

การปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพลาสติกรีไซเคิล

พนิดา ศรีประยา¹ และชาญณรงค์ สายแก้ว²

บทคัดย่อ

ชิ้นส่วนพลาสติกที่ใช้เป็นส่วนประกอบของรางหลอดฟลูออเรสเซนต์สำเร็จรูปไม่ได้รับความพึงพอใจจากลูกค้าเนื่องจากมีจุดบกพร่อง มีความแข็งแรงน้อย และมีความคงทนต่อความร้อนน้อยในขณะใช้งาน งานวิจัยนี้ศึกษาแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพชิ้นส่วนพลาสติกโดยประยุกต์ใช้หลักการซิกซ์ ซิกมา ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพเชิงสถิติของกระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์ แนวทางการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการดีเมอิก (DMAIC) ประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอน คือการกำหนดแผนงานในการแก้ปัญหาการวัดความสามารถของกระบวนการ การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา การปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ และการควบคุมกระบวนการ วิธีการวิจัยใช้การออกแบบการทดลองแบบผสมและวิธีพหุคูณผลตอบ ตามแนวทางการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการดีเมอิก การศึกษานี้เป็นการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดในการนำเศษโพลีคาร์บอเนตรีไซเคิลมาผสมกับเม็ดโพลีคาร์บอเนตใหม่ด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกเพื่อให้ชิ้นงานพลาสติกมีสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อนดีที่สุด งานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่า การออกแบบการทดลองแบบผสมและวิธีพหุคูณผลตอบ ตามแนวทางการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการดีเมอิกสามารถปรับปรุงคุณภาพของชิ้นงานพลาสติกตามคุณลักษณะ สมบัติทางกลและสมบัติเชิงความร้อนของผลิตภัณฑ์พลาสติกรีไซเคิล

คำสำคัญ: ผลิตภัณฑ์พลาสติกรีไซเคิล กระบวนการดีเมอิกซิกซ์ซิกมา การออกแบบการทดลองแบบผสมแบบ D-optimal วิธีพหุคูณผลตอบ การปรับปรุงคุณภาพ

¹บัณฑิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

corresponding author, e-mail: charn_sa@kku.ac.th

Improving Quality of Recycled Plastic Products

Panita Sripraya¹ Charnnarong Saikaew²

Abstract

Plastic parts in electric device manufacturing of fluorescent bulb kit do not meet the customer's satisfaction because of their defects, low strength, and low heat resistance. This research aims to improve the quality of plastic parts by implementing six sigma. Six sigma has evolved into a statistically oriented approach to process and product quality improvement. Six sigma approach has five steps consisting of define phase, measure phase, analyze phase, improve phase, and control phase (DMAIC process). By following the five step-six sigma process of DMAIC, mixture experiments and response surface methodology are employed in the study. The optimal setting conditions of plastic mixtures of recycled and virgin polycarbonate are determined for maximum mechanical property and thermal property of injection molded plastic parts. This research has shown that design of experiments and response surface methodology in conducting six sigma analysis improve the quality of plastic parts based on mechanical and thermal characteristics of recycled plastic products.

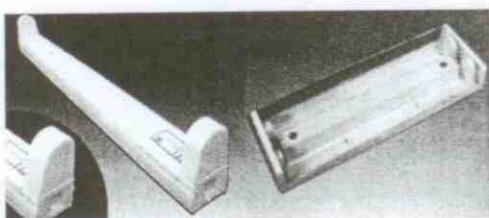
Keywords: Recycled plastic products, six sigma DMAIC process, mixture experiments, response surface methodology, quality improvement

¹) Master Graduate, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

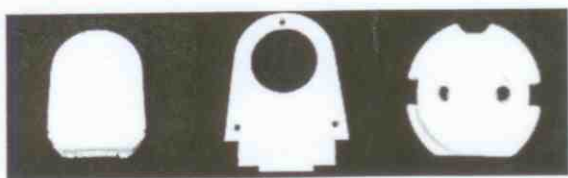
* ²) Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University
corresponding author, e-mail: charn_sa@kku.ac.th

