KKU Res.j. 2014; 19(3) : 385-398
http://resjournal.kku.ac.th

ปัจจัยและสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของขวดโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต

Factors and optimal operating condition of process factors affecting the quality of polyethylene terephthalate bottle

*อามิณฑ์ หล้าวงศ์, ชาญณรงค์ สายแก้ว**
*Amin Lawong, Charnnarong Saikaew**

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
**Correspondent author: charn_sa@kku.ac.th*

บทคัดย่อ

ปัญหาของเสียที่เกิดจากศูนย์กลางเยื้องบริเวณก้นขวดน้ำดื่มพลาสติกเป็นอาการของปัญหาที่ทำให้เกิดความสูญเสียของโรงงานกรณีศึกษา การปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตสามารถกระทำได้ด้วยการหาปัจจัยและสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัย ที่มีผลกระทบต่อค่าความแตกต่างของความหนาขวดที่ผ่านกระบวนการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ การออกแบบการทดลองด้วยวิธีไชนินถูกใช้ศึกษาผลกระทบของปัจจัย 6 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของขวด นอกจากนี้ การวิเคราะห์ความแปรปรวนและการเปรียบเทียบพหุคูณถูกใช้หาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัย ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเวลาฉีดเป็นปัจจัยเดียวที่มีผลกระทบต่อความแตกต่างของความหนาของขวดโดยเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่มีเวลาฉีด 11 วินาทีเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้สามารถลดจำนวนของเสียลงได้

Abstract

The defect of plastic drinking water bottle with indent in the center of bottom is a symptom that causes the defect in the case study. Quality improvement of the product and manufacturing process could be accomplished by determining process factors and optimal operating condition of the significant factors affecting the difference between the maximum and minimum values of thickness of the bottle in the plastic injection molding process. The Shainin design of experiment method was used to investigate the effect of six process factors on the quality of plastic drinking water bottle. Furthermore, analysis of variance and multiple comparisons were used to determine the optimal operating condition of the significant factors. The results showed that injection time was the only significant factor affecting the average difference between the maximum and minimum values of thickness of the bottle with the optimal operating condition of 11 seconds used for reducing the amount of waste.

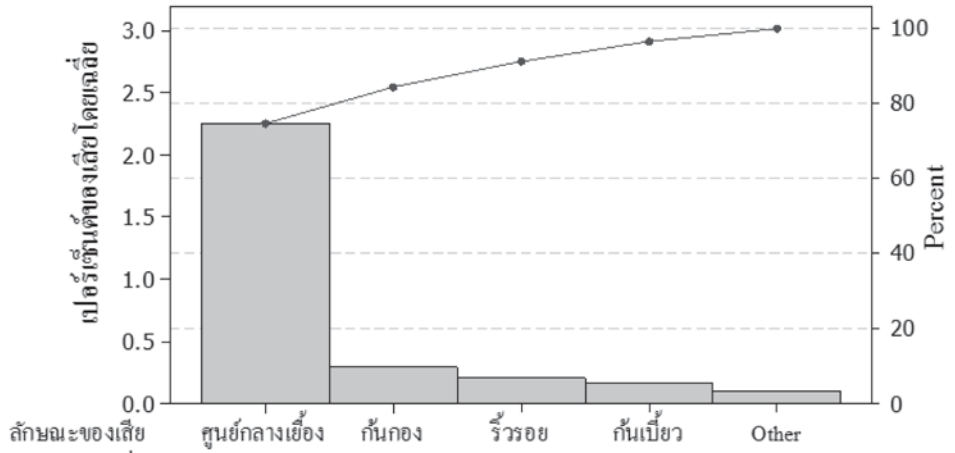
คำสำคัญ: การฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ การปรับปรุงคุณภาพ วิธีไชนิน การวิเคราะห์เชิงสถิติ
Keywords: Plastic injection molding, Quality improvement, Shainin method, Statistical analysis

1. บทนำ

กลุ่มผลิตบรรจุภัณฑ์ขวดน้ำดื่มพลาสติกเป็นอุตสาหกรรมการผลิตที่จัดอยู่ในกลุ่มตลาดน้ำดื่มบรรจุขวดพลาสติกที่มีการขยายตัวค่อนข้างสูงและมีความต้องการของกลุ่มผู้บริโภคที่ต้องการความสะดวกรวดเร็วในการบริโภคน้ำดื่ม การรองรับการขยายตัวของประชากรที่มีมากขึ้นและความต้องการที่เพิ่มขึ้นทำให้ธุรกิจน้ำดื่มบรรจุขวดมีการแข่งขันในการเข้ามาช่วงชิงส่วนแบ่งทางการตลาด โดยทั่วไป บรรจุภัณฑ์น้ำดื่มมี 4 ประเภท คือ 1) ขวดพลาสติกแบบ PET (polyethylene terephthalate) 2) ขวดแก้ว 3) ขวดขาวขุ่น และ 4) ถังพลาสติกขนาดใหญ่ โดยขวดพลาสติกแบบ PET มีสัดส่วนถึง 50% และมีมูลค่าตลาดประมาณ 21,000 ล้านบาท (1) คุณภาพบรรจุภัณฑ์ขวดน้ำดื่มพลาสติกและต้นทุนในการผลิตเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการขยายตัวและการแข่งขันของธุรกิจประเภทนี้

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพบรรจุภัณฑ์ขวดน้ำดื่มพลาสติกแบบ PET ที่มีขนาดบรรจุปริมาตรสุทธิ 1500 ซม.^{3} ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดเดียวที่ผลิตในโรงงานกรณีศึกษาในปัจจุบัน (พ.ศ. 2555) ขั้นตอนการผลิตประกอบไปด้วยการเตรียมวัตถุดิบเม็ดพลาสติกนำไปผ่านเครื่องอบ (2) และห้องอุณหภูมิหลอมเหลวเม็ดพลาสติก (3) โดยเครื่องฉีดจะฉีดพลาสติกหลอมเข้าไปในแม่พิมพ์ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเรียกว่า “ฟรีฟอร์ม” จากนั้นจะจัดเก็บฟรีฟอร์มเพื่อส่งไปยังเครื่องเป่า เครื่องเป่าจะผลิตผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นขวด และส่งลำเลียงไปที่เครื่องติดฉลากออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ขวดน้ำดื่มโดยผ่านการตรวจสอบคุณภาพพร้อมจัดส่งไปสู่ลูกค้าที่เป็นบริษัทผลิตน้ำดื่มบรรจุขวดพลาสติกต่อไป

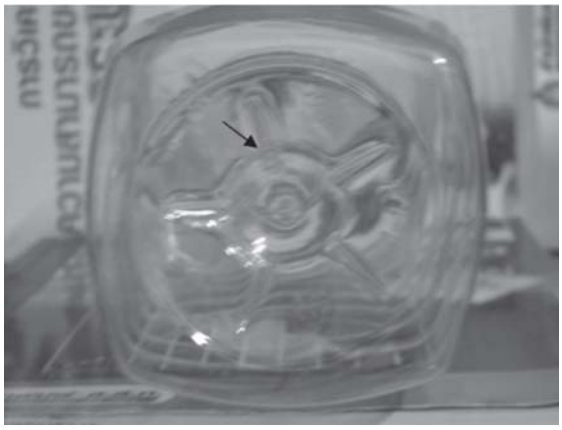
การศึกษานี้เริ่มต้นด้วยการรวบรวมข้อมูลของเสียที่ไม่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพซึ่งแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของลักษณะของเสีย ดังแผนภาพพาเรโต (Pareto chart) ในรูปที่ 1 จากภาพพบว่าศูนย์กลางเยื้องบริเวณก้นขวดเป็นลักษณะของเสียที่เกิดขึ้นมากที่สุด รองลงมาคือขวดเป็นก้นกอง รูปที่ 2 แสดงการเกิดลักษณะของเสียแบบศูนย์กลางเยื้องบริเวณก้นขวด จากการศึกษาของโรงงานพบว่าศูนย์กลางเยื้องบริเวณก้นขวดเกิดจากพรีฟอร์มมีความหนาแตกต่างกัน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3 การวัดค่าความหนาของพรีฟอร์มสามารถกระทำได้จากเครื่องมือวัด ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4 ลักษณะการเกิดของเสียประเภทนี้จำเป็นต้องได้รับการแก้ไข เนื่องจากเป็นของเสียที่มีปริมาณมากที่สุด ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อผลผลิตและความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ที่มีต่อลูกค้า ลักษณะของเสียแบบศูนย์กลางเยื้องบริเวณก้นขวดสามารถวัดได้จากความหนาของ



