

การลดสัดส่วนของเสียที่เกิดจากโพรงอากาศในกระบวนการขึ้นรูปไมโครชิป Reduction of Void Defective Proportion in Microchip Molding Process

สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ¹
Somkiat Tangjitsitcharoen¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดสัดส่วนของเสียที่เกิดจากโพรงอากาศในกระบวนการขึ้นรูปไมโครชิป โดยการประยุกต์ใช้ออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่ทำให้ขนาดรวมของโพรงอากาศทั้งภายนอกและภายในไมโครชิปมีค่าไม่เกิน 500 ไมครอน ซึ่งเป็นข้อกำหนดทางด้านคุณภาพ ในเบื้องต้นได้มีการระดมความคิดร่วมกับผู้เชี่ยวชาญด้านเทคนิคในการขึ้นรูปไมโครชิป เพื่อทำการศึกษาปัจจัยทั้งหมดที่นำจะมีผลต่อการเกิดโพรงอากาศตลอดจนการพิจารณาถึงข้อจำกัดต่างๆ ของปัจจัย โดยใช้หลักการของผังก้างปลา พบว่ามี 4 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องคือ แรงอัดของแม่พิมพ์ แรงฉีดเรซิน เวลาในการฉีดเรซิน และระยะเวลาในการให้ความร้อนกับเรซิน จากนั้นได้ประยุกต์ใช้หลักการออกแบบโดยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบ Box-Behnken Design เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยทั้ง 4 ที่ทำให้เกิดขนาดรวมของโพรงอากาศน้อยที่สุด จากผลการทดลองพบว่าทั้ง 4 ปัจจัย รวมทั้งมีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดโพรงอากาศ ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 คือ ระยะเวลาในการให้ความร้อนกับเรซิน 9 วินาที แรงฉีดเรซิน 10 kN แรงอัดของแม่พิมพ์ 280 Mpa และเวลาในการฉีดเรซิน 8 วินาที ได้ขนาดรวมของโพรงอากาศเฉลี่ยที่น้อยที่สุดเท่ากับ 218.25 ไมครอน จากการทดสอบเพื่อยืนยันผล ได้ขนาด

รวมของโพรงอากาศเฉลี่ยเท่ากับ 220.73 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ด้านคุณภาพ สามารถลดสัดส่วนของเสียจากโพรงอากาศได้ทั้งหมด เมื่อเทียบกับสัดส่วนของเสียก่อนการวิจัยประมาณ 2370 PPM

คำสำคัญ: ไมโครชิป กระบวนการขึ้นรูป แรงอัดของแม่พิมพ์ แรงฉีดเรซิน เวลาในการฉีดเรซิน ระยะเวลาในการให้ความร้อนกับเรซิน วิธีการพื้นผิวตอบสนอง

Abstract

The objective of this research is to reduce void defect proportion in the microchip molding process by utilizing the designed experiment to determine the optimum condition where no external and internal void space lies further than 500 microns, corresponding to the conventional standard. From the brainstorming of pertinent experts utilizing the fish bone diagram, potential 4 factors affecting void formation incorporate a) clamp pressure, b) injection force, c) injection time and d) the tablet preheat time. Further investigation employing a Response Surface Analysis with the Box-Behnken Design was carried

¹ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Tel. 08-9788-3654, E-mail: somkiat.t@eng.chula.ac.th

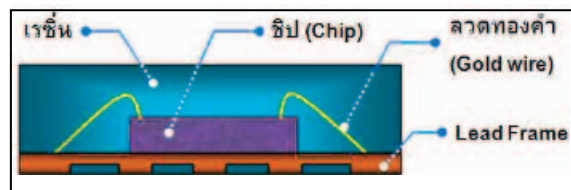
out to uncover the optimum condition for minimizing void formation and factors that affect the minimal occurrence of porosities ($\alpha \leq .05$). As results, the explored optimum conditions comprise the 9-second tablet preheat interval, along with the 10-kN injection force, 280-Mpa clamp pressure and the 8-second injection phase. The average minimal void formation generated from the aforementioned condition was revealed at 218.25 microns while the confirmation experiment produced the average void size of 220.73 microns. Through the developed optimum molding condition, the defect rate of 2,370 PPM at initial introduction can be decreased substantially.

Keyword: Microchip, Molding Process, Clamp Pressure, Injection Time, Tablet Pre-heat Time, Injection Force, Response Surface Analysis

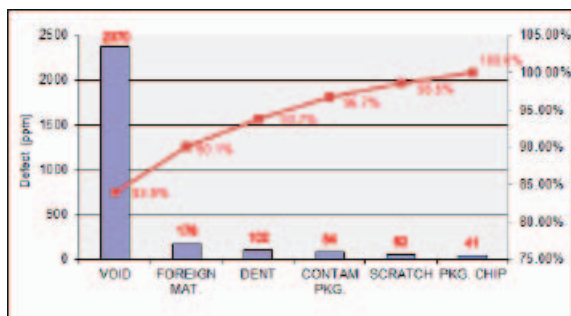
1. บทนำ

ไมโครชิปหรือไอซี (Integrated circuit: IC) คือชุดวงจรอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่ใช้เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์ทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ตู้เย็น พัดลม คอมพิวเตอร์ เป็นต้น ไมโครชิปอาจเรียกสั้นๆ ว่า ชิพ ซึ่งประกอบด้วยวงจรจำนวนมากที่เชื่อมต่อเข้าด้วยกัน วงจรชนิดนี้นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน เนื่องจากมีขนาดเล็ก ราคาถูก ใช้กระแสไฟน้อยและสามารถปฏิบัติงานได้อย่างรวดเร็ว จากรูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบหลักของไมโครชิปอันได้แก่ ลิตเฟรม ทำหน้าที่เป็นแกนกลางในการวางชิพและถูกเชื่อมต่อกับวงจรด้วยลวดทองคำ จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการขึ้นรูปด้วยเรซินเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับวงจรภายใน ปัจจุบันไมโครชิปถูกออกแบบให้มีขนาดเล็กและบางมาก แต่ฟังก์ชันการใช้งานยังคงมีความหลากหลายและประสิทธิภาพสูง

เมื่อพิจารณาสัดส่วนของเสียของไมโครชิปชนิดไม่มี



รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบหลักของไมโครชิป

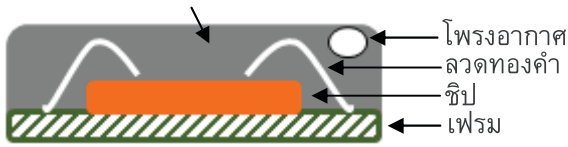


รูปที่ 2 กราฟแสดงสัดส่วนของเสียแต่ละชนิดของไมโครชิป LFBGA จากบริษัททรนศึกษา

ขาในกระบวนการขึ้นรูปไมโครชิปจากบริษัทที่เป็นกรณีศึกษาจากทั้งหมด 8 ชนิดพบว่าไมโครชิปชนิด LFBGA มีสัดส่วนของเสียเกิดขึ้นในปริมาณที่มากที่สุดประมาณ 2825 PPM เมื่อทำการจำแนกประเภทของของเสียออกมาพบว่า ของเสียที่เกิดจากโพรงอากาศมีปริมาณมากที่สุดประมาณ 2370 PPM ดังรูปที่ 2

