

การออกแบบการทดลองสำหรับการปรับปรุง ผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิต: การประยุกต์ ในเครื่องย่อยขวดแก้ว*

ชาญณรงค์ สายแก้ว¹⁾ นิพนธ์ ชิลพัฒน์²⁾

¹⁾ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002

²⁾ ครูชำนาญการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002

Email: charn_sa@kku.ac.th

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องย่อยขวดแก้วและประเมินปัจจัยที่มีผลต่อขนาดเศษแก้วของเครื่องย่อยขวดแก้วซึ่งการประเมินการทำงานของเครื่องนำไปสู่การพัฒนาประสิทธิภาพและประสิทธิผลของเครื่อง เครื่องที่ออกแบบและสร้างขึ้นมาสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยสามารถย่อยขวดแก้วได้ตามขนาดที่ตลาดรับซื้อของเก่าต้องการ

การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง 2^k แฟคตอเรียลถูกนำมาใช้ในการเก็บข้อมูลและทำการสร้างเข้ากับรูปแบบทางคณิตศาสตร์ของพื้นผิวผลตอบสนอง ค่าเปอร์เซ็นต์ของขนาดเศษแก้วที่มีขนาดเล็กกว่ารูตะแกรงและสามารถลอดผ่านได้เป็นค่าที่ถูกบันทึกไว้เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์ความแปรปรวนและการหาจุดที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อขนาดของเศษแก้ว ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยขวดแก้วให้ได้ขนาดและปริมาณที่มากคือความเร็วรอบและอัตราการป้อนขวดแก้ว นอกจากนี้ ความเร็วรอบประมาณ 450 รอบต่อนาทีและอัตราการป้อนขวดแก้ว 15 ขวดต่อนาทีเป็นการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องเพื่อให้ได้ขนาดของเศษแก้วตามที่ตลาดต้องการและได้ปริมาณมากที่สุดโดยเฉลี่ย

คำสำคัญ : การออกแบบการทดลอง, วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง, เครื่องย่อยขวดแก้ว

* รับต้นฉบับเมื่อวันที่ 29 พฤษภาคม 2549 และได้รับบทความฉบับแก้ไขเมื่อวันที่ 8 สิงหาคม 2549

Experimental Design for Product and Process Improvement: an Application in Bottle Glass Crushing Machine^{*}

Charnnarong Saikaew¹⁾ Nipon Chillapat²⁾

¹⁾ Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002

²⁾ Technical Specialist, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002

Email: charn_sa@kku.ac.th

ABSTRACT

This research aims to design and fabricate a glass bottle crushing machine as well as to investigate the factors that affect the size of the glass aggregates. An evaluation of machine operations leads to achievement of the machine efficiency and effectiveness. The machine works properly and can produce glass aggregates of suitable size targeted for the small recycling center market.

A 2^k factorial design using central composite design is used for data collection and fitting a second-order response surface model. The percentages of glass aggregates that can pass through a sieve are the data set used for performing analysis of variance and obtaining the optimal settings of the affecting factors. The results of this study have shown that the factors affecting the size of the glass aggregates are speed and bottle-feeding rate. Furthermore, the speed of approximately 450 rpm and the bottle-feeding rate of 15 bottles per minute are designed as the optimal settings of the two factors so that the machine can produce glass aggregates of the appropriate size targeted for the recycling industry with maximum yield averagely.

Keywords : Experimental design, Response surface methodology, Bottle glass crushing machine

^{*} Original manuscript submitted: May 29, 2006 and Final manuscript received: August 8, 2006

บทนำ

ขวดแก้วเป็นบรรจุภัณฑ์ที่นิยมใช้กันมานานและแพร่หลายมากในปัจจุบัน เนื่องจากขวดแก้วเป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีความใส สามารถมองเห็นสินค้าได้ ทนต่อกรด ต่าง และสารละลายได้ดี สามารถป้องกันและรักษาผลิตภัณฑ์ที่บรรจุไว้ได้ และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ อย่างไรก็ตาม ขวดแก้วมีข้อเสียคือ แดกหักง่ายและต้นทุนการผลิตสูง ดังนั้น ผลิตภัณฑ์ที่นำมาบรรจุมักเป็นสินค้าที่มีราคาสูงหรือเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้ง่าย ขวดแก้วถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเบียร์และสุราซึ่งมีสัดส่วนร้อยละ 30 อุตสาหกรรมเครื่องดื่มชูกำลังร้อยละ 27 น้ำอัดลมร้อยละ 10 อุตสาหกรรมอาหารและยาร้อยละ 11 เครื่องดื่มเกลือแร่ร้อยละ 9 และอุตสาหกรรมอื่นๆ ร้อยละ 13 ในอนาคตคาดว่าจะมีความต้องการใช้ขวดแก้วยังมีอยู่สูงโดยคาดว่าจะเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 10–12 ต่อปี (สุขใจ, 2546)