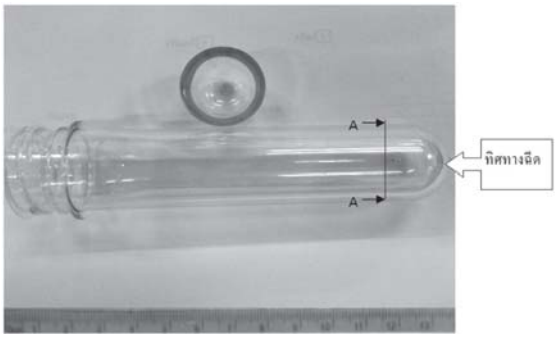
ลักษณะของเสีย	ศูนย์กลางเยื้อง	ก้นกอง	รี้วรอย	ก้นเบี้ยว	Other
ค่าเฉลี่ย	2.25	0.30	0.21	0.16	0.10
Percent	74.5	9.9	7.0	5.3	3.3
Cum %	74.5	84.4	91.4	96.7	100.0

รูปที่ 1 เปอร์เซ็นต์ของลักษณะของเสียที่ไม่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพ

พรีฟอร์ม ซึ่งกำหนดความแตกต่างของความหนาระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดไม่เกิน 0.4 มิลลิเมตร การวิเคราะห์หาปัจจัยที่น่าจะมีอิทธิพลต่อความแตกต่างของความหนาของพรีฟอร์ม สามารถกระทำได้จากเครื่องมือคุณภาพ เช่น 7 QC tools และการออกแบบการทดลอง

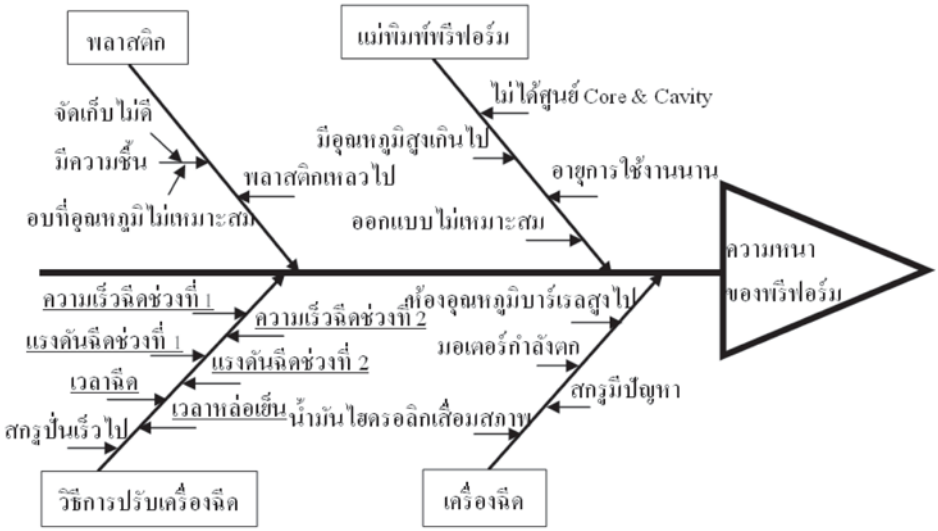


รูปที่ 2 ศูนย์กลางเยื้อง (บริเวณก้นขวด)



รูปที่ 3 ลักษณะของพรีฟอร์มที่มีความหนาแตกต่างกัน

รูปที่ 4 การวัดค่าที่ปลายของฟรีฟอร์ม (ค่าความแตกต่างของความหนา = max - min)



รูปที่ 5 แผนภูมิก้างปลา

หนึ่งใน 7 QC tools ที่นิยมใช้ในการระบุความสัมพันธ์กันระหว่างอาการของปัญหา และสาเหตุของอาการนั้น คือ แผนภูมิก้างปลา (fishbone diagram) การระดมสมองของทีมงานที่เป็นพนักงานและผู้วิจัยสามารถนำมาเขียนแผนภูมิก้างปลาซึ่งแสดงดังรูปที่ 5 ปัจจัยที่น่าจะมีผลกระทบต่อคุณภาพของขวดน้ำดื่มพลาสติกที่เป็นพรีฟอร์มน่าจะมาจากการปรับเครื่องฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ (plastic injection molding machine) (2, 4, 5-8) ซึ่งได้แก่ ความเร็วฉีดช่วงที่ 1 แรงดันฉีดช่วงที่ 1 ความเร็วฉีดช่วงที่ 2 แรงดันฉีดช่วงที่ 2 เวลาหล่อเย็นและเวลาฉีด การพิสูจน์ความสัมพันธ์ระหว่างหัวปลา (ลักษณะของเสียแบบศูนย์กลางเยื้องบริเวณก้นขวด) และก้างปลา (ปัจจัยทั้งหก) สามารถกระทำได้จากการทดสอบสมมติฐาน อย่างไรก็ตาม ถ้าข้อมูลที่รวบรวมได้มีความน่าเชื่อถือไม่เพียงพอ อาจทำให้การทดสอบสมมติฐานและการวิเคราะห์ผลไม่มีความแม่นยำเท่าที่ควร

การออกแบบการทดลอง (design of experiments) เป็นแนวทางหนึ่งในการเก็บข้อมูลอย่างเป็นระบบ การออกแบบการทดลองมีจุดประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตโดยใช้หาตัวแปรอิสระหรือปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ในทางปฏิบัติ (independent variables or factors) ที่มีผลกระทบต่อตัวแปรตามหรือผลตอบสนอง (responses or outputs) โดยลดความแปรปรวนของผลตอบสนองให้น้อยที่สุดในขณะที่ทำให้ผลตอบสนองอยู่ในเป้าหมายของการออกแบบมากที่สุด (9) การออกแบบการทดลองมีหลายวิธี เช่น การออกแบบการทดลองแบบดั้งเดิม (classical design of experiments) การออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ (Taguchi method) และการออกแบบการทดลองด้วยวิธีไชนิน (Shainin method) กรณีที่มีจำนวนปัจจัยในการทดลองเป็นจำนวนมากก่อให้เกิดปัญหาค่าใช้จ่ายและเวลาในการทดลอง Bhote and Bhote (2000) กล่าวอ้างว่า การออกแบบการทดลองด้วยวิธีไชนินมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทดลองทั้งสองแบบในเรื่องจำนวนครั้งในการทดลองที่ใช้น้อยกว่าและได้ผลการวิเคราะห์ที่น่าเชื่อถือและแม่นยำซึ่งจะทำให้ประหยัดต้นทุนในการทดลองโดยเฉพาะในกรณีที่มีจำนวนปัจจัยเป็นจำนวนมากและเป็นวิธีการที่ไม่จำเป็นต้องพึ่งหลักการทางสถิติที่มีความซับซ้อนและเข้าใจได้ยาก

