



วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

การวิเคราะห์การหดตัวของผลิตภัณฑ์ชิ้นงานฉีดขึ้นรูปพลาสติกรีไซเคิลด้วยการจำลองแบบและวิธีการทาคุชิ

Analysis Shrinkage of Recycle Plastic Injection Molding by using Taguchi Methodology

จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร^{1*} วัชระ สุขเรืองกุล² นพพริษฐ์ วสันต์บั้งมี²

¹ หน่วยวิจัยกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์และการอบชุบความร้อนโลหะ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

² คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

Jittiwat Nithikarnjanatharn Watchara Sukrueangkul Noppharit Wasanbongngem

Polymer Processing and Heat Treatment of Metals Researrch Units Rajamangala University of Technology Isan.

Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Mueang, Nakorn Ratchasima 30000

* Corresponding author.

E-mail: jittiwat.ni@muti.ac.th; Telephone: 08 1547 0993.

วันที่รับบทความ 8 พฤษภาคม 2561; วันแก้ไขบทความครั้งที่ 1 18 มิถุนายน 2561; วันแก้ไขบทความครั้งที่ 2 29 สิงหาคม 2561; วันที่ตอบรับบทความ 18 กันยายน 2561

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา พารามิเตอร์ที่ทำให้ได้ค่าการหดตัวที่น้อยที่สุด ในการฉีดพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการใช้งานแล้ว (r-PP) โดยนำพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วจากงานหุฟ่งที่ได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปหุฟ่งไปทดสอบค่าดัชนีการไหลและคุณสมบัติทางกลไปการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมโซลิดเวิร์กพลาสติก โดยได้ศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องได้แก่ แรงดันในการฉีด ย้ำ เวลาในการฉีด ย้ำ เวลาในการหล่อเย็น อุณหภูมิในการฉีด และอุณหภูมิแม่พิมพ์ และนำการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทาคุชิ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการฉีด และพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้การหดตัวของชิ้นงานน้อยที่สุดได้แก่ แรงดันในการฉีด ย้ำเท่ากับ ร้อยละ 100 เวลาในการฉีด ย้ำเท่ากับ 25 วินาที เวลาในการหล่อเย็นเท่ากับ 10 วินาที อุณหภูมิในการฉีดเท่ากับ 220 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส โดยค่าการหดตัวที่น้อยที่สุดมีค่าเท่ากับร้อยละ 15.2758 แต่เมื่อนำพารามิเตอร์ดังกล่าวมาจำลองการฉีดขึ้นรูปเพื่อศึกษาการหดตัวของชิ้นงานด้วยโปรแกรม Solidwork plastic พบว่ามีค่าการหดตัวสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 15.1719 ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 0.1039 จากผลการคำนวณด้วยทาคุชิ

คำสำคัญ

พอลิโพรพิลีน การหดตัว ไฟไนต์เอลิเมนต์ วิธีการทาคุชิ

Abstract

The purpose of this research to study the parameters that give the lowest shrinkage. In the injection molding process of recycled polypropylene (r-PP), bring therecycled plastic of runner from injection process of headphone to test the melt flow index and mechanical property then take the data to use finite element method by Solidwork plastic programto simulation. The parameters were studied are injection pressure, injectiontime, coolingtime, injection temperature, and

molding temperature. This research was used Taguchi method to finding the parameters that lowest shrinkage. The result of this research was 100% injection pressure ,25 second injection time ,10 second Cooling time ,220°C injection temperature and 30 °C Molding temperature. The lowest shrinkage was 15.2758 % but after put this value in the Solidwork plastic program, can found that the lowest shrinkage was 15.1719%. So, its error is 0.1039% difference from Taguchi design.

Keywords

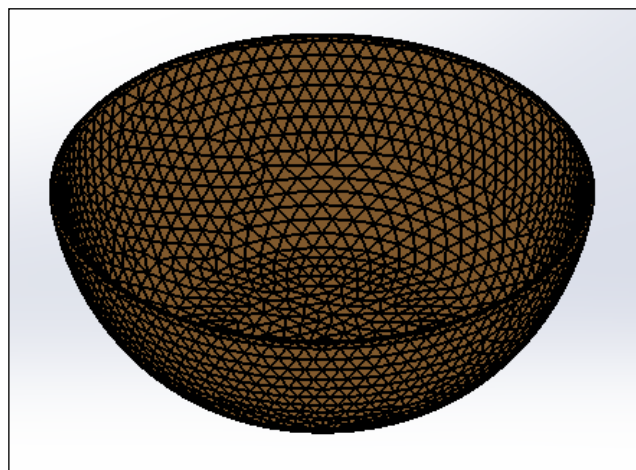
polypropylene; shrinkage; finite element; Taguchi method.

1. บทนำ

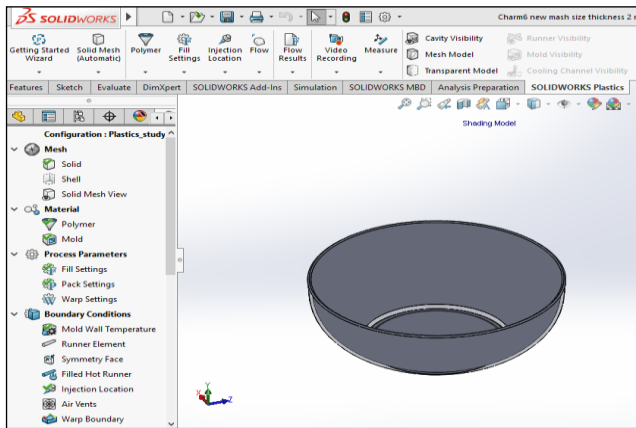
พอลิโพรพิลีนเป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกซึ่งมีคุณสมบัติเบา แข็งแรง ทนต่อแรงกระแทก และ ทนต่อการขีดข่วน จึงมีความนิยมใช้มากในงานอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ ทั้งอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์และอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งปัจจุบันมีสินค้าเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์นั้นจะนิยมใช้พลาสติกเป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์เนื่องจากทำารขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ง่ายและสวยงามโดยกระบวนการที่นิยมขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์คือ กระบวนการฉีดขึ้นรูป ซึ่งในส่วนของการขึ้นรูปขึ้นงานนั้นจะแบ่งขึ้นงานที่ได้ออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนที่เป็นชิ้นงานและส่วนที่เป็นทางวิ่งน้ำพลาสติกเหลวที่จะต้องถูกตัดทิ้งไป แต่เนื่องจากก้านรันเนอร์ที่ได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปนั้นไม่มีพลาสติกชนิดอื่นเจือปนและประกอบกับ พอลิโพรพิลีนเป็นพลาสติกที่สามารถนำมารีไซเคิลได้ ดังนั้นผู้ประกอบการจึงนิยมนำก้านรันเนอร์ มาบดและนำกลับใช้อีกครั้ง ซึ่งเป็นวิธีการที่จะลดปริมาณขยะหรือของเสียในกระบวนการผลิตลงได้และทำให้ต้นทุนการผลิตลดลงด้วยเช่นกันแต่อย่างไรก็ตามการผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลกับเม็ดพลาสติกที่เป็นเม็ดใหม่ในอัตราส่วนต่าง ๆ จะส่งผลต่อคุณสมบัติของชิ้นงานและการปรับตั้งพารามิเตอร์ในกระบวนการผลิตจากการศึกษาการวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วค่าดัชนีการไหลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแต่คุณสมบัติทางกลมีแนวโน้มลดลง [1] จึงทำให้ทำให้เกิดความล่าช้าทั้งจากการทดลองฉีดเพื่อหาเงื่อนไขในการผลิต

