

การลดสัดส่วนของเสียที่เกิดจากโพรงอากาศในกระบวนการขึ้นรูปไมโครชิป

นายจิระวัฒน์ แต่งไทย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REDUCTION OF VOID DEFECTIVE PROPORTION IN MICROCHIP MOLDING PROCESS

MR. JIRAWAT TAENGTHAI

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 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การลดสัดส่วนของเสียที่เกิดจากโพรงอากาศในกระบวนการขึ้นรูปไมโครชิป

โดย

นายจิระวัฒน์ แดงไทย

สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมมาภรณ์พิลาศ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภัสดวงศ์ โจรนโรวรรณ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกคี่ก)

จิระวัฒน์ แดงไทย : การลดสัดส่วนของเสียที่เกิดจากโพรงอากาศในกระบวนการขึ้นรูปไมโครชิป. (REDUCTION OF VOID DEFECTIVE PROPORTION IN MICROCHIP MOLDING PROCESS) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:  
รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ, 82 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดสัดส่วนของเสียที่เกิดจากโพรงอากาศในกระบวนการขึ้นรูปไมโครชิป ซึ่งเป็นชุดวงจรรีเลย์ทรานซิสเตอร์ขนาดเล็ก ที่ใช้เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ในการวิจัยมีการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ขนาดรวมของโพรงอากาศไม่เกิน 500 ไมครอนซึ่งเป็นข้อกำหนดทางด้านคุณภาพ ในเบื้องต้นได้ระบุปัจจัยทั้งหมดที่น่าจะมีผลต่อการเกิดโพรงอากาศตลอดจนการพิจารณาถึงข้อจำกัดต่างๆของปัจจัย โดยใช้หลักการของผังก้างปลา ร่วมกับผู้ที่มีความเชี่ยวชาญทางด้านเทคนิคในการขึ้นรูปไมโครชิป พบว่ามี 4 ปัจจัยคือ แรงอัดของแม่พิมพ์, แรงฉีดเรซิน, เวลาในการฉีดเรซิน และระยะเวลาในการอุ่นเรซิน

จากนั้นได้ประยุกต์ใช้หลักการออกแบบโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบ Box-Behnken Design เพื่อหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยทั้ง 4 ที่ให้ขนาดรวมของโพรงอากาศน้อยที่สุด จากผลการทดลองพบว่าทั้ง 4 ปัจจัยรวมทั้งอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยมีผลต่อการเกิดโพรงอากาศ โดยแรงฉีดและระยะเวลาในการอุ่นเรซินมีอิทธิพลที่ค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับแรงอัดของแม่พิมพ์หรือระยะเวลาในการฉีด แสดงให้เห็นว่าความหนืด แรงและความเร็วในการไหลมีผลต่อการเคลื่อนที่ของเรซิน ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  คือ แรงอัดของแม่พิมพ์ที่ 280 Mpa, แรงฉีดเรซินที่ 10 kN, เวลาในการฉีดเรซินที่ 8 วินาที และระยะเวลาในการอุ่นเรซินอยู่ที่ 9 วินาที ได้ขนาดรวมของโพรงอากาศเฉลี่ยที่น้อยที่สุดที่ 218.25 ไมครอน จากการทดสอบเพื่อยืนยันผล ยังไม่พบของเสียเนื่องจากขนาดของโพรงอากาศเกินกว่า 500 ไมครอน โดยที่ไม่ทำให้เกิดปัญหาคุณภาพด้านอื่น

ภาควิชา.....วิศวกรรมอุตสาหการ.....ลายมือชื่อ.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมอุตสาหการ.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
ปีการศึกษา...2553.....

# # 5171487121 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS : MICROCHIP / MOLDING PROCESS / CLAMP PRESSURE / INJECTION TIME / TABLET PRE-HEAT TIME / INJECTION FORCE / RESPONSE SURFACE ANALYSIS.

JIRAWAT TAENGTHAI : REDUCTION OF VOID DEFECTIVE PROPORTION IN MICROCHIP MOLDING PROCESS. ADVISOR : ASSOC.PROF.SOMKIAT TANGJITSITCHAREON,D.Eng, 82 pp.

The objective of this study is to reduce the proportion of void defective in microchip molding process. Microchip is the small set of electronic circuit which is used to be the main part of electrical devices. The 4 potential factors; clamp pressure (A), injection force (B), injection time (C) and tablet preheat time (D) were defined by applying the fish bone diagram and cooperating with the experts of microchip molding process.

These four factors were investigated by using a Response Surface analysis with the Box-Behnken Design. The optimum of the parameters based on none of void or minimum void side with significant at the level  $\alpha = 0.05$  were found to be A = 280 Mpa, B = 10 kN, C = 8 second and D = 9 second. They will give the average void side around 218.25 micron. After confirmation in the production, found no defect from void size over 500 micron and no effect to another category of defect.

Department : .....Industrial Engineering..... Student's Signature .....

Field of Study : .....Industrial Engineering..... Advisor's Signature .....

Academic Year : .....2010.....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา  
วิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้และแนะนำแนวทางต่างๆที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย จนทำให้งานวิจัย  
นี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมภรณ์พิลาศ ประธานสอบ  
วิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภัสสงศ์ โรจนโรวรรณ และรองศาสตราจารย์ สมชาย  
พวงเพิกคี่ก กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำเพื่อความถูกต้องสมบูรณ์ของ  
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่เป็นผู้ประสาขาวิชาแก่ผู้วิจัย ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้และ  
ความสามารถในการศึกษาเล่าเรียน ขอขอบคุณบิดา มารดาและครอบครัว ตลอดจนทุกๆกำลังใจ  
ที่มีส่วนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	15
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	15
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	17
1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	17
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	18
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
2.1 กระบวนการขึ้นรูปไมโครชิป.....	19
2.2 การวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้ผังก้างปลา.....	21
2.3 การออกแบบการทดลอง.....	21
2.4 การออกแบบการทดลองแบบพินผิวผลตอบ.....	29
2.5 หลักการทางสถิติสำหรับวิเคราะห์ข้อมูล.....	39
2.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	43
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	47
3.1 การออกแบบการทดลองและแบ่งส่วนงานวิจัย.....	47
3.2 การเลือกปัจจัยและกำหนดระดับของปัจจัย.....	47
3.3 เทคนิควิธีพินผิวตอบสนองและค่าตอบสนอง.....	51
3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	53
3.5 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	54

บทที่	หน้า
3.6 การตรวจสอบคุณภาพของงาน.....	54
3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	55
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	56
4.1 ผลการทดลอง.....	56
4.2 การวิเคราะห์และการสรุปผลการทดลองเบื้องต้น.....	57
4.3 พิจารณารูปแบบของสมการถดถอยและผลการวิเคราะห์ค่า P Value.....	57
4.4 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบทดลอง.....	61
4.5 การหาสภาวะที่เหมาะสม.....	63
4.6 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และอิทธิพลของปัจจัย.....	67
4.7 การทดสอบเพื่อยืนยันผล.....	68
4.8 การทดสอบความสัมพันธ์ที่มีผลต่อการเกิดโพรงอากาศ.....	69
4.9 การทดสอบสมมติฐานความแตกต่างของค่าเฉลี่ย.....	71
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	74
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	74
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	75
รายการอ้างอิง.....	76
ภาคผนวก.....	78
ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากโปรแกรมสำเร็จรูปต่างๆที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป..	79
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	82



## สารบัญญัตราจ

ตารางที่		หน้า
1.1	ปัจจัยจากคนที่มีอิทธิพลต่อการเกิดโพรงอากาศและวิธีการควบคุม.....	9
1.2	ปัจจัยจากเครื่องจักรที่มีอิทธิพลต่อการเกิดโพรงอากาศและวิธีการควบคุม.....	10
1.3	ปัจจัยจากวิธีการทำงานที่มีอิทธิพลต่อการเกิดโพรงอากาศและวิธีการควบคุม...	12
1.4	ปัจจัยจากสภาพแวดล้อมที่มีอิทธิพลต่อการเกิดโพรงอากาศและวิธีการ ควบคุม.....	13
1.5	ปัจจัยจากวัสดุดิบที่มีอิทธิพลต่อการเกิดโพรงอากาศและวิธีการควบคุม.....	14
1.6	แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	18
2.1	ค่าของ Code level ใน Central composite design (2ปัจจัย) $\alpha=1.414$ .....	35
2.2	ค่าของ Code level ใน Central composite design (3 ปัจจัย) $\alpha=1.682$ .....	36
2.3	การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนแบบสามตัวแปร.....	38
3.1	แสดงระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	51
3.2	แสดงระดับของปัจจัยที่ใช้ศึกษาพื้นผิวตอบสนอง.....	52
3.3	การออกแบบ Box-Behnken Design ที่มี 3 center point.....	52
3.4	แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ถูกกำหนดให้คงที่.....	54
4.1	แสดงผลของขนาดรวมของโพรงอากาศ.....	56
4.2	แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในสมการแบบพหุคูณถดถอย.....	58
4.3	แสดงการวิเคราะห์สมการถดถอย.....	59
4.4	ตารางแสดงสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดโพรงอากาศ.....	60
4.5	แสดงค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย.....	64
4.6	ผลการทดลองเพื่อยืนยันผล.....	68
4.7	ตารางเปรียบเทียบขนาดรวมของโพรงอากาศที่ได้จากการวัดในการทดลอง กับสมการความสัมพันธ์.....	69

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	ไมโครชิบบนอิเล็กทรอนิกส์บอร์ด.....	1
1.2	ไมโครชิปชนิดไม่มีขา.....	2
1.3	ส่วนประกอบของไมโครชิปชนิดไม่มีขา .....	2
1.4	แผ่นเวเฟอร์ (Wafer).....	2
1.5	ลีดเฟรม (Lead frame).....	3
1.6	ลวดทองคำ (Gold wire).....	3
1.7	เรซิน (Resin).....	4
1.8	กราฟแสดงสัดส่วนของเสียของไมโครชิปแต่ละชนิด.....	5
1.9	กราฟแสดงสัดส่วนของเสียแต่ละชนิดของงาน LFBGA.....	6
1.10	โพรงอากาศภายในไมโครชิป (Internal void).....	7
1.11	ผังก้างปลาของปัญหาของเสียที่เกิดจากโพรงอากาศ.....	8
2.1	Input และ out put ของกระบวนการขึ้นรูป.....	19
2.2	แสดงการเกิด Air trap .....	20
2.3	รูปแบบของระบบการทดลองทั่วไป.....	23
2.4	การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย (ไม่มีอันตรกิริยา).....	27
2.5	การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย (มีอันตรกิริยา).....	27
2.6	พื้นผิวผลตอบแบบสามมิติ.....	30
2.7	การออกแบบส่วนประสมกลางสำหรับ k=2 และ k=3 .....	35
2.8	การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับ 3 ตัวแปร.....	39
3.1	แสดงลักษณะของเฟรมที่ถูกกดทับลงมาบัง Air vent .....	48
3.2	แสดงลักษณะของการเกิด Air trap เมื่อเรซินมีความหนืดสูง.....	49
3.3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับเวลา.....	50
4.1	แสดงการกระจายตัวปกติของค่า Residuals .....	61
4.2	ความสัมพันธ์ Residual ของขนาดรวมของโพรงอากาศกับลำดับการทดลอง...	62
4.3	ค่า Residual กับ Fit value ของข้อมูลขนาดรวมของโพรงอากาศ.....	62
4.4	แสดง Output Optimize Point จากโปรแกรม.....	63

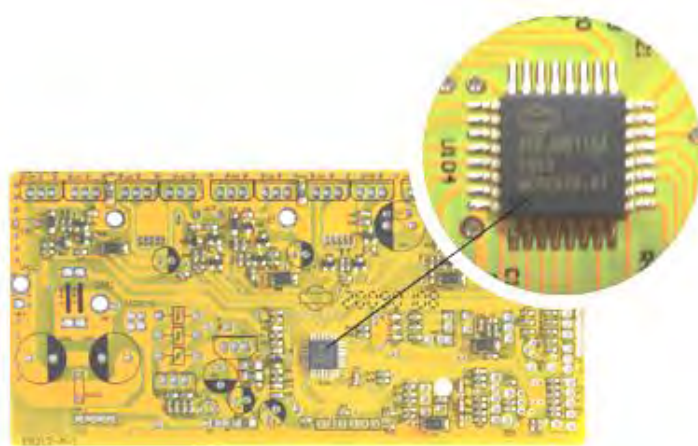
ภาพที่	หน้า
4.5	กราฟแสดงจุดตัดที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย..... 63
4.6	กราฟแสดงพื้นผิวตอบสนองระหว่าง Void size กับอิทธิพลร่วมของ Injection force และ Clamp pressure ..... 65
4.7	กราฟแสดงพื้นผิวตอบสนองระหว่าง Void size กับอิทธิพลร่วมของ Injection time และ Clamp pressure ..... 65
4.8	กราฟแสดงพื้นผิวตอบสนองระหว่าง Void size กับอิทธิพลร่วมของ Tablet pre-heat time และ Injection force ..... 66
4.9	กราฟแสดงพื้นผิวตอบสนองระหว่าง Void size กับอิทธิพลร่วมของ Tablet pre-heat time และ Injection time ..... 66
4.10	กราฟแสดงพื้นผิวตอบสนองระหว่าง Void size กับอิทธิพลร่วมของ Injection time และ Injection force ..... 67
4.11	แสดงตัวอย่างของระยะการรั่วไหลของเรซิน ..... 72

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

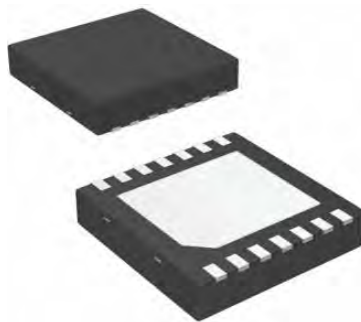
ไมโครชิป หรือชิปหรือไอซี (Integrated circuit: IC) คือชุดวงจรรวมอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก ที่ใช้เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น ตู้เย็น พัดลม คอมพิวเตอร์ หรือเครื่องใช้ที่มีส่วนประกอบของอิเล็กทรอนิกส์ เป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอุตสาหกรรมเซมิคอนดักเตอร์ ไมโครชิปบางที่เรียกสั้นๆ ว่า ชิป ประกอบด้วยวงจรจำนวนมากที่สร้างขึ้นและประกอบเป็นชิ้นส่วนต่างๆ ของวงจร เช่น ทรานซิสเตอร์ (transistor) ไดโอดส์ (diodes) เชื่อมต่อเข้าด้วยกันเป็นวงจรรวมอิเล็กทรอนิกส์ วงจรเบ็ดเสร็จชนิดนี้ใช้กันมากในปัจจุบัน เพราะมีขนาดเล็ก ราคาถูก ใช้กระแสไฟน้อย และสามารถปฏิบัติงานได้เร็ว ไมโครชิปในส่วนที่เป็นวงจรรวม จะมีส่วนประกอบของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีคุณสมบัติในด้านการเป็นสื่อผ่านทางไฟฟ้าอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวน โดยที่ความเป็นตัวนำจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิใช้งาน สารกึ่งตัวนำจะเป็นการรวมกันของธาตุหรือสารประกอบก็ได้ สารที่ใช้กันทั่วไปคือ ซิลิกอน (Si) และเจอร์มาเนียม (Ge) ปัจจุบันไมโครชิปจะถูกออกแบบให้มีขนาดเล็กและบางมาก แต่ฟังก์ชันการใช้งานยังคงความหลากหลายและมีประสิทธิภาพสูง



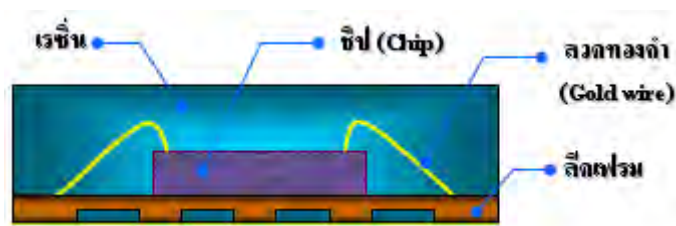
รูป 1.1 ไมโครชิปบนอิเล็กทรอนิกส์บอร์ด

ไมโครชิปสามารถแบ่งตามลักษณะของงานได้ 2 แบบหลักๆ ได้แก่ ไมโครชิปแบบมีขา (Peripheral) หมายถึงไมโครชิปที่จะต้องมีการบัดหรือขึ้นรูปขางาน ซึ่งใช้ในการเชื่อมต่อกับแผ่นวงจรรวมอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ส่วนใหญ่จะทำการขึ้นรูปเป็นตัว ส่วนงานที่ขึ้นรูปเป็นแผ่นหรืองาน

แบบไม่มีขา (Non-lead) หมายถึงงานที่ไม่ต้องมีกระบวนการขึ้นรูปขางาน ซึ่งสามารถแบ่งย่อยได้เป็นงานแบบที่จุดเชื่อมต่อมีลักษณะกลม เรียกว่า บอล ในส่วนของตัวงานจะมีลักษณะเป็นสีดำหรือใสแล้วแต่ชนิดของเรซินที่ใช้ การออกแบบจะขึ้นอยู่กับลักษณะการทำงานของตัวไมโครชิปตามที่ลูกค้าต้องการ



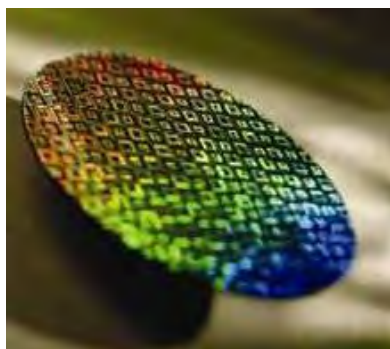
รูป 1.2 ไมโครชิปชนิดไม่มีขา



รูป 1.3 ส่วนประกอบของไมโครชิปชนิดไม่มีขา

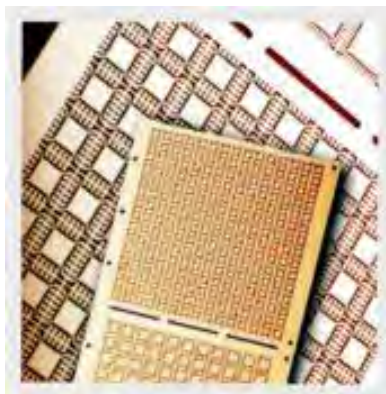
ส่วนประกอบหลักของไมโครชิป

1. ชิป (Chip) คือวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านการย่อส่วนลงบนผิวหน้าของฐานรองที่เป็นสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสารกึ่งตัวนำส่วนมากที่ใช้สร้างชิปนั้นคือซิลิกอน โดยมีรูปร่างเริ่มแรกเป็นลักษณะแผ่นสไลด์บางๆ เรียกว่า เวเฟอร์ (Wafer) จากนั้นจึงนำมาตัดย่อยออกเป็นชิ้นเล็กๆตามชนิดของงาน



รูป 1.4 แผ่นเวเฟอร์ (Wafer)

2. ลีดเฟรมหรือสับสเตรท (Lead frame/ Substrate) คือแผ่นตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นแกนกลางของวงจร สำหรับวางชิปและเชื่อมกันด้วยเส้นลวดทองคำ ลีดเฟรมหรือสับสเตรทมีหลายชนิด แล้วแต่วัสดุและขนาดที่ลูกค้าต้องการ



รูป 1.5 ลีดเฟรม (Lead frame)

3. โกลด์ไวร์ (Gold wire) คือ เส้นลวดทองคำที่เชื่อมต่อวงจรระหว่างลีดเฟรมกับวงจรภายในชิป โกลด์ไวร์มีหลายขนาด ความยาวของโกลด์ไวร์แต่ละเส้นอาจไม่เท่ากัน แล้วแต่การออกแบบ



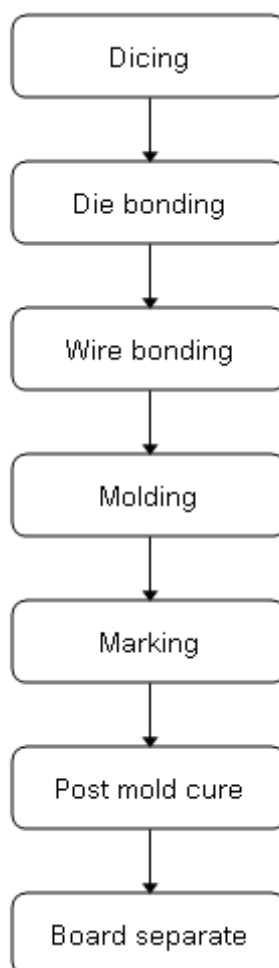
รูป 1.6 ลวดทองคำ (Gold wire)

4. เรซินหรือคอมปาว์น (Resin or compound) คือ สารประกอบที่เป็นพลาสติกจำพวกเทอร์โมเซต ใช้ในการขึ้นรูปเพื่อห่อหุ้มและป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับวงจรภายในไมโครชิป เรซินมีลักษณะเป็นผงอัดเม็ด จะต้องมีช่วงการให้ความร้อนก่อนที่จะถูกฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ เรซินที่ใช้กันทั่วไปในการขึ้นรูปไมโครชิปมี 2 สีคือสีดำกับสีใสหรือไม่มีสี



รูป 1.7 เรซิน (Resin)

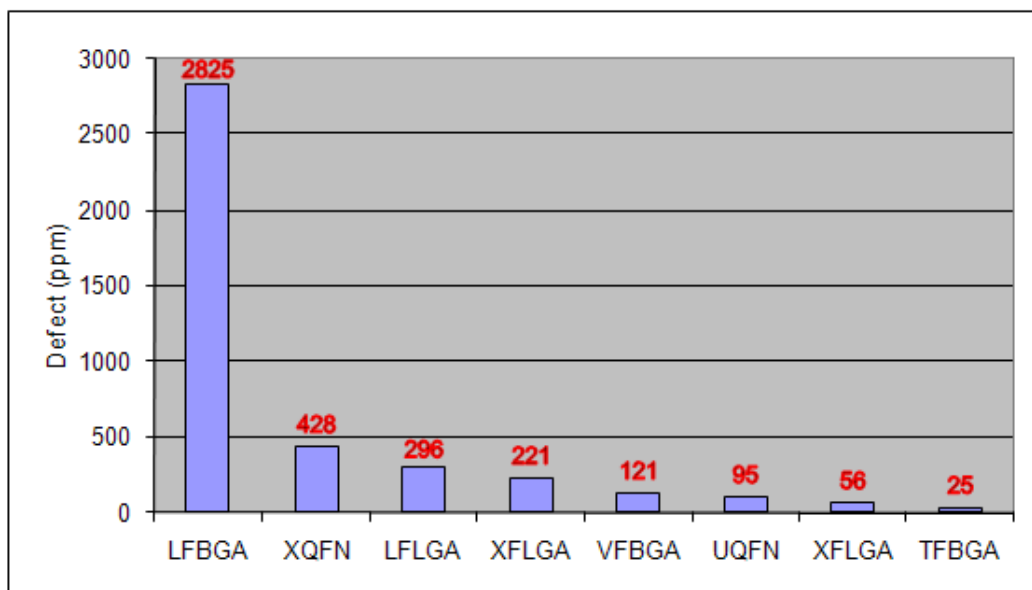
กระบวนการผลิตไมโครชิป



1. Dicing เป็นกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ที่ประกอบไปด้วยวงจรรีเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก โดยจะตัดออกมาเป็นชิ้นเล็กๆตามชนิดของงาน แผ่นเวเฟอร์ที่ตัดแล้วจะเรียกว่าชิป (Chip)

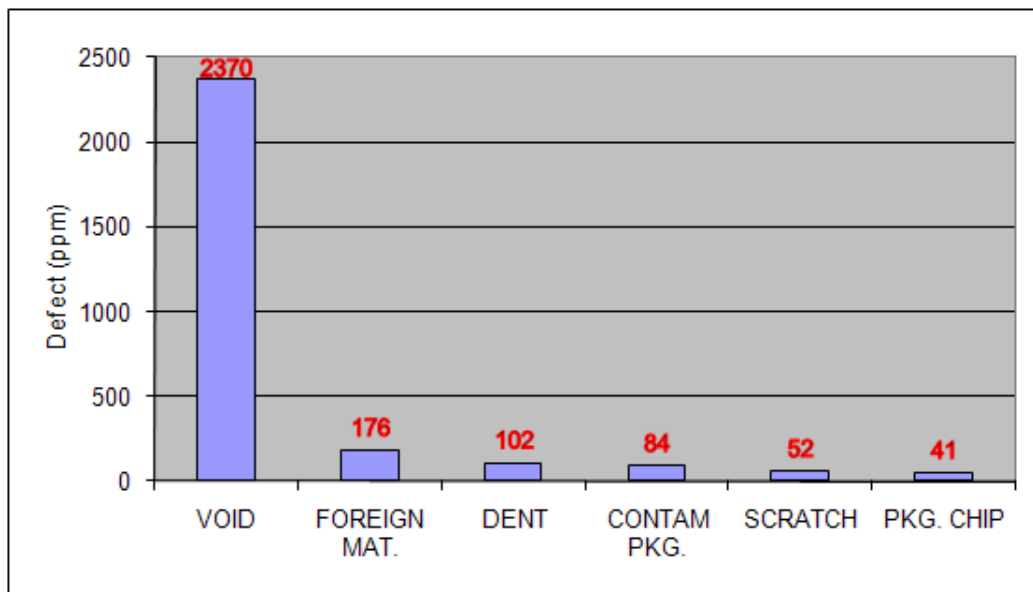
2. Die bonding เป็นกระบวนการติดชิปลงบนลีดเฟรม โดยใช้กาว (AG paste) ที่มีลักษณะเฉพาะเป็นตัวประสาน
3. Wire bonding เป็นกระบวนการเชื่อมลวดทองคำจากวงจรบนชิปไปสู่ขาของลีดเฟรม จำนวน ความยาวและชนิดของเส้นลวดทองคำ (Gold wire) จะขึ้นอยู่กับชนิดของงาน
4. Molding เป็นกระบวนการขึ้นรูปไมโครชิปโดยใช้เรซิน (Resin) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าคอมปาวน์ (Compound) ทำให้เกิดเป็นรูปร่างตามแม่พิมพ์และลักษณะของงาน
5. Post mold cure เป็นกระบวนการอบไมโครชิปหลังจากการขึ้นรูปเพื่อลดความเครียด (Strain) ให้กับเนื้อเรซิน ในการที่จะป้องกันการแตกร้าวหรือแยกชั้นกันระหว่างเนื้อเรซินกับลีดเฟรม และช่วยยืดอายุการใช้งานของไมโครชิป
6. Marking เป็นกระบวนการทำสัญลักษณ์ให้กับไมโครชิป ซึ่งจะแสดงรายละเอียดต่างๆ เกี่ยวกับที่มา เช่น วัน เดือน ปีที่ผลิต หรือล็อตในการผลิต เป็นต้น
7. Board separate เป็นกระบวนการตัดย่อยหลังจากการขึ้นรูป จากไมโครชิปหลายๆตัว ที่ขึ้นรูปเป็นแผ่นใหญ่ ให้ออกมาเป็นแต่ละตัว

### ปัญหาโพรงอากาศในกระบวนการขึ้นรูปไมโครชิป



รูป 1.8 กราฟแสดงสัดส่วนของเสียของไมโครชิปแต่ละชนิด





รูป 1.9 กราฟแสดงสัดส่วนของเสียแต่ละชนิดของงาน LFBGA

พิจารณาจากบริษัทที่เป็นกรณีศึกษา จากสัดส่วนของเสียที่เกิดจากกระบวนการขึ้นรูปของไมโครชิปชนิดไม่มีขาทั้ง 8 ชนิดในรูปที่ 1.8 พบว่าไมโครชิปชนิด LFBGA มีสัดส่วนของเสียเกิดขึ้นในปริมาณที่มากที่สุด ประมาณ 2,825 PPM ซึ่งเมื่อจำแนกประเภทของของเสียแต่ละชนิดออกมาพบว่าจากของเสียทั้งหมด 7 แบบ มีของเสียที่เกิดจากโพรงอากาศในสัดส่วนมากที่สุดประมาณ 2,370 PPM

เนื่องจากงานตัวนี้เป็นงานชนิดใหม่ที่เพิ่งจะพัฒนาขึ้นมาและยังไม่เคยมีการผลิตมาก่อนในบริษัท อีกทั้งยังใช้ชิปที่มีขนาดเล็กและบางมาก ตามความก้าวหน้าของเทคโนโลยี เพื่อลดขนาดของอุปกรณ์หลังจากประกอบเสร็จแล้ว ทำให้ส่งผลต่อลักษณะการเคลื่อนที่ของเรซินในขณะฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ ส่งผลต่อเนื่องไปถึงการไหลของอากาศที่มีอยู่ในแม่พิมพ์หรือแทรกตัวอยู่ในเนื้อของเรซินเป็นไปได้อย่างขึ้นและไม่สามารถไหลออกมาภายนอกแม่พิมพ์ได้ จึงเกิดเป็นโพรงอากาศหลังจากการฉีดขึ้นรูปแล้ว