การแก้ปัญหาคุณภาพของขวดน้ำดื่มพลาสติกในโรงงานกรณีศึกษานี้จึงใช้แนวทางการออกแบบการทดลองด้วยวิธีไชนิน เนื่องจากปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบความสัมพันธ์กับลักษณะของเสียแบบศูนย์กลางเยื้องบริเวณก้นขวด มีจำนวนมาก การออกแบบการทดลองด้วยวิธีไชนินมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้ สำหรับการศึกษานี้ใช้การค้นหาตัวแปร (variables search) เพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อความแตกต่างของความหนาของพรีฟอร์มในกระบวนการผลิตด้วยเครื่องฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ อย่างไรก็ตาม การออกแบบการทดลองแบบดั้งเดิมก็ยังคงใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยภายหลังจากที่ใช้วิธีการค้นหาตัวแปร ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาของเสียแบบศูนย์กลางเยื้องบริเวณก้นขวดให้มีเปอร์เซ็นต์ของเสียลดลงและยังช่วยในการปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการผลิตขวดน้ำดื่มพลาสติกขนาด 1500 ซม.^{3} ให้มีประสิทธิภาพและประสิทธิผลยิ่งขึ้น วิธีการค้นหาตัวแปรถูกนำไปใช้ประโยชน์หลายจุดประสงค์ เช่น เพื่อเป็นการคัดกรองตัวแปรหรือปัจจัยที่คาดว่าน่าจะมีอิทธิพลต่อผลตอบสนอง เพื่อเป็นการแยกตัวแปรที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบสนองออกจากตัวแปรอื่นๆ ที่มีอิทธิพลน้อยกว่า และเพื่อเพิ่มค่าตัวชี้วัดดัชนีความสามารถด้านสมรรถนะของกระบวนการ (*Cp*, *Cpk*) ที่เกิดจากการทราบตัวแปรที่มีนัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนอง นักวิจัยจำนวนหนึ่งใช้วิธีการค้นหาตัวแปรเพื่อจุดประสงค์ดังกล่าว เช่น Thomas and Antony (2004) ใช้วิธีนี้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปร 5 ตัวที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของวัสดุผสมที่เป็นชิ้นส่วนของยานอวกาศในอุตสาหกรรมการบิน ในขณะที่ Emmelmann and Urbina (2011) ใช้วิธีการค้นหาตัวแปร 6 ตัวที่มีอิทธิพลต่อ 2 ตัวแปรตามคือ อัตราการตัดเฉือนวัสดุออกจากผิวด้วยเลเซอร์และความขรุขระของผิวในอุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตขวดน้ำดื่มพลาสติกโดยการหาปัจจัยและสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในกระบวนการฉีดพลาสติกเข้า

แม่พิมพ์ที่มีผลต่อปัญหาของเสียแบบศูนย์กลางเยื้องบริเวณก้นขวดให้มีเปอร์เซ็นต์ของเสียลดลง

3. วิธีวิจัย

งานวิจัยนี้มีขั้นตอนในการศึกษาดังนี้

3.1 ใช้เครื่องมือคุณภาพ ได้แก่ 7QC tools เพื่อรวบรวมข้อมูล ระบุปัญหาและอาการของปัญหาพร้อมหาสาเหตุเบื้องต้น

3.2 ออกแบบการทดลองด้วยวิธีไชนินโดยใช้วิธีการค้นหาตัวแปร เพื่อหาตัวแปรหรือปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อความแตกต่างของความหนาของพรีฟอร์มในกระบวนการผลิตด้วยเครื่องฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ รุ่น EM260 (Chen De Plastic Machine Co., Ltd.) โดยมีแรงบีบอัดแม่พิมพ์ (clamping force) 260 ตัน และมีจำนวนช่องสำหรับการผลิตพรีฟอร์ม 16 ช่อง (cavity)

3.3 หาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญหลังจากผ่านขั้นตอน 3.2 แล้ว ด้วยการออกแบบการทดลองแบบดั้งเดิมและการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) และการเปรียบเทียบพหุคูณ (multiple comparisons)

3.4 ยืนยันผลการทดลองด้วยการฉีดพรีฟอร์มแบบต่อเนื่องที่สภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

3.5 ตรวจวัดความเค้นตกค้างของพรีฟอร์มที่สภาวะเดิมของกระบวนการฉีดพรีฟอร์มกับสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญ โดยใช้เครื่องโพลาริสโคป (polariscope testing instrument) ยี่ห้อ Presto ที่โรงงานกรณีศึกษา

3.6 ทดสอบความสามารถในการรับภาระแรงกดของพรีฟอร์มที่สภาวะเดิมของกระบวนการฉีดพรีฟอร์มกับสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญ ตามมาตรฐาน ASTM D 2659 โดยใช้เครื่องทดสอบแรงกด รุ่น CY ขนาด 50 ตัน ที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น เพื่อหาความสามารถต่อการรับน้ำหนักการวางซ้อนทับด้านบนที่กระทำต่อขวด

เพื่อให้เกิดความเข้าใจในการออกแบบการทดลองด้วยวิธีไชนินโดยใช้วิธีการค้นหาตัวแปร ผู้วิจัยขออธิบายขั้นตอนการออกแบบการทดลองนี้ได้ดังนี้

การออกแบบการทดลองด้วยวิธีไชนินโดยใช้วิธีการค้นหาตัวแปรมีคำนิยามของปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุดเรียกว่า Red X และปัจจัยที่มีความสำคัญอันดับสองเรียกว่า Pink X และปัจจัยที่มีความสำคัญอันดับสามเรียกว่า Pale Pink X โดยปัจจัยเหล่านี้จะมีอิทธิพลต่อผลตอบสนองที่เรียกว่า Green Y ระดับของปัจจัยที่นำมาพิจารณาในการออกแบบการทดลองนี้ถูกแบ่งออกเป็นสองระดับคือ ระดับที่ 1 เรียกว่า “Best of Best” ซึ่งจะแทนระดับที่ผู้วิจัยคิดว่าเป็นระดับที่น่าจะเหมาะสมในกระบวนการผลิต และระดับที่ 2 เรียกว่า “Worst of Worst” ซึ่งจะแทนระดับเดิมของกระบวนการผลิตนั้น การออกแบบการทดลองด้วยวิธีไชนินโดยใช้วิธีการค้นหาตัวแปรมีขั้นตอนย่อยลงไปอีกดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เรียกว่า “Ball Park” คือการกำหนดปัจจัยและหาค่าระดับของปัจจัยซึ่งแบ่งเป็นสองระดับ (Best of Best และ Worst of Worst) และทำการทดลองระดับละ 3 ซ้ำ หลังจากนั้น ให้คำนวณหาค่าอัตราส่วน $D/\bar{d}$ โดยที่ D คือความแตกต่างของค่ามัธยฐานและ $\bar{d}$ คือค่าเฉลี่ยของพิสัยของสองระดับ ซึ่งค่าอัตราส่วนนี้ต้องมากกว่า 1.25:1 หมายความว่าปัจจัยที่เลือกมามีผลต่อ Green Y และการกำหนดระดับทั้งสองของปัจจัยมีผลกระทบต่อ Green Y อย่างมีนัยสำคัญ ถ้าอัตราส่วนนี้ผ่าน ให้ไปทำขั้นตอนที่ 2 ต่อ แต่ถ้าไม่ผ่านให้พิจารณาศึกษาปัจจัยใหม่