แต่ผลกระทบที่ตามมาทำให้ให้สิ้นเปลือง ต้นทุนทั้ง วัสดุ เครื่องจักร และแรงงานคน

เพื่อลดความสิ้นเปลืองที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตจึงได้ทำการศึกษาหาเครื่องมือที่จะช่วยในการวิเคราะห์ในการทำงานและพบว่าได้มีการประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์การไหลตัวของพลาสติกเหลวและหาเงื่อนไขในการฉีดที่เหมาะสม เช่น สุกกิจ ขาวเนตร [2] ได้ใช้โปรแกรมโมลโฟลพลาสติกอินไซต์ เวอร์ชัน 4.0 ซึ่งใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับการทดลองเพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ทำให้เกิดการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์พลาสติกฉีดแม่พิมพ์ที่ใช้ในการฉีดผลิตภัณฑ์พลาสติกเป็นพิมพ์ส้อมและนอกจากนั้น นายเดช กันใจรส [3] ได้โปรแกรม Moldex3D ช่วยวิเคราะห์สมดุลค่าการไหลตัวของพลาสติกเหลวในแต่ละเข้าสู่ร่างแม่พิมพ์ โดยศึกษาค่าพารามิเตอร์ได้แก่ ความเร็วฉีด และความดันฉีดว่ามี



รูปที่ 1 ลักษณะชิ้นงานทดสอบการจำลอง



รูปที่ 2 ลักษณะการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Solidwork plastic

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS Plastics

พารามิเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์	ค่าที่ได้
ความดันฉีดเต็ม	7.40 MPa
เวลาในการฉีดเต็ม	1.5417Sec
เวลาในการฉีดย่อย	3.81Sec
เวลาในการหล่อเย็น	13.21 Sec
Cycle Time	19.06 Sec
อุณหภูมิของแม่พิมพ์	40 °C
อุณหภูมิของการหลอมเม็ดพลาสติก	250°C

ผลกระทบอย่างใดกับการไหลของพลาสติกในช่วงของการฉีดเต็มเต็ม เพื่อให้ได้การไหลเต็มเต็มเข้าแม่พิมพ์ที่สมดุล โดยพบว่าค่าพลาสติกที่มีค่าดัชนีการไหลสูงควรจะใช้ความเร็วในการฉีดต่ำและในทางกลับกันพลาสติกที่มีค่าดัชนีการไหลต่ำควรจะใช้ความเร็วในการฉีดสูงเพื่อให้ได้สมดุลการไหลที่ดี อุดุทธ์ จิตรอารี [4] ได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Moldex3D มาศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเสียรูปในกระบวนการฉีดขึ้นรูปชิ้นส่วนพลาสติก เอปียเอส โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้ร่วมกับการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกด้วย โดยทำการศึกษาปัจจัยเบื้องต้นทั้งหมด 8 ปัจจัย ได้แก่ อัตราการฉีด แรงดันฉีด ระยะเปลี่ยนการฉีดเป็นฉีดย่อย เวลาฉีดย่อยแรงดันฉีดย่อย อุณหภูมิหลอมเหลวพลาสติกและนอกจากนั้นยังมีการประยุกต์ใช้โปรแกรม โซลิค

เว็คส์ พลาสติกเข้ามาทำการวิเคราะห์การฉีดขึ้นรูปชิ้นงานจากพอลิออกซีเมทิลีน [5] ที่ผ่านการใช้งานแล้วและพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการใช้งานแล้ว [6] เช่นกัน

แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่มีการประยุกต์ใช้โปรแกรม โซลิคเว็คส์ พลาสติก ร่วมกับการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ ในงานวิจัยการฉีดขึ้นรูปพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการใช้งานแล้วจากก้านหูฟังและวิเคราะห์ถึงการหดตัวของชิ้นงาน ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวมีขีดความสามารถในการวิเคราะห์ผลการหดตัวเช่นเดียวกับโปรแกรมอื่น ๆ [2-4] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะใช้โปรแกรม โซลิคเว็คส์ พลาสติก ซึ่งสามารถจำลองการขึ้นรูปแบบฉีด ซึ่งสามารถวิเคราะห์เพื่อหาผลกระทบของลักษณะการไหล อุณหภูมิ ความดัน เวลาในการไหลเข้าแม่พิมพ์ และการวิเคราะห์คุณภาพของชิ้นงานเช่นการหดตัวเชิงปริมาตร โดยจะทำการใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ [7-19] และจำลองการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบรูปถ้วยเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ได้ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรที่น้อยที่สุด

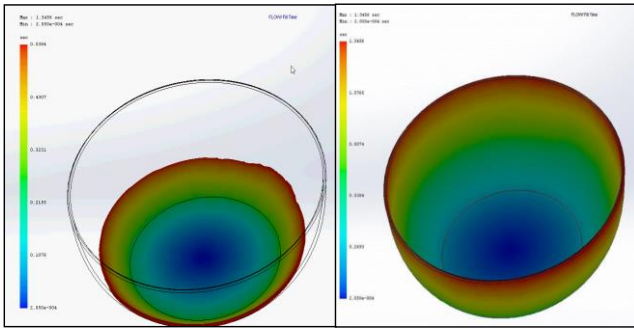
2. กระบวนการศึกษาวิจัย

2.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

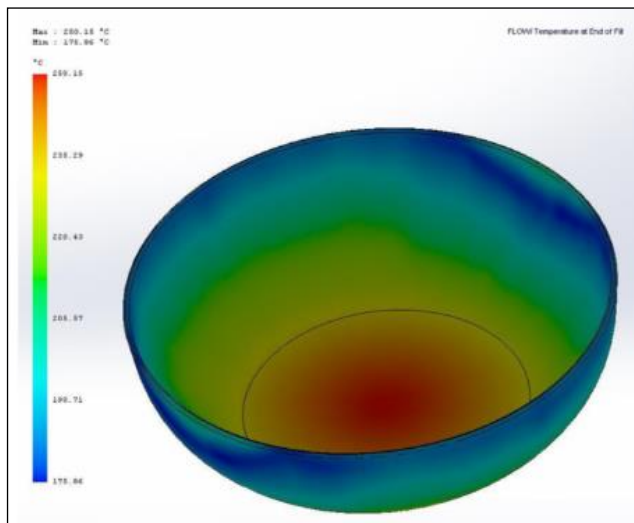
นำ r-PP มาทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวสกรูคู่ที่มีความเร็วรอบ 50 rpm. L/D = 40 โดยสถานะการทำงานของเครื่องอัดรีดเกลียวสกรูคู่ ใช้อุณหภูมิในการอัด 180°C และตัดออกมาเป็นเม็ดแล้วนำมาทดสอบค่าดัชนีการไหลใช้เครื่อง Melt Flow Index ตามมาตรฐาน ASTM D 1238 ต่อมาทำการขึ้นรูป นำเม็ดพอลิเมอร์ r-PP นำไปฉีดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบแรงดึง (tensile test) ด้วยเครื่อง injection molding machines ตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I

