

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

การศึกษาเชิงทดลองถึงอิทธิพลของความหนาที่มีผลต่อคุณภาพของเลนส์ใน
กระบวนการขึ้นรูปที่มีความแม่นยำสูง
**Experimental Study on the Effect of Thickness on Defection of Optical Glass in
Precision Molding Process**

นิรันดร์ ปลื้มกระจ่าง¹, จารุวัตร เจริญสุข²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
กรุงเทพฯ 10520

* ติดต่อ: โทรศัพท์: 089 916 2737, โทรสาร: 025 646 447

E-mail: nirund.p.KMITL@hotmail.com , kcjaruw@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเชิงทดลองเพื่อค้นหาพารามิเตอร์ที่เป็นปัจจัยทำให้เกิดงานเสียในลักษณะของการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างของชิ้นเลนส์ในกระบวนการ Precision Moulding Process จากสมมุติฐานเกี่ยวกับสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของวัสดุผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของความหนาของเลนส์ก่อนการขึ้นรูป ผลการทดลองพบว่าเมื่อเราปรับลดขนาดของความหนาของเลนส์ก่อนทำการขึ้นรูปที่ค่า 25 ไมครอนจากความหนาเดิมเราสามารถลดงานเสียจากการขึ้นรูปที่ไม่สมบูรณ์ได้เพราะการขึ้นรูปชิ้นเลนส์ที่มีความหนาที่มากเกินไปนั้น เมื่อวัสดุได้รับความร้อนขณะทำการขึ้นรูปชิ้นเลนส์จะเกิดการขยายตัวเนื่องจากความร้อนในเชิงปริมาตรจึงทำให้มีเศษเนื้อวัสดุของเลนส์ติดอยู่บนแม่พิมพ์ เป็นสาเหตุให้เมื่อทำการขึ้นรูปเลนส์ตัวต่อไป เศษวัสดุที่หลงเหลือจากกระบวนการขึ้นรูปในครั้งก่อนจะติดกับเลนส์ชิ้นถัดไปทำให้เกิดรอยลึกลงบนผิวหน้าเลนส์ อันเป็นสาเหตุให้เกิดเป็นงานเสีย

คำสำคัญ: กระบวนการขึ้นรูปที่มีความแม่นยำสูง, เลนส์พิเศษ, ชิ้นเลนส์.

Abstract

This experimental research was performed to identify the parameter that causes defection on the lens shape in the Precision Molding Process. Base on the hypothesis relating with thermal expansion coefficient, A study on the effect of lens thickness at pre molding stage was performed. The finding revealed that when adjusted the thickness was adjusted before molding to 25 microns from the original thickness, the number of defection could be reduced. This can be explained as when the thickness of lens is too large, the lens is expanded which made the parts of the lens stick to the patterns. As a result, they could affect the next molding process because the remaining pieces from the previous molding could create unsmooth lens surface, which brought about the defection.

Keywords: Precision Molding Process, Aspherical lens, lens.