เนื่องจากไมโครชิปชนิดนี้เป็นไมโครชิปชนิดใหม่ที่จะได้รับการพัฒนาขึ้นมาและยังไม่มีเคยมีการผลิตมาก่อนในบริษัททรนศึกษา อีกทั้งยังใช้ชิพที่มีขนาดเล็กและบางมากเพื่อลดขนาดของอุปกรณ์หลังจากประกอบเป็นผลิตภัณฑ์ ส่งผลต่อลักษณะการเคลื่อนที่ของเรซินในขณะที่ฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ โดยทำให้อากาศที่มีอยู่ในแม่พิมพ์หรือแทรกตัวอยู่ในเนื้อของเรซินเคลื่อนตัวได้ยากขึ้นและไม่สามารถไหลออกมาภายนอกแม่พิมพ์ได้ จึงเกิดเป็นโพรงอากาศหลังจากการฉีดขึ้นรูปแล้ว

โพรงอากาศที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการขึ้นรูป (Molding Process) สามารถจำแนกตามบริเวณการเกิดได้เป็น 2 แบบคือโพรงอากาศที่อยู่บริเวณผิวของงาน (External Void) และโพรงอากาศที่เกิดขึ้นภายใน



รูปที่ 3 ตัวอย่างโพรงอากาศภายในไมโครชิป (Internal Void) ของไมโครชิปชนิด LFBGA จากบริษัท กรณศึกษา

(Internal Void) ซึ่งลักษณะของโพรงอากาศที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 สำหรับข้อกำหนดทางด้านคุณภาพที่ยอมรับได้คือขนาดรวมของโพรงอากาศภายในและที่ผิวจะต้องไม่เกิน 500 ไมครอน และโพรงอากาศที่เกิดขึ้นจะต้องไม่สามารถทำให้มองเห็นชั้นส่วนภายในได้ ผลกระทบของโพรงอากาศภายนอกอาจทำให้รอย Mark ไม่ชัดเจน ส่วนผลกระทบในด้านคุณภาพการใช้งานนั้น บางครั้งอาจจะไม่ส่งผลต่อการใช้งานในระยะสั้น แต่เมื่อใช้ไปนานๆ ทั้งความร้อนและความเสื่อมสภาพจะมีผลทำให้ไมโครชิปมีอายุการใช้งานที่สั้นลง

2. วิธีการวิจัย

ในเบื้องต้นได้มีการศึกษาและวิเคราะห์หาปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อการเกิดโพรงอากาศ หลังจากนั้นผู้วิจัยจะประยุกต์ใช้หลักการออกแบบพื้นผิวตอบสนองแบบของ Box-Behnken Design [1] ซึ่งเป็นการออกแบบสามระดับสำหรับศึกษาพื้นผิวผลตอบ การออกแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากการออกแบบแฟกทอเรียล 2^k กับการออกแบบบล็อกไม่บริบูรณ์ ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพมากในด้านจำนวนของการทดลองที่ต้องการ และการออกแบบนี้ยังมีความสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้อีกด้วย ซึ่งจะทำให้สามารถลดปริมาณการทดลองแต่ได้ผลการทดลองที่เป็นที่ยอมรับได้ซึ่งจะมีความแตกต่างจากการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (Fractional Factorial Design) ที่การดำเนินการต่างๆของระบบหรือกระบวนการมีแนวโน้มที่จะถูกกำหนดโดยปัจจัยหลักและอันตรกิริยาขั้นต่ำเพียงบางตัวเท่านั้น จึงน่าจะเหมาะสมกับการกรอง

ปัจจัยที่มีจำนวนมากมากกว่าและมีประโยชน์ในส่วนของการรวมผลการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล 2 การทดลองหรือมากกว่าเข้าด้วยกันเพื่อให้เกิดการทดลองอย่างต่อเนื่องที่มีการออกแบบการทดลองที่ใหญ่กว่า สำหรับจำนวนการทดลองของ Box-Behnken Design ที่มีตัวแปร 3 ถึง 5 ตัวแปร สามารถคำนวณได้จาก

$$N = 4 \left(\frac{k}{2} \right) + n_0$$

เมื่อ k คือจำนวนตัวแปร

n_0 คือจุดกลางที่เพิ่มเข้าไปในแบบทดลอง

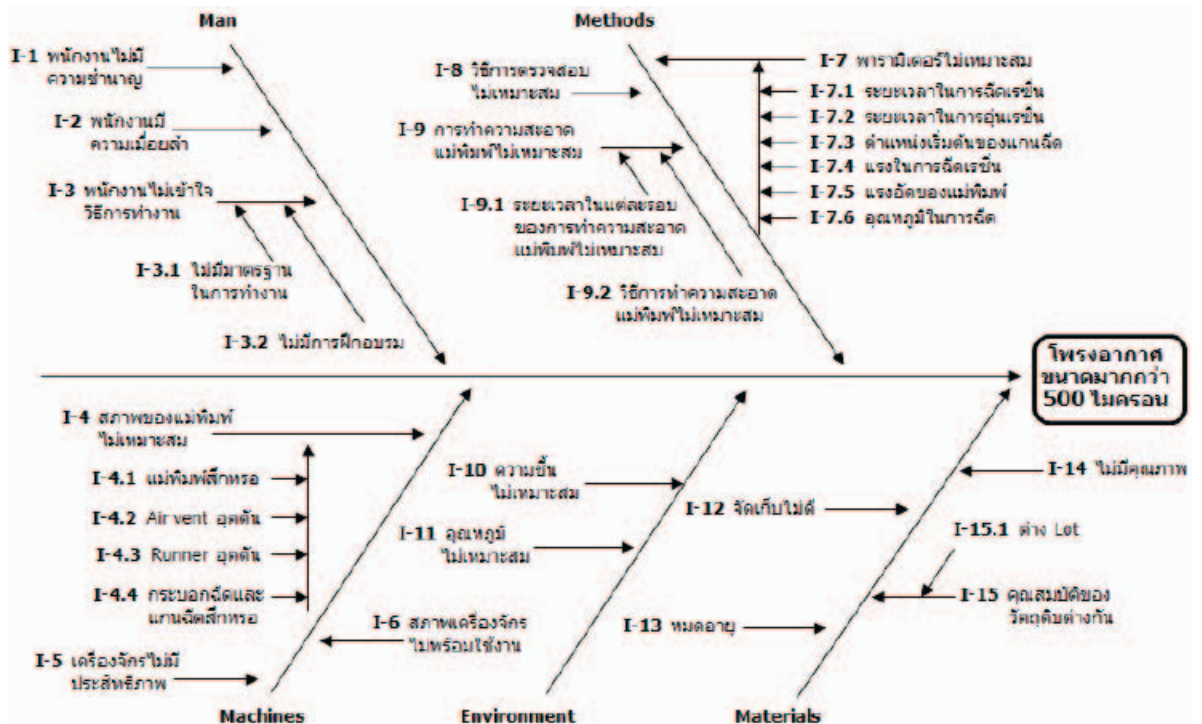
นอกจากนี้ การที่มีรูปแบบคล้าย Cubic ลูกบาศก์ 3 ระดับคือ -1, 0, +1 ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงการทดลองที่ระดับสูงสุดหรือต่ำสุด จากข้อจำกัดเรื่องความสามารถของเครื่องจักรและงบประมาณ ซึ่งต่างจากแบบทดลองของ Central Composite Design ที่มีลักษณะคล้ายทรงกลม 5 ระดับคือ $-\alpha, -1, 0, +1, +\alpha$ ทำให้ในการปรับค่าปัจจัยอาจทำได้ยากขึ้น

