

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติของคอมพอสิตระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลีอ์ไม์ และผลของสารทำให้เกิดฟองที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของวัสดุโพลิคอมพอสิตระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลีอ์ไม์ โดยแบ่งงานวิจัยออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารก่อกวนไซเลน โดยทำการเลือกใช้ไซเลน 2 ชนิด คือ γ -aminopropyl trimethoxy silane (Z-6011) และ N-(3-Trimethoxysilylpropyl) diethylenetriamine (TMS) ต่อสมบัติเชิงกล สมบัติการนำความร้อน และสัณฐานวิทยา ของวัสดุคอมโพสิตของพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลีอ์ไม์

ส่วนที่ 2 ศึกษาผลของปริมาณผงซีลีอ์ไม์ที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติการนำความร้อน และสัณฐานวิทยา ของวัสดุคอมโพสิตของพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลีอ์ไม์ โดยสัดส่วนของผงซีลีอ์ไม์ที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตมี 3 ปริมาณ คือ 10 %, 20 % และ 30 %wt โดยน้ำหนักของคอมโพสิต

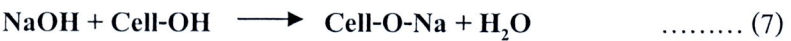
ส่วนที่ 3 ศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟอง 2 ชนิด คือ Hydrocerol HK 40B และ 5-Phenyl-1H-Tetrazole ต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการนำความร้อน และสัณฐานวิทยา ของวัสดุโพลิคอมโพสิตของพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลีอ์ไม์

4.1 ผลของชนิดและปริมาณสารก่อกวนไซเลนที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมพอสิต

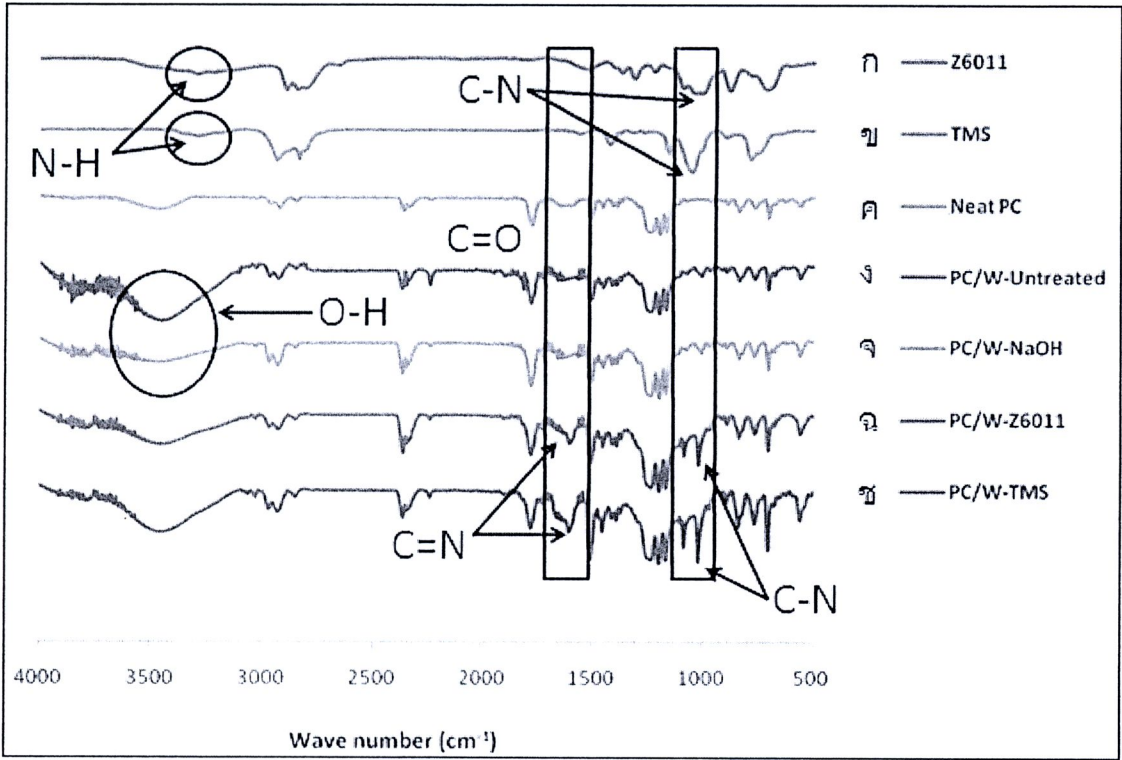
4.1.1 ศึกษาผลของชนิดสารก่อกวนไซเลนที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมพอสิต

ผู้วิจัยจะทำการศึกษาถึงผลของชนิดสารก่อกวนไซเลนที่มีต่อการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพื้นผิวของผงซีลีอ์ไม์กับพอลิเมอร์เมตริกซ์ซึ่งในที่นี้คือพอลิคาร์บอเนต ซึ่งความเข้ากันได้ระหว่างผงซีลีอ์ไม์กับพอลิเมอร์เมตริกซ์นี้จะส่งผลอย่างยิ่งต่อสมบัติต่างๆ ของคอมพอสิต โดยการปรับปรุงผิวผงซีลีอ์ไม์ด้วยการ pre-treatment ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อทำการกำจัดพวกลิกนิน (lignin) ไขมัน (wax) และสารประกอบที่ไม่ใช่เซลลูโลส (non-cellulosic matters) ที่ผิวของเส้นใยออกไป ปฏิกริยาไอโอไนเซชัน (ionization reaction) ที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของ

เซลลูโลสและโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แสดงดังสมการที่ 6 ในการปรับปรุงผิวด้วยวิธีนี้ทำให้พื้นผิวสัมผัสระหว่างผงซีลี้อยู่กับพอลิเมอร์เมทริกซ์เกิดได้มากขึ้น



4.1.1.1 ผลการทดสอบ FTIR



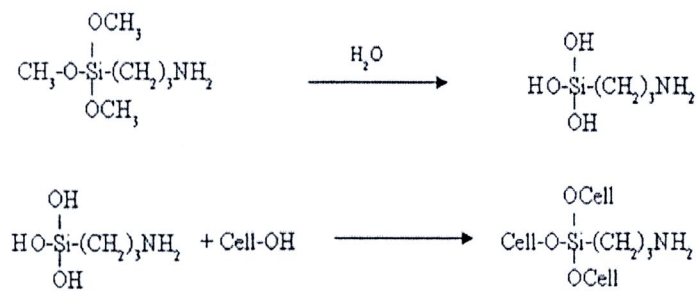
ภาพที่ 36 แสดง FTIR สเปกตรัมของสารคู่ควบไซเลนและพอลิคาร์บอนेटคอมพอสิต (ก) Z6011 silane (ข) TMS silane (ค) Neat PC (ง) PC/W-Untreated (จ) PC/W-NaOH (ฉ) PC/W-Z6011 และ (ช) PC/W-TMS

จากภาพที่ 36 แสดงผลของการปรับปรุงพื้นผิวของผงซีลี้อยู่ไม้ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพื้นผิวของผงซีลี้อยู่ไม้ (W) กับพอลิคาร์บอนेट (PC) โดยใช้เทคนิค FTIR จากการพิสูจน์เอกลักษณ์จะเห็นได้ว่าพอลิคาร์บอนेटคอมพอสิตที่มีการเติมผงซีลี้อยู่ไม้ซึ่งได้รับการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (PC/W-NaOH)

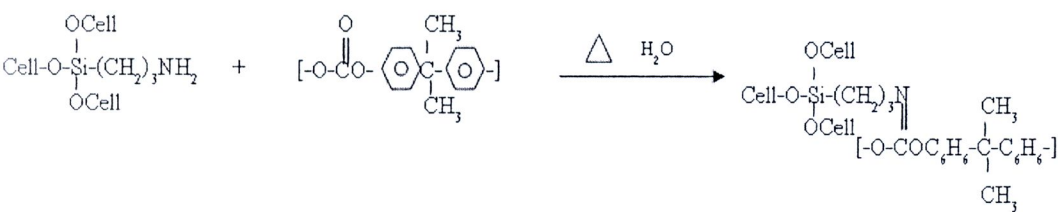
(กราฟเส้น จ) พบพิกัดขึ้นที่ wave number ประมาณ $3300-3500\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งแสดงถึงการ stretching ของหมู่ -OH พิกัดบริเวณนี้จะมีค่าความเข้มของพิกัดที่น้อยลงเมื่อทำการเปรียบเทียบกับพิกัดของพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิตที่มีการใส่ผงซีลีอไมซ์ซึ่งไม่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไป (PC/W-Untreated) (กราฟเส้น ง) ซึ่งการลดลงนี้แสดงถึงการแตกออกของพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ -OH ของโมเลกุลเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส โดยความเข้มข้นของพิกัดที่ลดลงนี้เกิดจากปฏิกิริยาไอออนในเซชันของหมู่ -OH ในโมเลกุลเซลลูโลสกับไซเดียมไฮดรอกไซด์

การปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างผงซีลีอไมซ์กับพอลิคาร์บอเนตจะทำได้โดยใช้สารก่อกวนไฮโดรเจนสองชนิด ได้แก่ γ -aminopropyl trimethoxy silane (Z-6011) (กราฟเส้น ก) และ N-(3-Trimethoxysilylpropyl) diethylenetriamine (TMS) (กราฟเส้น ข) ซึ่งไฮโดรเจนทั้ง 2 ชนิดนี้ ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันสำคัญที่เหมือนกันคือหมู่ NH_2 โดยพิกัดเอกลักษณ์ของ -NH ซึ่งเป็น weak peak อยู่ที่ประมาณ $3300-3400\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ -[O-CO-O] ของพอลิคาร์บอเนตผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่น (Condensation polymerization) นอกจากนี้ยังมีพิกัดเอกลักษณ์ของ C-N stretching ของหมู่เอมีนซึ่งปรากฏในช่วง $1000-1250\text{ cm}^{-1}$ จากภาพที่ 36 เป็นการพิสูจน์เอกลักษณ์ของหมู่ฟังก์ชันในวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลีอไมซ์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยไฮโดรเจน สเปกตรัมที่ได้จากเทคนิค FTIR ของทั้งคอมพอสิตระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลีอไมซ์ที่ปรับปรุงผิวด้วยไฮโดรเจนชนิด Z6011 (กราฟเส้น ฉ) และปรับปรุงผิวด้วยไฮโดรเจน TMS (กราฟเส้น ช) ได้แสดงให้เห็นถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นซึ่งปรากฏพิกัดที่ wave number ประมาณ 1017 cm^{-1} โดยเป็นพิกัดของ C-N stretching ของหมู่เอมีนเป็นการยืนยันได้เป็นอย่างดีถึงปฏิกิริยาควบแน่นระหว่าง hydrolyzed silane และหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลส ดังเช่นปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนชนิด Z-6011 กับพอลิคาร์บอเนตที่เคยถูกศึกษาในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [27] โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างผงซีลีอไมซ์ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไฮโดรเจนชนิด Z-6011 เป็นไปดังภาพที่ 37 และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างผงซีลีอไมซ์ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไฮโดรเจนชนิด Z-6011 และ TMS กับพอลิคาร์บอเนต เป็นไปดังภาพที่ 38 พิกัดที่ปรากฏอีกหนึ่งพิกัดที่ wave number ประมาณ 1610 cm^{-1} บ่งบอกถึงการมีอยู่ของพันธะ C=N ซึ่งเป็นของสารประกอบ imines

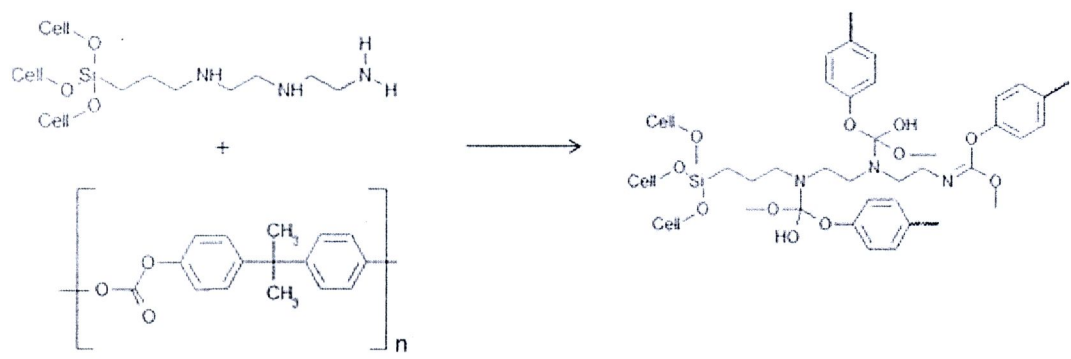
จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ของคอมพอสิตทั้ง 2 ชนิด PC/W-Z6011 และ PC/W-TMS ซึ่งตรวจพบพิกัดของ C=N และ C-N สามารถยืนยันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารก่อกวนไฮโดรเจนกับพอลิคาร์บอเนตได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 37 แสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างไซเลนชนิด Z-6011 กับโครงสร้างเซลลูโลสในผงขี้เลื่อยไม้ [27]

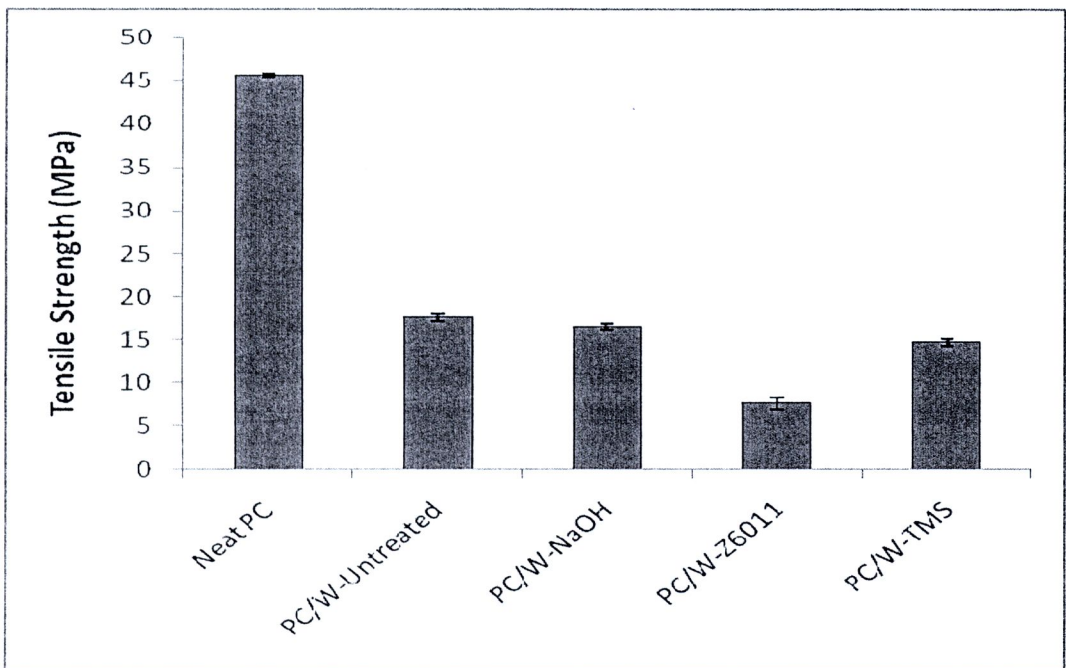


(ก)

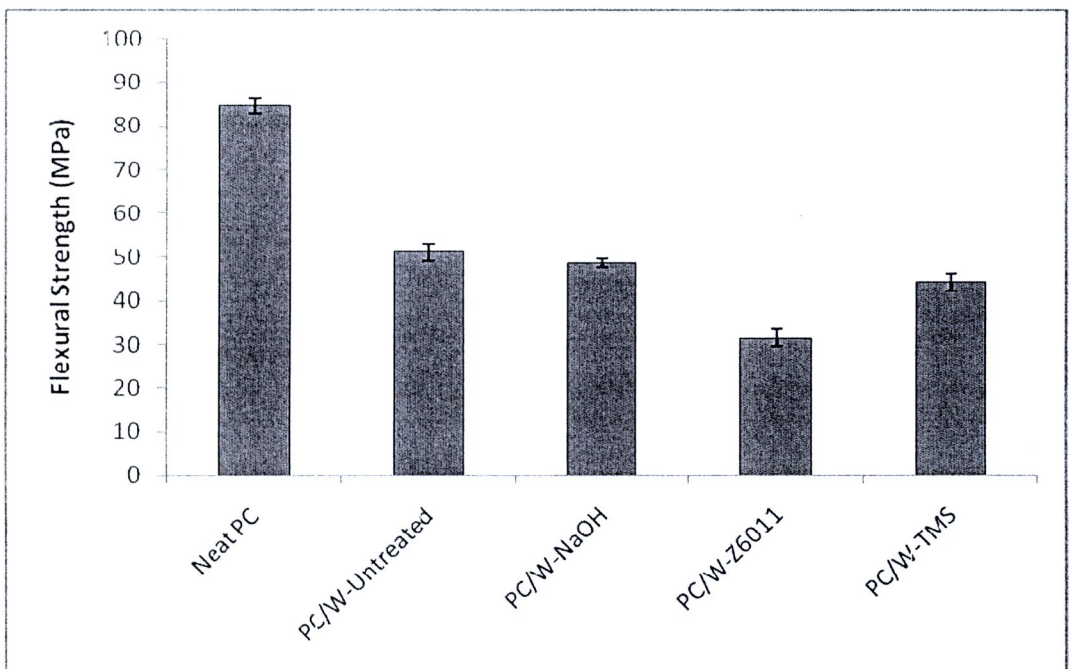


(ข)

ภาพที่ 38 แสดงกลไกปฏิกิริยาระหว่างผงขี้เลื่อยไม้ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลนชนิด (ก) Z6011 (ข) TMS กับพอลิคาร์บอนเนต



ภาพที่ 39 แสดงค่า tensile strength ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต



ภาพที่ 40 แสดงค่า flexural strength ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต

4.1.1.2 ผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิต

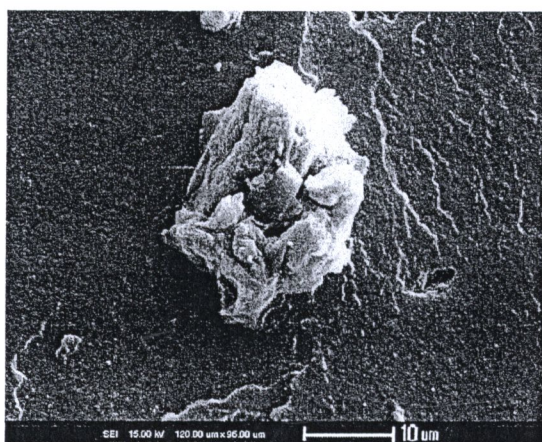
จากภาพที่ 39 ซึ่งแสดงค่า tensile strength ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต ค่า tensile strength ของวัสดุคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยผงซีลี้อยู่ไม่ทั้งที่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (PC/W-NaOH) และที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิว (PC/W-Untreated) มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ (Neat PC) โดยทั่วไปพอลิคาร์บอเนตเป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงค่อนข้างสูง มีสมบัติเชิงกลที่ดีโดยตัวของมันเองอยู่แล้ว การเติมอนุภาคผงซีลี้อยู่ไม่ซึ่งเป็นเฟสที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าลงไปจึงส่งผลให้ความแข็งแรงของพอลิคาร์บอเนตลดลง และเนื่องจากความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์กับวัสดุจำพวกเซลล์ลูโลสจึงอาจทำให้มีช่องว่าง (void) เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อหรือผิวสัมผัสของผงซีลี้อยู่ไม่กับพอลิคาร์บอเนต ซึ่งช่องว่างที่เกิดขึ้นนี้ถือเป็นจุดบกพร่อง (defect) ในชิ้นงาน ดังตัวอย่างที่ได้จากการศึกษาด้วยเทคนิค SEM แสดงในภาพที่ 41 ค ซึ่งแสดงให้เห็นถึงช่องว่าง (void) ที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน การเติมผงซีลี้อยู่ไม่ลงไปโดยไม่ได้มีการปรับปรุงพื้นผิวหรือคำนึงถึงความเข้ากันได้ระหว่างตัวพอลิเมอร์เมตริกซ์จึงส่งผลให้ความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างผิวของผงซีลี้อยู่ไม่กับเนื้อพอลิเมอร์มีน้อย ดังนั้นเมื่อชิ้นงานได้รับแรง บริเวณที่เป็นช่องว่าง (void) ที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดการแตกหักขึ้นก่อนเป็นส่วนแรก เนื่องจากไม่สามารถทำการส่งผ่านแรงไปยังส่วนอื่นๆ ได้ และจะทำให้ภายในเนื้อวัสดุเกิด crack propagation ทำให้รอยแตกหักที่เกิดขึ้นขยายไปทั่วทั้งชิ้นงาน จนในที่สุดส่งผลให้เกิดการแตกหักขึ้นของทั้งชิ้นงาน ส่งผลให้ค่า tensile strength ของ PC/W-Untreated และ PC/W-NaOH มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ Neat PC

การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อการปรับปรุงผิวของผงซีลี้อยู่ไม่พบว่าค่า tensile strength ของ PC/W-NaOH ซึ่งผ่านการปรับปรุงพื้นผิวของผงซีลี้อยู่ไม่แล้ว มีค่าลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับ PC/W-Untreated ซึ่งเป็นคอมพอสิตของผงซีลี้อยู่ไม่ที่ยังผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

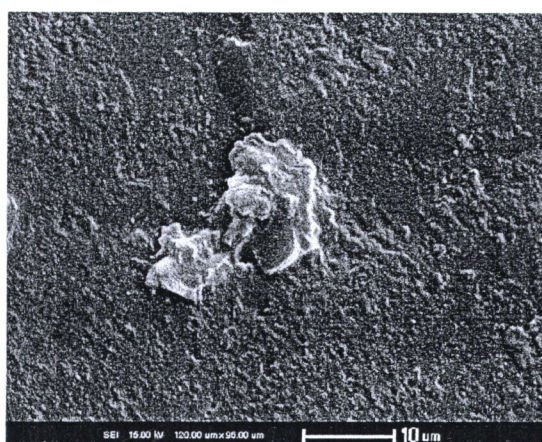
จากภาพที่ 40 แสดงถึงค่า flexural strength ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต วัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลี้อยู่ไม่ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (PC/W-NaOH) และที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิว (PC/W-Untreated) มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ (Neat PC) ซึ่งผลการทดสอบนั้นเป็นไปในแนวโน้มนี้อยู่ไม่เดียวกับผลของค่า tensile strength และสามารถอธิบายด้วยเหตุผลเดียวกัน นั่นคือการเติมผงซีลี้อยู่ไม่ลงไปโดยไม่ได้มีการปรับปรุงพื้นผิวหรือคำนึงถึงความเข้ากันได้ระหว่างตัวพอลิเมอร์เมตริกซ์จะทำให้เกิดช่องว่าง (void) เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อหรือผิวสัมผัสของผงซีลี้อยู่ไม่กับพอลิคาร์บอเนต ส่งผลให้ความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างผิวของผงซีลี้อยู่ไม่กับเนื้อพอลิเมอร์มีน้อย

ลิเมอร์มีน้อย โดยช่องว่างนี้ยังอาจเกิดจากการสลายตัวของผงซีลี้อยู่ ซึ่งจากการทดสอบด้วยเทคนิค TGA พบว่าผงซีลี้อยู่ไม่เริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 220°C และ ณ อุณหภูมิที่ทำการขึ้นรูป ($230\text{--}240^{\circ}\text{C}$) จะเกิดการสลายตัวไปประมาณร้อยละ 8 โดยน้ำหนักของผงซีลี้อยู่ ช่องว่างที่เกิดขึ้นนี้ถือเป็นจุดบกพร่อง (defect) ที่จะทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักเมื่อได้รับแรงโค้งงอ และการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับปรุงพื้นผิวของผงซีลี้อยู่ก็ยิ่งทำให้โครงสร้างเซลล์โลสมีความแข็งแรงลดลงด้วย เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใส่เข้าไปทำลายโครงสร้างผลึกของเซลล์โลส ส่งผลให้ค่า flexural strength ของ PC/W-NaOH (48.6 MPa) มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับ PC/W-Untreated (51.2MPa)

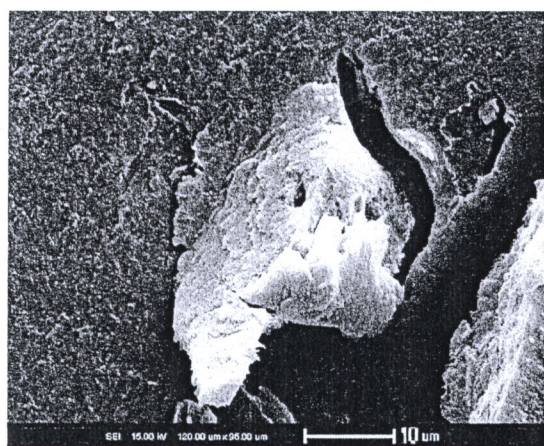
จากภาพที่ 39 และ 40 เมื่อพิจารณาผลของการปรับปรุงผิวของผงซีลี้อยู่ไม่ด้วยไซเลน 2 ชนิด คือ N-(3-Trimethoxysilylpropyl) diethylenetriamine (TMS) และ γ -aminopropyl trimethoxy silane (Z6011) ที่มีต่อ tensile strength และ flexural strength ของวัสดุคอมพอสิต พบว่าค่า tensile strength และ flexural strength ของวัสดุคอมพอสิตมีแนวโน้มที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือวัสดุคอมพอสิตระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลี้อยู่ไม่ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลนชนิด TMS (PC/W-TMS) จะมีทั้งค่า tensile strength และ flexural strength ที่สูงกว่าคอมพอสิตระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลี้อยู่ไม่ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย Z6011 (PC/W-Z6011) ดังนั้นไซเลนชนิด TMS จึงน่าจะแสดงผลของการช่วยในการยึดติดกันหรือปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพื้นผิวของผงซีลี้อยู่ได้กับพอลิคาร์บอเนตได้ดีกว่าไซเลนชนิด Z6011 โดยเหตุผลที่ทำให้ไซเลนชนิด TMS สามารถแสดงประสิทธิภาพในการช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพื้นผิวของผงซีลี้อยู่ไม่กับพอลิคาร์บอเนตได้ดีกว่านั้น น่าจะเนื่องมาจากโครงสร้างของตัว TMS ซึ่งมีหมู่อะมิโนที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอนิลของพอลิคาร์บอเนตได้ด้วยกันถึง 3 หมู่ จึงอาจเกิดปฏิกิริยาที่ช่วยในการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวได้มากกว่าไซเลนชนิด Z6011 โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นน่าจะเป็นปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างไซเลนชนิด TMS กับพอลิคาร์บอเนตน่าจะเป็นไปดังภาพที่ 38 ข จากโครงสร้างดังกล่าวสามารถทำให้การส่งผ่านแรงจากพอลิเมอร์เมตริกซ์ไปยังผงซีลี้อยู่ไม่เกิดได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับโครงสร้างการเชื่อมต่อที่เกิดจากการใช้ไซเลนชนิด Z6011 (ภาพที่ 38 ก) ในการปรับปรุง ดังนั้นจึงส่งผลในการช่วยเพิ่มความสามารถในการรับและกระจายแรงทำให้ค่า strength ของ PC/W-TMS สูงกว่าคอมพอสิตชนิด PC/W-Z6011 ซึ่งจากผลการทดลองกลับพบว่าแม้ว่าเราใช้ไซเลนทั้งสองชนิดช่วยในการปรับปรุงการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวของวัสดุคอมพอสิต แม้จะมีการใช้ไซเลนช่วยในการปรับปรุงความเข้ากันได้แล้วก็ตาม แต่ก็ยังคงมีบางส่วนของพื้นผิวที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุง เมื่อรวมถึงผลของ