1. บทนำ

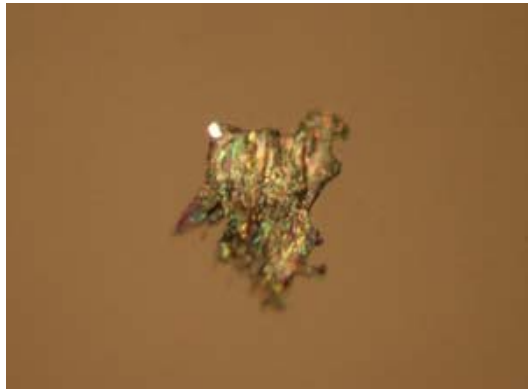
ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ทางด้านกล้องถ่ายภาพและเลนส์มีการเติบโตอย่างต่อเนื่องซึ่งชิ้นเลนส์เป็นผลิตภัณฑ์ชิ้นหนึ่งที่มีความสำคัญในชุด zoom เลนส์ของกล้องถ่ายภาพซึ่งในด้านอุตสาหกรรมจำเป็นต้องแข่งขันกันในด้านต้นทุนทางด้านการผลิตเพื่อให้มีมูลค่าที่ต่ำซึ่งกระบวนการผลิตเลนส์ในด้าน Precision Glass Process ได้มีการพัฒนาและทำการศึกษากันอย่างต่อเนื่องเพราะเลนส์ประเภทที่เกิดจากกระบวนการนี้สามารถลดจำนวนชิ้นเลนส์ในชุด zoom เลนส์ลงได้ กระบวนการผลิตเลนส์ในปัจจุบันสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ กระบวนการขัดผิวเลนส์ให้มีค่าความโค้งตามที่ต้องการ และกระบวนการขึ้นรูปเลนส์โดยทำการ Molding Process ซึ่งกระบวนการที่สองเป็นกระบวนการที่ใช้เทคโนโลยีขั้นสูงในการผลิตเลนส์ซึ่งต้องการความแม่นยำและความละเอียดสูง กระบวนการ Precision Glass Molding Process เป็นกระบวนการขึ้นรูปเลนส์ให้มีผิวหน้าของเลนส์เป็นผิว Aspherical ซึ่งเกิดจากการทำให้แก้วที่จะทำการขึ้นรูปมีอุณหภูมิที่สูงอยู่ในสภาวะที่อ่อนตัวจากนั้นทำการใช้แรงกดเลนส์ให้สัมผัสกับแม่พิมพ์เพื่อทำให้เกิดผิวตามที่ต้องการ ซึ่งที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการขึ้นรูปโดยในปี 2004 ,Allen Y. และคณะ [1] ได้ทำการทำนายผลของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเลนส์ในขณะทำการขึ้นรูปและการเปลี่ยนรูปของเลนส์เมื่อเกิดความเค้นจากการขึ้นรูปโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบปัญหาแบบสองมิติ และในปี 2008 ,Jiwang Yan และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาและสร้างแบบจำลองปัญหาทางด้านสองมิติเพื่อการทำนายการอ่อนตัวของเลนส์และรูปแบบของการถ่ายเทความร้อนของเลนส์ในขณะทำการขึ้นรูป ซึ่งมีความแตกต่างจากปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตจริง งานวิจัยจากการแก้ปัญหาในการทดลองได้ถูกตีพิมพ์ในปี 2006 ,Ho-Chiao

และคณะ [3] ทำการแก้ไขปัญหาของการขัดเลนส์ให้มีผิว Aspherical โดยทำการแก้ไขในส่วนของการเปลี่ยนแปลงรอบความเร็วในการขัดและแรงของหัวขัดในการขัดเลนส์แบบ Aspherical ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้นำเสนอปัญหาและการแก้ปัญหาจากกระบวนการผลิตซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของผิวหน้าของเลนส์หลังการขึ้นรูปเกิดเป็นรอยขีดข่วนบริเวณผิวหน้า พร้อมทั้งเกิดจุดขนาดเล็กๆบนผิวหน้าเลนส์และการเกิดรอยย่นบนบริเวณผิวหน้าของเลนส์หลังทำการขึ้นรูปและการเปลี่ยนแปลงความหนา ทำให้จำเป็นต้องศึกษาและทำการทดลองถึงตัวแปรทางด้านกายภาพของเลนส์ก่อนทำการขึ้นรูปเพื่อทำการลดงานเสียเนื่องมาจากกระบวนการผลิตจากกระบวนการ Precision Glass Molding Process มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องซึ่งมีความจำเป็นในการผลิตและคุณภาพของเลนส์เช่น 1. อุณหภูมิของเลนส์ขณะทำการขึ้นรูป 2. ปริมาตรของเลนส์ก่อนทำการขึ้นรูป 3. อุณหภูมิของแม่พิมพ์ตัวบนและแม่พิมพ์ตัวล่าง 4. แรงที่ใช้ทำการกดขึ้นรูประหว่างแม่พิมพ์และแกนมอเตอร์



รูปที่ 1. แสดงการเกิดรอยขีดข่วนบริเวณผิวหน้าเลนส์ โดยทำการขยาย 10 เท่า

โดยในงานวิจัยชิ้นนี้ทำการศึกษาถึงตัวแปรทางด้านความหนาของเลนส์ก่อนการขึ้นรูปและผลกระทบของความหนาของชิ้นเลนส์ก่อนการขึ้นรูป