ปัญหาโพรงอากาศที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการขึ้นรูป (Molding Process) สามารถจำแนกตามบริเวณการเกิดได้เป็น 2 แบบคือโพรงอากาศที่อยู่บริเวณผิวของงาน (External void) และโพรงอากาศที่เกิดขึ้นภายใน (Internal void) เกณฑ์ที่ยอมรับได้คือขนาดรวมของโพรงอากาศจะต้องไม่เกิน 500 ไมครอน และไม่สามารถมองเห็นขึ้นส่วนภายในได้ โพรงอากาศมีผลต่อคุณสมบัติภายนอกหรือทำให้รอย mark ไม่ชัดเจน ส่วนผลกระทบในด้านคุณภาพการใช้งานนั้น บางครั้งอาจจะไม่ส่งผลต่อการใช้งานในระยะสั้น แต่เมื่อใช้ไปนานๆ ทั้งความร้อนและความเสื่อมสภาพจะมีผลทำให้ไมโครชิปมีอายุการใช้งานที่สั้นลง

จากของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตพบว่าเป็นของเสียที่เกิดจากโพรงอากาศภายในไมโครชิปทั้งหมด ผู้วิจัยจึงเลือกศึกษาเฉพาะโพรงอากาศภายในไมโครชิปเท่านั้นเพื่อความชัดเจนในแนวทางและความถูกต้องในส่วนของผลการศึกษา โดยก่อนการวิจัยพบว่า ขนาดรวมของโพรงอากาศเฉลี่ยอยู่ที่ 467 ไมครอน



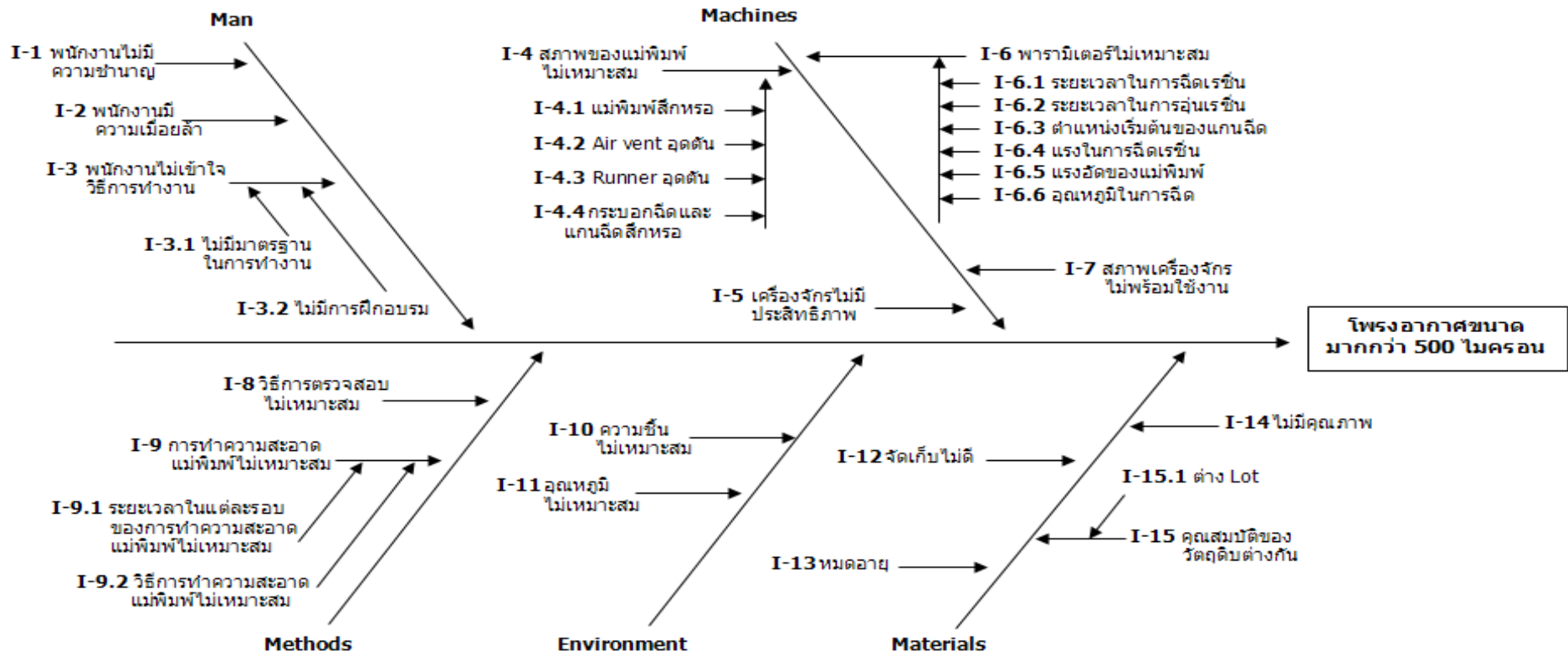
รูป 1.10 โพรงอากาศภายในไมโครชิป (Internal void)

### การวิเคราะห์หาสาเหตุของการเกิดปัญหา

ในการวิเคราะห์ปัญหานี้ ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้ผังก้างปลาในการวิเคราะห์หาปัจจัยที่น่าจะเป็นไปได้ทั้งหมดที่จะทำให้เกิดโพรงอากาศในกระบวนการขึ้นรูปไมโครชิป ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มาจากการระดมความคิดเห็นจากผู้ที่มีความรู้และประสบการณ์ทางด้านเทคนิคในกระบวนการขึ้นรูปไมโครชิป จากหลายส่วนที่เกี่ยวข้อง ทั้งในส่วนของฝ่ายพัฒนาผลิตภัณฑ์ ฝ่ายเทคนิคการผลิต ฝ่ายควบคุมคุณภาพและวิศวกรรมการผลิต โดยพิจารณาจาก 5 ปัจจัยพื้นฐาน ได้แก่

- 1) ปัจจัยเนื่องจากคน (Man)
- 2) ปัจจัยเนื่องจากเครื่องจักร (Machine)
- 3) ปัจจัยเนื่องจากวัตถุดิบ (Material)
- 4) ปัจจัยเนื่องจากวิธีการ (Method)
- 5) ปัจจัยเนื่องจากสภาพแวดล้อม (Environment)

ผังก้างปลาของปัญหาของเสียที่เกิดจากโพรงอากาศ



รูปที่ 1.11 ผังก้างปลาของปัญหาของเสียที่เกิดจากโพรงอากาศ

จากผังก้างปลาแสดงปัจจัยที่น่าจะเป็นไปได้ทั้งหมดของของเสียที่เกิดการเกิดโพรงอากาศ (ที่มีขนาดมากกว่า 500 ไมครอน) นำมาวิเคราะห์ผลกระทบและแนวทางแก้ไขได้ตามตารางดังนี้

ตารางที่ 1.1 ปัจจัยจากคนที่มีอิทธิพลต่อการเกิดโพรงอากาศและวิธีการควบคุม

สาเหตุ	ผลต่อการเกิดโพรงอากาศ	วิธีการควบคุม
I-1: พนักงานไม่มีความชำนาญในการตรวจสอบความผิดปกติของงานหรือเครื่องจักร	ทำให้ไม่สามารถตรวจสอบความผิดปกติของงานหรือเครื่องจักรได้ก่อนที่จะเกิดปัญหา	การฝึกอบรม ทดสอบและมีการจัดทำเอกสารตรวจสอบ
I-2: อาการเหนื่อยล้าของพนักงาน	ทำให้การทำงานหรือการตรวจสอบผิดพลาด	จัดเตรียมอุปกรณ์แบ่งเบาภาระและการบริหารเรื่องกำลังคน
I-3.1: พนักงานไม่เข้าใจวิธีการทำงานที่เกิดจากการไม่มีมาตรฐานในการทำงาน	พนักงานอาจสับสนในการปฏิบัติงานและไม่มีแหล่งอ้างอิงในกรณีที่ไม่เข้าใจในวิธีการปฏิบัติงานนั้นๆ ทำให้อาจตัดสินใจผิดพลาดแล้วทำให้เกิดงานเสีย	จัดทำมาตรฐานการทำงานไว้ให้พนักงานสามารถเข้าไปดูและใช้เป็นแหล่งอ้างอิงได้
I-3.2: พนักงานไม่เข้าใจวิธีการทำงานเนื่องจากไม่มีการฝึกอบรม	พนักงานทำงานด้วยความไม่มั่นใจหรือไม่แน่ใจ เนื่องจากไม่เคยทำมาก่อนหรือไม่เคยเจอมาก่อนอาจทำให้เกิดความผิดพลาดในการทำงานได้	มีการอบรมซ้ำเป็นประจำทุกๆ 6 เดือนเพื่อป้องกันการลืมและสามารถให้ข้อมูลใหม่ๆกับพนักงานได้

จากการพิจารณาสาเหตุที่น่าจะทำให้เกิดโพรงอากาศในกระบวนการขึ้นรูปไมโครชิปที่เกิดจากอิทธิพลของคนในตารางที่ 1.1 พบว่าทุกหัวข้อมีการควบคุมและตรวจสอบอย่างเป็นระบบ จึงไม่น่าจะเป็นสาเหตุของปัญหาได้

ตารางที่ 1.2 ปัจจัยจากเครื่องจักรที่มีอิทธิพลต่อการเกิดโพรงอากาศและวิธีการควบคุม

สาเหตุ	ผลต่อการเกิดโพรงอากาศ	วิธีการควบคุม
I-4.1: สภาพของแม่พิมพ์ไม่เหมาะสมเนื่องจากแม่พิมพ์สึกหรอ	มีผลต่อทิศทางและการไหลของเรซิน ทำให้ยังมีอากาศหลงเหลืออยู่	กำหนดอายุการใช้งาน มีการควบคุมและตรวจสอบในแต่ละเดือน
I-4.2: สภาพของแม่พิมพ์ไม่เหมาะสมที่เกิดจาก Air vent อุดตัน	ทำให้อากาศที่อยู่ภายในแม่พิมพ์หรือแทรกอยู่ในเรซิน ไหลออกมาได้ยาก ทำให้มีฟองอากาศหลงเหลืออยู่ในขณะฉีด	ควบคุมระยะเวลาในการความสะอาดและจัดทำมาตรฐานวิธีการทำความสะอาดของแม่พิมพ์
I-4.3: สภาพของแม่พิมพ์ไม่เหมาะสมที่เกิดจาก Runner อุดตัน	ทำให้เรซินไหลไม่สะดวกหรือเปลี่ยนทิศทางไหล ทำให้อากาศที่หลงเหลืออยู่ภายในไหลออกมาด้านนอกได้ยาก	ควบคุมระยะเวลาในการความสะอาดและจัดทำมาตรฐานวิธีการทำความสะอาดของแม่พิมพ์
I-4.4: สภาพของแม่พิมพ์ไม่เหมาะสมที่เกิดจากกระบอกฉีดและแกนฉีดสึกหรอ	ทำให้การเคลื่อนที่ในขณะที่ฉีดมีการติดขัด มีผลต่อความเร็วและทิศทางในการฉีดที่อาจจะเปลี่ยนไปอย่างกะทันหัน ทำให้อากาศที่อยู่ภายในแม่พิมพ์ไหลออกมาได้ยาก	กำหนดอายุการใช้งานของกระบอกฉีดและแกนฉีด โดยมีการควบคุมและตรวจสอบในแต่ละเดือน
I-5: เครื่องจักรไม่มีประสิทธิภาพ	ทำให้การทำงานหรือการควบคุมในส่วนของกรขึ้นรูปไม่มีประสิทธิภาพ	ตรวจสอบประสิทธิภาพของเครื่องจักรประจำวัน ก่อนทำการผลิต รวมทั้งบันทึกอายุการใช้งานของชิ้นส่วนต่างๆของเครื่อง
I-6.1: พารามิเตอร์ไม่เหมาะสม จากระยะเวลาในการฉีดเรซิน (Injection time)	มีผลต่อความเร็วและทิศทางและการไหลของเรซิน ทำให้การไหลของอากาศภายในแม่พิมพ์เป็นไปได้อย่างขึ้น	มีระบบควบคุมอัตโนมัติ ในส่วนของการตั้งค่า แต่ปัจจุบันยังไม่สามารถหาระยะเวลาที่เหมาะสมได้

ตารางที่ 1.2 ปัจจัยจากเครื่องจักรที่มีอิทธิพลต่อการเกิดโพรงอากาศและวิธีการควบคุม (ต่อ)

สาเหตุ	ผลต่อการเกิดโพรงอากาศ	วิธีการควบคุม
I-6.2: พารามิเตอร์ไม่เหมาะสม จากระยะเวลาในการอุ่นเรซิน (Tablet preheat time)	หากเรซินซึ่งถูกฉีดขณะอยู่ในสถานะที่ไม่เหมาะสม จะส่งผลต่อคุณภาพของการไหล ทำให้ไหลไม่ราบรื่นอากาศภายในเรซินไหลออกมาภายนอกได้ยากขึ้น	มีระบบควบคุมอัตโนมัติในส่วนของการตั้งค่า แต่ปัจจุบันยังไม่สามารถหาระยะเวลาที่เหมาะสมได้
I-6.3: พารามิเตอร์ไม่เหมาะสมจากตำแหน่งเริ่มต้นของแกนฉีด (Tablet position)	ส่งผลต่อระยะเวลาในการฉีดซึ่ง มีผลต่อความเร็วและทิศทางและการไหลของเรซิน ทำให้การไหลของอากาศภายในเป็นไปได้ยากขึ้น	ทำการตั้งค่าไว้เท่ากับ ความสูงของเรซินและกำหนดค่าไว้ รวมทั้งมีการตรวจสอบระยะเป็นประจำทุกวัน
I-6.4: พารามิเตอร์ไม่เหมาะสม จากแรงฉีด (Injection Force)	แรงดันจากการไหลของมวลเรซินที่มากหรือน้อยเกินไปจะส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอากาศเช่นกัน ซึ่งอาจเป็นไปได้ในทางที่ทำให้อากาศไหลออกมาได้ยาก	มีระบบควบคุมอัตโนมัติในส่วนของการตั้งค่า แต่ปัจจุบันยังไม่สามารถหาแรงฉีดที่เหมาะสมได้
I-6.5: พารามิเตอร์ไม่เหมาะสม จากแรงอัดของแม่พิมพ์ (Clamp pressure)	แรงอัดของแม่พิมพ์ทำให้เกิดการอัดตัวที่ลีดเฟรม และไปปิด Air vent, อากาศภายในแม่พิมพ์และเรซินจึงไหลออกมาได้ยาก	มีระบบควบคุมอัตโนมัติในส่วนของการตั้งค่า แต่ปัจจุบันยังไม่สามารถหาแรงอัดที่เหมาะสมได้
I-6.6: พารามิเตอร์ไม่เหมาะสม จากอุณหภูมิของแม่พิมพ์ (Die temperature)	ส่งผลต่อระยะเวลาการหลอมเหลวของเรซิน โดยอ้างอิงจากข้อมูลจากทางผู้ผลิต แล้วกำหนดค่าไว้	มีระบบควบคุมอัตโนมัติในส่วนของการตั้งค่า มีการตรวจสอบประจำวัน

ตารางที่ 1.2 ปัจจัยจากเครื่องจักรที่มีอิทธิพลต่อการเกิดโพรงอากาศและวิธีการควบคุม (ต่อ)

สาเหตุ	ผลต่อการเกิดโพรงอากาศ	วิธีการควบคุม
I-7: สภาพเครื่องจักรไม่พร้อมใช้งาน	มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องจักร และส่วนควบคุมที่ใช้ในการขึ้นรูป	มีการตรวจสอบจุดสำคัญและรายงานสภาพของเครื่องจักรเป็นประจำทุกวัน เพื่อเตรียมเครื่องจักรให้พร้อมกับการผลิต

จากการพิจารณาสาเหตุที่น่าจะทำให้เกิดโพรงอากาศในกระบวนการขึ้นรูปไมโครชิปที่เกิดจากอิทธิพลของเครื่องจักรในตารางที่ 1.2 พบว่ามี 4 หัวข้อในส่วนของพารามิเตอร์ที่ไม่เหมาะสมที่น่าจะเป็นสาเหตุของการเกิดโพรงอากาศในกระบวนการขึ้นรูป ได้แก่

- 1) พารามิเตอร์ไม่เหมาะสม จากระยะเวลาในการฉีดเรซิน (Injection time)
- 2) พารามิเตอร์ไม่เหมาะสม จากระยะเวลาในการอุ่นเรซิน (Tablet preheat time)
- 3) พารามิเตอร์ไม่เหมาะสม จากแรงฉีด (Injection Force)
- 4) พารามิเตอร์ไม่เหมาะสม จากแรงอัดของแม่พิมพ์ (Clamp pressure)

ตารางที่ 1.3 ปัจจัยจากวิธีการทำงานที่มีอิทธิพลต่อการเกิดโพรงอากาศและวิธีการควบคุม

สาเหตุ	ผลต่อการเกิดโพรงอากาศ	วิธีการควบคุม
I-8: วิธีการตรวจสอบไม่เหมาะสม	อาจทำให้ผลที่ได้ผิดจากความ เป็นจริง อาจตัดสินใจเป็นของเสียทั้งที่ไม่เป็นของเสีย หรือตัดสินใจว่าเป็นของดีทั้งที่เป็นงานเสีย	จัดทำวิธีการวัดหรือตรวจสอบขนาดของโพรงอากาศ ให้เป็นมาตรฐาน และมีการทบทวนรายเป็นประจำทุก 6 เดือน
I-9.1: การทำความสะอาดแม่พิมพ์ไม่เหมาะสมที่เกิดจากระยะเวลาในแต่ละรอบของการทำความสะอาดแม่พิมพ์ไม่เหมาะสม	ทำให้แม่พิมพ์สกปรก ซึ่งจะมีผลต่อความเร็วและทิศทางการไหลของเรซิน แล้วจะมีผล ทำให้อากาศติดค้างอยู่ในแม่พิมพ์และเนื้อเรซิน	กำหนดจำนวนครั้งของการผลิตที่ไม่ทำให้แม่พิมพ์สกปรก และตั้งค่าอัตโนมัติไว้ให้เครื่องจักรเตือนเมื่อถึงค่านั้น

ตารางที่ 1.3 ปัจจัยจากวิธีการทำงานที่มีอิทธิพลต่อการเกิดโพรงอากาศและวิธีการควบคุม (ต่อ)

สาเหตุ	ผลต่อการเกิดโพรงอากาศ	วิธีการควบคุม
I-9.2: การทำความสะอาดแม่พิมพ์ไม่เหมาะสม ที่เกิดจากวิธีการทำความสะอาดแม่พิมพ์ที่ไม่เหมาะสม	ทำให้เกิดการสะสมของคราบสกปรกมีผลเชื่อมโยงไปถึงอากาศที่จะไหลออกจากแม่พิมพ์ไม่สะดวก ทำให้เกิดเป็นโพรงอากาศหลังจากเย็นตัวแล้ว	จัดทำมาตรฐานเรื่องของวิธีการทำความสะอาดแม่พิมพ์และมีการอบรมพนักงานเป็นประจำ

จากการพิจารณาสาเหตุที่น่าจะทำให้เกิดโพรงอากาศในกระบวนการขึ้นรูปไมโครชิปที่เกิดจากอิทธิพลของวิธีการทำงานในตารางที่ 1.3 พบว่าทุกหัวข้อมีการควบคุมและตรวจสอบอย่างเป็นระบบ จึงไม่น่าจะเป็นสาเหตุของปัญหาได้

ตารางที่ 1.4 ปัจจัยจากสภาพแวดล้อมที่มีอิทธิพลต่อการเกิดโพรงอากาศและวิธีการควบคุม

สาเหตุ	ผลต่อการเกิดโพรงอากาศ	วิธีการควบคุม
I-10: ความชื้นไม่เหมาะสม	ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของเรซิน ซึ่งก็จะมีผลต่อเนื่องไปถึงลักษณะของการไหล ทำให้อากาศหลงเหลืออยู่ภายในเนื้อของเรซิน	มีการควบคุมความชื้นของทั้งโรงงาน โดยมีการตรวจสอบและบันทึกค่า
I-11: อุณหภูมิไม่เหมาะสม	เป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของเรซินและสภาวะของการขึ้นรูป	มีการควบคุมอุณหภูมิของทั้งโรงงาน โดยมีการตรวจสอบและบันทึกค่า

จากการพิจารณาปัจจัยที่น่าจะทำให้เกิดโพรงอากาศในกระบวนการขึ้นรูปไมโครชิปที่เกิดจากอิทธิพลของสภาพแวดล้อมในตารางที่ 1.4 พบว่าทุกหัวข้อมีการควบคุมและตรวจสอบอย่างเป็นระบบ จึงไม่น่าจะเป็นสาเหตุของปัญหาได้



ตารางที่ 1.5 ปัจจัยจากวัตถุดิบที่มีอิทธิพลต่อการเกิดโพรงอากาศและวิธีการควบคุม

สาเหตุ	ผลต่อการเกิดโพรงอากาศ	วิธีการควบคุม
I-12: การจัดเก็บวัตถุดิบไม่ดี	ส่งผลต่อคุณสมบัติของเรซิน	ทำมาตรฐานการจัดเก็บวัตถุดิบและมีการตรวจสอบอยู่ตลอด
I-13: วัตถุดิบหมดอายุ	ทำให้คุณสมบัติของเรซินเปลี่ยนไปโดยขึ้นอยู่กับระยะเวลาหลังจากการผลิต ซึ่งจะถูกกำหนดมาจากทางผู้ผลิต	มีการแสดงรายละเอียดเกี่ยวกับวันที่ผลิต วันหมดอายุและล็อตเรซิน เพื่อตรวจสอบก่อนทำการผลิต
I-14: วัตถุดิบไม่มีคุณภาพ	ทำให้คุณสมบัติไม่ได้ตามมาตรฐาน	มีวิธีการในการควบคุมและตรวจสอบคุณภาพอยู่เสมอ รวมถึงมีการส่งข้อมูลกลับไปยังผู้ผลิตเพื่อปรับปรุง
I-15.1: คุณสมบัติไม่เหมือนกันเนื่องจากล็อตของเรซินต่างกัน	ทำให้คุณสมบัติของวัตถุดิบเปลี่ยนไป ยากต่อการควบคุม	มีการตรวจสอบและส่งข้อมูลกลับไปทางผู้ผลิตเพื่อควบคุมให้คุณสมบัติของเรซินเหมือนกันทุกล็อตการผลิต

จากการพิจารณาสาเหตุที่น่าจะทำให้เกิดโพรงอากาศในกระบวนการขึ้นรูปไมโครชิปที่เกิดจากอิทธิพลของวัตถุดิบในตารางที่ 1.5 พบว่าทุกหัวข้อมีการควบคุมและตรวจสอบอย่างเป็นระบบ จึงไม่น่าจะเป็นสาเหตุของปัญหาได้

จากการวิเคราะห์แผนภาพก้างปลา พบปัจจัยที่น่าจะมีอิทธิพลต่อปัญหาของเสียที่เกิดจากโพรงอากาศในกระบวนการขึ้นรูป มีดังนี้

- 1) แรงอัดของแม่พิมพ์ (Clamp pressure)
- 2) แรงฉีด (Injection Force)
- 3) ระยะเวลาในการฉีดเรซิน (Injection time)
- 4) ระยะเวลาในการอุ่นเรซิน (Tablet pre-heat time)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อลดสัดส่วนของเสียที่เกิดจากโพรงอากาศในกระบวนการขึ้นรูปไมโครชิป โดยขนาดรวมของโพรงอากาศต้องมีขนาดไม่เกิน 500 ไมครอน

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเฉพาะปัญหาการเกิดโพรงอากาศที่เกิดจากกระบวนการขึ้นรูปไมโครชิปเท่านั้น

หมายเหตุ งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเฉพาะโพรงอากาศภายในไมโครชิปเท่านั้น

2. ทำการศึกษาและปรับปรุงเฉพาะพารามิเตอร์ที่ได้กำหนดสำหรับการทดลองนี้เท่านั้น  
ได้แก่

2.1 แรงอัดของแม่พิมพ์ (Clamp pressure)

2.2 แรงฉีด (Injection Force)

2.3 ระยะเวลาในการฉีดเรซิน (Injection time)

2.4 ระยะเวลาในการอุ่นเรซิน (Tablet pre-heat time)

3. กำหนดพารามิเตอร์ควบคุมของกระบวนการ โดยทำการกำหนดค่าไว้ให้คงที่ ได้แก่

3.1 ระยะเวลาของการอบเรซินหลังฉีดขึ้นรูป (Cure time)

เป็นเวลาที่ทิ้งไว้ให้เรซินมีการเซตตัวหลังการฉีดขึ้นรูป ระยะเวลาในการอบนี้จะถูกออกแบบมาสำหรับเรซินแต่ละแบบ โดยมีการทดสอบความแข็งของผิวเรซินที่ระยะเวลาการอบต่างกัน ซึ่งระยะเวลาการอบที่ต้องการจะเป็นเวลาที่น้อยที่สุดที่ทำให้ได้ค่าความแข็งที่เหมาะสมของผิวเรซินหลังจากการขึ้นรูป จากผลการทดสอบพบว่า ได้เวลาเท่ากับ 100 วินาที จึงทำการกำหนดค่าให้คงที่ไว้

3.2 ตำแหน่งเริ่มต้นแกนฉีด (Tablet position)

มีความสัมพันธ์กับความยาวของเรซินและระยะเวลาในการฉีด เป็นตำแหน่งที่ในการใส่เรซินลงไปในระบบฉีด มาตรฐานในการปรับตั้งค่าของเครื่องจักรจะอ้างอิงที่ความยาวของเรซินชนิดนี้และความสูงของเรซินจะต้องไม่เกินผิวของระบบฉีด โดยเรซินมีความยาวเท่ากับ 25 มิลลิเมตร จึงกำหนดค่าไว้ให้คงที่

3.3 อุณหภูมิของแม่พิมพ์ (Die temperature)

อุณหภูมิของแม่พิมพ์จะมีความสัมพันธ์กับการหลอมละลายของเรซินและการขยายตัวของลีดเฟรม ซึ่งได้ถูกกำหนดไว้ตั้งแต่ในขั้นตอนของการออกแบบที่ 175 องศาเซลเซียส  
หมายเหตุ การใช้อุณหภูมิที่มากกว่าหรือน้อยกว่าที่ออกแบบไว้จะมีผลต่อระยะเวลาที่ทำ

ให้เรซินหลอมละลายพร้อมที่จะขึ้นรูป อีกทั้งยังทำให้ลีดเฟรมมีการขยายตัวไม่สัมพันธ์กับการขยายตัวของแม่พิมพ์ ซึ่งทำจากเหล็ก ในการออกแบบจึงมีการคำนวณค่าการขยายตัวไว้แล้ว

#### 3.4 อุณหภูมิในการอุ่นลีดเฟรมก่อนขึ้นรูป (Frame pre-heat temperature)

เนื่องจากลีดเฟรมมีความบางและจะขยายตัวอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับความร้อนจากอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่สูงถึง 175 องศาเซลเซียส ทำให้ลีดเฟรมมีการบิดเบี้ยวหรืองอได้ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อารเสีรูปของเส้นทอง แต่ไม่ได้มีความเกี่ยวข้องกับการเสีรูปของเฟรมหรือการไหลของเรซินดังนั้นจึงต้องมีการอุ่นลีดเฟรมก่อนที่จะทำการขึ้นรูป โดยจะเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดของการอุ่นลีดเฟรมและความสามารถเครื่องจักร ที่ไม่ทำให้ลีดเฟรมมีการบิดเบี้ยวหรืองอ ซึ่งได้อุณหภูมิเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส จึงกำหนดไว้เป็นค่าคงที่

#### 3.5 เวลาในการอุ่นลีดเฟรมก่อนขึ้นรูป (Frame pre-heat temperature)

เป็นเวลาที่ใช้ในการnungให้ลีดเฟรมได้รับความร้อนและขยายตัวได้อย่างเหมาะสมก่อนที่จะทำการขึ้นรูป เวลาในการอุ่นลีดเฟรมก่อนขึ้นรูป จะสัมพันธ์กับอุณหภูมิในการอุ่นลีดเฟรมก่อนขึ้นรูป ซึ่งจะทำการเลือกระยะเวลาที่น้อยที่สุดของการอุ่นลีดเฟรมที่ไม่ทำให้ลีดเฟรมมีการบิดเบี้ยวหรืองอ ได้ระยะเวลาเท่ากับ 30 วินาที จึงกำหนดเป็นค่าคงที่ไว้

#### 4. ควบคุมเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

4.1 ใช้เครื่องจักรโมเดล โมเดล A เพียงเครื่องเดียวในการวิจัย

4.2 แม่พิมพ์ที่ใช้มีอายุการใช้งานอยู่ระหว่าง 100,000 (+/- 3000) ครั้งของการรัน

4.3 แกนฉีดและกระบอกลัดมีอายุการใช้งานอยู่ระหว่าง 100,000 (+/- 3000) ครั้ง

ของการรัน

#### 5. ควบคุมวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

5.1 งานที่ใช้ในการทดลองเป็นไมโครชิปแบบไม่มีขาชนิด LFBGA

5.2 ใช้เรซินชนิด CV ในการทดลอง

#### 6. ควบคุมสภาพแวดล้อมในการทดลอง ดังนี้

6.1 ทำการทดลองภายในห้องคลีนรูม (Clean room) class 1000

6.2 อุณหภูมิห้องทดลอง 22-26 องศาเซลเซียส

6.3 ความชื้นของห้องทดลอง 40-60 %RH

หมายเหตุ สภาวะในข้อ 6 เป็นสภาวะปกติที่ใช้ในการผลิต

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ช่วยปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปไมโครชิปจากปัญหาการเกิดโพรงอากาศ
2. ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม
3. ผลจากการศึกษาสามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปหรือกระบวนการผลิตในลักษณะอื่นๆ