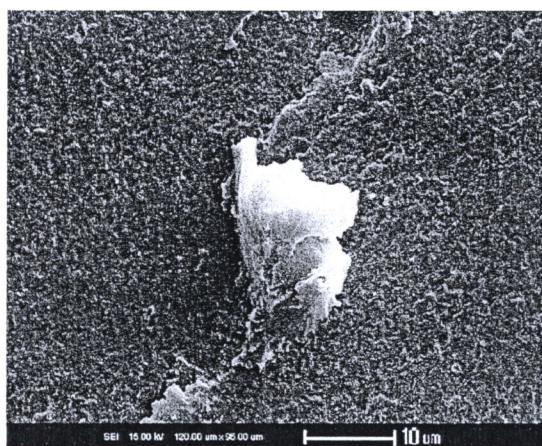
(ก)



(ข)



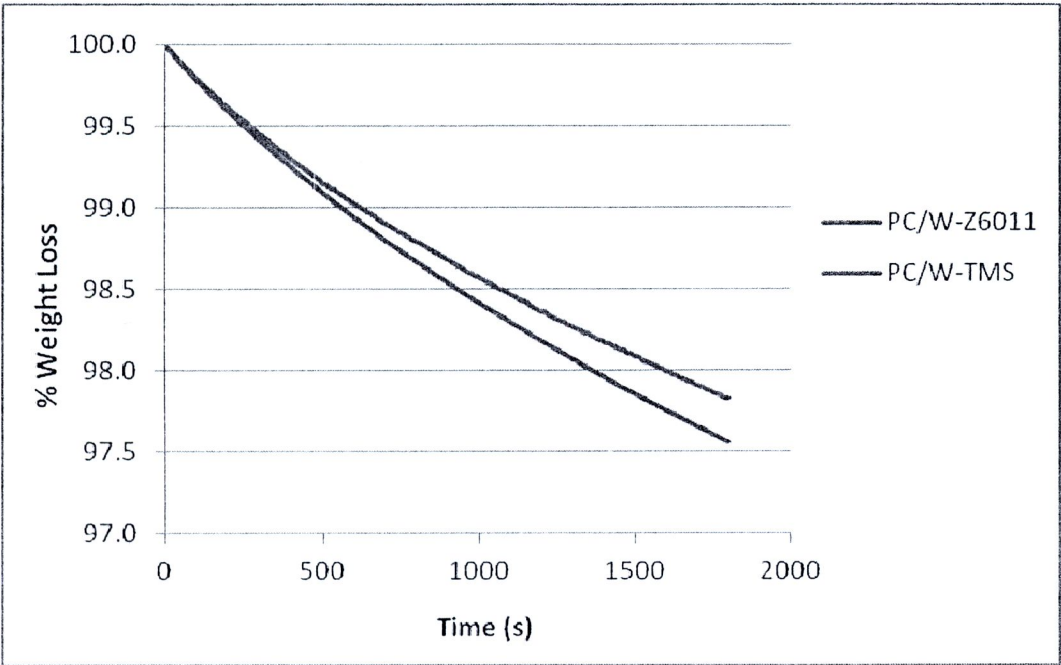
(ค)



(ง)

ภาพที่ 41 แสดงพื้นผิวการแตกหักของวัสดุคอมพอสิต (ก) PC/W-Untreated (ข) PC/W-NaOH (ค) PC/W-Z6011 และ (ง) PC/W-TMS ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

ความไม่เข้ากันอยู่เดิมของวัสดุจำพวกเซลลูโลสกับวัสดุพอลิเมอร์ อีกทั้งความแข็งแรงของผงซีลี้อยู่ที่น้อยกว่าตัวพอลิคาร์บอนเนตจึงส่งผลให้ค่า tensile strength และ flexural strength มีค่าน้อยกว่า Neat PC อยู่ดี



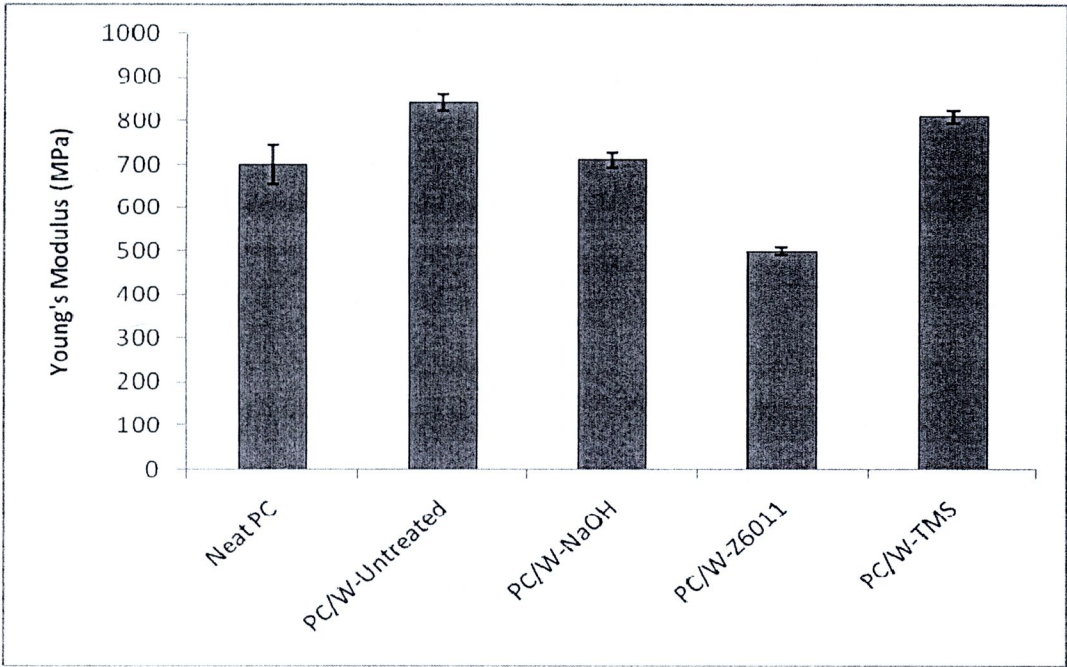
ภาพที่ 42 แสดง TGA thermogram ของพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของผงซีเลื่อยไม้ด้วยไซเลน ณ อุณหภูมิ 240°C คงอุณหภูมิไว้ 30 นาที ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน

เมื่อทำการพิจารณาค่า tensile strength ของคอมพอสิตที่มีการใช้และไม่ได้ใช้ไซเลนในการปรับปรุงพื้นผิว พบว่า PC/W-TMS มีค่า tensile strength ต่ำกว่า PC/W-Untreated เล็กน้อย (17.56 MPa สำหรับ PC/W-Untreated และ 14.74 MPa สำหรับ PC/W-TMS) ซึ่งค่า flexural strength ก็มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ในขณะที่คอมพอสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวโดยไซเลน Z6011 (PC/W-Z6011) มีค่า tensile strength และ flexural strength ที่ต่ำกว่าพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ (Neat PC) และวัสดุคอมพอสิตที่ผ่านการปรับปรุงด้วย NaOH และไซเลนชนิด TMS จะเห็นได้ว่าการปรับปรุงพื้นผิวผงซีเลื่อยไม้ด้วยไซเลนไม่ได้มีส่วนช่วยให้ค่าความแข็งแรงของวัสดุคอมพอสิตเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงของคอมพอสิตลดลง (ในกรณีของ PC/W-Z6011) ซึ่งอาจเกิดจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างไซเลนกับพอลิเมอร์เมตริกซ์ไปมีผลทำให้เกิดการขาดออกของสายโซ่พอลิเมอร์บางส่วน มีผลทำให้น้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์ลดลง นอกจากนี้การขาดออกของสายโซ่พอลิเมอร์ยังทำให้การส่งผ่านแรงภายในพอลิเมอร์เมตริกซ์เป็นไปได้ยากขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของคอมพอสิตโดยรวมลดลง แต่จาก TGA thermogram (ภาพที่ 42) จะเห็นได้ว่า ณ สภาวะขึ้นรูป (compression) ที่ได้รับความร้อนสูงเป็นระยะเวลานานๆ พอลิคาร์บอเนตคอมพอสิตมีการสลายตัวไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (ประมาณ 2.5% โดยน้ำหนัก)