รูปที่ 2. แสดงการเกิดหลุมและมีเศษของเลนส์ติดบริเวณผิวหน้าเลนส์หลังทำการขึ้นรูปโดยการขยาย 10 เท่า



รูปที่ 3. แสดงรอยบนบริเวณเนื้อวัสดุของผิวหน้าเลนส์หลังทำการขึ้นรูปโดยการขยาย 10 เท่า

2.วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 2.1 เพื่อลดปริมาณงานเสียที่เกิดจากกระบวนการขึ้นรูปใน Precision Glass Molding Process
- 2.2 เพื่อทดลองตัวแปรและพิสูจน์สมมุติฐานในการแก้ปัญหาโดยใช้หลักการทางด้านวิศวกรรมเข้ามาแก้ไขปัญหา

3.ขอบเขตในการศึกษาและทำการวิจัย

- 3.1 ศึกษากระบวนการ Precision Glass Molding Process
- 3.2 ทดลองเพื่อหาข้อสรุปในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าเลนส์หลังจากทำการขึ้นรูป

4.อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 4.1 เครื่องจักร Precision Glass Molding 1 Machine
- 4.2 แม่พิมพ์ ตัวบนและตัวล่าง
- 4.3 Performs lenses 120 ชิ้น

5.ลักษณะของเลนส์ที่ทำการขึ้นรูป

5.1 Aspherical surface

คุณสมบัติของเลนส์ Aspherical surface เป็นเลนส์ที่มีผิวหน้าที่เกิดจากการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ หรือกระบวนการขัดโดยจะมีผิวหน้าที่เป็นไปตามสมการของ Aspherical ซึ่งตารางที่ 1.จะแสดงรายละเอียดของเลนส์ที่ใช้ในการทดลอง โดยสมการของผิว Aspherical สามารถเขียนได้ดังนี้ สมการที่ (1),(2)

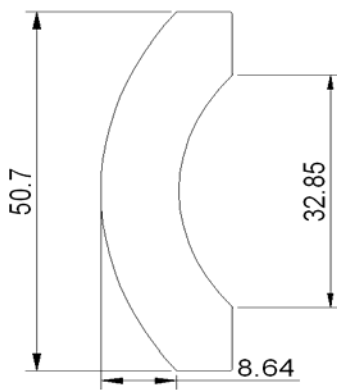
Table 1.แสดงตัวแปรของเลนส์ที่ใช้ในการทดลอง

Profile	Parabolic concave surface
Radius ,R1	41.500 mm.
Radius, R2	24.794 mm.
Conic constant ,k	-1
Lens diameter	50.7 mm.

เมื่อ X เป็นค่าที่แสดงทิศทางของผิว Aspherical ในแนวรัศมี และ Z เป็นค่าที่แสดงความหนาของผิว Aspherical R เป็นรัศมีของเลนส์และ k คือ Conic constant และ A_4, A_6, A_8 เป็นค่า Aspheric deformation constants ซึ่งจากการออกแบบของเลนส์เกิดจากการใช้สมการ Parabolic ซึ่งสมการที่ (1) สามารถเขียนโดยตัดค่า Conic constant จะสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2)

$$Z = \frac{-X^2}{R + \sqrt{R^2 - (1+k)X^2}} + A_4 X^4 + A_6 X^6 + A_8 X^8 \quad (1)$$

$$Z = \frac{X^2}{R + \sqrt{R^2 - (1-k)X^2}} \quad (2)$$



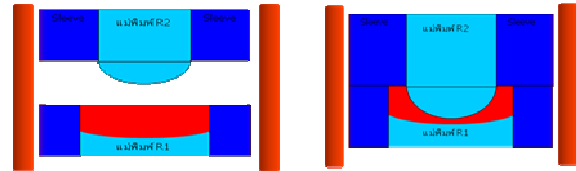
รูป 4. แสดงรูปร่างของชิ้นงานก่อนการขึ้นรูป

