



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

สภาวะที่เหมาะสมของคุณสมบัติเชิงกลวัสดุประกอบอีพอกซีที่เติมแต่งด้วยเถ้าเบาขยะชุมชน  
ผงเปลือกไข่ และไทเทเนียมไดออกไซด์

Optimization on Tensile and Flexural Properties of Egg Shell-TiO<sub>2</sub> Reinforced Fly Ash/Epoxy

Composite using Response Surface Methodology

วิศรุต เชาวชัยภูมิ<sup>1)</sup> และ วรินทร์ไพ เศรษฐ์ธณบุตร<sup>1),2)\*</sup>Wisarut Chaochaiyaphum<sup>1)</sup> and Varinrumpai Seithtanabutara<sup>1),2)\*</sup><sup>1)</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น<sup>2)</sup>ศูนย์วิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยขอนแก่น<sup>1)</sup>Energy Engineering Section, Engineering Faculty, Khon Kaen University, THAILAND<sup>2)</sup>Center for Alternative Energy Research and Development, Khon Kaen University, THAILAND

Received: 26 May 2021

Revised: 8 June 2021

Accepted: 9 June 2021

Available Online: 24 December 2021

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการเตรียมวัสดุประกอบอีพอกซีที่เติมแต่งเสริมแรงด้วยเถ้าเบา ผงเปลือกไข่ และไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ ด้วยเทคนิคการออกแบบส่วนประสมกลางภายใต้อิทธิพลของสองปัจจัย คือ ปริมาณเถ้าเบา (ร้อยละ 10-15 โดยน้ำหนัก) และปริมาณผสมของผงเปลือกไข่และไทเทเนียมไดออกไซด์ (ร้อยละ 5-10 โดยน้ำหนัก) โดยใช้สัดส่วนน้ำหนักผงเปลือกไข่ต่อไทเทเนียมไดออกไซด์คงตัวเป็น 2 ต่อ 1 ส่วน ทั้งนี้เถ้าเบาที่ใช้มาจากโรงไฟฟ้าขยะมูลฝอยชุมชนจังหวัดขอนแก่น รวมทั้งผงเปลือกไข่ และไทเทเนียมไดออกไซด์จะถูกนำมาปรับปรุงพื้นผิวเบื้องต้นก่อนนำมาใช้เป็นสารเติมแต่ง วัสดุประกอบทั้งหมดที่เตรียมขึ้นภายใต้เงื่อนไขที่ออกแบบไว้จะถูกนำมาตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกล คือ ความต้านทานแรงดึง โมดูลัสความยืดหยุ่น ความต้านทานการบิดงอ และโมดูลัสการบิดงอ เมื่อทำการวิเคราะห์เชิงสถิติจะทำได้แบบจำลองการถดถอยสำหรับแต่ละผลตอบสนองเพื่อนำมาวิเคราะห์ผลการตอบสนองเชิงพื้นผิว และสัดส่วนที่

เหมาะสมสำหรับการเตรียมวัสดุประกอบนี้ พบว่า การใช้เถ้าเบา ผงเปลือกไข่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และปริมาณอีพอกซี ปริมาณร้อยละ 10.8 4.95 2.47 และ 81.83 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จะทำให้ได้วัสดุประกอบที่มีสมบัติที่ดีที่สุด คือ มีความต้านทานแรงดึง 22.72 เมกะปาสคาล ค่าความต้านทานแรงดัด 43.11 เมกะปาสคาล ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น 521.5 เมกะปาสคาล และ ค่าโมดูลัสแรงดัด 1950 เมกะปาสคาล ซึ่งสภาวะนี้ได้รับการยืนยันจากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง พบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์

**คำสำคัญ:** วัสดุประกอบ คุณสมบัติเชิงกล เถ้าเบาขยะชุมชน ผงเปลือกไข่ ไทเทเนียมไดออกไซด์

### Abstract

In this research, epoxy composites reinforced with fly ash, eggshell powder and titanium dioxide were prepared. Central composite technique was used for experimental design under the influence of two factors; amount of fly ash (10-15%wt.) and mixture amount of egg shell powder and titanium dioxide (5-10 %wt.). The weight ratio of eggshell powder to titanium dioxide was fixed in 2:1. The fly ash provided from the municipal solid waste power plant in Khon Kaen province, including eggshell powder and titanium dioxide were surface pretreatment before used as the fillers. All composite materials prepared under the designed conditions were subjected to mechanical properties inspection of tensile strength, flexural strength, elastic modulus and flexural modulus. When statistical analysis was performed, a regression model for each response was obtained to analyze the results of surface response and optimum conditions for the preparation of this composite material. It was found that the optimum condition was fly ash, eggshell powder, titanium dioxide and epoxy of 10.8, 4.95, 2.47 and 81.83%wt., respectively. This optimum condition gave the composite material with the best of tensile strength, flexural strength, elastic modulus and flexural modulus of 22.72 MPa, 43.11 MPa, 521.5 MPa and 1950 MPa, respectively. Tri-replicated experiments confirmed this condition with an error less than 10 percent.