ในสภาวะปัจจุบัน การใช้สอยทรัพยากรเป็นสิ่งที่สำคัญมากซึ่งการนำไปใช้นั้นควรคำนึงถึงการใช้งานเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด เช่นการนำวัสดุที่เหลือใช้แล้วมาปรับปรุงสมบัติแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมประเภทที่ใช้ขวดแก้วเป็นตัวบรรจุภัณฑ์ การนำเอาเศษแก้วกลับมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นการช่วยลดพลังงานในการหลอมวัตถุดิบลงได้ประมาณร้อยละ 25–32 (Institute of Scrap and Recycle, 2001) ซึ่งส่งผลให้ต้นทุนการผลิตลดลงในขณะที่คุณภาพการผลิตยังคงสภาพเดิม บริษัทผู้ผลิตจึงมีการรับซื้อขวดที่ใช้แล้วกลับมาหลอมใหม่ซึ่งเป็นผลทำให้ธุรกิจประเภทรับซื้อของเก่าขยายตัวเพิ่มมากขึ้น การทำธุรกิจประเภทนี้มีการขนส่งเข้ามาเกี่ยวข้องโดยการขนส่งแต่ละครั้งต้องใช้พื้นที่ในการจัดวางมากซึ่งไม่สอดคล้องกับน้ำหนักในการขนส่งเป็นผลให้ต้นทุนในการขนส่งสูง สาเหตุนี้จึงได้มีการออกแบบและสร้างเครื่องย่อยขวดแก้วขนาดย่อมขึ้นมาโดยนำขวดแก้วมาย่อยให้มีขนาดเล็กเพื่อที่จะประหยัดพื้นที่ในการขนส่งและส่งผลให้ลดค่าใช้จ่ายลงได้ ดังนั้น วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องย่อยขวดแก้วโดยเป็นเครื่องย่อยขวดแก้วขนาดย่อมที่สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก นอกจากนี้ ยังทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อขนาดเศษแก้วซึ่งนำไปสู่การพัฒนาประสิทธิภาพและประสิทธิผลของเครื่อง

วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันนี้ การศึกษาเครื่องย่อยขวดแก้วยังมีน้อยมากหรือมีการผลิตแล้วแต่ไม่สามารถเปิดเผยข้อมูลได้จึงไม่สามารถนำงานวิจัยที่เกี่ยวกับการย่อยขวดแก้วมาเสนอได้มากเท่าที่ควร การศึกษาปัจจัย (factor) ที่มีผลต่อขนาดเศษแก้วของเครื่องย่อยขวดแก้วเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องทำเพื่อทำการประเมินประสิทธิภาพและประสิทธิผลของเครื่องโดยการพิจารณาตัวแปรหลายตัวพร้อมกันซึ่งกระทำได้ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน นเรศและสุชาติ (2547) ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องย่อยขวดแก้วขนาดย่อมและทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบบต่อขนาดเศษแก้วโดยทำการเลือกปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลกระทบซึ่งได้แก่ ชนิดของขวดแก้วและความเร็วรอบ แผนการทดลองแบบแฟกตอเรียล 3×3 ถูกนำมาใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์โดยในแต่ละทรีทเมนต์คอมบิเนชัน (treatment combination) มี 3 ซ้ำ ผลการ

วิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าชนิดของขวดไม่มีผลกระทบต่อขนาดของเศษแก้วส่วนความเร็วรอบมีผลกระทบต่อขนาดของเศษแก้วที่ถูกย่อยออกมา นั่นคือ ความเร็วรอบต่ำจะได้เศษแก้วที่มีขนาดใหญ่ส่วนความเร็วรอบสูงจะได้เศษแก้วที่มีขนาดเล็ก ดังนั้น ผลการศึกษาของนเรศและสุชาติจึงเป็นผลสืบเนื่องในการวิจัยในครั้งนี้ อย่างไรก็ตาม นเรศและสุชาติได้เสนอเฉพาะวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนซึ่งมีความสามารถในการวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนอง (response variable) เท่านั้นแต่ไม่สามารถหาระดับ (level) ของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (response surface methodology, RSM) สามารถใช้หาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดได้ วิธีพื้นผิวผลตอบสนองเป็นวิธีที่สร้างสมการของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (ระดับของปัจจัย, level of factor) กับตัวแปรตอบสนองโดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอย (regression) เพื่อหาค่าความเหมาะสม (optimal settings) ของระดับในแต่ละปัจจัยที่สนใจ (Montgomery, 1999; Montgomery, 2001)

วิธีพื้นผิวผลตอบสนองเป็นเทคนิคที่ใช้ความรู้ด้านคณิตศาสตร์และสถิติมาทำการสร้างรูปแบบคณิตศาสตร์และทำการวิเคราะห์เพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนอง ยกตัวอย่างเช่น วิศวกรเคมีต้องการศึกษาหาจุดที่เหมาะสมที่สุดของระดับความเข้มข้นของสารละลาย (x_1) และตัวเร่งปฏิกิริยา (x_2) ที่มีผลต่อปริมาณที่มากที่สุดของผลผลิตที่ได้ นั่นคือ ผลผลิตที่ได้จึงเป็นฟังก์ชันของตัวแปรทั้งสองตามสมการ

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (1)$$

โดยที่ ε เป็นค่าผิดพลาดที่ได้จากการทดลอง ค่าคาดหวังของผลตอบสนองถูกแสดงด้วย

$$E(y) \equiv \eta = E[f(x_1, x_2)] + E(\varepsilon) \quad (2)$$

เนื่องจาก $\varepsilon \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$ ผลตอบสนองจะถูกแสดงด้วย

$$\eta = f(x_1, x_2) \quad (3)$$

ซึ่งเรียกว่า พื้นผิวตอบสนอง (response surface) (หมายเหตุ ตัวแปร x_1 และ x_2 เป็นตัวแปรอิสระ (independent variables) และเรียกว่าตัวแปรสัญลักษณ์ (coded variables) ซึ่งไม่มีหน่วยแต่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และมีการกระจายแบบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน อย่างไรก็ตาม ตัวแปร x_1 และ x_2 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของตัวแปรจริง (natural variable) ซึ่งมีหน่วย เช่น x_1 แสดงเป็นตัวแปรจริง คือ ξ_1 และ x_2 แสดงเป็นตัวแปรจริง คือ ξ_2)

รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของสมการพื้นผิวผลตอบสนองอาจแสดงได้ในรูปแบบทั่วไปสำหรับตัวแปรสัญลักษณ์

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (4)$$

และสำหรับตัวแปรจริง

$$\eta = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) \quad (5)$$

โดยความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสัญลักษณ์และตัวแปรจริงอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$x_i = \frac{\xi_i - (\xi_{i \text{ high}} + \xi_{i \text{ low}})/2}{(\xi_{i \text{ high}} - \xi_{i \text{ low}})/2}, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (6)$$