#### 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษากระบวนการขึ้นรูปและปัญหาการเกิดโพรงอากาศ
3. วิเคราะห์และเลือกปัจจัยที่ทำให้เกิดปัญหา
4. เลือกการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมกับปัจจัย
5. ทดลองตามการออกแบบการทดลองที่ได้เลือกไว้
6. วิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการทางสถิติ
7. นำผลการวิเคราะห์มาใช้ในการปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูป
8. เก็บข้อมูลและติดตามผล
9. สรุปผลและข้อเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยต่อไป
10. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

## 1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ลำดับ	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	ระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย												
		2553								2554				
		พ.ค	มิ.ย	ก.ค	ส.ค	ก.ย	ต.ค	พ.ย.	ธ.ค	ม.ค	ก.พ			
1	ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง	■	■											
2	ศึกษากระบวนการขึ้นรูปและปัญหาการเกิดโพรงอากาศ			■										
3	วิเคราะห์และเลือกปัจจัยที่ทำให้เกิดปัญหา				■									
4	เลือกการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมกับปัจจัย					■								
5	ทดลองตามการออกแบบการทดลองที่ได้เลือกไว้						■							
6	วิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการทางสถิติ							■						
7	นำผลการวิเคราะห์มาใช้ในการปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูป								■					
8	เก็บข้อมูลและติดตามผล									■				
9	สรุปผลและข้อเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยต่อไป										■			
10	จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์											■	■	■

ตารางที่ 1.6 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

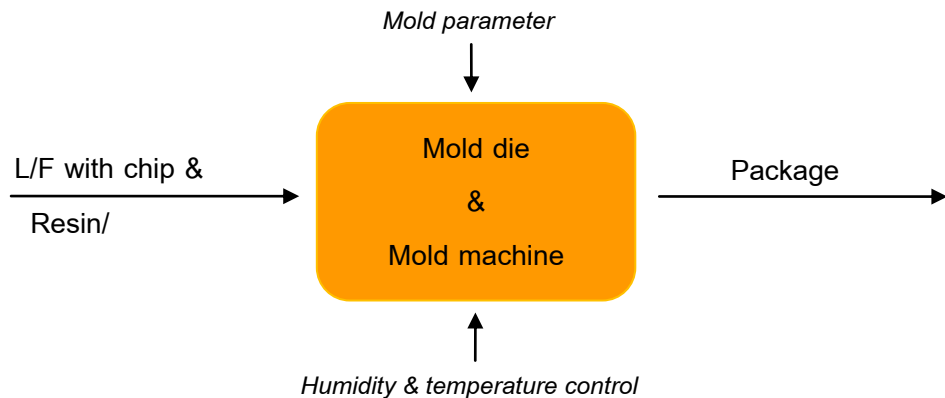
## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการแก้ไขปัญหาของงานที่เกิดจากกระบวนการผลิต โดยใช้การหาเงื่อนไขที่เหมาะสม จำเป็นต้องหาทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องมาประยุกต์ใช้ ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีต่างๆที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา และการออกแบบการทดลองด้วยหลักการทางสถิติ

#### 2.1 กระบวนการขึ้นรูปไมโครชิป (Molding Process)

การขึ้นรูปไมโครชิปนั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อห่อหุ้มวงจรมีความซับซ้อนและมีขนาดเล็กมาก ในการป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดจากการเคลื่อนย้าย การประกอบ สภาพแวดล้อมและการใช้งาน รวมถึงให้ง่ายในการนำไปใช้งานต่อ โดยทั่วไปแล้วลักษณะของการขึ้นรูปไมโครชิปจะเป็นแบบการอัดส่ง (Transfer Mold) สำหรับกระบวนการขึ้นรูปไมโครชิปประกอบไปด้วย ลีดเฟรมที่มีการติดชิปและเชื่อมด้วยลวดทองคำตามชนิดของงาน และเรซินหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าคอมปาวด์ (Compound) ส่งผ่านไปยังแม่พิมพ์เพื่อทำการขึ้นรูป ด้วยสภาวะที่เหมาะสม ออกมาเป็นไมโครชิปที่ขึ้นรูปเสร็จเรียบร้อยแล้ว

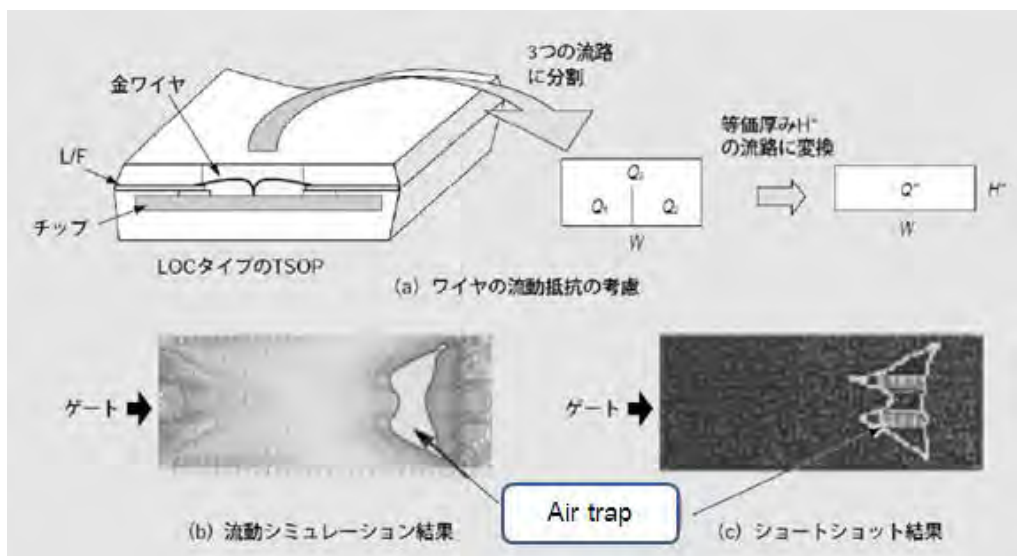


รูปที่ 2.1 Input และ out put ของกระบวนการขึ้นรูป

การที่อุตสาหกรรมเกี่ยวกับเซมิคอนดักเตอร์ซึ่งรวมถึงไมโครชิป มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วตามเทคโนโลยี ทำให้ไมโครชิปมีขนาดเล็กและบางลง ความซับซ้อนของวงจรมีส่วนประกอบภายในมีมากขึ้น ทำให้พบปัญหาต่างๆในกระบวนการขึ้นรูปมากขึ้นตามไปด้วย โดยเฉพาะในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการฉีดเรซิน เช่น การเกิดของเสียจากการที่เส้นลวดทองคำสัมผัสกัน ทำให้เกิดการ

ลัดวงจร ของเสียที่เกิดจากการแตกหรือบิ่นของเนื้อเรซินหลังจากขึ้นรูปแล้ว การแยกชั้นของเนื้อเรซินกับลีดเฟรม หรือแม้แต่การเกิดโพรงอากาศที่งานวิจัยนี้มุ่งที่จะนำเสนอการแก้ปัญหาด้วย

เนื่องจากเรซินที่ใช้ในการขึ้นรูปไมโครชิปมีลักษณะเป็น Composite material เกิดจากการผสมกันระหว่าง Epoxy resin กับ Silica filler พฤติกรรมการไหลของเรซินเข้าไปในแม่พิมพ์จะมีผลต่อการเกิดโพรงอากาศ ความหนืดของเรซินจึงเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาที่ได้รับความร้อน รวมทั้งลักษณะการรวมกลุ่มกันของ filler ด้วย ความหนืดนี้จะมีผลต่อการไหลของเรซินคือความเร็วและแรงปะทะของเรซินที่จะกระทำกับชิปและเส้นลวดทองคำ ความเร็วในการไหลของเรซินในแต่ละพื้นที่จะไม่เท่ากัน สำหรับเรซินที่มีความหนืดสูง ความเร็วของเรซินที่ไหลผ่านบริเวณหน้าชิปจะช้ากว่าที่ไหลผ่านบริเวณลีดเฟรม รวมถึงแรงปะทะที่มากด้วย ดังนั้นในขณะที่เรซินไหลผ่านบริเวณหน้าชิปจะเหมือนห่อหุ้มหรือกักอากาศเอาไว้ เกิดเป็นโพรงอากาศขึ้น ส่วนเรซินที่มีความหนืดต่ำนั้น จะมีการไหลที่สะดวก ทำให้ไม่เกิดการกักอากาศเอาไว้ พิจารณารูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงการเกิด Air trap (Yoshii M., Mizukami Y. and Shoji H., Evaluation Technologies on Moldability of Epoxy molding Compounds for Encapsulation of Semiconductor.)

ความต้านทานการไหลเนื่องจากความหนืดจะทำให้การไหลบริเวณกลางชิปช้าลง ในขณะที่เรซินรอบๆชิปจะไหลเร็วขึ้น เมื่อเรซินไหลมารวมตัวกับเรซินที่ดันตัวขึ้นมาจากด้านล่างชิป ก็จะทำให้เกิดเป็น Air trap ขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญให้หลงเหลือเป็นรูที่เรียกว่า Weld Void ในเนื้อเรซิน อย่างไรก็ตาม เราสามารถลดขนาดของ Air trap ได้โดยการลด Viscosity ของเรซินเพื่อเพิ่มความเร็วในการไหลของเรซินหรือไม่อย่างนั้นก็ต้องเปลี่ยนโครงสร้างของลีดเฟรมใหม่

## 2.2 การวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้ผังก้างปลา

ผังก้างปลาเป็นแผนผังที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัญหากับสาเหตุทั้งหมดที่อาจเป็นไปได้ (Possible cause) ที่ทำให้เกิดปัญหานั้น เรียกอย่างเป็นทางการว่า (Fish Bone Diagram) ใช้เมื่อต้องการหาสาเหตุของปัญหา นอกจากจะทำให้รู้ถึงปัญหาในส่วนของตนเองแล้วยังทำให้เข้าใจในกระบวนการของแผนกอื่นด้วย โดยจะต้องมีการระดมความคิด จากหลายๆส่วน เพื่อให้สามารถค้นหาสาเหตุของปัญหาออกมาได้อย่างครบถ้วน ในส่วนที่เป็นปัญหา (Problem) จะถูกกำหนดให้อยู่ในส่วนของหัวปลา ขณะที่ในส่วนของสาเหตุของปัญหาสามารถแบ่งย่อยได้เป็น ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปัญหา ประกอบด้วยสาเหตุหลักและสาเหตุรอง จะเขียนอยู่ที่บริเวณเส้นที่ลากออกมาในลักษณะก้างปลา ตามระดับของสาเหตุ โดยทั่วไปจะแบ่งสาเหตุรองให้ย่อยออกไปหลายระดับ เพื่อให้สามารถมองเห็นภาพรวมของปัญหาได้ ทำให้เราทราบถึงสาเหตุหลักหรือสาเหตุรองที่เป็นระดับความสำคัญลงมา นำไปสู่การแก้ไขปัญหาที่ตรงจุดได้ แต่อาจมีข้อเสียจากความคิดที่จำกัดของสมาชิกในทีม ดังนั้นจึงต้องอาศัยความสามารถและประสบการณ์ในการวิเคราะห์หาสาเหตุในระดับต่างๆออกมาอย่างถี่ถ้วน

### ขั้นตอนการสร้างผังก้างปลา

การทำผังก้างปลาจะต้องมีการจัดตั้งทีมงานขึ้นมาเพื่อระดมความคิด วิเคราะห์หาสาเหตุที่น่าจะเป็นไปได้ทั้งหมดออกมา ประกอบด้วย 6 ขั้นตอนดังนี้

1. การกำหนดปัญหาโดยจะใส่ไว้ที่ส่วนหัวปลา
2. การกำหนดกลุ่มของปัจจัยที่อาจทำให้เกิดปัญหานั้นๆ
3. ระดมสมอง เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุของแต่ละปัจจัย ที่คาดว่าเป็นสาเหตุของปัญหา
4. กลั่นกรองหาสาเหตุหลักของปัญหา
5. จัดลำดับความสำคัญของสาเหตุที่ได้มา
6. หาแนวทางการแก้ปัญหาในแต่ละปัจจัยหลักตามลำดับความสำคัญ

## 2.3. การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

การออกแบบการทดลองคือ กระบวนการในการวางแผนการทดลอง แล้วนำข้อมูลหรือผลการทดลองที่ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์เชิงสถิติ เพื่อหาข้อสรุป ช่วยให้เราสามารถหาสภาวะที่เหมาะสมหรือได้คำตอบที่ดีที่สุดในการแก้ปัญหาได้

### วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง

เพื่อทดสอบว่าปัจจัย (Factor) หรือตัวแปรใด มีผลต่อผลตอบสนองโดยมีจุดมุ่งหมายดังนี้



1. เพื่อยืนยันข้อเท็จจริง (Confirmation)
2. เพื่อค้นหาข้อเท็จจริง (Exploration)

### การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเป็นเครื่องมือที่สำคัญเกี่ยวกับงานทางด้านวิศวกรรม ในการที่จะปรับปรุงกระบวนการผลิตในรูปแบบหรือลักษณะดังต่อไปนี้

1. การเพิ่มผลผลิตให้กับกระบวนการ
2. การลดความแปรผันของกระบวนการ
3. ลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการศึกษาและพัฒนา

ส่วนประกอบต่างๆของการทดลอง

1. ทรีทเมนต์ (Treatment) เป็นวิธีที่ปฏิบัติกับสิ่งทดลองเพื่อเปรียบเทียบผล
2. หน่วยทดลอง (Experiment Unit) คือมาตรฐานหรือหน่วยที่ใช้วัดผลกระทบหรืออิทธิพลของทรีทเมนต์

3. ปัจจัย (Factor) หรือตัวแปรอิสระ ได้แก่กลุ่มของทรีทเมนต์ที่มีความเกี่ยวข้องกัน แบ่ง เป็นข้อมูลเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยปัจจัยสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

3.1 ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) คือปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าได้ในการทดลอง

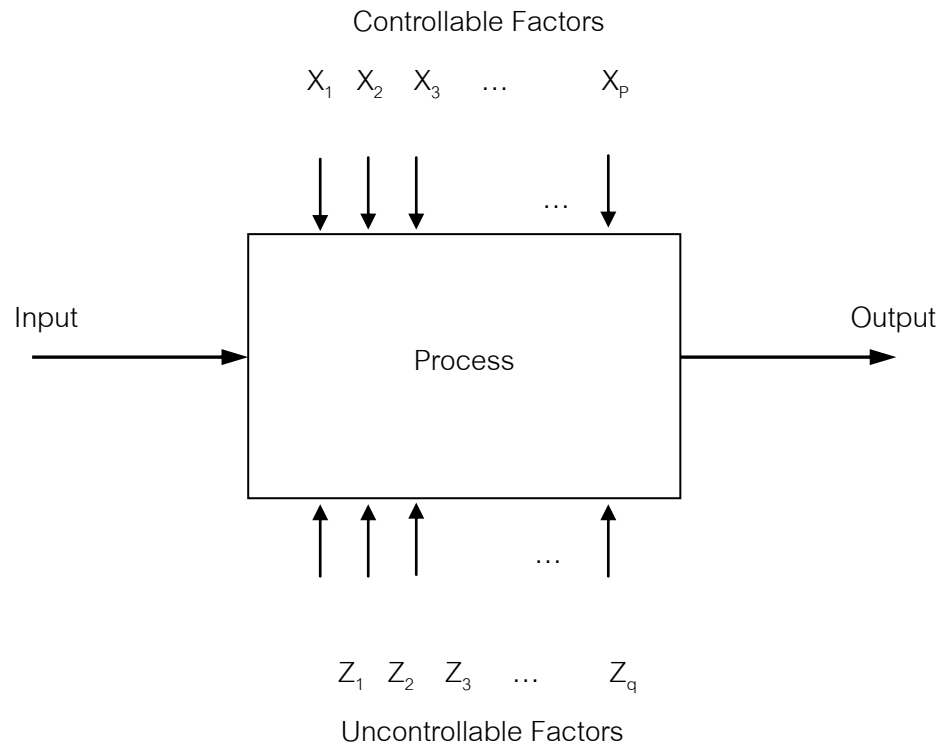
3.2 ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) คือปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าในการทดลองได้ เนื่องจากข้อจำกัดต่างๆเช่น ต้นทุนหรือเทคโนโลยี แบ่งเป็น

3.2.1 ตัวแปรรบกวน (Noise variable) แม้จะเป็นตัวแปรที่มีผลต่อผลตอบสนองแต่ไม่ใช่เป็นปัจจัยที่เราต้องการจะศึกษา เช่น เวลา เป็นต้น

3.2.2 Nuisance Variable เป็นตัวแปรที่มีผลต่อผลตอบสนองโดยที่เราไม่ทราบมาก่อน เราจะใช้การสุ่มเพื่อลดอิทธิพลของปัจจัยจำพวกนี้

4. ตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) หรือตัวแปรตาม คือตัวแปรที่ถูกสังเกตค่าหรือวัดค่าในการทดลอง หรือเป็นผลสะท้อนของตัวแปรอิสระ ในการทดลองอาจมีตัวแปรตอบสนองมากกว่าหนึ่งค่าก็ได้ ลักษณะของตัวแปรตามที่ดีจะต้องน่าเชื่อถือ

รูปแบบของระบบการทดลองโดยทั่วไปสามารถแสดงได้ดังนี้



รูป 2.3 รูปแบบของระบบการทดลองทั่วไป

### 2.3.1 หลักการพื้นฐานในการออกแบบการทดลอง

หลักการพื้นฐานมีความสำคัญต่อการออกแบบการทดลอง ซึ่งมีผลต่อความน่าเชื่อถือของผลการทดลองที่ได้ ทำให้การวิเคราะห์และการสรุปผลถูกต้องแม่นยำ หลักการพื้นฐานแบ่งเป็น 3 หลักการคือ การสุ่ม (Randomization) การทำการทดลองซ้ำ (Replication) และการจัดกลุ่ม (Blocking)

1. การสุ่ม (Randomization) เป็นการทดลองและเก็บข้อมูลแต่ละตัวในแบบที่เท่าๆกัน เพื่อไม่ให้เกิดความลำเอียงจากผู้ทดลอง รวมทั้งเป็นการจัดให้แต่ละสถานะของการทดลองเป็นไปอย่างทั่วถึง อีกทั้งยังเป็นการขจัดความผันแปรภายนอกที่ควบคุมไม่ได้อีกด้วย การทำสุ่มแบ่งได้เป็น 3 วิธีคือ

1.1 การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete randomization)

1.2 การทำแบบสุ่มอย่างง่าย (Simple randomization)

1.3 การทำแบบสุ่มแบบสมบูรณ์ภายในบล็อก (Complete randomization within blocks)

2. การทำการทดลองซ้ำ (Replication) จะช่วยให้ผู้ทดลองสามารถประเมินค่าความผิดพลาดหรือความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการทดลองได้ เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไปว่าปัจจัยใดมีผล

ต่อกระบวนการบ้าง โดยจะต้องมีการกำหนดจำนวนที่จะทำซ้ำและต้องทำอย่างเป็นอิสระต่อกัน จำนวนการทำซ้ำที่น้อยเกินไปอาจส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง แต่ถ้ามากเกินไปก็อาจทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่าย

3. การจัดกลุ่ม (Blocking) เพื่อทำให้ความแตกต่างภายในกลุ่มมีน้อยที่สุด แต่อาจมากขึ้น ถ้าเทียบระหว่างกลุ่มก็เป็นไปได้ เนื่องจากบางครั้งเราไม่สามารถทำการทดลองโดยใช้วัตถุดิบหรือ วันเวลาเดียวกันได้ ซึ่งการจัดกลุ่มจะขึ้นอยู่กับข้อจำกัดที่เกิดขึ้นเฉพาะการทดลองนั้นๆ

### 2.3.2 แนวทางในการออกแบบการทดลอง

เป็นการวิเคราะห์ปัญหาโดยการหาตัวแปรอิสระที่มีผลต่อการทดลองหรือความแปรปรวนของผลตอบสนอง ซึ่งจะต้องมีความเข้าใจพื้นฐานทางสถิติ ความเข้าใจในงานที่กำลังจะศึกษา ความเชี่ยวชาญและการทำงานร่วมกันเป็นทีม โดยสามารถแบ่งขั้นตอนการทดลองได้เป็นดังนี้

1. การกำหนดปัญหา (Identify problem) เพื่อชี้ชัดว่าเราต้องการอะไรหรือต้องการรู้อะไรจากการทดลอง เนื่องจากวิธีการที่จะออกแบบการทดลองนั้นจะต้องมีความชัดเจนในเรื่องของการกำหนดปัญหาเสียก่อน และจะต้องเชื่อมโยงไปถึงจุดประสงค์ของการทดลองด้วย

2. กำหนดปัจจัย (Define variable) และระดับของปัจจัย (Level) เป็นการระบุว่าปัจจัยใดบ้างที่มีผลต่อการทดลอง ส่วนใหญ่แล้วในการออกแบบการทดลองจะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาปัจจัยหลายๆอย่างพร้อมกัน บางครั้งผู้ทดลองไม่สามารถรู้ผลกระทบของปัจจัยทั้งหมดที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบสนองได้ จึงต้องมีการกลั่นกรองตัวแปรต่างๆที่มีผลกระทบต่อผลตอบสนองออกมา แบ่งเป็นตัวแปรต้นหรือปัจจัย (factor) ซึ่งรวมถึงสภาวะต่างๆที่เป็นไปได้ของปัจจัย เรียกว่าระดับของปัจจัย (level) และตัวแปรตามหรือผลตอบสนอง โดยจะต้องมีการพิจารณาถึงผลกระทบร่วมกันของปัจจัยในกรณีที่มีปัจจัยมากกว่าหนึ่ง

การแบ่งระดับของปัจจัย

1. แบบกำหนด (Fixed effect) หมายถึงระดับของปัจจัยที่สามารถควบคุมหรือกำหนดได้อย่างแน่นอน

2. แบบสุ่ม (Random effect) หมายถึงระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมหรือกำหนดได้อย่างแน่นอน

3. แบบผสม (Mixed effect) หมายถึงการมีทั้งระดับของปัจจัยที่สามารถควบคุมได้และไม่ได้รวมอยู่ด้วยกัน

ในส่วนของปัจจัยหลักและปัจจัยควบคุมที่มีค่าคงที่เนื่องจากมีค่าที่แน่นอน โดยทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 2 ระดับ และ 3 ระดับ โดยที่ในแบบ 2 ระดับจะกำหนดปัจจัยนอกช่วงใช้งานปกติคือ น้อยกว่าค่าต่ำสุดและมากกว่าค่าสูงสุด ใช้สัญลักษณ์เป็น ค่าสูงสุด (+) และ ค่าต่ำสุด (-)

สำหรับการกำหนดปัจจัยแบบ 3 ระดับ จะมีการเพิ่มระดับกลางเข้าไป เพื่อให้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตด้วย

3. การเลือกตัวแปรตอบสนอง จะต้องมีการเลือกตัวแปรตอบสนองที่มีประโยชน์และแสดงออกถึงความสัมพันธ์กับกระบวนการที่เราต้องการจะศึกษา ตัวแปรตอบสนองอาจมีค่าเดียวหรือหลายค่าก็ได้ขึ้นอยู่กับรูปแบบของการทดลอง ทั้งนี้จะต้องคำนึงถึงสิ่งที่จะใช้เป็นตัววัดหรือทำให้ได้มาซึ่งค่าของตัวแปรตอบสนองด้วย เพราะความแม่นยำของการวัดค่าจะส่งผลต่อผลการทดลองที่น่าเชื่อถือ

4. การเลือกแบบการทดลอง (Select design) ขึ้นอยู่กับจำนวนปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลตอบสนอง โดยจะต้องมีการกำหนดจำนวนข้อมูลที่ต้องการในแต่ละระดับ กำหนดรูปแบบในการทดลอง วิธีการสุ่มตัวอย่าง ซึ่งโดยปกติแล้วถ้าจำนวนปัจจัยที่มากกว่า 1 แต่ไม่เกิน 5 จะใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (factorial design) นอกจากนี้ยังต้องมีการวางแผนเกี่ยวกับจำนวนครั้งที่ทำการทดลองซ้ำ เพราะมีผลต่อการแปรผันของข้อมูล ซึ่งเป็นไปตามธรรมชาติของการทดลอง แต่ต้องระวังผลกระทบกับค่าใช้จ่ายด้วย

5. ทำการทดลอง (Perform experiment) ต้องมีการติดตามการทดลองอยู่ตลอดเวลา เพื่อลดความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการทดลอง ตรวจสอบความถูกต้องและสม่ำเสมอ เพื่อจะทำให้ผลที่ได้มีความแม่นยำมากที่สุด

6. การวิเคราะห์ข้อมูล (Statistical analysis of the data) การเก็บและจัดระบบข้อมูลที่ดี จะทำให้ผลการวิเคราะห์มีความน่าเชื่อถือ โดยการวิเคราะห์นั้นจะใช้พื้นฐานความรู้ทางสถิติเข้ามาช่วยในการทดสอบค่าที่เหมาะสม อย่างเช่น การวิเคราะห์ความแปรปรวน เป็นการวิเคราะห์ภายใต้ความเชื่อมั่น เพื่อเป็นแนวทางของการปรับปรุงและพัฒนาในการใช้งานจริง

7. การสรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ (Conclusions and recommendations) ต้องมีการสรุปผลที่ได้จากการทดลอง รวมถึงอาจมีข้อปรับปรุงหรือข้อเสนอแนะ ที่ได้จากการทดลองก็จะเป็นประโยชน์ต่อการทดลองในครั้งต่อไป

### 2.3.3 ชนิดของการออกแบบการทดลอง

#### 1. แผนการออกแบบการทดลองกรณีปัจจัยเดียว (Single factor design)

คือแบบการทดลองที่มีเพียงปัจจัยเดียวที่มีผลต่อค่าตอบสนอง แบ่งเป็น 2 แบบคือ

##### 1.1 แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely randomized design: CRD)

ใช้ในกรณีที่พบว่าตัวแปรตามมีความแปรผันจากปัจจัยเดียวแต่มีหลายระดับหรือเรียกว่าการแจกแจงแบบทางเดียว (One way classification) แต่ไม่มีปัจจัยรบกวน การเปรียบเทียบจึงทำระหว่างระดับของปัจจัย การเลือกระดับของปัจจัยสำหรับทำการทดลองแต่ละครั้งจะให้เป็นแบบสุ่ม ข้อมูลที่แต่ละระดับไม่จำเป็นต้องเท่ากัน ทำให้ง่ายต่อการจัดแผนการ

ทดลองและการวิเคราะห์ผล ซึ่งการวิเคราะห์จะไม่ค่อยซับซ้อนถึงแม้จะมีจำนวนการทดลองซ้ำไม่เท่ากัน แต่จำเป็นที่จะเหมาะกับจำนวนทรีทเมนต์ที่มีจำนวนน้อยและมีความสม่ำเสมอ อีกทั้งยังไม่สามารถหาปฏิกริยาร่วมระหว่างปัจจัยได้ (Interaction effect)

## 1.2 แผนการทดลองแบบบล็อกสุ่มสมบูรณ์ (Randomized block design: RBD)

เป็นวิธีการที่ใช้กำจัดอิทธิพลของปัจจัยที่เราไม่ต้องการหรือที่เรียกว่าปัจจัยรบกวนออกไปโดยใช้วิธีการบล็อก (Block) ก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลการทดลอง เนื่องจากความผันแปรที่เกิดจากตัวทรีทเมนต์ นอกจากนี้ยังมีความผันแปรเนื่องจากการทดลองรวมอยู่ด้วย เพราะบางครั้งในหน่วยของการทดลองอาจไม่มีความสม่ำเสมอ ทำให้การทดลองมีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นจึงต้องมีการแยกผลที่เกิดจากอิทธิพลที่ไม่เกี่ยวข้องกับทรีทเมนต์ออกไป ซึ่งจะต้องทำทุกระดับไม่ว่าจะเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองหรือไม่มีผลต่อการทดลอง

แผนการทดลองแบบบล็อกสุ่มสมบูรณ์ ใช้การจำแนกแบบ 2 ทาง (Two-Way classification) โดยทำการจัดหน่วยการทดลองที่มีความคล้ายคลึงกันให้อยู่ในกลุ่มเดียวกัน เรียกว่า บล็อก ซึ่งจะมีผลต่อความแปรปรวนภายในหน่วยการทดลองเดียวกัน แต่จะทำให้เกิดความแตกต่างมากขึ้นในระหว่างบล็อก แผนการทดลองแบบนี้มีข้อดีตรงที่ไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงข้อจำกัดของจำนวนทรีทเมนต์หรือบล็อก ถ้าต้องการทำเพิ่มหรือทำซ้ำก็สามารถเพิ่มข้อมูลเข้าไปในแต่ละบล็อกได้ แต่ถ้าความผันแปรในแต่ละบล็อกมีมาก ก็จะทำให้การทดลองมีความผันแปรมากขึ้นตามไปด้วย

