การศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปัญหาฟิล์มลอกของซิลิคอนเวเฟอร์ในการเคลือบผิวฟิล์มบางสาหรับอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิ

A STUDY AND ANALYSIS ON FACTORS AFFECTING FILM PEELING PROBLEM OF SILICON WAFER COATING FOR INSTRUMENT TEMPERATURE SENSOR

ยรรยง สรีสวัสดิ์
YANYONG SRISAWAT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา อิเล็กทรอนิกส์
คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2558
KMITL–2015–ED–M–232-009

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY AND ANALYSIS ON FACTORS AFFECTING FILM PEELING PROBLEM OF SILICON WAFER COATING FOR INSTRUMENT TEMPERATURE SENSOR

YANYONG SRISAWAT

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN INDUSTRIAL EDUCATION IN ELECTRICS FACULTY OF INDUSTRIAL EDUCATION KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2015

KMITL–2015–ED–M–232-009

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2015
FACULTY OF INDUSTRIAL EDUCATION
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปัญหาฟิล์มลอกของซิลิคอนเวเฟอร์ในการเคลือบผิวฟิล์มบางสำหรับอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิ
นักศึกษา	นายยรรยง ศรีสวัสดิ์
รหัสประจำตัว	53631654
ปริญญา	ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	อิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ กิติพงศ์ มะโน
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ์ สุนทรกนกพงศ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของ อุณหภูมิชิ้นงาน ความดันสุญญากาศ และ อัตราการระเหยสาร ที่ส่งผลต่อการลอกของฟิล์มบางในกระบวนการเคลือบแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์สำหรับอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิของโรงงานเคลือบผิวฟิล์มบางแห่งหนึ่ง โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟคตอเรียลแบบเต็มรูปชนิด 2^3 แฟคตอเรียล เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปัญหาฟิล์มลอกของซิลิคอนเวเฟอร์ในการเคลือบผิวฟิล์มบางสำหรับอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิ การทดลองครั้งนี้ใช้ตัวอย่างการทดลองโดยการสุ่มครั้งละ 2 ชิ้นรวมทั้งสิ้น 32 ชิ้น และมีการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง การทดสอบการยึดเกาะของฟิล์มบางใช้วิธีการกรีดผิวฟิล์มบางเป็นตารางด้วยหัวเพชรและ ใช้เทปกาวใสปิดทับบริเวณที่ถูกกรีดแล้วดึงขึ้นเพื่อประเมินอัตราการลอกของฟิล์มบาง การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปมินิเทป 14

จากผลการทดลองพบว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดฟิล์มลอกที่ระดับนัยสำคัญร้อยละ 95 (α = 0.05) ได้แก่ อุณหภูมิของชิ้นงาน อันตรกิริยาระหว่าง อุณหภูมิชิ้นงานกับความดันสุญญากาศ และอันตรกิริยาสามปัจจัยหลักได้แก่ อุณหภูมิชิ้นงาน ความดันสุญญากาศ และ อัตราการระเหยสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	A Study and Analysis on Factors Affecting Film Peeling Problem of Silicon Wafer Coating for Instrument Temperature Sensor
Student	Mr.Yanyong Srisawat
Student ID.	53631654
Degree	Master of Science in Industrial Education
Program	Electronics
Year	2015
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Kitipong Mano
Thesis Co-advisor	Assoc. Prof. Dr. Wisuit Sunthonkanokpong

ABSTRACT

The purpose of this study is to understand the influence of substrate temperature, the vacuum pressure and evaporation rate which affect to film peeling in silicon wafer thin film coating process. This study applies the 2^3 full factorial experiments model in a sample coating factory. This experiments model was designed to understand the factor which affect to film peeling problem in the production of silicon wafer coating process by 2 groups of 32 samples with 2 time repeat test. Film peeling determine method is the square scratch making on film surface by diamond cutter, apply the adhesion tape on film then pull the adhesion tape out to understand the level of peeling. All data is processed and analyzed by Minitab14

We can understand that the substrate temperature, the interactive between substrate temperature versus vacuum pressure, and the co-active substrate temperature, vacuum pressure and rate of evaporation is affect to coated film peeling problem at the significant 95 percent (α = 0.05)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดีด้วยความอนุเคราะห์จาก รศ.กิติพงค์ มะโน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รศ.ดร.วิสุทธิ์ สุนทรกนกพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา และคำแนะนำแนวทางรวมทั้งการแก้ไขปรับปรุงข้อบกพร่องต่าง ๆ ในการทำวิจัยด้วยความเอาใจใส่เสมอมา และรวมทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ตลอดจนประสบการณ์ ข้อคิดต่างๆ อันก่อให้เกิดประโยชน์ต่อการศึกษาค้นคว้าและเป็นแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์จนประสบความสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณเพื่อนสมาชิกนักศึกษาหลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิตสาขาอิเล็กทรอนิกส์ รุ่น 4 ทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือเป็นกำลังใจสนับสนุนให้ผู้วิจัยได้ประสบความสำเร็จจึงขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณโรงงานอุตสาหกรรมที่ผลิตแผ่นซิลิคอนเคลือบผิวฟิล์มบาง ที่ให้ทำการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูลที่เป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับการวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อวิจิตร และ คุณแม่จันดี ศรีสวัสดิ์ ที่คอยให้ความรักความห่วงใยและเป็นกำลังใจเสมอมา

คุณค่าและประโยชน์ใดๆ ที่เป็นผลมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบกุศลผลบุญดังกล่าวให้กับ บิดา มารดา ญาติสนิท มิตรสหาย ผู้มีพระคุณ ลูกศิษย์ นักศึกษา และสิ่งที่ล่าจากไป

ยรรยง ศรีสวัสดิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... II
กิตติกรรมประกาศ..... III
สารบัญ..... IV
สารบัญรูป..... VI
สารบัญตาราง..... VIII
บทที่ 1 บทนำ..... 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 2
1.3 สมมุติฐานการวิจัย..... 2
1.4 กรอบแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย..... 2
1.5 ขอบเขตของการวิจัย..... 3
1.6 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง..... 4
1.7 คำนิยามศัพท์เฉพาะที่ใช้ในการวิจัย..... 4

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 6
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับแสงอินฟราเรด..... 6
2.2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์..... 8
2.3 ทฤษฎีการเคลือบผิวฟิล์มบาง..... 10
2.4 การวิจัยเชิงทดลองและการออกแบบการทดลอง..... 14
2.5 การวัดผล..... 27
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 27

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย..... 29
3.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย..... 29
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย..... 29
3.3 การดำเนินการทดลองและเก็บข้อมูล..... 39
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล..... 43
3.5 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล..... 45

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล..... 46
4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง..... 46
4.2 ผลการการทดลอง..... 48
4.3 การวิเคราะห์ข้อมูล..... 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 54
5.1 สรุปผลการวิจัย 54
5.2 อภิปรายผลการวิจัย 54
5.3 ข้อเสนอแนะ 55

บรรณานุกรม 56

ภาคผนวก
ภาคผนวก ก ตารางผลการทดสอบการยึดเกาะของฟิล์มบางจากการทดลอง .. 58
ภาคผนวก ข. แบบฟอร์มบันทึกผลที่ได้จากการทดลอง 63
ประวัติผู้เขียน 79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 กรอบความคิดในการวิจัย	3
2.1 แผนผังการทำงานของ Filter lens	7
2.2 ส่วนประกอบของเลนส์ (Lens) ตัวตรวจจับรังสีอินฟราเรด	7
2.3 ตัวตรวจจับรังสีอินฟราเรด	8
2.4 แผนผังการทำงานของอุปกรณ์ภายในอินฟราเรดเซ็นเซอร์	8
2.5 แท่งซิลิคอนที่ถูกตัดเป็นแผ่นๆ	9
2.6 กราฟของช่วงความยาวคลื่นอินฟาเรดสำหรับอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิของร่างกาย	11
2.7 การใช้งานอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิ	12
2.8 แผนผังเทคนิควิธีการทำการเคลือบผิวฟิล์มบาง	13
2.9 แบบทั่วไปของกระบวนการ	15
2.10 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย	23
2.11 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย (มีอันตรกิริยา)	23
2.12 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (ไม่มีอันตรกิริยา)	23
2.13 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (มีอันตรกิริยา)	24
2.14 ภาพรวมการใช้งานโปรแกรม Minitab	25
2.15 ลักษณะหน้าตาโปรแกรม Minitab	25
3.1 เครื่องเคลือบระบบสุญญากาศที่ใช้ในการวิจัย	30
3.2 ชุดควบคุมการทำงานของเครื่องเคลือบ	30
3.3 ส่วนประกอบหลักที่สำคัญของเครื่องเคลือบผิวฟิล์มบางสุญญากาศ	31
3.4 แผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ที่ใช้ในการวิจัย	32
3.5 เทปกาวใสชนิดพิเศษ	32
3.6 หัวเพชรที่ใช้กรีดแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์	32
3.7 ขั้นตอนการออกแบบการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่ทำการทดลอง	33
3.8 การเลือก Option ออกแบบการทดลองแบบ Factorial	35
3.9 การเลือก Option เลือกประเภทของการออกแบบและจำนวนปัจจัย	35
3.10 การกำหนดจำนวนระดับของปัจจัยและจำนวนครั้งในการทำการทดลองซ้ำ	36
3.11 การกำหนดชนิดของปัจจัยและ ค่าของระดับปัจจัย	36
3.12 ลำดับการทำการทดลอง	37
3.13 ขั้นตอนการดำเนินการทดลองการเคลือบผิวฟิล์มบางแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์	39
3.14 การล้างทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ด้วยเครื่องล้างระบบอุลตร้าโซนิค	40
3.15 การกรีดแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์สำหรับติดเทป	41
3.16 การติดเทปกาวลงบนกระดาษ	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17 แบบฟอร์มบันทึกผลการทดลอง	42
3.18 ความน่าจะเป็นของค่าความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ	43
3.19 ค่าความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดและค่าเฉลี่ยมีแนวโน้มของรูปทรงที่ผิดปกติ	44
3.20 ความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดและลำดับที่ของการทดลอง	45
4.1 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนของทั้ง 3 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง	46
4.2 การกระจายตัวแบบปกติของส่วนตกค้าง	47
4.3 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับ Observation Order	48
4.4 พื้นที่การหลุดลอกของฟิล์มจากผลการทดลอง	49
4.5 กราฟผลกระทบหลักของปัจจัย อุณหภูมิของชิ้นงาน	51
4.6 กราฟผลกระทบอันตรกิริยา อิทธิพลร่วมของ 2 ปัจจัย ระหว่าง อุณหภูมิชิ้นงาน*ความดันสุญญากาศ	52
4.7 กราฟผลกระทบอันตรกิริยาอิทธิพลร่วมของ 3 ปัจจัยระหว่าง อุณหภูมิของชิ้นงาน*ความดันสุญญากาศ*อัตราระเหยสาร	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 การแบ่งเทคนิควิธีการทำการเคลือบผิวฟิล์มบาง..... 14

2.2 ข้อมูลของการทดลอง 2 ปัจจัย..... 18

3.1 ส่วนประกอบหลักที่สำคัญของเครื่องเคลือบผิวฟิล์มบาง สุญญากาศ..... 31

3.2 การออกแบบการทดลองจากโปรแกรม Minitab 38

4.1 ผลการทดสอบการยึดเกาะของฟิล์มโดยพิจารณาการหลุดลอกของฟิล์ม..... 49

4.2 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน..... 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีศักยภาพสูงและสามารถพัฒนาให้ก้าวไปสู่ความเป็นเลิศในภูมิภาคทั้งการผลิต การส่งออก การลงทุนและเทคโนโลยี อุตสาหกรรมนี้นับได้ว่ามีการพัฒนาเปลี่ยนแปลงค่อนข้างรวดเร็วเมื่อเทียบกับอุตสาหกรรมอื่น คือ มูลค่าการส่งออก มีแนวโน้มสูงขึ้น (กฤตธน ส้มอ่ำ : 2554.) ดังจะเห็นได้จาก ได้มีการศึกษาเลนส์กรองแสงที่ทำจากสารกึ่งตัวนำและเคลือบด้วยสารที่มีสมบัติการส่งผ่านของแสง (Transmissions) ที่เหมาะสม ซึ่งปัจจุบันนิยมใช้การเคลือบในสุญญากาศ (Vacuum Coating) ด้วยเทคนิคระเหยสาร (Evaporation) เป็นการเคลือบเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของการส่งผ่านแสง และการกรองแสง เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของการส่งผ่านแสงได้มากถึงกว่าร้อยละ 96 (H Angus Macleod : 2001) ซึ่งการเคลือบผิวฟิล์มบาง" หรือ'โค้ทติ้ง' คือคำศัพท์รวมๆ ที่เรียกวัสดุที่ใช้ปกปิดพื้นผิวงานที่ต้องการจะปกป้องจากสภาวะการใช้งาน การกัดกร่อนจากสภาวะแวดล้อมจากธรรมชาติ ฯลฯ (นิรันดร์ วิทิตอนันต์ : 2542.) ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีฟิล์มบางถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กโทรนิกส์ อาทิเช่น เลนส์ (Optics), แม่เหล็ก(Magnetic), การเคลือบต้านทานการการกัดกร่อน(Corrosion Resistant Coatings), ไมโคร-กลศาสตร์ (Micro-mechanics) รวมทั้งยังมีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรม Semiconductor Fabrication (อนันต์ บรรหารสกุล. 2549.)

สำหรับเทคนิคการเคลือบด้วยการระเหยของแข็งและทำการระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron Beam Evaporation) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในงานศึกษาวิจัยนี้เป็นกระบวนการที่อะตอมหรือโมเลกุลจากแหล่งกำเนิดความร้อนระเหยไปยังฐานรองรับโดยปราศจากการชนกับโมเลกุลของก๊าซที่ตกค้าง (Residual Gas) ภายในห้องเคลือบ (Deposition Chamber) สารเคลือบหลุดออกมาในรูปของไอฟุ้งกระจายไปจับตัวและควบแน่นเป็นชั้นบางๆ ของสารเคลือบบนผิวหน้าของชิ้นงาน ปัจจัยสำคัญในการเคลือบฟิล์มบางคือ อุณหภูมิของชิ้นงาน อัตราการระเหยสาร สภาวะแวดล้อมของสุญญากาศ เช่น ความดัน (Pressure) ชนิดของก๊าซ (Gas Species) ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ จะต้องถูกเฝ้าระวังและควบคุม

จากการรวบรวมข้อมูลปัญหาที่เกิดขึ้นในโรงงานอุตสาหกรรมเคลือบผิวฟิล์มบางพบว่า ประเภทของงานเสีย (Defect) ที่เกิดขึ้นมีหลายประเภท โดยปัญหาฟิล์มลอกเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นแล้วมีความเสียหายมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 100 ของความเสียหายที่เกิดขึ้นทั้งหมด อีกทั้งมีการร้องเรียนจากลูกค้า(Claim)ให้มีการหาสาเหตุและแก้ไขปัญหาดังกล่าวอยู่อย่างต่อเนื่อง

จากปัญหาที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ผู้วิจัยจึงศึกษาผลกระทบของ อุณหภูมิชิ้นงาน ความดันสุญญากาศ และ อัตราการระเหยสาร ที่ส่งผลต่อการลอกของฟิล์มบางในกระบวนการเคลือบแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์สำหรับอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิ โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง ทั้งนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้มาใช้พัฒนางานด้านการเคลือบผิวฟิล์มบางและนำไปสู่การสร้างผลิตภัณฑ์งานเคลือบผิวฟิล์มบางด้านอื่นๆได้ในอนาคต อีกต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของ อุณหภูมิชิ้นงาน ความดันสุญญากาศ และอัตราการระเหยสาร ที่ส่งผลต่อการลอกของฟิล์มบางในกระบวนการเคลือบแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์สำหรับอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิ

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

อุณหภูมิชิ้นงาน ความดันสุญญากาศ และ อัตราระเหยสาร มีผลกระทบต่อการลอกของ ฟิล์มบางในกระบวนการเคลือบแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์สำหรับอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิ

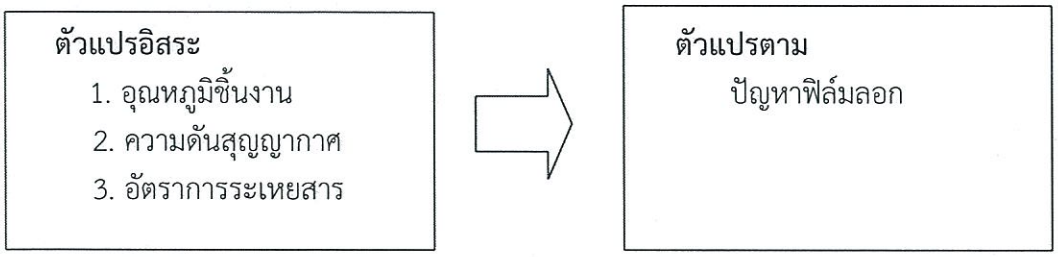
1.4 กรอบความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปัญหาฟิล์มลอกของซิลิคอนเวเฟอร์ในการเคลือบผิวฟิล์มบางสำหรับอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิ โดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองโดยใช้กรอบความคิดการออกแบบการทดลอง ของ ประไพศรี และ พงศ์ชนัน (2551:7-8) มาใช้ในการวิจัยดังนี้

1. กำหนดปัญหาที่ต้องการจะแก้ไข
2. เลือกปัจจัย ระดับ และขอบเขต
3. เลือกตัวแปรตอบสนอง
4. เลือกแบบแผนการทดลอง
5. ทำการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล
6. การวิเคราะห์ทางสถิติ
7. การสรุปผลการทดลองเพื่อยืนยันผลและข้อเสนอแนะ

ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาผลกระทบจาก อุณหภูมิชิ้นงาน ความดันสุญญากาศ และอัตราการระเหยสาร ที่ส่งผลต่อการลอกของฟิล์มบางในกระบวนการเคลือบแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์สำหรับอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิ โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองโดยได้กำหนดกรอบความคิดในการศึกษาและวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อปัญหาดังกล่าว ดังแสดงไว้รูปที่ 1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 กรอบความคิดในการวิจัย

การศึกษาและวิเคราะห์ ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปัญหาฟิล์มลอกของซิลิคอนเวเฟอร์ในการเคลือบผิวฟิล์มบางสำหรับอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิครั้งนี้ ผู้วิจัยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial) ชนิด 2^3 แฟคทอเรียล คือมีปัจจัยทั้งสิ้น 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ และมีการทดลองซ้ำ (Replicate) 2 ครั้ง โดยแต่ละการทดลองจะใช้จำนวนการทดลองครั้งละ 2 ชิ้น โดยทดลองทั้งหมดจำนวน 16 การทดลอง จากนั้นทำการบันทึกผลที่เกิดขึ้น และกำหนดการวิเคราะห์ผลที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ค่านัยสำคัญ $(\alpha) = 0.05$ โดยอ้างอิงรูปแบบการวิเคราะห์ตามหลักการแฟคทอเรียลเต็มรูป

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับความหมาย ทฤษฎีและงานวิจัยที่ เกี่ยวข้องจึงได้กำหนดตัวแปรอิสระ (Independent Variable) และตัวแปรตาม (Dependent Variable) ที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

ตัวแปรอิสระ ประกอบด้วยตัวแปรด้านต่าง ๆ ดังนี้

1. อุณหภูมิชิ้นงาน
2. ความดันสุญญากาศ
3. อัตราการระเหยสาร

ตัวแปรตาม

ปัญหาฟิล์มลอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

1.6.1 ประชากรที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ได้แก่แผ่นซิลิคอนเวเฟอร์เปล่า (Blank Silicon Wafer) ของโรงงานอุตสาหกรรมเคลือบผิวฟิล์มบาง ขนาด 6 นิ้ว จำนวน 56 ชิ้น

1.6.2 กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์เปล่าของโรงงานอุตสาหกรรมเคลือบผิวฟิล์มบาง ขนาด 6 นิ้ว ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปและมีการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ซึ่งผู้วิจัยสุ่มตัวอย่างโดยวิธีการสุ่มอย่างง่าย (Simple Random Sampling) จำนวน 32 ชิ้นจากประชากรทั้งหมด ซึ่งเป็นหลักการของการวิจัยของการวิจัยเชิงทดลอง ซึ่งต้องมีประชากรกลุ่มตัวอย่างอย่างน้อย 20 ตัวอย่าง (นงลักษณ์ วิรัชชัย. 2543: 38)

1.7 คำนิยามศัพท์เฉพาะที่ใช้ในการวิจัย

เพื่อความเข้าใจอันถูกต้องตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยจึงได้ให้คำนิยามคำศัพท์ที่ใช้ในการวิจัยดังต่อไปนี้

1.7.1 ซิลิคอนเวเฟอร์สำหรับอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิ หมายถึง แผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ที่ทำการเคลือบผิวฟิล์มบางเพื่อนำมากรองแสงอินฟาเรดของอุปกรณ์เซ็นเซอร์ในการตรวจจับอุณหภูมิ

1.7.2 แผ่นซิลิคอนเวเฟอร์เปล่า หมายถึง แผ่นเวเฟอร์ผลิตมาจากแผ่นซิลิคอนบริสุทธิ์ถึงร้อยละ 99.99 โดยอยู่ในรูปผลึกเดี่ยว จากนั้นจะตัดแท่งซิลิคอนออกมาเป็นแผ่นๆมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6 นิ้ว และหนาประมาณ 20 ไมครอน

1.7.3 การเคลือบผิวฟิล์มบางแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ หมายถึง กระบวนการการเคลือบและควบคุมความหนาของผิวฟิล์มบาง โดยจะทำการเคลือบในภาวะสุญญากาศ อาศัยการทำให้อะตอมสารเคลือบหลุดออกจากผิวสารเคลือบด้วยความร้อนหรือการถ่ายเทโมเมนตัมแล้วฟุ้งกระจายเข้าจับและยึดติดกับผิวแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ให้ได้ความหนาตามต้องการ

1.7.4 อุณหภูมิชิ้นงาน หมายถึง อุณหภูมิของแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ในห้องเคลือบมี หน่วยเป็นองศาเซลเซียส ผู้วิจัยได้กำหนดอุณหภูมิไว้ 2 ค่าคือที่ 80 องศาเซลเซียส กับ 180 องศาเซลเซียส

1.7.5 ความดันสุญญากาศ หมายถึง การสูบอากาศออกจากห้องเคลือบทำให้ระดับความดันภายในห้องเคลือบน้อยกว่าระดับความดันอากาศภายนอก เรียกสภาวะภายในห้องเคลือบนี้ว่าสภาวะสุญญากาศ ค่าความดันสุญญากาศภายในห้องเคลือบขณะทำการเคลือบมีหน่วยเป็นทอร์ (Torr) ผู้วิจัยได้กำหนดระดับความดันสุญญากาศไว้ 2 ค่าที่ $2.0E^{-5}$ ทอร์ กับ $2.7E^{-5}$ ทอร์

1.7.6 อัตราการระเหยสาร หมายถึง ระยะเวลาที่สารเคลือบใช้ในการเคลื่อนที่จากจุดกำเนิดไปยังแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ที่เคลือบ ผู้วิจัยได้กำหนดอัตราการระเหยของสารเคลือบไว้ 2 ค่าคือที่ 10 กับ 30 อังสตรอมต่อวินาที

1.7.7 ฟิล์มลอก หมายถึง สภาพการยึดติดที่ไม่ดีของผิวฟิล์มบางหลังการเคลือบทำให้เกิดการหลุดลอกของผิวฟิล์ม

1.7.8 การออกแบบการทดลอง หมายถึง การออกแบบทั่วไปของการทดลอง ซึ่งเกี่ยวข้องกับจำนวนและการจัดการตัวแปรอิสระ รวมทั้งการสุ่มหรือการเลือกตัวอย่างและการกำหนดเงื่อนไขในการทดลองเพื่อควบคุมตัวแปรแทรกซ้อน หรือตัวแปรเกินไม่ให้มีผลต่อตัวแปรตาม ผู้วิจัยได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป มีปัจจัยทั้งสิ้น 3 ปัจจัยแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ จึงได้ว่าเป็นการทดลองชนิด 2^3 แฟคทอเรียล และมีการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ทำการทดลองทั้งหมดเป็นจำนวน 16 การทดลอง โดยแต่ละการทดลองจะใช้จำนวนการทดลองครั้งละ 2 ชิ้น รวมทั้งสิ้น 32 ชิ้น แล้วทำการบันทึกผลที่เกิดขึ้น และกำหนดการวิเคราะห์ผลที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ค่านัยสำคัญ (α) = 0.05 โดยอ้างอิงรูปแบบการวิเคราะห์ตามหลักการแฟคทอเรียลเต็มรูป

1.7.9 ตัวแปรอิสระ หรือ ปัจจัย หมายถึงตัวแปรที่เกิดขึ้นก่อน และเป็นตัวแปรเหตุที่ทำให้ผลที่เกี่ยวข้องเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะหรือแปรสภาพไปผู้ วิจัยได้กำหนดปัจจัยสำหรับการทดลองไว้ 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิของชิ้นงาน ความดันสุญญากาศ และ อัตราการระเหยของสารเคลือบ 1.7.10 ระดับของปัจจัย หมายถึงชนิดย่อย ๆ หรือประเภทต่าง ๆ ของวิธีการ บางครั้งเรียกว่า ทรีทเมนต์ (Treatment) ผู้วิจัยได้กำหนดระดับของปัจจัยที่ ปัจจัยละ 2 ระดับ

1.7.11 ตัวแปรตาม หมายถึง ตัวแปรที่เกิดขึ้นทีหลัง หรือต้องเปลี่ยนแปรสภาพ หรือคุณลักษณะไปตามอิทธิพลของตัวแปรอิสระ ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปัญหาฟิล์มลอกผู้วิจัยได้กำหนดตัวแปรตามคือ ฟิล์มลอก

1.7.12 การทดสอบการยึดติดของผิวฟิล์ม หมายถึง กระบวนการทดสอบการยึดติดของผิวฟิล์มหลังการเคลือบด้วยกระบวนการดึงเทป โดยใช้ปากกาหัวเพชรกรีดลงบนผิวฟิล์มของแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ โดยการกรีด 10 เส้นในแนวตั้งและ 10 เส้นในแนวนอน จำนวน 100 ช่อง จากนั้น แปะเทปกาวแล้วดึงเทปจากนั้นติดลงไปที่กระดาษสีขาวโดยจะต้องไม่มีผิวฟิล์มหลุดลอกออกมา