บทนำ

ปัจจุบันมีโรงงานผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องใช้พลาสติกจากพลาสติกรีไซเคิลเป็นจำนวนมากเนื่องจากใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำและทำให้สามารถจำหน่ายสินค้าได้ในราคาถูกลง ถึงแม้ว่าผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผลิตจากเม็ดพลาสติกใหม่ก็ตาม แต่ก็สามารถได้เปรียบในเรื่องของราคาที่ถูกลงและเหมาะสมกับสภาพเศรษฐกิจปัจจุบันที่ผู้บริโภคมีกำลังซื้อต่ำ (ธนาคารพัฒนาวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมแห่งประเทศไทย, 2547) โรงงานกรณีศึกษาเป็นโรงงานที่ใช้พลาสติกรีไซเคิลในกระบวนการผลิตโดยใช้พลาสติกรีไซเคิลผลิตชิ้นส่วนที่ใช้เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น รางหลอดฟลูออเรสเซนต์ ขาสปริงหัวขาวโคม ด้วยขาสปริงโคมเป็นต้น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1 การใช้พลาสติกรีไซเคิลมาผลิตผลิตภัณฑ์จำเป็นต้องควบคุมคุณภาพและต้องคำนึงถึงปริมาณสัดส่วนของพลาสติกรีไซเคิลแต่ละชนิดในปริมาณที่เหมาะสม มิฉะนั้น อาจเป็นผลทำให้กระบวนการผลิตมีปริมาณของเสียหรือชิ้นงานมีความเสียหายเกิดขึ้นได้ ซึ่งก่อให้เกิดต้นทุนในกระบวนการผลิตที่สูงขึ้นและได้ชิ้นส่วนพลาสติกที่มีคุณภาพไม่เป็นไปตามความต้องการของลูกค้า



รูปที่ 1 รางหลอดฟลูออเรสเซนต์ขาสปริงหัวขาวโคมด้วยขาสปริงโคม



รูปที่ 2 หัวไฟใหญ่สีขาว ฝาหัวไฟใหญ่สีขาว และไส้ในใหญ่สีขาว

ชิ้นส่วนพลาสติกที่ใช้ในการศึกษาคือ หัวไฟใหญ่ ไส้ในใหญ่ ฝาใหญ่ หัวไฟเล็ก ไส้ในเล็ก และฝาเล็ก ซึ่งแสดงในรูปที่ 2 โพลีคาร์บอเนตเป็นวัสดุดีในการฉีดขึ้นรูปชิ้นส่วนพลาสติกในโรงงานกรณีศึกษา

เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิตทางด้านวัตถุดิบ และเป็นการเพิ่มคุณภาพผลิตภัณฑ์ จึงต้องหาวิธีที่มีประสิทธิภาพและประสิทธิผลในการนำโพลีคาร์บอเนตกลับมาใช้งานใหม่อีกครั้งหรือการรีไซเคิล โดยคำนึงถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ตามสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน โดยทั่วไปแล้ว เทคนิคการรีไซเคิลวัตถุดิบที่ดี จะใช้การผสมเม็ดโพลีเมอร์ใหม่กับโพลีเมอร์รีไซเคิลเพื่อช่วยให้สมบัติเชิงกลของโพลีเมอร์รีไซเคิลดีขึ้น แต่ปัญหาที่พบในวิธีการนี้คือไม่สามารถทราบปริมาณที่ถูกต้องของการผสมเม็ดโพลีเมอร์ใหม่กับโพลีเมอร์รีไซเคิลได้ Shriver et al. (1994) ศึกษาการนำโพลีคาร์บอเนตกลับมาใช้งานใหม่ โดยศึกษาสมบัติเชิงกลของโพลีคาร์บอเนตรีไซเคิลในกระบวนการฉีดพลาสติก และทดสอบหาค่าความแข็งแรงและแรงกระแทกของโพลีคาร์บอเนตรีไซเคิล พบว่าพลาสติกที่เกิดการแปรรูปแล้วจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของความแข็งแรงและความต้านทานต่อแรงกระแทกลดลง Mantia (2002) ศึกษาอัตราส่วนผสมในการนำเม็ดโพลีคาร์บอเนตใหม่มาผสมกับโพลีคาร์บอเนตรีไซเคิล พบว่าการนำโพลีคาร์บอเนตกลับมาใช้งานหรือใช้ประโยชน์ใหม่นั้นมีข้อดีคือสามารถลดปริมาณความต้องการในการใช้เม็ดพลาสติกใหม่ได้อีกทั้งยังทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและช่วยลดต้นทุนในการผลิต ส่วนข้อเสียคือเมื่อผสมโพลีคาร์บอเนตรีไซเคิลในปริมาณมากขึ้นจะทำให้สมบัติเชิงกลลดลง อาทิ ความต้านทานแรงยึดดึง ความต้านทานต่อแรงกระแทก เป็นต้น ปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปเลือกที่จะแก้ปัญหาส่วนผสมโพลีเมอร์โดยใช้วิธีการลองผิดลองถูก (trial and error) เพื่อหาอัตราส่วนผสมของโพลีเมอร์ต่างชนิดกัน แต่ยังไม่พบว่ามีงานวิจัยใดที่ศึกษาเกี่ยวกับการนำหลักการออกแบบการทดลอง (design of experiments) และวิธีพื้นผิวผลตอบ (response surface methodology) มาใช้ในการวางแผนการทดลองเพื่อหาค่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุด

ในการผสมเม็ดโพลีคาร์บอเนตใหม่กับโพลีคาร์บอเนตรีไซเคิล มีแต่เพียงศึกษาพลาสติกชนิดอื่นๆ โดยใช้หลักการออกแบบการทดลองด้วยวิธีออกแบบส่วนผสม Lucchetta et al. (2006) หาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงและโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่มีผลทำให้ต้นทุนรวมของโรงงานผลิตภาชนะใส่น้ำฝนขนาดใหญ่ที่ใช้เป็นกรณีศึกษาต่ำสุด ซึ่งต้นทุนรวมหาได้จากต้นทุนของวัตถุดิบและต้นทุนของกระบวนการผลิต การศึกษากระทำโดยจัดขึ้นรูปโพลีเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ และวิเคราะห์โดยใช้วิธีการ 3 วิธีคือ 1) ใช้วิธีการลองผิดลองถูก พบว่าอัตราส่วนผสมที่มีค่าสมบัติการไหลต่ำจะมีต้นทุนระหว่างวัตถุดิบและกระบวนการผลิตต่ำ 2) ใช้วิธีการออกแบบโครงตาข่ายซิมเพล็กซ์ และ 3) ใช้วิธีปัญหาค่าเหมาะสมที่สุด (optimization problem) ด้วยวิธี SLP (sequential linear programming) พบว่าเมื่อใช้ความหนืดเท่ากับ 103.4 Pas จะมีค่าต้นทุนรวมต่ำกว่าการใช้ความหนืดเท่ากับ 124 Pas ดังนั้น จากวิธีการทั้งสามเมื่ออัตราส่วนผสมมีค่าสมบัติการไหลที่ต่ำก็จะมีผลทำให้ต้นทุนรวมทั้งหมดต่ำเช่นกัน

งานวิจัยนี้เสนอแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพการผลิตชิ้นส่วนพลาสติกที่ใช้เป็นส่วนประกอบของรางหลอดฟลูออเรสเซนต์สำเร็จรูปในอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการใช้พลาสติกรีไซเคิลในการผลิต โดยคำนึงถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อนของชิ้นส่วนพลาสติกด้วยการใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม (mixture experiments) ในการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม ปัจจัยคือส่วนผสมที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์นั้นๆ ซึ่งทำให้การออกแบบการทดลองแบบนี้มีระดับของปัจจัยไม่เป็นอิสระ นั่นคือ ผลรวมของส่วนผสมมีค่าเท่ากับหนึ่ง หรือ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ปัจจัยหรือส่วนผสมแต่ละชนิดมีค่าตั้งแต่ศูนย์ถึงหนึ่งหรือ 100 เปอร์เซ็นต์ แนวทางในการดำเนินงานวิจัยนี้ยึดหลักการซิกซ์ ซิกมา (six sigma) มาประยุกต์ใช้ด้วยกระบวนการดีเมอิก (DMAIC) (Young and Anbari, 2006) ซึ่งประกอบด้วย 5 ขั้นตอน คือการกำหนดแผนงานในการแก้ปัญหา (define phase)

การวัดความสามารถของกระบวนการ (measure phase) การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา (analyze phase) การปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ (improve phase) และการควบคุมกระบวนการ (control phase) มาใช้ในการพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพชิ้นส่วนพลาสติกที่ใช้เป็นส่วนประกอบของรางหลอดฟลูออเรสเซนต์สำเร็จรูปในกระบวนการฉีดพลาสติก

วิธีการวิจัย

การกำหนดแผนงานในการแก้ปัญหา (Define phase)

การศึกษาลักษณะปัญหาในโรงงานกรณีศึกษาพบว่ากระบวนการผลิตปัจจุบันยังประสบปัญหาจากของเสียในกระบวนการผลิตเป็นส่วนใหญ่ เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ของเสียที่เกิดขึ้นพบว่าปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นมีปริมาณสูงมากและมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาแนวทางในการลดของเสียที่เกิดขึ้นจากชิ้นส่วนพลาสติก ซึ่งสามารถกระทำได้โดยการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของพลาสติกรีไซเคิลและเม็ดพลาสติกใหม่ชนิดโพลีคาร์บอเนต ซึ่งสามารถตรวจสอบคุณภาพได้โดยการทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติการคงทนต่อความร้อน

การวัดความสามารถของกระบวนการ (Measure phase)

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อลักษณะทางคุณภาพของชิ้นงานพลาสติกในโรงงานกรณีศึกษากรณีที่ใช้วิธีการฉีดพลาสติกคือตัววัสดุพลาสติก เนื่องจากโรงงานกรณีศึกษาใช้พลาสติกรีไซเคิลร้อยละ 10 เป็นส่วนผสมในการผลิตชิ้นส่วนพลาสติกที่ใช้เป็นส่วนประกอบของรางหลอดฟลูออเรสเซนต์สำเร็จรูป เป็นผลทำให้คุณภาพของชิ้นงานพลาสติกไม่เป็นไปตามความต้องการของลูกค้า ของเสียที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการผลิตชิ้นส่วนพลาสติกชนิดหัวไฟใหญ่ ใส่ในใหญ่ ฝาใหญ่ หัวไฟเล็ก ใส่ในเล็ก และฝาเล็ก เนื่องจากชิ้นส่วนพลาสติกดังกล่าวต้องนำมาประกอบกับรางหลอดฟลูออเรสเซนต์สำเร็จรูปแทบทุกชนิดและมีปริมาณการผลิตมากที่สุด อีกทั้งยังใช้พลาสติกรีไซเคิลหลากหลายชนิดในการผลิตจึงจำเป็นต้อง

ตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยการวัดจากการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลและสมบัติการคงทนต่อความร้อน การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา (Analyze phase)

การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาสามารถทำได้โดยการรวบรวมข้อมูลที่เกิดของเสียในโรงงานกรณีศึกษาจากแผ่นตรวจสอบบันทึกของเสียในกระบวนการฉีดขึ้นส่วนพลาสติกคือหัวไฟใหญ่ ใส่ในใหญ่ ฝาใหญ่ หัวไฟเล็ก ใส่ในเล็ก และฝาเล็ก และทำการแจกแจงหาสาเหตุของการเกิดของเสียโดยใช้แผนภาพพาเรโต พบว่าชิ้นส่วนพลาสติกเกิดความบกพร่องจากสาเหตุ 6 ประการ คือ ชิ้นงานเกิดรอยไหม้ ชิ้นงานแหวนหรือขีดไม่เต็ม ผิวไม่วาว รอยแตก รอยร้าว สีเพี้ยน และอื่นๆ สาเหตุหลักของการเกิดของเสียคือชิ้นงานเกิดรอยไหม้ เนื่องจากมีจำนวนจุดบกพร่องมากที่สุด และรองลงมาคือชิ้นงานเกิดรอยแหวนหรือขีดไม่เต็ม ซึ่งถูกนำมาหาสาเหตุที่แท้จริงหรือความบกพร่องด้านคุณภาพ ผลจากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อลักษณะทางคุณภาพของชิ้นงานพลาสติก หัวไฟใหญ่ ใส่ในใหญ่ ฝาใหญ่ หัวไฟเล็ก ใส่ในเล็ก และฝาเล็กคือวัสดุพลาสติก (โพลีคาร์บอเนต) ที่ทำให้คุณภาพของชิ้นส่วนพลาสติก ไม่เป็นไปตามความต้องการของลูกค้า เช่น เปราะง่าย ไม่ทนความร้อน เป็นต้น

การปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ (Improve phase)

เครื่องมือทางสถิติที่นำมาใช้คือการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม (mixture experiments) สำหรับรูปแบบปัญหาในการหาอัตราส่วนผสมของพลาสติก รีไซเคิลและเม็ดโพลีคาร์บอเนตใหม่สามารถแสดงเป็นรูปแบบสมการของแผนการทดลองแบบส่วนผสมได้ดังนี้

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = 100 \quad (1)$$

$$10 \leq x_1 \leq 30 \quad (2)$$

$$20 \leq x_2 \leq 40 \quad (3)$$

$$20 \leq x_3 \leq 40 \quad (4)$$

$$0 \leq x_4 \leq 20 \quad (5)$$

โดยที่ x_1 คือเศษโพลีคาร์บอเนตรีไซเคิลสีใส x_2 คือเศษโพลีคาร์บอเนตรีไซเคิลสีขาวนม x_3 คือเศษโพลีคาร์บอเนตรีไซเคิลสีขาวขุ่นและ x_4 คือเม็ดโพลีคาร์บอเนตใหม่ สมการที่ (1) แสดงผลรวมของอัตราส่วนผสมทั้งหมดเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ สมการที่ (2) สมการที่ (3)

สมการที่ (4) และสมการที่ (5) เป็นสมการข้อจำกัดในการผสมเศษโพลีคาร์บอเนตรีไซเคิลและเม็ดโพลีคาร์บอเนตใหม่

การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์รูปแบบสมการใช้โปรแกรม Design-Expert Version 7.0 (Stat-Ease, Inc., 2005) โดยใช้วิธีการออกแบบส่วนผสมแบบ D-optimal (Myers and Montgomery, 2002) เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นรูปแบบการทดลองภายใต้ข้อจำกัดตามสมการและสมการที่ (1)-(5) อัตราส่วนผสมที่ได้จึงมีทั้งหมด 13 อัตราส่วนผสมดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของปริมาณโพลีคาร์บอเนต

อัตราส่วนผสม	x_1	x_2	x_3	x_4
1	22.5	32.5	32.5	12.5
2	20	20	40	20
3	30	25	25	20
4	25	35	40	0
5	30	40	30	0
6	30	20	40	10
7	10	40	40	10
8	20	40	20	20
9	10	30	40	20
10	30	40	20	10
11	10	40	30	20
12	20	30	40	10
13	30	30	30	10