2.2 การทดสอบสมบัติทางกลของ r-PP

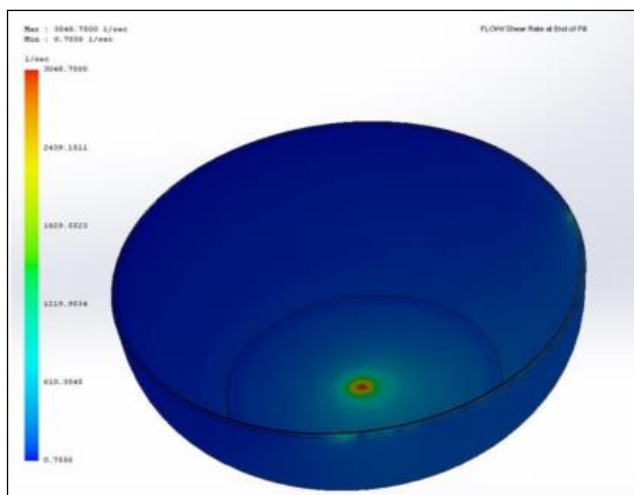
การทดสอบสมบัติทางกลได้แก่ โมดูลัสความยืดหยุ่น (Yong's modulus) ตาม มาตรฐานการทดสอบ ASTM D638 Type I มีค่าเท่ากับ 672.59 Mpa และการทดสอบสมบัติทาง



รูปที่ 3 ลักษณะของการไหลของพลาสติกเหลวและการแสดงผลของโปรแกรม



รูปที่ 4 การวิเคราะห์อุณหภูมิของชิ้นงาน



รูปที่ 5 ผลวิเคราะห์อัตราการเฉือนของชิ้นงาน

ภาพถ่ายโดยการทดสอบดัชนีการ หลอมไหล (melt flow index, MFI) ตามมาตรฐาน ASTM D1238 มีค่าเท่ากับ 26.58

g/10min ซึ่งนำผลการทดสอบที่ได้มาจำลองพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์โดยใช้โปรแกรม SOLIDWORKS plastics.

2.3 การออกแบบและวิเคราะห์การทดลองด้วยวิธีการของ ทากุชิ

วิธีการทากุชิเป็นเครื่องมือเชิงคุณภาพที่ช่วยปรับปรุงและพัฒนากระบวนการได้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อเลือกปัจจัยที่เหมาะสมของกระบวนการโดยดำเนินการออกแบบแผนการทดลองออร์ทोगอนอล (orthogonal array) เพื่อลดจำนวนการทดลองให้เหมาะสมกับเงื่อนไขที่กำหนดการวิเคราะห์ข้อมูลของทากุชิ เพื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากระดับที่ทำให้ค่าตัววัดของทากุชิ คืออัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (signal-to-noise ratio, S/N) มีค่าสูงสุด แบ่งได้เป็น 3 กรณี คือ

2.3.1 กรณียิ่งมกยิ่งดี (larger-the better) เป็นการสมมติอัตราส่วน S/N เป้าหมายคือค่าสูงสุดของผลตอบสนอง และเป็นค่าที่เหมาะสมเมื่อแสดงรายการเพียงพิกัดความเผื่อจำกัดด้านล่างหาได้จากสมการที่ (1) ดังนี้

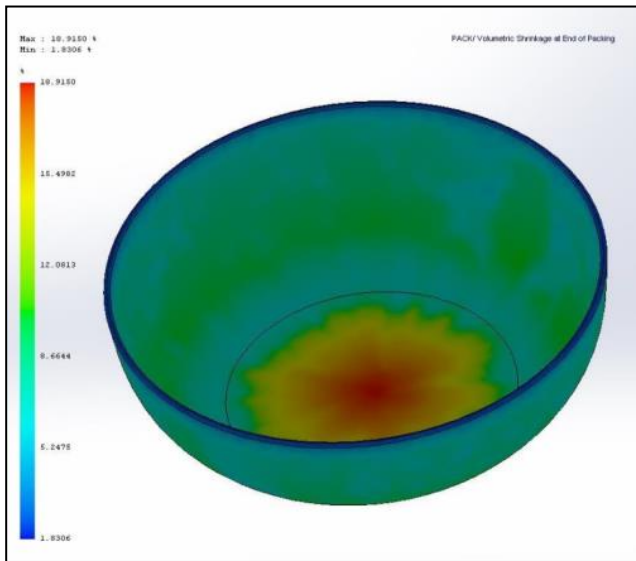
$$S / N_L = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum \frac{1}{y^2} \right) \quad (1)$$

ซึ่งเป้าหมายของการทดลองสำหรับสถานการณ์ larger-is-better คือค่ามากที่สุดของผลตอบ (ผลตอบของกระบวนการ) แต่ค่า y มากที่สุดคือน้อยที่สุดของ $1/y$ และค่า $1/y$ นั้นเป้าหมายสูงสุดหาได้จากสมการที่ (2) ดังนี้

$$\frac{1}{y} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum \frac{1}{y^2} \right) \quad (2)$$

2.3.2 กรณีค่าน้อยยิ่งดี (smaller-the better) เป็นการสมมติ อัตราส่วน S/N ของค่าเป้าหมายสำหรับผลตอบที่เป็นศูนย์และเป็นค่าที่เหมาะสมเมื่อแสดงรายละเอียดเพียงพื่อพิกัดความเผื่อของข้อจำกัดด้านบนสามารถคำนวณหาได้จากสมการ (3) ดังนี้

$$S / N_s = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum y_i^2 \right) \quad (3)$$



รูปที่ 6 ผลวิเคราะห์การหดตัวของชิ้นงาน

ตารางที่ 2 ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ออกแบบการทดลอง

Control factor	Level				
	1	2	3	4	5
Melt Temperature (°C)	220	230	240	250	260
Mold Temperature (°C)	30	40	50	60	70
Packing time (Sec)	5	10	15	20	25
Packing Pressure	60%	70%	80%	90%	100%
Cooling time (°C)	10	20	30	40	50