1.7.13 ปากากรีดหัวเพชร (Diamond Pen) หมายถึง อุปกรณ์สำหรับกรีดผิวฟิล์มบางแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์เพื่อทดสอบการยึดติดของผิวฟิล์มหลังการเคลือบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปัญหาฟิล์มลอกของซิลิคอนเวเฟอร์ในการเคลือบผิวฟิล์มบางสำหรับอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิ เป็นการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองทางสถิติ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab14 เพื่อให้เกิดความเข้าใจมากขึ้นผู้วิจัยได้ลำดับหัวข้อการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อศึกษาข้อมูลต่างๆ ดังนี้

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับแสงอินฟราเรด
2.2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์
2.3 ทฤษฎีการเคลือบผิวฟิล์มบาง
2.4 การวิจัยเชิงทดลองและการออกแบบการทดลอง
2.5 การวัดผล
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับแสงอินฟราเรด

2.1.1 ความรู้เกี่ยวกับรังสีอินฟราเรด

รังสีอินฟราเรด หรือ คลื่นรังสีความร้อน (Infrared, IR) มีชื่อเรียกอีกชื่อว่า รังสีใต้แดง หรือรังสีความร้อน เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่างคลื่นวิทยุและแสงมีความถี่ในช่วง 1011 – 1014 เฮิร์ตซ์ มีความถี่ในช่วงเดียวกับไมโครเวฟ มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่างแสงสีแดงกับคลื่นวิทยุ สสารทุกชนิดที่มีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง -200 องศาเซลเซียสถึง 4,000 องศาเซลเซียส จะปล่อยรังสีอินฟาเรดออกมาคุณสมบัติเฉพาะตัวของรังสีอินฟราเรด เช่น ไม่เบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแต่ที่ แตกต่างกันก็คือคุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับความถี่คือยิ่งความถี่สูงมากขึ้นพลังงานก็สูงขึ้นด้วย ดังนั้นปัจจุบันมีการนำคลื่นรังสีอินฟราเรดมาใช้ประโยชน์ในการสร้างกล้องอินฟราเรดที่สามารถมองเห็นวัตถุในความมืดได้เช่นอเมริกาสามารถใช้กล้องอินฟราเรดมองเห็นเวียตกงได้ตั้งแต่สมัยสงครามเวียตนาม และสัตว์หลายชนิดมีนัยน์ตารับรู้รังสีชนิดนี้ได้ ทำให้มองเห็นหรือล่าเหยื่อได้ในเวลากลางคืน (หน่วยของความยาวคลื่นโดยปกติจะมีหน่วยเป็นไมโครเมตร (um))

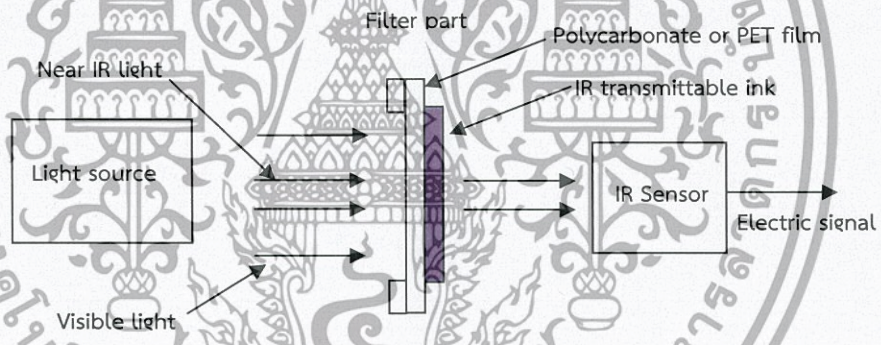
สรุปได้ว่า รังสีอินฟราเรด (infrared) คือ แสงที่มนุษย์เราไม่สามารถมองเห็นได้ เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ต่ำกว่าแสงสีแดง แหล่งกำเนิดของรังสีอินฟราเรด คือ ความร้อน (Heat) จะเกิดการแผ่รังสีความร้อนกับวัตถุใดก็ตามที่มีอุณหภูมิสูงกว่าค่า Absolute Zero หรืออุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ (-273.15 องศาเซลเซียส หรือ 0 องศาเคลวิน) เท่านั้น โดยจะมีการแผ่รังสีในย่านอินฟราเรดหรือรังสีความร้อนที่แผ่ออกมาจากพื้นผิวของวัตถุ แม้วัตถุนั้นจะเป็นไนโตรเจนเหลวที่มีอุณหภูมิอุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียล ก็ยังมีการแผ่รังสีอินฟราเรดออกมาได้ถึงแม้จะมีค่าน้อยก็ตามซึ่งในความเป็นจริงและในชีวิตประจำวันเราจะสัมผัสและเกี่ยวข้องกับรังสีอินฟราเรดอยู่ตลอดเวลา กล่าวคือ เรารู้สึกร้อนเมื่ออยู่กลางแสงอาทิตย์หรือใกล้ไฟ ถึงแม้ว่าตามนุษย์จะไม่สามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

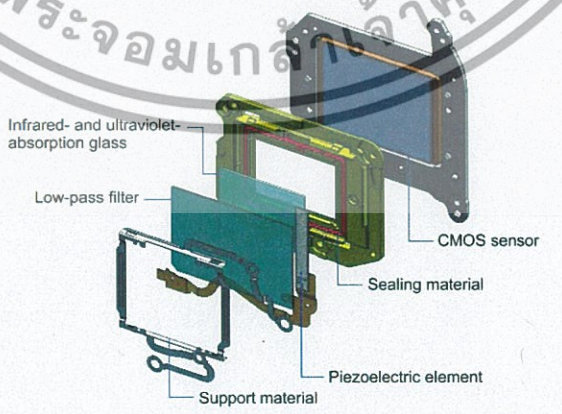
มองเห็นรังสีอินฟราเรดได้ แต่ผิวเราก็สามารถรู้สึกสัมผัสถึงความร้อนได้ นั่นแสดงให้เห็นว่าวัตถุที่ร้อนย่อมแผ่พลังงานรังสีความร้อนหรือรังสีอินฟราเรดออกมาได้มากกว่าวัตถุที่เย็น

2.1.2 การตรวจจับรังสีอินฟราเรด

กล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermal Image Camera, TI - Camera หรือ Thermography) เป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ ซึ่งเป็นการวัดแบบไม่สัมผัสและไม่ทำลายวัตถุและเป็นการวัดอุณหภูมิแบบพื้นที่ส่วนประกอบสำคัญของกล้องถ่ายภาพความร้อน ประกอบด้วย เลนส์ (Lens) ตัวตรวจจับรังสีอินฟราเรด (Infrared Detector) หรือเซนเซอร์ชนิดอินฟราเรด (Infrared sensor) วงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Circuit) และส่วนแสดงผล (Display) โดยมีหลักการทำงานดังนี้ ตัวตรวจจับรังสีอินฟราเรดทำหน้าที่รับรังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกจากวัตถุเป้าหมาย (Target) ผ่านเลนส์ของเครื่องมือวัด แล้วแปลงรังสีอินฟราเรดเหล่านี้ให้อยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้า โดยรังสีอินฟาเรดที่ตัวตรวจจับรับไปนั้นประกอบด้วยรังสีที่วัตถุเป้าหมายแผ่ออกมารวมกับรังสีที่แผ่จากวัตถุอื่นหรือจากสิ่งแวดล้อมสะท้อนออกจากผิวของวัตถุเป้าหมาย (ตามทฤษฎีการแผ่รังสีความร้อน: Theory of Thermal Radiation) จากนั้นวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะทำหน้าที่แปลงข้อมูลที่รับมาจากตัวตรวจจับและนำไปแสดงที่ตัวแสดงผล ซึ่งอาจแสดงผลออกมาในรูปแบบของตัวเลข สี หรือกราฟ หรือทั้ง 3 รูปแบบ

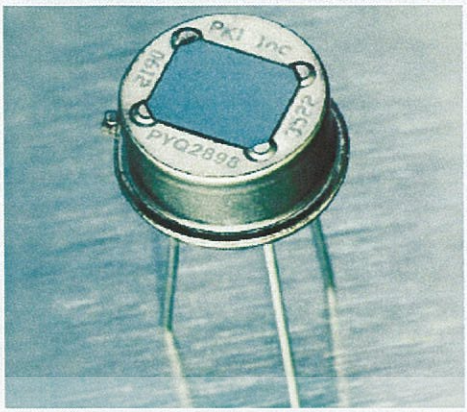


รูปที่ 2.1 แผนผังการทำงานของ Filter lens



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของเลนส์ ตัวตรวจจับรังสีอินฟราเรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ตัวตรวจจับรังสีอินฟราเรด

รูปที่ 2.4 แผนผังการทำงานของอุปกรณ์ภายในอินฟราเรดเซ็นเซอร์

2.2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์

แผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ผลิตมาจากแผ่นซิลิคอนเปล่าซึ่งขั้นตอนการผลิตเริ่มจากการสกัดซิลิคอนบริสุทธิ์ออกมาจากแร่ควอทซ (Quartz) ซึ่งทำได้ค่อนข้างยากเนื่องจากจุดหลอมเหลวของซิลิคอนสูงถึง 1,420 องศาเซลเซียส ทำให้ต้องใช้พลังงานความร้อนสูงมากและใช้ภาชนะที่ไม่ปล่อยสารปนเปื้อนออกมาเจือปนภายใต้อุณหภูมิสูงจากนั้นจึงปั่นซิลิคอนที่ร้อนมากจากสภาพของเหลวให้เป็นรูปทรงกระบอก ทั้งนี้ซิลิคอนที่จะนำมาใช้จะถูกทำให้บริสุทธิ์ถึงร้อยละ 99.99 โดยอยู่ในรูปผลึกเดี่ยว จากนั้นจะตัดแท่งซิลิคอนออกมาเป็นแผ่นๆ ให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6 นิ้ว และหนาประมาณ 20 ไมครอน ซึ่งหนาเป็น 2 เท่าของเส้นผม แล้วขัดแต่ละแผ่นให้เรียบจนเป็นเงา

ซิลิคอนเป็นธาตุกึ่งโลหะอยู่ในหมู่ที่ IVA เป็นผลึกสีเทาเป็นมันวาว มีโครงสร้างคล้ายเพชร มีเลขอะตอม 14 ไอโซโทปทั่วไปส่วนมากมีน้ำหนักอะตอม28 เป็นธาตุที่มีในธรรมชาติมากเป็นอันดับสองรองจากออกซิเจนคือประมาณร้อยละ 25.67 โดยมวล ซิลิคอนไม่พบในรูปอิสระมักพบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในแร่ควอตซ์และทรายในรูปของซิลิคอนไดออกไซด์ที่เรียกว่าซิลิกา(SiO2) เนื่องจากซิลิคอนเป็นสารกึ่งตัวนำจึงนำมาใช้ทำวงจรอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก เพื่อใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าเช่น ไมโครคอมพิวเตอร์ วิทยุ โทรทัศน์และใช้ทำเซลล์สุริยะซิลิกาใช้ทำแก้วทำส่วนประกอบของนาฬิกา ควอตซ์ในรูปซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) ใช้ทำเส้นใยแก้วนำแสงในรูปซิลิโคนซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของซิลิคอน เป็นสารที่ไม่รวมตัวกับน้ำไม่นำไฟฟ้าทนความร้อนและไม่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาใช้เป็นฉนวนไฟฟ้า และใช้เคลือบผิววัตถุเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาเคมี ซิลิคอนบริสุทธิ์ใช้ผลิตซิลิคอนบริสุทธิ์พิเศษสำหรับการประยุกต์ทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วยในสถานะบริสุทธิ์ ซิลิคอนนำไฟฟ้าไปยังส่วนขยายที่ขึ้นกับการขยายซึ่งมีการเพิ่มสารเจือปนการเพิ่มสารเจือปนให้กับซิลิคอนหรือวัสดุกึ่งตัวนำอื่นๆ เรียกว่าการเจือสาร (Doping) สารเจือปนบางชนิดผลิตซิลิคอนแบบ N-type ซึ่งตัวนำประจุส่วนใหญ่เป็นอิเล็กตรอนที่มีประจุลบ ผลลัพธ์สารเจือปนอื่นในการผลิตซิลิคอนแบบ P-type ซึ่งตัวนำประจุส่วนใหญ่เป็นหลุมที่มีประจุบวก อุปกรณ์ซิลิคอนส่วนใหญ่บรรจุวัสดุ N-type และ P-type ซิลิคอนได้รับการนำไปใช้อย่างหลากหลายในชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ดังนี้

- Diode
- Light-Emitting Diodes (LED)
- อุปกรณ์ควบคุมไฟฟ้า
- ตัวจ่ายไฟฟ้า
- ระบบสวิทช์
- ตัวจับแสง (Photo Detector)
- ทรานซิสเตอร์ขั้วคู่ (Bipolar Transistor)
- Field-Effect Transistor
- วงจรรวม (Integrated Circuit)

รูปที่ 2.5 แท่งซิลิคอนที่ถูกตัดเป็นแผ่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ทฤษฎีการเคลือบผิวฟิล์มบาง

การเคลือบผิวฟิล์มบางในสุญญากาศครั้งแรก เกิดขึ้นในปี คศ.1852 โดย Bunsen และ Grove โดยมีแนวความคิดพื้นฐานจากการเคลือบผิวฟิล์มบาง คือ การเรียงตัว โดยการตกตะกอนทับถมกันของสารเคลือบในลักษณะของอะตอมเดี่ยวบนวัสดุรองรับจนเกิดเป็นชั้นของฟิล์มบาง โดยฟิล์มที่ได้จะบางมาก ระดับไมครอน ผิวเคลือบที่ได้นี้ เป็นผิวที่มีความเรียบสูง และมีแรงยึดเกาะชิ้นงานที่ดีมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งชิ้นงานที่ถูกเตรียมผิวก่อนการเคลือบอย่างเหมาะสม ดังนั้นคุณสมบัติต่างๆของผิวเคลือบ เช่น การยึดติด ความเค้นของฟิล์ม สมบัติเชิงกล ความหนาของฟิล์ม ความหนาแน่น ความพรุน และความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งการสะท้อนแสง และการส่งผ่านแสงขึ้นอยู่กับวัสดุของผิวเคลือบด้วย เทคโนโลยีการเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นในสหภาพโซเวียต ในช่วงสงครามเย็นเพื่อใช้ในทางการทหาร เทคโนโลยีอวกาศ และเทคโนโลยีนิวเคลียร์ และด้วยประสิทธิภาพของระบบนี้ทำให้สหภาพโซเวียตล้ำหน้าตะวันตก ไปในยุคทศวรรษที่ 70 ในการใช้งานการเคลือบผิวด้วยฟิล์มบาง ทางอุตสาหกรรม เพื่อต้านทานการสึกหรอของเครื่องจักรกล จนกระทั่งโลกตะวันตกต้องยอมรับ และซื้อเทคโนโลยีจากรัสเซียมาใช้ในงานด้านนี้อยู่จนปัจจุบัน

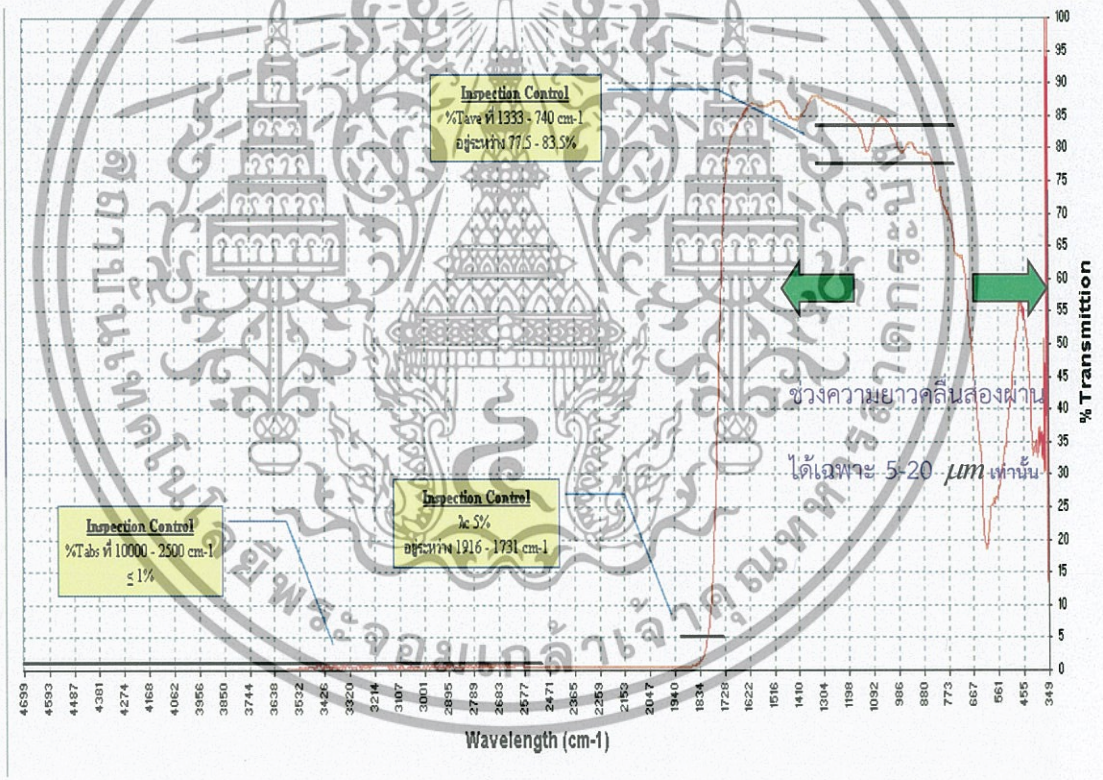
2.3.1 ความรู้เกี่ยวกับการเคลือบผิวฟิล์มบาง

การเคลือบผิวฟิล์มบาง หรือ โค้ทติ้ง คือคำศัพท์รวมๆที่เรียกวัสดุที่ใช้ปกปิดพื้นผิวงานที่เราต้องการจะปกป้องจากสภาวะการใช้งาน การกัดกร่อน สภาวะแวดล้อมจากธรรมชาติ ฯลฯ หรือเพื่อเปลี่ยนแปลงและปรับปรุงสมบัติของวัสดุให้เป็นไปตามที่ต้องการ การเคลือบผิวฟิล์มบางสามารถทำได้ทั้งจากกระบวนการทางเคมีหรือกระบวนการทางฟิสิกส์โดยพื้นฐานแล้วกระบวนการเคลือบฟิล์มบางมีขั้นตอนที่สำคัญคือเริ่มจากระบบสุญญากาศ การสร้างสารเคลือบในรูปของอะตอม โมเลกุล หรืออนุภาค จากนั้นเป็นการเคลื่อนย้ายสารเคลือบมายังวัสดุรองรับสุดท้ายสารเคลือบจะมีการควบแน่นและเกิดกระบวนการพอกพูนและโตของชั้นฟิล์มบางบนวัสดุรองรับ แผนผลึกที่ต้องการเคลือบจะวางอยู่ในแชมเบอร์ซึ่งเป็นสุญญากาศ โดยที่มีเครื่องสูบแบบโรตารี ทำหน้าที่ดูดอากาศออกจากแชมเบอร์จากความดันบรรยากาศจนมีค่า $\approx 10^{-3}$ ทอร์ จากนั้นเครื่องสูบแพร่น้ำมัน (Oil Diffusion Pump) ช่วงความดันนี้ใช้สำหรับการเคลือบแบบลำอิเล็กตรอน (Electron-Beam) ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันการเคลือบผิวชิ้นงานส่วนใหญ่จะนิยมใช้วิธีทางเคมี เช่น การเคลือบด้วยไฟฟ้า แต่การเคลือบวิธีนี้มีข้อเสียคือคุณภาพของผิวเคลือบต่ำอีกทั้งยังมีปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม จึงมีการวิจัยและพัฒนาเทคนิคการเคลือบใหม่ทดแทนได้แก่ “การเคลือบในสุญญากาศ เนื่องจากการเคลือบนี้เกิดขึ้นเฉพาะในสุญญากาศและไม่ใช้สารเคมีที่จะทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ในกระบวนการเคลือบในสุญญากาศการเคลือบผิวฟิล์มบางจะกระทำกันในเตาสุญญากาศสูง สารตั้งต้นจะถูกกระทำให้เป็นไอในระบบสุญญากาศโดยวิธีต่างๆทางฟิสิกส์แล้วไอสารนั้นซึ่งมีได้ทั้ง atom, ion ฯลฯ จะตกตะกอนลงบนพื้นผิวที่ต้องการ ทั้งในแบบเกิดปฏิกิริยา และไม่เกิดปฏิกิริยา เพื่อสร้างสารเคลือบต่างๆ ตามความต้องการของผู้ใช้งาน เช่น พลาสติก, โลหะทุกชนิด, กระเบื้อง, แก้ว, กระจก การเคลือบผิวฟิล์มบางไม่จำกัดว่าจะต้องเป็น ‘สี’ หรือมีสีสันเท่านั้น (มีลักษณะใส, มองทะลุได้) เช่นว่า ปูน, คอนกรีต, โลหะบางชนิด หรือแม้กระทั่ง แก้ว ก็มีการนำมาประยุกต์เป็นการเคลือบผิวฟิล์มบาง มาแล้วการเคลือบฟิล์มบางของสารเคมีลงบนแผ่นรองรับ เช่นแผ่นแก้วเพื่อเพิ่มการสะท้อนของแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

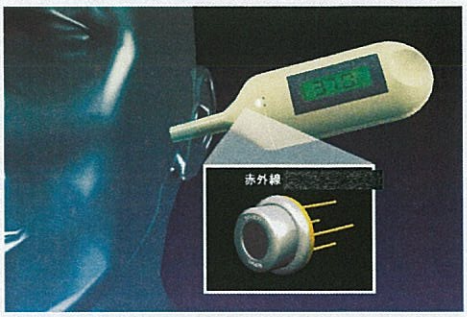
2.3.2 การเคลือบผิวฟิล์มบางแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์สำหรับอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิ

คือการเคลือบฟิล์มบางแบบหลายชั้น (Coating Multi-Layer) ลงบนผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์เป็นชั้นๆ เนื่องจากมีสมบัติของฟิล์มหลายค่าที่สัมพันธ์กับความหนาของฟิล์ม เช่น ความต้านทานไฟฟ้า การสะท้อนแสงและการส่งผ่านแสง จากคุณลักษณะเฉพาะของฟิล์มด้านการสะท้อนแสงและการส่งผ่านแสงดังกล่าว จึงมีการนำเทคโนโลยีการเคลือบผิวฟิล์มบางมาทำการเคลือบผิวฟิล์มบางแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ เพื่อนำมาใช้เป็นตัวกรองแสงอินฟาเรดสำหรับอุปกรณ์เซ็นเซอร์ โดยอาศัยคุณลักษณะเฉพาะที่สำคัญอย่างหนึ่งของฟิล์มบาง คือ การส่งผ่านแสง โดยใช้สารเคมีที่มีดัชนีการสะท้อนแสงที่แตกต่างกันเคลือบทับกันสลับชั้นกันไปเรื่อยๆโดยวิธีการใช้ไอระเหยของสาร ซึ่งถูกทำให้ระเหยโดยใช้ความร้อนลอยขึ้นไปติดยังผิวของแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ ซึ่งวิธีการทำให้สารระเหยโดยใช้ความร้อนมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี แต่ในการวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกศึกษาวิธีการระเหยของสารแบบระบบสุญญากาศ ด้วยวิธีลำแสงอิเล็กตรอน และในย่านความถี่ สำหรับช่วงความยาวคลื่นที่เคลือบสำหรับเป็นตัวกรองแสงอินฟาเรด สภาพการสะท้อนจะอยู่ในช่วงอินฟาเหรด ดังแสดงในรูปที่ 2.6

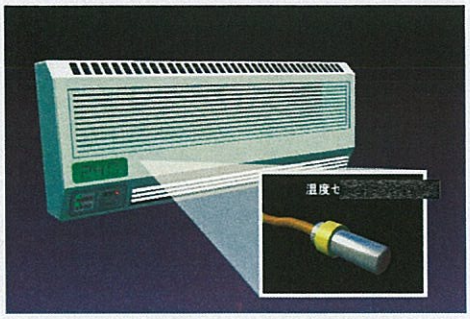


รูปที่ 2.6 กราฟของช่วงความยาวคลื่นอินฟาเรดสำหรับอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิของร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เซ็นเซอร์สำหรับอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิของร่างกาย



อุปกรณ์เซ็นเซอร์สำหรับเครื่องปรับอากาศ

รูปที่ 2.7 การใช้งานอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิ

2.3.3 เงื่อนไขของการเคลือบผิวฟิล์มบางระบบสุญญากาศ

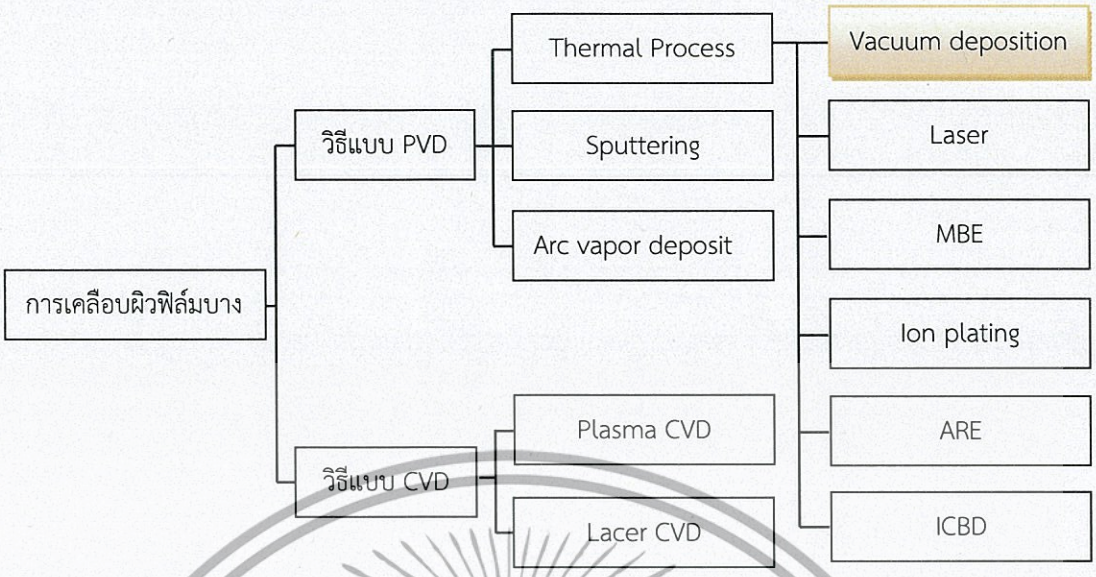
สิ่งสำคัญสำหรับการเคลือบผิวฟิล์มบางระบบสุญญากาศ ในด้านคุณสมบัติทางแสงคือการที่ทำให้คุณสมบัติพิเศษของฟิล์มบางตามที่ต้องการเป็นไปได้จริง เพื่อให้คุณสมบัติพิเศษของฟิล์มบางเป็นไปได้จริงจำเป็นต้องทำให้ปัจจัยต่างๆที่ใช้ในแต่ละกระบวนการมีความเหมาะสมมากที่สุด แม้จะเป็นกระบวนการเดียวกันก็ตามเงื่อนไขที่เหมาะสมอาจเปลี่ยนแปลงตามปัจจัยดังต่อไปนี้