อัตราส่วนผสมจากตารางที่ 1 ถูกนำมาใช้ในการเก็บข้อมูลด้านสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อน การทดสอบสมบัติเชิงกลคือการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง โดยเตรียมชิ้นงานตัวอย่างสำหรับทดสอบให้อยู่ในรูปดัมเบลล์ (dumbbell) ตามมาตรฐาน ASTM D638 (Mantia, 2002) ชิ้นงานพลาสติกถูกขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดพลาสติก โดยทดสอบชิ้นงานตัวอย่างซ้ำ 3 ครั้งต่อ 1 ตัวอย่างทดสอบ การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนคือการทดสอบอุณหภูมิการบิดงอ ที่ระดับอุณหภูมิซึ่งทำให้พลาสติกเริ่มอ่อนตัวจนถึงขั้นเปลี่ยนรูปทรงหรือเริ่มเสียรูปร่างไป (deflected) เมื่อได้รับแรงกดค่าหนึ่งมากกระทำโดยทดสอบชิ้นงานตัวอย่างตามมาตรฐานของ ASTM D648 (Mantia, 2002) ที่มีน้ำมันซิลิโคนเป็นตัวกลางนำความร้อน ชิ้นงานที่เตรียมทดสอบมีขนาดความกว้าง ความหนา และความยาวเป็น 3 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 100 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยทดสอบชิ้นงานตัวอย่างซ้ำ 3 ครั้งต่อ 1 ตัวอย่างทดสอบ

การควบคุมกระบวนการ (Control phase)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นวิธีการวิเคราะห์ผลทดลองหนึ่งเพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เมื่อทราบอัตราส่วนผสมของเศษโพลีคาร์บอเนตรีไซเคิลและเม็ดโพลีคาร์บอเนตใหม่ที่มีสมบัติที่ดีและเหมาะสมในการนำไปใช้งานควรมีการควบคุมคุณภาพและปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์ต่อไป

ผลการวิจัย

ตารางที่ 2 และ ตารางที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของส่วนผสมซึ่งพบว่ารูปแบบของส่วนผสม (mixture model) มีความสัมพันธ์กันระหว่างส่วนผสม และค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าอุณหภูมิการบิดงออย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า p -value น้อยกว่า 0.05 โดยผลลัพธ์ในโปรแกรมจะแทนค่าตัวแปรอิสระ x_1 คือ A ตัวแปรอิสระ x_2 คือ B ตัวแปรอิสระ x_3 คือ C และตัวแปรอิสระ x_4 คือ D ตามลำดับ

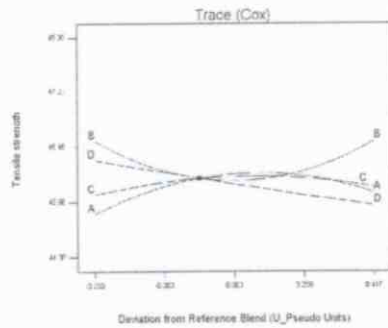
ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของส่วนผสมของค่าความต้านทานต่อแรงดึง

Source	SS	df	MS	F-value	p-value
Model	37.06	9	4.12	3.11	0.009
Linear mixture	11.68	3	3.89	2.94	0.050
AB	0.29	1	0.29	0.22	0.641
AC	5.18	1	5.18	3.91	0.058
AD	5.34	1	5.34	4.03	0.054
BC	2.74	1	2.74	2.07	0.161
BD	14.57	1	14.57	10.99	0.003
CD	2.71	1	2.71	2.04	0.164
Residual	38.44	29	1.33		
Lack of fit	10.21	3	3.40	3.14	0.043
Pure error	28.23	26	1.09		
Cor total	75.50	38			

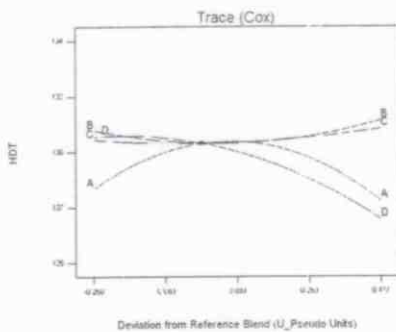
ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของส่วนผสมของค่าอุณหภูมิการบิดงอ

Source	SS	df	MS	F-value	p-value
Model	105.64	9	11.74	4.65	0.001
Linear mixture	42.20	3	14.07	5.57	0.004
AB	11.47	1	11.47	4.54	0.042
AC	9.42	1	9.42	3.73	0.063
AD	19.83	1	19.83	7.85	0.009
BC	10.97	1	10.97	4.34	0.046
BD	0.18	1	0.18	0.07	0.792
CD	3.19	1	3.19	1.26	0.270
Residual	73.28	29	2.53		
Lack of fit	14.61	3	4.87	2.16	0.117
Pure error	58.67	26	2.26		
Cor total	178.92	38			