สำหรับการทดลองแบบเต็มรูปแบบ 3 ระดับ (Full Factorial Designs) นั้น ถึงแม้จะให้ผลการทดลองที่แม่นยำ แต่ใช้จำนวนการทดลองค่อนข้างมาก จึงไม่เหมาะกับการทดลองนี้ เนื่องจากราคาของตัวอย่างในการทดลองค่อนข้างสูง

2.1 การคัดเลือกปัจจัย

ในการเลือกปัจจัยที่มีอิทธิพลนั้น จะใช้การประยุกต์ใช้แผนภูมิแกงปลาและทำการวิเคราะห์โดยผู้เชี่ยวชาญที่มีความรู้ทางเทคนิคและประสบการณ์ในกระบวนการขึ้นรูปไมโครชิป พิจารณาจาก 5 ส่วนหลัก ซึ่งได้แก่ ปัจจัยอันเนื่องมาจากคน (Man) เครื่องจักร (Machine) วัตถุดิบ (Material) วิธีการ (Method) และจากสภาพแวดล้อม (Environment) แสดงดังรูปที่ 4

จากผังแกงปลาแสดงปัจจัยที่น่าจะเป็นไปได้ทั้งหมดของของเสียที่เกิดการเกิดโพรงอากาศ (ที่มีขนาดมากกว่า 500 ไมครอน) นำมาวิเคราะห์ผลกระทบและแนวทางแก้ไขได้ดังนี้



รูปที่ 4 ผังก้างปลาของปัญหาของเสียที่เกิดจากโรงอากาศมีขนาดเกิน 500 ไมครอน

เครื่องจักร: ความพร้อมของเครื่องจักร สภาพของแม่พิมพ์ กระบอกฉีดและแกนฉีดที่มีการสึกหรอ ทำให้การเคลื่อนที่ในขณะที่ฉีดมีการติดขัด ส่งผลต่อความเร็วและทิศทางการไหลของเรซิน นอกจากนี้การที่ Air Vent หรือ Runner อุดตัน อาจทำให้มีฟองอากาศหลงเหลืออยู่ในขณะฉีด จึงมีการควบคุมระยะเวลาในการทำความสะอาดและจัดทำมาตรฐานวิธีการทำความสะอาดของแม่พิมพ์ รวมทั้งมีการกำหนดอายุการใช้งาน

ผู้ปฏิบัติงาน: พนักงานไม่มีความชำนาญ ไม่เข้าใจวิธีการทำงาน หรือแม้กระทั่งอาการเหนื่อยล้าของพนักงาน ทำให้ไม่สามารถตรวจสอบความผิดปกติของผลิตภัณฑ์หรือเครื่องจักรได้ก่อนที่จะเกิดปัญหา ซึ่งได้มีการฝึกอบรม ทดสอบและมีการจัดทำเอกสารตรวจสอบ รวมทั้งการจัดเตรียมอุปกรณ์แบ่งเบาภาระและการบริหารเรื่องกำลังคน

สภาพแวดล้อม: ความชื้นและอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสม ส่งผลต่อคุณสมบัติของเรซิน ซึ่งมีผลต่อเนื่องไปถึงลักษณะของการไหล ทำให้อากาศหลงเหลืออยู่ภายในเนื้อของเรซิน จึงมีการควบคุมความชื้นในบริเวณที่เก็บเรซินและไลน์การผลิต โดยมีการตรวจสอบและบันทึกค่าทุกวัน

วัตถุดิบ: การจัดเก็บวัตถุดิบและการตรวจสอบคุณภาพของวัตถุดิบ โดยเฉพาะในส่วนของเรซิน กำหนดให้มีการจัดทำมาตรฐานการจัดเก็บวัตถุดิบและมีการตรวจสอบอยู่ตลอดเวลา รวมทั้งมีการส่งข้อมูลกลับไปยังผู้ผลิตเพื่อทำการปรับปรุงคุณภาพอยู่เสมอ

วิธีการ: วิธีการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์รวมถึงวิธีการตรวจสอบที่ไม่เหมาะสม อาจทำให้ผลที่ได้ผิดจากความเป็นจริง จึงมีการจัดทำวิธีการวัดหรือตรวจสอบขนาดของโรงอากาศให้เป็นมาตรฐาน นอกจากนี้ยังมี

การกำหนดวิธีการทำความสะอาดของแม่พิมพ์ ตลอดจนจำนวนครั้งของการผลิตที่ไม่ทำให้เกิดของเสียและตั้งค่าอัตโนมัติไว้ให้เครื่องจักรเตือนเมื่อถึงเวลาทำความสะอาด สำหรับพารามิเตอร์บางตัวนั้นยังไม่สามารถหาค่าที่เหมาะสมในการปรับค่าได้ ได้แก่

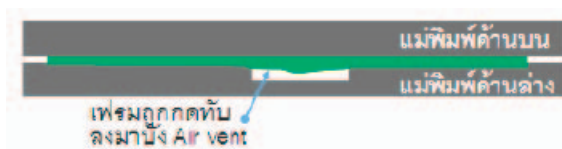
1. แรงอัดของแม่พิมพ์ (Clamp Pressure) มีผลต่อการกดทับสัดเฟรมซึ่งมีความหนาประมาณ 300 ไมครอน วางอยู่ระหว่างแม่พิมพ์ด้านล่างและด้านบนดังรูปที่ 5 แรงกดทับที่มากเกินไปอาจทำให้สัดเฟรมเกิดการยุบหรืองอไปปิดบัง Air vent ซึ่งเป็นช่องทางให้อากาศไหลออกจากแม่พิมพ์ จนทำให้อากาศที่อยู่ภายในแม่พิมพ์และเรซินระบายออกมาได้ยากขึ้น เกิดเป็นโพรงอากาศหลังฉีดขึ้นรูป แต่แรงกดที่น้อยเกินไป อาจทำให้เรซินเกิดการรั่วไหลในขณะที่ฉีดได้