คุณสมบัติที่โดดเด่นของ Aspherical lens คือจะทำให้จุดที่ตกของจุดโฟกัสของเลนส์มีแม่นยำมากขึ้น สามารถทำให้สีที่เกิดขึ้นมีความคมชัดมากขึ้นและยังสามารถลดจำนวนของชิ้นเลนส์ใน zoom lens และสามารถทำให้ Zoom มีน้ำหนักเบา

5.2 Precision Glass Molding Process.

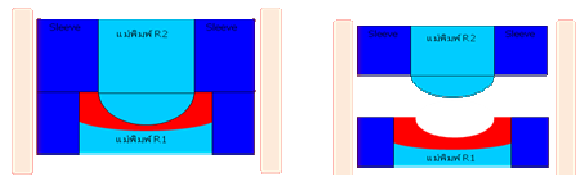
กระบวนการ Precision Glass Molding Process เป็นกระบวนการผลิตเลนส์ให้เกิดผิวหน้าของเลนส์เป็นผิวตามสมการของ Aspherical surface ซึ่งประกอบไปด้วยกระบวนการที่สำคัญคือ 1.Prepareing Process เป็นกระบวนการเริ่มต้นของกระบวนการผลิตเลนส์จะถูกนำมาแยกความหนาและทำความสะอาดโดยทำการล้างเพื่อเตรียมเข้ากระบวนการ Mold 2.Molding Process เป็นกระบวนการของเครื่องจักรโดยเครื่องจักรจะทำการอุ่นเลนส์ให้มีอุณหภูมิถึงที่อ่อนตัวหรือเรียกว่า Molding temperature จากนั้นเครื่องจักรจะทำการกดเลนส์ให้สัมผัสกับแม่พิมพ์ด้วยแรงของมอเตอร์ซึ่งจะมีการกำหนดค่าขอบเขตทางด้านความหนาของเลนส์หลังจากทำการขึ้นรูปซึ่งในระหว่างของการทำการขึ้นรูปนี้เครื่องจักรจะทำการปล่อยแก๊สไนโตรเจนซึ่งเป็นแก๊สเฉื่อยเพื่อเป็นการไล่อากาศและความชื้นในขณะที่

ทำการขึ้นรูปโดยรูปแบบของการขึ้นรูปจะประกอบไปด้วย การใส่ชิ้นเลนส์ในชุดแม่พิมพ์



รูป (a)

รูป (b)

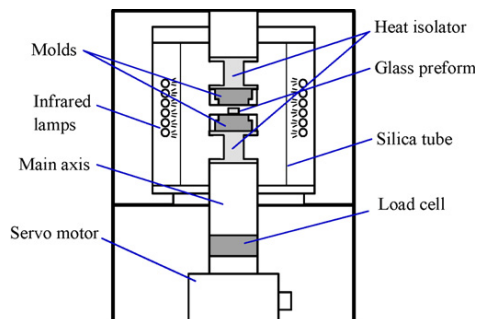
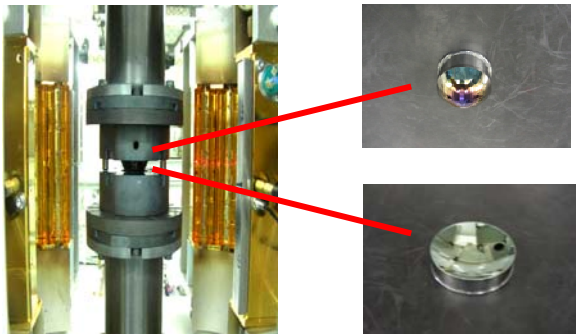


รูป (c)

รูป (d)

รูป 5. กระบวนการ (a) แสดงกระบวนการอุ่นเลนส์ กระบวนการ (b) แสดงกระบวนการของการใช้แรงกดลงบนแม่พิมพ์บนและล่าง กระบวนการ(c) แสดงกระบวนการ Cool down และสุดท้ายคือ(d) กระบวนการนำเลนส์ออก