ขั้นตอนที่ 2 เรียกว่า “Separation of Important and Unimportant Factors” คือการแยกปัจจัยที่สำคัญออกจากปัจจัยที่ไม่สำคัญและกำจัดปัจจัยที่ไม่สำคัญออกไป รวมทั้งกริยาร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction) ที่เกิดจากปัจจัยนั้นออกไป ขั้นตอนนี้สามารถกระทำได้โดยทำการสลับเปลี่ยนระดับจากระดับ Best of Best เป็น Worst of Worst ของปัจจัยแรกที่คิดว่ามีผลกระทบต่อ Green Y มากที่สุด โดยให้ปัจจัยที่เหลืออยู่ในระดับเดิม แล้วจึงทำการทดลอง และทำการคำนวณหาขอบเขตควบคุมจากข้อมูล Green Y ของระดับทั้งสองจากสมการ (1) และ (2) ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95%

$$CL_B = M_B \pm t_{\alpha/2,n-2}\left(\frac{\bar{d}}{d_2}\right) \quad (1)$$

$$CL_W = M_W \pm t_{\alpha/2,n-2}\left(\frac{\bar{d}}{d_2}\right) \quad (2)$$

โดยที่ CL_B และ CL_W คือ ขอบเขตควบคุมทั้งบนและล่างจากข้อมูล Green Y ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 ของระดับ Best of Best และ Worst of Worst ตามลำดับ ในขณะที่ M_B และ M_W คือ ค่ามัธยฐานจากข้อมูล Green Y ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 ของระดับ Best of Best และ Worst of Worst ตามลำดับ ค่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดนี้มีค่า $\alpha = 0.05$ ในขณะที่ $n = 6$ ตามข้อมูล Green Y ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 ที่กระทำ 3 ซ้ำของระดับ Best of Best และที่กระทำ 3 ซ้ำของระดับ Worst of Worst ดังนั้น ค่า $t_{\alpha/2,n-2} = t_{0.05/2,6-2} = 2.776$ ส่วนค่า $\overline{d}$ คือค่าเฉลี่ยของพิสัยของสองระดับ ในขณะที่ d_2 คือค่าคงที่ซึ่งมีค่า 1.81 การตัดสินใจว่าผลการสลับเปลี่ยนระดับจากระดับ Best of Best เป็น Worst of Worst ของปัจจัยแรกที่คิดว่าจะมีผลกระทบต่อ Green Y หรือไม่นั้น สามารถจำแนกได้ 3 กรณี ดังนี้

(a) ถ้าผลการสลับเปลี่ยนระดับจากระดับ Best of Best เป็น Worst of Worst ของปัจจัยแรกแสดงผลอยู่ในขอบเขตควบคุมทั้งบนและล่างของทั้งสองระดับ แสดงว่าปัจจัยนั้นไม่มีนัยสำคัญ ให้ทดลองปัจจัยที่เหลือต่อไป

(b) ถ้าผลการสลับเปลี่ยนระดับจากระดับ Best of Best เป็น Worst of Worst ของปัจจัยแรกแสดงผลตรงข้ามกันคือ ระดับ Best of Best ของปัจจัยแรกแสดงผลอยู่ในขอบเขตควบคุมของ Worst of Worst และระดับ Worst of Worst ของปัจจัยแรกแสดงผลอยู่ในขอบเขตควบคุมของ Best of Best หรือมีแนวโน้มเลยผ่านเส้นกลาง (center line) ถ้าผลเป็นเช่นนี้แสดงว่า ปัจจัยที่ทำการสลับนี้เป็นปัจจัยเดียวที่มีนัยสำคัญ (Red X) และไม่จำเป็นต้องทดสอบปัจจัยอื่นๆ อีกต่อไป

(c) ถ้าผลการสลับเปลี่ยนระดับจากระดับ Best of Best เป็น Worst of Worst ของปัจจัยแรกแสดงผลอยู่นอกขอบเขตควบคุมทั้งบนและล่างของทั้งสองระดับ แต่มีลักษณะแตกต่างจากกรณี (b) แสดงว่า ปัจจัยนี้ยังต้องนำมาพิจารณาร่วมกับปัจจัยอื่น ซึ่งจะต้องนำไปวิเคราะห์ในขั้นตอนที่ 3 ต่อไป

ขั้นตอนที่ 3 เรียกว่า “Capping Run” คือการยืนยันปัจจัยที่มีนัยสำคัญและความสำคัญของปัจจัยนั้น ขั้นตอนนี้จะใช้ในกรณี (c) ในขั้นตอนที่ 2 โดยที่อย่างน้อยสองปัจจัยมีอิทธิพลร่วมกัน ถ้าผลการสลับเปลี่ยนอยู่นอกขอบเขตควบคุมทั้งบนและล่างของทั้งสองระดับ

ขั้นตอนที่ 4 เรียกว่า “Factorial Analysis” คือการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญที่จะทำให้คุณภาพผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการดีที่สุดโดยการหาศึกษาปัจจัยอิทธิพลหลัก (main effect) และอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย (interaction effect) ขั้นตอนนี้สามารถใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1-3 เพื่อนำมาแสดงผลในกราฟอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย

4. ผลการวิจัยและการอภิปราย

4.1 ผลการวิเคราะห์การทดลองด้วยวิธีไชนิน

จากการศึกษาด้วยเครื่องมือคุณภาพพบว่าปัจจัยที่น่าจะมีผลกระทบต่อคุณภาพของขวดน้ำดื่มพลาสติกที่เป็นพรีฟอร์มมีจำนวน 6 ปัจจัย ได้แก่ เวลาฉีด เวลาหล่อเย็น ความเร็วฉีดช่วงที่ 2 แรงดันฉีดช่วงที่ 2 ความเร็วฉีดช่วงที่ 1 และแรงดันฉีดช่วงที่ 1 การพิสูจน์ความสัมพันธ์ระหว่างหัวปลา (ลักษณะของเสียแบบศูนย์กลางเยื้องบริเวณก้นขวด) และก้างปลา (ปัจจัยทั้ง 6) สามารถกระทำได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธีไชนินโดยใช้วิธีการค้นหาตัวแปร เพื่อหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความแตกต่างของความหนาของพรีฟอร์มในกระบวนการผลิตด้วยเครื่องฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์

ตารางที่ 1 แสดงผลการทดลองในขั้นตอนที่ 1 ของการออกแบบการทดลองด้วยวิธีไชนินโดยใช้วิธีการค้นหาตัวแปร ด้วยการกำหนดปัจจัยและค่าระดับของปัจจัย ค่าอัตราส่วน $D/\overline{d}$ สามารถคำนวณได้จากผลการทดลองที่ 1-3 ซึ่งเป็นค่าความแตกต่างของความหนาของพรีฟอร์มได้ผลดังนี้

$$\frac{D}{\overline{d}} = \frac{0.23 - 0.15}{[(0.24 - 0.22) + (0.16 - 0.15)]/2} = 5.33$$

ผลการคำนวณได้ค่าอัตราส่วน $D/\overline{d}$ มากกว่า 1.25 ซึ่งถือว่าขั้นตอนนี้ผ่าน และทำการทดลองต่อในขั้นตอนที่ 2

ขอบเขตควบคุมจากข้อมูล Green Y (ความแตกต่างของความหนาของพรีฟอร์ม) ของระดับทั้งสองสามารถคำนวณได้จากสมการ (1) และ (2) ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% ขอบเขตควบคุมบนและล่างของระดับใหม่ (Best of Best) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$CL_B = M_B \pm t_{\alpha/2,n-2}\left(\frac{\bar{d}}{d_2}\right)$$
$$= 0.15 \pm 2.776(0.015/1.81) = 0.15 \pm 0.023$$

และขอบเขตควบคุมบนและล่างของระดับเดิม (Worst of Worst) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$CL_W = M_W \pm t_{\alpha/2,n-2}\left(\frac{\bar{d}}{d_2}\right)$$
$$= 0.23 \pm 0.023$$

ค่าเส้นกลาง (center line) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$CL = \frac{M_B + M_W}{2} = \frac{0.15 + 0.23}{2} = 0.19$$