1. ระดับแรงดันสุญญากาศขณะเคลือบ (Vacuum pressure)
2. อัตราการระเหยของสาร (Deposition rate)
3. อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของ (Substrate)
4. การแบ่งแรงดันของก๊าซที่ทำปฏิกิริยากับ Initial pressure
5. ขนาดของห้องเคลือบ (Chamber)
6. ระดับความเร็วในการดูดอากาศ (Exhaust time)
7. สภาพความสะอาดภายในห้องเคลือบ
8. เงื่อนไขสภาพแวดล้อมของการติดตั้งเครื่อง รวมถึงฤดูกาลเป็นต้น

2.3.4 ประเภทของการเคลือบฟิล์มบาง

การเคลือบในสุญญากาศแบ่งได้ 2 กลุ่ม ได้แก่กระบวนการทางเคมี (Chemical Vapor Deposition: CVD) เป็นเทคนิคที่ใช้ปลูกฟิล์มพวกไดอิเล็กตริกหรือผลึกโพลี เป็นการสร้างชั้นสารจากไอสารเคมี เป็นวิธีที่อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพแก๊สและเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นสารใหม่เคลือบบนวัสดุรองรับ ส่วนกระบวนการทางฟิสิกส์ (Physical Vapor Deposition : PVD) เป็นการปลูกฟิล์มของโลหะเป็นส่วนใหญ่ วิธีนี้อาศัยการทำให้อะตอมสารเคลือบหลุดออกจากผิวสารเคลือบแล้วฟุ้งกระจายเข้าจับและยึดติดกับ ผิวของวัสดุรองรับ โดยจะแบ่งการอธิบาย หลักการทำงานของการเคลือบฟิล์มบางดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แผนผังเทคนิควิธีการทำการเคลือบผิวฟิล์มบาง

ตารางที่ 2.1 การแบ่งเทคนิควิธีการทำการเคลือบผิวฟิล์มบาง

Group	Sub-group	Methods
Physical vapor deposition(PVD)	Thermal evaporation (TE)	Pulsed laser deposition (PLD)
		Electron beam deposition (EB-PVD)
	Sputter deposition	Magnetron sputtering
		Ion beam sputtering
	Are vapor deposition	Vacuum are deposition
		Filtered are deposition
	Ion implantation	Ion beam deposition (IBD)
Chemical vapor deposition(CVD)		Plasma enhanced CVD (PECVD)
		Plasma assistant CVD (PACVD)
		Electron cyclotron resonance CVD (ECR-CVD)

2.4 การวิจัยเชิงทดลอง และการออกแบบการทดลอง

2.4.1 การวิจัยเชิงทดลอง

การวิจัยเชิงทดลอง เป็นวิธีการแสวงหาความรู้อย่างมีระบบและมีเหตุมีผล การทดลองเป็นวิธีการทดสอบสมมติฐานอย่างหนึ่ง คือ เมื่อผู้วิจัยนิยามปัญหาที่จะวิจัยแล้วก็ตั้งสมมติฐาน ซึ่งสมมติฐานนี้อาจถูกหรือผิดก็ได้ การที่สมมติฐานจะได้รับการยืนยัน หรือไม่ได้รับการยืนยันจากข้อมูลขึ้นอยู่กับการควบคุมความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรว่ามีความถูกต้องเพียงใด จุดมุ่งหมายของการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชิงทดลอง ก็เพื่อพยากรณ์เหตุการณ์ที่ได้ผลจากการทดลอง และหาผลสรุปเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ (มั่นคง มณีรัตนรุ่งโรจน์ (2546 :6))

วิธีการดำเนินการวิจัยเชิงทดลอง ประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

1. การศึกษางานวิจัย หนังสือ บทความต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับปัญหาที่จะทำการวิจัย
2. กำหนดจุดมุ่งหมายและนิยามปัญหาที่จะทำอย่างชัดเจน
3. ตั้งสมมติฐาน นิยามคำศัพท์เฉพาะและตัวแปรให้ชัดเจน
4. สร้างแบบแผนการฝึกทดลองให้เป็นตัวแทนของข้อมูลทั้งหมด เลือกกลุ่มตัวอย่างที่เป็นตัวแทนของประชากรทั้งหมด เลือกแผนวิธีการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหา ระบุตัวแปรที่ไม่เกี่ยวข้องทั้งหมด คัดเลือกเครื่องมือในการวิจัย โดยพิจารณาถึงความเที่ยงตรงของเครื่องมือ แปลงสมมติฐานให้เป็นข้อมูลทางสถิติ
5. ดำเนินการทดลองและต้องควบคุมสิ่งต่างๆให้คงที่
6. กำจัดลักษณะการกระทำต่างๆ ที่อาจทำให้ได้ข้อมูลที่ผิดพลาดและมีอิทธิพลต่อการทดลอง
7. นำวิธีทางสถิติมาทดสอบสมมติฐานและพิจารณาประสิทธิภาพผลการวิจัยที่ได้

2.4.2 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment; DOE)

Sir Ronald A. Fisher เป็นผู้ค้นคิดการใช้วิธีการทางสถิติสำหรับการออกแบบการทดลองขึ้น ทั้งนี้เพราะว่า Sir Ronald A. Fisher ต้องเข้าไปมีส่วนรับผิดชอบทางด้านสถิติและการวิเคราะห์ข้อมูลที่สถานีทดลองทางเกษตรกรรมรอตทันสเตต กรุงลอนดอน ประเทศอังกฤษอยู่เป็นเวลานานหลายปี Sir Ronald A. Fisher เป็นทั้งผู้พัฒนาและเป็นบุคคลแรกที่นำเอาการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) มาใช้เป็นวิธีการเบื้องต้นในการวิเคราะห์ทางสถิติเกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง เป็นเทคนิคทางสถิติชั้นสูงที่ใช้ในการปรับค่าสภาวะของกระบวนการเพื่อให้ได้ผลตอบสนองเป็นไปตามที่เราต้องการ ซึ่งข้องแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดระหว่างวิธีการโดยทั่วไปกับเทคนิคที่ใช้การออกแบบการทดลองคือ วิธีการโดยทั่วไปมักใช้วิธีการแบบลองผิดลองถูก หรือ ใช้วิธีการปรับตั้งค่ากระบวนการที่ละคา (One-factor-at-a-time, OFAT) จะให้ผลตอบสนองเข้าสู่จุดหมายที่ต้องการได้ช้ามากและสิ้นเปลืองทรัพยากรในการวิเคราะห์ รวมถึงต้องเก็บข้อมูลมากและยังไม่เหมาะสมอย่างยิ่งกับกระบวนการที่มีอันตรกริยาระหว่างตัวแปรของกระบวนการด้วยกันเอง

การออกแบบการทดลองคืออะไร คือการทดสอบ หรือ ชุดของการทดสอบ เพื่อศึกษาผลของปัจจัยนำเข้า (Input) ต่อผลลัพธ์ที่สนใจคุณลักษณะทางคุณภาพ หรือ Quality Characteristics โดยการเปลี่ยนระดับของปัจจัยนำเข้าอย่างตั้งใจตามแผนการทดลองที่ออกแบบไว้ ทำให้เราสามารถประมาณผลของปัจจัยหนึ่งที่ระดับต่างๆ ของปัจจัยอื่นได้ รวมทั้งทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุผลตลอดเงื่อนไขของการทดลองได้ มีคำศัพท์ที่ต้องทราบดังต่อไปนี้

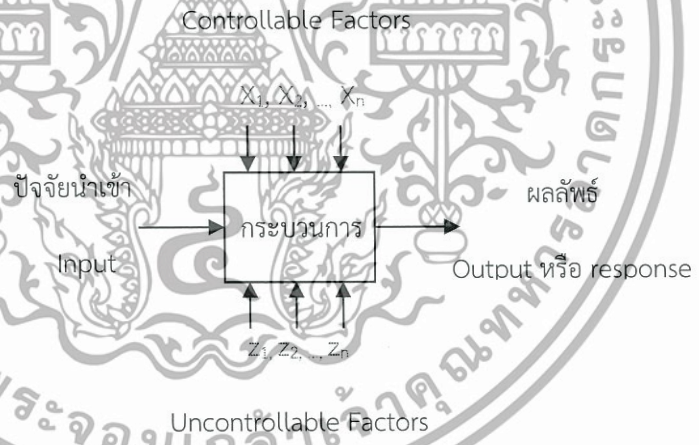
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัย (Factor) เป็นปัจจัยอิสระ (Independence) ที่ผู้วิเคราะห์สงสัยว่าจะส่งผลต่อผลลัพธ์ ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factor หรือ Noise Factor) แทนด้วย $z_1, z_2,..., z_n$ และปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factor) แทนด้วย $x_1, x_2,...x_n$ โดย DOE จะมุ่งเน้นที่การศึกษาเพื่อบ่งชี้ผลกระทบจากปัจจัยที่ควบคุมได้ต่อผลลัพธ์ที่สนใจ ในขณะที่ต้องการกระจายผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ไม่ให้ส่งผลต่อผลลัพธ์อย่างมีนัยสำคัญ ปัจจัยที่ควบคุมได้จะเรียกว่า ทรีตเม้นท์

จำนวนครั้งในการทำการทดลองซ้ำ (Replication) เป็นการทำการทดลองซ้ำด้วยเงื่อนไขที่เหมือนกัน โดยในการทดลองหนึ่ง ๆ จะมีจำนวนเงื่อนไขการทดลอง (Treatment Combination) เท่ากับผลคูณของจำนวนปัจจัยและจำนวนระดับของแต่ละปัจจัย เช่น การทดลองที่มี 2 ปัจจัย ๆ ละ 2 ระดับจะมีทั้งหมด 4 เงื่อนไขการทดลอง

ผลลัพธ์ที่สนใจ (Response) เป็นคุณลักษณะทางคุณภาพที่สนใจ ซึ่งเป็นปัจจัยไม่อิสระ (Dependence) ต้องการศึกษา ควบคุม ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญตามการเปลี่ยนแปลงของทรีตเม้นท์ต่าง ๆ

การสุ่ม (Randomization) เป็นส่วนหนึ่งของ DOE ที่พยายามให้ผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้กระจายอย่างสม่ำเสมอกับค่าผลลัพธ์ ที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 2.9 แบบทั่วไปของกระบวนการ

การออกแบบการทดลองเป็นเครื่องมือที่สำคัญอย่างหนึ่งของการควบคุมกระบวนเชิงสถิติ เช่น หากผลของการติดตามกระบวนการด้วยแผนภูมิควบคุมบ่งชี้ว่ากระบวนการ Out-Of-Control ซึ่งอาจมีปัจจัยจำนวนมากที่เป็นไปได้ที่จะเป็นสาเหตุของความผิดปกติ การที่จะปรับปรุง แก้ไขเพื่อนำกระบวนการกลับสู่ภาวะภายใต้การควบคุมจะเป็นไปได้ยากหากไม่ทราบว่าปัจจัยตัวใหนที่ส่งผลต่อ Response อย่างมีนัยสำคัญ การออกแบบการทดลองจึงเป็นเครื่องมือที่นิยมใช้เพื่อบ่งชี้ปัจจัยเหล่านี้ ทั้งนี้หากมีการประยุกต์หลักการของ DOE ตั้งแต่เริ่มต้นพัฒนาผลิตภัณฑ์จะนำไปสู่ผลการดำเนินการที่ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลจะสามารถทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีต่อกระบวนการและเกิดขึ้นพร้อมๆกันได้ เมื่อมีการทำการทดลอง ควรทำการเปลี่ยนค่าระดับปัจจัยไปพร้อมๆกันมากกว่าทำการเปลี่ยนค่าระดับปัจจัยตัวใดตัวหนึ่ง เพราะจะทำให้ได้งานที่มีประสิทธิภาพมากกว่าทั้งในเรื่องการประหยัดเวลาและต้นทุน และยังสามารถวิเคราะห์เรื่องอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยได้ด้วย โดยอิทธิพลร่วม คือผลของการที่ปัจจัยร่วมกันที่มีอยู่ในหลายๆกระบวนการ ถ้าไม่ได้ทำการทดลองแบบแฟคทอเรียลอาจจะไม่เห็นผลของอิทธิพลร่วม ได้ชัดเจนนัก ซึ่งการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลมีอยู่ ด้วยกันหลายแบบได้แก่

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k เป็นการออกแบบการทดลองในกรณีมีปัจจัย k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรืออาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพ เช่น เครื่องจักร คนงานและใน 2 ระดับที่กล่าวนี้จะแทนด้วยระดับสูงและต่ำของปัจจัยหนึ่ง ๆ ใน 1 เรพลิเคตที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้ จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น 2^k ข้อมูล การออกแบบการทดลองแบบนี้มีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่เราต้องการที่จะตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่ สามารถจะทำได้

2.4.3 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

เพื่อให้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DOE มีความน่าเชื่อถือ นำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นที่ผู้วิเคราะห์ต้องมีเป้าหมายการศึกษา ผลลัพธ์ที่สนใจ ปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อผลลัพธ์ วิธีการเก็บข้อมูล ตลอดจนแนวทางการวิเคราะห์ อย่างชัดเจน ซึ่ง Montgomery (2005) ได้สรุปแนวทางการศึกษาด้วย DOE ไว้ดังนี้

1. ศึกษาปัญหา
2. กำหนด Response ที่ต้องการศึกษา
3. กำหนดปัจจัยที่ต้องการควบคุม และ ระดับของปัจจัย
4. กำหนดรูปแบบการทดลอง
5. ทำการทดลอง และเก็บข้อมูล
6. วิเคราะห์ข้อมูล
7. สรุป และ นำเสนอแนวทางการปรับปรุง

การศึกษาปัญหา: ในขั้นตอนนี้ ผู้วิเคราะห์ต้องตระหนักว่าปัญหาคืออะไร ต้องการข้อมูลจากแหล่งใดบ้าง เพื่อกำหนดเป้าหมายของการศึกษาให้ชัดเจน การศึกษาในขั้นตอนนี้บ่อยครั้งที่พบว่ามีส่วนทำให้ผู้วิเคราะห์เข้าใจกระบวนการได้ดียิ่งขึ้น และนำไปสู่แนวทางการแก้ปัญหาในที่สุด ซึ่งการนิยามปัญหาจะเกี่ยวโยงไปถึงวัตถุประสงค์ของการทดลอง

การกำหนด Response ที่ต้องการศึกษา: เป็นขั้นตอนที่ผู้ทำการทดลองต้องกำหนดคุณลักษณะทางคุณภาพที่มั่นใจได้ว่าเป็นสิ่งที่ต้องการปรับปรุงของกระบวนการที่ทำการศึกษาอยู่ อาจเป็นผลมาจากการทำ SPC ทั้งนี้ต้องมั่นใจได้ว่าระบบการวัดมีความสามารถเพียงพอ เนื่องจากระบบการวัดที่ไม่มีความสามารถจะทำให้การบ่งชี้ปัจจัยที่ส่งผลต่อ Responseไม่ชัดเจน เพราะผลการทดลองจะบ่งชี้ความแตกต่างของผลของปัจจัยได้เฉพาะปัจจัยที่ส่งผลสูง ๆ เท่านั้น ในขณะที่ปัจจัยที่ส่งผลระดับต่ำถึงปานกลางจะไม่สามารถแบ่งแยกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำหนดปัจจัยที่ต้องการควบคุม และ ระดับของปัจจัย: เป็นขั้นตอนที่ผู้ทำการทดลองต้องเลือกปัจจัยที่สงสัยว่าจะส่งผลต่อ Response พร้อมทั้งระดับของแต่ละปัจจัยที่ปรับเปลี่ยนได้ โดยต้องพิจารณาให้สอดคล้องกับสถาพการดำเนินการจริง ซึ่งจะต้องอาศัยข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญ และ/หรือ ประสบการณ์ทำงานที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ หากกำหนดจำนวนปัจจัย และระดับของปัจจัยไม่ครอบคลุมจะทำให้ไม่ได้ผลการทดลองที่นำไปสู่การแก้ปัญหาได้อย่างแท้จริงในขณะที่การกำหนดจำนวนและระดับของปัจจัยมากเกินไปจะส่งผลต่อต้นทุน และเวลาในการทดลอง อย่างไรก็ตามกรณีที่มีจำนวนปัจจัยที่เกี่ยวข้องจำนวนมากผู้ทำการทดลองสามารถคัดกรองปัจจัยต้องการการทดลองเบื้องต้นหรือ Screening Experiment ก่อนที่จะดำเนินการทดลองโดยละเอียดกับปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อ Response อย่างแท้จริงต่อไป

การกำหนดรูปแบบการทดลอง: เมื่อ 3 ขั้นตอนแรกทำอย่างถูกต้องขั้นตอนนี้จะไม่ยุ่งยากนัก ผู้ทำการทดลองต้องเลือกรูปแบบ (Design) ของการทดลอง ซึ่งรวมถึงขนาดตัวอย่าง จำนวนครั้งในการทำการทดลองซ้ำ (จำนวน Replication) การกำหนดลำดับการทดลองอย่างสุ่ม เป็นต้น

การทดลองและการเก็บข้อมูล: ผู้ทดลองต้องควบคุมการทดลองให้เป็นไปตามแผนที่วางไว้ ความผิดพลาดทั้งจากการทดลองและการเก็บข้อมูล จะส่งผลให้การทดลองไม่น่าเชื่อถือ และไม่สามารถนำไปวิเคราะห์ได้ เช่นการไม่ทำการทดลองตามหลักการของการสุ่มจะส่งผลให้อิทธิพลของ Noise Factors ไม่กระจายเฉลี่ย ทำให้ผลของการทดลองแต่ละครั้งขึ้นอยู่กับผลการทดลองครั้งก่อนหน้าหรือครั้งอื่นๆ (ไม่อิสระต่อกัน) หรือมี Autocorrelation ระหว่างข้อมูลจากการทดลอง เป็นต้น

การวิเคราะห์ข้อมูล: การวิเคราะห์ข้อมูลทำตามหลักการของการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis Of Variance, ANOVA) การวิเคราะห์ด้วยกราฟ การวิเคราะห์สมการเส้นถดถอย ทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น ในการวิเคราะห์จริงผู้วิเคราะห์มีซอร์ฟแวร์ทางสถิติช่วยในการวิเคราะห์หลากหลายชนิด แต่อย่างไรก็ตามผู้วิเคราะห์ควรเข้าใจหลักการทางสถิติเพื่อการแปรความหมายที่ถูกต้องด้วย

การสรุปและนำเสนอแนวทางการปรับปรุง: เมื่อทราบผลการวิเคราะห์ การสรุปผลและแนะนำการดำเนินการเพื่อปรับปรุงเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่ง ผู้วิเคราะห์อาจใช้เครื่องมือเช่น กราฟ เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ต่าง ๆ และผลที่คาดว่าจะได้รับจากการปรับปรุงแก่ผู้ที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้ควรมีการทดลองเพื่อยืนยันข้อแนะนำการปรับปรุงอีกครั้งก่อนการประยุกต์ใช้จริง นอกจากนี้ควรมีการตรวจติดตามผลการปรับปรุงด้วยเครื่องมือของ SPC ที่เหมาะสมต่อไปด้วย

จากขั้นตอนทั้งหมด ขั้นตอนที่ 1 – 3 เป็นขั้นตอนการเตรียมการทดลอง ซึ่งต้องดำเนินการอย่างระมัดระวังเพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดขึ้น และได้ผลการทดลองที่มีความน่าเชื่อถือ นำไปสู่การปรับปรุงได้อย่างแท้จริง โดยการดำเนินการตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 – 7 สามารถทำเป็นรอบ ๆ ได้ จากการทดลองเพื่อคัดกรองปัจจัย (Screening Experiment) การทดลองโดยละเอียดเพื่อบ่งชี้ปัจจัยที่ส่งผลต่อ Response อย่างแท้จริง (Refining Experiment) และการทดลองเพื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่มีผลอย่างเหมาะสม (Optimizing Experiment) ความผิดพลาดที่พบบ่อยในการนำ DOE ไปใช้กับงานจริงคือผู้ทดลองพยายามที่จะทำการทดลองขนาดใหญ่เพียงครั้งเดียว และสรุปผลให้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะเป็นสาเหตุของความผิดพลาดต่าง ๆที่ตามมาเช่น ข้อมูลที่ได้ไม่เป็นอิสระต่อกัน ความผันแปรของข้อมูลไม่คงที่ตลอดการทดลอง เป็นต้น

ข้อดีในการใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

1. เป็นวิธีการที่น่าเชื่อถือที่ใช้ในการคัดเลือกปัจจัยที่นิยมใช้กันมากที่สุด
2. สามารถวิเคราะห์อันตรกริยาได้ทุกปัจจัย
3. ใช้เวลาในส่วนการวางแผนการศึกษาและวิเคราะห์ผลลัพธ์น้อย

ข้อเสียในการใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

1. ใช้จำนวนการดำเนินงานมาก ถ้ามีปัจจัยที่ต้องการศึกษามาก
2. ไม่สามารถวิเคราะห์อิธิพลของปัจจัยที่เป็นเชิงพนุนามได้

2.4.4.การทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Design)

เป็นการออกแบบที่กำหนดให้มีการทดสอบทุก ๆ ทางเลือกที่เป็นไปได้ (Combinations) ของปัจจัยทั้งหมด ซึ่งทำให้สามารถประมาณอิทธิพลของปัจจัยต่อ Response ได้ทั้งแบบ Main Effect และInteraction แต่การออกแบบการทดลองแบบนี้ ต้องการเวลาและทรัพยากรในการทดลองมาก โดยเฉพาะเมื่อจำนวนปัจจัยมีมากขึ้น การออกอาจแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะตามจำนวนระดับของแต่ละปัจจัย คือ

1. เมื่อจำนวนระดับของแต่ละปัจจัยมากกว่า 2 ระดับขึ้น และ
2. เมื่อจำนวนระดับของแต่ละปัจจัยเท่ากับ 2 ระดับ ในกรณีที่ 2 จะใช้สัญลักษณ์ 2^k Design โดยเลข 2 แทนจำนวนระดับของแต่ละปัจจัย และ k แทนจำนวนปัจจัยที่พิจารณาในการทดลอง ในการทดลองจะมีสัญลักษณ์ที่เกี่ยวข้องคือ

ระดับของปัจจัย A สามารถปรับเปลี่ยนได้ จากระดับ 1, 2, ..., a แทนด้วย i
ระดับของปัจจัย B สามารถปรับเปลี่ยนได้ จากระดับ 1, 2, ..., b แทนด้วย j
ระดับของปัจจัย C สามารถปรับเปลี่ยนได้ จากระดับ 1, 2, ..., c แทนด้วย k
จำนวนครั้งในการทำการทดลองซ้ำหรือ Replication แทนด้วย n

ผลการทดลองจากการทดลองที่ปัจจัย A, B และ C ระดับ i, j และ k ตามลำดับครั้งที่ n แทนด้วย y_{ijkn} ข้อมูลจากการทดลองกรณี 2 ปัจจัย A จำนวน a ระดับ และ ปัจจัย B จำนวน b ระดับ จะได้ดังตารางที่ 11.1

ตารางที่ 2.2 แสดงข้อมูลของการทดลอง 2 ปัจจัย

		ปัจจัย B			
		1	2	...	b
ปัจจัย A	1	$y_{111},y_{112},\ldots,y_{11n}$	$y_{121},y_{122},\ldots,y_{12n}$	...	$y_{1b1},y_{1b2},\ldots,y_{1bn}$
	2	$y_{211},y_{212},\ldots,y_{21n}$	$y_{221},y_{222},\ldots,y_{22n}$	...	$y_{2b1},y_{2b2},\ldots,y_{2bn}$
	⋮			⋮	
	a	$y_{a11},y_{a12},\ldots,y_{a1n}$	$y_{a21},y_{a22},\ldots,y_{a2n}$	...	$y_{ab1},y_{ab2},\ldots,y_{abn}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งสำคัญในการทำการทดลองตามที่ออกแบบไว้จะต้องไม่ลืมว่าการทดลองแต่ละครั้งต้องทำตามลำดับการสุ่ม จากกระบวนการสุ่มที่เหมาะสม มิฉะนั้นอาจส่งผลให้ผลการทดลองที่ได้ไม่สามารถนำไปวิเคราะห์และนำไปใช้ได้อย่างน่าเชื่อถือ เนื่องจากสมมติฐานของเทคนิคการวิเคราะห์ทางสถิติไม่เป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติผู้ทำการทดลองสามารถสร้างลำดับการทดลองแบบสุ่มโดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติเช่น Minitab เป็นต้น

2.4.5 การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing)