โดยทั่วไปแล้ว รูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนอง (response) และตัวแปรอิสระ (independent variables) มีรูปแบบที่ไม่สามารถล่วงรู้มาก่อน ดังนั้น ขั้นตอนแรกของการวิเคราะห์ต้องหาฟังก์ชันที่เหมาะสมซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะใช้ฟังก์ชันที่เป็นเส้นตรง (first-order model) ดังสมการข้างล่าง

$$y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

โดยที่ y_i คือผลตอบสนองที่ได้จากการสังเกตในแต่ละการทดลอง x_{ij} คือค่าสังเกตตัวที่ i th หรือระดับของตัวแปร x_j โดยมีค่าพารามิเตอร์ β เป็นสัมประสิทธิ์ในแต่ละเทอมของแต่ละตัวแปรซึ่งมี k ตัวแปร และมีจำนวน p สัมประสิทธิ์โดยที่ $p = k + 1$ ส่วน ε_i คือส่วนค่าคลาดเคลื่อนซึ่งมีสมบัติ $E(\varepsilon) = 0$ และ $\text{Var}(\varepsilon) = \sigma^2$ สมการ (7) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (8)$$

โดยที่ \mathbf{y} เป็นเวกเตอร์ $n \times 1$ ของค่าสังเกต, \mathbf{X} เป็นเมตริกซ์ $n \times p$ ของระดับของตัวแปรอิสระ, $\boldsymbol{\beta}$ เป็นเวกเตอร์ $p \times 1$ ของสัมประสิทธิ์ในแต่ละเทอมของสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง \mathbf{y} และ \mathbf{X} และ $\boldsymbol{\varepsilon}$ เป็นเวกเตอร์ $n \times 1$ ของค่าคลาดเคลื่อน

สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ (ระหว่าง \mathbf{y} และ \mathbf{X}) จำเป็นต้องคำนวณหาตัวแปรที่ไม่ลำเอียงของสัมประสิทธิ์ $\boldsymbol{\beta}$ นั่นคือ \mathbf{b} ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้หลักการกำลังสองน้อยที่สุด (least squares) ที่ทำให้สมการต่อไปนี้มีย่าน้อยที่สุด

$$L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \boldsymbol{\varepsilon}'\boldsymbol{\varepsilon} = (\mathbf{y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta})'(\mathbf{y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}) \quad (9)$$

หรือ

$$\begin{aligned} L &= \mathbf{y}'\mathbf{y} - \boldsymbol{\beta}'\mathbf{X}'\mathbf{y} - \mathbf{y}'\mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\beta}'\mathbf{X}'\mathbf{X}\boldsymbol{\beta} \\ &= \mathbf{y}'\mathbf{y} - 2\boldsymbol{\beta}'\mathbf{X}'\mathbf{y} + \boldsymbol{\beta}'\mathbf{X}'\mathbf{X}\boldsymbol{\beta} \end{aligned}$$

โดยใช้หลักการกำลังสองน้อยที่สุดจะได้

$$\left. \frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{\beta}} \right|_{\mathbf{b}} = -2\mathbf{X}'\mathbf{y} + 2\mathbf{X}'\mathbf{X}\mathbf{b} = \mathbf{0} \quad (10)$$

นั่นคือ

$$\mathbf{X}'\mathbf{X}\mathbf{b} = \mathbf{X}'\mathbf{y} \quad (11)$$

ถ้าคุณสมการข้างต้นทั้งสองข้างด้วย $\mathbf{X}'\mathbf{X}$ จะได้ตัวแปรที่ไม่ลำเอียงของสัมประสิทธิ์ \mathbf{b} นั่นคือ \mathbf{b}

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}'\mathbf{y} \quad (12)$$

และจะได้ค่าที่ได้จากการประมาณจากสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ \hat{y}_i ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{X}\mathbf{b} \quad (13)$$

รายละเอียดเกี่ยวกับหลักการกำลังสองน้อยที่สุดสามารถดูได้จาก Myers and Montgomery (2002)

ถ้าความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรในรูปแบบที่ไม่เป็นเส้นตรง จะใช้ฟังก์ชันที่เป็นเส้นโค้ง (second-order model) ตั้งสมการข้างล่าง

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (14)$$

ซึ่งมีจำนวนพารามิเตอร์เป็น $1 + 2k + k(k-1)/2$ สมการ (14) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\hat{y} = b_0 + \mathbf{x}'\mathbf{b} + \mathbf{x}'\hat{\mathbf{B}}\mathbf{x} \quad (15)$$

โดยที่ b_0 , \mathbf{b} , $\hat{\mathbf{B}}$ คือตัวประมาณสัมประสิทธิ์การถดถอยที่เป็นค่าจุดตัด, เส้นตรง, และเส้นโค้ง ตามลำดับ ซึ่งเมทริกซ์ $\hat{\mathbf{B}}$ มีนิยามดังนี้

$$\hat{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12}/2 & \cdots & b_{1k}/2 \\ & b_{22} & \cdots & b_{2k}/2 \\ & & \ddots & \vdots \\ \text{symmetry} & & & b_{kk} \end{bmatrix}$$

เพื่อที่จะหาค่าผลตอบสนองที่คาดหวัง (predicted response) เราจำเป็นต้องหาตำแหน่งที่จุดหยุดนิ่งก่อน (stationary points) โดยการหาค่าอนุพันธ์ของ \hat{y} เทียบกับส่วนประกอบของเวกเตอร์ \mathbf{x} แล้วให้มีความเท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial \mathbf{x}} = \mathbf{b} + 2\hat{\mathbf{B}}\mathbf{x} = \mathbf{0} \quad (16)$$