**Keywords:** Composite: Physical property: Municipal waste fly ash: Egg shell: Titanium dioxide

## 1. บทนำ

วัสดุประกอบหรือวัสดุคอมโพสิต (Composite Materials) เป็นวัสดุวิศวกรรมที่เกิดจากการรวมตัวของวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันมากกว่าหนึ่งชนิดขึ้นไป การนำกากของเสียมาใช้เป็นสารเสริมแรงวัสดุประกอบได้รับความสนใจมากขึ้น การใช้เถ้าเา (Fly Ash, FA) จากโรงไฟฟ้าถ่านหิน เป็นสารเติมแต่ง (Filler) จะทำให้ได้วัสดุประกอบที่มีสมบัติเชิงกลด้านความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ความต้านทานแรงดัด (Flexural Strength) และความแข็ง (Hardness) เพิ่มขึ้น [1] ซึ่งได้มีรายงานสอดคล้องกันกับการศึกษาของ Sim J และคณะ [2] ว่า สัดส่วนที่เหมาะสมของเถ้าเา ตั้งแต่ร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนัก จะทำให้ได้วัสดุประกอบที่มีค่าความต้านทานแรงดึง ความแข็งแรงทนต่อการดัดโค้งมากขึ้น แต่การใช้ปริมาณเถ้าเาที่มากเกินไปจะส่งผลให้วัสดุประกอบมีความแข็งแรงของวัสดุประกอบลดลงเนื่องจากการกระจายตัวของเถ้าเาไม่สม่ำเสมอ เพราะจะไปรวมตัวกันอยู่ที่จุดเดียว ดังนั้น จึงได้มีการปรับสภาพเถ้าเาเบื้องต้นด้วยสารคู่ควบไซเลน (Silane Coupling Agent) Goh CK และคณะ [3] พบว่า การใช้เถ้าเาร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จะทำให้วัสดุประกอบอีพอกซีมีคุณสมบัติเชิงกลที่โดดเด่นขึ้น เนื่องจากเถ้าเาที่ผ่านการปรับสภาพแล้วจะมีพฤติกรรมกระจายตัวที่ดีมากในอีพอกซีเมทริกซ์ ในทำนองเดียวกัน มีรายงานโดย Nguyen TA [4] พบว่า การปรับสภาพผิวช่วยให้อนุภาคเถ้าเาเข้าไปแทรกระหว่างช่องว่างของการเชื่อมต่อแบบสายโซ่ของอีพอกซีเมทริกซ์ได้ดีกว่าเถ้าเาไม่ปรับสภาพ โดยเฉพาะการใช้ที่ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทำ

ให้ลดความยืดหยุ่น (Flexible) ของวัสดุประกอบ แต่เพิ่มความแข็ง (Hardness) นั้นหมายถึงเพิ่มความเปราะแก่วัสดุ

เนื่องจากเปลือกไข่เป็นกากวัสดุเหลือทิ้งที่สามารถนำมาใช้เป็นสารเสริมแรงทดแทนแคลเซียมคาร์บอเนตในวัสดุได้ แต่มีงานส่วนน้อยในการนำวัสดุนี้มาใช้เป็นสารเสริมแรงวัสดุประกอบอีพอกซี ได้มีรายงานโดย Hamdi WJ และคณะ [5] พบว่า วัสดุประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยผงเปลือกไข่จะมีความเสถียรทางความร้อน (Thermal Stability) มีค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ที่ลดลง มีอุณหภูมิแก้ว (Glass Temperature) สูงกว่าวัสดุอีพอกซีบริสุทธิ์ อย่างไรก็ตาม ควรมีการปรับสภาพผงเปลือกไข่ให้เหมาะสมก่อนนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งวัสดุประกอบอีพอกซี ทั้งนี้ เพื่อให้มีการกระจายตัวของอนุภาคได้ทั่วถึงส่งผลให้ความต้านทานแรงดัดของวัสดุประกอบมีค่าสูงขึ้น มีความเสถียรทางความร้อนที่ดีขึ้น ทั้งนี้อาจใช้ กรดสเตอริก (Steric Acid) หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ [6-7]

สารเติมแต่งอีกชนิดหนึ่งที่นิยมในอุตสาหกรรมต่างๆ รวมถึงอุตสาหกรรมพลาสติก คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) แต่ยังมีนำมาใช้เป็นวัสดุเติมแต่งสำหรับโพลีเมอร์เทอร์โมเซตติง (Thermosetting) ไม่กว้างขวางนัก ได้มีรายงานว่า วัสดุประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยปริมาณนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมจะมีสมบัติเชิงความร้อน สมบัติเชิงกล ที่ดีขึ้น ไม่ว่าจะเป็น ค่าความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงดัด ซึ่งสูงกว่าวัสดุอีพอกซีบริสุทธิ์ [8-10] ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณที่ใช้และสภาวะการเตรียมวัสดุด้วย ซึ่งพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์

ที่มีอนุภาคขนาดเล็กระดับนาโนทำให้ความแข็งแรงของวัสดุประกอบลดลงส่งผลให้วัสดุมีค่าความต้านทานแรงดัดเพิ่มขึ้นและโมดูลัสแรงดัดลดลง มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลง มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นจากเดิม [11-12] ซึ่งมีความต้านทานแรงดึงสูงขึ้น

การศึกษาค้นคว้านี้มุ่งเตรียมวัสดุประกอบอีพอกซีที่เข้าเบาเสริมแรงด้วยผงเปลือกไข่และไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่มีสมบัติเหมาะสมเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุวิศวกรรมต่อไป เช่น ฉนวนความร้อน แผ่นกันแสงผนังกัน วัสดุโครงสร้าง เพดาน เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม วัสดุประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยการใช้สารเติมแต่งแต่ละชนิดจะมีสมบัติแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิด คุณลักษณะ สมบัติ และปริมาณ ของสารเติมแต่งนั้นๆ รวมถึงกระบวนการในการผสม เพื่อให้มีการกระจายตัวของอนุภาคแต่ละชนิดในเนื้อวัสดุ ดังนั้น การเตรียมวัสดุประกอบอีพอกซีที่มีการใช้สารเติมแต่งมากกว่าหนึ่งชนิดขึ้นไป จำเป็นต้องคำนึงถึงสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้ได้วัสดุที่มีสมบัติเชิงกลโดดเด่นในแต่ละด้านตามคุณลักษณะของสารเติมแต่งนั้นๆ