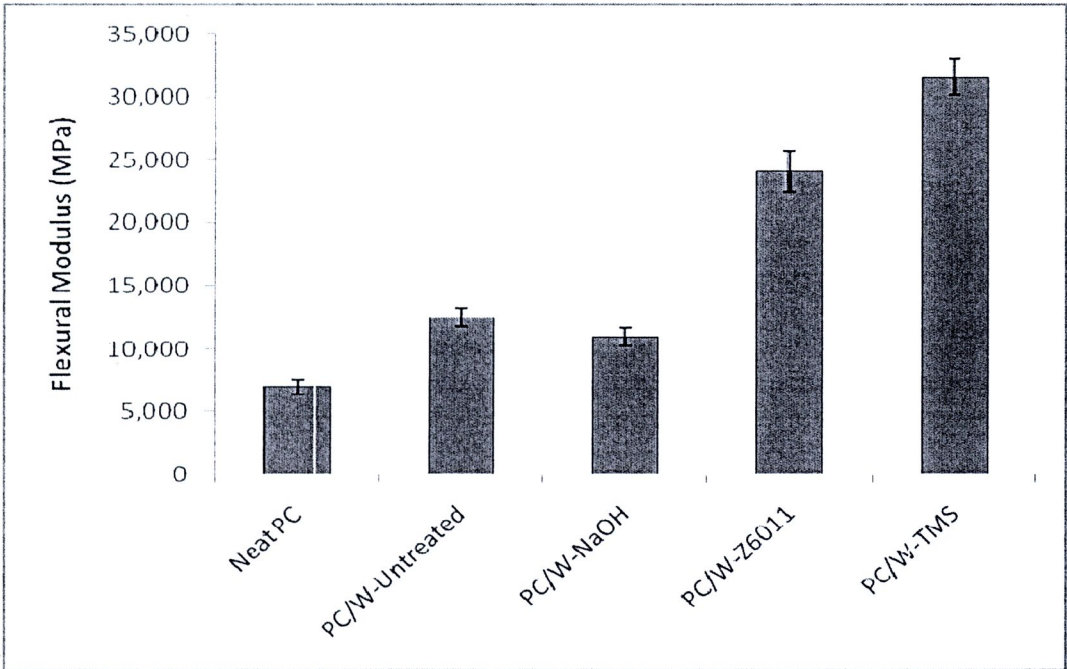
ดังนั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจึงไม่น่าจะทำให้มีการขาดออกจากกันของสายโซ่พอลิเมอร์ ความแข็งแรงของพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิตที่ลดลงจึงเป็นเรื่องที่อธิบายได้ค่อนข้างยาก

โดยปกติอนุภาคของผงไม้ที่ไม่เกิดการยึดติดกับเมตริกซ์จะก่อตัวเป็นช่องว่างเล็กๆ เกิดขึ้นซึ่งนำไปสู่การลดลงของความ stiffness ในโครงสร้างของคอมพอสิต ยิ่งไปกว่านั้นช่องว่างเล็กๆอาจรวมตัวเกิดเป็นช่องว่างที่ใหญ่ขึ้นและนำไปสู่จุดเริ่มต้นของการเกิดรอยแตกอย่างรวดเร็ว [29] ซึ่งเป็นผลให้เกิดการลดลงของค่า tensile strength และอาจเกิดการแตกหักของชิ้นงานได้ เหตุผลที่ได้อธิบายไปนั้นได้รับการสนับสนุนจากภาพที่ 41 ค โดยจะเห็นได้ว่ามีบริเวณที่เป็นช่องว่าง (void) เกิดขึ้นในชิ้นงานของ PC/W-Z6011 โดยช่องว่างที่เกิดขึ้นนี้เกิดระหว่างพื้นผิวของอนุภาคผงไม้กับพอลิเมอร์เมตริกซ์มาจากการยึดติดกันไม่ได้มีระหว่างพื้นผิว ซึ่งช่องว่างที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นส่วนที่ไม่สามารถทำการส่งผ่านแรงไปยังส่วนอื่นๆ ได้ ทำให้มันจะเกิดการแตกหักขึ้นก่อนเป็นส่วนแรก จนเป็นสาเหตุให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักได้ง่าย ส่งผลให้ค่า tensile strength และ flexural strength มีค่าต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับคอมพอสิตอื่นๆ ในระบบ

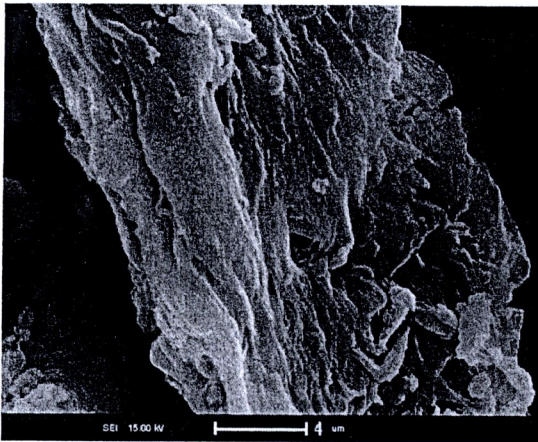
จากภาพที่ 43 แสดงค่า Young's modulus ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ และพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิตที่มีการเติมผงไม้ลงโดยไม่ผ่านการปรับปรุงใดๆ ผงไม้ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมที่แตกต่างกัน 2 ชนิด พบว่าค่า Young's modulus ของพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 699 MPa สำหรับ neat PC ไปเป็น 842 MPa สำหรับ PC/W-Untreated เนื่องจากกลไกนี้เป็นสารที่เป็นองค์ประกอบหนึ่งในไม้อยู่ร่วมกับเซลล์โลสมีโครงสร้างเป็นวงเบนซิน ซึ่งโครงสร้างนี้ทำให้ตัวมันมีความ stiffness การเติมผงไม้ลงไปจึงเป็นการเพิ่มเฟสที่มีความ rigid ในเนื้อพอลิเมอร์เมตริกซ์ให้มากขึ้น ส่งผลให้ค่ามอดูลัสของคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างพื้นผิวของผงไม้จะประกอบด้วยส่วนที่เป็นเซลล์โลสและส่วนที่ไม่ใช่เซลล์โลส เช่น เซมิเซลล์โลส และกลไก การทำ alkaline treatment หรือปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะเป็นการกำจัดกลไกออกไป โดยตรวจสอบได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM จะเห็นได้ว่าอนุภาคผงไม้ที่ไม่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ภาพ 45 ก) จะมีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระ แต่หลังจากผ่านการปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคผงไม้ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้ว พื้นผิวจากที่มีลักษณะขรุขระจะมีความเรียบของพื้นผิวมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด (ภาพ 45 ข) จากการที่กลไกและไขมันบริเวณพื้นผิวหลุดออกไป ทำให้อนุภาคของผงไม้มีขนาดเล็กลง (ภาพ 45 ง) เมื่อโครงสร้างที่มีความ stiffness ถูกกำจัดออกไปรวมถึงขนาดอนุภาคที่เล็กลงจึงส่งผลให้ความแข็งแรงของอนุภาคผงไม้ที่มีลดลงไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบที่พบว่า ค่า Young's modulus ของ PC/W-NaOH มี ค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับ PC/W-Untreated



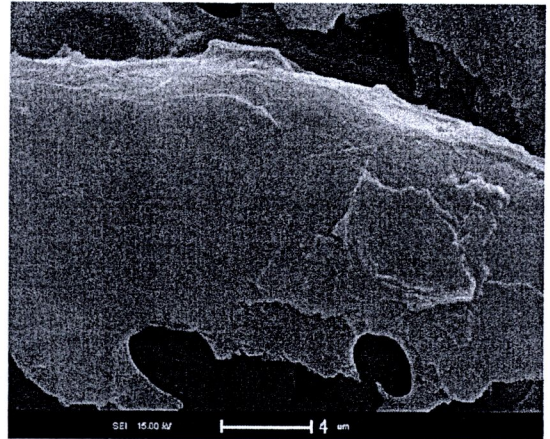
ภาพที่ 43 แสดงค่า Young’s modulus ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต



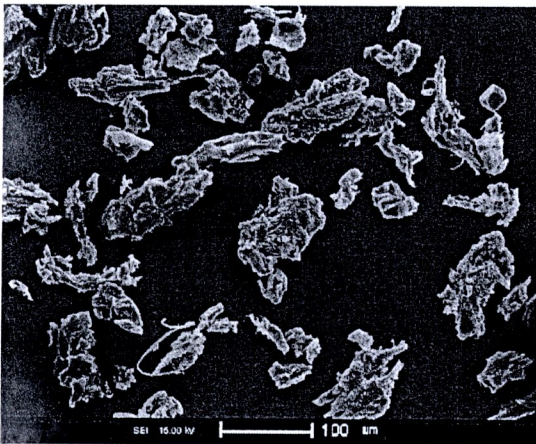
ภาพที่ 44 แสดงค่า flexural modulus ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต



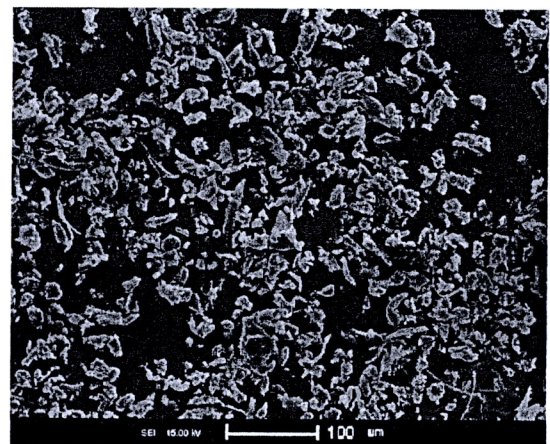
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