การทดลองสุ่มตัวอย่างผู้ทำการทดลองจะได้รับค่าสถิติต่างๆที่กำลังสนใจผ่านทฤษฎีการประมาณค่า (Parameter Estimation) เพื่อให้ค่าสถิติที่ได้รับจำกัดตัวอย่างมีความถูกต้องกับค่าจากพารามิเตอร์ของประชากรที่กำลังพิจารณาสนใจมากที่สุดรวมทั้งทราบถึงการแจกแจงความน่าจะเป็นในการเกิดขึ้นของสถิติต่างๆ จากกลุ่มตัวอย่างหลายๆ ชุดเหล่านั้นอีกทางหนึ่งด้วย นอกจากนี้การสุ่มตัวอย่าง และค่าสถิติที่ได้รับยังสามารถใช้ในการทดสอบเกี่ยวกับพารามิเตอร์ ของประชากรชุดเดียวกันกับตัวอย่างที่ทำการทดลองด้วยกระบวนการทดสอบทางสถิติว่าถูกต้องมาก หรือน้อยเพียงใดกับปัญหา หรือกระบวนการต่างๆ อย่างไรก็ตามมีปัญหาทางด้านวิศวกรรมหลายชนิดที่ต้องการตัดสินใจในการยอมรับหรือปฏิเสธข้อสมมติของพารามิเตอร์ของประชากรทั้งหมดข้อสมมติดังกล่าวจึงถูกเรียกว่า สมมติ ฐาน ขั้นตอนสำหรับกระบวนการตัดสินใจดังกล่าวจึงถูกเรียกว่า การทดสอบสมมติฐาน ดังนั้น สมมติฐาน จึงหมายถึง ข้อสมมติหรือข้อความที่เกี่ยวข้องกันของประชากรชุดเดียวหรือมากกว่าซึ่งอาจเป็นจริงหรือไม่ก็ได้อย่างไรก็ตามการทดสอบสมมติฐานว่าเป็นจริงหรือไม่เราไม่สามารถกระทำได้จากประชากรทั้งหมดอย่างทั่วถึงกลุ่มตัวอย่างจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมจากนั้นจึงอาศัยค่าสถิติต่างๆ ที่ได้รับจากกลุ่มตัวอย่างนั้นๆเข้าช่วยในการตัดสินว่าเป็นจริงหรือไม่อย่างไรสมมติฐานจะจริงหรือไม่ขึ้นอยู่กับหลักฐานที่มีอยู่และกฎเกณฑ์ที่กำหนดถ้าหลักฐานไม่สอดคล้องกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ก็ทำให้สรุปได้ว่าไม่ยอมรับสมมติฐานนั้น ถ้าหลักฐานสอดคล้องกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ ก็สามารถสรุปได้ว่าไม่มีเหตุผลในการปฏิเสธสมมติฐานนั้น

สมมติฐานที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อจุดมุ่งหมายที่ต้องการ เรียกว่า สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis) ซึ่งเขียนแทนด้วย H_0 การปฏิเสธ H_0 ก่อให้เกิดการไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานอื่นๆ (Alternative Hypothesis) เขียนแทนด้วย H_1 ตัวอย่างเช่นในกรณีที่มีความสนใจว่าอัตราการเผาไหม้โดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ50 เซนติเมตรต่อวิ นาที (cm/s)

$$\therefore\ H_0 : \mu = 50\ cm/s$$

$$H_1 : \mu \neq 50\ cm/s$$

ดังนั้นสมมติฐานที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อจุดมุ่งหมายที่ต้องการซึ่งในที่นี้คือ ค่าเฉลี่ยในการเผาไหม้เท่ากับ 50 เซนติเมตรต่อวินาที (cm/s) จึงถูกเรียกว่า สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis) ซึ่งเขียนแทนด้วย H_0 และการปฏิเสธ H_0 ก่อให้เกิดการไม่สามารถปฏิเสธ (หรืออีกนัยหนึ่ง คือ การยอมรับ) อีกสมมติฐานหนึ่ง (Alternative Hypothesis) ได้ ซึ่งเขียนแทนด้วย H_1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตัวอย่างที่กล่าวมากสมมติฐานอื่นๆ สามารถแยกออกได้สองกรณีย่อย คือ ค่าเฉลี่ยของการเผาไหม้มากกว่า 50 เซนติเมตรต่อวินาที หรือต่ากว่า 50 เซนติเมตรต่อวินาที ดังนั้นจึงเรียกการทดสอบสมมติฐานนี้ว่า การทดสอบสองข้าง (Two-Tailed Test) แต่ในบางสถานการณ์อาจมีความต้องการในการทดสอบเพียงข้างเดียว (One-Tailed Test) อาทิ

$$H_0 : \mu = 50\ cm/s \quad \text{หรือ} \quad H_0 : \mu \neq 50\ cm/s$$

$$H_1 : \mu < 50\ cm/s \qquad H_1 : \mu > 50\ cm/s$$

สิ่งที่พึงระวังในการทดสอบคือ สมมติฐานเป็นข้อความสมมติสำหรับประชากรไม่ใช่สำหรับกลุ่มตัวอย่าง โดยที่ ค่าของพารามิเตอร์ สำหรับประชากรสามารถวิเคราะห์ได้ เพื่อวัตถุประสงค์ใดวัตถุประสงค์หนึ่ง ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. เพื่อตรวจสอบว่าพารามิเตอร์ มีความเปลี่ยนแปลงอย่างไรหรือไม่โดยอาศัยประสบการณ์หรือความรู้ของกระบวนการหรือการทดสอบในอดีต
2. เพื่อทดสอบตัวแบบหรือทฤษฎีที่ถูกกำหนดขึ้น
3. เพื่อทดสอบประสิทธิภาพเบื้องต้นจากการกำหนดภายนอกไม่ว่าจะเป็นผลจากการออกแบบหรือการพิจารณาข้อกำหนดทางด้านวิศวกรรม (Engineering Specifications)

ขั้นตอนในการพิจารณาตัดสินใจสมมติฐานที่สนใจ หรือการทดสอบสมมติฐานอยู่บนพื้นฐานของข้อมูลต่างๆ ที่มีอยู่และได้รับจากกลุ่มตัวอย่างจากประชากรชุดเดียวกันกับที่กำลังสนใจถ้าข้อมูลสอดคล้องกับสมมติฐานเราสามารถกล่าวได้ว่า สมมติฐานเป็นจริงในทำนองกลับกันหากข้อมูลไม่สอดคล้องกับสมมติฐานเราอาจกล่าวได้ว่า สมมติฐานเป็นเท็จอย่างไรก็ตามในความเป็นจริงแล้วพารามิเตอร์ต่างๆไม่สามารถพราบได้อย่างแน่ชัด ถ้าไม่ได้ทำการตรวจสอบพิจารณาประชากรชุดนั้นทั้งหมดซึ่งเป็นสิ่งที่เป็นไปได้ยาก ดังนั้นเราจึงไม่สามารถหลีกเลี่ยงการทดสอบสมมติฐานได้ อย่างไรก็ตามการทดสอบดังกล่าวควรถูกนำมาพิจารณาควบคู่ไปกับการลดโอกาสในการสรุปผลผิดอันอาจเกิดขึ้นได้ไปพร้อมๆ กันในการทดสอบสมมติฐาน สมมติฐานหลักคือสมมติฐานที่เราต้องการทดสอบ การปฏิเสธสมมติฐานหลักนำไปสู่ การยอมรับสมมติฐานอื่นๆ ในตัวอย่างที่กล่าวมาถ้าต้องการทดสอบ

$$H_0 : \mu = 50\ cm/s \text{ แย้งกับ } \quad H_0 : \mu \neq 50\ cm/s$$

จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าสมมติฐานอื่นๆ นำมาซึ่งค่าของพารามิเตอร์ ที่สนใจหลากหลายค่า ดังนั้น การทดสอบสมมติฐานซึ่งเป็นการอาศัยกลุ่มตัวอย่างเพื่อใช้ในการคำนวณค่าสถิติทดสอบและใช้ค่าสถิติดังกล่าวเป็นตัวช่วยในการตัดสินใจเกี่ยวกับสมมติฐาน ดังนั้นในการตัดสินใจอาจเกิดการผิดพลาดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.6 สถิติสำหรับการวิจัย

สถิติจัดได้ว่าเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการดาเนินกิจกรรมต่างๆ ที่อยู่บนพื้นฐานของข้อมูลที่มีความถูกต้อง เป็นสิ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์หาเหตุผลความเป็นไปได้ การตัดสินใจเลือกแนวทางในการปฏิบัติ, การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรมรวมทั้งเป็นการพิสูจน์ความเป็นจริงของทฤษฎีที่ยังมีความสงสัย ทั้งนี้ทั้งนั้นต้องมีสมมติฐานสอดคล้องกันในทางวิทยาศาสตร์

การใช้งานของสถิติวิศวกรรมได้มีการประยุกต์ใช้ในหลากหลายสาขาอาชีพเพื่อเป็นเครื่องมือสำหรับการวิจัยในเรื่องต่างๆ ที่สนใจหรืออาจพูดได้ว่าเมื่อใดที่ต้องการการทดสอบเพื่อหาแนวทางการปรับปรุงและพัฒนาก็จะต้องมีสถิติเข้าไปเกี่ยวข้องในการนั้นเสมอ นั่นยอมหมายความว่าส่วนใหญ่ของการวิจัยจะมีสถิติเป็นส่วนประกอบอยู่ด้วยเสมอ เช่น การหาสาเหตุความบกพร่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต การควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์, การพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้มีคุณภาพที่ดีขึ้นหรือสูงขึ้นเพื่อเป็นการเพิ่มคุณค่าให้เหมาะสมกับการแข่งขันซึ่งอาจจะเป็นในลักษณะของการรักษาคุณภาพของงานให้คงที่แต่ทาการวิจัยให้ต้นทุนในกระบวนการผลิตลดลงหรืออาจลดเวลา หรือขั้นตอนในการผลิตโดยรักษาคุณภาพของงานให้คงเดิม หรืออาจจะเพิ่มคุณภาพของงานให้สูงขึ้น แต่ต้นทุนยังคงเท่าเดิม ซึ่งจะเห็นว่าในปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาไปสู่ “ซิกซิกม่า” นั่นก็คือเป็นการลดความคลาดเคลื่อนของงานในกระบวนการผลิตให้แคบลง ทาการควบคุมของเสียในปัจจุบันนับอยู่บนฐานต่อล้านชิ้น กว่าจะถึงเส้นทางนี้ได้ต้องมีการพัฒนากันอย่างต่อเนื่องหรือเป็นไปตามคากล่าวที่ว่า “พัฒนาไม่หยุดยั้ง” ซึ่งในการวิจัยและพัฒนานี้ต้องอาศัยปัจจัยที่มีความสาคัญประการหนึ่งนั่นคือ “สถิติวิศวกรรม”

การทดลองส่วนมากในทางปฏิบัติจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาถึงผลของปัจจัย (Factor) ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ในกรณีเช่นนี้ การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) จะเป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น ตัวอย่างเช่น กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลอง1 เรพลิเคต (Replicate) จะประกอบด้วยการทดลองทั้งหมด ab การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนามาจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบแบบเชิงแฟกทอเรียล เราจะกล่าวว่าปัจจัยเหล่านี้มีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน

ผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่ง หมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบ (Response) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้นๆ ซึ่งเรียกว่า ผลหลัก (Main Effect) เนื่องจากว่ามันเกี่ยวข้องกับปัจจัยเบื้องต้นของการทดลอง ตัวอย่างเช่น การทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย โดยที่แต่ละปัจจัยจะประกอบด้วย 2 ระดับ คือ ระดับ "ต่า" และ "สูง" ซึ่งจะแทนระดับทั้งสองด้วยเครื่องหมาย "-" และ "+" ตามลาดับ ผลหลักของปัจจัย A ในการทดลองนี้คือผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของผลตอบที่ระดับต่าและระดับสูงของปัจจัย A ซึ่งเขียนเป็นตัวเลขได้ว่า

$$A = (40+52)/2 - (20+30)/2 = 21$$

หมายความว่า การเพิ่มขึ้นของปัจจัย A จากระดับต่าไปสู่ระดับสูงจะทาให้ผลตอบเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 21 หน่วย ในทานองเดียวกัน จะสามารถคานวณหาค่าผลหลักของปัจจัย B ได้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$B = (30+52)/2 - (20+40)/2 = 11$$

ในการทดลองบางอย่าง เราอาจจะพบว่าความแตกต่างของผลตอบที่เกิดขึ้นบนระดับต่างๆของปัจจัยหนึ่งจะมีค่าไม่เท่ากันที่ระดับอื่นๆ ทั้งหมดของปัจจัยอื่น ซึ่งหมายถึงว่า ผลตอบของปัจจัยหนึ่งจะขึ้นกับระดับของปัจจัยอื่นๆ นั้นเอง และเราเรียกเหตุการณ์นี้ว่า การมีอันตรกิริยา(Interaction) ต่อกันระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ตัวอย่างเช่น พิจารณาการทดลองเชิงแฟกทอเรียลของปัจจัย 2 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ผลของปัจจัย A ที่ปัจจัย B อยู่ระดับต่ำ (B) มีค่าเป็น

$$A = 50 - 20 = 30$$

และผลของปัจจัย A ที่ปัจจัย B อยู่ที่ระดับสูง (B+) มีค่าเป็น

$$A = 12 - 40 = -28$$

เนื่องจากผลของปัจจัย A ขึ้นกับระดับของปัจจัย B ที่ถูกเลือก ดังนั้น เราจะกล่าวได้ว่า ปัจจัย A และ B มีอันตรกิริยาต่อกัน ขนาดของอันตรกิริยาจะเท่ากับค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของผลของปัจจัย A ที่ระดับต่างๆ ของปัจจัย B ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$AB = (-28 - 30)/2 = -29$$

ซึ่งเห็นได้ว่า ค่าอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย A และ B ในที่นี้มีค่าสูงแนวคิดดังกล่าวสามารถแสดงได้ด้วยกราฟ รูปที่ 2.12 แสดงเป็นกราฟระหว่างผลตอบของปัจจัย A ที่ระดับทั้งสองของปัจจัย B จะเห็นว่าเส้นของ B- และ B+ จะประมาณได้ว่าขนานกันซึ่งลักษณะของกราฟเช่นนี้จะบ่งถึงการไม่มีอันตรกิริยาซึ่งกันและกันของปัจจัยทั้งสอง ในทานองเดียวกัน รูปที่ 2.13 เป็นการพล็อตข้อมูลของรูปที่ 2.11 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเส้น B- และ B+ ไม่ขนานกันและสามารถกล่าวได้ว่าปัจจัยทั้งสองมีอันตรกิริยาต่อกัน บ่อยครั้งที่กราฟลักษณะนี้จะถูกนามาใช้เพื่อแสดงถึงการมีนัยสาคัญ (Significant) ของอันตรกิริยา นอกจากนั้นแล้วยังสามารถใช้ในการรายงานหรือบรรยายให้แก่ผู้บริหารที่ไม่ได้รับการฝึกอบรมทางสถิติให้เกิดความเข้าใจได้ง่ายอีกด้วยอย่างไรก็ตาม กราฟเช่นนี้ไม่ควรนามาใช้แทนเทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลในทางสถิติ เพราะว่าการตีความจากกราฟค่อนข้างที่จะขึ้นกับความคิดเห็นส่วนบุคคล ซึ่งอาจจะทาให้เกิดความเข้าใจผิดหรือวิเคราะห์ผิดพลาดได้

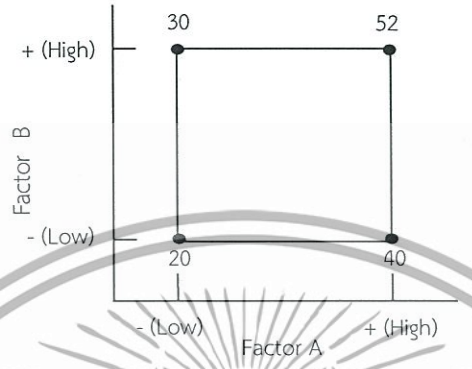
ตามปกติแล้วเมื่ออันตรกิริยามีค่าสูง ผลหลักจะมีความหมายน้อยมากในทางปฏิบัติ จากตัวอย่างในรูปที่ 2.9 จะเห็นว่าผลหลักของปัจจัย A มีค่าเท่ากับ

$$A = (50 + 12)/2 - (20 + 40)/2 = -1$$

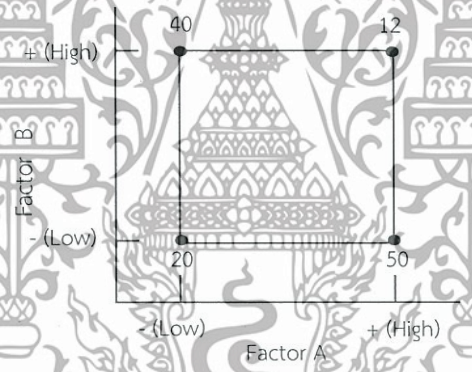
ซึ่งมีค่าต่ามาก และโน้มน้าวให้เราสรุปว่า ผลจากปัจจัย A นั้นไม่มีนัยสาคัญ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงผลของปัจจัย A ที่ระดับต่างๆ ของปัจจัย B แล้วจะพบว่า ในความเป็นจริงแล้วปัจจัย A มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลอย่างมีนัยสาคัญ แต่ผลของปัจจัย A นั้นจะขึ้นกับระดับของปัจจัย B ดังนั้น ความรู้เกี่ยวกับอันตรกิริยา AB จะมีประโยชน์มากกว่าความรู้เกี่ยวกับผลหลัก และในกรณีที่อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยมีนัยสาคัญ ผู้ทาการทดลองควรจะต้องพิจารณาผลตอบที่เกิดขึ้นที่ระดับต่างๆ ของปัจจัยหนึ่ง (เช่น A) โดยให้ระดับของปัจจัยอื่นคงตัว เพื่อที่จะหาข้อสรุปเกี่ยวกับผลที่เกิดจากปัจจัย A

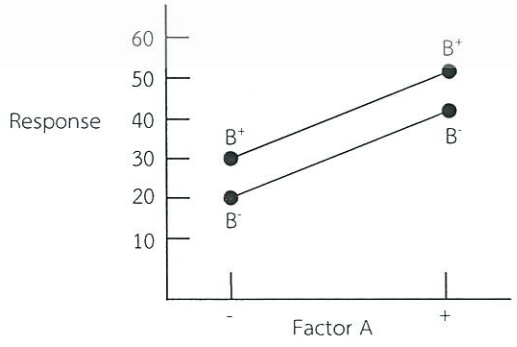


รูปที่ 2.10 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย (ปารเมศ, 2545)



รูปที่ 2.11 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย (มีอันตรกิริยา) (ปารเมศ, 2545)

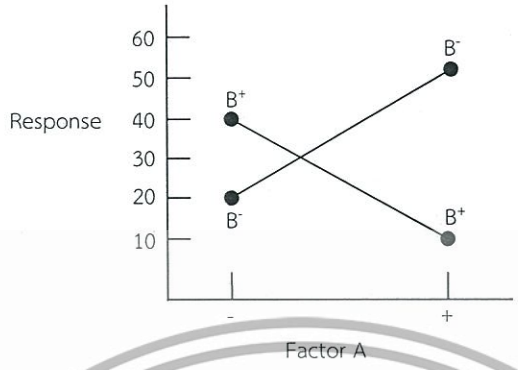
อิทธิพลร่วมของปัจจัยไม่มีผลต่อผลตอบสนอง



รูปที่ 2.12 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (ไม่มีอันตรกิริยา) (ปารเมศ, 2545)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิทธิพลร่วมของปัจจัยมีผลต่อผลตอบสนอง



รูปที่ 2.13 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (มีอันตรกิริยา) (ปารเมศ, 2545)

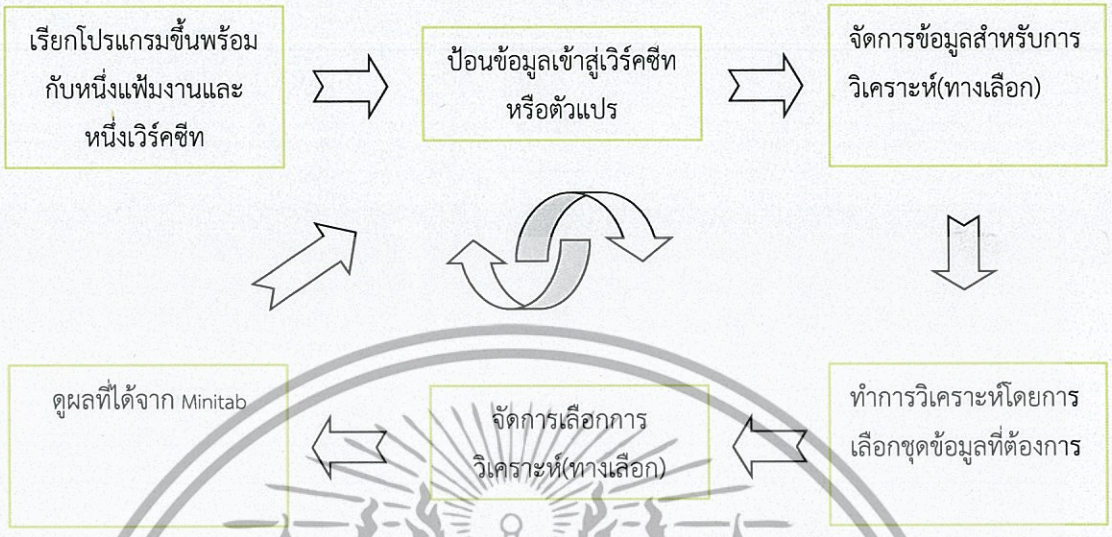
2.4.7 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลด้วยโปรแกรม Minitab

ความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ ซึ่งในปัจจุบันแทบจะเรียกได้ว่าเป็นส่วนหนึ่งของชีวิตประจำวันในการทำงาน ประกอบกับความรู้และทฤษฎีที่มีการประมวลที่ซับซ้อนมากขึ้น โดยโปรแกรม Minitab ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่เข้ามามีบทบาทเพื่อช่วยให้งานวิเคราะห์และประมวลผลสะดวกรวดเร็วยิ่งขึ้น หรือเป็นเครื่องมือที่ใช้ สร้างกราฟต่างๆ การประมวลผลทางสถิติ และสามารถนำเอาไปประยุกต์ใช้ได้กับงานอีกหลายประเภท ซึ่งส่วนใหญ่จะนำไปใช้เกี่ยวกับ งานประเภทอุตสาหกรรม ก็จะเกี่ยวกับงานที่เป็นด้านคุณภาพ โดยตัวโปรแกรม Minitab นี้จะใช้ประมวลค่าที่เป็นเชิงตัวเลข ให้เป็นกราฟ ให้ออกมาดูแล้วเข้าใจได้ง่ายกว่าตัวเลขและสามารถนำข้อมูลที่ออกมาเป็นกราฟต่างตามต้องการได้

Minitab คืออะไร Minitab เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปใช้ประมวลผลข้อมูลทางด้านสถิติ โดยพัฒนาจากกลุ่มนักวิชาการทางด้านสถิติมากว่า 30 ปีแล้ว Minitab เป็นโปรแกรมที่มีความโดดเด่นในด้านการใช้งานที่ง่ายและมีการพัฒนาปรับปรุงฟังก์ชันต่างๆ ให้สอดคล้องกับความรู้และทฤษฎีใหม่ๆ รวมถึงการประยุกต์ทางด้านสถิติโดยเฉพาะในงานด้านคุณภาพอย่างต่อเนื่อง ดังนั้น Minitab จึงเป็นที่รู้จักกันเป็นอย่างดีสำหรับกลุ่มผู้ที่พัฒนาปรับปรุงคุณภาพด้วยหลักการ ซิกซ์ ซิกม่า เนื่องจาก Minitab เป็นเครื่องมือที่สำคัญสำหรับกลุ่มผู้ใช้กลุ่มนี้ แต่ไม่ได้หมายความว่าจะจำเพาะกลุ่มผู้ใช้กลุ่มนี้เท่านั้น Minitab ยังเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในกลุ่มนักวิชาการ นักวิจัย นักวิทยาศาสตร์ และผู้ใช้สถิติทั่วไป ดังนั้น Minitab จึงถูกเลือกใช้ด้วยเหตุผลหลัก 3 ประการ คือ

1. ความซับซ้อนในการประมวลผล (Complexity)
2. ความเที่ยงตรงและแม่นยำในการประมวลผลข้อมูล (Accuracy)
3. ความรวดเร็วและความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 แสดงภาพรวมการใช้งานโปรแกรม Minitab

รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะหน้าตาโปรแกรม Minitab

การทำการทดลองแบบแฟคทอเรียลสำหรับโปรแกรม Minitab จะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ก่อนที่จะทำการใช้ Minitab ในการออกแบบการทดลอง จะต้องมีการทำการทดลองเบื้องต้นมาก่อนเพื่อการวางแผน ตัวอย่างเช่น จะต้องทำการหาปัจจัยที่คาดว่ามีอิทธิพลต่อค่าตอบสนอง

2. Minitab สามารถใช้เพื่อสร้างตัวแบบการทดลองใหม่ หรือใช้กับเวิร์คชีทที่มีข้อมูลอยู่แล้ว

• ใช้คำสั่ง Create Factorial Design เพื่อสร้างตัวแบบ Full หรือ Fraction Factorial และ Plackett-Burman

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

• ใช้คำสั่ง Define Custom Factorial Design เพื่อใช้ในการสร้างตัวแบบกรณีที่มีเวิร์คชีทที่มีข้อมูลอยู่แล้ว ซึ่งคุณสามารถที่จะปรับเปลี่ยนและกำหนดคอลัมน์ของปัจจัยและค่าต่างๆ เพื่อให้เหมาะกับตัวแบบและการวิเคราะห์ต่อไป

3. ใช้คำสั่ง Modify Design เพื่อทำการแก้ไขชื่อปัจจัย เปลี่ยนค่าระดับปัจจัย การสร้างค่าซ้ำ (replicate) การทำการสุ่มลำดับการทดลอง (Randomization) สำหรับ Two-Level Design สามารถใช้สร้าง Fold design เพิ่มรันที่จุด Axial Points และ เพิ่มรันที่ Center Point

4. ใช้คำสั่ง Display Design เพื่อทำการเปลี่ยนลำดับการทดลองของแต่ละรัน และหน่วย (ทั้งแบบที่เป็นค่าจริง (Uncoded) หรือค่ารหัส (Code) ซึ่ง Minitab ได้แสดงค่าไว้ของแต่ละปัจจัยในเวิร์คชีท

5. ทำการทดลองและเก็บค่าข้อมูล จากนั้นใส่ค่าข้อมูลในเวิร์คชีทของ Minitab

6. ใช้คำสั่ง Analyze Factorial Design เพื่อวิเคราะห์ค่าตอบสนอง (Response) ใช้คำสั่ง Analyze Variability เพื่อทำการวิเคราะห์ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) สำหรับกรณีที่มีการทำซ้ำ

7. ในกรณีที่จะทำการพล็อตกราฟเพื่อดูอิทธิพล (Effects) ใช้คำสั่ง Factorial Plots เพื่อทำการสร้างกราฟที่แสดงได้ทั้ง อิทธิพลหลัก (Main Effects) และอิทธิพลร่วม (Interaction Effects) และ Cube Plot สำหรับตัวแบบ Two-Level สามารถใช้คำสั่ง Contour/Surface Plots เพื่อแสดงกราฟ Contourและ Surface

8. ถ้าต้องการหาค่าที่ดีที่สุดของค่าตอบสนอง ใช้คำสั่ง Response Optimizer หรือคำสั่ง Overlaid Contour Plot เพื่อช่วยในการหาค่าที่ดีที่สุดโดยทำทั้งแบบตัวเลขและพิจารณาจากกราฟ

