

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเปรียบเทียบการทำเครื่องหมายบนโพลีโพรไพลีนด้วยเครื่องพิมพ์แบบ
อิงค์เจ็ทและเครื่องเลเซอร์ไฟเบอร์

COMPARISON OF MARKING ON POLYPROPYLENE BETWEEN
INK - JET PRINTER AND FIBER LASER



T123044

อภิรักษ์ โสภากัญช์
APINAN SOPAKHUN

จพ.
๑ ๒๐๑๗
๑๐๐๖

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 123044
วัน,เดือน,ปี 18 ต.ค. 2555

b. 124469527
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2555

KMITL-2012-EN-M-217-130

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COMPARISON OF MARKING ON POLYPROPYLENE BETWEEN
INK - JET PRINTER AND FIBER LASER



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2012

KMITL-2012-EN-M-217-130

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2012

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเปรียบเทียบการทำเครื่องหมายบนโพลีโพรไพลีนด้วยเครื่องพิมพ์แบบอิงค์เจ็ทและเครื่องเลเซอร์ไฟเบอร์

Thesis Title Comparison of Marking on Polypropylene between Ink-Jet Printer and Fiber Laser

นักศึกษา นายอภิรักษ์ โสภากัณฑ์

รหัสประจำตัว 53612404

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมวิศวกรรมอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.วิภู ศรีสืบสาย

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2012-EN-M-217-130

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สุริภณ	สมควรพาณิชย์	
ดร.สันติ	วัฒน์านุสรณ์	
รศ.ติลก	ศรีประไพ	
ดร.ศิริเดช	บุญแสง	
ดร.วิภู	ศรีสืบสาย	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 30 พฤษภาคม พ.ศ. 2555 เวลา 13.00 – 15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)
คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่ 30 พฤษภาคม พ.ศ. 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเปรียบเทียบการทำเครื่องหมายบนโพลีโพรไพลีนด้วยเครื่องพิมพ์แบบอิงค์เจ็ทและเครื่องเลเซอร์ไฟเบอร์
นักศึกษา	นายอภิรักษ์ โสภากัญช์
รหัสประจำตัว	53612404
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
พ.ศ.	2555
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร. วิภู ศรีสืบสาย

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ศึกษาการเปรียบเทียบการทำเครื่องหมายบนพลาสติกโพลีโพรไพลีนด้วยเครื่องพิมพ์แบบอิงค์เจ็ทและเครื่องเลเซอร์ไฟเบอร์ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการพิมพ์ลงบนพลาสติกโพลีโพรไพลีน โดยอาศัยการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค 2^{k-p} ซึ่งได้กำหนดปัจจัยทั้งหมด 6 ปัจจัย การใช้เครื่องอิงค์เจ็ทในการพิมพ์ลงบนผลิตภัณฑ์ พบปัญหาว่าหมึกที่ใช้ในการพิมพ์ไม่สามารถแห้งติดบนผลิตภัณฑ์ได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดความล่าช้าต่อขบวนการผลิต ซึ่งตัวแปรที่มีผลต่อการแห้งของน้ำหมึกบนผลิตภัณฑ์นั้นมีจำนวนมาก ดังนั้นจึงใช้แนวคิดการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองมาใช้ในการออกแบบนี้เพื่อหาเวลาในการแห้งของน้ำหมึก (Dry Time) สามารถวัดได้โดยการจับเวลาน้ำหมึกที่แห้งติดบนผลิตภัณฑ์ทำการออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิค 2^{6-2} Fractional Factorial เพื่อทำการกรองปัจจัย จากนั้นนำปัจจัยที่ทำการคัดแยกแล้วมาทำการวิเคราะห์ต่อโดยใช้เทคนิค 2^{3-1} Fractional Factorial เพื่อทำการหาสมการ แบบถดถอย ที่ใช้สำหรับหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการพิมพ์หมึกลงบนพลาสติกโพลีโพรไพลีน การทำให้เกิดรอยบนพลาสติกด้วยแสงเลเซอร์เป็นการทำให้เกิดรอยอย่างถาวรที่ดีที่สุด วิธีการนี้เป็นวิธีการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งไม่ต้องใช้หมึกพิมพ์ที่หลุดลอกได้ง่ายและติดคงทนต่อตัวทำละลาย ชนิดของพลาสติกมีผลต่อสีของรอยที่เกิดขึ้น ถ้าเกิดกระบวนการคาร์บอนไนเซชันจะได้รอยสีเข้มและ ถ้าเกิดกระบวนการโพลีเมริงจะได้สีอ่อน ซึ่งได้กำหนดปัจจัยทั้งหมด 6 ปัจจัยแผนการดำเนินการดังนี้ โดยใช้เทคนิค 2^{6-2} Fractional Factorial เพื่อทำการกรองปัจจัย หาสีที่เกิดขึ้นบนผลิตภัณฑ์ จากนั้นทำการหาจุดคุ้มทุนในการผลิตเพื่อจะเลือกใช้เครื่องอิงค์เจ็ทหรือเครื่องเลเซอร์ในการพิมพ์ โดยผลการทดลองด้วยเครื่องอิงค์เจ็ทพบว่า ขนาดตัวอักษรที่พิมพ์ ความละเอียดในการพิมพ์ และเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของตัวทำละลาย มีผลต่อความเร็วในการแห้งของน้ำหมึกบนผลิตภัณฑ์ที่ความละเอียด 150x150 dpi จะทำให้ใช้เวลาน้อยกว่าความละเอียด 600x600 dpi เมื่อขนาดของตัวอักษรอยู่ที่ 10 mm และเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของตัวทำละลายที่ 80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเวลาในการแห้งของน้ำหมึกจะอยู่ที่ 2 วินาที ผลการทดลองด้วยเครื่องเลเซอร์พบว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อสีที่เกิดขึ้นบนผลิตภัณฑ์นั้นได้แก่ ขนาดของตัวอักษร ค่าความถี่ที่ใช้ในการพิมพ์ ค่าพลังงานที่ใช้ในการพิมพ์ เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตที่ 800,000 ชิ้นต่อปี พบว่าต้นทุนในการใช้เครื่องอิงค์เจ็ทอยู่ที่ 0.049 บาทต่อชิ้น ต้นทุนในการใช้เครื่องเลเซอร์อยู่ที่ 0.174 บาทต่อชิ้น

Thesis	COMPARISON OF MARKING ON POLYPROPYLENE BETWEEN INK - JET PRINTER AND FIBER LASER
Student	Mr. Apinan Sopakhun
Student ID.	53612404
Degree	Master of Engineering
Program	Industrial Engineering
Year	2012
Thesis Advisor	Dr. Wipoo Sriseubsai

ABSTRACT

This thesis was study on the comparison of marking on polypropylene(PP) between an Inkjet printer and Laser Fiber. The objective of this study was to determine the appropriate processing parameters for marking on polypropylene(PP). The design of experimental , 2^{k-p} was used with 6 main factors. The problem when marking product with inkjet was long dry time and made delay process. Although there were many factors effect to dry time , the main 6 factors were defined and used Fractional Factorial design , 2^{6-2} to filter those factors. After that , 2^{3-1} Fractional Factorial design was used to find the regression equation for defining the appropriate processing condition. The Laser Fiber marking was the best marking process with permanent mark. The type of plastic was effected to the color of marking. The carbonization process gave dark color marking but forming process gave light color marking. The Fractional Factorial design , 2^{6-2} was used to filter the factors. The results showed that. font size, resolution and percentage of the solvent concentration when marking with inkjet affected to the less drying time of the ink on the product with resolution of 150x150 dpi than the resolution of 600x600 dpi while the font size was 10 mm and the concentration of solvent was 80%. The drying time of ink was 2 sec. The results when using Laser Fiber showed the font size, frequency of printing and energy of printing were main effected on the color of printing. Comparison the cost of producing 800,000 pieces/year, the cost of using Inkjet printer was 0.049 baht/piece and 0.174 baht/piece when using Fiber laser.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.วิภู ศรีสืบสาย ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะ และช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้แก่ข้าพเจ้า ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง และขอขอบพระคุณอาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมทุกท่านที่ให้คำแนะนำ ชี้แนะในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณบุคลากรประจำสาขาวิชาอุตสาหกรรม และเจ้าหน้าที่บัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเจ้าหน้าที่บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

ขอขอบคุณเพื่อน พี่และน้องๆ นักศึกษาปริญญาโทสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกคน ที่ช่วยให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำในเรื่องต่างๆ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้รับทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็น ให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า และผู้มีพระคุณทุกท่าน

อภิรักษ์ โสภากัณฑ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	II
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 สมมุติฐานงานวิจัย	3
1.4 ขอบเขตของการศึกษา	3
1.5 กรอบแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ทฤษฎีเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท	5
2.2 เลเซอร์	6
2.3 การทำงานของเลเซอร์	6
2.3.1 องค์ประกอบที่สำคัญในการทำให้เกิดแสงเลเซอร์	8
2.3.2 ไฟเบอร์เลเซอร์	9
2.4 การประยุกต์ใช้งานเลเซอร์	10
2.4.1 การใช้เลเซอร์เพื่อเจาะ ตัด เชื่อม	10
2.4.2 การใช้เลเซอร์ด้านการแพทย์	10
2.4.3 การใช้เลเซอร์ด้านการสื่อสารโทรคมนาคม	10
2.4.4 การใช้เลเซอร์ด้านสร้างภาพทางด้านสร้างภาพ 3 มิติ	11
2.4.5 การใช้เลเซอร์ในการวัด	11
2.4.6 การใช้เลเซอร์ในสำนักงานและในบ้าน	11
2.4.7 การใช้เลเซอร์ในงานด้านนิติศาสตร์	11
2.4.8 การใช้เลเซอร์ในด้านเลเซอร์ฟิวชั่น	11
2.5 การค้นพบเลเซอร์	12
2.5.1 คุณสมบัติโคฮีเร้นท์ของเลเซอร์	12
2.6 ชนิดพลาสติก	15
2.6.1 เทอร์โมพลาสติก	15
2.6.2 เทอร์โมเซตติงพลาสติก	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ IV ไปถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.3 โพลีโพรพิลีน	17
2.6.4 คุณสมบัติของโพลีโพรพิลีน	18
2.6.5 การสลายตัวของโพลีโพรพิลีน	19
2.6.6 ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากโพลีโพรพิลีน.....	19
2.7 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล	20
2.7.1 การออกแบบเพื่อการคัดเลือก.....	20
2.7.2 การออกแบบการทดลองแบบ FULL FACTORIAL	20
2.7.3 การออกแบบการทดลองแบบ TWO-LEVEL FULL FACTORIAL	21
2.7.4 การออกแบบการทดลองแบบ GENERAL FULL FACTORIAL.....	21
2.7.5 การออกแบบการทดลองแบบ FRACTIONAL FACTORIAL.....	21
2.7.6 การออกแบบการทดลองแบบ PLACKET-BURMAN.....	22
2.7.6 การออกแบบการทดลองแบบ 2^K	22
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	27
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการ.....	27
3.1.1 ขบวนการทดลองโดยใช้องค์เจ็ทพิมพ์ลงบนผลิตภัณฑ์.....	27
3.1.1.1 ชนิดน้ำหมึก.....	27
3.1.1.2 ชนิดตัวทำละลาย.....	27
3.1.1.3 ชนิดเครื่องพิมพ์	28
3.1.1.4 วัสดุที่ใช้ในการพิมพ์ทดสอบ.....	29
3.1.1.5 ขั้นตอนการทดลอง	29
3.1.1.6 วิธีการวัดผลการทดลอง	31
3.2 การออกแบบการทดลองของน้ำหมึกที่พิมพ์ลงบนผลิตภัณฑ์	31
3.2.1 กำหนดปัจจัย.....	31
3.2.2 การทดลองขั้นต้น.....	31
3.2.3 ทำการคัดแยกปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบสนอง	31
3.3 ขบวนการทดลองโดยใช้เลเซอร์พิมพ์ลงบนผลิตภัณฑ์	32
3.3.1 เครื่องเลเซอร์.....	32
3.3.2 ชุดดูดควัน.....	33
3.3.3 ชิ้นงานตัวอย่างทดลอง.....	34
3.4 ขั้นตอนการทดลอง	34
3.4.1 เครื่องเลเซอร์ยี่ห้อ MACSA.....	34
3.4.2 สร้างข้อความ.....	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.3 ปรับความเร็วของสายพาน.....	35
3.5 การออกแบบการทดลอง.....	35
3.5.1 กำหนดปัจจัย.....	35
3.5.2 การทดลองเลือกใช้เทคนิค 2^{6-2}	36
3.5.3 ทำการคัดแยกปัจจัย.....	36
3.6 ปัจจัยในการทดลองเบื้องต้น.....	36
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.....	38
4.1 ผลการทดลองด้วยอิงค์เจ็ท.....	38
4.1.1 ผลการทดลอง 2^{6-2}	38
4.1.2 ผลการทดลอง 2^{3-1}	42
4.1.3 STEEPEST DESCENT METHOD.....	45
4.2 ผลการทดลองด้วยเลเซอร์.....	49
4.3 การคำนวณหาจุดคุ้มทุนในการผลิตระหว่างเครื่องอิงค์เจ็ทกับเครื่องเลเซอร์.....	53
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	54
5.1 สรุปผลการพิมพ์โดยใช้เครื่องอิงค์เจ็ท.....	54
5.2 สรุปผลการพิมพ์โดยใช้เครื่องเลเซอร์.....	55
5.3 สรุปการเปรียบเทียบระหว่างเครื่องอิงค์เจ็ทกับเครื่องเลเซอร์.....	55
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	56
บรรณานุกรม.....	57
ภาคผนวก.....	60
ภาคผนวก ก. ผลการทดลอง.....	60
ภาคผนวก ข. การคำนวณจุดคุ้มทุน.....	67
ประวัติผู้เขียน.....	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้อง VI ึ่งอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ปัจจัยและระดับของปัจจัยของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท	32
3.2 ปัจจัยและระดับของปัจจัยของเครื่องพิมพ์เลเซอร์	36
4.1 ผลการทดลอง 2^{6-2} FRACTIONAL FACTORIAL	37
4.2 ผลการวิเคราะห์ ANOVA	40
4.3 REVISE FACTOR LEVEL	42
4.4 ผลการทดลอง 2^{3-1} FRACTIONAL FACTORIAL	42
4.5 ผลการวิเคราะห์ ANOVA	44
4.6 ผลการทดลองด้วย STEEPEST DESCENT	46
4.7 ผลการทดลองด้วย 2^{6-2} FRACTIONAL FACTORIAL	49
4.8 ผลการวิเคราะห์ด้วย ANOVA.....	50
ก. 1 ผลการทดลองและวิเคราะห์เครื่องอิงค์เจ็ท	60
ก. 2 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของ 2^{6-2}	61
ก. 3 REVISE FACTOR LEVEL ของ 2^{3-1}	62
ก. 4 ผลการทดลอง 2^{3-1}	63
ก. 5 ผลการวิเคราะห์ ANOVA 2^{3-1}	63
ก. 6 ผลการทดลองด้วยวิธี STEEPEST DESCENT.....	64
ก. 7 ผลการทดลอง 2^{6-2}	64
ก. 8 ผลการวิเคราะห์ ANOVA.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้อง VII ไปถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ลักษณะการพิมพ์อิงค์เจ็ทลงบนผลิตภัณฑ์	1
1.2 ลักษณะการพิมพ์เลเซอร์ลงบนผลิตภัณฑ์	2
1.3 ปัจจัยที่นำสนจะส่งผลต่อสีที่เกิดขึ้นบนพลาสติก	3
2.1 ลักษณะของเม็ดหมึกที่หยดลงกระดาษ	5
2.2 ระดับพลังงานของอะตอมแบบ 2 ระดับ	6
2.3 การดูดกลืนพลังงานและการปล่อยโปรตอนโดยธรรมชาติ	7
2.4 การปล่อยโปรตอนโดยธรรมชาติ	7
2.5 การแกว่งกวัดเลเซอร์	8
2.6 การปั๊มเลเซอร์	9
2.7 เลเซอร์ไดโอด	10
2.8 สูตรเคมี	17
2.9 โพลีโพรพิลีนที่มีการจัดเรียงโครงสร้างต่างกัน	18
2.10 RESIN IDENTIFICATION CODE 5	19
2.11 การออกทดลองแบบ 2 และ 3 ปัจจัย	21
3.1 ชนิดน้ำหมึก	27
3.2 ชนิดตัวทำละลาย	28
3.3 เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทรุ่น 7300	29
3.4 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	29
3.5 การเติมสารละลายลงในถังสำหรับเก็บกัก	30
3.6 สายพานที่ใช้ในการลำเลียงผลิตภัณฑ์	30
3.7 ส่วนของสายพานที่ใช้ในการปรับค่าความเร็วที่ใช้ในการพิมพ์	31
3.8 หัวเลเซอร์ (FIBER LASER)	33
3.9 ชุดควบคุม (CONTROL)	33
3.10 ชุดดูดควัน	34
3.11 ชิ้นงานตัวอย่างทดลอง	34
3.12 สายพานที่ใช้ในการลำเลียงผลิตภัณฑ์	35
3.13 การปรับความเร็วที่ใช้ในการพิมพ์	35
3.14 การเปรียบเทียบสีเลเซอร์	36
4.1 NORMAL PROBABILITY PLOT OF 2^{6-2}	39
4.2 THE RESIDUAL PLOT OF DRY TIME FOR 2^{6-2}	41
4.3 NORMAL PROBABILITY PLOT OF 2^{3-1}	43
4.4 THE RESIDUAL PLOT OF DRY TIME FOR 2^{3-1}	45
4.5 เวลาในการแห้งของน้ำหมึก	47
4.6 SURFACE PLOT	47
4.7 CONTOUR PLOT	48

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 NORMAL PROBABILITY PLOT OF 2^{6-2}	50
4.9 THE RESIDUAL PLOT OF COLOR FOR 2^{6-2}	52
4.10 แสดงการเปรียบเทียบต้นทุนระหว่างเครื่องอิงค์เจ็ทกับเครื่องเลเซอร์	53



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ IX ึ่งอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีการพัฒนาอุตสาหกรรมพลาสติกอย่างรวดเร็วและแพร่หลาย โดยพลาสติกเป็นวัสดุที่สำคัญในอุตสาหกรรมสินค้าอุปโภคบริโภค การติดฉลากหรือการทำเครื่องหมายของผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ทำการผลิตเป็นสิ่งสำคัญมากในตลาดวันนี้ สินค้าจะถูกระบุหรือทำเครื่องหมายต่างๆ เพื่อความปลอดภัยในตัวสินค้า เครื่องหมายต่างๆรวมถึง วันที่ผลิต วันหมดอายุ บาร์โค้ด หมายเลขประจำเครื่องบนชิ้นส่วน อิเล็กทรอนิกส์ ข้อความบนไม้ก๊อกของขวดไวน์ ตัวอักษรหรือตัวเลขบนฝาขวดน้ำอัดลม ป้ายชื่อบริษัท และตราสัญลักษณ์[1] ในปัจจุบันการทำเครื่องลงบนตัวสินค้าสามารถทำได้ 2 แบบคือ การใช้เครื่องพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท และการใช้เครื่องเลเซอร์ในการทำเครื่องหมาย การพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท (Inkjet) ลงบนผลิตภัณฑ์พบปัญหาว่าหมึกที่ใช้ในการพิมพ์ไม่สามารถแห้งติดบนผลิตภัณฑ์ได้อย่างรวดเร็ว เพราะการพิมพ์ด้วยหมึกเป็นการทำให้เม็ดหมึกไปเกาะเกาะไว้บนหน้าของพื้นผิว ลักษณะการพิมพ์อิงค์เจ็ทลงบนผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ทำให้เกิดความล่าช้าต่อขบวนการผลิต และทำให้เกิดความสิ้นเปลืองเป็นจำนวนมาก เทคโนโลยีของเลเซอร์เป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพในการลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมและลดค่าใช้จ่ายกว่าวิธีแบบเดิม[1]



รูปที่ 1.1 ลักษณะการพิมพ์อิงค์เจ็ทลงบนผลิตภัณฑ์[1]

การทำให้เกิดรอยบนพลาสติกด้วยแสงเลเซอร์เป็นการทำให้เกิดรอยอย่างถาวรที่ดีที่สุด วิธีการนี้เป็นวิธีการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งไม่ต้องใช้น้ำหมึกพิมพ์ที่หลุดลอกได้ง่ายและติดคงทนบนผลิตภัณฑ์[2] ปัจจุบันการทำเครื่องหมายด้วยเลเซอร์ สามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภทใหญ่ๆ ซึ่งแบ่งตามตัวกลางของเลเซอร์ มี แก๊ส ของแข็ง ของเหลว สารกึ่งตัวนำ การทำเครื่องหมายด้วยเลเซอร์บนผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำจะไม่ส่งผลต่อการทำเครื่องหมาย[2] ชนิดของพลาสติกมีผลต่อสีของรอยที่เกิดขึ้น ถ้าเกิดกระบวนการคาร์บอนไนเซชันจะได้รอยสีเข้มและ ถ้าเกิดกระบวนการโพลีเมอริงจะได้สีเอกสาร์นี่เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อ่อนลักษณะการพิมพ์เลเซอร์ลงบนผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ซึ่งการนำเลเซอร์เข้ามามีบทบาทเพิ่มมากขึ้นเพื่อทดแทนการใช้งานด้วยเครื่องอิงค์เจ็ทเริ่มเห็นได้มากขึ้นเพราะมีข้อได้เปรียบดังนี้

ข้อได้เปรียบของการทำเครื่องหมายด้วยเลเซอร์ ได้แก่

1. รอยติดทนนานโดยไม่ต้องปรับสภาพพื้นผิวพลาสติกก่อนการยิงเลเซอร์
2. สามารถออกแบบลวดลายได้หลากหลาย ทำลวดลายขนาดเล็กๆได้และใช้ได้กับทุกพื้นผิว
3. ความเร็วในการพิมพ์ด้วยเลเซอร์มีความเร็วสูงและไม่ต้องสัมผัสพื้นผิวของผลิตภัณฑ์
4. ในการยิงเลเซอร์สามารถเชื่อมต่อกับสายผลิตได้
5. สามารถลดค่าใช้จ่ายในการผลิตได้ (Running cost)
6. ไม่ต้องใช้น้ำหมึก
7. สามารถป้องกันการปลอมแปลง



รูปที่ 1.2 ลักษณะการพิมพ์เลเซอร์ลงบนผลิตภัณฑ์[2]

บริษัท พี.ที.เอเซีย เป็นบริษัทนำเข้าเกี่ยวกับ เครื่องทำรหัส(Coding) เครื่องทำเครื่องหมาย (Marking) และได้ให้บริการกับอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมยานยนต์ รายใหญ่ในประเทศ งานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาให้กับบริษัท A ซึ่งทางลูกค้าได้ผลิตพลาสติกหุ้มสันรองเท้าส่งให้กับบริษัทนี้ก็ถือว่าเป็นลูกค้าที่สำคัญในปัจจุบัน และทางบริษัทได้ประสบปัญหาเกี่ยวกับความล่าช้าในการแห้งของน้ำหมึกที่จะพิมพ์ลงบนผลิตภัณฑ์ ทำให้ปริมาณการผลิตพลาสติกหุ้มสันรองเท้าไม่ทันต่อความต้องการของลูกค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ออกแบบและวิเคราะห์หาปัจจัยที่ทำให้หมึกพิมพ์แห้งติดบนผลิตภัณฑ์ได้อย่างรวดเร็ว โดยใช้เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท
- 1.2.2 เพื่อศึกษาหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของเครื่องเลเซอร์ที่ทำให้พลาสติกเกิดการเปลี่ยนสีตรงต่อความต้องการของลูกค้า
- 1.2.3 เพื่อเพิ่มจำนวนในการผลิตและลดค่าใช้จ่ายในการผลิตของเครื่องอิงค์เจ็ทและเลเซอร์

1.3 สมมุติฐานงานวิจัย

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำเครื่องหมาย (Marking) ด้วยเครื่องเลเซอร์ทำให้พลาสติกเปลี่ยนสี ได้แก่ ปัจจัย(Factor) ที่คาดว่าจะมีผลตอบสนอง(Response) ที่ต้องการศึกษา ซึ่งได้เลือกมา 6 ปัจจัย คือ ขนาดตัวอักษรที่พิมพ์(Font) ความเร็วที่ใช้ในการพิมพ์(Speed) ค่าความถี่ที่ใช้ในการพิมพ์ (MHz) ค่าพลังงานที่ใช้ในการพิมพ์(Resolution) จำนวนบรรทัดที่พิมพ์ ผู้ปฏิบัติงาน(Operation) และผลตอบสนองที่จะทำงานศึกษาคือสีที่ได้จากการพิมพ์ สามารถวัดได้จากวิธีการประมวลภาพ (image processing) มาประยุกต์ใช้ในการประเมินผล เพื่อให้การแบ่งแยกสีของวัสดุที่ทำการพิมพ์ด้วยเลเซอร์มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นปัจจัยที่ใส่เข้าไป (Input) ที่น่าจะส่งผลต่อสีที่เกิดขึ้นบนพลาสติกด้วยการพิมพ์ด้วยเลเซอร์ จะเห็นได้ว่าปัจจัยทั้ง 6 ปัจจัยนี้ สามารถควบคุมได้ (Controllable factors) ปัจจัยทั้งหมดนี้เป็นปัจจัยพื้นฐานในการควบคุมเครื่องเลเซอร์ ดังแสดงในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 ปัจจัยที่น่าจะส่งผลต่อสีที่เกิดขึ้นบนพลาสติก

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

ครอบคลุมถึงการศึกษา หาปัจจัยการแห้งของหมึกโดยใช้เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท โดยมีปัจจัยทั้งหมด 6 ปัจจัย 1ขนาดตัวอักษรที่ใช้พิมพ์ 2ความเร็วที่ใช้ในการพิมพ์ 3ความละเอียดในการพิมพ์ 4เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของตัวทำละลาย 5จำนวนบรรทัดที่พิมพ์ 6ผู้ปฏิบัติงาน และหาปัจจัยในการทำให้เกิดสีของ เครื่องเลเซอร์ โดยมีปัจจัยทั้งหมด 6 ปัจจัย 1ขนาดของตัวอักษร 2ความเร็วที่ใช้ในการพิมพ์ 3ค่าความถี่ที่ใช้ในการพิมพ์ 4ค่าพลังงานที่ใช้ในการพิมพ์ 5จำนวนบรรทัดที่พิมพ์ 6ผู้ปฏิบัติงาน จากนั้นจะทำการเก็บรวบรวมข้อมูล นำเสนอข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล ทั้งเครื่องอิงค์เจ็ทและเลเซอร์ ไม่ว่าจะเป็นใครๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเครื่องเลเซอร์ เพื่อทำการวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุนที่จะเลือกใช้เครื่องอิงค์เจ็ทหรือเครื่องเลเซอร์ในการผลิต

1.5 กรอบแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการแห้งของน้ำหมึกบนพลาสติกโพลีโพรพิลีนที่ทำการพิมพ์ด้วยเครื่องอิงค์เจ็ท เพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุดที่สามารถเพิ่มจำนวนการผลิต จากนั้นทำการหาปัจจัยที่มีผลต่อสีที่เกิดขึ้นบนพลาสติกโพลีโพรพิลีนที่ทำการยิงด้วยเครื่องเลเซอร์ เพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุดที่ลูกค้าต้องการ รวมทั้งพิจารณาชนิดของพลาสติกโพลีโพรพิลีนที่นำมาทำการทดลอง มุ่งเน้นให้เสมือนกับการใช้งานจริงในอุตสาหกรรม เพื่อที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมการทำเครื่องหมายบนผลิตภัณฑ์ เพื่อให้เกิดประโยชน์ และประสิทธิภาพมากที่สุด การทำวิจัยเพื่อให้บรรลุผลตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รู้ถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการแห้งของน้ำหมึกที่พิมพ์ลงพลาสติกโพลีโพรพิลีน โดยการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท
2. ได้รู้ถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนสีของพลาสติกโพลีโพรพิลีน โดยการพิมพ์ด้วยเครื่องเลเซอร์
3. สามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในขบวนการผลิตให้กับทางลูกค้า
4. สามารถเพิ่มจำนวนการผลิตให้กับทางลูกค้า

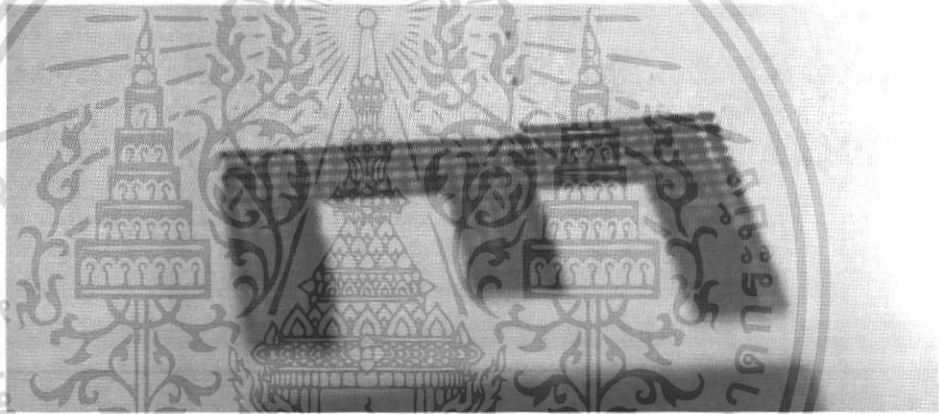
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท

การพิมพ์อิงค์เจ็ทต่อเนื่อง (Continuous Ink Jet Printer) อิงค์เจ็ทต่อเนื่องจะไม่ใช้ฟอร์มที่ติดต่อกันในการพิมพ์ด้วยความเร็วสูง เพื่อให้ข้อมูลต่างๆ เช่น วันที่ผลิต วันหมดอายุ รหัสชุด ชื่อสินค้าและโลโก้ ที่ใช้กับตัวสินค้า การพิมพ์อิงค์เจ็ทสามารถพิมพ์ได้อย่างรวดเร็ว และลงบนวัสดุที่หลากหลาย ไม่ว่าจะมีความหนาและรูปร่างของวัสดุเป็นลักษณะแบบใด เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ททำงานโดยการขับเคลื่อนกระแสไฟฟ้า อย่างต่อเนื่องของหมึกผ่านหัวฉีด เพื่อทำการป้อนประจุไฟฟ้าลงในเม็ดหมึก เพื่อทำให้เกิดข้อความขึ้น ข้อความของเครื่องอิงค์เจ็ทจะเป็นลักษณะของดอทเมทริกซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะของเม็ดหมึกที่หยดลงกระดาษ[3]

จากรูปที่ 2.1 เครื่องพิมพ์แบบฉีดหมึก โดยใช้วิธีพ่นหยดหมึกขนาดเล็กไปยังกระดาษ โดยใช้หลักการสแกนเหมือนกับการสแกนของลำอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์ จุดจะปรากฏเรียงกันอยู่บนกระดาษ เรียงต่อกันเป็นภาพและเส้นขึ้นมา โดยเม็ดหมึกจะถูกฉีดด้วยความเร็วสูงถึง 120,000 หยดต่อวินาที[3] เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทระบบซีไอเอเจใช้เทคโนโลยีขั้นพื้นฐาน เหมือนกันแต่จะต่างกันในเรื่องของการออกแบบตัวเครื่อง[3]

คุณสมบัติการพิมพ์ด้วยเครื่องอิงค์เจ็ท

1. มีขนาดเล็ก (เส้นผ่าศูนย์กลาง 50 ถึง 60 ไมครอน)
2. ความละเอียดของจุดที่ปรากฏบนภาพสูงมาก ปัจจุบันมีความละเอียดได้ถึง 1440x720 จุดต่อตารางนิ้ว
3. จุดต่างๆ บนภาพถ้ามองด้วยระยะใกล้ชัด จะเห็นเป็นจุดสีแตกต่างกัน แต่ถ้ามองระยะไกล จุดต่างๆ เหล่านี้ จะผสมสีกัน เกิดเป็นภาพสีธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 เลเซอร์

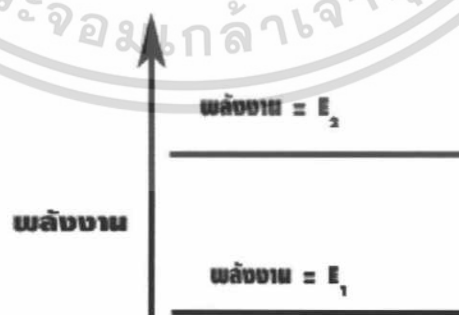
กลศาสตร์ควอนตัมของ(ชเรอดิงเงอร์) และ(ไอเซนเบิร์ก)ให้เราเข้าใจสเปกตรัมของระบบของอะตอมและโมเลกุลดีขึ้นมาก และทำให้มีเทคโนโลยีการประยุกต์ที่มนุษย์ไม่เคยนึกถึงได้ในสมัยก่อนๆ เช่น แสงเลเซอร์ ซึ่งแสงที่ไม่มีในธรรมชาติ เป็นแสงพิเศษที่นักฟิสิกส์สร้างขึ้นมา เป็นแสงที่มีความเข้มสูงมาก มากกว่าแสงที่เคยพบเห็นในธรรมชาติ นอกจากนี้ยังมีความถี่เดียวและเป็นแสงอาพันธ์ (coherent) สามารถทำให้ลำแสงขนาดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมาก แสงเลเซอร์ยังถูกออกแบบให้เกิดแสงอย่างต่อเนื่อง หรือทำให้เกิดช่วงเวลาสั้นๆระดับ 10-12 วินาที

เลเซอร์(Laser) ในภาษาอังกฤษได้ย่อมาจากคำว่า Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation มารวมกันในปัจจุบันนี้สามารถจะทำให้กำเนิดแสงเลเซอร์ได้หลายวิธี เช่นใช้ของแข็งที่เป็นผลึก แก๊ส ของเหลว หรือสารกึ่งตัวนำ และนำไปใช้งานได้หลายรูปแบบ อย่างไรก็ตาม เลเซอร์ทุกชนิดก็ทำงานด้วยหลักการเช่นเดียวกัน และบางกรณีใช้เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสง

หลังจาก Maiman สามารถสร้างแสงเลเซอร์ได้เป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1960 เซอร์ก็ได้รับการพิสูจน์ว่ามีประโยชน์มากมาย เช่น ในงานวิจัยวิทยาศาสตร์ ในการแพทย์หรือเป็นเครื่องใช้ในบ้านในบ้านเรือนเช่นเครื่องเล่นแผ่นซีดี(CD) ที่ต้องใช้เลเซอร์ในการอ่านรหัสดิจิทัล การใช้แสงเลเซอร์ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ การสื่อสารสมัยใหม่ ที่สามารถส่งสัญญาณจำนวนมากผ่านตามเส้นใยนำแสงไปยังปลายทางโดยใช้เลเซอร์เป็นคลื่นพา(carrier wave) จึงทำให้สัญญาณโทรศัพท์หลายสัญญาณสามารถเดินทางไปในเส้นใยนำแสงเดียวกันได้ คุณสมบัติพิเศษของเลเซอร์อีกประการหนึ่ง เป็นแสงความยาวคลื่นเดียว สามารถทำให้เป็นแสงขนาดลำเล็กได้[4]

2.3 การทำงานของเลเซอร์

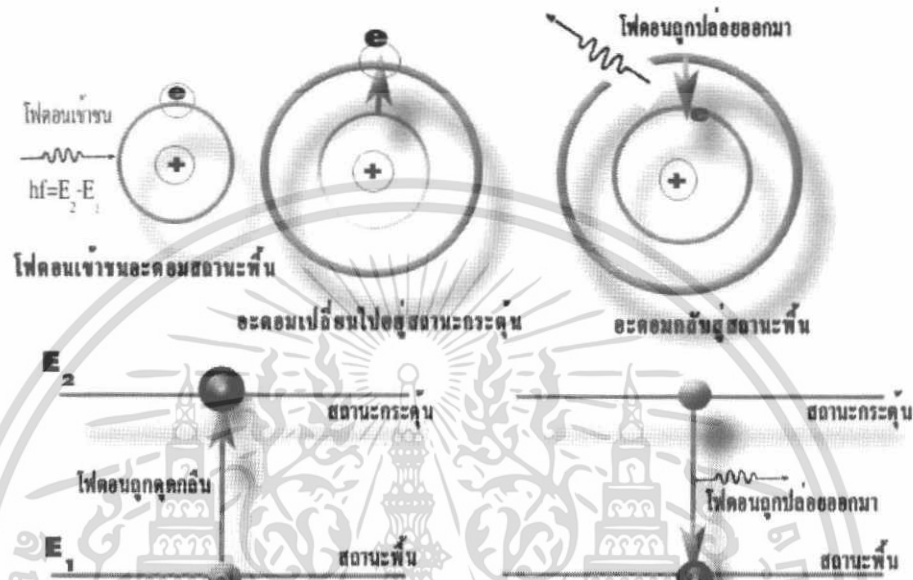
การทำงานของเลเซอร์พิจารณาระดับพลังงาน (energy level) ของอะตอม (หรือโมเลกุล) 2 ระดับ คือ อิเล็กตรอนในอะตอมนั้นมีพลังงาน E_1 และ E_2 โดยที่ $E_1 < E_2$ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ระดับพลังงานของอะตอมแบบ 2 ระดับ[5]

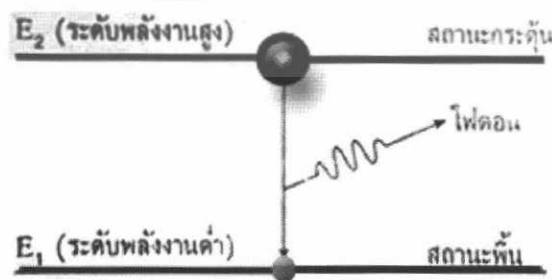
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าอิเล็กตรอนในอะตอมอยู่ที่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่าคือ E_1 เมื่อมีโฟตอนที่มีพลังงาน $hf = E_2 - E_1$ มาตกกระทบอะตอม โฟตอนจะถูกดูดกลืน แล้วอิเล็กตรอนในอะตอมจะถูกกระตุ้น (excite) จากระดับพลังงาน E_1 ให้ไปอยู่ที่ระดับพลังงานที่สูงกว่าคือ E_2 ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า การดูดกลืนพลังงาน (absorption) ดังแสดงในรูป 2.3



รูปที่ 2.3 การดูดกลืนพลังงานและการปล่อยโฟตอนโดยธรรมชาติ[5]

อิเล็กตรอนในอะตอมจะอยู่ที่ระดับพลังงาน E_2 ชั่วขณะหนึ่ง แล้วสลายกลับมาอยู่ที่ระดับพลังงาน E_1 ตามเดิม โดยการปล่อยโฟตอนออกมา ในทางกลับกัน ถ้าอิเล็กตรอนในอะตอมอยู่ที่ระดับพลังงาน E_2 มันจะหวนกลับมาสู่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่า E_1 และปล่อยโฟตอนหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา การปล่อยโฟตอนโดยวิธีนี้เป็น การปลดปล่อยโฟตอนแบบธรรมชาติ โฟตอนที่ปล่อยออกมาจะมีทิศทางไม่แน่นอน ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การปล่อยโฟตอนแบบธรรมชาติ (spontaneous emission)[5]

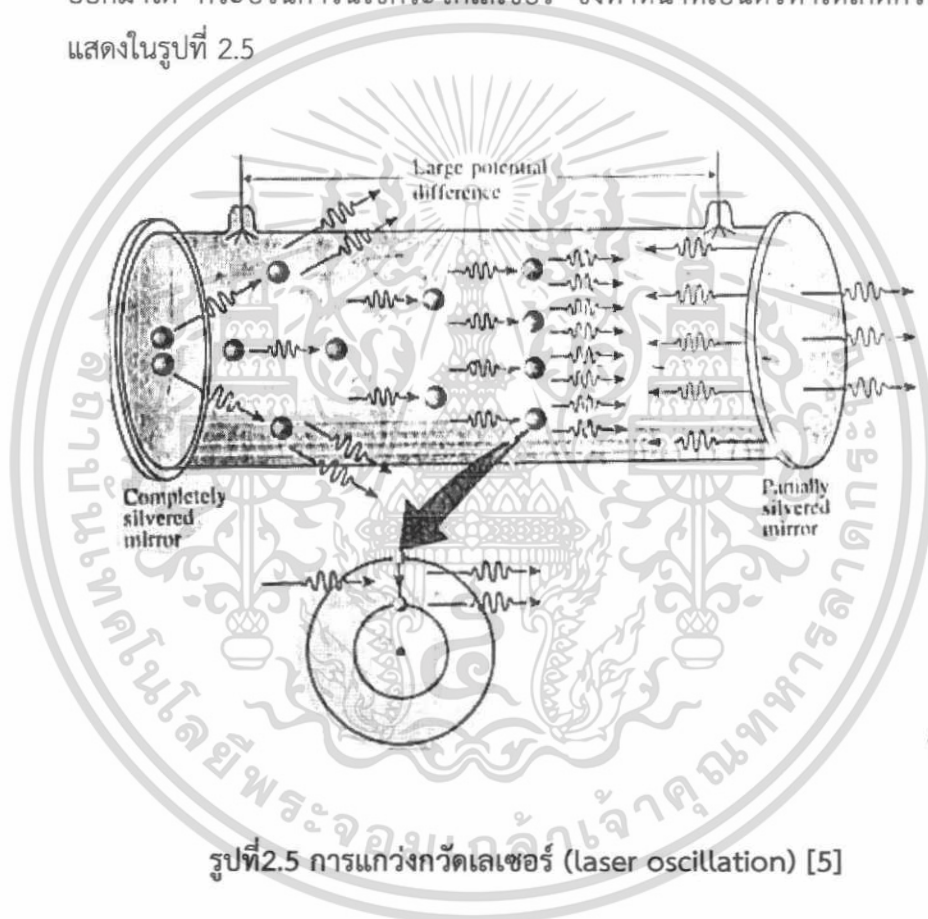
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 องค์ประกอบที่สำคัญในการทำให้เกิดแสงเลเซอร์

2.3.3.1 วัสดุที่ต้องการการกระตุ้นให้ปล่อยแสงเลเซอร์ (อาจเป็นของแข็ง ของเหลว แก๊สหรือสารประกอบ) ซึ่งเรียกว่า ตัวกลางเลเซอร์ (laser medium) หรือตัวกลางทำงาน (working medium หรือ active medium)

2.3.3.2 การทำให้เกิดการกลับประชากร (population inversion) ในตัวกลางทำงาน โดยกระบวนการที่เรียกว่า การปั๊มเลเซอร์ (laser pumping)

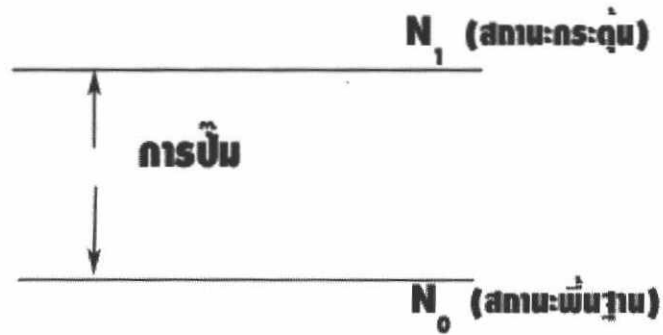
2.3.3.3 กระบวนการที่ทำให้เกิดการแกว่งกวัดเลเซอร์ (laser oscillation) เพื่อเพิ่ม (amplify) ความเข้มของกระบวนการปล่อยโฟตอนแบบกระตุ้น จนสามารถมีแสงเลเซอร์ออกมาได้ กระบวนการนี้ใช้กระจกเลเซอร์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวทำให้เกิดความสั่นพ้อง ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การแกว่งกวัดเลเซอร์ (laser oscillation) [5]

ถ้า N_0 = จำนวนอะตอมที่ระดับพลังงาน E_0 หรือสถานะพื้น (ground state)
 N_1 = จำนวนอะตอมที่อยู่ในสถานะกระตุ้น (excited state)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 การปั๊มเลเซอร์[5]

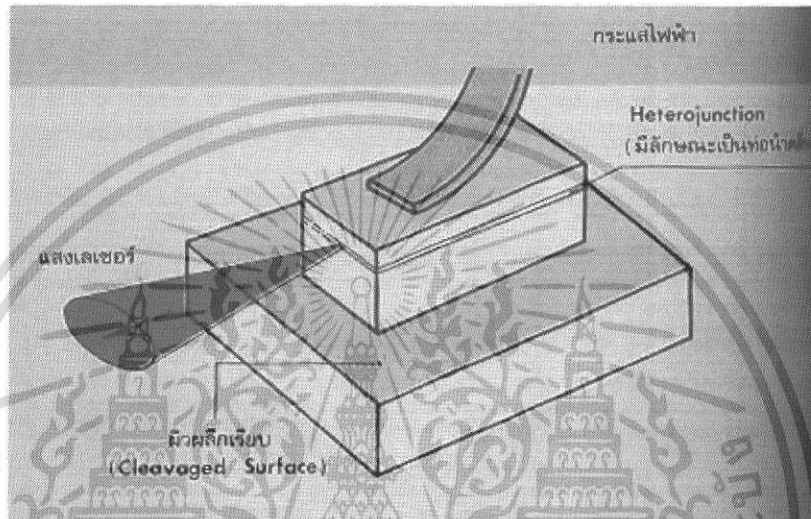
เมื่อ $N_1 > N_0$ เรียกว่าเกิดการกลับประชากร การปั๊ม ก็คือทำให้พลังงานแก่อะตอมหรือโมเลกุลของตัวกลางแอคทีฟ เพื่อให้ อะตอมหรือโมเลกุลถูกกระตุ้นจากสถานะพื้นฐานไปยังสถานะกระตุ้น[5] ดังแสดงในรูป 2.6

2.3.2 ไฟเบอร์เลเซอร์

ไฟเบอร์เลเซอร์จัดอยู่ในชนิดเดียวกับ เลเซอร์ไดโอดซึ่งเป็นเลเซอร์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ ซึ่ง ทำจากสารประกอบ เช่น GaAs (แกลเลียมอาร์เซไนด์) GaAlAs (แกลเลียมอะลูมิเนียมอาร์เซไนด์) InGaAsP อินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสไฟด์) ซึ่งมีค่าแถบพลังงานต่าง ๆ กัน จึงเป็นตัว กำหนดค่าความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ เช่น GaAs ให้แสงเลเซอร์ที่ค่าความยาวคลื่น 0.8 μm (อิน ฟาเรด) GaAlAs ให้แสงเลเซอร์ที่ค่าความยาวคลื่น 0.7 μm (สีแดง) InGaAsP ให้แสงเลเซอร์ที่ค่า ความยาวคลื่น 1.3 และ 1.55 μm (อินฟาเรด) เลเซอร์ไดโอดแต่ละชนิดจึงมีการใช้งานที่แตกต่างกัน ตามลักษณะ และคุณสมบัติของค่าความยาวคลื่นนั้น ๆ เช่น เลเซอร์ไดโอดที่ให้สีแดงจะใช้ในเครื่อง คอมแพคดิสก์ ส่วนเลเซอร์ไดโอดที่ให้แสงอินฟาเรดที่ค่าความยาวคลื่น 1.55 μm จะใช้ใน ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสง เป็นต้น โครงสร้างของเลเซอร์ไดโอด ได้แก่ หัวต่อพีเอ็นแบบเฮต เตอโรจังก์ชัน (Heterojunction) เช่น GaAlAs/GaAs ทำให้ประสิทธิภาพของเลเซอร์ไดโอดเริ่มทำงาน น้อยลง การฉีดกระแสไฟฟ้าผ่านหัวต่อพีเอ็นของเลเซอร์ไดโอดเป็นวิธีการปั๊มพลังงาน เพื่อให้เกิดการ รวมตัวของพาหะนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำและนำมาสู่การเปล่งแสง แสงที่เปล่งออกมาจะถูกขยาย สัญญาณให้มีความเข้มสูงขึ้น ด้วยควมถี่แสงที่เกิดจากผิวมันสะท้อนแสงของผิวผลึกที่ทำให้แตกโดย ธรรมชาติ (Cleaved Surface)

เลเซอร์ไดโอดเป็นเลเซอร์ที่มีขนาดเล็กจิ๋วกินไฟน้อย สามารถผลิตได้จำนวนมาก ๆ ด้วย เทคโนโลยีด้านสารกึ่งตัวนำ เลเซอร์ไดโอดถูกใช้งาน อย่างกว้างขวางตั้งแต่การใช้เป็นเลเซอร์พอยน เตอร์ (Laser Pointer) ใช้ในการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสง ใช้เป็นหัวอ่าน ของเครื่องคอมแพค ดิสก์ เครื่องวีดีโอเลเซอร์ดิสก์ และเครื่องถ่ายเอกสารประเภทเลเซอร์ พรินเตอร์ (Laser Printer) คณะ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ศึกษาวิจัยการสร้างเลเซอร์ไดโอดด้วยเทคโนโลยีด้านการปลูกผลึกจากของเหลว (Liquid Phase Epitaxy : LPE) และเทคโนโลยีการปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy : MBE) เลเซอร์ไดโอดมีกำลังแสงต่ำตั้งแต่ระดับไมโครวัตต์ (mW) จนถึงวัตต์ (W) และเป็นเลเซอร์ที่มีจุดเด่นคือ สามารถโมดูลิตีสูงได้ โดยตรง โดยผ่านเข้าไปทางด้านกระแสไฟฟ้าที่ฉีดผ่านตัวส่งประติษฐ์ จึงสะดวกต่อการใช้งานโดยเฉพาะการสื่อสารทางด้านแสง[6] ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เลเซอร์ไดโอด[6]

2.4 การประยุกต์ใช้งานเลเซอร์

เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีคุณสมบัติเด่น คือเป็นคลื่นแสงที่มีระเบียบ มีลักษณะเป็นลำแสง ความเข้มแสงสูง จึงมีศักยภาพในด้านประยุกต์มากมาย ได้แก่

2.4.1. การใช้เลเซอร์เพื่อเจาะ ตัด เชื่อม

เลเซอร์เป็นแสงที่มีความเข้มสูง และเป็นลำแสง เมื่อโฟกัสมีขนาดเล็กจะสามารถ เจาะ ตัด เชื่อม วัสดุต่าง ๆ ได้ รูปที่เจาะ รอยตัด รอยเชื่อม จะมีขนาดเล็กและคมชัดมาก ทำให้สามารถทำงานที่มีความละเอียดสูงได้ เลเซอร์ที่ใช้งานต้องมีกำลังสูง เช่น เลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ และเลเซอร์แย็ค

2.4.2 การใช้เลเซอร์ด้านการแพทย์

เลเซอร์ถูกนำมาใช้ในการผ่าตัดและรักษาทางการแพทย์และจักษุแพทย์ เช่น การผ่าตัดที่มีขนาดเล็ก(Microsurgery) การผ่าตัด เป็นต้น เลเซอร์ที่ใช้ ได้แก่ เลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ เลเซอร์อาร์กอน

2.4.3. การใช้เลเซอร์ด้านสื่อสารโทรคมนาคม

เลเซอร์ไดโอดถูกนำมาใช้เป็นตัวส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสง เพื่อใช้ถ่ายทอดสัญญาณ โทรศัพท์ โทรศัพท์ ข้อมูลคอมพิวเตอร์ อย่างกว้างขวาง สื่อสารโทรคมนาคมด้วยแสงเลเซอร์นี้มีจุดเด่น เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ในลิขสิทธิ์การสงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้รู้เห็นใบนี้ประสงฆ์เห็นใจให้ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่จะไม่มีสัญญาณรบกวนเพราะเป็นคลื่นแสง มีความจุข้อมูลสูงมากเพราะมี ความถี่สูงกว่าคลื่นวิทยุ ทำให้เส้นใยแก้วนำแสงเส้นหนึ่งสามารถจุสายโทรศัพท์ได้เป็นพัน ๆ คู่สาย

2.4.4. การใช้เลเซอร์ทางด้านสร้างภาพสามมิติ

เลเซอร์มีความเป็นระเบียบของคลื่นแสง ดังนั้นจึงสามารถบันทึกข้อมูลของภาพสามมิติได้ เพราะบันทึกทั้งความเข้มแสงและเฟส(หน้าคลื่น) ของแสงด้วยภาพที่บันทึกจึงมีข้อมูลเกี่ยวกับความลึกของภาพด้วย ทำให้ได้ภาพสามมิติเรียกว่า โฮโลกราฟี(Holography) การบันทึกภาพสามมิตินี้ต้องกระทำบนโต๊ะแสง (Optical Bench) เพื่อขจัดปัญหาการสั่นสะเทือน คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย[6] ได้พัฒนา เทคนิคการบันทึกภาพสามมิติเชิงซ้อน และนำภาพสามมิติเชิงซ้อนดังกล่าวมาประยุกต์เป็นกุญแจแสง (Optical key) และบัตรประจำตัว (Holographic Identification) ซึ่งเป็นผลงานที่จดสิทธิบัตร

2.4.5. การใช้เลเซอร์ในการวัด

เลเซอร์มีค่าความยาวคลื่นคงที่ และเป็นลำแสงขนาน จึงถูกนำมาใช้เป็นมาตรฐานการวัดที่ละเอียดแม่นยำ เช่น การวัดขนาดของสิ่งของ การวัดระยะทางทั้งใกล้และไกล โดยอาศัยหลักการของการสอดแทรก เช่น อินเทอเฟอเมตรี (Interferometry) หลักการการสะท้อนของ คลื่น แสงที่เป็นพัลส์ และหลักการเกิดการเคลื่อนของเฟส (Phase Shift) ของคลื่นแสงที่ถูกโมดูลेटแล้ว

2.4.6. การใช้เลเซอร์ในสำนักงานและในบ้าน

เลเซอร์ไดโอดเป็นเลเซอร์ที่มีขนาดเล็กมากไม่กินไฟ จึงเหมาะนำมาประยุกต์กับอุปกรณ์สำนักงานและใช้ในบ้าน ได้แก่ การใช้เลเซอร์เป็นเลเซอร์พอยน์เตอร์ ใช้ในเครื่องถ่ายเอกสาร และเครื่องพิมพ์เอกสารแบบ เลเซอร์พริ้นเตอร์ ใช้ในเครื่องเสียงคอมแพคดิสก์ใช้ในเครื่องวีดีโอเลเซอร์ดิสก์ ฯลฯ

2.4.7. การใช้เลเซอร์ในงานด้านนิทรรศการ

แสงเลเซอร์มีลักษณะเด่น คือ มีลำแสงที่ระยิบระยับเนื่องจากการเกิดการสอดแทรกของแสงเลเซอร์ เมื่อฉายกระทบฝุ่นละอองในอากาศที่แขวนลอยทำให้การแสดงนิทรรศการมีชีวิตชีวาจึงเห็นมีการนำเลเซอร์ไปใช้ในงานโฆษณา งานแสดงละครงานบนเวทีคอนเสิร์ต ฯลฯ ด้วย

2.4.8. การใช้เลเซอร์ในด้านเลเซอร์ฟิวชั่น (LaserFusion)

ฟิวชั่นเป็นปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดจากการหลอมธาตุเบา เช่น ไฮโดรเจน หรือไอโซโทป ของไฮโดรเจน ให้กลายเป็นธาตุหนัก เช่น ฮีเลียมและมีพลังงานความร้อนเป็นผลพลอยได้จำนวนมาก จึงสามารถนำพลังงานดังกล่าวไปผลิตกระแสไฟฟ้าได้ ปฏิกิริยาฟิวชั่นนี้สามารถชักนำให้เกิดและควบคุมด้วยแสงเลเซอร์ที่มีกำลังสูงมาก ๆ (มีขนาดเทรวาต์ต์ : TW) เลเซอร์ที่มีกำลังสูงนี้ ได้แก่ เลเซอร์แก้วและเลเซอร์เอกไซเมอร์ เป็นเทคโนโลยีการประยุกต์เลเซอร์ที่กำลังวิจัยพัฒนาและหากทำได้สำเร็จจะทำให้สังคมมีพลังงานที่สะอาดใช้ เพราะปฏิกิริยาฟิวชั่นนี้มีกัมมันตภาพรังสีน้อยมาก[6]

2.5 การค้นพบเลเซอร์

เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ทรงพลังและมีคุณสมบัติพิเศษที่มีประโยชน์ใช้งานอย่างกว้างขวาง ผู้ที่คิดค้นเลเซอร์ได้คือ ซี. เอช.ทาวน์ส (C.H. Townes) ในปี ค.ศ. 1954 โดยได้เสนอเป็นหลักการหรือทฤษฎีเลเซอร์ไว้ ซี.เอช.ทาวน์ส ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 1964 สำหรับการคิดค้นเรื่องเลเซอร์นี้เอง เมแมน (Maiman) เป็นผู้ที่มีชื่อเสียงทฤษฎีเลเซอร์ของ C.H. Townes ได้สำเร็จ โดยการประดิษฐ์เลเซอร์ตัวแรกของโลกขึ้น เป็นเลเซอร์ที่ทำทับทิม (Ruby Laser) ซึ่งเป็นของแข็งในปี ค.ศ. 1960 ในปีเดียวกันนั้นเอง จาแวน (Javan) ก็ได้ประดิษฐ์เลเซอร์ที่ทำจากก๊าซฮีเลียม-นีออนได้เป็นผลสำเร็จ จากนั้นจึงมีการพัฒนาเลเซอร์ ชนิดต่าง ๆ อีกมากมาย ทั้งที่ทำจากของแข็ง ของเหลว ก๊าซ และสารกึ่งตัวนำ คำว่า "เลเซอร์" เป็นคำทับศัพท์ จากภาษาอังกฤษ คือ "LASER" ซึ่งเป็นคำย่อของ "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" จึงหมายถึง การแผ่รังสีของการเปล่งแสงแบบถูกเร้าด้วยการขยายสัญญาณแสง ดังนั้นกลไก

พื้นฐานของเลเซอร์จึงได้แก่ การเปล่งแสงแบบถูกเร้า และ การขยายสัญญาณแสง กลไกทั้งสองนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้เลเซอร์มีคุณสมบัติพิเศษต่าง ๆ เช่น เป็นลำแสงขนานที่มีความเข้มสูง และมีคลื่นแสงที่เป็นระเบียบด้วยค่าความยาวคลื่นที่ตายตัวองค์ประกอบของเลเซอร์เลเซอร์โดยทั่วไปประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญ 3 ส่วนได้แก่

1. วัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางเลเซอร์ (Laser Medium)
2. การปั๊มพลังงานให้แก่เนื้อวัสดุที่เป็นตัวกลางเลเซอร์ให้มีสภาพถูกกระตุ้น Energy Pumping)
3. แควิตี้แสงเพื่อขยายสัญญาณแสง

2.5.1 คุณสมบัติโคฮีเร้นท์ของแสงเลเซอร์

แสงเลเซอร์เกิดขึ้นจากการเปล่งแสงถูกเร้าโฟตอนจึงมีความเป็นระเบียบสูง คลื่นแสงมีลักษณะที่พร้อมเพรียงกัน และเมื่อมีการขยายสัญญาณแสงด้วยแควิตี้แสง โฟตอนจึงมีจำนวนมาก หรือแสงมีความเข้มสูง และวิ่งในทิศทางที่แน่นอน คือตั้งฉากกับกระจกที่ใช้ทำเป็นแควิตี้เท่านั้น จึงมีลักษณะเป็นลำแสง หากเปรียบเทียบกับกองทหาร ก็เป็นหน่วยทหารที่มีระเบียบเดินแถวเป็นหน้ากระดานด้วยจังหวะการ เดินที่พร้อมเพรียงกัน และก้าวเท่า ๆ กัน เดินไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นแสงเลเซอร์จึงมีคุณสมบัติเด่นหลักๆ 4 ประการคือ

1. เป็นแสงสีเดียว (มีค่าความยาวคลื่นเดียว)
2. มีเฟสเดียวกัน (มีหน้าคลื่น)
3. มีทิศทางแน่นอน (เป็นลำแสง)
4. มีความเข้มสูง (จำนวนโฟตอนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่สูง)

คุณสมบัติทั้ง 4 นี้เรียกรวม ๆ กันว่า คุณสมบัติโคฮีเร้นท์ (Coherent) เลเซอร์จึงเป็นแหล่งกำเนิดแสงแบบโคฮีเร้นท์ (Coherent Light Source) นั่นเอง จุดเด่นทั้ง 4 นี้มีส่วนสำคัญที่ทำให้แสงเลเซอร์เกิดประโยชน์ในด้านประยุกต์ เช่น การที่แสงเลเซอร์มีค่าความยาวคลื่นที่แน่นอนจึงทำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เลเซอร์ถูกใช้เป็นมาตรฐาน และใช้ในงานที่ต้องการความแม่นยำสูง ได้แก่ การวัดระยะทางหน้าคลื่นที่เป็นระเบียบของแสงเลเซอร์ถูกนำมาใช้เพื่อบันทึกข้อมูลของภาพสามมิติ ลักษณะเป็นลำแสงมีประโยชน์ต่อการนำร่อง การสื่อสารและความ เข้มสูงของแสงเลเซอร์ มีที่ใช้งานด้านเจาะตัด เชื่อมวัสดุได้ รวมทั้งการผ่าตัดด้วยแสงเลเซอร์ในด้านการแพทย์อีกด้วย PhantomX[7]

การเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดสีบนพลาสติกด้วยเลเซอร์ การติดฉลากหรือการทำเครื่องหมายบนผลิตภัณฑ์ที่เป็นพลาสติกเป็นสิ่งสำคัญมาก สินค้าจะถูกระบุหรือทำเครื่องหมายเพื่อความปลอดภัยในตัวสินค้า งานวิจัยนี้ได้หันมาใช้เลเซอร์ในการทดลองเพื่อลดต้นทุนในการพิมพ์แบบเดิม คือ การพิมพ์โดยใช้น้ำหมึก (Inkjet) หรือ การประทับตรา (Stamping) เพื่อรักษาสีแวดล้อม ความต้องการที่เพิ่มขึ้นในอุตสาหกรรมพลาสติก เกี่ยวกับคุณภาพตัวอักษรและความเร็วในการพิมพ์ แต่ต้องคำนึงถึงสีแวดล้อมความจำเป็นที่ จะต้องลดต้นทุนในการผลิตมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ขั้นตอนการทำเครื่องหมายด้วยเลเซอร์บนพลาสติก ในอดีตจะพบได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากพลาสติกไม่สามารถทำเครื่องหมายได้ จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มเม็ดสี (Pearlescent) ทำให้เรขามองเห็นตัวอักษรที่ทำเครื่องหมายได้ชัดเจนยิ่งขึ้น และ การทำเครื่องหมายลงบนพลาสติกจะเพิ่มความเร็วในการทำเครื่องหมายเพราะ เรซินจะช่วยกระตุ้นให้เกิดสีเร็วขึ้น[8] ยังมีผู้ทำวิจัยเกี่ยวกับเลเซอร์โดยการนำเลเซอร์มาพิมพ์ลงบน พื้นผิวของแม่พิมพ์พลาสติก P21 เหล็ก (Fe-3% Ni-5% Mn-1% Al-0.3% Si-0.15% C) และ 440 °C (Fe-17% Cr-1.1 % C) โดยใช้พลังงานเลเซอร์ 500 W Cw : Nd YAG Laser โดยใช้ความเร็วในการสแกนที่แตกต่างกัน ชิ้นงานของผิวที่หลอมละลายด้วยเลเซอร์ เมื่อวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (diffractometry X-ray) ลักษณะของชิ้นงานที่หลอมละลายด้วยสารโซเดียมคลอไรด์ 3.5% และกรดซันเอมที่ 238 °C ศึกษาโดยการ Potentiodynamic X-ray พบว่าพื้นผิวที่หลอมละลายด้วยเลเซอร์ P21 440 °C มี martensite และ austenite ผิวที่หลอมละลายด้วยเลเซอร์ที่ 440 °C พื้นผิวไม่ละลาย P21 ทนต่อการกัดกร่อนด้วยเลเซอร์ ละลาย P21 โดยความหนาแน่นของกระแสลดลง เมื่อเทียบกับการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการหลอมละลายด้วยเลเซอร์ จะทำให้ความต้านทานต่อการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น พื้นผิวละลาย P21 เกิดการละลายของ Ni3Al ในรูปแบบของสารละลายให้เป็นเนื้อเดียวกัน การให้เป็นของแข็งที่ทนต่อการกัดกร่อนของพื้นผิว 440 °C ละลายในสารละลายโซเดียมคลอไรด์[9] การรวมตัวกันของโลหะและพลาสติกโดยเลเซอร์ ได้พัฒนาเลเซอร์อย่างรวดเร็ว เพื่อจะนำมาเชื่อมต่อกันระหว่างโลหะและพลาสติกโดยที่ไม่ต้องทากาว โดยการนำมาต่อกันระหว่าง สแตนเลส 304 และพลาสติก (PET) เพื่อจะนำมาต่อกันในระดับอะตอมและโมเลกุล ผ่านฟิล์มออกไซด์ (Cr) ผลการตรวจสอบความสำคัญของพื้นฐานการยึดเกาะ โคนการใช้เลเซอร์ระหว่างสแตนเลสกับพลาสติก โดยการทดสอบด้วยการปล่อยก๊าซทดสอบและทดสอบด้วยเครื่องจับก๊าซ เพื่อยืนยันว่าไม่มีรอยรั่วแม้จะเกิดฟองขนาดเล็กจำนวนมาก จากการทดสอบพบว่าเครื่องไม่สามารถตรวจจับก๊าซได้ แสดงว่าไม่เกิดรอยรั่วบริเวณที่ทำการเชื่อม [9] และยังนำเลเซอร์มาใช้ประโยชน์ใน การแยกพลาสติกโดยการดูดกลืนด้วยแสงอินฟราเรดโดยการใช้เลเซอร์ไดโอด ในปัจจุบันระบบรีไซเคิลของพลาสติกส่วนใหญ่ สามารถทำได้ด้วยส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปกโตรมิเตอร์ โดยใช้ความถี่ใกล้เคียงอินฟราเรดของแต่ละชนิดของพลาสติก วิธีนี้น่าจะนำเสนอเพราะมีความถูกต้องสูง ข้อเสียคือค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาโดยใช้เลเซอร์ไดโอด จากการตรวจสอบความเป็นไปได้ของพลาสติก เป็นเทคโนโลยีการใช้เลเซอร์ไดโอด เป็นครั้งแรกของโลก เทคโนโลยีนี้สามารถใช้ได้กับพลาสติก PET PVC และ PS [10] การทำนายเชิงตัวเลขของการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกที่เกิดจากการประมวลผลของเลเซอร์ การประมวลผลของเลเซอร์ กับแสงเลเซอร์พลังงานสูงเหมาะต่อการสร้างฟิล์มแรงดันสูง บนพื้นผิวของโลหะเคลือบของแสงเลเซอร์ ทำปฏิกิริยากับวัสดุชั้นผิวทำให้เกิด Stress บนพื้นผิวของวัสดุเป็นประโยชน์ สำหรับผิวในสมบัติเชิงกลและการกัดกร่อน วิธีการนำเสนอจะใช้ขั้นตอนการที่แตกต่าง เพื่อจำลองการเกิด Stress ในวัสดุแต่ละ Module มีองค์ประกอบที่จะทำให้เกิดรูป และเกิดความเค้น การคำนวณโดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อเสนอกับ ผลของการทดลอง เช่นเดียวกับผลที่ได้จากการแก้ปัญหา การวิเคราะห์ที่จะแสดงให้เห็นความสัมพันธ์กัน แบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการจำลองของ LPS ของวัสดุ ที่ได้รับการพัฒนา เคลื่อนของพลาสติกโครงสร้างแต่ละขั้นตอนมีการใช้การวิเคราะห์คลื่น elasto พลาสติก เนื่องจากการหดตัวของพื้นผิวในขณะที่เปลี่ยนรูปแบบของพลาสติกและผลที่ใช้เลเซอร์ การพยากรณ์เชิงปริมาณค่อนข้างดีทางกายภาพ และผลกระทบทางกลที่เกิดภายในวัสดุ บริเวณพื้นผิวที่มีการกระทำด้วยเลเซอร์ความเครียดตกค้างมีความสัมพันธ์[11]

การระบายความร้อนของวัสดุ ที่อยู่ภายใต้ความร้อนของเลเซอร์ สำหรับอุณหภูมิอันเนื่องมาจากพลังงานของเลเซอร์ และพลาสติกของคลื่นความเครียด และความถี่ของผิว สำหรับการหดตัวระดับความดันที่สร้างขึ้นในระหว่างขั้นตอนการระเหย ระดับความเครียดที่ผิวของชิ้นงานถือว่าขนาดของความเครียดมีเกินขีดจำกัดของความยืดหยุ่น ขนาดของการหดตัวลดลงมากจะเกิดขึ้นหลังจาก $t = 0:032$ เมื่อคลื่นผ่านตัวกลางยืดหยุ่นได้เร็ว กระบวนการให้ความร้อนด้วยเลเซอร์ฟิล์มเป็นสูตรการหดตัว ระดับของอุณหภูมิในพื้นที่ต่ำ เนื่องจากความดันหดตัวระดับ Stress เกินขอบเขตเมื่อความดันหดตัวระดับของความเครียดจะขยายตัวลงในเนื้อของวัสดุ แต่เมื่อระดับของความดันลดลงการหดตัวก็จะมาก[12] การเจาะพลาสติกในระหว่างการให้ความร้อนด้วยเลเซอร์บนแผ่นโลหะองค์ประกอบทางความร้อนของพลาสติก สามารถคำนวณปัญหา elasto พลังงานความร้อนของเลเซอร์บนแผ่นโลหะด้านข้างจุดหลอมเหลว โดยเฉพาะอย่างยิ่งสามารถอธิบายถึงกระบวนการระบายความร้อนจะประสบความสำเร็จ การรวมตัวกันของความร้อนและความร้อนจะทำให้ระดับความเครียดเกินระดับของอุณหภูมิ ของการขยายตัวและความร้อนจะทำให้ความร้อนเกินจากจุดศูนย์กลาง บนพื้นผิวที่ผ่านการฉายแสงเข้าสู่พลาสติก ขั้นตอนแรกจะเพิ่มระดับของความเครียด การขยายตัวของความร้อน และระดับความเครียดลดลงภายใต้ของการระบายความร้อนของพลาสติก การเจาะพลาสติกได้รับผลกระทบที่ไม่แน่นอน[13] ไมโครเลเซอร์ที่มองเห็นได้ของการใช้พลาสติกใส Au นาโน การกระจายตัวของโพลิเมอร์ฟิล์ม ฟิล์มโพลิเมอร์ Au อนุภาคนาโน มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 nm ถูกนำไปใช้ไมโครเลเซอร์ของพลาสติกใสมีการดูดซับที่ความยาวคลื่นประมาณ 500 นาโนเมตร เมื่อแสงเลเซอร์ถูกฉายลงบนโพลิเมอร์ฟิล์มเคลือบลงบนพื้นผิวใส ผิวภายใต้โพลิเมอร์มีการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดูคลื่นแสงช่วงของความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ ถูกมองเห็นได้อย่างชัดเจน ในความโปร่งแสงของ โพลีเมอร์ฟิล์มของเรา Au การกระจายตัวของโพลีเมอร์ฟิล์มถูกนำไปใช้ดูดซับ แสงเลเซอร์บนพลาสติกใสถูกประเมินผลโดยใช้ฟิล์มโพลีเมอร์ ขึ้นอยู่กับความหนาของฟิล์มการประมาณผลบนพื้นผิวถูกตรวจสอบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ความหนาของฟิล์มโพลีเมอร์ค่าของความหนาของฟิล์มโพลีเมอร์ประมาณ 15 นาโนเมตร การติดฉลากโปร่งใสแสดงให้เห็นพื้นผิว PMMA และการติดฉลากได้อย่างถูกต้อง เทคนิคนี้ใช้ได้เฉพาะพลาสติกใส [14]

2.6 ชนิดพลาสติก

2.6.1 เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) หรือเรซิน เป็นพลาสติกที่ใช้กันแพร่หลายที่สุดในโลก ได้รับความร้อนจะอ่อนตัว และเมื่อเย็นลงจะแข็งตัว สามารถเปลี่ยนรูปได้ พลาสติกประเภทนี้ โครงสร้างโมเลกุลเป็นโซ่ตรงยาว มีการเชื่อมต่อกันระหว่างโซ่โพลีเมอร์น้อยมาก จึงสามารถหลอมเหลว หรือเมื่อผ่านการอัดแรงมากจะไม่ทำลายโครงสร้างเดิม ตัวอย่าง พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน พอลิสไตรีน มีสมบัติพิเศษคือ เมื่อหลอมแล้วสามารถนำมาขึ้นรูปกลับมาใช้ใหม่ได้ ชนิดของพลาสติกใน ตระกูลเทอร์โมพลาสติก ได้แก่

พอลิเอทิลีน (Polyethylene: PE) เป็นพลาสติกที่ไอน้ำซึมผ่านได้เล็กน้อย แต่อากาศผ่านเข้าออกได้ มีลักษณะขุ่นและทนความร้อนได้พอควร เป็นพลาสติกที่นำมาใช้มากที่สุด ในอุตสาหกรรม เช่น ท่อน้ำ ถัง ถู ขวด แท่นรองรับสินค้า

พอลิโพรพิลีน (Polypropylene: PP) เป็นพลาสติกที่ไอน้ำซึมผ่านได้เล็กน้อย แข็งกว่าโพลีเอทิลีน ทนต่อสารไขมันและความร้อนสูง ใช้ทำแผ่นพลาสติกถุงพลาสติกบรรจุอาหารที่ทนร้อน หลอดดูดพลาสติก เป็นต้น

พอลิสไตรีน (Polystyrene: PS) มีลักษณะโปร่งใส เปราะ ทนต่อกรดและด่าง ไอน้ำและอากาศซึมผ่านได้พอควร ใช้ทำชิ้นส่วนอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องใช้สำนักงาน เป็นต้น SAN (styrene-acrylonitrile) เป็นพลาสติกโปร่งใส ใช้ผลิตชิ้นส่วน เครื่องใช้ไฟฟ้า ชิ้นส่วนยานยนต์ เป็นต้น

ABS (acrylonitrile-butadiene-styrene) สมบัติคล้ายโพลิสไตรีน แต่ทนสารเคมีดีกว่า เหนียวกว่า โปร่งแสง ใช้ผลิตถ้วย ถาด เป็นต้น

พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride: PVC) ไอน้ำและอากาศซึมผ่านได้พอควร แต่ป้องกันไขมันได้ดีมีลักษณะใส ใช้ทำขวดบรรจุน้ำมันและไขมันปรุงอาหาร ขวดบรรจุเครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์ เช่น ไวน์ เบียร์ ใช้ทำแผ่นพลาสติก ท่อเนยแข็ง ทำแผ่นแลมินเนตชั้นในของถุงพลาสติก ไนลอน (Nylon) เป็นพลาสติกที่มีความเหนียวมาก คงทนต่อการเพิ่มอุณหภูมิ ทำแผ่นแลมินเนตสำหรับทำถุงพลาสติกบรรจุอาหารแบบสุญญากาศ

พอลิเอทิลีน เทอร์ฟทาเลต (Polyethylene terephthalate: PET) เหนียวมากโปร่งใส ราคาแพง ใช้ทำแผ่นฟิล์มบาง ๆ บรรจุอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate: PC) มีลักษณะโปร่งใส แข็ง ทนแรงยึดและแรงกระแทกได้ดี ทนความร้อนสูง ทนกรด แต่ไม่ทนด่าง เป็นรอยหรือคราบอาหาร จับยาก ใช้ทำถ้วย จาน ชาม ขวดนมเด็ก และขวดบรรจุอาหารเด็ก

2.6.2 เทอร์โมเซตติงพลาสติก (Thermosetting plastic) เป็นพลาสติกที่มีสมบัติพิเศษคือทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและทนปฏิกิริยาเคมีได้ดี เกิดคราบและรอยเปื้อนได้ยาก คงรูปหลังการผ่านความร้อนหรือแรงดันเพียงครั้งเดียว เมื่อเย็นลงจะแข็งมาก ทนความร้อนและความดันไม่อ่อนตัวและเปลี่ยนรูปร่างไม่ได้ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงก็จะแตกและไหม้เป็นขี้เถ้าสีดำ พลาสติกประเภทนี้โมเลกุลจะเชื่อมโยงกันเป็นร่างแหจับกันแน่น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแข็งแรงมาก จึงไม่สามารถนำมาหลอมเหลวได้ กล่าวคือ เกิดการเชื่อมต่อข้ามไปมาระหว่างสายโซ่ของโมเลกุลของโพลิเมอร์ (cross linking among polymer chains) เหตุนี้หลังจาก พลาสติกเย็นจนแข็งตัวแล้ว จะไม่สามารถทำให้อ่อนได้อีกโดยใช้ความร้อน หากแต่จะสลายตัวทันทีที่อุณหภูมิสูงถึงระดับ การทำพลาสติกชนิดนี้ให้เป็นรูปลักษณะต่าง ๆ ต้องใช้ความร้อนสูง และโดยมากต้องการแรงอัดด้วย เทอร์โมเซตติงพลาสติกได้แก่

เมลามีน ฟอรัมาลดีไฮด์ (melamine formaldehyde) มีสมบัติทางเคมีทนแรงดันได้ 7,000-135,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ทนแรงอัดได้ 25,000-50,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ทนแรงกระแทกได้ 0.25-0.35 ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ทนความร้อนได้ถึง 140 องศาเซลเซียส และทนปฏิกิริยาเคมีได้ดี เกิดคราบและรอยเปื้อนยาก เมลามีนใช้ทำภาชนะบรรจุอาหารหลายชนิด และนิยมใช้กันมาก มีทั้งที่เป็นสีเรียบและลวดลายสวยงาม ข้อเสียคือ น้ำส้มสายชูจะซึมเข้าเนื้อพลาสติกได้ง่าย ทำให้เกิดรอยด่าง แต่ไม่มีพิษภัยเพราะไม่มีปฏิกิริยากับพลาสติก

ฟีนอลฟอรัมาลดีไฮด์ (phenol-formaldehyde) มีความต้านทานต่อตัวทำละลายสารละลายเกลือและน้ำมัน แต่พลาสติกอาจพองบวมได้เนื่องจากน้ำหรือแอลกอฮอล์พลาสติกชนิดนี้ใช้ทำฝาจุขวดและหม้อ

อีพ็อกซี (epoxy) ใช้เคลือบผิวของอุปกรณ์ภายในบ้านเรือน และท่อเก็บก๊าซ ใช้ในการเชื่อมส่วนประกอบโลหะ แก้ว และเซรามิก ใช้ในการหล่ออุปกรณ์ที่ทำจากโลหะและเคลือบผิวอุปกรณ์ ใช้ใส่ในส่วนประกอบของอุปกรณ์ไฟฟ้า เส้นใยของท่อ และท่อความดัน ใช้เคลือบผิวของพื้นและผนัง ใช้เป็นวัสดุของแผ่นกำบังนิวตรอน ซีเมนต์ และปูนขาว ใช้เคลือบผิวถนน เพื่อกันลื่น ใช้ทำโฟมแข็ง ใช้เป็นสารในการทำสีของแก้ว

โพลีเอสเตอร์ (polyester) กลุ่มของโพลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเตอร์ (-O•CO-) ในหน่วยซ้ำเป็นโพลิเมอร์ที่นำมาใช้งานได้หลากหลาย เช่น ใช้ทำพลาสติกสำหรับเคลือบผิว ขวดน้ำ เส้นใย ฟิล์มและยาง เป็นต้น ตัวอย่างโพลิเมอร์ในกลุ่มนี้ เช่น โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต โพลีบิวทิลีนเทเรฟทาเลต และโพลิเมอร์ผลึกเหลวบางชนิด

ยูรีเทน (urethane) ชื่อเรียกทั่วไปของเอทิลคาร์บาเมต มีสูตรทางเคมีคือ $\text{NH}_2\text{COOC}_2\text{H}_5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพลียูรีเทน (polyurethane) โพลีเมอร์ประกอบด้วยหมู่ยูรีเทน (-NH•CO•O-) เตรียมจากปฏิกิริยาระหว่างไดไอโซไซยานต (di-isocyanates) กับ ไดออล (diols) หรือไตรออล (triols) ที่เหมาะสม ใช้เป็นกาว และน้ำมันชักเงา พลาสติกและยาง ชื่อย่อคือ PU[15]

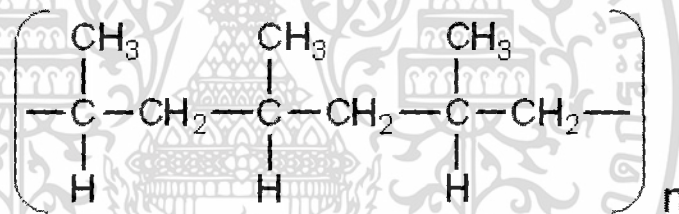
2.6.3 โพลีโพรพิลีน (Polypropylene, PP) ได้รับการพัฒนาและผลิตขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1957 จากโพรพิลีน เป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีลักษณะเป็นของแข็ง ไม่มีสี มีทั้งโปร่งใสและโปร่งแสง ผิวเป็นมันเงา ทนกรด เบส และสารเคมีต่างๆ ยกเว้นไฮโดรคาร์บอนและคลอรีนเทตไฮโดรคาร์บอน แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามโครงสร้างของโพลีโพรพิลีน ได้แก่ ไอโซแทกติกโพลีโพรพิลีน ซินดีโอแทกติกโพลีโพรพิลีนและแอแทกติกโพลีโพรพิลีน มีสมบัติดีกว่าโพลีเอทิลีนหลายอย่าง ได้แก่ ทนแรงกระแทกสูง ทนการขีดข่วน ทนสารเคมี มีจุดอ่อนตัวสูง มีความหนาแน่นต่ำ และมีอุณหภูมิในการหลอมสูง ทำให้ใช้งานที่อุณหภูมิสูงถึง 120 °C

ชื่อทางเคมี (Chemical Name) : poly (1-methylethylene)

ชื่อพ้อง (Synonyms) : Polypropene, Polipropene 25 [USAN], Propylene polymers,

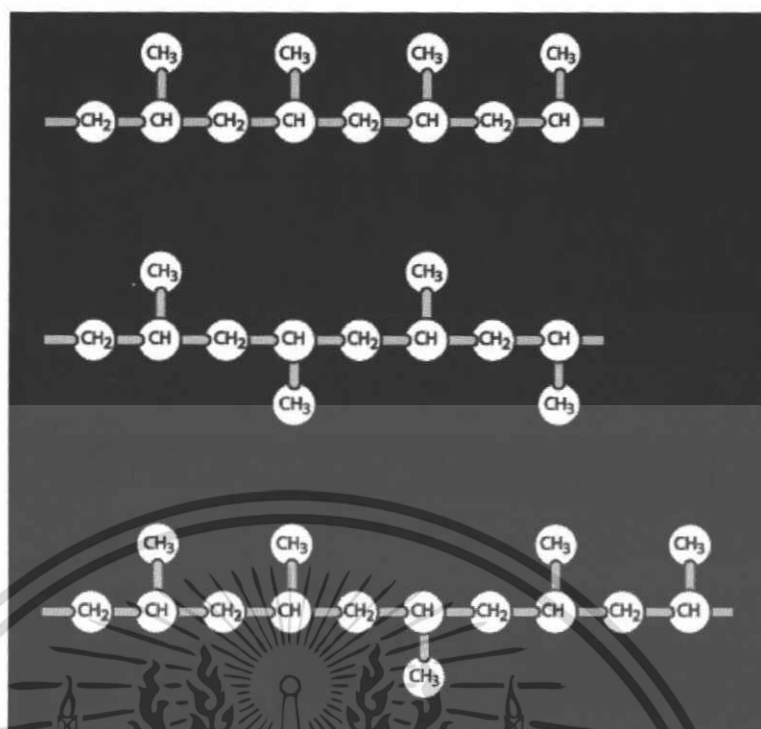
1-Propene homopolymer

สูตรโครงสร้างทางเคมี (Chemical Structure) ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 สูตรเคมีคือ (C₃ H₆)_n [15]

โพลีโพรพิลีน (PP) เป็นเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) คือ พอลิเมอร์พลาสติกที่สามารถขึ้นรูปโดยใช้ความร้อนซ้ำๆ ได้หลายครั้ง โพลีโพรพิลีนเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงประกอบด้วยโมโนเมอร์ของ propylene (C₃H₆) หลายๆ ตัว เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของก๊าซ propylene โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารประกอบพวกโลหะ เช่น ไทเทเนียมคลอไรด์ การใช้ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาและสภาวะของการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ทำให้ได้โพลีโพรพิลีนที่มีการจัดเรียงโครงสร้างต่างกัน 3 ชนิดคือ isotactic syndiotactic และ atactic ขึ้นอยู่กับทิศทางการจับของหมู่เมธิลกับอะตอมคาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 พอลิโพรไพลีนที่มีการจัดเรียงโครงสร้างต่างกัน 3 ชนิด[15]

พอลิโพรไพลีนชนิด isotactic นำมาผลิตเป็นพลาสติกได้อย่างดี เนื่องจากโครงสร้างมีการจัดเรียงของหมู่เมทิลอยู่ด้านเดียวกันอย่างเป็นระเบียบจึงมีความเป็นผลึกสูง ทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรง ทนทาน ตรงข้ามกับชนิด atactic ที่มีความเหนียวมากกว่าเนื่องจากหมู่เมทิลมีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (amorphous) ส่วนชนิด syndiotactic หมู่เมทิลจัดเรียงตรงข้ามกันมีความแข็งแรงน้อยกว่า แต่จะทนทานมากกว่าชนิด isotactic

2.6.4 คุณสมบัติของโพลีโพรไพลีน

คุณสมบัติดังนี้ คือ

- มีความแข็งแรง ความเปราะและแตกง่ายน้อยกว่า HDPE และมีความยืดหยุ่นน้อยกว่า LDPE มีผิวแข็ง ทนทานต่อการขีดข่วนคงตัวไม่เสียรูปง่าย มีความทนทานมากสามารถทำเป็นบานพับในตัว
- เมื่อไม่ได้ผสมสีมีลักษณะขาวขุ่น ไม่ทึบแต่ไม่ใส ทึบแสงกว่าพอลิเอทิลีน (PE) แต่ไม่ใสเท่ากับพอลิสไตรีน (PS)
- มีน้ำหนักเบา เนื่องจากมีความหนาแน่นน้อย ในช่วง $0.855 - 0.946 \text{ g/cm}^3$ ด้วยเหตุนี้จึงสามารถลอยน้ำได้เช่นเดียวกับพอลิเอทิลีน
- มีจุดหลอมเหลวสูง $130-171^{\circ}\text{C}$ จึงสามารถทนอุณหภูมิสูงที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ (Sterilization : 100°C) ได้
- เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมาก แม้ที่อุณหภูมิสูง
- มีความต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทนทานต่อสารเคมีส่วนมาก ได้แก่ กรด ต่าง แอลกอฮอล์ ตัวทำละลายอินทรีย์ แต่จะเกิดการพองตัว อ่อนนิ่ม หรือพื้นผิวเป็นรอยได้ในสารเคมี ที่มีองค์ประกอบเป็นคลอรีน หรือไฮโดรคาร์บอนทั้งชนิดอะโรมาติกและอะลิฟาติก เนื่องจากพอลิโพรไพลีนมีคุณสมบัติไม่มีขั้วสามารถดูดซึมสารที่ไม่มีขั้วได้ดี ดังนั้นจึงสามารถทนต่อสารที่มีขั้วได้ดีกว่า และพอลิโพรไพลีนจะพองตัวและสลายตัวได้ในสารเคมีที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง เช่น โอกรดไนตริก กรดซัลฟิวริกเข้มข้นและร้อน

2.6.5 การสลายตัวของโพลิโพรไพลีน

พอลิโพรไพลีนเกิดการสลายตัวได้ง่ายในสภาวะที่มีแรงกระแทก ความร้อน ออกซิเจน แสง UV เนื่องจากโครงสร้างมี tertiary carbon atom ที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายทำให้ตัดพันธะพอลิเมอร์สายสั้นลง และให้สารกลุ่มอัลดีไฮด์ กรดคาร์บอกซิลิก แลคโตนและเอสเทอร์ออกมาทำให้พอลิเมอร์ไม่คงทน มีรอยแตกและเหลือง ดังนั้นเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิโพรไพลีนสำหรับการใช้งานภายนอกอาคาร อาจต้องมีการเติม carbon black เพื่อป้องกันแสง UV และสารต้านออกซิเดชันเพื่อป้องกันพอลิเมอร์สลายตัว

2.6.6 ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากโพลิโพรไพลีน

ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากโพลิโพรไพลีน ได้แก่ ก่อของเล่นเด็ก ถุงปุ๋ย โหมยเทียม พรมและแผ่นรองพรม ผ้าใบกันน้ำ เชือก สายรัดบรรจุภัณฑ์ ถุงร้อน ขวดใส่เครื่องดื่ม ซองขนม ท่อ ปลอกหุ้มสายไฟและสายเคเบิล งานเคลือบกระดาษ วัสดุอุดรอยรั่ว กาว และอุปกรณ์ภายในรถยนต์ ภาชนะที่ทำจาก PP ซึ่งเป็นเทอร์โมพลาสติก ได้รับการจำแนกชนิดของพลาสติก เพื่อนำกลับไปเวียนทำใหม่ (recycle) มีสัญลักษณ์เป็นเลข 5 ซึ่งหมายถึง Resin Identification Code 5 ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 Resin Identification Code 5 [15]

ในปี 2008 นักวิจัยทางการแพทย์ในแคนาดา [15] ได้อ้างว่ามีการปลดปล่อย quaternary ammonium biocides และ oleamide ออกมาจากพลาสติกชนิด PP มีผลต่อการทดลองในห้องปฏิบัติการ quaternary ammonium biocides เป็นสารต้านแบคทีเรียที่ผู้ผลิตใช้เติมลงในพลาสติก ส่วน oleamide เป็นสารเคมีที่เติมลงไปเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของพลาสติก เนื่องจากมีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้พลาสติก PP เป็นภาชนะสำหรับบรรจุอาหารและเครื่องดื่มจำนวนมาก จึงมีโอกาสที่ oleamide จากพลาสติกจะไปปนเปื้อนอาหารได้ แต่ทั้งนี้ก็ยังไม่ทราบถึงอันตรายต่อสุขภาพ[15]

2.7 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Designs)

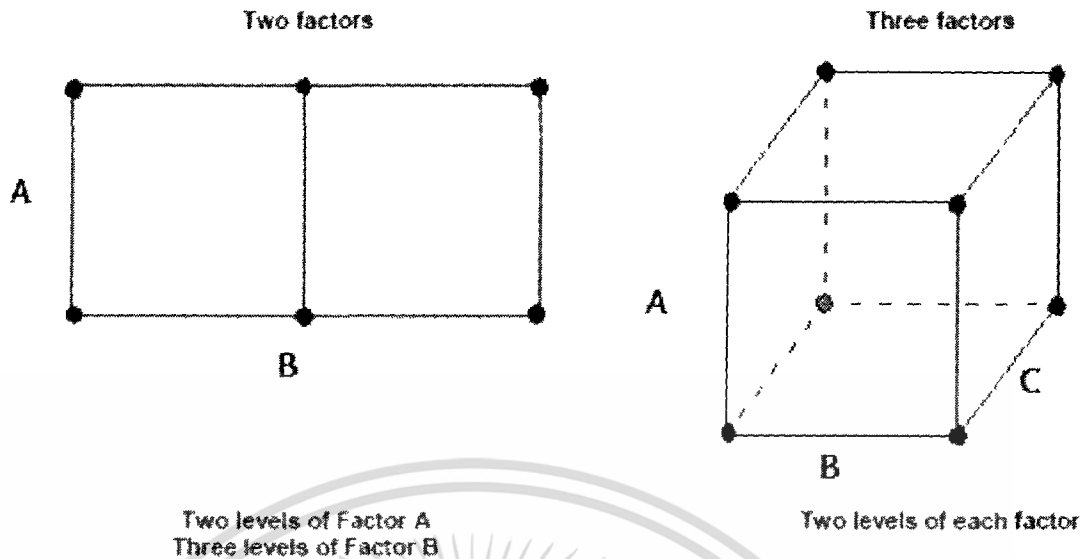
การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลจะสามารถทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีต่อกระบวนการและ เกิดขึ้นพร้อมๆกันได้ เมื่อมีการทำการทดลอง ควรทำการเปลี่ยนค่าระดับปัจจัยไปพร้อมๆกันมากกว่าทำการเปลี่ยนค่าระดับปัจจัยตัวใดตัวหนึ่ง เพราะจะทำให้ได้งานที่มีประสิทธิภาพมากกว่าทั้งในเรื่องการประหยัดเวลาและต้นทุน และยังสามารถวิเคราะห์เรื่องอิทธิพลร่วม (Interaction) ระหว่างปัจจัยได้ด้วยโดยอิทธิพลร่วม (Interaction) คือผลของการที่ปัจจัยร่วมกันที่มีอยู่ในหลายๆกระบวนการ ถ้าไม่ได้ทำการทดลองแบบแฟคทอเรียล อาจจะไม่เห็นผลของอิทธิพลร่วม (Interaction) ได้ชัดเจนนัก

2.7.1 การออกแบบเพื่อการคัดเลือก (Screening Design)

ในงานพัฒนากระบวนการและงานการผลิตส่วนมาก มีตัวแปรจำนวนมากที่มีแนวโน้มว่าจะมีส่วนในการปรับปรุง การคัดเลือกเป็นการลดจำนวนตัวแปรเหล่านี้ให้มีจำนวนน้อยลง โดยคัดเลือกตัวแปรที่มีความสำคัญอย่างมากต่อ คุณภาพของผลิตภัณฑ์ การลดจำนวนตัวแปรนี้ทำให้คุณสามารถจะพิจารณาเฉพาะที่ตัวแปรที่มีความสำคัญต่อ กระบวนการเท่านั้นได้ หรือ พิจารณาตามหลักการความสำคัญจำนวนน้อย การคัดเลือกอาจจะสามารถ ทำได้ถึงการหาค่าที่เหมาะสม (optimal) ของตัวแปรนั้นๆ รวมทั้งทำการทดลองเพื่อหาค่าที่ดีที่สุด (optimization) เพื่อบอกว่าค่าตอบสนอง (response) มีสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้ง

2.7.2 การออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial

ในการทดลองแบบ Full Factorial ค่าตอบสนอง (response) จะถูกวัดค่าที่ทุกๆ เงื่อนไขของทุกค่าระดับปัจจัยที่มี ในการทดลอง โดยเงื่อนไขการทดลอง (combination of factor levels) เป็นเงื่อนไขที่กำหนดให้ทำการทดลองเพื่อวัดค่า ตอบสนอง โดยที่เงื่อนไขการทดลองแต่ละอันจะเรียกว่า รัน (run) และมีการทำการทดลองเพื่อวัดค่าตอบสนอง และชุดข้อมูลทั้งหมดในทุกรันจะเรียกว่า แบบการทดลอง (design) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ด้านล่างนี้เป็นรูปแสดงตัวแบบของการทดลองแบบ 2 และ 3 ปัจจัย โดยจุดจะเป็นแสดงถึงเงื่อนไขการทดลอง (combination) แต่ละอันของการทดลอง ตัวอย่างเช่น ในตัวแบบ 2 ปัจจัย (two-factor design) จุดที่มุมล่างด้านซ้าย และรันของการทดลองที่มีค่าระดับปัจจัย A เป็นค่าต่ำ (low) และ ค่าระดับปัจจัย B เป็นค่าต่ำ เช่นกัน



รูปที่ 2.11 การทดลองแบบ 2 และ 3 ปัจจัย [16]

2.7.3 การออกแบบการทดลองแบบ Two-level full factorial

ในตัวแบบของ Two-level full factorial ในทุกๆ การทดลองทุกๆ ปัจจัยจะมีค่าระดับเพียงแค่ 2 ระดับเท่านั้น การทดลองแต่ละรันจะมีทุกๆ ค่าระดับของทุกๆ ปัจจัย ถึงแม้ว่าตัวแบบ Two-level full factorial จะไม่สามารถทำการทดลองที่ค่าปัจจัยย่าน (range) กว้างๆ มากได้ แต่ก็สามารถให้สาระข้อมูลที่มีประโยชน์ได้โดยที่จำนวนรันไม่มากนักต่อหนึ่งปัจจัย และเพราะว่า Two-level full factorial สามารถที่จะแสดงค่าแนวโน้มได้ จึงสามารถนำมาใช้เพื่อนำไปเป็นแนวทางในการสร้างการทดลองต่อไป ตัวอย่างเช่น เมื่อคุณต้องการที่จะทำการทดลองในย่านที่กว้างขึ้นซึ่งคุณมีสมมติฐานเบื้องต้นว่าจะมีค่าที่ดีที่สุดอยู่ คุณอาจใช้ตัวแบบแฟคทอเรียล (factorial) เพิ่มเติมจากจุดนี้โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ central composite

2.7.4 การออกแบบการทดลองแบบ General full factorial

ในตัวแบบของ General full factorial การทดลองแต่ละครั้งในแต่ละปัจจัยจะมีค่าระดับหลายๆค่า ตัวอย่างเช่น ปัจจัย A มี 2 ระดับ ปัจจัย B มี 3 ระดับ และ ปัจจัย C มี 5 ระดับ การทดลองในทุกรันจะทำครบทุกค่าระดับของทุกปัจจัย ตัวแบบ General full factorial อาจจะนำไปใช้ในการทดลองขนาดเล็กเพื่อทำการคัดเลือกปัจจัย (Screening) หรือ เพื่อทำการหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization)

2.7.5 การออกแบบการทดลองแบบ Fractional Factorial

ในการทดลองแบบ Full factorial ค่าตอบสนองจะถูกวัดค่าในทุกๆ เงื่อนไขการทดลองซึ่งจะเป็นทุกๆ ค่าระดับของทุกปัจจัย ซึ่งอาจจะต้องมีการทำการทดลองจำนวนมากครั้ง ตัวอย่างเช่น การทดลองของ two-level full factorial ของ 6 ปัจจัย อย่างน้อยต้องมีการทดลองจำนวน 64 รัน หรือ กรณีที่มี 9 ปัจจัย จะมีการทดลองอย่างน้อย 512 รัน เพื่อเป็นการประหยัดเวลาและต้นทุนคุณอาจเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการออกแบบการทดลองให้มีการทำการทดลองเฉพาะบางเงื่อนไข ตัวแบบ Factorial ที่มีการทดลองไม่ครบทุกเงื่อนไขนี้เรียกว่า Fractional factorial designs โปรแกรม Minitab สามารถสร้างตัวแบบ fractional factorial ได้จนถึงจำนวนปัจจัย 15 ตัวต่อหนึ่งการทดลอง Fraction factorial มีความสำคัญอย่างมากในการทดลองเพื่อการคัดเลือกปัจจัย (screening) เพราะว่ามีผลลดจำนวนรันลงจนเหลือขนาดการทดลองที่สามารถทำได้จริง รันที่ถูกเลือกมาทำการทดลองเป็นรันที่อยู่ในชุดการทดลอง ของตัวแบบ full factorial ซึ่งในกรณีที่ไม่ได้ทำการทดลองครบทุกเงื่อนไขของทุกปัจจัยจะทำให้เกิดผลอย่างหนึ่งที่ เรียกว่าคอนฟาวด์ (confounded) ซึ่ง คอนฟาวด์ นี้หมายถึง อิทธิพลของปัจจัยที่ไม่สามารถทำการประเมินค่าแยก ออกมาได้เดี่ยวๆ และอาจเรียกว่าเป็น Aliased โดย Minitab จะแสดงตารางของ alias ที่อยู่ในรูปแบบของการคอน ฟาวด์ เพราะว่าเรื่องของคอนฟาวด์ ทำให้อิทธิพล (effects) บางตัวไม่สามารถหาค่าได้ทำให้การเลือกการทำ fractional factorial ต้องเลือกส่วนที่จะมาทำให้ถูกต้องเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ใช้งานได้ การเลือกส่วนการทดลองที่ดีที่สุด (Best fraction) บางครั้งอาจจะต้องใช้ความรู้เฉพาะเกี่ยวกับกระบวนการและผลิตภัณฑ์เพื่อมาตัดสินใจด้วย

2.7.6 การออกแบบการทดลองแบบ Plackett-Burman

การทดลองแบบ Plackett-Burman เป็นการทดลองที่มีค่า resolution เท่ากับ 3 (III) ซึ่งถือเป็นการทดลองแบบ fractional factorial ที่มี resolutions III ซึ่งมีรูปแบบของ alias ระหว่างปัจจัยหลัก (main effect) กับ interaction ของ 2 ปัจจัย (two-way interactions) Minitab สามารถสร้างการทดลองได้สูงสุดถึงจำนวน 47 ปัจจัย โดยแต่ละตัวแบบที่ถูกสร้างขึ้นจะขึ้นอยู่กับจำนวน รัน ตั้งแต่จำนวน 12 ถึง 48 รัน (เพิ่มขึ้นทีละ 4 รัน) และจำนวนปัจจัยจะต้องมีค่าน้อยกว่าจำนวนรันเสมอ[16]

2.7.7 การออกแบบการทดลองแบบ 2^k

การออกแบบ 2^k มีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่ต้องการทำการตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองที่น้อยที่สุดที่สามารถจะทำได้ เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ปัจจัยได้อย่างบริบูรณ์ โดยการใช้ การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล ดังนั้นจึงไม่น่าแปลกใจเลยที่การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k จะถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อทำการกรองปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้เหลือน้อยลง เนื่องจากแต่ละปัจจัยของการออกแบบ 2^k ประกอบด้วย 2 ระดับ

การวิเคราะห์การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ในรูปแบบต่างๆ ไปคือ การออกแบบที่มี k ปัจจัยแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ แบบจำลองทางสถิติสำหรับการออกแบบ 2^k จะประกอบด้วยผลหลัก k ปัจจัย $\binom{k}{2}$ เทอมความสัมพันธ์ร่วมกันของ 2 ปัจจัย $\binom{k}{3}$ เทอมความสัมพันธ์ร่วมกันของ 3 ปัจจัย,, และ 1 เทอมความสัมพันธ์ร่วมกันของ k ปัจจัย นั่นคือแบบจำลองบริบูรณ์สำหรับการออกแบบ 2^k จะประกอบไปด้วยผลลัพธ์ทั้งสิ้น $2^k - 1$ ปัจจัยวิธีการทั่วไปในการวิเคราะห์เชิงสถิติของการออกแบบ 2^k ได้ทำการสรุปเอาไว้ดังนี้คือ การกำหนดปัจจัยที่มี

อิทธิพล การกำหนดแบบทดลองเบื้องต้นของการทดลอง การดำเนินการทดสอบทางสถิติ การปรับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบทดลองให้เหมาะสม การวิเคราะห์ส่วนตักค้างของแบบทดลองและการอธิบายผลลัพธ์ที่ได้จากแบบการทดลอง

รายละเอียดของบทสรุปเกี่ยวกับขั้นตอนการวิเคราะห์สำหรับ การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

คือ ในขั้นแรกจะทำการประมาณค่าผลลัพธ์ที่จะเกิดขึ้นจากปัจจัยต่างๆ และตรวจสอบเครื่องหมายและขนาดของผลลัพธ์ที่จะเกิดขึ้น ข้อมูลเหล่านี้จะทำให้ผู้ทำการทดลองทราบเบื้องต้นว่าปัจจัย และเทอมความสัมพันธ์รวมกันตัวใดที่มีความสำคัญ และปัจจัยเหล่านี้ควรจะถูกรับให้อยู่ในทิศทางใด เพื่อที่จะปรับปรุงผลลัพธ์ตอบสนอง ในการสร้างแบบจำลองเบื้องต้น ควรที่จะเลือกแบบจำลองแบบเต็มรูปแบบ ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยหลักและเทอมความสัมพันธ์รวมกันทั้งหมด ในขั้นตอนที่สองจะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อที่จะทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยหลักและเทอมความสัมพันธ์รวมกันโดยรูปแบบต่างๆ ไปของการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ที่มี n เรพลีเคต ขั้นตอนที่สามจะเป็นการขีดเคลาแบบจำลอง ซึ่งขั้นตอนนี้จะเกี่ยวกับการดึงเอาปัจจัยที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญออกจากแบบจำลอง เต็มรูปแบบ ขั้นตอนที่จะเป็นการวิเคราะห์ส่วนตักค้าง เพื่อที่จะตรวจสอบความเพียงพอของ แบบจำลอง และตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานที่สร้างขึ้น มีบางครั้งเช่นกันที่การขีดเคลาแบบจำลองเกิดขึ้นภายหลังจากการวิเคราะห์ส่วนตักค้าง ทั้งนี้เนื่องจากพบว่า แบบจำลองเกิดความไม่เพียงพอหรือสมมติฐานที่กำหนดให้มันไม่ถูกต้องอย่างมาก และในขั้นตอนสุดท้ายจะทำการวิเคราะห์ด้วยกราฟโดยจะทำการสร้างกราฟปัจจัยหลักและเทอมความสัมพันธ์รวมกันขึ้นมา

สำหรับการประมาณค่าของผล หรือค่าผลรวมของกำลังสองของผล จะต้องทำการคำนวณหา ค่า Contrast ที่เกี่ยวข้องกับผลปัจจัยและเทอมของความสัมพันธ์รวมกันนั้นๆ ก่อน โดยใช้สมการที่ (2.1) ดังนี้

$$\text{Contrast AB...K} = (a \pm 1)(b \pm 1) \dots (k \pm 1) \quad (2.1)$$

เมื่อทำการคำนวณหา ค่า Contrast สำหรับผลปัจจัยหลักและเทอมของความสัมพันธ์รวมกันต่างๆ เสร็จเรียบร้อยแล้ว ก็จะสามารถทำการประมาณค่าผลต่างๆ ดังกล่าว และสามารถทำการประมาณค่าของผลรวมกำลังสองได้ ดังแสดงในสมการ (2.2) และสมการ (2.3) ดังนี้

$$\text{AB...K} = \frac{2}{n2^k} \quad (\text{Contrast AB...K}) \quad (2.2)$$

$$\text{SS AB...K} = \frac{2}{n2^k} (\text{Contrast AB...K})^2 \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์แฟรคชันนอลแฟกทอเรียลแบบ 2^{k-p} (The Fractional Factorial Design Methodology) การออกแบบที่ประกอบไปด้วย 2^{k-p} การทดลอง จะเรียกว่าเศษส่วนของ การออกแบบ 2^k หรือเรียกว่า การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^{k-p} การออกแบบเช่นนี้ จะต้องเลือกตัวก่อกำเนิด p ตัวที่เป็นอิสระต่อกัน ตัวกำหนดความสัมพันธ์สำหรับการออกแบบนี้ ประกอบด้วยตัวก่อกำเนิดที่ถูกเลือกขึ้นมาในตอนเริ่มต้น p ตัว และเทอมของความสัมพันธ์รวมกันวาง นัยทั่วไปแล้วที่เกิดจากตัวก่อกำเนิดเหล่านี้คือ $2^p - p - 1$ ตัว

โครงสร้างของคู่แฝดแฝงสามารถหาได้จากการคูณผลในแต่ละคอลัมน์ด้วยตัวกำหนด ความสัมพันธ์ แต่จะต้องให้ความระมัดระวังในการเลือกตัวก่อกำเนิดเพื่อว่าผลที่อยู่ในความสนใจจะไม่ คู่แฝดแฝงซึ่งกันและกัน ผลจะมี 2^{p-1} คู่แฝดแฝงเมื่อ k มีค่าค่อนข้างมาก โดยจะสมมติว่าผลของ ความสัมพันธ์รวมกันขั้นสูง (3 หรือ 4 หรือมากกว่านี้) สามารถละลายได้ และสิ่งนี้ทำให้โครงสร้าง ของคู่แฝดแฝงง่ายขึ้น

มีความสำคัญอย่างยิ่งในการเลือกตัวก่อกำเนิด p ตัวสำหรับใช้ในการออกแบบแฟรคชันนอล แฟกทอเรียลเช่นกัน เพราะว่าต้องการที่จะให้ความสัมพันธ์ของคู่แฝดแฝงที่จะเกิดขึ้นเป็นไปอย่างดีที่สุด เกณฑ์ในการเลือกตัวก่อกำเนิดคือทำให้การออกแบบ 2^{k-p} มีมิติสูงสุดเท่าที่จะเป็นไปได้

1. การออกแบบการกรองปัจจัย (Screening Design) เป็นขั้นตอนการประยุกต์ใช้ประโยชน์ ก่อนทำการทดลองจริง เมื่อจำนวนปัจจัยที่ต้องการจะทำการศึกษามีจำนวนที่มาก และมีจำนวนใน การดำเนินการทดลองที่จำกัด อันเนื่องมาจากผลกระทบของเวลาและต้นทุนในการดำเนินการ ทดลอง วัตถุประสงค์หลักของการออกแบบการกรองปัจจัย คือ การแสดงผลสัมพัทธ์ความสัมพันธ์ของ ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความแปรปรวนของค่าผลตอบสนอง

การออกแบบแฟรคชันนอลแฟกทอเรียล จะเป็นการจำกัดเกี่ยวกับเศษส่วนของระดับปัจจัย ที่มีความเป็นไปได้ทั้งหมด เช่น $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ ซึ่งจะทำให้ประหยัดเวลาในการดำเนินการทดลองให้สั้นลง อีก ทั้งยังเป็นการกำจัดความยุ่งยากซับซ้อนเกี่ยวกับเทอมความสัมพันธ์รวมกันระดับสูง ดังนั้นการ ออกแบบแฟรคชันนอลแฟกทอเรียลเป็นเสมือนขอแนะนำเกี่ยวกับวัตถุประสงค์หลักของการออกแบบ การกรองปัจจัยนั่นเอง

การออกแบบการทดลองแฟรคชันนอลแฟกทอเรียลช่วยประหยัดเวลาในการดำเนินการ ทดลองจัดเป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญอย่างมากในวิธีการ “ซิกส์ซิกม่า (Six Sigma)” โดยการ ออกแบบการทดลองจะช่วยในการปรับปรุงกระบวนการใหม่รูปแบบที่ทันสมัยอยู่โดยตลอดในการ ดำเนินการอย่างต่อเนื่อง และเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ เพื่อการวินิจฉัยถึงสาเหตุ และ ความสัมพันธ์เกี่ยวกับอิทธิพลระหว่างความแปรปรวนของปัจจัยตอบสนอง (Y)

การออกแบบการทดลองแฟรคชันนอลแฟกทอเรียล สามารถทำประโยชน์ได้อย่างมากมาย ดังต่อไปนี้ การออกแบบการทดลองแฟรคชันนอลแฟกทอเรียล จะเป็นแรงผลักดันในการค้นหา ลักษณะของแหล่งกำเนิดความแปรปรวน คุณภาพของการออกแบบการทดลองแฟรคชันนอลแฟกทอเรียล จะมีการแสดงส่วนสำคัญเกี่ยวกับเทอมความสัมพันธ์รวมกันของปัจจัยอิสระ (X)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดำเนินการออกแบบการทดลองแฟรคชันนอลแฟกทอเรียล จะมีการสร้างสมการที่มีคุณภาพวิธีการหนึ่งเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยอิสระ (X) กับผลตอบสนอง (Y) ดังนั้น จึงทำให้สะดวกต่อการแปลงให้เป็นหลักการของ $Y = f(X)$ ในวิธีการซิกส์ซิกมา

ลักษณะเฉพาะของการออกแบบการทดลองแฟรคชันนอลแฟกทอเรียล สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาต่างๆ บนพื้นฐานของความหลากหลายในการวางแผนกับปัจจัยอิสระต่างๆ รวมทั้งผลลัพธ์ในส่วนสุดท้ายของการวิเคราะห์ สิ่งเหล่านี้จะเป็นการพิสูจน์โดยการทดลอง และ เป็นกลยุทธ์อย่างหนึ่งในการอธิบายการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่สามารถนำมาใช้เพื่อทำการสรุปการตัดสินใจ เลือกรุ่น III และ Resolution IV

2. การเพิ่มจุดศูนย์กลางให้การออกแบบ 2^k ประการสำคัญในการใช้งานการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k คือ สมมติฐานเกี่ยวกับความเป็นเชิงเส้นของผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากปัจจัยต่างๆ แน่นอนว่า ความเป็นเชิงเส้นอย่างบริบูรณ์แบบนั้นไม่ได้เป็นสิ่งที่จำเป็นมากมายนักและระบบ 2^k ยังคงทำงานได้ค่อนข้างดี แม้ว่าในกรณีที่มีสมมติฐานเกี่ยวกับความเป็นเชิงเส้นจะเป็นไปได้แค่เพียงโดยประมาณเท่านั้น ในความเป็นจริงแล้ว จะสังเกตเห็นได้ว่าถ้าเทอมของความสัมพันธ์รวมกันถูกเติมเข้าไปในผลตอบสนองปัจจัยหลัก หรือแบบจำลองขั้นแรก นั่นคือ

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j X_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \epsilon \quad (2.4)$$

ดังนั้นจะสามารถที่จะมีแบบจำลองที่แสดงส่วนโค้งบางประการในฟังก์ชันของผลตอบสนองส่วนโค้งนี้ เกิดจากการบิดเบี้ยวของระนาบที่ถูกทำให้เกิดขึ้นจากผลรวมความสัมพันธ์ร่วมกันนั่นคือ $\beta_{ij} X_i X_j$ นั่นเอง

มีบางกรณีเช่นกันที่ส่วนโค้งในฟังก์ชันผลตอบสนองไม่เพียงพอที่จะสร้างสมการของแบบจำลองตามแบบข้างบนนี้ได้ ในกรณีเช่นนี้แบบจำลองที่เหมาะสมกว่ามีดังนี้

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j X_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} X_j^2 + \epsilon \quad (2.5)$$

โดยที่ β_{ij} จะแสดงผลตอบสนองขั้นที่สองหรือผลตอบสนองของแบบควอดราติก นี้เรียกว่าแบบจำลองพื้นผิวตอบสนองขั้นที่สอง ในการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ส่วนใหญ่จะนิยมต้องการใช้สมการของแบบจำลองขั้นแรกมากกว่าแต่เป็นไปได้เช่นกันที่บางครั้งพบว่า แบบจำลองขั้นที่สองจะดูเหมาะสมกว่าในกรณีเช่นนี้มีการเรพลิเคต การทดลองในแบบแฟกทอเรียลแบบ 2^k ที่จะทำให้การป้องกันส่วนโค้งที่เกิดขึ้นจากผลขั้นที่สองนี้ นอกจากนั้นยังทำให้สามารถหาค่าประมาณความผิดพลาดได้อย่างอิสระอีกด้วย วิธีการเช่นนี้เกิดจากการเติมจุดศูนย์กลางให้การออกแบบ 2^k และทำการทดลองจำนวน n เรพลิเคตที่จุด $x_i = 0$ ($i = 1, 2, \dots, k$) เหตุผลของการเพิ่มเติมการทดลองเช่นนี้เข้าไปก็คือ จุดศูนย์กลางเหล่านี้ที่เติมเข้าไปไม่ได้ส่งผลกระทบต่อค่าประมาณค่าผล ตามปกติของการเอกซอร์นี้ เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบ 2^k แต่ประการใด เมื่อเราเติมจุดศูนย์กลางเขาไปเช่นนี้ จะสมมติให้ปัจจัยทั้ง k ตัวเหล่านี้เป็นข้อมูลเชิงประมาณ

เพื่อแสดงวิธีการดังกล่าวข้างต้น พิจารณาการออกแบบ 2^2 ที่มีข้อมูล 1 ตัวที่แต่ละจุดของแฟกทอเรียล $(-, -), (+, -), (-, +)$ และ $(+, +)$ และมีข้อมูลที่จุดศูนย์กลาง $(0, 0)$ อยู่ n_C ตัว กำหนดให้ \bar{Y}_F เป็นค่าเฉลี่ยของการทดลองทั้ง 4 ค่าที่จุดทั้ง 4 ของแฟกทอเรียลและกำหนดให้ \bar{Y}_C เป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูล n_C ที่จุดกึ่งกลาง ถ้าผลต่างระหว่าง $\bar{Y}_F - \bar{Y}_C$ มีค่าน้อยจุดศูนย์กลางนี้จะอยู่บน หรือใกล้กับระนาบที่ผ่านของจุดแฟกทอเรียล และจะไม่มีส่วนโค้งแบบควอดราติกค่าผลรวมกำลังสองสำหรับส่วนโค้งแบบควอดราติกบริสุทธิ์ซึ่งมีระดับความเสรีเท่ากับ 1 ความสามารถหาได้จาก

$$SS \text{ Pure quadratic} = \frac{n_F n_C (\bar{Y}_F - \bar{Y}_C)^2}{n_F + n_C} \quad (2.6)$$

โดยที่ n_F คือจำนวนของจุดในการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล ค่านี้จะถูกนำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบกับค่าความผิดพลาดของกำลังสองเฉลี่ย เพื่อที่จะทดสอบความเป็นส่วนโค้งแบบบริสุทธิ์ ยิ่งไปกว่านั้นเติมจุดเข้าไปที่จุดศูนย์กลางของการออกแบบ 2^k การตรวจสอบส่วนโค้งคือ

$$H_0^k: \sum_{j=1}^k \beta_{jj} = 0 \quad (2.7)$$

$$H_0^k: \sum_{j=1}^k \beta_{jj} \neq 0 \quad (2.8)$$

นอกจากนี้ ถ้าจุดของแฟกทอเรียลในการออกแบบเป็นแบบไม่มีเรพลิเคต จะสามารถใช้จุดศูนย์กลาง n_C นี้ในการสร้างตัวประมาณของความผิดพลาด ซึ่งมีระดับชั้นความเสรีเท่ากับ $n_C - 1$ ชั้นได้อีกด้วย

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

3.1 ขั้นตอนการดำเนินการ

3.1.1 ขบวนการทดลองโดยใช้อิงค์เจ็ทพิมพ์ลงบนผลิตภัณฑ์

การวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยในกระบวนการพิมพ์หมึกลงบนพลาสติก โดยอาศัยการออกแบบการทดลอง และการหาค่าที่เหมาะสมซึ่งได้กำหนดแผนการดำเนินการดังนี้

ในขั้นแรกได้ทดลองใช้หมึกในการพิมพ์ลงบนผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องอิงค์เจ็ท พบปัญหาว่าหมึกที่ใช้ในการพิมพ์ไม่สามารถแห้งติดบนผลิตภัณฑ์ได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดความล่าช้าต่อขบวนการผลิต ซึ่งตัวแปรที่มีผลต่อการแห้งของน้ำหมึกบนผลิตภัณฑ์นั้นมีจำนวนมาก หากใช้ทุกตัวแปรจะทำให้เสียเวลาและเกิดความเสียหายจำนวนมาก ดังนั้นจึงใช้แนวความคิดการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองมาใช้ในการออกแบบนี้เพื่อหาเวลาในการแห้งของน้ำหมึก (Dry Time) สามารถวัดได้โดยการจับเวลาน้ำหมึกที่แห้งติดบนผลิตภัณฑ์เพื่อที่จะให้เกิดมาตรฐานต่อการใช้งานจริงในการทดลองนี้ จึงได้มีการกำหนดลำดับขั้นตอนการทดลอง อุปกรณ์ เครื่องมือ และวัสดุที่ใช้สำหรับการผลิต ดังนี้

3.1.1.1. ชนิดน้ำหมึก (Ink) ใช้ น้ำหมึกชนิด Black fast drying ซึ่งมีคุณสมบัติ คือ สามารถทนอุณหภูมิได้สูงถึง 300 องศาเซลเซียส และยึดเกาะได้บนวัสดุประเภทพลาสติก ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ชนิดของน้ำหมึก

3.1.1.2. ชนิดตัวทำละลาย (Solvent) ใช้ Methyl Ethyl Ketone (MEK) เป็นตัวทำละลาย ซึ่งมีคุณสมบัติ คือ เป็นของเหลวไม่มีสี Methyl Ethyl Ketone (MEK) ใช้เป็นตัวทำละลายในกา หมึกพิมพ์ ใช้กำจัดเชื้อ ส่วน MIBK ใช้เป็นสารตัวทำละลายของสีวานิช และไนโตรเซลลูโลส แลคเกอร์ และยังใช้ในอุตสาหกรรมการกลั่น การสังเคราะห์สารอินทรีย์ของเมทิล เอมีลแอลกอฮอล์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ชนิดของตัวทำละลาย

3.1.1.3. เครื่องพิมพ์ (Ink jet printer) สำหรับเครื่องพิมพ์ ที่ใช้ในการพิมพ์เป็นเครื่องยี่ห้อ Linx รุ่น 7300 นำเข้าจากประเทศอังกฤษซึ่งมีคุณสมบัติ สามารถพิมพ์ได้ถึง 5 บรรทัด และมีความละเอียดได้ถึง 600*600 dpi และมี IP 65

IP ก็คือ ค่ามาตรฐานการป้องกัน ซึ่งจะเป็ค่าแสดงระดับการป้องกันของกล่อง แผงไฟฟ้า หรืออุปกรณ์ไฟฟ้า โดยที่ค่า IP นั้นจะแสดงด้วยตัวเลข 2 หลัก คือ IPxx โดยที่ตัวเลขหลักแรกจะหมายถึงการป้องกันจากของแข็ง ซึ่งจะมีตั้งแต่ 0-6 ส่วนตัวเลขหลักที่ 2 จะหมายถึงการป้องกันจากของเหลว ซึ่งจะมีตั้งแต่ 0-8 ความหมายของตัวเลขหลักแรก

ถ้าตัวเลขหลักแรกเป็น 0 หมายถึง ไม่มีการป้องกันใดๆได้เลย

ถ้าเป็น 1 หมายถึง มีการป้องกัน จากของแข็งที่มีขนาดใหญ่ กว่า 50 มม. ขึ้นไป

ถ้าเป็น 2 หมายถึง มีการป้องกัน จากของแข็งที่มีขนาดใหญ่ กว่า 12 มม. ขึ้นไป

ถ้าเป็น 3 หมายถึง มีการป้องกัน จากของแข็งที่มีขนาดใหญ่ กว่า 2.5 มม. ขึ้นไป

ถ้าเป็น 4 หมายถึง มีการป้องกัน จากของแข็งที่มีขนาดใหญ่ กว่า 1 มม.

ถ้าเป็น 5 หมายถึง มีการป้องกันจากฝุ่นผงละออง แต่ต้องเป็นฝุ่นละอองของสารที่ไม่ทำให้เกิดอันตรายครับ

ถ้าเป็น 6 หมายถึง มีการป้องกันจากฝุ่นผงละอองของสารที่อาจทำให้เกิดการกัดกร่อน หรือเป็นอันตรายได้

ตัวเลขหลักที่ 2

ถ้าตัวเลขหลักที่ 2 เป็น 0 หมายถึง ไม่มีการป้องกันจากของเหลวใดๆได้

ถ้าเป็น 1 หมายถึง มีการป้องกันจากหยดน้ำที่หยดลงมาในแนวตั้ง

ถ้าเป็น 2 หมายถึง มีการป้องกันจากหยดน้ำที่หยดลงกระทบทำมุม 15 องศาจากแนวตั้ง

ถ้าเป็น 3 หมายถึง มีการป้องกันจากน้ำฝนที่ตกกระทบทำมุม 60 องศาจากแนวตั้ง

ถ้าเป็น 4 หมายถึง มีการป้องกันจากน้ำได้รอบทุกทิศทาง

ถ้าเป็น 5 หมายถึง มีการป้องกันจากสายน้ำ (jet water) ได้รอบทุกทิศทาง

ถ้าเป็น 6 หมายถึง มีการป้องกันจากสายน้ำ (jet water) ที่มีแรงคล้ายกับน้ำทะเล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเป็น 7 หมายถึง มีการป้องกันจากผลกระทบที่เกิดจากการจุ่มลงในน้ำได้
 ถ้าเป็น 8 หมายถึง มีการป้องกันจากผลกระทบที่เกิดจากการจุ่มลงในน้ำภายใต้แรงกดดันได้
 ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท รุ่น 7300

3.1.1.4. วัสดุที่ใช้ในการพิมพ์ทดสอบ เป็นพลาสติกชนิด Polypropylene (PP) ขนาด กว้าง 20 มิลลิเมตร ยาว 20 มิลลิเมตรหนา 2 มิลลิเมตร ซึ่งจะใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องต้มเป็นส่วนใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 3.4

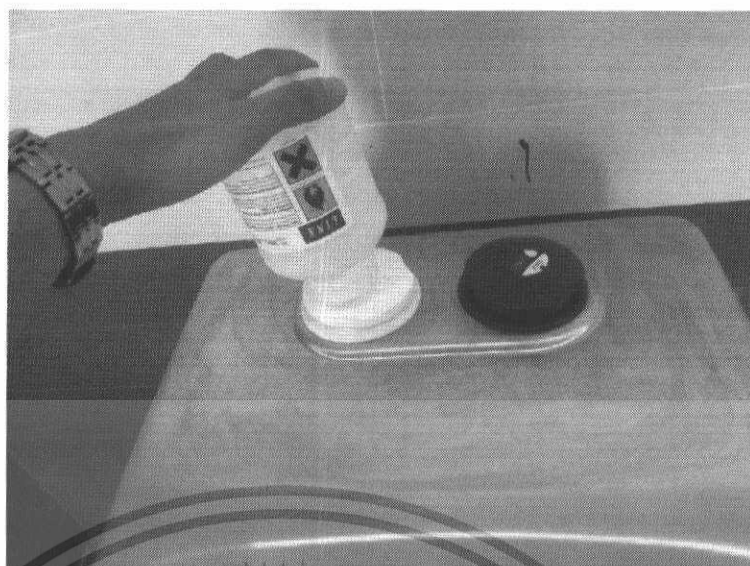


รูปที่ 3.4 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1.5. ขั้นตอนการทดลอง

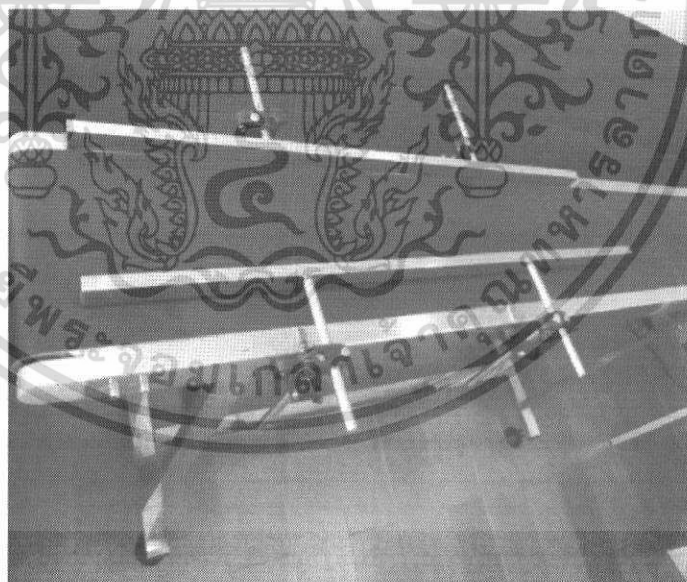
นำเครื่องพิมพ์ยี่ห้อ Linx รุ่น 7300 เติมน้ำหมึกด้วย น้ำหมึกชนิด Black fast drying ผสมกับตัวทำละลาย (Solvent) ชนิด Ketone-based (MEK) ที่ระดับความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ และ 80 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



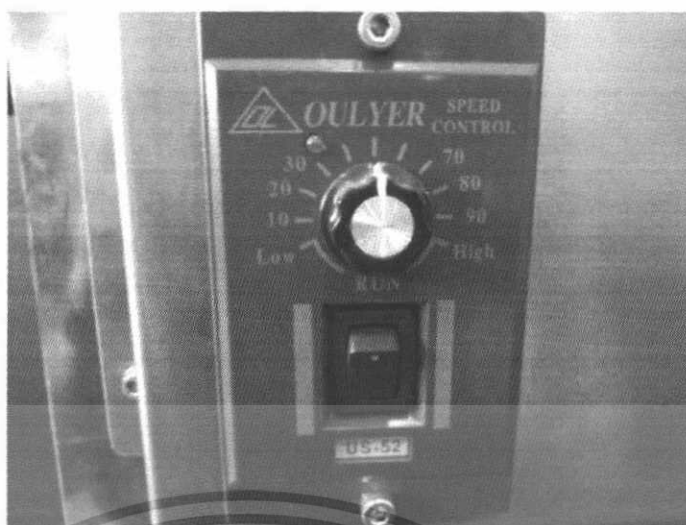
รูปที่3.5 การเติมตัวละลายลงในถังสำหรับกักเก็บ

1. สร้างข้อความ AAAAAAAAAA ที่จะทำการทดลอง 2 แบบ ที่ขนาด 2 มิลลิเมตร กับ 10 มิลลิเมตร และ ตั้งค่าบรรทัดพิมพ์ที่ 1 บรรทัดและ 2 บรรทัด
2. ปรับความเร็วของสายพาน ที่ 50 เมตรต่อนาที (m/min) และ 100 เมตรต่อนาที(m/min) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และ 3.7



รูปที่3.6 สายพานที่ใช้ในการลำเลียงผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ส่วนของสายพานที่ใช้ในการปรับค่าความเร็วที่ใช้ในการพิมพ์

3. ตั้งความละเอียดในการพิมพ์ที่ 150*150 dpi และ 600*600 dpi

4. ทำการทดลอง ตามที่ได้ออกแบบไว้

3.1.1.6. วิธีการวัดผลการทดลอง โดยการทำการพิมพ์จำนวนตัวอักษร 15 ตัว แล้วทำการเช็คดอกที่ละตัว โดยการจับเวลา

3.2 การออกแบบการทดลองของน้ำหมึกที่พิมพ์ลงบนผลิตภัณฑ์

3.2.1. กำหนดปัจจัย (Factor) ที่คาดว่าจะมีผลต่อผลตอบสนอง(Response)ที่ต้องการศึกษา ซึ่งในที่นี้ได้เลือกปัจจัย 6 ปัจจัย คือ ขนาดตัวอักษรที่พิมพ์(Font) ความเร็วที่ใช้ในการพิมพ์(Speed) ความละเอียดในการพิมพ์(DPI) เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของตัวทำละลาย(% Solvent) จำนวนบรรทัดที่พิมพ์ ผู้ปฏิบัติงาน(Operator) และผลตอบสนองที่ต้องการศึกษา คือ เวลาในการแห้งของน้ำหมึกบนผลิตภัณฑ์(Dry Time)ซึ่งสามารถวัดได้โดยการจับเวลาน้ำหมึกที่แห้งติดบนผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

3.2.2. ในขั้นตอนนี้ผู้ทำการทดลองเลือกใช้เทคนิค 2^{6-2} (fractional factorial design with resolution III) เพื่อทำการประเมินปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบสนอง และคัดแยกปัจจัยที่มีความสำคัญไว้ทำการศึกษาต่อไป

3.2.3. ทำการคัดแยกปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบสนอง ออกมาแล้วจะได้ปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบสนองเหลืออยู่ 3 ปัจจัย จากนั้นนำปัจจัยที่ผ่านการคัดแยกแล้วมาทำการวิเคราะห์ต่อโดยใช้เทคนิค 2^{3-1} (fractional factorial design with resolution III added three center points) เพื่อทำการหาสมการ Regression ที่ใช้สำหรับหาสถานะที่เหมาะสมต่อการพิมพ์หมึกลงบนผลิตภัณฑ์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ปัจจัยและระดับของปัจจัย

Factor	Low level	High level	หน่วย
A : ขนาดตัวอักษรที่พิมพ์	2	10	mm
B : ความเร็วที่ใช้ในการพิมพ์	50	100	m/min
C : ความละเอียดในการพิมพ์	150*150	600*600	dpi
D : เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของตัวทำละลาย	20	80	watt
E : จำนวนบรรทัดที่พิมพ์	1	2	บรรทัด
F : ผู้ปฏิบัติงาน	1	2	คน

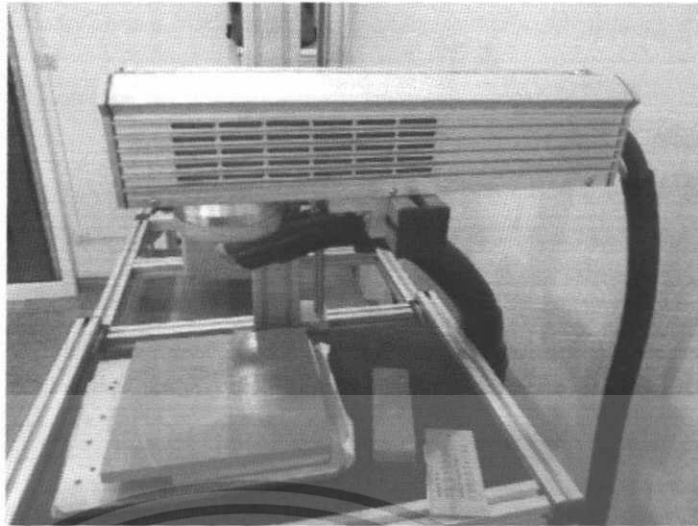
ออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิค 2^{6-2} (fractional factorial design with resolution III) โดยมีการสุ่มลำดับการทดลอง(Randomized) และทำการวัดผลด้วยการจับเวลาในการแห้งของน้ำหมึกหลังจากที่เครื่องพิมพ์ได้พิมพ์เสร็จ

ในที่นี้ใช้ Generators เป็น $E = ABC$, $F = BCD$ และ Alias Structure คือ
 $I + ABCE + ADEF + BCDF$, $A + BCE + DEF + ABCDF$, $B + ACE + CDF + ABDEF$,
 $C + ABE + BDF + ACDEF$, $D + AEF + BCF + ABCDE$, $E + ABC + ADF + BCDEF$,
 $F + ADE + BCD + ABCEF$, $AB + CE + ACDF + BDEF$, $AC + BE + ABDF + CDEF$,
 $AD + EF + ABCF + BCDE$, $AE + BC + DF + ABCDEF$, $AF + DE + ABCD + BCEF$,
 $BD + CF + ABEF + ACDE$, $BF + CD + ABDE + ACEF$, $ABD + ACF + BEF + CDE$,
 $ABF + ACD + BDE + CEF$

3.3 ขบวนการทดลองโดยใช้เลเซอร์พิมพ์ลงบนผลิตภัณฑ์

เพื่อที่จะให้เกิดมาตรฐานต่อการใช้งานจริงในการทดลองนี้จึงได้มีการกำหนดลำดับขั้นตอนการทดลอง อุปกรณ์ เครื่องมือ และวัสดุที่ใช้สำหรับการผลิตในครั้งต่อไป ดังนี้

3.3.1. เครื่องเลเซอร์ไฟเบอร์ (Fiber Laser) F-9020 จากประเทศสเปน อายุการใช้งาน 100,000 ชั่วโมง Nominal Power : 20 W ,Wavelength : 1.06 microns, Focal Specifications : 100 mm, Marking Head : Marking area indicator (Red diode) สามารถพิมพ์ได้โดยไม่จำกัดจำนวนบรรทัดแต่จะจำกัดพื้นที่ในการพิมพ์ที่ขนาด 100x100 มิลลิเมตร(mm) ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และ 3.9



รูปที่3.8 หัวเลเซอร์ (Fiber Laser)

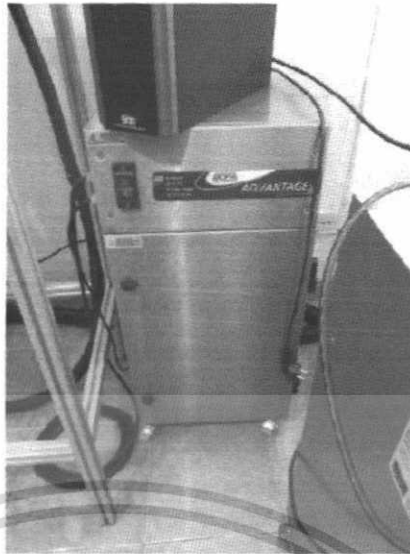


รูปที่3.9 ชุดควบคุม (Control)

เครื่องเลเซอร์จะถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ จะถูกเขียนโปรแกรมลงไปโปรแกรมสำเร็จรูปที่มาจากตัวเครื่อง

3.3.2. ชุดควบคุม จะทำการดูควันจะทำการดูควันที่มาจาก การทำปฏิกิริยาระหว่างแสงเลเซอร์กับแผ่นพลาสติกที่นำมาทดลอง เพื่อไม่ให้เป็นอันตรายต่อผู้ทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่3.10 ชุดตัดควีน

3.3.3. ชิ้นงานตัวอย่างทดลอง เป็นพลาสติก PP ขนาด 20x20 mm ที่ทำการฉีดยาเรียบร้อยแล้ว ก่อนนำไปพิมพ์ตัวอย่าง เพื่อเก็บข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่3.11 ชิ้นงานตัวอย่างทดลอง

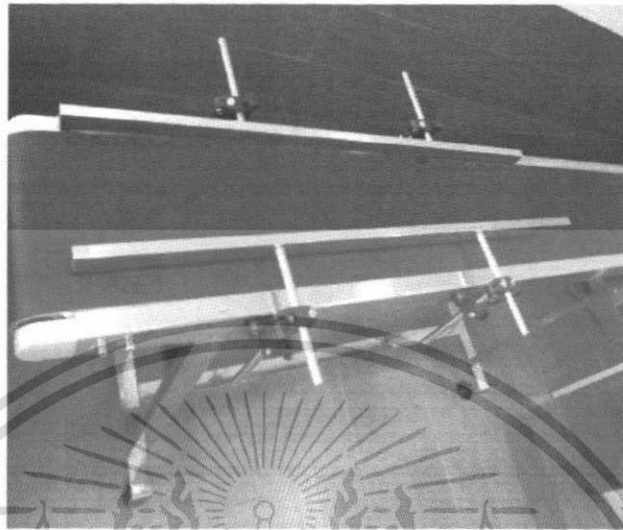
3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 นำเครื่องเลเซอร์ไฟเบอร์(Fiber Laser)ยี่ห้อ Macsa รุ่น F-9020 ติดตั้งเข้ากับสายพานแล้วตั้งค่าความถี่เลเซอร์ที่ 10 MHz และ 20 MHz และตั้งพลังงานที่ทำการยิงที่ 10 และ 20 MHz

3.4.2 สร้างข้อความ ที่จะทำการทดลองแบบสี่เหลี่ยมจตุรัส 2 แบบ ที่ขนาด 2x2 มิลลิเมตร และ 10x10 มิลลิเมตร และตั้งค่าบรรทัดที่จะพิมพ์ที่ 1 บรรทัดและ 2 บรรทัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 ปรับความเร็วของสายพาน ที่ 50 เมตรต่อนาที (m/min) และ 100 เมตรต่อนาที (m/min) ดังแสดงในรูปที่ 3.12 และ 3.13



รูปที่ 3.12 สายพานที่ใช้ในการลำเลียงผลิตภัณฑ์



รูปที่ 3.13 การปรับความเร็วที่ใช้ในการพิมพ์

3.5 การออกแบบการทดลอง

3.5.1. กำหนดปัจจัย(Factor) ที่คาดว่าจะมีผลตอบสนอง(Response) ที่ต้องการศึกษา ซึ่งมี 6 ปัจจัย คือ ขนาดตัวอักษรที่พิมพ์(Font) ความเร็วที่ใช้ในการพิมพ์(Speed) ค่าความถี่ที่ใช้ในการพิมพ์(MHz) ค่าพลังงานที่ใช้ในการพิมพ์(Resolution) จำนวนบรรทัดที่พิมพ์ ผู้ปฏิบัติงาน (Operation) และผลตอบสนองที่จะทำงานศึกษาคือสีที่ได้จากการพิมพ์ สามารถวัดได้จากวิธีการประมวลผลภาพ(image processing) มาประยุกต์ใช้ในการประเมินผล เพื่อให้การแบ่งแยกสีของวัสดุที่ทำการพิมพ์ด้วยเลเซอร์มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1	2	3	4	5	6	7

รูปที่3.14 การเปรียบเทียบสีเลเซอร์[1]

3.5.2. การทดลองเลือกใช้เทคนิค 2^{6-2} (Fractional factorial design with resolution III) เพื่อทำการประเมินปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบสนอง และคัดแยกปัจจัยที่มีความสำคัญไว้ทำการศึกษาต่อไป

3.5.3. ทำการคัดแยกปัจจัย ที่มีผลตอบสนองออกและนำปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบสนองที่เหลือไปทำการวิเคราะห์ต่อ

3.6. ปัจจัยในการทดลองเบื้องต้น

ในการทดลองเบื้องต้นได้ใช้ผลตอบสนอง คือ สีที่ทางลูกค้าได้เลือกและ ปัจจัย 6 ปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อผลตอบสนอง ซึ่งเป็นเป้าหมายที่ต้องการคือ การพิมพ์ออกมาให้ได้สีตามที่ลูกค้าได้เลือกไว้ให้ใกล้เคียงที่สุด

ตาราง3.2 ปัจจัยและระดับของปัจจัย

Factor	Low level	High level	หน่วย
A:ขนาดของตัวอักษร	2	10	mm
B:ความเร็วที่ใช้ในการพิมพ์	50	100	m/min
C:ค่าความถี่ที่ใช้ในการพิมพ์	10	20	MHz
D:ค่าพลังงานที่ใช้ในการพิมพ์	10	20	watt
E:จำนวนบรรทัดที่พิมพ์	1	2	บรรทัด
F:ผู้ปฏิบัติงาน	1	2	คน

ออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิค 2^{6-2} (fractional factorial design with resolution III) โดยมีการสุ่มลำดับการทดลอง (Randomized) และทำการวัดผลด้วยการจับเวลาในการแห้งของน้ำหมึกหลังจากที่เครื่องพิมพ์ได้พิมพ์เสร็จ

ในที่นี้ใช้ Generators เป็น $E = ABC$, $F = BCD$ และ Alias Structure คือ

$I + ABCE + ADEF + BCDF$, $A + BCE + DEF + ABCDF$, $B + ACE + CDF + ABDEF$,

$C + ABE + BDF + ACDEF$, $D + AEF + BCF + ABCDE$, $E + ABC + ADF + BCDEF$,

$F + ADE + BCD + ABCEF$, $AB + CE + ACDF + BDEF$, $AC + BE + ABDF + CDEF$,

$AD + EF + ABCF + BCDE$, $AE + BC + DF + ABCDEF$, $AF + DE + ABCD + BCEF$,

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสจวณวิศวกรรมศาสตร์เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BD + CF + ABEF + ACDE, BF + CD + ABDE + ACEF, ABD + ACF + BEF + CDE,
ABF + ACD + BDE + CEF



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

จากการทดลองตามขั้นตอนในบทที่ 3 ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือการทดลองด้วยเครื่องอิงค์เจ็ทและการทดลองด้วยเลเซอร์ ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดลองด้วยอิงค์เจ็ท

4.1.1 ผลการทดลอง 2^{6-2} (fractional factorial design with resolution III)

ออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิค 2^{6-2} (fractional factorial design with resolution III) โดยมีการสุ่มลำดับการทดลอง(Randomized) และทำการวัดผลด้วยการจับเวลาในการแห้งของน้ำหมึกหลังจากที่เครื่องพิมพ์ได้พิมพ์เสร็จจะทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ซึ่งได้ผลการทดลอง ดังแสดงตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองโดยใช้เทคนิค 2^{6-2} (fractional factorial design with resolution III)

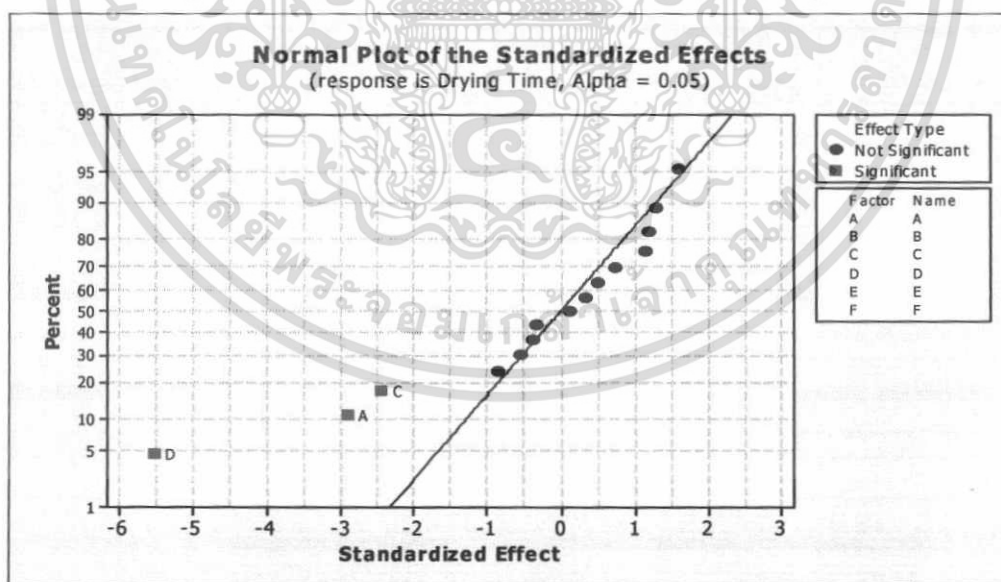
StdOrder	RunOrder	A	B	C	D	E	F	Drying Time
9	1	2	50	150*150	80	1	2	4
29	2	2	50	600*600	80	2	1	5.3
22	3	10	50	600*600	20	1	2	5.6
12	4	10	100	150*150	80	1	1	2.7
19	5	2	100	150*150	20	2	2	16
31	6	2	100	600*600	80	1	2	7
30	7	10	50	600*600	80	1	1	4
14	8	10	50	600*600	80	1	1	2
25	9	2	50	150*150	80	1	2	7
4	10	10	100	150*150	20	1	2	9
7	11	2	100	600*600	20	1	1	9.5
1	12	2	50	150*150	20	1	1	15
17	13	2	50	150*150	20	1	1	10.2
16	14	10	100	600*600	80	2	2	5.5
21	15	2	50	600*600	20	2	2	9.1
10	16	10	50	150*150	80	2	2	7
6	17	10	50	600*600	20	1	2	8.6
11	18	2	100	150*150	80	2	1	7.6
32	19	10	100	600*600	80	2	2	5.5
18	20	10	50	150*150	20	2	1	12
26	21	10	50	150*150	80	2	2	7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ผลการทดลองโดยใช้เทคนิค 2^{6-2} (fractional factorial design with resolution III

24	22	10	100	600*600	20	2	1	7
8	23	10	100	600*600	20	2	1	7
20	24	10	100	150*150	20	1	2	9
13	25	2	50	600*600	80	2	1	7
28	26	10	100	150*150	80	1	1	5.2
23	27	2	100	600*600	20	1	1	9.5
5	28	2	50	600*600	20	2	2	9.1
27	29	2	100	150*150	80	2	1	7.6
2	30	10	50	150*150	20	2	1	9
15	31	2	100	600*600	80	1	2	7
3	32	2	100	150*150	20	2	2	8

จากรูปที่ 4.1 การวิเคราะห์ Normal probability plot ด้วยวิธีนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพิจารณาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าตอบสนอง (Y) โดยการพิจารณาจุดที่มีระยะห่างจากเส้น ถ้ามีระยะห่างมากปัจจัยนั้นก็จะมีอิทธิพลมาก Normal probability plot พบว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลได้แก่ ขนาดตัวอักษรที่พิมพ์(A) ความละเอียดในการพิมพ์(C) และเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของตัวทำละลาย(D) มีผลต่อเวลาในการแห้งของน้ำหมึกที่พิมพ์บนผลิตภัณฑ์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังแสดงในรูปที่ 4.1 จากนั้นนำไปวิเคราะห์ต่อที่ ตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.1 Normal probability plot ของ 2^{6-2} (fractional factorial design with resolution III

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

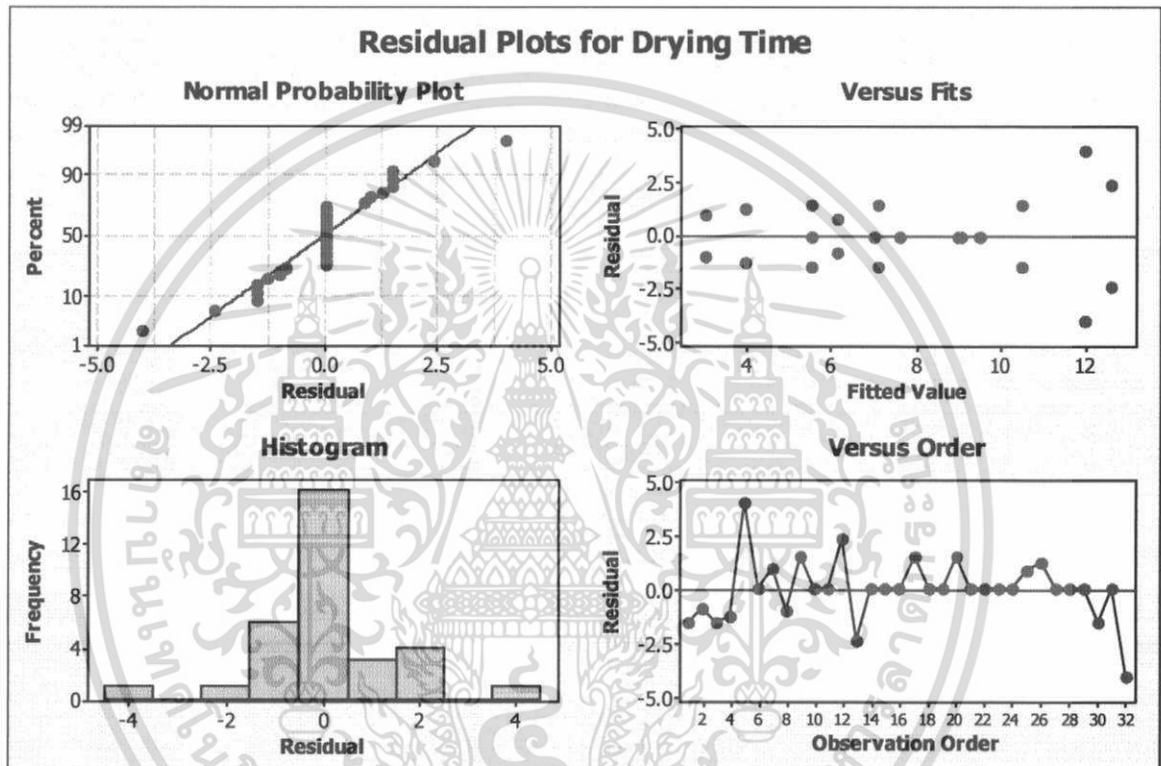
เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วย ตาราง ANOVA พบว่าผลที่ได้สอดคล้องกับ Normal probability plot นั่นคือ ขนาดตัวอักษรที่พิมพ์(A) ความละเอียดในการพิมพ์(C) และเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของตัวทำละลาย(D) มีผลต่อเวลาในการแห้งของน้ำหมึกบนผลิตภัณฑ์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่4.2 ผลการวิเคราะห์ ANOVA

Factorial Fit: Drying Time versus A, B, C, D, E, F						
Estimated Effects and Coefficients for Drying Time (coded units)						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P	
Constant		7.644	0.3499	21.85	0.000	
A	-2.075	-1.037	0.3499	-2.97	0.009	
B	0.050	-0.025	0.3499	0.07	0.944	
C	-1.700	-0.850	0.3499	-2.43	0.027	
D	-3.913	-1.956	0.3499	-5.59	0.000	
E	0.925	0.463	0.3499	1.32	0.205	
F	0.263	0.131	0.3499	0.38	0.712	
A*B	-0.638	-0.319	0.3499	-0.91	0.376	
A*C	-0.212	-0.106	0.3499	-0.30	0.765	
A*D	0.325	0.162	0.3499	0.46	0.649	
A*E	0.863	0.431	0.3499	1.23	0.236	
A*F	0.825	0.413	0.3499	1.18	0.256	
B*D	0.500	0.250	0.3499	0.71	0.485	
B*F	1.150	0.575	0.3499	1.64	0.120	
A*B*D	-0.288	-0.144	0.3499	-0.41	0.687	
A*B*F	-0.362	-0.181	0.3499	-0.52	0.612	
S = 1.97911 PRESS = 250.68						
R-Sq = 77.64% R-Sq(pred) = 10.55% R-Sq(adj) = 56.67%						
Analysis of Variance for Drying Time (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	6	187.442	187.442	31.2404	7.98	0.000
2-Way Interactions	7	28.434	28.434	4.0620	1.04	0.444
3-Way Interactions	2	1.712	1.712	0.8562	0.22	0.806
Residual Error	16	62.670	62.670	3.9169		
Pure Error	16	62.670	62.670	3.9169		
Total	31	280.259				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีตรวจสอบสมมติฐาน (i) ใช้กราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Plot) ถ้ากราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงสามารถสรุปได้ว่า ค่าความผิดพลาดมีการแจกแจงแบบปกติ กรณีตรวจสอบสมมติฐานที่ (ii), (iii) และ (iv) ใช้กราฟของค่าความผิดพลาด (Residuals Plot) โดยในการตรวจสอบข้อสมมติทั้งสามจะผ่าน เมื่อกราฟ e_i vs i or \hat{y}_i มีการกระจายของค่าความผิดพลาดรอบเส้นศูนย์กราฟ e_i vs \hat{y}_i ความกว้างของแถบ (Width of Band) คงที่และกราฟ e_i vs x (ตัวแปรปัจจัย) ไม่มีรูปแบบ (no pattern) แสดงถึงความเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 4.2 The residual plot of dry time for 2^{6-2} fractional factorial design with resolution III

จากรูปที่ 4.2 จากการพิจารณา Residual plot แสดงให้เห็นว่ากราฟ Residual plot ไม่พบสิ่งผิดปกติ โดยตรวจสอบดังนี้ การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normality Test) จากกราฟ Normal probability plot มีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ, การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent Test) จากกราฟ Residuals vs Order ลักษณะของข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน เนื่องจากการกระจายไม่มีรูปแบบ, การตรวจสอบความแปรปรวนคงที่ (Variance Stability Test) จากกราฟ Residuals vs Fitted value ความแปรปรวนไม่คงที่ แต่สามารถยอมรับได้ แสดงว่า 2^{6-2} (fractional factorial design with resolution III) นี้มีความเพียงพอต่อการนำมาวิเคราะห์ (model adequate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การทดลอง 2^{3-1} (fractional factorial design with resolution III added three center points)

จากการทดลองขั้นต้นด้วยเทคนิค 2^{6-2} fractional factorial design with resolution III สามารถคัดแยกปัจจัยที่มีความสำคัญออกมาได้ 3 ปัจจัย ได้แก่ ขนาดตัวอักษรที่พิมพ์(A) ความละเอียดในการพิมพ์(C) และเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของตัวทำละลาย(D) ซึ่งจากปัจจัยดังกล่าวนี้จะนำมาทำการวิเคราะห์ต่อ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการแห้งของน้ำหมึกได้เร็วที่สุด จึงได้ทำการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค 2^{3-1} (fractional factorial design with resolution III added three center points) ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่4.3 Revise factor level

Factor	Low level	Center point	High level	หน่วย
A : ขนาดตัวอักษรที่พิมพ์	2	6	10	mm
C : ความละเอียดในการพิมพ์	150*150	300*300	600*600	Dpi
D : เปอร์เซ็นความเข้มข้นของตัวทำละลาย	20	50	80	%

ในที่นี้ใช้ Generator เป็น $C = AB$ และ Alias Structure คือ $I + ABC, A + BC, B + AC, C + AB$

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลอง 2^{3-1} (fractional factorial design) with resolution III added 3 center points)

ออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิค 2^{3-1} (fractional factorial design with resolution III added 3 center points) โดยมีการสุ่มลำดับการทดลอง(Randomized) และทำการวัดผลด้วยการจับเวลาในการแห้งของน้ำหมึกหลังจากที่เครื่องพิมพ์ได้พิมพ์เสร็จ มาจากการกรองปัจจัย ผลการทดลองตามตารางที่ 3 ซึ่งได้ผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่4.4 ผลการทดลองโดยใช้เทคนิค 2^{3-1} (fractional factorial design with resolution III)

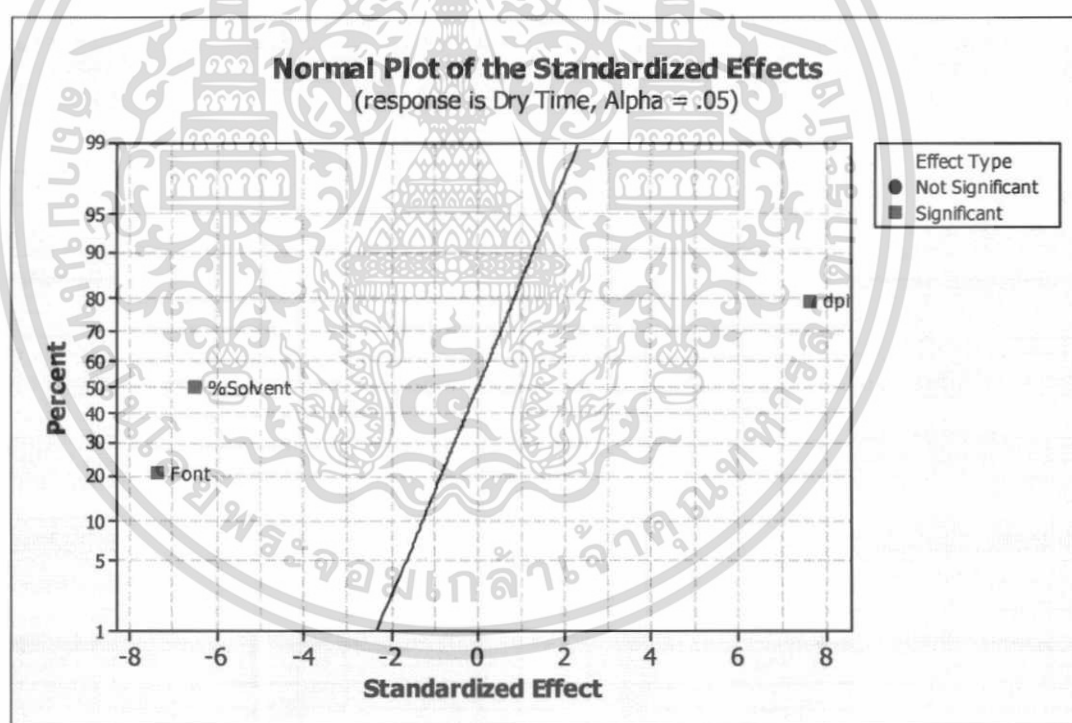
StdOrder	RunOrder	CenterPt	Font	DPI	%Solvent	Dry Time
9	1	0	6	150*150	50	5.5
8	2	0	6	600*600	50	9
10	3	0	6	600*600	50	7.5
6	4	0	6	600*600	50	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 (ต่อ) ผลการทดลองโดยใช้เทคนิค 2^{3-1} (fractional factorial design with resolution III)

1	5	1	2	150*150	80	5
2	6	1	10	150*150	20	4.5
7	7	0	6	150*150	50	6
3	8	1	2	600*600	20	12
4	9	1	10	600*600	80	4
5	10	0	6	150*150	50	5.5

จากกราฟ Normal probability plot แสดงให้เห็นว่า ขนาดตัวอักษรที่พิมพ์(A) ความละเอียดในการพิมพ์(C) และเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของตัวทำละลาย(D) มีผลต่อเวลาในการแห้งของน้ำหมึกบนผลิตภัณฑ์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังแสดงในรูปที่ 4.3 จากนั้นนำไปวิเคราะห์ต่อที่ ตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.3 Normal probability plot ของ 2^{3-1} (fractional factorial design with resolution III added three center points)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการพิจารณาตารางที่ 4.5 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่าค่าปัจจัยผลกระทบหลักมีผลต่อเวลาในการแห้งของน้ำหมึกบนผลิตภัณฑ์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งสอดคล้องกับกราฟ Normal probability plot ดังแสดงในรูปที่ 4.3

ตารางผลการวิเคราะห์ ANOVA ค่า P-value ของ Lack of Fit มีค่ามากกว่า 0.05 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า Model นี้มีความเพียงพอต่อการนำมาวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 4.5

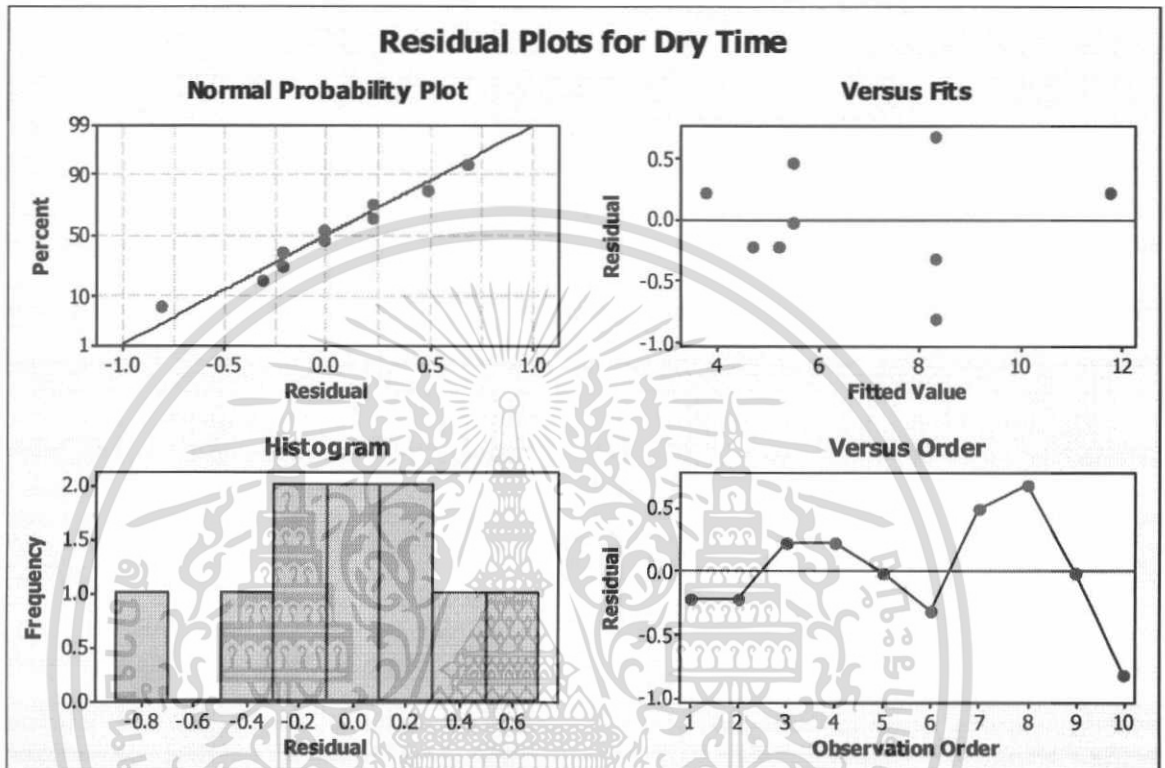
ตารางที่ 4.5 ตารางผลการวิเคราะห์ ANOVA

Factorial Fit: Dry Time versus Font, DPI, %Solvent						
Estimated Effects and Coefficients for Dry Time (coded units)						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P	
Constant		6.375	0.2890	22.06	0.000	
Font	-4.250	-2.125	0.2890	-7.35	0.001	
DPI	2.800	1.400	0.1828	7.66	0.001	
%Solvent	-3.750	-1.875	0.2890	-6.49	0.001	
Ct Pt		0.542	0.3731	1.45	0.206	
S = 0.578072 PRESS = 16.6420						
R-Sq = 96.91% R-Sq(pred) = 69.24% R-Sq(adj) = 94.44%						
Analysis of Variance for Dry Time (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	51.7250	51.7250	17.2417	51.60	0.000
Curvature	1	0.7042	0.7042	0.7042	2.11	0.206
Residual Error	5	1.6708	1.6708	0.3342		
Lack of Fit	1	0.3375	0.3375	0.3375	1.01	0.371 not significant
Pure Error	4	1.3333	1.3333	0.3333		
Total	9	54.1000				

จากการพิจารณา Residual plot ดังแสดงที่รูป 4.4 แสดงให้เห็นว่ากราฟ Residual plot ไม่พบสิ่งผิดปกติ โดยตรวจสอบดังนี้ การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normality Test) จากกราฟ Normal probability plot มีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ, การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent Test) จากกราฟ Residuals vs Order ลักษณะของข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน เนื่องจากการกระจายไม่มีรูปแบบ, การตรวจสอบความแปรปรวนคงที่ (Variance Stability Test)

กรณีตรวจสอบสมมติฐาน (i) ใช้กราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probabiliti Plot) ถ้ากราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงสามารถสรุปได้ว่า ค่าความผิดพลาดมีการแจกแจงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบปกติ กรณีตรวจสอบสมมุติฐานที่ (ii), (iii) และ (iv) ใช้กราฟของค่าความผิดพลาด (Residuals Plot) โดยในการตรวจสอบข้อสมมติทั้งสามจะผ่าน เมื่อกราฟ e_i vs i or \hat{y}_i มีการกระจายของค่าความผิดพลาดรอบเส้นศูนย์กราฟ e_i vs \hat{y}_i ความกว้างของแถบ (Width of Band) คงที่และกราฟ e_i vs x (ตัวแปรปัจจัย) ไม่มีรูปแบบ (no pattern) แสดงถึงความเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 4.4 The residual plot of dry time for 2^{3-1} (fractional factorial design with resolution III added three center points)

จากกราฟ Residuals vs Fitted value ความแปรปรวนไม่ค่อยคงที่ แต่สามารถยอมรับได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 แสดงว่า 2^{3-1} (fractional factorial design with resolution III added three center points) นี้มีความเพียงพอต่อการนำมาวิเคราะห์ (model adequate) ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ตารางการวิเคราะห์ ANOVA

4.1.3 Steepest descent method

สมการ Regression ซึ่งผลจาก Minitab จะได้สมการดังนี้

$$\hat{y} = 6.375 - 2.125x_1 - 1.875x_3 \quad (4.1)$$

$$\text{Slope} = \frac{-1.875}{-2.125} = 0.88 \quad (4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพิจารณาด้วยวิธี Steepest descent ใช้สมการในรูปของ coded โดยปัจจัยที่ใช้ในการพิจารณา คือ ขนาดตัวอักษรที่พิมพ์(A) และเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของตัวทำละลาย(D) ซึ่งแสดงสมการได้ ดังนี้

$$x_1 = \frac{\xi_1 - 6}{2} \text{ และ } x_3 = \frac{\xi_3 - 50}{30} \quad (4.3)$$

โดยกำหนดให้ ξ_1 : the natural variable font และ ξ_3 : the natural variable %Solvent และ เนื่องจากการทดลองจริงมีปัจจัยเปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นของตัวทำละลายจะควบคุมได้ยาก เพราะค่าเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของตัวทำละลายจะมีค่าที่เป็นตัวเลขลงตัว เช่น 10%, 20%, 30%,...90% เป็นต้น ดังนั้นทางผู้จัดทำจึงกำหนด code variables X_1 มีให้ระดับ Step side $\Delta = 0.374$ และจะได้ค่า Δ ของ $X_3 = 0.374 * 0.88 = 0.33$ ซึ่งจะง่ายต่อการทดลองเนื่องจากค่า Step side ดังกล่าวจะทำให้ค่า natural variable เป็นเลขลงตัว และจะได้การออกแบบการทดลองด้วยวิธี Steepest descent ดังแสดงในตารางที่ 4.6

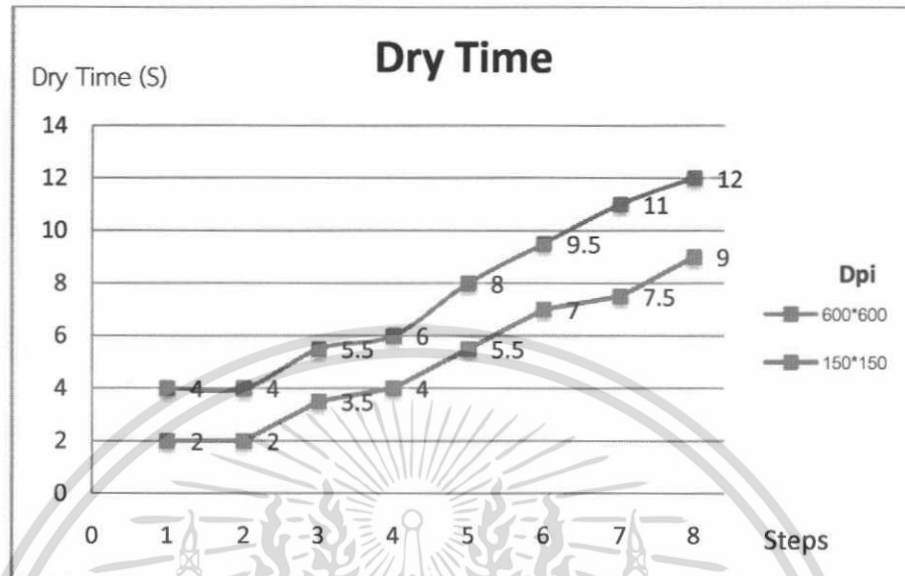
ตารางที่ 4.6 ตารางผลการทดลองด้วยวิธี Steepest descent

Steps	Coded Variables		Natural Variables		Dry Time of Dpi	
	x_1	x_3	ξ_1	ξ_3	150*150	600*600
Origin	0	0	6	50	-	-
Δ	0.374	0.33	1.5	10	-	-
Origin + 4 Δ	1.496	1.32	12	90	2	4
Origin + 3 Δ	1.122	0.99	10.5	80	2	4
Origin + 2 Δ	0.748	0.66	9	70	3.5	5.5
Origin + Δ	0.374	0.33	7.5	60	4	6
Origin	0	0	6	50	5.5	8
Origin - Δ	-0.374	-0.33	4.5	40	7	9.5
Origin - 2 Δ	-0.748	-0.66	3	30	7.5	11
Origin - 3 Δ	-1.122	-0.99	1.5	20	9	12

จากตารางที่ 4.6 เป็นตารางแสดงผลการทดลองที่ได้จากวิธี Steepest descent ซึ่งได้ออกแบบการทดลองให้เป็นเช่นนี้ เนื่องมาจากได้ทำการลดค่าปัจจัยที่มีผลต่อการแห้งของน้ำหมึกลงเรื่อยๆ ปรากฏว่าเวลาที่แห้งของน้ำหมึกกลับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งตามเป้าหมายต้องการที่จะให้ค่าลดลง ดังนั้น จึงได้ทำการเพิ่มค่าปัจจัยที่มีผลต่อการแห้งของน้ำหมึกขึ้นจากจุด Origin ซึ่งก็ได้ผลตามที่ต้องการ คือเวลาในการแห้งของน้ำหมึกลดลง

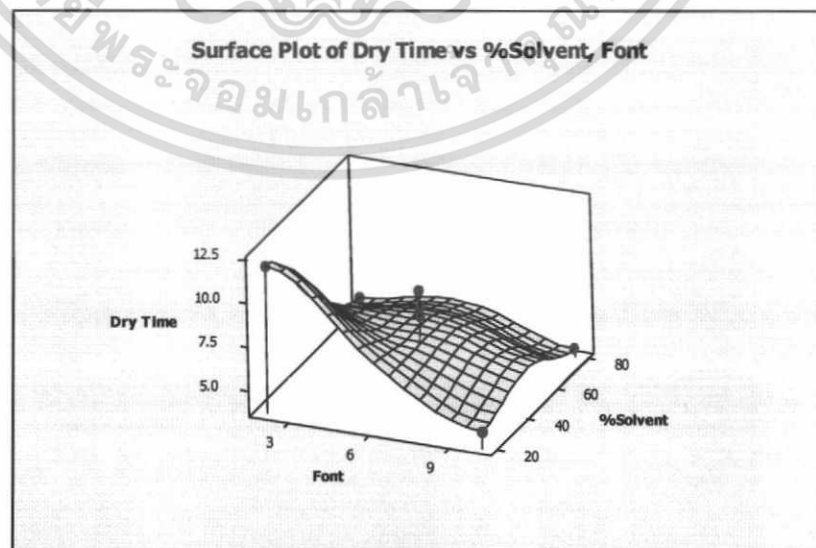
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าการพิมพ์น้ำหมึกลงบนผลิตภัณฑ์ที่มีความละเอียด 150*150 dpi จะทำให้ใช้เวลาในการแห้งของน้ำหมึกน้อยกว่าความละเอียดในการพิมพ์ที่ 600*600 dpi ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่4.5 เวลาในการแห้งของน้ำหมึกที่ระดับความละเอียด 150*150 dpi และ 600*600 dpi

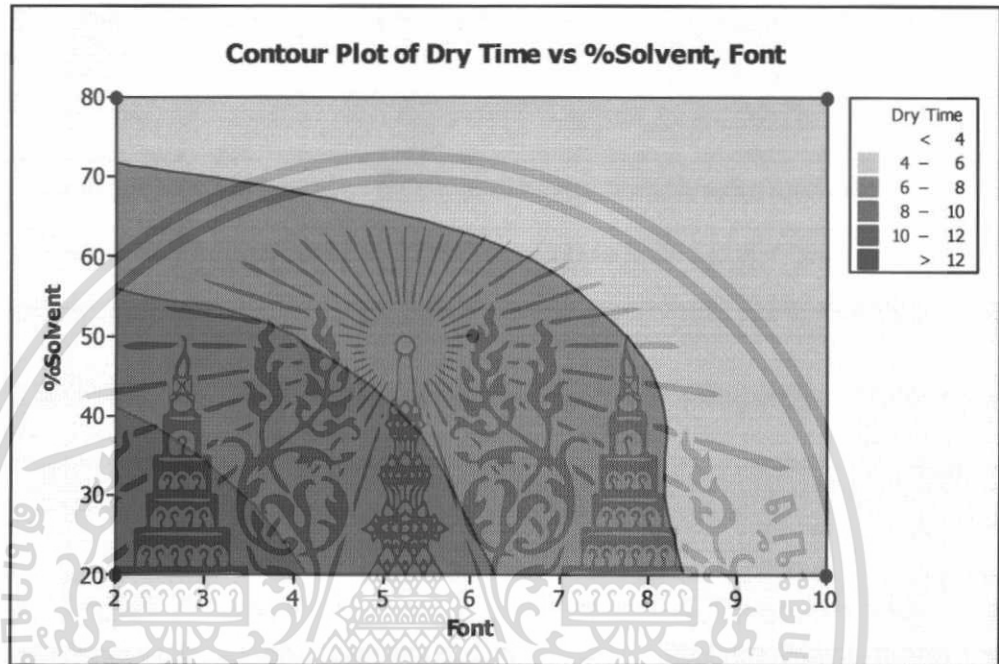
ซึ่งจากการทดลองในครั้งนี้จะเห็นได้ว่าเวลาในการแห้งของน้ำหมึกจะเริ่มคงที่ที่ขนาดตัวอักษร 10.5 มิลลิเมตร และเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของตัวทำละลายที่ 80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเวลาที่ใช้ในการแห้งของน้ำหมึกจะใช้เวลาน้อยที่สุดที่ 2 วินาที ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการแห้งของน้ำหมึก คือการพิมพ์ที่ใช้ความละเอียดในการพิมพ์ 150*150 dpi ขนาดตัวอักษรที่ใช้ในการพิมพ์คือ 10.5 มิลลิเมตร และเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของตัวทำละลายที่ 80 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่4.6 Surface Plot

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 Surface plot ส่วนโค้งจะค่อยไล่ระดับลดลงเรื่อยๆ จนไปถึง ณ จุดๆหนึ่งให้ค่าน้อยที่สุด และเมื่อมาพิจารณา Contour plot จะได้ว่าเวลาในการแห้งของน้ำหมึกที่น้อยที่สุด จะอยู่ตั้งแต่ตัวอักษรขนาด 10 มิลลิเมตร และเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของตัวทำละลายที่ 80 เปอร์เซ็นต์ลงไป ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 Contour Plot

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดลองด้วยเลเซอร์

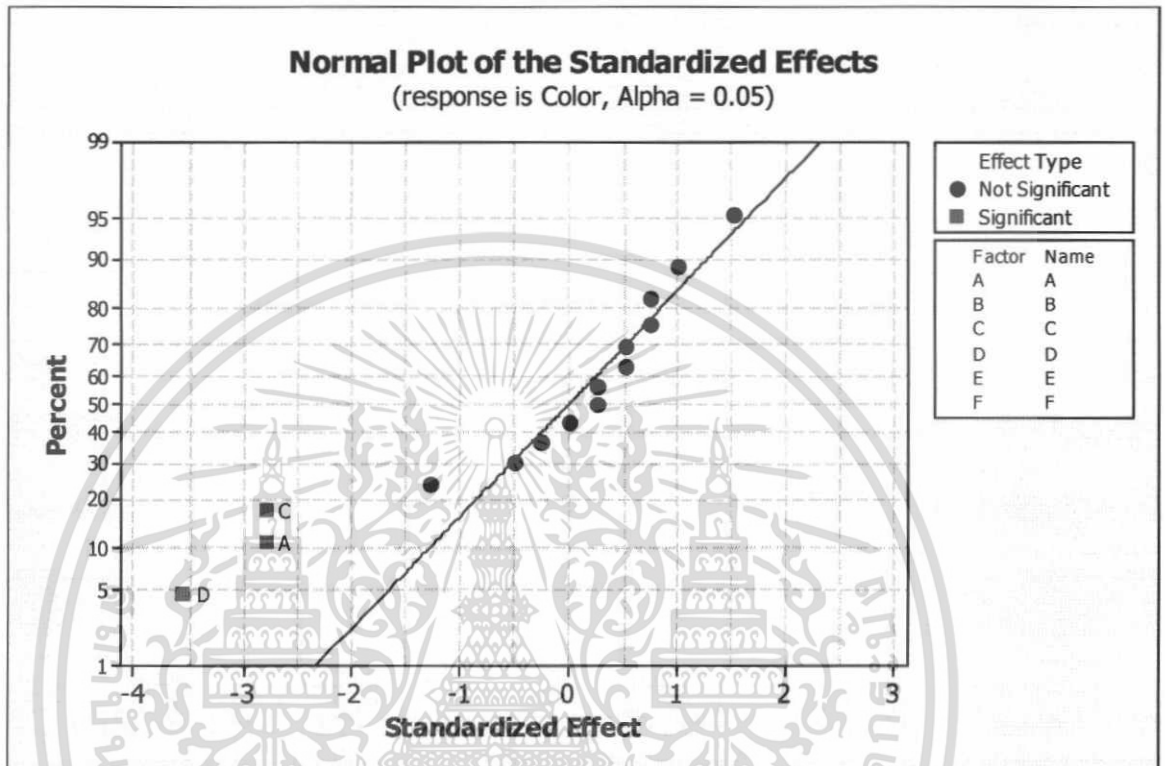
ออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิค 2^{6-2} (fractional factorial design with resolution III) โดยมีการสุ่มลำดับการทดลอง (Randomized) และทำการวัดผลด้วยการวัดสีจากรูป การเปรียบเทียบสีเลเซอร์จะทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง จากนั้นทางลูกค้าได้ทำการประชุมและเลือกสีตามที่ต้องการอีกครั้ง ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลอง 2^{6-2} (fractional factorial design with resolution III)

StdOrde	RunOrde	A	B	C	D	E	F	Color
r	r							
2	1	10	50	10	10	2	1	7
23	2	2	100	20	10	1	1	5
21	3	2	50	20	10	2	2	2
14	4	10	50	20	20	1	1	1
26	5	10	50	10	20	2	2	3
27	6	2	100	10	20	2	1	6
22	7	10	50	20	10	1	2	4
19	8	2	100	10	10	2	2	7
32	9	10	100	20	20	2	2	3
15	10	2	100	20	20	1	2	5
1	11	2	50	10	10	1	1	6
29	12	2	50	20	20	2	1	2
6	13	10	50	20	10	1	2	3
30	14	10	50	20	20	1	1	1
16	15	10	100	20	20	2	2	2
11	16	2	100	10	20	2	1	4
31	17	2	100	20	20	1	2	3
10	18	10	50	10	20	2	2	4
8	19	10	100	20	10	2	1	3
18	20	10	50	10	10	2	1	2
28	21	10	100	10	20	1	1	4
4	22	10	100	10	10	1	2	5
12	23	10	100	10	20	1	1	1
25	24	2	50	10	20	1	2	3
20	25	10	100	10	10	1	2	5
24	26	10	100	20	10	2	1	3
5	27	2	50	20	10	2	2	6
9	28	2	50	10	20	1	2	3
3	29	2	100	10	10	2	2	7
13	30	2	50	20	20	2	1	3
17	31	2	50	10	10	1	1	6
7	32	2	100	20	10	1	1	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Normal probability plot พบว่าปัจจัยหลัก ได้แก่ ขนาดของตัวอักษร(A) ค่าความถี่ที่ใช้ในการพิมพ์(C) ค่าพลังงานที่ใช้ในการพิมพ์(D) มีผลต่อสีที่เกิดขึ้นบนพลาสติก ที่นัยสำคัญ 0.05 ดังแสดงในรูปที่ 4.8 จากนั้นนำไปวิเคราะห์ต่อที่ตาราง 4.8



รูปที่4.8 Normal probability plot ของ 2^{6-2} (fractional factorial design with resolution III)

เมื่อทำการวิเคราะห์ต่อด้วยตาราง ANOVA พบว่าผลที่ได้สอดคล้องกับ Normal probability plot นั้น คือ ขนาดตัวอักษรที่พิมพ์(A) ค่าความถี่ที่ใช้ในการพิมพ์(C) ค่าพลังงานที่ใช้ในการพิมพ์(D) มีผลต่อสีที่เกิดขึ้นบนพลาสติก ที่นัยสำคัญ 0.05 ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ ANOVA

Factorial Fit: Color versus A, B, C, D, E, F					
Estimated Effects and Coefficients for Color (coded units)					
Term	Effect	Coef	SE	T	P
Constant		3.8750	0.2461	15.75	0.000
A	-1.3750	-0.6875	0.2461	-2.79	0.013
B	0.7500	0.3750	0.2461	1.52	0.147
C	-1.3750	-0.6875	0.2461	-2.79	0.013

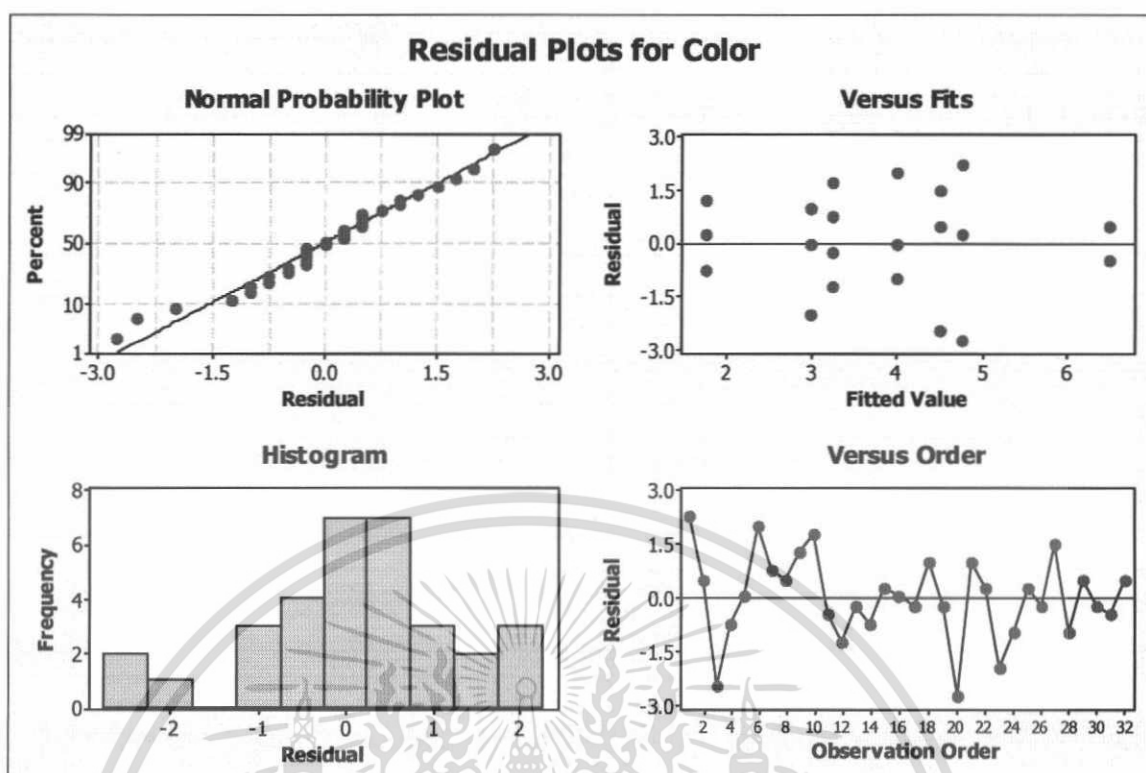
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่4.8 ผลการวิเคราะห์ ANOVA(ต่อ)

D	-1.7500	-0.8750	0.2461	-3.56	0.003	
E	0.2500	0.1250	0.2461	0.51	0.618	
F	0.3750	0.1875	0.2461	0.76	0.457	
A*B	-0.6250	-0.3125	0.2461	-1.27	0.222	
A*C	0.0000	0.0000	0.2461	0.00	1.000	
A*D	0.1250	0.0625	0.2461	0.25	0.803	
A*E	0.1250	0.0625	0.2461	0.25	0.803	
A*F	0.5000	0.2500	0.2461	1.02	0.325	
B*D	0.2500	0.1250	0.2461	0.51	0.618	
B*F	0.3750	0.1875	0.2461	0.76	0.457	
A*B*D	-0.1250	-0.0625	0.2461	-0.25	0.803	
A*B*F	-0.2500	-0.1250	0.2461	-0.51	0.618	
S = 1.39194 PRESS = 124						
R-Sq = 68.84% R-Sq(pred) = 0.00% R-Sq(adj) = 39.64%						
Analysis of Variance for Color (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	6	60.8750	60.8750	10.1458	5.24	0.004
2-Way Interactions	7	7.0000	7.0000	1.0000	0.52	0.810
3-Way Interactions	2	0.6250	0.6250	0.3125	0.16	0.852
Residual Error	16	31.0000	31.0000	1.9375		
Pure Error	16	31.0000	31.0000	1.9375		
Total	31	99.5000				

กรณีตรวจสอบสมมติฐาน (i) ใช้กราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probabiliti Plot) ถ้ากราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงสามารถสรุปได้ว่า ค่าความผิดพลาดมีการแจกแจงแบบปกติ กรณีตรวจสอบสมมติฐานที่ (ii), (iii) และ (iv) ใช้กราฟของค่าความผิดพลาด (Residuals Plot) โดยในการตรวจสอบข้อสมมติทั้งสามจะผ่าน เมื่อกราฟ e_i vs i or \hat{y}_i มีการกระจายของค่าความผิดพลาดรอบเส้นศูนย์กราฟ e_i vs \hat{y}_i ความกว้างของแถบ (Width of Band) คงที่และกราฟ e_i vs x (ตัวแปรปัจจัย) ไม่มีรูปแบบ (no pattern) แสดงถึงความเป็นอิสระต่อกัน

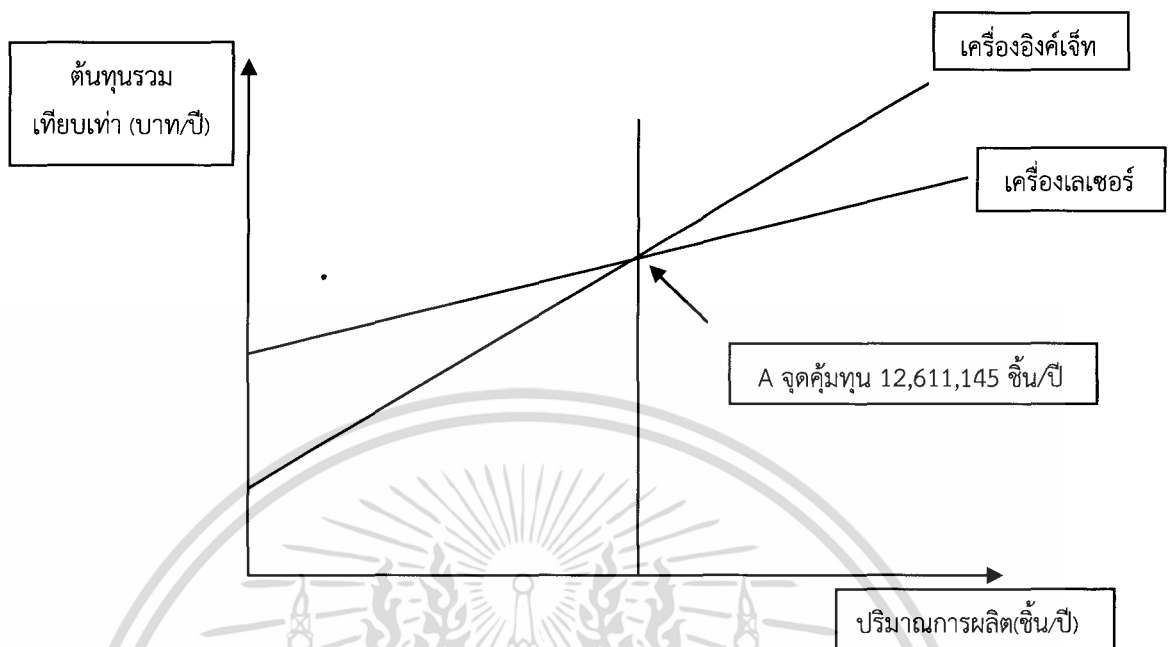
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 The residual plot of dry time for 2^{6-2} fractional factorial design with resolution III

จากการพิจารณา Residual plot แสดงให้เห็นว่ากราฟ Residual plot ไม่พบสิ่งผิดปกติ โดยตรวจสอบดังนี้ การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normality Test) จากกราฟ Normal probability plot มีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ, การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent Test) จากกราฟ Residuals vs Order ลักษณะของข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน เนื่องจากการกระจายไม่มีรูปแบบ, การตรวจสอบความแปรปรวนคงที่ (Variance Stability Test) จากกราฟ Residuals vs Fitted value ความแปรปรวนไม่คงที่ แต่สามารถยอมรับได้ แสดงว่า 2^{6-2} (fractional factorial design with resolution III) นี้มีความเพียงพอต่อการนำมาวิเคราะห์ (model adequate) ดังแสดงในรูปที่ 4.9

4.3 การคำนวณหาจุดคุ้มทุนในการผลิตระหว่างเครื่องอิงเจ็ทและเครื่องเลเซอร์



รูปที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบต้นทุนระหว่างเครื่องอิงค์เจ็ทกับเครื่องเลเซอร์

จากรูปที่ 4.10 จุด A เป็นจุดคุ้มทุนที่ต้องการผลิตเทียบระหว่างเครื่องอิงค์เจ็ทและเครื่องเลเซอร์ ช่วงการผลิตจำนวนต่ำกว่าที่ 12,611,145 ชิ้น/ปี เครื่องเลเซอร์ต้นทุนสูงกว่า เครื่องอิงค์เจ็ทเพราะต้นทุนที่สูงกว่า แต่พอเลยช่วงการผลิต 12,611,145 ชิ้น/ปี เครื่องเลเซอร์จะประหยัดกว่า เพราะต้นทุนแปรผันต่ำกว่าซึ่งเกิดจากเส้นของ ปริมาณการผลิตตัดกับเส้นของต้นทุนรวม (ผลการคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก ข) แต่ความต้องการในการผลิตในปัจจุบันอยู่ที่ 9,600,000 ชิ้น/ปี

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลของการพิมพ์โดยใช้เครื่องอิงค์เจ็ท

1. ในการทำงานจริงพบว่าปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อเวลาในการแห้งของน้ำหมึกนั้นมีมากมาย ซึ่งได้ลองเลือกปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อเวลาในการแห้งของน้ำหมึกบนผลิตภัณฑ์มีศึกษาด้วยกันทั้งหมด 6 ปัจจัย ได้แก่ ขนาดตัวอักษรที่พิมพ์, ความเร็วที่ใช้ในการพิมพ์, ความละเอียดในการพิมพ์, เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของตัวทำละลาย และจำนวนบรรทัดที่พิมพ์ผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งในเบื้องต้นได้ใช้การออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค 2^{6-2} fractional factorial design with resolution III ซึ่งทำให้สามารถรองรับปัจจัยที่มีผลต่อเวลาในการแห้งของน้ำหมึกออกได้ 3 ปัจจัย คือขนาดตัวอักษรที่พิมพ์, ความละเอียดในการพิมพ์ และ เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของตัวทำละลาย

2. เมื่อกรองปัจจัยที่สำคัญออกมาได้แล้วได้ทำการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค 2^{3-1} fractional factorial design with resolution III added 3 center points ซึ่งใช้เทคนิคนี้เพื่อต้องการหาสมการ Regression เพื่อที่จะใช้ในออกแบบขั้นต่อไป ซึ่งจากการทดลองก็จะได้ปัจจัยที่มีผลต่อเวลาในการแห้งของน้ำหมึกเหมือนเช่นเดิม คือ ขนาดตัวอักษรที่พิมพ์, ความละเอียดในการพิมพ์ และ เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของตัวทำละลาย

3. จากนั้นได้นำสมการ Regression ที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค 2^{3-1} fractional factorial design with resolution III added 3 center points มาทำการหาความชัน

4. การออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคทั้งหมดที่ได้กล่าวมาในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเร็วในการแห้งของน้ำหมึกบนผลิตภัณฑ์นั้นถือว่าสามารถตอบโจทย์ที่ทางผู้จัดทำต้องการได้อย่างครบถ้วนแล้ว เนื่องจากทำให้ผู้จัดทำทราบสถานะที่เหมาะสมต่อการแห้งของน้ำหมึกบนผลิตภัณฑ์ และยังช่วยให้ทราบแล้วแนวโน้มของการใช้น้ำหมึกชนิด Black fast drying ตัวทำละลายชนิด Ketone-based(MEK) ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ในขนาดตัวอักษรที่ต่างๆกันออกไป บนเครื่องพิมพ์ยี่ห้อ Linx รุ่น 7300 ว่าเป็นเช่นไร ซึ่งทางผู้จัดทำจะนำผลที่ได้จากการศึกษานี้ไปทำการนำเสนอให้กับบริษัทของลูกค้าอีกทีหนึ่ง เพื่อเป็นการพัฒนา และปรับปรุงคุณภาพให้การพิมพ์น้ำหมึกลงบนผลิตภัณฑ์ของลูกค้าให้ดียิ่งขึ้นกว่าเดิม

การพิมพ์น้ำหมึกลงบนผลิตภัณฑ์ที่ความละเอียด 150*150 dpi จะทำให้ใช้เวลาในการแห้งของน้ำหมึกน้อยกว่าความละเอียดในการพิมพ์ที่ 600*600 dpi ซึ่งจากการทดลองในครั้งนี้จะเห็นว่าเวลาในการแห้งของน้ำหมึกจะเริ่มคงที่ที่ขนาดตัวอักษร 10.5 มิลลิเมตร และเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของตัวทำละลายที่ 80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเวลาที่ใช้ในการแห้งของน้ำหมึกจะใช้นาน้อยที่สุดที่ 2 วินาที

5. จากที่ได้ทำการออกแบบการทดลอง และได้ทดลองจริงใน การศึกษาเรื่องปัจจัยที่มีผลต่อความเร็วในการแห้งของน้ำหมักบนผลิตภัณฑ์ไปนั้น เราสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาตลอดจนช่วยให้บริษัทลูกค้าสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ได้ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากใช้ปัจจัยได้อย่างเหมาะสมกับการผลิตผลิตภัณฑ์ แต่อย่างไรก็ตามในการศึกษาครั้งนี้ก็ยังไม่ครอบคลุมทั้งหมดเนื่องมาจากทางผู้จัดทำได้เลือกกรณีศึกษานี้มาจากบริษัทที่ทางผู้จัดทำติดต่อเพียงบริษัทเดียว ดังนั้นยังมีแนวทางในการพัฒนาต่อได้เนื่องจากตอนนี้สามารถผลิตได้ 21,600 ชิ้น/วัน ทำงาน 12 ชม/วัน ซึ่งทำให้ทางบริษัทต้องเสียค่าใช้จ่ายโอทีให้กับทางพนักงานทุกวัน ซึ่งใน 1 เดือนมีออเดอร์(Orders) ที่ต้องผลิตอยู่ที่ 800,000 ชิ้น/เดือน แต่ ณ ตอนนี้ผลิตได้แค่ 518,400 ชิ้น/เดือน ดังนั้นเครื่องพิมพ์อิงค์เจตแต่ไม่สามารถที่จะทำให้ทางลูกค้าได้จำนวนการผลิตที่เพิ่มขึ้นตามเป้าหมายผู้วิจัยจึงเปลี่ยนมาใช้เทคโนโลยีตัวใหม่ในการทำวิจัยครั้งนี้โดยใช้เป็นเครื่องเลเซอร์

5.2 สรุปผลการพิมพ์โดยใช้เลเซอร์

1. การออกแบบการทดลองโดยใช้เลเซอร์ในการพิมพ์เพื่อช่วยให้เพิ่มจำนวนการผลิตนั้นสามารถเพิ่มจำนวนการผลิตให้กับทางลูกค้าได้ตามความต้องการ สามารถตัดปัญหาในการแห้งของหมักได้

สิ่งที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของชิ้นงาน ทางลูกค้าได้ทำการประชุมและสรุปผลโดยได้เลือก การทดลองที่ 12 เพราะ

- 1.1 สีที่ได้มีความเข้มไม่เยอะเกินไปเมื่อมองทะลุแสง
- 1.2 สามารถมองเห็นได้ในระยะที่ทางลูกค้าต้องการ

2. จากการที่ได้ทำการออกแบบการทดลอง และได้ทดลองจริง สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหา ตลอดจนช่วยให้บริษัทลูกค้าสามารถผลิต ผลิตภัณฑ์ได้ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากสามารถตัดปัญหาเรื่องของการแห้งของน้ำหมักออกไปได้ แต่อย่างไรก็ตามการใช้เครื่องเลเซอร์มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงจึงต้องมาคำนวณหาจุดคุ้มทุนในการตัดสินใจว่าจะใช้เป็นเครื่องแบบไหนอีกที

5.3 สรุปการเปรียบเทียบต้นทุนระหว่างเครื่องอิงค์เจ็ทและเครื่องเลเซอร์

การผลิตจำนวนต่ำกว่า 12,611,143 ชิ้น/ปี ถ้าใช้เครื่องเลเซอร์ในการพิมพ์จะทำให้ต้นทุนสูงกว่า การใช้เครื่องอิงค์เจ็ทในการพิมพ์เพราะต้นทุนที่สูงกว่า แต่พอเลยช่วงการผลิตเลย 12,611,143 ชิ้น/ปี เครื่องเลเซอร์จะประหยัดกว่าเพราะต้นทุนแปรผันต่ำกว่า แต่ ณ ตอนนี้การผลิตอยู่ที่ 9,600,000 ชิ้น/ปี ควรเลือกใช้เครื่องพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท

ต้นทุนต่อชิ้นโดยใช้เครื่องอิงค์เจ็ทอยู่ที่ 0.049 บาท

ต้นทุนต่อชิ้นโดยใช้เครื่องเลเซอร์อยู่ที่ 0.174 บาท

5.4 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาขั้นต่อไป เสนอแนะดังต่อไปนี้

1. ทดลองโดยนำปัจจัยความชื้นสัมพัทธ์มาเป็นปัจจัยเพิ่มในการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1]ดร.ยุวดี เทียงทางธรรม. การทำให้เกิดรอยด้วยเลเซอร์. [ออนไลน์]. เข้าได้ถึงจาก : <http://www.merck-chemicals.com/thailand>.
- [2]ไพศาล นาคพิพัฒน์. พลาสติกในชีวิตประจำวัน. [ออนไลน์]. เข้าได้ถึงจาก : [http://guru.sanook.com/search/knowledge_search.php?qID=&wi=&hnl=&ob=&asc=&q=พอลิโพรไพลีน \(Polypropylene : PP\)&select=1](http://guru.sanook.com/search/knowledge_search.php?qID=&wi=&hnl=&ob=&asc=&q=พอลิโพรไพลีน (Polypropylene : PP)&select=1)
- [3]นพพร รัตนช่วง. ม.ป.ป.คู่มือปฏิบัติการฟิลิกส์ยุคใหม่ (01420222). คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน. นครปฐม
- [4]สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว. ชนิดของเลเซอร์. [ออนไลน์]. เข้าได้ถึงจาก : http://guru.sanook.com/enc_preview.php?id=1855&title=%AA%B9%D4%B4%A2%CD%A7%E0%C5%E0%AB%CD%C3%EC
- [5]วลัยพร มุขสุวรรณ. 2551. ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย. [ออนไลน์]. เข้าได้ถึงจาก : <http://www.stks.or.th/blog>
- [6]Polypropylene. **Wikipedia, the Free Encyclopedia.** [Online]. [cited 2011 Oct 10] : Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/Polypropylene>
- [7]University of Alberta. **Plastic additives leach into medical experiments.** [Online]. 2008 Nov 10 [cited 2011 Oct 10]; Available from <http://www.physorg.com/news145545554.html>
- [8]Marfa A. Diaz-Garcia, Fumitomo Hide, Benjamin J. Schwartz,t (1997) “Plasticlasers : Semiconducting polymers as a new class of solid-state laser materials.” **Synthetic Metals.** 84 ,455-466
- [9]Jeff D. Babich, “The Enhancement of Laser Marking Plastic Polymers with Pearlescent Pigments.” **Darmstadt, Germany**
- [10]C.T. Kwok a, K.I. Leong a, F.T. Cheng b,* , H.C. Manc (2003) “Microstructural and corrosion characteristics of laser surface-melted plastics mold steels.” **Materials Science and Engineering.** A357,94-103
- [11]Seiji Katayama and Yousuke Kawahito* (2008) “Laser direct joining of metal and plastic.” **Scripta Materialia.** 59, 1247-1250
- [12]Koji Inada *, Rina Matsuda, Chizuru Fujiwara,Mitsutoshi Nomura, Tatsumi Tamon, Ikkan Nishihara,Takeshi Takao, Toshihiro Fujita (2001) “Identification of plastics

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

by infrared absorption using InGaAsP laser diode.” **Resources, Conservation and Recycling**. 33,131-146

[13]Abul Fazal M. Arif* (2003) “Numerical prediction of plastic deformation and residual stresses induced by laser shock processing.” **Journal of Materials Processing Technology**. 136,120-138

[14]B.S. Yilbas, N. Al-Aqeeli (2004) “Thermal stresses due to time exponentially decaying laser pulse: elasto-plastic wave propagations.” **International Journal of Mechanical Sciences**. 46, 57-80

[15]Yanbei Chen, Jian Lu, Xiaowu Ni, Juan Bib, Xihe Zhang (2008) “Plastic penetration during laser heating of a metal plate.” **journal of materials processing technology**. 205,9-15

[16]Hiromasa Yagyu (2010) “Journal of Materials Processing Technology.” **Journal of Materials Processing Technology**. 210,1153-1158

Montgomery, D. C. (2005). “Design and Analysis of Experiments.” **6th edition**. Wiley, New York.





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลการทดลอง

1. ผลการทดลองและวิเคราะห์เครื่องอิงค์เจ็ท

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลอง 2^{6-2} (fractional factorial design with resolution III)

StdOrde r	RunOrde r	A	B	C	D	E	F	Drying Ti
9	1	2	50	150*150	80	1	2	4
29	2	2	50	600*600	80	2	1	5.3
22	3	10	50	600*600	20	1	2	5.6
12	4	10	100	150*150	80	1	1	2.7
19	5	2	100	150*150	20	2	2	16
31	6	2	100	600*600	80	1	2	7
30	7	10	50	600*600	80	1	1	4
14	8	10	50	600*600	80	1	1	2
25	9	2	50	150*150	80	1	2	7
4	10	10	100	150*150	20	1	2	9
7	11	2	100	600*600	20	1	1	9.5
1	12	2	50	150*150	20	1	1	15
17	13	2	50	150*150	20	1	1	10.2
16	14	10	100	600*600	80	2	2	5.5
21	15	2	50	600*600	20	2	2	9.1
10	16	10	50	150*150	80	2	2	7
6	17	10	50	600*600	20	1	2	8.6
11	18	2	100	150*150	80	2	1	7.6
32	19	10	100	600*600	80	2	2	5.5
18	20	10	50	150*150	20	2	1	12
26	21	10	50	150*150	80	2	2	7
24	22	10	100	600*600	20	2	1	7
8	23	10	100	600*600	20	2	1	7
20	24	10	100	150*150	20	1	2	9
13	25	2	50	600*600	80	2	1	7
28	26	10	100	150*150	80	1	1	5.2
23	27	2	100	600*600	20	1	1	9.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ผลการทดลอง 2^{6-2} (fractional factorial design with resolution III)

5	28	2	50	600*600	20	2	2	9.1
27	29	2	100	150*150	80	2	1	7.6
2	30	10	50	150*150	20	2	1	9
15	31	2	100	600*600	80	1	2	7
3	32	2	100	150*150	20	2	2	8
3	1	2	100	150*150	20	2	1	14.0
6	2	10	50	600*600	20	1	1	6.6
16	3	10	100	600*600	80	2	1	5.0
15	4	2	100	600*600	80	1	1	7.0
9	5	2	50	150*150	80	1	1	7.0
10	6	10	50	150*150	80	2	1	8.5
12	7	10	100	150*150	80	1	2	3.0
11	8	2	100	150*150	80	2	2	7.6
5	9	2	50	600*600	20	1	1	9.1
8	10	10	100	600*600	20	2	2	7.0
2	11	10	50	150*150	20	2	2	12.0
4	12	10	100	150*150	20	2	1	9.0
1	13	2	50	150*150	20	1	2	12.7
14	14	10	50	600*600	80	1	2	2.0
13	15	2	50	600*600	80	2	2	6.3
7	16	2	100	600*600	20	1	2	9.5

ตารางที่ ก.2 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของ 2^{6-2} (fractional factorial design with resolution III)

Factorial Fit: Drying Time versus A, B, C, D, E, F					
Estimated Effects and Coefficients for Drying Time (coded units)					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		7.644	0.3499	21.85	0.000
A	-2.075	-1.037	0.3499	-2.97	0.009
B	0.050	0.025	0.3499	0.07	0.944
C	-1.700	-0.850	0.3499	-2.43	0.027
D	-3.913	-1.956	0.3499	-5.59	0.000
E	0.925	0.463	0.3499	1.32	0.205

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทาง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของ 2^{6-2} (fractional factorial design with resolution III)

F	0.263	0.131	0.3499	0.38	0.712	
A*B	-0.638	-0.319	0.3499	-0.91	0.376	
A*C	-0.212	-0.106	0.3499	-0.30	0.765	
A*D	0.325	0.162	0.3499	0.46	0.649	
A*E	0.863	0.431	0.3499	1.23	0.236	
A*F	0.825	0.413	0.3499	1.18	0.256	
B*D	0.500	0.250	0.3499	0.71	0.485	
B*F	1.150	0.575	0.3499	1.64	0.120	
A*B*D	-0.288	-0.144	0.3499	-0.41	0.687	
A*B*F	-0.362	-0.181	0.3499	-0.52	0.612	
S = 1.97911 PRESS = 250.68						
R-Sq = 77.64% R-Sq(pred) = 10.55% R-Sq(adj) = 56.67%						
Analysis of Variance for Drying Time (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	6	187.442	187.442	31.2404	7.98	0.000
2-Way Interactions	7	28.434	28.434	4.0620	1.04	0.444
3-Way Interactions	2	1.712	1.712	0.8562	0.22	0.806
Residual Error	6	62.670	62.670	62.670	3.9169	
Pure Error	16	62.670	62.670	62.670	3.9169	
Total	31	280.259				

ตารางที่ ก.3 Revised factor level ของ 2^{3-1} (fractional factorial design with resolution III added 3 center points)

Factor	Low level	Center point	High level	หน่วย
A : ขนาดตัวอักษรที่พิมพ์	2	6	10	mm
C : ความละเอียดในการพิมพ์	150*150	300*300	600*600	Dpi
D : เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของตัวทำละลาย	20	50	80	%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 ผลการทดลอง 2^{3-1} (fractional factorial design with resolution III added 3 center points)

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Font	DPI	%Solvent	Dry Time
9	1	0	6	150*150	50	5.5
8	2	0	6	600*600	50	9
10	3	0	6	600*600	50	7.5
6	4	0	6	600*600	50	8
1	5	1	2	150*150	80	5
2	6	1	10	150*150	20	4.5
7	7	0	6	150*150	50	6
3	8	1	2	600*600	20	12
4	9	1	10	600*600	80	4
5	10	0	6	150*150	50	5.5

ตารางที่ ก.5 ผลการวิเคราะห์ ANOVA 2^{3-1} (fractional factorial design with resolution III added 3 center points)

Factorial Fit: Dry Time versus Font, DPI, %Solvent						
Estimated Effects and Coefficients for Dry Time (coded units)						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P	
Constant		6.375	0.2890	22.06	0.000	
Font	-4.250	-2.125	0.2890	-7.35	0.001	
DPI	2.800	1.400	0.1828	7.66	0.001	
%Solvent	-3.750	-1.875	0.2890	-6.49	0.001	
Ct Pt		0.542	0.3731	1.45	0.206	
S = 0.578072 PRESS = 16.6420						
R-Sq = 96.91% R-Sq(pred) = 69.24% R-Sq(adj) = 94.44%						
Analysis of Variance for Dry Time (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects		3 51.7250	51.7250	17.2417	51.60	0.000
Curvature		1 0.7042	0.7042	0.7042	2.11	0.206
Residual Error		5 1.6708	1.6708	0.3342		
Lack of Fit	1	0.3375	0.3375	0.3375	1.01	0.371 not significant
Pure Error	4	1.3333	1.3333	0.3333		
Total	9	54.1000				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.6 ผลการทดลองด้วยวิธี Steepest descent

Steps	Coded Variables		Natural Variables		Dry Time of Dpi	
	x_1	x_3	ξ_1	ξ_3	150*150	600*600
Origin	0	0	6	50	-	-
Δ	0.374	0.33	1.5	10	-	-
Origin + 4Δ	1.496	1.32	12	90	2	4
Origin + 3Δ	1.122	0.99	10.5	80	2	4
Origin + 2Δ	0.748	0.66	9	70	3.5	5.5
Origin + Δ	0.374	0.33	7.5	60	4	6
Origin	0	0	6	50	5.5	8
Origin - Δ	-0.374	-0.33	4.5	40	7	9.5
Origin - 2Δ	-0.748	-0.66	3	30	7.5	11
Origin - 3Δ	-1.122	-0.99	1.5	20	9	12

2. ผลการทดลองและวิเคราะห์เครื่องเลเซอร์

ตารางที่ ก.7 ผลการทดลอง 2^{6-2} (fractional factorial design with resolution III)

StdOrde	RunOrde	A	B	C	D	E	F	Color
r	r							
2	1	10	50	10	10	2	1	7
23	2	2	100	20	10	1	1	5
21	3	2	50	20	10	2	2	2
14	4	10	50	20	20	1	1	1
26	5	10	50	10	20	2	2	3
27	6	2	100	10	20	2	1	6
22	7	10	50	20	10	1	2	4
19	8	2	100	10	10	2	2	7
32	9	10	100	20	20	2	2	3
15	10	2	100	20	20	1	2	5
1	11	2	50	10	10	1	1	6
29	12	2	50	20	20	2	1	2
6	13	10	50	20	10	1	2	3
30	14	10	50	20	20	1	1	1
16	15	10	100	20	20	2	2	2
11	16	2	100	10	20	2	1	4
31	17	2	100	20	20	1	2	3
10	18	10	50	10	20	2	2	4
8	19	10	100	20	10	2	1	3
18	20	10	50	10	10	2	1	2
28	21	10	100	10	20	1	1	4
4	22	10	100	10	10	1	2	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.7 (ต่อ) ผลการทดลอง 2^{6-2} (fractional factorial design with resolution III)

12	23	10	100	10	20	1	1	1
25	24	2	50	10	20	1	2	3
20	25	10	100	10	10	1	2	5
24	26	10	100	20	10	2	1	3
5	27	2	50	20	10	2	2	6
9	28	2	50	10	20	1	2	3
3	29	2	100	10	10	2	2	7
13	30	2	50	20	20	2	1	3
17	31	2	50	10	10	1	1	6
7	32	2	100	20	10	1	1	5

ตารางที่ ก.8 ผลการวิเคราะห์ ANOVA

Factorial Fit: Color versus A, B, C, D, E, F						
Estimated Effects and Coefficients for Color (coded units)						
Term	Effect	Coef	SE	Coef	T	P
Constant		3.8750	0.2461		15.75	0.000
A	-1.3750	-0.6875	0.2461		-2.79	0.013
B	0.7500	0.3750	0.2461		1.52	0.147
C	-1.3750	-0.6875	0.2461		-2.79	0.013
D	-1.7500	-0.8750	0.2461		-3.56	0.003
E	0.2500	0.1250	0.2461		0.51	0.618
F	0.3750	0.1875	0.2461		0.76	0.457
A*B	-0.6250	-0.3125	0.2461		-1.27	0.222
A*C	0.0000	0.0000	0.2461		0.00	1.000
A*D	0.1250	0.0625	0.2461		0.25	0.803
A*E	0.1250	0.0625	0.2461		0.25	0.803
A*F	0.5000	0.2500	0.2461		1.02	0.325
B*D	0.2500	0.1250	0.2461		0.51	0.618
B*F	0.3750	0.1875	0.2461		0.76	0.457
A*B*D	-0.1250	-0.0625	0.2461		-0.25	0.803
A*B*F	-0.2500	-0.1250	0.2461		-0.51	0.618
S = 1.39194 PRESS = 124						
R-Sq = 68.84% R-Sq(pred) = 0.00% R-Sq(adj) = 39.64%						
Analysis of Variance for Color (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	6	60.8750	60.8750	10.1458	5.24	0.004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.8 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์ ANOVA

2-Way Interactions	7	7.0000	7.0000	1.0000	0.52	0.810
3-Way Interactions	2	0.6250	0.6250	0.3125	0.16	0.852
Residual Error	16	31.0000	31.0000	1.9375		
Pure Error	16	31.0000	31.0000	1.9375		
Total	31	99.5000				



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
การคำนวณจุดคุ้มทุน

1. คำนวณหาจุดคุ้มทุนของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทกับเครื่องเลเซอร์

	เครื่องอิงค์เจ็ท	เครื่องเลเซอร์
ราคาเครื่องจักร	320,000 บาท	1,556,000 บาท
ค่าบำรุงรักษา/ปี	401 บาท	-
ค่าน้ำหมึก/ปี	34,606.30 บาท	-
อายุการใช้งาน	20 ปี	20 ปี
ผลผลิต/ชม	1,800 ชิ้น	6,000 ชิ้น
ค่าไฟฟ้า/ปี	1,694.784 บาท	2,542.176 บาท
มูลค่าซาก	32,000 บาท	155,600 บาท
เครื่องเลเซอร์		
ค่าแรงงาน 1 ชม =	37 บาท/ชม	
ผลผลิต 1 ชม =	6,000 ชิ้น/ชม	
ผลผลิต 6,000 ชิ้น เสียค่าแรง =	37 บาท	
ผลผลิต x ตัว เสียค่าแรง =	$\frac{26x}{6000}$	
ต้นทุนแปรผันต่อปี =	0.066x บาท	
ต้นทุนเทียบเท่ารายปี	$1,556,000(A/P, 10\%, 20) - 155,600(A/F, 10\%, 20) + \frac{26x}{6000} + 2,542$	
	$= 1,556,000(0.11746) - 155,600(0.01746) + \frac{26x}{6000} + 2,542$	
	$= 182,767.76 - 2,716 + \frac{26x}{6000}$	
	$= 182,592.948 + \frac{26x}{6000}$	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องจักรเจ็ท

$$\text{ค่าแรงงาน 1 ชม} = 37 \text{ บาท/ชม}$$

$$\text{ผลผลิต 1 ชม} = 1,800 \text{ ชิ้น/ชม}$$

$$\text{ผลผลิต 555 ชิ้น เสียค่าแรง} = 37 \text{ บาท}$$

$$\text{ผลผลิต} \times \text{ตัว เสียค่าแรง} = \frac{26x}{1800}$$

$$\text{ต้นทุนแปรผันต่อปี} = 0.066x \text{ บาท}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้นทุนเทียบเท่ารายปี} &= 320,000(A/P, 10\%, 20) - 32,000(A/F, 10\%, 20) + 35,007.3 + \frac{26x}{1800} + \\ &1,694.784 \end{aligned}$$

$$= 320,000(0.11746) - 32,000(0.01746) + 35,007.3 +$$

$$\frac{26x}{1800} + 1,694.784$$

$$= 37,587.2 - 558.72 + 35,007.3 + \frac{26x}{1800} + 1,694.784$$

$$= 73,730.564 + \frac{26x}{1800}$$

$$73,730.564 + \frac{26x}{1800} = 182,592.948 + \frac{26x}{6000}$$

$$\frac{26x}{1800} - \frac{26x}{6000} = 182,592.948 - 27,635.78$$

$$\frac{13,875x - 9,000x}{199,800} = 153,015.204$$

$$\frac{109200x}{10800000} = 153,015.204$$

$$X = 151,333,718 \text{ ชิ้น/ปี}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายอภิรักษ์ โสภากัณฑ์
วัน เดือน ปีเกิด	28 กันยายน 2528 ที่นครศรีธรรมราช
ที่อยู่	2349/143 แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพมหานคร 10250 โทร.086-5940237
ประวัติการศึกษา	2551 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
ผลงานทางวิชาการ	“ปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดของการทำเครื่องหมายลงบนพลาสติกโพลีพรพิลีน” การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี 2554



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้