การกำหนดปัจจัยที่มีผลกระทบต่อขนาดกระเบื้องผนังพอร์ซเลนชนิดดูดซึมน้ำต่ำโดยวิธีการทดลองแบบแฟคตอเรียลเต็มรูปแบบ: กรณีศึกษาโรงงานผลิตกระเบื้องพอร์ซเลน

ANALYSIS OF THE FACTORS AFFECTING THE DIMENSION OF LOW WATER ABSORPTION OF WALL TILE PORCELAIN USING THE FULL FACTORIAL EXPERIMENTAL METHOD: A CASE STUDY OF PORCELAIN TILES FACTORY

เลิศชาย นาหมื่น[1], พัชราภรณ์ ญาณภิรัต[2] และ ศันสนีย์ สุภาภา[2]
[1]สาขาวิชาการจัดการวิศวกรรม ภาคพิเศษ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
50 ถนนงามวงศ์วาน เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
[2]ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
50 ถนนงามวงศ์วาน เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

Lertchai Nameun[1] Patcharaporn Yanpirat[2] and Sansanee Supapa[2]
[1]The Special Graduate Program in Engineering Management, Faculty of Engineering
Kasetsart University 50 Ngam Wong Wan Road, Chatuchak, Bangkok 10900
[2]Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University
50 Ngam Wong Wan Road, Chatuchak, Bangkok 10900

บทคัดย่อ

การวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อขนาดของกระเบื้องผนังพอร์ซเลนชนิดดูดซึมน้ำต่ำแบบไม่ขัดขอบ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่และกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการผลิต โดยการประยุกต์การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปและการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณ ผลจากการทดลองพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อขนาดกระเบื้องคือ ค่าแรงอัดขึ้นรูปแผ่นกระเบื้องและค่าการหดตัวผงดิน ทั้งนี้ค่าแรงอัดขึ้นรูปแผ่นกระเบื้องควรมีค่าเท่ากับ 362 กิโลกรัมต่อตารางเซ็นติเมตร และค่าการหดตัวผงดินเท่ากับร้อยละ 7.56 ซึ่งจะส่งผลให้การผลิตกระเบื้องมีขนาดตามที่กำหนด รวมถึงคุณสมบัติทางกลด้านการดูดซึมน้ำและค่าโมดูลัสแตกร้าว เป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานการผลิต นอกจากนี้ผลลัพธ์ของการวิจัยสามารถใช้เป็น

ข้อกำหนดของขั้นตอนมาตรฐานในการผลิตสำหรับผลิตภัณฑ์ใหม่และการปรับปรุงผลิตภาพการผลิตโดยการลดการสูญเสียเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักรสำหรับการขึ้นรูปกระเบื้องก่อนการผลิต
คำสำคัญ: กระเบื้องพอร์ซเลน, การปรับปรุงกระบวนการผลิต, การออกแบบการทดลอง, ขนาดกระเบื้อง

ABSTRACT

The objective of this paper is to analyze the factors that affect the dimension of low water absorption of new product; wall tile porcelain without edge trimming. Design of experiment with full factorial analysis is employed including multiple regression analysis for model fitting. The experimental results reveal that pressing pressure and powder shrinkage affect the dimension of such tile porcelain while other quality requirements of water absorption and modulus of rupture are compliant with the standards. The appropriate value setting for both factors are recommended at 362 kg/cm^2 and 7.56 percent, respectively. In addition, the research's results can be applied in determining standard manufacturing procedures of other new products and improving productivity of pressing machine in terms of set up time reduction.
KEYWORDS: design of experiment, process improvement, tile dimension, wall tile porcelain

1. บทนำ

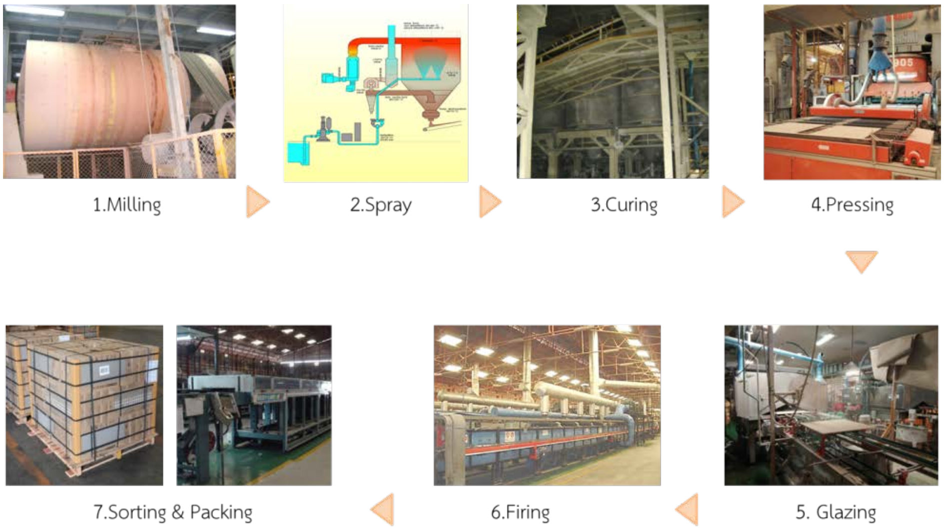
ผลิตภัณฑ์มวลรวมภายในประเทศ (Gross Domestic Product, GDP) เป็นดัชนีประเภทหนึ่งที่แสดงศักยภาพด้านการผลิตของประเทศ อุตสาหกรรมก่อสร้าง ระหว่างปี 2557-2559 มีสัดส่วนเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 3 ของผลิตภัณฑ์มวลรวมนอกภาคการเกษตร ปี 2557 2558 และ 2559 มีมูลค่า 337,237 ล้านบาท 380,133 ล้านบาท และ 401,851 ล้านบาท และคิดเป็นร้อยละ 2.55 2.84 และ 2.83 ของผลิตภัณฑ์มวลรวมภายในประเทศ ตามลำดับ [1] ซึ่งสะท้อนการขยายตัวของภาคธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ในประเทศไทยส่งผลโดยตรงต่อการขยายตัวของอุตสาหกรรมการผลิตที่เกี่ยวข้องกับวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการก่อสร้างและการตกแต่งภายในและภายนอก ส่งผลให้อุตสาหกรรมกระเบื้องพอร์ซเลนมีบทบาทที่สำคัญในการรองรับการเติบโตของธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ เนื่องจากกระเบื้องพอร์ซเลนเป็นวัสดุตกแต่งที่มีความพรุนต่ำ ส่งผลดีต่อคุณสมบัติทางกลและทางเคมีของกระเบื้อง กล่าวคือ มีความคงทนสูง อายุการใช้งานนาน ทำความสะอาดง่าย และเหมาะกับการใช้งานสำหรับพื้นที่เน้นความสำคัญด้านสุขอนามัย [2] ดังนั้นการออกแบบ

กระเบื้องพอร์ซเลนที่เน้นการตกแต่งด้านสถาปัตยกรรมที่มีเอกลักษณ์เฉพาะจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่สามารถสร้างความได้เปรียบในการแข่งขันของผู้ผลิตในอุตสาหกรรมนี้