หมายเหตุ : ในแต่ละการทดลอง อาจจะมีลำดับของขั้นตอนต่างกัน หรือ อาจจะมีการทำซ้ำที่ขั้นตอนใดเพิ่ม หรือ บางขั้นตอนอาจจะไม่ต้องทำ

2.5 การวัดผล

การทดสอบการยึดติดของผิวฟิล์ม หมายถึง กระบวนการทดสอบการยึดติดของผิวฟิล์มหลังการเคลือบด้วยกระบวนการดึงเทป โดยใช้หัวเพชรกรีดลงบนผิวฟิล์มของแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ โดยการกรีด 10 เส้นในแนวตั้งและ 10 เส้นในแนวนอน จำนวน 100 ช่อง จากนั้น แปะเทปกาวแล้วดึงเทปจากนั้นติดลงไปที่กระดาษสีขาวโดยจะต้องไม่มีผิวฟิล์มหลุดลอกออกมา

2.5.1 วิธีการวัดผล วิธีการการตรวจวัดการลอกของผิวฟิล์ม ทำโดยการนำเทปกาวที่ติดลงไปที่กระดาษสีขาว มาเทียบพื้นที่การลอกของผิวฟิล์มที่ติดมากับเทปกาวโดยเทียบพื้นที่การลอกเป็นเปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โสภิดา ท้วมมี (2550: บทคัดย่อ) ได้ทำการวิจัยเรื่องการลดปริมาณของเสียในกระบวนการผลิตพลาสติกแผ่น โดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะลดจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านข้อกำหนดการตรวจสอบประเภทเม็ดพีวีซีไม่หลอมละลายที่เกิดขึ้นบนผิวผลิตภัณฑ์ โดยประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลอง เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อการเกิดเม็ดพีซีซีไม่หลอมละลายที่เกิดขึ้นบนผิวผลิตภัณฑ์ และเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยผลการวิจัยพบว่าที่อุณหภูมิในการหลอม PVC Compound ที่ Mixing Rolls 180 องศาเซลเซียส และปริมาณเศษพีวีซีแผ่นที่นำกลับมาหลอมใหม่ที่ Mixing Rolls 30 กิโลกรัม/Batch จะทำให้ค่าจำนวนจุดบกพร่องประเภทเม็ดพีวีซีไม่หลอมละลายที่เกิดขึ้นบนผิวผลิตภัณฑ์ 1 ตารางเมตร อยู่ในช่วงที่ต้องการ คือ ไม่เกิน 10 จุดต่อตารางเมตร ซึ่งทำให้สามารถลดจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านข้อกำหนดการตรวจสอบประเภทเม็ดพีวีซีไม่หลอมละลายที่เกิดขึ้นบนผิวผลิตภัณฑ์ลงได้ 73.08 เปอร์เซ็นต์

อดิศร เพ็ชรจรูญ (2552: บทคัดย่อ) ได้ทำการวิจัยเรื่องการเคลือบฟิล์มบางโดยอิเล็กตริกแบบหลายชั้นสำหรับการสะท้อนแสงสูง สำหรับใช้เป็นกระจกเลเซอร์ของฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ โดยวิธีการระเหยของสาร ภายในระบบสุญญากาศ ระหว่างที่ทำการเคลือบสารแต่ละชั้น ความหนาของฟิล์มที่เคลือบถูกวัดและ ควบคุมโดยเครื่องวัดความหนาของฟิล์มด้วยแสง และเครื่องวัดความหนาของฟิล์มด้วยควอทซ์ ผลการวิจัยสรุปว่าสภาพการสะท้อนแสงของกระจกที่เคลือบ 13 ชั้น มีค่าร้อยละ 99.6 ที่ความยาว คลื่น 632.8 nm จากการคำนวณหาขนาดของเม็ดผลึก (Grain Size) ของฟิล์มพบว่าฟิล์มที่เคลือบ 791113 ชั้นมีขนาดเฉลี่ยของเม็ดผลึกเท่ากับ 113878679 nm ตามลำดับ โดยขนาดเฉลี่ย ของความขรุขระเท่ากับ 9543 nm ตามลำดับ

กมลวรรณ บุตรพลอย (2552: บทคัดย่อ) ได้ศึกษาและวิเคราะห์ในเรื่องปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปัญหาสีลอกของแผงหน้าปัดรถยนต์ โดยได้ทำการกำหนดสมมุติฐานว่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีมีผลกระทบต่อปัญหาสีลอก ดังนั้นการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะสามารถลดของเสียจากปัญหาสีลอกลงได้ โดยการทำการทดลองพ่นสี 3 ชนิดลงบนแผ่นพลาสติก แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิต่างกันคือ 65 องศาเซลเซียส องศาเซลเซียส 70 และ 75 องศาเซลเซียส โดยทำการทดลอง 5 ตัวอย่างสำหรับพารามิเตอร์แต่ละค่าทั้งหมดรวม 45 ตัวอย่าง จากนั้นทดสอบการยึดเกาะของสี โดยการกรีดผิวสีเป็นตาราง ใช้เทปกาวใสปิดทับบริเวณที่กรีดแล้วดึงขึ้นเพื่อวัดพื้นที่การหลุดลอกของสี ผลกการวิจัยสรุปว่าการทดสอบประกอบกับการวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่าการใช้สีชนิดที่ 2 และใช้อุณหภูมิในการอบที่ 70^{o}C จะทำให้การยึดเกาะของสีดีกว่ามาตรฐานที่กำหนด

นิรันดร์ วิทิตอนันต์ (2552: บทคัดย่อ) ได้ทำการวิจัยเรื่องการเคลือบฟิล์มโครเมียมด้วยเทคนิคสปัตเตอริงสำหรับกระจกเงาส่องหลังรถยนต์เคลือบฟิล์มด้วยระบบดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง บนกระจกและแผ่นซิลิคอน และตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ตรวจวัดสมบัติทางแสงด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ และวัดความหนาฟิล์มด้วยเครื่องอะตอมมิคฟอร์ซไมโคร สโคป จากนั้นเคลือบฟิล์มโครเมียมบนกระจกแผ่นเรียบ นำกระจกเงาเคลือบโครเมียมที่ได้ไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจวัดค่าการสะท้อนแสง ทดสอบการยึดติด การทนน้ำและความร้อน ผลการวิจัยพบว่ากระจกเงาเคลือบโครเมียมสามารถสะท้อนแสงได้ทุกความยาวคลื่นในช่วงตามองเห็น ค่าการสะท้อนแสงและส่งผ่านแสงของฟิล์มโครเมียมแปรผันตามความหนาฟิล์ม กระจกเงาเคลือบโครเมียมที่เคลือบได้ในงานวิจัยนี้มีค่าการสะท้อนแสง การยึดติดการทนน้ำและความร้อนเหมาะสำหรับใช้ทำกระจกเงาส่องหลังรถยนต์

มะลิ (2544) ได้ทาการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความหนาของผิวเคลือบในกระบวนการเคลือบผิวไฟฟ้า ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตใหม่ในการผลิตแผงวงจรไฟฟ้ารวม งานวิจัยนี้ได้ระบุปัจจัยทั้งหมดที่มีผลต่อความหนาผิวเคลือบโดยใช้แผนภูมิเหตุและผล ซึ่งทาให้ทราบว่า 6 ปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อค่าความหนาปัจจัยเหล่านี้ประกอบด้วยความเข้มข้นของน้ำยาดีบุก Additive อิเล็คโตรไลต์ ความสูงของแผ่นกั้น เวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวและความหนาแน่นของกระแสการออกแบบการทดลองโดยวิธีการ Taguchi ได้ถูกนามาใช้เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยใดที่มีผลต่อค่าความหนาผิวเคลือบเฉลี่ยและให้ความแข็งแรงต่อค่าตอบสนอง จากการทดลองพบว่าเพียง 3 ปัจจัยเท่านั้นที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยความหนาผิวเคลือบ คือ ความเข้มข้นของอิเล็คโตรไลต์ เวลาในการเคลือบและความหนาแน่นของกระแส การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลได้ถูกนามาใช้เพื่อในการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมที่จะได้ความหนาผิวเคลือบใกล้ค่ากึ่งกลางและมีความผันแปรน้อยที่สุดโดยไม่มีข้อบกพร่องของคุณสมบัติทางกายภาพหลังกระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าและกระบวนการตัดและขึ้นรูปงานและการทดสอบโซลเดอร์ราบิลิตี้ ผลการทดลองพบว่ามี 2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลคือ เวลาในการเคลือบผิวและความหนาแน่นกระแส ด้วยสภาวะที่เหมาะสมคือความหนาแน่นกระแส 30 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร และเวลาที่ใช้ในการเคลือบ 55 วินาที เมื่อค่าปัจจัยที่ดีที่สุดได้ถูกระบุ ฝ่ายผลิตต้องปฏิบัติมาตรฐานขั้นตอนการปฏิบัติงานก่อนทำการผลิตเพื่อให้ชิ้นงานนั้นมีคุณภาพ

โสภิดา ท้วมมี (2550: บทคัดย่อ) ได้ทำการวิจัยเรื่องการลดปริมาณของเสียในกระบวนการผลิตพลาสติกแผ่น โดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะลดจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านข้อกำหนดการตรวจสอบประเภทเม็ดพีวีซีไม่หลอมละลายที่เกิดขึ้นบนผิวผลิตภัณฑ์ โดยประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลอง เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อการเกิดเม็ดพีซีซีไม่หลอมละลายที่เกิดขึ้นบนผิวผลิตภัณฑ์ และเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยผลการวิจัยพบว่าที่อุณหภูมิในการหลอม PVC Compound ที่ Mixing Rolls 180 องศาเซลเซียส และปริมาณเศษพีวีซีแผ่นที่นำกลับมาหลอมใหม่ที่ Mixing Rolls 30 กิโลกรัม/Batch จะทำให้ค่าจำนวนจุดบกพร่องประเภทเม็ดพีวีซีไม่หลอมละลายที่เกิดขึ้นบนผิวผลิตภัณฑ์ 1 ตารางเมตร อยู่ในช่วงที่ต้องการ คือ ไม่เกิน 10 จุดต่อตารางเมตร ซึ่งทำให้สามารถลดจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านข้อกำหนดการตรวจสอบประเภทเม็ดพีวีซีไม่หลอมละลายที่เกิดขึ้นบนผิวผลิตภัณฑ์ลงได้ 73.08 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปัญหาฟิล์มลอกของซิลิคอนเวเฟอร์ในการเคลือบผิวฟิล์มบางสำหรับอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิ ครั้งนี้เป็นการวิจัยเพื่อศึกษาผลกระทบจากอุณหภูมิชิ้นงาน ความดันสุญญากาศ และ อัตราการระเหยสาร ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค้นคว้าแนวคิดทฤษฎีจากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอ เรียบเรียงสาระสำคัญตามลำดับ หัวข้อต่อไปนี้

3.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย
3.3 การดำเนินการทดลองและเก็บข้อมูล
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล
3.5 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย

ประชากรและกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้มีดังต่อไปนี้ คือ

3.1.1 ประชากรที่ใช้ในการวิจัยได้แก่แผ่นซิลิคอนเวเฟอร์เปล่า ขนาด 6 นิ้ว จำนวณ 56 ชิ้น

3.1.2 กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์เปล่าของโรงงานเคลือบผิวฟิล์มบางแห่งหนึ่งขนาด 6 นิ้ว ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป และมีการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ผู้วิจัยสุ่มตัวอย่างโดยวิธีการสุ่มอย่างง่าย (Simple Random Sampling) ได้ตัวอย่างจำนวน 32 ชิ้นจากประชากรทั้งหมด ซึ่งเป็นหลักการของการวิจัยของการวิจัยเชิงทดลองซึ่งต้องมีประชากรกลุ่มตัวอย่างอย่างน้อย 20 ตัวอย่าง (นงลักษณ์ วิรัชชัย. 2543: 38)

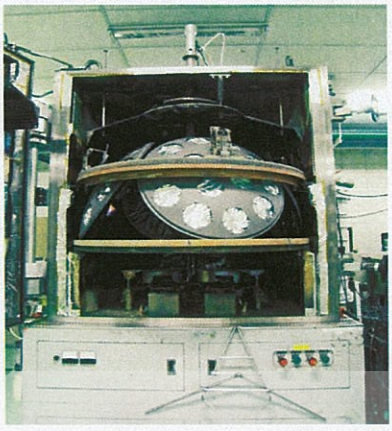
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 เครื่องเคลือบสารระบบสุญญากาศ ด้วยวิธีการระเหยสาร

เป็นห้องเคลือบทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1320.0 มิลลิเมตร สูง 1180.0 มิลลิเมตร ระบบเครื่องสูบสุญญากาศประกอบด้วยเครื่องสูบแบบแพร่ไอ โดยมีเครื่องสูบกลโรตารีเป็นเครื่องสูบท้าย และแผงควบคุมการทำงานดังแสดงในดังแสดงในรูปที่ 3.1และ รูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องเคลือบระบบสุญญากาศ



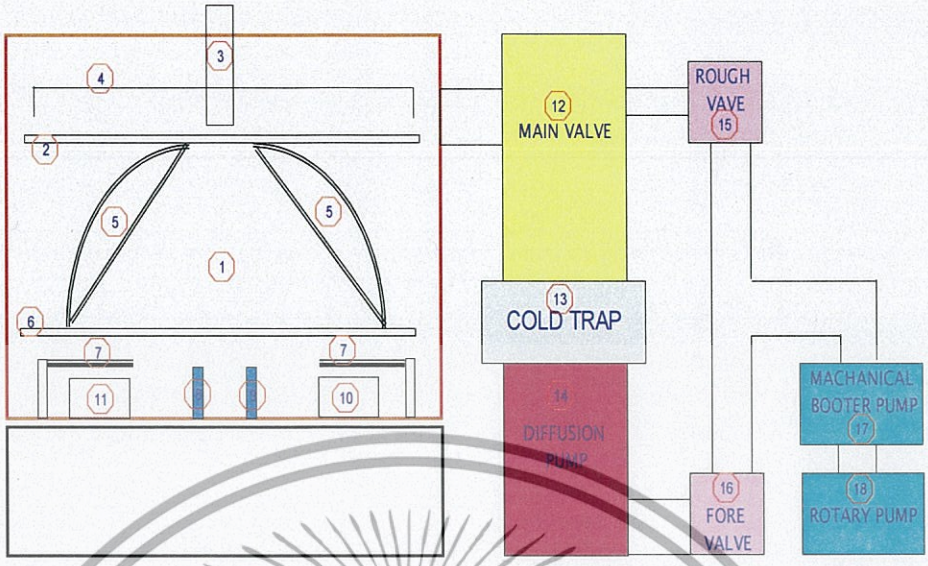
ภายในห้องเคลือบระบบสุญญากาศ

รูปที่ 3.1 เครื่องเคลือบระบบสุญญากาศที่ใช้ในการวิจัย

รูปที่ 3.2 ชุดควบคุมการทำงานของเครื่องเคลือบ

ส่วนประกอบของเครื่องเคลือบผิวฟิล์มบาง สุญญากาศ การเคลือบด้วยวิธีระเหยสารโดย ลักษณะของเครื่องเคลือบจะมีส่วนประกอบหลัก 4 ส่วนได้แก่ ภาชนะสุญญากาศ ทำจากสเตนเลส ทรงกระบอก มีหน้าแปลนสำหรับติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ที่จำเป็น ระบบเครื่องสูบสุญญากาศ ประกอบด้วยเครื่องสูบ 2 ชนิดคือ เครื่องสูบกลโรตารี และ เครื่องสูบแบบแพร่ไอ ส่วนการเคลือบ ทำหน้าที่ให้ความร้อนสำหรับระเหยสารเคลือบ และที่วางชิ้นงาน และส่วนประกอบสุดท้ายเป็นชุดควบคุมการทำงานของเครื่องเคลือบ ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานทั้งหมดของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งแสดงส่วนประกอบหลักที่สำคัญของเครื่องเคลือบผิวฟิล์มบาง สุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ส่วนประกอบหลักที่สำคัญของเครื่องเคลือบผิวฟิล์มบาง สุญญากาศ

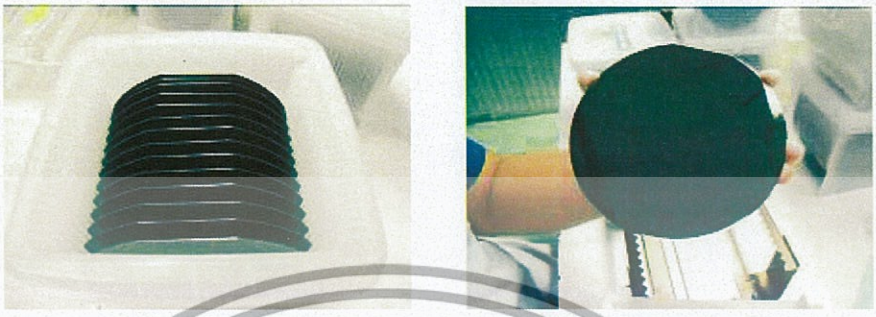
ตารางที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบหลักที่สำคัญของเครื่องเคลือบผิวฟิล์มบาง สุญญากาศ

ลำดับที่	รายการ	รายระเอียด
1	Chamber	แชมเบอร์ หรือ ห้องเคลือบสุญญากาศ
2	Dome gear	การหมุนของโดม
3	Crystal Sensor	เซ็นเซอร์วัดความหนาของของสารเคลือบ
4	Heater	ขดลวดให้ความร้อนสำหรับแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์
5	Dome	อุปกรณ์สำหรับใส่แผ่นซิลิคอนเวเฟอร์
6	Dome rill	ร่องรางโดม
7	Shutter	แผ่นกันป้องกันการกระเด็นของสารเคลือบ
8	Mouth of introduce gas	ชุดจ่ายก๊าซ
9	Mouth of introduce gas	ชุดจ่ายก๊าซ
10	Electrons Beam gun	ชุดหลอมสารเคมี
11	Electrons Beam gun	ชุดหลอมสารเคมี
12	Main Valve	วาล์วควบคุมการไหลของอากาศไปยัง DP
13	Cold trap Polycold	แผ่นกั้นลดการย้อยกลับของไอน้ำมัน
14	Diffusion Pump	เครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน
15	Rough Valve (RV)	วาล์วควบคุมการไหลของอากาศไปยัง DP
16	Fore Valve (FV)	วาล์วควบคุมการไหลของอากาศไปยัง DP
17	Mechanical Booster Pump (MBP)	ปั๊มกลสำหรับดูดอากาศ
18	Rotary pump (RP)	ปั๊มกลโรตารี่สำหรับดูดอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 แผ่นซิลิคอนเวเฟอร์เปล่า

ขนาด 6 นิ้วจำนวณ 56 ชิ้น โดยใช้ตัวอย่างการทดลองโดยการเลือกแบบสุ่มครั้งละ 2 ชิ้น และมีการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง รวมทั้งสิ้น 32 ชิ้น



รูปที่ 3.4 แผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ที่ใช้ในการวิจัย

3.3.3 เทปใสชนิดพิเศษ

เทปใสของบริษัท 3M เบอร์ 604 สำหรับติดที่แผ่นซิลิคอนเวเฟอร์แล้วลอก

รูปที่ 3.5 เทปกาวใสชนิดพิเศษ

3.3.4 หัวกรีดเพชร

รูปที่3.6 หัวเพชรที่ใช้กรีดแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนในการสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปัญหาฟิล์มลอกของซิลิคอนเวเฟอร์ในการเคลือบผิวฟิล์มบางสำหรับอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิ ดังแสดงในรูป 3.7

รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการออกแบบการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่ทำการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปัญหาฟิล์มลอกของซิลิคอนเวเฟอร์ในการเคลือบผิวฟิล์มบางสำหรับอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิ ได้กำหนดปัจจัยทั้งสิ้น 3 ปัจจัยแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ ตามเงื่อนไขที่กำหนดดังนี้

1. อุณหภูมิของชิ้นงาน (Substrate Temperature)
2. ความดันสุญญากาศ (Vacuum pressure)
3. อัตราการระเหยของสารเคลือบ (Coating rate)

ปัจจัยที่ 1 อุณหภูมิชิ้นงาน คืออุณหภูมิภายในห้องเคลือบสำหรับอบเพื่อให้ความร้อนกับแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ที่จะเคลือบ มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส ในกระบวนการผลิตปัจจุบันมีข้อกำหนดค่าอุณหภูมิของชิ้นงานไว้ที่ 130 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการกำหนดโดยพิจารณาถึงความแข็งแรงของผิวฟิล์มเป็นหลัก หากอุณหภูมิที่กำหนดต่ำจะทำให้การยึดเกาะระหว่างโมเลกุลของสารเคลือบน้อยเกินไป ในขณะเดียวกันหากกำหนดสูงเกินไปก็จะทำให้เกิดรอยแตกที่ผิวเคลือบเนื่องมาจากความเครียด ดังนั้นจึงเลือกทดลองที่อุณหภูมิดังนี้

ระดับการทดลองที่ 1 คือ 80 องศาเซลเซียส
ระดับการทดลองที่ 2 คือ 160 องศาเซลเซียส

ปัจจัยที่ 2 ความดันสุญญากาศ คือสภาวะสุญญากาศภายในห้องเคลือบที่ใช้ทำการเคลือบมีหน่วยเป็น ทอร์"ในกระบวนการผลิตปัจจุบันกำหนดความดันสุญญากาศไว้ที่ $2.3E^{-5}$ หากตั้งค่าสูงเกินไปจะทำให้เกิดเสียเวลาในการผลิต หากตั้งค่าไว้ต่ำเกิดไปทำให้ปริมาณของก๊าซภายในห้องเคลือบทำปฏิกริยากับชิ้นงาน ดังนั้นจึงเลือกที่จะทดลองที่ระดับความดันสุญญากาศ ดังนี้

ระดับการทดลองที่ 1 คือ $2.7E^{-5}$ ทอร์
ระดับการทดลองที่ 2 คือ $2.0E^{-5}$ ทอร์

ปัจจัยที่ 3 อัตราระเหยสาร คือความเร็วของสารเคลือบจากเบ้าหลอมที่ลอยไปติดผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์มีหน่วยเป็นอังสตรอมต่อวินาที (Å/sec)) ในกระบวนการผลิตปัจจุบันกำหนดอัตราระเหยของสารเคลือบไว้ที่ 20 อังสตรอมต่อวินาที หากตั้งค่าสูงเกินไปจะทำให้เกิดสะเก็ดของสารกระเด็นไปติดที่ผิวของชิ้นงานเนื่องจากพลังงานของสารเคลือบมากเกินไปทำให้กลายเป็นของเสียในที่สุด หากตั้งค่าต่ำเกินไปการระเหยสารมีค่าต่ำทำให้การยึดติดของฟิล์มกับแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ไม่ดี ดังนั้นจึงเลือกที่จะทดลองที่อัตราระเหยของสารเคลือบ ดังนี้

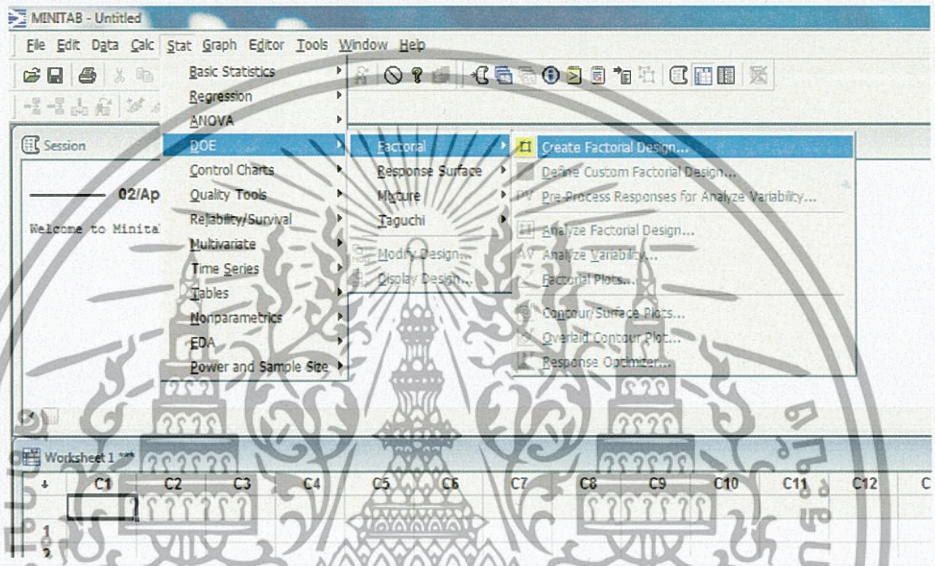
ระดับการทดลองที่ 1 คือ 10 อังสตรอมต่อวินาที
ระดับการทดลองที่ 2 คือ 30 อังสตรอมต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปัญหาฟิล์มลอกของซิลิคอนเวเฟอร์ในการเคลือบผิวฟิล์มบางสำหรับอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิ มีปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อการลอกของฟิล์มบาง 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิชิ้นงาน ความดันสุญญากาศ และ อัตราระเหยสาร

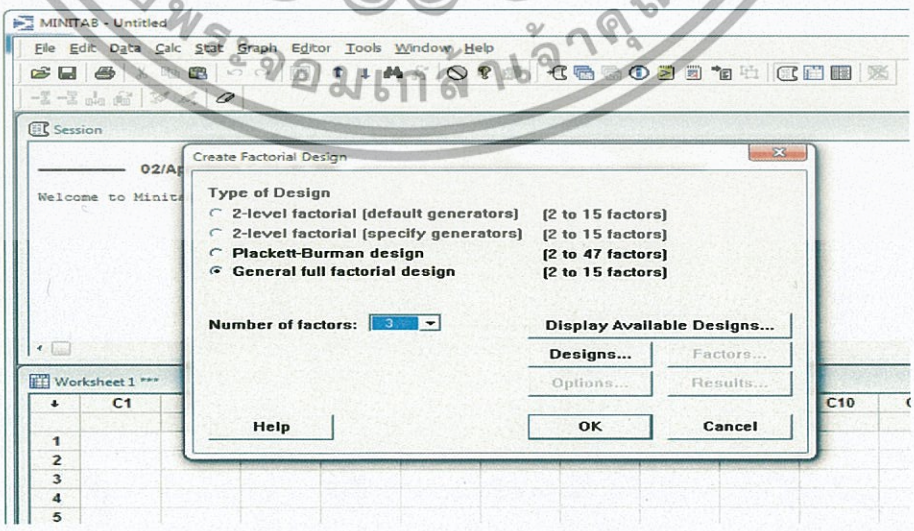
การออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial จะต้องทดลอง ทั้งหมด 16 ครั้ง ลำดับการทดลองสามารถกำหนดแบบสุ่มโดยวิธีการกำหนดด้วยโปรแกรม Minitab 14 ดังนี้

1. เปิดโปรแกรม Minitab และเลือก Menu – Stat – DOE – Factorial – Create Factorial Design ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การเลือก Option ออกแบบการทดลองแบบ Factorial

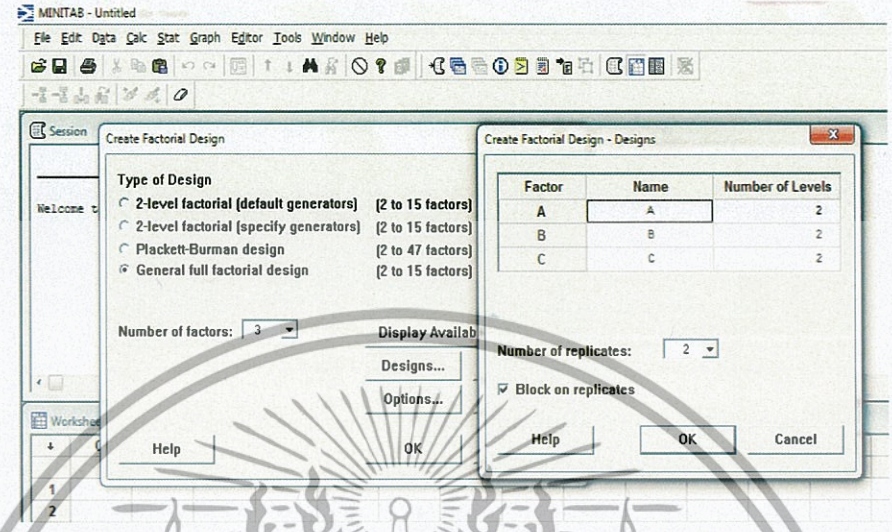
2. จะได้ Dialogue Box ดังรูปที่ 3.9 ให้เลือก Option General full factorial design [2 to 15 factors] และ กำหนดNumber of factors เป็น 2 จากนั้นคลิ๊ก tab Designs....