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) เป็นเทคนิคทางสถิติขั้นสูงที่ถูกนำมาใช้ในการออกแบบการทดลองครั้งนี้ ด้วยการปรับค่าสภาวะของกระบวนการให้เป็นไปตามความต้องการภายใต้ปัจจัยที่กำหนดเพื่อให้ได้ผลตอบสนองตามต้องการ ซึ่งแตกต่างจากวิธีการโดยทั่วไปที่เป็นการทดลองแบบลองผิดลองถูก หรือใช้การทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า (One-Factor-at-a-Time) โดยจะมีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) และทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology,

RSM) เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Condition) จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า ยังไม่มีการนำเทคนิคทางสถิติ DOE และ RSM มาใช้ในการศึกษา และไม่พบการเตรียมวัสดุประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเถ้าเบาจากโรงงานไฟฟ้าขยะชุมชน ผงเปลือกไข่ และไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงนำวิธีการนี้มาใช้ในการเตรียมวัสดุประกอบดังกล่าว เพื่อให้ได้วัสดุประกอบที่มีสมบัติเชิงกลด้านแรงดึงและแรงดัด ที่ดีภายใต้สัดส่วนที่เหมาะสมของแต่ละสารเติมแต่ง

## 2. วิธีการวิจัย

### 2.1. การเตรียมวัตถุดิบ

วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ เถ้าเบา (Fly Ash) จากโรงไฟฟ้าขยะมูลฝอยชุมชน จ.ขอนแก่น Epoxy Resin 200A (Diglycidyl ether of Bisphenol-A) Hardener 200B (3-aminomethyl-3,5,5-trimethylcyclohexylamine benzyl alcohol) จากบริษัท Infinite Crafts Co., Ltd. Silane Coupling Agent (3-Glycidyloxypropyl) จากบริษัท Sigma Aldrich Co., Ltd. เปลือกไข่ (Eggshell) จากครัวเรือน และผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) เกรดทางการค้า ชนิด P25 ไฮเดียมไฮดรอกไซด์ และกรดโพลิอิกจากเป็นเกรดห้องปฏิบัติการ เนื่องจากเถ้าเบา และไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นสารที่มีขั้วและชอบน้ำ (Hydrophilic) ในขณะที่อีพอกซีเป็นสารที่ไม่มีขั้วและไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวต่ำ จึงต้องทำการปรับสภาพโดยใช้สารคู่ควบไซเลน (Silane Coupling Agent) เพื่อให้เกิดการกระจายตัวได้ดีขึ้นและเพิ่มความแข็งแรงยึดเกาะ สูตรทั่วไปของสารคู่ควบไซเลน คือ  $(\text{R}'\text{O})_x\text{-M-}(\text{R-X})_y$  โดย M เป็นหมู่

โลหะ เช่น Si, Ti, Zr และ X เป็นหมู่ไวเนิล ( $-\text{CH}=\text{CH}_2$ ) หรือ หมู่อะมิโน ( $-\text{RNH}_2$ ) และ R เป็นหมู่อินทรีย์เชื่อมระหว่าง X กับ M กลไกการเกิดปฏิกิริยาของสารคู่ควบไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของสารคู่ควบไฮโดรไลซิสจากน้ำที่ใส่เพิ่มหรือความชื้นบนผิวเกิดเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (Silanols) จากนั้นหมู่ไฮดรอกซิลจับกับหมู่  $-\text{OH}$  บนพื้นผิวของน้ำหลุดออกเกิดเป็นพันธะออกเซน (Oxane bonds) และเกิดการยึดติดกับผิวของสารอนินทรีย์หรือสารตัวเติมและสุดท้ายสารคู่ควบไฮโดรไลซิสทำปฏิกิริยากันเองเกิดการยึดเกาะกันหลายชั้นเป็นตาข่ายหรืออาจเกิดเป็นสารเชื่อมกัน ในการศึกษานี้ Silane Coupling Agent (3-Glycidyloxypropyl) จะถูกเลือกใช้สำหรับอีพอกซีเรซิน [13] เริ่มต้นจะนำสารคู่ควบไฮโดรไลซิส (Silane Coupling Agent) ปริมาณ 2 กรัม มาละลายในเอทานอล 100 มิลลิลิตร ให้เข้ากันที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส 30 นาที แล้วค่อยๆ โปรมก้นเบา หรือไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 100 กรัม ลงไปภายใต้การกวนต่อเนื่อง 4 ชั่วโมง ด้วยความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้งๆ ละ 300 มิลลิลิตร และแยกอนุภาคด้วยเครื่อง Rotofix 32A อบแห้งที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วนำมาบดและคัดขนาดให้ได้อนุภาค 200 เมช ขนาด 75 ไมครอน จะได้เป็นเม็ดเบา และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับสภาพ

ส่วนเปลือกไข่จะถูกนำมาล้าง แยกเยื่อเมมเบรน แล้วบดละเอียดเป็นผงอนุภาค 200 เมช แล้วจึงนำมาปรับสภาพโดยการต้มล้างผงเปลือกไข่ 100 กรัม ในสารละลายไฮเดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.04 โมลาร์

ปริมาณ 3 ลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปกรองแยก และอบแห้งเป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วนำมาบดให้ได้ขนาด 75 ไมครอน จากนั้นเตรียมสารละลายกรดโอลิอิกในตัวทำละลายเอทานอล และน้ำกลั่น โดยใช้กรดโอลิอิก 5 กรัม เอทานอล 100 กรัม และน้ำกลั่น 300 กรัม กวนให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วจึงค่อยๆ โปรมผงเปลือกไข่ที่เตรียมไว้ และกวนต่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากครบตามเวลาแล้วนำไปกรอง และนำผงที่ได้ไปอบแห้งเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