การทำให้ความร้อนโดย Heater พร้อมทั้งกดแม่พิมพ์ให้สัมผัส และการปล่อยให้เป็นตัว Cool down ภายในเครื่องจักรและนำเลนส์ออก 3.Process Annealing เป็นกระบวนการอบเลนส์หลังจากทำการขึ้นรูปแล้วให้เลนส์ได้คลายความเค้นในเนื้อวัสดุหลังจากการขึ้นรูป 4.กระบวนการขัดเลนส์ หลังจากทำการอบแล้วจะเกิดฝ้าขึ้นบริเวณผิวหน้าเลนส์จึงจำเป็นต้องทำการขัดผิวหน้าของเลนส์ให้มีความใสอีกครั้งก่อนจะส่งให้กระบวนการต่อไป 5.กระบวนการตรวจสอบผิว Aspherical เป็นกระบวนการสุดท้ายของการทำผิว Aspherical โดยเลนส์จะถูกนำมาเช็คผิวหน้าด้วยเครื่องเช็ค Profile เพื่อตรวจสอบผิวหน้าของเลนส์



รูป 6. แสดงส่วนประกอบของภายในเครื่องจักร
ของเครื่อง Mold machine

5.3 การขยายตัวของวัสดุเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน Thermal Expansion Coefficient เป็นตัวบอกว่าวัสดุจะขยายตัวมากน้อยเพียงใดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงในส่วนของคุณสมบัติ โดยจะมีค่าเท่ากับ ความยาวที่เพิ่มขึ้นต่อความยาวเริ่มต้นต่อองศาอุณหภูมิ

$$\delta t = \alpha \Delta T L \quad (3)$$

โดยกำหนดให้ α หมายถึง สมบัติของสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

ΔT หมายถึงอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป

L หมายถึงความยาวของชิ้นงาน

δt หมายถึงความยาวที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากอุณหภูมิ



รูป 7. แสดงการใช้โปรแกรมทางด้านคอมพิวเตอร์ในการคำนวณปริมาตรและการเปลี่ยนแปลงความหนา
Table 2. แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความหนาต่อน้ำหนักในการคำนวณ

Thickness (mm)	Mass (g)	Volume (Cubic meter)	Density (Kg/m ³)
8.800	0.048122	1.9179E-05	2510
9.155	0.051649	2.0577E-05	2510
9.180	0.051900	2.0677E-05	2510

6. การทดลอง

6.1 การปรับตั้งค่าตัวแปรของเครื่องจักร

ในการทดลองเราทำการปรับตั้งค่าของตัวแปรของเครื่องจักรเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรทางด้านความหนาของเลนส์เพียงอย่างเดียว

6.1.1 ทำการปรับตั้งค่าอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลองมีอุณหภูมิที่เท่ากันทั้งตัวบนและตัวล่าง

6.1.2 ทำการปรับตั้งค่าของ Heater ที่เป็นแหล่งความร้อนให้กับการอุ่นเลนส์ให้มีอุณหภูมิที่คงที่