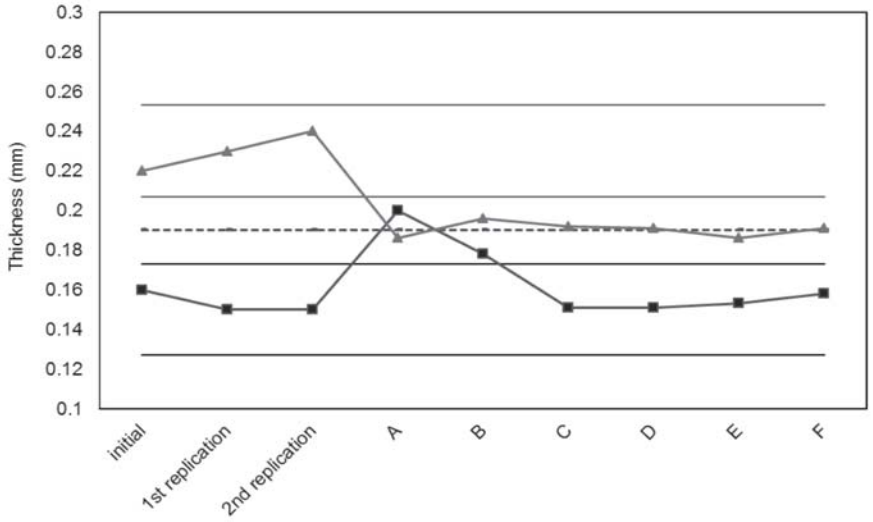
การสลับเปลี่ยนระดับจากระดับ Best of Best (11.5 วินาที) เป็น Worst of Worst (12.5 วินาที) ของปัจจัยแรก (ปัจจัย *A*: เวลาฉีด) ที่คิดว่ามีผลกระทบต่อความแตกต่างของความหนาของพรีฟอร์มมากที่สุด โดยให้ปัจจัยที่เหลืออยู่ในระดับเดิม แล้วจึงทำการทดลอง ผลการสลับเปลี่ยนระดับของปัจจัยอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 2และสามารถนำไปแสดงผลดังรูปที่ 6

ตารางที่ 1 ปัจจัยและผลการทดลองระดับเดิมและระดับใหม่

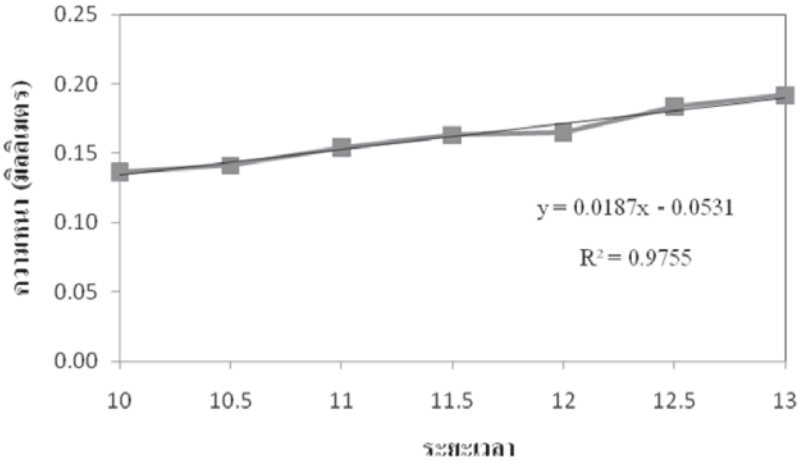
ปัจจัย	**ระดับเดิม (Worst of Worst)**	**ระดับใหม่ (Best of Best)**
A: เวลาฉีด (s)	12.5	11.5
B: เวลาหล่อเย็น (s)	13	12
C: ความเร็วฉีดช่วงที่ 2 (mm/s)	12	10
D: แรงดันฉีดช่วงที่ 2 (bar)	8	6
E: ความเร็วฉีดช่วงที่ 1 (mm/s)	40	36
F: แรงดันฉีดช่วงที่ 1 (bar)	30	26
ผลการทดลองที่ 1	0.22	0.16
ผลการทดลองที่ 2	0.23	0.15
ผลการทดลองที่ 3	0.24	0.15

ตารางที่ 2 ผลการสลับเปลี่ยนระดับของปัจจัย

ปัจจัย	สลับคู่ปัจจัย	ความแตกต่างของความหนา (mm)	ขอบเขตควบคุม	สรุปผล
A: เวลาฉีด (s)	A_WR_B	0.19	0.13-0.17	มีความสำคัญ Red X
	A_BR_W	0.20	0.21-0.25	
B: เวลาหล่อเย็น (s)	B_WR_B	0.20	0.13-0.17	ไม่มีความสำคัญ
	B_BR_W	0.18	0.21-0.25	
C: ความเร็วฉีดช่วงที่ 2 (mm/s)	C_WR_B	0.19	0.13-0.17	ไม่มีความสำคัญ
	C_BR_W	0.15	0.21-0.25	
D: แรงดันฉีดช่วงที่ 2 (bar)	D_WR_B	0.19	0.13-0.17	ไม่มีความสำคัญ
	D_BR_W	0.15	0.21-0.25	
E: ความเร็วฉีดช่วงที่ 1 (mm/s)	E_WR_B	0.19	0.13-0.17	ไม่มีความสำคัญ
	E_BR_W	0.15	0.21-0.25	
F: แรงดันฉีดช่วงที่ 1 (bar)	F_WR_B	0.19	0.13-0.17	ไม่มีความสำคัญ
	F_BR_W	0.16	0.21-0.25	



รูปที่ 6 ผลการการสลับเปลี่ยนระดับจากระดับ Best of Best เป็น Worst of Worst ของปัจจัยแต่ละปัจจัย



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของความหนาของพรีฟอร์มและเวลาฉีด

จากรูปที่ 6 จะเห็นว่า ผลการสลับเปลี่ยนระดับจากระดับ Best of Best เป็น Worst of Worst ของปัจจัย *A*: เวลาฉีด คือ ระดับทั้งสองของปัจจัยนี้แสดงผลมีแนวโน้มเลยผ่านเส้นกลาง (center line) ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ปัจจัย *A* เป็นปัจจัยเดียวที่มีผลกระทบต่อความแตกต่างของความหนาของพรีฟอร์มอย่างมีนัยสำคัญ (Red X) และไม่จำเป็นต้องทดสอบปัจจัยอื่นๆ อีกต่อไป อย่างไรก็ตามผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบปัจจัยอื่นๆ ด้วยการทดลองเช่นเดียวกับปัจจัย *A* ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยอื่นๆ ไม่มีผลกระทบต่อความแตกต่างของความหนาของพรีฟอร์ม เวลาฉีดเป็นปัจจัยเดียวที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของพรีฟอร์มและจะส่งผลต่อการเกิดของเสียของขวดน้ำดื่มพลาสติกเป็นผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นได้ การหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของขวดน้ำดื่มในกระบวนการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ จะส่งผลให้จำนวนของเสียลดลงได้

4.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัย

ก่อนที่จะหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัย (เวลาฉีด) ผู้วิจัยได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของความหนาของพรีฟอร์มและเวลาฉีดที่ระดับต่างๆ รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของความหนาของพรีฟอร์มและเวลาฉีด จากรูป จะเห็นว่าแบบจำลองเชิงเส้นตรงคือ

$$\hat{y}=0.0094x+0.1247$$

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

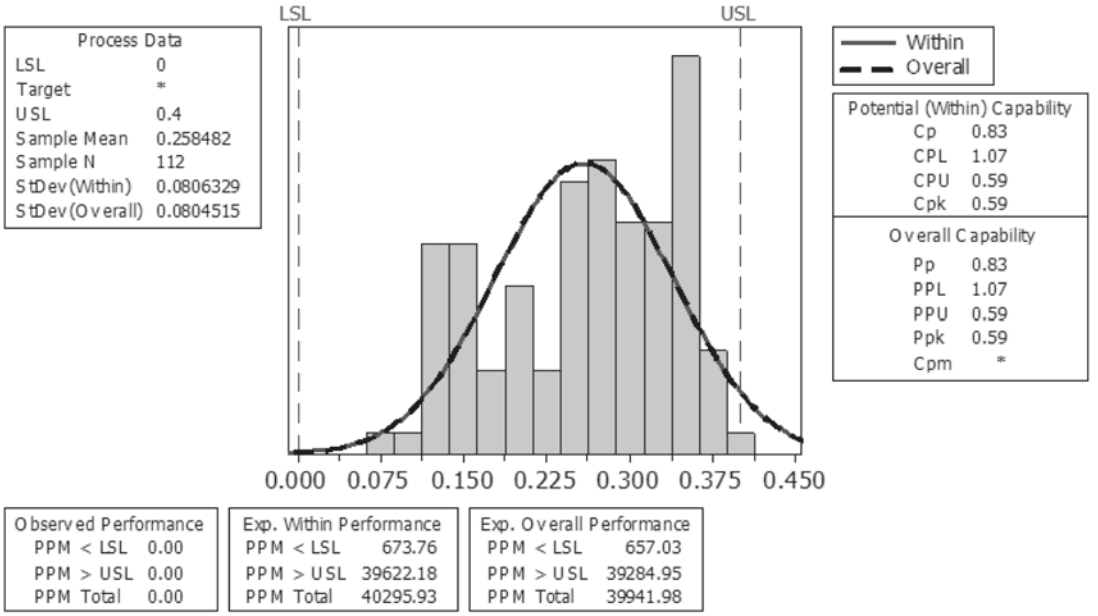
Source of Variation	SS	df	MS	*F-value*	*p-value*
Between Groups	0.006563903	6	0.001094	14.2401	< 0.0001
Within Groups	0.001075536	14	7.68E-05		
Total	0.007639439	20			

โดยที่ $\hat{y}$ คือค่าประมาณความแตกต่างของความหนาของพรีฟอร์ม และ x คือเวลาฉีดที่เปลี่ยนแปลงไป ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (coefficient of determination) หรือค่า R^2 ซึ่งเป็นค่าที่ใช้วัดความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอยที่แสดงสัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ที่ตัวแปรอิสระ x มีส่วนในการอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรตาม y ค่า R^2 = 0.98 แสดงให้เห็นว่า 98 เปอร์เซ็นต์ของความแปรปรวนของความแตกต่างของความหนาของพรีฟอร์มสามารถอธิบายได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงของเวลาฉีดในกระบวนการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ นอกจากนี้ อัตราความแตกต่างของความหนาของพรีฟอร์มในกระบวนการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์มีค่าเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยซึ่งขึ้นอยู่กับเวลาฉีด

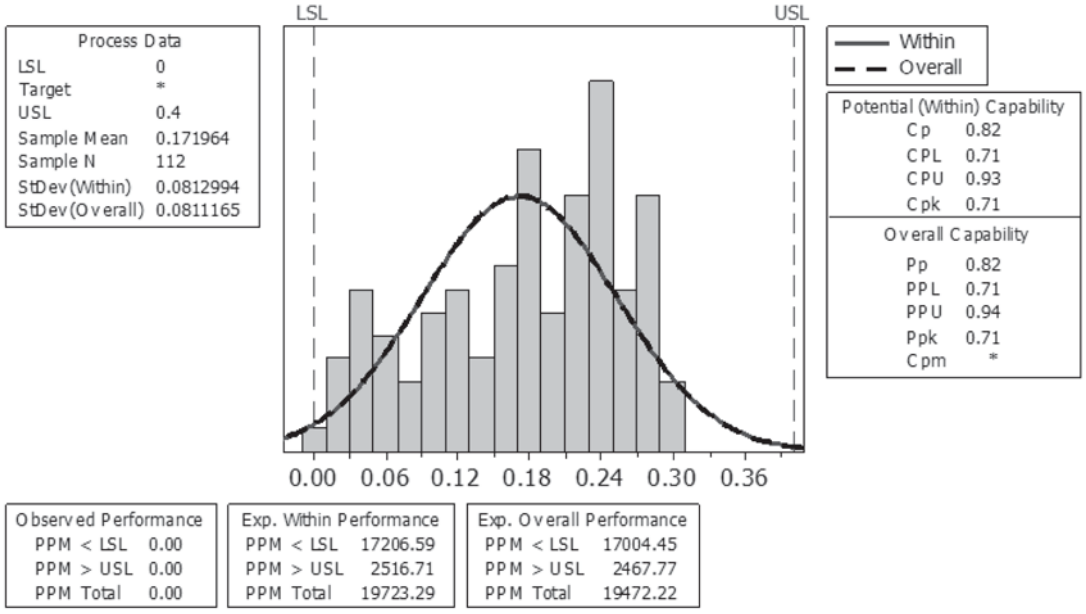
ตารางที่ 3 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่ใช้ทดสอบความแตกต่างของความหนาของพรีฟอร์มโดยเฉลี่ย ในระยะเวลาฉีดต่างๆ กัน (7 ระยะเวลาฉีด) จากตารางสามารถสรุปได้ว่า ระยะเวลาฉีดต่างๆ กันมีผลกระทบต่อค่าความแตกต่างของความหนาของพรีฟอร์มโดยเฉลี่ย ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (p-value < 0.05) อย่างไรก็ตาม การสรุปผลที่ได้แสดงให้เห็นแต่เพียงว่า ระยะเวลาฉีดมีผลกระทบต่อค่าความแตกต่างของความหนาของพรีฟอร์มเท่านั้น แต่ยังไม่สามารถกล่าวได้ว่า ระยะเวลาฉีดเท่าไรจะเป็นระยะเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ความแตกต่างของความหนาของพรีฟอร์มตามที่กำหนด

การเปรียบเทียบพหุคูณ (multiple comparisons) ด้วยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตระหว่างคู่ (9, 12) สามารถกระทำได้ด้วยวิธีผลต่างนัยสำคัญที่น้อยที่สุด (the least significant difference method, LSD) ผลการเปรียบเทียบพหุคูณด้วยวิธีนี้แสดงดังตารางที่ 4 จากตาราง จะเห็นว่า มีจำนวนหลายคู่ของระยะเวลาฉีดที่ทำให้ความแตกต่างของความหนาของพรีฟอร์มโดยเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน อาทิ 10s. VS 10.5s., 10s.VS 11s., 10.5s.VS 11s., 11s.VS 11.5s., 11s.VS 12s., 11.5s.VS 12s., 12s.VS 12.5s., 12 .5s. VS 13s. เพื่อให้ได้ความแตกต่างของความหนาของพรีฟอร์มน้อยที่สุด จะเห็นว่า ระยะเวลาฉีด 11.5 วินาทีเป็นระยะเวลาที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม ระยะเวลาฉีด 11 วินาทีและระยะเวลาฉีด 11.5 วินาทีมีผลต่อความแตกต่างของความหนาของพรีฟอร์มโดยเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน เนื่องจากระยะเวลาฉีด 11 วินาทีเป็นเวลาที่กระทำได้ง่ายในทางปฏิบัติ ดังนั้น เวลาฉีดที่ระดับ 11 วินาทีจึงเป็นระยะเวลาฉีดที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ความแตกต่างของความหนาของพรีฟอร์มน้อยที่สุด โดยที่ระดับของปัจจัยอื่นๆ ใช้ระดับใหม่ที่ผู้วิจัยนำเสนอ (ดูตารางที่ 1) หมายเหตุ ผู้ประกอบการของโรงงาน กรณีศึกษาสามารถเลือกใช้เวลาฉีดที่ระดับ 11 วินาที โดยที่ยังคงใช้ระดับเดิมของปัจจัยอื่นๆ เนื่องจากปัจจัยอื่นๆ ไม่มีผลกระทบต่อความแตกต่างของความหนาของพรีฟอร์มโดยเฉลี่ย