## 2.2 การเตรียมวัสดุประกอบ

ในการศึกษานี้ ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม Minitab 17 ในการออกแบบการทดลอง ปัจจัยที่เกี่ยวข้องประกอบไปด้วย 2 ปัจจัย คือ FA (X1, ร้อยละ 10-15 โดยน้ำหนัก) และ ES+TiO<sub>2</sub> (X2, ร้อยละ 5-10 โดยน้ำหนัก) โดยสัดส่วนโดยน้ำหนักของ ES ต่อ TiO<sub>2</sub> จะคงที่เป็น 2 ต่อ 1 ส่วน โดยเลือกใช้เทคนิคการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) เนื่องจากมีปัจจัยศึกษาเพียง 2 ปัจจัย และมีความเหมาะสมที่สุดในการศึกษาสมการโพลีโนเมียลยกกำลังสอง สำหรับปัจจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Factor) โดยทำการออกแบบที่ CCD 5 ระดับ ค่า  $\alpha=0.5$  ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทำให้ได้ผลการออกแบบทั้งหมด 14 การทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 1 ทั้งนี้ ตัวแปรตอบสนองมีทั้งหมด 4 ค่า คือ Tensile Strength Flexural Strength Elastic Modulus และ Flexural Modulus ในการเตรียมวัสดุประกอบ จะกำหนดมวลรวมของวัสดุประกอบทั้งหมดจะเป็น 150 กรัม สำหรับการหล่อในโมลด์ (Mold) อะคริลิกขนาด 20x20x0.3 เซนติเมตร โดยใช้ Hardener 200B

คงตัวที่ 50 กรัม ในการเตรียมชิ้นงานวัสดุประกอบ เริ่มจากนำ Epoxy Resin 200A และเถ้าเบามาชั่ง น้ำหนักให้ได้ตามสัดส่วน โดยทำการผสม Epoxy Resin 200A กับ Hardener 200B ปริมาณ 50 กรัม กวนให้เข้ากัน 20 นาที จากนั้นนำเถ้าเบาค่อย ๆ ปรอย ลงไปเพื่อให้ผสมเข้ากันกับ Epoxy กับ Hardener ตาม ด้วยผงเปลือกไข่ และไทเทเนียมไดออกไซด์ กวนให้

เข้ากันอีก 5 ถึง 10 นาที เสร็จแล้วเทลงแม่พิมพ์ อะคริลิกที่เตรียมไว้ ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง แล้วจึง แกะขึ้นเพื่อนำไปตัดด้วยเครื่องตัดชิ้นงานเลเซอร์ รุ่น BCL 1309 บริษัท Royal Intertrade Co., Ltd. ให้ได้ ตามมิติมาตรฐาน ASTM D638 ประเภทที่ 1 [3, 14] และ ASTM 790 [15] สำหรับทดสอบสมบัติเชิงกล

**ตาราง 1** ผลการทดสอบของเชิงกลของแต่ละการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบ CCD

Run	FA (X1, wt%)	ES+TiO <sub>2</sub> (X2, wt%)	Tensile Strength (Y1, MPa)	Flexural Strength (Y2, MPa)	Elastic Modulus (Y3, MPa)	Flexural modulus (Y4, MPa)
1	13.75	7.50	20.04	41.97	452.61	1785.35
2	12.50	6.25	21.10	40.85	465.43	1730.75
3	12.50	7.50	25.22	38.02	579.14	1697.12
4	12.50	8.75	22.45	36.88	525.14	1314.99
5	11.25	7.50	21.24	44.94	475.02	1924.54
6	12.50	7.50	24.53	39.12	571.17	1647.93
7	12.50	7.50	24.87	38.72	599.73	1635.14
8	12.50	7.50	25.78	39.72	605.48	1662.18
9	12.50	7.50	24.69	38.36	588.09	1642.02
10	10.00	5.00	22.47	40.58	480.75	1713.18
11	10.00	10.00	18.98	40.81	467.25	1840.03
12	15.00	5.00	17.71	49.61	420.62	2215.13
13	12.50	7.50	24.25	38.15	612.79	1651.21
14	15.00	10.00	18.20	42.51	435.06	1857.71

**2.3. การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลวัสดุประกอบ**

เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, INSTRON, Model EZ-LX) ขนาดโหลด เซลล์ 5 กิโลนิวตัน จะถูกใช้ในการทดสอบแรงดึง และแรงดัด ซึ่งในการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) จะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 ชิ้นทดสอบที่ใช้ เป็นประเภทที่ 1 [3, 14] เพื่อหาค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Elastic Modulus)

ส่วนในการทดสอบแรงดัด (Flexural Test) การทดสอบจะเป็นลักษณะแรงดัดโค้ง 3 จุด (3-Point Bending Test) จะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM 790 เพื่อหาค่าความต้านทานแรงดัด (Flexural Strength) และ ค่าโมดูลัสแรงดัด (Flexural Modulus) [15] โดยทำการทดสอบตัวอย่างละ 6 ซ้ำ แล้วนำค่าเฉลี่ยที่ได้มาวิเคราะห์

### 3. ผลการทดลองและการอภิปราย

#### 3.1. ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

จากการใช้โปรแกรม MINITAB 17 ในการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Design of Experiment : DOE) ด้วยเทคนิคการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) จะได้ผลการออกแบบแสดงดังตารางที่ 1 ผลตอบสนองของสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบที่ได้จากการทดลองภายใต้เงื่อนไขการออกแบบการทดลองแบบ CCD ทั้งหมด 14 การทดลอง ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1

ซึ่งก่อนที่จะนำข้อมูลไปวิเคราะห์ได้มีการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลที่เกิดขึ้นด้วยฟังก์ชัน

Graphical Summary และ Normality Test พบว่าข้อมูลตอบสนองของแต่ละค่าให้แผนภาพฮิสโตแกรมมีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ และมี P-Value มากกว่า 0.05 ซึ่งค่าเฉลี่ย (Mean) และ ค่ามัธยฐาน (Median) มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้น สามารถสรุปผลยืนยันได้ว่าข้อมูลชุดนี้มีการแจกแจงแบบปกติ และได้มีการยืนยันจาก การกระจายตัวของ Residuals พบว่าข้อมูลมีการแจกแจงปกติ (Normal Distribution) มีความเป็นอิสระต่อกัน และมีความเสถียร จากผลที่ได้จากการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง สรุปได้ว่าไม่มีความผิดปกติจากการทดลองที่เกิดขึ้น และข้อมูลมีความน่าเชื่อถือ

**ตารางที่ 2** ค่า P-Value และ F-Value แต่ละเทอมของแบบจำลองการถดถอยของแต่ละผลการตอบสนอง

Response	Term	P-Value	F-Value	F-Value	
Tensile Strength (Y1)	Regression	<b>0.025</b>	5.09	3.87	Significant
	Linear	0.230	1.83	4.74	Insignificant
	Square	0.006	11.95	4.74	Significant
	2-Way Interaction	0.259	1.51	5.59	Insignificant
	Lack-of-fit	<b>0.012</b>	<b>15.20</b>	<b>6.59</b>	<b>Significant</b>
R <sup>2</sup> =81.36%; R <sup>2</sup> -adj.=65.38%					
Flexural Strength (Y2)	Regression	<b>0.020</b>	5.53	3.87	Significant
	Linear	0.043	5.10	4.74	Significant
	Square	0.012	8.75	4.74	Significant
	2-Way Interaction	0.093	3.77	5.59	Insignificant
	Lack-of-fit	<b>0.013</b>	<b>14.73</b>	<b>6.59</b>	<b>Significant</b>
R <sup>2</sup> =82.58%; R <sup>2</sup> -adj.=67.65%					
Elastic Modulus (Y3)	Regression	<b>0.047</b>	3.99	3.87	Significant
	Linear	0.562	0.63	4.74	Insignificant
	Square	0.007	11.22	4.74	Significant
	2-Way Interaction	0.768	0.09	5.59	Insignificant
	Lack-of-fit	<b>0.005</b>	<b>24.21</b>	<b>6.59</b>	<b>Significant</b>
R <sup>2</sup> =77.35%; R <sup>2</sup> -adj.=57.94%					
	Regression	<b>0.022</b>	5.36	3.87	Significant
	Linear	0.095	3.35	4.74	Insignificant

Response	Term	P-Value	F-Value	F-Value	
Flexural	Square	0.013	8.52	4.74	Significant
Modulus (Y4)	2-Way Interaction	0.072	4.48	5.59	Insignificant
	Lack-of-fit	<u>0.001</u>	<u>50.71</u>	<u>6.59</u>	<u>Significant</u>
	R <sup>2</sup> =82.12%; R <sup>2</sup> -adj.=66.79%				

ตารางที่ 3 สมการทำนายผลตอบสนองของสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบ

$$\text{Tensile Strength (MPa)} \quad Y1 = -89.7 + 19.2 * X1 - 0.51 * X2 - 0.837 * (X1)^2 - 0.112 * (X2)^2 + 0.159 * (X1) * (X2)$$

$$\text{Flexural Strength (MPa)} \quad Y2 = 237.1 - 43.5 * X1 + 19.08 * X2 + 1.860 * (X1)^2 - 1.080 * (X2)^2 - 0.293 * (X1) * (X2)$$

$$\text{Elastic Modulus (MPa)} \quad Y3 = -2984 + 557 * X1 + 32 * X2 - 23.0(X1)^2 - 2.9 * (X2)^2 + 1.12 * (X1) * (X2)$$

$$\text{Flexural Modulus (MPa)} \quad Y4 = 14582 - 2980 * X1 + 1492 * X2 + 126.6(X1)^2 - 85.9(X2)^2 - 19.37(X1) * (X2)$$

ผู้วิจัยจึงดำเนินการตรวจสอบความแปรปรวนต่อ โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ( $\alpha=0.05$ ) จะได้ ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ ( $R^2$ ) ค่าการขาดแคลนความเหมาะสมของสมการ (Lack of Fit) ค่าการกระจายข้อมูล (F-Value) ค่าความน่าจะเป็น (P-Value) จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อเป็นการตรวจสอบแหล่งผันแปรของแบบจำลอง หลังประมวลผลแล้วได้ค่าต่าง ๆ ดังสรุปเปรียบเทียบ แต่ละแบบจำลองถดถอยของแต่ละผลตอบสนองดัง ตารางที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยสมการเชิงเส้น (Linear Model) สมการกำลังสอง (Quadratic Model) และ สมการปฏิสัมพันธ์ (Interaction) หรือ อันตรกิริยา พบว่า แบบจำลองการถดถอยของผลตอบสนอง Tensile Strength Elastic Modulus Flexural

Strength และ Flexural Modulus จะมีเฉพาะเทอมยกกำลังสอง (Square) ที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ส่วนแบบจำลองการถดถอยของ Flexural Strength จะมีเทอม Linear ที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ด้วย และแบบจำลองการถดถอยของ Flexural Strength จะมีเฉพาะเทอมอันตรกิริยา (2-Way Interaction) ที่ให้ค่า P-Value มากกว่า 0.05 แต่แบบจำลอง Regression ที่ได้สำหรับผลตอบสนองแต่ละตัว ก็ยังคงให้ P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.05 ดังนั้น แบบจำลองการถดถอยของผลตอบสนองแต่ละตัวที่ได้ จึงมีนัยสำคัญทางสถิติ จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ค่าความผันแปรทั้งหมด 100 หน่วย พบว่า  $R^2$  ของแต่ละแบบจำลองมีค่าที่สูงแตกต่างกัน  $R^2$  มีค่าเท่ากับ 81.36 82.58 77.35 และ 82.12 เปอร์เซ็นต์



สำหรับผลตอบสนอง Tensile Strength Flexural Strength Elastic Modulus และ Flexural Modulus ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ของตัวแปรที่ได้จากผลวิเคราะห์ ANOVA ดังข้างต้น ถูกนำไปเขียนสมการทำนายค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละตัวแปร จะได้สมการทำนายผลตอบสนองแต่ละตัวของวัสดุประกอบในรูป สมการถดถอยที่ระบุในรูปตัวแปร Uncoded Units ดังตารางที่ 3

สมการทำนายสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบจะถูกนำไปวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรที่ได้ เพื่อให้ได้วัสดุประกอบที่มีผลตอบสนองตามต้องการคือ มีความเหนียว มีความต้านทานแรงดึง และแรงบิดงอ ไม่ยืดหยุ่นง่าย ทนสภาพการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้แรงดึงและแรงบิดงอ พบว่าสัดส่วนที่เหมาะสมของสารเติมแต่งสำหรับการเตรียมวัสดุประกอบ ภายใต้พิจารณาค่าความพึงพอใจเชิงสถิติ (Desirability) แล้ว พบว่า มีค่าความพึงพอใจเชิงสถิติสูงสุดถึง 100 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองนั้นอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดที่ให้ค่าสูงสุดในทุกผลตอบสนอง และเข้าใกล้ค่าเป้าหมายความพึงพอใจมากที่สุด นั่นคือ วัสดุประกอบที่เตรียมจากการใช้เถ้าเบาปริมาณร้อยละ 10.8 โดยน้ำหนัก ปริมาณผงเปลือกไข่มผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 7.42 โดยน้ำหนัก (สัดส่วนผงเปลือกไข่มต่อไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็น 2 ต่อ 1) จะทำให้ได้วัสดุประกอบที่มีสมบัติ Tensile Strength เป็น 22.72 เมกะปาสคาล Flexural Strength เป็น 43.11 เมกะปาสคาล Elastic Modulus เป็น 521.5 เมกะปาสคาล และ Flexural Modulus เป็น 1950 เมกะปาสคาล

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการตรวจสอบค่าทำนายสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบที่เตรียมจากสัดส่วนที่เหมาะสมนี้ เพื่อเปรียบเทียบค่าทำนายที่ได้จากแบบจำลองสมการที่ใช้ โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ จะได้ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองสำหรับ Tensile Strength เป็น 22.63 เมกะปาสคาล Flexural Strength เป็น 43.32 เมกะปาสคาล Elastic Modulus เป็น 513.38 เมกะปาสคาล และ Flexural Modulus เป็น 1977.69 เมกะปาสคาล แสดงให้เห็นว่า สมการถดถอยที่ใช้มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นสมการทำนายที่ได้นี้ จึงสามารถนำมาใช้ทำนายได้ในการศึกษาครั้งนี้

### 3.2. การวิเคราะห์กราฟพื้นผิวตอบสนอง

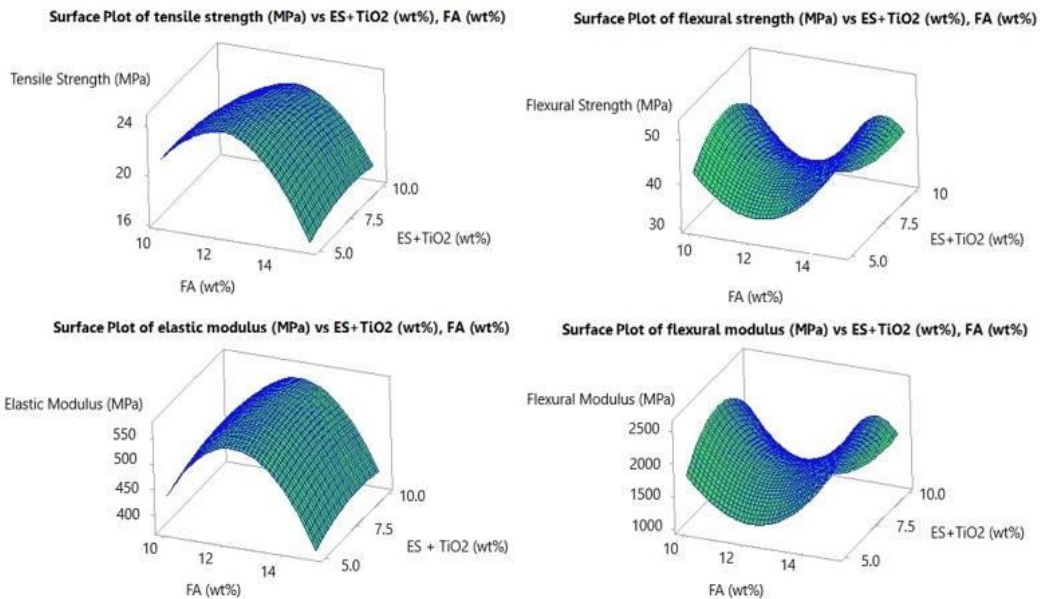
การวิเคราะห์จากกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Plot) จะเป็นการยืนยันความถูกต้องร่วมกับผลลัพธ์จากการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสม (Optimization Analysis) โดยดำเนินการวิเคราะห์เปรียบเทียบพารามิเตอร์เป็นคู่ ในรูปของกราฟพื้นผิว (Surface Plot) ของผลตอบสนองแต่ละตัวดังแสดงใน รูปที่ 1 เมื่อพิจารณาผลตอบสนอง Tensile Strength พบว่า การใช้ปริมาณ FA ที่ต่ำกว่าร้อยละ 12.55 โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้ค่าทนแรงดึงวัสดุประกอบมีค่าสูงเมื่อใช้ปริมาณ ES+TiO<sub>2</sub> ที่อยู่ในช่วงร้อยละ 5 ถึง 7.66 โดยน้ำหนัก ซึ่งค่าการทนแรงดึงสูงสุดเป็น 24.40 เมกะปาสคาล เมื่อใช้ปริมาณ FA ประมาณร้อยละ 12.05 และปริมาณ ES+TiO<sub>2</sub> ประมาณร้อยละ 6.25 โดยน้ำหนัก แต่การใช้ปริมาณ FA และ ES+TiO<sub>2</sub> ที่สูงกว่านี้จะทำให้ค่าทนแรงดึงลดลง

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองของ Flexural Strength พบว่า การใช้ปริมาณ FA ในสัดส่วนต่ำกว่าร้อยละ 10.2 โดยน้ำหนัก และปริมาณ ES+TiO<sub>2</sub> ระหว่างร้อยละ 6.68 ถึง 8.25 โดยน้ำหนัก จะให้วัสดุประกอบที่มีค่าทนแรงดัดสูง แต่เมื่อใช้สัดส่วน FA มากขึ้น จะทำให้ค่าทนแรงดัดลดลงโดยเฉพาะการใช้ปริมาณที่น้อยกว่าหรือมากกว่าช่วงนี้ อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้สัดส่วน FA สูงมากกว่าร้อยละ 14.81 โดยน้ำหนัก และสัดส่วน ES+TiO<sub>2</sub> ระหว่างร้อยละ 5.35 ถึง 8.45 โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้วัสดุประกอบมีค่าทนแรงดัดสูงเช่นเดียวกัน พบค่าสูงสุดประมาณ 53.36 เมกะปาสคาล ที่สัดส่วน FA ร้อยละ 15 และ ES+TiO<sub>2</sub> อยู่ที่ปริมาณร้อยละ 6.78 โดยน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองของ Elastic Modulus ระหว่างผลกระทบรวมกันระหว่างสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ FA และ ES+TiO<sub>2</sub> พบว่า วัสดุประกอบจะมีค่า Elastic Modulus สูงสุด เมื่อใช้ FA ปริมาณร้อยละ 11.92 ถึง 12.68 และ ES+TiO<sub>2</sub> 6.88 ถึง 9.01 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้

เมื่อใช้ FA สัดส่วนประมาณร้อยละ 12.29 และ ES+TiO<sub>2</sub> สัดส่วนประมาณร้อยละ 7.90 โดยน้ำหนัก จะให้ค่า Elastic Modulus สูงที่สุดเป็น 573.30 เมกะปาสคาล แต่การใช้ปริมาณ FA ที่ต่ำกว่าหรือสูงกว่าช่วงนี้จะส่งผลให้ค่า Elastic Modulus ลดลงขึ้นอยู่กับปริมาณ ES+TiO<sub>2</sub> ที่ใช้

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองของ Flexural Modulus ระหว่างผลกระทบรวมกันระหว่างเปอร์เซ็นต์ FA และ ES+TiO<sub>2</sub> พบว่า การใช้ปริมาณ FA ในสัดส่วนที่ต่ำกว่าร้อยละ 10.34 และใช้ ES+TiO<sub>2</sub> ปริมาณร้อยละ 6.25 ถึง 8.85 โดยน้ำหนัก จะให้วัสดุประกอบที่มีค่า Flexural Modulus สูง ซึ่งเมื่อใช้ปริมาณ FA ที่สูงขึ้น และใช้ปริมาณ ES+TiO<sub>2</sub> ที่ต่ำกว่าหรือสูงกว่าช่วงนี้ จะส่งผลให้ค่า Flexural Modulus ลดลง แต่การใช้ปริมาณ FA ที่สูงกว่าร้อยละ 14.75 และปริมาณ ES+TiO<sub>2</sub> ร้อยละ 5.35 ถึง 8.45 โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้วัสดุประกอบมีค่า Flexural Modulus สูง



รูปที่ 1 โครงร่างและกราฟพื้นผิวตอบสนองแต่ละตัวระหว่าง FA (%) และ ES+TiO<sub>2</sub> (%)

แนวโน้มสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบในการศึกษานี้ จะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Goh CK [3] และ Shah AH และคณะ [6] คือ วัสดุประกอบจะมีค่าความต้านทานแรงดึงและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นลดลงเมื่อใช้ปริมาณเถ้าเบาหรือผงเปลือกไข่เพิ่มขึ้น และการใช้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์สูงขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึง และค่าความต้านทานแรงดัดสูงขึ้นมีแนวโน้มใกล้เคียงกับรายงานวิจัยของ Ozsoy I และคณะ [8] ดังนั้น การใช้สารเติมแต่งร่วมกันทั้งสามชนิดด้วยวิธีการขึ้นรูปในการศึกษาครั้งนี้ จะทำให้ได้วัสดุประกอบที่มีสมบัติแรงดัดเทียบเคียงนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทดแทนพลาสติกอื่นๆ ได้ เช่น แผ่นโพลีคาร์บอเนต แผ่นโพลีเอทิลีน แต่อย่างไรก็ตาม ต้องได้รับการพัฒนาด้านสมบัติแรงดึงเพื่อให้เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งาน

#### 4. สรุปผล

จากการวิเคราะห์สมการการถดถอยเชิงสถิติสำหรับแต่ละโมเดล Regression ที่ใช้ในการทำนายสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบ พบว่า ค่า P-Value ของ X1 (ปริมาณ FA) น้อยกว่า ของ X2 (ปริมาณ ES+TiO<sub>2</sub>) อีกทั้งสมการทำนายแสดงให้เห็นว่าค่าสัมบูรณ์ของสัมประสิทธิ์ X1 มีค่ามากกว่าของ X2 จึงยืนยันได้ว่า X1 เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองสมบัติเชิงกลมากกว่า X2 โดยสัดส่วนที่เหมาะสมของสารเติมแต่งสำหรับการเตรียมวัสดุประกอบ คือ การใช้เถ้าเบาที่ผ่านการปรับปรุงปริมาณร้อยละ 10.8 โดยน้ำหนัก ผงเปลือกไข่ปริมาณร้อยละ 4.95 โดยน้ำหนัก ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณร้อยละ 2.47 โดยน้ำหนัก และปริมาณอีพอกซีร้อยละ 81.83 โดย

น้ำหนัก จะทำให้ได้วัสดุประกอบที่มีสมบัติ Tensile Strength = 22.72 เมกะปาสคาล, Flexural Strength = 43.11 เมกะปาสคาล, Elastic Modulus = 521.5 เมกะปาสคาล และ Flexural Modulus = 1950 เมกะปาสคาล อย่างไรก็ตาม หากมีการเตรียมวัสดุด้วยวิธีหรือสภาวะที่ต่างออกไปจากการศึกษานี้ อาจจะทำให้ได้สัดส่วนเหมาะสมและสมบัติวัสดุประกอบที่แตกต่างกัน

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโรงไฟฟ้าขยะมูลฝอยชุมชน ตำบลโนนท่อน อำเภอเมืองขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น ที่เอื้อเฟื้อตัวอย่างเถ้าเบา และขอขอบคุณ ศูนย์วิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยขอนแก่น และ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ได้สนับสนุนงบประมาณส่วนหนึ่งในการศึกษาครั้งนี้

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Sangamesh, Ravishankar KS, Kulkarni SM. Synthesis and comparison of mechanical behavior of fly ash-epoxy and silica fumes-epoxy composite. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017; 225(1): 012299.
- [2] Sim J, Kang Y, Kim BJ, Park YH, Lee YC. Preparation of fly ash/epoxy composites and its effects on mechanical properties. Polymers (Basel). 2020; 12(1): 1–12.

- [3] Goh CK, Valavan SE, Low TK, Tang LH. Effects of different surface modification and contents on municipal solid waste incineration fly ash/ epoxy composites. *Waste Management*. 2016; 58: 309–15.
- [4] Nguyen TA. Effects of the Amount of Fly Ash Modified by Stearic Acid Compound on Mechanical Properties, Flame Retardant Ability, and Structure of the Composites. *International Journal of Chemical Engineering*. 2020; 2020: 6–11.
- [5] Hamdi WJ, Habubi NF. Preparation of epoxy chicken eggshell composite as thermal insulation. *Journal of the Australian Ceramic Society*. 2018; 54(2): 231–5.
- [6] Shah AH, Zhang Y, Xu X, Dayo AQ, Li X, Wang S, et al. Reinforcement of stearic acid treated egg shell particles in epoxy thermosets: Structural, thermal, and mechanical characterization. *Materials (Basel)*. 2018; 11(10): 1872.
- [7] Dash C, Das A, Behera S, Bisoyi DK, Diffractometer X. Influence of Pretreatment on Mechanical properties of Bio waste Eggshell Composite. *Indian Institute of Metals, NMD- ATM 71<sup>st</sup> Annual Technical Meeting; 2017* November 11-14: India; 2017.
- [8] Ozsoy I, Demirkol A, Mimaroglu A, Unal H, Demir Z. The influence of micro- And nano-filler content on the mechanical properties of epoxy composites. *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*. 2015; 61(10): 601–9.
- [9] Bezy NA, Fathima AL. Effect of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on Mechanical Properties of Epoxy- Resin System. *International Journal of Engineering Research and General Science* 2015; 3(5): 143–51.
- [10] Kumar K, Ghosh PK, Kumar A. Improving mechanical and thermal properties of TiO<sub>2</sub> - epoxy nanocomposite. *Composites Part B: Engineering*. 2016; 97: 353–60.
- [11] Singh SK, Singh S, Kumar A, Jain A. Thermo- mechanical behavior of TiO<sub>2</sub> dispersed epoxy composites. *Engineering Fracture Mechanics*. 2017; 184: 241–8.
- [12] Battawi AA, Abed BH, Khuder AWH. Effects of reinforcements ( fiber glass, TiO<sub>2</sub> and Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) with different volume fraction on the mechanical properties of epoxy composite. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2019; 10(1): 507–15.

- [13] วิฑูร วิมลทรง. การศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมโพสิตระหว่างผงซีลีเนียมกับพอลิคาร์บอเนต [วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศิลปากร; 2554.
- [14] ASTM D638-14. ISO 17296-3:2014, Additive manufacturing - General principles. Part 3: Main characteristics and corresponding test methods. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, ASTM International, West Conshohocken. PA; 2014.
- [15] ASTM INTERNATIONAL. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. Annual Book of ASTM Standards. 2002. p. 1–12.