จากการทดสอบเบื้องต้น โดยเปลี่ยนระดับของแรงอัด แล้วตรวจสอบระยะเวลาการรั่วไหลของเรซิน ซึ่งสามารถกำหนดช่วงของแรงอัดของแม่พิมพ์ โดยที่ไม่ทำให้เรซินรั่วไหลเกินขอบเขตที่กำหนดไว้ ได้ดังนี้

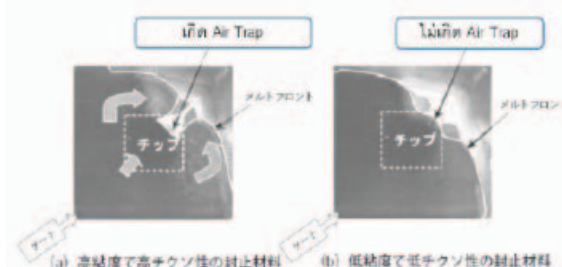
- ระดับต่ำ กำหนดแรงอัดของแม่พิมพ์ 280 Mpa
- ระดับสูง กำหนดแรงอัดของแม่พิมพ์ 300 Mpa

2. แรงฉีด (Injection Force) มีผลต่อการกดอัดฟองอากาศที่มีอยู่ภายในแม่พิมพ์หรือเรซินให้แตกออก และแพร่กระจายหรือไหลออกไปจากแม่พิมพ์ได้ง่ายขึ้น [2] แต่แรงฉีดที่สูงเกินไป อาจทำให้เกิดการรั่วไหลของเรซินออกมาภายนอกแม่พิมพ์หรือมีโอกาสเสี่ยงที่จะทำให้แรงที่เกิดจากการไหลของมวลเรซินไปปะทะกับเส้นลวดทองคำมีค่ามากขึ้น และอาจทำให้เส้นลวดทองคำสัมผัสกัน ซึ่งจะทำให้เกิดการลัดวงจร เป็นของเสียที่จัดอยู่ในขั้นรุนแรง ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบเบื้องต้น โดยการเปลี่ยนระดับของแรงฉีด แล้วตรวจสอบระยะเวลาการรั่วไหลของเรซิน ซึ่งต้องอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้และระยะห่างของเส้นลวดทองคำจะต้องมากกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดทองคำ ซึ่งสามารถกำหนดช่วงของแรงที่ใช้ในการฉีดได้ดังนี้

- ระดับต่ำ กำหนดแรงฉีดเรซิน 6 kN
- ระดับสูง กำหนดแรงฉีดเรซิน 10 kN



รูปที่ 5 สัดเฟรมที่ถูกแม่พิมพ์กดทับมาบังช่อง Air Vent



รูปที่ 6 แสดงการเกิด Air Trap ในสภาวะที่เรซินมีความหนืดสูง [2]

3. ระยะเวลาในการฉีดเรซิน (Injection Time) คือระยะเวลาที่ใช้ในการฉีดเรซินเข้าไปในแม่พิมพ์ ตั้งแต่แกนฉีดเริ่มเคลื่อนที่จนถึงจุดที่แกนฉีดหยุดนิ่งซึ่งเป็นจังหวะเริ่มนับเวลาของการอบ (Cure Time) ระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปในการฉีดทำให้ความหนืดแต่ละช่วงไม่เท่ากัน ซึ่งอาจอยู่ในช่วงที่ไม่เหมาะสม พิจารณาในรูปที่ 6 [2] ในส่วนของ (a) ค่าความหนืดสูงมีผลต่อความเร็วของเรซินที่ไหลเข้าไปในบริเวณต่างๆ ของแม่พิมพ์ ทำให้การไหลของเรซินบริเวณกลางชิปช้าลง ในขณะที่การไหลของเรซินรอบๆ ชิปจะเร็วขึ้น ซึ่งเมื่อเรซินที่ไหลมาจากด้านบนของชิปมารวมตัวกับเรซินที่ดันตัวขึ้นมาจากด้านล่างของชิป จะทำให้เกิดเป็น Air Trap ขนาดใหญ่ ซึ่งการเกิด Air Trap ขนาดใหญ่เช่นนี้เป็นปัจจัยสำคัญที่จะทำให้หลงเหลือรูหรือโพรงอากาศที่เรียกว่า Weld Void ในเนื้อเรซินแต่จะไม่พบ Air Trap เมื่อเรซินมีความหนืดต่ำจากรูปในส่วนของ (b)

นอกจากนี้ระยะเวลาของการฉีดที่เร็วเกินไปจะมีผลต่อการเคลื่อนที่ของมวลเรซินเข้าไปปะทะกับเส้นลวดทองคำให้เคลื่อนที่มาใกล้กันหรือสัมผัสกันแล้วทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้นได้ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบเบื้องต้น โดยการเปลี่ยนระยะเวลาในการฉีด แล้วตรวจสอบระยะเวลา

รั่วไหลของเรซิน ซึ่งต้องอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้และระยะห่างของเส้นลวดทองคำจะต้องมากกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดทองคำ ซึ่งสามารถกำหนดช่วงของระยะเวลาในการฉีดเรซินได้ดังนี้

- ระดับต่ำ กำหนดระยะเวลาในการฉีดเรซิน 8 วินาที
- ระดับสูง กำหนดระยะเวลาในการฉีดเรซิน 12 วินาที

4. ระยะเวลาในการอุ่นเรซิน (Tablet Pre-heat Time) คือ ระยะเวลาในการให้ความร้อนกับเรซินซึ่งมีลักษณะเป็นผงอัดเม็ด ให้หลอมเหลวมีสถานะเหมาะสมก่อนที่จะถูกฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ ซึ่งมีความสัมพันธ์ต่อเนื่องกับระยะเวลาในการฉีดเรซิน สำหรับช่วงที่เหมาะสมในการฉีดเรซินคือช่วงที่เรซินมีสถานะเป็นเจล มีค่าเท่ากับ 35 วินาที ดังนั้นช่วงเวลาในการให้ความร้อนกับเรซินรวมกับระยะเวลาที่ใช้ในการฉีดจะต้องไม่เกิน 35 วินาที ซึ่งโดยทั่วไปจะทำการตั้งค่าให้เร็วที่สุด เพื่อลดเวลาในการผลิต แต่จะต้องคำนึงถึงผลกระทบทางด้านคุณภาพด้วยสถานะของเรซิน สามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วง แสดงดังรูปที่ 7 ดังนี้

