูงกว่าอุณหภูมิแคะงาน 10 องศาเซลเซียส คือ เพิ่มจากอุณหภูมิแคะงานที่ 90 องศาเซลเซียสเป็นค่าปรับตั้งอุณหภูมิของตู้เก็บงานที่ 100 องศาเซลเซียส
6. ก่อนนำงานออกจากตู้เก็บงานเพื่อไปทำการแคะให้ตรวจสอบที่ตัวเครื่องให้อุณหภูมิจริง (PV; Present Value) เท่ากับอุณหภูมิปรับตั้ง (SV; Set Value) ด้วย คือที่ 100 °C จากนั้นทำการแคะคลิป (Clip) และกาสเก็ต (Gasket) ออกจากแม่แบบแซนด์วิช (Sandwich Mold)
7. แคะแม่แบบออกจากเลนส์โดยใช้สปาทุลาชนิดรูด ต้องทำการแคะหลังจากการแคะคลิป (Clip) และกาสเก็ต (Gasket) ทันที ห้ามมีการพักงานไว้ จากนั้นแคะเลนส์ที่ติดกับแม่แบบอีกด้านซึ่งปกติแล้วจะเป็นแม่แบบตัวบวก (Convex Mold) ด้วยการใช้ลมซึ่งมีความดัน 6 บาร์ เป่าเพื่อให้อากาศเข้าไปแทนที่ระหว่างเลนส์และแม่แบบจนกว่าเลนส์จะหลุดออกจากแม่แบบเอง

8. เมื่อแม่แบบเต็มตะกร้าใส่แม่แบบ (Rack) จึงนำแม่แบบไปล้างด้วยเครื่องล้างแม่แบบ

9. ตรวจสอบแม่แบบด้วยสายตา และบันทึกข้อมูลแม่แบบเสียในแผ่นรายการตรวจสอบ

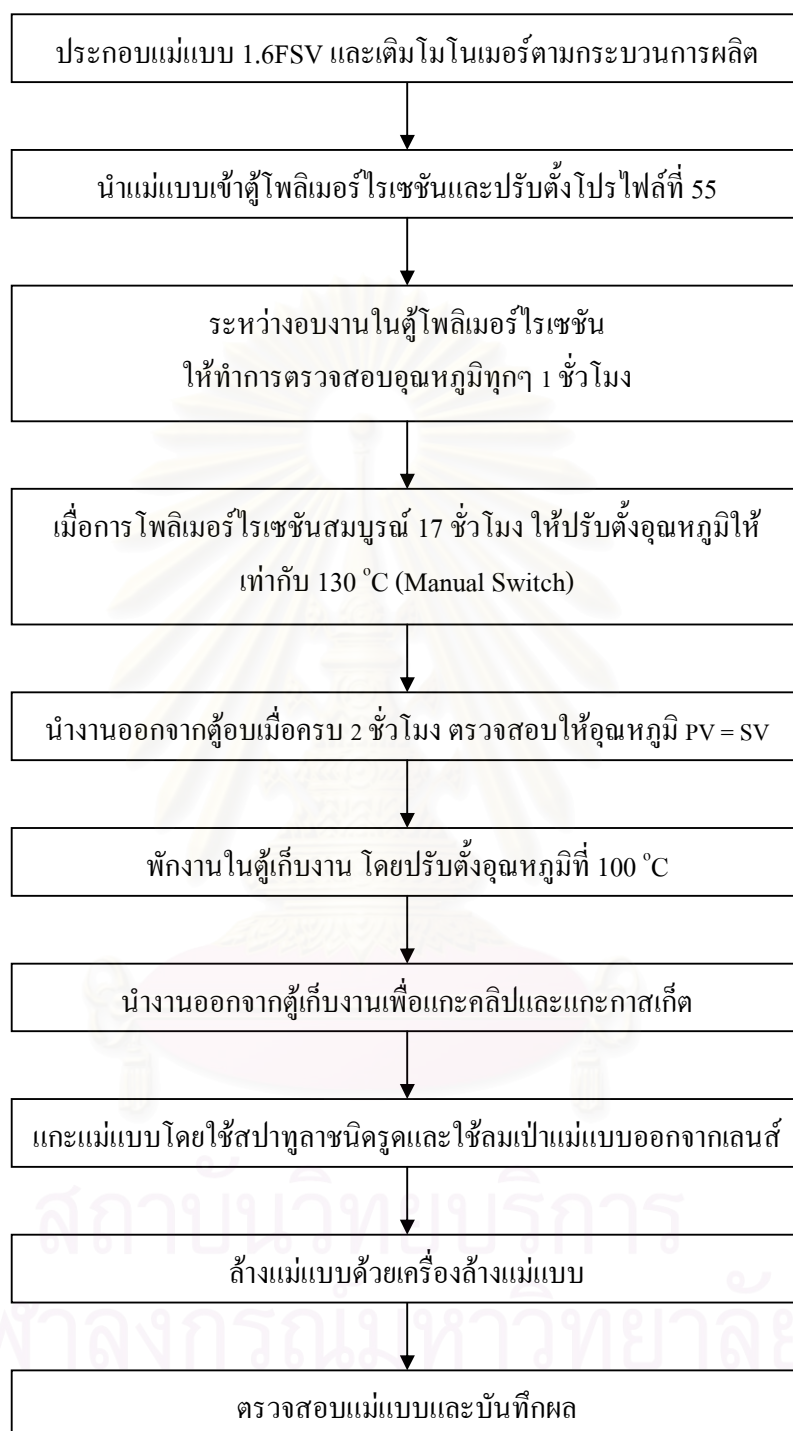
7.2.2 การตรวจติดตามผลโดยใช้แผนภูมิควบคุม

ในการยืนยันผลนั้นจะทำการตรวจติดตามโดยใช้แผนภูมิควบคุม ซึ่งในกรณีที่มีข้อมูลเป็นจำนวนของเสีย (Defectives) หรือสัดส่วนของเสีย แผนภูมิควบคุมตามลักษณะ (Attribute Control Charts) ที่ใช้นิยมใช้โดยทั่วไปคือ pn chart เมื่อขนาดตัวอย่างมีค่าคงที่ หรือ p chart เมื่อขนาดตัวอย่างไม่คงที่ แต่หากข้อมูลที่มีสัดส่วนของเสียต่ำมากหรือกระบวนการที่มีคุณภาพสูงดังเช่นงานวิจัยนี้ การใช้แผนภูมิ np หรือแผนภูมิ p จะมีข้อเสียหรือข้อจำกัด ดังต่อไปนี้ (Xie et al., 1998)

- ต้องรู้ขนาดตัวอย่างที่แน่นอน ดังนั้นการตัดสินใจใดๆ ในการแก้ปัญหาจึงทำได้ต่อเมื่อมีการผลิตและตรวจสอบจนถึงขนาดตัวอย่างที่กำหนด ซึ่งการกำหนดขนาดตัวอย่าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ข้อมูลมีสัดส่วนของเสียที่ต่ำ หากขนาดตัวอย่างน้อยเกินไปจะทำให้ไม่สามารถตรวจจับความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ ส่วนการกำหนดขนาดตัวอย่างที่มากเกินไปจะส่งผลให้การเตือนความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับกระบวนการผลิตทำได้ช้า รวมทั้งทำให้ค่าใช้จ่ายสูงตามไปด้วย

- กรณีที่ p มีค่าต่ำมากและขนาดตัวอย่างที่กำหนดมีค่าน้อย อาจทำให้ขอบเขตควบคุมล่าง (LCL) มีค่าติดลบ ส่งผลให้ในการควบคุมหรือการตรวจติดตามกระบวนการผลิตไม่สามารถทราบได้ว่ากระบวนการปรับปรุงขึ้นหรือไม่ เนื่องจากข้อมูลของเสียไม่มีโอกาสต่ำกว่าเส้นขอบเขตควบคุมล่าง กล่าวคือของเสียในกระบวนการผลิตไม่สามารถมีค่าต่ำกว่า 0 ได้นั่นเอง

- กรณีที่ p มีค่าต่ำมากและขนาดตัวอย่างที่กำหนดมีค่าน้อย การประมาณค่าการแจกแจงทวินามให้เป็นการแจกแจงปกติซึ่งเป็นสมมติฐานในการใช้ขอบเขต 3 ซิกมา จะไม่สมเหตุสมผล กล่าวคือเมื่อค่า p มีค่าน้อยมาก ขอบเขตควบคุมบน (UCL) ของแผนภูมิ np อาจมีค่าต่ำกว่า 1 ส่วนแผนภูมิ p อาจมีค่าต่ำกว่า $1/n$ ดังนั้นทุกๆ การเกิดงานเสีย 1 ชิ้นก็จะออกนอกขอบเขตควบคุมบน ซึ่งส่งผลให้เกิดความผิดพลาดของการเตือน (Alarm)



รูปที่ 7.1 แผนภูมิการไหลของวิธีการทดลองในขั้นตอนขึ้นชั้นผล

จากข้อจำกัดของแผนภูมิ np หรือแผนภูมิ p ข้างต้น Xie et al. (1998) จึงได้นำเสนอแผนภูมิควบคุมตามลักษณะที่เหมาะสมในกรณีที่สัดส่วนของเสียมีค่าต่ำมากเพื่อการตัดสินใจในการแก้ไขปัญหาที่เหมาะสมและทันต่อเหตุการณ์ ได้แก่ แผนภูมิ CCC-r ซึ่งเป็นแผนภูมิที่นำเอาจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ตรวจสอบทั้งหมดจนพบผลิตภัณฑ์บกพร่อง r ขึ้นมาลงจุดค่าแทนสัดส่วนของเสียใน p Chart หรือแทนจำนวนผลิตภัณฑ์บกพร่องใน np Chart ซึ่งเป็นแผนภูมิที่พัฒนามาจากแผนภูมิ Cumulative Count of Conforming (CCC chart) หรือแผนภูมิที่นำเอาจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ตรวจสอบทั้งหมดจนพบผลิตภัณฑ์บกพร่อง 1 ขึ้นมาพลอตค่าแทนจำนวนผลิตภัณฑ์บกพร่อง (Xie and Goh, 1997)

สมการในการคำนวณหาขอบเขตควบคุมบน (UCL) ขอบเขตควบคุมล่าง (LCL) และเส้นกึ่งกลาง (CL) ของแผนภูมิ CCC-r แสดงดังสมการที่ 2.26 ถึง 2.28 โดยวิธีการอ่านเพื่อการตัดสินใจของแผนภูมิ CCC-r นี้จะตรงข้ามกับการอ่านแผนภูมิ np หรือแผนภูมิ p คือ เมื่อจุดอยู่เหนือขอบเขตควบคุมบน (UCL) หมายถึง กระบวนการปรับปรุงขึ้น และในทางตรงกันข้ามกันเมื่อจุดอยู่ใต้ขอบเขตควบคุมล่าง (LCL) หมายถึง กระบวนการแยกลงนั่นเอง

จากลักษณะของแผนภูมิ CCC-r ที่ได้อธิบายไปข้างต้น ผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้แผนภูมิ CCC-r นี้ในการตรวจติดตามผลหลังการปรับปรุง โดยเลือกค่า r เท่ากับ 2 เนื่องจากค่า r ยิ่งน้อย ความรวดเร็วในการตัดสินใจแก้ไขเมื่อเกิดความผิดปกติก็จะเร็วขึ้น แต่หากเลือกค่า r เท่ากับ 1 นั้น (หรือแผนภูมิ CCC) ความน่าเชื่อถือของการตรวจจับความเปลี่ยนแปลง (shift) ของค่า p ก็จะมีน้อย (เนื่องจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ของจำนวนชิ้นงานที่ทำการตรวจสอบจนพบผลิตภัณฑ์บกพร่อง r ขึ้น จะมีค่าเป็น $1/\sqrt{r}$) (Chan, 2003) และเมื่อเปรียบเทียบค่าขอบเขตควบคุมจากตารางที่ 7.2 พบว่าเมื่อสัดส่วนของเสียเท่ากับ 0.0025 (สัดส่วนของเสียในปัจจุบันของโรงงาน) ที่ r เท่ากับ 1 นั้น LCL มีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นการออกนอกเส้น LCL จะไม่เกิดขึ้นเลยนอกจากในกรณีที่พบของเสียอย่างน้อย 2 ตัวคิดกันเท่านั้น ดังนั้นการเลือก r เท่ากับ 2 จึงสมเหตุสมผลกว่าในการตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้น อาจกล่าวได้ว่าแผนภูมิ CCC ($r=1$) เหมาะกับกรณีที่สัดส่วนของเสีย น้อยมากๆ เช่น น้อยกว่า 0.0001 (Xie et al., 1998)

ตารางที่ 7.2 ขอบเขตควบคุมของ CCC-r เมื่อ r เท่ากับ 1, 2 และ 3 ($p = 0.0025$)

p	CCC-1			CCC-2			CCC-3		
	UCL	CL	LCL	UCL	CL	LCL	UCL	CL	LCL
0.0001	66,074	6,932	13	91,895	16,786	530	114,341	26,746	2,118
0.0025	2,750	289	1	3,702	700	23	4,520	1,115	90

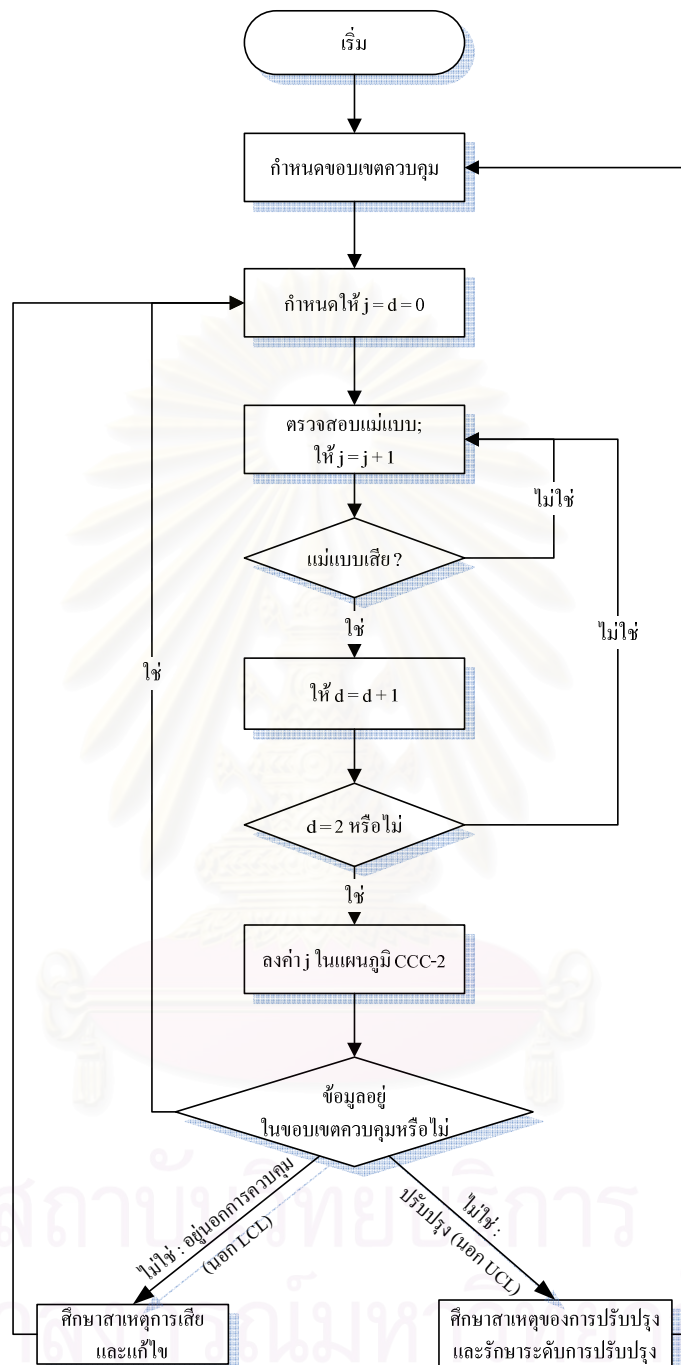
ดังนั้นในการเก็บข้อมูลของแม่แบบเสียนี้จึงต้องทำการเก็บข้อมูลเป็นจำนวนแม่แบบที่ทำการตรวจสอบทั้งหมดจนพบแม่แบบเสีย 2 ชิ้น โดยให้พนักงานตรวจสอบแม่แบบทำการบันทึกค่าลงในแผ่นรายการตรวจสอบ (Check Sheet) แสดงในภาคผนวก ข วิธีการเก็บข้อมูลของแผนภูมิ CCC-2 แสดงดังแผนภูมิการไหลรูปที่ 7.2

7.2.3 การวิเคราะห์ผลและสรุปการทดสอบยืนยันผล

จากการทดสอบยืนยันผลการทดสอบยืนยันผลเป็นระยะเวลา 1 เดือนคือ เดือนมกราคม พ.ศ. 2551 โดยปรับค่าปัจจัยนำเข้าที่สำคัญตามค่าที่ได้กำหนดไว้ และทำการเก็บข้อมูลเป็นจำนวนแม่แบบที่ทำการตรวจสอบทั้งหมดจนพบแม่แบบเสีย 2 ชิ้น เพื่อนำมาสร้างแผนภูมิควบคุมชนิด CCC-r โดยที่ r มีค่าเท่ากับ 2 (ดังที่ได้อธิบายไปในหัวข้อ 7.2.2) ได้แผนภูมิ CCC-2 ดังรูปที่ 7.3 โดยที่ $p = 0.0025$ มีขอบเขตควบคุมเป็น $LCL = 23$, $CL=700$ และ $UCL= 3,702$ จากการพิจารณาแผนภูมิแสดงให้เห็นว่าไม่มีจุดใดๆออกนอก LCL ซึ่งหมายถึงกระบวนการอยู่ในการควบคุม นอกจากนี้ยังพบว่าจุดส่วนใหญ่อยู่บนเส้น CL และมีจุดที่ออกนอก UCL จำนวน 4 จุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการได้ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นนั่นเอง

หากทำการพิจารณาข้อมูลเป็นสัดส่วนของแม่แบบเสีย พบว่าสัดส่วนของแม่แบบเสียจากรอยขีดข่วนในการทดสอบยืนยันผลมีค่าเท่ากับ 0.0008 และสัดส่วนของแม่แบบเสียรวม เท่ากับ 0.0010 ซึ่งมีค่าตามค่าเป้าหมายคือน้อยกว่า 0.0015 ดังนั้นจึงกำหนดให้นำค่าของปัจจัยทั้ง 5 ตามระดับที่ได้จากการทดลองไปใช้ในกระบวนการผลิตจริง เพื่อให้สามารถลดสัดส่วนของแม่แบบเสียได้ตามเป้าหมาย และเมื่อทำการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการผลิตจากข้อมูลการทดสอบยืนยันผลนี้ พบว่าสัดส่วนของเสียที่ 0.0010 หรือ 0.10% นั้นคิดเป็นจำนวนแม่แบบเสีย 956 ตัวในหนึ่งล้านตัว (Part per Million หรือ PPM)

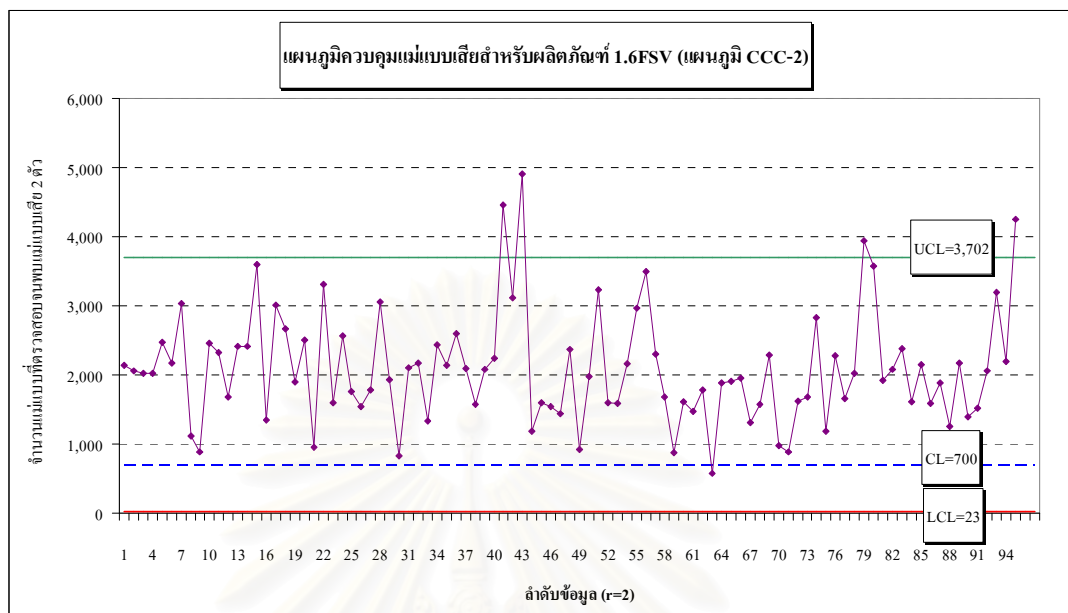
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



j คือ จำนวนแม่แบบที่ตรวจสอบ

d คือ จำนวนแม่แบบเสียที่พบ

รูปที่ 7.2 แผนภูมิการไหลแสดงวิธีการเก็บข้อมูลของแผนภูมิ CCC-2



รูปที่ 7.3 แผนภูมิ CCC-2 ของการทดสอบยืนยันผลระยะเวลา 1 เดือน

7.3 แผนการควบคุม

แผนการควบคุม ได้แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ การควบคุมปัจจัยนำเข้า และการตรวจติดตามคุณภาพของแม่แบบ ซึ่งรายละเอียดของทั้ง 2 ส่วนมีดังต่อไปนี้

7.3.1 การควบคุมปัจจัยนำเข้า

ปัจจัยนำเข้าที่สำคัญที่ทำการควบคุมในแผนควบคุม (Control Plan) มีทั้งหมด 5 ปัจจัย โดยแบ่งเป็นปัจจัยที่อยู่ในกระบวนการโพลิเมอร์ไรเซชัน 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิออกจากตู้โพลิเมอร์ไรเซชัน และระยะเวลาที่เก็บงานไว้ในตู้หลังการโพลิเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์ ส่วนอีก 3 ปัจจัยอยู่ในกระบวนการแกะแม่แบบ ประกอบไปด้วย วิธีการแกะแม่แบบออกจากเลนส์, อุณหภูมิในการแกะแม่แบบ และชนิดของสปาตุลา ปัจจัยเหล่านี้เป็นปัจจัยที่จะต้องทำการควบคุมค่าหรือระดับให้ได้ตามที่กำหนดไว้ รายละเอียดของแต่ละปัจจัยมีดังต่อไปนี้