การยืนยันผลการทดลองสามารถกระทำได้ด้วยการฉีดพรีฟอร์มแบบต่อเนื่องทั้งหมด 21 ช็อต ที่ระดับที่เหมาะสม จะได้จำนวนพรีฟอร์มทั้งหมด 21 x 16 = 336 พรีฟอร์ม จากนั้นสุ่มมา 7 ช็อต 7 x 16 = 112 พรีฟอร์ม แล้วนำมาวัดความสามารถของกระบวนการโดยทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากสภาวะเดิมของกระบวนการผลิตตามที่โรงงานกรณีศึกษาดำเนินการอยู่ ความสามารถของกระบวนการสามารถวัดด้วยดัชนีวัดความสามารถด้านศักยภาพแบบระยะสั้นของกระบวนการ (Cp) และดัชนีวัดความสามารถด้านสมรรถนะแบบระยะสั้นของกระบวนการ (Cpk) (13) ผลการวิเคราะห์พบว่า ความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุงที่สภาวะเดิมมีค่า Cp = 0.83 และค่า Cpk = 0.59 (ดูรูปที่ 8) ในขณะที่ความสามารถของกระบวนการหลังการปรับปรุงที่สภาวะที่เหมาะสมมีค่า Cp = 0.82 และค่า Cpk = 0.71 (ดูรูปที่ 9) ถึงแม้ว่า ค่า Cp ก่อนและหลังการปรับปรุง



รูปที่ 8 ความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุง



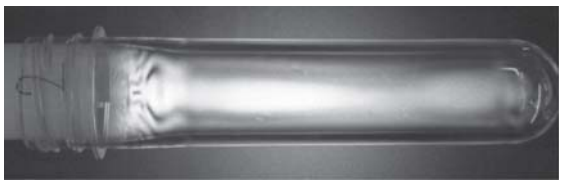
รูปที่ 9 ความสามารถของกระบวนการหลังการปรับปรุง

จะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ค่า *Cpk* มีค่าแตกต่างกัน ซึ่งค่า เป็นค่าที่ให้ความสำคัญของค่าเฉลี่ยหรือค่าเซตติ้งของกระบวนการ (ค่าความแตกต่างของความหนาของพรีฟอร์มตามข้อกำหนด) นอกจากนี้ ถ้าพิจารณาสัดส่วนข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์โดยรวมก่อนและหลังการปรับปรุง (ดู Exp. Overall Performance ในรูปที่ 8 และ 9) ได้ค่า PPM > USL = 3.928% และ 0.247% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นั่นคือ กระบวนการผลิตขวดพรีฟอร์มด้วยเครื่องฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์มีความสามารถในการปรับปรุงความแตกต่างของความหนาของพรีฟอร์มด้วยการหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยของกระบวนการผลิต

4.3 การตรวจวัดความเค้นตกค้างของพรีฟอร์ม

นอกจากการวิเคราะห์ผลด้วยการออกแบบการทดลองและเครื่องมือทางคุณภาพตามที่กล่าวมาแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการตรวจวัดความเค้นตกค้างจากรูปที่ 8 ของพรีฟอร์ม โดยใช้เครื่องโพลาริสโคป (14-16) ก่อนทำการเป่าขึ้นรูปขวด จากการศึกษาพบว่า พรีฟอร์มที่ผลิตในสภาวะที่เหมาะสมมีความเค้นตกค้างบริเวณคอขวดและปลายขวดน้อยกว่า โดยดูจากการมีริ้วสีแสดน้อยลงซึ่งจะส่งผลต่อการเป่าขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น (วัสดุยืดออกเท่ากันทุกทิศทาง) คือมีความหนาใกล้เคียง (ดูรูปที่ 10 และ 11) และยังสามารถทราบถึงลักษณะการไหลของพลาสติกเหลวในขณะที่ถูกฉีด ซึ่งจะเห็นเป็นสีเขียวและริ้วสีชมพูตามทิศทางการไหลของพลาสติกเหลว

รูปที่ 10 โพลาริสโคประดับที่เหมาะสม



รูปที่ 11 โพลาริสโคปที่ระดับเดิม

4.4 การทดสอบภาระแรงกดของพรีฟอร์ม

การทดสอบภาระแรงกดของขวดพลาสติกหลังจากการเป่าขึ้นรูปสามารถกระทำได้ตามมาตรฐาน ASTM D 2659 (17) เพื่อหาความสามารถต่อการรับน้ำหนักการวางซ้อนทับด้านบนที่กระทำต่อขวด (18) ถูกนำมาทดสอบ โดยชั่งน้ำหนัก วัดแรงกดที่ระดับสูงสุด และระยะยุบเฉลี่ย ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 5 จากตารางจะเห็นว่าแรงกดสูงสุดที่ขวดพรีฟอร์มสามารถรับน้ำหนักได้มีค่าแตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบขวดพรีฟอร์มที่ผลิตจากกระบวนการที่สภาวะเดิมและกระบวนการที่สภาวะที่เหมาะสม ในขณะที่ระยะยุบเฉลี่ยมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยจากการเสียรูปจะอยู่ที่ระหว่างช่วงกลางลำตัวและที่ช่วงคอ ซึ่งการเสียรูปที่ช่วงคอจะให้แรงกดสูงสุดที่น้อยกว่า (การอ่านค่าของเครื่องทดสอบที่วัดค่าแรงกดที่ระดับสูงสุดจะมีค่าสูงและต่ำ ที่เป็นเช่นนั้นก็เนื่องมากจากการเลือกใช้เครื่องที่มีกำลังมากมาทดสอบกับวัสดุที่มีความแข็งแรงน้อย)

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความแตกต่างของความหนาของพรีฟอร์มในแต่ละระดับของเวลาฉีดเป็นคู่ โดยใช้วิธี LSD

การเปรียบเทียบระหว่างเวลาฉีด	ผลการเปรียบเทียบ
10s. VS 10.5s.	0.14-0.143 = -0.00333
10s. VS 11s.	0.14-0.153 = -0.01333
10s. VS 11.5s.	0.14-0.163 = -0.02333*
10s. VS 12s.	0.14-0.167 = -0.02667*
10s. VS 12.5s.	0.14-0.180 = -0.04*
10s. VS 13s.	0.14-0.190 = -0.05*
10.5s. VS 11s.	0.143-0.153 = -0.01
10.5s. VS 11.5s.	0.143-0.163 = -0.02*
10.5s. VS 12s.	0.143-0.167 = -0.02333*
10.5s. VS 12.5s.	0.143-0.180 = -0.03667*
10.5s. VS 13s.	0.143-0.190 =-0.04667*
11s. VS 11.5s.	0.153-0.163 = -0.01
11s. VS 12s.	0.153-0.167 = -0.01333
11s. VS 12.5s.	0.153-0.180 = -0.02667*
11s VS 13s.	0.153-0.190 = -0.03667*
11.5s. VS 12s.	0.163-0.167 = -0.00333
11.5s. VS 12.5s.	0.163-0.180 = -0.01667*
11.5s. VS 13s.	0.163-0.190 = -0.02667*
12s. VS 12.5s.	0.167-0.180 = -0.01333
12s. VS 13s.	0.167-0.190 = -0.02333*
12 .5s. VS 13s.	0.180-0.190 = -0.01

หมายเหตุ * หมายถึงค่าเฉลี่ยคู่นั้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

การแสดงผลการทดสอบสามารถทำได้โดยการเรียงลำดับค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตในแต่ละระดับตามลำดับจากน้อยไปมาก ถ้าคู่ใดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จะขีดเส้นใต้ดังนี้ 10s. VS 10.5s., 10s. VS 11s., 10.5s. VS 11s., 11s. VS 11.5s., 11s. VS 12s., 11.5s. VS 12s., 12s. VS 12.5s., 12 .5s. VS 13s.