เป้าหมายของการทดลองสำหรับสถานการณ์ smaller-is-better คือค่าน้อยสุดของ $\sum y_i^2$ เมื่อค่า n คือจำนวนค่าที่ได้จากการวัดในการทดลองและค่า $\sum y_i^2$ นั้นเป็นเป้าหมายสูงสุดโดยคำนวณได้จากสมการ (4) ดังนี้

$$y_i = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (4)$$

2.3.3 กรณีค่าตรงเป้าหมายดีที่สุด (target-the better) เป็นการสมมติอัตราส่วน S/N นั้น ให้ค่าเป้าหมายคือค่าที่ดีที่สุดและเป็นค่าที่เหมาะสมเมื่อค่านั้นเป็นค่าเป้าหมาย กับค่าพิสัยความเมื่อจำกัดด้านบนและด้านล่างหาได้จากสมการที่ (5) ดังนี้

$$S / N_N = 10 \log \left(\frac{y^{-2}}{S^2} \right) \quad (5)$$

เป้าหมายของการทดลองสำหรับสถานการณ์ target-value-is-best คือ ความแปรปรวนลดลงรอบค่าเป้าหมาย เฉพาะเมื่อความแปรปรวนของผลตอบลดลงจะมีความสัมพันธ์กับค่าเฉลี่ยผลตอบ ทำให้ค่า S/N เพิ่มขึ้นจากการคำนวณดังกล่าวนำมาวิเคราะห์ผลตอบต่อไปด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนอิทธิพลของ noise และวิเคราะห์สมรรถนะของกระบวนการ

3. การสร้างแบบจำลองการไหลด้วย SOLIDWORK plastic

3.1 ออกแบบชิ้นงาน

สร้างแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยทำการสร้างชิ้นงานด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS ซึ่งอยู่ในรูปแบบของไฟล์ SLSPT file แล้วใช้โปรแกรม SOLIDWORKS plastics เพื่อที่จะทำการสร้าง mesh model จากชิ้นงานที่ออกแบบเพื่อใช้ในการวิเคราะห์การไหลของพลาสติกเหลวในขั้นตอนต่อไป

- 1) กำหนด mesh เป็นการแบ่งแบบจำลองที่ได้จากการออกแบบ โดยจะทำการกำหนดให้เป็นรูปทรงพีระมิดฐานสามเหลี่ยม (Tetrahedral) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ด้วย ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งมีจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดเท่ากับ 421932 เอลิเมนต์ และมีโหนดเท่ากับ 99651 โหนดและมีค่า aspect ratio สูงสุดอยู่ที่ 6.981 ซึ่งถือเป็นค่าที่ยอมรับได้ของโปรแกรม Solidwork plastic ซึ่งกำหนดค่าของ aspect ratio ไว้สูงสุดไม่ควรเกิน 8
- 2) กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ (material) โดยทำการกำหนดคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ในการทดลองนี้ใช้เหล็กสำหรับใช้ทำแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปคือ P20 และคุณสมบัติของพลาสติกที่ใช้ในการฉีดซึ่งได้จากการทดสอบ

- 3) กำหนดพารามิเตอร์ของกระบวนการ (process parameter) โดยทำการกำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปได้แก่ อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิแม่พิมพ์ แรงดันในการฉีดขึ้นรูป แรงดันในการฉีดอัด เวลาในการฉีดเติมพลาสติกเหลว และเวลาในการฉีดอัด
- 4) กำหนดขนาดและตำแหน่งของทางเข้าน้ำพลาสติก (boundary condition) โดยศึกษาจากชิ้นงานจริง
- 5) ทำการประมวลผลวิเคราะห์ (run)

3.2 ผลการ Simulation

โปรแกรมจะทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์และผลลัพธ์เบื้องต้นที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปโดยจะแสดงเป็นลักษณะแถบสีต่างๆ ที่ทั้งตัวชิ้นงานสามารถสรุปเป็นตารางดังนี้

- 1) การวิเคราะห์อุณหภูมิของชิ้นงานฉีด
ผลการจำลองการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานพบว่า อุณหภูมิของชิ้นงานหลังการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานมีค่าสูงสุดเท่ากับ 250.15 องศาเซลเซียสซึ่งเท่ากับ อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติกเหลว จะอยู่ใกล้บริเวณทางเข้าน้ำพลาสติก(Gate) และอุณหภูมิต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 175.04 องศาเซลเซียส อยู่บริเวณขอบบนของถ้วย
- 2) การวิเคราะห์อัตราการไหลของชิ้นงานฉีด
ค่าที่ได้จากโปรแกรมมีอัตราสูงสุดอยู่ที่ 3048.75 ต่อวินาทีอยู่บริเวณทางเข้าน้ำพลาสติกหลอมเหลว และ ค่าอัตราการไหลต่ำสุดอยู่ที่ 0.556 ต่อวินาที ซึ่งเป็นบริเวณส่วนใหญ่ของชิ้นงานแสดงว่าชิ้นงานมีการไหลตัวได้ดี
- 3) การวิเคราะห์การหดตัวของชิ้นงาน
ผลจากการทำการจำลองการไหลทำให้ทราบค่าการหดตัวเชิงปริมาตรสูงสุดที่ร้อยละ 18.915 อยู่บริเวณทางเข้าน้ำพลาสติกเหลวและยังเป็นบริเวณที่

มีอุณหภูมิสูงสุดของชิ้นงานและการหดตัวต่ำสุดอยู่ที่ร้อยละ 1.8306 อยู่ทีบริเวณขอบบนของชิ้นงานซึ่งเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำสุดของชิ้นงาน

3.3 ผลการจำลองการฉีด

ผลจำลองการไหลทำให้แสดงผลค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับตั้งเครื่องสำหรับฉีดดังในตารางที่ 1 และยังแสดงผลค่าการหดตัวเชิงปริมาตรของชิ้นงานโดยพารามิเตอร์ดังกล่าวให้ค่าการหดตัวสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 18.915 ซึ่งครอบคลุมบริเวณเกือบทั้งหมดของด้านล่างของชิ้นงานดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบการทดลองเพื่อที่จะหาพารามิเตอร์ที่ทำให้เกิดการหดตัวที่น้อยที่สุดโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบทากูชิร่วมกับการจำลองการฉีดขึ้นรูปด้วยโปรแกรม Solidwork plastic

4. การออกแบบการทดลอง

4.1 การกำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ออกแบบการทดลอง

ผลการทดลองเบื้องต้นพบว่าโปรแกรมสามารถวิเคราะห์ผลการหดตัวของชิ้นงานได้ หากต้องการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการหดตัวของชิ้นงาน จึงจำเป็นต้องกำหนดขอบเขตของปัจจัยที่ส่งผลต่อการหดตัวของชิ้นงานและใช้วิธีการออกแบบการทดลอง เพื่อจะหาค่าพารามิเตอร์สภาวะที่เหมาะสมต่อการฉีดพลาสติกเพื่อคำนวณหาปัจจัยที่ทำให้การหดตัวของชิ้นงานน้อยที่สุดโดยได้ทำการศึกษาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องถึงพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการหดตัวของชิ้นงานฉีดขึ้นรูปโดยใช้ พอลิโพรพิลีน (polypropylene, PP) [15] ทำให้สามารถกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยดังตารางที่ 2

โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่ อุณหภูมิหลอมเหลว (A) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (B) เวลาฉีดอัด (C) แรงดันฉีดอัด (D) และเวลาการเย็นตัว (E)

4.2 การทดลองโดยวิธีการของทากูชิ (Taguchi design)

เป็นออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยใช้การออกแบบการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลด้วย

ตารางที่ 3 ผลการทดลอง

No.	A	B	C	D	E	Volumetric Shrinkage(%)	S/N
1	220	30	5	60	10	16.7826	-24.4972
2	220	40	10	70	20	16.5433	-24.3724
3	220	50	15	80	30	16.6063	-24.4055
4	220	60	20	90	40	16.2213	-24.2017
5	220	70	25	100	50	15.452	-23.7797
6	230	30	10	80	40	17.4818	-24.8517
7	230	40	15	90	50	17.1052	-24.6626
8	230	50	20	100	10	16.4197	-24.3073
9	230	60	25	60	20	16.4155	-24.3051
10	230	70	5	70	30	17.3572	-24.7896
11	240	30	15	100	20	17.3018	-24.7618
12	240	40	20	60	30	17.4125	-24.8172
13	240	50	25	70	40	16.9067	-24.5612
14	240	60	5	80	50	17.8782	-25.0465
15	240	70	10	90	10	17.7013	-24.9601
16	250	30	20	70	50	17.8342	-25.0251
17	250	40	25	80	10	17.3996	-24.8108
18	250	50	5	90	20	18.3909	-25.2921
19	250	60	10	100	30	18.2126	-25.2074
20	250	70	15	60	40	18.4639	-25.3265
21	260	30	25	90	30	17.7679	-24.9927
22	260	40	5	100	40	18.883	-25.5214
23	260	50	10	60	50	19.1892	-25.6611
24	260	60	15	70	10	18.9548	-25.5544
25	260	70	20	80	20	18.648	-25.4126

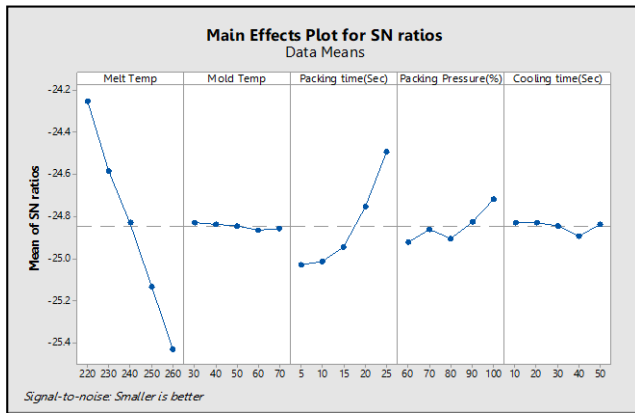
วิธีใช้การสร้างแผนการทดลองแบบเมตริกซ์ (matrix experiment design) ซึ่งรูปแบบการทดลองที่สร้างขึ้นถูกเลือกมาจากการทดลองแบบสมบูรณ์ เพื่อลดเวลาและความสิ้นเปลืองทรัพยากรจากการทดลองจำนวนมาก โดยดำเนินแผนการทดลองตามตารางออร์ทोगอนอลอะเรย์ L25 ซึ่งใช้

สำหรับออกแบบการทดลองที่ศึกษาปัจจัยของกระบวนการที่มีปัจจัย 5 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 5 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 3

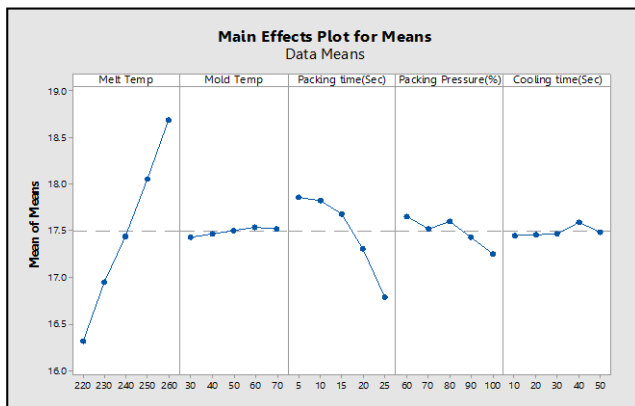
จากนั้นเก็บรวบรวมข้อมูลตามการทดลองที่ออกแบบไว้ และคำนวณค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนระบบ (signal-to-noise ratio) ซึ่งค่าอัตราส่วนของ S/N ที่มีขนาดมากกว่าจะมีผลกระทบในการปรับค่าพารามิเตอร์มากกว่า S/N ที่มีขนาดน้อย ผลการทดลองตามแผนการทดลองโดยตาราง orthogonal array (L25) ด้วยโปรแกรม Solidwork plastic โดยวัดผลการตอบสนองของกระบวนการ คือ ร้อยละของการหดตัวของชิ้นงานและคำนวณค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนระบบ (S/N ratio) ตามวัตถุประสงค์ของระบบ คุณภาพคือค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (smaller the better)

จากผลการวิเคราะห์ของการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Taguchi และการประมวลผลด้วยโปรแกรม Minitab 17 ทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 7 คือผลกระทบของ ค่าความไวต่อสิ่งรบกวนในแต่ละระดับของพารามิเตอร์ซึ่งค่าอัตราส่วนของ S/N ที่มีขนาดมากกว่าจะมีผลกระทบในการปรับค่าพารามิเตอร์มากกว่า S/N ที่มีขนาดน้อยและค่าอัตราส่วนที่สูงจะส่งผลให้ได้ค่าการหดตัวที่น้อยที่สุดเช่นกัน เนื่องจากการวิเคราะห์นี้ได้เลือกใช้ สมการที่ (3) คำนวณค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนระบบ (S/N ratio) ตามวัตถุประสงค์ของระบบคุณภาพคือค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (smaller the better)

หากจะวิเคราะห์จากกราฟจะพบว่าระดับอัตราส่วนสูงสุดของ S/N ในแต่ละพารามิเตอร์ดังนี้ อุณหภูมิ หลอมเหลว (A) เท่ากับ -24.25 ที่อุณหภูมิ 220 องศา เวลาในการฉีดอัด (C) เท่ากับ -24.49 ที่ 25 วินาที แรงดันในการฉีดอัด (D) เท่ากับ -24.72 ที่แรงดันร้อยละ 100 เวลาในการเย็นตัวของชิ้นงาน (E) เท่ากับ -24.83 ที่ 10 วินาที และอุณหภูมิของแม่พิมพ์ (B) เท่ากับ -24.83 ที่อุณหภูมิ 30 องศา ส่วนผลการทดลองในรูปที่ 8 คือผลกระทบในการปรับระดับของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งจะ