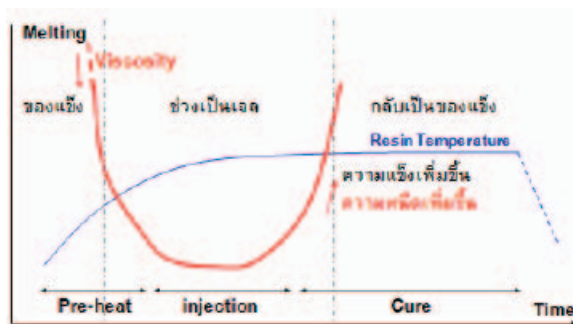
ช่วงแรก คือช่วงที่เรซินมีลักษณะเป็นผงอัดเม็ด มีสถานะเป็นของแข็งซึ่งเมื่อโดนความร้อน ความแข็งของเรซินจะเริ่มลดลง

ช่วงที่สอง คือช่วงที่เรซินเป็นเจลสูงสุด ช่วงนี้ถือว่าเป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดที่จะฉีดเรซินเข้าไปยังแม่พิมพ์

ช่วงที่สาม คือช่วงที่เรซินจะค่อยๆเปลี่ยนสถานะจากการเป็นเจลกลับมาเป็นของแข็ง หลังการฉีดขึ้นรูป

ผู้วิจัยได้ทดสอบเบื้องต้นโดยการปรับค่าระยะเวลาในการอุ่นเรซิน จากนั้นจึงทำการฉีดเรซินเพื่อตรวจสอบระยะการรั่วไหลของเรซิน ซึ่งสามารถกำหนดช่วงของระยะเวลาในการอุ่นเรซินที่ไม่ทำให้เกิดการรั่วไหลของเรซินเกินขอบเขตที่กำหนดไว้ ได้ดังนี้

- ระดับต่ำ กำหนดระยะเวลาในการอุ่นเรซิน 9 วินาที
- ระดับสูง กำหนดระยะเวลาในการอุ่นเรซิน 13 วินาที



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับเวลา [3]

2.2 การทดลองเพื่อหาอิทธิพลของปัจจัย

หลังจากที่ได้ผลจากการวิเคราะห์ปัจจัยเบื้องต้นแล้ว ซึ่งพบว่ามี 4 ปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อการเกิดโพรงอากาศ ผู้วิจัยจึงได้ประยุกต์ใช้หลักการออกแบบโดยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบ Box-Behnken Design เพื่อวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองระหว่างตัวแปรกับค่าตอบสนองและหาระดับที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย [4]

สำหรับการทดลอง 1 การทดลอง จะประกอบด้วยจำนวนรันเท่ากับ 27 รัน โดยกำหนดให้มีการทำซ้ำ 2 ครั้งในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง เพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลองและความเที่ยงตรงของผลการทดลอง ดังนั้นในการทดลองนี้จะทำการทดลองทั้งหมด 54 รัน ซึ่งแบ่งระดับของปัจจัยเป็น 3 ระดับดังตารางที่ 1 ระดับของปัจจัยได้มาจากการทดลองเบื้องต้นที่มีการพิจารณาถึงความเป็นไปได้และข้อจำกัดของแต่ละปัจจัย

ตารางที่ 1 แสดงปัจจัยและระดับของปัจจัย

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย			หน่วย
	Low	Medium	High	
	(-1)	(0)	(+1)	
A	280	290	300	Mpa
B	6	8	10	kN
C	8	10	12	วินาที
D	9	11	13	วินาที

การทดลองครั้งนี้มีการจัดลำดับการทดลองให้เป็นแบบสุ่มเพื่อลดอคติของการทดลอง ผลการทดลองในตารางที่ 2 จะแสดงลำดับของการทดลอง แต่ละวันจะใช้ระดับของปัจจัยที่ต่างกันตามแบบการทดลองของ Box-Behnken ทำให้ได้ค่าตอบสนอง (Response) เป็นขนาดรวมของโพรงอากาศและมีการทดลองซ้ำหนึ่งการทดลอง ผลของขนาดรวมของโพรงอากาศ ทั้งสองครั้งแสดงข้อมูลใน Y1 และ Y2 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 แสดงผลของขนาดรวมของโพรงอากาศ

การทดลอง	ปัจจัย					Void Size
	A	B	C	D	Y1	Y2
1	280	6	10	11	529	515
2	300	6	10	11	357	374
3	280	10	10	11	301	329
4	300	10	10	11	553	520
5	290	8	8	9	440	414
6	290	8	12	9	516	525
7	290	8	8	13	406	413
8	290	8	12	13	294	325
9	280	8	8	11	381	374
10	300	8	8	11	397	428
11	280	8	12	11	371	353
12	300	8	12	11	388	405
13	290	6	10	9	444	453
14	290	10	10	9	541	505
15	290	6	10	13	456	422
16	290	10	10	13	309	331
17	280	8	10	9	333	348
18	300	8	10	9	521	535
19	280	8	10	13	424	387
20	300	8	10	13	262	273
21	290	6	8	11	496	481
22	290	10	8	11	412	431
23	290	6	12	11	418	413
24	290	10	12	11	448	420
25	290	8	10	11	484	442
26	290	8	10	11	468	431
27	290	8	10	11	452	433

หลังจากที่ทำการทดลองตามแบบ Box-Behnken Design แล้ว ผลการทดลองที่ได้จะนำมาเข้าสู่กระบวนการของการเลือกสมการทางคณิตศาสตร์ โดยใช้โปรแกรม

มินิแทบ เพื่อหาจุดที่เหมาะสมของค่าตอบสนอง ซึ่งจะใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติเชิงวิศวกรรม ในการเลือกรูปแบบสมการจากผลการวิเคราะห์จากแบบทดลองของ Box-Behnken [5], [6]

เมื่อพิจารณาผลของการวิเคราะห์สมการในทอมพูลควอดราติก (Full Quadratic) ในตารางที่ 3 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% คือค่า P-value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยนั้นมีผลกระทบต่อการศึกษาการเกิดโพรงอากาศ นอกจากนี้ยังพบว่าอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยมีผลต่อการเกิดโพรงอากาศ ยกเว้นอันตรกิริยาระหว่างแรงอัดของแม่พิมพ์กับระยะเวลาในการฉีดเรซิน ($A \times C$) ไม่มีอิทธิพลพอที่จะสรุปว่าเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลหรือมีผลกระทบต่อการศึกษาการเกิดโพรงอากาศ เนื่องจากค่า P-value ที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่ามากกว่า 0.05

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในสมการแบบพูลควอดราติก (Full Quadratic)

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

สมการในทอมพูลควอดราติก (Full Quadratic) ในตารางที่ 4 ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 เท่ากับ 95.9 เปอร์เซนต์ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2_{adj} เท่ากับ 94.4 เปอร์เซนต์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 1 ถือว่าเป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ค่อนข้างน่าพอใจ สำหรับ P-Value ของ

Regression Linear Square และ Interaction มีค่าน้อยมาก แสดงว่ามีผลต่อรูปแบบของสมการ ในการพิจารณาความสมรูปของสมการ (Lack-of-fit) มีค่าเท่ากับ 0.324 ซึ่งมากกว่า α ทำให้สรุปได้ว่าเทอมของพหุคูณควอดราติก (Full Quadratic) มีความพอเพียง