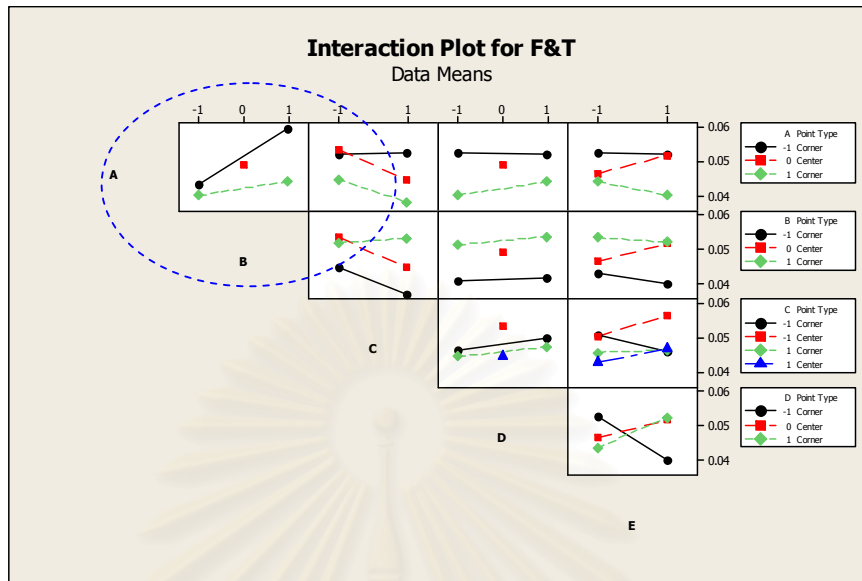
7.3.1.1 กระบวนการ โพลีเมอร์ไรเซชัน

จากผลในกระบวนการโพลีเมอร์ไรเซชัน มีปัจจัยที่ต้องทำการควบคุม 2 ปัจจัยคือ ระยะเวลาที่เก็บงานไว้ในตู้หลังการโพลีเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์ และอุณหภูมิออกจากตู้โพลีเมอร์ไรเซชัน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- อุณหภูมิที่นำงานออกจากตู้โพลีเมอร์ไรเซชัน กำหนดให้มีค่า 130 องศาเซลเซียส ซึ่งการควบคุมปัจจัยนี้สามารถตั้งค่าที่ตัวเครื่องได้ โดยเมื่อการโพลีเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์ที่ 17 ชั่วโมง พนักงานโพลีเมอร์ไรเซชันต้องทำการปรับตั้งอุณหภูมิหลังการโพลีเมอร์ไรเซชันที่ตัวเครื่องให้เท่ากับ 130 องศาเซลเซียส แล้วทิ้งงานไว้ในตู้อบอีก 2 ชั่วโมง ก่อนนำงานออกจากตู้อบ หากไม่มีการปรับตั้งอุณหภูมิใหม่ อุณหภูมิจะลดลงไปจนถึง 80 องศาเซลเซียส โดยแผนการตรวจสอบในปัจจุบันนี้พนักงานโพลีเมอร์ไรเซชันจะทำการตรวจสอบอุณหภูมิจริง (PV; Present Value) เทียบกับอุณหภูมิปรับตั้ง (SV; Set Value) และบันทึกลงในแผ่นรายการตรวจสอบ (แสดงในภาคผนวก ข) ทุกๆ 1 ชั่วโมงเพื่อให้อุณหภูมิโพลีเมอร์ไรเซชันเป็นไปตามที่กำหนดจนกระทั่งถึงชั่วโมงที่ต้องนำงานออกจากตู้อบเพื่อไปแกะ หากอุณหภูมิอุณหภูมิจริง (PV) ไม่เป็นไปตามอุณหภูมิปรับตั้ง (SV) ให้ทำการแจ้งหัวหน้างานเพื่อทำการแก้ไข รวมทั้งแยกงานเหล่านั้นไว้ตรวจสอบคุณภาพต่อไป

- ระยะเวลาที่เก็บงานไว้ในตู้หลังการโพลีเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์คือ 2 ชั่วโมง โดยหลังจากการปรับตั้งอุณหภูมิที่ตัวเครื่องให้เท่ากับ 130 °C ต้องทำการเก็บงานไว้ในตู้อบเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนนำงานออกจากตู้อบ แผนการตรวจสอบสำหรับปัจจัยนี้คือการบันทึกแผ่นรายการตรวจสอบ ซึ่งเป็นรายการเดียวกันกับแผ่นรายการตรวจสอบอุณหภูมิ เนื่องจากการตรวจสอบอุณหภูมิจะต้องกระทำทุกๆ 1 ชั่วโมงจนกระทั่งนำงานออกจากตู้อบ จึงสามารถควบคุมเวลาที่อยู่ในตู้อบได้ด้วยนั่นเอง

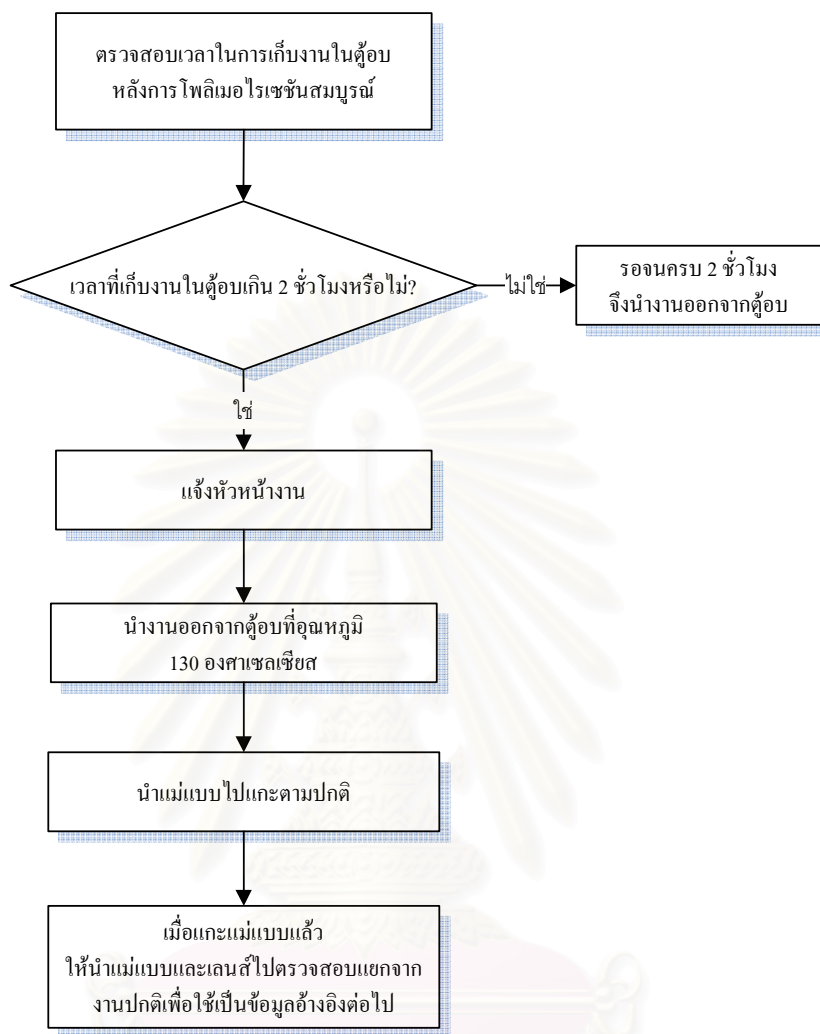
ในการปฏิบัติการแก้ไขหากทำการเก็บงานไว้ในตู้อบมากกว่า 2 ชั่วโมง ให้กำหนดอุณหภูมิที่ออกจากตู้อบที่ 130 องศาเซลเซียสเช่นเดิม เนื่องจากเมื่อพิจารณา Interaction Plot ของ AB ของการออกแบบการทดลอง รูปที่ 7.4 พบว่าเวลาที่เก็บงานไว้ในตู้อบมากกว่า 2 ชั่วโมง (B ที่ 0 หรือ +1) อุณหภูมิที่นำแม่แบบออกจากตู้อบ (A) ที่ระดับ 130 องศาเซลเซียส (+1) จะแสดงผลของสัดส่วนของเสียที่ต่ำกว่าอุณหภูมิมิระดับอื่นแต่เพิ่มขึ้นจากการเก็บงานที่ 2 ชั่วโมงเล็กน้อย (ผลการทดลองในขั้นตอนก่อนหน้าแสดงว่าปัจจัยมีคุณสมบัติเชิงเส้น (Linearity) หรือไม่มีความโค้งของผลตอบ (Curvature) ของปัจจัย)



รูปที่ 7.4 ผลของอันตรกิริยาที่มีผลต่อสัดส่วนของแม่แบบเสียจากรอยขีดข่วน

ปัจจัยทั้ง 2 ปัจจัยที่อยู่ในกระบวนการ โพลีเมอร์ไรเซชันนี้ สามารถควบคุมได้จากตัวเครื่อง และมีค่าที่ค่อนข้างคงที่ ดังนั้น ไม่มีความจำเป็นต้องประยุกต์ใช้แผนภูมิในการควบคุมค่าให้เป็นไปตามที่กำหนด และเพื่อให้การควบคุมการทำงานในขั้นตอนการ โพลีเมอร์ไรเซชันนี้เป็นไปตามมาตรฐานที่ได้กำหนดไว้ จึงได้ทำการปรับปรุงแก้ไขเอกสารคู่มือการปฏิบัติงาน (Work Instruction) ซึ่งได้กล่าวถึงรายละเอียดของวิธีปฏิบัติงานในกระบวนการ โพลีเมอร์ไรเซชันทั้งหมด โดยให้ระบุถึงการควบคุมในส่วนนี้ด้วย ดังแสดงในภาคผนวก ข นอกจากนี้ยังได้จัดทำขั้นตอนในการปฏิบัติการแก้ไขเมื่อมีความผิดพลาดเกิดขึ้นในขั้นตอนนี้ (Out of Control Action Plan; OCAP) แสดงดังรูปที่ 7.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7.5 ขั้นตอนการแก้ไขเมื่อเวลาเก็บงานในตู้อบไม่เป็นไปตามค่าที่กำหนด

7.3.1.2 กระบวนการแกะแม่แบบออกจากเลนส์

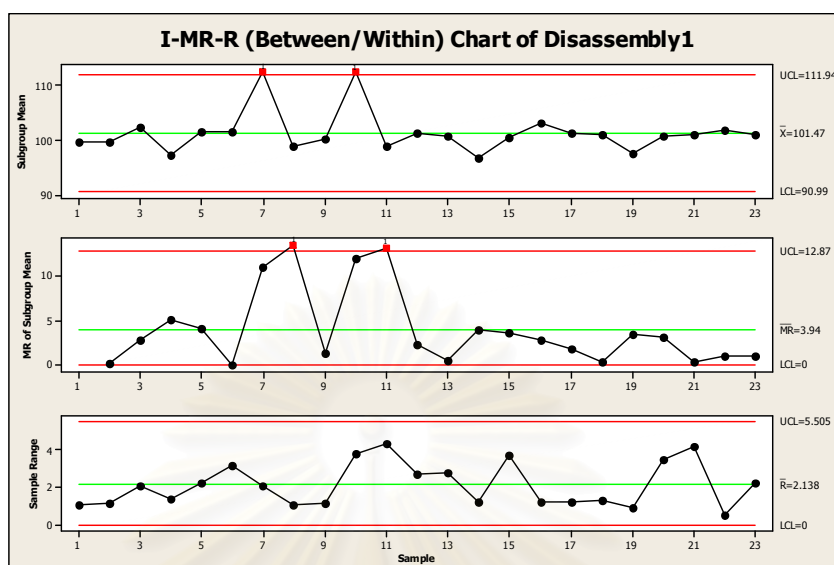
จากขั้นตอนการปรับปรุง พบว่ากระบวนการแกะแม่แบบออกจากเลนส์ มีปัจจัยที่ต้องทำการควบคุมจำนวน 3 ปัจจัยคือ อุณหภูมิในการแกะแม่แบบ, ชนิดของสปาทูลา และวิธีการแกะแม่แบบออกจากเลนส์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- อุณหภูมิในการแกะแม่แบบที่เหมาะสมกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส การควบคุมอุณหภูมินี้กระทำหลังจากนำงานออกจากตู้โพลีเมอร์ไรเซชัน ด้วยการนำงานไปใส่ในตู้เก็บงาน (Holding Oven) เพื่อรักษาอุณหภูมิการแกะงานให้เป็นไปตามที่กำหนด และปรับตั้งอุณหภูมิตู้เก็บงานให้สูงกว่าค่าของอุณหภูมิแกะงาน 10 องศาเซลเซียส นั่นคือปรับตั้งค่าที่ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งการตรวจสอบอุณหภูมิกระทำโดยพนักงานเก็บแม่แบบ โดยทำการตรวจสอบที่

ตัวเครื่องให้อุณหภูมิจริง (PV) เท่ากับอุณหภูมิปรับตั้ง (SV) ที่ 100 องศาเซลเซียสก่อนนำแม่แบบแต่ละถาดออกจากตู้เพื่อนำมาแกะคลิปลและกาสเกิด รวมทั้งทำการตรวจสอบอุณหภูมิของแม่แบบก่อนแกะคลิปลและกาสเกิด 1 ตัวของทุกๆ ถาดบน กลาง (ถาดที่ 8) และล่างสุดของผู้เก็บงาน ส่วนพนักงานแกะแม่แบบให้ทำการตรวจสอบอุณหภูมิของแม่แบบก่อนแกะ 1 ตัวทุกๆ 15 กลุ่ม (Batch) และทำการบันทึกค่าลงในแผ่นรายการตรวจสอบ (แสดงในภาคผนวก ข) นอกจากนี้ยังได้ประยุกต์แผนภูมิควบคุมมาใช้ในการตรวจจับและควบคุมปัจจัยนี้ว่าอยู่ในค่าที่กำหนดหรือไม่ พบว่าข้อมูลทั้ง 2 จุดเป็นข้อมูลแปรผัน (Variable Data) ดังนั้นแผนภูมิควบคุมที่เหมาะสม ได้แก่

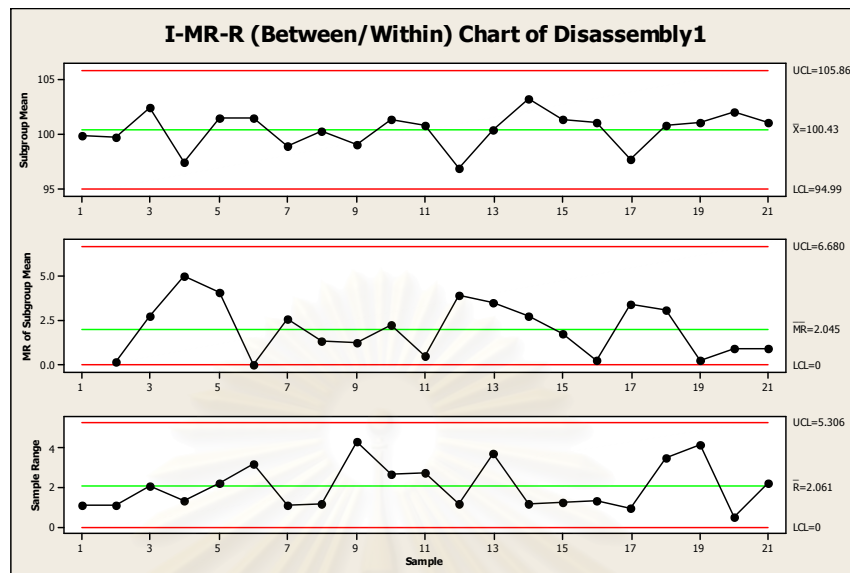
o จุดควบคุมแรก (ก่อนการแกะคลิปลและกาสเกิด) ข้อมูลมีลักษณะเป็นกลุ่มย่อยคือกลุ่มละ 3 ค่า (วัดจากแม่แบบของถาดบน กลาง และล่างของผู้เก็บงาน) แผนภูมิที่จะนำมาใช้ในการควบคุมคือ แผนภูมิควบคุมสามทาง (Three-Way Control Chart) หรือแผนภูมิ I-MR-R ซึ่งเป็นแผนภูมิที่ใช้ในการติดตามหรือประเมินความแปรผันทั้งระหว่างกลุ่มตัวอย่าง และความผันแปรภายในกลุ่มตัวอย่างหรือคลาดเคลื่อนเชิงสุ่ม (Random Error) โดยประกอบไปด้วย 3 แผนภูมิย่อยสองแผนภูมิแรกคือ แผนภูมิควบคุมเชิงเดี่ยว (Individual Chart) และแผนภูมิควบคุมพิสัยเคลื่อนที่ (Moving Range Chart) ของค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มตัวอย่าง ซึ่งจะใช้ค่าพิสัยเคลื่อนที่ระหว่างค่าเฉลี่ยที่ติดกันมาคำนวณขอบเขตควบคุม แผนภูมิสองชนิดนี้ใช้เพื่อติดตามตำแหน่งและความแปรผันของกระบวนการ ส่วนอีกแผนภูมิหนึ่ง คือ แผนภูมิควบคุมพิสัย (R Chart) ใช้ในการติดตามความแปรผันภายในกลุ่มตัวอย่าง (Breyfogle, 2001) เนื่องจากความผันแปรของข้อมูลอุณหภูมิในจุดควบคุมนี้เกิดได้ทั้งจากความผันแปรระหว่างกลุ่มของตัวอย่าง (อุณหภูมิของแม่แบบต่างชุด) และจากความผันแปรภายในกลุ่มตัวอย่าง (อุณหภูมิของแม่แบบในชุดเดียวกันกลุ่มละ 3 ค่า) ดังนั้นแผนภูมิควบคุมสามทางหรือแผนภูมิ I-MR-R นี้จึงเหมาะสมในการนำมาควบคุมในจุดควบคุมนี้เพื่อให้การแก้ไขปัญหาคทำได้อย่างถูกต้อง โดยได้ทำการเก็บข้อมูลเพื่อสร้างแผนภูมิและกำหนดขอบเขตควบคุมเป็นเวลา 1 สัปดาห์ แสดงดังรูปที่ 7.6

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



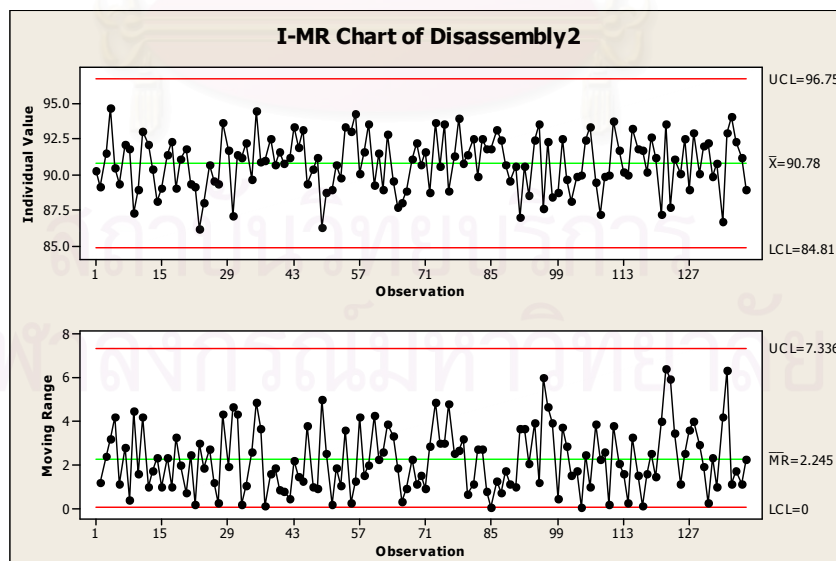
รูปที่ 7.6 แผนภูมิ I-MR-R ช่วงการสร้างแผนภูมิควบคุม

ผลหลังการเก็บข้อมูลเพื่อสร้างแผนภูมิควบคุม I-MR-R จากรูปที่ 7.6 แสดงให้เห็นว่ามีข้อมูลออกนอกขอบเขตควบคุมจำนวน 2 ค่า ซึ่งหลังจากทำการค้นหาสาเหตุของปัญหาพบว่าสาเหตุเกิดจากพนักงานนำงานออกจากตู้เก็บงานเร็วเกินไปทำให้อุณหภูมิยังไม่ได้ค่าตามที่กำหนด จึงได้ทำการกำหนดเวลาที่เก็บแม่แบบไว้ในตู้เก็บงานอย่างน้อยเป็นเวลา 30 นาทีก่อนนำแม่แบบออกมาแกะ เพื่อให้อุณหภูมิได้ค่าตามที่กำหนด โดยได้ระบุไว้ในเอกสารคู่มือการปฏิบัติงานที่ได้จัดทำขึ้น (ภาคผนวก ข) และเนื่องจากสาเหตุของปัญหาเป็นสาเหตุที่ระบุได้ (Assignable Cause) ดังนั้นในการสร้างแผนภูมิควบคุมจึงได้ทำการคำนวณขอบเขตควบคุมของแผนภูมิใหม่โดยการกำจัดข้อมูลที่ออกนอกขอบเขตควบคุมออกไป แสดงดังรูปที่ 7.7