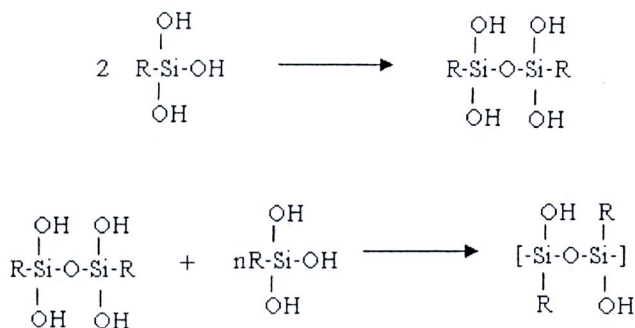
ภาพที่ 45 แสดงพื้นผิวของผงขี้เลื่อยไม้ (ก) Wood-Untreated (ข) Wood-NaOH ที่กำลังขยาย 2500 เท่า (ค) Wood-Untreated และ (ง) Wood-NaOH ที่กำลังขยาย 100 เท่า

ค่า Young's modulus ของพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิตที่มีการเติมผงขี้เลื่อยไม้ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารคู่ควบไซเลน TMS และ Z6011 (ภาพที่ 43) จากการทดสอบพบว่า ค่า Young's modulus ของ PC/W-TMS (809 MPa) มีค่าสูงกว่า PC/W-Z6011 (500 MPa) อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งน่าจะเนื่องมาจากเหตุผลเดียวกันกับผลของ tensile strength และ flexural strength คือ ไซเลนชนิด TMS ได้แสดงผลของการช่วยในการยึดติดกันหรือปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพื้นผิวของผงขี้เลื่อยกับพอลิคาร์บอเนตได้ดีกว่าไซเลนชนิด Z6011 จากปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างไซเลนชนิด TMS กับพอลิคาร์บอเนตดังภาพที่ 38 ข ทำให้การส่งผ่านแรงจากพอลิเมอร์

เมตริกซ์ไปยังผงซีลีเนียมไม่ได้เกิดได้ ตีความเมื่อเทียบกับโครงสร้างการเชื่อมต่อที่เกิดจากการใช้โซเลนชนิด Z6011 ดังภาพที่ 38 ก ดังนั้นผลของค่า Young's modulus จึงเป็นไปในแนวโน้มนัยเดียวกันกับค่า tensile strength และ flexural strength เมื่อทำการพิจารณาผลของการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเลนของวัสดุคอมพอสิตของทั้ง PC/W-Untreated และ PC/W-TMS จะเห็นได้ว่าคอมพอสิตทั้งสองชนิดนี้มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่อยู่ในช่วงเดียวกันซึ่งถือว่าค่า Young's modulus ของวัสดุคอมพอสิตของทั้ง PC/W-Untreated และ PC/W-TMS มีค่าไม่แตกต่างกัน ในส่วนของ PC/W-Z6011 ก็ให้ผลเป็นไปในแนวโน้มนัยเดียวกันกับค่า tensile strength และ flexural strength คือมีค่า Young's modulus ที่น้อยที่สุด สาเหตุที่เป็นเช่นนี้จะเนื่องมาจากบางส่วนของสารคู่ควบโซเลน Z6011 ที่เติมลงไปไม่ได้เกิดปฏิกิริยากับหมู่ OH บนพื้นผิวของผงซีลีเนียม โดยโซเลน Z6011 เกิดการพอลิเมอไรเซชันเป็นพอลิโซเลน หรือพอลิไซลอกเซน (Polysiloxane) ขึ้นในวัสดุคอมพอสิต ดังแสดงในภาพที่ 46 ซึ่งพอลิไซลอกเซน ที่เกิดขึ้นนี้จะเข้าไปทำหน้าที่เป็นเสมือนพลาสติกไซเซออร์ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ผ่านกันได้ง่ายขึ้น [27, 38] ดังนั้นค่า Young's modulus ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกความสามารถในการรับแรงหรือรักษารูปร่างในช่วงที่เป็นอีลาสติคก่อนที่จะเกิดการแตกหักเสียหายจึงมีค่าต่ำกว่าคอมพอสิตตัวอื่นๆ

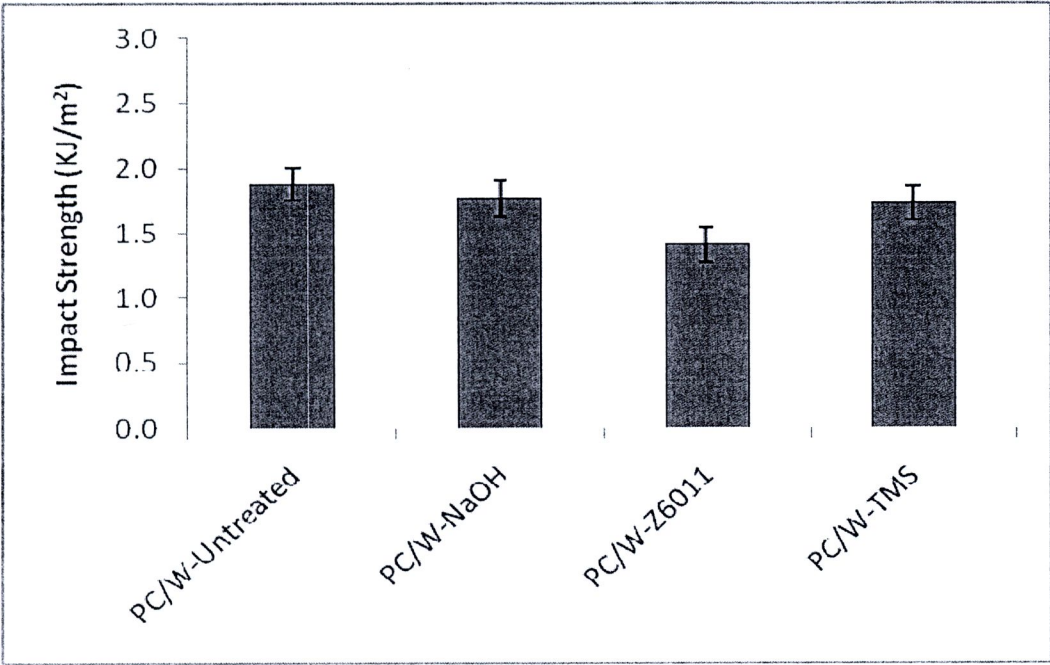
ภาพที่ 44 แสดงค่า flexural modulus ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต ค่า flexural modulus ของวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยผงซีลีเนียมที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุง (PC/W-Untreated) และที่ผ่านการปรับปรุงแล้วด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (PC/W-NaOH) มีแนวโน้มนัยเหมือนกับค่า Young's modulus คือ flexural modulus ของวัสดุคอมพอสิต PC/W-Untreated และ PC/W-NaOH สูงกว่าพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ (Neat PC) ซึ่งน่าจะเป็นผลของความ stiffness ของสายโซ่เซลลูโลสที่แม้ว่าจะยังไม่ได้ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพื้นผิวกับพอลิเมอร์ก็ตาม แต่ความ stiffness ของโครงสร้างผงซีลีเนียมก็ช่วยเพิ่มค่า flexural modulus ของวัสดุคอมพอสิตให้เพิ่มขึ้น และเมื่อได้รับการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ค่า flexural modulus ก็มีแนวโน้มนัยลดลงเช่นเดียวกันกับผลของ Young's modulus ซึ่งเหตุผลที่สามารถอธิบายได้ก็เป็นเช่นเดียวกัน คือโครงสร้างของลิกนินที่มีความ stiffness สูงถูกขจัดออกไป





ภาพที่ 46 แสดงปฏิกิริยาการเกิดพอลิไซลอกเซน (Polysiloxane) [27]

สำหรับค่า flexural modulus ของพอลิคาร์บอนเอตคอมพอสิต โครงสร้างผงซีเลียมที่มีความ stiffness ได้มีส่วนช่วยเป็นอย่างมากในการปรับปรุงค่า modulus ของคอมพอสิต ยิ่งเมื่อทำการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างผงซีเลียมและพอลิคาร์บอนเอตด้วยสารคู่ควบไซเลน จะเห็นได้ว่าค่า flexural modulus ของทั้ง PC/W-TMS และ PC/W-Z6011 มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิคาร์บอนเอตบริสุทธิ์ (Neat PC) และ PC/W-Untreated โดยมีค่าเพิ่มจาก 6,943 MPa สำหรับ Neat PC และ 12,529 สำหรับ PC/W-Untreated ไปเป็น 24,132 MPa สำหรับ PC/W-Z6011 และ 31,590 MPa สำหรับ PC/W-TMS ค่า flexural modulus ที่เพิ่มขึ้นมาอย่างมากมายนี้เป็นผลมาจากการที่ไซเลนได้เข้าไปช่วยในการเชื่อมต่อกันระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์กับอนุภาคของผงซีเลียม เมื่อได้รับแรงโค้งงอวัสดุจะสามารถต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปได้มากเนื่องจากการเชื่อมต่อกันนี้ไปช่วยในการขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ ทำให้การจัดเรียงตัวตามแนวแรงที่ได้รับเป็นไปได้อย่างขึ้น เมื่อพิจารณาค่า flexural modulus ของไซเลนทั้งสองชนิดจะเห็นได้ว่าการใช้ไซเลนชนิด TMS จะให้ผลของการปรับปรุง modulus ที่ดีกว่า ซึ่งเหตุผลก็มาจากกลไกการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางระหว่างตัวไซเลนกับพอลิเมอร์เมตริกซ์ทำให้ความแข็งแรงของการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวมีมากกว่า การเคลื่อนที่ของสายโซ่เมื่อได้รับแรงจึงเป็นไปได้อย่างยากกว่า



ภาพที่ 47 แสดงค่า Impact strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต

จากภาพที่ 47 จะเห็นได้ว่าวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลี้อยไม้ทั้งที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวและได้รับการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่า impact strength ที่ลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ (81.15 kJ/m²) ซึ่งน่าจะเนื่องมาจากความไม่เข้ากันระหว่างผงซีลี้อยไม้กับพอลิคาร์บอเนตรวมถึงแรงยึดเกาะบริเวณพื้นผิว (Interface adhesion) ผงซีลี้อยไม้ที่ใส่เข้าไปจึงไปเป็นจุดบกพร่องในชิ้นงานและจุดเริ่มต้นของการแตกหัก เมื่อชิ้นงานได้รับแรงเข้าไปอย่างทันทีทันใดผงซีลี้อยไม้ที่ใส่เข้าไปจึงไม่สามารถช่วยในการดูดซับแรงให้กับพอลิเมอร์เมตริกซ์ได้ วัสดุจึงเกิดการแตกหักอย่างรวดเร็วโดยที่ไม่สามารถส่งผ่านแรงได้ทัน จากค่า impact strength ของวัสดุคอมพอสิตของทั้ง PC/W-Untreated และ PC/W-NaOH จะเห็นได้ว่าคอมพอสิตทั้งสองชนิดนี้มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่อยู่ในช่วงเดียวกันซึ่งถือว่าการค่า impact strength ของวัสดุคอมพอสิตของทั้ง PC/W-Untreated และ PC/W-NaOH มีค่าไม่แตกต่างกัน

จากการปรับปรุงพื้นผิวของผงซีลี้อยไม้ด้วยไซเลน จะเห็นได้ว่าคอมพอสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของผงซีลี้อยไม้ด้วยไซเลนทั้ง 2 ชนิด ยังคงมีค่า impact strength ที่ลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ แม้ว่าจะมีการปรับปรุงการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวแล้ว แต่จากความไม่เข้ากันระหว่างผงซีลี้อยไม้กับพอลิคาร์บอเนต รวมถึงความแข็งแรงของ

อนุภาคผงซีลี้อยไม้ที่มีน้อยกว่าพอลิคาร์บอเนตมาก ทำให้ผงซีลี้อยไม้ที่ใส่เข้าไปเป็นจุดบกพร่องในชิ้นงานและจุดเริ่มต้นของการแตกหักเมื่อชิ้นงานได้รับแรง เนื่องจากไม่สามารถช่วยในการดูดซับแรงให้กับพอลิเมอร์เมตริกซ์ได้วัสดุจึงเกิดการแตกหักอย่างรวดเร็ว โดยจากกราฟจะเห็นได้ว่าคอมพอสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวผงซีลี้อยไม้ด้วยโซเลนชนิด TMS (PC/W-TMS) มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่อยู่ในช่วงเดียวกันกับคอมพอสิตของ PC/W-Untreated จึงถือว่าค่า impact strength ของวัสดุคอมพอสิตของทั้ง PC/W-Untreated และ PC/W-TMS มีค่าไม่แตกต่างกัน การปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเลนจึงไม่ได้มีส่วนช่วยในการปรับปรุงค่า impact strength ให้สูงขึ้น และเมื่อพิจารณาในส่วน of PC/W-Z6011 จะพบว่ามีความค่า impact strength ที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับคอมพอสิตอื่นๆ ในระบบ ซึ่งก็น่าจะเป็นผลมาจากช่องว่าง (void) ที่ได้รับการยืนยันจากภาพที่ 41 ค ช่องว่างที่เกิดขึ้นนี้ถือเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้พอลิเมอร์เมตริกซ์ไม่สามารถทำการส่งผ่านแรงไปยังส่วนอื่นๆ ได้ ส่งผลให้มันเกิดการแตกหักขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับแรงอย่างทันทีทันใด

4.1.1.3 ผลต่อสมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิต

ในงานวิจัยนี้สมบัติการเป็นฉนวนความร้อน (Thermal insulation) ของวัสดุคอมพอสิตระหว่างผงซีลี้อยไม้กับพอลิคาร์บอเนตจะถูกทำการตรวจสอบ โดยการวัดค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ซึ่งแสดงผลการทดสอบไว้ดังตารางที่ 7 การนำความร้อนคือความสามารถในการถ่ายโอนความร้อนผ่านตัวกลางที่เป็นของแข็งจากพื้นผิวหนึ่งไปยังอีกพื้นผิวหนึ่งในทิศทางปกติ โดยอาศัยผลต่างของอุณหภูมิระหว่างพื้นผิวทั้งสอง [36] จากการทดสอบพบว่า การเติมผงซีลี้อยไม้แม้จะยังไม่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวลงไปก็สามารถที่จะช่วยปรับปรุงสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนให้กับพอลิคาร์บอเนต (neat PC) ได้ ค่าการนำความร้อนของ Neat PC ที่มีค่า 0.1650 W/m K มีค่าลดลงเมื่อมีการเติมผงซีลี้อยไม้ลงไปเหลือ 0.1088 W/m K (สำหรับ PC/W- Untreated) และ 0.1081 W/m K (สำหรับ PC/W- NaOH) เนื่องจากโดยปกติแล้วค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) หรือ K value ของไม้ ($K \sim 0.08$ W/m K) มีค่าน้อยกว่าวัสดุจำพวกพลาสติก ดังนั้นเมื่อทำการเติมผงซีลี้อยไม้ลงไปเฟสของผงซีลี้อยไม้จึงไปลดความสามารถในการนำความร้อนของพอลิเมอร์ให้น้อยลง ทำให้ได้วัสดุคอมพอสิตที่มีสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนที่ดีขึ้น ส่วนการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้นแทบจะไม่ส่งผลใดๆ ต่อสมบัติการนำความร้อนของคอมพอสิตเลย ซึ่งจะเห็นได้จากค่าการนำความร้อนของ PC/W- Untreated และ PC/W- NaOH ที่มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

ตารางที่ 7 แสดงค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิต ที่ปริมาณการใช้ผงซีลีเนียม 10% โดยน้ำหนักของคอมพอสิต

ตัวอย่างชิ้นงาน	ค่าการนำความร้อน (W/m K)
Neat PC	0.1650 ± 0.0018
PC/W- Untreated	0.1088 ± 0.0023
PC/W- NaOH	0.1081 ± 0.0003
PC/W- Z6011 1.0%	0.0904 ± 0.0004
PC/W- TMS 1.0%	0.0941 ± 0.0002

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าคอมพอสิตที่ใช้ไซเลนในการปรับปรุงพื้นผิวของผงซีลีเนียมจะมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับทั้ง Neat PC และ PC/W-Untreated เหตุผลที่เกิดการลดลงของค่าการนำความร้อนในคอมพอสิตนั้นอาจเกิดจากผลของพอลิไซลอกเซน (Polysiloxanes) ซึ่งมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าค่าการนำความร้อนของพอลิคาร์บอเนตคืออยู่ที่ประมาณ 0.13 W/m K [34] จึงพอที่จะคาดเดาได้ว่าพอลิไซลอกเซนที่เกิดขึ้นระหว่างการปรับปรุงพื้นผิวมีผลต่อการลดลงของค่าการนำความร้อนในวัสดุคอมพอสิต โดยวัสดุคอมพอสิต PC/W-Z6011 มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าวัสดุคอมพอสิต PC/W-TMS, PC/W-NaOH และ PC/W-Untreated ซึ่งน่าจะเกิดจากผลของช่องว่างที่มีในคอมพอสิต (ดูได้จากภาพที่ 41 ค) ทำให้สมบัติในการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิต PC/W-Z6011 มีค่าต่ำที่สุด แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนเฉพาะในคอมพอสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้ไซเลนด้วยกันเอง จะเห็นได้ว่ามีค่าการนำความร้อนที่ไม่แตกต่างกันมากนักคือ 0.0904 W/m K สำหรับ PC/W-Z6011 และ 0.0941 W/m K สำหรับ PC/W-TMS