ซึ่งจะได้ตำแหน่งที่จุดหยุดนิ่งเป็น

$$\mathbf{x}_s = -\frac{1}{2}\hat{\mathbf{B}}^{-1}\mathbf{b} \quad (17)$$

จากสมการ (15) จะได้ค่าผลตอบสนองที่คาดหวัง

$$\begin{aligned}\hat{y}_s &= b_0 + \mathbf{x}'_s \mathbf{b} + \mathbf{x}'_s \hat{\mathbf{B}} \mathbf{x}_s \\ &= b_0 + \frac{1}{2} \mathbf{x}'_s \mathbf{b}\end{aligned}\quad (18)$$

การออกแบบส่วนผสมกลางเป็นเทคนิคหนึ่งในวิธีการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองที่ได้รับ
ความนิยมในการออกแบบและการพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตที่ใช้การออกแบบการทดลอง
(Myers and Montgomery, 2002) โดยทั่วไปแล้ว การออกแบบส่วนผสมกลางจะประกอบด้วย 2^k
แฟกตอเรียลที่มี n_f หน่วยทดลอง, 2^k หน่วยทดลองในแนวแกนหรือในแนวรูปดาว (star) และ n_c หน่วย
ทดลองที่จุดศูนย์กลาง สำหรับกรณีที่มีการทดลองมีสองปัจจัย นั่นคือ 2^k แฟกตอเรียลจะประกอบด้วย
 $(-1, -1)$ $(+1, -1)$ $(-1, +1)$ $(+1, +1)$ แนวแกนหรือแนวรูปดาวจะประกอบด้วย
 $(-\alpha, 0)$ $(+\alpha, 0)$ $(0, -\alpha)$ $(0, +\alpha)$ ส่วนที่จุดศูนย์กลางมักจะมีการกระทำซ้ำ 4-6 หน่วยทดลองที่
จุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย จะเห็นว่า การออกแบบส่วนผสมกลางสำหรับกรณีที่มีสองปัจจัยจะ
ประกอบด้วย 5 ระดับของแต่ละปัจจัย (นั่นคือ $-\alpha, -1, 0, 1, +\alpha$) ดังนั้น จำนวนหน่วยทดลองที่
จะต้องทำการทดลองจะมีทั้งหมด 12-14 หน่วยทดลอง

ในทางปฏิบัติ การออกแบบส่วนประสมกลางจะเกิดขึ้นจากการทดลองแบบเป็นอันดับ
(sequential experimentation) กล่าวคือ การออกแบบ 2^k แฟกตอเรียลถูกนำมาใช้เมื่อมีการสร้าง
ข้อมูลเข้ากับแบบจำลองอันดับที่หนึ่ง เมื่อพบว่าแบบจำลองอันดับที่หนึ่งไม่เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้
จึงมีการทำการทดลองเพิ่มในแนวแกนหรือในแนวรูปดาวเพื่อให้สามารถใส่พจน์ควอดราติกลงใน
แบบจำลองได้ อย่างไรก็ตาม ถ้าหากเราพบว่าข้อมูลที่ได้สามารถทำการสร้างเข้ากับแบบจำลองที่เป็นค
วอดราติก เราสามารถทำการออกแบบการทดลองโดยใช้การออกแบบส่วนผสมกลางได้ทันทีโดยไม่ต้อง
คำนึงถึงการออกแบบ 2^k แฟกตอเรียลที่ถูกนำมาใช้เพื่อการสร้างข้อมูลเข้ากับแบบจำลองอันดับที่หนึ่ง

สมบัติหนึ่งที่สำคัญของการออกแบบส่วนประสมกลางก็คือ ความสามารถในการหมุน
(rotatability) ซึ่งหมายความว่าความแปรปรวนของผลตอบสนองที่ถูกทำนาย (the variance of the
predicted response) มีความเสถียรภาพและมีระยะห่างจากจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัยเท่ากัน การ
ออกแบบส่วนประสมกลางสามารถทำให้หมุนได้โดยการเลือกค่าของ α ซึ่งมีค่าเท่ากับ $F^{1/4}$

ระเบียบวิธีวิจัย

เพื่อให้มีประสิทธิภาพตรงตามวัตถุประสงค์และเป้าหมายที่ต้องการ การทดสอบประสิทธิภาพ
และประสิทธิผลของเครื่องย่อยขวดแก้วเริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความสามารถ
ในการย่อยขวดแก้วของเครื่อง ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อขนาดของเศษแก้วที่ได้จากการศึกษา
วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องคือ ความเร็วรอบ (speed) และอัตราการป้อนขวด (bottle-feeding rate)
ความเร็วรอบจะถูกกำหนดโดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพู่เล่ย์ และอัตราการป้อนขวดจะถูกกำหนด
โดยการทดลองป้อนขวดในอัตราความเร็วที่เครื่องสามารถย่อยขวดได้ตามขนาดที่เหมาะสม ขนาดเส้น
ผ่านศูนย์กลางของพู่เล่ย์และความเร็วรอบมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$n_1 d_1 = n_2 d_2 \quad (19)$$

โดยที่ d_1 คือเส้นผ่านศูนย์กลางของพูลีย์ตัวขับ n_1 คือความเร็วรอบสูงสุดของมอเตอร์ซึ่งมีความเร็ว 1,450 รอบต่อนาที (ขนาด 2 แรงม้า) d_2 คือเส้นผ่านศูนย์กลางของพูลีย์ที่ออกแบบ และ n_2 คือความเร็วรอบในการทดสอบ กำหนดให้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพูลีย์ตัวขับคือ 3 นิ้ว ดังนั้นความเร็วรอบที่ใช้ในการทดสอบซึ่งถูกกำหนดจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพูลีย์จะมีความเร็วตั้งแต่ 150 ถึง 452 รอบต่อนาที ตารางที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของพูลีย์และความเร็วรอบที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพและประสิทธิผลของเครื่องซึ่งความเร็วรอบค่าต่าง ๆ จะถูกกำหนดโดยการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (หมายเหตุ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพูลีย์ในทางปฏิบัติอาจใช้ขนาดใกล้เคียงกับที่มีขายตามท้องตลาด)