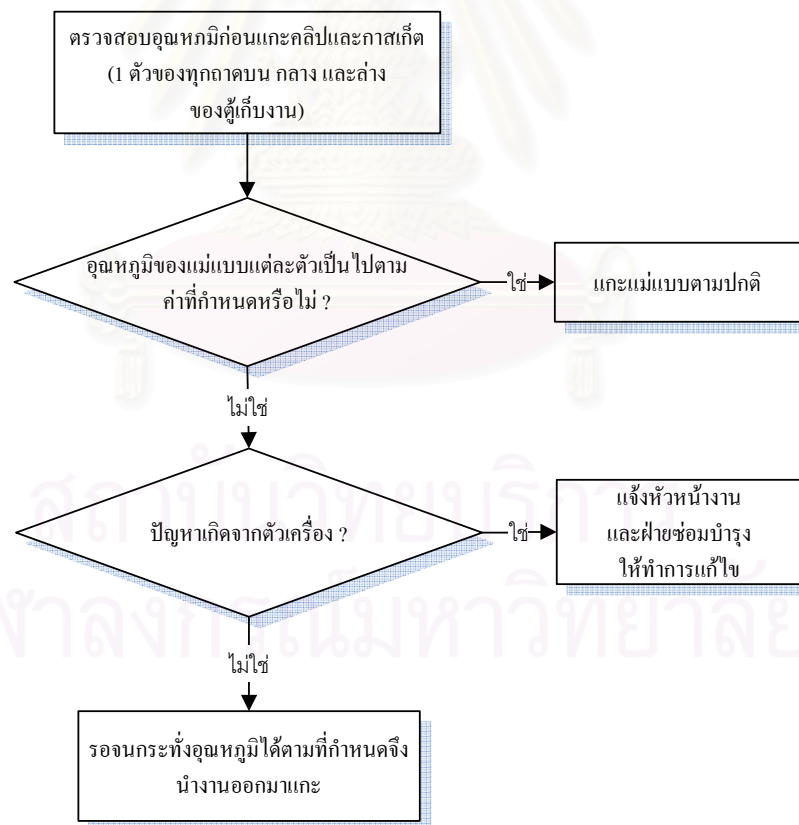
รูปที่ 7.7 แผนภูมิ I-MR-R ช่วงการสร้างแผนภูมิควบคุมหลังกำจัดจุดออกนอกขอบเขตควบคุม
ที่เป็นสาเหตุที่ระบุได้ (Assignable Cause)

o จุดควบคุมที่สอง (ก่อนการแกะแม่แบบออกจากเลนส์) ข้อมูลมีลักษณะเป็นค่าเดียว จึงได้ประยุกต์ใช้แผนภูมิ I-MR ในการควบคุม โดยได้ทำการเก็บข้อมูลเพื่อสร้างแผนภูมิและกำหนดขอบเขตควบคุมเป็นเวลา 1 สัปดาห์ เช่นเดียวกับกับจุดควบคุมแรก แสดงดังรูปที่ 7.8

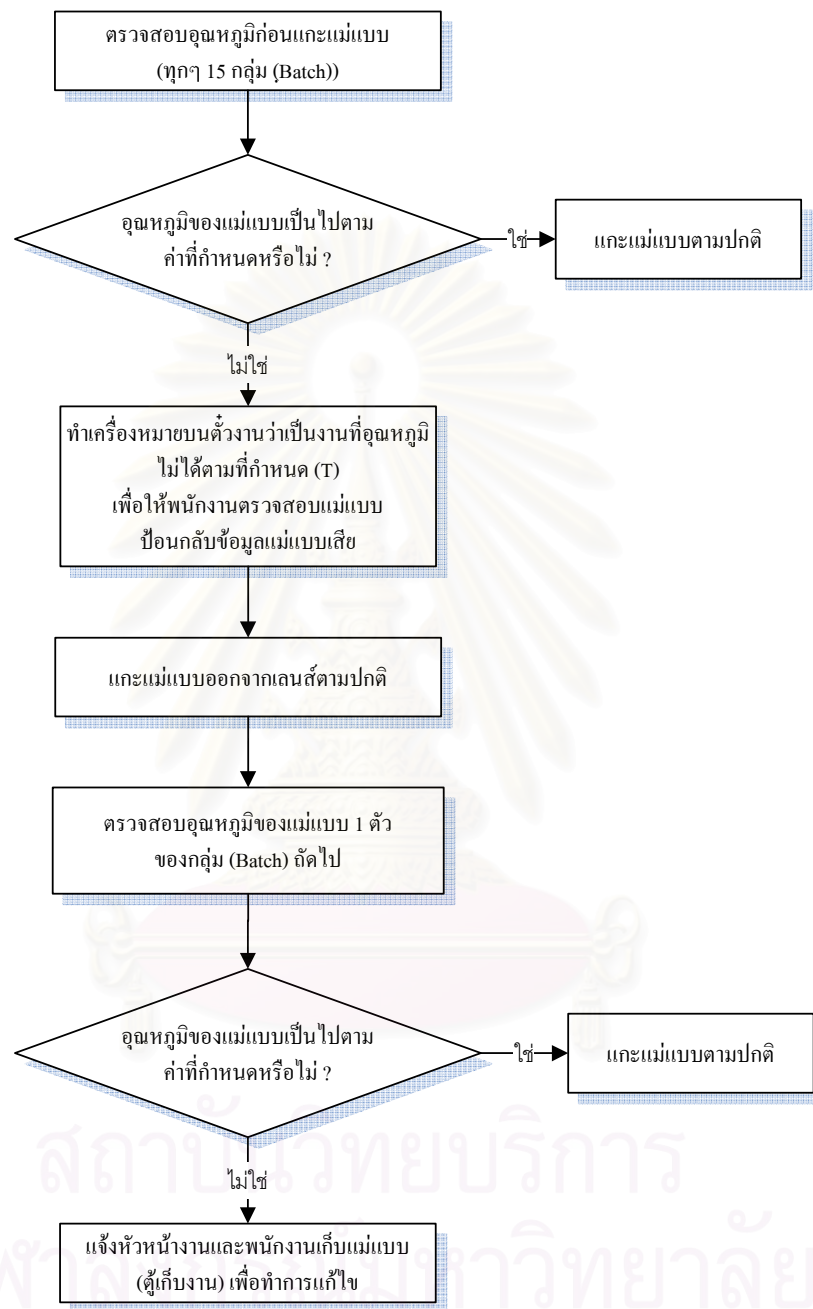


รูปที่ 7.8 แผนภูมิ I-MR ช่วงการสร้างแผนภูมิควบคุม

หลังจากพิจารณาแผนภูมิควบคุมทั้งสองจุดควบคุม พบว่าจุดควบคุมที่ 1 (แผนภูมิ I-MR-R) มีขอบเขตควบคุมล่างและบนเป็น 94.99 และ 105.86 องศาเซลเซียสตามลำดับ ส่วนจุดควบคุมที่ 2 (แผนภูมิ I-MR) มีขอบเขตควบคุมล่างและบนเป็น 84.81 และ 96.85 องศาเซลเซียสตามลำดับ เพื่อการง่ายต่อการควบคุมค่าในการทำงานจริงของพนักงานและสามารถมั่นใจได้ว่าข้อมูลจะไม่ออกนอกขอบเขตควบคุม จึงได้กำหนดข้อกำหนดในการผลิต (Specification) ให้มีค่าสมมาตรกันทั้งขอบเขตบนและล่างโดยมีค่าแคบกว่าขอบเขตควบคุมของแผนภูมิควบคุมเล็กน้อย นั่นคือ 100 ± 5 องศาเซลเซียส สำหรับก่อนการแกะคลิปลและกาสเก็ต และ 90 ± 5 องศาเซลเซียส สำหรับก่อนการแกะแม่แบบ และหากทำการพิจารณาค่าความผิดพลาดแบบที่ 1 (Type I Error) หรือค่า α ของข้อกำหนดในการผลิต (Specification) ที่แคบกว่าขอบเขตควบคุมของแผนภูมิควบคุมนี้ พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.0072 (2.52σ และ -2.99σ) และ 0.0188 (2.12σ และ -2.90σ) ตามลำดับ ซึ่งสามารถยอมรับได้ (แผนภูมิควบคุมตามหลักการของ 3 ซิกมาโดยปกติจะมีค่า α เท่ากับ 0.0027) โดยขั้นตอนการแก้ไขเมื่ออุณหภูมิไม่เป็นไปตามข้อกำหนด แสดงดังรูปที่ 7.9 และ 7.10 ตามลำดับ

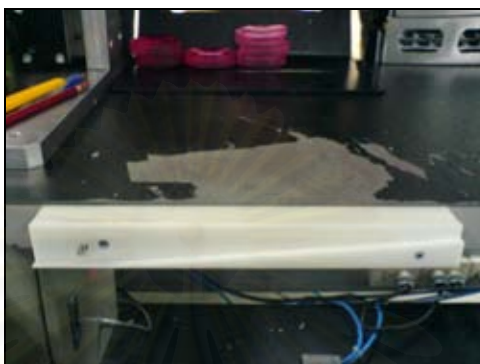


รูปที่ 7.9 ขั้นตอนการแก้ไขเมื่ออุณหภูมิแม่แบบก่อนแกะคลิปลและกาสเก็ตไม่เป็นไปตามข้อกำหนด



รูปที่ 7.10 ขั้นตอนการแก้ไขเมื่ออุณหภูมิก่อนการแกะแม่แบบไม่เป็นไปตามข้อกำหนด

- ชนิดของสปาทุลา กำหนดให้เป็นสปาทุลาแบบใช้รูด ดังแสดงในรูปที่ 7.11 ซึ่งชนิดของสปาทุลานี้ไม่จำเป็นต้องมีการควบคุมเนื่องจากได้กำหนดไว้ตายตัวให้ใช้ในการแกะผลิตภัณฑ์ 1.6FSV โดยได้ระบุในเอกสารการปฏิบัติงาน ดังแสดงในภาคผนวก ข



รูปที่ 7.11 สปาทุลาชนิดรูด

- วิธีการแกะแม่แบบออกจากเลนส์ที่กำหนด คือ ทำการแกะแม่แบบออกจากเลนส์ โดยการใช้สปาทุลาชนิดรูด และต้องทำการแกะหลังจากการแกะด้วยยึด (Clip) และกาสเก็ท (Gasket) ทันที ห้ามมีการพักงานไว้ จากนั้นแกะเลนส์ที่ติดกับแม่แบบอีกด้านซึ่งปกติแล้วจะเป็นแม่แบบตัวบวค (Convex Mold) ด้วยการใช้ลมซึ่งมีความดัน 6 บาร์ เป่าเพื่อให้อากาศเข้าไปแทนที่ระหว่างเลนส์และแม่แบบจนกว่าเลนส์จะหลุดออกจากแม่แบบ ซึ่งรายละเอียดของวิธีการปฏิบัติงานในขั้นตอนการแกะแม่แบบนี้ได้แสดงในเอกสารคู่มือการปฏิบัติงาน (Work Instruction) ภาคผนวก ข โดยพนักงานแกะแม่แบบของผลิตภัณฑ์ 1.6FSV ทุกคนจะได้รับการฝึกอบรมวิธีการแกะนี้จากผู้ฝึกอบรมของโรงงานเพื่อให้สามารถทำการแกะแม่แบบได้อย่างถูกวิธี

จากรายละเอียดการควบคุมข้างต้นสามารถสรุปแผนควบคุมของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญทั้ง 5 ปัจจัย ได้ดังตารางที่ 7.3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

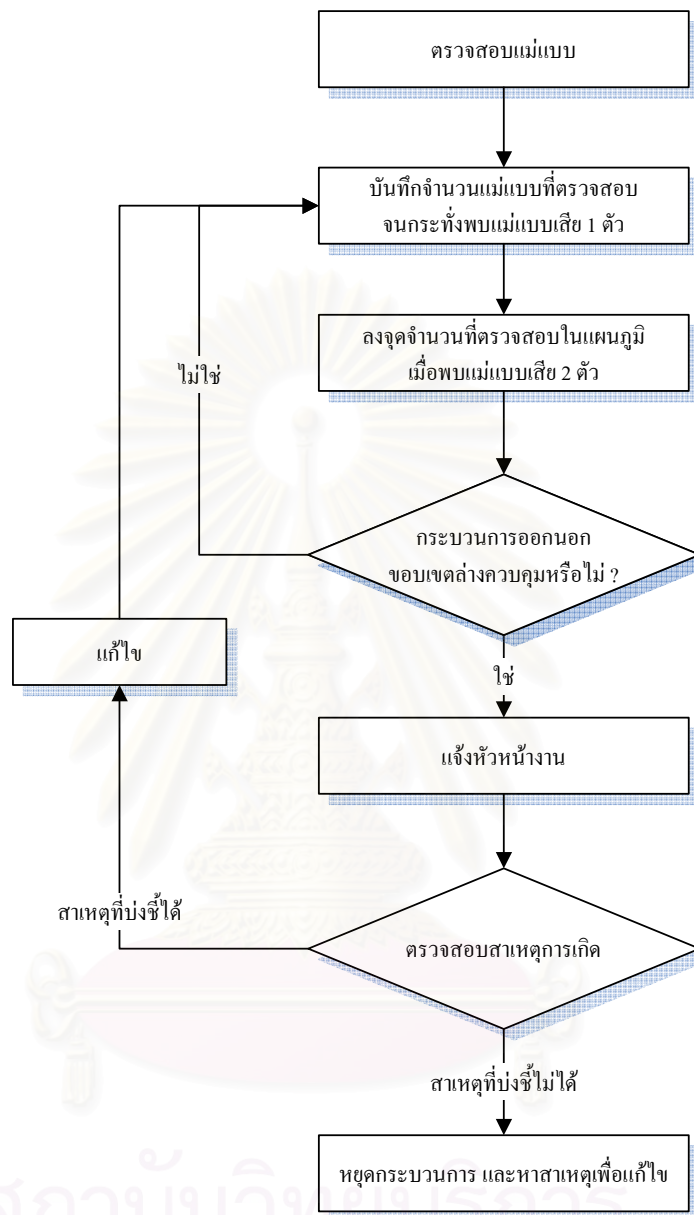
ตารางที่ 7.3 แผนควบคุม (เฉพาะกระบวนการและปัจจัยที่เกี่ยวข้อง)

ลำดับ	กระบวนการ	จุดควบคุม	มาตรฐาน	การควบคุม			ผู้รับผิดชอบ	บันทึกคุณภาพ	แผนการแก้ไข
				วิธีการ	เครื่องมือ	ความถี่			
1	โพลีเมอร์ไรเซชัน	อุณหภูมิก่อนนำงานออกจากตู้	130 องศาเซลเซียส	WI - 01	เครื่องวัดอุณหภูมิของตู้อบ	ทุกชั่วโมง	พนักงานโพลีเมอร์ไรเซชัน	ใบตรวจสอบอุณหภูมิและเวลาของตู้อบ	แจ้งหัวหน้างาน
		เวลาเก็บงานในตู้	2 ชั่วโมง		เครื่องจับเวลาของตู้อบ	ทุกชั่วโมง			
2	แกะแม่แบบ	อุณหภูมิในการแกะแม่แบบ	100 องศาเซลเซียส	WI - 02	เครื่องวัดอุณหภูมิของตู้เก็บงาน	ทุกครั้งก่อนนำถาดออกจากตู้	พนักงานเก็บแม่แบบ	ใบตรวจสอบอุณหภูมิจุดควบคุมที่ 1	แจ้งหัวหน้างานและฝ่ายซ่อมบำรุง
			100 ± 5 องศาเซลเซียส	WI - 02	เครื่องวัดอุณหภูมิแบบเลเซอร์	1 ตัวของถาดบน กลาง (ถาดที่ 8) และล่างของตู้	พนักงานเก็บแม่แบบ		
			90 ± 5 องศาเซลเซียส	WI-03	เครื่องวัดอุณหภูมิแบบเลเซอร์	1 ตัวของทุก 15 กลุ่ม (Batch)	พนักงานแกะแม่แบบ		
		ชนิดของสปาทูลา	ชนิดครูด	WI - 03	-	-	-	-	-
		การแกะแม่แบบ	วิธีการแกะแบบเป่าลม	WI - 03	สปาทูลา และเครื่องเป่าลม	ตรวจสอบแรงดันลมทุกะการทำงาน	พนักงานแกะแม่แบบ	ใบบันทึกแรงดันลม	แจ้งแผนกซ่อมบำรุง

7.3.2 การตรวจติดตามคุณภาพของแม่แบบ

ในการควบคุมคุณภาพของแม่แบบได้ประยุกต์ใช้แผนภูมิควบคุม CCC-r ในการตรวจติดตาม (Monitor) ความเปลี่ยนแปลงที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการ แผนภูมิ CCC-r เป็นแผนภูมิที่เหมาะสมกับข้อมูลที่มีสัดส่วนของเสียต่ำมากดังเช่นในงานวิจัยนี้ โดยจะนำเอาจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ตรวจสอบทั้งหมดจนพบผลิตภัณฑ์บกพร่อง r ขึ้นมาลงจุดค่าแทนสัดส่วนของเสีย ซึ่งได้ทำการเลือกค่า r เท่ากับ 2 รายละเอียดของแผนภูมิ CCC-r นี้ได้อธิบายไปแล้วในหัวข้อที่ 7.2.2

จากแผนภูมิ CCC-2 ในการทดสอบยืนยันผล (รูปที่ 7.3) ได้แสดงให้เห็นว่ากระบวนการได้ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น โดยพบว่าจุดส่วนใหญ่อยู่บนเส้น CL และมีจุดที่อยู่นอก UCL จำนวน 4 จุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการกำหนดขอบเขตควบคุมใหม่ จากค่าสัดส่วนของเสียรวมในขั้นตอนทดสอบยืนยันผลมีค่าเท่ากับ 0.001 ดังนั้น ขอบเขตควบคุมใหม่จะมีค่า $LCL = 54$, $CL=1,678$ และ $UCL=8,876$ ซึ่งค่าขอบเขตควบคุมนี้สามารถเปิดได้จากตารางขอบเขตควบคุมของแผนภูมิ CCC-r ของ Xie et al. (1998) แสดงในภาคผนวก ข โดยขั้นตอนการบันทึกข้อมูลและการปฏิบัติการเมื่อพบจุดออกนอกขอบเขตควบคุมของแผนภูมิ CCC-2 แสดงดังรูปที่ 7.12



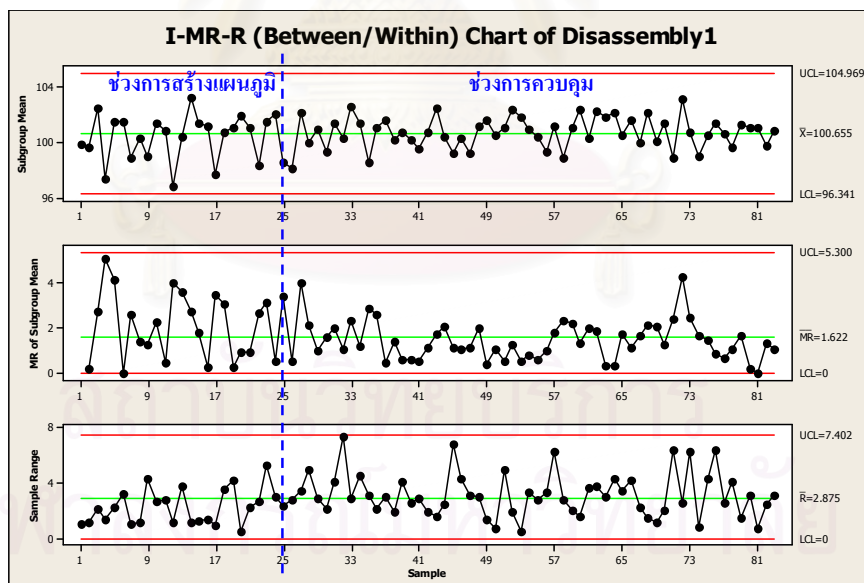
รูปที่ 7.12 ขั้นตอนการบันทึกข้อมูลและการปฏิบัติการเมื่อพบจุดออกนอกขอบเขตควบคุม

7.4 ผลการปรับปรุง

หลังจากทำการกำหนดแผนการควบคุมปัจจัยนำเข้าทั้ง 5 ปัจจัย จากนั้นจึงได้นำระดับที่กำหนดของปัจจัยเหล่านั้นไปทำการผลิตและควบคุมกระบวนการผลิตเลนส์พลาสติกผลิตภัณฑ์ 1.6FSV ในเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551 โดยทำการพิจารณาผลทั้งปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนอง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

7.4.1 ผลการควบคุมปัจจัยนำเข้า

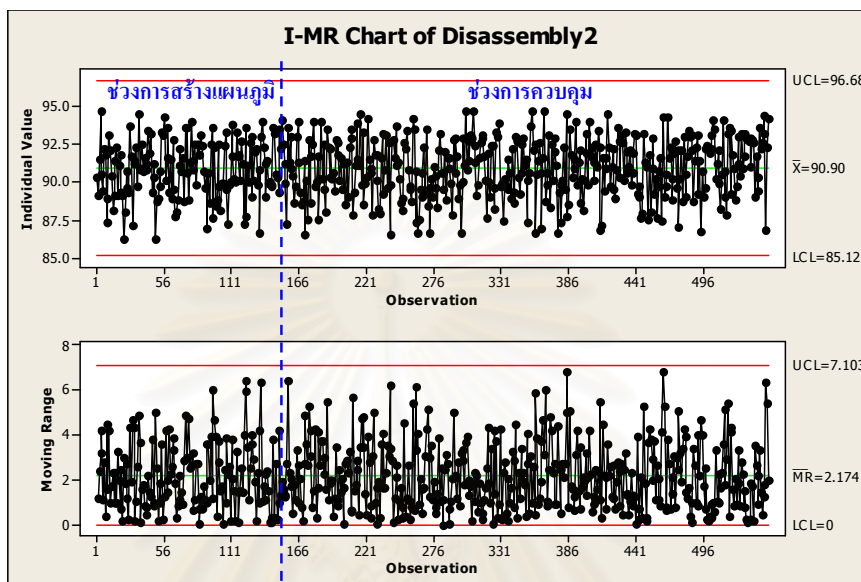
ผลจากการเก็บข้อมูลอุณหภูมิที่ทำการตรวจสอบก่อนการแกะคลิปลและกาสเก็ต โดยทำการวัดจากแม่แบบแซนด์วิช 1 ตัวของทุกๆ ถาดบน กลาง (ถาดที่ 8) และล่างสุดของผู้เก็บงาน เมื่อพิจารณาแผนภูมิควบคุมสามทาง (Three-Way Control Chart) หรือแผนภูมิ I-MR-R ในรูปที่ 7.13 พบว่ากระบวนการนี้อยู่ภายใต้การควบคุมสถิติ กล่าวคือไม่มีจุดใดๆ ออกนอกขอบเขตควบคุมทั้ง 3 แผนภูมิ และมีค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิเป็น 100.66 องศาเซลเซียส ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้ที่ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 7.13 แผนภูมิ I-MR-R แสดงผลของการวัดอุณหภูมิก่อนการแกะคลิปลและกาสเก็ต

ส่วนผลของอุณหภูมิที่ทำการตรวจสอบโดยพนักงานแกะแม่แบบ ด้วยการวัดอุณหภูมิของแม่แบบก่อนแกะ 1 ตัวทุกๆ 15 กลุ่ม (Batch) จากแผนภูมิ I-MR รูปที่ 7.14 พบว่ากระบวนการนี้อยู่

ภายใต้การควบคุมเช่นเดียวกัน และมีค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิในจุดนี้เท่ากับ 90.90 องศาเซลเซียส ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้ที่ 90 องศาเซลเซียส