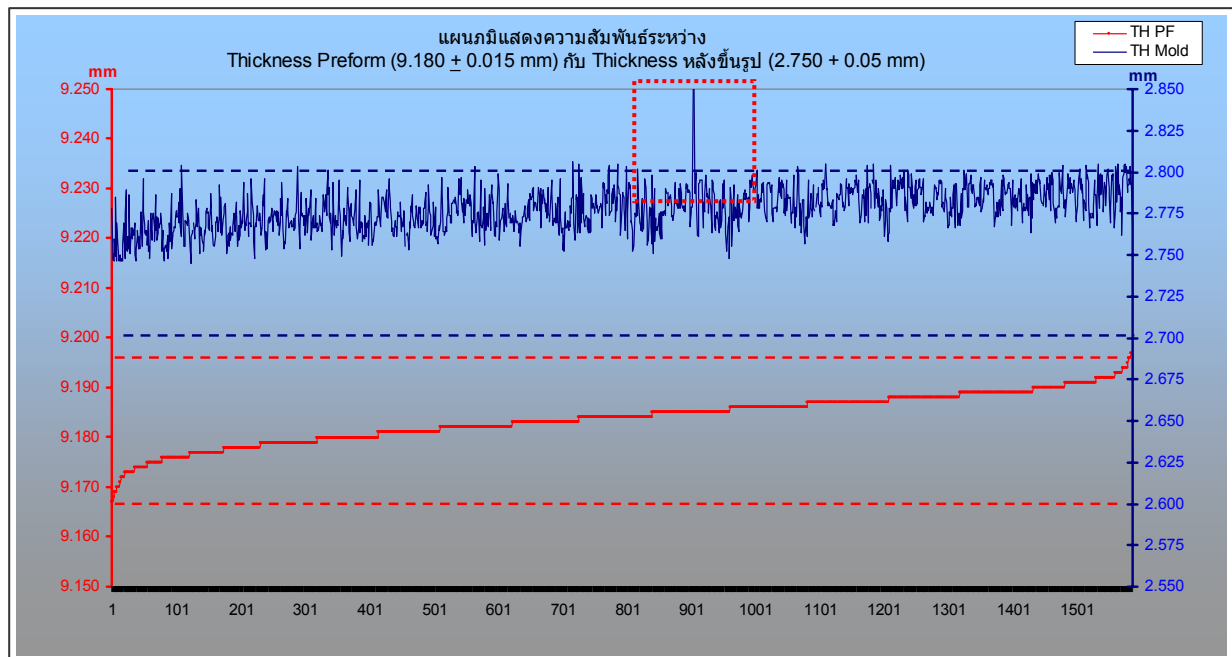
6.2 ผลการทดลอง

จากรูปที่ (8) แสดงกราฟความสัมพันธ์ของความหนาของเลนส์ก่อนการขึ้นรูป (TH PF) Thickness Perform และค่าความหนาหลังการขึ้นรูป (TH Mold) Thickness Mold โดยค่าในแนวแกนนอนแสดงจำนวนของชิ้นงานในการทดลองและ ค่าในแกนตั้งแสดงค่าของความหนาของเลนส์ก่อนการขึ้นรูปและหลังการขึ้นรูป จากการทดลองขอบเขตความหนาของเลนส์ก่อนการขึ้นรูป ค่าของเลนส์ที่ควบคุมความหนา ก่อนทำการขึ้นรูป อยู่ที่ 9.165-9.195 มิลลิเมตร (ความต่าง 0.03 มิลลิเมตร) โดยเส้นขอบเขตบนและขอบเขตล่างแสดงโดยเส้นประที่อยู่บริเวณล่างของกราฟ และค่าความหนาของเลนส์ที่ควบคุมหลังการขึ้นรูปแสดงในกราฟด้านบนโดยค่าของเลนส์ที่ควบคุมความหนาหลังทำการขึ้นรูป 2.700-2.800 มิลลิเมตร (ความต่าง 0.1 มิลลิเมตร) ค่าของขอบเขตบนแสดงโดยใช้เส้นประจากข้อมูลของการขึ้นรูปก่อนการเปลี่ยนแปลงความหนาในการทดสอบชิ้นงานทั้งหมด 2,000 ชิ้น เราพบว่าที่ความหนาของเลนส์ก่อนการขึ้นรูปที่ค่าอยู่ในช่วง 9.165-9.195 มิลลิเมตร และเมื่อเลนส์ก่อนการขึ้นรูปมีค่าความหนามากขึ้นจะส่งผลต่อความหนาของเลนส์หลังการขึ้นรูปโดยจะทำให้ชิ้นงานภายหลังการขึ้นรูปเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาที่มากขึ้นจนเข้าสู่ค่าที่เกินขอบเขตบนคือค่า 2.800 มิลลิเมตร ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของความหนาของเลนส์ก่อนการขึ้นรูปจะส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาของเลนส์หลังการขึ้นรูปในกราฟที่ (9) แสดงความสัมพันธ์ของความหนาของเลนส์หลังจากมีการปรับค่าให้มีค่าของความหนาก่อนการขึ้นรูปลดลง 25 ไมครอนจากความหนาเดิม โดยแกนแนวนอนแสดงค่าของจำนวนชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองโดยเราทำการทดลองการเปลี่ยนแปลงความหนาของเลนส์ก่อนการขึ้นรูปในจำนวนชิ้นงานในการผลิตจริงจำนวน 120 ชิ้น ผลของการตรวจสอบและผลของการขึ้นรูป