## 2. แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial design: FD)

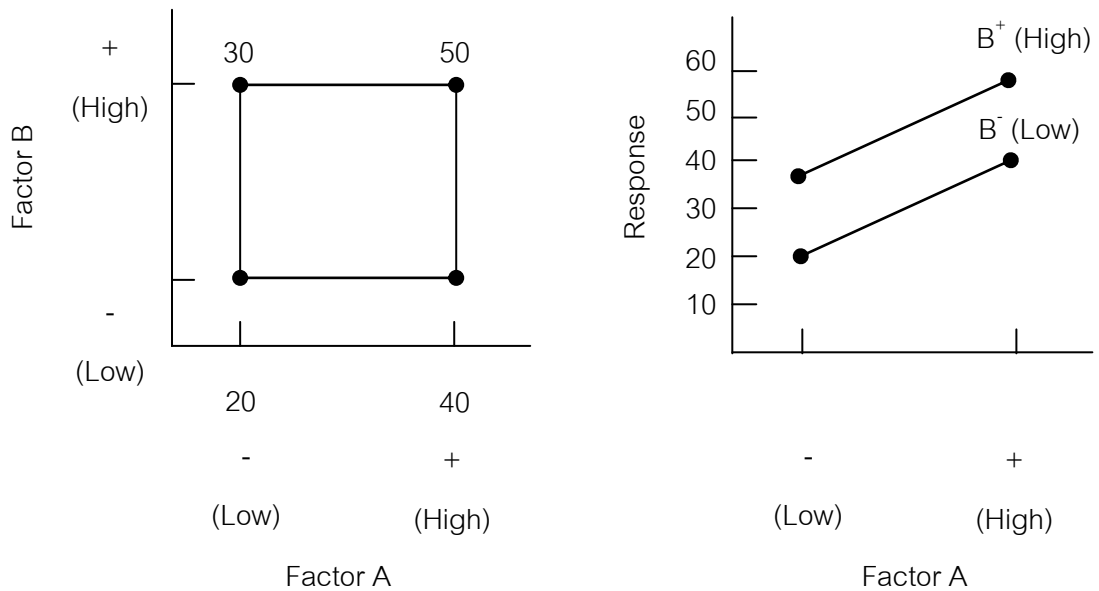
เป็นแผนการทดลองสำหรับการทดลองที่มีปัจจัยตั้งแต่สองตัวขึ้นไป โดยปัจจัยหนึ่งๆที่มีทำให้ผลตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลง เราเรียกว่าปัจจัยหลัก (Main effect) แต่ถ้าผลตอบสนองของปัจจัยหนึ่งขึ้นกับระดับของปัจจัยอื่น เราเรียกว่ามีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกัน จึงต้องมีการศึกษาผลของแต่ละปัจจัยไปพร้อมๆกัน คำว่า แฟคทอเรียล หมายถึงการทดลองที่มีความสมบูรณ์ในแต่ละการทำซ้ำของการทดลอง โดยต้องทำการทดลองทุกระดับของปัจจัย เพื่อให้สามารถหาอิทธิพลต่างๆที่เกิดกับการทดลอง สามารถแบ่งได้เป็น

1. อิทธิพลหลัก (Main effect) ผลต่อตัวแปรตอบสนองที่เปลี่ยนแปลงไป เกิดจากอิทธิพลที่ตัวของปัจจัยนั้นๆเอง

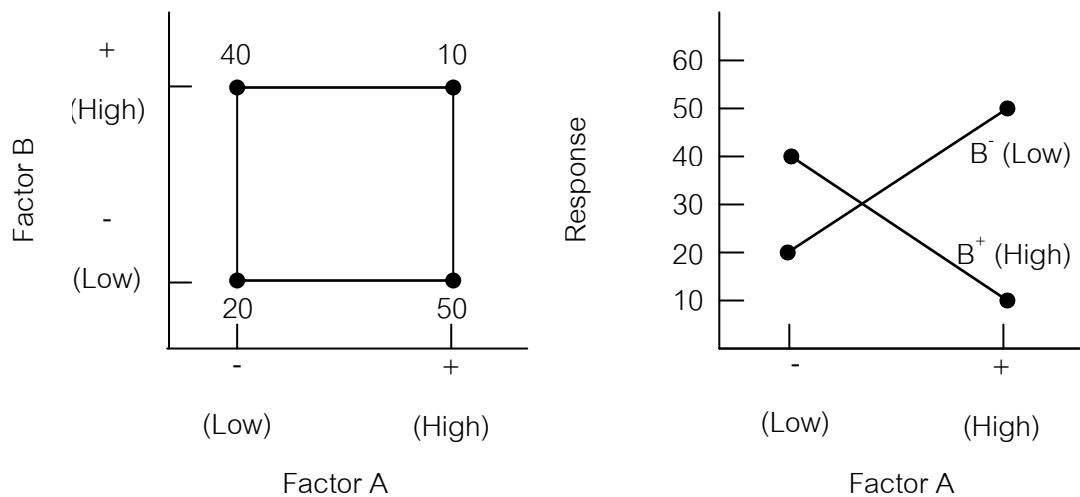
2. อิทธิพลร่วม (Interaction effect) อิทธิพลของปัจจัยหนึ่งจะเปลี่ยน เมื่อปัจจัยร่วมมีการเปลี่ยนแปลง

ผลที่เกิดจากปัจจัยนั้นๆจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นที่ผลตอบ เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้นๆ ซึ่งจะเรียกว่าผลหลัก (Main effect) และหากความแตกต่างของ

ผลตอบที่เกิดขึ้นบนระดับต่างๆของปัจจัยหนึ่งจะมีค่าไม่เท่ากันที่ระดับอื่นๆ ซึ่งเรียกว่า การมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกันระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง โดยค่าที่จุดต่างๆคือตัวแปรตอบสนอง เมื่อมีปัจจัย 2 ตัวคือ A และ B โดยแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับคือ - หรือ Low และ + หรือ High



รูปที่ 2.4 การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย (ไม่มีอันตรกิริยา)



รูปที่ 2.5 การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย (มีอันตรกิริยา)

แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลนั้นจะทำให้เราสามารถหาปฏิกริยาร่วมของปัจจัยได้ แต่ถ้ามีปฏิกริยาร่วมที่มาก ก็อาจจะทำให้อธิบายผลการทดลองได้ยาก อีกทั้งการเพิ่มของจำนวนปัจจัยก็จะทำให้จำนวนการทดลองเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งนั่นหมายถึงการเสียเวลาและค่าใช้จ่ายที่มากขึ้น

รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของการทดลองแบบแฟคทอเรียลกรณีที่มี 2 ปัจจัยคือ ปัจจัย A มี a ระดับ และปัจจัย B มี b ระดับและทดลอง n ครั้ง คือ 
$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + AB_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \text{โดยที่}$$
 
$$i = 1, 2, \dots, a \quad j = 1, 2, \dots, b \quad k = 1, 2, \dots, n$$

รูปแบบของการทดลองแบบแฟคทอเรียลที่สำคัญได้แก่

### 1. การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล $2^k$

ใช้กับการทดลองที่มีหลายปัจจัย โดยแบ่งระดับของปัจจัยเป็น 2 ระดับ จากปัจจัยทั้งหมด k ปัจจัย มีประโยชน์ต่อการทำวิจัยในช่วงแรกที่มีปัจจัยจำนวนมากให้ตรวจสอบ จึงใช้เพื่อคัดกรองปัจจัยที่ไม่มีผลต่อการทดลองออกไปก่อนจากกรณีที่มีหลายปัจจัยโดยสมมติว่า

1. ปัจจัยทั้งหมดมีค่าตายตัว
2. การออกแบบเป็นแบบเชิงสุ่มบริบูรณ์ (Completely Randomized)
3. สมมติฐานเกี่ยวกับความเป็นปกติเป็นที่ยอมรับได้

### 2. การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล $3^k$

ใช้กับการทดลองที่มีหลายปัจจัย โดยแบ่งระดับของปัจจัยเป็น 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ ใช้สัญลักษณ์ -1 ระดับกลาง ใช้สัญลักษณ์ 0 และระดับสูง ใช้สัญลักษณ์ 1 จากปัจจัยทั้งหมด k ปัจจัย การที่มีระดับที่สามเพิ่มขึ้นมา ทำให้เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและปัจจัยในแบบควอดราติก (Quadratic) เหมาะกับผู้ที่สนใจผลตอบที่มีลักษณะเป็นส่วนโค้ง

### 3. การออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล (Fractional Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลเป็นการทดลองที่มีหลายปัจจัยเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ต้องเสียเวลาและทรัพยากรในการเก็บข้อมูลจำนวนมาก เพลิดเพลินที่บริบูรณ์จะเพิ่มมากขึ้นจนเกินกว่าที่ทรัพยากรที่มีอยู่จะรองรับได้ ถ้าผู้ทดลองสามารถตั้งสมมติฐานอย่างมีเหตุผลได้ว่า อันตรกิริยาระดับสูงบางตัวสามารถละเลยได้ ในกรณีเช่นนี้ข้อมูลเกี่ยวกับปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระดับต่ำอาจจะหาได้โดยการทดลองเพียงแค่เศษส่วนของแฟคทอเรียลอย่างบริบูรณ์ โดยสามารถใช้การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลเพื่อค้นหาว่าปัจจัยใดบ้างเป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ การทดลองเพื่อกรองปัจจัยนี้ส่วนมากจะใช้ในตอนเริ่มต้นโครงการ เนื่องจากโดยมากแล้วในขณะนั้นมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่มีแนวโน้มจะเป็นปัจจัยที่มีผลน้อยหรือไม่ผลต่อผลต่อผลตอบที่กำลังพิจารณาอยู่ หลังจากการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเสร็จสิ้นแล้ว ปัจจัยที่มีผลจะถูกนำไปทำการทดลองอย่างละเอียดในการทดลองต่อไป ความสำเร็จของการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลขึ้นอยู่กับแนวคิดที่สำคัญ 3 ประการคือ

3.1 หลักการที่ว่า มีปัจจัยจำนวนน้อยที่มีผล เมื่อมีตัวแปรหลายตัว การดำเนินการต่างๆ ของระบบหรือกระบวนการมีแนวโน้มที่จะถูกกำหนดโดยปัจจัยหลักและอันตรกิริยาขั้นต่ำเพียงบางตัวเท่านั้น

3.2 คุณสมบัติการฉายการออกแบบ การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลสามารถถูกขยายไปสู่การออกแบบที่ดีกว่าในเซตย่อยของปัจจัยที่มีผล

3.3 การทดลองต่อเนื่อง เป็นไปได้ที่จะรวมการทดลองเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล  $2^k$  การทดลองหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน เพื่อที่จะทำการให้เกิดการทดลองอย่างต่อเนื่องที่มีการออกแบบที่ใหญ่กว่าและสามารถประมาณผลของปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่อยู่ในความสนใจได้ดียิ่งขึ้น

4. แผนการออกแบบการทดลองอื่นๆ

- แผนการออกแบบการทดลองลาตินสแควร์ (Latin Square Design)
- แผนการออกแบบการทดลองเนสต์เต็ด (Nested Design)
- แผนการออกแบบการทดลองสปริทพล็อต (Split – Plot Design)
- แผนการออกแบบการทดลองพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design)

## 2.4 การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design)

วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology, RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา ผลตอบที่ได้จะขึ้นอยู่กับหลายตัวแปรที่มีผลต่อการทดลอง และเราต้องการที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบนี้ พิจารณาจากสมการ

$$y = f(X_1, X_2) + \epsilon$$

โดยที่  $\epsilon$  คือค่าความผิดพลาดของผลตอบ  $y$  ที่เป็นผลมาจากทดลอง

ถ้ากำหนดให้ 
$$E(y) = f(X, X_2) = f(X_1, X_2)$$

ดังนั้น เราสามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้ดังนี้

$$\eta = f(X_1, X_2)$$



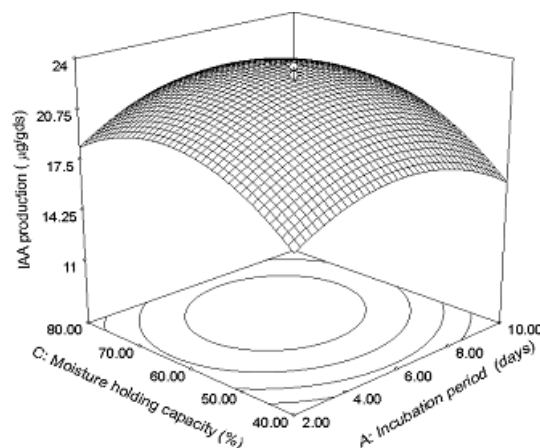
ซึ่งเราจะเรียกว่า พื้นผิวตอบ (Response Surface)

โดยทั่วไปจะมีการแสดงพื้นผิวผลตอบในรูปแบบกราฟิก โดยที่  $\eta$  จะถูกพล็อตกับระดับของ  $X_1$  และ  $X_2$  เพื่อที่จะช่วยให้เรามองรูปร่างของพื้นผิวตอบได้ดียิ่งขึ้น สามารถพล็อตออกมาได้ดังรูป เส้นที่มีค่าของผลตอบคงที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบ  $X_1$  และ  $X_2$  เส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวตอบที่เท่ากันค่าหนึ่ง โดยมากแล้วเราจะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและตัวแปรอิสระ ดังนั้นขั้นตอนแรกคือ ต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่างและเซตของตัวแปรอิสระ ตามปกติแล้วเราจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำๆที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่จะใช้ในการประมาณความสัมพันธ์นี้คือแบบจำลองกำลังหนึ่ง

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon$$

แต่ถ้ามีส่วนโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องในระบบ เราจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon$$



รูปที่ 2.6 พื้นผิวผลตอบแบบสามมิติ

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบส่วนมากจะใช้แบบจำลองหนึ่งในสองแบบนี้ แต่แบบจำลองพหุนามที่กล่าวมานี้ไม่สามารถใช้ประมาณความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระใด แต่ถ้าพื้นผิวที่เราสนใจอยู่นั้นมีขนาดค่อนข้างเล็ก แบบจำลองเหล่านี้สามารถใช้ได้ดีพอสมควร

วิธีการกำลังสองน้อยสุด (Least Square Method) เป็นวิธีการที่ใช้มากในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับแบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้นพหุคูณ ซึ่งถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองพหุนาม การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบจะเกิดขึ้นกับพื้นผิวที่สร้างขึ้น ถ้าพื้นผิวที่สร้างขึ้นสามารถใช้ประมาณฟังก์ชันผลตอบได้อย่างดีพอ ดังนั้นการวิเคราะห์พื้นผิวที่ถูกสร้างขึ้นมานี้จะสามารถประมาณค่าได้เหมือนการวิเคราะห์ระบบจริงซึ่งการออกแบบการสร้างพื้นผิวผลตอบเรียกว่า การออกแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design)

การวิเคราะห์พื้นผิวเช่นเป็นวิธีการแบบมีลำดับขั้นตอน บ่อยครั้งที่เราอยู่ที่จุดบนพื้นผิวผลตอบที่ห่างไกลออกไปจากจุดที่ดีที่สุด ซึ่งวัตถุประสงค์ของเราก็คือการนำการทดลองไปตามแนวทางที่มีการปรับปรุงมากที่สุดและอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดเพื่อที่จะไปใกล้จุดที่ดีที่สุดได้อย่างรวดเร็วที่สุด และเมื่อเราพบอาณาเขตของค่าที่ดีที่สุดแล้ว เราจะนำเอาแบบจำลองที่ซับซ้อนขึ้น เช่นแบบจำลองกำลังสอง เข้ามาใช้ในการวิเคราะห์ และการทดลองเช่นนี้จะทำเพื่อที่จะให้เราสามารถหาจุดที่ดีที่สุดได้ จุดประสงค์สุดท้ายของการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบก็คือ การหาเงื่อนไขการทำงานที่ดีที่สุดสำหรับระบบ

#### 2.4.1 การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบกำลังสอง

เมื่อการทดลองอยู่ที่จุดใกล้เคียงกับจุดที่ดีที่สุด เราจะใช้แบบจำลองที่สามารถแสดงส่วนโค้งได้นำมาประมาณค่าของผลตอบ ส่วนมากแบบจำลองกำลังสองจะมีรูปแบบดังนี้

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon$$

ตำแหน่งของจุดหยุดนิ่ง

สมมติว่าต้องการหาระดับของ  $x_1, x_2, \dots, x_k$  ที่จะทำให้ผลตอบมีค่าดีที่สุด ซึ่งจุดนี้ถ้ามี

อยู่จริงจะหมายถึงเซตของจุด  $x_1, x_2, \dots, x_k$  ที่มีค่าของอนุพันธ์แบบบางส่วน (Partial Derivative)

$$\partial \hat{y} / \partial X_1 = \partial \hat{y} / \partial X_2 = \dots = \partial \hat{y} / \partial X_k = 0$$

และจะเรียกจุดเหล่านี้ว่า  $x_{1,S}, x_{2,S}, \dots, x_{k,S}$  ว่าจุดหยุดนิ่ง (Stationary Point) จุดหยุดนิ่งนี้สามารถใช้ในการแทน

1. จุดที่มีค่าตอบสูงสุด
2. จุดที่มีค่าตอบต่ำสุด
3. จุดอานม้า (Saddle Point)

กราฟโครงร่าง (Contour Plot) มีความสำคัญมากในการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ การใช้ซอฟต์แวร์สำหรับสร้างกราฟโครงร่างของพื้นผิวผลตอบขึ้นมาจะทำให้ทราบถึงรูปร่างของพื้นผิว และตำแหน่งของจุดที่ดีที่สุดได้ค่อนข้างแม่นยำ ซึ่งเราอาจหาคำตอบทั่วไปทางคณิตศาสตร์สำหรับหาตำแหน่งของจุดหยุดนิ่ง (Stationary Point) ได้โดยการเขียนแบบจำลองกำลังสองในรูปเมทริกซ์ได้คือ

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + x'b + x'Bx$$

โดยที่

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_k \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \vdots \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad B = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_{11} & \hat{\beta}_{12}/2 & \dots & \hat{\beta}_{1k}/2 \\ & \hat{\beta}_{22} & \dots & \hat{\beta}_{2k}/2 \\ & & \ddots & \\ \text{sym.} & & & \hat{\beta}_{kk} \end{bmatrix}$$

$b$  คือเวกเตอร์ขนาด  $(k \times 1)$  ของสัมประสิทธิ์การถดถอยกำลังหนึ่ง

$B$  คือเมทริกซ์แบบสมมาตรขนาด  $(k \times k)$  มีส่วนประกอบในแนวเส้นทแยงมุมหลักเป็นสัมประสิทธิ์ของกำลังสองบริสุทธิ์ ( $\hat{\beta}_{ii}$ ) และ ส่วนประกอบที่ไม่ได้อยู่ในแนวเส้นทแยงมุมเป็นครึ่งหนึ่งของสัมประสิทธิ์กำลังสองผสม ( $\hat{\beta}_{jj}, i \neq j$ )

ค่าอนุพันธ์ของ  $\hat{y}$  เทียบกับส่วนประกอบของเวกเตอร์  $x$  มีค่าเท่ากับ 0 คือ

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial x} = b + 2Bx$$

จุดหยุดนิ่งคือคำตอบของสมการ

$$x_s = -\frac{1}{2}B^{-1}b$$

เมื่อแทนค่าในสมการ จะพบว่าค่าผลตอบที่คาดหวังที่จุดหยุดนิ่ง

$$\hat{y}_s = \hat{\beta}_0 + \frac{1}{2} \mathbf{x}_s' \mathbf{b}$$

#### 2.4.2 การออกแบบการทดลองสำหรับฟิตพื้นผิวผลตอบ

การฟิตและวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบจะทำได้ง่ายขึ้น ถ้าเราเลือกการออกแบบการทดลองที่เหมาะสม ลักษณะของการออกแบบที่ต้องการบางประการที่ควรพิจารณาคือ

1. ทำให้เกิดการแจกแจงหรือการกระจายที่เหมาะสมของจุดของข้อมูลตลอดบริเวณที่อยู่ในความสนใจ
2. ทำให้สามารถตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลอง และ Lack of Fit ได้
3. ทำให้การทดลองสามารถเกิดขึ้นได้ในบล็อก
4. ทำให้การออกแบบที่มีอันดับ (Order) สูงขึ้นสามารถสร้างขึ้นได้ตามลำดับ
5. ให้ค่าประมาณภายในของความผิดพลาด
6. ไม่ต้องรันการทดลองเป็นจำนวนมาก
7. ไม่ต้องมีหลายระดับของตัวแบบอิสระ
8. คำนวณพารามิเตอร์ในแบบจำลองได้ง่าย

บางครั้งคุณสมบัติเหล่านี้อาจขัดแย้งกันได้ จึงต้องมีการพิจารณาอย่างถี่ถ้วนก่อนที่จะเลือกแบบที่จะนำมาใช้งานการออกแบบสำหรับฟิตแบบจำลองอันดับที่สอง

#### 2.4.3 การออกแบบแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design)

การออกแบบ Central Composite เป็นการออกแบบที่มีความยืดหยุ่นมากในด้านความสามารถในการทำให้เกิดการบล็อก ถ้า  $k$  มีค่าใหญ่พอ ส่วนของแฟกทอเรียลของการออกแบบจะสามารถถูกแบ่งออกเป็น 2 บล็อกหรือมากกว่าได้ (จำนวนของบล็อกแฟกทอเรียลจะต้องมีค่าเป็นกำลังสองโดยที่ส่วนในแนวแกนจะทำให้เกิดบล็อกขึ้นหนึ่งบล็อก)

ในการการวิเคราะห์ความแปรปรวนเมื่อการออกแบบพื้นผิวตอบถูกรันในบล็อก ประการแรกเกี่ยวกับการใช้จุดศูนย์กลางเพื่อคำนวณตัวประมาณของค่าความผิดพลาดบริสุทธิ์เฉพาะจุดศูนย์กลางที่ถูกรันในบล็อกเดียวกันเท่านั้นที่สามารถถูกนำมาพิจารณาว่าเป็นเรพลิเคตได้ ดังนั้นพจน์ของค่าความผิดพลาดบริสุทธิ์จะถูกคำนวณได้ภายในบล็อกเท่านั้น ถ้าความแปรปรวนมีความอยู่กับร่องกับรอยตลอดทั้งบล็อกแล้ว ตัวประมาณค่าผิดพลาดบริสุทธิ์เหล่านี้จะสามารถถูกนำมารวมกลุ่ม (Pooled) กันได้ ประการที่สองเกี่ยวกับผลของบล็อก ถ้าการออกแบบมีการบล็อกอย่างแข็งตั้งฉากใน  $m$  บล็อกแล้ว ผลรวมกำลังสองสำหรับบล็อกจะมีค่าเท่ากับ

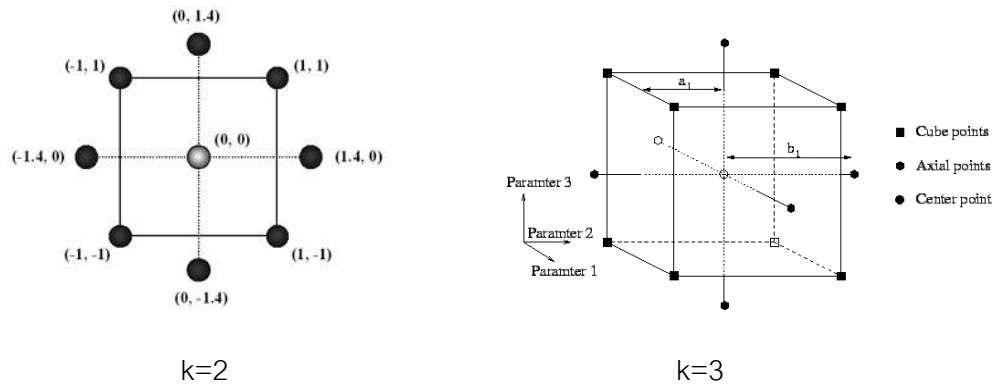
$$SS_{Blocks} = \sum_{b=1}^m \frac{B_b^2}{n_b} - \frac{G^2}{N}$$

โดยที่  $B_b$  คือ ผลรวมทั้งหมดของ  $n_b$  ค่าสังเกตในบล็อกที่  $b$  และ  $G$  คือค่าผลรวมทั้งหมดของ  $N$  ค่าสังเกตใน  $m$  บล็อกทั้งหมด เมื่อบล็อกไม่ได้เป็นแบบเชิงตั้งฉากตรงๆ แล้ว เราสามารถนำเอาการทดสอบความมีนัยสำคัญของการถดถอยแบบทั่วไปมาใช้ได้

การควบคุมผลการทดลองที่ดีนั้นจะต้องมีกระบวนการออกแบบการทดลองที่มีการควบคุมให้ได้ผลการทดลองที่ได้รับความน่าเชื่อถือที่สุด การพิจารณาค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของผลการทดลองที่ได้จากกระบวนการทดลองจึงเป็นสิ่งที่ต้องให้การควบคุมอย่างดี

การหาผลที่ดีที่สุด หลังจากทำการหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลตอบสนองแล้ว การหาจุดที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยนั้นๆ สามารถหาได้จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนอง ซึ่งอยู่ในรูปแบบคณิตศาสตร์ การวิเคราะห์หาจุดที่เหมาะสมที่สุดสามารถใช้หลักการของแผนภาพของผลตอบสนอง (Response surface plot) และโครงร่างของผลตอบสนอง (contour plot) หรือ ใช้หลักการหาโดยเทคนิคของการหาค่าเหมาะสมที่สุด (optimization)

โดยทั่วไป CCD จะประกอบด้วย  $2^k$  แฟคทอเรียลที่มี  $n_c$  รัน,  $2^k$  รันในแนวแกนหรือในแนวรูปดาว (Star) และ  $n_c$  รันที่จุดศูนย์กลาง การพัฒนาของ CCD ในทางปฏิบัติส่วนมากจะเกิดขึ้นจากการทดลองแบบเป็นอันดับ นั่นคือ การออกแบบ  $2^k$  ถูกนำมาใช้เพื่อพิตแบบจำลองอันดับที่หนึ่ง แล้วพบว่าแบบจำลองนี้ไม่เหมาะสมที่จะใช้ข้อมูลนี้ ดังนั้นจึงได้มีการรันการทดลองเพิ่มในแนวแกนเพื่อทำให้สามารถใส่พจน์ ควอดราติก ลงในแบบจำลองได้ CCD เป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพมากในการพิตแบบจำลองอันดับที่สอง มีพารามิเตอร์อยู่ 2 ตัวในการออกแบบที่จะต้องถูกกำหนด นั่นคือ ระยะทาง  $\alpha$  ของการรันในแนวแกนจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบ และจำนวนของจุดศูนย์กลาง  $n_c$



รูปที่ 2.7 การออกแบบส่วนประสมกลางสำหรับ  $k=2$  และ  $k=3$

ตารางที่ 2.1 ค่าของ code level ใน Central composite design (2 ปัจจัย)  $\alpha=1.414$

สิ่งทดลอง (Run no.)	Code level	
	ปัจจัย $x_1$	ปัจจัย $x_2$
1	+1	+1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	-1	+1
5	$+\alpha=+1.414$	0
6	0	$+\alpha=+1.414$
7	$-\alpha=-1.414$	0
8	0	$-\alpha=-1.414$
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0

ตารางที่ 2.2 ค่าของ code level ใน Central composite design (3 ปัจจัย)  $\alpha=1.682$ 

สิ่งทดลอง (Run no.)	Code level		
	ปัจจัย $x_1$	ปัจจัย $x_2$	ปัจจัย $x_3$
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	1
3	-1	1	-1
4	-1	1	1
5	1	-1	-1
6	1	-1	1
7	1	1	-1
8	1	1	1
9	$-\alpha = -1.682$	0	0
10	$+\alpha = +1.682$	0	0
11	0	$-\alpha = -1.682$	0
12	0	$+\alpha = +1.682$	0
13	0	0	$-\alpha = -1.682$
14	0	0	$+\alpha = +1.682$
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0
19	0	0	0
20	0	0	0

**ความสามารถในการหมุน**

เป็นความสำคัญอย่างหนึ่งของแบบจำลองอันดับที่สอง ที่จะต้องมีความสามารถในการพยากรณ์ได้ตลอดบริเวณที่สนใจอยู่ วิธีการหนึ่งที่จะบอกว่า แบบจำลองนี้ดีก็คือ แบบจำลองนี้จะต้องอยู่ภายในรูปแบบอย่างมีเหตุผลและมีความแปรปรวนที่มีเสถียรภาพของผลตอบแทนที่จุด  $x$  ซึ่งอยู่ในความสนใจ ความแปรปรวนของผลตอบที่ถูกพยากรณ์ที่บางจุด  $x$  คือ

$$V[\hat{y}(x)] = \sigma^2 x'(X'X)^{-1}x$$

ซึ่งถูกแนะนำว่า การออกแบบพื้นผิวผลตอบอันดับที่สองควรมีความสามารถในการหมุน (Rotatable) ซึ่งหมายความว่า  $V[\hat{y}(x)]$  คือจุด  $x$  ทุกจุดที่มีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบเท่ากัน นั่นคือค่าความแปรปรวนของผลตอบที่ถูกพยากรณ์จะมีค่าทรงตัวบนรูปทรงกลม