รูปที่ 7.14 แผนภูมิ I-MR แสดงผลของการวัดอุณหภูมิก่อนการแกะแม่แบบ

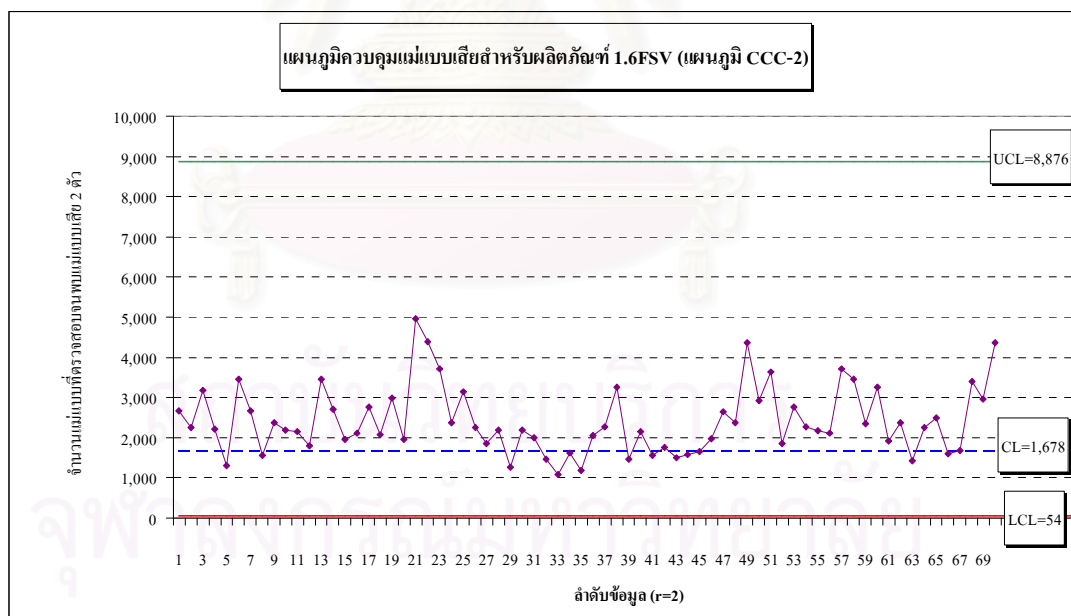
7.4.2 ผลการปรับปรุงสัดส่วนแม่แบบเสีย

หลังจากการกำหนดแผนการควบคุมปัจจัยนำเข้าที่สำคัญทั้ง 5 ปัจจัย คือระยะเวลาที่เก็บงานไว้ในตู้หลังการโพลีเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์, อุณหภูมิออกจากตู้โพลีเมอร์ไรเซชันอุณหภูมิในการแกะแม่แบบ, ชนิดของสปาทูลา และวิธีการแกะแม่แบบออกจากเลนส์ และได้นำเงื่อนไขที่ปรับปรุงไปดำเนินการผลิตในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ 1.67FSV ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนของแม่แบบเสียจากรอยขีดข่วนรวมทั้งสัดส่วนของแม่แบบเสียรวมในเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551 ได้ลดลงตามเป้าหมาย โดยสัดส่วนของแม่แบบเสียจากรอยขีดข่วนมีค่าเป็น 0.00075 (0.075%) และสัดส่วนของแม่แบบเสียรวมมีค่าเป็น 0.00083 (0.083%) หรือคิดเป็น 826 ตัวในหนึ่งล้านตัว (PPM) เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนของแม่แบบเสียรวมก่อนการปรับปรุงซึ่งมีค่าเป็น 0.0025 (0.25%) หรือคิดเป็นจำนวนแม่แบบเสีย 2,512 ตัวในหนึ่งล้านตัว (PPM) สามารถลดแม่แบบเสียรวมได้ถึง 66.8% และเมื่อทำการศึกษาค่าคะแนนมาตรฐาน (Z Score) หรือค่า σ -Level พบว่าผลหลังการปรับปรุงมีค่า Z Long-Term (Z_{LT}) มีค่า 3.15 และ Z Short-Term (Z_{ST}) มีค่า 4.65 ส่วนค่าประมาณของ Ppk และ Cpk มีค่าเท่ากับ 1.05 และ 1.55 ตามลำดับ สรุปดังตารางที่ 7.4

ตารางที่ 7.4 การเปรียบเทียบผลของแม่แบบเสียก่อนและหลังการปรับปรุง

ระยะ	สัดส่วนของ แม่แบบเสีย	แม่แบบเสีย ในหนึ่งล้าน ตัว (PPM)	Long term σ level	Short term σ level	Ppk	Cpk
ก่อนปรับปรุง (Baseline)	0.0025	2,512	2.81	4.31	0.94	1.44
ทดสอบยืนยันผล	0.0010	956	3.09	4.59	1.03	1.53
ควบคุม กระบวนการผลิต	0.00083	826	3.15	4.65	1.05	1.55

และจากการประยุกต์ใช้แผนภูมิควบคุม CCC-2 ในการตรวจติดตาม (Monitor) ความเปลี่ยนแปลงที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการ ซึ่งมีขอบเขตควบคุมใหม่คือ LCL = 54, CL=1,678 และ UCL= 8,876 ในรูปที่ 7.15 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการอยู่การควบคุม กล่าวคือ ไม่มีจุดใดๆ ออกนอกขอบเขตควบคุมล่าง (LCL) เอง



รูปที่ 7.15 แผนภูมิ CCC-2 หลังการปรับปรุงกระบวนการผลิต (เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551)

7.4.3 มูลค่าความสูญเสียหลังการปรับปรุง

ในการคิดมูลค่าความสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นจากการเกิดแม่แบบเสีย จะคำนวณจากจากต้นทุนของวัตถุดิบแม่แบบแก้ว รวมถึงต้นทุนจากการผลิตเลนส์เสียที่เกิดขึ้นจากแม่แบบ โดยไม่มีต้นทุนจากการแก้ไขงานที่บกพร่อง (Rework) เนื่องจากแม่แบบเสียไม่สามารถนำไปแก้ไขได้ ดังนั้นมูลค่าความสูญเสียรวมของการเกิดแม่แบบเสียหลังการปรับปรุง คำนวณจากสัดส่วนของแม่แบบเสียที่ลดลงได้เมื่อเทียบกับ สัดส่วนของแม่แบบเสียก่อนการปรับปรุง (Baseline) ตั้งแต่เดือนมกราคม (ขั้นตอนทดสอบยืนยันผล) และเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551 (ขั้นตอนควบคุมกระบวนการผลิต) พบว่าสามารถลดแม่แบบเสียลงได้ 596 ตัว คิดเป็นมูลค่าความสูญเสียที่ลดลงได้ 381,376 บาท

นอกจากนี้หากพิจารณาเป็นมูลค่าความสูญเสียที่ลดลงได้ต่อปี จากการปริมาณการผลิตที่พยากรณ์ได้ในปี พ.ศ. 2551 (ช่วงเดือน มีนาคม ถึงธันวาคม) คาดว่าจะมีการผลิตเลนส์ 1.6FSV ทั้งสิ้น 935,705 เลนส์ คิดเป็นปริมาณการใช้แม่แบบ 1,871,410 ตัว ดังนั้นจะสามารถลดปริมาณแม่แบบเสียลง 3,154 ตัว คิดเป็นมูลค่าความสูญเสียที่ลดลงได้ 2,017,245 บาท และเมื่อรวมกับมูลค่าความสูญเสียที่ลดลงได้ในเดือนมกราคม และกุมภาพันธ์ที่ได้ทำการผลิตไปแล้ว พบว่ามูลค่าความสูญเสียที่ลดลงได้ต่อปีเท่ากับ 2,398,621 บาท โดยรายละเอียดของการคิดมูลค่าความสูญเสียที่นี้แสดงในภาคผนวก ข

7.5 สรุประยะการติดตามควบคุม

ระยะการติดตามควบคุม ในขั้นตอนแรกได้ทำการทดสอบยืนยันผล โดยปรับค่าปัจจัยนำเข้าที่สำคัญตามค่าที่ได้กำหนดไว้ เพื่อตรวจสอบว่าสัดส่วนของเสียเป็นไปตามผลการทดลองหรือไม่ และทำการตรวจติดตามโดยใช้แผนภูมิควบคุม CCC-r ซึ่งเป็นแผนภูมิที่เหมาะสมกว่าแผนภูมิ p หรือ np ในกรณีที่ข้อมูลเป็นสัดส่วนของเสียที่มีค่าต่ำมากดังเช่นในงานวิจัยนี้ โดยจะนำเอาจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ตรวจสอบทั้งหมดจนพบผลิตภัณฑ์บกพร่อง r ขึ้นมาลงจุดค่าแทนสัดส่วนของเสีย (Xie et al., 1998) ซึ่งได้ทำการเลือกค่า r เท่ากับ 2 ซึ่งผลการทดสอบยืนยันผลแสดงว่า สัดส่วนของแม่แบบเสียจากรอยขีดข่วนในการทดสอบยืนยันผลมีค่าเท่ากับ 0.0008 และสัดส่วนของแม่แบบเสียรวม เท่ากับ 0.0010 คิดเป็นแม่แบบเสีย 956 ตัวในหนึ่งล้านตัว (PPM) และจากการพิจารณาแผนภูมิแสดงให้เห็นว่าไม่มีจุดใดๆออกนอก LCL ซึ่งหมายถึงกระบวนการอยู่ในการควบคุม นอกจากนี้ยังพบว่าจุดส่วนใหญ่อยู่บนเส้น CL และมีจุดที่ออกนอก UCL จำนวน 4 จุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการได้ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น

จากนั้นจัดทำแผนควบคุม (Control Plan) โดยได้แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ การควบคุมปัจจัยนำเข้า และการตรวจติดตามคุณภาพของแม่แบบ ซึ่งปัจจัยนำเข้าที่ทำการควบคุมมีทั้งหมด 5 ปัจจัย เป็นปัจจัยที่อยู่ในกระบวนการโพลีเมอร์ไรเซชัน 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิออกจากตู้โพลีเมอร์ไรเซชันที่ 130 องศาเซลเซียส และระยะเวลาที่เก็บงานไว้ในตู้หลังการโพลีเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์ 2 ชั่วโมง ซึ่งทำการควบคุมโดยทำการบันทึกข้อมูลในแผ่นรายการตรวจสอบ (Check Sheet) รวมทั้งได้จัดทำขั้นตอนในการปฏิบัติการแก้ไขเมื่อมีความผิดพลาดเกิดขึ้น (OCAP) ส่วนอีก 3 ปัจจัยอยู่ในกระบวนการแกะแม่แบบ ประกอบไปด้วย วิธีการแกะแม่แบบออกจากเลนส์วิธีที่ 2 , อุณหภูมิในการแกะแม่แบบ 90 องศาเซลเซียส และชนิดของสปาทุลาที่ชนินครูด ซึ่งอุณหภูมิที่การแกะแม่แบบนั้นกำหนดให้ทำการปรับตั้งอุณหภูมิที่ตู้เก็บงาน (Holding Oven) ไว้ที่ 100 องศาเซลเซียส และกำหนดให้มีการใช้แผนภูมิควบคุมในการควบคุม คือ แผนภูมิควบคุมสามทาง (Three-Way Control Chart) หรือแผนภูมิ I-MR-R ในจุดควบคุมก่อนการแกะคลิปลและกาสเก็ต (100 องศาเซลเซียส) และแผนภูมิ I-MR ในจุดควบคุมก่อนการแกะแม่แบบ (90 องศาเซลเซียส) และจัดทำขั้นตอนในการปฏิบัติการแก้ไขเมื่อมีความผิดพลาดเกิดขึ้น สำหรับวิธีการแกะแม่แบบและชนิดของสปาทุลาควบคุมโดยจัดทำเอกสารคู่มือการปฏิบัติงาน (Work Instruction) เพื่อให้เป็นมาตรฐานในการทำงาน ส่วนการตรวจติดตามคุณภาพของแม่แบบนี้ได้ประยุกต์ใช้แผนภูมิ CCC-2 ในการตรวจติดตามโดยทำการกำหนดขอบเขตควบคุมใหม่ คำนวณจากสัดส่วนของแม่แบบเสียที่ได้จากขั้นตอนการขึ้นชิ้นผลนั้นเอง

ผลการปรับปรุงหลังกำหนดใช้แผนการควบคุม พบว่าทั้งผลการควบคุมปัจจัยนำเข้าและการตรวจติดตามคุณภาพของแม่แบบ อยู่ในการควบคุมทั้งสองค่า โดยสัดส่วนของแม่แบบเสียจากรอยขีดข่วนมีค่าเป็น 0.00075 (0.075%) และสัดส่วนของแม่แบบเสียรวมมีค่าเป็น 0.00083 (0.083%) หรือคิดเป็น 826 ตัวในหนึ่งล้านตัว (PPM) สามารถลดแม่แบบเสียรวมได้ถึง 66.8% เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนของแม่แบบเสียก่อนการปรับปรุง และเมื่อทำการศึกษาค่าคะแนนมาตรฐาน (Z Score) หรือค่า σ -Level พบว่าผลหลังการปรับปรุงมีค่า Z Long-Term (Z_{LT}) มีค่า 3.15 และ Z Short-Term (Z_{ST}) มีค่า 4.65 ส่วนค่าประมาณของ Ppk และ Cpk มีค่าเท่ากับ 1.05 และ 1.55 ตามลำดับ หากพิจารณามูลค่าความสูญเสียที่ลดลงได้ตั้งแต่ขั้นตอนทดสอบขึ้นชิ้นผลจนถึงขั้นตอนควบคุมกระบวนการผลิต คิดเป็น 381,376 บาท และหากคิดรวมเป็นมูลค่าความสูญเสียต่อปี โดยรวมกับมูลค่าความสูญเสียที่คาดว่าจะลดลงได้ ในช่วงเดือนมีนาคมถึงธันวาคม ปี พ.ศ. 2551 จากปริมาณการผลิตที่พยากรณ์ไว้ พบว่ามูลค่าความสูญเสียที่ลดลงได้ต่อปีเท่ากับ 2,398,621 บาท

บทที่ 8

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 บทนำ

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์แนวคิดซิกซ์ ซิกมาเข้ามาใช้ในการปรับปรุงกระบวนการเพื่อลดแม่แบบเสียจากการเกิดรอยขีดข่วนในกระบวนการผลิตเลนส์พลาสติก เนื่องจากแม่แบบที่ใช้ในการผลิตเลนส์ผลิตภัณฑ์ที่ทำการศึกษาเป็นแม่แบบแก้วที่มีราคาค่อนข้างสูง และเกิดรอยขีดข่วนได้ง่าย รวมทั้งยังไม่สามารถซ่อมแก้ไข (Rework) ได้เมื่อเกิดรอยตำหนิ การเกิดแม่แบบเสียนี้จึงกระทบต่อต้นทุนในการผลิตเลนส์ค่อนข้างมาก แนวคิดซิกซ์ ซิกมาซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนการดำเนินงาน 5 ระยะ คือ ระยะนิยามปัญหา (Define Phase) ระยะการวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา (Measure Phase) ระยะการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analyze Phase) ระยะการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ (Improve Phase) และระยะการติดตามควบคุม (Control Phase) ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินการปรับปรุงกระบวนการเพื่อลดปริมาณของแม่แบบเสียลง ซึ่งจะส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตเลนส์ลดลงไปด้วย บทสรุปของการดำเนินงานและผลการปรับปรุงของแต่ละระยะ มีดังนี้

8.2 บทสรุประยะนิยามปัญหา

ในระยะนิยามปัญหาได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตและสภาพปัญหาในปัจจุบันของโรงงาน เพื่อทำการกำหนดปัญหาและเป้าหมายที่จะทำการปรับปรุง คือการลดสัดส่วนของเสียจากตำหนิประเภทรอยขีดข่วนของแม่แบบแก้วที่ใช้การผลิตเลนส์สายตาชนิด 1.6FSV โดยมีเป้าหมายที่จะลดแม่แบบเสียให้ได้เหลือ 0.15% จากแม่แบบเสียในปัจจุบัน 0.25% จากนั้นทำการจัดตั้งคณะทำงานเข้าร่วมในโครงการเพื่อช่วยในการระดมสมอง และสนับสนุนการทดลอง

8.3 บทสรุประยะการวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา

หลังจากทราบถึงปัญหาที่จะทำการปรับปรุงแล้ว ในขั้นตอนแรกของระยะวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา ได้ทำการวิเคราะห์ระบบการวัดแบบข้อมูลตามลักษณะ (Attribute Agreement Analysis) โดยทดสอบพนักงานตรวจสอบแม่แบบ 3 คน แบ่งเป็นการวิเคราะห์ระบบการตรวจสอบแม่แบบประเภทตำหนิตัวไป และการวิเคราะห์เฉพาะตำหนิประเภทรอยขีดข่วน เนื่องจากเป็นตำหนิที่ทำการศึกษาและยังมีเปอร์เซ็นต์มากถึง 80.2% ของแม่แบบเสียทั้งหมด ผลจากการวิเคราะห์พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความสามารถในการวัดซ้ำของพนักงานตรวจสอบ เปอร์เซ็นต์ความไว้อัสของพนักงานตรวจสอบ เปอร์เซ็นต์ประสิทธิผลด้านความสามารถในการวัดซ้ำของการตรวจสอบ และ เปอร์เซ็นต์ประสิทธิผลด้านไว้อัสของการตรวจสอบ ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดในการทดสอบครั้งแรก ในการวิเคราะห์ทั้งสองแบบ (เกณฑ์การยอมรับของระบบการวัดของทั้ง 4 ค่า คือ 100%) ดังนั้นจึงทำการอบรมพนักงานตรวจสอบใหม่ทั้งหมด และทำการทดสอบอีกครั้งได้ผลการทดสอบว่าความสามารถของกระบวนการวัดแบบข้อมูลตามลักษณะของทดสอบครั้งที่ 2 ผ่านเกณฑ์การทดสอบ เนื่องจากพนักงานตรวจสอบทุกคนสามารถตัดสินใจแม่แบบได้ถูกต้องทุกตัว

จากนั้นจึงได้ศึกษาความสามารถของกระบวนการในปัจจุบัน พบว่าเปอร์เซ็นต์แม่แบบเสียในแต่ละเดือนของปี พ.ศ. 2549 มีความแปรผัน (Variation) ค่อนข้างสูง โดยสัดส่วนของเสียมีค่าเป็น 0.25% คิดเป็นจำนวนแม่แบบเสีย 2,512 ตัวในหนึ่งล้านตัว (PPM) ค่า Z Long-Term (Z_{LT}) มีค่า 2.81 และ Z Short-Term (Z_{ST}) มีค่า 4.31 และหากนำมาคำนวณค่าประมาณของ Ppk และ Cpk จะได้ 0.94 และ 1.44 ตามลำดับ โดย 80.2% ของแม่แบบเสียทั้งหมดเป็นตำหนิประเภทรอยขีดข่วน (Scratch Mold) และทำการเก็บข้อมูลลักษณะรอยตำหนิประเภทขีดข่วนเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์หาสาเหตุของการเกิดต่อไป พบว่า 72% ของงานเสียประเภทรอยขีดข่วน มีลักษณะเป็นรอยขีดข่วนยาว ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งอาจเกิดจากการเสียดสีระหว่างเลนส์และแม่แบบ

เมื่อทราบถึงลักษณะของรอยขีดข่วนแล้ว จึงได้ทำการระดมสมองสมาชิกในทีมเพื่อหาสาเหตุที่เป็นไปได้ของการเกิดรอยขีดข่วนบนแม่แบบ โดยใช้ผังก้างปลาหรือผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) พบว่าสาเหตุที่สำคัญอย่างหนึ่งเกิดจากการเกิดการดีโมลด์ (Demold) คือแม่แบบหลุดออกจากเลนส์ก่อนการแกะ ทำให้แม่แบบเกิดการเสียดสีกับเลนส์เกิดรอยขีดข่วนขึ้น จึงทำการระดมสมองเพื่อหาสาเหตุของการเกิดการดีโมลด์ (Demold) ด้วย จากนั้นนำปัจจัยต่างๆที่ได้มาทำการวิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยนำเข้าที่อาจมีผล (KPIV) โดยใช้ตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause & Effect Matrix) ซึ่งได้กำหนดอัตราความสำคัญเท่ากับ 10 สำหรับสาเหตุที่

อาจทำให้เกิดรอยขีดข่วนบนแม่แบบโดยตรง และอัตราความสำคัญเท่ากับ 8 สำหรับสาเหตุที่อาจทำให้เกิดการดีโม่ (Demold) ของแม่แบบแซนด์วิช (ประมาณ 83% ของแม่แบบแซนด์วิชที่เกิดการดีโม่จะก่อให้เกิดรอยขีดข่วนบนแม่แบบและเลนส์เนื่องจากการเสียดสี) และในแต่ละปัจจัยได้ให้กลุ่มสมาชิกทำการลงคะแนนความสำคัญ ซึ่งจะให้คะแนนในช่วง 1 ถึง 10 คะแนน ผลจากการให้คะแนนพบว่า มี 15 ปัจจัยมีคะแนนสูง (สูงกว่า 100 คะแนน) จึงได้นำปัจจัยเหล่านี้ไปทำการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode & Effects Analysis) ต่อไป โดยทำการระดมความคิดในการแจกแจงการเกิดความเสียหายหรือข้อบกพร่อง (Potential Failure Mode) ทั้ง 15 ปัจจัย จากนั้นให้คะแนนความร้ายแรง (Severity Score: S) คะแนนความถี่ในการเกิด (Occurrence Score: O) และคะแนนการตรวจจับ (Detection Score: D) ที่มีต่อการเกิดของเสียประเภทรอยขีดข่วนบนแม่แบบ ซึ่งมาจากการระดมสมองและประเมินผลจากข้อมูลที่มีอยู่ การประเมินคะแนนของแต่ละค่าจะอยู่ในช่วงคะแนน 1 ถึง 10 เช่นกัน การกำหนดคะแนนนั้นได้ทำการประยุกต์ให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์และลักษณะปัญหาที่ทำการศึกษา จากนั้นทำการคำนวณค่า RPN (Risk Priority Number) ซึ่งได้มาจากผลคูณค่าคะแนนที่ได้ 3 ตัว ในแต่ละแถวของตาราง ดังสมการ $RPN = S \times O \times D$ ได้ปัจจัยที่มีค่าคะแนน RPN ที่มีค่าสูงจำนวน 5 ปัจจัยเพื่อนำไปทดสอบและวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไปซึ่งคิดเป็น 83.7 เปอร์เซ็นต์ของคะแนน RPN ทั้งหมด ได้แก่ อุณหภูมิออกจากตู้โพลีเมอร์ไรเซชัน ระยะเวลาที่เก็บงานไว้ในตู้หลังการโพลีเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์ วิธีการแกะแม่แบบออกจากเลนส์ อุณหภูมิในการแกะแม่แบบ และชนิดของสปาทุลา (Spatula) ที่ใช้ในการแกะแม่แบบ