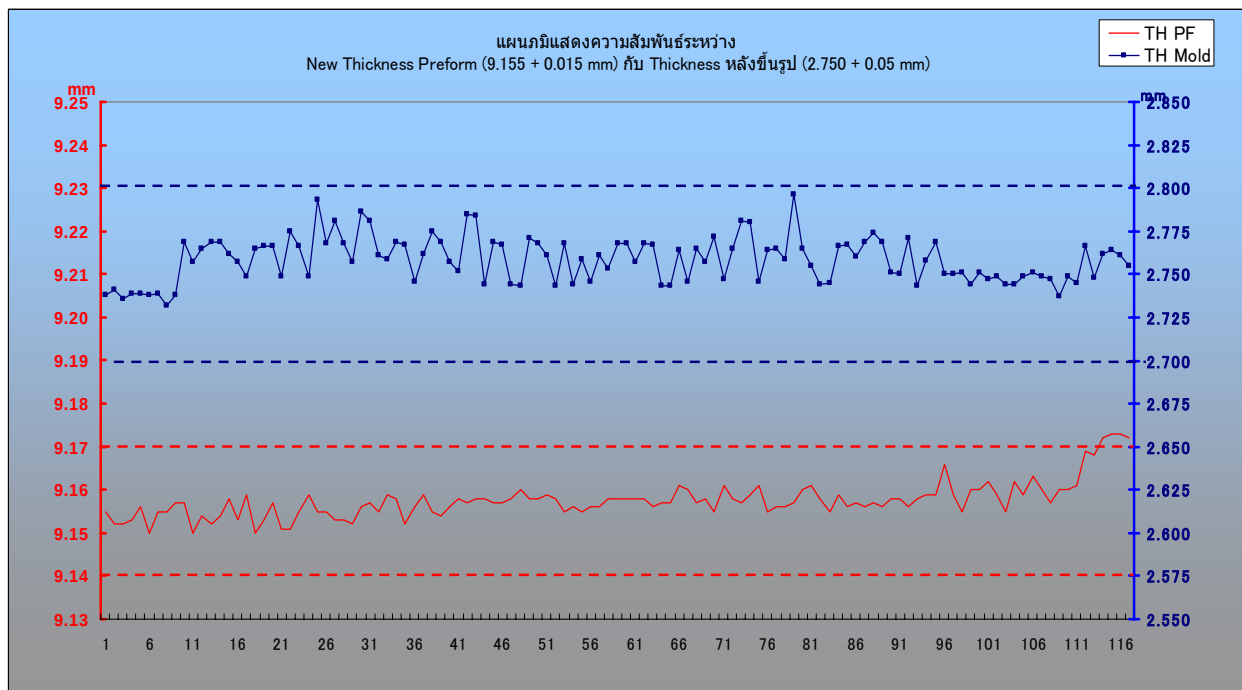
แสดงในรูปที่ (9) ค่าของเลนส์ที่ควบคุมความหนาก่อนทำการขึ้นรูป 9.140-9.170 มิลลิเมตร (ลดลง 0.025 มิลลิเมตร) ค่าของเลนส์ที่ควบคุมความหนาหลังทำการขึ้นรูป 2.700-2.800 มิลลิเมตร (ควบคุมโดยใช้ค่าเดิม) เส้นกราฟในแนวแกนตั้งแสดงค่าความหนาของเลนส์ก่อนการขึ้นรูปและหลังการขึ้นรูป ผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาของเลนส์ก่อนการขึ้นรูปทำให้ความหนาของเลนส์หลังการขึ้นรูปมีการเปลี่ยนแปลงค่าอยู่ในขอบเขตทั้งหมดโดยมีค่าความต่างก็น้อยกว่าเมื่อเทียบกับค่าการเปลี่ยนแปลงของขอบเขตก่อนการขึ้นรูปแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงความหนาของเลนส์มีผลต่อการขยายตัวของเลนส์และการเปลี่ยนรูปของเลนส์หลังการขึ้นรูป