กรณีศึกษาผลิตสินค้าในสายผลิตภัณฑ์กระเบื้องเซรามิกชนิดพอร์ซเลน ประเภทกระเบื้องปูพื้น กระเบื้องปูผนัง และกระเบื้องตกแต่ง ประกอบด้วยโรงงานผลิต 10 โรงงาน มีกำลังการผลิตรวมทั้งสิ้น 40 ล้านตารางเมตรต่อปี จากกลยุทธ์ด้านการตลาดในการรุกตลาดระดับบนของวงการกระเบื้องเซรามิกในประเทศไทย กรณีศึกษาผลิตกระเบื้องพอร์ซเลน สินค้าใหม่เป็นกระเบื้องพอร์ซเลนชนิดดูดซึมน้ำต่ำ (ไม่เกิน 0.5%) เพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าที่ชื่นชอบงานดีไซน์ที่เรียบง่ายแต่สง่างามแบบอิตาเลี่ยน โดยชูจุดเด่นนำเสนอคุณสมบัติของกระเบื้องชนิดนี้ใน 3 ประการ คือ 1) กระเบื้องมีการออกแบบที่แปลกใหม่จากสินค้าปัจจุบันทุกรุ่น มีความทันสมัยโดยรูปร่างคล้ายกรอบรูปติดผนังซึ่งน้อยนักที่จะเห็นกระเบื้องรูปแบบนี้ 2) กระเบื้องที่ผลิตไม่มีการขัดขอบในกระบวนการผลิตเพื่อต้องการให้ความกว้างของสันกรอบเท่ากันทุกด้าน โดยทั่วไปกระเบื้องที่ผลิตจากกรณีศึกษาจะขึ้นรูปมาโดยเผื่อให้ได้ขนาดใหญ่กว่าขนาดสุดท้ายที่ต้องการ 6-8 มิลลิเมตร หลังจากนั้นจะนำมาขัดขอบให้ได้ขนาดสุดท้ายตามมาตรฐานที่ต้องการ โดยกระเบื้องขัดขอบมีข้อดีคือ ลักษณะของขอบที่มีผิวเรียบทั้ง 4 ด้าน สามารถนำไปปูได้ชิดกว่ากระเบื้องไม่ขัดขอบโดยเว้นร่องยาแนวเพียง 2 มิลลิเมตร แต่มีข้อเสียคือ มีต้นทุนในการผลิตที่สูงขึ้นจากกระบวนการขัดขอบ ขณะที่กระเบื้องไม่ขัดขอบข้อดีคือ มีต้นทุนที่ต่ำกว่า แต่มีข้อเสียคือ ต้องปูให้เว้นร่องยาแนวระหว่างแผ่น 3 มิลลิเมตรขึ้นไป เพื่อเป็นการชดเชยระยะเนื่องจากขนาดของกระเบื้องแต่ละแผ่นไม่เท่ากัน และ 3) กระเบื้องสินค้าใหม่ มีขนาดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า จำหน่ายกระเบื้องในขนาดกลางขนาดเดียวเท่านั้น โดยควบคุมขนาดด้านกว้าง 12 นิ้ว อยู่ที่ 298 ± 0.7 มิลลิเมตร และขนาดด้านยาว 24 นิ้ว อยู่ที่ 599 ± 1.0 มิลลิเมตร รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งจะแตกต่างจากกระเบื้องในท้องตลาดทั่วไปที่จะขายหลายขนาดทั้งขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่

รูปที่ 1 กระเบื้องพอร์ซเลนชนิดดูดซึมน้ำต่ำแบบไม่ขัดขอบ

กระบวนการผลิตกระเบื้องพอร์ซเลนชนิดดูดซึมน้ำต่ำแบบไม่ขัดขอบ ดังแสดงในรูปที่ 2 มีขั้นตอนหลัก 7 ขั้นตอน รายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2 กระบวนการผลิตกระเบื้องพอร์ซเลนชนิดดูดซึมน้ำต่ำแบบไม่ขัดขอบ

1. การบดวัตถุดิบ (Milling) เป็นส่วนของการเตรียมส่วนผสม ได้แก่ ดินเกาลิน (Kaolin clay) แร่ธาตุธรรมชาติ (Mineral) โซเดียมเฟลสปาร์ (Sodium feldspar) และเฟลสปาร์ (feldspar) โหลดลงโม่บด (Ball mill) เติมน้ำและสารเคมีที่ช่วยในการไหลตัวและทำการบดใช้เวลานาน 11 ชั่วโมง จนได้ความละเอียดตามที่ต้องการส่วนผสมที่ได้นี้เรียกว่า น้ำดิน (Slurry)

2. การสเปรย์ (Spraying) เป็นการนำเอาน้ำดินไปทำให้เป็นผงดิน โดยใช้การพ่นน้ำดินในอุณหภูมิที่สูงในเครื่องสเปรย์ดายเออร์ (Spray dryer) น้ำดินจะถูกฉีดขึ้นไปด้วยความดันสูงผ่านหัวฉีดที่ควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอย่างเหมาะสม จะได้ผงดินที่มีรูปร่างคล้ายโดนัท ผงดินที่ได้จะถูกสุ่มตัวอย่างโดยการนำไปขึ้นรูปเป็นกระเบื้องขนาด 12 x 12 นิ้ว ที่ห้องปฏิบัติการ เพื่อตรวจสอบค่าการหดตัว ควบคุมที่ร้อยละ 7.25-7.55 ผงที่ได้นี้เรียกว่า ผงดิน ซึ่งค่าความชื้นผงดินเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความหนาแน่นของกระเบื้องดิบหลังจากขึ้นรูป ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อขนาดกระเบื้องหลังเผา กล่าวคือ หากความชื้นของผงดินสูงจะทำให้กระเบื้องมีความหนาแน่นสูงแต่จะมีความเสี่ยงในเรื่องที่ผงดินจะติดแม่พิมพ์ ในทางตรงกันข้ามหากความชื้นของผงดินต่ำจะทำให้ความหนาแน่นของกระเบื้องน้อย หากความชื้นผงดินน้อยกว่า 5% จะมีความเสี่ยงที่ทำให้เกิดปัญหาเนื้อกระเบื้องแยกชั้น ดังนั้นค่าการควบคุมค่าความชื้นโดยทั่วไปประมาณ 5-7% นอกจากนี้พบว่าค่าการหดตัวผงดินส่งผลต่อขนาดของกระเบื้องโดยมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อขนาดของกระเบื้องหลัง

เผา คือเมื่อค่าการหดตัวผงดินสูงจะทำให้กระเบื้องหลังเผาหดตัวมากขนาดกระเบื้องจะเล็ก ในทางตรงกันข้ามหากค่าการหดตัวผงดินต่ำจะทำให้กระเบื้องหลังเผาหดตัวน้อยขนาดกระเบื้องจะใหญ่ [3-5]

3. การบ่มผงดิน (Curing) ผงดินที่ผ่านการสเปรย์จะถูกนำไปเก็บในไซโลที่อุณหภูมิปกติ ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้ผงดินเย็นตัว

4. การปั๊มขึ้นรูปโดยวิธีการอัด (Pressing) ผงดินจะถูกส่งมาทางสายพานลำเลียงลงถังพัก (Hopper) เพื่อใช้ส่งเข้าเครื่องปั๊มขึ้นรูปอย่างต่อเนื่อง ก่อนการผลิตพนักงานขึ้นรูปจะสุ่มผงดินมาวัดค่าความชื้นก่อนทุกครั้งด้วยเครื่องวิเคราะห์ค่าความชื้นรุ่น HB43-S จากนั้นจะทดลองขึ้นรูปที่แรงอัดซึ่งปัจจุบันมีช่วงใช้งานระหว่าง 330-380 kg/cm^2 ค่าแรงอัดที่ได้กล่าวมานี้เป็นค่าแรงอัดขั้นตอนที่ 3 ของการขึ้นรูปกระเบื้อง กระเบื้องที่ได้นี้เรียกว่า กระเบื้องดิบ (Green tiles) ซึ่งแรงอัดการปั๊มขึ้นรูป (Specific Pressure) เป็นปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อขนาดของกระเบื้อง เมื่อขึ้นรูปด้วยแรงอัดที่สูงจะทำให้เนื้อกระเบื้องมีความหนาแน่นสูง ส่งผลให้เมื่อเผากระเบื้องจะส่งผลทำให้กระเบื้องหดตัวได้น้อยขนาดกระเบื้องหลังเผาจึงมีขนาดใหญ่ ในทางตรงกันข้ามหากขึ้นรูปด้วยแรงอัดที่ต่ำ จะทำให้เนื้อกระเบื้องมีความหนาแน่นต่ำลง ส่งผลให้เมื่อเผากระเบื้องแล้วกระเบื้องหดตัวได้มากขนาดกระเบื้องหลังเผาจึงมีขนาดเล็ก [3, 4]

5. การเคลือบสี (Glazing) เป็นการเคลือบและตกแต่งลวดลายบนหน้ากระเบื้อง การตกแต่งกระเบื้องจะใช้สีชนิดพิเศษที่เรียกว่า Soluble salt ซึ่งเป็นสารละลายของพวกโลหะทรานสิชั่นต่าง ๆ สารละลายเหล่านี้เมื่อถูกสกรีนลงบนหน้ากระเบื้องจะซึมลงไปตามรูพรุนของเนื้อกระเบื้องดิบ (Green tile) โดยก่อนเคลือบจะควบคุมอุณหภูมิหน้ากระเบื้องอยู่ระหว่าง 40-60 องศาเซลเซียส เพื่อให้การเคลือบสีนั้นสมบูรณ์ทั่วทั้งหน้ากระเบื้อง ทั้งนี้ยังเป็นการควบคุมเฉดสีและความมันบนหน้ากระเบื้องให้เหมาะสม กระเบื้องหลังเคลือบสีจะเรียกว่า กระเบื้องเคลือบ (Glaze tiles)