8.4 บทสรุประยะการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการเลือกการทดลองที่จะทำให้ใช้ขนาดตัวอย่างต่ำที่สุด เนื่องจากแม่แบบที่ใช้ในการทดลองมีราคาแพง และสัดส่วนของแม่แบบเสียในกระบวนการผลิตในปัจจุบันมีค่าค่อนข้างต่ำ ทำให้ต้องใช้ขนาดตัวอย่างจำนวนมากเพื่อสามารถให้สามารถตรวจจับความแตกต่างของการทดลองได้ โดยได้ทำการเปรียบเทียบขนาดตัวอย่างระหว่าง การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Test) และการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) ซึ่งการคำนวณขนาดตัวอย่างสำหรับการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลในกรณีที่ตัวแปรตอบสนองเป็นข้อมูลประเภทสัดส่วนของของเสียนี้ ได้มีนำเสนอไว้ในงานวิจัยของ Bisgaard และ Fuller (1995) พบว่าขนาดตัวอย่างที่ต้องใช้ในการออกแบบการทดลองมีปริมาณน้อยกว่าการทดสอบสมมติฐานถึง 4 เท่า ดังนั้นในขั้นตอนนี้จึงได้เลือกทำการออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบมี

จุดศูนย์กลางสำหรับปัจจัยที่เป็นปัจจัยแบบแปรผัน (2_v^{s-1}) เนื่องจากใช้ขนาดตัวอย่างน้อยกว่ามาก และสามารถพิจารณาอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยในการทดลอง และควมมีส่วนโค้งของปัจจัยได้นอกจากนี้ยังสามารถทำการฉายการออกแบบ (Projection) ให้อยู่ในรูปการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบบริบูรณ์ที่มีเรฟลิคตได้โดยการตัดปัจจัยที่สามารถละเลยได้ทิ้ง และสามารถทำการทดลองต่อเนื่องไปสู่การทดลองที่ใหญ่ขึ้น โดยการรวมผลการทดลองที่เพิ่มขึ้นมาเข้าด้วยกันเพื่อให้สามารถประมาณผลของปัจจัยหรืออันตรกิริยาที่สนใจได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งการออกแบบการทดลองนี้ใช้การทดลองทั้งหมด 20 รัน (Runs)

จากนั้นเมื่อได้ผลการทดลองแล้วจึงนำมาวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง โดยมีการแปลงค่าของตัวแปรตอบสนองให้เป็นไปตามสมมติฐานเรื่องความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนของการออกแบบการทดลอง ด้วยวิธีของ Freeman และ Tukey เนื่องจากตัวแปรตอบสนองเป็นสัดส่วนของเสีย (Bisgaard and Fuller, 1994) และทำการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) เมื่อพบว่าข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ จึงได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองในขั้นต่อไป

ผลจากการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองเบื้องต้น พบว่าที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญเพื่อนำไปปรับปรุงหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสม คือ $A + BCDE$, $B + ACDE$, $C + ABDE$, $AB + CDE$ และ $DE + ABC$ โดยที่ A คือ อุณหภูมิออกจากตู้โพลีเมอร์ไรเซชัน B คือ ระยะเวลาที่เก็บงานไว้ในตู้หลังการโพลีเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์ C คือ วิธีการแกะแม่แบบออกจากเลนส์ D คือ อุณหภูมิในการแกะแม่แบบ และ E คือ ชนิดของสปีทูลานอกจากนี้ยังพบว่าไม่มีอิทธิพลเนื่องจากความโค้ง (Curvature) เกิดขึ้นกับตัวแบบนี้

8.5 บทสรุประยะการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการออกแบบการทดลองเพิ่มจากการออกแบบการทดลองในขั้นตอนก่อนหน้า โดยเลือกทำการทดลองเพิ่มเฉพาะบางส่วนเพื่อให้ทราบเฉพาะอันตรกิริยาที่สนใจเท่านั้น นั่นคือการทำการ De-Alias อันตรกิริยา DE และ ABC จากนั้นจึงนำผลการทดลองทั้งในขั้นตอนก่อนหน้าและในการทดลองเพิ่มมาวิเคราะห์ โดยมีการแปลงค่าของตัวแปรตอบสนองให้เป็นไปตามสมมติฐานเรื่องความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนของการออกแบบการทดลองด้วยวิธีของ Freeman และ Tukey ดังเช่นในบทที่ 5 และทำการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) เมื่อพบว่าข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ จึงได้ทำการวิเคราะห์ผลพบว่าอันตรกิริยาที่ทำการ De-Alias นั้นเฉพาะอันตรกิริยา DE เท่านั้นที่มีผลต่อตัวแปร

ตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นเทอมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญจึงประกอบไปด้วย A, B, C, AB และ DE จึงนำไปปรับปรุงหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสม และคำนวณค่าทำนายของตัวแปรตอบสนอง จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ เพื่อหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ค่าตัวแปรตอบสนองหรือสัดส่วนแม่แบบเสียที่ต่ำที่สุด ผลจากการวิเคราะห์พบว่าค่าทำนายของสัดส่วนแม่แบบเสียจากคำนิยามประเภทรอยขีดข่วนที่ต่ำที่สุดเมื่อแปลงค่าจากวิธี Freeman และ Tukey กลับเป็นค่าสัดส่วนของเสียมีค่า 0.09% ซึ่งเป็นไปตามเป้าหมายที่กำหนดไว้คือต่ำกว่า 0.15% โดยระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยแสดงดังตารางที่ 8.1

ตารางที่ 8.1 ระดับของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญที่เหมาะสมทั้ง 5 ปัจจัย

สัญลักษณ์ของปัจจัย	คำอธิบาย	ระดับ (Coded Units)	ระดับที่เหมาะสม	หน่วย
A	อุณหภูมิออกจากตู้โพลีเมอร์ไรเซชัน	1	130	องศาเซลเซียส
B	ระยะเวลาที่เก็บงานไว้ในตู้หลังการโพลีเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์	-1	2	ชั่วโมง
C	วิธีการแกะแม่แบบออกจากเลนส์	1	วิธีที่ 2	-
D	อุณหภูมิในการแกะแม่แบบ	-1	90	องศาเซลเซียส
E	ชนิดของสปาทูลา	1	ชนิดครูด	-

8.6 บทสรุประยะการติดตามควบคุม

ระยะการติดตามควบคุม ในขั้นตอนแรกได้ทำการทดสอบยืนยันผล โดยปรับค่าปัจจัยนำเข้าที่สำคัญตามค่าที่ได้กำหนดไว้ เพื่อตรวจสอบว่าสัดส่วนของเสียเป็นไปตามผลการทดลองหรือไม่ และทำการตรวจติดตามด้วยการใช้แผนภูมิควบคุม CCC-r ซึ่งเป็นแผนภูมิที่เหมาะสมกว่าแผนภูมิ p หรือ np ในกรณีที่ข้อมูลเป็นสัดส่วนของเสียที่มีค่าต่ำมากดังเช่นในงานวิจัยนี้ โดยนำเอาจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ตรวจสอบทั้งหมดจนพบผลิตภัณฑ์บกพร่อง r ขึ้นมาลงจุดค่าแทนสัดส่วนของเสีย (Xie et al., 1998) ส่วนค่า r ที่ได้ทำการเลือกมีค่าเท่ากับ 2 เนื่องจากค่า r ยิ่งน้อย ความรวดเร็วในการตัดสินใจแก้ไขเมื่อเกิดความผิดปกติก็จะเร็วขึ้น แต่หากเลือกค่า r เท่ากับ 1 (CCC Chart) นั้นความน่าเชื่อถือของการตรวจจับความเปลี่ยนแปลง (shift) ของค่า p ก็จะมีน้อย (เนื่องจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ของจำนวนชิ้นงานที่ทำการตรวจสอบจนพบผลิตภัณฑ์

บกพร่อง r ขึ้น จะมีค่าเป็น $1/\sqrt{r}$) (Chan, 2003) ซึ่งผลการทดสอบยืนยันผลแสดงว่าสัดส่วนของแม่แบบเสียจากรอยขีดข่วนในการทดสอบยืนยันผลมีค่าเท่ากับ 0.0008 และสัดส่วนของแม่แบบเสียรวมเท่ากับ 0.0010 คิดเป็นแม่แบบเสีย 956 ตัวในหนึ่งล้านตัว (PPM) และจากการพิจารณาแผนภูมิแสดงให้เห็นว่าไม่มีจุดใดๆ ออกนอก LCL ซึ่งหมายถึงกระบวนการอยู่ในการควบคุม นอกจากนี้ยังพบว่าจุดส่วนใหญ่อยู่บนเส้น CL และมีจุดที่ออกนอก UCL จำนวน 4 จุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการได้ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น

จากนั้นจัดทำแผนควบคุม (Control Plan) โดยได้แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ การควบคุมปัจจัยนำเข้า และการตรวจติดตามคุณภาพของแม่แบบ ซึ่งปัจจัยนำเข้าที่ทำการควบคุมมีทั้งหมด 5 ปัจจัย เป็นปัจจัยที่อยู่ในกระบวนการโพลีเมอร์ไรเซชัน 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิออกจากตู้โพลีเมอร์ไรเซชันที่ 130 องศาเซลเซียส และระยะเวลาที่เก็บงานไว้ในตู้หลังการโพลีเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์ 2 ชั่วโมง ซึ่งทำการควบคุมโดยทำการบันทึกข้อมูลในแผ่นรายการตรวจสอบ (Check Sheet) และกำหนดขั้นตอนในการปฏิบัติการแก้ไขเมื่อมีความผิดพลาดเกิดขึ้น (OCAP) รวมทั้งได้ทำการแก้ไขปรับปรุงเอกสารคู่มือการปฏิบัติงาน (Work Instruction) เพื่อควบคุมให้การปฏิบัติงานเป็นไปอย่างมีมาตรฐาน ส่วนอีก 3 ปัจจัยที่ทำการควบคุมอยู่ในกระบวนการแกะแม่แบบ ประกอบไปด้วย วิธีการแกะแม่แบบออกจากเลนส์วิธีที่ 2, อุณหภูมิในการแกะแม่แบบ 90 องศาเซลเซียส และชนิดของสปาทุลาชนิดครูด ซึ่งอุณหภูมิที่การแกะแม่แบบนี้กำหนดให้ทำการปรับตั้งอุณหภูมิที่ตู้เก็บงาน (Holding Oven) ไว้ที่ 100 องศาเซลเซียส และกำหนดให้มีการใช้แผนภูมิควบคุมในการควบคุม คือ แผนภูมิควบคุมสามทาง (Three-Way Control Chart) หรือแผนภูมิ I-MR-R ในจุดควบคุมก่อนการแกะคลิปและกาสเก็ต (100 องศาเซลเซียส) เนื่องจากความผันแปรของข้อมูลอุณหภูมิในจุดควบคุมนี้เกิดได้ทั้งจากความผันแปรระหว่างกลุ่มของตัวอย่าง (อุณหภูมิของแม่แบบต่างชุด) และจากความผันแปรภายในกลุ่มตัวอย่าง (อุณหภูมิของแม่แบบในชุดเดียวกันกลุ่มละ 3 ค่า) และได้ใช้แผนภูมิ I-MR ในจุดควบคุมก่อนการแกะแม่แบบ (90 องศาเซลเซียส) โดยทั้งสองจุดควบคุมจะมีการบันทึกข้อมูลลงในแผ่นรายการตรวจสอบ (Check Sheet) ที่ได้จัดทำไว้ และยังสามารถจัดทำขั้นตอนในการปฏิบัติการแก้ไขเมื่อมีความผิดพลาดเกิดขึ้น รวมทั้งเอกสารคู่มือการปฏิบัติงาน (Work Instruction) เพื่อให้เป็นมาตรฐานในการทำงานด้วย สำหรับวิธีการแกะแม่แบบและชนิดของสปาทุลา ควบคุมโดยมีการอบรมพนักงานและมีการแก้ไขปรับปรุงเอกสารคู่มือการปฏิบัติงานเพื่อให้วิธีการแกะแม่แบบและชนิดของสปาทุลาคือเป็นมาตรฐานหนึ่งในการทำงาน ส่วนในการตรวจติดตามคุณภาพของแม่แบบหรือควบคุมค่าตัวแปรตอบสนองนั้นได้ประยุกต์ใช้แผนภูมิ CCC-2 ในการตรวจติดตาม โดยทำการกำหนดขอบเขตควบคุมใหม่ คำนวณจากสัดส่วนของแม่แบบเสียที่ได้จากขั้นตอนการยืนยันผลนั่นเอง

ผลการปรับปรุงหลังกำหนดใช้แผนการควบคุม พบว่าทั้งผลการควบคุมปัจจัยนำเข้าและการตรวจติดตามคุณภาพของแม่แบบ อยู่ในการควบคุมทั้งสองค่า โดยสัดส่วนของแม่แบบเสียจากรอยขีดข่วนมีค่าเป็น 0.00075 (0.075%) และสัดส่วนของแม่แบบเสียรวมมีค่าเป็น 0.00083 (0.083%) หรือคิดเป็น 826 ตัวในหนึ่งล้านตัว (PPM) สามารถลดแม่แบบเสียรวมได้ถึง 66.8% เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนของแม่แบบเสียก่อนการปรับปรุง และเมื่อทำการศึกษาค่าคะแนนมาตรฐาน (Z Score) หรือค่า σ -Level พบว่าผลหลังการปรับปรุงมีค่า Z Long-Term (Z_{LT}) มีค่า 3.15 และ Z Short-Term (Z_{ST}) มีค่า 4.65 ส่วนค่าประมาณของ Ppk และ Cpk มีค่าเท่ากับ 1.05 และ 1.55 ตามลำดับ หากพิจารณามูลค่าความสูญเสียที่ลดลงได้ตั้งแต่ขั้นตอนทดสอบยืนยันผลจนถึงขั้นตอนควบคุมกระบวนการผลิต คิดเป็น 381,376 บาท และหากคิดรวมเป็นมูลค่าความสูญเสียต่อปี โดยรวมกับมูลค่าความสูญเสียที่คาดว่าจะลดลงได้ ในช่วงเดือนมีนาคมถึงธันวาคม ปี พ.ศ. 2551 จากปริมาณการผลิตที่พยากรณ์ไว้ พบว่ามูลค่าความสูญเสียที่ลดลงได้ต่อปีเท่ากับ 2,398,621 บาท

8.7 ข้อจำกัดในงานวิจัย

1. ตัวแปรตอบสนอง (Response) ในงานวิจัยนี้เป็นข้อมูลตามลักษณะ (Attribute Data) คือ สัดส่วนของแม่แบบเสีย ซึ่งเป็นชนิดของข้อมูลที่มีข้อจำกัดค่อนข้างมาก กล่าวคือ มีเครื่องมือทางสถิติที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลแปรผัน (Variable Data) รวมทั้งให้ข้อมูลในการวิเคราะห์ค่อนข้างน้อยด้วย

2. ในงานวิจัยนี้สิ่งที่ต้องคำนึงถึงอย่างยิ่งในเลือกการทดลองคือ ขนาดตัวอย่างที่ต้องใช้ในการทดลอง เนื่องจากมีตัวแปรตอบสนองเป็นข้อมูลตามลักษณะ (Attribute Data) หรือเป็นค่าสัดส่วนของเสีย รวมทั้งสัดส่วนของแม่แบบเสียในการผลิตปัจจุบันมีค่าที่ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นในการทำการทดลองจึงจำเป็นต้องใช้ขนาดตัวอย่างในแต่ละการทดลองจำนวนมากเพื่อให้สามารถตรวจจับความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในการทดลองได้ นอกจากนี้แม่แบบที่ใช้ในการทดลองยังมีราคาสูงอีกด้วย

3. แม่แบบแก้วมีราคาค่อนข้างสูงและง่ายต่อการเกิดตำหนิ ดังนั้นก่อนทำการทดลองจึงได้ทำการทดสอบการทดลองนั้นด้วยแม่แบบเสียหรือแม่แบบที่ทิ้งแล้วก่อนส่วนหนึ่ง เพื่อให้แน่ใจว่าการทดลองนั้นๆจะไม่ทำให้เพิ่มปริมาณแม่แบบเสีย โดยทำเครื่องหมายรอยตำหนิเดิมไว้ด้านหลัง เพราะขนาดตัวอย่างในการทดลองที่ใช้มีจำนวนมาก การทดลองบางอย่างอาจส่งผลกระทบต่อเปอร์เซ็นต์แม่แบบเสียในการผลิตได้ การทดลองของแม่แบบเสียเช่น การทดลองแกะแม่แบบแต่ละวิธี การทดลองแกะโดยใช้สปาทุลาแต่ละชนิด เป็นต้น

4. เนื่องจากการทดลองต้องใช้ขนาดตัวอย่างจำนวนมาก จึงไม่สามารถทำการทดลองทั้งหมดในช่วงเวลาเดียวกันได้ ดังนั้นในการทำการทดลองจึงต้องมีการควบคุมสภาวะต่างๆให้ใกล้เคียงกันในทุกๆการทดลอง เพื่อลดความผันแปรอื่นๆที่อาจมีผลกระทบต่อทดลอง เช่น กำหนดให้ตู้โพลีเมอร์ไรเซชันที่ใช้ในการทดลองเป็นตู้เดียวกัน แม่แบบชุดเดียวกัน เป็นต้น

5. การเกิดรอยขีดข่วนบนแม่แบบและเลนส์นั้น สามารถเกิดได้ง่ายจากการทำงานที่ประมาทเลินเล่อของพนักงานซึ่งเป็นปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นปัจจัยที่ทำการพิจารณาในงานวิจัยนี้จึงต้องเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้เท่านั้น

8.8 ข้อเสนอแนะ

1. ในการนำผลของการปรับปรุงในงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้กับแม่แบบของผลิตภัณฑ์อื่นๆ ต้องคำนึงถึงความแตกต่างของแต่ละผลิตภัณฑ์ด้วย เช่น ชนิดของแม่แบบ ความหนาของแม่แบบและเลนส์ รวมทั้งชนิดโมโนเมอร์ ซึ่งอาจเป็นส่วนที่มีผลที่ทำให้ในบางปัจจัยไม่สามารถใช้ระดับของปัจจัยที่เหมาะสมเหมือนกับผลิตภัณฑ์ 1.6FSV ได้

2. การทำการทดลองในกรณีที่กระบวนการมีส่วนของเสียที่ค่าต่ำมากๆนั้น ในแต่ละการทดลองต้องใช้ขนาดตัวอย่างจำนวนมาก ซึ่งในบางการทดลองอาจส่งผลให้เกิดของเสียออกมาจำนวนมากตามไปด้วย ดังนั้นหากการผลิตมีลักษณะต่อเนื่อง อาจทำการทดลองแบบไม่กำหนดขนาดตัวอย่าง คือทำการทดลองจนกระทั่งได้ของเสียเท่ากับค่าคงที่ค่าหนึ่งที่ได้กำหนดไว้ วิธีการนี้เรียกว่าการสุ่มแบบส่วนกลับของทวินาม (Inverse Binomial Sampling) ซึ่งเป็นการทำการทดลองจนกระทั่งได้ของเสียเท่ากับค่าคงที่ค่าหนึ่ง (r) และค่าตัวแปรตอบสนองที่วัดคือจำนวนที่ทำการผลิตจนกระทั่งได้ของเสียเท่ากับ r ขึ้นนั่นเอง (Bisgaard and Gertsbakh, 2000) โดยข้อดีของการสุ่มแบบนี้คือ ผู้ทำการทดลองสามารถมั่นใจได้ว่าจะไม่ผลิตงานเสียออกมาจำนวนมากกว่าค่าที่กำหนดไว้ แต่เนื่องจากการในงานวิจัยนี้ ปัจจัยในการทดลองส่วนหนึ่งเกี่ยวกับการควบคุมพารามิเตอร์ของตู้อบ ซึ่งภายใน 1 ตู้อบมีความจุค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมที่จะใช้การทดลองด้วยวิธีสุ่มแบบส่วนกลับของทวินามนี้

3. ในการทำการทดลองเพิ่มจากออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล 2^{k-1} เพื่อให้สามารถประมาณผลของปัจจัยหรืออันตรกิริยาที่สนใจสำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกทำการทดลองเพิ่มเพียงบางส่วนเพื่อ De-alias เฉพาะอันตรกิริยาที่สนใจเท่านั้น (De-aliasing Interaction) เนื่องจากมีข้อจำกัดเรื่องขนาดตัวอย่างในการทดลอง ซึ่งวิธีการนี้มีข้อเสียคืออาจมีผลจากเวลา (หรือผลจากบล็อก) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการออกแบบการทดลองที่บล็อกไม่เป็นเชิงตั้งฉาก (Orthogonal) กับท

รีทเมนต์ (Treatment) (Montgomery, 2005) การทดลองเพิ่มจึงควรเป็นการทดลองเป็นเลขคู่ เพื่อให้การทดลองเป็นเชิงตั้งฉาก (Orthogonal) รวมทั้งควรทำการทดลองในสภาวะที่สามารถเทียบเคียงกันได้ (Homogenous) เพื่อลดผลของบล็อกที่อาจเกิดขึ้น แต่หากในกรณีที่ไม่มีข้อจำกัดในการทดลองแล้ว ควรเลือกทำการทดลองอีกครั้งที่เหลือ (Alternative Fraction) ทั้งหมด เพื่อให้เป็นการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2^k แบบบริบูรณ์ เรียกว่าวิธีการนี้ว่าการ Fold Over หรืออาจทำการทดลองเพียงครึ่งหนึ่งของการ Fold Over แบบบริบูรณ์หรือเรียกว่า Partial Fold Over ซึ่งทั้งสองแบบนี้เป็นการทดลองที่สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้ดีกว่า