ตารางที่ 4 แสดงการวิเคราะห์ผลการถดถอย

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

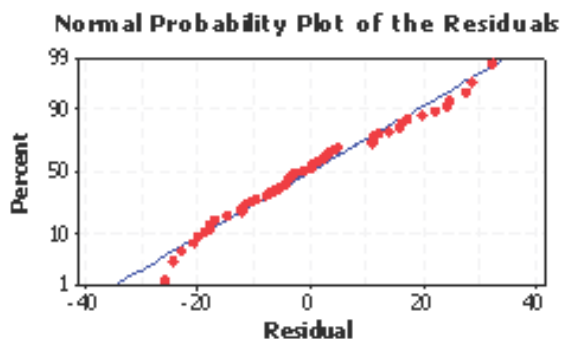
พิจารณาในรูปที่ 8 จากผลการทดสอบกราฟการกระจายของค่า Residual ว่ามีการแจกแจงแบบปกติด้วยวิธีของโคลโมโกรอฟ-สเมียร์นอฟ (Kolmogorov-Smirnov Normality Test) ซึ่งมีค่า P-Value > 0.15 และพิจารณาจากการกระจายตัวของข้อมูล ซึ่งมีลักษณะเป็นไปตามแนวเส้นตรงหรือเกือบเป็นเส้นตรงทำให้เชื่อมั่นได้ว่า Residuals มีการแจกแจงแบบปกติ

พิจารณากราฟรูปที่ 9 แสดงถึงการกระจายตัวที่ไม่แน่นอนหรือไม่มีความสัมพันธ์ที่คล้ายกับปากแตร ทำให้สามารถประมาณการได้ว่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนคงที่

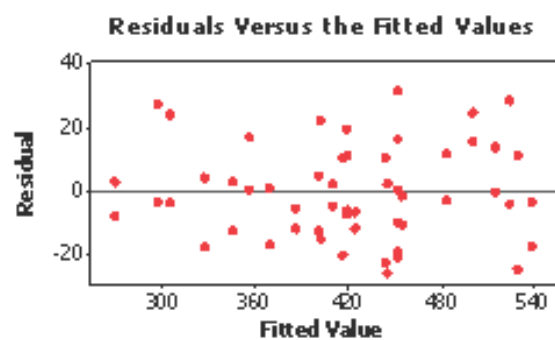
พิจารณารูปที่ 10 จากกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง พบว่าไม่มีการแปรผันตามปัจจัยหรือลำดับการทดลอง จึงประมาณได้ว่าสัดส่วนตกค้างนี้มีการกระจายตัวแบบอิสระ

2.3 การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมและการหาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดโพรงอากาศ

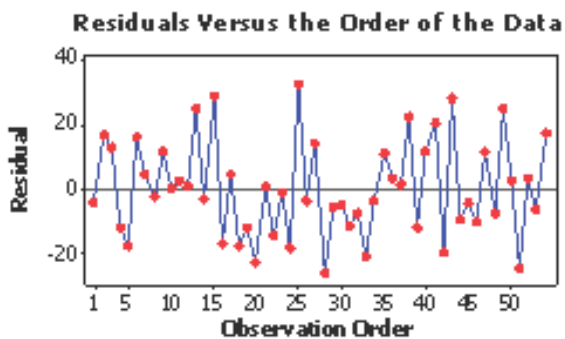
การทดลองนี้ได้ประยุกต์ใช้โปรแกรมมินิแทบในการวิเคราะห์ Response Optimizer เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์ ซึ่งจะทำได้ขนาด



รูปที่ 8 กราฟ Normal Probability Plot ของ Residuals



รูปที่ 9 กราฟ Residuals และ Fitted Value



รูปที่ 10 กราฟ Residuals และ Observation Order

รวมของโพรงอากาศที่น้อยที่สุด หรือมีขนาดรวมไม่เกิน 500 ไมครอน ซึ่งอ้างอิงจากข้อกำหนดด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาควบคู่กันไปด้วยคือ การทดลองจะต้องไม่ทำให้เกิดข้อบกพร่องของคุณสมบัติทางกายภาพของไมโครชิปในด้านอื่นๆ เนื่องจากการปรับค่าพารามิเตอร์ใดๆ จะส่งผลต่อการเกิดของเสียในด้าน

Optimal D	Hi	Clamp pr	Inj. for	Inj. tim	Tab. tim
0.93917	Lo	300.0	10.0	12.0	13.0
		280.0	6.0	8.0	9.0
Void siz					
Minimum					
d = 0.93917					

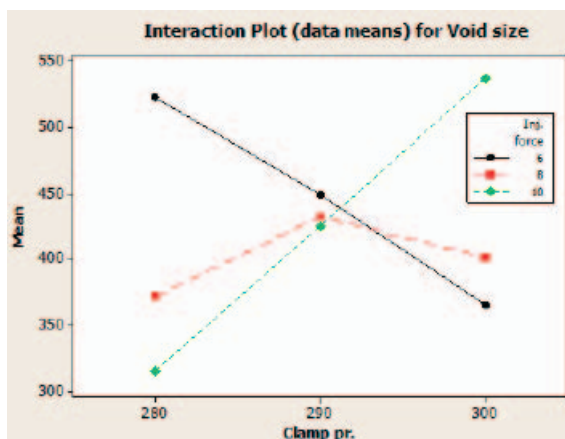
รูปที่ 11 กราฟแสดงจุดตัดที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย

อื่นๆ ด้วยเช่นกัน

จากรูปที่ 11 แสดงจุดตัดที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย ทำให้ได้สภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ขนาดรวมของโพรงอากาศมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 218.25 ไมครอน

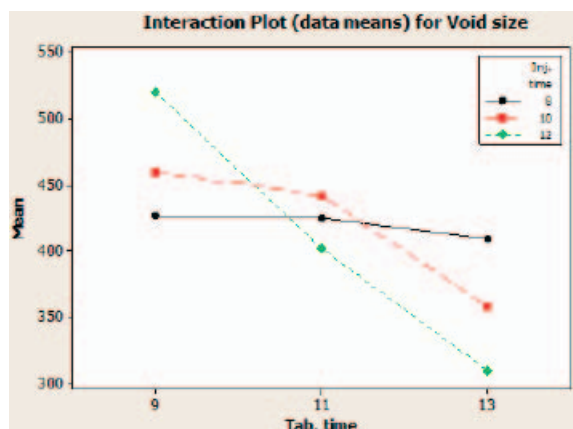
เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์แต่ละตัวกับขนาดรวมของโพรงอากาศ จากรูปที่ 12 พบว่าขนาดของโพรงอากาศมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อทำการลดแรงอัดของแม่พิมพ์ ตรงกันข้ามกับแรงฉีดที่ต้องใช้ในระดับสูงเมื่ออ้างอิงจากการทดลอง ซึ่งทั้งสองปัจจัยนี้จะมีอันตรกิริยาต่อกัน การปรับแรงฉีดในระดับที่สูงขึ้นอาจช่วยให้ขนาดรวมของโพรงอากาศลดลงได้ แต่ขนาดรวมของโพรงอากาศอาจจะเพิ่มขึ้นถ้าหากปรับขนาดของแรงอัดของแม่พิมพ์ในระดับที่สูงเกินไป นอกจากนี้ระดับของแรงฉีดที่สูงเกินไปจะมีโอกาสเสี่ยงที่เรซินจะรั่วไหลออกมาภายนอกแม่พิมพ์ได้ ส่วนในกรณีของระยะเวลาในการฉีดและระยะเวลาในการให้ความร้อนกับเรซินจะเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของเรซินในเรื่องของความหนืดจากการไหลและการหลอมเหลว ซึ่งได้มีการอธิบายในส่วนของการวิเคราะห์ปัจจัย