การออกแบบที่มีคุณสมบัติเช่นนี้จะทำให้ค่าความแปรปรวนของ  $\hat{y}$  ไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อการออกแบบถูกหมุนรอบจุดศูนย์กลาง (0, 0, ..., 0) ดังนั้นทำให้เราเรียกรูปแบบนี้ว่า การออกแบบที่สามารถหมุนได้ (Rotatable Design)

ความสามารถในการหมุนเป็นพื้นฐานเบื้องต้นสำหรับการเลือกการออกแบบพื้นผิวผลตอบเพราะว่าวัตถุประสงค์ของ RSM คือการหาค่าที่ดีที่สุด และเราไม่ถือว่าตำแหน่งใดเป็นตำแหน่งที่ดีที่สุดก่อนที่จะทำการทดลอง ดังนั้นจะมีเหตุผลที่ดีกว่าที่จะใช้การออกแบบที่ทำให้เกิดตัวประมาณที่มีความเที่ยงตรงเท่ากันในทุกทิศทาง

การออกแบบส่วนประสมกลาง สามารถทำให้หมุนได้โดยการเลือกค่าของ  $\alpha$  ค่าของ  $\alpha$  สำหรับความสามารถหมุนได้จะขึ้นอยู่กับจำนวนของจุดในส่วนของแฟกทอเรียลของการออกแบบความจริงแล้ว  $\alpha = (n_f)^{1/4}$  จะทำให้เกิดการออกแบบส่วนประสมกลาง ที่สามารถหมุนได้ โดยที่  $n_f$  คือจำนวนของจุดที่ถูกใช้ในส่วนแฟกทอเรียลของการออกแบบ

### CCD รูปทรงกลม

ความสามารถในการหมุนเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของรูปทรงกลม (Sphere) นั่นคือ จะเป็นการดีมากถ้าจะใช้เงื่อนไขในการออกแบบเช่นนี้เมื่อบริเวณที่เรากำลังสนใจอยู่มีรูปทรงกลม อย่างไรก็ตามการออกแบบที่ดีไม่จำเป็นว่าจะต้องทำให้เกิดความสามารถในการหมุนได้อย่างถูกต้องร้อยเปอร์เซ็นต์ ในความเป็นจริงแล้ว สำหรับบริเวณของทรงกลมที่เรากำลังสนใจนั้น ทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับ  $\alpha$  หาได้จากการพยากรณ์ความแปรปรวนสำหรับ CCD ซึ่งกำหนดให้  $\alpha = \sqrt{k}$  การออกแบบเช่นนี้เรียกว่า CCD รูปทรงกลม (Spherical CCD) ซึ่งจะกำหนดให้ทุกจุดที่อยู่ในการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล และการออกแบบในแนวแกน ให้อยู่บนพื้นผิวของรูปทรงกลมซึ่งมีรัศมี  $\sqrt{k}$

### จุดศูนย์กลางของการรันใน CCD

การเลือก  $\alpha$  ใน CCD จะถูกกำหนดโดยบริเวณที่เราสนใจ เมื่อบริเวณนี้เป็นรูปทรงกลม การออกแบบจะต้องรวมเอาจุดศูนย์กลางของการรันเข้าไว้ด้วย ทั้งนี้เพื่อที่จะทำให้ค่าความแปรปรวนของผลตอบที่พยากรณ์ได้มีเสถียรภาพอย่างที่เป็นที่ยอมรับได้



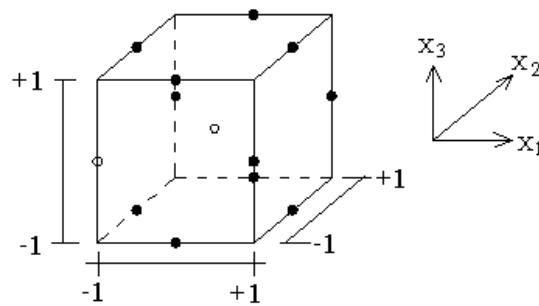
#### 2.4.4 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design)

การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) เป็นการออกแบบสามระดับสำหรับพิดพื้นผิวผลตอบ การออกแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบแฟกทอเรียล  $2^k$  กับการออกแบบบล็อกไม่บริบูรณ์ ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพมากในด้านจำนวนการรันที่ต้องการ และการออกแบบนี้ยังมีความสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้อีกด้วย

ตารางที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนที่มีตัวแปร 3 ตัว รูปทางเรขาคณิตของการออกแบบแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.6 สังเกตว่า การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนเป็นการออกแบบรูปทรงกลม ที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี  $\sqrt{2}$  และไม่มีการรวมเอาจุดใดๆที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากขีดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัวแปรเอาไว้ การกระทำเช่นนี้เป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อจุดที่อยู่บนมุมของลูกบาศก์ คือ การรวมของปัจจัยระดับ (Factor-Level Combination) ที่แพงมากหรือเป็นไปได้ที่จะทำการทดลองเนื่องจากข้อจำกัดในด้านกายภาพของกระบวนการ

ตารางที่ 2.3 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนแบบ 3 ตัวแปร

Run	x1	x2	x3
1	-1	-1	0
2	-1	1	0
3	1	-1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	1
7	1	0	-1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	-1	1
11	0	1	-1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0



รูปที่ 2.8 การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับ 3 ตัวแปร

## 2.5 หลักการทางสถิติสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล

### 2.5.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA)

สมการเบื้องต้นของการวิเคราะห์ความแปรปรวน คือ

**ความแปรผันทั้งหมด = ความแปรผันจากปัจจัย + ความแปรผันโดยธรรมชาติของข้อมูล**

สมการดังกล่าวได้มาจากข้อคิดที่ว่าความแตกต่างกันของข้อมูลอาจมีมาจากสาเหตุของความแปรผันโดยธรรมชาติของข้อมูล (หรือความผิดพลาดแบบสุ่ม) เพียงอย่างเดียว หรืออาจจะมากจากการที่ปัจจัยหนึ่งปัจจัยใดหรือหลาย ๆ ปัจจัยทำให้เกิดความแปรผัน ทำให้สามารถสร้างสมการได้ 4 ลักษณะ ดังนี้

1. ถ้าความแปรผันในข้อมูลนั้น เกิดขึ้นโดยธรรมชาติ จะได้สมการ

$$Y_i = \mu + \varepsilon_i$$

ค่า  $Y_i$  จะแตกต่างจากค่าเฉลี่ยของประชากร  $\mu$  ด้วยค่าความผิดพลาดแบบสุ่ม  $\varepsilon_i$

2. ถ้าจากการทดลองหรือการเก็บรวบรวมข้อมูล พบว่าความแปรผันของข้อมูลมาจากปัจจัยตัวหนึ่ง จะได้สมการ

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

ค่า  $Y_i$  จะแตกต่างจากค่าเฉลี่ยของประชากร  $\mu$  ด้วยความแปรผันจากปัจจัย  $T$  และค่าความผิดพลาดแบบสุ่ม  $\varepsilon_i$

3. ถ้าจากการทดลองพบว่า ความแปรผันของข้อมูลเกิดจากปัจจัย  $n$  ตัวที่ทำให้เกิดความแปรผันในข้อมูลจะได้สมการ

$$Y_{ijk} = \mu + T_j + N_k + \dots + \varepsilon_{ijk}$$

ถ้าความแปรผันของข้อมูล เนื่องมาจากปัจจัย 2 ปัจจัยและอิทธิพลร่วมกันของปัจจัยจะได้สมการ

$$Y_{ijk} = \mu + T_j + N_k + TN_{jk} + \varepsilon_{ijk}$$

สมการ Y เป็น รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของการทดลองซึ่งได้จากการจัดสรรความแปรผันออกเป็นส่วน ๆ ตามที่มาของแหล่งที่ทำให้เกิดความแปรผัน

จากรูปแบบของ Y การวิเคราะห์กระทำโดยการหาขนาดของความแปรผันของปัจจัยในรูปแบบของผลบวกกำลังสอง (Sum of Square) เทียบกับขนาดของความผิดพลาดแบบสุ่มในรูปแบบของผลบวกกำลังสอง เพื่อพิจารณาว่าขนาดของความแปรผันของปัจจัยนั้น ๆ มีนัยสำคัญทางสถิติที่ยอมรับว่าปัจจัยนั้น ๆ มีอิทธิพลที่ทำให้เกิดความแปรผันในข้อมูลจริง ๆ โดยใช้สถิติในการทดสอบคือ ตัวสถิติ F โดยที่

$$F = \frac{\text{ผลบวกกำลังสองของปัจจัย}}{\text{องศาความอิสระของปัจจัย}}$$

$$\frac{\text{ผลบวกกำลังสองของความผิดพลาดแบบสุ่ม}}{\text{องศาความอิสระของความผิดพลาดแบบสุ่ม}}$$

เปรียบเทียบกับค่า F ที่คำนวณได้กับค่า  $F_{\alpha, a, b}$  จากตารางการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบ F โดยที่

$\alpha$  = ระดับนัยสำคัญ

a = องศาความอิสระของปัจจัย

b = องศาความอิสระของความผิดพลาดแบบสุ่ม

ถ้า  $F > F_{\alpha, a, b}$  ยอมรับอิทธิพลของปัจจัย และถ้า  $F \leq F_{\alpha, a, b}$  ปฏิเสธอิทธิพลของปัจจัย

จากสมมติฐานที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากความเชื่อของบุคคลหรือกลุ่มบุคคลที่คาดหวังไว้ว่าจะเกิดขึ้น แต่จะเป็นจริงหรือไม่ก็ได้ สมมติฐานแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ

3.1 สมมติฐานหลัก (Null hypothesis) เพื่อเป็นข้อสมมติฐานที่เราสนใจ และต้องการพิสูจน์ว่าเป็นจริงหรือไม่ ใช้สัญลักษณ์  $H_0$

3.2 สมมติฐานแย้ง (Alternative hypothesis) เป็นความคิดที่หวังให้มีความแย้งกับสมมติฐานหลัก ใช้สัญลักษณ์  $H_1$

จากนั้นจึงพิจารณาถึงโอกาสที่จะปฏิเสธสมมติฐานหลักนั้นหมายถึงการยอมรับสมมติฐานอื่น ๆ ว่าเป็นจริง โดยดูที่ระดับนัยสำคัญ

### ความผิดพลาดในการตรวจสอบสมมติฐาน

1. ความผิดพลาดประเภทที่ 1 (Type I Error) หรือระดับนัยสำคัญ (Level of significance) ใช้สัญลักษณ์  $\alpha$  เป็นความผิดพลาดที่เกิดจากการปฏิเสธสมมติฐานหลักโดยที่สมมติฐานหลักเป็นจริง

2. ความผิดพลาดประเภทที่ 2 (Type II Error) เป็นความผิดพลาดที่เกิดจากการยอมรับสมมติฐานหลักโดยที่สมมติฐานอื่น ๆ เป็นจริง ใช้สัญลักษณ์  $\beta$

ในการทำการทดลองนั้น ผู้ทดลองต้องการให้เกิดความผิดพลาดให้น้อยที่สุด แต่ในความเป็นจริงแล้ว หาก  $\alpha$  น้อยลง ค่า  $\beta$  จะเพิ่มขึ้น ในการกลับกันหาก  $\beta$  น้อยลง ค่า  $\alpha$  จะเพิ่มขึ้นแทน ดังนั้นถ้าต้องการลดความผิดพลาดทั้งสองประเภทไปพร้อมๆกัน จะต้องทำการทดลองโดยการเพิ่มข้อมูลในการวิเคราะห์ให้มากขึ้น

หลังจากที่ได้มีการออกแบบและทดลองได้ผลออกมา เพื่อดูว่านัยสำคัญทางสถิติ หรือค่า P value เพื่อที่จะวิเคราะห์ว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลโดยดูจากความแตกต่างที่ออกมาในรูปของความแปรปรวนหรือความแปรผัน แล้วเปรียบเทียบกัน ความแตกต่างใดที่มีค่ามาก ก็แสดงว่าปัจจัยนั้นทำให้เกิดความแตกต่างหรือมีผล ความแปรผันทั้งหมดจะเกิดจากความแปรผันอันเนื่องมาจากปัจจัยและความแปรผันที่เกิดเองตามธรรมชาติของข้อมูล โดยใช้ลักษณะของการเปรียบเทียบดังนี้

ค่า P value น้อยกว่า ค่า  $\alpha$  แสดงว่าปัจจัยนั้นๆมีผลต่อตัวแปรตอบสนอง

ค่า P value มากกว่า ค่า  $\alpha$  แสดงว่าปัจจัยนั้นๆไม่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง

โดยที่กำหนดให้  $\alpha$  มีค่าเท่ากับ 0.05

หากปัจจัยหรือตัวแปรอิสระมีผลต่อตัวแปรตามแล้ว ในแต่ละระดับของตัวแปรอิสระ จะมีอิทธิพลต่อตัวแปรตามไม่เหมือนกัน ในการวิเคราะห์จึงมีการกำหนดค่าของตัวแปรอิสระที่ระดับต่างๆกัน แล้วนำมาวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นว่ามีนัยสำคัญหรือไม่เมื่อเทียบกับความแปรผันตามธรรมชาติของตัวแปรตาม โดยจะต้องมีการทดลองทำซ้ำในจำนวนที่มากพอเพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความน่าเชื่อถือ สำหรับการเลือกระดับของปัจจัยนั้น หากเป็นการเจาะจงเลือก จะสรุปผลได้เฉพาะอิทธิพลจากปัจจัยในระดับที่นำมาทดสอบ แต่ถ้าเป็นการเลือกแบบสุ่ม ก็สามารถสรุปเป็นอิทธิพลโดยรวมของปัจจัยได้ โดยใช้ผลต่อค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Mean square: MS) ซึ่งเป็นตัวที่ประมาณค่าความแปรปรวนได้ดีที่สุด ในการวัดค่าความแปรผันของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง สามารถคำนวณได้จาก

ในการพิจารณาความแปรปรวน สามารถแบ่งได้ตามแบบของการทดลองได้ดังนี้

1. การทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD)

แบ่งความแปรปรวนเป็นสองส่วนคือ ความแปรปรวนเนื่องจากการให้ทรีทเมนต์ต่างกัน และความแปรปรวนที่เกิดจากการทดลอง

## 2. การทดลองแบบบล็อกสุ่มสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design: RCB)

โดยแบ่งความแปรปรวนเป็น 2 ส่วนได้แก่ ความแปรปรวนเนื่องมาจากการให้ทรีทเมนต์ต่างกัน ความแปรปรวนอันเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง

## 3. การทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Experiment)

แบ่งความแปรปรวนเป็น 3 ส่วนได้แก่ ความแปรปรวนเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆ ความแปรปรวนเนื่องจากอิทธิพลร่วม และความแปรปรวนจากความคลาดเคลื่อนของการทดลอง

### 2.5.2 การค่า P (P value)

โดยทั่วไป เมื่อต้องการสรุปผลการทดสอบสมมติฐานนั้น สิ่งที่น่าสนใจ คือ สมมติฐานหลัก (Null hypothesis) จะถูกยอมรับหรือปฏิเสธ ถ้าถูกยอมรับ หมายถึง สมมติฐานเป็นจริง และถ้าถูกปฏิเสธ หมายถึง สมมติฐานนั้นไม่เป็นจริง จึงมีการกำหนดค่าระดับนัยสำคัญ เพื่อที่จะบอกยอมรับหรือปฏิเสธ Null hypothesis เราเรียกว่า Probability Value ( P-Value ) ค่า P - Value นี้จะอ้างอิงอยู่กับ  $\alpha$  โดยที่ P-Value คือค่าจริง(Actual)ของprobability ซึ่งได้จากการคำนวณ ส่วน  $\alpha$  คือเส้นกำหนดหรือจุดแบ่งระหว่างการยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานหลัก ซึ่งก็คือ Probability เหมือนกัน โดยจะยอมรับสมมติฐานหลัก ถ้า P-Value มากกว่า  $\alpha$  และปฏิเสธ ถ้า P-Value เท่า หรือน้อยกว่า

### 2.5.3 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน (Residual Analysis)

สำหรับการศึกษาอิทธิพลของปัจจัย 2 ปัจจัย และผลจากการทดสอบอิทธิพลร่วมพบว่าไม่มีอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัยนั้น จึงเขียนตัวแบบสถิติของ การทดลองนี้ซึ่งไม่มีอิทธิพลร่วม คือ

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ijk}$$

- เมื่อ
- $y_{ijk}$  คือ ค่าตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรตาม
  - $\mu$  คือ ค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นค่าคงที่
  - $\tau_i$  คือ ค่าที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของปัจจัย
  - $\varepsilon_{ijk}$  คือ ค่าที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของความผิดพลาดแบบสุ่ม

ก่อนที่จะสรุปผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ควรตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบสถิตินี้ ก่อน เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบก็คือการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน ขั้นตอนแรก

ของการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนคือ การคำนวณค่าประมาณของความคลาดเคลื่อนของตัวแบบการทดลองแฟคทอเรียลที่มี 2 ปัจจัย และ 2 ปัจจัยนั้นไม่มีอิทธิพลร่วมกันคือ

$$e_{ijk} = y_{ijk} - \hat{y}_{ijk}$$

$$\text{เมื่อ } \hat{y}_{ijk} = \bar{y}_{i..} + \bar{y}_{.j} - \bar{y}_{..}$$

## 2.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### วิชา วิชาภัย บุนนาค (2543)

งานวิจัยนี้มีการออกแบบการทดลองเพื่อแปรสภาวะในการบ่มสารเคลือบผิว โดยประยุกต์ใช้หลักการออกแบบเซ็นทรัลคอมโพสิทโรเตทาบิล (Central Composite Rotatable, CCR) และวิเคราะห์ผลโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) อิทธิพลของปัจจัยในการบ่มซึ่งได้แก่ อุณหภูมิการบ่ม ระยะเวลาในการบ่ม และปริมาณทรายที่ใช้เป็นสารเติมแต่งที่มีต่อสมบัติเชิงกล ผลการทดลองพบว่าผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งอีพอกซีเรซินที่บ่ม ณ อุณหภูมิห้อง (31°C) มีความสามารถในการรับแรงกระแทก (impact strength) และค่าความเหนียวเมื่อแตก (fracture toughness) สูง ในขณะที่ความสามารถในการรับแรงกด (compressive strength) จะต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการรับแรงกดของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่ง ที่บ่ม ณ อุณหภูมิสูง (99 °C) นอกจากนี้การเพิ่มเวลาในการบ่มจะช่วยให้คุณสมบัติในการรับแรงกดดีขึ้น ส่วนการใส่ทรายเพื่อเป็นสารเติมแต่งไม่ได้มีผลต่อการรับแรงกดมากนัก แต่ช่วยให้พลังงานการแตก (fracture energy) ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งอีพอกซีเรซินสูงขึ้นมาก แต่ขณะเดียวกันก็ทำให้สมบัติในการรับแรงกดและแรงกระแทกลดลงเล็กน้อย ซึ่งผลจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า แต่ละสภาวะจะมีสมบัติเชิงกลในการบ่มจะแตกต่างกันออกไป ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งอีพอกซีเรซินจะมีคุณสมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุดเมื่อบ่มที่ 31 °C นาน 56.2 ชั่วโมง และใส่ทราย 23-25% สมบัติเชิงกลที่ลดลงมากที่สุด ณ สภาวะการบ่มนี้ ได้แก่ ความสามารถในการรับแรงกด ซึ่งลดลง 24.2% อย่างไรก็ตาม แนวโน้มของความสามารถในการรับแรงกดจะเพิ่มขึ้นอีกเมื่อเพิ่มเวลาในการบ่มออกไป

### วรพงศ์ นาวารกุล (2546)

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดความแปรปรวนของน้ำหนักกระดาศเกรด 75 g/m<sup>2</sup> เปรียบเทียบก่อนทำการวิจัย พบน้ำหนักมาตรฐานของกระดาศคือ 1.98 g/m<sup>2</sup> และดัชนีสมรรถนะรวมของกระบวนการคือ 0.71 งานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากปัจจัย 2

ปัจจัย (Two Factor Analysis of Variance) ผลที่ได้พบว่าความแตกต่างของน้ำหนักรูมาตรฐานในแนวตามยาวเครื่องและในแนวตามขวางเครื่องอย่างมีนัยสำคัญ คือปัจจัยทางด้านแนวตามขวางเครื่องมีผลกระทบต่อน้ำหนักรูมาตรฐานมากกว่า และผลของอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยในแนวตามยาวและแนวตามขวางไม่มีผลต่อน้ำหนักรูมาตรฐาน

### ลัดดา เรียงเลิศ (2546)

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการพิมพ์สีในโรงงานผลิตพื้นยางนีโอไลท์ โดยมีการปรับแต่งค่าของเครื่องพิมพ์แบบคงที่ แล้วทดสอบปัจจัยที่สำคัญของเครื่องพิมพ์ที่คาดว่าจะมีผลต่อการปรับตั้งเครื่อง ผลการวิจัยหลังการปรับปรุงกระบวนการพิมพ์ทำให้เวลาที่ใช้ในการปรับแต่งกระบวนการลดลงจากเดิม 74.70 % สามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตเมื่อวัดจากปริมาณผลผลิตที่ได้หลังการปรับปรุง มีค่าเพิ่มมากขึ้น 74.08% และเกรด A ของผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้น 13.6%

### พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์และนพดล จิ่งทอง (2550)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรับปรุงขนาดของรูรีมเมอร์ (Reamer Hole) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร โดยพิจารณาปัจจัยที่สำคัญจำนวน 3 ปัจจัย คือ อัตราป้อนของดอกกรีมเมอร์ (Feed; m/min), ความเร็วรอบ (Speed; rpm) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนการคว้านรูเรียบ (Diameter before Reaming; mm) มีการกำหนดระดับเบื้องต้นของปัจจัยใช้วิธี OVAT (One Variable At the Time) และวิธีเชิงแฟคทอเรียล  $k$  ปัจจัยชนิดสองระดับ ( $2^k$  Factorial Design) แล้วปรับปรุงกระบวนการผลิตทั้งวิธีเชิงแฟคทอเรียลชนิดสองระดับ และวิธีสเตียพเตสเซนท์ (Steepest Descent) ในการทดลองครั้งแรกพบว่าให้ผลตอบสนองที่ดีขึ้นกับทุกชนิดของเหล็กและสารหล่อเย็น อย่างไรก็ตามผลการปรับปรุงด้วยกระบวนการในครั้งที่สองไม่พบการพัฒนาที่ดีขึ้น ค่าของผลตอบสนองที่ได้จากวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล  $2^k$  ครั้งที่สอง และวิธีสเตียพเตสเซนท์ยังไม่สามารถที่จะสรุปได้ว่าควรปรับระดับของปัจจัยทั้งสามปัจจัยที่เท่าใด

ในการใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล  $2^k$  เป็นแนวทางในการหาค่าผลตอบสนองที่ดีที่สุด ควรปรับระดับของปัจจัยให้มีค่าลดลงมาเพื่อให้ค่าผลตอบสนองอยู่ในช่วงที่ต้องการ การที่จะใช้วิธีสเตียพเตสเซนท์ เป็นแนวทางในการหาค่าผลตอบสนองที่ดีที่สุดนั้น ในการทดลองครั้งนี้ ไม่สัมฤทธิ์ผลซึ่งอาจเกิดจากหลายๆ สาเหตุ ดังนั้นจึงควรกำหนดค่า  $a$  ให้มีค่าน้อยลงในการกำหนดค่าจุดกึ่งกลางใหม่เพื่อให้ค่าผลตอบสนองอยู่ในช่วงที่ต้องการ

### อนุสิทธิ์ อ่ำไพบูลย์ (2550)

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยในกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมแกนฟลักซ์ (Flux – Cored Arc Welding, FCAW) โดยเริ่มต้นจากการกรองปัจจัย 6 ปัจจัย ได้แก่ กระแสไฟ แรงดันไฟเชื่อม ความเร็วเชื่อม ระยะโผล่ลวดเชื่อม มุมหัวเชื่อมและแก๊สคลุม โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^{6-2}$  Fractional Factorial Designs แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ เมื่อได้เฉพาะปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความต้านแรงดึงของตะเข็บเชื่อม จากนั้นจึงใช้การทดลองแบบ บ็อกซ์-เบนเคน (Box-Behnken) เพื่อวิเคราะห์หาผลตอบที่ดีที่สุด โดยนำชิ้นงานมาทำการเชื่อมทางตรงและทดสอบหาคุณภาพทางกล ด้วยการทดสอบค่าความต้านแรงดึง ผลการทดลองความต้านแรงดึงของตะเข็บเชื่อม ที่ระดับ  $\alpha = 0.05$  พบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรต่างๆ คือ กระแสไฟ เท่ากับ 250 แอมป์ แรงดันไฟเชื่อม เท่ากับ 32 โวลต์ ความเร็วในการเชื่อม เท่ากับ 22 นิ้วต่อนาที ระยะโผล่ลวดเชื่อม เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มุมหัวเชื่อม เท่ากับ 45.6 องศาและแก๊ส  $\text{CO}_2$  คลุมแนวเชื่อม เท่ากับ 20 ลิตรต่อนาที ซึ่งได้ค่าแรงดึงสูงสุด คือ 6400 kgf.

### วัลภา เตชะสุข (2552)

งานวิจัยนี้เลือกศึกษาเซมิคอนดักเตอร์ชนิดมีขา เนื่องจากพบปัญหาเส้นทองสัมผัสกันในกระบวนการขึ้นรูป โดยมีเกณฑ์มาตรฐานไว้ว่าจะต้องใกล้กันไม่เกิน 23 ไมครอน เบื้องต้นได้มีการประยุกต์ใช้แผนภูมิแกงปลาเพื่อคัดเลือกปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อปัญหา พบว่ามีอยู่ 3 ปัจจัยคือ เวลาฉีดเรซิน, เวลาในการให้ความร้อนแก่เรซินและแรงฉีด จากนั้นได้นำหลักการของการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) มาใช้ร่วมกับหลักการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) เพื่อหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยทั้ง 3 ที่มีผลให้เส้นทองที่อยู่ติดกันมีระยะห่างมากที่สุด ผลการทดลองพบว่า พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้เส้นทองอยู่ห่างกันมากที่สุด คือ ที่ เวลาฉีดเรซิน 13 วินาที เวลาให้ความร้อนแก่เรซิน 9 วินาที และแรงฉีดเรซิน 1.7 ตัน ซึ่งจะได้ค่าระยะห่างของเส้นทองเฉลี่ย 49.38 ไมครอน หลังจากการปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์แล้ว ไม่พบงานที่มีเส้นทองสัมผัสกัน หรือใกล้กันน้อยกว่า 23 ไมครอน

Somkiat T., Somchart., and Sirichan, T.