ถึงแม้ว่าผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนจะไม่แสดงค่าต่างๆ ของปัจจัยหลักสี่ปัจจัย แต่ไม่ได้หมายความว่าปัจจัยหลักทั้งสี่ไม่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนอง ถ้าการทดลองมีส่วนผสมมากกว่า 3 ชนิด จะใช้กราฟ trace plot ของค่าผลตอบมาทำการวิเคราะห์ส่วนผสมทั้งหมดว่าแต่ละส่วนผสมมีอิทธิพลต่อค่าผลตอบสนองหรือไม่ กราฟ trace plot ถูกใช้ในการเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดจากส่วนผสมของเศษโพลีคาร์บอเนตรีไซเคิลและเม็ดโพลีคาร์บอเนตใหม่ที่มีผลต่อความต้านทานต่อแรงดึงและค่าอุณหภูมิการบิดงอ โดยที่เส้นกราฟของส่วนผสมใดที่มีอิทธิพลจะแสดงถึงความโค้งอย่างเด่นชัด รูปที่ 3 (ก) แสดงให้เห็นว่ามีเพียงปัจจัย C ที่ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึง เนื่องจากเส้นกราฟมีลักษณะเกือบเป็นเส้นตรงหรือค่าคงที่ ส่วนปัจจัย A ปัจจัย B และปัจจัย D มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึง รูปที่ 3 (ข) แสดงให้เห็นว่ามีปัจจัย C และปัจจัย B ที่ไม่มีอิทธิพลต่อค่าอุณหภูมิการบิดงอ ส่วนปัจจัย A และปัจจัย D มีอิทธิพลต่อค่าอุณหภูมิการบิดงอ



(ก)



(ข)

รูปที่ 3 กราฟ Trace plot ของ (ก) ความต้านทานต่อแรงดึง (ข) อุณหภูมิการบิดงอ

การทดลองแบบส่วนผสมในเทอมที่เป็นรูปแบบเชิงเส้นตรงจะต้องใส่พจน์ของส่วนผสมนั้นไว้ในสมการถดถอยเสมอ เนื่องจากส่วนที่เป็นเชิงเส้นตรงของส่วนผสมจะไม่สามารถตัดส่วนผสมหรือปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลต่อผลตอบได้ (Lawson and Erjavec, 2001) ถึงแม้ว่าส่วนผสมนั้นจะไม่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองก็ตาม รูปแบบจำลองการถดถอยสำหรับผลตอบคือค่าความต้านทานต่อแรงดึง (y_1) และค่าอุณหภูมิการบิดงอ (y_2) แสดงดังสมการที่ (6) และสมการที่ (7) ตามลำดับ

$$y_1 = 41.02x_1 + 50.89x_2 + 41.79x_3 + 42.33x_4 - 2.46x_1x_2$$

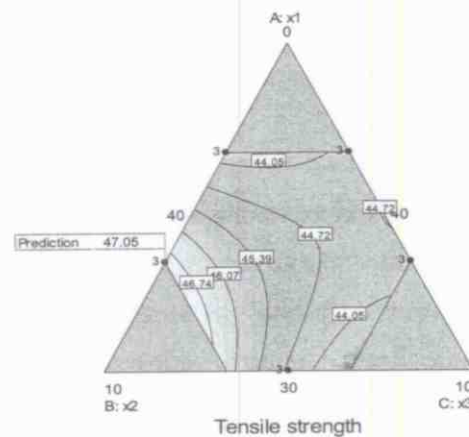
$$13.31x_1x_3 + 12.67x_1x_4 - 6.93x_2x_3 - 19.29x_2x_4 + 9.43x_3x_4 \quad (6)$$

$$y_2 = 121.17x_1 + 132x_2 + 130.23x_3 + 121.49x_4 + 15.38x_1x_2$$

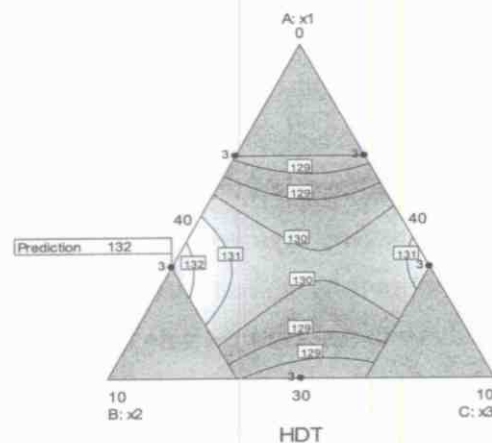
$$17.95x_1x_3 + 24.43x_1x_4 - 13.87x_2x_3 - 2.14x_2x_4 + 10.23x_3x_4 \quad (7)$$

สมการที่ (6) และสมการที่ (7) ถูกนำมาพล็อตพื้นผิวผลตอบแบบเส้นโครงร่าง (contour plot) ของค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าอุณหภูมิการบิดงอ รูปที่ 4 (ก) พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงดีที่สุดที่ทำนายได้เท่ากับ 47.05 MPa พื้นที่ที่เหมาะสมของค่าความต้านทานต่อ