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบภาระแรงกดของระดับเดิมกับระดับที่เหมาะสม

ตัวอย่าง	ระดับเดิม			ระดับที่เหมาะสม		
	น้ำหนัก (g)	แรงกดสูงสุด (kg)	ระยะยุบ (mm)	น้ำหนัก (g)	แรงกดสูงสุด (kg)	ระยะยุบ (mm)
1	37.6	22.53	6.3	36.98	19.31	5.6
2	37.42	22.53	6.17	37.47	22.53	7.32
3	37.38	25.75	5.58	37.61	22.53	3.85
4	37.5	25.75	3.94	38.23	25.75	7.49
5	38.16	22.57	7.11	37.04	22.54	3.41
6	37.82	22.53	5.21	36.64	16.1	7.04
เฉลี่ย	37.65	23.61	5.72	37.33	21.46	5.79

หมายเหตุ: ระยะยุบเป็นระยะที่เครื่องเคลื่อนที่กด

5. สรุป

คุณภาพผลิตภัณฑ์และต้นทุนในการผลิตเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการขยายตัวและการแข่งขันของธุรกิจต่างๆ รวมทั้งบรรจุภัณฑ์ขวดน้ำดื่มพลาสติก การปรับปรุงคุณภาพบรรจุภัณฑ์ขวดน้ำดื่มพลาสติกแบบ PET ที่มีขนาดบรรจุปริมาตรสุทธิ 1500 ซม.^{3} ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดเดียวที่ผลิตในโรงงานกรณีศึกษานี้ ลักษณะของเสียที่เกิดขึ้นมากที่สุดคือ ศูนย์กลางเยื้องบริเวณก้นขวดที่เกิดจากพรีฟอร์มมีความหนาแตกต่างกัน ลักษณะการเกิดของเสียประเภทนี้ถูกแก้ไขด้วยเครื่องมือคุณภาพคือ 7 QC tools และการออกแบบการทดลองด้วยวิธีไชนินรวมทั้งการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังใช้การวิเคราะห์ทางวิศวกรรมอื่นๆ เช่น การตรวจวัดความเค้นตกค้างของพรีฟอร์มโดยใช้เครื่องโพลาริสโคปและการทดสอบภาระแรงกดของพรีฟอร์ม

ผลการวิเคราะห์การทดลองด้วยวิธีไชนินแสดงให้เห็นว่าเวลาฉีดในเครื่องฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์เป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความแตกต่างของความหนาของขวดพรีฟอร์มโดยเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นตัวชี้วัดคุณภาพการเกิดศูนย์กลางเยื้องบริเวณก้นขวดพรีฟอร์ม จากการใช้การวิเคราะห์เชิงสถิติสามารถกำหนดเวลาฉีดที่เหมาะสมที่ระดับ 11 วินาทีที่ทำให้ได้ความแตกต่างของความหนาของพรีฟอร์มน้อยที่สุด

การยืนยันผลการทดลองกระทำโดยการฉีดพรีฟอร์มแบบต่อเนื่องที่ระดับที่เหมาะสม แล้วนำมาวัดความสามารถของกระบวนการโดยทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากสภาวะเดิมของกระบวนการผลิตตามที่โรงงานกรณีศึกษาดำเนินการอยู่ ค่าก่อนปรับปรุงมีค่า 0.83 และค่า= 0.59 เมื่อปรับปรุงแล้วค่า = 0.82 และค่า= 0.71 ซึ่งส่งผลให้มีจำนวนของเสียลดลงจาก 39,285 ppm เป็น 2,468 ppm นั่นคือจำนวนของเสียลดลง 35,817 ชิ้นต่อล้านชิ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการผลิตขวดพรีฟอร์มด้วยเครื่องฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์มีความสามารถในการปรับปรุงความแตกต่างของความหนาของพรีฟอร์มด้วยการหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยของกระบวนการผลิต

การตรวจวัดความเค้นตกค้างของพรีฟอร์มและการทดสอบภาระแรงกดของพรีฟอร์มมีค่าแตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบขวดพรีฟอร์มที่ผลิตจากกระบวนการที่สภาวะเดิมและกระบวนการที่สภาวะที่เหมาะสม

ผู้ประกอบการของโรงงานกรณีศึกษาสามารถใช้สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตขวดน้ำดื่มพลาสติกแบบ PET ที่มีขนาดบรรจุปริมาตรสุทธิ 1500 ซม.^{3} ซึ่งจะทำให้ลดของเสีย และต้นทุนการผลิต ส่งผลให้สามารถแข่งขันช่วงชิงส่วนแบ่งทางการตลาดได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้จัดการฝ่ายวิศวกรรมบริษัทผลิตขวดน้ำดื่มพลาสติกแห่งหนึ่งในจังหวัดขอนแก่นที่ให้การอนุเคราะห์ข้อมูลต่างๆ ในการทดลองในครั้งนี้และพนักงานทุกคนที่ให้ความร่วมมือในการทดลองตลอดจนให้ความรู้ในเรื่องลักษณะของเสียที่เกิดขึ้น

7. เอกสารอ้างอิง

(1) Kasikorn Research Center. (2011). Bottled water last year '54: Percentage growth 15 the adverse weather conditions. Search 22 January 2013. Available from: http://www.kasikornresearch.com/TH/Pages/Default.aspx

(2) Itthiprom R, Dutchanee S, Saikaew C. Waste reduction in plastic bottle manufacturing for drinking water industry.KKU Eng J. 2013;40(3): 437-446. Thai.

(3) Jaemheam S, Moojarean V, Saegsawat. Metrics, specific energy consumption of injection tube preformed plastic PET. Srinakharinwirot Eng J. 2012; 7(2):15- 23. Thai.

(4) Patcharaphan S. Defect of injection molded part: cause and troubleshooting. Kasetsart Eng J. 2009; 69(22):91-104. Thai.

(5) Akbarzadeh, A. and Sadeghi, M. Parameter study in plastic injection molding process using statistical methods and IWO algorithm. Int. J. Modeling and Optimization. 2011;1(2), 141-145.

(6) Chen, P., Chuang, T., Hsiao, H., Yang, K. and Tsai, H. Simulation and experimental study in determining injection molding process parameters for thin-shell plastic parts via design of experiments analysis. Expert Systems with Applications. 2009;36: 10752-10759.

(7) Kurt, M., Kamber, O.S., Kaynak, Y., Atakok, G. and Girit, O. Experimental investigation of plastic injection molding: Assessment of the effects of cavity pressure and mold temperature on the quality of the final products. Mater &Des. 2009;30: 3217-3224.

(8) Ozcelik, B. and Erzurumlu, T. Comparison of the warpage optimization in the plastic injection molding using ANOVA, neural network model and genetic algorithm. J. Mater. Process. Technol. 2006;171: 437-445.

(9) Saikaew C. Statistics and Design of Engineering Experiments. (2 nd Edition), Faculty of Engineering Press, Khon Kaen University, Khon Kaen; 2012. Thai.

(10) Thomas, A. and Antony, J. Applying Shainin's variables search methodology in aerospace applications at assembly. Assembly Automation. 2004;24(2): 184–191.

(11) Emmelman, C. and Urbnina, J.P.C. Analysis of the influence of burst-mode laser ablation by modern quality tools. Physics Procedia. 2011;12: 172-181.

(12) Montgomery, D.C. Design and Analysis of Experiments, 6th Edition, John Wiley & Sons, New York; 2001.

(13) Ploypanitchroen, K. Process Capability Analysis (PCA), 5th Edition, Thai-Nichi Institute of Technology, Bangkok; 2008. Thai.

(14) Numkiertikjorwut C, Patcharaphan S. Analysis of residual stress within injection-molded part via computer-aided engineering program. Kasetsart Eng J.2011; 24(76): 33-42. Thai.

(15) Pinit P, Naiyo T, Pomsutwan T. Polaris copeland compact desktop: design and evaluation. Engineering J. 2010; 2(4): 27- 38. Thai.

(16) Postawa P, Kwiatkowski D.(2006). Residual stress distribution injection molded parts. J. Achievements in Mater. & Manuf. Eng. 2006;18: 171-174.

(17) ASTM Specification D 2659, Volume 08.02, Standard Test Method for column Crush Properties of Blow Thermoplastic containers.

(18) Nitivaraput V, Pimsarn M. Bucking load analysis of a PET –plastic bottle. The 23rd Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand, 4-7 Nov 2009.

(19) Bhote, K R. and Bhote, A. K. World Class Quality: Using Design of Experiments to Make It Happen: Amacom New York; 2000.