4. การประยุกต์แผนภูมิ CCC-r ในการตรวจติดตามกระบวนการนั้น ควรเลือกค่า r ให้เหมาะสมกับกระบวนการที่ตรวจติดตาม ซึ่งจะต้องพิจารณาจากสัดส่วนของเสีย (p) โดยค่า r ที่เหมาะสมในกรณีทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 2-5 แต่ในกรณีที่สัดส่วนของเสียมีค่าต่ำมาก ๆ (เช่นต่ำกว่า 0.0001) การใช้แผนภูมิ CCC-r จะไม่เหมาะสมเนื่องจากมีช่วงของขอบเขตควบคุมที่กว้างมาก ดังนั้นจึงแนะนำให้ใช้แผนภูมิ CCC แทน (Xie et al., 1998) ซึ่งแผนภูมิ CCC ก็คือแผนภูมิที่นำเอาจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ตรวจสอบทั้งหมดจนพบผลิตภัณฑ์บกพร่อง 1 ชิ้นมาพล็อตค่าแทนจำนวนผลิตภัณฑ์บกพร่องหรือแผนภูมิ CCC-1 นั่นเอง (Xie and Goh, 1997)

5. แผนการควบคุมที่ได้กำหนดขึ้นมานั้น อาจมีการปรับปรุงให้เหมาะสมกับกระบวนการหรือลักษณะของข้อมูลภายหลังได้ เช่น หากพบว่าอุณหภูมิก่อนการแกะคลิปลและกาสเกิดอยู่ภายใต้การควบคุมโดยตลอด อาจลดความถี่ในการตรวจสอบลงเป็นตู้เว้นตู้ เป็นต้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กัลยา วานิชย์บัญชา. การวิเคราะห์สถิติ: สถิติสำหรับการบริหารและวิจัย. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545
- กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2549.
- กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. การวิเคราะห์ระบบการวัด (MSA) : ประมวลผลด้วย MINITAB. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2549
- โกศล ศีลธรรม. เส้นทางสู่คุณภาพระดับ Six Sigma. วารสารเทคนิค 226 (ส.ค.46): 175-182.
- ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. วิศวกรรมศาสตร์. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2549.
- ทานตะวันธรรม เต็กซัน, นิรันดร์ จันรัมย์ และอดิศักดิ์ แก้วใส. พลาสติก 1. สกายบุ๊กส์, 2544.
- ปารเมศ ชุตินา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545
- พิชิต เลี่ยมพิพัฒน์. พลาสติก. กรุงเทพมหานคร: สัมพันธ์พาณิชย์, 2537.
- แม่น อมรสิทธิ์ และ สมชัย อัครทิวา. วิศวกรรมศาสตร์. กรุงเทพมหานคร: แมคโคร-ฮิล อินเตอร์เนชันแนล เอ็นเทอร์ไพรส์, อิงค์, 2544.
- วรภัทร์ ภูเจริญ, กาญจนา สร้อยระย้า และ ธนกฤต จรัสรุ่งสวัสดิ์. เข้าใจและ Six Sigma. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2546
- วิทยา สุหฤทธดำรง และ คณศ น้อยคุณ. หัวใจสำคัญของการดำเนินงานของการทำ Six Sigma. วารสาร Industrial Technology Review 118 (ธ.ค. 46): 145-147.
- วิยะดา ตันวัฒนากุล. การควบคุมคุณภาพในเชิงสถิติ. ภาควิชาสถิติ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2538.
- ศิริศักดิ์ เทพจิต. การประเมินการนำ Lean Six Sigma ไปใช้งานด้วยการสร้างแบบจำลองพลวัตของระบบ กรณีศึกษา: โรงพยาบาล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2549.
- ศิริวดี เอื้ออรุณโชติ. การลดการปนเปื้อนจากกระบวนการผลิตหัวอ่าน-เขียนสำหรับคอมพิวเตอร์ โดยประยุกต์ใช้วิธีการซิกซ์ ซิกมา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

อุษณีย์ ถิ่นเกาะแก้ว. การลดการสูญเสียจากกระบวนการผลิตกระป๋องโดยประยุกต์ใช้วิธีการซิกซ์
ซิกมา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

อิโตชิ คุเมะ. วิธีทางสถิติเพื่อการพัฒนาคุณภาพ. แปลโดย วีรพงษ์ เกลิมจิระรัตน์. กรุงเทพมหานคร:
สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2535.

ภาษาอังกฤษ

Automotive Industry Action Group (AIAG), Potential failure mode and effects analysis –
Reference manual, 3rd ed., 2001.

Banuelas, R.; Antony, J. and Brace, M. An application of six sigma to reduce waste. Journal of
Quality and Reliability Engineering International 21 (2005): 553-570.

Bisgaard, S. and Fuller, H. T. Analysis of factorial experiments with defects or defectives as the
response. Journal of Quality Engineering 7: 2 (1994): 429-443.

Bisgaard, S. and Fuller, H. T. Sample size estimates for two-level factorial designs with binary
response. Journal of Quality Technology 27: 4 (1995): 344-354.

Bisgaard, S. and Gertsbakh, I. 2^{k-q} Experiments with binary responses: Inverse binomial sampling.
Journal of Quality Technology 32: 2 (2000): 148-156.

Bowden, F. P. and Scott, H. G. The polishing, surface flow and wear of diamond and glass.
Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical
Sciences 248: 1254 (Nov. 25, 1958): 368-378.

Breyfogle, F. W. III. Implementing six sigma: Smarter solutions using statistical methods. New
York: John Wiley & Sons, 2001.

Chan, L. Y.; Lai, C. D. ; Xie, M. and Goh, T. N. A two-stage decision procedure for monitoring
processes with low fraction nonconforming. European Journal of Operational Research
150: 2 (2003): 420-436.

Cherry, J. and Seshadri, S. Six Sigma: Using statistics to reduce process variability and costs in
radiology. Radiology Management 22: 6 (2000): 42-45.

Dial, W.R.; Bissinger, W.E.; Dewitt, B.J. and Strain, F. Polymerization control in casting a
thermosetting resin. Industrial and Engineer Chemistry 47 (1955) : 2447 - 2451.

Evans, J. R. and Lindsay, W. M. An introduction to six sigma & process improvement. Mason,
Ohio: Thomson/South-Western, 2005.

- Goh, T.N. and Xie, M. Statistical control for a six sigma process. Journal of Quality Engineering 15: 4 (2003): 587–592.
- Harry, M. and Schroeder R. Six Sigma: The breakthrough management strategy revolutionizing the world's top corporations. New York: Currency Book, 2000.
- Houero, V. L.; Sangleboeuf, J.C.; Deriano, S.; Rouxel, T. and Duisit, G. Surface damage of soda–lime–silica glasses: indentation scratch behavior. Journal of Non-Crystalline Solids 316 (2003): 54–63.
- McCarty, T.; Daniels, L.; Bremer, M. and Gupta, P. The six sigma black belt handbook. New York: Motorola University. McGraw-Hill, 2005.
- Montgomery, D. C. Design and analysis of experiments. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, 2005.
- Raisinghani, M. S.; Ette, H.; Pierce, R.; Cannon, G. and Daripaly, P. Six Sigma: concepts, tools, and applications. Journal of Industrial Management & Data Systems 105: 4 (2005): 491 – 505.
- Sleeper, A. D. Design for Six Sigma statistics: 59 tools for diagnosing and solving problems in DFSS initiatives. New York: McGraw-Hill, 2006.
- Su, C.T.; Chiang, T.L. and Chiao, K. Optimizing the IC delamination quality via six-sigma approach. IEEE Transaction Electronics Packaging Manufacturing 28: 3 (2005): 241-248.
- Uhlmann, D.R. and Kreidl, N.J. Elasticity and strength in glass. Glass Science and technology 5, 1980.
- Xie, M.; Goh, T.N and Xie, W. A study of economic design of control charts for cumulative count of conforming items. Communications in Statistics - Simulation and Computation 26: 3 (1997): 1009 - 1027
- Xie, M.; Lu, X.S.; Goh, T.N. and Chan, P.L.Y. A quality monitoring and decision-making scheme for automated production processes. International Journal of Quality and Reliability Management 16: 2 (1999): 148 - 157.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ใบรายการตรวจสอบ GR&R แม่แบบผลิตภัณฑ์ 1.6FSV

วันที่:

ตรวจสอบโดย:

กะทำงาน:

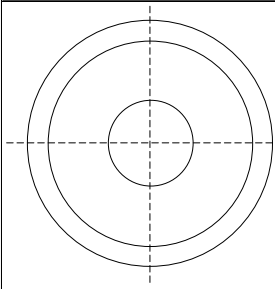
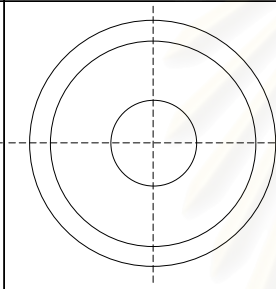
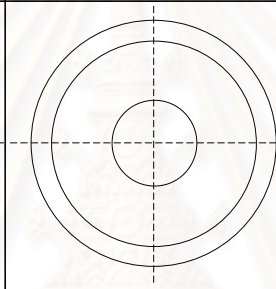
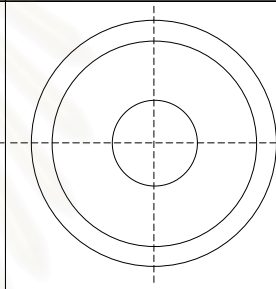
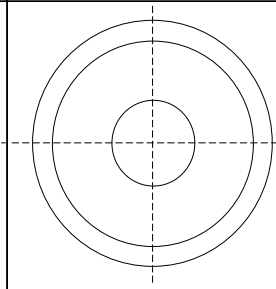
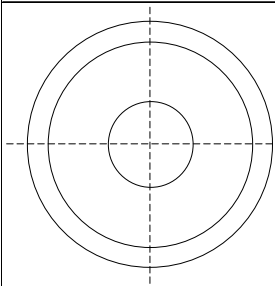
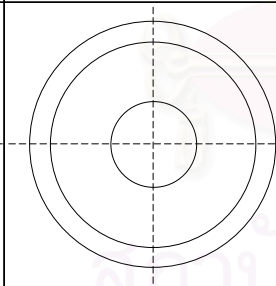
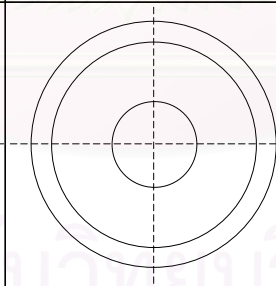
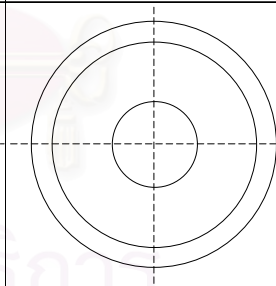
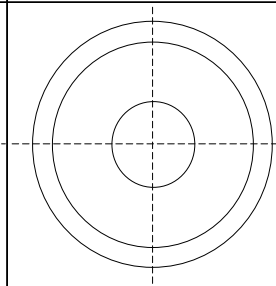
แม่แบบลำดับที่	ผ่าน	ไม่ผ่าน	ชนิดของรอยตำหนิ
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			

แม่แบบลำดับที่	ผ่าน	ไม่ผ่าน	ชนิดของรอยตำหนิ
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			
31			
32			
33			
34			
35			
36			
37			
38			
39			
40			

รูปที่ ก.1 ตัวอย่างแผ่นรายการตรวจสอบแม่แบบในการวิเคราะห์ระบบการวัด

Gauge R&R of FSV Products

Date: Inspect by: Shift:

Mold No: <input type="checkbox"/> Pass <input type="checkbox"/> Fail	Mold No: <input type="checkbox"/> Pass <input type="checkbox"/> Fail	Mold No: <input type="checkbox"/> Pass <input type="checkbox"/> Fail	Mold No: <input type="checkbox"/> Pass <input type="checkbox"/> Fail	Mold No: <input type="checkbox"/> Pass <input type="checkbox"/> Fail
Defect Type:	Defect Type:	Defect Type:	Defect Type:	Defect Type:
				
Mold No: <input type="checkbox"/> Pass <input type="checkbox"/> Fail	Mold No: <input type="checkbox"/> Pass <input type="checkbox"/> Fail	Mold No: <input type="checkbox"/> Pass <input type="checkbox"/> Fail	Mold No: <input type="checkbox"/> Pass <input type="checkbox"/> Fail	Mold No: <input type="checkbox"/> Pass <input type="checkbox"/> Fail
Defect Type:	Defect Type:	Defect Type:	Defect Type:	Defect Type:
				

รูปที่ ก.2 แผ่นรายการตรวจสอบแม่แบบในการวิเคราะห์ระบบการวัด เพื่อบันทึกตำแหน่งของรอยตำหนิ

ตารางที่ ก.1 เกณฑ์การให้คะแนนระดับความรุนแรง (S)

ความรุนแรงของผลกระทบที่เกิด	ระดับ
มีระดับความร้ายแรงของปัญหาสูงมาก มีผลกระทบกับผลิตภัณฑ์ ซึ่ง 100 % ของผลิตภัณฑ์เสียหายต้องทิ้งทั้งหมด โดยไม่มีสัญญาณการเตือน	10
มีระดับความร้ายแรงของปัญหาสูง มีผลกระทบกับผลิตภัณฑ์ ซึ่ง 100 % ของผลิตภัณฑ์เสียหายต้องทิ้งทั้งหมด โดยมีสัญญาณการเตือนแล้ว	9
เกิดความผิดพลาดในสายการผลิต โดยผลิตภัณฑ์ที่ผลิตมีการคัดเลือกและทิ้งบางส่วนมากกว่า 80% มีระดับไม่ผ่านข้อกำหนด	8
เกิดความผิดพลาดในสายการผลิต โดยผลิตภัณฑ์ที่ผลิตมีการคัดเลือกและทิ้งบางส่วน 65% ถึงน้อยกว่า 80 % มีระดับไม่ผ่านข้อกำหนด	7
เกิดความผิดพลาดในสายการผลิต โดยผลิตภัณฑ์ที่ผลิตมีการคัดเลือกและทิ้งบางส่วน 50% ถึงน้อยกว่า 65 % มีระดับไม่ผ่านข้อกำหนด	6
เกิดความผิดพลาดในสายการผลิต โดยผลิตภัณฑ์ที่ผลิตมีการคัดเลือกและทิ้งบางส่วน 35% ถึงน้อยกว่า 50 % มีระดับไม่ผ่านข้อกำหนด	5
เกิดความผิดพลาดในสายการผลิต โดยผลิตภัณฑ์ที่ผลิตมีการคัดเลือกและทิ้งบางส่วน 20% ถึง 35 % มีระดับไม่ผ่านข้อกำหนด	4
เกิดความผิดพลาดในสายการผลิต โดยผลิตภัณฑ์ที่ผลิตมีการคัดเลือกและทิ้งบางส่วน 10% ถึง 20 % มีระดับไม่ผ่านข้อกำหนด	3
เกิดความผิดพลาดในสายการผลิต โดยผลิตภัณฑ์ที่ผลิตมีการคัดเลือกและทิ้งบางส่วน น้อยกว่า 10% มีระดับไม่ผ่านข้อกำหนด	2
ไม่มีผลกระทบ	1

ตารางที่ ก.2 เกณฑ์การให้คะแนนความถี่ (O)

ความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเสียหาย	อัตราส่วนที่อาจเกิดความเสียหาย	ระดับคะแนน
สูงมาก (Vary high): เกิดขึ้นบ่อยมากจนเป็นปกติ	มากกว่า 200 ใน 10,000 ขึ้น (> 2%)	10
	150 ใน 10,000 ขึ้น (1.5%)	9
สูง (High): เกิดขึ้นบ่อยๆ	100 ใน 10,000 ขึ้น (1%)	8
	75 ใน 10,000 ขึ้น (0.75%)	7
ปานกลาง (Moderate): เกิดขึ้นบางครั้ง	50 ใน 10,000 ขึ้น (0.5%)	6
	25 ใน 10,000 ขึ้น (0.25%)	5
ต่ำ (Low): เกิดขึ้นนานๆครั้ง	10 ใน 10,000 ขึ้น (0.1%)	4
	5 ใน 10,000 ขึ้น (0.05%)	3
ต่ำมาก (Very low): แทบจะไม่เคยเกิดขึ้น	2 ใน 10,000 ขึ้น (0.02%)	2
	น้อยกว่า 1 ใน 10,000 ขึ้น ($\leq 0.01\%$)	1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.3 เกณฑ์การให้คะแนนระดับความสามารถในการตรวจจับปัญหา (D)

การตรวจพบ	แนวโน้มในการตรวจพบสาเหตุของ ความเสียหาย/ งานเสีย	ระดับ
เกือบจะเป็นไปไม่ได้ (Almost impossible)	ไม่สามารถตรวจพบแนวโน้มที่จะเกิดสาเหตุให้เกิดความเสียหาย	10
ห่างไกลมาก (Very remote)	ความสามารถที่จะตรวจพบแนวโน้มที่จะเกิดสาเหตุที่ทำให้เกิด ความเสียหาย ยังห่างไกลมาก	9
ห่างไกล (Remote)	ความสามารถที่จะตรวจพบแนวโน้มที่จะเกิดสาเหตุที่ทำให้เกิด ความเสียหาย ยังห่างไกล	8
ต่ำมาก (Very low)	ความสามารถที่จะตรวจพบแนวโน้มที่จะเกิดสาเหตุที่ทำให้เกิด ความเสียหาย ยังต่ำมาก	7
ต่ำ (Low)	ความสามารถที่จะตรวจพบแนวโน้มที่จะเกิดสาเหตุที่ทำให้เกิด ความเสียหาย ยังต่ำ	6
ปานกลาง (Moderate)	ความสามารถที่จะตรวจพบแนวโน้มที่จะเกิดสาเหตุที่ทำให้เกิด ความเสียหาย อยู่ในระดับปานกลาง	5
ค่อนข้างสูง (Moderately high)	ความสามารถที่จะตรวจพบแนวโน้มที่จะเกิดสาเหตุที่ทำให้เกิด ความเสียหาย อยู่ในระดับค่อนข้างสูง	4
สูง (High)	ความสามารถที่จะตรวจพบแนวโน้มที่จะเกิดสาเหตุที่ทำให้เกิด ความเสียหาย อยู่ในระดับสูง	3
สูงมาก (Very high)	ความสามารถที่จะตรวจพบแนวโน้มที่จะเกิดสาเหตุที่ทำให้เกิด ความเสียหายยัง อยู่ในระดับสูงมาก	2
เกือบแน่นอน (Almost certain)	ความสามารถที่จะตรวจพบแนวโน้มที่จะเกิดสาเหตุที่ทำให้เกิด ความเสียหาย อยู่ในระดับที่สามารถตรวจจับได้เกือบแน่นอน	1



ภาคผนวก ข

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1 ขอบเขตควบคุมของ CCC-1 CCC-2 และ CCC-3 (Xie et al., 1998)

p	CCC-1			CCC-2			CCC-3		
	UCL	CL	LCL	UCL	CL	LCL	UCL	CL	LCL
0.0001	66,074	6,932	13	91,895	16,786	530	114,341	26,746	2,118
0.0002	33,035	3,466	7	43,522	8,391	265	52,817	13,368	1,060
0.0003	22,023	2,311	5	29,487	5,594	177	35,959	8,913	707
0.0004	16,516	1,733	4	22,316	4,196	133	27,284	6,685	531
0.0005	13,212	1,386	3	17,953	3,357	107	21,990	5,349	425
0.0006	11,010	1,155	3	14,744	2,797	89	17,973	4,457	354
0.0007	9,437	990	2	12,699	2,398	77	15,505	3,820	304
0.0008	8,257	867	2	11,158	2,098	67	13,640	3,343	266
0.0009	7,339	770	2	9,831	1,865	60	11,982	2,971	237
0.0010	6,605	693	2	8,876	1,678	54	10,833	2,674	213
0.0020	3,301	347	1	4,436	839	27	5,414	1,337	107
0.0030	2,200	231	1	2,968	560	19	3,626	892	72
0.0040	1,649	173	1	2,222	420	14	2,715	669	54
0.0050	1,319	139	1	1,776	336	12	2,169	535	44
0.0060	1,098	116	1	1,479	280	10	1,806	446	37
0.0070	941	99	1	1,269	240	9	1,550	382	32
0.0080	823	87	1	1,110	210	8	1,355	334	28
0.0090	731	77	1	986	187	7	1,204	297	25
0.0100	658	69	1	886	168	6	1,083	268	23
0.0200	328	35	1	441	84	4	539	134	12
0.0300	217	23	1	293	56	3	358	89	9
0.0400	162	17	1	219	42	2	268	67	7
0.0500	129	14	1	175	34	2	213	54	6

ตารางที่ ข.2 ขอบเขตควบคุมของ CCC-4 CCC-5 และ CCC-6 (Xie et al., 1998)

p	CCC-4			CCC-5			CCC-6		
	UCL	CL	LCL	UCL	CL	LCL	UCL	CL	LCL
0.0002	61,309	18,357	2,328	69,284	23,349	3,961	76,940	28,343	5,877
0.0004	31,872	9,181	1,165	36,213	11,678	1,982	40,385	14,176	2,940
0.0006	20,936	6,120	777	23,726	7,785	1,322	26,403	9,450	1,961
0.0008	15,930	4,590	583	18,090	5,839	992	20,178	7,088	1,471
0.0010	12,628	3,672	467	14,327	4,671	794	15,952	5,670	1,177
0.0020	6,312	1,836	234	7,160	2,336	398	7,973	2,835	590
0.0030	4,231	1,224	157	4,804	1,557	266	5,355	1,890	394
0.0040	3,168	918	118	3,596	1,168	200	4,006	1,418	296
0.0050	2,528	735	95	2,873	934	160	3,201	1,134	237
0.0060	2,107	612	79	2,392	779	134	2,664	945	198
0.0070	1,809	525	68	2,054	667	115	2,289	810	170
0.0080	1,582	459	60	1,795	584	101	2,001	709	149
0.0090	1,405	408	53	1,595	519	90	1,777	630	133
0.0100	1,263	367	48	1,434	467	81	1,598	567	120
0.0200	630	184	25	715	234	42	796	284	61
0.0300	418	123	17	475	156	29	529	189	42
0.0400	313	92	13	355	117	22	396	142	32
0.0500	249	74	11	283	94	18	316	114	26
0.0600	207	61	10	235	78	15	262	95	22
0.0700	177	53	9	201	67	14	224	81	19
0.0800	154	46	8	175	59	12	195	71	17
0.0900	136	41	7	155	52	11	173	63	16
0.1000	122	37	7	139	47	10	155	57	14