Diameter of pulley (in)	Speed (rpm)
15.18	150
11.73	195
7.57	300
5.50	410
5.05	452

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของพูลีย์และความเร็วรอบ

หลังจากที่ได้ออกแบบการทดลองแล้ว (ดูตารางที่ 2) ขั้นตอนต่อไปคือการเก็บข้อมูลซึ่งข้อมูลที่เก็บได้ในแต่ละค่าเรียกว่าค่าสังเกต (observations) ซึ่งค่าสังเกตแต่ละค่าก็คือผลตอบสนอง (response) ที่จะถูกนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อไป (หมายเหตุ ค่าสังเกตที่ได้จากการทดสอบประสิทธิภาพและประสิทธิผลของเครื่องย่อยขวดแก้วคือค่าที่วัดได้จากการวัดขนาดของเศษแก้วที่มีขนาดตามที่ตลาดต้องการ (นั่นคือ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3/8 นิ้ว)) ขนาดของเศษแก้วที่มีขนาดเล็กกว่ารูตะแกรงและสามารถลอดผ่านได้จะถูกนำไปชั่งแล้วคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ซึ่งเป็นค่าที่ถูกบันทึกไว้เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์ความแปรปรวนและการหาจุดที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรแต่ละตัวต่อไป ค่าเปอร์เซ็นต์ของขนาดเศษแก้วที่มีขนาดเล็กกว่ารูตะแกรงและสามารถลอดผ่านได้สามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$\% = \frac{BS - AS}{BS} \times 100 \quad (20)$$

โดยที่ % คือค่าเปอร์เซ็นต์ของเศษแก้วที่มีขนาดเล็กกว่ารูตะแกรงและสามารถลอดผ่านได้ BS คือน้ำหนักของขวดแก้วที่ชั่งก่อนตี และ AS คือน้ำหนักของเศษแก้วที่มีขนาดเล็กกว่ารูตะแกรงและสามารถลอดผ่านได้

ผลการศึกษา

รูปที่ 1 แสดงชุดตีของเครื่องและฝาครอบกันเศษแก้วกระเด็น และเครื่องที่สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว เครื่องที่สร้างเสร็จแล้วสามารถเคลื่อนย้ายได้โดยการใช้ล้อเลื่อนเพื่อให้เกิดความสะดวกในการใช้
รูปที่ 2 แสดงเศษแก้วที่ได้จากการย่อยซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมและเป็นที่ต้องการของผู้รับซื้อ



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 (ก) ชุดตีของเครื่องและฝาครอบกันเศษแก้ว (ข) เครื่องที่สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 2 เศษแก้วที่ได้จากการย่อย

ตารางที่ 2 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบประสิทธิภาพและประสิทธิผลของเครื่องย่อยขวดแก้วซึ่งมีตัวแปรสองตัวที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการย่อยขวดแก้วของเครื่องคือ ความเร็วรอบ

(ξ_1) และอัตราการป้อนขวด (ξ_2) ข้อมูลที่วัดได้แสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของขนาดเศษแก้วที่มีขนาดเล็กกว่ารูตะแกรงและสามารถลอดผ่านได้ซึ่งในแต่ละทรีทเมนต์คอมบิเนชันจะมีการทดลอง 3 ซ้ำและจะถูกบันทึกเป็นค่าเฉลี่ย นั่นคือ ค่าเปอร์เซ็นต์ของขนาดเศษแก้วคือผลตอบสนอง (y)

Treatment combination	Natural variable		Coded variable		Observations (%)			Average (%)
	Speed, ξ_1 (rpm)	Feed rate, ξ_2 (bottle/min)	Speed, x_1	Feed rate, x_2	1	2	3	
1	195	8	-1	-1	86.40	85.60	86.00	86.00
2	410	8	1	-1	88.80	88.40	89.00	88.73
3	195	16	-1	1	87.20	86.60	86.96	86.92
4	410	16	1	1	89.20	89.48	88.88	89.19
5	150	12	-1.414	0	86.00	85.52	85.92	85.81
6	452	12	1.414	0	90.00	90.40	89.92	90.11
7	300	6	0	-1.414	87.20	87.00	87.40	87.20
8	300	18	0	1.414	88.00	87.80	88.28	88.03
9	300	12	0	0	88.40	88.16	88.28	88.28
10	300	12	0	0	87.80	88.00	88.44	88.08
11	300	12	0	0	88.00	87.96	87.68	87.88
12	300	12	0	0	87.60	88.16	88.36	88.04
13	300	12	0	0	88.40	87.64	87.92	87.99