แรงดึงอยู่ในบริเวณทางด้านซ้ายส่วนล่างของส่วนผสม x_2 ซึ่งจะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมากกว่า 46.74 MPa รูปที่ 4 (ข) แสดงค่าอุณหภูมิการบิดงอที่ดีที่สุดที่ทำนายได้เท่ากับ 132 °C พื้นที่ที่เหมาะสมของค่าอุณหภูมิการบิดงอจะอยู่ในบริเวณทางด้านซ้ายส่วนล่างของส่วนผสม x_2 และทางด้านขวาส่วนล่างของส่วนผสม x_3 ที่จะให้อุณหภูมิการบิดงอมากกว่า 132 °C และ 131 °C

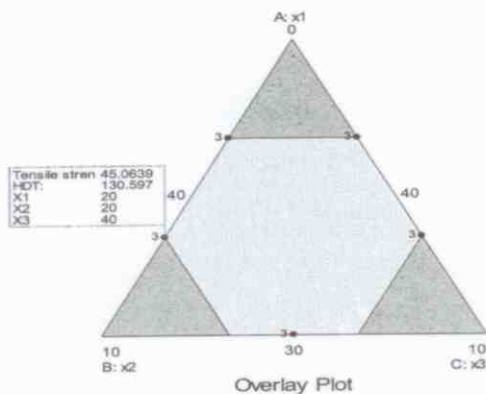


(ก)



(ข)

รูปที่ 4 พื้นผิวผลตอบแบบเส้นโครงร่าง (ก) ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (ข) ค่าอุณหภูมิการบิดงอ



รูปที่ 5 พื้นที่ทับซ้อนของผลตอบ

ผู้วิจัยต้องการความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความคงทนต่อการบิดงอที่ดีที่สุดของชิ้นส่วนพลาสติก ดังนั้นในการวิเคราะห์พื้นที่ผิวผลตอบของการออกแบบส่วนผสมโดยหาพื้นที่ทับซ้อนของพื้นผิวผลตอบของค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าอุณหภูมิการบิดงอวิเคราะห์แทนดังรูปที่ 5 พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าอุณหภูมิการบิดงอที่ดีที่สุดคืออัตราส่วนผสมที่ 2 ซึ่งประกอบด้วย เศษโพลิคาร์บอเนตรีไซเคิลสีใสร้อยละ 20 เศษโพลิคาร์บอเนตรีไซเคิลสีขาวนร้อยละ 20 เศษโพลิคาร์บอเนตรีไซเคิลสีชาวนร้อยละ 40 และเม็ดโพลิคาร์บอเนตร้อยละ 20

อย่างไรก็ตาม ในการดำเนินการกระบวนการผลิตหรือกระบวนการทดลองใดๆ อาจเกิดค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่เกิดจากความเบี่ยงเบนของปัจจัยหรือส่วนผสมที่มีผลต่อผลตอบ และค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่เกิดขึ้นนี้ควรที่จะมีค่าน้อยที่สุด การวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนของข้อมูล (propagation of error: POE) สามารถหาค่าส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลตอบทั้งสองมีค่าน้อยที่สุด จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าอุณหภูมิการบิดงอที่ให้การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดประกอบด้วย เศษโพลิคาร์บอเนต รีไซเคิลสีใสร้อยละ 19.15 เศษโพลิคาร์บอเนตรีไซเคิลสีชาวนร้อยละ 36.99 เศษโพลิคาร์บอเนตรีไซเคิลสีชาวนร้อยละ 27.54 และเม็ดโพลิคาร์บอเนตร้อยละ 16.33

เพื่อให้ผลการวิเคราะห์สามารถนำไปใช้งานได้จริง การยืนยันผลการทดลอง (confirmation experiment) สามารถกระทำได้ โดยทำการทดสอบสมบัติเชิงกล (ค่าความต้านทานต่อแรงดึง) และสมบัติเชิงความร้อน (ค่าอุณหภูมิการบิดงอ) ของอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม 3 อัตราส่วนผสม ด้วยการทดลองซ้ำ 10 ครั้ง แล้วทำการวิเคราะห์ช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ของค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าอุณหภูมิการบิดงอ ดังแสดงในตารางที่ 4 ถ้าอัตราส่วนผสมใดอยู่ในช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ของผลตอบตอบ แสดงว่าอัตราส่วนผสมนั้นเหมาะสมและมีอิทธิพลต่อผลตอบจริงตามผลที่ได้จากการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบของการออกแบบส่วนผสม

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์หาช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ของค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าอุณหภูมิการบิดงอ

อัตราส่วนผสม	ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)		ค่าอุณหภูมิการบิดงอ (°C)	
	ค่าต่ำ	ค่าสูง	ค่าต่ำ	ค่าสูง
2	44.70	45.32	129.53	132.47
POE	43.95	44.51	126.93	129.87