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนารูปแบบของการทำนายของ Surface roughness ใน CNC turning ใช้หลักการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองแบบของ Box-Behnken เพื่อจะหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการตัดที่ทำให้ผิวงานเรียบที่สุดในการตัด plain carbon steel โดยการศึกษา 3



ปัจจัยได้แก่ cutting speed, feed rate และ Depth of cut ผลจากการวิเคราะห์พบว่า cutting speed 350 m/min, feed rate 0.15 mm/rev และ Depth of cut 0.5 mm ได้ค่าของความเรียบผิวหลังการตัดที่ดีที่สุด

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 การออกแบบการทดลองและแบ่งส่วนงานวิจัย

เนื่องจากวัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ การลดสัดส่วนของเสียที่เกิดจากโพรงอากาศในกระบวนการขึ้นรูปไมโครชิป โดยพิจารณาที่ขนาดของโพรงอากาศ หากมีขนาดเกินกว่า 500 ไมครอนถือว่าเป็นของเสีย เริ่มจากการวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลต่อการทำให้เกิดโพรงอากาศ จากนั้นจึงใช้วิธีการออกแบบผลการทดลองเพื่อให้ได้มาซึ่งค่าของสภาวะในแต่ละตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ไม่เกิดโพรงอากาศหรือขนาดของโพรงอากาศต้องไม่เกิน 500 ไมครอน แล้วนำไปปรับใช้กับเครื่องจักรเพื่อติดตามผลในการผลิตว่าสามารถลดสัดส่วนของเสียที่เกิดจากโพรงอากาศได้มากน้อยเพียงใด

##### การแบ่งส่วนการวิจัย

1. การวิเคราะห์หาปัจจัยที่น่าจะมีอิทธิพลต่อการเกิดของเสียที่เกิดจากโพรงอากาศในกระบวนการขึ้นรูป โดยเกณฑ์ที่ยอมรับได้จะต้องมีขนาดไม่เกิน 500 ไมครอน
2. การออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดสภาวะที่เหมาะสม (Response Optimizer) และการศึกษาพื้นผิวผลตอบสนองของตัวแปร (Response Surface Methodology) โดยอาศัยการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design ที่ทำให้ไม่เกิดโพรงอากาศหรือมีขนาดโพรงอากาศรวมไม่เกิน 500 ไมครอน เพื่อลดสัดส่วนของเสียที่เกิดขึ้นให้มากที่สุด

#### 3.2 การเลือกปัจจัยและกำหนดระดับของปัจจัย

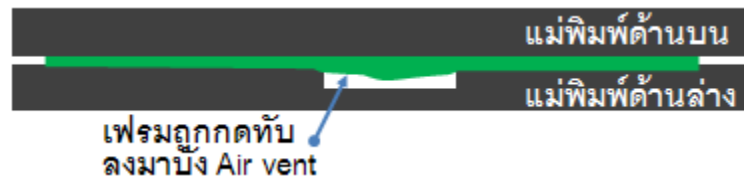
ในการเลือกปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลนั้นมีการประยุกต์ใช้แผนภูมิแกงปลาและทำการวิเคราะห์โดยผู้เชี่ยวชาญที่มีความรู้และประสบการณ์ทางเทคนิคของกระบวนการขึ้นรูปไมโครชิปพิจารณาจาก 5 ปัจจัยหลัก ซึ่งได้แก่

- 1) ปัจจัยเนื่องจากคน (Man)
- 2) ปัจจัยเนื่องจากเครื่องจักร (Machine)
- 3) ปัจจัยเนื่องจากวัตถุดิบ (Material)
- 4) ปัจจัยเนื่องจากวิธีการ (Method)
- 5) ปัจจัยเนื่องจากสภาพแวดล้อม (Environment)

รายละเอียดของการคัดเลือกปัจจัยได้แสดงเอาไว้ในส่วนของ การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาในบทที่ 1 จากผลการวิเคราะห์พบ 4 ปัจจัยที่น่าจะเป็นสาเหตุและมีอิทธิพลต่อของเสียที่เกิด

จากเกิดโพรงอากาศ ซึ่งมีทำให้ขนาดรวมของโพรงอากาศเกินกว่า 500 ไมครอน ดังนี้

### 3.2.1 แรงอัดของแม่พิมพ์ (Clamp pressure)



รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของเฟรมที่ถูกกดทับลงมาบัง Air vent

แรงอัดของแม่พิมพ์มีผลต่อการกดทับลีดเฟรมซึ่งมีความหนาประมาณ 300 ไมครอน วางอยู่ระหว่างแม่พิมพ์ด้านล่างและด้านบน แรงกดทับที่มากเกินไปอาจมีผลทำให้ลีดเฟรมเกิดการย่นหรืองอไปปิดบัง Air vent ซึ่งเป็นช่องทางให้อากาศไหลออกจากแม่พิมพ์ จนทำให้อากาศที่อยู่ภายในแม่พิมพ์และเรซินระบายออกมาได้ยากขึ้นและหลงเหลือเป็นโพรงอากาศ แต่หากแรงกดที่น้อยไปก็อาจทำให้เรซินเกิดการรั่วไหลในขณะที่ฉีดได้ ซึ่งได้มีการทดสอบเบื้องต้น โดยดูที่ระยะการรั่วไหลของเรซินจะต้องมีระยะไม่เกินขอบเขตที่กำหนดไว้ ผลการทดสอบเบื้องต้นสามารถกำหนดช่วงของแรงอัดของแม่พิมพ์ในการทดลองได้ดังนี้

- ระดับต่ำ กำหนดแรงอัดของแม่พิมพ์ 280 Mpa
- ระดับสูง กำหนดแรงอัดของแม่พิมพ์ 300 Mpa

### 3.2.2 แรงฉีด (Injection Force)

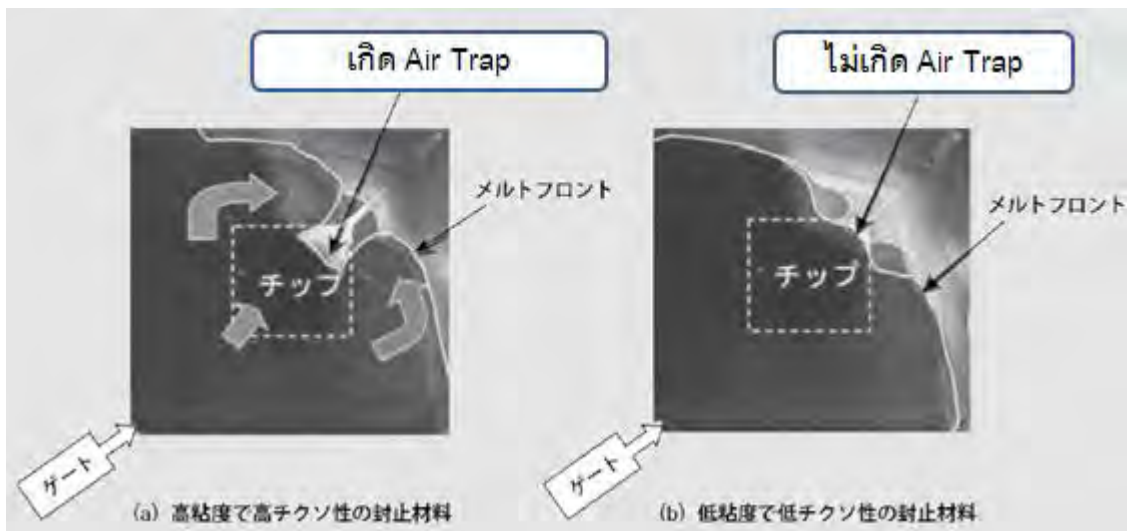
แรงฉีดนั้นมีผลต่อการกดอัดฟองอากาศที่มีอยู่ภายในแม่พิมพ์หรือเรซินให้แตกออก และแพร่กระจายหรือไหลออกไปจากแม่พิมพ์ได้ง่ายขึ้น แต่ถ้าแรงฉีดมากเกินไปก็อาจจะทำให้เกิดการรั่วไหลของเรซินออกมาภายนอกแม่พิมพ์ ซึ่งจะส่งผลเสียต่อกระบวนการถัดไป ยิ่งไปกว่านั้น แรงฉีดที่มากจะทำให้แรงที่เกิดจากการไหลของมวลเรซินไปปะทะกับเส้นลวดทองคำมีค่ามากขึ้น ซึ่งอาจทำให้เส้นลวดทองคำสัมผัสกัน ซึ่งจะทำให้เกิดการลัดวงจร เป็นของเสียที่อยู่ในชั้นรุนแรง จึงมีการทดสอบเบื้องต้น โดยดูที่ระยะการรั่วไหลของเรซินจะต้องมีระยะไม่เกินขอบเขตที่กำหนดไว้ และตรวจสอบระยะห่างของเส้นลวดทองคำจะต้องมากกว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดทองคำชนิดนั้นๆ ผลการทดสอบเบื้องต้นสามารถกำหนดช่วงของแรงที่ใช้ในการฉีดเรซินเข้าไปในแม่พิมพ์ ดังนี้

- ระดับต่ำ กำหนดแรงที่ใช้ในการฉีดเรซินเข้าไปในแม่พิมพ์ 6 kN
- ระดับสูง กำหนดแรงฉีดที่ใช้ในการฉีดเรซินเข้าไปในแม่พิมพ์ 10 kN

### 3.2.3 ระยะเวลาในการฉีดเรซิน (Injection time)

คือระยะเวลาที่ใช้ในการฉีดเรซินเข้าไปในแม่พิมพ์ ตั้งแต่แกนฉีดเริ่มเคลื่อนที่จนกระทั่งฉีดสุดหรือเมื่อเริ่มนับเวลาของการอบ เวลาในการฉีดมีผลต่อการเกิดโพรงอากาศ เนื่องจากระยะเวลา

ในการฉีดมีผลต่อความหนืด ระยะเวลาการฉีดที่มากหรือน้อยเกินไปจะทำให้ความหนืดแต่ละช่วงไม่เท่ากันซึ่งอาจไม่อยู่ในช่วงที่เหมาะสม พิจารณาในรูปที่ 3.2 ในส่วน (a) ความหนืดสูงมีผลต่อความเร็วของเรซินที่ไหลเข้าไปในบริเวณต่างๆของแม่พิมพ์ ทำให้การไหลของเรซินบริเวณกลางชิปช้าลง ในขณะที่เรซินรอบๆชิปจะไหลเร็วขึ้น ซึ่งเมื่อเรซินไหลมารวมตัวกับเรซินที่ดันตัวขึ้นมาจากด้านล่างของชิป ก็จะทำให้เกิดเป็น Air Trap ขนาดใหญ่ ซึ่งการเกิด Air Trap ขนาดใหญ่เช่นนี้เป็นปัจจัยสำคัญที่จะทำให้หลงเหลือรูหรือโพรงอากาศที่เรียกว่า Weld Void ในเนื้อเรซิน แต่จะไม่พบ Air trap เมื่อเรซินมีความหนืดต่ำ แสดงในส่วนของ (b)

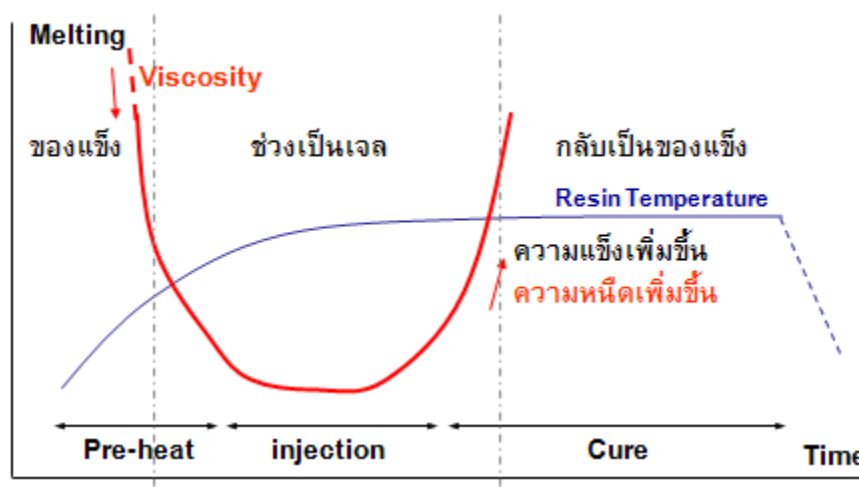


รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะของการเกิด Air trap เมื่อเรซินมีความหนืดสูง (Yoshii M., Mizukami Y. and Shoji H., Evaluation Technologies on Moldability of Epoxy molding Compounds for Encapsulation of Semiconductor.)

นอกจากนี้ระยะเวลาของการฉีดที่เร็วเกินไปจะมีผลต่อการเคลื่อนที่ของมวลเรซินเข้าไปปะทะกับเส้นลวดทองคำให้เคลื่อนที่มาใกล้กันหรือสัมผัสกันแล้วทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้นได้ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบเบื้องต้น โดยดูที่ระยะการรั่วไหลของเรซินจะต้องมีระยะไม่เกินขอบเขตที่กำหนดไว้ และตรวจสอบระยะห่างของเส้นลวดทองคำจะต้องมากกว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดทองคำชนิดนั้นๆ ผลการทดสอบเบื้องต้นสามารถกำหนดช่วงของระยะเวลาในการฉีดเรซินที่ใช้ในการทดลองไว้ดังนี้

- ระดับต่ำ กำหนดระยะเวลาในการฉีดเรซิน 8 วินาที
- ระดับสูง กำหนดระยะเวลาในการฉีดเรซิน 12 วินาที

### 3.2.4 ระยะเวลาในการอุ่นเรซิน (Tablet pre-heat time)



รูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับเวลา

ระยะเวลาในการอุ่นเรซิน คือ ระยะเวลาที่ทำให้ความร้อนกับเรซินซึ่งมีลักษณะเป็นผงอัดเม็ดให้หลอมเหลวมีสถานะเหมาะสมก่อนที่จะถูกฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาในการฉีดเรซิน (Injection time) ช่วงที่เหมาะสมในการฉีดเรซินคือช่วงที่เรซินมีสถานะเป็นเจล มีค่าเท่ากับ 35 วินาที ดังนั้นช่วงเวลาอุ่นเรซินรวมกับระยะเวลาที่ใช้ฉีดจะต้องไม่เกิน 35 วินาที ซึ่งโดยทั่วไปจะต้องการตั้งค่าให้เร็วที่สุดที่จะทำได้โดยไม่มีผลกระทบทางด้านคุณภาพเพื่อเพิ่มความสามารถในการผลิต สถานะของเรซินสามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วงดังนี้

ช่วงแรก คือช่วงที่เรซินมีลักษณะเป็นผงอัดเม็ด มีสถานะเป็นของแข็งซึ่งเมื่อโดนความร้อน ความแข็งแรงของเรซินก็จะค่อยๆลดลง

ช่วงที่สอง คือช่วงที่เรซินเป็นเจลสูงสุด ช่วงนี้ถือว่าเป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดที่จะฉีดเรซินเข้าไปยังแม่พิมพ์

ช่วงที่สาม คือช่วงที่เรซินจะค่อยๆเปลี่ยนสถานะจากการเป็นเจลกลับมาเป็นของแข็ง

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบเบื้องต้น โดยดูที่ระยะการรั่วไหลของเรซินจะต้องมีระยะไม่เกินขอบเขตที่กำหนดไว้ ผลการทดสอบเบื้องต้นสามารถกำหนดช่วงของระยะเวลาในการอุ่นเรซิน ที่ใช้ในการทดลองไว้ดังนี้

- ระดับต่ำ กำหนดระยะเวลาในการอุ่นเรซิน 9 วินาที
- ระดับสูง กำหนดระยะเวลาในการอุ่นเรซิน 13 วินาที

ดังนั้นสามารถสรุปปัจจัยและระดับของปัจจัยเบื้องต้นได้ตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ระดับต่ำ (-1)	ระดับสูง (+1)	หน่วย
แรงอัดของแม่พิมพ์	A	280	300	Mpa
แรงฉีก	B	6	10	kN
ระยะเวลาในการฉีดเรซิน	C	8	12	วินาที
ระยะเวลาในการอุ่นเรซิน	D	9	13	วินาที

### 3.3 เทคนิควิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) และค่าตอบสนอง

ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดโพรงอากาศ จากฝั่งก้างปลา ซึ่งได้รวบรวมความคิดเห็นจากผู้ที่มีประสบการณ์ในกระบวนการขึ้นรูปไมโครชิปมานานกว่า 15 ปี พบปัจจัยที่น่าจะเกี่ยวข้องกับการเกิดโพรงอากาศจำนวน 4 ปัจจัย ซึ่งทุกปัจจัยไม่สามารถละเลยได้ในทางปฏิบัติ เนื่องจากมีผลกระทบต่ออาการเกิดของเสียในลักษณะอื่นๆ ส่วนปัจจัยอื่นๆที่น่าจะมีผลต่อการเกิดโพรงอากาศนั้นคืออุณหภูมิของแม่พิมพ์ แต่เนื่องจากแม่พิมพ์ถูกออกแบบมาให้ใช้ได้กับอุณหภูมิที่ค่อนข้างเฉพาะ เพื่อให้สอดคล้องกับการเลือกใช้ซิลิโคนเฟรมและเรซิน เนื่องจากการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิจะมีผลต่อการขยายตัวของเฟรมรวมถึงคุณสมบัติการหลอมเหลวของเรซิน ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถควบคุมการเกิดของเสียในลักษณะอื่นๆและมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตในกระบวนการถัดไป ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการพิตค่าของอุณหภูมิไว้ให้คงที่ จากการที่มีปัจจัยเกี่ยวข้องเพียง 4 ปัจจัยอีกทั้งยังเป็นการประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูง ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้หลักการออกแบบโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบ Box-Behnken Design และกำหนด Center Point = 3 เพื่อวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองระหว่างตัวแปรกับค่าตอบสนอง และหาระดับที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย เพื่อให้ได้ขนาดของโพรงอากาศรวมน้อยที่สุด โดยที่ในการทดลองจะมีทั้งหมด 27 วัน และกำหนดให้ทำการทดลองซ้ำ (Replicate) เพิ่มอีก 1 ทดลอง ทำให้มีจำนวนวันทั้งหมด 54 วัน การทดลองครั้งนี้จัดลำดับการทดลองเป็นแบบสุ่มเพื่อลดอคติของการทดลอง โดยกำหนดระดับของปัจจัยต่างๆได้ตามตารางที่ 3.2 จากนั้นจึงนำไปออกแบบตามแบบการทดลองของ Box-Behnken ซึ่งแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 แสดงระดับของปัจจัยที่ใช้ศึกษาพื้นผิวตอบสนอง

พารามิเตอร์	ระดับ			หน่วย
	Low (-1)	Medium (0)	High (+)	
แรงอัดของแม่พิมพ์ (Clamp pressure)	280	290	300	Mpa
แรงฉีด (Injection Force)	6	8	10	kN
ระยะเวลาในการฉีดเรซิน (Injection time)	8	10	12	วินาที
ระยะเวลาในการอุ่นเรซิน (Tablet pre-heat time)	9	11	13	วินาที

ตารางที่ 3.3 การออกแบบ Box-Behnken Design ที่มี 3 center point

Run order	Parameter			
	A	B	C	D
1	-	-	0	0
2	+	-	0	0
3	-	+	0	0
4	+	+	0	0
5	0	0	-	-
6	0	0	+	-
7	0	0	-	+
8	0	0	+	+
9	-	0	-	0
10	+	0	-	0
11	-	0	+	0
12	+	0	+	0
13	0	-	0	-
14	0	+	0	-
15	0	-	0	+
16	0	+	0	+
17	-	0	0	-
18	+	0	0	-

ตารางที่ 3.3 การออกแบบ Box-Behnken Design ที่มี 3 center point (ต่อ)

Run order	Parameter			
	A	B	C	D
19	-	0	0	+
20	+	0	0	+
21	0	-	-	0
22	0	+	-	0
23	0	-	+	0
24	0	+	+	0
25	0	0	0	0
26	0	0	0	0
27	0	0	0	0

### คำตอบสนอง

คำตอบสนองที่ใช้จะมีความสัมพันธ์กับเกณฑ์การวัดคุณภาพของงาน โดยพิจารณาจากขนาดของโพรงอากาศรวม หากมีขนาดเกิน 500 ไมครอน ถือเป็นของเสีย ดังนั้นจึงใช้ขนาดของโพรงอากาศที่เกิดขึ้นในแต่ละสภาวะการรันงานเป็นคำตอบสนองของกระบวนการ ซึ่งในท้ายที่สุดเราจะใช้คำตอบสนองนี้เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจว่าเป็นงานดีหรืองานเสีย แล้วคิดเทียบเป็นสัดส่วนของของเสียออกมาในกระบวนการผลิตจริงต่อไป

### 3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องขึ้นรูปไมโครชิป (Molding Machine) เป็นเครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูปไมโครชิป ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆคือ

- 1.1 ส่วนเตรียมและส่งงานให้กับชุดแม่พิมพ์ขึ้นรูป
- 1.2 ส่วนของแม่พิมพ์และชุดส่งกำลังสำหรับฉีดเรซิน
- 1.3 ส่วนที่รับงานที่ขึ้นรูปเสร็จแล้ว

นอกจากนี้ยังมีส่วนของซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการควบคุมระบบต่างๆของเครื่องจักรรวมทั้งพารามิเตอร์ที่สำคัญของเครื่อง

2. กล้องสเตอริโอสโคป (Stereo scope) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจคุณลักษณะกายภาพด้วยสายตา ใช้สำหรับตรวจดูผิวของงาน ตามมาตรฐานการทำงานกำหนดให้ใช้กำลังขยายที่ 20 เท่า



3. กล้องเมเซอริงสโคป (Measuring scope) เป็นกล้องที่ใช้ตรวจสอบสภาพทั่วไปและวัดขนาดโพรงอากาศ

4. เครื่อง SAT คือเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบโพรงอากาศภายในไมโครชิป

5. เครื่องเอ็กซเรย์ (X-ray) คือเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบระยะห่างของเส้นลวดทองคำ

### 3.5 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

1. เตรียมงานที่ผ่านกระบวนการก่อนหน้า ซึ่งมีการวางชิปและเชื่อมด้วยเส้นลวดทองคำ แล้วตามจำนวนการทดลอง

2. ตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ถูกกำหนดให้ปัดค่าไว้ตามตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ถูกกำหนดให้คงที่

ปัจจัย	หน่วย	ค่าพารามิเตอร์
ระยะเวลาของการอบเรซินหลังฉีดขึ้นรูป (Cure time)	วินาที	100
ตำแหน่งเริ่มต้นแกนฉีด (Tablet position)	mm	25
อุณหภูมิของแม่พิมพ์ (Die temperature)	วินาที	175
อุณหภูมิในการอุ่นลีดเฟรมก่อนขึ้นรูป (Frame pre-heat temperature)	องศา เซลเซียส	80
เวลาในการอุ่นลีดเฟรมก่อนขึ้นรูป (Frame pre-heat temperature)	วินาที	30

3. ตั้งค่าพารามิเตอร์ที่จะทำการทดลองได้แก่ แรงอัดของแม่พิมพ์ (Clamp pressure), แรงฉีด (Injection Force), ระยะเวลาในการฉีดเรซิน (Injection time) และระยะเวลาในการอุ่นเรซิน (Tablet preheat time) ตามตารางที่ 3.2 โดยเรียงลำดับทดลองการออกแบบ Box-Behnken Design ตามตารางที่ 3.3

4. ทำการผลิตงานโดยใช้พารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.2 โดยเรียงลำดับทดลองการออกแบบ Box-Behnken Design ตามตารางที่ 3.3 จนครบทุกทดลอง

5. นำชิ้นงานออกจากเครื่องขึ้นรูป

6. ตรวจสอบงานด้วยกล้องสเตอริโอสโคป (Stereo scope) และกระบวนการ SAT เพื่อวัดขนาดรวมของโพรงอากาศ แล้วบันทึกค่าในตารางแสดงผลการทดลอง

### 3.6 การตรวจสอบคุณภาพของงาน

1. ตรวจสอบคุณภาพของผิวงานด้วยกล้องสเตอริโอโคป โดยผิวงานจะต้องเรียบ ไม่บิ่นหรือแตกหัก ไม่มีโพรงอากาศ สิ่งแปลกปลอมหรือคราบสกปรกติดอยู่บนผิวงาน รวมทั้งจะต้องไม่มีร่องรอยของเรซินที่ไหลออกมาเกินกว่าตัวงาน

2. ตรวจสอบและบันทึกค่าขนาดรวมของโพรงอากาศ

ตรวจสอบโพรงอากาศภายในไมโครชิป (Internal void) โดยเครื่อง SAT แล้วเปรียบเทียบค่าของโพรงอากาศ แล้วบันทึกค่าในตารางแสดงผลการทดลอง

3. ตรวจสอบคุณภาพของเส้นลวดทองคำ โดยใช้เครื่อง X-ray

### 3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล

ในการวิเคราะห์ข้อมูล จะใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล โดยที่ จะต้องสามารถวิเคราะห์ข้อมูลแบบการทดลองโดยวิธีพินิจผลตอบได้ ในการพิจารณาค่า P-value ที่ได้จากการทดลองในการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดโพรงอากาศในกระบวนการขึ้นรูป ผู้วิจัยได้กำหนดระดับความเชื่อมั่น 95% โดยที่ถ้าค่า P น้อยกว่า 0.05 แสดงว่า ปัจจัยนั้นมีผลกระทบต่อ การเกิดโพรงอากาศ แต่ถ้าค่า P มากกว่า 0.05 แสดงว่า ปัจจัยนั้นๆไม่มีผลกระทบต่อ การเกิดโพรงอากาศ นอกจากนี้ยังมีการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างตัวอย่าง 2 กลุ่ม เพื่อตรวจสอบว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากการทดลองกับข้อมูลที่ได้จากสมการมีความแตกต่างกันหรือไม่ เพื่อความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่มากขึ้น

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 ผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์ถึงปัจจัยทั้ง 4 ที่น่าจะมีอิทธิพลต่อการเกิดโพรงอากาศตลอดจนข้อจำกัดของปัจจัยต่างๆ ทำให้ได้มาซึ่งระดับของปัจจัย จากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม (Response Optimizer) และการศึกษาพื้นผิวผลตอบสนองของตัวแปร (Response Surface Methodology) โดยวิธีทดลองแบบ Box-Behnken ทำให้ได้แบบจำลองของการทดลองออกมา ซึ่งในหนึ่งทดลองจะมีจำนวน 27 รัน และได้กำหนดให้มีการทำซ้ำ 1 Replicate เนื่องจากการทำการทดลองในแต่ละวันจะมีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างแพง ทำให้มีจำนวนรันทั้งหมดทั้งหมด 54 รัน ผลที่ได้จากการทดลองในแต่ละทดลองคือค่าขนาดรวมของโพรงอากาศ โดยที่ Y1 คือค่าขนาดรวมของโพรงอากาศจากการทดลองในครั้งที่ 1 ส่วน Y2 คือค่าขนาดรวมของโพรงอากาศจากการทดลองในครั้งที่ 2 แสดงดังตารางที่ 4.1 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงผลของขนาดรวมของโพรงอากาศ

Run order	Parameter				Void Size	
	A	B	C	D	Y1	Y2
10, 27	280	6	10	11	529	515
12, 54	300	6	10	11	357	374
13, 34	280	10	10	11	301	329
1, 15	300	10	10	11	553	520
29, 41	290	8	8	9	440	414
6, 49	290	8	12	9	516	525
45, 50	290	8	8	13	406	413
14, 43	290	8	12	13	294	325
19, 30	280	8	8	11	381	374
35, 42	300	8	8	11	397	428
16, 37	280	8	12	11	371	353
4, 7	300	8	12	11	388	405
23, 46	290	6	10	9	444	453

ตารางที่ 4.1 แสดงผลของขนาดรวมของโพรงอากาศ (ต่อ)

Run order	Parameter				Void Size	
	A	B	C	D	Y1	Y2
40, 51	290	10	10	9	541	505
20, 47	290	6	10	13	456	422
17, 18	290	10	10	13	309	331
36, 39	280	8	10	9	333	348
5, 26	300	8	10	9	521	535
22, 38	280	8	10	13	424	387
32, 52	300	8	10	13	262	273
3, 8	290	6	8	11	496	481
9, 48	290	10	8	11	412	431
31, 53	290	6	12	11	418	413
11, 28	290	10	12	11	448	420
25, 44	290	8	10	11	484	442
2, 33	290	8	10	11	468	431
21, 24	290	8	10	11	452	433

#### 4.2 การวิเคราะห์และการสรุปผลการทดลองเบื้องต้น

ผลการทดลองที่ได้จากตารางที่ 4.1 จะนำมาเข้าสู่กระบวนการของการเลือกสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้หาจุดเหมาะสมของค่าตอบสนอง ซึ่งจะใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติเชิงวิศวกรรม ในการเลือกรูปแบบสมการจากผลการวิเคราะห์ จะพิจารณาจากค่าความมีนัยสำคัญของสมการถดถอย (Regression), ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ  $R^2$ , ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ  $R^2_{adj}$  และ ค่า Lack-of-Fit เป็นตัวบอกความเพียงพอของตัวแปรในสมการ

#### 4.3 พิจารณารูปแบบของสมการถดถอยและผลการวิเคราะห์ค่า P Value

ในการพิจารณาสมการถดถอยจะใช้รูปแบบสมการพหุคูณควอดราติกในการวิเคราะห์ ซึ่งสามารถพิจารณาภาพรวมของสมการได้ทุกเงื่อนไข แสดงดังตารางที่ 4.2 และ 4.3

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในสมการแบบพหุคูณควอดราติก (Full Quadratic)

Term	Coef	P
Constant	451.667	0.000
A	15.333	0.000
B	-10.750	0.004
C	-8.208	0.025
D	-53.042	0.000
A*A	-38.271	0.000
B*B	11.729	0.033
C*C	-20.083	0.001
D*D	-24.583	0.000
A*B	94.500	0.000
A*C	-0.125	0.984
A*D	-81.375	0.000
B*C	21.375	0.001
B*D	-48.375	0.000
C*D	-48.375	0.000

เมื่อพิจารณาผลของการวิเคราะห์สมการในเทอมพหุคูณควอดราติก (Full Quadratic) ในตารางที่ 4.2 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% คือ ค่า P น้อยกว่า 0.05 แสดงว่า ปัจจัยนั้นมีผลกระทบต่อ การเกิดโพรงอากาศ ซึ่งประกอบไปด้วย 4 ปัจจัยหลักได้แก่

1. แรงอัดของแม่พิมพ์ (Clamp pressure: A)
2. แรงฉีด (Injection force: B)
3. ระยะเวลาในการฉีด (Injection time: C)
4. ระยะเวลาในการอุ่นเรซิน (Tablet pre-heat time: D)

อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยมีผลต่อการเกิดโพรงอากาศได้แก่

1. อันตรกิริยาระหว่างแรงอัดของแม่พิมพ์กับแรงอัดของแม่พิมพ์
2. อันตรกิริยาระหว่างแรงฉีดเรซินกับแรงฉีดเรซิน
3. อันตรกิริยาระหว่างเวลาในการฉีดเรซินกับเวลาในการฉีดเรซิน
4. อันตรกิริยาระหว่างเวลาในการอุ่นเรซินกับเวลาในการอุ่นเรซิน

5. อันตรกิริยาระหว่างแรงอัดของแม่พิมพ์กับแรงฉีดเรซิน
6. อันตรกิริยาระหว่างแรงอัดของแม่พิมพ์กับระยะเวลาในการอุ่นเรซิน
7. อันตรกิริยาระหว่างแรงฉีดเรซินกับระยะเวลาในการฉีดเรซิน
8. อันตรกิริยาระหว่างแรงฉีดเรซินกับระยะเวลาในการอุ่นเรซิน
9. อันตรกิริยาระหว่างเวลาในการฉีดเรซินกับระยะเวลาในการอุ่นเรซิน