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลจำนวนตรวจสอบสะสมจนกระทั่งพบแม่แบบเสีย 1 ตัว
ระยะทดสอบยืนยันผล (จากซ้ายไปขวา)

768	1370	569	1489	1128	890	1378	647	1570	903
1239	932	1409	1627	537	579	70	815	1567	893
1432	890	948	732	1162	1253	1437	977	1753	1839
561	783	1635	1374	735	1937	1028	865	1273	1233
937	17	1172	2134	837	763	1730	836	1372	387
625	918	1233	543	234	2827	1265	670	2	824
1124	985	794	1379	567	765	543	1890	1238	904
1325	1270	1378	715	635	943	344	1736	1633	603
3094	1370	732	2383	3075	1836	644	537	762	832
5	1532	465	973	733	1635	383	537	635	1342
2295	936	364	1235	937	646	1374	783	1232	1736
1556	1937	1432	862	542	1132	239	637	1336	273
736	737	947	837	144	436	832	1048	76	1830
756	1203	938	376	937	643	1653	638	436	545
736	153	862	763	948	732	1881	948	234	947
1535	746	398	1252	537	1482	1653	2288	1635	1937
231	1693	651	1427	638	1743	173	1432	2147	7
846	737	1274	614	312	936	1830	342	453	937
837	678	1183	872	2163	1038	1263	937	2431	1826

1.6FSV (MR 8) PTN 55 Polymerization Oven Time Sheet

Start Date _____ Time _____ Shift _____ Name _____ Oven No. _____

Finish Date _____ Time _____ Shift _____ Name _____ PTN No. _____

Motive SW (ON) Heater SW (ON) Exhaust SW (Auto) Main Power (ON) RCD Record (ON)

Cooling BL (Auto) Cooling SV (Auto) Buzzer SW (ON) Temp. Record (ON) Manu SW (ON)

Start Temp: _____ Start Time: _____

Finish Temp: _____ Finish Time: _____

Step	Temp. Setting		Temp. Act.	Time Check	Check By	
	Begin	End			Poly.	Mold Keeper
1	15.0	15.0				
2	15.0	15.0				
3	15.0	15.1				
4	15.1	15.1				
5	15.1	15.3				
6	15.3	15.4				
7	15.4	15.8				
8	15.8	16.3				
9	16.3	17.1				
10	17.1	18.5				
11	18.5	20.7				
12	20.7	24.4				

Step	Temp. Setting		Temp. Act.	Time Check	Check By	
	Begin	End			Poly.	Mold Keeper
13	24.4	30.5				
14	30.5	40.6				
15	40.6	57.3				
16	57.3	84.7				
17	84.7	130.0				
18	130.0	130.0				
19	130.0	130.0				
20	130.0	130.0				
21	130.0	130.0				
22	130.0	130.0				
23	130.0	130.0				
24	130.0	130.0				

รูปที่ ข.2 แผ่นรายการตรวจสอบเวลาและอุณหภูมิของการโพลิเมอไรเซชัน

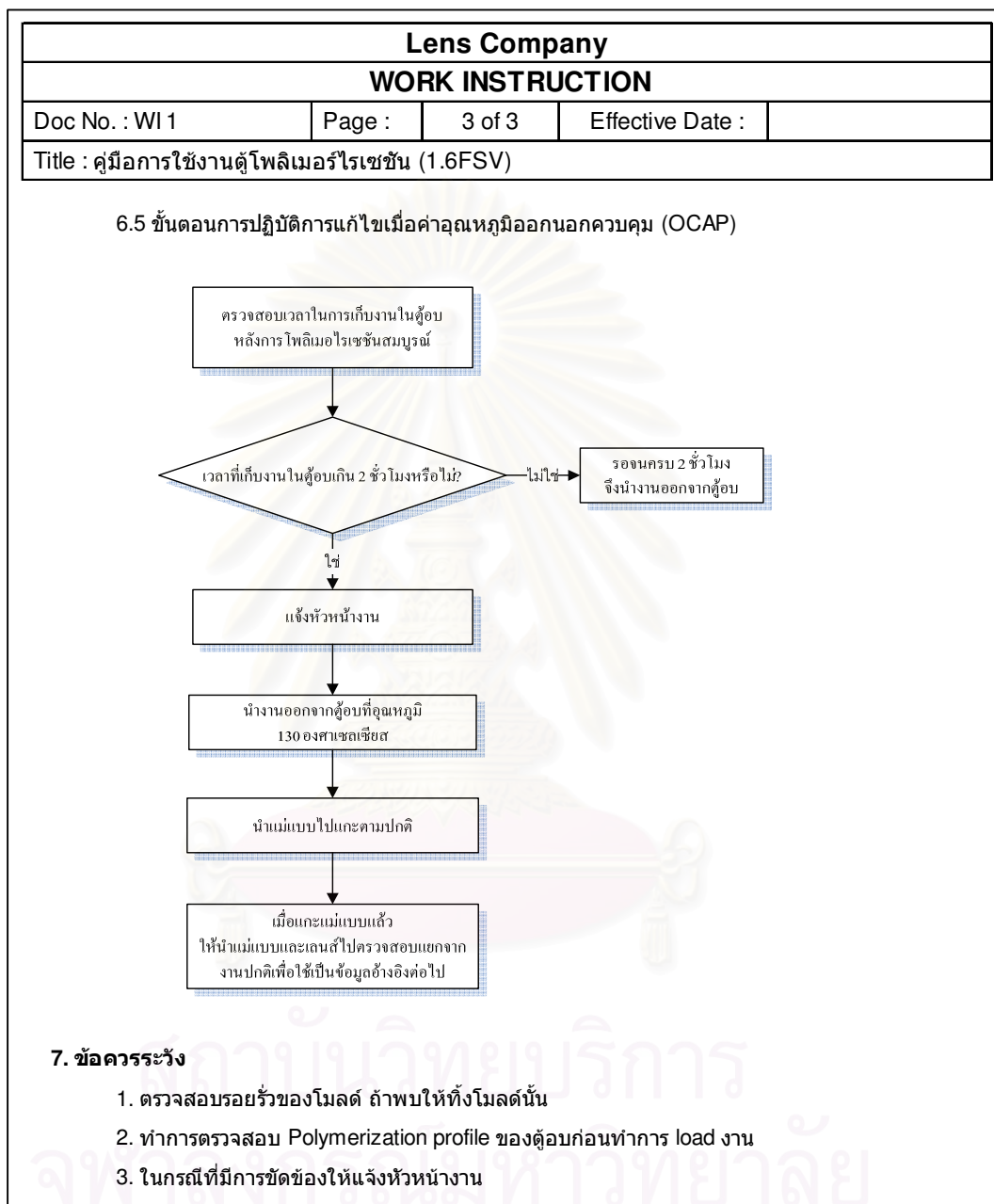
ตารางที่ ข.4 เอกสารการปฏิบัติงาน กระบวนการโพลีเมอร์ไรเซชัน

Lens Company							
WORK INSTRUCTION							
Doc No. : WI 1	Page :	1 of 3	Effective Date :				
Title : คู่มือการใช้งานตู้โพลีเมอร์ไรเซชัน (1.6FSV)							
<p>1. วัตถุประสงค์</p> <p>เพื่อเป็นคู่มือการใช้งานเครื่องโพลีเมอร์ไรเซชัน และให้แน่ใจว่าการผลิตภัณฑ์ได้รับการโพลีเมอร์ไรเซชันได้ในระดับอุณหภูมิที่ต้องการ</p> <p>2. ขอบข่าย</p> <p>วิธีการทำงานตามเอกสารนี้นำมาใช้กับพนักงานประจำตู้โพลีเมอร์ไรเซชัน และพนักงานเก็บแม่แบบในการเปิด-ปิดตู้โพลีเมอร์ไรเซชัน</p> <p>3. เอกสารอ้างอิง</p> <table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;">ชื่อเรื่อง</td> <td style="width: 50%;">เลขที่เอกสาร</td> </tr> <tr> <td>1.6 Casting Procedure</td> <td>XXX</td> </tr> </table> <p>4. หน้าที่ความรับผิดชอบ</p> <p>พนักงานประจำตู้โพลีเมอร์ไรเซชัน และพนักงานเก็บแม่แบบ (Mold Keeper Operator)</p> <p>5. อุปกรณ์ความปลอดภัยและวัสดุ</p> <p>5.1 อุปกรณ์ความปลอดภัย</p> <ul style="list-style-type: none"> 5.1.1 ผ้าปิดจมูก 5.1.2 เสื้อคลุมสีขาว 5.1.3 ผ้ากันเปื้อน 5.1.4 ถุงมือเคลือบ 5.1.5 ถุงมือผ้า 5.1.6 รองเท้าเซฟตี้ <p>5.2 ข้อควรตระหนักเรื่องความปลอดภัย</p> <ul style="list-style-type: none"> 5.2.1 สวมใส่อุปกรณ์ป้องกันภัยส่วนบุคคลให้เรียบร้อยก่อนเริ่มปฏิบัติงานและในขณะที่ปฏิบัติงาน <p>6. ขั้นตอนการทำงาน</p> <p>6.1 ขั้นตอนการเปิดเครื่อง</p> <ul style="list-style-type: none"> 6.1.1 เปิดวาล์วน้ำหล่อเย็นเพื่อจ่ายเข้าเครื่องและเปิดสวิตช์แหล่งจ่ายไฟเข้าเครื่อง 6.1.2 ทำการเลือกตำแหน่งของสวิตช์บริเวณชุดควบคุมให้อยู่ในตำแหน่ง ON 6.1.3 ตรวจสอบค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ของ Oven heat cut regulator. 6.1.4 เลือกโปรแกรม 55 สำหรับผลิตภัณฑ์ 1.6FSV จากชุด "PATTERN CHANGE" 				ชื่อเรื่อง	เลขที่เอกสาร	1.6 Casting Procedure	XXX
ชื่อเรื่อง	เลขที่เอกสาร						
1.6 Casting Procedure	XXX						

ตารางที่ ข.4 เอกสารการปฏิบัติงาน กระบวนการโพลีเมอร์ไรเซชัน (ต่อ)

Lens Company											
WORK INSTRUCTION											
Doc No. : WI 1	Page :	2 of 3	Effective Date :								
Title : คู่มือการใช้งานตู้โพลีเมอร์ไรเซชัน (1.6FSV)											
<p>6.1.5 เมื่อนำเลนส์เข้าตู้อบแล้วยกปุ่ม Reset 1 ครั้ง หลังจากนั้นทำตามขั้นตอนต่อไป</p> <p>6.1.6 Manual switch Run-Stop ที่ตำแหน่ง Stop</p> <p>6.1.7 ตรวจสอบอุณหภูมิของ SV ที่หน้าจอบของตัวควบคุมต้องเป็นอุณหภูมิเริ่มการโพลีเมอร์ไรเซชัน คือ 15 °C (สำหรับงาน 1.6FSV)</p> <p>6.1.8 รอจนกระทั่งอุณหภูมิของ PV เท่ากับอุณหภูมิของ SV</p> <p>6.1.9 ทำการเช็คสวิทช์ Temp Recorder เป็นหน้าเครื่อง</p> <p>6.1.10. Indicate สวิทช์ และ Record สวิทช์อยู่ในตำแหน่ง ON</p> <p>6.1.11 ทำการ Reset ปุ่ม Reset ก่อนที่จะเริ่ม Start ตู้อบ</p> <p>6.1.12 ทำการเลื่อนปุ่ม Run – Stop ไปที่ตำแหน่ง Run หลังจากทำการนำรถเข็นเข้าตู้อบแล้ว</p> <p>6.2 ขั้นตอนการนำงานเข้าตู้อบ</p> <p>6.2.1 ตรวจสอบ Cycle Profile 1.6SFV = PTN55 (19 ชั่วโมง)</p> <p>6.2.2 ปิดและเริ่มกระบวนการอบ</p> <p>6.2.3 ให้ตรวจสอบอุณหภูมิของตู้ oven ทุก ๆ 1 ชั่วโมงและบันทึกลงในใบรายการตรวจสอบ</p> <p>6.2.4 เมื่อสิ้นสุดชั่วโมงที่ 17 ให้ทำการปรับระดับอุณหภูมิให้อยู่ที่ 130 °C (Manual Switch)</p> <p>6.2.5 นำงานออกจากตู้อบเมื่อครบชั่วโมงที่ 19</p> <p>6.3 การเปิดเครื่อง</p> <p>6.3.1 เลื่อนปุ่ม Run – Stop ไปที่ Stop หลังจากนำงานออกจากตู้</p> <p>6.3.2 เลื่อนปุ่มในตู้ Temp Recorder หน้าเครื่องไปที่ตำแหน่ง OFF.</p> <p>6.3.3 เลื่อนปุ่ม Power supply ไปตำแหน่ง OFF</p> <p>6.4 Process Control Plan</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 60%;">ปัจจัย</th> <th style="width: 40%;">MR8 (1.60)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cycle Profile</td> <td>PTN55</td> </tr> <tr> <td>ระยะเวลาเก็บงานในตู้อบหลังชั่วโมงที่ 17</td> <td>2 ชั่วโมง</td> </tr> <tr> <td>อุณหภูมินำงานออกจากตู้อบ</td> <td>130 °C</td> </tr> </tbody> </table>				ปัจจัย	MR8 (1.60)	Cycle Profile	PTN55	ระยะเวลาเก็บงานในตู้อบหลังชั่วโมงที่ 17	2 ชั่วโมง	อุณหภูมินำงานออกจากตู้อบ	130 °C
ปัจจัย	MR8 (1.60)										
Cycle Profile	PTN55										
ระยะเวลาเก็บงานในตู้อบหลังชั่วโมงที่ 17	2 ชั่วโมง										
อุณหภูมินำงานออกจากตู้อบ	130 °C										

ตารางที่ ข.4 เอกสารการปฏิบัติงาน กระบวนการโพลีเมอร์ไรเซชัน (ต่อ)



ตารางที่ ข.5 เอกสารการปฏิบัติงานของพนักงานผู้เก็บงาน

Lens Company							
WORK INSTRUCTION							
Doc No. : WI 2	Page :	1 of 2	Effective Date :				
Title : คู่มือการใช้งานตู้เก็บงานผลิตภัณฑ์ 1.6FSV (Holding Oven)							
<p>1. วัตถุประสงค์ เพื่อให้แน่ใจว่าการผลิตภัณฑ์มีระดับอุณหภูมิในการแกะตามที่กำหนด</p> <p>2. ขอบข่าย วิธีการทำงานตามเอกสารนี้นำมาใช้กับพนักงานเก็บแม่แบบประจำตู้เก็บงาน</p> <p>3. เอกสารอ้างอิง</p> <table border="0"> <tr> <td>ชื่อเรื่อง</td> <td>เลขที่เอกสาร</td> </tr> <tr> <td>1.6 Casting Procedure</td> <td>XXX</td> </tr> </table> <p>4. หน้าที่ความรับผิดชอบ พนักงานเก็บแม่แบบ (Mold Keeper Operator)</p> <p>5. อุปกรณ์ความปลอดภัยและวัสดุ</p> <p>5.1 อุปกรณ์ความปลอดภัย</p> <p>5.1.1 ผ้าปิดจมูก</p> <p>5.1.2 เสื้อคลุมสีขาว</p> <p>5.1.3 ผ่ากันเปื้อน</p> <p>5.1.4 ถุงมือ</p> <p>5.1.5 ถุงมือเคลือบ</p> <p>5.1.6 รองเท้าเซฟตี้</p> <p>5.2 ข้อควรตระหนักเรื่องความปลอดภัย</p> <p>5.2.1 สวมใส่อุปกรณ์ป้องกันภัยส่วนบุคคลให้เรียบร้อยก่อนเริ่มปฏิบัติงานและในขณะที่ปฏิบัติงาน</p> <p>6. ขั้นตอนการทำงาน</p> <p>6.1 ทำการเลือกตำแหน่งของสวิทช์บริเวณชุดควบคุมให้อยู่ในตำแหน่ง ON</p> <p>6.2 ตรวจสอบอุณหภูมิของ SV ที่หน้าจอบของตัวควบคุมต้องเป็นอุณหภูมิของการเก็บงาน คือ 100 °C (สำหรับงาน 1.6FSV)</p> <p>6.3 นำงานใส่ในตู้</p> <p>6.4 รออย่างน้อย 30 นาทีจนกระทั่งอุณหภูมิของ PV เท่ากับอุณหภูมิของ SV</p>				ชื่อเรื่อง	เลขที่เอกสาร	1.6 Casting Procedure	XXX
ชื่อเรื่อง	เลขที่เอกสาร						
1.6 Casting Procedure	XXX						

ตารางที่ ข.5 เอกสารการปฏิบัติงานของพนักงานผู้เก็บงาน (ต่อ)

Lens Company			
WORK INSTRUCTION			
Doc No. : WI 2	Page :	2 of 2	Effective Date :
Title : คู่มือการใช้งานตู้เก็บงานผลิตภัณฑ์ 1.6FSV (Holding Oven)			

6.5 ตรวจสอบอุณหภูมิของแม่แบบถาดบน (ถาดที่ 15) ถาดกลาง (ถาดที่ 8) และถาดล่าง (ถาดที่ 1) อย่างละ 1 ตัว ของทุกตู้โดยใช้เครื่องวัดอุณหภูมิแบบเลเซอร์แล้วทำการบันทึกค่าในแผนรายการตรวจสอบ

6.6 นำงานออกมาแกะหากได้ค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วงที่กำหนด

6.7 Process Control Plan

Temp.	MR8 (1.60)
Holding oven setting Temperature	100 \pm 5 °C
Holding Time	>30 min
Disassembly Temperature	90 \pm 5 °C

6.5 ขั้นตอนการปฏิบัติการแก้ไขเมื่อค่าอุณหภูมิออกนอกควบคุม (OCAP)

```

graph TD
    A[ตรวจสอบอุณหภูมิก่อนแกะคลิปลและกาสกึ่ง  
(1 ตัวของทุกถาดบน กลาง และล่าง  
ของผู้เก็บงาน)] --> B{อุณหภูมิของแม่แบบแต่ละตัวเป็นไปตาม  
ค่าที่กำหนดหรือไม่?}
    B -- ใช่ --> C[แกะแม่แบบตามปกติ]
    B -- ไม่ใช่ --> D{ปัญหาเกิดจากตัวเครื่อง}
    D -- ใช่ --> E[แจ้งหัวหน้างาน  
และฝ่ายซ่อมบำรุง  
ให้ทำการแก้ไข]
    D -- ไม่ใช่ --> F[รอนกระทั่งอุณหภูมิได้ตามที่กำหนดจึง  
นำงานออกมาแกะ]
  
```

7. ข้อควรระวัง

7.1 ห้ามปล่อยแม่แบบที่นำออกจากตู้เก็บงานทิ้งไว้ (ให้ทำการแกะทันที) เพราะจะมีผลกระทบต่อการแกะประกอบ

7.2 การเก็บในตู้เก็บงานให้เก็บไว้อย่างน้อย 30 นาทีเพื่อให้ได้อุณหภูมิในการแกะแม่แบบตามที่กำหนด

Lens Company

Mold Temp. Check Sheet of Disassembly (1.6FSV)

Date _____ Shift _____ Station No. _____ Operator Name _____

No.	Plate No.	Mold Temp	No.	Plate No.	Mold Temp	No.	Plate No.	Mold Temp	No.	Plate No.	Mold Temp
1			26			51			76		
2			27			52			77		
3			28			53			78		
4			29			54			79		
5			30			55			80		
6			31			56			81		
7			32			57			82		
8			33			58			83		
9			34			59			84		
10			35			60			85		
11			36			61			86		
12			37			62			87		
13			38			63			88		
14			39			64			89		
15			40			65			90		
16			41			66			91		
17			42			67			92		
18			43			68			93		
19			44			69			94		
20			45			70			95		
21			46			71			96		
22			47			72			97		
23			48			73			98		
24			49			74			99		
25			50			75			100		

รูปที่ ข.4 แผ่นรายการตรวจสอบอุณหภูมิแม่แบบก่อนการแกะ (จุดควบคุมที่ 2)