รูปที่ 7 ผลการวิเคราะห์ Main Effects Plot of SN ratios



รูปที่ 8 ผลการวิเคราะห์ Main Effects Plot of mean

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน

Level	Melt Temp	Mold Temp	Packing Time	Packing Pressure	Cooling time
1	-24.25	-24.83	-25.03	-24.92	-24.83
2	-24.58	-24.84	-25.01	-24.86	-24.83
3	-24.83	-24.85	-24.94	-24.91	-24.84
4	-25.13	-24.86	-24.75	-24.82	-24.89
5	-25.43	-24.85	-24.49	-24.72	-24.83
Delta	0.56	0.04	0.54	0.21	0.07
Rank	1	5	2	3	4

แสดงผลลัพธ์เป็นค่าการหาค่าของการปรับพารามิเตอร์ในระดับต่าง ๆ และในการวิเคราะห์ผลจะเลือกอันดับของพารามิเตอร์ที่ทำให้เกิดการหาค่าที่น้อยที่สุด จากรูปที่ 11 สามารถสรุปผลได้ดังนี้ อุณหภูมิหลอมเหลว (A) เท่ากับร้อยละ 16.3211 ที่อุณหภูมิ 220 องศา เวลาในการฉีด (C) เท่ากับ

ร้อยละ 16.7883 ที่ 25 วินาที แรงดันในการฉีด (D) เท่ากับร้อยละ -17.2538 ที่แรงดันร้อยละ 100 เวลาในการเย็นตัวของชิ้นงาน (E) เท่ากับร้อยละ 17.4516 ที่ 10 วินาที และอุณหภูมิของแม่พิมพ์ (B) เท่ากับร้อยละ 17.4337 ที่อุณหภูมิ 30 องศา ซึ่งค่าดังกล่าวตรงกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยรูปที่ 7

จากผลการวิเคราะห์สามารถสรุปผลในตารางที่ 4 คือผลการวิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิ หลอมเหลวนั้นมีผลกระทบต่อการยุบตัวของชิ้นงานมากที่สุดโดยสังเกตจากความชันของกราฟและการจัดอันดับความไวของผลการวิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในตารางที่ 4 พบว่าปัจจัยรองลงมาได้แก่ เวลาในการฉีด แรงดันในการฉีด เวลาในการเย็นตัวของชิ้นงาน และอุณหภูมิของแม่พิมพ์

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวของกระบวนการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 หรือร้อยละ 5 โดยวิเคราะห์ผลจากค่า p-value ทำให้ทราบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการหดตัวอย่างมีนัยสำคัญได้แก่ อุณหภูมิ หลอมเหลว เวลาในการฉีด และแรงดันในการฉีด โดยมีค่า p-value เท่ากับ 0.000 0.000 และ 0.023 ตามลำดับ ส่วนปัจจัยที่ไม่มีผลต่อการหดตัวของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญคือปัจจัยที่มีค่า p-value เกินระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้แก่ เวลาในการหล่อเย็น และอุณหภูมิของแม่พิมพ์ โดยมีค่า p-value เท่ากับ 0.392 และ 0.615 ตามลำดับ

4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากตารางที่ 4 ทำให้เราสามารถหาค่าเงื่อนไขที่ทำให้ได้ค่าการหดตัวน้อยที่สุดได้แก่เงื่อนไขที่ 5 มีค่าเท่ากับร้อยละ 15.452 และสามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้เกิดการหดตัวของชิ้นงานมากที่สุดแก่เงื่อนไขที่ 23 มีค่าเท่ากับร้อยละ 19.1892 ดังสรุปในตารางที่ 6 ดังนี้

แต่อย่างไรก็ตามการออกแบบการทดลองแบบ หากุซียังสามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดได้โดยการใช้ผลของระดับของแต่ละพารามิเตอร์ซึ่งให้ค่าการหดตัวที่น้อยที่สุดโดย

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัว

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Melt Temp	4	17.079	4.270	352.940	0.000
Mold Temp	4	0.035	0.009	0.730	0.615
Packing time(Sec)	4	4.063	1.016	83.970	0.000
Packing Pressure(%)	4	0.493	0.123	10.180	0.023
Cooling time(Sec)	4	0.065	0.016	1.340	0.392
Error	4	0.048	0.012		
Total	24	21.784			

ตารางที่ 6 ค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้การยุบตัวน้อยที่สุดและมากที่สุดจากการทดลอง

Run	Control Factors					Response
	A	B	C	D	E	Volumetric Shrinkage (%)
5	220	70	25	100	50	15.4520
23	260	50	10	60	50	19.1892

วิเคราะห์จากรูปที่ 8 จากนั้นทำการเลือกอันดับของพารามิเตอร์ซึ่งทำให้ได้ค่าการหดตัวที่น้อยที่สุดเพื่อจะคำนวณหาค่าการหดตัวด้วยโปรแกรม Minitab 17 และหลังจากนั้นทำการจำลองผลด้วยโปรแกรม Solidwork plastic เพื่อเปรียบเทียบค่าของการหดตัว โดยจากรูปสามารถสรุประดับของพารามิเตอร์ที่ทำให้การหดตัวที่น้อยที่สุดได้แก่ อุณหภูมิหลอมเหลวเท่ากับ 220 องศา อุณหภูมิของแม่พิมพ์เท่ากับ 30 องศา เวลาในการฉีดอัดเท่ากับ 25 วินาที แรงดันในการฉีดอัดเท่ากับร้อยละ 100 และเวลาในการหล่อเย็นเท่ากับ 10 วินาที และหลังจากการวิเคราะห์ด้วย ทากูชิพบว่าค่าการหดตัวที่ระดับของพารามิเตอร์ดังกล่าวอยู่ที่ร้อยละ 15.2758

4.4 การจำลองผลการยุบตัว

นำผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองมาจำลองด้วยโปรแกรม Solidwork plastic โดยทำการจำลองค่าพารามิเตอร์เพื่อเปรียบเทียบกับค่าคำนวณวิธีทากูชิ เป็นเงื่อนไขที่มีการหดตัวที่น้อยที่สุดคือ อุณหภูมิหลอมเหลว 220°C อุณหภูมิแม่พิมพ์

Taguchi Analysis: Volumetric S versus Melt Temp, Mold Temp, Packing time, Packing Pres, ...