ตารางที่ 2 การออกแบบส่วนผสมกลางสำหรับการทดสอบประสิทธิภาพและประสิทธิผลของเครื่อง

การวิเคราะห์หารูปแบบของสมการที่เหมาะสมโดยใช้การออกแบบส่วนประสมกลางสามารถใช้ซอฟต์แวร์สำหรับคอมพิวเตอร์ ตารางที่ 3 แสดงการวิเคราะห์หารูปแบบของสมการที่เหมาะสม จะเห็นว่าผลการวิเคราะห์แสดงการคำนวณเชิงลำดับหรือผลรวมของกำลังสองแบบพิเศษ (sequential or extra sums of squares) สำหรับรูปแบบเชิงเส้น (linear) ควอดราติก (quadratic) และลูกบาศก์ (cubic) ขึ้นมาก่อน จากค่า P -value ที่มีค่าน้อยกว่า 0.05 (กำหนดให้ $\alpha = 0.05$) จะเห็นว่ารูปแบบเชิงเส้นและควอดราติกจะได้รับการยอมรับเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับผลตอบสนอง อย่างไรก็ตาม การทดสอบ lack-of-fit test จะเป็นการยืนยันว่ารูปแบบทางคณิตศาสตร์ใดเป็นรูปแบบที่เหมาะสมในการทำการสร้างเข้ากับข้อมูล การทดสอบ lack-of-fit test มีสมมติฐานว่า ถ้าค่าผลตอบสนองที่คาดหวัง \hat{y}_i มีค่าใกล้เคียงกับค่าผลตอบสนองเฉลี่ย \bar{y}_i แสดงให้เห็นว่ารูปแบบทางคณิตศาสตร์นั้นควรเป็นรูปแบบเชิงเส้น (Myers and Montgomery, 2002) นั่นคือ ค่า P -value จะมีค่าน้อยกว่า 0.05 แต่ถ้าค่า P -value มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่ารูปแบบทางคณิตศาสตร์นั้นควรเป็นรูปแบบอื่นที่ไม่ใช่เชิงเส้น จากตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ lack-of-fit test ยืนยันว่ารูปแบบทางคณิตศาสตร์ควอดราติกเป็นรูปแบบที่เหมาะสมในการทำการสร้างเข้ากับข้อมูลสังเกตได้จากค่า P -value มีค่ามากกว่า 0.05 (หมายเหตุ ค่า P -value ของรูปแบบลูกบาศก์ก็มีค่ามากกว่า 0.05 แต่ไม่ได้รับการยอมรับเนื่องจากมีความเตือนในโปรแกรมเกี่ยวกับการเป็นคู่แฝดแฝง (aliased) ในรูปแบบลูกบาศก์ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการออกแบบส่วนประสมกลางมีการทำการทดลองไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดแบบจำลองลูกบาศก์ได้)

โดยการใช้ตัวแปรสัญลักษณ์ รูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรที่มีรูปแบบเป็นเส้นโค้ง (second-order model) แบบควอดราติกถูกทำการสร้างเข้ากับข้อมูล รูปแบบทางคณิตศาสตร์นี้สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon \quad (21)$$

Response	1	Percent	Transform:	None
*** WARNING: The Cubic Model is Aliased! ***				
Sequential Model Sum of Squares [Type I]				
	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value
Source				p-value Prob > F
Mean vs Total	.004E+005	1	1.004E+005	
Linear vs Mean	16.13	2	8.07	113.89 < 0.0001
2FI vs Linear	0.054	1	0.054	0.75 0.4091
<u>Quadratic vs 2FI</u>	<u>0.41</u>	<u>2</u>	<u>0.20</u>	<u>5.75</u> <u>0.0333</u> <u>Suggested</u>
Cubic vs Quadratic	0.15	2	0.074	3.78 0.1002 Aliased
Residual	0.099	5	0.020	
Total	1.004E+005	13	7721.67	
"Sequential Model Sum of Squares [Type I]": Select the highest order polynomial where the additional terms are significant and the model is not aliased.				
Lack of Fit Tests				
	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value
Source				p-value Prob > F
Linear	0.62	6	0.10	4.78 0.0760
2FI	0.57	5	0.11	5.23 0.0671
<u>Quadratic</u>	<u>0.16</u>	<u>3</u>	<u>0.054</u>	<u>2.47</u> <u>0.2017</u> <u>Suggested</u>
Cubic	0.012	1	0.012	0.54 0.5024 Aliased
Pure Error	0.087	4	0.022	
"Lack of Fit Tests": Want the selected model to have insignificant lack-of-fit.				
Model Summary Statistics				
	Std. Dev.	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared
Source				PRESS
Linear	0.27	0.9579	0.9495	0.9233 1.29
2FI	0.27	0.9612	0.9482	0.8961 1.75
<u>Quadratic</u>	<u>0.19</u>	<u>0.9853</u>	<u>0.9748</u>	<u>0.9242</u> <u>1.28</u> <u>Suggested</u>
Cubic	0.14	0.9941	0.9860	0.9473 0.89 Aliased
"Model Summary Statistics": Focus on the model maximizing the "Adjusted R-Squared" and the "Predicted R-Squared".				

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์หารูปแบบของสมการที่เหมาะสมโดยใช้การออกแบบส่วนประสมกลาง

ตารางที่ 4 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องทดสอบ F-test สำหรับรูปแบบควอดราติกซึ่งมี $F_0 = 93.93$ และ P-value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปฏิเสธสมมติฐาน

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_{11} = \beta_{22} = \beta_{12} = 0 \quad (22)$$

และสรุปว่าอย่างน้อยหนึ่งพารามิเตอร์ไม่เป็นศูนย์ ตารางที่ 4 สามารถสรุปให้เห็นว่าตัวแปรทั้งสองมีผลกระทบโดยตรงต่อขนาดเศษแก้ว นอกจากนี้ ค่า R_2 และ adjusted R_2 มีค่าสูงและใกล้เคียงกันซึ่ง

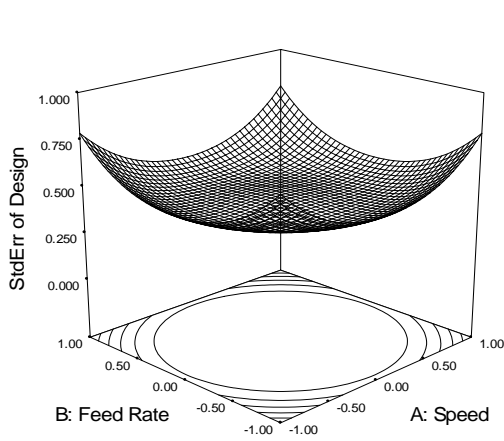
แสดงให้เห็นว่ารูปแบบควอดราติกมีความเหมาะสมที่ถูกทำการสร้างเข้ากับข้อมูล ดังนั้น รูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนอง (เปอร์เซ็นต์ของขนาดเศษแก้วที่มีขนาดเล็กกว่ารูตะแกรงและสามารถลอดผ่านได้, y) และตัวแปร (ความเร็วรอบ, x_1 และอัตราการป้อนขวด, x_2) คือ

$$\hat{y} = 88.05 + 1.38 x_1 + 0.32 x_2 - 0.07 x_1^2 - 0.24 x_2^2 - 0.12 x_1 x_2 \quad (23)$$