จากรูปที่ 13 พบว่าค่าของระยะเวลาในการฉีดและระยะเวลาในการให้ความร้อนกับเรซินที่ระดับสูงสุดของการทดลอง มีแนวโน้มที่จะทำให้ขนาดรวมของโพรงอากาศลดลง แต่ทั้งนี้การเลือกปรับพารามิเตอร์ทั้งสองค่านี้จะคำนึงถึงความสามารถของเครื่องจักรรวมทั้งคุณสมบัติเรื่องระยะเวลาการเป็นเจล ซึ่งเป็นช่วงระยะ

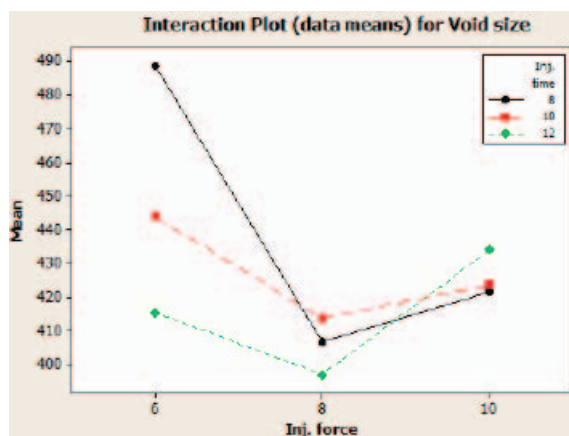


รูปที่ 12 กราฟ Interaction ระหว่างแรงอัดและแรงฉีดกับขนาดเฉลี่ยของโพรงอากาศ

เวลาที่เหมาะสมต่อการฉีด รวมทั้งการคำนวณเพื่อลดเวลาในการผลิต ในกรณีของการลดระยะเวลาในการฉีด จะทำให้ความเร็วในการไหลของเรซินเพิ่มมากขึ้น อาจทำให้เกิดการปะทะกันระหว่างมวลเรซินกับเส้นลวดทองคำอย่างรุนแรง ทำให้เส้นลวดทองคำเคลื่อนที่ไปใกล้กันหรือสัมผัสกัน เกิดการลัดวงจรขึ้น (Short Circuit) ซึ่งถือว่าเป็นของเสียในกลุ่มที่รุนแรง ซึ่งระดับที่ใช้ในการทดลองนี้ได้มีการทดลองเบื้องต้นแล้วพบว่าไม่ทำให้เกิดของเสียในกลุ่มดังกล่าว ในส่วนของระยะเวลาในการให้ความร้อนกับเรซิน โดยปกติแล้วจะมีการปรับค่าไว้ให้เร็วที่สุดที่เครื่องจะทำได้ เพื่อลดเวลาในการผลิต อย่างไรก็ตามจะต้องคำนึงถึงความสัมพันธ์กับระยะเวลาในการฉีด ใน



รูปที่ 13 กราฟ Interaction ระหว่างเวลาในการให้ความร้อนกับเรซินและเวลาที่ใช้ในการฉีดกับขนาดเฉลี่ยของโพรงอากาศ



รูปที่ 14 กราฟ Interaction ระหว่างแรงฉีดและเวลาที่ใช้ในการฉีดกับขนาดเฉลี่ยของโพรงอากาศ

เรื่องของระยะเวลาการเป็นเจลด้วยเช่นกัน

พิจารณารูปที่ 14 พบว่าแม้จะมีบางช่วงที่ทำให้ขนาดรวมของโพรงอากาศต่ำที่สุดแต่ทั้งนี้ในการเลือกปรับพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับเวลา จะต้องคำนึงถึงความสามารถในการผลิตด้วยซึ่งจะคล้ายกับกรณีของระยะเวลาในการให้ความร้อนกับเรซิน โดยจะพิจารณาว่าหากขนาดรวมของโพรงอากาศที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนัก จะทำการเลือกปรับให้ใช้เวลาที่น้อยที่สุดเพื่อให้สามารถผลิตได้มากขึ้น ส่วนอัตราการไหลระหว่างแรงอัดของแม่พิมพ์กับระยะเวลาในการให้ความร้อนกับเรซินนั้นจะมีความเกี่ยวเนื่องกัน เนื่องจากในช่วงเริ่มต้นที่มีการอัดของแม่พิมพ์ด้านบนและด้านล่าง จนกระทั่งเครื่องจักรทำแรงอัดได้เต็มที่ จะเป็นช่วงเวลาที่เรซินได้รับความร้อน แต่หลังจากที่แม่พิมพ์ทำแรงอัดได้เต็มที่แล้วจะเป็นจังหวะที่เริ่มมีการฉีดเรซิน ดังนั้นระยะเวลาในการฉีดเรซินนั้นจึงไม่มีความเกี่ยวข้องกับแรงอัดของแม่พิมพ์ สอดคล้องกับผลจากการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าไม่มีอันตรกิริยาต่อกัน

ในการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองและสมการถดถอย หรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้น เพื่อที่จะใช้ในการประมาณค่าของพารามิเตอร์ของแบบจำลอง ซึ่งถ้าพื้นผิวตอบสนองที่สร้างขึ้นมานี้ สามารถประมาณค่าฟังก์ชัน

ของผลตอบได้ดีพอ ในการพยากรณ์ค่าพารามิเตอร์ในระบบจริงก็就会有ความแม่นยำและน่าเชื่อถือมากขึ้น รวมทั้งสามารถปรับแต่งค่าของพารามิเตอร์ให้ได้ผลตอบสนองได้ตามต้องการ

จากตารางที่ 5 ซึ่งสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดโพรงอากาศในรูปแบบ Unicode Unit ซึ่งสามารถเลือกได้ในส่วนการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ สามารถใช้เป็นข้อมูลในการเขียนเป็นแบบจำลองของสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