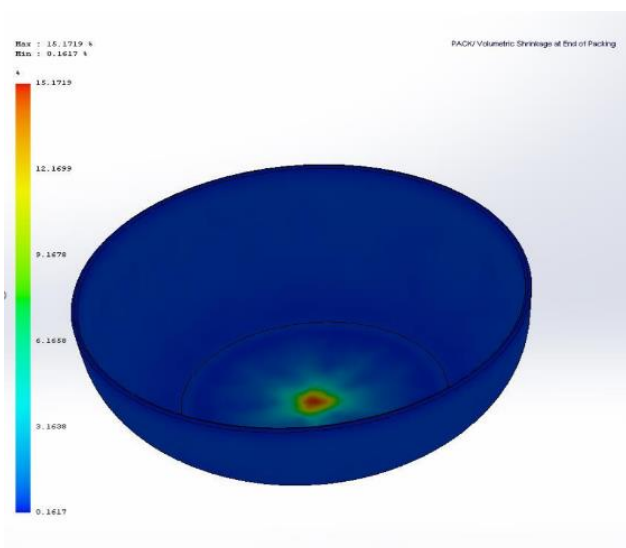
Predicted values

S/N Ratio Mean
-23.7286 15.2758

Factor levels for predictions

Melt Temp	Mold Temp	Packing time(Sec)	Packing Pressure(%)	Cooling time(Sec)
220	30	25	100	10

รูปที่ 9 ผลการทำนายการหดตัวด้วยวิธีทากูชิ



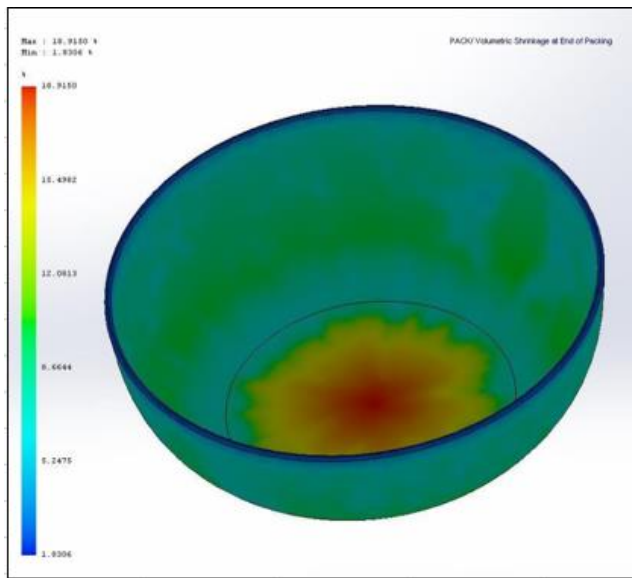
รูปที่ 10 ผลการจำลองการหดตัว

30°C เวลาฉีดอัด 25 วินาที แรงดันฉีดอัดร้อยละ 100 ของแรงดันฉีดอัด และเวลาการเย็นตัว 10 วินาที และพบว่าบริเวณที่มีการหดตัวต่ำสุดอยู่ที่ขอบบนของถ้วยมีร้อยละการหดตัวอยู่ที่ 0.161 และมีการหดตัวมีมากที่สุดอยู่ที่บริเวณก้นถ้วยโดยมีร้อยละการหดตัวอยู่ที่ 15.1719 ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายด้วยทากูชิร้อยละ 0.1039 ดังแสดงในรูปที่ 10

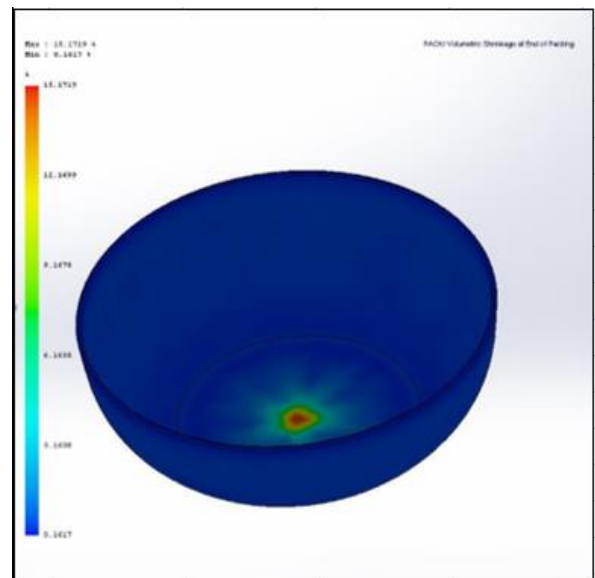
5 วิจัยรณผลการทดลอง

5.1 พารามิเตอร์มีผลต่อการฉีด

จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิหลอมเหลว (A) ส่งผลต่อการหดตัวของชิ้นงานมากที่สุดและรองลงมาได้แก่เวลาในการฉีดอัด (C) แรงดันในการฉีดอัด (D) เวลาในการเย็นตัวของชิ้นงาน (E) และอุณหภูมิของแม่พิมพ์ (B) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบ



(ก) ก่อนทำการออกแบบการทดลอง



(ข) หลังทำการออกแบบการทดลอง

รูปที่ 11 เปรียบเทียบผลการการหดตัวของชิ้นงาน

กับการวิเคราะห์การหดตัวของพลาสติกชนิดพอลิออกซิเมทิลีน [7] ซึ่งมีโครงสร้างกิ่งผลึกเช่นเดียวกับพอลิโพรพิลีน และพบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการหดตัวของชิ้นงานมากที่สุดแต่ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อผลต่างกันได้แก่ แรงดันในการฉีดอัด เวลาในการฉีดอัด เวลาในการหล่อเย็น และอุณหภูมิของแม่พิมพ์ ทั้งนี้จะมีความแตกต่างในส่วนของการพารามิเตอร์ลดลงเนื่องจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนั้นใช้แรงดันในการฉีดอัดสูงถึง 100 Mpa จึงทำให้ปริมาตรของพลาสติกเหลวอัดตัวกันแน่นเวลาอันสั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้เวลาในการฉีดมีผลกระทบต่อหดตัวของชิ้นงานน้อยลงซึ่งมีความแตกต่างจากการทดลองครั้งนี้ที่ใช้แรงดันเพียงร้อยละ 100 ของการฉีดเต็มเต็มชิ้นงานหรือเท่ากับ 7.4 Mpa ดังนั้นจึงต้องอาศัยเวลาในการฉีดอัดที่นานขึ้นเพื่อให้เนื้อพลาสติกเหลวอัดตัวกันแน่นขึ้นจนกว่าจะเกิดการแข็งตัวของพลาสติกจึงทำให้เวลาในการฉีดอัดมีผลต่อการหดตัวอย่างเห็นได้ชัด

5.2 การออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ

จากการหาค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกโดยใช้วิธีการทากูชิในการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูป ของพลาสติกชนิด