ส่วนอันตรกิริยาระหว่างแรงอัดของแม่พิมพ์กับระยะเวลาในการฉีดเรซิน ( $A^*C$ ) ไม่มีอิทธิพลพอที่จะสรุปว่าเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลหรือมีผลกระทบต่ออาการเกิดโพรงอากาศ เนื่องจากค่า P-value ที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่ามากกว่า 0.05

ตารางที่ 4.3 แสดงการวิเคราะห์สมการถดถอย

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F	P
Regression	14	271307	19379.1	64.85	0.000
Linear	4	77555	19388.8	78.69	0.000
Square	4	2298.4	7059.2	23.62	0.000
Interaction	6	165515	27585.8	92.31	0.000
Residual Error	39	11654	298.8		
Lack-of-Fit	10	3437	343.7	1.21	0.324
Pure Error	29	8217	283.3		
Total	53	282961			

สมการในเทอมพูลควอดรติก (Full Quadratic) ในตารางที่ 4.3 ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ  $R^2$ , ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ  $R^2_{adj}$  ถือเป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ค่อนข้างน่าพอใจ สำหรับค่า P-Value ของ Regression มีค่าน้อยมาก จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก ( $P\text{-Value} < \alpha$ ) ในการพิจารณาความสมบูรณ์ของสมการ (Lack-of-fit) มีค่าเท่ากับ 0.324 ซึ่งมากกว่า  $\alpha$  ทำให้สรุปได้ว่าเทอมของพูลควอดรติก (Full Quadratic) มีความพอเพียง

จากผลการวิเคราะห์สมการในเทอมของพูลควอดรติก (Full Quadratic) ซึ่งพิจารณาจากค่าของ  $R^2$ ,  $R^2$  (adj), P-Value ของ Regression และ P-Value ของ Lack-of-Fit พบว่าได้ค่าอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ในเทอมของพูลควอดรติก (Full Quadratic) มาใช้ในการพยากรณ์หาขนาดของโพรงอากาศรวมที่น้อยที่สุดที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  ซึ่งผลจากการที่ได้มาจากการวิเคราะห์ค่า P-value ในตารางที่ 4.2 และ 4.3 ทำให้สามารถสรุปความสัมพันธ์ของปัจจัยและอันตรกิริยาที่มีผลต่อการเกิดโพรงอากาศได้ตามตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดโพรงอากาศ (Unicode Unit)

Factor	Coef
Constant	-36863.6
A	230.523
B	-1342.95
C	188.406
D	1506.31
A*A	-0.382708
B*B	2.93229
C*C	-5.02083
D*D	-6.14583
A*B	4.725
A*C	-
A*D	-4.06875
B*C	5.34375
B*D	-12.0937
C*D	-12.0937

สามารถเขียนเป็นแบบจำลองของสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$Y = -36863.6 + 230.523A - 1342.95B + 188.406C + 1506.31D - 0.382708(A*A) + 2.93229(B*B) - 5.02083(C*C) - 6.14583(D*D) + 4.725(A*B) - 4.06875(A*D) + 5.34375(B*C) - 12.0937(B*D) - 12.0937(C*D)$$

โดยมีเงื่อนไขคือ

$$280 \leq A \leq 300, 6 \leq B \leq 10, 8 \leq C \leq 12, 9 \leq D \leq 13$$

และ A, B, C, D > 0 เมื่อ

Y = ขนาดรวมของโพรงอากาศ

A = แรงอัดของแม่พิมพ์ (Clamp Pressure)

B = แรงฉีด (Injection Force)

C = ระยะเวลาในการฉีดเรซิน (Injection time)

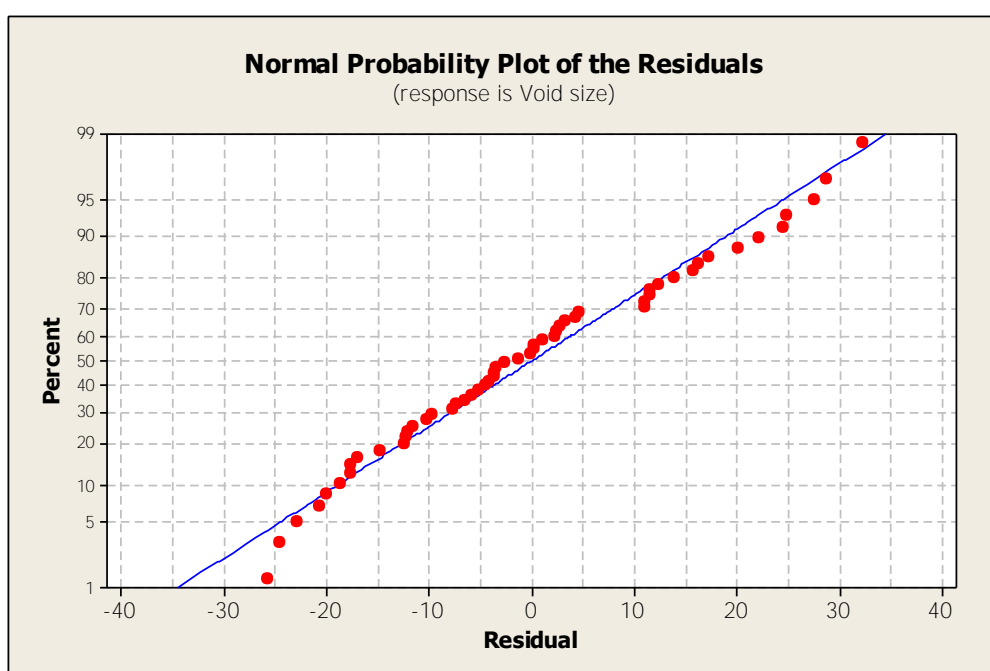
D = ระยะเวลาในการอุ่นเรซิน (Tablet preheat time)

#### 4.4 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบทดลอง

ในการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking) เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง เพื่อให้ข้อมูลจากการทดลองมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ผลการตรวจสอบความเป็นไปได้ตามข้อสมมติฐานแสดงได้ดังต่อไปนี้

##### 1. การทดสอบการกระจายแบบปกติ (Normality)

พิจารณาจากกราฟการกระจายของค่า Residual ในรูปที่ 4.1 พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรงหรือเกือบเป็นเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ น่าเชื่อถือได้

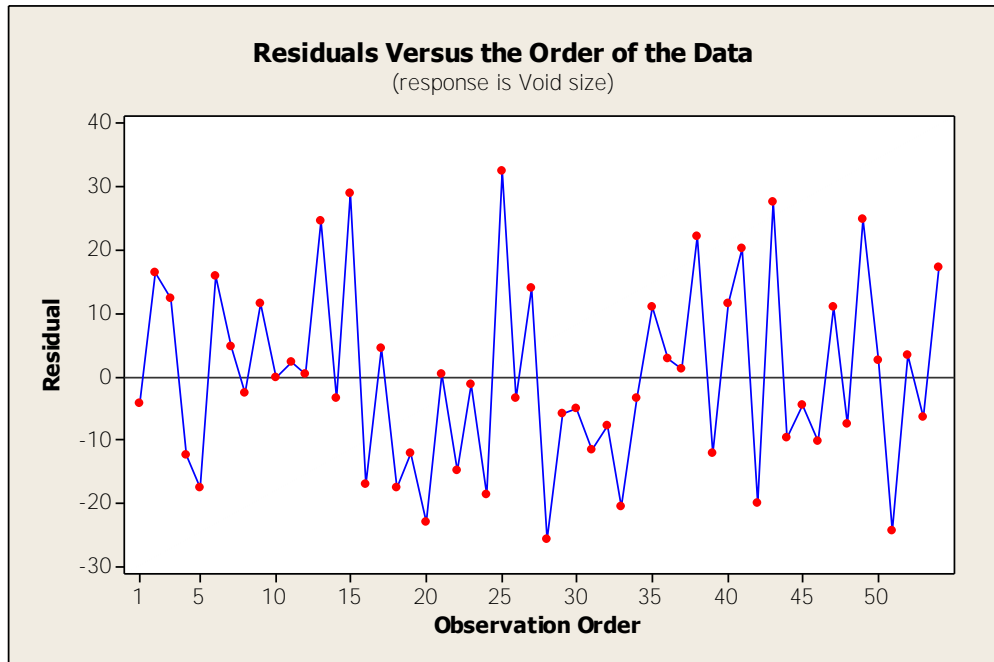


รูปที่ 4.1 แสดงการกระจายตัวปกติของค่า Residuals

##### 2. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent)

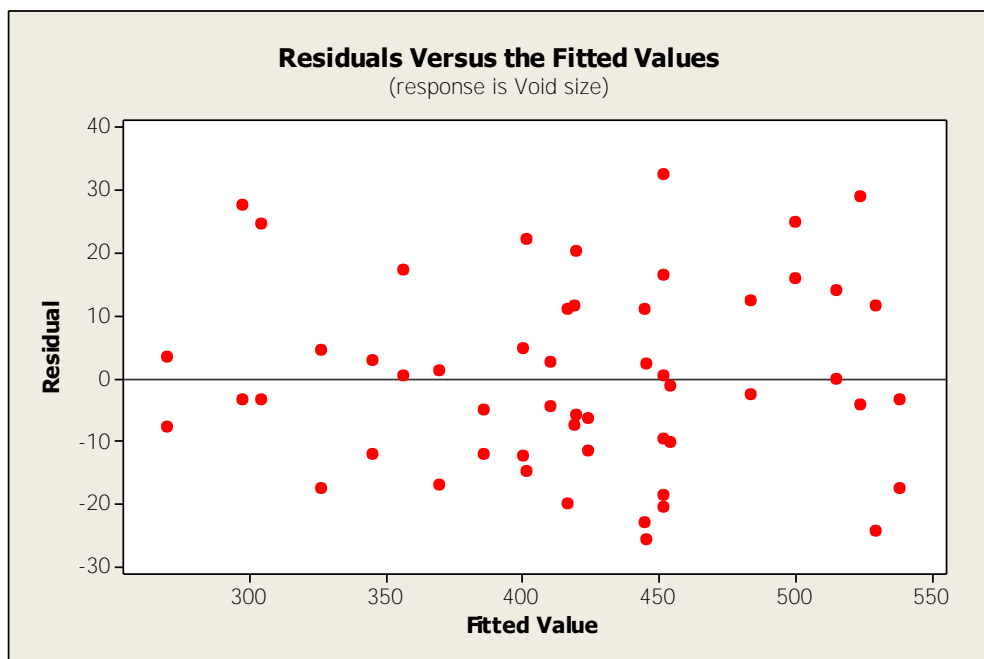
พิจารณาจากแผนภูมิการกระจายในรูปที่ 4.2 พบว่าการกระจายตัวของ Residual มีรูปแบบที่เป็นอิสระหรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ แสดงให้เห็นว่าค่า Residual มีความเป็นอิสระต่อกัน (Independent) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลจากการทดลองนี้มีความถูกต้องและเชื่อถือได้





รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ Residual ของขนาดรวมของโพรงอากาศกับลำดับการทดลอง

### 3. การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของข้อมูล



รูปที่ 4.3 ค่า Residual กับ Fit value ของข้อมูลขนาดรวมของโพรงอากาศ

นำ Residual ของข้อมูลพล็อตกับ Fit value เพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่าง Residual จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Residual ในรูปที่ 4.3 พบว่าความสัมพันธ์ของ Residual ไม่มีลักษณะ

ของการลู่เข้าหรือลู่ออก และไม่มีรูปแบบปรากฏให้เห็น แสดงว่าข้อมูลมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล

#### 4.5 การหาสภาวะที่เหมาะสม

จากการวิเคราะห์โดย Response Optimizer (การหาค่าที่ดีที่สุด) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์ จะพิจารณาจากค่าขนาดรวมของโพรงอากาศ ซึ่งเป้าหมายที่ตั้งไว้ก็คือไม่มีโพรงอากาศหรือให้มีน้อยที่สุดและจะต้องไม่เกิน 500 ไมครอน โดยอ้างอิงจากข้อกำหนดด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาคู่กันไปคือ การทดลองจะต้องไม่ส่งผลทำให้เกิดข้อบกพร่องของคุณสมบัติทางกายภาพของไมโครชิปในด้านอื่นๆ เนื่องจากการปรับพารามิเตอร์ใดๆ จะส่งผลต่อการเกิดของเสียในด้านอื่นๆ ด้วยเช่นกัน

##### Response Optimization Parameters

	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
Void size	Minimum	200	200	500	1	1

##### Global Solution

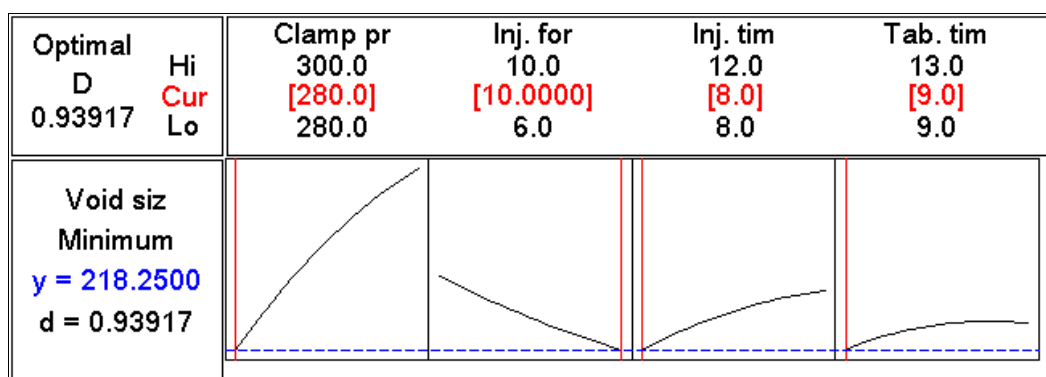
Clamp pr.	=	280
Inj. force	=	10
Inj. time	=	8
Tab. time	=	9

##### Predicted Responses

Void size = 218.25, desirability = 0.93917

Composite Desirability = 0.93917

รูปที่ 4.4 แสดง Output Optimize Point จากโปรแกรม



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงจุดตัดที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย

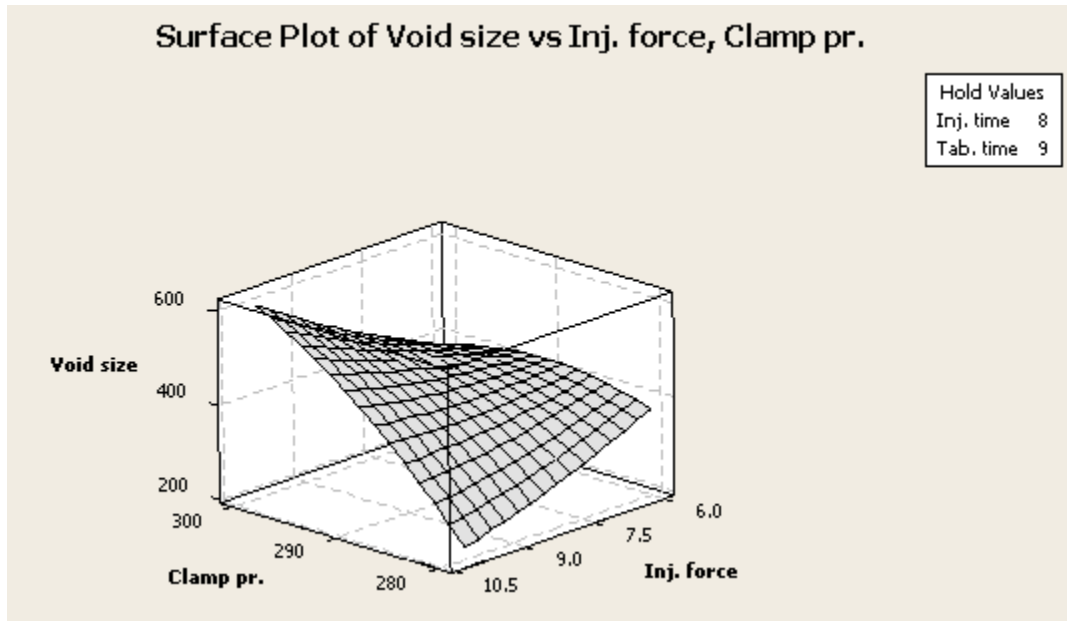
จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 จะได้สภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ขนาดรวมของโพรงอากาศมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 218.25 ไมครอน เมื่อพิจารณาที่ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์แต่ละตัวกับขนาดรวม

ของโพรงอากาศ โดยเริ่มจาก Clamp pressure ขนาดของโพรงอากาศมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อทำการลดแรงอัดระหว่างแม่พิมพ์ด้านล่างกับแม่พิมพ์ด้านบน แต่ทั้งนี้จะต้องคำนึงถึงแรงขีดด้วย เนื่องจากผลการทดลองจะเห็นว่าถ้าให้ Clamp pressure ในระดับต่ำ ในขณะที่ปรับค่า Injection force ให้สูงขึ้น จะช่วยลดขนาดของโพรงอากาศได้ แต่ในความเป็นจริงแล้วแรงกดที่น้อยลงจะมีโอกาสเสี่ยงที่เรซินจะรั่วไหลออกมาภายนอกแม่พิมพ์ได้ ประกอบกับแรงขีดที่มากขึ้นด้วยแล้ว ก็ยังจะทำให้เรซินมีอากาศรั่วไหลมากขึ้นตามไปด้วย ค่าที่กำหนดไว้จึงเป็นค่าที่เหมาะสม หากมีการปรับค่าของ Clamp pressure น้อยลงกว่านี้หรือมีการปรับค่า Injection force ให้สูงขึ้น ก็อาจจะทำให้เสี่ยงที่จะเกิดปัญหาดังกล่าวได้ ส่วนในกรณีของ Injection time กับ Tablet pre-heat time จะเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของเรซินในเรื่องของความหนืดจากการไหลและการหลอมเหลว จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่า ค่าของ Injection time กับ tablet pre-heat time ที่ต่ำจะมีผลต่อขนาดรวมของโพรงอากาศที่ลดลง การเลือกปรับพารามิเตอร์ทั้งสองค่านี้จะคำนึงถึงความสามารถของเครื่องจักรที่จะทำได้ด้วย รวมทั้งคุณสมบัติเรื่องการเป็นเจล ซึ่งเป็นช่วงระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการฉีด ค่า Injection time ที่เร็วเกินไปจะทำให้ความเร็วในการไหลของเรซินเพิ่มมากขึ้น อาจจะทำให้เกิดการปะทะกันระหว่างมวลเรซินกับเส้นลวดทองคำอย่างรุนแรง ทำให้เส้นลวดทองคำเคลื่อนที่ไปใกล้กันหรือสัมผัสกัน เกิดการลัดวงจรขึ้น (Short circuit) ซึ่งถือว่าเป็นของเสียในโหมดที่รุนแรง แต่ถ้าช้าไปก็จะทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น การไหลของเรซินและอากาศจึงทำได้ยากขึ้นตามไปด้วย ในส่วนของ Tablet pre-heat time โดยปกติแล้วจะตั้งไว้ให้เร็วที่สุดที่เครื่องจะทำได้ เนื่องจากเป็นการช่วยลดเวลาการผลิตด้วย แต่ต้องคำนึงถึงความสัมพันธ์กับ Injection time ในเรื่องของระยะเวลาการเป็นเจลด้วยเช่นกัน

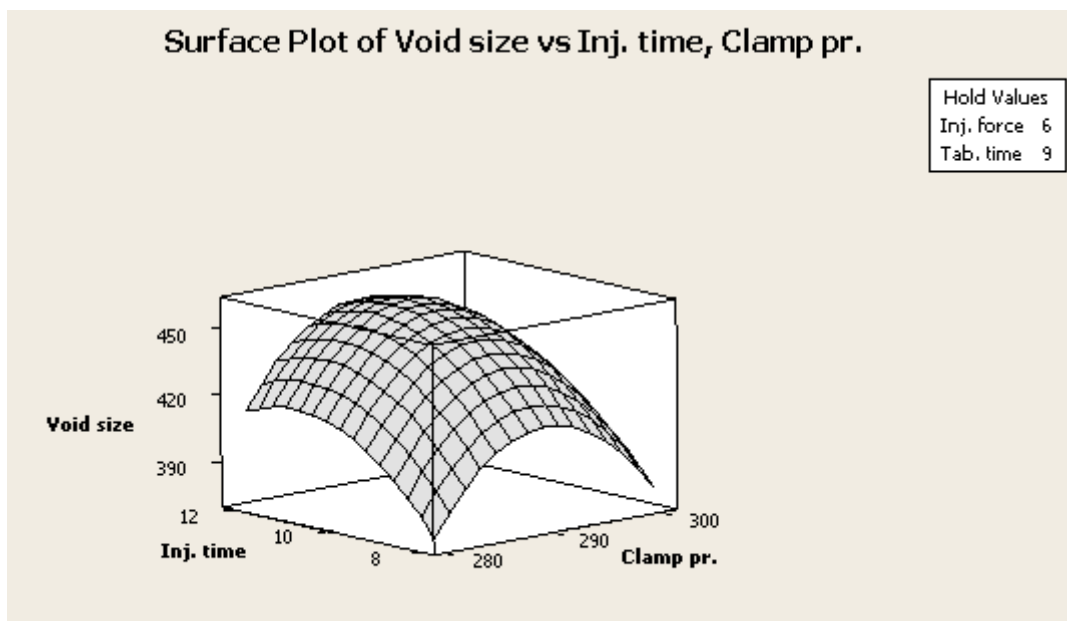
จากเหตุผลที่ได้กล่าวมาทั้งหมด จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าที่ได้จากการทดลองถือว่ามีความเหมาะสมที่จะทำให้ได้ขนาดของโพรงอากาศที่เล็กที่สุด ประกอบกับการพิจารณาเพื่อลดโอกาสเสี่ยงที่จะเกิดของเสียในหมวดอื่นๆ ซึ่งผลที่ได้คือจะได้ขนาดรวมของโพรงอากาศเท่ากับ 218.25 ไมครอน จากสภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย

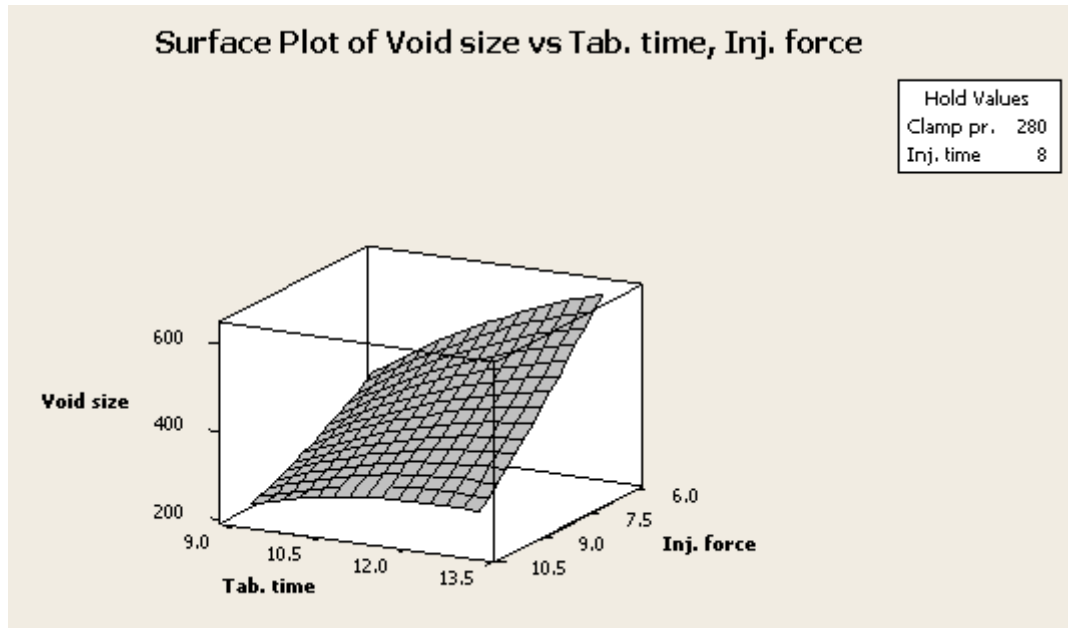
ปัจจัย	ค่าที่เหมาะสม	หน่วย
แรงอัดของแม่พิมพ์	280	Mpa
แรงขีด	10	kN
ระยะเวลาในการฉีดเรซิน	8	วินาที
ระยะเวลาในการอุ่นเรซิน	9	วินาที



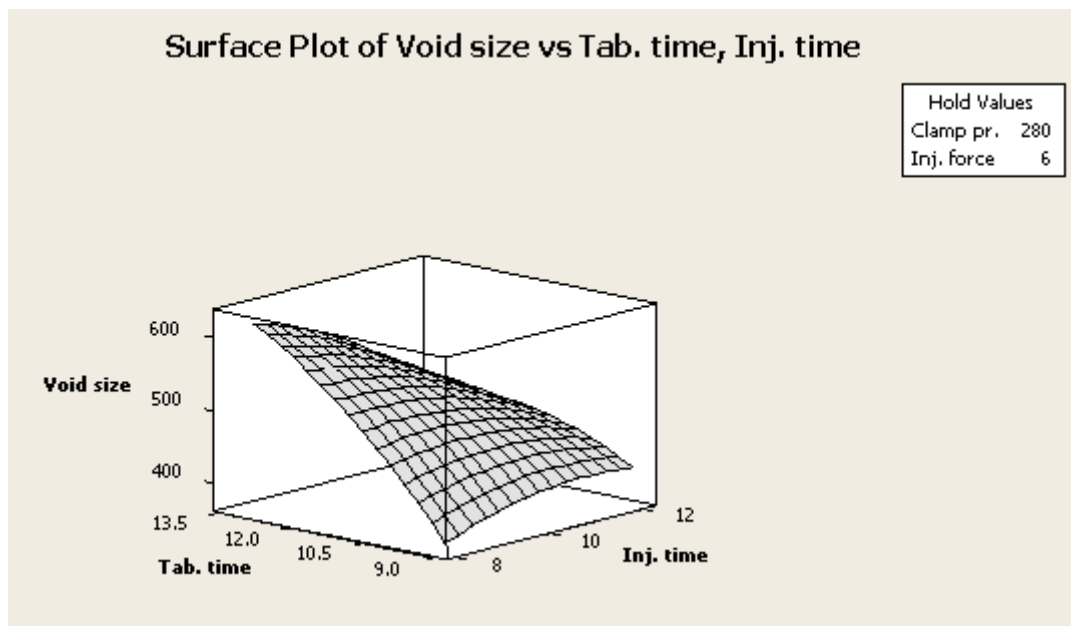
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงพื้นผิวตอบสนองของระหว่าง Void size กับอิทธิพลร่วมของ Injection force และ Clamp pressure



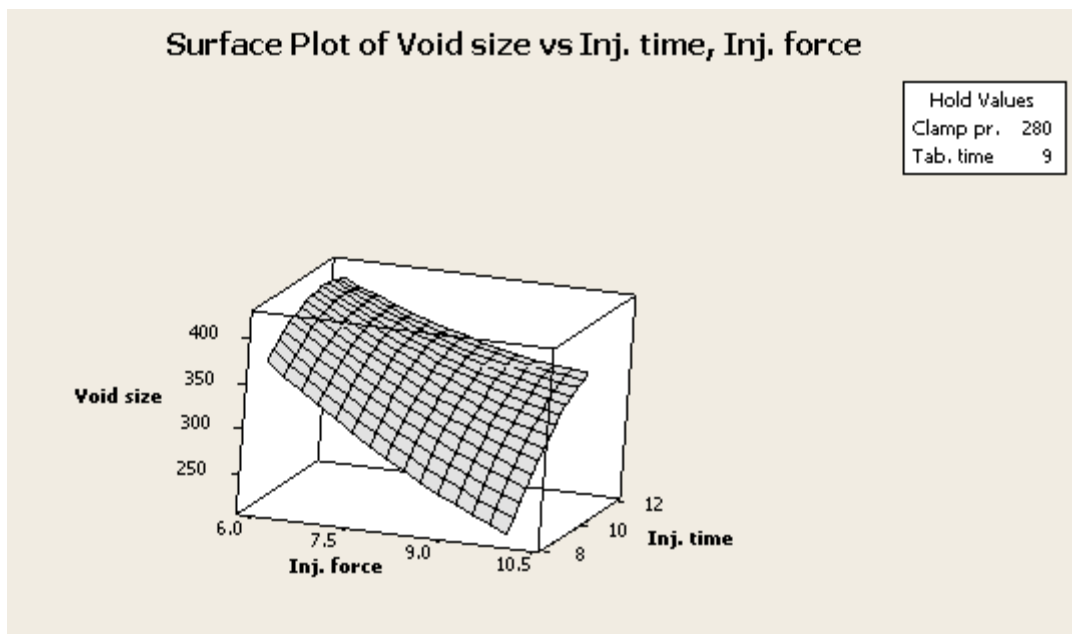
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงพื้นผิวตอบสนองของระหว่าง Void size กับอิทธิพลร่วมของ Injection time และ Clamp pressure



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงพื้นผิวตอบสนองของระหว่าง Void size กับอิทธิพลร่วมของ  
Tablet pre-heat time และ Injection force



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงพื้นผิวตอบสนองของระหว่าง Void size กับอิทธิพลร่วมของ  
Tablet pre-heat time และ Injection time



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงพื้นผิวตอบสนองระหว่าง Void size กับอิทธิพลร่วมของ Injection time และ Injection force