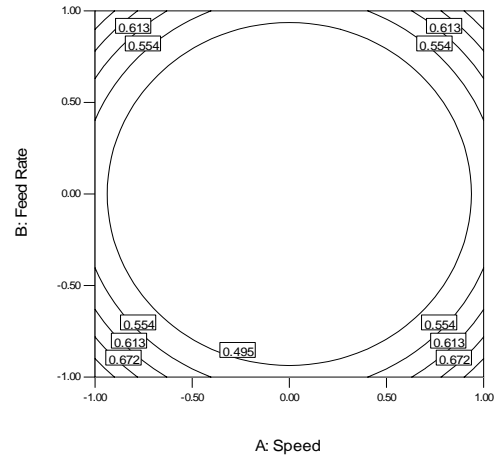
รูปที่ 3 แสดงการทดสอบความสามารถในการหมุนโดยแสดงออกมาเป็นพื้นผิวผลตอบสนอง 3 มิติและเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบสนอง จากรูป จะเห็นว่าผลการทดลองนี้สามารถแทนด้วยรูปแบบทางคณิตศาสตร์แบบจำลองอันดับที่สอง (รูปแบบควอดราติก) ได้เป็นอย่างดีซึ่งตรงกับผลการวิเคราะห์หารูปแบบของสมการที่เหมาะสมโดยใช้การออกแบบส่วนประสมกลางตามตารางที่ 3 และตารางที่ 4

ANOVA for Response Surface Quadratic Model					
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]					
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	16.59	5	3.32	93.93	< 0.0001 significant
A-Speed	15.32	1	15.32	433.74	< 0.0001
B-Feed Rate	0.81	1	0.81	22.87	0.0020
AB	0.054	1	0.054	1.54	0.2544
A ²	0.030	1	0.030	0.85	0.3863
B ²	0.40	1	0.40	11.26	0.0121
Residual	0.25	7	0.035		
Lack of Fit	0.16	3	0.054	2.47	0.2017 not significant
Pure Error	0.087	4	0.022		
Cor Total	16.84	12			
Std. Dev.		0.19		R-Squared	0.9853
Mean		87.87		Adj R-Squared	0.9748
C.V. %		0.21		Pred R-Squared	0.9242
PRESS		1.28		Adeq Precision	30.926
Final Equation in Terms of Coded Factors:					
Percent		=			
+88.05					
+1.38		* A			
+0.32		* B			
-0.12		* A * B			
-0.066		* A ²			
-0.24		* B ²			

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดสอบประสิทธิภาพและประสิทธิผลของเครื่อง

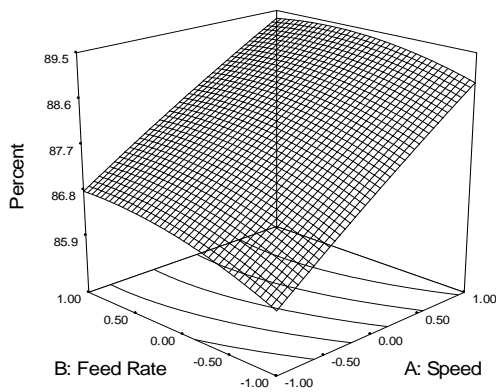


(ก)

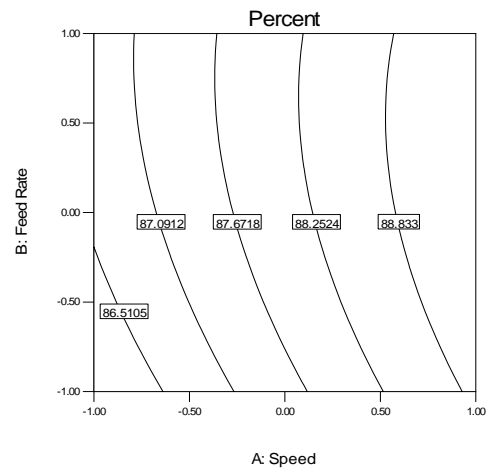


(ข)

รูปที่ 3 การทดสอบความสามารถในการหมุน (ก) พื้นผิวผลตอบสนอง 3 มิติ
(ข) เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบสนอง



(ก)



(ข)

รูปที่ 4 (ก) พื้นผิวผลตอบสนอง 3 มิติ (ข) เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบสนอง

สมการ (23) สามารถนำมาพล็อตเป็นรูปสามมิติและเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบสนองดังแสดงในรูปที่ 4 จากรูปจะเห็นว่า ความชันของกราฟจะมีแนวโน้มสูงขึ้น (นั่นคือ เปอร์เซนต์ของขนาดเศษแก้วที่มีขนาดเล็กกว่ารูตะแกรงและสามารถลอดผ่านได้มีค่าเพิ่มขึ้น) เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นในขณะที่การเพิ่มขึ้นของอัตราการป้อนขนาดมีผลเล็กน้อยต่อการเพิ่มของผลตอบสนอง