7.สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองลดขนาดของตัวแปรในด้านความหนาของเลนส์ก่อนทำการขึ้นรูปในค่า 25 ไมครอน เราสามารถควบคุมให้ไม่เกิดงานเสียในด้านความหนาภายหลังการขึ้นรูปได้โดยความหนาหลังการขึ้นรูปจะอยู่ภายใต้ค่าที่ทำการควบคุมทั้งหมดและผลของการลดขนาดลงยังสามารถลดงานเสียจากอาการอื่นๆ ที่เกิดขึ้นลงด้วยจากสาเหตุคือเมื่อทำการขึ้นรูปเลนส์ที่มีความหนาจะทำให้เกิดการขยายตัวของเลนส์ทำให้เลนส์หลังจากทำการขึ้นรูปตกลงบนผิวหน้าของแม่พิมพ์เมื่อทำการขึ้นรูปของเลนส์ตัวต่อไปจะทำให้เกิดงานเสียขึ้นในเลนส์ตัวต่อไป ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าค่าความหนาของเลนส์ก่อนการขึ้นรูปมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาของเลนส์หลังการขึ้นรูปโดยตรงซึ่งเป็นไปตามหลักการของการขยายตัวของวัสดุเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยเมื่อเลนส์ก่อนการขึ้นรูปมีความหนามากจะทำให้ปริมาตรของเลนส์เพิ่มขึ้น และเมื่อเลนส์ได้รับความร้อนก่อนทำการขึ้นรูปจะทำให้เลนส์เกิดการขยายตัว เมื่อถูกกดด้วยแม่พิมพ์ตัวบนและตัวล่างปริมาตรในส่วนที่เกินจะหลุดและเกิดเศษของเนื้อวัสดุติดอยู่ที่แม่พิมพ์เมื่อทำการขึ้นรูปเลนส์ตัวต่อไปจะทำให้เกิดรอยขึ้นที่แม่พิมพ์และเมื่อทำการขึ้นรูปต่อก็จะพบในเลนส์ตัวอื่นๆ



รูป 8 .กราฟแสดงผลก่อนปรับความหนาของเลนส์ก่อนขึ้นรูป



รูป 9 .กราฟแสดงผลหลังปรับความหนาของเลนส์ก่อนขึ้นรูป

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณอาจารย์ จารุวัตร เจริญสุข ที่ให้คำปรึกษาในการทำวิจัยครั้งนี้และขอบคุณคุณคงพล เพ็ญสุภาพ ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับกระบวนการขึ้นรูปและข้อมูลที่ใช้เป็นในการทดลอง

9. เอกสารอ้างอิง

9.1 บทความจากวารสาร (Journal)

- [1] Allen Y, Anurag Jain, (2004). Compression Molding of Aspherical Glass Lenses –A Combined Experimental and Numerical Analysis, *Journal of the American Ceramic Society* .
- [2]Jiwang Yan,Tianfeng Zhou, Jun Masuda,TsumemotoKuriyagawa (2008) .Modeling high – Temperature glass molding process by coupling heat transfer and viscous deformation analysis ,*Journal power source Precision Engineering* .
- [3] Ho Chiao Chuang,Pei-Lum Tso (2006). An investigation of lapping characteristics for improving the form error of an aspherical lens , *Journal of Materials Processing Technology* .
- [4] Yang Chen , (2008). Numerical Simulation and Experimental Study of Residual Stresses in Compression Molding of Precision Glass Optical Components , *Journal of Manufacturing Science and Engineering* .
- [5] Tianfeng Zhou ,Jun Masuda (2008). Investigation on the viscoelasticity of optocal glass in ultraprecision lens molding process, *Journal of Materials Processing Technology*.
- [6] Kuo Ming ,Chung-Yu Hsieh,Wei-Chun (2007). A study of the effects of process parameters for injection molding on surface quality of optical lenses, *Journal of Materials Processing Technology* 2009, 3469-3477

9.2 หนังสือ

- [1] มนตรี พิรุณเกษตร , (2551). การถ่ายเทความร้อนฉบับเตรียมสอบและเสริมประสบการณ์ บริษัท วิทยพัฒน์ จำกัด เขตบางกะปิ กรุงเทพฯ
- [2] YunusA.Cengel,MichaelA.Boles
Thermodynamics:AnEngineering
Approach ,(1998)., McGrawHill Companies, New York.