พอลิโพรพิลีน ที่ผ่านการใช้งานแล้ว (r-PP) เพื่อให้ได้ค่าการหดตัวที่น้อยที่สุด จากการวิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (signal-to-noise ratio) พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ผลกระทบต่อค่าการหดตัวของชิ้นงานมากที่สุดได้แก่ อุณหภูมิหลอมเหลว และรองลงมาได้แก่ เวลาในการฉีดอัด แรงดันในการฉีดอัด เวลาการเย็นตัว และอุณหภูมิแม่พิมพ์ โดยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิหลอมเหลว 220°C อุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C เวลาฉีดอัด 25 วินาที แรงดันฉีดอัดร้อยละ 100 Mpa และเวลาการเย็นตัว 10 วินาทีซึ่งทำให้ได้ค่าร้อยละของการหดตัวเท่ากับ 15.2758 แต่เมื่อนำพารามิเตอร์ดังกล่าวมาจำลองการฉีดขึ้นรูปเพื่อศึกษาการหดตัวของชิ้นงานด้วยโปรแกรม Solidwork plastic พบว่ามีค่าการหดตัวสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 15.1719 ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนการคำนวณด้วยวิธีทากูชิร้อยละ 0.1039 และสามารถลดการหดตัวถึงร้อยละ 3.7431 เมื่อเปรียบเทียบค่าการหดตัวของชิ้นงานก่อนการออกแบบการทดลองที่มีค่าการหดตัวเท่ากับร้อยละ 18.915 โดยสามารถเปรียบเทียบลักษณะการหดตัวของชิ้นงานก่อนและหลังการออกแบบการทดลองดังรูปที่ 13

6 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าโปรแกรม Solidwork plastic สามารถวิเคราะห์เพื่อหาค่าการหดตัวของชิ้นงานฉีดขึ้นรูปได้และเมื่อทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากุชิทำให้สามารถหาพารามิเตอร์ที่ทำให้เกิดการหดตัวที่น้อยที่สุดคือ อุณหภูมิหลอมเหลว 220°C อุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C เวลาฉีด 25 วินาที แรงดันฉีด 100 ของแรงดันฉีด และ เวลาการเย็นตัว 10 วินาที และพบว่าบริเวณที่มีการหดตัวต่ำสุดอยู่ที่ขอบบนของถ้วยมีร้อยละของการหดตัวอยู่ที่ 0.161 และมีการหดตัวมีมากที่สุดอยู่ที่บริเวณด้านล่างของชิ้นงานโดยมีร้อยละของการหดตัวสูงสุดอยู่ที่ 15.1719

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา บริษัท เอ็นแมช จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือขึ้นรูป เครื่องมือทดสอบคุณสมบัติของพลาสติก บริษัท โคราทอาร์ซี พลาสติก จำกัด และบริษัท โตคูมิ อิเล็กทรอนิกส์ไทย ที่ให้ความอนุเคราะห์พอลิเมอร์ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bunkeaw J. Effect of recycled polypropylene blends on mechanical properties and melt flow index. *M.S. thesis, Dept. Industrial Eng Chula Univ.* Bangkok; 2009.
- [2] Khaownetr S. A Study of Parameters Affecting Quality of Injection Molded Plastic Product Using Experimental and Finite Element Methods. *M.S. thesis, Dept. Mechanical Eng SWU Univ.* Bangkok; 2007.
- [3] Kunjairod D. Study on Influence of Injection Velocity and Injection Pressure for Flow Balancing in Injection Mold with Multi Cavity. *M.S. thesis, Dept. Industrial Eng KMUNB Univ.* Bangkok; 2016.
- [4] Jitarre A. Design of Experiment for analyzing factors affecting to Varied deformation in the simulation of ABS plastic injection molding Process. *M.S. thesis, Dept. Industrial Eng RMUTT Univ.* Bangkok; 2012.
- [5] Sukruengku W, Tuengta W, Poontanod S, Kongrit A, Thammachote N, Nitthikarnjanatharn J. Analysis of the Flow front on the Cup of Injection Mold Case study of used polyoxymethylene plastic. In: *8th Engineering Science Technology and Architecture Conference 2017, Khonkean, Jul.21.* 2017: p. 449–455.
- [6] Sukruengkul W, Makthong C, Thammachote N, Tiwasingh M, YodPeet S, Nitthikarnjanatharn J. Analysis of the Flow front and injection parameter of Injection Mold. Case study of used Polypropylene (Saline bag). In: *Innovation and Technology Conference (ITC 2017), Surin, Dec.25–26.* 2017: p. 359–364.
- [7] Ramakrishnanand R, Mao K. Minimization of Shrinkage in Injection Molding Process of Acetal Polymer Gear Using Taguchi DOE Optimization and ANOVA Method. *International Journal of Mechanical and Industrial Technology.* 2559; 4(2): 72–79.
- [8] Mizamzul N, Kamaruddin S, Othman AR. Modeling and Analysis of Injection Moulding Process Parameters for Plastic Gear Industry Application. Hindawi Publishing Corporation ISRN Industrial Engineering. Vol 2013. Article ID 869736. 2013
- [9] Khongrit A, Champutsa K, Panpooklang R, Runkhatok P, Nitthikarnjanatharn J. Effect of

- Coupling Agent on Mechanical Properties of Recycled Polypropylene and Recycled High Density Polyethylene Blend. *SWU Engineering Journal*. 2016; 11: 57–58.
- [10] Tummasema K. An Analysis for Determining Suitable Plastic Injection Molding Parameters of Polyoxymethylene (POM) that Affect Part's Dimensions by Design of Experiments and Finite Element Method - based Flow Simulation. M.S. Independent Study. 2003.
- [11] Wangand X, Cui X. Effect of ionomers on mechanical proper- ties, morphology and rheology of polyoxymethylene and its blends with methyl methacrylate–styrene–butadiene copolymer. *European Polymer Journal*. 2005; 41: 871–880.
- [12] Ramakrishnanand R, Mao K. Minimization of Shrinkage in Injection Molding Process of Acetal Polymer Gear Using Taguchi DOE Optimization and ANOVA Method. *International Journal of Mechanical and Industrial Technology*. 2016; 4(2): 72–79.
- [13] Bangphan S. Application of Taguchi Method for Optimizing Turning Process by Studyingof Production Machining Parameters. *UBU Engineering Journal*, Jul 2014; 7: 104–112.
- [14] Issarapong P. A Study of optimal condition for polypropylene plastic injection process. M.S. thesis, Dept. Industrial. EngKMUNB Univ. Bangkok; 2011.
- [15] H. RA, Mustaffab MT, Annuarc AF, Azmid H, Zakariae MZ and Khalil ANM. An Optimization of Shrinkage in Injection Molding Parts by Using Taguchi Method. *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics*. 2015; 10(1);1–8.
- [16] Pareek R, Bhamniya J. Optimization of Injection Moulding Process using Taguchi and ANOVA. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2013; 4(1).
- [17] Kavade MV, Kadam SD. Parameter Optimization of Injection Molding of Polypropylene by using Taguchi Methodology. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*. 2012; 4(4): 49–58.
- [18] Oktem H, Erzurumlu T, Uzman I. Application of Taguchi optimization technique in determining plastic injection molding process parameters for a thin-shell part. *Materials and Design*. 2007; (28): 1271–1278.
- [19] Kamaruddin S, Zahid A, Khan, Foong SH. Application of Taguchi Method in the Optimization of Injection Moulding Parametersfor Manufacturing Products from Plastic Blend. *IACSIT International Journal of Engineering and Technology*. 2010; 4(6).