ตารางที่ 5 แสดงผลการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของความเร็รรอบและอัตราการป้อนขวด จากตารางจะเห็นว่าที่ความเร็รรอบ 1.00 และอัตราการป้อนขวด 0.42 (จากช่วง -1 ถึง +1 ของตัวแปรสัญลักษณ์) เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ของเศษแก้วที่มีขนาดเล็กกว่ารูตะแกรงและสามารถลอดผ่านได้มากที่สุด ความเร็รรอบ 1.00 และอัตราการป้อนขวด 0.42 สามารถแปลงให้อยู่ในรูปของตัวแปรจริงได้จากสมการ (6) ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสัญลักษณ์และตัวแปรจริงของความเร็รรอบคือ

$$x_1 = \frac{\xi_1 - (452 + 150)/2}{(452 - 150)/2} \quad (24)$$

ดังนั้น ตัวแปรจริงของความเร็รรอบ 1.00 คือ 452 รอบต่อนาที ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสัญลักษณ์และตัวแปรจริงของอัตราการป้อนขวดคือ

$$x_2 = \frac{\xi_2 - (18 + 6)/2}{(18 - 6)/2} \quad (25)$$

ดังนั้น ตัวแปรจริงของอัตราการป้อนขวด 0.42 คือ 14.52 หรือ 15 ขวดต่อนาที

จากความเร็รรอบ 452 รอบต่อนาทีสามารถคำนวณหาขนาดของพู่เล่ย์โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพู่เล่ย์และความเร็รรอบมีความสัมพันธ์กันดังสมการ (19) นั่นคือ

$$1450 \times 3 = 452 d_2$$

$$d_2 = 9.62 \quad (26)$$

ดังนั้น เส้นผ่านศูนย์กลางของพู่เล่ย์ที่ทำให้ได้ขนาดของเศษแก้วตามความต้องการของตลาดและได้ปริมาณมากที่สุดโดยเฉลี่ยคือ 9.62 นิ้ว และสามารถคำนวณหาปริมาณเศษแก้วที่ย่อยได้โดยเฉลี่ยเท่ากับ 89.41 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม การเลือกซื้อพู่เล่ย์ให้ได้ขนาดตามที่คำนวณคงเป็นไปได้ยาก ดังนั้น การเลือกซื้อควรให้ได้ขนาดใกล้เคียงกับที่มีขายตามท้องตลาด

Solutions Number	Speed	Feed Rate	Percent	Desirability
1	1.00	0.42	89.4137	0.839 Selected
2	1.00	0.41	89.4137	0.839
3	1.00	0.37	89.4132	0.838
4	1.00	0.47	89.4131	0.838
5	1.00	0.23	89.4047	0.837
6	1.00	0.73	89.391	0.833
7	1.00	0.79	89.3805	0.831
8	1.00	0.85	89.3703	0.828

8 Solutions found

ตารางที่ 5 ผลการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

สรุป

วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องย่อยขวดแก้ว รวมทั้งทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อขนาดเศษแก้วของเครื่องย่อยขวดแก้วซึ่งนำไปสู่การพัฒนาประสิทธิภาพและประสิทธิผลของเครื่อง จะเห็นว่าเครื่องที่ออกแบบและสร้างขึ้นมาสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยสามารถย่อยขวดแก้วได้ตามขนาดที่ตลาดต้องการ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยขวดแก้วให้ได้ขนาดและปริมาณที่มากคือความเร็วรอบและอัตราการป้อนขวดแก้ว โดยที่ความเร็วรอบ 452 รอบต่อนาทีหรือประมาณ 450 รอบต่อนาทีและอัตราการป้อนขวดแก้ว 15 ขวดต่อนาทีเป็นการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องเพื่อให้ได้ขนาดของเศษแก้วตามที่ต้องการและได้ปริมาณมากที่สุดโดยเฉลี่ย จากความเร็วรอบและอัตราการป้อนขวดแก้วที่ระดับดังกล่าวสามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของขนาดเศษแก้วที่มีขนาดเล็กกว่ารูตะแกรงและสามารถลอดผ่านได้โดยเฉลี่ยเท่ากับ 89.41 เปอร์เซ็นต์ ถ้าทำการย่อยขวดแก้วเป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมงต่อวันจะได้เศษแก้วเท่ากับจำนวนขวด 7,200 ขวด (15 ขวดต่อนาที \times 60 นาที \times 8 ชั่วโมง) ประสิทธิภาพในการย่อยขวดแก้วที่ดีที่สุดเท่ากับ 89.41 เปอร์เซ็นต์และขวดมีน้ำหนักประมาณ 0.4167 กิโลกรัมต่อขวด ดังนั้น จะได้เศษแก้วมีน้ำหนัก 2,682.52 กิโลกรัมต่อวัน เศษแก้วที่ได้จากการย่อยสามารถลดพื้นที่ในการขนส่งและยังช่วยประหยัดค่าขนส่งอีกด้วย นอกจากนี้ เครื่องย่อยขวดแก้วยังสามารถลดปริมาณขยะที่เกิดจากขวดแก้วที่ทิ้งแล้วซึ่งเป็นการลดมลภาวะได้อีกทางหนึ่ง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักบริหารการวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่นที่ได้ให้การสนับสนุนทุนนักวิจัยหน้าใหม่ประจำปีงบประมาณ 2548

เอกสารอ้างอิง

- นเรศ ชักโยงและสุชาติ วงศ์สุริยา. 2547. การออกแบบและสร้างเครื่องย่อยขวดแก้ว. รายงานงานโครงการวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สุขใจ เตชศุภบุญ. 2546. อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์สินค้าไทย, [ออนไลน์] [อ้างเมื่อ 28 เมษายน 2548] เข้าถึงได้จาก: www.dft.moc.go.th/eximcentre/technical/pack.htm.
- Institute of Scrap and Recycle. 2001. **Glass Recycling: It Just Keeps Going On and On.** Retrieved October 5, 2004. www.isri.org/industryinfo/glass.htm
- Montgomery, D.C. 1999. **Experimental Design for Product and Process Development.** The Statistician: 48(2): 159-177.
- Montgomery, D.C. 2001. **Design and Analysis of Experiments.** Fifth Edition. John Wiley & Sons Inc.

Myers, R.H. and Montgomery, D.C. 2002. **Response Surface Methodology Process and Product Optimization Using Designed Experiments**. Second Edition.
John Wiley & Sons, Inc.