การวิเคราะห์สมการถดถอยของค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าอุณหภูมิการบิดงอตามสมการที่ (6) และสมการที่ (7) พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ทำนายได้ของอัตราส่วนผสมที่ 2 มีค่าเท่ากับ 44.47 MPa และค่าอุณหภูมิการบิดงอที่ทำนายได้ของอัตราส่วนผสมที่ 2 มีค่าเท่ากับ 129.86 °C เมื่อแทนค่าตัวแปร x_1 เท่ากับ 0.2, x_2 เท่ากับ 0.2, x_3 เท่ากับ 0.4 และ x_4 เท่ากับ 0.2 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ทำนายได้ของอัตราส่วนผสมที่ได้จากการวิเคราะห์โดยการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 44.58 MPa และค่าอุณหภูมิการบิดงอที่ทำนายได้ของอัตราส่วนผสมที่ได้จากการวิเคราะห์โดยการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 129.85 °C เมื่อแทนค่าตัวแปร x_1 เท่ากับ 0.19, x_2 เท่ากับ 0.37, x_3 เท่ากับ 0.28 และ x_4 เท่ากับ 0.16

เมื่อยืนยันผลการทดลองพบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ทำนายได้ของอัตราส่วนผสมที่ 2 และอัตราส่วนผสมที่ได้จากการวิเคราะห์โดยการแพร่กระจายความ

คลาดเคลื่อนน้อยที่สุดไม่อยู่ในช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ของค่าความต้านทานต่อแรงดึง อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนผสมที่ 2 และอัตราส่วนผสมที่ได้จากการวิเคราะห์โดยการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดอยู่ในช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ของค่าอุณหภูมิการบิดงอ

สรุปและอภิปรายผล

วิธีคุณภาพแบบซิกซ์ซิกม่าสามารถลดค่าใช้จ่ายที่ไม่จำเป็นจากการสูญเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตของโรงงานกรณีศึกษาได้ ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของเวลา ต้นทุนของงานที่ต้องนำกลับมาแก้ไขหรือทำใหม่ เนื่องจากชิ้นส่วนพลาสติกคือหัวไฟใหญ่ ใส่นใหญ่ ฝาใหญ่ หัวไฟเล็ก ใส่นเล็ก และฝาเล็กมีคุณภาพดีขึ้น ฉะนั้นปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นก็อาจมีน้อยลงเมื่อเทียบกับอัตราส่วนผสมแบบเก่า ในการศึกษา การเลือกอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดเพื่อนำไปผลิตชิ้นส่วนพลาสติกให้ได้สมบัติตามที่ต้องการ (สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและค่าอุณหภูมิการบิดงอ) พร้อมๆ กันจึงเป็นไปได้น้อย อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดขึ้นอยู่กับชนิดของชิ้นส่วนพลาสติกนั้นๆ ที่จะนำไปใช้งาน ถ้าชิ้นส่วนใดที่ต้องการความคงทนต่อความร้อนมาก ผู้ประกอบการก็สามารถเลือกอัตราส่วนผสมที่ 2 หรืออัตราส่วนผสมที่ได้จากการวิเคราะห์โดยการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนผสมทั้งสอง ก็อยู่ในระดับที่ใช้ได้ในการนำมาผลิตชิ้นส่วนพลาสติกที่ให้สมบัติที่ดีด้านความต้านทานต่อแรงดึง

ข้อเสนอแนะ

ผู้วิจัยควรศึกษาส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาเชิงเศรษฐศาสตร์ ซึ่งสามารถใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคมอนติคาร์โล (Monte Carlo simulation technique) ของปริมาณการผลิตของแต่ละอัตราส่วนผสมในการหาค่าคาดหวังของผลกำไรรวมโดยเฉลี่ยที่ดีที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยทุนมหาดบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้โครงการสร้างกำลังคนเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมระดับปริญญาโท (สกว.-สว.) ประจำปี 2550

เอกสารอ้างอิง

- ธนาคารพัฒนาวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมแห่งประเทศไทย. 2547. ผลิตภัณฑ์จากพลาสติกรีไซเคิล. ค้นเมื่อ 11 ธันวาคม 2550, จาก <http://mdit.pbru.ac.th/sme/Details/InvestmentExamples/I052.doc>
- Lawson, J.S., & Erjavec, J. 2001. Modern statistics for engineering and quality improvement. Australia: Duxbury.
- Lucchetta, G., Bariani, F. & Knight, A. 2006. A new approach to the optimization of blends composition in injection moulding of recycled polymer. ANNALS- CIRP, 55(1), 465-468.
- Mantia, F.A. 2002. Handbook of plastics recycling. Shrewsbury, UK: Rapra Technology.
- Myers, R. H. & Montgomery, D.C. 2002. Response surface methodology process and product optimization using designed experiments. New York: John Wiley and Sons.
- Shriver, M. E., Beiter, K. A. & Ishii, K. 1994. Performance characterization of recycled thermoplastics for material life-cycle analysis. Proceedings of the SPE 52nd Annual Technical Conference, 40, 2910-2915.
- Stat-Ease, Inc. 2005. Design Expert Version 7 User's Manual. Minneapolis, MN.
- Young, H.K. & Anbari, F.T. 2006. Benefits, obstacles, and future of six sigma approach. Technovation. 26. 708-715.