6. การเผา (Firing) เป็นการเผาเร็วแบบครั้งเดียว (Single fast firing) โดยใช้เตาเผาแบบโรลเลอร์ (Roller Kiln) กระเบื้องจะถูกป้อนเข้าทางด้านหน้าของเตา จากนั้นจะถูกลำเลียงด้วยโรลเลอร์ภายในเตาจนออกทางด้านท้ายเตา การเผากระเบื้องสินค้าใหม่จะใช้อุณหภูมิในการเผาที่ 1,200 องศาเซลเซียส เวลาในการเผา 80 นาที กระเบื้องที่ได้เรียกว่า กระเบื้องหลังเผา (Fired tiles) จากผลงานของ Sa´nchez E, Garcı´a-Ten J, Sanz V and Moreno A [2] และ Abadir MF, Sallam EH and Bakr M [4] ได้ทำการวิจัยและพบว่าอุณหภูมิอบก่อนเผาไม่ส่งผลต่อขนาดของกระเบื้องหลังเผา แต่จะส่งผลต่อค่าความแข็งและคุณสมบัติทางกลอื่น ๆ ให้เกิดการแตกร้าวของกระเบื้องหลังเผา กล่าวคือ เมื่ออบกระเบื้องในอุณหภูมิที่ต่ำแล้วไล่ความชื้นในเนื้อกระเบื้องไม่เหมาะสม ความชื้นตกค้างคงเหลือในเนื้อกระเบื้องมาก (เกิน 1%) จะส่งผลให้กระเบื้องหลังเผาแตกร้าวได้ นอกจากนี้อุณหภูมิในการเผา เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดของกระเบื้องหลังเผา โดยเมื่อ

เผาที่อุณหภูมิสูงกระเบื้องได้รับความร้อนสูงจะทำให้เนื้อกระเบื้องหดตัวมาก ส่งผลให้ขนาดกระเบื้องเล็กลง ในทางตรงกันข้ามหากเผาที่อุณหภูมิต่ำกระเบื้องได้รับความร้อนต่ำจะทำให้เนื้อกระเบื้องหดตัวน้อย ส่งผลให้ขนาดกระเบื้องใหญ่กว่าที่กำหนดได้

7. การคัดเลือกและบรรจุภัณฑ์ (Sorting and packing) หลังจากเก็บกระเบื้องหลังเผาไว้ 6-8 ชั่วโมง จะนำกระเบื้องมาคัดเลือกโดยอ้างอิงคุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องเซรามิก มอก. 2508-2555 [6] กระเบื้องจะถูกบรรจุลงกล่อง โดย 1 กล่องประกอบด้วยกระเบื้องขนาด 12 x 24 นิ้ว จำนวน 8 แผ่น จากนั้นจะถูกลำเลียงไปเก็บไว้ในคลังสินค้า เพื่อการจำหน่ายต่อไป

การผลิตผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่ ปัจจัยที่สำคัญสำหรับผู้ผลิตคือ การกำหนดตัวแปรต่างๆ ที่สำคัญให้เหมาะสมกับสภาพหรือเงื่อนไขต่างๆ สำหรับกระบวนการผลิตของผู้ผลิตแต่ละราย เพื่อกำหนดเป็นขั้นตอนมาตรฐานในการผลิต การผลิตกระเบื้องพอร์ซเลนชนิดดูดซึมน้ำต่ำสำหรับโรงงานกรณีศึกษา ใช้การประมาณการปรับตั้งค่าแรงอัดขึ้นรูประหว่าง 350-360 กิโลกรัมต่อตารางเซ็นติเมตร โดยคุณสมบัติของผงดินมีค่าการหดตัวร้อยละ 7.44 และค่าความชื้นร้อยละ 5.92 ผ่านกระบวนการขึ้นรูปและการเผาเช่นเดียวกับกระเบื้องพอร์ซเลนชนิดอื่นๆ โดยกำหนดอุณหภูมิเผาไว้ที่ 1,200 °C เวลาเผา 80 นาที ซึ่งใช้เป็นอุณหภูมิมาตรฐานสำหรับการเผากระเบื้องพอร์ซเลนทุกชนิดเพื่อง่ายต่อการผลิตโดยรวมและเผาแบบต่อเนื่องกัน จากการตั้งค่าแรงอัดขึ้นรูปกระเบื้องพอร์ซเลนชนิดดูดซึมน้ำต่ำซึ่งเป็นสินค้าชนิดใหม่ การผลิตในปัจจุบันจะทำการทดลองแบบลองผิดลองถูกระหว่างค่าแรงอัดดังกล่าวข้างต้น จนกระทั่งได้ขนาดของกระเบื้องเป็นไปตามขนาดที่กำหนดจึงจะดำเนินการเริ่มผลิตจริง ส่งผลให้การผลิตสูญเสียเวลาในการหาค่าแรงอัดขึ้นรูปโดยเฉลี่ย 6 ชั่วโมงต่อรุ่นการผลิต

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

การวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดปัจจัยที่คาดว่าส่งผลกระทบต่อขนาดของกระเบื้องพอร์ซเลนชนิดดูดซึมน้ำต่ำแบบไม่มีการขัดขอบสำหรับกำหนดเป็นค่ามาตรฐานการผลิต โดยสินค้าที่ผลิตต้องมีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องเซรามิก มอก. 2508-2555 [6]

3. วิธีดำเนินการวิจัย

จากการวิเคราะห์กระบวนการผลิตของกรณีศึกษา โดยทีมผู้เชี่ยวชาญทำการประยุกต์แผนภูมิก้างปลา พบว่าปัจจัยที่อาจส่งผลกระทบต่อขนาดของกระเบื้องชนิดใหม่ คาดว่าน่าจะมาจากปัจจัย 1) ค่าความชื้นผงดิน ซึ่งอาจเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนาแน่นของกระเบื้องดิบหลังจากขึ้นรูป

2) ค่าการหดตัวผงดิน (Shrinkage) ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อขนาดของกระเบื้องหลังเผา สำหรับอุณหภูมิการเผากระเบื้องกำหนดให้เป็นปัจจัยคงที่ เนื่องจากเตาเผาที่ใช้ในการเผากระเบื้องหลากหลายผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการปรับอุณหภูมิเผาจะส่งผลให้เกิดของเสียในช่วงรอยต่อของการปรับอุณหภูมิ สำหรับปัจจัยด้านเครื่องจักร พบว่าเครื่องจักรอยู่ในสภาพที่สมบูรณ์ระบบไฮดรอลิกสามารถทำแรงอัดได้ตามค่าที่ตั้งไว้ ซึ่งปัจจุบันเครื่องจักรนี้ยังใช้งานได้ตามปกติ และตรวจสอบขนาดของแม่พิมพ์ได้ถูกออกแบบมาโดยเผื่อค่าการหดตัวผงดินไว้ที่ค่ามาตรฐานตรงกลางที่ร้อยละ 7.5 และ 3) แรงอัดการปั๊มขึ้นรูป (Specific Pressure) ซึ่งคาดว่าจะสามารถใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงผลิตภาพในการผลิตกระเบื้องผลิตภัณฑ์ใหม่ เพื่อให้ได้ขนาดกระเบื้องตามมาตรฐานและสามารถลดเวลาสูญเสียจากความผิดพลาดในการผลิต

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

วัตถุดิบหรือส่วนผสมหลักสำหรับการทดลองประกอบด้วย 1) ดินเหนียว 2) ดินปราจีน 3) พอตเตอรี่สโตน 4) เฟลสปาร์ 5) ดินแม่ทาน 6) ดินแกรนิติก 7) เบนโทไนท์ 8) โซเดียมซิลิเกตเฟลสปาร์ 9) แร่พิโรฟิไลท์ 10) แครี่บอน และ 11) ผงดินรีไซเคิลจากกระบวนการผลิต (อัตราส่วนผสมไม่สามารถเปิดเผยรายละเอียดจากเหตุผลด้านความลับ เนื่องจากวัตถุดิบและอัตราส่วนผสมต่างๆ เป็นปัจจัยสำคัญด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในการสร้างความได้เปรียบในการแข่งขัน)

อุปกรณ์การทดลองประกอบด้วย 1) เครื่องวัดความชื้น มีช่วงวัดอุณหภูมิ 50-200^{o}C และค่าความละเอียด 0.01% 2) เครื่องปั๊มขึ้นรูปกระเบื้อง มีค่ากำลังอัดสูงสุด 2,000 ตัน 3) ตู้อบกระเบื้องมีค่าพลังงานความร้อนไม่น้อยกว่า 500,000 Kcal/hr 4) เตาเผากระเบื้องแบบโรลเลอร์ มีช่วงอุณหภูมิใช้งานสูงสุด 1,160-1,240 ^{o}C 5) เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ ระยะการวัด 0-1,000 mm. ค่าความละเอียด 0.1 6) เครื่องตรวจสอบการต้านแรงกดแตกของกระเบื้อง กำลังมอเตอร์ไม่น้อยกว่า 0.18 kW มีช่วงการหักระหว่าง 40-300 mm. 7) หม้อต้มตรวจสอบค่าการดูดซึมน้ำของกระเบื้อง มีค่าอุณหภูมิสูงสุด 100 ^{o}C 8) โปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลและประมวลผลทางสถิติ Minitab version 16