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

จากรูปที่ 15 พิจารณาอิทธิพลร่วมของแรงฉีดและแรงอัดของแม่พิมพ์สามารถประมาณได้ว่าขนาดรวมของโพรงอากาศมีแนวโน้มที่จะลดลงต่ำที่สุดเมื่อปรับค่าแรงฉีดที่ระดับสูงและแรงอัดของแม่พิมพ์ที่ระดับต่ำเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยพบว่าแรงฉีดและระยะเวลาในการอุ่นเรซินมีอิทธิพลที่ค่อนข้างมากเมื่อเทียบ

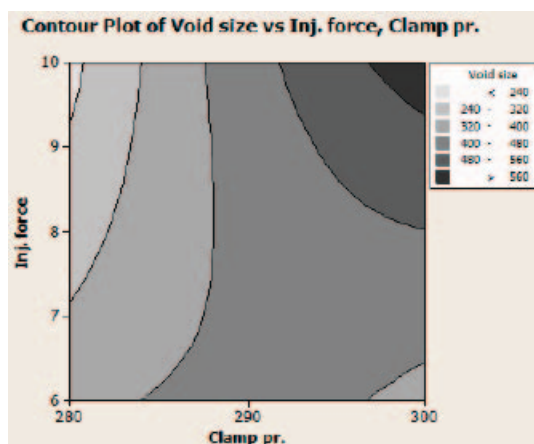
กับแรงอัดของแม่พิมพ์หรือระยะเวลาในการฉีด แสดงให้เห็นว่าความหนืด แรงและความเร็วมีผลต่อการเคลื่อนที่ของเรซินที่ไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ ผ่านชิปและเส้นลวดทองคำ แรงฉีดในระดับสูงจะเพิ่มโอกาสในการกดอัดฟองอากาศให้มีขนาดเล็กลง ทำให้ง่ายต่อการเคลื่อนที่ออกมาภายนอกแม่พิมพ์ผ่านทางช่องระบายอากาศหรือที่เรียกว่า Air Vent แต่ทั้งนี้ก็ต้องควบคุมไม่ให้สูงเกินกว่าช่วงที่กำหนดไว้ เนื่องจากมีผลต่อการ รั่วไหลของเรซินนั่นเอง ส่วนแรงอัดของแม่พิมพ์และระยะเวลาในการฉีด ถึงแม้เมื่อเทียบสัดส่วนแล้วจะมีอิทธิพลไม่เท่ากับแรงฉีดและระยะเวลาในการอุ่นเรซิน แต่ก็ยังมีผลที่ค่อนข้างชัดเจน รวมทั้งยังมีผลต่อการเกิดของเสียในลักษณะอื่นด้วย

ตารางที่ 5 ตารางแสดงสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดโพรงอากาศ (Unicode Unit)

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

2.4 การทดสอบเพื่อยืนยันผล

หลังการตรวจสอบผลการทดลองทั้งหมด 10 ล็อต ล็อตละ 15 ข้อมูล ไม่พบข้อบกพร่องใดๆ ที่ทำให้งานเป็นของเสีย ได้ขนาดรวมของโพรงอากาศเฉลี่ยเท่ากับ 220.73 ไมครอน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 10.07 ไมครอน มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ได้มีการตรวจสอบสมมติฐานเรื่องความแตกต่าง



รูปที่ 15 พื้นผิวตอบสนองระหว่างขนาดรวมของโพรงอากาศกับอิทธิพลร่วมของแรงฉีดและแรงอัดของแม่พิมพ์

ของค่าเฉลี่ยของโพรงอากาศที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากสมการ ที่ระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 ผลจากการคำนวณได้ค่า P-value = 0.1936 ซึ่งมีค่ามากกว่า α จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยของโพรงอากาศที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากสมการไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สามารถเชื่อถือได้

3. สรุป

ผลการออกแบบการทดลอง ได้สภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ขนาดรวมของโพรงอากาศน้อยที่สุดคือ 218.25 ไมครอน ได้แก่แรงอัดของแม่พิมพ์ 280 Mpa แรงฉีด 10 kN ระยะเวลาในการฉีดเรซิน 8 วินาทีและระยะเวลาในการอุ่นเรซิน 9 วินาที ซึ่งสามารถลดสัดส่วนของเสียที่เกิดจากโพรงอากาศได้ทั้งหมดเมื่อเทียบจากสัดส่วนของเสียก่อนการวิจัยเท่ากับ 2370 PPM

การทำวิจัยครั้งนี้ได้กำหนดปัจจัยหลักทั้งหมด 4 ปัจจัย ส่วนปัจจัยอื่นๆ ที่ผู้วิจัยได้กำหนดหรือจำกัดไว้ให้เป็นเพียงพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดค่าไว้เนื่องจากลักษณะการออกแบบไว้ในช่วงของการพัฒนาผลิตภัณฑ์ ยกตัวอย่างเช่น อุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่กำหนดค่าไว้ เนื่องจากการออกแบบจะคำนึงถึงสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิง

ความร้อนของวัสดุมาแล้ว ซึ่งจำกัดในเรื่องของการขยายตัวของลีดเฟรม นอกจากนี้การควบคุมคุณสมบัติของวัสดุอย่างเช่น เรซินหรือลีดเฟรม จะต้องมีการควบคุมคุณภาพในแต่ละล็อตการผลิต รวมถึงมาตรฐานในการจัดเก็บ ในส่วนระยะเวลาในการให้ความร้อนกับเรซินอาจสามารถพิจารณาให้กำหนดเป็นค่าคงที่ไว้ คือตั้งค่าไว้ให้เร็วที่สุดแล้วทำการปรับค่าเฉพาะเวลาในการฉีด เพื่อให้เหลือเพียง 3 ปัจจัยในการทดลองคือ แรงอัดของแม่พิมพ์ แรงฉีดและระยะเวลาในการฉีด ซึ่งอาจทำให้ควบคุมการทดลองได้ง่ายขึ้น

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Parames Chutima, *Engineering Design of Experiment*, 1st ed. Bangkok: Chulalongkorn University, 2002.
- [2] M. Yoshii, Y. Mizukami, and H. Shoji, *Evaluation*

Technologies on Moldability of Epoxy molding Compounds for Encapsulation of Semiconductor.

- [3] Wallapa Techasuk, "Molding process improvement in peripheral semiconductor industry," A thesis for the degree of master of engineering program, Industrial engineering, Graduate school, Chulalongkorn University, 2009.
- [4] Pairote Wiriyacharee, *Response surface design*, 1st ed, Chiang Mai: Faculty of Agro Industry Chiang Mai University, 2001.
- [5] Channarong Rungruang and Somkiat Tangjitsitcharoen, "Investigation of dry cutting and mist cutting in ball end milling based on response surface analysis," in *Proceedings of the 40th International conference on Computer and Industrial Engineering*, 2010.
- [6] T. Somkiat, A. Somchart, and T. Sirichan, *In-Process Monitoring and Prediction of Surface Roughness on CNC turning by using Response Surface Analysis*. Proceeding of the 36th International MATADOR Conference 2010, pp. 213-216.