รูปที่ 3.9 การเลือก Option เลือกประเภทของการออกแบบและจำนวนปัจจัย

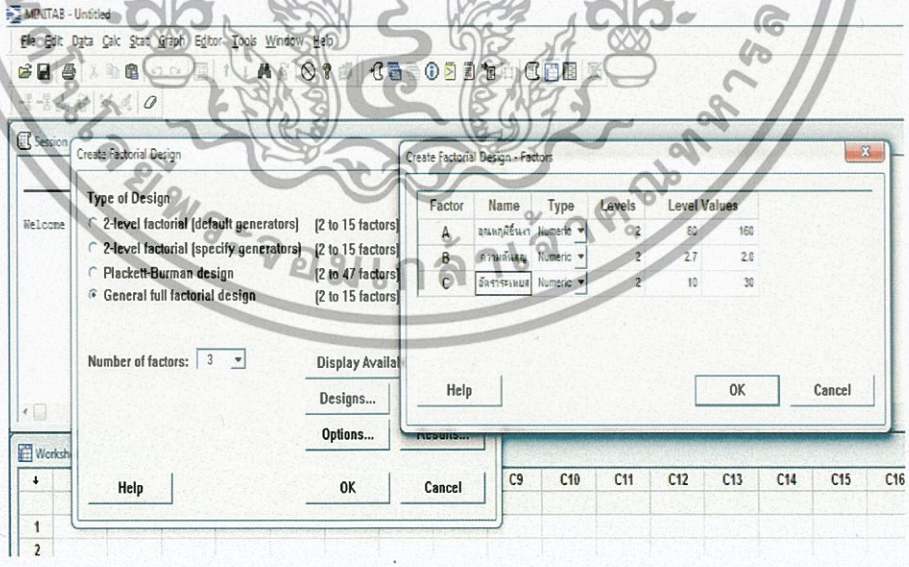
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. จะได้ Dialogue Box ดังรูปที่ 3.10 ให้ กำหนดระดับปัจจัย A และ B เป็น 2 ระดับ ตามลำดับ และ Number of replicates เป็น 2 จากนั้นคลิ๊ก tab OK



รูปที่ 3.10 การกำหนดจำนวนระดับของปัจจัยและจำนวนครั้งในการทำการทดลองซ้ำ

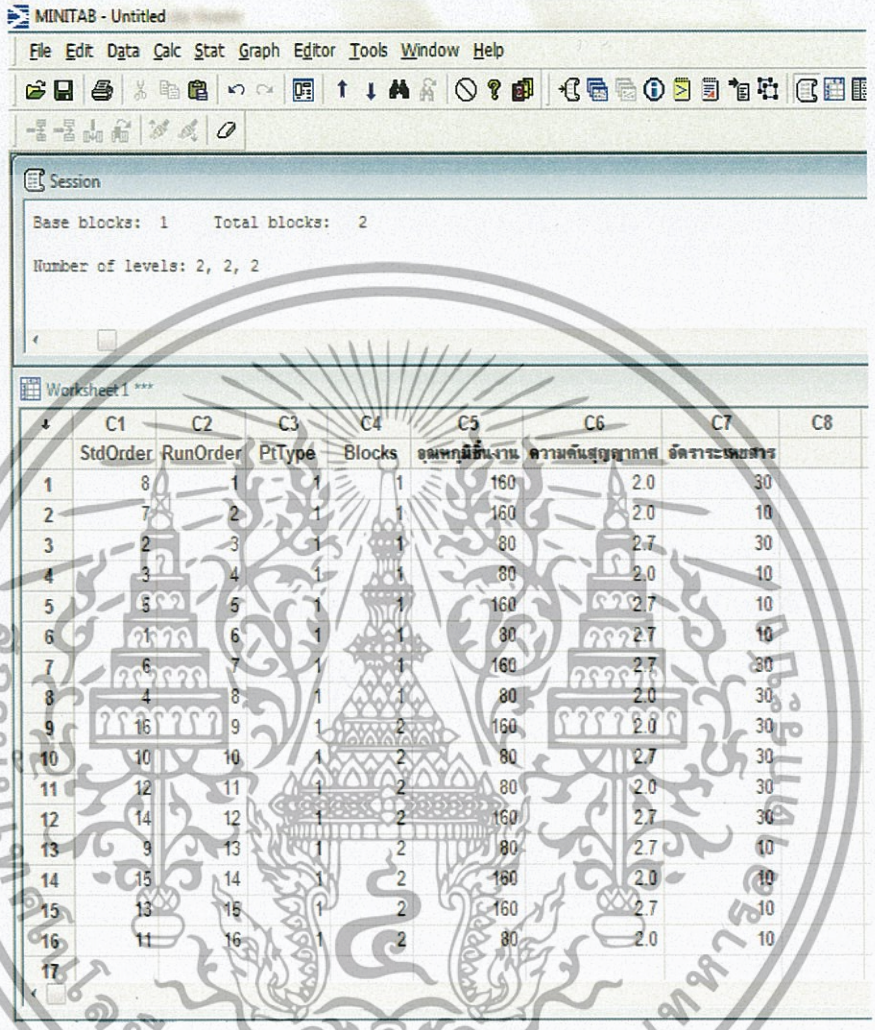
4. จะได้ Dialogue Box ดังรูปที่ 3.11 ซึ่งจะเห็นว่า tab Design, Factors, Options และ Results เปลี่ยนจากสีเทาเป็นสีดำ ซึ่งบ่งชี้ว่าให้คลิ๊กเพื่อกำหนดค่าต่าง ๆ ในที่นี้ให้คลิ๊กที่ tab Factors ซึ่งจะได้ Dialogue Box Create factorial design – Factors ซึ่ง Level Values ของปัจจัยที่ใช้คือ 2 จากนั้นคลิ๊ก tab OK



รูปที่ 3.11 การกำหนดชนิดของปัจจัยและ ค่าของระดับปัจจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. คลิ๊ก tab OK อีกครั้ง จะได้ ผลลำดับการทำการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.12 คอลัมน์ C2 แสดงลำดับการทดลองจากผลการสุ่ม คอลัมน์ C5 C6 และ C7 บ่งชี้ว่าจะทดลองที่ปัจจัย A และ B ระดับใด



	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	อุณหภูมิชิ้นงาน	ความดันสุญญากาศ	อัตราระเหยสาร	
1	8	1	1	1	160	2.0	30	
2	7	2	1	1	160	2.0	10	
3	2	3	1	1	80	2.7	30	
4	3	4	1	1	80	2.0	10	
5	5	5	1	1	160	2.7	10	
6	1	6	1	1	80	2.7	10	
7	6	7	1	1	160	2.7	30	
8	4	8	1	1	80	2.0	30	
9	16	9	1	2	160	2.0	30	
10	10	10	1	2	80	2.7	30	
11	12	11	1	2	80	2.0	30	
12	14	12	1	2	160	2.7	30	
13	9	13	1	2	80	2.7	10	
14	15	14	1	2	160	2.0	10	
15	13	15	1	2	160	2.7	10	
16	11	16	1	2	80	2.0	10	
17								

รูปที่ 3.12 ลำดับการทำการทดลอง

จากนั้นทำการทดลองตามลำดับและได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3.3 จากผลการทดลองต้องวิเคราะห์ตามหลักการทางสถิติเพื่อหาข้อสรุปต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 แสดงการออกแบบการทดลองจากโปรแกรม Minitab

ลำดับการทดลอง	วันที่ทำการทดลอง	อุณหภูมิชิ้นงาน (องศาเซลเซียส)	แรงดันสุญญากาศ (ทอร์)	อัตราระเหยสาร (อังสตรอมต่อวินาที)
1	1	160	$2.0\ E^{-5}$	30
2	1	160	$2.0\ E^{-5}$	10
3	1	80	$2.7\ E^{-5}$	30
4	1	80	$2.0\ E^{-5}$	10
5	1	160	$2.7\ E^{-5}$	10
6	1	80	$2.7\ E^{-5}$	10
7	1	160	$2.7\ E^{-5}$	30
8	1	80	$2.0\ E^{-5}$	30
9	2	160	$2.0\ E^{-5}$	30
10	2	80	$2.7\ E^{-5}$	30
11	2	80	$2.0\ E^{-5}$	30
12	2	160	$2.7\ E^{-5}$	30
13	2	80	$2.7\ E^{-5}$	10
14	2	160	$2.0\ E^{-5}$	10
15	2	160	$2.7\ E^{-5}$	10
16	2	80	$2.0\ E^{-5}$	10

จากตารางที่ 3.3 เป็นผลการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม มินิเทป14 โดยได้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ 2^3 แฟคทอเรียลเต็มรูป และมีการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง พบว่าจะต้องทำการทดลองทั้งหมด 16 การทดลองแบบสุ่มลำดับการทดลอง โดยจะแบ่งออกเป็น 2 วัน เพื่อตัดปัจจัยต่างๆให้เหลือเฉพาะปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง จากนั้นทำการทดลองจริงตามที่โปรแกรมได้กำหนดออกแบบการทดลองไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การดำเนินการทดลองและเก็บข้อมูล

ขั้นตอนการศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปัญหาฟิล์มลอกของซิลิคอนเวเฟอร์ในการเคลือบผิวฟิล์มบางสำหรับอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 3.8

รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการดำเนินการทดลองการเคลือบผิวฟิล์มบางแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 วิธีทำการทดลอง

1. เตรียมแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ ด้วยการล้างทำความสะอาดในเครื่องอุลตราโซนิกด้วยน้ำ RO จำนวนทั้งสิ้น 32 ชิ้นดังแสดงในรูปที่3.9

รูปที่ 3.14 การล้างทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ด้วยเครื่องล้างระบบอุลตร้าโซนิค

2. การเคลือบผิวฟิล์มบาง โดยทำการเคลือบตามลำดับดังนี้

การทดลองวันที่ 1

2.1. เคลือบที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ที่ความดัน $2.0E^{-5}$ ทอร์ และที่อัตราการระเหยสาร 30 อังสตรอมต่อวินาทีจำนวน 2 ชิ้น

2.2. เคลือบที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ที่ความดัน $2.0E^{-5}$ ทอร์ และที่อัตราการระเหยสาร 10 อังสตรอมต่อวินาทีจำนวน 2 ชิ้น

2.3. เคลือบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ที่ความดัน $2.7E^{-5}$ ทอร์ และที่อัตราการระเหยสาร 30 อังสตรอมต่อวินาทีจำนวน 2 ชิ้น

2.4. เคลือบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ที่ความดัน $2.0E^{-5}$ ทอร์ และที่อัตราการระเหยสาร 10 อังสตรอมต่อวินาทีจำนวน 2 ชิ้น

2.5. เคลือบที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ที่ความดัน $2.7E^{-5}$ ทอร์ และที่อัตราการระเหยสาร 10 อังสตรอมต่อวินาทีจำนวน 2 ชิ้น

2.6. เคลือบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ที่ความดัน $2.7E^{-5}$ ทอร์ และที่อัตราการระเหยสาร 10 อังสตรอมต่อวินาทีจำนวน 2 ชิ้น

2.7. เคลือบที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ที่ความดัน $2.7E^{-5}$ ทอร์ และที่อัตราการระเหยสาร 30 อังสตรอมต่อวินาทีจำนวน 2 ชิ้น

2.8. เคลือบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ที่ความดัน $2.0E^{-5}$ ทอร์ และที่อัตราการระเหยสาร 30 อังสตรอมต่อวินาทีจำนวน 2 ชิ้น

การทดลองวันที่ 2

2.9. เคลือบที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ที่ความดัน $2.0E^{-5}$ ทอร์ และที่อัตราการระเหยสาร 30 อังสตรอมต่อวินาทีจำนวน 2 ชิ้น

2.10. เคลือบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ที่ความดัน $2.7E^{-5}$ ทอร์ และที่อัตราการระเหยสาร 30 อังสตรอมต่อวินาทีจำนวน 2 ชิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11. เคลือบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ที่ความดัน $2.0E^{-5}$ ทอร์ และที่อัตราการระเหยสาร 30 อังสตรอมต่อวินาทีจำนวน 2 ชิ้น

2.12. เคลือบที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ที่ความดัน $2.7E^{-5}$ ทอร์ และที่อัตราการระเหยสาร 30 อังสตรอมต่อวินาทีจำนวน 2 ชิ้น

2.13. เคลือบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ที่ความดัน $2.7E^{-5}$ ทอร์ และที่อัตราการระเหยสาร 10 อังสตรอมต่อวินาทีจำนวน 2 ชิ้น

2.14. เคลือบที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ที่ความดัน $2.0E^{-5}$ ทอร์ และที่อัตราการระเหยสาร 10 อังสตรอมต่อวินาทีจำนวน 2 ชิ้น

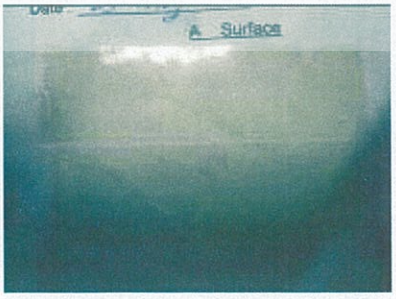
2.15. เคลือบที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ที่ความดัน $2.7E^{-5}$ ทอร์ และที่อัตราการระเหยสาร 10 อังสตรอมต่อวินาทีจำนวน 2 ชิ้น

2.16. เคลือบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ที่ความดัน $2.0E^{-5}$ ทอร์ และที่อัตราการระเหยสาร 10 อังสตรอมต่อวินาทีจำนวน 2 ชิ้น

3. การทดสอบการยึดติดของผิวฟิล์ม

นำแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์มากรีดด้วยเครื่องมือกรีดแบบหัวเพชรตามแนวตั้งและแนวนอนแถวละ 10เส้นดังแสดงในรูปที่ 3.15 แปะเทปกาวใสลงบนแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ที่กรีดไว้จากนั้นรีดเทปกาวใสให้แนบกับแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์จากนั้นจึงดึงเทปใส แล้วทำการตรวจสอบการลอกของผิวฟิล์มโดยการติดลงไปที่กระดาษสีขาวโดยจะต้องไม่มีผิวฟิล์มหลุดลอกออกมาดังแสดงในรูปที่ 3.16

รูปที่ 3.15 การกรีดแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์สำหรับติดเทป

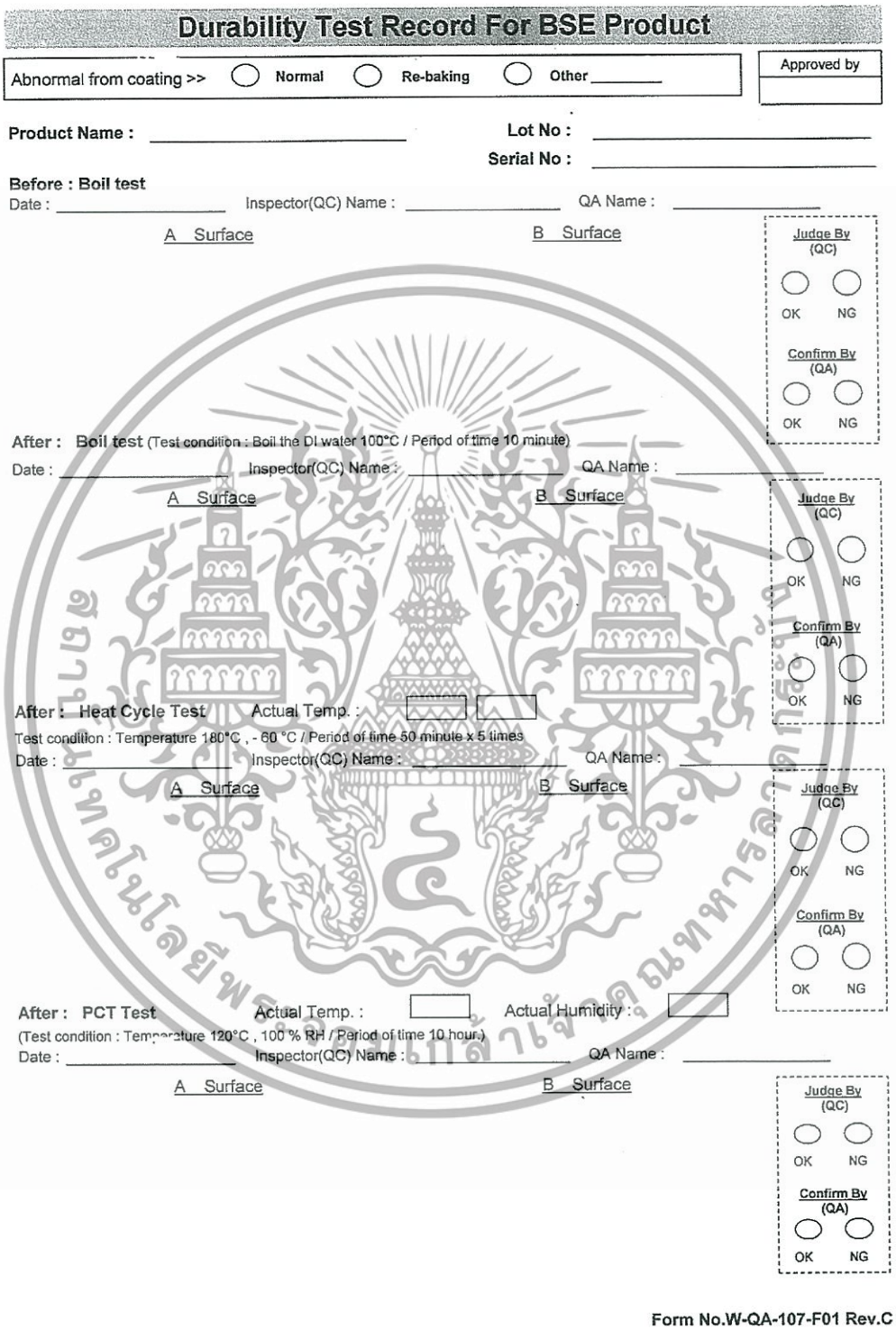


รูปที่ 3.16 การติดเทปกาวลงบนกระดาษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. บันทึกผลการทดลอง

ทำการบันทึกผลการทดลองลงบน แบบฟอร์ม ดังแสดงในรูปที่ 3.17



Durability Test Record For BSE Product

Abnormal from coating >> ○ Normal ○ Re-baking ○ Other _____

Approved by

Product Name : _____ **Lot No :** _____

Serial No : _____

Before : Boil test

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ○ OK ○ NG

Confirm By (QA) ○ OK ○ NG

After : Boil test (Test condition : Boil the DI water 100°C / Period of time 10 minute)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ○ OK ○ NG

Confirm By (QA) ○ OK ○ NG

After : Heat Cycle Test Actual Temp. : [ ] [ ]

Test condition : Temperature 180°C , - 60 °C / Period of time 50 minute x 5 times

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ○ OK ○ NG

Confirm By (QA) ○ OK ○ NG

After : PCT Test Actual Temp. : [ ] Actual Humidity : [ ]

(Test condition : Temperature 120°C , 100 % RH / Period of time 10 hour.)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ○ OK ○ NG

Confirm By (QA) ○ OK ○ NG

Form No.W-QA-107-F01 Rev.C

รูปที่ 3.17 แบบฟอร์มบันทึกผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

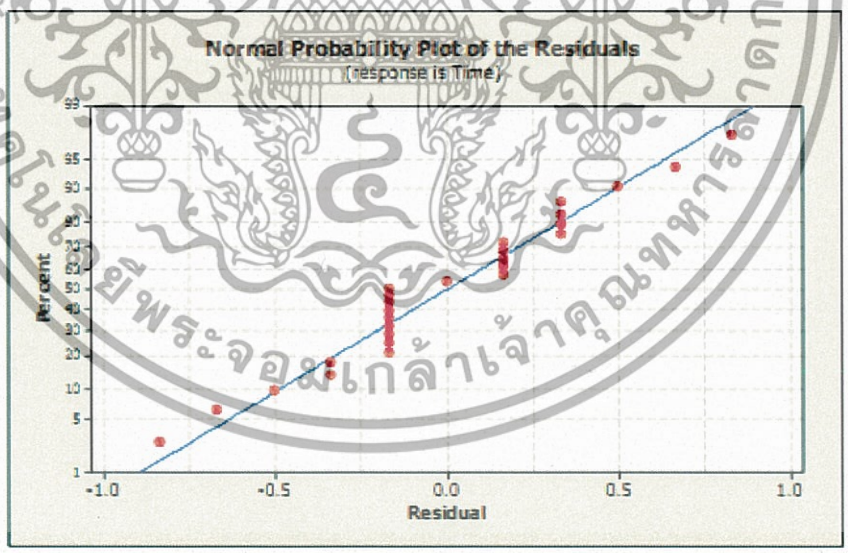
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

การศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปัญหาฟิล์มลอกของซิลิคอนเวเฟอร์ในการเคลือบผิวฟิล์มบางสำหรับอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิครั้งนี้ วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป Minitab14 ในการวิเคราะห์ข้อมูล โดยกำหนดการวิเคราะห์ผลที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ค่านัยสำคัญ (α)= 0.05 โดยอ้างอิงรูปแบบการวิเคราะห์ตามหลักการแฟคทอเรียลเต็มรูปดังนี้

3.4.1 การตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบจำลอง

การวิเคราะห์การออกแบบการทดลองกรณีหลายปัจจัยนั้น ค่าความผิดพลาด หรือค่าความคลาดเคลื่อนในการทดลองต้องมีการกระจายตัวแบบปกติ ข้อมูลที่เก็บมาต้องมีความอิสระต่อกัน และค่าความแปรปรวนต้องคงที่ มีความถูกต้องตรงตามข้อสมมุติ สำหรับกระบวนการทดลองอาจมีความคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นที่ผู้ทดลองต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อสมมุติฐานดังกล่าวก่อน โดยพิจารณาจากความแปรปรวน (ANOVA) จะมีการตรวจสอบด้วยกันดังนี้

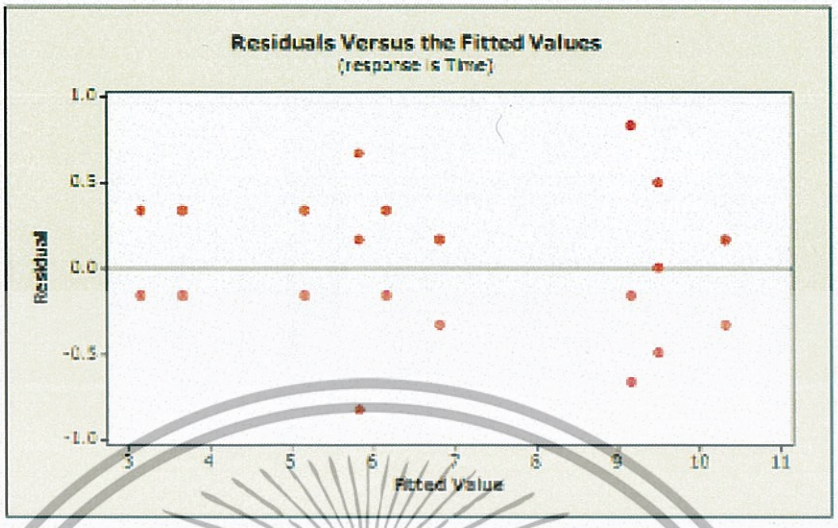
1. การตรวจสอบจากการแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot) ในการตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง สามารถทำได้โดยการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าความผิดพลาด โดยมีข้อสมมุติความถูกต้องในการนำเสนอข้อมูล ด้วยกราฟดังกล่าวควรมีลักษณะเป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ความน่าจะเป็นของค่าความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ

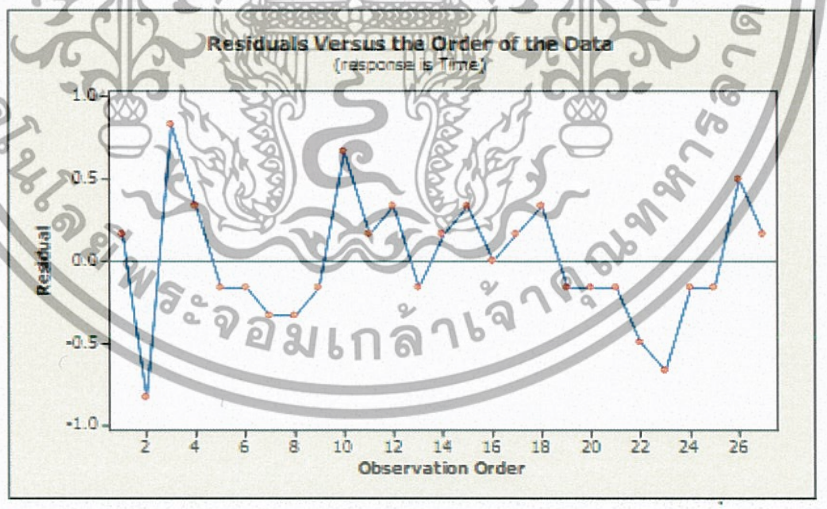
2. การตรวจสอบความแปรปรวนคงที่ (Constant Variance, σ^2) ส่วนการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) เทียบกับค่าที่ถูกฟิตจะพบว่า ข้อมูลมีความอิสระไม่เป็นรูปโทรโข่ง หรือกรวยลำโพง และมีความผันแปรคงที่ในรูปของความเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนดังแสดงในรูปที่ 3.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 ค่าความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดและค่าเฉลี่ยมีแนวโน้มของรูปทรงที่ผิดปกติ

3. การตรวจสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้าง (Residual) เมื่อพิจารณาการกระจายของข้อมูล พบว่าการกระจายตัวของส่วนตกค้าง มีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนหรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ แสดงให้เห็นว่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกันกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดและลำดับที่ของการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

การศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปัญหาฟิล์มลอกของซิลิคอนเวเฟอร์ในการเคลือบผิวฟิล์มบางสำหรับอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมินี้ ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปมินิเทป14 ในการวิเคราะห์ข้อมูล กำหนดการวิเคราะห์ผลที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยอ้างอิงรูปแบบการวิเคราะห์ ตามหลักการแฟคทอเรียลเต็มรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

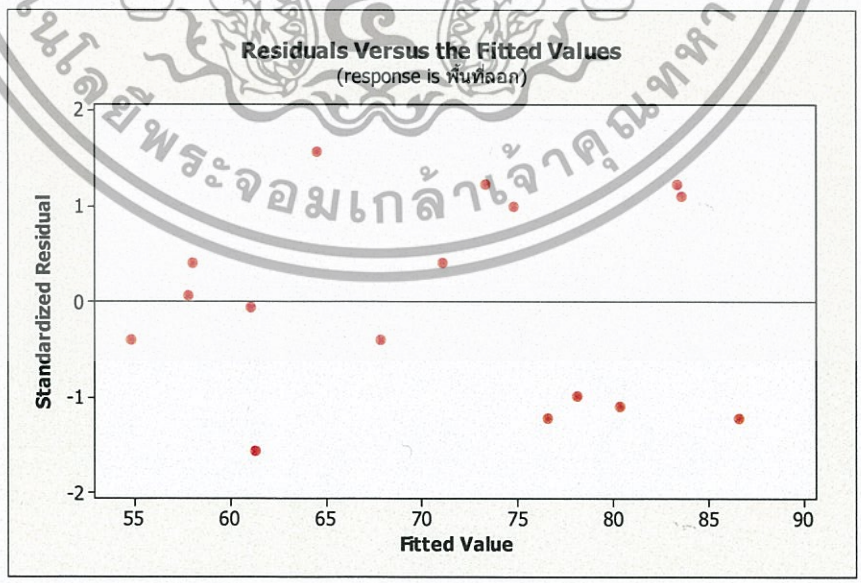
การศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปัญหาฟิล์มลอกในการเคลือบผิวฟิล์มบางแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์สำหรับอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิครั้งนี้ ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป Minitab 14 ในการวิเคราะห์ข้อมูล กำหนดการวิเคราะห์ผลที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยอ้างอิงรูปแบบการวิเคราะห์ ตามหลักการแฟคทอเรียลเต็มรูปเริ่มต้นด้วยการตรวจสอบข้อสมมติฐานสำหรับการใช้ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยพิจารณาการกระจายตัวของค่าความผิดพลาด ผลการวิเคราะห์ข้อมูลในการวิจัยมีดังนี้

4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking)เป็นการทดสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้ทำการทดลองซึ่งมีสมมติฐานว่ารูปแบบของค่าส่วนตกค้างมีการแจงแจงแบบปกติและเป็นอิสระด้วยค่าเฉลี่ยใกล้เคียง 0 และ σ^2 มีความเสถียร (Stability) จึงจะทำให้ข้อมูลจากการทดลองมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ โดยพิจารณาจากความแปรปรวน (ANOVA) จะมีการตรวจสอบด้วยกันดังนี้

4.1.1 การตรวจสอบความแปรปรวนคงที่

ส่วนการกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับค่าที่ถูกฟิตจะพบว่าข้อมูลมีความอิสระไม่เป็นรูปโทรโข่งหรือกรวยลำโพง และมีความแปรผันคงที่ในรูปของความเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนดังแสดงในรูปที่ 4.1



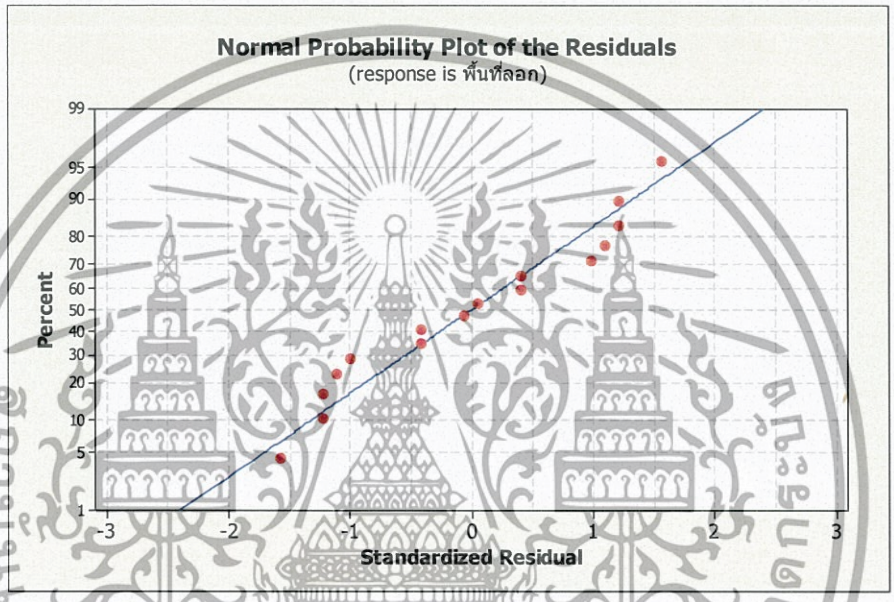
รูปที่ 4.1 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนของทั้ง 3 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 เป็นกราฟการตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล โดยใช้แผนภูมิการกระจาย เพื่อสังเกตลักษณะการกระจายของจุดที่แทนข้อมูลบนแผนภูมิว่าเป็นรูปแบบอิสระ แสดงความสัมพันธ์ ของค่าผิดพลาดและค่าเฉลี่ยของจำนวนพื้นที่การหลุดลอกของฟิล์ม พบว่าค่าความผิดพลาดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์

4.1.2 **การตรวจสอบจากการแจกแจงปกติ**

การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ของส่วนตกค้าง โดยพิจารณาจากการกระจายตัวของส่วนตกค้างดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งพบว่ามีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง คือ สามารถประมาณได้ว่ามีการแจกแจงแบบปกติ



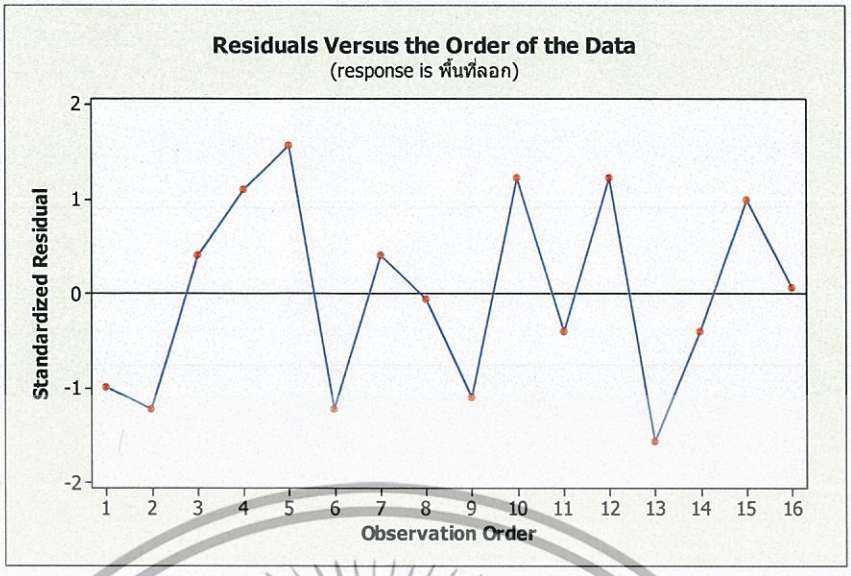
รูปที่ 4.2 การกระจายตัวแบบปกติของส่วนตกค้าง

จากกราฟรูปที่ 4.2 เป็นกราฟที่แสดงถึงความเสถียรของความแปรปรวน โดยใช้แผนภูมิการกระจายค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ระดับปัจจัยพบว่าส่วนตกค้างของผลการทดลองมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอทั้งทางบวกและทางลบ มีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลที่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

4.1.3 **การตรวจสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้าง**

การตรวจสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้างเมื่อพิจารณาการกระจายของข้อมูล พบว่าการกระจายตัวของส่วนตกค้าง มีรูปแบบที่เป็นอิสระไม่มีรูปแบบที่แน่นอนหรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้แสดงให้ เห็นว่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับ Observation Order

รูปที่4.3 แสดงถึงส่วนตกค้างของผลการทดลอง มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอแสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระ พิจารณารูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าค่าความผิดพลาดหรือค่าความคลาดเคลื่อนในการทดลอง (Experiment Error or Residual) มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) ดังรูปที่4.1 และมีความเป็นอิสระต่อกัน (Independently Distributed) ด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และค่าความแปรปรวนคงที่ (Constant Variance) ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งถูกต้องตรงตามข้อสมมุติดังนั้นผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ในตารางที่ 4.2 สามารถใช้ได้

4.2 ผลการการทดลอง

สมบัติการยึดติด การยึดติดของฟิล์มที่ทำหน้าที่กรองแสงอินฟราเรด เป็นสมบัติสำคัญของเลนส์กรองแสงอินฟราเรด ผู้วิจัยได้นำแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์มาทดสอบการยึดติดตามวิธีทดสอบของโรงงานด้วยการกรีดบนผิวหน้าฟิล์มด้วยหัวเพชรเป็นตารางแล้วปิดทับด้วยเทปใสจากนั้นดึงเทปใสเข้าหาตัวผู้ทดสอบโดยความสามารถในการยึดติดของฟิล์มประเมินจากเนื้อฟิล์มที่หลุดออกจากผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ติดเทปใสออกมา ผลการทดลองที่ได้จากการตรวจสอบทั้งสิ้น 32 ตัวอย่างแสดงไว้ในตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบการยึดเกาะของฟิล์มโดยพิจารณาการหลุดลอกของฟิล์ม

การทดลองที่	อุณหภูมิชิ้นงาน (°C)	ความดันสุญญากาศ (Torr)	อัตราระเหยสารเคลือบ (A°/s)	การหลุดลอกของฟิล์ม (เปอร์เซ็นต์) พื้นที่ฟิล์มลอก (%)
1	160	$2.7x10^{-5}$	30	72
2	80	$2.0x10^{-5}$	10	61
3	160	$2.7x10^{-5}$	10	84
4	160	$2.0x10^{-5}$	10	59
5	80	$2.0x10^{-5}$	30	86
6	80	$2.7x10^{-5}$	10	76
7	160	$2.0x10^{-5}$	30	68
8	80	$2.7x10^{-5}$	30	74
9	80	$2.0x10^{-5}$	30	78
10	160	$2.7x10^{-5}$	10	58
11	80	$2.7x10^{-5}$	10	77
12	160	$2.0x10^{-5}$	10	86
13	160	$2.7x10^{-5}$	30	76
14	80	$2.0x10^{-5}$	10	54
15	80	$2.7x10^{-5}$	30	67
16	160	$2.0x10^{-5}$	30	58

จากตารางที่ 4.1 เป็นผลการทดสอบการยึดเกาะของฟิล์มในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง โดยการใช้หัวเพชรกรีดผิวฟิล์มเป็นตาราง แล้วใช้เทปกาวใสปิดทับบริเวณที่กรีดแล้วดึงขึ้นเพื่อวัดพื้นที่การหลุดลอกของฟิล์มดังแสดงในรูปที่ 4.1 จากนั้นนำผลลัพธ์มาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังแสดงในตารางที่ 4.2

รูปที่ 4.4 พื้นที่การหลุดลอกของฟิล์มจากผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

การคำนวณและวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้โปรแกรม MINITAB 14

ตารางที่ 4.2 แสดงตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน

Source	DF	SS	MS	F	P
Block	1	42.25	42.25	4.01	0.085
อุณหภูมิชิ้นงาน	1	1225	1225	116.27	0.000 *
ความดันสุญญากาศ	1	56.25	56.25	5.34	0.054
อัตราระเหยสาร	1	16.00	16.00	1.52	0.258
อุณหภูมิชิ้นงาน*ความดันสุญญากาศ	1	81.00	81.00	7.69	0.028 *
อุณหภูมิชิ้นงาน*อัตราระเหยสาร	1	0.25	0.25	0.02	0.882
ระดับสุญญากาศ*อัตราระเหยสาร	1	9	9	0.85	0.368
อุณหภูมิชิ้นงาน*ความดันสุญญากาศ* อัตราระเหยสาร	1	156.25	156.25	14.83	0.006 *
Error	7	73.75	10.54		
Total	15				
S=3.24588 R-sq=95.56% R-sq(adj) =90.48%					

หมายเหตุ * มีนัยสำคัญที่สำคัญ 0.05

DF = Degree of freedom

SS = Sum square

MS= Mean square

F = F Ratio

P = Probability value

กำหนดการวิเคราะห์ผลที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ค่านัยสำคัญ (α) = 0.05 โดยอ้างอิงรูปแบบการวิเคราะห์ตามหลักการแฟลทอเรียลเต็มรูป

จากผลการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Minitab 14 จากตารางที่ 4.2 กำหนดการวิเคราะห์ผลที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ค่านัยสำคัญ (α) = 0.05 โดยอ้างอิงรูปแบบการวิเคราะห์ตามหลักการแฟลทอเรียลเต็มรูป พบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดฟิล์มลอกมี 3 ปัจจัยได้แก่ ปัจจัยหลัก อุณหภูมิชิ้นงาน อิทธิพลร่วมของสองปัจจัยระหว่าง อุณหภูมิชิ้นงาน * ความดันสุญญากาศ และอิทธิพลร่วมของสามปัจจัยระหว่าง อุณหภูมิชิ้นงาน * ความดันสุญญากาศ * อัตราระเหยสาร

และเมื่อพิจารณาค่า P-Value จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม Minitab 14 ดังตารางที่ 4.2 พบว่าค่า P-Value ของพารามิเตอร์อุณภูมิของชิ้นงานรวมทั้งอันตรกิริยา (Interaction) อุณหภูมิชิ้นงาน * ความดันสุญญากาศ และอุณหภูมิชิ้นงาน * ความดันสุญญากาศ * อัตราระเหยสาร มีค่าน้อยกว่า 0.05 คือ 0.000, 0.028 และ 0.006 ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสาคัญ

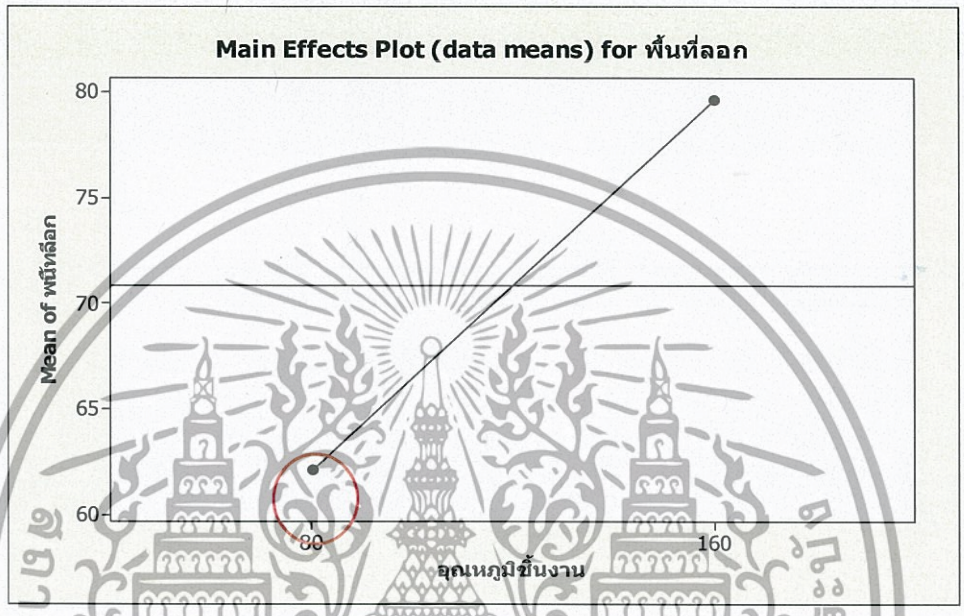
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 การวิเคราะห์ระดับปัจจัยหลัก (Main Effect) ได้แก่ อุณหภูมิชิ้นงาน

H_0: ปัจจัยหลักไม่มีผลต่อการเกิดฟิล์มลอก

H_1: ปัจจัยหลักมีผลต่อการเกิดฟิล์มลอก

อุณหภูมิชิ้นงาน P-value = 0.000 < (α) ปฏิเสธสมมุติฐานหลักดังนั้นปัจจัยหลักอุณหภูมิของแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ มีผลต่อการเกิดฟิล์มลอก



รูปที่ 4.5 กราฟผลกระทบหลักของปัจจัย อุณหภูมิของชิ้นงาน

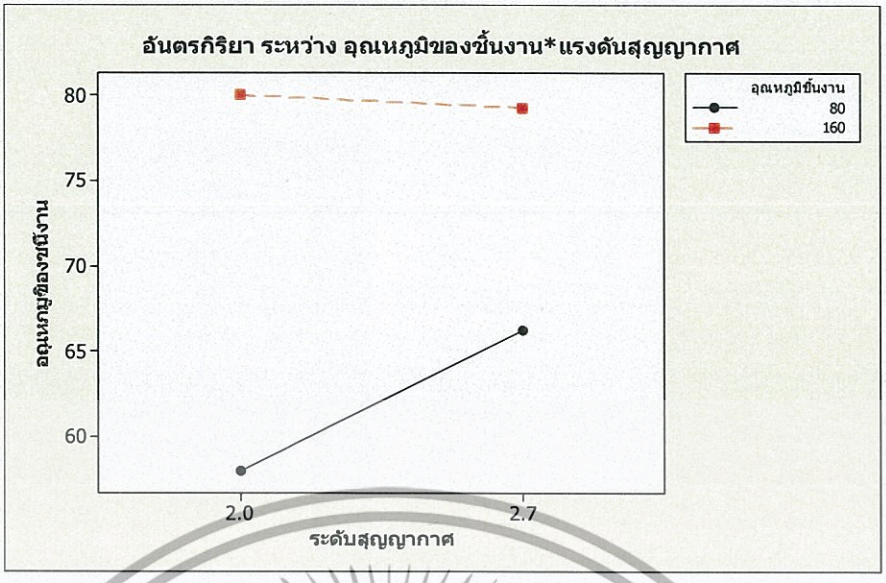
4.3.2 การวิเคราะห์ระดับปัจจัยร่วม 2 ปัจจัยได้แก่ อุณหภูมิชิ้นงาน * ความดันสุญญากาศ

H_0: ปัจจัยร่วมไม่มีผลต่อการเกิดฟิล์มลอก

H_1: ปัจจัยร่วมมีผลต่อการเกิดฟิล์มลอก

อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิของชิ้นงาน * ความดันสุญญากาศ P-value = 0.028 < (α) ปฏิเสธสมมุติฐานหลัก ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลร่วม(อันตรกิริยา) ระหว่าง อุณหภูมิชิ้นงาน * ความดันสุญญากาศ มีผลต่อการเกิดฟิล์มลอกแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับ 0.028

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟอิทธิพลร่วมของ 2 ปัจจัย ระหว่าง อุณหภูมิชิ้นงาน * ความดันสุญญากาศ

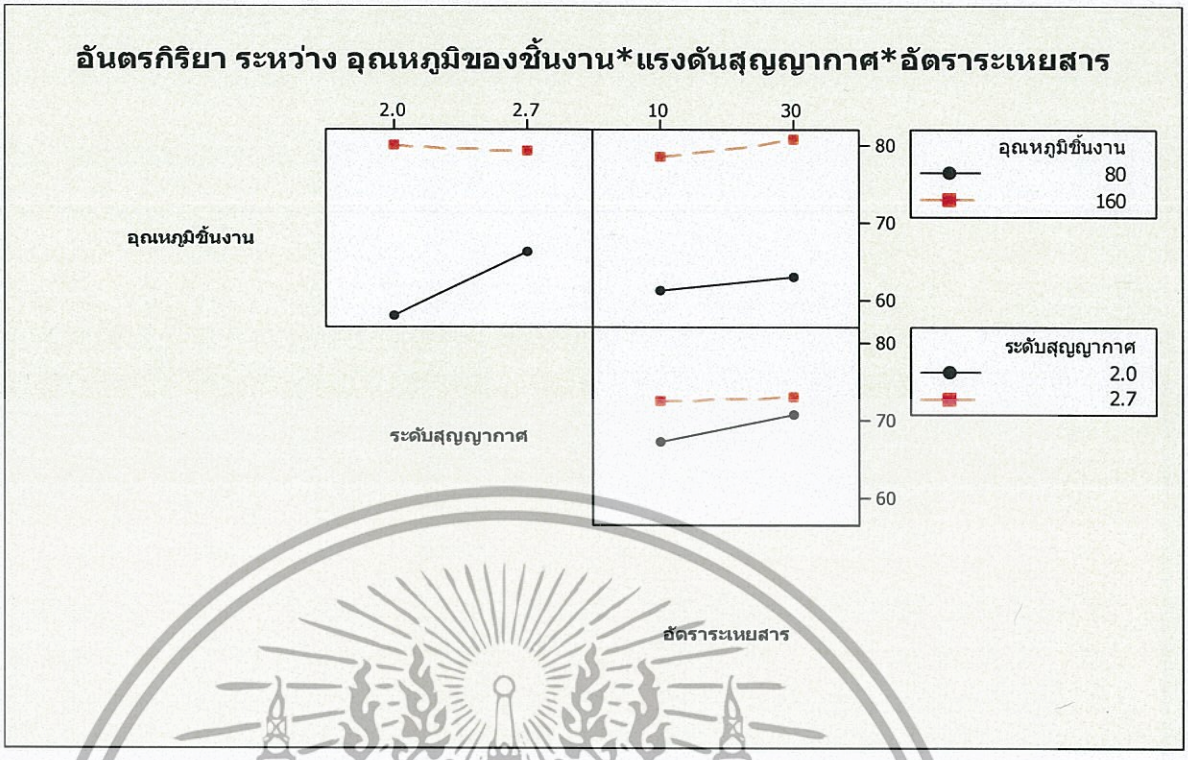
4.3.3 การวิเคราะห์ระดับปัจจัยร่วม 3 ปัจจัยได้แก่อุณหภูมิของชิ้นงาน * ความดันสุญญากาศ * อัตราระเหยสาร

H_0: ปัจจัยร่วมไม่มีผลต่อการเกิดฟิล์มลอก

H_1: ปัจจัยร่วมมีผลต่อการเกิดฟิล์มลอก

อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิชิ้นงาน * ความดันสุญญากาศ * อัตราระเหยสาร P-value = 0.006 < (α) ปฏิเสธสมมุติฐานหลัก ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลร่วม (อันตรกิริยา)ระหว่าง อุณหภูมิของชิ้นงาน*ความดันสุญญากาศ*อัตราระเหยสาร มีผลต่อการเกิดฟิล์มลอก แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับ 0.006

- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟอิทธิพลร่วมของ 3 ปัจจัยระหว่าง อุณหภูมิชิ้นงาน * ความดันสุญญากาศ * อัตราระเหยสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปัญหาฟิล์มลอกของซิลิคอนเวเฟอร์ในการเคลือบผิวฟิล์มบางสำหรับอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิครั้งนี้ โดยมีสาระสำคัญในการวิจัยสรุปเป็นหัวข้อได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากปัญหาฟิล์มลอกของของซิลิคอนเวเฟอร์ในการเคลือบผิวฟิล์มบางสำหรับอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์พารามิเตอร์ของกระบวนการเคลือบผิวฟิล์มบางที่มีผลกระทบต่อปัญหาฟิล์มลอกของแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ ดังกล่าว ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิชิ้นงาน, ความดันสุญญากาศ, อัตราการระเหยสารจากการวิเคราะห์ผลการวิจัยในบทที่ 4 โดยประยุกต์ใช้การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 3 ปัจจัย ซึ่งพบว่า ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดฟิล์มลอกที่ระดับร้อยละ 95 (α = 0.05) สามารถสรุปผลการวิจัยได้ตามลำดับ ดังนี้

จากผลการทดลองพบว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดฟิล์มลอกที่ระดับนัยสำคัญร้อยละ 95 (α = 0.05) ได้แก่ อุณหภูมิของชิ้นงาน อันตรกิริยาระหว่าง อุณหภูมิชิ้นงานกับความดันสุญญากาศ และอันตรกิริยาสามปัจจัยหลักได้แก่ อุณหภูมิชิ้นงาน ความดันสุญญากาศ และ อัตราการระเหยสาร โดยที่อุณหภูมิที่สูงหรือต่ำเกินไปทำให้เกิดการหลุดลอกของฟิล์มนอกจากนี้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปัจจัยร่วมจะส่งผลต่อการยึดเกาะของฟิล์มด้วย

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปัญหาฟิล์มลอกในการเคลือบผิวฟิล์มบาง แผ่นซิลิคอนเวเฟอร์จาก 3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดปัญหาฟิล์มลอกในกระบวนการเคลือบผิวฟิล์มบางเลนส์กรองแสงอินฟราเรดจากสารกึ่งตัวนำแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ คุณภาพของการยึดติดของชั้นเคลือบหรือฟิล์มบางที่เคลือบบนฐานรองจะขึ้นกับเงื่อนไขหรือปัจจัยต่างๆ หลายประการดังนี้

สมบัติการยึดติด การยึดติดของฟิล์มที่ทำหน้าที่ส่งผ่านแสงเป็นสมบัติสำคัญของเลนส์กรองแสงอินฟราเรด ได้นำแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์มาทดสอบการยึดติดตามวิธีทดสอบของโรงงาน ด้วยการใช้ปากกาหัวเพรชรกรีดบนผิวหน้าฟิล์มเป็นตารางแล้วปิดทับด้วยเทปใสจากนั้นดึงเทปใสเข้าหาตัวของผู้ทดสอบโดยความสามารถในการยึดติดของฟิล์มประเมินจากเนื้อฟิล์มที่หลุดออกจากผิวหน้าเลนส์ติดเทปใสออกมาผลทดลองในงานวิจัยนี้พบว่าการเคลือบ ณ อุณหภูมิที่ต่ำจะทำให้การยึดเกาะระหว่างโมเลกุลของสารเคลือบน้อยเกินไปจึงทำให้ผิวเคลือบหลุดลอกได้ง่าย ในขณะเดียวกันหากทำการเคลือบ ณ อุณหภูมิที่สูงก็จะทำให้การยึดเกาะระหว่างโมเลกุลของสารเคลือบยึดเกาะกันแน่นเกินไปเกิดรอยแตกที่ผิวเคลือบเนื่องมาจากความเครียด (Stress) ที่ผิวฟิล์มในเนื้อฟิล์ม แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของชิ้นงานมีผลต่อการยึดติดของฟิล์มบนผิวหน้าชิ้นงานสอดคล้องกับงานวิจัยของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิรันดร์ วิทิตอนันต์ เรื่อง “กระจกเงาเคลือบโครเมียมที่เคลือบด้วยเทคนิคสปัตเตอริงสำหรับกระจกเงาส่องหลังรถยนต์” ซึ่งรายงานว่าฟิล์มบางที่มีความหนาน้อยจะยึดติดชิ้นงานดีกว่าฟิล์มที่มีความหนามาก เนื่องจากเมื่อความหนาของฟิล์มบางเพิ่มขึ้นแรงยึดติดระหว่างอะตอมในเนื้อสารเคลือบจะมีค่าสูงกว่าแรงยึดติดของเนื้อสารเคลือบกับชิ้นงานส่งผลให้เกิดความเครียดคงค้าง (residual stress) ในเนื้อฟิล์ม ทำให้ฟิล์มที่มีความหนามากหลุดลอกจากชิ้นงานได้ง่ายกว่าฟิล์มที่มีความหนาน้อย โดยความเครียดคงค้างที่เกิดขึ้นในเนื้อฟิล์ม ที่มีความหนามากมีสาเหตุหลายประการ เช่น เป็นผลจากความร้อนที่เกิดขึ้นเองในกระบวนการเคลือบฟิล์ม หรือเป็นผลจากความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การขยายตัว(thermal expansion coefficient) ของอะตอมสารเคลือบที่เป็นเนื้อฟิล์มและอะตอมของชิ้นงานหรือวัสดุรองรับเป็นต้น

5.3 ข้อเสนอแนะ

11.1 ข้อเสนอแนะที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้

1. สำหรับการทำงานจริงหากมีการกำหนดระดับของปัจจัยตามการทดลองแล้ว อาจจะไม่มีการเกิดฟิล์มลอกแต่เนื่องจากยังมีปัจจัยอื่นที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น เครื่องจักรที่เก่าทำให้ ไม่สามารถตั้งค่าอุณหภูมิได้ตามที่ต้องการ ประสิทธิภาพของระบบสุญญากาศ ดังนั้นควรตรวจสอบเครื่องจักรให้สามารถตั้งค่าได้ตามข้อกำหนดเพื่อลดปัญหาการเกิดฟิล์มลอกจากปัจจัยภายนอก

2. จากผลการทดลอง ระดับปัจจัยทั้ง 3 ที่ใช้ในการทดลอง ดังกล่าวไม่ใช่ระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการผลิตนี้ หากต้องการทราบว่าระดับปัจจัยทั้ง 3 คือ อุณหภูมิฐานรองรับชนิดซิลิคอน ระดับสุญญากาศ และอัตราระเหยสารที่เหมาะสมที่สุดเป็นเท่าใด ควรต้องทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์ หาระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อไป

3. เนื่องจากการทดลองกับเครื่องเคลือบตัวอย่างจำเป็นต้องใช้เครื่องเคลือบในกระบวนการจริงซึ่งมีตารางการผลิตที่แน่นอน จึงต้องใช้เครื่องเคลือบในช่วงนอกเวลาการผลิต

4. มีข้อจำกัดในการใช้แผ่นซิลิคอนเวเฟอร์เปล่า ซึ่งมีราคาค่อนข้างสูงที่ใช้ในการทดสอบงาน จึงต้องใช้แผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ที่เป็นงานเสียจากปัญหาอื่นๆมาทำการทดลอง

11.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยในอนาคต

จากการวิเคราะห์ปัญหาอย่างเป็นระบบและการใช้หลักการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ พารามิเตอร์ของกระบวนการเคลือบผิวที่มีผลกระทบต่อปัญหาฟิล์มลอกของฐานรองรับชนิดซิลิคอนพบว่าสามารถทราบปัจจัยที่ทำให้ฟิล์มลอกเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตได้ ดังนั้นควรมีการใช้แนวทางการวิจัยในลักษณะนี้ไปขยายผลสู่ปัญหาอื่นต่อไป เช่น ปัญหาเกี่ยวกับการเกิดของ*เสีย*ในส่วนการผลิตอื่นเป็นต้น นอกจากนี้ ยังสามารถประยุกต์ใช้กับลักษณะงานหรือกิจกรรมอื่นๆ ในองค์กร เช่น การออกแบบผลิตภัณฑ์ การเพิ่มผลผลิต การลดเวลาการทำงาน การพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการผลิตเป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

กฤตธน ส้มอั้น.2554.**ปัจจัยที่ส่งผลต่อความรู้และเจตคติของหัวหน้างานเกี่ยวกับระบบห้องสะอาดในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์และอุตสาหกรรมการผลิตยาในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล** วารสารครุศาสตร์อุตสาหกรรม

นิรันดร์ วิทิตอนันต์.2542. **การวัดความหนาของฟิล์มทองคำซึ่งเคลือบบนแผ่นแก้วด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอ็กซ์** วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิตสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

นิรันดร์ วิทิตอนันต์.2553. **กระจกเงาเคลือบโครเมียมที่เคลือบด้วยเทคนิคสปัตเตอริงสำหรับกระจกเงาส่องหลังรถยนต์** วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ

นงลักษณ์ วิรัชชัย. 2543. ที่ระลึกวันเกษียณอายุราชการ. ภาควิชาวิจัยการศึกษา คณะครุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มะลิ แซ่อึ้ง. **การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความหนาของผิวเคลือบในกระบวนการเคลือบผิวไฟฟ้า**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.

ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, รศ.ดร.พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์.2551. **การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง(Design and analysis of experiment)**.กรุงเทพฯ: ท้อป

ปารเมศ ชุติมา. **การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม**. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

วันทนีย์ อ่อนบารุง **การศึกษาปัจจัยที่ก่อให้เกิดฟองอากาศในกระบวนการผลิตพื้นรองเท้า (OUT SOLE) ณ บริษัท เอคโค่ (ประเทศไทย) จากัด** ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อนันต์ บรรหารสกุล. 2549. **การสร้างแบบจำลองขนานสำหรับการเคลือบฟิล์มบางโดยใช้วิธี DSMC** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

H Angus Macleod, 1986, 2001 **Thin Film Optical Filters** 3rd ed., Institute of Physics, London (n.p.)

Kitamura, T., Hirakata, H. and Itsuji, T. (2003). **Effect of residual stress on Delamination from Interface dege Between Nano-films**, Engineering Fracture Mechanics.

Sheeja, D., Tay, B.K., Leong, K.W. and Lee,C.H. (2002). **Effect on film thickness on The Stress and adhesion of diamond-like Carbon Coatings**, Diamond and Related Material.

Varias, A.G., Mastorakos, I. And Aifantis, E.C. (1999). **Numerical simulation of Interface Crack in thin films**, International Journal of Fracture.

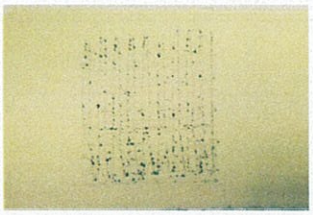
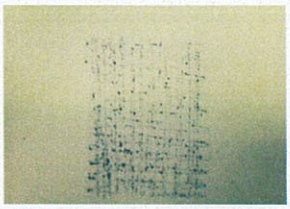
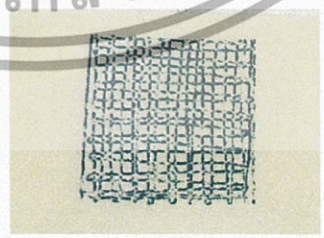
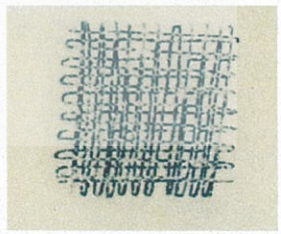
Wei, C. And Yen, J.Y. (2007). **Effect of film Thickness and interlayer on the Adhesion Strength Of diamond like carbon films on Different Substrates**, Diamond and Related Materials

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ผลการทดสอบการยึดเกาะของฟิล์มบางจากการทดลอง

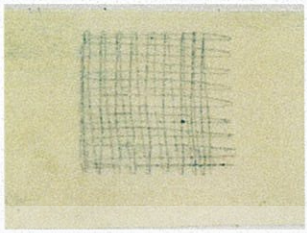
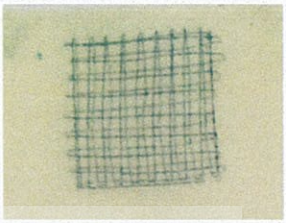
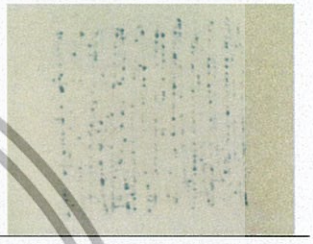
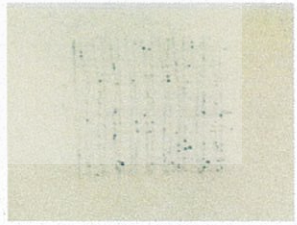
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 แสดงผลการทดสอบการยึดเกาะของฟิล์มบางจากการทดลอง

การทดลองที่	การหลดลอกของฟิล์ม (%)	รูปชิ้นงานการทดสอบ (ชิ้นที่ 1)	รูปชิ้นงานการทดสอบ (ชิ้นที่ 2)
1	72%		
2	61%		
3	84%		
4	59%		
5	86%		

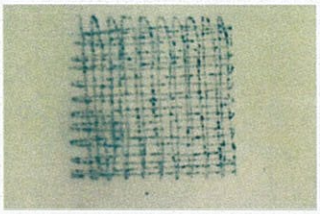
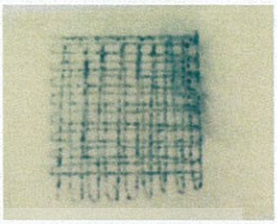
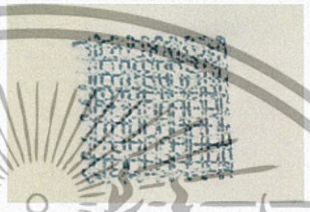
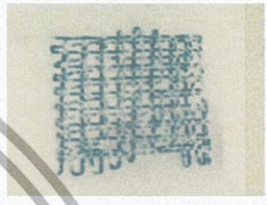
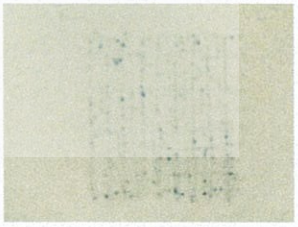
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1(ต่อ)

การทดลองที่	การหลดลอกของฟิล์ม (%)	รูปชิ้นงานการทดสอบ (ชิ้นที่ 1)	รูปชิ้นงานการทดสอบ (ชิ้นที่ 2)
6	76%		
	68%		
8	74%		
9	78%		
10	58%		

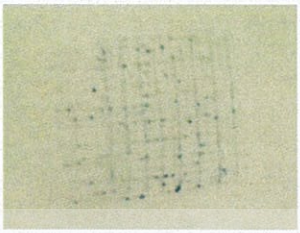
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 (ต่อ)

การทดลองที่	การหลดลอกของฟิล์ม (%)	รูปชิ้นงานการทดสอบ (ชิ้นที่ 1)	รูปชิ้นงานการทดสอบ (ชิ้นที่ 2)
11	77%		
12	86%		
13	76%		
14	54%		
15	67%		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 (ต่อ)

การทดลองที่	การหลดลอกของฟิล์ม (%)	รูปชิ้นงานการทดสอบ (ชิ้นที่ 1)	รูปชิ้นงานการทดสอบ (ชิ้นที่ 2)
16	58%		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
แบบฟอร์มบันทึกผลที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Durability Test Record For BSE Product

Abnormal from coating >> ◯ Normal ◯ Re-baking ✓ Other test - 1

Approved by

Product Name : _____ **Lot No :** _____

Serial No : _____

Before : Boil test

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : Boil test (Test condition : Boil the DI water 100°C / Period of time 10 minute)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : Heat Cycle Test Actual Temp. : [ ] [ ]

Test condition : Temperature 180°C , - 60 °C / Period of time 50 minute x 5 times

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : PCT Test Actual Temp. : [ ] Actual Humidity : [ ]

(Test condition : Temperature 120°C , 100 % RH / Period of time 10 hour.)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

Form No.W-QA-107-F01 Rev.C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Durability Test Record For BSE Product

Abnormal from coating >> ◯ Normal ◯ Re-baking ✓ Other test-2

Approved by

Product Name : _____ **Lot No :** _____

Serial No : _____

Before : Boil test

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : Boil test (Test condition : Boil the DI water 100°C / Period of time 10 minute)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : Heat Cycle Test Actual Temp. : ☐ ☐

Test condition : Temperature 180°C , - 60 °C / Period of time 50 minute x 5 times

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : PCT Test Actual Temp. : ☐ Actual Humidity : ☐

(Test condition : Temperature 120°C , 100 % RH / Period of time 10 hour.)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

Form No.W-QA-107-F01 Rev.C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Durability Test Record For BSE Product

Abnormal from coating >> ◯ Normal ◯ Re-baking ✓ Other test - 3

Approved by

Product Name : _____ **Lot No :** _____

Serial No : _____

Before : Boil test

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ ◯ OK NG

Confirm By (QA) ◯ ◯ OK NG

After : Boil test (Test condition : Boil the DI water 100°C / Period of time 10 minute)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ ◯ OK NG

Confirm By (QA) ◯ ◯ OK NG

After : Heat Cycle Test Actual Temp. : [ ] [ ]

Test condition : Temperature 180°C , - 60 °C / Period of time 50 minute x 5 times

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ ◯ OK NG

Confirm By (QA) ◯ ◯ OK NG

After : PCT Test Actual Temp. : [ ] Actual Humidity : [ ]

(Test condition : Temperature 120°C , 100 % RH / Period of time 10 hour.)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ ◯ OK NG

Confirm By (QA) ◯ ◯ OK NG

Form No.W-QA-107-F01 Rev.C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Durability Test Record For BSE Product

Abnormal from coating >> ◯ Normal ◯ Re-baking ✓ Other test-4

Approved by

Product Name : _____ **Lot No :** _____

Serial No : _____

Before : Boil test

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : Boil test (Test condition : Boil the DI water 100°C / Period of time 10 minute)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : Heat Cycle Test Actual Temp. : ☐ ☐

Test condition : Temperature 180°C , - 60 °C / Period of time 50 minute x 5 times

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : PCT Test Actual Temp. : ☐ Actual Humidity : ☐

(Test condition : Temperature 120°C , 100 % RH / Period of time 10 hour.)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

Form No.W-QA-107-F01 Rev.C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Durability Test Record For BSE Product

Abnormal from coating >> ◯ Normal ◯ Re-baking ✓ Other test-5

Approved by

Product Name : _____ **Lot No :** _____

Serial No : _____

Before : Boil test

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface

B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : Boil test (Test condition : Boil the DI water 100°C / Period of time 10 minute)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : Heat Cycle Test Actual Temp. : [ ] [ ]

Test condition : Temperature 180°C , - 60 °C / Period of time 50 minute x 5 times

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : PCT Test Actual Temp. : [ ] Actual Humidity : [ ]

(Test condition : Temperature 120°C , 100 % RH / Period of time 10 hour.)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

Form No.W-QA-107-F01 Rev.C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Durability Test Record For BSE Product

Abnormal from coating >> ◯ Normal ◯ Re-baking ✓ Other test-b	Approved by

Product Name : _____ **Lot No :** _____

Serial No : _____

Before : Boil test

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : Boil test (Test condition : Boil the DI water 100°C / Period of time 10 minute)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : Heat Cycle Test Actual Temp. : ☐ ☐

Test condition : Temperature 180°C , - 60 °C / Period of time 50 minute x 5 times

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : PCT Test Actual Temp. : ☐ Actual Humidity : ☐

(Test condition : Temperature 120°C , 100 % RH / Period of time 10 hour.)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

Form No.W-QA-107-F01 Rev.C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Durability Test Record For BSE Product

Abnormal from coating >> ◯ Normal ◯ Re-baking ✓ Other test-2

Approved by

Product Name : _____ **Lot No :** _____

Serial No : _____

Before : Boil test

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : Boil test (Test condition : Boil the DI water 100°C / Period of time 10 minute)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : Heat Cycle Test Actual Temp. : [ ] [ ]

Test condition : Temperature 180°C , - 60 °C / Period of time 50 minute x 5 times

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : PCT Test Actual Temp. : [ ] Actual Humidity : [ ]

(Test condition : Temperature 120°C , 100 % RH / Period of time 10 hour.)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

Form No.W-QA-107-F01 Rev.C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Durability Test Record For BSE Product

Abnormal from coating >> ◯ Normal ◯ Re-baking ✓ Other test-8

Approved by

Product Name : _____ **Lot No :** _____

Serial No : _____

Before : Boil test

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface

B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : Boil test (Test condition : Boil the DI water 100°C / Period of time 10 minute)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : Heat Cycle Test Actual Temp. : [ ] [ ]

Test condition : Temperature 180°C , - 60 °C / Period of time 50 minute x 5 times

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : PCT Test Actual Temp. : [ ] Actual Humidity : [ ]

(Test condition : Temperature 120°C , 100 % RH / Period of time 10 hour)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

Form No.W-QA-107-F01 Rev.C

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Durability Test Record For BSE Product

Abnormal from coating >> ◯ Normal ◯ Re-baking ✓ Other test-9

Approved by

Product Name : _____ **Lot No :** _____

Serial No : _____

Before : Boil test

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface

B Surface

Judge By (QC) ◯ ◯ OK NG

Confirm By (QA) ◯ ◯ OK NG

After : Boil test (Test condition : Boil the DI water 100°C / Period of time 10 minute)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ ◯ OK NG

Confirm By (QA) ◯ ◯ OK NG

After : Heat Cycle Test Actual Temp. : [ ] [ ]

Test condition : Temperature 180°C , - 60 °C / Period of time 50 minute x 5 times

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ ◯ OK NG

Confirm By (QA) ◯ ◯ OK NG

After : PCT Test Actual Temp. : [ ] Actual Humidity : [ ]

(Test condition : Temperature 120°C , 100 % RH / Period of time 10 hour.)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ ◯ OK NG

Confirm By (QA) ◯ ◯ OK NG

Form No.W-QA-107-F01 Rev.C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Durability Test Record For BSE Product

Abnormal from coating >> ◯ Normal ◯ Re-baking ✓ Other test 10

Approved by

Product Name : _____ **Lot No :** _____

Serial No : _____

Before : Boil test

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ ◯ OK NG

Confirm By (QA) ◯ ◯ OK NG

After : Boil test (Test condition : Boil the DI water 100°C / Period of time 10 minute)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ ◯ OK NG

Confirm By (QA) ◯ ◯ OK NG

After : Heat Cycle Test Actual Temp. : [ ] [ ]

Test condition : Temperature 180°C , - 60 °C / Period of time 50 minute x 5 times

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ ◯ OK NG

Confirm By (QA) ◯ ◯ OK NG

After : PCT Test Actual Temp. : [ ] Actual Humidity : [ ]

(Test condition : Temperature 120°C , 100 % RH / Period of time 10 hour.)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ ◯ OK NG

Confirm By (QA) ◯ ◯ OK NG

Form No.W-QA-107-F01 Rev.C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Durability Test Record For BSE Product

Abnormal from coating >>	◯ Normal	◯ Re-baking	✓ Other test-11	Approved by

Product Name : _____ **Lot No :** _____

Serial No : _____

Before : Boil test

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : Boil test (Test condition : Boil the DI water 100°C / Period of time 10 minute)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : Heat Cycle Test Actual Temp. : [ ] [ ]

Test condition : Temperature 180°C , - 60 °C / Period of time 50 minute x 5 times

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : PCT Test Actual Temp. : [ ] Actual Humidity : [ ]

(Test condition : Temperature 120°C , 100 % RH / Period of time 10 hour.)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

Form No.W-QA-107-F01 Rev.C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Durability Test Record For BSE Product

Abnormal from coating >> ◯ Normal ◯ Re-baking ☑ Other test - 12

Approved by

Product Name : _____ **Lot No :** _____

Serial No : _____

Before : Boil test

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : Boil test (Test condition : Boil the DI water 100°C / Period of time 10 minute)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : Heat Cycle Test Actual Temp. : [ ] [ ]

Test condition : Temperature 180°C , - 60 °C / Period of time 50 minute x 5 times

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : PCT Test Actual Temp. : [ ] Actual Humidity : [ ]

(Test condition : Temperature 120°C , 100 % RH / Period of time 10 hour.)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

Form No.W-QA-107-F01 Rev.C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Durability Test Record For BSE Product

Abnormal from coating >> ◯ Normal ◯ Re-baking ✓ Other test - 13

Approved by

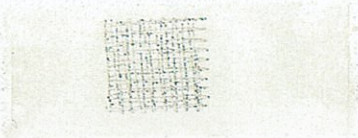
Product Name : _____ **Lot No :** _____

Serial No : _____

Before : Boil test

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface



Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : Boil test (Test condition : Boil the DI water 100°C / Period of time 10 minute)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : Heat Cycle Test Actual Temp. : [ ][ ]

Test condition : Temperature 180°C , - 60 °C / Period of time 50 minute x 5 times

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : PCT Test Actual Temp. : [ ] Actual Humidity : [ ]

(Test condition : Temperature 120°C , 100 % RH / Period of time 10 hour.)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

Form No.W-QA-107-F01 Rev.C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Durability Test Record For BSE Product

Abnormal from coating >> ◯ Normal ◯ Re-baking ☑ Other test-14

Approved by

Product Name : _____ **Lot No :** _____

Serial No : _____

Before : Boil test

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : Boil test (Test condition : Boil the DI water 100°C / Period of time 10 minute)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : Heat Cycle Test Actual Temp. : [ ] [ ]

Test condition : Temperature 180°C , - 60 °C / Period of time 50 minute x 5 times

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : PCT Test Actual Temp. : [ ] Actual Humidity : [ ]

(Test condition : Temperature 120°C , 100 % RH / Period of time 10 hour.)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

Form No.W-QA-107-F01 Rev.C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Durability Test Record For BSE Product

Abnormal from coating >> ◯ Normal ◯ Re-baking ✓ Other test-15

Approved by

Product Name : _____ **Lot No :** _____

Serial No : _____

Before : Boil test

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : Boil test (Test condition : Boil the DI water 100°C / Period of time 10 minute)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : Heat Cycle Test Actual Temp. : [ ] [ ]

Test condition : Temperature 180°C , - 60 °C / Period of time 50 minute x 5 times

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : PCT Test Actual Temp. : [ ] Actual Humidity : [ ]

(Test condition : Temperature 120°C , 100 % RH / Period of time 10 hour.)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

Form No.W-QA-107-F01 Rev.C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Durability Test Record For BSE Product

Abnormal from coating >> ◯ Normal ◯ Re-baking ✓ Other test-16

Approved by

Product Name : _____ **Lot No :** _____

Serial No : _____

Before : Boil test

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : Boil test (Test condition : Boil the DI water 100°C / Period of time 10 minute)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : Heat Cycle Test Actual Temp. : [ ] [ ]

Test condition : Temperature 180°C , - 60 °C / Period of time 50 minute x 5 times

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

After : PCT Test Actual Temp. : [ ] Actual Humidity : [ ]

(Test condition : Temperature 120°C , 100 % RH / Period of time 10 hour.)

Date : _____ Inspector(QC) Name : _____ QA Name : _____

A Surface B Surface

Judge By (QC) ◯ OK ◯ NG

Confirm By (QA) ◯ OK ◯ NG

Form No.W-QA-107-F01 Rev.C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายยรรยง ศรีสวัสดิ์
วัน/เดือน/ปีเกิด	25 มกราคม 2521
สถานที่เกิด	ตำบลไร่ อำเภอพรรณานิคม จังหวัดสกลนคร
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	เลขที่ 30 หมู่ 16 บ้านไฮ่ ตำบล ไร่ อำเภอพรรณานิคม จังหวัดสกลนคร 47130
ประวัติการศึกษา	ปี พ.ศ. 2531 สำเร็จการศึกษาในระดับประถมศึกษาชั้นปีที่ 6 จากโรงเรียนบ้านไร่บ้านไฮ่ อำเภอพรรณานิคม จังหวัดสกลนคร
	ปี พ.ศ. 2534 สำเร็จการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาชั้นปีที่ 3 จากโรงเรียนเทพสวัสดิ์วิทยา อำเภอพรรณานิคม จังหวัดสกลนคร
	ปี พ.ศ. 2537 สำเร็จการศึกษาในระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช) แผนกวิชาอิเล็กทรอนิกส์ จากวิทยาลัยเทคนิคสกลนคร อำเภอ เมือง จังหวัดสกลนคร
	ปี พ.ศ. 2539 สำเร็จการศึกษาในระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง(ปวส) แผนกวิชาอิเล็กทรอนิกส์ จากวิทยาลัยเทคนิคสกลนคร อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร
	ปี พ.ศ. 2542 สำเร็จการศึกษาในระดับบริญญาตรี อุตสาหกรรมบัณฑิต (อ.ส.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ กำลัง จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร
	ปี พ.ศ. 2558 สำเร็จการศึกษาในระดับบริญญาโท ครุศาสต์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต (ค.อ.ม.) สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้