



การศึกษาคุณสมบัติความแข็งและความทนต่อแรงกระแทกของพื้นอีพ็อกซีนาโนคอมโพสิตจากวัสดุทางเลือก

## Hardness and Impact Resistance Study of Flooring Epoxy Nanocomposites from Alternative Materials

เข็มจิต เสนา<sup>1\*</sup> ชัยภัทร เครือหงส์<sup>1</sup> และสายฝน เครือหงส์<sup>1</sup>

Received: December, 2017; Accepted: February, 2018

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาของการเติมสารหรือวัสดุเสริมแรงลงในอีพ็อกซี ซึ่งเป็นโพลิเมอร์ชนิดเทอร์โมเซตติงที่นิยมใช้มากในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นงานไฟเบอร์กลาสเพื่อเป็นชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่าง ๆ ชิ้นส่วนยานยนต์ ซีวีแอลโทรคไฟฟ้า หรือใช้เคลือบพื้นผิว อีกทั้งใช้สำหรับปูพื้นโรงงานและสถานที่ต่าง ๆ ทำให้มีความสวยงาม สะอาดและคงทน โดยวัสดุที่ใช้เติมลงไปมีสองชนิดคือ เถ้าลอย ซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือเป็นปริมาณมากจากการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหิน และวัสดุอีกชนิดหนึ่งคือ นาโนคาร์บอนรูปทิวหอมต่อกันคล้ายโซ่ ซึ่งเป็นรูปหนึ่งของนาโนคาร์บอนที่สามารถสังเคราะห์ได้จากวิธีอาคัยเปลวไฟจากการเผาไหม้โดยใช้ขี้เถ้าของเถ้าลอยคือ ใช้เป็นสารเพิ่มปริมาตรและเพิ่มความแข็งตึง เนื่องจากมีส่วนผสมของซิลิกาและอลูมิน่า และนาโนคาร์บอนรูปทิวหอมต่อกันคล้ายโซ่ซึ่งมีความแข็งของคาร์บอนและมีลักษณะใหม่เป็นโซ่ ทำให้คุณสมบัติทางกลเป็นที่น่าสนใจเมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมและเส้นใยเสริมแรงชนิดอื่น ๆ

คำสำคัญ : การทดสอบคุณสมบัติทางกล; อีพ็อกซีเรซิน; เถ้าลอย; นาโนคาร์บอนรูปทิวหอมต่อกันคล้ายโซ่; นาโนคอมโพสิต;

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, Khon Kaen University

\* Corresponding Author E - mail Address: skhema@kku.ac.th

## Abstract

This article aims to present the study of effects of two additive materials to reinforce materials an epoxy resin matrix, a widely used thermosetting polymer. Epoxy is used in many applications nowadays, such as in fiber glass works, automotive parts, electrical electrodes, coating of surfaces and flooring materials. The first additive material is fly ash, a coal combustion by-products from power plants. The second material comprises Chain-like Carbon Nano-Onions (CLCNOs) which are synthesized from a flame burning process. Using strengthening advantages of fly ash (silica and alumina) and hardness from CLCNOs, the bulk volume, stiffness and hardness of the resin can be increased. These CLCNOs are new chain-structure Nano carbons with interesting mechanical properties in comparison with other additives or reinforced fibers.

**Keywords:** Mechanical Properties Tests; Epoxy Resin; Fly Ash; Chain-Like Carbon Nano-Onions; Nanocomposites;

## บทนำ

ในปัจจุบันพลาสติกมีบทบาทสำคัญในชีวิตของเรามากขึ้นไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์ เครื่องใช้ต่าง ๆ ล้วนมีส่วนประกอบของพลาสติกทั้งสิ้น [1] แต่สำหรับการใช้งานที่ต้องการความแข็งแรงสูงพลาสติกกลับมีข้อด้อย เพราะมีความแข็งแรงน้อยเมื่อเทียบกับโลหะจำพวกเหล็ก ในการแก้ปัญหานี้ได้มีการพัฒนาพลาสติกผสมขึ้นมา คือการนำอนุภาคหรือเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูงมาผสมกับพลาสติก ทำให้พลาสติกมีความแข็งแรงด้านต่าง ๆ สูงขึ้น และยังคงมีน้ำหนักเบา แต่ปัญหายังมีอยู่คือเมื่อเทียบกับโลหะจำพวกเหล็ก วัสดุผสมยังมีความแข็งแรงและความคงทนต่อการขีดข่วนด้อยกว่า ด้วยเหตุผลนี้จึงมีแนวคิดที่จะวิจัยพัฒนาให้วัสดุผสมมีความแข็งแรงมากขึ้น

คอมโพสิตหรือวัสดุผสม (Composite) เป็นวัสดุที่มีหลายเฟส ผลิตจากวัสดุที่เป็นองค์ประกอบสองชนิดหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน ประกอบด้วย วัสดุที่เป็นเนื้อพื้นเรียกว่าเมทริกซ์ และวัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรงซึ่งกระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้นโดยทำหน้าที่ปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของเนื้อพื้นให้สูงขึ้น [2] พลาสติกผสม (Polymer Composite) หรือพลาสติกชนิดเสริมแรง มีโพลิเมอร์เป็นเมทริกซ์ ผสมกับวัสดุเสริมแรง การเสริมแรงจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเรื่องความแข็งแรง ความแข็งแรง ความแข็งตึง หรือความสามารถในการยึดหดตัว โพลิเมอร์ที่นำมาใช้เป็นตัวเชื่อมพลาสติกและเทอร์โมเซตติง [3] พลาสติกที่เสริมแรงด้วยเส้นใย เส้นใยอาจมีความยาวต่อเนื่องตลอดความยาวของเมทริกซ์ หรือกรณีเส้นใยสั้นมีความยาวไม่ต่อเนื่อง เส้นใยอาจกระจายตัวอย่างเป็นระเบียบหรือไม่เป็นระเบียบอยู่ในเมทริกซ์ ความแข็งแรงของวัสดุจะถูกกำหนดโดยคุณสมบัติของเส้นใย สัดส่วนโดยปริมาตรของเส้นใย การเรียงตัว ความยาวและการกระจายตัวของเส้นใย ความแข็งแรงของพันธะซึ่งจะต้องแข็งแรงเพียงพอที่จะป้องกันไม่ให้แรงกระทำจากภายนอกสามารถแยกเส้นใยและเมทริกซ์ออกจากกัน นอกจากนี้ยังสามารถเติมสารต่าง ๆ เข้าไปในเมทริกซ์ เพื่อเพิ่มเนื้อวัสดุและทำให้คุณสมบัติด้านต่าง ๆ ดีขึ้นอีกด้วย

อีพ็อกซี (Epoxy) จัดอยู่ในกลุ่มเทอร์โมเซตติงโพลิเมอร์ (Thermosetting Polymer) คือ เมื่อผ่านกระบวนการผลิตในครั้งแรกแล้วจะมีความแข็งแรงทนทานเป็นอย่างมาก ไม่คืนรูป และไม่สามารถรีไซเคิลหรือนำกลับมาใช้ใหม่ได้ อีพ็อกซีเป็นโคโพลิเมอร์ (Copolymer) หมายความว่า เป็นโพลิเมอร์ชนิดที่ประกอบด้วย โมโนเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยทั่วไปอีพ็อกซีได้จากการทำปฏิกิริยาของบิสฟีนอลเอ (Bisphenol A) กับอีพิคลอโรไฮดรินโมโนเมอร์ (Epichlorohydrin Monomer) และสารเพิ่มความแข็งแรง (Hardener) ซึ่งเป็นสารประเภทโพลิเอมีน (Polyamine) โดยในการทำปฏิกิริยาอาจมีการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้าไปเพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยาด้วยได้ [4] ประโยชน์และการนำไปใช้ของอีพ็อกซีเรซิน คือ ใช้เป็นกาวและสารยึดติด อีพ็อกซีเรซินสามารถใช้ยึดติดกับวัสดุได้หลากหลายประเภท เช่น ไม้ เหล็ก ไฟเบอร์ แก้ว พลาสติก คอนกรีต เป็นต้น นิยมใช้เป็นสารเคลือบผิว ในการเคลือบผิวของอาคาร พื้นอาคาร พื้นโรงงาน เนื่องจากอีพ็อกซีมีคุณสมบัติทนต่อแรงกระแทก การขีดขีด เสียดสี ทนกรดและเบส ทนความร้อนได้ดี แต่ไม่ทนต่อ UV จึงมักถูกประยุกต์ใช้ภายในอาคาร นอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้ในด้านอื่น ๆ เช่น เป็นสารเคลือบภายในถังบรรจุสารเคมี ใช้เป็นแบบหล่อในการผลิตเครื่องมือต่าง ๆ ในทางอุตสาหกรรม อีพ็อกซียังถูกนำไปใช้ในระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าต่าง ๆ ใช้ในการผลิตมอเตอร์ หม้อแปลง เป็นต้น

เถ้าลอย หรือเถ้าปลิว (Fly Ash) คือเถ้าที่หลงเหลือจากกระบวนการเผาไหม้ของถ่านหินลิกไนต์ มีขนาดเล็กและละเอียดมากประกอบด้วยสารหลักคือซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินาหรืออลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และออกไซด์ของธาตุอื่น ๆ เป็นองค์ประกอบ เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการเผาถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจำนวนมาก และถือเป็นขยะอันตรายที่มีกัมมันตรังสีต่ำ ปัญหาทั้งทางด้านสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์โดยเฉพาะบริเวณใกล้เคียง เถ้าลอยมีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน ไปจนถึง 200 ไมครอน เถ้าลอยได้ถูกใช้เป็นสารตัวเติมที่เป็นทรงกลมมานานหลายปี โดยส่วนใหญ่ใช้ในการศึกษาของงานทางวิศวกรรมโยธา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการผลิตคอนกรีตมวลเบาที่มีความแข็งแรงสูง [5] ในปัจจุบันได้มีการนำมาใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และกระบวนการผลิตคอนกรีตต่าง ๆ

นาโนคาร์บอนรูปหัวหอมต่อกันคล้ายโซ่ (Chain-Like Carbon Nono-Onions, CLCNOs) เป็นวัสดุขนาดนาโน ค้นพบโดยบังเอิญมีลักษณะคล้ายนาโนคาร์บอนทรงกลมภายในเป็นชั้น ๆ และจับตัวกันเป็นลูกโซ่ เป็นวัสดุที่ใหม่และสังเคราะห์ได้ง่าย ราคาถูก จึงเป็นนาโนคาร์บอนหลักที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ มีวิธีการสังเคราะห์สองวิธีการด้วยกันคือ วิธีตกตะกอนไอเคมี (CVD) และวิธีอาศัยเปลวไฟจากการเผาไหม้ [6]

ด้วยคุณสมบัติที่ดีในด้านต่าง ๆ ทั้งเถ้าลอยและนาโนคาร์บอนจึงถูกนำมาผสมกับวัสดุชนิดต่าง ๆ โดยเฉพาะโพลิเมอร์ เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกล ทางไฟฟ้า และทางความร้อน ในอดีตจนถึงปัจจุบัน ได้มีการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติของโพลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัว (โพลิเอสเตอร์เรซิน) ผสมกับเถ้าลอย พบว่าอนุภาคเถ้าลอยช่วยเพิ่มค่าความแข็งแรงดึงหรือค่ามอดูลัสการดึงของเรซินทุกช่วงอุณหภูมิ ในขณะที่ความแข็งแรงการดึงสูงสุดจะมีค่าลดลง สืบเนื่องมาจากการขีดขวางความสม่ำเสมอของเนื้อวัสดุ โดยเถ้าลอย อีกทั้งความละเอียดของเถ้าลอยที่มากเกินไปทำให้การกระจายตัวของเถ้าลอยต่ำ และมีการเกาะกลุ่มกันเองของเถ้าลอย โดยได้มีการเติมเถ้าลอยเป็นปริมาณสูง (10 - 40 %) ลงในโพลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัวที่ผ่านการปรับปรุงผิว [5] การเติมเถ้าลอยที่ปริมาณมาก ๆ จะทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงมากขึ้น

แฉ่นตัวน้อยลง (Stiffer) และมีเปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาดลดลง เช่นเดียวกับการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นวัสดุเฟสที่สามลงไปไนโพลีเอสเตอร์ [7] นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาถึงพฤติกรรมการขัดสีของโพลีเอสเตอร์คอมโพสิตที่ผสมแก้วลอยและไฟเบอร์กลาส ความเสียหายที่ขึ้นกับแรงขัดสีและระยะทางการลื่นไถลของแรงนั้น จากการศึกษาพบว่าค่าความเสียหายจากการขัดสี (Wear Loss) จะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อใช้แรงต่ำที่สุดกระทำบนวัสดุที่ผสมแก้วลอยเป็นปริมาณสูงที่สุด [5]

โพลีเมอร์ชนิดอื่นที่นำมาใช้ผสมกับแก้วลอยเพื่อเป็นคอมโพสิตเพื่อใช้งานได้อีกก็มี เช่น โพลีเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำผสมกับแก้วลอยที่ปริมาณสูง 10 - 50 % โดยน้ำหนัก พบว่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุผสมมีค่าสูงสุดที่ปริมาณแก้วลอยเท่ากับ 20 % โดยน้ำหนัก [8] หรือในการผสมโพลีเอทิลีนเทอร์พาทาเรทกับแก้วลอยสามารถลดการหดตัวและเพิ่มสมบัติความต้านทานแรงกดได้สูงถึง 53 % [9] นอกจากนี้ยังได้ศึกษาพบว่าเมื่อเปรียบเทียบการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตลงในโพลีเอทิลีนจะทำให้ความสามารถในการขึ้นรูปได้น้อยกว่าแก้วลอยในปริมาณเท่ากัน ทั้งนี้คาดว่าเนื่องจากผลของรูปร่างแก้วลอยซึ่งมีลักษณะกลม [10] ได้มีการศึกษาความเป็นไปได้ของการเพิ่มปริมาณการใช้แก้วลอยเป็นสารตัวเติมของผลิตภัณฑ์โพลีเอทิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแม่พิมพ์หมุนเหวี่ยง ซึ่งผสมกันทั้งแบบแห้งและแบบเปียก โดยใช้ปริมาณแก้วลอยที่ 20 - 40 % โดยน้ำหนัก พบว่าการผสมแบบเปียก (Melt Blending) สามารถขึ้นรูปได้ดีกว่าแบบแห้ง (Dry Blending) ที่ปริมาณการผสมสูง ๆ แต่สมบัติเชิงกลโดยรวมมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากโพลีเอทิลีนได้รับความเค้นเฉือนมากทั้งการผสมทั้งแบบแห้งและแบบเปียกซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการเสื่อมสภาพของโมเลกุลและทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดต่ำลง และความสามารถเข้ากันได้ระหว่างโพลีเอทิลีนและแก้วลอย ทำให้เนื้อวัสดุคอมโพสิตมีความไม่ต่อเนื่องและมีจุดบกพร่องเกิดขึ้น [11]

วัสดุคอมโพสิตระหว่างอีพ็อกซีเรซินและแก้วลอยได้มีผู้ศึกษาไม่มากนัก แต่ก็ได้มีผลการศึกษาคล้ายกับโพลีเมอร์ชนิดอื่นคือ เมื่อเพิ่มปริมาณแก้วลอยในอีพ็อกซี จะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลง ค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น [5] ในขณะที่มีผลการศึกษาพฤติกรรมความทนต่อแรงกระแทกของอีพ็อกซี/แก้วลอยคอมโพสิต โดยการปรับปรุงผิวแก้วลอยด้วยสารต่าง ๆ พบว่าทำให้พลังงานในการดูดซับและการรับแรงกระแทกมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากมีพลังงานในการยึดเกาะสูงขึ้น เมื่อเทียบกับคอมโพสิตที่ไม่ได้ปรับปรุงผิวแก้วลอย [12] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาในส่วนของเทคนิคการเชื่อมโยงสายโซ่โดยการให้ความร้อนโดยตรงและการใช้คลื่นไมโครเวฟแก่อีพ็อกซีเรซินและแก้วลอยที่ 20 และ 80 phr พบว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟทำให้ระยะเวลาในการเชื่อมสายโซ่สั้นกว่า ความต้านทานแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาดมีค่าสูงกว่า ขณะที่ค่ามอดูลัสแรงดึงและแรงคดมีค่าต่ำกว่าการให้ความร้อนโดยตรง และยังพบว่าค่าความทนต่อแรงกระแทกเมื่อผสมแก้วลอยที่ 20 phr จะมีค่ามากกว่าเมื่อผสมแก้วลอย 80 phr [13]

ในส่วนของนาโนคาร์บอน/โพลีเมอร์คอมโพสิตนั้น ได้มีการศึกษาอย่างต่อเนื่องทั้งคุณสมบัติทางกล ทางไฟฟ้าหรือทางความร้อน อีกทั้งโครงสร้างของนาโนคาร์บอนที่ต่างกันไป เช่น ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (MWNTs: Multi-Wall Carbon Nanotubes) และท่อคาร์บอนผนังชั้นเดียว (SWNTs: Single-Wall Carbon Nanotubes) ซึ่งสมัยก่อนสามารถสังเคราะห์ได้ช้าและมีราคาแพง เมื่อนำมาทำเป็นวัสดุผสมและขึ้นรูปในลักษณะต่าง ๆ จะเห็นว่าการเติมนาโนคาร์บอนลงไปทำให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นหรือความแข็งตึงยืดหยุ่น (Elastic Stiffness) ของโพลีเมอร์สูงขึ้น ตัวอย่างเช่น การทดสอบคุณสมบัติทางกลของโพลีไครไตรนกับท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (MWNTs) ที่สังเคราะห์ด้วยขบวนการทางไฟฟ้าโดยมีความยาวท่อคาร์บอนสองขนาดคือ 15 และ 50 ไมโครเมตร ใส่เป็นปริมาณเพียง 1 %w ทำให้ค่ามอดูลัส

ความยืดหยุ่นของโพลีเมอร์เพิ่มขึ้น 36 % และ 42 % นอกจากนั้นยังพบว่าทั้งสองกรณีให้ค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นประมาณ 25 % อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงและอัตราส่วนของท่อนาโนคาร์บอนจะมีความซับซ้อนมาก โดยพบว่าเมื่อมีท่อนาโนคาร์บอนน้อยกว่า 10 %v ความต้านทานแรงดึงจะลดลง แต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณท่อนาโนคาร์บอนเกินกว่า 15 %v จนถึง 25 %v [14] สำหรับอีพ็อกซีนาโนคาร์บอนคอมโพสิตได้มีผู้ศึกษาคุณสมบัติทางกลของอีพ็อกซีผสมกับท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น และพบว่าค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของการกดมีมากกว่าการดึง ซึ่งอธิบายได้โดยใช้หลักการถ่ายโอนภาระหรือการกระจายความเค้นไปยังท่อนาโนคาร์บอนของการกดซึ่งดีกว่าการดึง [15] นอกจากนั้นยังได้มีการทดสอบอีพ็อกซีผสมกับท่อนาโนคาร์บอนและซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ปริมาณท่อนาโนคาร์บอน 0.1 % ถึง 1 % พบว่าทำให้มีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น มีอัตราการสึกหรอลดลง สำหรับประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ [16]

จากที่กล่าวมาจะเห็นว่าการผสมเถ้าลอยและนาโนคาร์บอนปริมาณมาก ๆ จะทำให้ความต้านทานแรงดึงและความทนต่อแรงกระแทกลดลง แต่จะเพิ่มความต้านทานแรงกด ค่าความแข็งแรงดึงหรือมอดูลัสความยืดหยุ่นทำให้วัสดุไม่แอ่นตัว นอกจากนั้นยังช่วยให้วัสดุผสมลดการหดตัว และสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงขึ้นได้

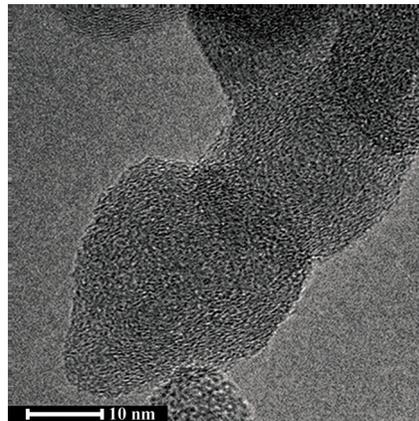
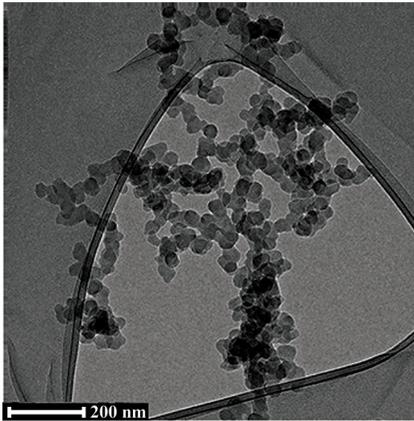
ด้วยเหตุนี้จึงมีแนวคิดในการพัฒนาวัสดุผสมชนิดสามเฟสหรือวัสดุที่ประกอบไปด้วย อนุภาคสามส่วนอยู่ด้วยกันคือ อีพ็อกซี เถ้าลอย และนาโนคาร์บอนรูปห้วทอมต่อกันคล้ายโซ่ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผสมสารตัวเติม เพื่อเพิ่มความทนต่อการขีดข่วนและความแข็งแรงดึง โดยใช้เถ้าลอยซึ่งมีซิลิกาเป็นส่วนผสม ผสมกับอีพ็อกซีเรซินเมทริกซ์ นอกจากนั้นยังผสมนาโนคาร์บอนเข้าไปอีกเพื่อให้มีความแข็งแรงยิ่งขึ้น มีความทนทานต่ออุณหภูมิสูงขึ้น อีกทั้งเป็นสารเพิ่มปริมาณและเป็นการนำวัสดุเหลือใช้ นำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบคุณสมบัติความแข็งแรงและความทนต่อแรงกระแทกที่แปรผันไปตามอัตราส่วนหรือปริมาณส่วนผสมของสารตัวเติมทั้งสองชนิดที่ปริมาณน้อย ๆ (ไม่เกิน 15 %) โดยให้ตัวแปรอื่นคงที่ อีกทั้งทำการส่งกล้องจุลทรรศน์เพื่อดูโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของอีพ็อกซีคอมโพสิตดังกล่าว จากการศึกษาทำให้ทราบถึงปริมาณของสารตัวเติม เพื่อช่วยทำให้คุณสมบัติทางกลบางด้านของอีพ็อกซีดีขึ้นโดยใช้ตัวเติมทั้งสองชนิดที่ปริมาณไม่มากนัก ได้วัสดุที่มีความแข็งแรง มีน้ำหนักเบา ทนต่อการขีดข่วน จึงเป็นการช่วยให้สามารถเลือกวัสดุได้อย่างเหมาะสมกับงานชนิดต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นงานหล่อ เคลือบผิว หรือปูพื้น ได้เป็นอย่างดี

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 1. วัสดุที่ใช้

อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin) ชื่อทางการค้า Yb-128 จากบริษัท C-Society ประเทศไทย มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวใส มีค่าความหนาแน่น 1.16 g/mL เถ้าลอย (Fly Ash) จากโรงไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ประเทศไทย มีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลม ขนาดต่ำกว่า 5 ไมครอน และนาโนคาร์บอนรูปห้วทอมต่อกันคล้ายโซ่ (Chain-Like Carbon Nano-Onions, CLCNOs) นาโนคาร์บอนโครงสร้างหนึ่ง ที่สังเคราะห์ได้เองโดยใช้วิธีอาศัยเปลวไฟจากการเผาไหม้

การสังเคราะห์นาโนคาร์บอนรูปหัวหอมต่อกันคล้ายโซ่ เริ่มจากการตัดแผ่นสแตนเลส 304 ขนาด  $4 \times 4 \text{ cm}^2$  มาทำความสะอาดผิวหน้าแล้วแช่ด้วยสารละลายเอทานอลแล้ววางในอ่างอัลตราโซนิกที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที ปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้องแล้วนำไปเก็บในโถสุญญากาศขึ้นเพื่อรอการใช้งานสำหรับเป็นตัวรองรับและตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์นาโนคาร์บอน ใช้เทียนไขทั่วไป (Candle Light Pratheep, Thailand) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ไล่เทียนขนาด 0.5 เซนติเมตร เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนและความร้อน โดยมีระยะห่างระหว่างแผ่นสแตนเลสกับไล่เทียนประมาณ 3 เซนติเมตร เพื่อให้ได้อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิในการเกิดนาโนคาร์บอนรูปหัวหอมต่อกันคล้ายโซ่ตามที่ต้องการ โดยใช้เวลาในการสังเคราะห์ 5 นาที [6] นาโนคาร์บอนรูปหัวหอมต่อกันคล้ายโซ่ที่สังเคราะห์ได้สามารถเห็นโครงสร้างได้จากรูปที่ 1 โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM)



(ก) ภาพถ่าย TEM ที่กำลังขยาย 10000 เท่า (ข) ภาพถ่าย TEM ที่กำลังขยายสูง รูปที่ 1 ลักษณะและคุณสมบัติของ CLCNOs ที่สังเคราะห์ได้บนแผ่นสแตนเลส 304 ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ด้วยวิธีอาศัยเปลวไฟจากการเผาไหม้ของเทียนไข

## 2. การเตรียมชิ้นงานเพื่อการทดสอบทางกลและทางสัณฐานวิทยา

การเตรียมชิ้นงานเพื่อใช้ในการทดสอบสามารถเตรียมได้โดยใช้แม่พิมพ์ซิลิโคน ตามขนาดและจำนวนที่เป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบการทนต่อแรงกระแทกแบบชาร์ปี ASTM D6110 และมาตรฐานการทดสอบความแข็ง ASTM D785 ผสมอีพ็อกซีเรซินและแก้วลอยโดยใช้วิธีการตวงด้วยบิกเกอร์และชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล จากนั้นคนให้เข้ากันใช้เวลาประมาณ 4 นาที จึงค่อยเติมตัวทำแข็งลงไป กวนให้เข้ากันอีกประมาณ 4 นาที เทลงในแม่พิมพ์ซิลิโคน ทิ้งไว้ให้เย็นภายใต้อุณหภูมิห้องและดูดไล่ฟองอากาศออกโดยใช้ปั๊มสุญญากาศประมาณ 6 - 8 ชั่วโมง การผสมอีพ็อกซีเรซินกับแก้วลอยจะใช้อัตราส่วนผสม 1 2 3 5 10 และ 15 % โดยปริมาตร แล้วจึงนำไปทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งทั้งด้านบนและด้านล่างชิ้นงาน จากนั้นนำอัตราส่วนผสมที่ให้ค่าการทดสอบทางกลดีที่สุดมาใช้ในการทดสอบการผสมแบบสามเฟส (อีพ็อกซี แก้วลอย และนาโนคาร์บอนรูปหัวหอมต่อกันคล้ายโซ่) โดยการผสมอีพ็อกซี/

เถ้าลอยคอมโพสิตด้วยนาโนคาร์บอนรูปทิวทอมต่อกันคล้ายโซ่ลงไปอีกที่อัตราส่วนผสม 1 1.5 2 2.5 และ 3 % โดยปริมาตร ใช้วิธีการผสมและการขึ้นรูปเช่นเดียวกับอีพ็อกซี/เถ้าลอยคอมโพสิต แล้วนำไปทดสอบความแข็ง ส่วนการทดสอบการทนต่อแรงกระแทกก็ใช้วิธีการเตรียมชิ้นงานแบบเดียวกันเพียงแต่ขนาดชิ้นงานมีขนาดต่างกัน

### 3. อุปกรณ์และสภาวะในการทดสอบ

3.1 การทดสอบทางกล การทดสอบความแข็งจะใช้เครื่องทดสอบความแข็ง ยี่ห้อ Instron Wolpert รุ่น Testor 930 และใช้ Rockwell Hardness Scale R (HRR) Major Load 60 กิโลกรัม Minor Load 10 กิโลกรัม Diameter of Indentor 0.5 นิ้ว ในขณะที่เครื่องทดสอบการกระแทกเป็นแบบชาร์ปี ยี่ห้อ CEAST รุ่น Resil Impactor โดยต้องมีการทำรอยบากเสียก่อนด้วยเครื่องทำรอยบาก (Charpy Cutting Machine) ยี่ห้อ BLACKS จากนั้นนำมาทำการวัดความกว้างของฐานถึงรอยบากและความหนาของชิ้นงานด้วยไมโครมิเตอร์บันทึกข้อมูลไว้ ค้อนเทีย่งจะใช้ค้อนเทีย่งขนาด 2.75 จูล ซึ่งมีความเร็วในขณะกระทบ 3.46 เมตรต่อวินาที โดยการทดลองทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง (23°C)

3.2 การทดสอบทางสัณฐานวิทยา เป็นการทดสอบเพื่อคุณลักษณะและการกระจายตัวของเถ้าลอยและอนุภาคนาโนคาร์บอนรูปทิวทอมต่อกันคล้ายโซ่โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการทนต่อแรงกระแทกมาพิจารณาโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ LEO รุ่น 1450 ซึ่งก่อนทำการทดสอบต้องทำการเคลือบฉาบผิวด้วยทอง ด้วยเครื่องฉาบผิวด้วยทอง (Sputter Coater) ภายใต้ภาวะสุญญากาศและให้กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม

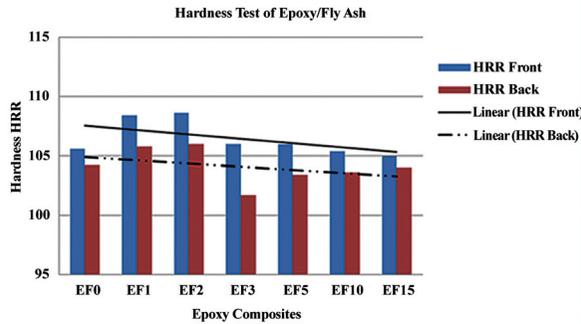
## ผลการทดลอง

### 1. ผลการทดสอบค่าความแข็งแบบรีอคเวลล์ของอีพ็อกซี/เถ้าลอยและนาโนคาร์บอนรูปทิวทอมต่อกันคล้ายโซ่คอมโพสิต

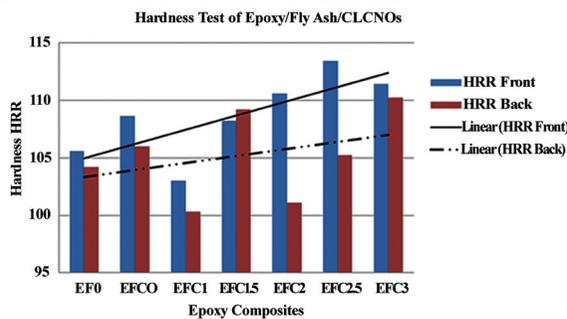
การทดสอบเริ่มจากการทดสอบความแข็งแบบรีอคเวลล์ของชิ้นงานอีพ็อกซีคอมโพสิตผสมกับเถ้าลอยก่อน โดยอัตราส่วนการผสมอยู่ที่ 0 - 15 % โดยปริมาตร (EF0 - EF15) โดยใช้จำนวนชิ้นงานหนึ่งชิ้นต่อหนึ่งตัวอย่าง นำมาครบบริเวณต่าง ๆ 5 จุด ด้านบนและด้านล่างของชิ้นงาน ระยะห่างระหว่างจุดควรห่างกันอย่างน้อย 3 เท่าของขนาดหัวกด ในที่นี้ใช้หัวบอลขนาด ½ นิ้ว แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยได้เป็นค่าความแข็งแบบรีอคเวลล์สเกล R (HRR) จากนั้นนำค่าที่มีความแข็งสูงที่สุด (ในที่นี้คืออัตราส่วนผสมเถ้าลอย 2 % โดยปริมาตร) ไปผสมกับนาโนคาร์บอนรูปทิวทอมต่อกันคล้ายโซ่ที่อัตราส่วนผสม 0 - 3 % โดยปริมาตร (EFC0 - EFC3 โดยที่ EF0 คือ อีพ็อกซีเรซินที่ไม่มีสารตัวเติมใด ๆ) แล้วทำการทดสอบหาค่าความแข็งด้านบนและด้านล่างเพื่อศึกษาการตกตะกอนของอนุภาคอีกครั้ง (รูปที่ 2)

จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งของอีพ็อกซี/เถ้าลอยคอมโพสิตสูงสุดอยู่ที่การผสมเถ้าลอย 2 % แต่โดยรวมแล้วมีแนวโน้มที่จะลดลงทั้งทางด้านบนและด้านล่างของชิ้นงานตามอัตราส่วนการผสมเถ้าลอยที่เพิ่มมากขึ้น สาเหตุน่าจะเกิดจากลักษณะของเถ้าลอยที่มีลักษณะกลมจึงทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคเพิ่มมากขึ้น หรือการจับตัวที่ไม่ค่อยดีนักของเถ้าลอยและอีพ็อกซี ส่วนด้านล่างที่ความแข็งน้อยกว่าด้านบนอาจเป็นเพราะความขรุขระของพื้นผิวด้านล่างของพื้นที่เทอีพ็อกซีลงไปร่วมด้วย และภายหลัง

จากที่นำส่วนผสมนี้ไปผสมกับนาโนคาร์บอนรูปทิวทอมต่อกันคล้ายโซ่แล้วจะเห็นว่าค่าความแข็งมีการแกว่งตัวแต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้งด้านบนและด้านล่างตามปริมาณนาโนคาร์บอนรูปทิวทอมต่อกันคล้ายโซ่ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากนาโนคาร์บอนรูปทิวทอมต่อกันคล้ายโซ่มีลักษณะเป็นสายโซ่จับตัวกับอีพ็อกซีได้ดีกว่าเถ้าลอยและมีความแข็งกว่าเถ้าลอยมาก ทำให้คอมโพสิตมีความแข็งขึ้นทั้งด้านบนและด้านล่าง



(ก) อีพ็อกซี/เถ้าลอย



(ข) อีพ็อกซี/เถ้าลอย/นาโนคาร์บอนรูปทิวทอมต่อกันคล้ายโซ่

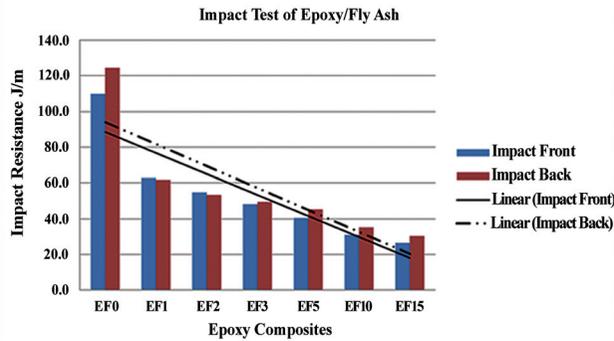
รูปที่ 2 ค่าความแข็งร็อคเวลล์สเกล R ของคอมโพสิตสองเฟสและสามเฟสด้านบนและด้านล่างชิ้นงาน

## 2. ผลการทดสอบค่าการทนต่อแรงกระแทกของอีพ็อกซี/เถ้าลอยและนาโนคาร์บอนรูปทิวทอมต่อกันคล้ายโซ่คอมโพสิต

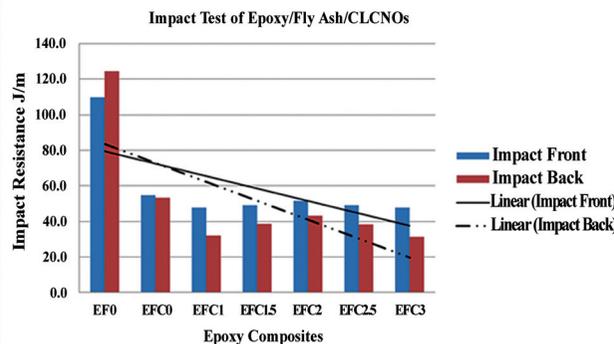
การทดสอบการทนต่อแรงกระแทกแบบชาร์ปีของอีพ็อกซีคอมโพสิตกระทำเช่นเดียวกัน โดยทดสอบกับอัตราส่วนผสมต่าง ๆ กันของเถ้าลอยก่อน ทั้งลักษณะวางเอาด้านบนหงายขึ้นและด้านล่างหงายขึ้น (เพื่อศึกษาความแตกต่างที่เกิดจากการตกตะกอนและความขรุขระของพื้นผิว) แล้วจึงทดสอบการผสมกับนาโนคาร์บอนรูปทิวทอมต่อกันคล้ายโซ่ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ ต่อไป

ผลจากการทดสอบ (รูปที่ 3) จะเห็นว่าค่าพลังงานที่ทำให้เกิดการแตกหักของชิ้นงานวัสดุคอมโพสิต หรือค่าการทนต่อแรงกระแทกของวัสดุคอมโพสิต จะมีค่าน้อยกว่าอีพ็อกซีที่ไม่ผสมสารใด ๆ ก่อนข้างมาก และมีแนวโน้มว่าจะลดลงเมื่ออัตราส่วนผสมของเถ้าลอยและนาโนคาร์บอนรูปทิวทอมต่อกันคล้ายโซ่ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการผสมสารตัวเดิมทำให้การกระจายตัวของแรงภายนอกผ่านไปยังเถ้าลอยหรือนาโนคาร์บอนต้องผ่านรอยต่อระหว่างอนุภาคเถ้าลอย นาโนคาร์บอนและโพลิเมอร์

ทำให้คอมโพสิตรับแรงได้ไม่ตื้นัก โดยผลของการตกตะกอนและลักษณะพื้นผิวจะไม่มีผลกับค่าความทนต่อแรงกระแทกในกรณีของเก้าอี้ลอย แต่จะมีผลเมื่อใส่คาร์บอนรูปทิวหอมต่อกันคล้ายโซ่เข้าไป โดยค่าความทนต่อแรงกระแทกเมื่อวางเอาด้านบนของการหล่อขึ้นรูปขึ้นในการทดสอบแบบชาร์ปี จะมีค่ามากกว่าเมื่อเอาด้านล่างที่เกิดการตกตะกอนและมีพื้นผิวที่ขรุขระกว่าทรงขึ้นทดสอบ



(ก) อิพ็อกซี/เก้าอี้ลอย

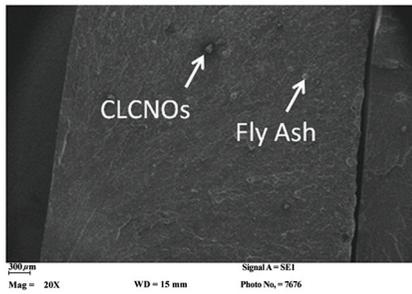


(ข) อิพ็อกซี/เก้าอี้ลอย/นาโนคาร์บอนรูปทิวหอมต่อกันคล้ายโซ่

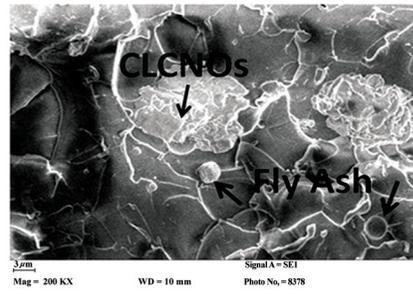
รูปที่ 3 ค่าการทนต่อแรงกระแทกของคอมโพสิตสองเฟสและสามเฟสด้านบนและด้านล่างขึ้นงาน

### 3. ผลของการศึกษาทางสัณฐานวิทยา

จากการศึกษาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จะทำให้เห็นลักษณะผิวของรอยแตกภายหลังการทดสอบการทนต่อแรงกระแทก โดยพฤติกรรมการแตกหักเป็นแบบเปราะ มีผิวแตกหักค่อนข้างขรุขระ จากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะเห็นช่องว่างระหว่างเฟสเก้าอี้ลอยนาโนคาร์บอนรูปทิวหอมต่อกันคล้ายโซ่ และอิพ็อกซี ซึ่งช่องว่างระหว่างเฟสนี้เป็นเหตุทำให้การส่งผ่านแรงเป็นไปได้อย่างยากและเกิดการแตกหักที่จุดนี้ (รูปที่ 4) ซึ่งจะเห็นอนุภาคของเก้าอี้ลอยหรือหลุมของเก้าอี้ลอยที่มีลักษณะกลมติดอยู่ด้านใดด้านหนึ่งของรอยแตก ในขณะที่นาโนคาร์บอนรูปทิวหอมต่อกันคล้ายโซ่ก็จะเป็นสายสั้น ๆ ต่อกันหรือจับกันเป็นกลุ่มตามรูปที่ 4



(ก) กำลังขยาย 20 เท่า



(ข) กำลังขยาย 2000 เท่า

รูปที่ 4 ลักษณะของรอยแตกเมื่อทำการทดสอบความทนต่อแรงกระแทกและรูปร่างของอนุภาคสารตัวเติม

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าทั้งอนุภาคเถ้าลอยและนาโนคาร์บอนรูปทิวหอมต่อกันคล้ายโซ่มีแนวโน้มที่จะเกาะกลุ่มกันเอง (Self Agglomeration) เกิดการกระจายตัวในอีพ็อกซีได้ไม่ดีนัก อีกทั้งในการผสมกันระหว่างโพลีเมอร์และสารตัวเติม ในขณะที่ผสมโพลีเมอร์ได้รับความเค้นเฉือนและความร้อนในปริมาณสูง จึงทำให้โมเลกุลเสื่อมสภาพ เนื้อวัสดุผสมมีความไม่ต่อเนื่องและมีจุดบกพร่อง นอกจากนี้ยังมีฟองอากาศที่เกิดจากความชื้นที่มีอยู่ภายในเมทริกซ์และรอยต่อระหว่างเฟสเถ้าลอยหรือนาโนคาร์บอนกับโพลีเมอร์เมทริกซ์ ที่ไม่สามารถแพร่มาสู่บริเวณผิวของชิ้นงานได้ เนื่องจากความหนืดที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากปฏิกิริยาเชื่อมโยงสายโซ่ระหว่างอีพ็อกซีเรซินกับสารเชื่อมโยง (Hardener) ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักก่อนเวลาอันสมควร

## อภิปรายผลการศึกษา

นาโนคาร์บอนรูปทิวหอมต่อกันคล้ายโซ่เป็นวัสดุใหม่ที่มีโครงสร้างเป็นชั้น ๆ ต่อกันเป็นลูกโซ่ที่สังเคราะห์ได้ง่าย และยังไม่มีการศึกษาคุณสมบัติทางกลที่ขึ้นกับทิศทางการเรียงตัวของสายโซ่เมื่อเปรียบเทียบกับนาโนคาร์บอนชนิดอื่น ๆ การสังเคราะห์นาโนคาร์บอนรูปทิวหอมต่อกันคล้ายโซ่จะคล้ายกับการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนอื่น ๆ แต่จะเป็นการสังเคราะห์ในสภาวะที่มีออกซิเจน กระทำที่อุณหภูมิต่ำหรือปานกลาง (600 - 900 องศาเซลเซียส) เมื่อเทียบกับการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนชนิดอื่น นอกจากการใช้เทียนไขแล้ว เชื้อเพลิงอื่น ๆ ที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์ เช่น เอทิลีน ( $C_2H_4$ ) เอทิลเบนซีน ( $C_6H_5CH_2CH_3$ ) และเอทิลแอลกอฮอล์ ( $C_2H_5OH$ ) [17] บนตัวรองรับและตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น สแตนเลส 304 นิกเกิล เหล็ก เป็นต้น ข้อเสียของการใช้เทียนไขเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนคือ นาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้มีความบริสุทธิ์ต่ำและมีความบกพร่องของโครงสร้างสูง เป็นเพราะสารเติมแต่งสีและกลิ่นในเทียนไข อุณหภูมิและการไหลเวียนของอากาศที่ไม่แน่นอน [18] ทำให้ได้โครงสร้างที่เป็นนาโนคาร์บอนรูปทิวหอมต่อกันคล้ายโซ่ไม่สม่ำเสมอเพราะปัจจัยที่มีผลต่อการเติบโตหรือการเกิดนาโนคาร์บอนคือ เวลา อุณหภูมิ ตัวเร่งปฏิกิริยา และแหล่งของคาร์บอน [19] อย่างไรก็ตามทิศทางการสังเคราะห์นาโนคาร์บอนโดยอาศัยเปลวไฟจากกระบวนการเผาไหม้เป็นวิธีการที่น่าสนใจ เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายต่ำ สะดวก รวดเร็ว และง่ายต่อการดำเนินการผลิตในระดับอุตสาหกรรม [20]

ปริมาณของสารตัวเติมที่นำไปใช้จริงจะขึ้นอยู่กับวิธีการขึ้นรูปหรือขบวนการผลิต ความต้องการความแข็งแรงด้านต่าง ๆ ของชิ้นงาน หรือลักษณะของการนำไปใช้งานของวัสดุคอมโพสิต ซึ่งถ้าเติมวัสดุคอมโพสิตด้วยอนุภาคต่าง ๆ ส่วนใหญ่จะทำให้คุณสมบัติทางกลหลายด้านลดลง แต่จะมีบางด้านเพิ่มขึ้น แต่ในการศึกษาครั้งนี้จะเป็นการเติมสารตัวเติมสองอย่างผสมกัน และเป็นปริมาณไม่มากนัก (ถ้าลายน้อยกว่า 15 % และนาโนคาร์บอนรูปทิวหอมต่อกันคล้ายโซ่อย่างน้อย 3 %) เพื่อดูคุณสมบัติด้านความแข็งแรงและความทนต่อแรงกระแทก

ในการศึกษาครั้งนี้จึงนำเสนอเฉพาะคุณสมบัติทางด้านความแข็งแรงและความทนต่อแรงกระแทกของอิพ็อกซีเรซิน ซึ่งนิยมใช้ในการหล่อเทเป็นพื้นภายในอาคาร เช่น พื้นโรงงานต่าง ๆ ที่ต้องการความแข็งแรงและความทนต่อแรงกระแทกเมื่อมีของหล่นใส่หรือการกระทบกับพื้นเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาคุณสมบัติด้านอื่น ๆ ประกอบด้วย เช่น ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงกด ความต้านทานแรงดัด เป็นต้น อีกทั้งจะเห็นได้ว่าค่าความแข็งแรงและความทนต่อแรงกระแทกมีความแตกต่างกันระหว่างด้านบนและด้านล่างของการเทหล่อ จึงสมควรทำให้พื้นผิวที่จะทำการเทมีความเรียบมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ อีกทั้งการตกตะกอนของเถ้าลอยที่มีค่าความหนาแน่นสูงกว่าอิพ็อกซี ในขณะที่นาโนคาร์บอนรูปทิวหอมต่อกันคล้ายโซ่จะมีความหนาแน่นต่ำกว่าอิพ็อกซีจึงกระจายตัวได้ดีกว่าไม่ตกตะกอนและทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นทั้งด้านบนและล่างดังรูปที่ 5 เมื่อทำการเทพื้นจึงควรทำให้พื้นเรียบและให้อิพ็อกซีเรซินแห้งเร็วไม่เกิดการตกตะกอนเท่าที่จะเป็นไปได้



รูปที่ 5 ภาพถ่าย SEM ของการรวมตัวและตกตะกอนของเถ้าลอยในคอมโพสิต

คุณสมบัติของโพลิเมอร์คอมโพสิตนอกจากจะขึ้นอยู่กับปริมาณของสารตัวเติมแล้วยังขึ้นอยู่กับทิศทางการเรียงตัวของสารตัวเติมนั้น ๆ เช่นเดียวกับเส้นใยที่มีการเติมเข้าไปเพื่อการเสริมแรงทั้งชนิดเส้นใยสั้นและยาว ที่แสดงคุณสมบัติทางกลแตกต่างกันไปตามทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย อีกทั้งขบวนการผลิต ไม่ว่าจะเป็นการหล่อ การฉีด หรือการขึ้นรูปเป็นชิ้น ๆ จึงต้องมีการศึกษาคุณสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตและการเรียงตัวของสารตัวเติมและสารเสริมความแข็งแรงตามขบวนการผลิตแต่ละประเภทที่แตกต่างกันไป

## สรุปผล

จากการศึกษาพบว่า การเติมเถ้าลอยเป็นปริมาณ 2 % และนาโนคาร์บอนรูปทิวหอมต่อกันคล้ายโซ่เป็นปริมาณ 3 % โดยปริมาตร จะทำให้ค่าความแข็งแรงหรือคเวลล์สเกลอาร์ของวัสดุคอมโพสิตมากที่สุด แต่จะลดลง

เมื่อปริมาณเถ้าลอยมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ถ้าดินนาโนคาร์บอนรูปหุ้มห่อกันคล้ายโซ่ที่ผู้วิจัยสังเคราะห์ได้จากวิธีออสัยเปลวไฟจากการเผาไหม้ปริมาณน้อย ๆ ลงไป ค่าความแข็งแรงหรือคเวลล์สเกลลาร์ จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณนาโนคาร์บอนรูปหุ้มห่อกันคล้ายโซ่ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของความแข็งทางด้านบนและด้านล่างซึ่งเป็นบริเวณที่ตกตะกอนอีกทั้งมีความขรุขระของพื้นผิวที่เคลือบจะเห็นว่าพื้นผิวด้านบนมีค่าความแข็งแรงหรือคเวลล์สเกลลาร์สูงกว่าด้านล่างที่มีการตกตะกอนและพื้นผิวขรุขระกว่า ในส่วนของความทนต่อแรงกระแทก ค่าความทนต่อแรงกระแทกจะมากที่สุดเมื่อไม่ได้เติมสารเติมแต่งใด ๆ เลย และลดลงตามปริมาณการผสมเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น ไม่มีความแตกต่างระหว่างการทดสอบชิ้นงานทั้งด้านบนและด้านล่าง ในขณะที่ค่าความทนต่อแรงกระแทกจะลดลงและไม่มีค่าความแตกต่างกันมากนักตามปริมาณนาโนคาร์บอนรูปหุ้มห่อกันคล้ายโซ่ที่เพิ่มขึ้น และเห็นความแตกต่างระหว่างด้านบนและด้านล่างชิ้นงานชัดเจนกว่า โดยเมื่อทงายด้านบนที่ไม่เกิดการตกตะกอนและผิวเรียบกว่าทงายขึ้นเพื่อทำการทดสอบจะมีค่าการดูดซับแรงกระแทกหรือความทนต่อแรงกระแทกมากกว่าเมื่อทงายด้านล่างขึ้น การศึกษาในครั้งนี้จึงได้ทราบผลของการเติมเถ้าลอยและนาโนคาร์บอนรูปหุ้มห่อกันคล้ายโซ่เป็นปริมาณน้อย ๆ ซึ่งได้ผลใกล้เคียงกับการเติมในปริมาณมากของงานวิจัยที่ผ่านมา อีกทั้งค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นเมื่อเติมนาโนคาร์บอนรูปหุ้มห่อกันคล้ายโซ่ลงไป ในอีพ็อกซีเมทริกซ์ ทำให้วัสดุคอมโพสิคนี้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ทนต่อการขีดข่วนได้เป็นอย่างดี

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนขอขอบคุณมหาวิทยาลัยขอนแก่นสำหรับทุนในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมีและภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำหรับคำแนะนำและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้

## References

- [1] Jantathai, W. (2012). **Properties of Polypropylene/Polylactic Acid Reinforced with Cyperaceae Fiber**. M. Eng. Thesis. Khon Kaen University (in Thai)
- [2] Kanchanaworawanich, B. (2008). **Interesting Material: Polymer Composites**. Access (18 October 2017). Available (<https://old.mtec.or.th/academic-services/mtec-knowledge/79>) (in Thai)
- [3] Nakason, C. (2003). **Introduction to Plastic Technology**. Bangkok: Forepace Publisher.
- [4] Kru Aor Chemistry Tutor. (2017). **Epoxy: Do you know**. Access (18 October 2017). Available ([http://www.kru-aor.com/Chem\\_Tips/epoxy.html](http://www.kru-aor.com/Chem_Tips/epoxy.html)) (in Thai)
- [5] S. Sen and N. Nugay. (2000). Uncured and Cured State Properties of Fly Ash Filled Unsaturated Polyester Composites. **Journal of Applied Polymer Science**. Vol. 77, Issue 5, pp. 1128-1136

- [6] Kruehong, S., Kruehong, C., Chindaprasirt, P., and Artnaseaw, A. (2015). Candle Flame Synthesis and Electrochemical Behavior of Chain-like Carbon Nano-onions on 304 Stainless Steel. **Chiang Mai Journal of Science**. Vol. 42, No. 3, pp. 1-7 (in Thai)
- [7] Guhanathan, S., Devi, S. M., and Murugesan, V. (2001). Effect of Coupling Agent on the Mechanical Properties of Fly Ash/Polyester Particulate Composites. **Journal of Applied Polymer Science**. Vol. 82, Issue 7, pp. 1755-1760
- [8] Alkan, C., Arslan, M., Cici, M., Kaya, M., and Aksoy, M. (1995). A Study on the Production of New Material from Fly Ash and Polyethylene. **Resources Conservation and Recycling**. Vol. 13, Issue 3-4, pp. 147-154. DOI: 10.1016/0921-3449(94)00014-V
- [9] Li, Y., White, D. J., and Peyton, R. L. (1998). Composite Material from Fly Ash and Post-consumer PET. **Resources, Conservation & Recycling**. Vol. 24, Issue 2, pp. 87-93
- [10] Sombatsompop, N. and Kositchaiyong, A. (2006). **Research on Wastewater Tanks from Polyethylene-Inorganic Composites for Cost Saving Purposes**. Final Research Report. Office of the Higher Education Commission (OHEC). pp. 49-103 (in Thai)
- [11] Kositchaiyong, A., Mitprasertporn, S., Wimolmala, E., and Sombatsompop, N. (2010). Re-using of Fly Ash Particles from Power-Plant Station as Alternative Filler in Rotational - Moulded Polyethylene Products. **Proceedings of the 48<sup>th</sup> KU Conference**. pp. 1-8 (in Thai)
- [12] Kishore, S. M., Kulkarni, S., Sunil, D., and Sharathchandra, S. (2002). Effect of Surface Treatment on the Impact Behavior of Fly-ash Filled Polymer Composites. **Polymer International**. Vol. 51, Number 12, pp. 1378-1384. DOI: 10.1002/pi.1055
- [13] Chaowasakoo, T. and Sombatsompop, N. (2007). Effects of Curing Techniques and Silane Treatment on Mechanical and Morphological Properties of Fly Ash/Epoxy Composites. **Songklanakarin Journal of Science and Technology**. Vol. 29, No. 1, pp. 217-230 (in Thai)
- [14] R. Andrews, D. Jacques, D. Qian, and T. Rantell. (2002). Multiwall Carbon Nanotubes: Synthesis and Application. **Accounts of Chemical Research**. Vol. 35. No. 12. pp. 1008-1017. DOI: 10.1021/ar010151m
- [15] Ajayan, P. M., Stephan, O., Colliex, C., and Trauth, D. (1994). Aligned Carbon Nanotube Arrays Formed by Cutting a Polymer Resin - Nanotube Composite. **Science**. Vol. 265, Issue 5176, pp. 1212-1214. DOI: 10.1126/science.265.5176.1212
- [16] Nhuapeng, W. (2008) **Carbon Nanotube/Silicon Carbide/Epoxy Resin Nanocomposites**. Final Research Report. Office of the Higher Education Commission (OHEC). November. (in Thai)
- [17] Hall, B., Zhuo, C., Levendis, Y. A., and Richter, H. (2011). Influence of the Fuel Structure on the Flame Synthesis of Carbon Nanomaterials. **Carbon**. Vol. 49, Issue 11, pp. 3412-3423. DOI: 10.1016/j.carbon.2011.04.036

- [18] Y. -Y. Li and C. -C. Hsieh. (2007). Synthesis of Carbon Nanotubes by Combustion of a Paraffin Wax Candle. **Micro and Nano Letters**. Vol. 2, No. 3, pp. 63-66
- [19] Yuan, L., Li, T., and Saito, K. (2003). Growth Mechanism of Carbon Nanotubes in Methane Diffusion Flames. **Carbon**. Vol. 41, Issue 10, pp. 1889-1896
- [20] Kruehong, S., Artnaseaw, A., and Kruehong, C. (2013). Important Factors on the Flame Synthesis of Carbon Nanotubes. **The Journal of Industrial Technology**. Vol. 9, Issue 3, pp. 183-194 (in Thai)