ตารางที่ ข.6 เอกสารการปฏิบัติงาน กระบวนการแกะแม่แบบ

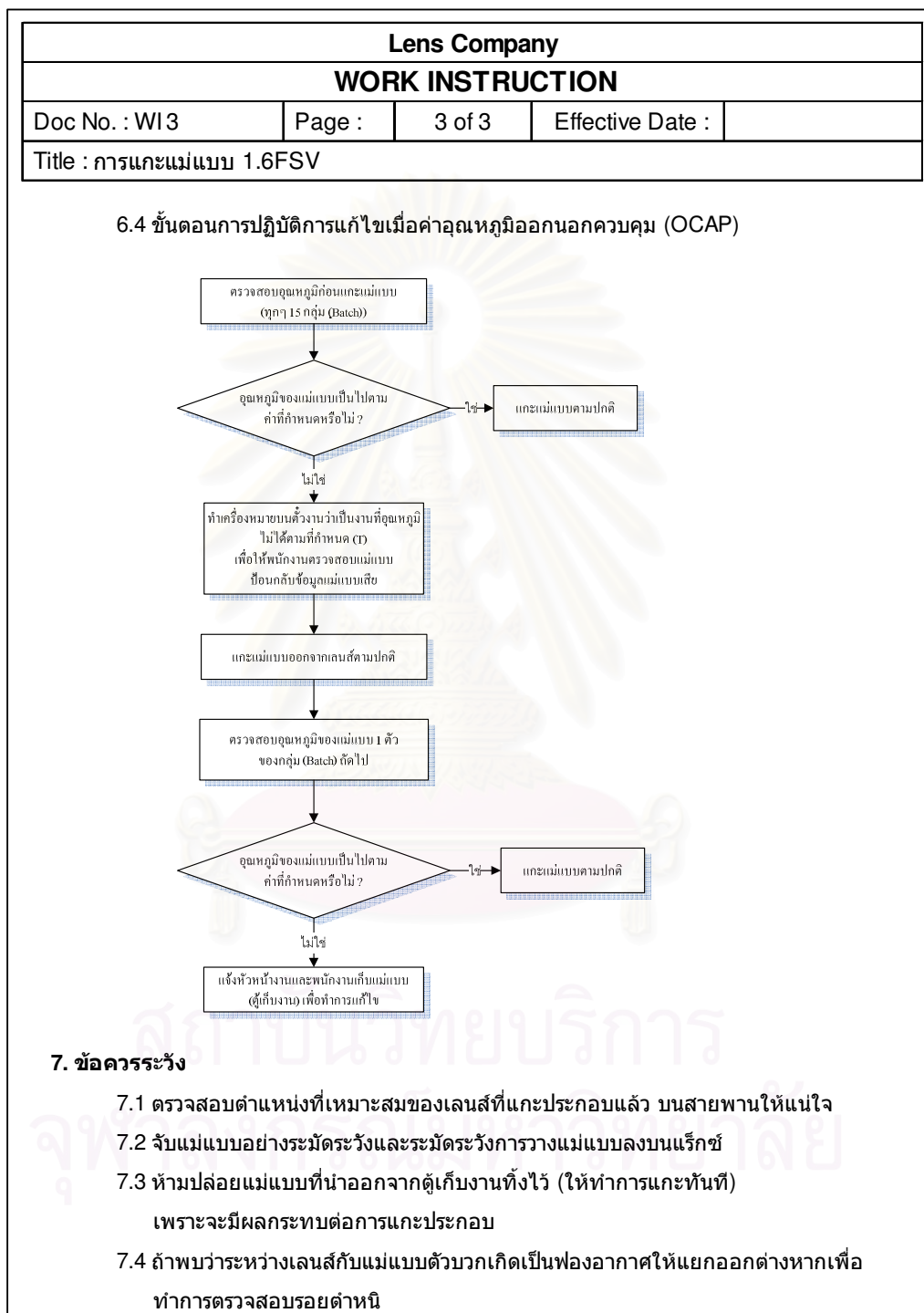
Lens Company							
WORK INSTRUCTION							
Doc No. : WI3	Page :	1 of 3	Effective Date :				
Title : การแกะแม่แบบ 1.6FSV							
<p>1. วัตถุประสงค์ ทำการแยกเลนส์ออกจากแม่แบบแซนตวิช</p> <p>2. ขอบข่าย วิธีการทำงานตามเอกสารนี้นำมาใช้กับพนักงานแยกเลนส์ออกจากโมลด์</p> <p>3. เอกสารอ้างอิง</p> <table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;">ชื่อเรื่อง</td> <td style="width: 50%;">เลขที่เอกสาร</td> </tr> <tr> <td>1.6 Casting Procedure</td> <td>XXX</td> </tr> </table> <p>4. หน้าที่ความรับผิดชอบ พนักงานแยกเลนส์ออกจากโมลด์ (Disassembly Operator)</p> <p>5. อุปกรณ์ความปลอดภัยและวัสดุ</p> <p>5.1 อุปกรณ์ความปลอดภัย</p> <ul style="list-style-type: none"> 5.1.1 หมวกคลุมผม 5.1.2 ที่อุดหู 5.1.3 เสื้อคลุมกันไฟฟ้าสถิตย์ 5.1.4 รองเท้าผ้าใบ 5.1.5 ถุงมือ 5.1.6 ผ้าปิดจมูกคาร์บอน 5.1.7 ถุงมือเคลือบ <p>5.2 ข้อควรตระหนักเรื่องความปลอดภัย</p> <ul style="list-style-type: none"> 5.2.1 สวมใส่อุปกรณ์ป้องกันภัยส่วนบุคคลให้เรียบร้อย ก่อนเริ่มปฏิบัติงานและในขณะปฏิบัติงาน <p>6. ขั้นตอนการทำงาน</p> <p>6.1 การเตรียมก่อนการแกะแม่แบบ</p> <ul style="list-style-type: none"> 6.1.1 ตรวจสอบพารามิเตอร์ทั้งหมดบนรายการตรวจสอบของขั้นตอนการแกะกาสเกิด ก่อนเริ่มการทำงาน ถ้าพารามิเตอร์ทุกอย่างอยู่ในข้อกำหนดก็เริ่มการแกะกาสเกิด 6.1.2 ปรับแรงดันลม ของเครื่องแกะประกอบที่ 6 บาร์ 				ชื่อเรื่อง	เลขที่เอกสาร	1.6 Casting Procedure	XXX
ชื่อเรื่อง	เลขที่เอกสาร						
1.6 Casting Procedure	XXX						

ตารางที่ ข.6 เอกสารการปฏิบัติงาน กระบวนการแกะแม่แบบ (ต่อ)

Essilor Manufacturing (Thailand) Company limited											
WORK INSTRUCTION											
Doc No. : WI 3	Page :	2 of 3	Effective Date :								
Title : การแกะแม่แบบ 1.6FSV											
<p>6.1.3 ตรวจสอบหมายเลขกลุ่มงาน (Batch) ที่ทำการแกะในโปรแกรม</p> <p>6.2 ขั้นตอนการแกะแม่แบบ</p> <p>6.2.1 ตรวจสอบให้แน่ใจว่าแร็คซ์ใส่แม่แบบที่จะใช้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง ที่ถูกต้องวางแร็คซ์แม่แบบบนอุปกรณ์นำแนว (Jig) ที่จัดไว้</p> <p>6.2.2 หยิบแม่แบบที่แกะคลิบและกาสเกิดแล้วจากสายพานวางลงบนโต๊ะทำงาน</p> <p>6.2.3 ตรวจสอบอุณหภูมิก่อนทำการแกะแม่แบบ 1 ตัว โดยใช้เครื่องวัดอุณหภูมิ แบบเลเซอร์ทุกๆ 15 กลุ่ม (Batch) และทำการบันทึกค่าในแผ่นรายการตรวจสอบ</p> <p>6.2.4 แกะแม่แบบโดยรดกับสปรายทูลา แล้วตรวจสอบชั้นต้นที่แม่แบบว่ามีตำหนิหรือไม่ จากนั้นวางแม่แบบในแร็คซ์แม่แบบ</p> <p>6.2.5 เป่าเลนส์ด้วยแรงดันลม 6 บาร์ เพื่อให้เลนส์หลุดออกจากแม่แบบอีกด้าน (ให้แน่ใจว่าจับโมลด์ที่ขอบเท่านั้น) ทำการตรวจสอบเลนส์ว่ามีตำหนิหรือไม่ ในกรณีที่พบตำหนิให้เขียนบอกรายละเอียดของตำหนิในด้วงงาน ที่เสียบกับแร็คซ์เลนส์และแร็คแม่แบบอย่างละ 1 ใบ</p> <p>6.2.6 วางเลนส์ที่แกะแล้วบนแร็คซ์เลนส์ เมื่อทำการแกะครบทั้งกลุ่มแล้วให้ เสียบด้วงงานในแร็คซ์ แล้วปล่อยแร็คซ์เลนส์ลงบนสายพาน</p> <p>6.2.7 ส่วนแร็คซ์แม่แบบ ให้วางบนรถเข็นเพื่อนำไปล้างโดยเครื่องล้างต่อไป</p> <p>6.3 Process Control Plan</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Temp.</th> <th>MR8 (1.60)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Holding oven setting Temperature</td> <td>100 \pm5 °C</td> </tr> <tr> <td>Holding Time</td> <td>>30 min</td> </tr> <tr> <td>Disassembly Temperature</td> <td>90 \pm5 °C</td> </tr> </tbody> </table>				Temp.	MR8 (1.60)	Holding oven setting Temperature	100 \pm 5 °C	Holding Time	>30 min	Disassembly Temperature	90 \pm 5 °C
Temp.	MR8 (1.60)										
Holding oven setting Temperature	100 \pm 5 °C										
Holding Time	>30 min										
Disassembly Temperature	90 \pm 5 °C										

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.6 เอกสารการปฏิบัติงาน กระบวนการแกะแม่แบบ (ต่อ)



ตารางที่ ข.7 ข้อมูลอุณหภูมิของแม่แบบก่อนแกะคลิป์และกาสเก็ต (จุดควบคุมที่ 1) ในระยะควบคุมกระบวนการ

No.	Top	Mid	Bot
1	99.9	99.4	100.4
2	99.3	100.4	99.5
3	103.3	102.9	101.2
4	96.9	97.1	98.3
5	100.5	101.4	102.7
6	102.1	99.6	102.8
7	111.2	113.3	112.8
8	99.2	98.3	99.4
9	99.8	100.2	101.0
10	112.5	110.3	114.1
11	101.9	97.6	97.8
12	103.1	100.4	100.6
13	100.1	102.7	99.9
14	97.5	96.3	97.0
15	102.4	98.6	100.4
16	102.7	103.1	103.9
17	101.5	100.7	102.0
18	101.7	101.3	100.4
19	97.4	97.5	98.3
20	102.4	98.9	101.1
21	103.5	99.4	100.2
22	102.1	101.7	102.2
23	101.0	102.2	100.0
24	99.4	99.2	96.6
25	99.0	104.3	101.3
26	103.1	100.1	103.0
27	98.8	97.4	99.8
28	99.3	98.6	96.5
29	103.8	102.3	100.3
30	100.4	102.3	97.4

No.	Top	Mid	Bot
31	101.1	99.5	102.4
32	98.8	100.8	98.6
33	101.9	103.1	99.1
34	104.2	99.9	96.8
35	101.4	102.2	104.3
36	102.3	98.8	103.3
37	99.4	96.6	99.7
38	101.8	99.8	101.9
39	103.5	100.9	100.5
40	101.0	100.5	99.0
41	101.6	98.4	102.4
42	101.5	99.0	100.1
43	98.1	100.9	99.9
44	101.5	99.6	101.2
45	102.2	103.4	101.9
46	100.2	99.3	101.8
47	103.1	96.4	98.3
48	99.0	98.9	103.1
49	100.1	97.2	100.3
50	99.8	102.8	101.0
51	102.2	101.8	100.9
52	100.1	100.8	100.8
53	99.6	104.3	99.4
54	103.5	102.0	101.5
55	101.5	101.9	102.0
56	100.6	99.5	102.8
57	100.8	101.6	98.8
58	101.5	98.2	98.5
59	103.5	102.9	97.2
60	98.7	100.4	97.6

No.	Top	Mid	Bot
61	101.3	101.9	99.9
62	102.4	101.5	103.2
63	100.9	98.3	101.9
64	100.1	102.7	103.8
65	100.0	102.7	102.9
66	102.6	99.9	104.1
67	102.7	99.3	99.5
68	99.2	102.5	103.3
69	100.1	98.9	101.1
70	101.8	103.1	101.6
71	100.7	99.5	100.2
72	102.3	101.5	100.3
73	95.4	101.7	99.8
74	103.8	104.1	101.6
75	96.6	102.9	102.6
76	98.7	99.6	98.9
77	97.9	102.3	101.4
78	103.2	103.6	97.3
79	99.1	101.7	101.3
80	102.0	97.9	99.1
81	100.6	101.4	102.0
82	103.1	100.3	100.0
83	101.4	100.8	101.2
84	100.7	100.4	98.3
85	99.3	101.0	102.4

ตารางที่ ข.8 ข้อมูลอุณหภูมิของแม่แบบก่อนการแกะ (จุดควบคุมที่ 2) ในระยะควบคุมกระบวนการ

No. 1	Temp. 90.3	No. 61	Temp. 91.5	No. 121	Temp. 87.2	No. 181	Temp. 91.7	No. 241	Temp. 89.9	No. 301	Temp. 91.1	No. 361	Temp. 91.4	No. 421	Temp. 91.0	No. 481	Temp. 89.1	No. 541	Temp. 90.3
2	89.1	62	88.9	122	93.6	182	87.6	242	92.7	302	94.7	362	92.6	422	92.2	482	90.5	542	93.6
3	91.5	63	92.8	123	87.7	183	90.2	243	92.8	303	90.8	363	90.6	423	89.6	483	91.7	543	92.2
4	94.7	64	89.5	124	91.1	184	94.0	244	91.6	304	92.7	364	86.9	424	88.9	484	93.4	544	92.6
5	90.5	65	87.7	125	90.0	185	90.3	245	93.7	305	91.4	365	91.6	425	90.8	485	93.0	545	94.4
6	89.4	66	88.0	126	92.6	186	92.5	246	91.1	306	93.1	366	94.7	426	93.6	486	93.1	546	93.2
7	92.2	67	88.8	127	89.0	187	89.5	247	91.3	307	92.9	367	88.7	427	92.7	487	92.1	547	86.9
8	91.8	68	91.1	128	93.0	188	88.0	248	90.3	308	94.7	368	89.8	428	90.3	488	88.7	548	92.3
9	87.3	69	92.2	129	90.1	189	93.4	249	88.6	309	92.4	369	90.6	429	93.1	489	91.4	549	89.7
10	88.9	70	90.7	130	92.0	190	92.3	250	88.9	310	91.3	370	93.1	430	92.6	490	92.3		
11	93.1	71	91.6	131	92.2	191	90.4	251	88.1	311	89.2	371	88.3	431	90.1	491	93.1		
12	92.1	72	88.7	132	89.8	192	92.2	252	92.2	312	89.8	372	92.5	432	93.3	492	89.2		
13	90.4	73	93.6	133	90.8	193	90.2	253	92.6	313	91.6	373	90.1	433	92.0	493	91.4		
14	88.1	74	90.6	134	86.6	194	90.6	254	93.4	314	92.6	374	92.9	434	90.6	494	86.7		
15	89.1	75	93.6	135	93.0	195	89.4	255	90.8	315	93.1	375	92.0	435	91.0	495	90.7		
16	91.4	76	88.8	136	94.0	196	92.8	256	89.7	316	92.9	376	91.1	436	92.1	496	89.0		
17	92.3	77	91.3	137	92.3	197	91.8	257	89.5	317	91.7	377	86.7	437	89.8	497	89.6		
18	89.1	78	94.0	138	91.2	198	92.6	258	88.7	318	90.1	378	89.3	438	90.6	498	92.2		
19	91.1	79	90.8	139	89.0	199	90.1	259	94.1	319	87.6	379	89.8	439	91.9	499	92.4		
20	91.8	80	91.4	140	91.4	200	91.6	260	93.5	320	91.9	380	87.4	440	93.2	500	92.2		
21	89.3	81	92.5	141	89.9	201	89.5	261	87.3	321	90.0	381	90.1	441	93.1	501	91.9		
22	89.1	82	89.8	142	90.0	202	89.5	262	90.7	322	89.0	382	92.3	442	89.2	502	92.2		
23	86.2	83	92.5	143	89.7	203	91.2	263	86.6	323	92.4	383	89.5	443	89.0	503	93.1		
24	88.0	84	91.8	144	89.8	204	88.5	264	87.5	324	92.4	384	94.5	444	89.7	504	94.1		
25	90.7	85	91.8	145	93.5	205	91.3	265	89.6	325	88.3	385	87.7	445	87.6	505	93.5		
26	89.6	86	93.1	146	93.2	206	89.0	266	89.0	326	89.6	386	88.5	446	87.9	506	90.2		
27	89.4	87	92.4	147	90.5	207	92.3	267	90.6	327	93.3	387	93.5	447	93.2	507	91.2		
28	93.7	88	90.7	148	90.3	208	92.9	268	92.3	328	93.0	388	91.8	448	91.3	508	92.1		
29	91.7	89	89.6	149	89.3	209	93.5	269	89.2	329	93.9	389	90.3	449	91.0	509	89.9		
30	87.1	90	90.6	150	93.5	210	87.8	270	93.5	330	89.7	390	91.5	450	91.1	510	88.2		
31	91.4	91	87.0	151	92.2	211	89.3	271	88.4	331	90.0	391	90.9	451	87.5	511	90.5		
32	91.2	92	90.6	152	94.1	212	91.1	272	89.6	332	89.7	392	94.0	452	91.8	512	94.1		
33	92.3	93	88.6	153	92.5	213	93.9	273	86.7	333	87.4	393	89.8	453	88.0	513	89.0		
34	89.7	94	92.5	154	91.2	214	91.5	274	90.2	334	90.2	394	91.3	454	90.9	514	90.7		
35	94.5	95	93.6	155	89.9	215	91.1	275	89.0	335	89.7	395	92.1	455	92.9	515	87.8		
36	90.8	96	87.6	156	87.2	216	94.5	276	91.0	336	89.5	396	88.6	456	89.2	516	93.2		
37	90.9	97	92.3	157	93.6	217	89.8	277	90.4	337	91.5	397	90.2	457	90.3	517	93.6		
38	92.5	98	88.4	158	91.3	218	93.3	278	89.6	338	90.6	398	88.1	458	87.6	518	89.2		
39	90.7	99	88.8	159	93.0	219	88.5	279	88.3	339	88.9	399	90.1	459	89.7	519	93.4		
40	91.6	100	92.5	160	90.9	220	89.9	280	92.1	340	92.2	400	93.2	460	90.8	520	91.8		
41	90.8	101	89.7	161	90.4	221	90.3	281	93.2	341	89.4	401	91.9	461	91.6	521	90.9		
42	91.2	102	88.2	162	88.6	222	94.2	282	90.6	342	88.6	402	89.8	462	87.5	522	88.8		
43	93.4	103	89.9	163	89.7	223	91.5	283	90.6	343	93.0	403	94.0	463	94.3	523	89.7		
44	91.9	104	89.9	164	93.0	224	90.6	284	89.5	344	92.7	404	91.7	464	89.1	524	93.0		
45	93.2	105	92.4	165	94.0	225	90.9	285	92.0	345	90.3	405	92.3	465	89.7	525	91.2		
46	89.4	106	93.3	166	91.3	226	87.8	286	88.8	346	89.2	406	91.3	466	90.5	526	90.4		
47	90.3	107	89.5	167	89.3	227	92.8	287	91.6	347	92.5	407	90.1	467	94.3	527	93.2		
48	91.2	108	87.2	168	88.5	228	91.8	288	91.6	348	90.6	408	92.5	468	91.6	528	90.9		
49	86.2	109	89.6	169	88.7	229	91.8	289	90.9	349	92.9	409	91.0	469	92.3	529	91.7		
50	88.8	110	90.0	170	91.4	230	90.2	290	89.9	350	91.1	410	93.4	470	90.2	530	93.2		
51	88.9	111	93.8	171	86.5	231	88.3	291	87.8	351	91.5	411	92.3	471	88.8	531	92.9		
52	90.7	112	91.7	172	90.1	232	88.0	292	92.8	352	87.4	412	86.8	472	91.9	532	92.8		
53	89.7	113	90.2	173	87.5	233	91.6	293	90.7	353	90.1	413	87.1	473	92.7	533	92.7		
54	93.3	114	90.0	174	92.8	234	93.2	294	92.9	354	90.6	414	91.6	474	89.7	534	92.9		
55	93.1	115	93.3	175	88.6	235	89.2	295	91.7	355	93.7	415	89.4	475	92.1	535	91.0		
56	94.3	116	91.8	176	91.7	236	90.8	296	88.9	356	94.7	416	91.6	476	87.0	536	92.8		
57	90.1	117	91.7	177	92.5	237	93.1	297	89.8	357	92.1	417	90.9	477	90.2	537	92.6		
58	91.6	118	90.1	178	94.0	238	89.6	298	86.6	358	92.5	418	94.5	478	92.1	538	89.0		
59	93.6	119	92.7	179	89.7	239	92.6	299	90.0	359	86.6	419	92.3	479	88.7	539	91.7		
60	89.3	120	91.2	180	90.0	240	86.5	300	92.9	360	90.5	420	89.7	480	93.0	540	89.4		

ตารางที่ ข.9 ข้อมูลจำนวนตรวจสอบสะสมกระท้งพบแม่แบบเสีย 1 ตัว
ระยะควบคุมกระบวนการ (จากซ้ายไปขวา)

1837	836	1323	937	1537	1638	938	1273	937	374
1323	2133	937	1736	937	628	1434	937	251	1937
528	1635	165	1635	628	2837	1763	938	1231	726
1283	827	1837	938	638	1437	827	2163	378	1573
1826	3125	1625	2765	1736	1983	1736	637	2284	867
937	1325	739	1127	1263	927	23	1233	763	1423
827	1162	627	826	154	928	679	936	538	648
736	1326	1443	837	1534	1736	638	832	927	1233
739	826	527	1232	583	928	62	1522	729	927
346	1624	1028	1627	837	1542	2381	1983	1282	1635
982	2651	1328	527	1837	937	1327	938	639	1529
1273	837	2182	1538	1837	1625	429	1932	2397	873
1321	592	1426	937	736	682	1635	625	720	1762
820	782	321	1358	1872	1529	928	2028	2461	1906

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.10 รายละเอียดของการคิดมูลค่าความสูญเสียหลังการปรับปรุง

ข้อมูล	ขั้นตอนทดสอบ ยืนยันผล	ขั้นตอนควบคุม กระบวนการผลิต	จากการพยากรณ์											
			เดือน / ปี	Jan-08	Feb-08	Mar-08	Apr-08	May-08	Jun-08	Jul-08	Aug-08	Sep-08	Oct-08	Nov-08
ปริมาณการผลิตตามแผนการผลิต			199,760	169,440	212,940	190,440	206,820	190,250	199,530	176,280	172,640	179,280	168,250	174,980
ก่อนการปรับปรุง (Baseline)	สัดส่วนแม่แบบเสีย		0.25%	0.25%	0.25%	0.25%	0.25%	0.25%	0.25%	0.25%	0.25%	0.25%	0.25%	0.25%
	จำนวนแม่แบบเสีย		502	426	535	478	519	478	501	443	434	450	423	440
	มูลค่าความสูญเสีย		320,882	272,178	342,054	305,911	332,223	305,606	320,513	283,166	277,319	287,985	270,267	281,077
หลังการปรับปรุง	สัดส่วนแม่แบบเสีย		0.0956%	0.0826%	0.0826%	0.0826%	0.0826%	0.0826%	0.0826%	0.0826%	0.0826%	0.0826%	0.0826%	0.0826%
	จำนวนแม่แบบเสีย		191	140	176	157	171	157	165	146	143	148	139	145
	มูลค่าความสูญเสีย		122,150	89,534	112,520	100,631	109,286	100,530	105,434	93,149	91,225	94,734	88,905	92,462
แม่แบบเสียที่ลดลง		311	286	359	321	349	321	336	297	291	302	284	295	
มูลค่าความสูญเสียที่ลดลงได้		198,732	182,644	229,534	205,281	222,937	205,076	215,079	190,017	186,093	193,251	181,361	188,616	

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวธีรพร เสนพรหม เกิดเมื่อวันที่ 7 เมษายน พ.ศ. 2525 ที่จังหวัดพิจิตร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนยุพราชวิทยาลัย จังหวัดเชียงใหม่ และเข้าศึกษาต่อจนสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาบัณฑิต จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในปีการศึกษา 2546 ภายหลังจบการศึกษาได้เข้าทำงานที่บริษัท โศยา กลาสติสค์ (ประเทศไทย) จำกัด ในตำแหน่งวิศวกรฝ่ายประกันคุณภาพ จากนั้นจึงได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2548



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย