

การปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปในอุตสาหกรรมเซมิคอนดักเตอร์ชนิดมีขา Molding Process Improvement in Peripheral Semiconductor Industry

สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ^{1*} และ วัลภา เตชะสุข²

บทคัดย่อ

เซมิคอนดักเตอร์ (สารกึ่งตัวนำ) คือวัสดุที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวน เป็นวัสดุที่ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้เลือกศึกษาและแก้ไขงานมีขา (Peripheral) เนื่องจากพบปัญหาในกระบวนการขึ้นรูป (Mold Process) ซึ่งทำให้เกิดงานเสียที่เรียกว่าเส้นทองสัมผัสกัน หรือระยะห่างระหว่างเส้นทองแต่ละเส้นใกล้กันเกินกว่าที่ข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์กำหนดไว้ คือเส้นทองแต่ละเส้นต้องห่างกันมากกว่าหรือเท่ากับ 23 ไมครอน โดยงานวิจัยนี้ได้รับปัจจัยทั้งหมดที่มีผลต่อการเกิดปัญหาโดยใช้แผนภูมิแกว่งปลา ซึ่งจากแผนภูมิดังกล่าว ผู้วิจัยได้เลือกปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดปัญหา คือ เวลาฉีดเรซิน เวลาให้ความร้อนเรซิน และแรงฉีดเรซิน จากนั้นได้ใช้หลักการออกแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Design: CCD) ร่วมกับหลักการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) เพื่อหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยทั้ง 3 ที่มีผลให้เส้นทองที่อยู่ติดกันมีระยะห่างมากที่สุด ผลการทดลองพบว่า พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้เส้นทองอยู่ห่างกันมากที่สุด คือที่เวลาฉีดเรซิน 13 วินาที เวลาให้ความร้อนเรซิน 9 วินาที และแรงฉีด 1.7 ตัน ซึ่งจะได้ค่าระยะห่างของเส้นทองเฉลี่ย 49.38 ไมครอน

คำสำคัญ: กระบวนการขึ้นรูป เวลาฉีดเรซิน เวลาให้ความร้อนเรซิน แรงฉีด การออกแบบส่วนผสมกลาง หลักการพื้นผิวผลตอบสนอง

Abstract

Semiconductor is the material that has properties of conductive stay between the conductor and the electric insulator. It is the main part of electrical appliances. This research studies and solves the problem in peripheral product at the mold process. The problem of the wire touch or the gap between 2 gold wires is less than the standard rule of the product. The gap between gold wires must be wider than 23 micron. This research defines the potential factors of the wire touch or gab between the gold wires by utilizing the fish bone diagram. There are 3 factors which are considered to be the main factors of the problem. Those factor are the injection time, the tablet preheat time and the injection pressure. Central Composite Design (CCD) is employed with the response surface analysis to explore the appropriate parameters which

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

² นักวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2218-6814 E-mail: somkiat.t@eng.chula.ac.th

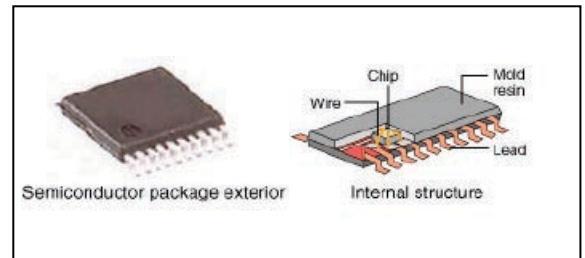
affect the maximum gap of the gold wires. The experimental result show that the suitable parameters of the mold machine of the wire touch problem are the injection time of 13 sec , the tablet preheat time of 9 sec and the injection pressure of 1.7 ton, which result in the maximum wire gap of 49.38 micrometer.

Keyword: Mold Process, Injection Time, Tablet Preheating Time, Injection Pressure, Center Composite Design, Response Surface Analysis

1. บทนำ

เซมิคอนดักเตอร์ (สารกึ่งตัวนำ) คือวัสดุที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวน เป็นวัสดุที่ใช้ทำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ มักมีส่วนประกอบของ Germanium, Selenium หรือ Silicon วัสดุเนื้อแข็ง ผลึกพวกหนึ่งที่มีสมบัติเป็นตัวนำ หรือสื่อไฟฟ้าก้ำกึ่งระหว่างโลหะกับอโลหะหรือฉนวน ความเป็นตัวนำไฟฟ้าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และสิ่งไม่บริสุทธิ์ที่มีเจือปนอยู่ในวัสดุพวกนี้ ซึ่งอาจเป็นธาตุหรือสารประกอบก็มี เช่น ธาตุเจอร์เมเนียม ซีลีเนียม และตะกั่วเทลลูไรด์ เป็นต้น วัสดุกึ่งตัวนำพวกนี้มีความต้านทานไฟฟ้าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะตรงข้ามกับโลหะทั้งปวง เซมิคอนดักเตอร์มีหลายประเภทด้วยกันเช่น งานมีชา (Peripheral) งานไม่มีชา (Non-Lead) งานที่มีจุดเชื่อมต่อเป็นลักษณะลูกบอลกลมๆ เรียกว่า บอล และงานเรซินใส ซึ่งงานแต่ละประเภทออกแบบมาเพื่อใช้งานตามลักษณะงานที่แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาและแก้ไขงานมีชา (Peripheral) ที่เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ซึ่งมีส่วนประกอบดังรูปที่ 1

เนื่องจากบริษัทกรณีศึกษาพบปัญหาในกระบวนการขึ้นรูป (Mold Process) ในการผลิตผลิตภัณฑ์ใหม่ซึ่งแตกต่างจากผลิตภัณฑ์เดิมโดยที่ขนาดของชิป (Chip) มีขนาดเล็กลงซึ่งส่งผลให้ความยาวของเส้นทอง (Gold



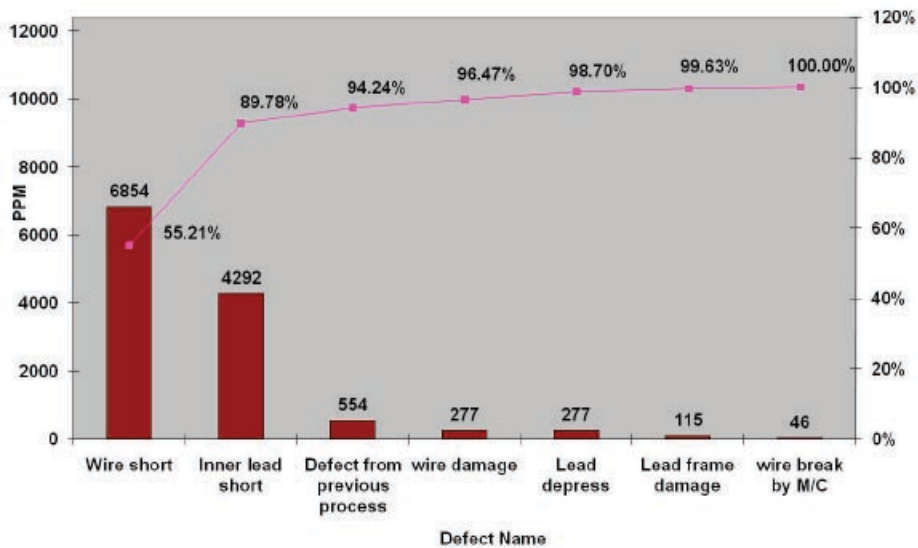
รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบหลักของเซมิคอนดักเตอร์

Wire) เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเมื่อมีการฉีดเรซินเข้าไปในแม่พิมพ์ทำให้เกิดงานเสียที่เรียกว่าเส้นทองสัมผัสกันหรือเส้นทองแต่ละเส้นใกล้กันเกินกว่าที่ข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์กำหนดไว้ คือเส้นทองแต่ละเส้นต้องห่างกันมากกว่าหรือเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นทอง ในที่นี้เส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นทองเท่ากับ 23 ไมครอน

ดังนั้นผลิตภัณฑ์ชิ้นนี้กำหนดให้เส้นทองแต่ละเส้นต้องอยู่ห่างกันมากกว่า 23 ไมครอน แต่ปัญหาดังกล่าวไม่ได้ทำให้งานเสียหายเนื่องจากเมื่อตรวจสอบงานด้วยเครื่องเอ็กซเรย์ในด้านบน เส้นทองมีลักษณะที่สัมผัสกัน แต่เมื่อเอ็กซเรย์ด้วยการตะแคงดูด้านข้างจะเห็นว่าเส้นทองไม่ได้สัมผัสกันเลย แต่เหตุที่บริษัทกรณีศึกษาต้องการให้แก้ปัญหานี้เนื่องจากในกระบวนการขึ้นรูปเมื่อทำการขึ้นรูปงานแล้ว ผู้ปฏิบัติงานจะต้องนำงานมาเอ็กซเรย์ จากด้านบนเพื่อตรวจสอบคุณภาพงานหลังการขึ้นรูป และเมื่อมีการพบเส้นทองสัมผัสกัน ผู้ปฏิบัติงานจะทำการตัดสินใจให้งานเป็นของเสีย เนื่องจากเป็นไปตามข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ จึงทำให้เกิดการสูญเสียงานที่ไม่ได้สูญเสียจริงขึ้นเป็นจำนวน 0.69% ของจำนวนงานที่ผลิตทั้งหมด

จากรูปที่ 2 ปัญหาเส้นทองสัมผัสกันเป็นปัญหาหลักของงานเซมิคอนดักเตอร์ชนิดมีชาซึ่งมีจำนวนของเสีย 6854 PPM

ดังนั้น วัตถุประสงค์ของการวิจัยเพื่อปรับปรุงงานเซมิคอนดักเตอร์ที่มีชา (Peripheral) ไม่ให้เกิดปัญหาเส้นทองสัมผัสกันหรือเส้นทองใกล้กันน้อยกว่า 23 ไมครอนซึ่งถือว่าเป็นของเสีย



รูปที่ 2 แผนภูมิพารेटโตแสดงปริมาณปัญหาหลักที่พบในกระบวนการขึ้นรูป

ผู้วิจัยจึงทำการวิจัยการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลต่อการทำให้เส้นทองไม่สัมผัสกัน หรือใกล้กันเกินมากกว่าที่ขอบเขตกำหนด โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง และใช้หลักการทางสถิติเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลต่อการทำให้เกิดงานเสีย โดยปัจจัยที่ศึกษาประกอบไปด้วย เวลาฉีดเรซิน เวลาให้ความร้อนเรซิน และแรงฉีด

2. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้หลักการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology: RSM) มาใช้ในการศึกษา โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยสำคัญสามปัจจัยอันได้แก่ เวลาฉีดเรซิน เวลาให้ความร้อนเรซิน และแรงฉีด เพื่อแก้ปัญหาเส้นทองสัมผัสกัน หรือเส้นทองแต่ละเส้นใกล้กันเกินกว่าที่ข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์กำหนดไว้ ในการทดลองนี้ผู้วิจัยได้ใช้ระยะห่างของเส้นทองแต่ละเส้น เป็นตัวชี้วัดคุณภาพของงานเซมิคอนดักเตอร์โดยมาตรฐานของผลิตภัณฑ์คือ 23 ไมครอน ดังนั้นเป้าหมายของการศึกษานี้เพื่อหา

ค่าที่เหมาะสมของปัจจัยสำคัญทั้งสาม ปัจจัยที่จะทำให้อุณหภูมิของงานเซมิคอนดักเตอร์ที่มีขามีค่าระยะห่างของเส้นทองมากกว่า 23 ไมครอน

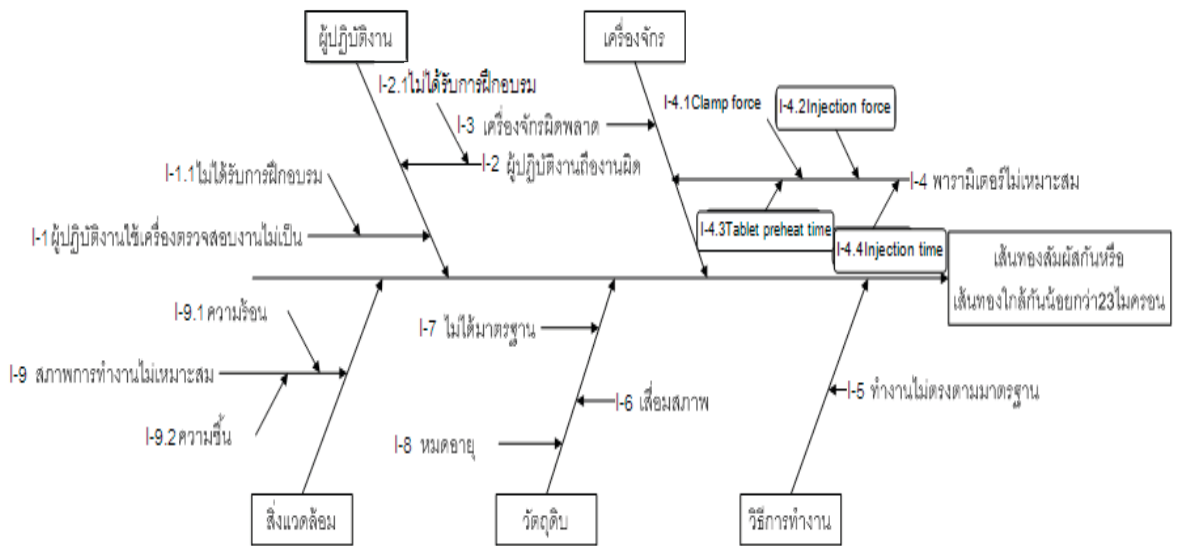
ในการดำเนินการวิจัย ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 4 ส่วน คือวิเคราะห์เลือกปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดปัญหาทดลองเพื่อหาอิทธิพลของปัจจัย วิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด และยืนยันผลการวิจัย

2.1 วิเคราะห์เลือกปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดปัญหา

จากปัญหาที่ได้กล่าวมาข้างต้น จะถูกนำมาวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาด้วยการระดมสมองจากผู้ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบนี้ได้แก่ ฝ่ายควบคุมคุณภาพ ฝ่ายวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ และฝ่ายเทคนิค โดยการใช้แผนภาพก้างปลาเป็นเครื่องมือทางสถิติในการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา แสดงดังรูปที่ 3

ผู้ปฏิบัติงาน :

I-1: พนักงานใช้เครื่องตรวจสอบงาน ซึ่งก็คือเครื่อง X-ray เนื่องจากหน้าจอของเครื่องจักรเป็นภาษาอังกฤษทั้งหมด ซึ่งทำให้ยากต่อการทำความเข้าใจใน



รูปที่ 3 แผนภาพก้างปลาของปัญหาการเกิดเส้นทองล้ม ผัสกันและเส้นทองใกล้กันน้อยกว่า 23 ไมครอน

เรื่องการใช้งาน ดังนั้น จึงได้มีการเขียนวิธีใช้งานหน้าเครื่องตรวจสอบงานหน้าทุกเครื่อง

I-1.1: ไม่ได้รับการฝึกอบรม ดังนั้นต้องจัดให้มีการฝึกอบรมการใช้เครื่องตรวจสอบงาน

I-2: การถืองานผิดเนื่องจากอุปกรณ์ช่วยในการนำงานเข้าสู่เครื่องจักรมีขนาดเล็กและยากต่อการใส่ชิ้นงานเข้าเครื่องจักร ถ้าวางตำแหน่งของมือผิดจากตำแหน่งที่ระบุในมาตรฐานการถืองาน ความเสี่ยงที่ทำให้เส้นทองล้มจะสูงขึ้น ดังนั้นจึงมีการออกแบบอุปกรณ์ช่วยในการถืองานได้ง่ายขึ้น เพื่อลดความเสี่ยงที่เส้นทองล้มก่อนเข้าสู่เครื่องขึ้นรูป

I-2.1: ไม่ได้รับการฝึกอบรม ดังนั้นต้องจัดให้มีการฝึกอบรมการถืองาน

เครื่องจักร :

I-3: เครื่องจักรผิดพลาด หรือเครื่องจักรชำรุด ได้รับการตรวจสอบทุกวันจากฝ่ายซ่อมบำรุง ซึ่งหากพบความผิดพลาดหรือเครื่องจักรชำรุด เครื่องจักรจะได้รับการแก้ไขทันที

I-4: พารามิเตอร์ไม่เหมาะสม เพราะงานมีการ

เปลี่ยนแปลงโครงสร้างซึ่งมีความเสี่ยงที่จะมีการสัมผัสกันของเส้นทองสูงหากใช้พารามิเตอร์เดิม

I-4.1: Clamp Force แรงกดมีผลต่องานในเรื่องของความสูงของงาน และการเปิดปิดทางเข้าออกของอากาศในตัวงานขณะทำการฉีดเรซิน ดังนั้น ค่าของแรงกดจึงต้องพอดี

I-4.2: Injection Force แรงฉีด คือแรงที่กระทำกับแกนฉีดเพื่อให้เรซินไหลเข้าไปในแม่พิมพ์อย่างสมบูรณ์ แรงฉีดมีผลให้เกิดเส้นทองสัมผัสกัน หรือเส้นทองใกล้กันน้อยกว่า 23 ไมครอน เนื่องจากแรงดังกล่าวจะเป็นตัวผลักให้มวลของเรซินไปปะทะกับเส้นทองจึงทำให้เส้นทองเกิดการโค้งงอจนสัมผัสหรือใกล้กัน ซึ่งยังไม่สามารถหาแรงฉีดที่เหมาะสมได้ **สาเหตุหลัก**

I-4.3: Tablet Preheat Time เวลาให้ความร้อนแก่เรซิน คือระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่เรซินก่อนทำการฉีด ระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่เรซินมีผลให้เกิดเส้นทองสัมผัสกัน หรือเส้นทองใกล้กันน้อยกว่า 23 ไมครอน เนื่องจากความร้อนที่ให้นั้นจะส่งผลต่อลักษณะของเรซินซึ่งมีอยู่ 3 ช่วง

ช่วงแรก คือช่วงที่เรซินมีสถานะเป็นของแข็งซึ่ง

เมื่อโดนความร้อน ความแข็งแรงของเรซินก็จะค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ

ช่วงที่สอง คือช่วงที่เรซินเป็นเจล (ช่วงที่เป็นของเหลว) สูงสุด ช่วงนี้ถือว่าเป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดที่จะฉีดเรซินเข้าไปยังแม่พิมพ์

ช่วงที่สาม คือช่วงที่เรซินจะค่อยๆ เปลี่ยนสถานะจากการเป็นเจลกลับมาเป็นของแข็ง

ซึ่งยังไม่สามารถหาช่วงเวลาในการให้ความร้อนแก่เรซินที่เหมาะสมได้ **สาเหตุหลัก**

I-4.4: Injection Time เวลาในการฉีดเรซิน คือระยะเวลาในการฉีดเรซินเข้าไปยังแม่พิมพ์ ระยะเวลาในการฉีดมีผลให้เกิดเส้นทองสัมผัสกัน หรือเส้นทองใกล้เคียงกันน้อยกว่า 23 ไมครอน เนื่องจาก

F คือแรง m คือมวล และ a คือความเร่ง

$$F = ma$$

$$a = v/t$$

$$F = m * (v/t)$$

$$t = mv/F$$

จากสูตรจะเห็นว่า $t \propto F$

ซึ่งหมายความว่าถ้าเวลาในการฉีดของเรซินมีน้อยจะส่งผลให้แรงของเรซินที่ฉีดเข้าไปยังแม่พิมพ์มีมากขึ้นกัน ขณะนี้ยังไม่สามารถหาช่วงเวลาในการฉีดเรซินที่เหมาะสมได้ **สาเหตุหลัก**

วิธีการทำงาน :

I-5: ทำงานไม่ตรงตามมาตรฐาน เนื่องจากไม่ได้รับความรู้หรือการฝึกอบรมก่อนการปฏิบัติงานจริง ดังนั้นมาตรฐานที่ระบุถึงวิธีการและข้อควรระวังซึ่งผู้ปฏิบัติงานทุกคนจะต้องศึกษา ผู้ปฏิบัติงานต้องทำความเข้าใจก่อนทำการปฏิบัติงานจริง

วัตถุดิบ :

I-6: วัตถุดิบเสื่อมสภาพ เนื่องจากได้รับการดูแลที่ไม่ได้มาตรฐาน เช่น สภาพอุณหภูมิในที่เก็บมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้น จึงมีการควบคุมห้องเก็บหรือตู้เก็บเรซินอยู่เสมอ

I-7: วัตถุดิบไม่ได้มาตรฐาน เนื่องจากมาตรฐานวัตถุดิบเกิดจากข้อตกลงระหว่างบริษัทและผู้ผลิต ซึ่งผู้ผลิตจะทำการตรวจสอบวัตถุดิบว่าตรงตามมาตรฐานหรือไม่ ก่อนส่งมาให้บริษัทซึ่งหากไม่ผ่านมาตรฐานก็ต้องทำการผลิตใหม่

I-8: วัตถุดิบหมดอายุ มีผลต่อคุณภาพของเรซินอย่างมาก เนื่องจากเวลาผ่านไปคุณภาพของเรซินก็จะต่ำลงเรื่อยๆ ดังนั้นหน้ากล่องบรรจุเรซินต้องการระบุวันที่ผลิต วันหมดอายุ รวมถึงล็อตเรซิน

สิ่งแวดล้อม :

I-9: สภาพการทำงานไม่เหมาะสม ดังนั้นจึงมีการควบคุมและบันทึกค่าต่างๆ อยู่เป็นประจำ

I-9.1: ความร้อนมีผลต่อคุณภาพของงานและวัตถุดิบในการผลิต ดังนั้น จึงมีการควบคุมและบันทึกค่าภายในห้องปฏิบัติงานอยู่เสมอ

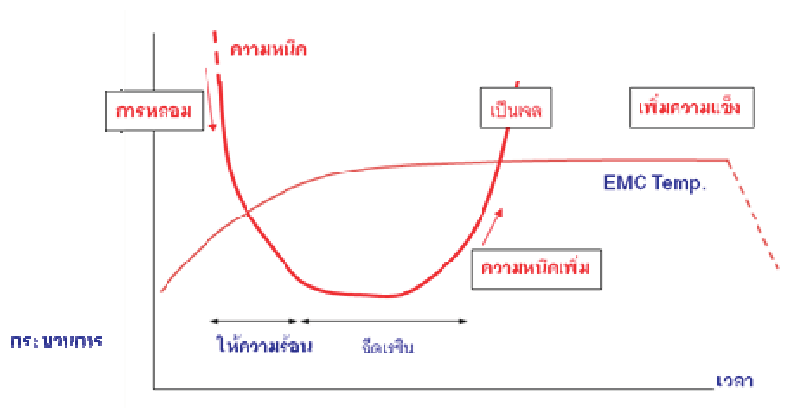
I-9.2: ความชื้นมีผลต่อคุณภาพของงานและวัตถุดิบในการผลิต ดังนั้น จึงมีการควบคุมและบันทึกค่าภายในห้องปฏิบัติงานอยู่เสมอ

จากการรวบรวมข้อมูลจากการประชุมกับบุคลากรที่เกี่ยวข้องในกระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์ได้มีการลงความเห็นว่ปัจจัยที่จะนำมาใช้ในการวิจัยควรเป็นปัจจัยที่สามารถปรับค่าได้โดยตรงที่เครื่องจักร คือ

1. เวลาฉีดเรซิน (Injection Time)
2. เวลาให้ความร้อนเรซิน (Tablet Preheat Time)
3. แรงฉีด (Injection Force)

2.2 การทดลองเพื่อหาอิทธิพลของปัจจัย

ในงานวิจัยนี้ใช้หลักการการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD) เหตุผลที่ผู้วิจัยได้เลือกหลักการนี้ เพราะว่าการออกแบบส่วนประสมกลางเป็นการออกแบบการทดลองที่เป็นส่วนหนึ่งของ Response Surface Methodology ที่ใช้ในการออกแบบการทดลองสำหรับพิตแบบจำลองกำลังสอง (Second-Order Model) และนำไปสู่การแปรผลพื้นผิวผลตอบที่ต้องการศึกษา หลักการพื้นฐานของการ



รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ของความหนืดและเวลา

ออกแบบ ส่วนประสมกลั่นนั้นเป็นการขยายการออกแบบ 2^k Factorial Design โดยทั่วไปแล้ว CCD จะประกอบ ด้วย 2^k Factorial ที่มี n_f Runs และ $2k$ Runs ใน แนวแกน (Axial Point) ที่เรียกว่า Star Runs และ Center Runs (n_c) ที่จุดศูนย์กลาง และค่า α นี้จะเป็น ตัวบอกให้ทราบ ถึงระยะปลายสุดของระดับของปัจจัย ที่สนใจศึกษาทั้งทางด้านต่ำ (Low) และด้านสูง (High) [1],[2]-[4]

จากหลักการออกแบบส่วนประสมกลั่น (Central Composite Design; CCD) ค่าของระดับของปัจจัยที่นำมาใช้ปกติจะไม่ใช้ค่าต่ำสุดหรือสูงสุดของการออกแบบ เมื่อมี Axial Points เพราะปกติ Axial Points จะอยู่นอก Cube ของการออกแบบ (ยกเว้นกำหนดค่า α มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ) ซึ่งถ้าไม่ระมัดระวังแล้ว อาจจะทำให้ไม่สามารถทำการ Runs การทดลองได้ เพราะว่า Axial Runs อยู่นอกเหนือจากจุดที่ใช้ทดลอง [1], [2]-[4]

ในส่วนของระดับของปัจจัยต่างๆ ที่จะนำมาพิจารณา ในการออกแบบการทดลองครั้งนี้ผู้วิจัยได้มาจากการรวบรวมข้อมูลจากการประชุมกับบุคลากรที่เกี่ยวข้องในกระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์เช่นกัน

เนื่องจากเวลาในการฉีดเรซินและเวลาให้ความร้อนแก่เรซิน มีความสัมพันธ์กับความหนืด (Viscosity) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างมากในกระบวนการขึ้นรูป ตามรูปที่ 4

จากรูปจะเห็นว่าเมื่อเวลาเปลี่ยนไปความหนืดของเรซินก็เปลี่ยนไป ซึ่งในกระบวนการขึ้นรูปต้องการให้เรซิน มีความหนืดที่น้อยที่สุด เพื่อให้แรงไปกระทำกับเส้นทองน้อยที่สุด ดังนั้นค่าของเวลาในการฉีดและเวลาให้ความร้อนแก่เรซินต้องอยู่ในช่วงที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของเรซินด้วย โดยเรซินที่ใช้ในกระบวนการผลิตนี้มีค่าความเป็นเจลอยู่ที่ 32 วินาที

2.2.1 เวลาฉีดเรซิน คือระยะเวลาในการฉีดเรซินเข้าไปในแม่พิมพ์ ระยะเวลาในการฉีดมีผลให้เกิดเส้นทองสัมผัสกันหรือเส้นทองใกล้กันน้อยกว่า 23 ไมครอน เนื่องจาก

F คือ แรง m คือมวล และ a คือความเร่ง

$$F = ma$$

$$a = v/t$$

$$F = m \times (v/t)$$

$$t = mv/F$$

จากสูตรจะเห็นว่า $t \propto F$

ซึ่งหมายความว่าถ้าเวลาในการฉีดของเรซินมีน้อย จะส่งผลให้แรงของเรซินที่ฉีดเข้าไปยังแม่พิมพ์มีมากขึ้น

เนื่องจากคุณสมบัติของเรซินเมื่อเวลาผ่านไปเรซินจะเปลี่ยนสถานะจากการเป็นเจลเป็นของแข็ง ซึ่งก็หมายความว่าเรซินจะมีความหนืดสูงขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นเมื่อเวลาในการฉีดเรซินมากเกินไปจะส่งผลให้เรซินที่มีความหนืดสูงมีแรงกระทำต่อเส้นทองเพิ่มมากขึ้น

ดังนั้น จึงต้องมีการกำหนดเวลาในการฉีดเรซินให้เหมาะสม ผู้วิจัยได้กำหนดเวลาในการฉีดเรซินในการทดลอง ดังนี้

- ระดับต่ำ เวลาในการฉีดเรซิน 7 วินาที
- ระดับสูง เวลาในการฉีดเรซิน 13 วินาที

2.2.2 เวลาให้ความร้อนแก่เรซิน คือระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่เรซินก่อนทำการฉีด ระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่เรซินมีผลให้เกิดเส้นทองสัมผัสกันหรือเส้นทองใกล้กันน้อยกว่า 23 ไมครอน เนื่องจากความร้อนที่ไปนั้นจะส่งผลต่อคุณสมบัติของเรซินซึ่งมีอยู่ 3 ช่วง

ช่วงแรก คือช่วงที่เรซินมีสถานะเป็นของแข็งซึ่งเมื่อโดนความร้อน ความแข็งแรงของเรซินก็จะค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ

ช่วงที่สอง คือช่วงที่เรซินเป็นเจล (ช่วงที่เป็นของเหลว) สูงสุด ช่วงนี้ถือว่าเป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดที่จะฉีดเรซินเข้าไปยังแม่พิมพ์

ช่วงที่สาม คือช่วงที่เรซินจะค่อยๆ เปลี่ยนสถานะจากการเป็นเจลกลับมาเป็นของแข็ง

กล่าวได้ว่าหากกำหนดให้ระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่เรซินสั้นเกินไป เรซินในช่วงนี้จะมีความหนืดสูงเนื่องจากเป็นช่วงที่กำลังระหว่างสภาวะที่แข็งและเป็นเจล จึงส่งผลให้เรซินมีแรงกระทำต่อเส้นทองมาก และหากระยะเวลาการให้ความร้อนแก่เรซินมีมากเกินไปจะเข้าสู่ช่วงที่สามของเรซินคือเปลี่ยนสถานะจากของเจลเป็นของแข็ง ซึ่งทำให้เรซินมีความหนืดสูงขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้เรซินมีแรงกระทำต่อเส้นทองมากขึ้น

ดังนั้น จึงต้องมีการกำหนดเวลาในการให้ความร้อนแก่เรซินให้เหมาะสม ผู้วิจัยได้กำหนดเวลาในการให้ความร้อนแก่เรซินในการทดลอง ดังนี้

- ระดับต่ำ เวลาในการให้ความร้อนแก่เรซิน 9 วินาที
- ระดับสูง เวลาในการให้ความร้อนแก่เรซิน 15 วินาที

2.2.3 แรงฉีด คือแรงที่กระทำกับแกนฉีด (Plunger) เพื่อให้เรซินไหลเข้าไปในแม่พิมพ์อย่างสมบูรณ์ แรงฉีดมีผลให้เกิดเส้นทองสัมผัสกัน หรือเส้นทองใกล้กันน้อย

กว่า 23 ไมครอน เนื่องจากแรงดังกล่าวจะเป็นตัวหลักให้มวลของเรซินไปปะทะกับเส้นทองจึงทำให้เส้นทองเกิดการโค้งจนสัมผัสหรือใกล้กัน

ในงานวิจัยนี้สามารถเทียบค่าแรงฉีด 1 ตันเท่ากับแรงดัน 92.80 kgf/cm^2 ที่แกนฉีด (Plunger) ขนาด 14 มิลลิเมตร จำนวน 7 ชิ้น

ดังนั้น จึงต้องมีการกำหนดแรงฉีดเรซินที่ใช้ในการฉีดเรซินให้เหมาะสม ผู้วิจัยได้กำหนดแรงฉีดที่ใช้ในการฉีดเรซินในการทดลอง ดังนี้

- ระดับต่ำ แรงฉีดที่ใช้ในการฉีดเรซิน 16 ตัน
- ระดับสูง แรงฉีดที่ใช้ในการฉีดเรซิน 18 ตัน

โดยอ้างอิงจากงานเคมีคอนดักเตอร์ชนิดมีขาที่มีโครงสร้างใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 1 สรุประดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองของกระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์

ปัจจัย	ระดับ					หน่วย
	(-α)	(-1)	0	(+1)	(+α)	
เวลาในการฉีด	5	7	10	13	15	วินาที
เวลาในการให้ความร้อนเรซิน	7	9	12	15	17	วินาที
แรงฉีด	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	ตัน

การทดลองเพื่อหาอิทธิพลของปัจจัยนั้นได้ทำการทดลองแบบสุ่มโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการกำหนดลำดับการทดลอง โดยเก็บค่าผลการทดลอง 2 Replication เพื่อให้ผลที่ได้มีค่าความแปรปรวนน้อย ผลที่ได้รับจากการทดลองแสดง ไว้ในตารางที่ 2 จากนั้นจะนำข้อมูลไปวิเคราะห์การถดถอยของพื้นที่ผลตอบแทน

ผลที่ได้ตารางจะถูกนำไปวิเคราะห์เชิงสถิติ โดยใช้แบบจำลองการถดถอยของพื้นที่ผิวตอบเพื่อนำไปใช้ทำนายค่าของระยะห่างของเส้นทองได้ ซึ่งจะได้ค่าประมาณของสัมประสิทธิ์ของปัจจัยและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยทั้งหมดแล้วนำไปใช้ทำนายค่าของผลตอบแทนเพื่อหาค่าของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด

ในการทดลองนี้ผู้วิจัยกำหนดค่านัยสำคัญทางสถิติ $\alpha = 0.05$ โดยนำค่าความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีค่า P-Value ต่ำกว่า 0.05 มาสร้างสมการทำนาย

ตารางที่ 2 ตารางบันทึกผลการทดลองของระยะของเส้นทอง

เวลาฉีดเรซิน (วินาที)	เวลาให้ความร้อนแก่เรซิน (วินาที)	แรงฉีด (ตัน)	ระยะห่างเส้นทอง (ไมครอน)	
A	B	C	Y1	Y2
7	9	1.6	15	10
13	9	1.6	49	56
7	15	1.6	5	7
13	15	1.6	31	27
7	9	1.8	7	11
13	9	1.8	45	43
7	15	1.8	3	2
13	15	1.8	27	25
5	12	1.7	2	1
15	12	1.7	37	35
10	7	1.7	31	36
10	17	1.7	7	5
10	12	1.5	35	28
10	12	1.9	23	29
10	12	1.7	33	35
10	12	1.7	38	42
10	12	1.7	24	32
10	12	1.7	35	41
10	12	1.7	43	45
10	12	1.7	44	47

ตารางที่ 3 แสดงการวิเคราะห์สมการถดถอย

Term	Coef	P
Constant	38.2102	0.000
A	13.1452	0.000
B	-7.3772	0.000
C	-2.0319	0.049
A*A	-6.6345	0.000
B*B	-6.2809	0.000
C*C	-3.0989	0.003
A*B	-3.5625	0.010
A*C	-0.5625	0.667
B*C	0.6875	0.599

จากตารางที่ 3 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% คือค่า P น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยนั้นมีผลกระทบต่อระยะของเส้นทอง ดังนั้น ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระยะห่างของเส้นทอง คือ

1. เวลาฉีดเรซิน
2. เวลาในการให้ความร้อนแก่เรซิน
3. แรงฉีดเรซิน
4. อันตรกิริยาระหว่างเวลาในการฉีดกับเวลาในการฉีด
5. อันตรกิริยาระหว่างเวลาในการให้ความร้อนแก่เรซินกับเวลาในการให้ความร้อนแก่เรซิน
6. อันตรกิริยาระหว่างแรงฉีดเรซินกับแรงฉีดเรซิน
7. อันตรกิริยาระหว่างเวลาฉีดเรซินกับเวลาในการให้ความร้อนแก่เรซิน

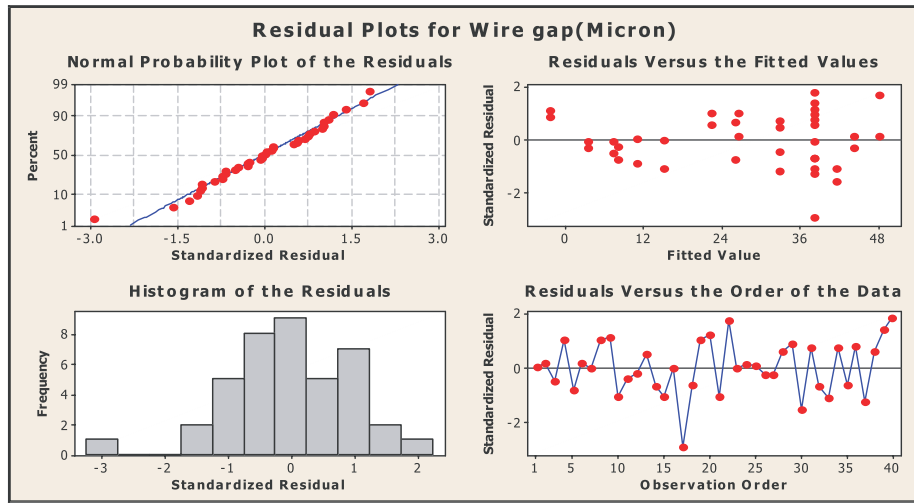
ปัจจัยที่เหลือไม่มีผลพอที่จะสรุปว่าเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลหรือมีผลกระทบต่อระยะห่างของเส้นทอง เนื่องจากค่า P ที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่ามากกว่า 0.05 ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1. อันตรกิริยาระหว่างเวลาฉีดเรซินกับแรงฉีดเรซิน
2. อันตรกิริยาระหว่างเวลาในการให้ความร้อนแก่เรซินกับแรงฉีดเรซิน

ตารางที่ 4 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอยของผลตอบ

(Source)	DF	Seq SS	Adj MS	F	P
Regression	9	8833	981.4	36.7	0.000
Linear	3	6319	2106	78.7	0.000
Square	3	2298	766.1	28.6	0.000
Interaction	3	215.7	71.90	2.69	0.064
Residual Error	30	803.0	26.77		
Lack-of-Fit	5	193.7	38.74	1.59	0.199
Pure Error	25	609.3	24.37		
Total	39	9636			

จากตารางที่ 4 ค่า P มีค่าน้อยกว่า 0.05 ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าแบบจำลองเพื่อแก้ปัญหาเส้นทองสัมผัสกันหรือใกล้กันน้อยกว่า 23 ไมครอนมีความเหมาะสม ซึ่งหมายความว่า เวลาฉีดเรซิน เวลาให้ความร้อนเรซิน



รูปที่ 5 แสดง Residual Plot ของค่าระยะของเส้นทอง

และแรงฉีก มีผลต่อการเบี่ยงตัวของเส้นทอง นอกจากนี้ Lack of Fit มีค่า 0.199 ซึ่งหมายความว่ารูปแบบจำลองการถดถอยสำหรับค่าระยะห่างของเส้นทอง มีความเหมาะสมอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อได้ผลการดังกล่าวแล้วให้พิจารณาในเรื่องความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของผลการทดลอง โดยการวิเคราะห์ข้อมูลได้ Residual Plot ของข้อมูลแสดงดังรูปที่ 5

จากรูปที่ 5 สามารถสรุปได้ว่า

1. การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ของ Residuals

จากการพิจารณาการกระจายของค่า Residual ซึ่งใช้การทดสอบการแจกแจงแบบปกติพบว่าค่า Residual มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง และจากฮิสโตแกรม (Histogram) พบว่าค่า Residual มีการกระจายตัวเป็นรูปทรงแบบปกติ ทำให้ประมาณได้ว่า Residuals มีการแจกแจงแบบปกติ

2. การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่า Residual

โดยพิจารณาจากแผนภูมิการกระจาย เมื่อพิจารณาการกระจายของข้อมูลบนแผนภูมิ พบว่าการกระจายตัว

ของ Residual มีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ แสดงให้เห็นว่าค่า Residual มีความเป็นอิสระต่อกัน

3. การตรวจสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของข้อมูล

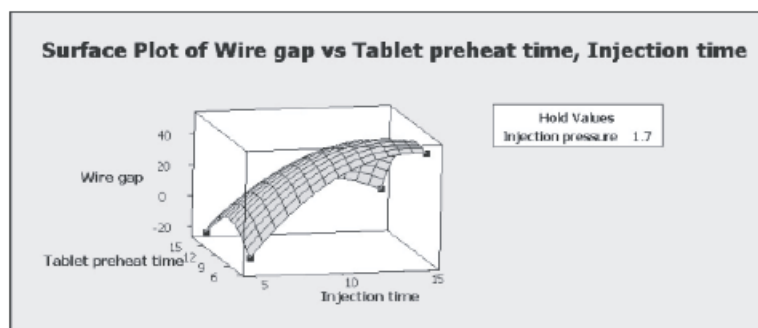
จากการพิจารณาค่า Residual และ Fit Value พบว่ากราฟไม่มีลักษณะของการลู่เข้าหรือลู่ออก และไม่มีรูปแบบปรากฏให้เห็น แสดงว่าข้อมูลมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล

2.3 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อระยะห่างของเส้นทอง

ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อระยะห่างของเส้นทอง โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบพหุคูณผลตอบ จากการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยวิเคราะห์จากปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยทุกตัวที่มีผลต่อระยะห่างของเส้นทอง อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเข้มข้น 95% จะได้สัมประสิทธิ์ของปัจจัยต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 5

New D 0.57753	Hi Cur Lo	Injectio 15.0454 [13.0] 4.9546	Tablet p 17.0454 [9.0] 6.9546	Injectio 1.8682 [1.70] 1.5318
Wire gap Minimum y = 49.3798 d = 0.57753				

รูปที่ 6 กราฟแสดงจุดที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย



รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉีดเรซินและเวลาในการให้ความร้อนแก่เรซิน ที่แรงฉีด 1.7 ตัน

ตารางที่ 5 แสดงสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่มีผลต่อระยะห่างของเส้นทอง

ปัจจัย	สัมประสิทธิ์
ค่าคงที่	-1058.86
A	23.875
B	18.2484
C	1033.32
A*A	-0.737162
B*B	-0.697879
C*C	-309.893
A*B	-0.395833

ความสัมพันธ์ที่มีผลต่อระยะห่างของเส้นทอง

$$Y_{gap} = -1058.86 + 23.875A + 18.2484B + 1033.32C - 0.737162(A*A) - 0.697879(B*B) - 309.893(C*C) - 0.395833(A*B)$$

เมื่อ Y_{gap} คือระยะห่างของเส้นทอง (ไมครอน)

A คือเวลาฉีดเรซิน (วินาที)

B คือเวลาให้ความร้อนแก่เรซิน (วินาที)

C คือแรงฉีด (ตัน)

2.4 การวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมที่สุด

จากการวิเคราะห์ด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer [3] เราจะได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยทั้งสาม ดังแสดงในรูปที่ 6 ดังนั้นค่าสำหรับระยะห่างของเส้นทองที่ดีที่สุดคือเวลาฉีดเรซิน 13.0 วินาที เวลาให้ความร้อนแก่เรซิน 9.0 วินาที และแรงฉีด 1.7 ตัน โดยมีค่าทำนายของระยะห่างระหว่างเส้นทอง 49.38 ไมครอน

จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของเวลาฉีดเรซินและเวลาให้ความร้อนแก่เรซิน ที่สามารถนำไปใช้ในการพยากรณ์ระยะห่างของเส้นทองได้ ดังแสดงในรูปที่ 7

2.5 การทดสอบเพื่อยืนยันผล

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์แล้วนำไปทดสอบเพื่อยืนยันผล จำนวน 20 ล็อต ล็อตละ 30 ข้อมูล ซึ่งการทดสอบผลของกระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์ จะได้ค่าระยะห่างของเส้นทองเฉลี่ยเท่ากับ 45.16 ไมครอน มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 3.707 ไมครอนและไม่พบข้อบกพร่องใดๆ ที่ทำให้งานเป็นของเสีย

3. สรุป

1. ผู้วิจัยได้ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ ผลที่ได้จากการทดลอง พบว่าเวลาในการฉีดเรซิน เวลาในการให้ความร้อนแก่เรซิน และแรงในการฉีดเรซิน เป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าระยะห่างของเส้นทอง โดยค่าที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ระยะห่างของเส้นทองตามเป้าหมายคือมากกว่า 23 ไมครอนซึ่งจากสมการความสัมพันธ์ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดคือ 49 ไมครอน โดยไม่มีข้อบกพร่องทางด้านคุณภาพอื่นๆ ซึ่งได้พารามิเตอร์ที่เป็นปัจจัยหลัก คือเวลาในการฉีดเรซิน 13 วินาที และเวลาในการให้ความร้อนแก่เรซิน 9 วินาที โดยควบคุมแรงในการฉีดเรซิน 1.7 ตัน

2. ในกรณีที่ต้องการปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปเซมิคอนดักเตอร์ในด้านการปรับปรุงกำลังการผลิต โดยการลดเวลาในกระบวนการขึ้นรูป สามารถใช้สมการความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อระยะห่างของเส้นทองเป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปเซมิคอนดักเตอร์ โดยการกำหนดค่าของปัจจัยต่างๆ ของกระบวนการขึ้นรูปได้จากสมการความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ได้จากการทดลองนี้ เพื่อควบคุมระยะห่างของเส้นทองให้ได้ตามเป้าหมายที่กำหนด

4. ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้พิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักรที่มีผลให้เส้นทองสัมผัสกัน ซึ่งได้มีการควบคุมปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบ เช่น ลีตเรซิน อายุของเรซิน ซึ่งปัจจัยดังกล่าว

มีผลต่อคุณสมบัติของเรซิน ดังนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้งานเซมิคอนดักเตอร์เกิดปัญหาเส้นทองสัมผัสกันอีก จึงควรมีการควบคุมคุณสมบัติของเรซินในกระบวนการผลิตอยู่เสมอ ถึงแม้ว่าลีตเรซินจะต่างกัน

2. จากการทำวิจัยทำให้ทราบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปัญหาเส้นทองสัมผัสกัน คือ เวลาในการฉีดเรซิน เวลาในการให้ความร้อนแก่เรซินและแรงในการฉีดเรซิน ซึ่งทั้ง 3 ปัจจัยนี้เกี่ยวข้องกับเครื่องจักรโดยตรง ดังนั้นควรมีการซ่อมบำรุงรักษาเครื่องจักรอย่างสม่ำเสมอ

3. งานวิจัยนี้มีการควบคุมระดับความสูงในการวางเส้นทองไว้ที่ 120 ไมครอน ซึ่งเป็นค่ากึ่งกลางของข้อกำหนดผลิตภัณฑ์ ซึ่งในทางปฏิบัติจริงแล้ว ค่าระดับความสูงของเส้นทองจะมีค่าเผื่อที่กว้างคือ 120 ± 30 ไมครอน ดังนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้งานเซมิคอนดักเตอร์เกิดปัญหาเส้นทองสัมผัสกันอีก จึงควรมีการลดค่าข้อกำหนดของระดับความสูงของเส้นทองลงเป็น 120 ± 10 ไมครอน

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้มาโดยตลอด

เอกสารอ้างอิง

- [1] ปารเมศ ชุตินา, การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [2] ไพโรจน์ วิริยจารี, การออกแบบพื้นที่การตอบสนอง *Response surface design*, พิมพ์ครั้งที่ 1, เชียงใหม่ : คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2544.
- [3] บริษัท โซลูชั่น เซ็นเตอร์ จำกัด, คู่มือการใช้ Minitab หัวข้อ "Design of Experiments," กรุงเทพมหานคร.
- [4] DC. Montgomery, *Design and Analysis of Experiment*, 6th ed., New York : Wiley, 2005.