การวัดผลการทดลอง ประกอบด้วยมิติของแผ่นกระเบื้อง คุณสมบัติด้านการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) และโมดูลัสแตกร้าว มีรายละเอียดดังนี้

1) มิติของแผ่นกระเบื้อง คือ ด้านกว้างและด้านยาวของแผ่นกระเบื้องของกระเบื้องแต่ละแผ่น ด้านกว้าง 12 นิ้ว ความเบี่ยงเบนของค่าเฉลี่ยเท่ากับ 298 ± 0.7 มิลลิเมตร (297.3-298.7 mm.) และขนาดด้านยาว 24 นิ้ว ความเบี่ยงเบนของค่าเฉลี่ยเท่ากับ 599 ± 1.0 มิลลิเมตร (598-600 mm.) ซึ่งการวัดความยาวของกระเบื้องทั้ง 4 ด้านนั้นอาจมีการเยื้องของแผ่นกระเบื้องได้ ดังนั้นในการทดลองจึงกำหนดความเบี่ยงเบนของค่าเฉลี่ยของความยาวของเส้นทแยงมุมของแผ่น

กระเบื้องเป็นตัวแปรตอบสนอง โดยความเบี่ยงเบนของค่าเฉลี่ยของความยาวของด้านทแยงมุมที่ต้องการ คือ 669 ± 1.2 mm.

2) การดูดซึมน้ำ (Water absorption) คือ ค่าเปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของมวลกระเบื้องก่อนแช่น้ำเทียบกับมวลของกระเบื้องหลังแช่น้ำ ในการทดลองใช้วิธีการต้มในน้ำ (Boiling) มีรายละเอียดขั้นตอนการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 10545-11: Ceramic Tiles 2008 [7]

3) โมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of Rupture: MOR) หาได้จากการนำกระเบื้องไปทดสอบด้วยเครื่องกดแบบอิเล็คทรอนิกส์ด้วยความเร็ว 1.0 มิลลิเมตร/นาที มีรายละเอียดขั้นตอนการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 10545-11: Ceramic Tiles 2008 [7]

3.2 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดค่าที่เหมาะสมในการใช้งานของปัจจัยที่มีผลต่อขนาดกระเบื้องหลังขึ้นรูป ประยุกต์วิธีการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Experiment) กำหนดช่วงของระดับปัจจัยจากข้อมูลการผลิตปัจจุบันของกระเบื้องพอร์ซเลนของกรณีศึกษา โดยค่าแรงอัดขึ้นรูปปัจจุบันใช้งานที่ 330-380 kg/cm^2 ค่าความชื้นผงดินควบคุมที่ 5-7% โดยน้ำหนัก และค่าการหดตัวผงดินควบคุมที่ 7.25-7.75 % ของการเปลี่ยนแปลงของขนาดกระเบื้องก่อนเผาเทียบกับขนาดกระเบื้องหลังเผา สำหรับอุณหภูมิการเผาในการวิจัยนี้ไม่นำมาพิจารณา เนื่องจากเตาเผากระเบื้องเป็นแบบโรลเลอร์ และมีการใช้ร่วมกันสำหรับหลายผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิการเผาเพื่อทำการทดลองจึงมีต้นทุนการทดลองที่สูงมาก การทดลองจึงกำหนดให้อุณหภูมิการเผาอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในระดับใช้งานสูงสุด 1,160-1,240 $^{\circ}$C สำหรับปัจจัยที่คาดว่าอาจมีผลต่อขนาดกระเบื้องหลังขึ้นรูปสำหรับการทดลองดังกล่าวข้างต้นกำหนดระดับการทดลองเป็น 3 ระดับ (Min point, Center point, Max point) โดยแต่ละระดับของปัจจัยทำซ้ำ 2 ครั้ง มีจำนวนการทดลองทั้งหมด 54 การทดลอง ทั้งนี้ผลการทดลองของกระเบื้องดังกล่าวต้องมีคุณสมบัติด้านการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ไม่เกิน 0.50% ของการเปลี่ยนแปลงของมวลกระเบื้องก่อนแช่น้ำเทียบกับมวลของกระเบื้องหลังแช่น้ำ และโมดูลัสแตกร้าว (Modulus of Rupture) ไม่น้อยกว่า 35 N/mm^2 เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องเซรามิก มอก. 2508-2555 โดยที่ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	หน่วย	สัญลักษณ์	ระดับของปัจจัย		
			ต่ำ	กลาง	สูง
แรงอัดการปั๊มขึ้นรูป	Kg/cm^2	SP	330	355	380
ค่าความชื้นของผงดิน	%	M	5	6	7
ค่าการหดตัวของผงดิน	%	SHK	7.25	7.50	7.75

การทดลองดำเนินการในสายการผลิตจริง มีขั้นตอนการทดลองดังขั้นตอนที่ 1-7 ของกระบวนการผลิตดังกล่าวมาแล้วข้างต้น มีปัจจัยควบคุมคือ วัตถุดิบหลักและส่วนผสมต่างๆ ตลอดจนเครื่องจักร และขั้นตอน/วิธีปฏิบัติในกระบวนการผลิต อย่างไรก็ตามพบว่า การควบคุมค่าปัจจัยสำหรับวัตถุดิบซึ่งประกอบด้วยค่าความชื้นและค่าการหดตัวของผงดิน ซึ่งมีรายละเอียดและขั้นตอนการเตรียมผงดินที่ 1-3 ให้เป็นไปตามค่าระดับของปัจจัยตามแผนการทดลองเป็นไปได้ยาก ซึ่งในการผลิตจริงและโดยทั่วไปของการผลิตค่าทั้งสองจะมีการควบคุมแบบเป็นช่วง ดังนั้นค่าที่ใช้ในการทดลองจึงเลือกค่าของปัจจัยดังกล่าวให้ใกล้เคียงกับค่าที่ใช้ในแผนการทดลองให้มากที่สุด จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อขนาดของกระเบื้องด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณ และขั้นตอนสุดท้ายคือ การยืนยันผลการทดลองเพื่อแสดงความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของผลการทดลอง โดยนำฟังก์ชันความสัมพันธ์ที่ได้ไปดำเนินการผลิตจริง และวิเคราะห์ผลโดยพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของความยาวของเส้นทะแยงมุมเฉลี่ยร่วมกับแผนภาพการควบคุม

4. ผลการวิจัย

ผลการทดลองมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2

4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล

การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยโปรแกรม Minitab 2016 รายละเอียดดังปรากฏในรูปที่ 3

ตารางที่ 2 ผลการทดลองเพื่อกำหนดปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อขนาดของกระเบื้องพอร์ซเลนชนิดดูดซึมน้ำต่ำแบบไม่มีการขัดขอบ

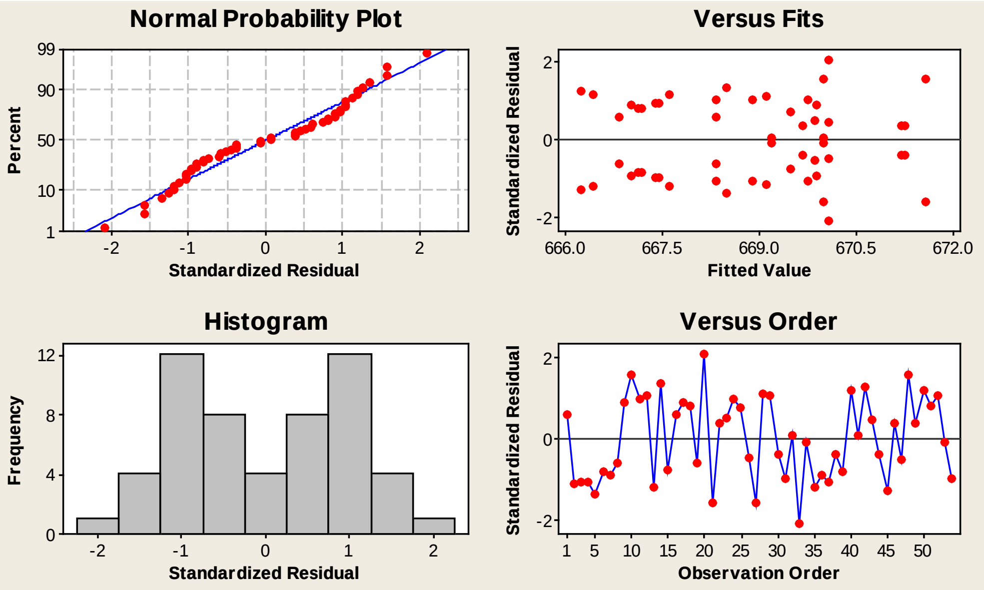
StdOrder	RunOrder	ปัจจัย แรงอัดขึ้นรูป (kg/cm2)	ปัจจัย ค่าความชื้น (%)	ผลการทดลอง ค่าการหดตัว (%)	ผลการทดลอง ค่าเฉลี่ยขนาดด้านทแยงมุม (mm)	ผลการทดลอง ค่าเฉลี่ยขนาดด้าน 12" (mm)	ผลการทดลอง ค่าเฉลี่ยขนาดด้าน 24" (mm)	ผลการทดลอง ค่าการดูดซึมน้ำ (%)	ผลการทดลอง โมดูลัสแตกร้าว (N/mm2)
1	45	330	5.63	7.32	668.59	297.80	598.60	0.09	37.09
2	12	330	5.62	7.53	666.75	296.90	597.00	0.14	54.21
3	31	330	5.64	7.78	665.86	296.50	596.20	0.12	42.31
4	43	330	6.32	7.32	668.76	297.80	598.80	0.13	53.48
5	36	330	6.30	7.53	666.89	297.00	597.10	0.14	51.10
6	11	330	6.33	7.78	666.08	296.60	596.40	0.14	53.15
7	30	330	6.89	7.32	669.21	298.00	599.20	0.09	40.26
8	13	330	6.87	7.53	666.93	297.10	597.10	0.12	53.78
9	28	330	6.90	7.78	666.66	296.70	597.00	0.10	43.81
10	15	355	5.63	7.32	669.61	298.70	599.30	0.08	42.10
11	35	355	5.62	7.53	668.14	297.60	598.20	0.12	40.40
12	41	355	5.64	7.78	667.15	297.20	597.30	0.09	51.20
13	7	355	6.32	7.32	669.53	298.10	599.50	0.09	40.30
14	2	355	6.30	7.53	668.00	297.50	598.10	0.19	54.21
15	33	355	6.33	7.78	667.11	297.10	597.30	0.13	45.80
16	40	355	6.89	7.32	669.44	298.30	599.30	0.15	53.78
17	32	355	6.87	7.53	668.09	297.50	598.20	0.13	42.31
18	51	355	6.90	7.78	667.24	297.20	597.40	0.14	53.15
19	44	380	5.63	7.32	671.31	299.10	601.00	0.12	38.29
20	49	380	5.62	7.53	669.70	298.50	599.50	0.14	51.10
21	52	380	5.64	7.78	669.26	298.10	599.20	0.08	45.78
22	24	380	6.32	7.32	671.13	298.90	600.90	0.11	53.78
23	19	380	6.30	7.53	669.93	298.60	599.70	0.13	53.15
24	42	380	6.33	7.78	669.57	298.20	599.50	0.12	37.39
25	17	380	6.89	7.32	671.09	299.20	600.70	0.09	41.73
26	39	380	6.87	7.53	669.97	298.70	599.70	0.14	42.31
27	20	380	6.90	7.78	669.44	298.30	599.30	0.08	44.39
28	6	330	5.63	7.32	669.21	298.00	599.20	0.11	45.78
29	54	330	5.62	7.53	667.29	297.50	597.30	0.09	42.31

ตารางที่ 2 ผลการทดลองเพื่อกำหนดปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อขนาดของกระเบื้องพอร์ซเลนชนิดดูดซึมน้ำต่ำแบบไม่มีการขัดขอบ (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	ปัจจัย: แรงอัดขึ้นรูป (kg/cm2)	ปัจจัย: ค่าความชื้น (%)	ปัจจัย: ค่าการหดตัว (%)	ผลการทดลอง: ค่าเฉลี่ยขนาดด้านทแยงมุม (mm)	ผลการทดลอง: ค่าเฉลี่ยขนาดด้าน 12" (mm)	ผลการทดลอง: ค่าเฉลี่ยขนาดด้าน 24" (mm)	ผลการทดลอง: ค่าการดูดซึมน้ำ (%)	ผลการทดลอง: โมดูลัสแตกร้าว (N/mm2)
30	21	330	5.64	7.78	666.62	297.00	596.80	0.17	43.81
31	9	330	6.32	7.32	669.44	298.10	599.40	0.12	53.15
32	53	330	6.30	7.53	667.38	297.50	597.40	0.13	40.40
33	5	330	6.33	7.78	666.80	297.00	597.00	0.10	54.21
34	1	330	6.89	7.32	669.17	298.70	598.80	0.15	51.10
35	47	330	6.87	7.53	667.42	297.40	597.50	0.14	39.29
36	23	330	6.90	7.78	667.02	297.10	597.20	0.09	44.39
37	26	355	5.63	7.32	670.15	298.30	600.10	0.13	42.31
38	3	355	5.62	7.53	668.50	297.80	598.50	0.18	51.00
39	46	355	5.64	7.78	667.74	297.70	597.70	0.12	41.73
40	25	355	6.32	7.32	670.46	299.00	600.10	0.11	45.80
41	34	355	6.30	7.53	668.63	297.90	598.60	0.14	40.30
42	14	355	6.33	7.78	667.69	297.60	597.70	0.14	54.31
43	4	355	6.89	7.32	670.69	298.90	600.40	0.12	53.15
44	37	355	6.87	7.53	668.90	297.90	598.90	0.15	42.31
45	16	355	6.90	7.78	667.96	297.60	598.00	0.16	43.81
46	8	380	5.63	7.32	671.09	299.20	600.70	0.19	44.39
47	50	380	5.62	7.53	670.02	298.60	599.80	0.12	42.31
48	10	380	5.64	7.78	669.70	298.50	599.50	0.14	44.49
49	48	380	6.32	7.32	671.36	299.40	600.90	0.12	43.81
50	38	380	6.30	7.53	670.20	298.80	599.90	0.11	54.21
51	18	380	6.33	7.78	669.79	298.50	599.60	0.13	53.15
52	27	380	6.89	7.32	672.03	299.50	601.60	0.10	42.31
53	29	380	6.87	7.53	670.02	298.80	599.70	0.09	45.78
54	22	380	6.90	7.78	670.06	298.70	599.80	0.13	40.30

หมายเหตุ:

1. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องเซรามิก (TIS 2508-2555) กำหนดให้ ค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ต้องไม่เกิน 0.50% และค่าโมดูลัสแตกร้าว (Modulus of Rupture) ต้องไม่น้อยกว่า 35 N/mm^2
2. ค่าเบี่ยงเบียนของค่าเฉลี่ยความยาวของด้านทแยงมุมที่ต้องการ คือ 669 ± 1.2 mm



รูปที่ 3 การกระจายตัวของค่าเศษเหลือของค่าเฉลี่ยความยาวของด้านทแยงมุม

จากการวิเคราะห์การกระจายตัวของเศษเหลือ (Residual) โดยพิจารณาจากกราฟ Normal probability plot หรือกราฟแท่ง (Histogram) พบว่ามีการกระจายตัวประมาณได้ด้วยการแจกแจงแบบปกติแบบสองการแจกแจงซ้อนกัน ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดของการทดลองของการขึ้นรูปแผ่นกระเบื้องจำเป็นต้องทำจากสายการผลิตจริงและแบบต่อเนื่อง ดังนั้นการเก็บข้อมูลตัวอย่างที่ได้จึงไม่เป็นแบบสุ่ม ในทำนองเดียวกันจากกราฟ Versus fits ซึ่งพิจารณาการกระจายตัวของค่าเศษเหลือ พบว่า ค่าความเสถียรของค่าเศษเหลือแบ่งเป็น 2 ชุด สำหรับการวิเคราะห์กราฟ Versus order พบว่าลำดับการทดลองกับค่าเศษเหลือเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูลมีรูปแบบที่ไม่เป็นอิสระ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองไม่สอดคล้องเป็นไปตามข้อกำหนดของการทดสอบความแปรปรวนค่าเศษเหลือต้องมีการกระจายตัวแบบปกติ และต้องมีรูปแบบการกระจายตัวที่เป็นอิสระต่อกัน ซึ่งประเด็นดังกล่าวจึงเป็นข้อจำกัดที่สำคัญของการวิจัยซึ่งเป็นผลมาจากข้อจำกัดด้านเวลา เทคโนโลยีด้านการผลิต และต้นทุนที่เกิดจากการทดลอง

4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA)

จากนั้นทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยทั้งหมดที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยความยาวของเส้นทแยงมุมของแผ่นกระเบื้อง เนื่องจากข้อจำกัดของการทดลองของการขึ้นรูปแผ่นกระเบื้องจำเป็นต้องทำจากสายการผลิตจริง ดังนั้นตัวอย่างที่ได้จึงไม่เป็นแบบสุ่ม ดังนั้นการทดสอบความมีนัยสำคัญทางสถิติของปัจจัยจึงกำหนดที่ระดับความเชื่อมั่น 90% วิธีการตรวจสอบผลพิจารณาจากค่า *P–value*

หากค่า *P–value* น้อยกว่าหรือเท่ากับค่านัยสำคัญของระดับการทดสอบที่ (α) 0.10 แสดงว่าปัจจัยนั้นมีผลต่อขนาดกระเบื้องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งผลการทดสอบ รายละเอียดดังปรากฏในรูปที่ 4 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยความยาวของเส้นทแยงมุมของแผ่นกระเบื้อง คือ ปัจจัยร่วมระหว่างค่าแรงอัดขึ้นรูป (Specific pressure: SP) และค่าการหดตัวผงดิน (Shrinkage: SHK) ซึ่งมีค่า *P–value* เท่ากับ 0.096 ซึ่งน้อยกว่าค่านัยสำคัญของระดับการทดสอบที่ (α) 0.10 สำหรับปัจจัยค่าความชื้นผงดินไม่มีอิทธิพลต่อขนาดกระเบื้อง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Perez JM and Romero M [3] และ Abadir MF, Sallam EH and Bakr M [4] คือ ความชื้นเป็นปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลต่อขนาดของกระเบื้อง ในทำนองเดียวกันผลการทดลองพบว่า ปัจจัยร่วมระหว่างค่าการหดตัวผงดินและค่าความชื้น และปัจจัยร่วมของค่าแรงอัดขึ้นรูป ค่าความชื้น และค่าการหดตัวผงดิน ไม่มีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยความยาวของเส้นทแยงมุมของแผ่นกระเบื้อง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ณ ระดับค่านัยสำคัญของระดับการทดสอบที่ (α) 0.10

```
Factor  Type   Levels  Values
SP      fixed       3  330, 355, 380
M       fixed       3  5.63, 6.32, 6.89
SHK     fixed       3  7.32, 7.53, 7.78

Analysis of Variance for ด้านทแยงมุม, using Adjusted SS for Tests

Source    DF    Seq SS   Adj SS   Adj MS       F      P
SP         2   69.5711  69.5711  34.7855  193.29  0.000
M          2    0.6033   0.6033   0.3017    1.68  0.206
SHK        2   48.7719  48.7719  24.3860  135.50  0.000
SP*M       4    0.0635   0.0635   0.0159    0.09  0.985
SP*SHK     4    1.5804   1.5804   0.3951    2.20  0.096
M*SHK      4    0.0658   0.0658   0.0164    0.09  0.984
SP*M*SHK   8    0.1521   0.1521   0.0190    0.11  0.999
Error     27    4.8592   4.8592   0.1800
Total     53  125.6673

S = 0.424228   R-Sq = 96.13%   R-Sq(adj) = 92.41%
```

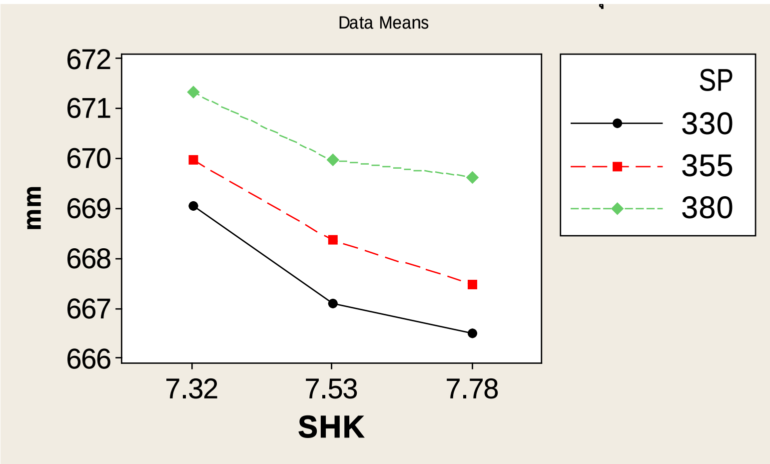
รูปที่ 4 ผลการทดสอบปัจจัยแรงอัดการปั๊มขึ้นรูป ค่าความชื้นผงดิน และค่าการหดตัวผงดิน ที่มีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยความยาวของเส้นทแยงมุมของแผ่นกระเบื้อง

จากนั้นทำการประมวลผลใหม่โดยไม่พิจารณาปัจจัยค่าความชื้นของผงดิน ผลการวิเคราะห์รายละเอียดดังปรากฏในรูปที่ 5 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อขนาดกระเบื้อง คือ ปัจจัยร่วมระหว่างค่าแรงอัดขึ้นรูป (Specific pressure: SP) และค่าการหดตัวผงดิน (Shrinkage: SHK) ซึ่งมีค่า *P–value* เท่ากับ 0.025 และตรวจสอบค่า R^2 (Adj.) พบว่า ค่า R^2 (Adj.) มีค่า 94.62% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ดี

```
Factor  Type   Levels  Values
SP      fixed       3  330, 355, 380
SHK     fixed       3  7.32, 7.53, 7.78


Analysis of Variance for ด้านทแยงมุม, using Adjusted SS for Tests

Source  DF   Seq SS   Adj SS   Adj MS       F      P
SP       2   69.571   69.571   34.786  272.53  0.000
SHK      2   48.772   48.772   24.386  191.05  0.000
SP*SHK   4    1.580    1.580    0.395    3.10  0.025
Error   45    5.744    5.744    0.128
Total   53  125.667


S = 0.357268   R-Sq = 95.43%   R-Sq(adj) = 94.62%
```

รูปที่ 5 ผลการทดสอบปัจจัยแรงอัดการปั๊มขึ้นรูป และค่าการหดตัวผงดินที่มีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยความยาวของเส้นทแยงมุมของแผ่นกระเบื้อง

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยแรงอัดการปั๊มขึ้นรูปกระเบื้องและค่าการหดตัวผงดินต่อค่าเฉลี่ยความยาวของเส้นทแยงมุนของแผ่นกระเบื้อง รายละเอียดดังรูปที่ 6 พบว่า มีความสัมพันธ์ทางลบ กล่าวคือ กระเบื้องจะมีขนาดใหญ่ที่สุดเมื่อใช้แรงอัดขึ้นรูปที่ระดับสูง 380 kg/cm^2 และใช้ค่าการหดตัวระดับต่ำ 7.32% ในทางกลับกันขนาดของกระเบื้องจะลดลงเมื่อลดแรงอัดขึ้นรูปหรือใช้ค่าการหดตัวผงดินเพิ่มขึ้น



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างปัจจัยแรงอัดการปั๊มขึ้นรูปกระเบื้องกับปัจจัยค่าการหดตัวผงดินที่มีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยของความยาวของเส้นทแยงมุมของแผ่นกระเบื้อง

4.3 การสร้างสมการความสัมพันธ์เชิงถดถอย

จากนั้นวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์เชิงถดถอย (Regression Model) ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยความยาวของด้านทแยงมุม พบว่า ค่า *P-Value* ของสมการมีค่าน้อยกว่า 0.10 กล่าวคือ ปัจจัยทั้งสองมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับตัวแปรตอบสนองที่ระดับนัยสำคัญ 0.10 และ ค่า R^2 (Adj.) มีค่า 89.90% แสดงว่าสมการถดถอยมีความถูกต้องในการพยากรณ์ตัวแปรตอบสนองได้ดี ในช่วงขอบเขตที่ทำการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 7 และสมการที่ (1)

สมการความสัมพันธ์เชิงถดถอย (Regression Model) ระหว่างค่าเฉลี่ยความยาวเส้นทแยงมุมของแผ่นกระเบื้องกับปัจจัยค่าแรงอัดขึ้นรูปกระเบื้องและค่าการหดตัวผงดิน

$$Y = 784 - 0.222*SP - 17.900*SHK + 0.037*SP*SHK \qquad (1)$$

เมื่อกำหนดให้ Y คือ ค่าเฉลี่ยความยาวของด้านทแยงมุม SP แทน ค่าแรงอัดขึ้นรูปกระเบื้อง (kg/cm^2) และ SHK คือ ค่าการหดตัวผงดิน (%)

```
Predictor      Coef  SE Coef      T      P
Constant     784.06    46.60  16.83  0.000
SP          -0.2223   0.1310  -1.70  0.096
SHK         -17.869    6.175  -2.89  0.006
SP*SHK      0.03677  0.01737   2.12  0.039


S = 0.489821   R-Sq = 90.5%   R-Sq(adj) = 89.9%


Analysis of Variance

Source          DF       SS      MS       F      P
Regression       3  113.671  37.890  157.93  0.000
Residual Error  50   11.996   0.240
Total           53  125.667
```

รูปที่ 7 ผลการทดสอบปัจจัยแรงอัดการปั๊มขึ้นรูป ค่าความชื้นผงดิน และค่าการหดตัวผงดิน ที่มีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยความยาวของเส้นทแยงมุมของแผ่นกระเบื้อง

4.4 การยืนยันความถูกต้องของตัวแปรผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบการทดลอง

จากสมการความสัมพันธ์เชิงถดถอยที่ได้จากขั้นตอนการวิเคราะห์มาใช้จริงกับการผลิตกระเบื้องสินค้าใหม่ของบริษัทกรณีศึกษา ซึ่งแสดงรายละเอียดการนำไปใช้งานแต่ละขั้นตอน ดังนี้

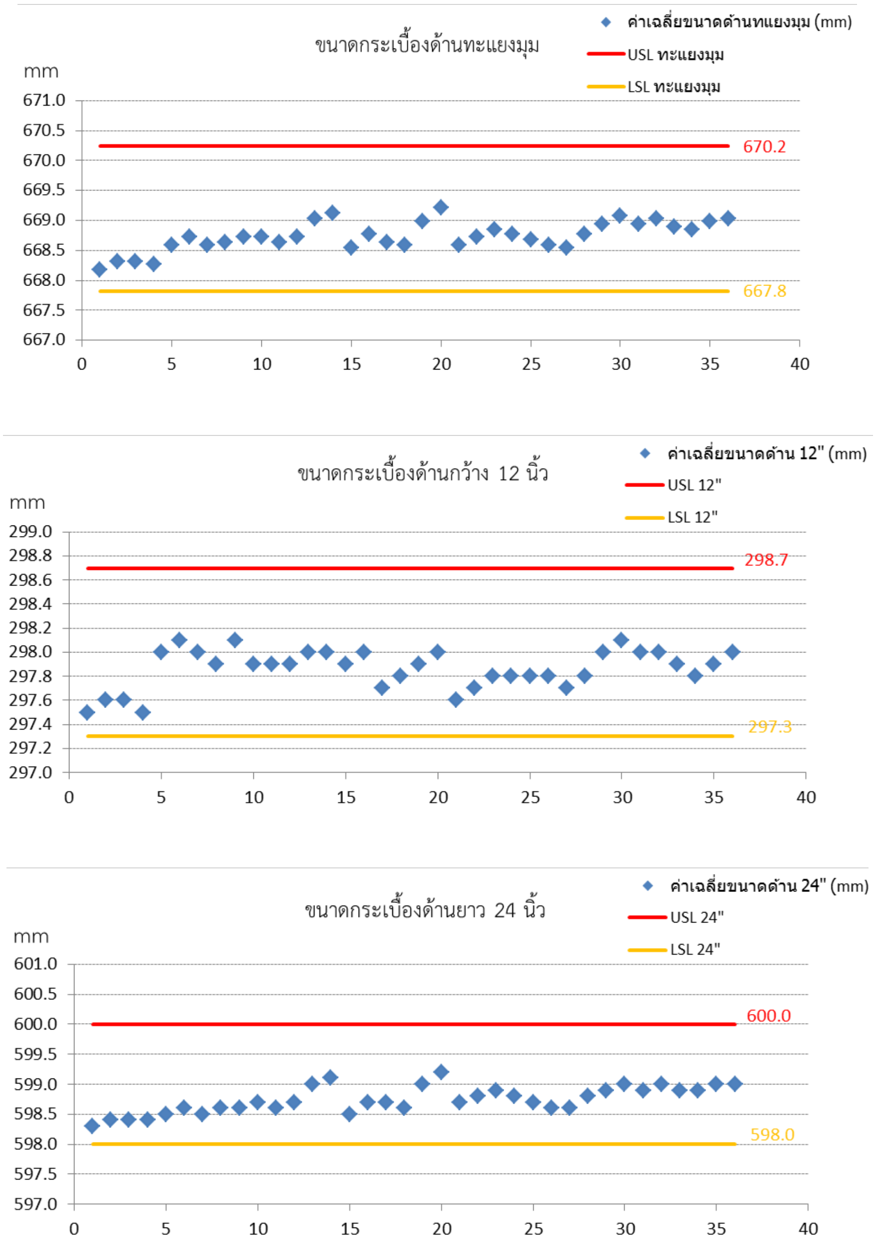
1. ตรวจสอบแผนการผลิตกระเบื้องสินค้าใหม่ พบว่ามียอดการผลิตจำนวน 2,864 ตารางเมตร ในเดือนกุมภาพันธ์ 2560 ซึ่งจะทำการผลิตที่เครื่องปั๊มขึ้นรูปเครื่องเดียวกันกับเครื่องที่ใช้ทดลองในงานวิจัยนี้

2. ตรวจสอบผงดินที่จะนำมาผลิต พบว่าผงดินที่เตรียมไว้เป็นผงดินที่ผลิตรุ่นใหญ่รุ่นเดียวจำนวน 100 ตัน สามารถผลิตกระเบื้องได้ประมาณ 3,000 ตารางเมตร และค่าการหดตัวผงดินเท่ากับร้อยละ 7.56 ทั้งนี้ค่าความชื้นของผงดินอยู่ระหว่าง 5-7% ตามมาตรฐานการผลิตเดิมของโรงงาน

3. นำค่าการหดตัวผงดิน 7.56% ไปคำนวณในสมการความสัมพันธ์เชิงถดถอย (Regression Model) ที่ได้ โดยมีจุดประสงค์เพื่อต้องการหาค่าแรงอัดขึ้นรูปที่เหมาะสมที่ทำให้กระเบื้องมีขนาดตามที่มาตรฐานกำหนด พบว่าจะต้องใช้แรงอัด 360 kg/cm^2

4. ทดลองใช้แรงอัดขึ้นรูปที่ 360 kg/cm^2 จากนั้นได้หยุดการผลิตไว้ชั่วคราว และนำกระเบื้องที่ได้จากการขึ้นรูปไปเผาเพื่อดูขนาดกระเบื้องหลังเผา พบว่า กระเบื้องมีค่าเฉลี่ยความยาวของด้านทแยงมุมเท่ากับ 668.2 mm. (ค่ามาตรฐาน 669 ± 1.2 mm), ขนาดเฉลี่ยด้านกว้างเท่ากับ 297.5 mm. (ค่ามาตรฐาน 298 ± 0.7 mm.) และขนาดเฉลี่ยด้านยาวเท่ากับ 598.3 mm. (ค่ามาตรฐาน 599 ± 1.0 mm.) ซึ่งพบว่าอยู่ในค่าที่มาตรฐานกำหนด แต่ขนาดมีแนวโน้มไปด้านเล็ก จึงได้ทดลองผลิตประมาณ 4 ชั่วโมง เพื่อดูแนวโน้มขนาดของกระเบื้องโดยการสุ่มเก็บกระเบื้องไปเผาทุก 1 ชั่วโมง ชั่วโมงละ 1 แผ่น พบว่าขนาดของกระเบื้องยังอยู่ในค่ามาตรฐานที่กำหนด แต่ขนาดมีแนวโน้มไปด้านเล็ก จึงได้ปรับเพิ่มแรงอัดขึ้นรูปขึ้นจาก 360 kg/cm^2 เป็น 362 kg/cm^2

5. ทดลองใช้แรงอัดขึ้นรูปที่ 362 kg/cm^2 และนำกระเบื้องที่ได้จากการขึ้นรูปไปเผาเพื่อดูขนาดกระเบื้องหลังเผา พบว่า กระเบื้องมีค่าเฉลี่ยความยาวของด้านทแยงมุมเท่ากับ 668.6 mm. (ค่ามาตรฐาน 669 ± 1.2 mm), ขนาดเฉลี่ยด้านกว้างเท่ากับ 298.0 mm . และขนาดเฉลี่ยด้านยาวเท่ากับ 598.5 mm. ซึ่งพบว่าอยู่ในค่ามาตรฐานที่กำหนด และมีแนวโน้มที่อยู่ค่ากลางของมาตรฐาน จึงทำการผลิตต่อ และกำหนดให้มีการสุ่มเก็บกระเบื้องทุก 1 ชั่วโมง ชั่วโมงละ 1 แผ่น (ปกติมาตรฐานการตรวจสอบขนาดกระเบื้องจะตรวจสอบทุก 2 ชั่วโมง) ไปเผา เพื่อติดตามดูแนวโน้มขนาดกระเบื้อง จากการทดลองใช้ตามมาตรฐานที่กำหนดเพื่อยืนยันผล โดยการบันทึกข้อมูลการตรวจสอบประจำชั่วโมง (ทั้งหมด 36 ชั่วโมง) ผลการสุ่มเก็บกระเบื้องทุก 1 ชั่วโมง ชั่วโมงละ 1 แผ่น เพื่อติดตามดูแนวโน้มขนาดกระเบื้อง ดังแสดงในรูปที่ 8 หลังจากนั้นส่งกระเบื้องไปทดสอบคุณสมบัติด้านการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) และโมดูลัสแตกร้าว (Modulus of Rupture) พบว่า ผ่านตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องเซรามิก มอก. 2508-2555



หมายเหตุ: ชั่วโมงที่ 1-4 ใช้แรงอัดขึ้นรูป 360 kg/cm^2, ชั่วโมงที่ 5-36 ใช้แรงอัดขึ้นรูป 362 kg/cm^2

รูปที่ 8 ผลการวัดขนาดกระเบื้องจากการสุ่มเก็บตัวอย่างทุก 1 ชั่วโมง

จากนั้นนำกระเบื้องทั้งหมดที่ทำการผลิตจำนวน 3,068 ตารางเมตร ไปเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส เวลาเผา 80 นาที และเข้าสู่กระบวนการคัดเลือกเกรดและบรรจุกล่อง เพื่อส่งขายให้ลูกค้าต่อไป พบว่ากระเบื้องรุ่นดังกล่าว พบของเสียที่เกิดจากขนาดกระเบื้องไม่ได้ตาม

มาตรฐานจำนวน 0.21% (6.44 ตารางเมตร) ซึ่งดีกว่าค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้คือ กำหนดของเสียจากสาเหตุขนาดกระเบื้องไม่ได้ตามมาตรฐานไม่เกิน 0.50% สำหรับการปรับปรุงการผลิตที่ได้รับจากการดำเนินการทดลองอยู่ในรูปแบบของการลดเวลาสูญเสียในการทดลองปรับตั้งค่าของตัวแปรต่างๆ ก่อนเริ่มการผลิต จากเดิมที่ต้องทดลองแบบลองผิดลองถูกเฉลี่ย 3 ครั้งต่อการผลิตกระเบื้องหนึ่งรุ่น หรือประมาณ 360 นาที ทำให้สามารถลดเวลาสูญเสียในการรอผลการทดลองเหลือเพียง 1 ครั้ง หรือประมาณ 120 นาที ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและเพิ่มโอกาสในการทำกำไรให้กับกรณีศึกษา

5. สรุปและเสนอแนะ

การกำหนดปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อขนาดของกระเบื้องพอร์ซเลนชนิดดูดซึมน้ำต่ำแบบไม่ขัดขอบ ปัจจัยที่นำมาพิจารณาประกอบด้วย 3 ปัจจัย คือ ค่าแรงอัดขึ้นรูปแผ่นกระเบื้อง ค่าความชื้นของผงดิน และค่าการหดตัวผงดิน โดยวิธีการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป ผลจากการทดลองพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อขนาดกระเบื้องคือ ค่าแรงอัดขึ้นรูปแผ่นกระเบื้อง และค่าการหดตัวผงดิน และผลจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองโดยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณร่วมกับการนำค่าประมาณการที่ได้ไปทดลองผลิตจริง พบว่า พบว่า ค่าแรงอัดขึ้นรูปแผ่นกระเบื้องควรมีค่าเท่ากับ 362 กิโลกรัมต่อตารางเซ็นติเมตร และค่าการหดตัวผงดินเท่ากับร้อยละ 7.56 ซึ่งจะส่งผลให้การผลิตกระเบื้องฯ มีขนาดตามที่กำหนด รวมถึงคุณสมบัติด้านการดูดซึมน้ำ และค่าโมดูลัสแตกร้าว คุณภาพของกระเบื้องที่ผลิตได้เป็นไปตามข้อกำหนดทั้งด้านขนาดและคุณสมบัติทางกล รวมถึงช่วยลดเวลาในการตั้งค่าของตัวแปรต่างๆ ในการผลิต

จากการคัดเลือกปัจจัยสำหรับการทดลองซึ่งพิจารณาเฉพาะปัจจัยที่มีผลค่อนข้างรุนแรงต่อขนาดของกระเบื้องเพียง 3 ปัจจัย ซึ่งอยู่ภายใต้ข้อจำกัดของลักษณะของกระบวนการผลิตของกรณีศึกษา โดยไม่พิจารณาปัจจัยด้านอุณหภูมิการเผากระเบื้องซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลโดยตรงต่อขนาดของกระเบื้อง หรือปัจจัยภายนอกที่ควบคุมไม่ได้ทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ สภาพอากาศ เป็นต้น รวมถึงการทดลองมีการดำเนินการในสายการผลิตจริง ทำให้ค่าสังเกตุที่ได้ไม่ใช่ค่าสังเกตุที่มาจากการทดลองแบบสุ่ม นอกจากนี้ค่าระดับของปัจจัยที่ได้จากการทดลองของงานวิจัยนี้เหมาะสมกับเงื่อนไขของการทดลองของกรณีศึกษาเท่านั้น ดังนั้นในการที่ผู้ผลิตกระเบื้องพอร์ซเลนรายอื่นๆ จะนำค่าที่ได้ไปใช้งานในการผลิต ผลที่ได้อาจไม่เป็นไปตามผลการทดลองที่ได้จากกรณีศึกษา แต่สามารถใช้เป็นแนวทางในการทดลองเพื่อปรับปรุงผลิตภาพการผลิตได้ ในทำนองเดียวกันกรณีที่ผู้ประกอบการต้องการให้ค่าสังเกตุที่ได้จากการทดลองเป็นแบบสุ่มเพื่อความถูกต้องและน่าเชื่อถือสูงตามหลักสถิติ ดังนั้นจำเป็นที่ผู้ประกอบการจะต้องเลือกและพิจารณาความคุ้มค่าระหว่างความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของข้อมูลทางสถิติเพื่อให้การทดลองเป็นแบบสุ่มเปรียบเทียบกับต้นทุนการทดลองที่เพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณโรงงานกรณีศึกษา ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการดำเนินการทดลอง ตลอดจนการให้คำแนะนำและความเห็นที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

References

[1] Office of National Economic and Social Development Board. Quarterly gross domestic product 2017 [Internet]. 2017 [cited 2017 Jun 6]. Available from: http://www.nesdb.go.th/main.php?filename=qgdp_page (In Thai)

[2] Sa´nchez E, Garcı´a-Ten J, Sanz V and Moreno A. Porcelain tile: almost 30 years of steady scientific-technological evolution. Ceramics International 2010;36:831-845.

[3] Perez JM and Romero M. Microstructure and technological properties of porcelain stoneware tiles mold at different pressures and thicknesses. Ceramics International 2014;40:1365-1377.

[4] Abadir MF, Sallam EH and Bakr M. Preparation of porcelain tiles from Egyptian raw materials. Ceramics International 2002;28(3):303-310.

[5] Taskiran MU, Demirkol N and Capoglu A. Influence of mixing milling on sintering and technological properties of anorthite based porcelainised stoneware. Ceramics International 2006;32:325-330.

[6] Thai Industrial Standards Institute. Thai Industrial Standard 2508-2555: Ceramic Tiles [Internet]. 2012 [cited 201//05/20]. Available from: http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2555/E/093/11.PDF (In Thai).

[7] International Organization for Standardization. ISO 10545-11: Ceramic tiles [Internet]. 2008 [cited 2017/05/20]. Available from: https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:10545:-11:ed-1:v1:en:ed1:v1

ประวัติผู้เขียนบทความ

เลิศชาย นาหมื่น, วศบ.(วิศวกรรมอุตสาหการ) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ วศม.(การจัดการวิศวกรรม) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน E-mail: lertchainameun@hotmail.com งานวิจัยที่สนใจ: การออกแบบการทดลองเพื่อพัฒนากระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิก

พัชราภรณ์ ญาณภิรัต, D.Tech.Sc. (Industrial Engineering) Asian Institute of Technology (AIT) รองศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน E-mail: fengppy@ku.ac.th งานวิจัยที่สนใจ: Applied Operations Research, Multiple Criteria Decision Making, Supply Chain Management, and Cost Management

ศันสนีย์ สุภาภา, M.S. (Industrial Eng.), Illinois Institute of Technology, USA. วุฒิวิศวกร สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ และกรรมการสภาวิศวกร ผู้ทรงคุณวุฒิพิเศษ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ และสาขาวิชาการจัดการวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน E-mail: fengsas@ku.ac.th งานวิจัยที่สนใจ: Engineering project feasibility study, Process improvement