#### 4.6 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และอิทธิพลของปัจจัย

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดลอง

$$Y = -36863.6 + 230.523A - 1342.95B + 188.406C + 1506.31D - 0.382708(A*A) + 2.93229(B*B) - 5.02083(C*C) - 6.14583(D*D) + 4.725(A*B) - 4.06875(A*D) + 5.34375(B*C) - 12.0937(B*D) - 12.0937(C*D)$$

โดยมีเงื่อนไขคือ

$$280 \leq A \leq 300, 6 \leq B \leq 10, 8 \leq C \leq 12, 9 \leq D \leq 13$$

โดยที่

Y = ขนาดรวมของโพรงอากาศ

A = แรงอัดของแม่พิมพ์ (Clamp Pressure)

B = แรงฉีด (Injection Force)

C = ระยะเวลาในการฉีดเรซิน (Injection time)

D = ระยะเวลาในการอุ่นเรซิน (Tablet preheat time)

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยพบว่าแรงฉีดและระยะเวลาในการอุ่นเรซินมีอิทธิพลที่ค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับแรงอัดของแม่พิมพ์หรือระยะเวลาในการฉีด แสดงให้เห็นว่าความหนืดแรงและความเร็วในการไหลมีผลต่อการเคลื่อนที่ของเรซิน ที่ไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ ผ่านชิปและเส้นลวดทองคำ แรงฉีดที่มากจะเพิ่มโอกาสในการกดอัดฟองอากาศให้มีขนาดเล็กลง ทำให้ง่ายต่อการ

เคลื่อนที่ออกมาภายนอกแม่พิมพ์ผ่านทางช่องระบายอากาศหรือที่เรียกว่า Air vent แต่ทั้งนี้ก็ต้องควบคุมไม่ให้เกินจากช่วงที่กำหนดไว้ เนื่องจากมีผลต่อการรั่วไหลของเรซินนั่นเอง

ส่วนแรงอัดของแม่พิมพ์และระยะเวลาในการฉีด ถึงแม้เมื่อเทียบสัดส่วนแล้วจะมีอิทธิพลไม่มากเท่ากับแรงฉีดและระยะเวลาในการอุ่นเรซิน แต่ก็ยังมีผลที่ค่อนข้างชัดเจนอยู่รวมทั้งยังมีผลต่อการเกิดของเสียในแบบอื่นด้วย แต่ถ้าหากต้องการพิจารณาเฉพาะการเกิดโพรงอากาศอย่างเดียวก็สามารถไม่นำมาพิจารณา เนื่องจากการควบคุมตัวแปรหรือพารามิเตอร์ที่มีจำนวนน้อยๆ น่าจะทำให้สามารถควบคุมได้ง่ายและทั่วถึงกว่า อย่างไรก็ตามควรจะมีการศึกษาเพิ่มเติมก่อน

#### 4.7 การทดสอบเพื่อยืนยันผล

ผู้วิจัยได้นำสภาวะที่เหมาะสมในตารางที่ 5 ไปปรับตั้งค่าที่เครื่องจักร เพื่อทำการติดตามผลในการผลิตจริงจำนวนทั้งสิ้น 10 ล็อต ล็อตละ 15 ข้อมูล ได้ค่าตามตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองเพื่อยืนยันผล

Lot ที่	ขนาดรวมของโพรงอากาศเฉลี่ย (ไมครอน)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
1	203.13	9.88
2	214.73	11.25
3	209.00	10.03
4	213.40	10.97
5	232.40	11.38
6	245.27	9.51
7	222.47	8.39
8	214.87	11.09
9	224.00	8.24
10	228.00	9.94
เฉลี่ย	220.73	10.07

หลังจากทดสอบผลในการผลิตจริง ได้ขนาดรวมของโพรงอากาศเฉลี่ยเท่ากับ 220.73 ไมครอน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 10.07 ไมครอนและไม่พบข้อบกพร่องใดๆที่ทำงานเป็นของเสีย

#### 4.8 ทดสอบความสัมพันธ์ที่มีผลต่อการเกิดโพรงอากาศ

ในการตรวจสอบความแม่นยำของสมการความสัมพันธ์ที่หาได้ จะทำการเปรียบเทียบค่าขนาดรวมของโพรงอากาศที่ได้จากสมการความสัมพันธ์กับขนาดรวมของโพรงอากาศที่วัดได้จากการทดลอง

ตารางที่ 4.7 ตารางเปรียบเทียบขนาดรวมของโพรงอากาศที่ได้จากการวัดในการทดลองกับสมการความสัมพันธ์

การทดลอง	Void size จากการวัด (ไมครอน)	Void size จากสมการ (ไมครอน)	ค่าความคลาด เคลื่อน (ไมครอน)	% ความคลาด เคลื่อน
1	520	542.94	22.94	4.41
2	468	469.77	1.77	0.38
3	496	498.13	2.13	0.43
4	388	422.79	34.79	8.97
5	521	557.30	36.30	6.97
6	516	521.94	5.94	1.15
7	405	422.79	17.79	4.39
8	481	498.13	17.13	3.56
9	431	433.87	2.87	0.67
10	515	532.52	17.52	3.40
11	448	467.46	19.46	4.34
12	357	375.44	18.44	5.17
13	329	322.01	6.99	2.12
14	294	319.10	25.10	8.54
15	553	542.94	10.06	1.82
16	353	390.87	37.87	10.73
17	331	344.74	13.74	4.15
18	309	344.74	35.74	11.57
19	374	400.04	26.04	6.96
20	422	463.00	41.00	9.72
21	452	469.77	17.77	3.93



ตารางที่ 4.7 ตารางเปรียบเทียบขนาดรวมของโพรงอากาศที่ได้จากการวัดในการทดลอง  
กับสมการความสัมพันธ์ (ต่อ)

การทดลอง	Void size จากการวัด (ไมครอน)	Void size จากสมการ (ไมครอน)	ค่าความคลาด เคลื่อน (ไมครอน)	% ความคลาด เคลื่อน
22	387	419.29	32.29	8.34
23	453	472.34	19.34	4.27
24	433	469.77	36.77	8.49
25	484	469.77	14.23	2.94
26	535	557.30	22.3	4.17
27	529	532.52	3.52	0.67
28	420	467.46	47.46	11.30
29	414	434.36	20.36	4.92
30	381	400.04	19.04	5.00
31	413	446.21	33.21	8.04
32	262	288.46	26.46	10.10
33	431	469.77	38.77	9.00
34	301	322.01	21.01	6.98
35	428	431.96	3.96	0.93
36	348	362.62	14.62	4.20
37	371	390.87	19.87	5.36
38	424	419.29	4.71	1.11
39	333	362.62	29.62	8.89
40	541	547.58	6.58	1.22
41	440	434.36	5.64	1.28
42	397	431.96	34.96	8.81
43	325	319.10	5.90	1.82
44	442	469.77	27.77	6.28

ตารางที่ 4.7 ตารางเปรียบเทียบขนาดรวมของโพรงอากาศที่ได้จากการวัดในการทดลอง  
กับสมการความสัมพันธ์ (ต่อ)

การทดลอง	Void size จากการวัด (ไมครอน)	Void size จากสมการ (ไมครอน)	ค่าความคลาด เคลื่อน (ไมครอน)	% ความคลาด เคลื่อน
45	406	425.02	19.02	4.68
46	444	472.34	28.34	6.38
47	456	463.00	7.00	1.54
48	412	433.87	21.87	5.31
49	525	521.94	3.06	0.58
50	413	425.02	12.02	2.91
51	505	547.58	42.58	8.43
52	273	288.46	15.46	5.66
53	418	446.21	28.21	6.75
54	374	375.44	1.44	0.39
เฉลี่ย			19.98	5.00

จากการตรวจสอบความแม่นยำของสมการความสัมพันธ์ พบว่าขนาดรวมของโพรงอากาศที่ได้จากการวัดในการทดลองกับสมการความสัมพันธ์มีความคลาดเคลื่อน ประมาณ 5% อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

#### 4.9 การทดสอบสมมติฐานความแตกต่างของค่าเฉลี่ย

เพื่อตรวจสอบว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากการทดลองกับข้อมูลที่ได้จากสมการมีความแตกต่างกันหรือไม่ เพื่อความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่มากขึ้น แสดงรายละเอียดได้ดังนี้

ข้อมูล 1 คือขนาดรวมของโพรงอากาศที่ได้จากการทดลอง (ตารางที่ 4.7)

ข้อมูล 2 คือขนาดรวมของโพรงอากาศที่ได้จากสมการ (ตารางที่ 4.7)

กำหนดสมมติฐาน 1.  $H_0 : \mu_1 - \mu_2 = 0$

2.  $H_1 : \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

และ 3.  $\alpha = 0.05$

4. บริเวณปฏิเสธ  $H_0$  คือ  $Z \leq -1.96$  หรือ  $Z \geq 1.96$

5. จาก

$$Z = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2 - d_0}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}}$$

เมื่อ  $\bar{X}_1 = 420.02$ ,  $\bar{X}_2 = 438.12$ ,  $S_1 = 73.07$ ,  $S_2 = 71.46$ ,  $n_1 = n_2 = 54$  และ  $d_0 = 0$

จะได้  $Z = -1.3$

6. พบว่า  $Z = -1.3$  ตกอยู่บริเวณยอมรับ  $H_0$

P-value =  $P(Z > 1.3) + P(Z < -1.3)$

= 0.1936 ซึ่งมากกว่า  $\alpha$

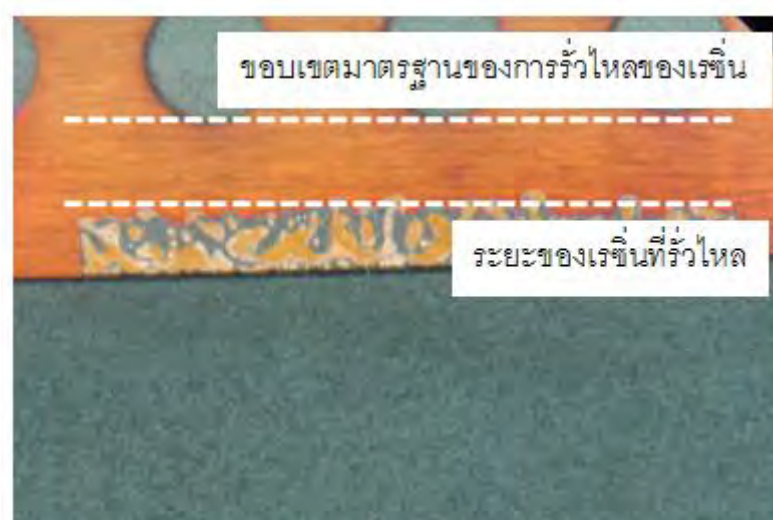
ดังนั้น ยอมรับ  $H_0 : \mu_1 - \mu_2 = 0$

นั่นคือ ค่าเฉลี่ยของโพรงอากาศที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากสมการไม่ต่างกัน

นอกจากนั้นยังมีการตรวจสอบเพิ่มเติมดังนี้

#### 1. การรั่วไหลของเรซิน

การรั่วไหลของเรซินจะได้รับผลกระทบจากการเพิ่มแรงยึดหรือการลดแรงอัดของแม่พิมพ์ มาตรฐานการตรวจสอบกำหนดไว้ว่าเรซินจะต้องมีการรั่วไหลออกมาในขอบเขตที่กำหนดไว้ กล่าวคือ ระยะในการรั่วไหลจะต้องไม่เลยมาถึงบริเวณรูของเฟรม แสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งการตรวจสอบไม่พบว่าเรซินมีการรั่วไหลเกินจากขอบเขตที่กำหนดไว้



รูปที่ 4.11 แสดงตัวอย่างของระยะการรั่วไหลของเรซิน

## 2. ระยะห่างของเส้นลวดทองคำ

แรงดึงดูดและระยะเวลาในการขีดมีผลต่อความหนืดและความเร็วในการไหลของเรซิน ไปปะทะกับเส้นลวดทองคำ แรงดึงดูดหรือระยะเวลาในการขีดที่มากเกินไป อาจดันให้เส้นลวดทองคำเคลื่อนที่เข้ามาใกล้หรือสัมผัสกัน ซึ่งอาจทำให้เกิดการลัดวงจรได้ ผู้วิจัยจึงกำหนดให้มีการตรวจสอบเพิ่มเติม โดยมาตรฐานทั่วไป ระยะห่างของเส้นลวดทองคำจะต้องมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดทองคำชนิดนั้นๆ ซึ่งจากผลการตรวจสอบ ไม่พบปัญหานี้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบการทดลอง เพื่อลดสัดส่วนของเสียที่เกิดจากโพรงอากาศ โดยการหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการขึ้นรูปไมโครชิป ซึ่งจะให้ได้ขนาดรวมของโพรงอากาศน้อยที่สุด หรือจะต้องไม่เกิน 500 ไมครอน โดยประยุกต์ใช้หลักการออกแบบโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบ Box-Behnken Design ผลที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธีนี้ทำให้ได้ค่าสภาวะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 คัดเลือกปัจจัยหลักที่มีน่าจะมีอิทธิพลต่อการเกิดโพรงอากาศในกระบวนการขึ้นรูปไมโครชิป รวมถึงความเป็นไปได้และข้อจำกัดต่างๆที่จะนำมาทำการทดลอง สามารถรวบรวมปัจจัยต่างๆได้ดังนี้

5.1.1.1 แรงอัดของแม่พิมพ์ (Clamp Pressure)

5.1.1.2 แรงฉีด (Injection Force)

5.1.1.3 ระยะเวลาในการฉีดเรซิน (Injection time)

5.1.1.4 ระยะเวลาในการอุ่นเรซิน (Tablet preheat time)

5.1.2 ผลการวิจัยจากการประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบ Response Surface Methodology ในแบบของ Box-Behnken Design ซึ่งก็พบว่าทั้ง 4 ปัจจัยมีอิทธิพลต่อการเกิดโพรงอากาศ จากผลการทดลองทำให้ได้รูปแบบของสมการถดถอยของปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดโพรงอากาศดังนี้

$$Y = -36863.6 + 230.523A - 1342.95B + 188.406C + 1506.31D - 0.382708(A*A) + 2.93229(B*B) - 5.02083(C*C) - 6.14583(D*D) + 4.725(A*B) - 4.06875(A*D) + 5.34375(B*C) - 12.0937(B*D) - 12.0937(C*D)$$

โดยมีเงื่อนไขคือ

$$280 \leq A \leq 300, 6 \leq B \leq 10, 8 \leq C \leq 12, 9 \leq D \leq 13$$

และ A, B, C, D > 0 เมื่อ

Y = ขนาดรวมของโพรงอากาศ

A = แรงอัดของแม่พิมพ์ (Clamp Pressure)

B = แรงฉีด (Injection Force)

C = ระยะเวลาในการฉีดเรซิน (Injection time)

D = ระยะเวลาในการอุ่นเรซิน (Tablet preheat time)

5.1.3 ผลการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม (Response Optimizer) และ การศึกษาพื้นผิวผลตอบสนองของตัวแปร (Response Surface Methodology) ทำให้ได้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ได้ผลตอบเป็นขนาดรวมของโพรงอากาศเล็กที่สุด สามารถสรุปได้คือ แรงอัดของแม่พิมพ์ 280 Mpa, แรงฉีด 10 kN, ระยะเวลาในการฉีดเรซิน 8 วินาที ระยะเวลาในการอุ่นเรซิน 9 วินาที ได้ค่าขนาดรวมของโพรงอากาศที่น้อยที่สุดคือ 218.25 ไมครอน ซึ่งต่ำกว่าข้อกำหนดด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ไม่เกิน 500 ไมครอน

ซึ่งจากการยืนยันผลการทดลองนั้นไม่พบของเสียในส่วนของโพรงอากาศที่มีขนาดเกินกว่า 500 ไมครอน ทำให้สามารถลดสัดส่วนของเสียที่เกิดจากโพรงอากาศได้ 100% จากสัดส่วนของเสียก่อนการวิจัยเท่ากับ 2370 PPM และไม่ทำให้เกิดปัญหาคุณภาพด้านอื่นๆ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

การทำวิจัยครั้งนี้ได้กำหนดปัจจัยหลักทั้งหมด 4 ปัจจัย ส่วนปัจจัยอื่นๆที่ผู้วิจัยได้กำหนดหรือจำกัดไว้ให้เป็นเพียงพารามิเตอร์ที่ต้องพิจารณาค่าไว้ก็เนื่องมาจากลักษณะการออกแบบไว้ตั้งแต่ในช่วงของการพัฒนาผลิตภัณฑ์ ซึ่งในขณะที่ผู้วิจัยทำการทดลองนี้ อยู่ในส่วนของการผลิตจริงแล้ว ทำให้เป็นไปได้ยากที่จะไปปรับหรือแก้ไขในส่วนของการออกแบบ ซึ่งจะทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่ายในปริมาณที่สูง ยกตัวอย่างเช่น อุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่พิดค่าไว้ เนื่องจากในการออกแบบจะคำนึงถึงสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อนของวัสดุมาแล้ว หากไปทำการปรับค่าอุณหภูมิก่อนหรือจากที่ออกแบบไว้จะทำให้ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของงานในด้านอื่น ดังนั้นในช่วงของการออกแบบจึงจะต้องมีการพิจารณาถึงจุดนี้ด้วย นอกจากนี้ เนื่องจากการทดลองนี้เป็น การหาค่าของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ แต่ในส่วนของการควบคุมคุณสมบัติของวัสดุ อย่างเช่น เรซินหรือสีดีเฟรมหรือ ฟิลสเตอร์ท ถึงแม้ว่าจะต่างล้อตการผลิตกัน แต่จะต้องควบคุมให้มีคุณภาพใกล้เคียงกันให้มากที่สุด เพื่อลดความเสี่ยงต่อการเกิดโพรงอากาศ

## รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. สถิติสำหรับงานวิศวกรรมเล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น), 2545.

กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. สถิติสำหรับงานวิศวกรรมเล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น), 2545.

คณาจารย์ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ความน่าจะเป็นและสถิติ. พิมพ์ครั้งที่ 11. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

ชัชวาลย์ เรืองประพันธ์. สถิติพื้นฐานพร้อมตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MINITAB SPSS และ SAS. พิมพ์ครั้งที่ 5. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2543.

ปารเมศ ชูติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์ ,นพดล ฉิ่งทอง. การกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของการปรับปรุงขนาดของรูรีมเมอร์ โดยวิธีการออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2550.

ไพโรจน์ วิริยจารี. การออกแบบพื้นที่การตอบสนอง Response surface design. พิมพ์ครั้งที่ 1. เชียงใหม่: คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2544.

ลัดดา เรียงเลิศ. การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการพิมพ์สี ในโรงงานผลิตพื้นยางนิโอไลท์, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

วัลภา เตชะสุข. การปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปในอุตสาหกรรมเซมิคอนดักเตอร์ชนิดมีขา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.

วรพงศ์ นาวารกุล. การลดความแปรปรวนของกระบวนการผลิตกระดาษ, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

วิชาญา วิชาภักย์ บุญนาค. อิทธิพลของปัจจัยในการบ่มต่อสมบัติเชิงกลของอีพอกซีเรซินเสริมเส้นใยแก้วสำหรับเคลือบคอนกรีตและมอร์ตาร์, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

วีรเทพ เฉลิมสมิทธิ์ชัย. การศึกษาปริมาณธาตุที่เหมาะสมในอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กดิบ โดยวิธีการออกแบบการทดลอง, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2550.

ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ และ จันทนา จันทโร. สถิติสำหรับงานวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.

อนุสิทธิ์ อ่ำไพบูลย์. ปัจจัยที่เหมาะสมของการเชื่อมแบบอาร์คโลหะก๊าซคลุม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2550.

#### ภาษาอังกฤษ

Channarong Rungruang and Somkiat Tangjitsitcharoen, Investigation of dry cutting and mist cutting in ball end milling based on response surface analysis. Proceedings of the 40<sup>th</sup> International conference on Computer and Industrial Engineering 2010.

Yoshii M., Mizukami Y. and Shoji H., Evaluation Technologies on Moldability of Epoxy molding Compounds for Encapsulation of Semiconductor.

Montgomery. 2000. Design and Analysis of Experiment. 6<sup>th</sup> edition (n.p.): John Wiley and Sons.

Somkiat T., Somchart A. and Sirichan T., In-Process Monitoring and Prediction of Surface Roughness on CNC turning by using Response Surface Analysis. Proceeding of the 36<sup>th</sup> International MATADOR Conference 2010, 213-216

Devalve C. and Pitchumani R., Void formation during preform impregnation in liquid composite molding process, Advance materials and technologies laboratory, Department of mechanical engineering, Virginia Polytechnic institute and state university, Blackburg, Virginia 24061-0238, USA, pitchu@vt.edu



ภาคผนวก

**ภาคผนวก**  
**ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากโปรแกรมสำเร็จรูป รวมถึงกราฟต่างๆที่ได้จาก**  
**โปรแกรมสำเร็จรูป**

ภาคผนวก ผลการวิเคราะห์ข้อมูลขนาดรวมของโพรงอากาศ

Response Surface Regression: Void size versus Clamp pressure, Injection force, Injection time and Tablet preheat time

**Response Surface Regression: Void size versus Clamp pr., Inj. force, ...**  
**Estimated Regression Coefficients for Void size**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	451.667	7.057	64.001	0.000
Clamp pr.	15.333	3.529	4.345	0.000
Inj. force	-10.750	3.529	-3.047	0.004
Inj. time	-8.208	3.529	-2.326	0.025
Tab. time	-53.042	3.529	-15.032	0.000
Clamp pr.*Clamp pr.	-38.271	5.293	-7.231	0.000
Inj. force*Inj. force	11.729	5.293	2.216	0.033
Inj. time*Inj. time	-20.083	5.293	-3.794	0.001
Tab. time*Tab. time	-24.583	5.293	-4.645	0.000
Clamp pr.*Inj. force	94.500	6.112	15.462	0.000
Clamp pr.*Inj. time	-0.125	6.112	-0.020	0.984
Clamp pr.*Tab. time	-81.375	6.112	-13.315	0.000
Inj. force*Inj. time	21.375	6.112	3.497	0.001
Inj. force*Tab. time	-48.375	6.112	-7.915	0.000
Inj. time*Tab. time	-48.375	6.112	-7.915	0.000

S = 17.29 R-Sq = 95.9% R-Sq(adj) = 94.4%

รูปที่ 1 Estimated Regression Coefficients for Void size using data in code unit

**Analysis of Variance for Void size**

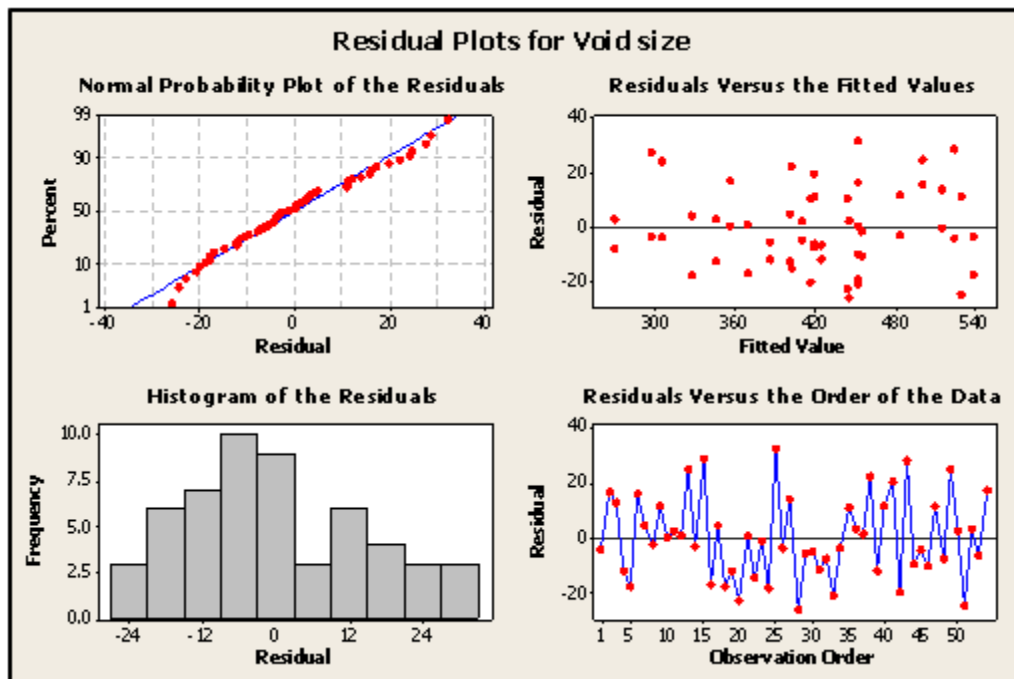
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	271307	271307	19379.1	64.85	0.000
Linear	4	77555	77555	19388.8	64.88	0.000
Square	4	28237	28237	7059.2	23.62	0.000
Interaction	6	165515	165515	27585.8	92.31	0.000
Residual Error	39	11654	11654	298.8		
Lack-of-Fit	10	3437	3437	343.7	1.21	0.324
Pure Error	29	8217	8217	283.3		

รูปที่ 2 Analysis of Variance for Void size

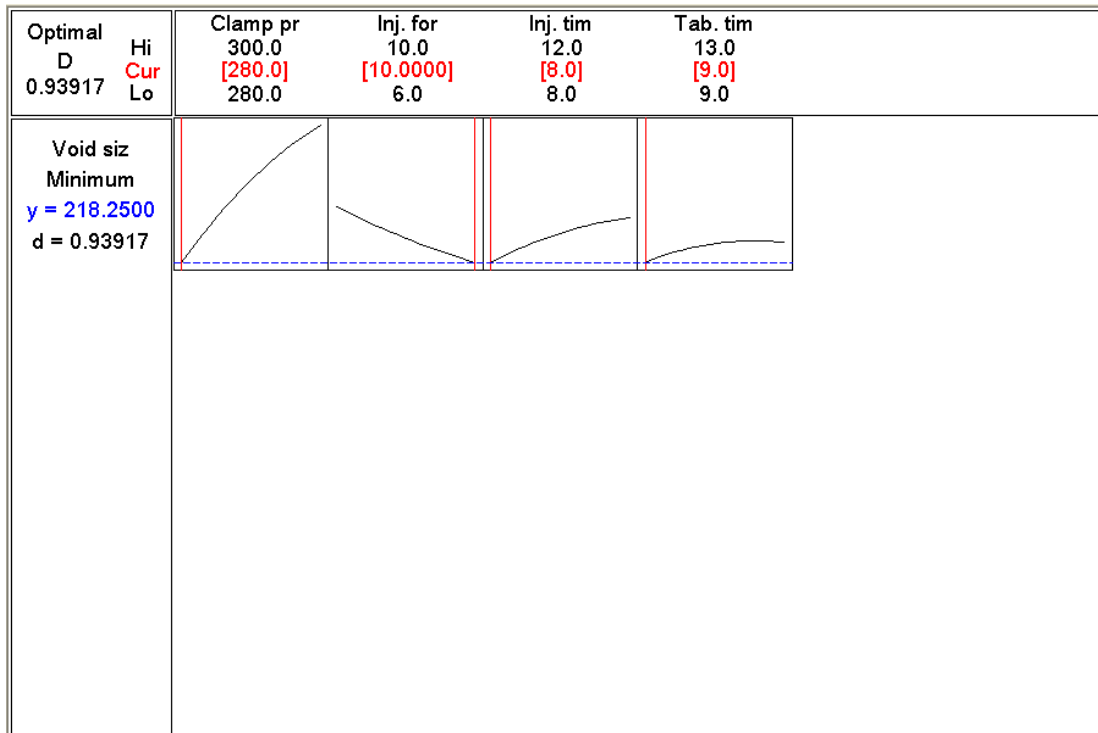
**Estimated Regression Coefficients for Void size using data in uncoded units**

Term	Coef
Constant	-36863.6
Clamp pr.	230.523
Inj. force	-1342.95
Inj. time	188.406
Tab. time	1506.31
Clamp pr.*Clamp pr.	-0.382708
Inj. force*Inj. force	2.93229
Inj. time*Inj. time	-5.02083
Tab. time*Tab. time	-6.14583
Clamp pr.*Inj. force	4.72500
Clamp pr.*Inj. time	-0.00625000
Clamp pr.*Tab. time	-4.06875
Inj. force*Inj. time	5.34375
Inj. force*Tab. time	-12.0937
Inj. time*Tab. time	-12.0937

รูปที่ 3 Estimated Regression Coefficients for Void size Using data in uncoded units



รูปที่ 4 Residual plots for Void size



รูปที่ 5 Response optimization graph

### Response Optimization Parameters

	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
Void size	Minimum	200	200	300	1	1

### Starting Point

Clamp pr.	=	280
Inj. force	=	10
Inj. time	=	8
Tab. time	=	9

### Global Solution

Clamp pr.	=	280
Inj. force	=	10
Inj. time	=	8
Tab. time	=	9

### Predicted Responses

Void size	=	218.25, desirability =	0.8175
-----------	---	------------------------	--------

รูปที่ 6 Response optimization

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจิระวัฒน์ แต่งไทย เกิดเมื่อวันที่ 23 ธันวาคม พ.ศ. 2525 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ รัชสิดปทุมธานี ปีการศึกษา 2548 จากนั้นได้เข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกรในบริษัทแห่งหนึ่ง ในปี 2551 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย