

การผลิตล้อเจียรในพันธะวิทรีไฟด์จากซิลิกอนคาร์ไบด์

Production of Vitrified Bonded Grinding Wheel from Silicon Carbide

กนิษฐ์ บุญพละ* และอิสรา ธีระวัฒน์สกุล

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

Kanit Boonpala* and Isra Teerawatsakul

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Chiang Mai University, Chiang Mai 50200

E-mail: maninironmask@hotmail.com*, isra@eng.cmu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคออกแบบการทดลอง เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของการผลิตล้อเจียรในพันธะวิทรีไฟด์ โดยใช้กระบวนการอัดขึ้นรูปแบบแห้ง ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก เทคนิคออกแบบการทดลองแบบผสมถูกนำมาใช้หาอัตราส่วนของซิลิกอนคาร์ไบด์ ตัวประสาน และแนฟทาลีนที่เหมาะสม ในล้อเจียรในพันธะวิทรีไฟด์² ผลการทดสอบใช้วิธีทดสอบเชิงกล ได้แก่ การทดสอบความแข็งแรงเชิงอัด และการทดสอบความแข็งแรงเชิงดัด พบว่า ปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ 80% ปริมาณตัวประสานที่ 10% และปริมาณแนฟทาลีนที่ 10% เป็นสูตรที่เหมาะสม โดยให้ค่าความแข็งแรงเชิงอัดและเชิงดัดเท่ากับ 449.281 และ 325.324 kg/cm² ตามลำดับ จากนั้นทำการหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตล้อเจียรในด้วยวิธี Central Composite Design (CCD) โดยปัจจัยที่ทำการศึกษา 2 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิการเผาไฟ และเวลาในการเผาแห้ง วิเคราะห์ผลโดยใช้วิธีทดสอบเชิงกล ได้แก่ การทดสอบความแข็งแรงเชิงอัด และการทดสอบความแข็งแรงเชิงดัด พบว่า สภาวะการทดลองที่เหมาะสมสำหรับผลิตล้อเจียรในพันธะวิทรีไฟด์ คือ อุณหภูมิการเผาไฟเท่ากับ 1,072 องศาเซลเซียส และเวลาในการเผาแห้งเท่ากับ 3.9 ชั่วโมง โดยให้ค่าความแข็งแรงเชิงอัด และความแข็งแรงเชิงดัดเท่ากับ 469.117 และ 271.415 kg/cm² ตามลำดับ

ABSTRACT

This research applied experimental design technique for determining an optimum value of the bonded grinding wheel manufacturing by dry pressing with a hydraulic molding machine. The mixture design was used to determine optimum ratio of silicon carbide, binder and naphthalene in the formulation of the vitrified bonded grinding wheel. Test effect was used mechanical method such as compressive and bending strength. The result showed that 80% of silicon carbide, 10% of binder, and 10% of naphthalene was the optimum ingredient, and the compressive and bending strength were at 449.3 and 325.3 kg/cm² respectively. After that, we determined the optimum condition in production process by using Central Composite Design (CCD). The study included two factors: the firing temperature and the holding time. The compressive and bending strength were considered. It was found that the optimum temperature for making the vitrified bonded grinding wheel was 1,072 °C and the holding time was 3.9 hours. The compressive and bending strength were at 469.1 and 271.4 kg/cm² respectively.

1. บทนำ

ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) เป็นวัสดุธรรมชาติที่มีความแข็งแรงรองจากเพชร จัดเป็นวัสดุกลุ่มตัวแทนของวัสดุแข็งโลหะไม่ใช่เหล็ก มีความแข็งสูง มีความแข็งตามมอร์ห์ 9.5 ถึง 9.75 [1] ซิลิกอนคาร์ไบด์มี 2 ชนิด คือซิลิกอนคาร์ไบด์สีดำและซิลิกอนคาร์ไบด์สีเขียว ซึ่งชนิดสีเขียวจะมีความบริสุทธิ์มากกว่า [2]

ซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการสังเคราะห์เพชรเทียมซึ่งเกิดจากคาร์บอน เกิดปฏิกิริยากับซิลิกา แต่ตามปกติแล้ว กราไฟต์ต้องตกผลึกได้เพชรในอะลูมิเนียมซิลิเกต [3] ในปัจจุบันการผลิตซิลิกอนคาร์ไบด์ใช้ทรายหรือซิลิกาแทนซิลิเกต และใช้ถ่านหินแทนกราไฟต์ ผลิตภัณฑ์ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เตรียมได้อยู่ในรูปของผง ซึ่งสามารถนำไปอัดขึ้นรูปในแม่พิมพ์ก่อนนำขึ้นงานไปให้ความร้อนเพื่อให้อนุภาคขึ้นงานหลอมเข้าหากันจนได้เป็นชิ้นงานที่มีความหนาแน่นและเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง เนื่องจากซิลิกอนคาร์ไบด์มีความแข็งและเหนียวสามารถทนความอุณหภูมิได้มากกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ทนต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน และการกัดกร่อนภายใต้หลายสภาวะ [4] ซิลิกอนคาร์ไบด์จึงใช้มากในงานที่ต้องอยู่ภายใต้อุณหภูมิสูง เช่น อุปกรณ์ชิ้นส่วนเครื่องยนต์และใบพัดก๊าซร้อน นอกจากนี้เมื่อทำซิลิกอนคาร์ไบด์ให้อยู่ในรูปแบบของผลึกที่เป็นเส้นสั้นๆคล้ายเส้นผมและนำมาผสมกับวัสดุที่อ่อนกว่าซิลิกอนคาร์ไบด์ก็ทำหน้าที่ในการเสริมแรงให้กับวัสดุผสมนั้น ส่วนในรูปแบบของผงจะใช้มากในงานขัด [2]

ปัญหาที่เกิดขึ้นกับโรงงานผลิตเพชรเทียม ส่วนใหญ่คือ การกำจัดของเหลือ เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์ โดยปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นในแต่ละเดือน มีมากถึง 2-3 ตัน ทำให้โรงงานต้องเสียค่ากำจัด 7,000 - 8,000 บาทต่อตัน ผู้วิจัยจึงคิดที่จะนำของเหลือนี้กลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์อีกครั้งหนึ่ง เนื่องจากซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นวัสดุที่มีคุณภาพมากในหลายด้าน ซึ่งเด่นในด้านงานขัดหรือเจียรไน โดยซิลิกอนคาร์ไบด์สามารถนำมาทำเป็นเครื่องมือที่ใช้ขัดวัสดุ

จำพวกโลหะได้ เช่น การทำล้อเจียรไน การทำกระดาษทรายขัด การทำแท่งขัด

ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งเน้นในการศึกษา เพื่อหาส่วนผสมของล้อเจียรไนพันธะอิทธิพลไฟต์ที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้เทคนิคออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม (Mixture Design) และหาค่าสภาวะของกระบวนการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตล้อเจียรไนพันธะอิทธิพลไฟต์ โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD)

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาหาส่วนผสม และสภาวะของกระบวนการผลิตล้อเจียรไนพันธะอิทธิพลไฟต์ที่เหมาะสม โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง

2.2 เพื่อศึกษาแนวทางการผลิตล้อเจียรไน โดยสามารถใช้งานได้จริง

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 ซิลิกอนคาร์ไบด์

ซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นสารประกอบของธาตุระหว่างซิลิกอน (Si) กับคาร์บอน (C) ซึ่ง ซิลิกอนกับคาร์บอนจะเข้าไปสร้างพันธะกับสารประกอบตัวอื่นๆ เช่น 3C, 4H, 6H หรือแม้แต่โมเลกุลใหญ่ เช่น 15R ทำให้มีขนาดโมเลกุลใหญ่ขึ้น [5] โดยคุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกอนคาร์ไบด์ [6] สรุปได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกอนคาร์ไบด์

โครงสร้างผลึก	Hexagonal (Alpha)
ความหนาแน่น	3.2 g/cm ³
ความแข็ง (Hardness)	9.0 – 9.5 Mohs' scale, ประมาณ 2,800 Knoop, แข็งกว่าอลูมินา
ความเหนียว (Toughness)	ต่ำกว่าอลูมินา
จุดหลอมเหลว	2,700 °C
ความจุความร้อนจำเพาะ	0.34 cal/g. °C
สัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อน	3.4 x 10 ⁻⁶ /°C
เสถียรภาพทางความร้อน	0.1 cal.cm/cm ² .s. °C at 20°C สูงกว่าอลูมินา
เสถียรภาพทางเคมี	เกิดออกซิเดชันช้าๆ ที่ 1,000 °C เกิดซิลิกา
การนำไฟฟ้า	ทนต่อกรดและเบส

ประโยชน์ของซิลิกอนคาร์ไบด์ ยกตัวอย่างเช่น ใช้เป็นวัสดุขัด (Abrasive) เนื่องจากแข็งและทนความร้อนได้สูงจึงใช้ทำวัสดุขัดหลายชนิด เช่น หินเจียร แผ่นตัดเหล็ก และอุปกรณ์ขัดอื่นๆ เป็นผิวป้องกันการสึกกร่อน (Wear Surface) ใช้เป็นวัสดุทนไฟ (Refractory) ใช้บุผนังเตาและหม้อหรืออุปกรณ์ทนความร้อนต่างๆ ใช้ในงานทางไฟฟ้า เช่น อุปกรณ์ต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูง (Thermister) อุปกรณ์หรือเครื่องมือที่นำไฟฟ้าได้เพียงเล็กน้อยนำมาใช้แทนหลอดวิทยุ (Transistor) และประโยชน์อื่นๆ ได้แก่ เป็นแผ่นหรือภาชนะรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นวัสดุวางเรียงซ้อนขึ้นบรรจุภายในหลอด (Tower Packing) หรือใช้เป็นอุปกรณ์พ่นของเหลวชนิดกรดแก่ เช่น ในการผลิตกรดกำมะถัน ซึ่งเป็นอุปกรณ์รูปพ่นหมอก (Spray Nozzle) [6]

3.2 การออกแบบการทดลอง

3.2.1 การออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) ใช้กับปัจจัยที่เป็นเชิงปริมาณตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป โดยที่ปัจจัยนั้นๆ จะมีความเกี่ยวเนื่องกัน ซึ่งปริมาณ

ของแต่ละปัจจัยเมื่อรวมกันจะเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ กล่าวคือ เมื่อปัจจัยหนึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้น ย่อมทำให้ปัจจัยอื่น ๆ มีสัดส่วนลดลง [7]

โดยแบบพหุนามที่ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระ [8] มีดังนี้

1) Linear Model

$$E(y) = \sum_{i=1}^p \beta_i X_i \quad (1)$$

2) Quadratic Model

$$E(y) = \sum_{i=1}^p \beta_i X_i + \sum_{i<j}^p \beta_{ij} X_i X_j \quad (2)$$

3) Full Cubic Model

$$E(y) = \sum_{i=1}^p \beta_i X_i + \sum_{i<j}^p \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i<j<k}^p \delta_{ijk} X_i X_j (X_i - X_j) + \sum_{i<j<k}^p \beta_{ijk} X_j X_j X_k \quad (3)$$

4) Special Cubic Model

$$E(y) = \sum_{i=1}^p \beta_i X_i + \sum_{i<j}^p \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i<j<k}^p \beta_{ijk} X_j X_j X_k \quad (4)$$

แผนการออกแบบย่อยแบบเอ็กซ์ตรีมเวอร์ทิส (Extreme Vertices) เป็นการออกแบบการทดลองแบบที่มีข้อจำกัดสัดส่วน (Design with constraints on proportion) กล่าวคือ ระดับในแต่ละปัจจัยที่ทำการทดลองไม่จำเป็นต้องเป็น 0–100% โดยอาจเป็น 20–30% หรือ 10 – 25 % เป็นต้น [9]

3.2.2 การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD) เป็นหนึ่งในวิธีการหาพื้นผิวผลตอบที่นิยมใช้เพื่อหากระบวนการที่เหมาะสม CCD สามารถทำให้หาค่าได้โดยการเลือกค่าของ α

การออกแบบจำลองอันดับที่สองควรมีความสามารถในการหมุน ซึ่งหมายความว่าค่าความแปรปรวนของผลตอบที่ถูกพยากรณ์จะมีค่าคงตัวบนรูปทรงกลม ดังสมการที่ (5)

$$V[y(x)] = \sigma^2 x'(X'X)^{-1}x \quad (5)$$

โดย $V[y(x)]$ คือ จุด x ทุกจุดที่มีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบเท่ากัน เส้นโครงร่างของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มีค่าคงตัวของผลตอบที่ถูกพยากรณ์จะเป็นวงกลมที่มีศูนย์กลางอยู่ร่วมกัน การออกแบบที่มี

คุณสมบัติเช่นนี้จะทำให้ค่าความแปรปรวนของ y ไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อการออกแบบถูกหมุนรอบจุดศูนย์กลาง $(0, 0, \dots, 0)$ [9]

3.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับล้อยืดหยุ่น

กันยาพร [10] ได้ศึกษาถึงผลของตัวเติม (Additives) ที่ใช้ในการเผาผนึก (Sintering) ซิลิกอนคาร์ไบด์ คือ อิตเทรียมออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์ และอลูมิเนียมไนเตรด พบว่า การเติมตัวเชื่อมช่วยในการขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแห้ง เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเชื่อม ความหนาแน่นของชิ้นงานก่อนเผาและหลังเผาจะสูงขึ้น และค่าความทนแรงอัดหลังการเผาก็จะสูงขึ้นตาม ส่วน Lin et al. [11] ได้ศึกษาถึงตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการเผา (Sintering) โดยศึกษาเม็ดพอลิเมอร์ที่ใช้สร้างรูพรุน บรรยากาศ และเวลาในการเผา ผลการทดลองสรุปได้ว่าเม็ดพอลิเมอร์มีผลต่อการหดตัวของชิ้นงานบรรยากาศที่มีก๊าซเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน มีความจำเป็นต่อการเผาที่อุณหภูมิสูง เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และอุณหภูมิการเผาส่งผลกระทบต่อชิ้นงานมากกว่าเวลาในการเผา นอกจากนี้ Jackson [12] ได้ค้นคว้าเกี่ยวกับปริมาณ คิวซท์ในล้อยืดหยุ่นในพันธะวิทรีไฟด์ พบว่าหากใช้เวลาในการเผาแช่ (Holding Time) สั้นเกินไป จะทำให้คิวซท์ละลายไม่หมด ส่งผลต่อความแข็งแรงของล้อยืดหยุ่น ทำให้ความแข็งแรงลดลง ล้อยืดหยุ่นไม่มีการสึกหรอที่เร็วกว่าปกติ

3.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองแบบผสม ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อหาสูตรในการผลิตที่เหมาะสม เช่น ธวัชชัย [13] ทำการศึกษากรรมวิธีการผลิตเหล็กแท่ง ในการคัดเลือกปัจจัยที่ส่งผลต่อผลผลิต และหาอัตราส่วนผสมวัตถุดิบเศษเหล็ก พร้อมกับตั้งค่าระดับปัจจัยที่ส่งผลต่อผลผลิต และต้นทุนการผลิต โดยใช้การออกแบบการทดลองผสม คือ Extreme Vertices Design ร่วมกับการ

ออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล คือ 2^2 Factorial Design

สำหรับเทคนิคการออกแบบส่วนประสมกลาง เป็นการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต ยกตัวอย่าง เช่น รังสฤษฏ์ และชาญณรงค์ [14] ทำการศึกษาการเคลือบฟิล์มบาง MoO_3 ด้วยวิธีการอาร์เอฟรีแอคทีฟสปีดเตอร์ริง เช่นเดียวกันกับ เสาวลักษณ์ และวณิช [15] ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตคาร์บอนเมลของน้ำตาลทรายขาว นอกจากนั้น พัชรียา [16] ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อลักษณะเฉพาะของเชื้อจากทางใบป่าลุ่มน้ำมัน โดยเทคนิคการออกแบบส่วนประสมกลาง

จากผลลัพธ์ของการวิจัยต่างๆทำให้สรุปได้ว่า เทคนิคการออกแบบการทดลองทำให้ทราบถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิต ทำให้ได้ค่าปัจจัยที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิตของแต่ละงานวิจัย และสามารถกำหนดปัจจัยได้ตามผลตอบที่ต้องการ ดังนั้นเทคนิคการออกแบบการทดลองจึงมีประโยชน์มากสำหรับงานวิจัยที่ต้องการค้นหาตัวแปรปัจจัยหลายๆ ค่า ซึ่งสามารถลดเวลาในการวิจัยได้

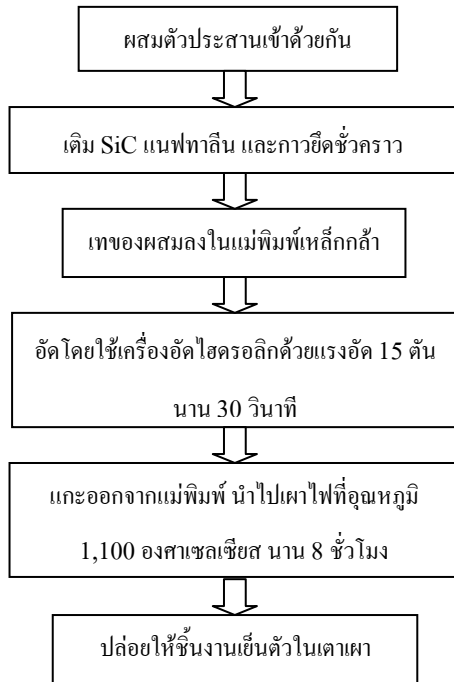
4. กรรมวิธีการผลิตล้อยืดหยุ่นพันธะวิทรีไฟด์

โดยรายละเอียดขั้นตอนการผลิตล้อยืดหยุ่นพันธะวิทรีไฟด์ แสดงดังรูปที่ 1 วัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัยควรมีขนาด 100–250 mesh ยกเว้นซิลิกอนคาร์ไบด์ จะใช้ขนาด 180 mesh และผงฟritจะต้องทำการบด เพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสม โดยใช้เครื่องบด Ball Milling บดแบบแห้งนาน 1 วัน นำมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 mesh ในการผสมวัตถุดิบควรจะต้องผสมให้มีความเป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากต้องการให้ตัวประสานกระจายตัวอย่างทั่วถึงภายในชิ้นงาน โดยทั่วไปชิ้นงานก่อนการเผาไฟ (Green) จะไม่สามารถขึ้นรูปได้ หากไม่มีกาว (Temporary Binder) ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกสารละลายกาวยางสังเคราะห์ และเอทิลีนไกลคอล มาทำเป็นกาว ซึ่งเมื่อทำการเผาชิ้นงานที่ขึ้นรูปแล้ว กาวจะสลายตัวไปกับความร้อน การขึ้นรูปล้อยืดหยุ่นในสามารถทำได้โดยกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบ

เย็น (Cold Pressing) ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ขนาด 30 ตัน ใช้แม่พิมพ์เหล็กกล้า (Steel Molding) ดังรูปที่ 2 โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว แรงอัด 15 ตัน ใช้เวลาอัด 30 วินาที การเผาไฟควรใช้อุณหภูมิที่สูงเพียงพอ เพื่อให้ตัวประสานเกิดการหลอมตัว และยึดเกาะเม็ดเกรนขัดเข้าด้วยกัน หลังจากนั้นปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในเตาเผา ซึ่งจะได้ชิ้นงานล้อยืดหยุ่น ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ชิ้นงานล้อยืดหยุ่นในหลังการเผาไฟ



รูปที่ 1 ขั้นตอนการผลิตล้อยืดหยุ่นในพันธะอิทธิพลไฟต์



รูปที่ 2 แม่พิมพ์เหล็กกล้า

5. วิธีการดำเนินงานวิจัย

5.1 การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง เพื่อหาสูตรที่เหมาะสมในการผลิตล้อยืดหยุ่น จะใช้ Mixture Design แบบ Extreme Vertices และใช้หลักการหาพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology; RSM) ในการหาความสัมพันธ์ของปัจจัยและผลตอบ โดยปัจจัยที่ศึกษา คือ อัตราส่วนผสมของซิลิกอนคาร์ไบด์ ตัวประสาน และแนพทาไลน์ ผลตอบที่ศึกษา คือ ค่าความแข็งแรงเชิงอัด (Compressive Strength) และค่าความแข็งแรงเชิงคด (Bending Strength) ซึ่งได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 13 การทดลอง ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองแบบผสม แบบ Extreme Vertices

ลำดับ	ปัจจัยที่ทำการศึกษา		
	SiC	Bond	Naphthalene
1	60	10	30
2	80	10	10
3	60	15	25
4	75	15	10
5	70	10	20
6	60	12.5	27.5
7	77.5	12.5	10
8	67.5	15	17.5
9	64.375	11.25	24.375
10	74.375	11.25	14.375
11	64.375	13.75	21.875
12	71.875	13.75	14.375
13	68.75	12.5	18.75

5.2 การประยุกต์ใช้การออกแบบส่วนประสมกลาง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตลื้อเจียระไน ปัจจัยที่ศึกษา คือ อุณหภูมิการเผา (Firing Temperature) 900–1,100 องศาเซลเซียส และเวลาเผาแซ่ (Holding Time) 2–4 ชั่วโมง ผลตอบคือค่าความแข็งแรงเชิงอัด และค่าความแข็งแรงเชิงคด ได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 13 การทดลอง ดังตารางที่ 3

5.3 การทดสอบยืนยันผล โดยทำการผลิตชิ้นงานทดสอบแรงอัด 10 ชิ้น และชิ้นงานทดสอบแรงคด 10 ชิ้น

ตารางที่ 3 การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง

ลำดับ	จุดที่ใช้ทดลอง	ระดับปัจจัย			
		X ₁	X ₂	อุณหภูมิ	เวลา
1	2 ² full factorial design	-1	-1	900	2
2		1	-1	1100	2
3		-1	1	900	4
4		1	1	1100	4
5	Trials at star points	-1.414	0	859	3
6		1.414	0	1141	3
7		0	-1.414	1000	1.6
8		0	1.414	1000	4.4
9	Repeated trials at central point	0	0	1000	3
10		0	0	1000	3
11		0	0	1000	3
12		0	0	1000	3
13		0	0	1000	3

6. ผลการวิจัย

6.1 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลอง เพื่อหาสูตรที่เหมาะสมในการผลิตลื้อเจียระไน ผลดังตารางที่ 4 และวิเคราะห์เชิงสถิติโดยใช้แบบจำลองการถดถอยของพื้นที่ผิวผลตอบ เพื่อใช้ทำนายค่าความแข็งแรงเชิงอัด และค่าความแข็งแรงเชิงคด ได้ค่าประมาณสัมประสิทธิ์ของปัจจัย และทำนายค่าผลตอบ เพื่อหาค่าของปัจจัยที่ดีที่สุด

ตารางที่ 4 ผลการหาสูตรที่เหมาะสมในการผลิตลื้อเจียระไน

ลำดับ	ปัจจัยที่ทำการศึกษา			ความแข็งแรง (kg/cm ²)	
	SiC	Bond	Naphthalene	เชิงอัด	เชิงคด
1	60	10	30	263.0	233.0
2	80	10	10	507.5	322.5
3	60	15	25	270.0	188.5
4	75	15	10	359.0	235.5
5	70	10	20	344.5	250.0
6	60	12.5	27.5	335.0	207.0
7	77.5	12.5	10	423.5	302.5
8	67.5	15	17.5	405.0	194.0
9	64.375	11.25	24.375	285.5	239.5
10	74.375	11.25	14.375	326.0	254.0
11	64.375	13.75	21.875	334.5	181.5
12	71.875	13.75	14.375	444.0	243.5
13	68.75	12.5	18.75	470.0	247.5

จากนั้นนำค่าความแข็งแรงเชิงอัด และค่าความแข็งแรงเชิงคดที่ได้จากตารางที่ 4 ไปวิเคราะห์ความแปรปรวน ด้วยโปรแกรม Design Expert 8.0 ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 5 และตารางที่ 6

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของ Linear Model สำหรับค่าความแข็งแรงเชิงอัด

Source	SS	MS	F	P
Model	74645.28	37322.64	9.44	0.0010
Linear	74645.28	37322.64	9.44	0.0010
Residual Error	90912.81	3952.73		
Lack-of-Fit	69487.40	6948.74	4.22	0.0089
Pure Error	21425.41	1648.11		
Total	1.656E+005			

S = 62.87, R-Sq = 45.09% และ R-Sq (adj) = 40.31%

จากตารางที่ 5 กำหนดให้ค่านัยสำคัญทางสถิติ $\alpha = 0.05$ พบว่าค่า P-Value ของ Linear Model เท่ากับ

0.001 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า α แสดงว่าไม่มีส่วนโค้งเกิดขึ้นที่พื้นผิวผลตอบ

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของ Reduced Quadratic Model สำหรับค่าความแข็งเชิงคด

Source	SS	MS	F	P
Model	37152.70	12384.23	46.69	0.0001
Linear	35079.21	17539.61	66.13	0.0001
AC	2073.48	2073.48	7.82	0.0105
Residual Error	5835.35	265.24		
Lack-of-Fit	3602.70	400.30	2.33	0.0806
Pure Error	2232.65	171.74		
Total	42988.04			

S = 16.29, R-Sq = 86.43% และ R-Sq (adj) = 84.57%

จากตารางที่ 6 พบว่าค่า P-Value ของ AC เท่ากับ 0.0105 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าเป็นสัมประสิทธิ์ที่มีนัยสำคัญในสมการถดถอย

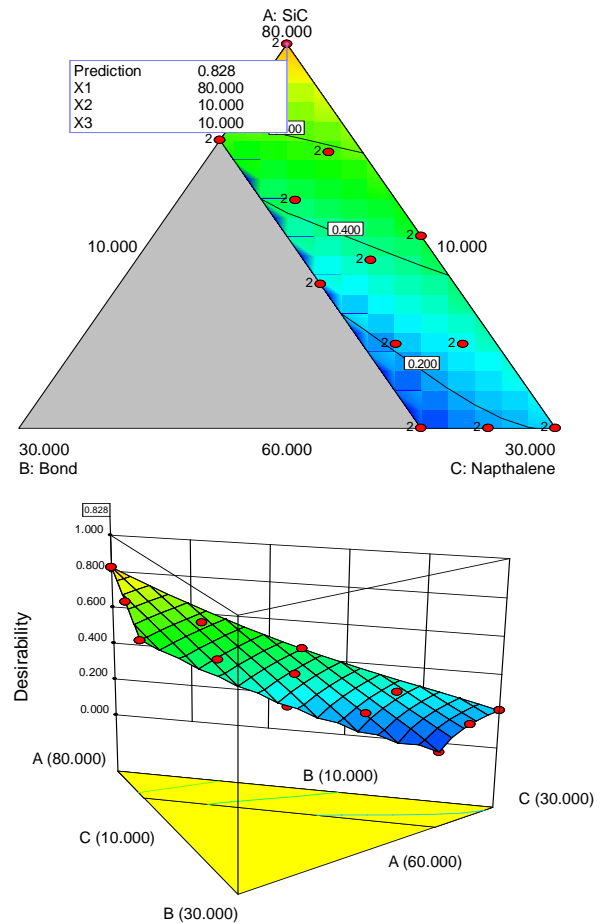
จากผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ในตารางที่ 5 และ ตารางที่ 6 ทำให้สามารถสร้างสมการถดถอยได้ โดยพิจารณาว่าค่า P-Value ที่ต่ำกว่า 0.05 มาสร้างสมการทำนายดังสมการที่ (6) และ (7)

$$\text{Compressive Strength} = 5.72453A + 1.69212B - 2.56029C \quad (6)$$

$$\text{Bending Strength} = 6.29462A - 11.95493B + 14.84271C - 0.25902AC \quad (7)$$

เมื่อทำการตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Sq (adj)) ของค่าความแข็งแรงเชิงอัด และความแข็งแรงเชิงคด เท่ากับ 40.31% และ 84.57% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการทดสอบเชิงกลที่เหมาะสมต่อชิ้นงาน ล้อจักรยานในพันธะวิทวีไฟด์ คือการทดสอบความแข็งแรงเชิงคดเบื้องต้น ซึ่งสามารถสร้างสมการทำนายที่มีความแม่นยำสูง ในขณะที่แบบจำลองความแข็งแรงเชิงอัดเบื้องต้นนี้มีความแปรปรวนจากความแตกต่างการทดลอง

ซึ่งในขั้นของการนำไปใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรม จะต้องทำการควบคุมสภาวะการทดลองให้คงที่



รูปที่ 4 กราฟ Desirability ของการหาส่วนผสมที่ดีที่สุด

จากรูปที่ 4 เป็นกราฟแสดงลักษณะการให้ผลตอบสูงสุด โดยให้ค่าความแข็งแรงเชิงอัดและความแข็งแรงเชิงคดมากที่สุด คือ 449.281 และ 325.324 kg/cm² ตามลำดับ และปัจจัยที่ดีที่สุด คือ ซิลิกอนคาร์ไบด์ 80% ตัวประสาน 10% และเนฟทาลีน 10%

6.2 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลอง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตล้อจักรยาน การทดลองเพื่อหาอิทธิพลของปัจจัย ได้ใช้โปรแกรม Design Expert 8.0 ในการกำหนดลำดับการทดลอง ผลดังตารางที่ 7 และวิเคราะห์เชิงสถิติโดยใช้แบบจำลองการถดถอยของพื้นที่ผิวผลตอบ เพื่อใช้ทำนายค่าความแข็งแรงเชิงอัด และความ

แข็งแรงเชิงคด ได้ค่าประมาณสัมประสิทธิ์ของปัจจัย และ
ทำนายค่าผลตอบ เพื่อหาค่าของปัจจัยที่ดีที่สุด

ตารางที่ 7 ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตล้อย
จักรยาน

ลำดับ	อุณหภูมิ เผา	เวลาเผา ชั่วโมง	ความแข็งแรง (kg/cm ²)	
			เชิงอัด	เชิงคด
1	900	2	422.6	401.6
2	1100	2	384.6	490.8
3	900	4	292.7	405.4
4	1100	4	456.0	481.4
5	859	3	248.5	389.8
6	1141	3	436.2	493.8
7	1000	1.6	454.8	479.6
8	1000	4.4	505.6	490.0
9	1000	3	374.8	543.4
10	1000	3	377.0	575.8
11	1000	3	369.9	564.4
12	1000	3	380.6	564.2
13	1000	3	357.2	573.8

จากนั้นนำค่าความแข็งแรงเชิงอัด และความแข็งแรง
เชิงคดที่ได้จากตารางที่ 7 ไปวิเคราะห์ความแปรปรวน ด้วย
โปรแกรม Design Expert 8.0 ผลการวิเคราะห์แสดงดัง
ตารางที่ 8 และตารางที่ 9

ตารางที่ 8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของ Reduced
Quadratic Model สำหรับค่าความแข็งแรงเชิงอัด

Source	SS	MS	F	P
Model	47811.17	11952.79	10.89	0.0025
A	19085.49	19085.49	17.38	0.0031
B	22.25	22.25	0.020	0.8903
B ²	18573.00	18573.00	16.91	0.0034
AB	10130.42	10130.42	9.23	0.0161
Residual Error	8784.44	1098.06		
Lack-of-Fit	8454.24	2113.56	25.60	0.0041
Pure Error	330.20	82.55		
Total	56595.61			

S = 33.14, R-Sq = 84.48% และ R-Sq(adj) = 76.72%

จากตารางที่ 8 กำหนดให้ค่านัยสำคัญทางสถิติ $\alpha =$
0.05 พบว่าค่า P-Value ของเทอมกำลังสอง เท่ากับ
0.0025 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า α แสดงว่ามีส่วนโค้งเกิดขึ้นที่
พื้นผิวผลตอบ และสัมประสิทธิ์การถดถอย A, B² และ
AB มีนัยสำคัญสำหรับทำนายค่าความแข็งแรงเชิงอัด แต่
เนื่องจาก B² และ AB มีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงไม่ตัด
สัมประสิทธิ์ B ออกจากสมการ

ตารางที่ 9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของ Reduced
Quadratic Model สำหรับค่าความแข็งแรงเชิงคด

Source	SS	MS	F	P
Model	13858.25	3464.56	69.34	0.0001
A	3283.24	3283.24	65.71	0.0001
B	2.82	2.82	0.056	0.8181
A ²	8130.38	8130.38	162.72	0.0001
B ²	3691.01	3691.01	73.87	0.0001
Residual Error	399.71	49.96		
Lack-of-Fit	222.08	55.52	1.25	0.4169
Pure Error	177.63	44.41		
Total	14257.97			

S = 7.07 R-Sq = 97.20% และ R-Sq(adj) = 95.79%

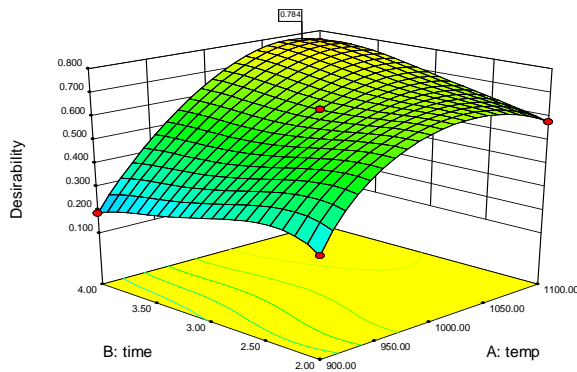
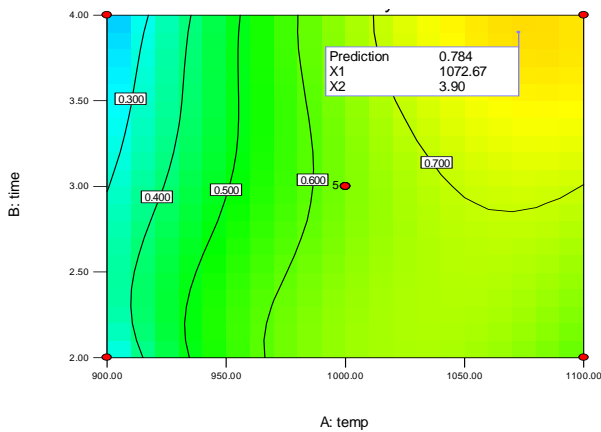
จากตารางที่ 9 พบว่าค่า P-Value ของเทอมกำลังสอง
น้อยกว่า 0.0001 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า α แสดงว่ามีส่วนโค้ง
เกิดขึ้นที่พื้นผิวผลตอบ และสัมประสิทธิ์การถดถอย A,
A² และ B² มีนัยสำคัญสำหรับทำนายค่าความแข็งแรงเชิง
คด แต่เนื่องจาก B² มีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงไม่ตัด
สัมประสิทธิ์ B ออกจากสมการ

จากผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ในตารางที่ 8 และ
ตารางที่ 9 ทำให้สามารถสร้างสมการถดถอยได้ โดย
พิจารณาค่า P-Value ที่ต่ำกว่า 0.05 มาสร้างสมการ
ทำนาย ดังสมการที่ (8) และ (9)

$$\text{Compressive Strength} = 1835.11948 - 1.02132A - 808.95833B + 51.22935B^2 + 0.50325AB \quad (8)$$

$$\text{Bending Strength} = -3537.50288 + 7.03996A + 138.80011B - 0.00341869A^2 - 23.03437B^2 \quad (9)$$

เมื่อทำการตรวจสอบสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Sq (adj)) ของค่าความแข็งแรงเชิงอัด และความแข็งแรงเชิงดึง เท่ากับ 76.72% และ 95.79% ตามลำดับ แสดงว่าแบบจำลองสามารถนำไปสร้างสมการทำนายได้อย่างถูกต้อง และเหมาะสม



รูปที่ 5 กราฟ Desirability ของการหาส่วนผสมที่ดีที่สุด

จากรูปที่ 5 เป็นกราฟแสดงลักษณะการให้ผลตอบสูงสุด โดยให้ค่าความแข็งแรงเชิงอัดและความแข็งแรงเชิงดึงมากที่สุด คือ 469.117 และ 271.415 kg/cm² ตามลำดับ

6.3 ผลการทดสอบยืนยัน จากผลการทดลองจะทำให้ได้ค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดจากสมการ แล้วนำค่าปัจจัยที่ได้ไปทำการทดลองผลิต 10 ครั้ง แสดงผลดังตารางที่ 10

จากตารางที่ 11 ผลการทดสอบทางสถิติ พบว่าค่าผลตอบทั้งหมดจากการทดลองความน่าเชื่อถือไม่มีความแตกต่างกับค่าผลตอบจากการทำนายอย่างมีนัยสำคัญ ณ

ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากค่า P-Value มากกว่า 0.05

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบยืนยัน

ลำดับ	อุณหภูมิ เผา	เวลาเผา ชั่วโมง	ความแข็งแรง (kg/cm ²)	
			เชิงอัด	เชิงดึง
1	1070	3.9	465	270
2	1070	3.9	470	265
3	1070	3.9	447	273
4	1070	3.9	453	277
5	1070	3.9	478	268
6	1070	3.9	486	274
7	1070	3.9	450	270
8	1070	3.9	463	266
9	1070	3.9	472	279
10	1070	3.9	477	265

ตารางที่ 11 ผลทดสอบ t-test ของการยืนยันผล

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	T	P
ความแข็งแรงเชิงอัด	10	466.1	38.6	12.2	-0.26	0.801
ความแข็งแรงเชิงดึง	10	270.7	7.9	2.5	-0.27	0.796

7. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการผลิตล้อยืดหยุ่นในซิลิกอนคาร์ไบด์พันธะอิทธิฤทธิ์ไฟด์ ออกแบบการทดลองโดยใช้ออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) และสรุปผลในการหาค่าที่เหมาะสมส่วนผสมที่เหมาะสมของล้อยืดหยุ่น คือ ปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ 80% ปริมาณตัวประสาน 10% และปริมาณเนพทาไลน์ 10% โดยระดับดังกล่าวจะมีผลต่อการทำนายค่าผลตอบแต่ละตัว โดยที่ค่าความแข็งแรงเชิงอัดและความแข็งแรงเชิงดึงเท่ากับ 449.281 และ 325.324 kg/cm² ตามลำดับ

หลังจากที่หาค่าส่วนผสมที่เหมาะสมได้แล้ว นำส่วนผสมนั้นมาทำการทดลองต่อ โดยผู้วิจัยได้ใช้เทคนิคออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตล้อยืดใยไนซิลิกอนคาร์ไบด์พันธะอิทธิพลไฟต์ และสรุปผลในการหาค่าที่เหมาะสม พบว่าสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตล้อยืดใยไน คือ อุณหภูมิการเผา 1072.65 องศาเซลเซียส และเวลาการเผาแชน้ 3.9 ชั่วโมง โดยระดับดังกล่าวจะมีผลต่อการทำนายค่าผลตอบแต่ละตัว โดยที่ค่าความแข็งแรงเชิงอัดและความแข็งแรงเชิงตัดเท่ากับ 469.117 และ 271.415 kg/cm²

เมื่อทำการทดสอบยืนยันผล พบว่า การผลิตชิ้นงานทดสอบในสูตรและสภาวะที่เหมาะสมตามการทดลองให้ค่าผลตอบทั้งทางด้านค่าความแข็งแรงเชิงอัด และค่าความ

แข็งแรงเชิงตัด ไม่แตกต่างจากสมการทำนายค่าอย่างมีนัยสำคัญ ณ ระดับความเชื่อมั่น 95%

8. ข้อเสนอแนะ

8.1 ผงฟريت (โบโรซิลิเกตฟريت) มีหลายแบบ หากทำการเปลี่ยนชนิดของฟريت อาจได้ล้อยืดใยไนใหม่ที่มีความแข็งแรงดีขึ้นได้

8.2 การขึ้นรูปชิ้นงานจะต้องใช้น้ำมันพืชทาแม่แบบ และจะต้องขัดแม่แบบทุกครั้งด้วยกระดาษทราย

8.3 ผงแนฟทาลีนหรือผงลูกเหม็น สามารถทดแทนได้ด้วยตัวสร้างรูพรุนอื่นๆ เช่น ผงขี้เถ้า

เอกสารอ้างอิง

- [1] Mabery, Charles F. (Oct 28, 2007). Notes, On Carborundum, Journal of the American Chemical Society, Vol. 22(2), pp. 706–707. available online at <http://books.google.com/?id=fBIDAAAAYAAJ&pg=PA706>.
- [2] Available online at <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=4277>
- [3] Byrappa, K. and Ohachi, T. (2003). Crystal growth technology. Springer, New York.
- [4] Raygan, Sh., Kondori, B. and Yangijeh, H.M. (2011). Effect of mechanical activation on the production of SiC from silica sand. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, vol. 29(1), January 2011, pp. 10-13.
- [5] Sheldon, D.A. (1998). Silicon carbide abrasive wheel. United States Patent, Patent Number: 5,711,774.
- [6] Adams. M. (2002). Silicon Carbide, SiC Material Properties. available online at <http://accuratus.com/silicar.html>
- [7] ปารเมศ ชูติมา. (2545). การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. ศูนย์หนังสือแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- [8] Montgomery D.C., 2009. Design and Analysis of Experiments, 7th ed., John Wiley & Sons, New York.
- [9] อิศรพงษ์ พงษ์ศิริกุล. (2544). การวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับอุตสาหกรรมเกษตร. ภาควิชาเทคโนโลยีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. หน้า 107–111.
- [10] กันยาพร ไชยวงศ์. (2544). ผลของตัวเติมต่อสมบัติผลงเผาผนึกของซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแห้ง. รายงานปัญหาพิเศษ. ปรญญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [11] Lin K.H., Lin S.T. and Peng S.F. (2007). Sintering parameters and wear performances of vitrified bond diamond grinding wheels, International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, vol. 25, pp.25-31.
- [12] Jackson M.J. (2007). Sintering and vitrification heat treatment of cBN grinding wheels, Journal of Materials Processing Technology, vol. 191, pp.232-234.

- [13] ชวิชัย ขงเนตร. (2553). การประยุกต์วิธีออกแบบเชิงวิศวกรรมเพื่อการปรับปรุงคุณภาพ: กรณีศึกษาโรงงานผลิตเหล็กแท่ง, การประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษาศิลปากรระดับชาติ, ครั้งที่ 1, หน้า 1544 – 1550.
- [14] รังสฤษฎ์ สุทธิคุณ และชาญณรงค์ สายแก้ว. (2552). การประยุกต์การออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, ครั้งที่ 7, 21–22 พฤษภาคม, หน้า 428 – 433.
- [15] เสาวลักษณ์ วิเศษศรี และ วรนุช ศรีเจษฎารักษ์. (2550). กระบวนการผลิตคาราเมลเพื่อให้ได้คาราเมลชนิดที่ 4 ที่มีคุณสมบัติเหมาะสม, วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, ปีที่ 38, ฉบับที่ 6 พฤศจิกายน – ธันวาคม, หน้า 95 – 98.
- [16] พัชรียา รัชฎา. (2550). อิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อลักษณะเฉพาะของเยื่อจากทางใบปาล์มน้ำมัน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.