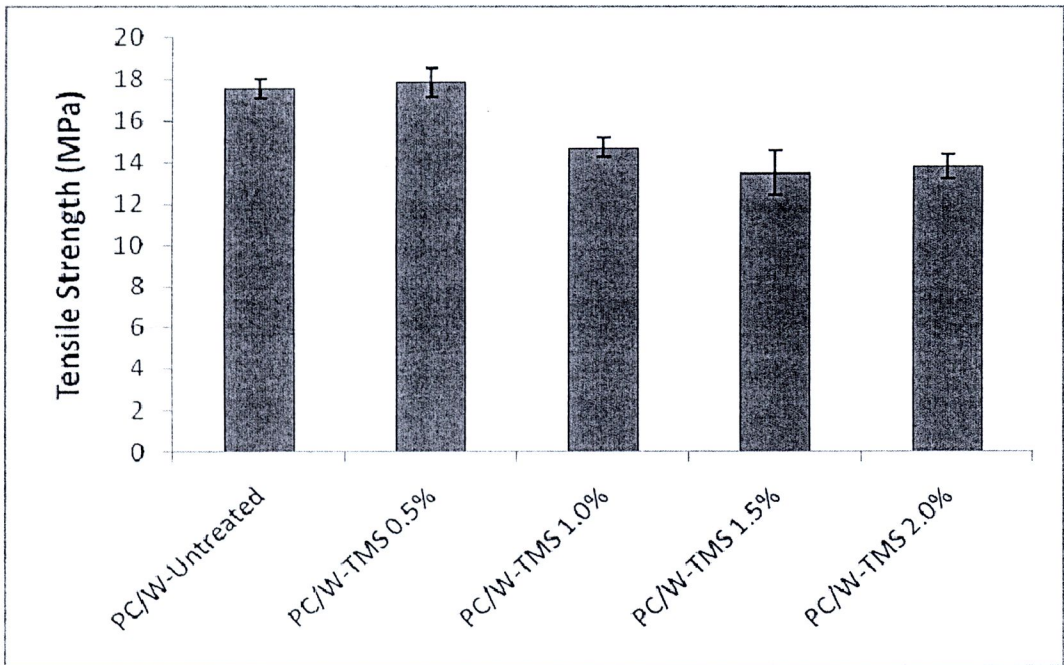
จากการทดสอบสมบัติต่างๆ ของคอมพอสิตที่ได้กล่าวมา จะเห็นได้ว่าการเติมผงซีลีเนียมช่วยปรับปรุงค่า modulus หรือความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนรูปของวัสดุคอมพอสิตให้เพิ่มขึ้นได้ ในขณะที่ความแข็งแรงของพอลิคาร์บอเนตมีค่าลดลงเมื่อเติมผงซีลีเนียมลงไป โดย PC/W- Untreated, PC/W- NaOH และ PC/W-TMS แสดงค่า strength และ Young’s modulus ที่มีค่าใกล้เคียงกัน ขณะที่ PC/W-Z6011 ให้ค่า strength และ Young’s modulus ที่ต่ำที่สุด โดยในส่วนของ flexural modulus ซึ่งเป็นความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนรูปเมื่อได้รับแรงโค้งงอ คอมพอสิตของ PC/W-TMS แสดงค่าการปรับปรุงที่ดีที่สุด โดยสูงกว่าพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์เกือบ 5 เท่า และให้ค่าสูงกว่าคอมพอสิตซึ่งไม่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวของผงซีลีเนียม

เลื่อยไม้ด้วยวิธีใดๆ เลยกว่า 2 เท่า นอกจากนี้แล้ววัสดุคอมพอสิต PC/W-TMS ยังแสดงถึงการเป็น
 จนวนทางความร้อนที่ดีกว่าวัสดุคอมพอสิตตัวอื่นได้ดีพอๆกับ PC/W-Z6011 ซึ่งเป็นคอมพอสิตที่มี
 ค่าการนำความร้อนต่ำสุด ดังนั้นในการวิจัยขั้นต่อไปที่จะทำการศึกษาผลของปริมาณสารคู่ควบไซ
 เลนที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของพอลิคาร์บอนเนตคอมพอสิตกับผงซีเลื่อยไม้ โดยใช้สารคู่ควบไซเลน
 ชนิด N-(3-Trimethoxysilylpropyl) diethylenetriamine ในการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างผงซี
 เลื่อยไม้กับพอลิคาร์บอนเนต

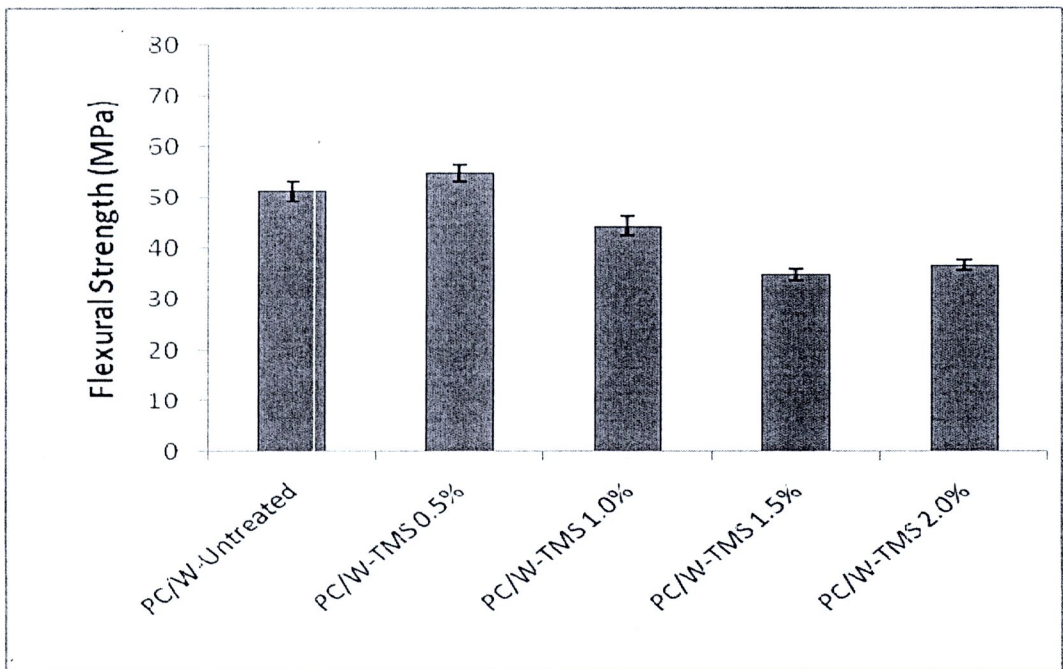
4.1.2 ศึกษาผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมพอสิต

4.1.2.1 ผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิต

โดยทั่วไปแล้วสารคู่ควบไซเลนจะเป็นสารที่ช่วยในการปรับปรุง
 ความสามารถในการยึดเกาะกันระหว่างพื้นผิวของตัวพอลิเมอร์เมตริกซ์กับฟิลเลอร์หรือสาร
 เสริมแรง ผลที่ได้จากการปรับปรุงจะขึ้นอยู่กับชนิดของไซเลนและปริมาณการใช้ที่เหมาะสม
 จากภาพที่ 48 แสดงผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนชนิด TMS สำหรับปรับปรุงความเข้ากันได้
 ระหว่างพื้นผิวของผงซีเลื่อยไม้กับพอลิคาร์บอนเนตที่มีต่อค่า tensile strength ของวัสดุคอมพอสิต
 ในปริมาณการใช้ไซเลนที่ความเข้มข้น 0.5%, 1.0%, 1.5% และ 2.0% โดยน้ำหนัก พบว่าความ
 เข้มข้นของ TMS ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อใช้ในการปรับปรุงความเข้ากันได้อยู่ที่ 0.5 wt.% ที่ปริมาณ
 การใช้ TMS น้อยๆ นี้ได้ส่งผลให้เกิดการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวของพอลิคาร์บอนเนตกับอนุภาคผง
 ซีเลื่อยไม้ที่ดีขึ้น สังเกตได้จากเมื่อเพิ่มปริมาณการปรับปรุงด้วยไซเลน TMS ค่า tensile strength จะ
 มีแนวโน้มที่ลดลง แต่จะเห็นได้ว่ามีค่าไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อเทียบกับวัสดุคอมพอสิตของพอลิ
 คาร์บอนเนตกับผงซีเลื่อยไม้ที่ไม่ได้รับการปรับปรุงผิว (จาก 17.56 MPa สำหรับ PC/W-Untreated
 ไปเป็น 17.86 MPa สำหรับ PC/W-TMS 0.5%) อาจเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยา self-condensation
 ของสารคู่ควบไซเลนทำให้เกิดเป็นโมเลกุลของสารที่มีความ flexible [39, 40] นั่นก็คือ
 polysiloxane ซึ่งจะเกิดบนพื้นผิวของผงซีเลื่อยไม้ โดย polysiloxane ที่เกิดนี้จะไปเป็นตัวขัดขวาง
 ให้ความว่องไวของการเข้าทำปฏิกิริยาระหว่างพื้นผิวของผงซีเลื่อยไม้กับพอลิคาร์บอนเนตลดลง ทำ
 ให้ความสามารถในการที่จะยึดติดกันได้ระหว่างพื้นผิวทั้งสองลดลง ส่งผลให้ความแข็งแรงของ
 คอมพอสิตลดลง แนวโน้มของ tensile strength จึงมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณการใช้ TMS
 โดยปฏิกิริยา self condensation ของไซเลนที่ทำให้เกิดเป็น polysiloxane นั้นสามารถตรวจสอบได้



ภาพที่ 48 แสดงค่า tensile strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการปรับปรุงด้วยไซเลนชนิด TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน

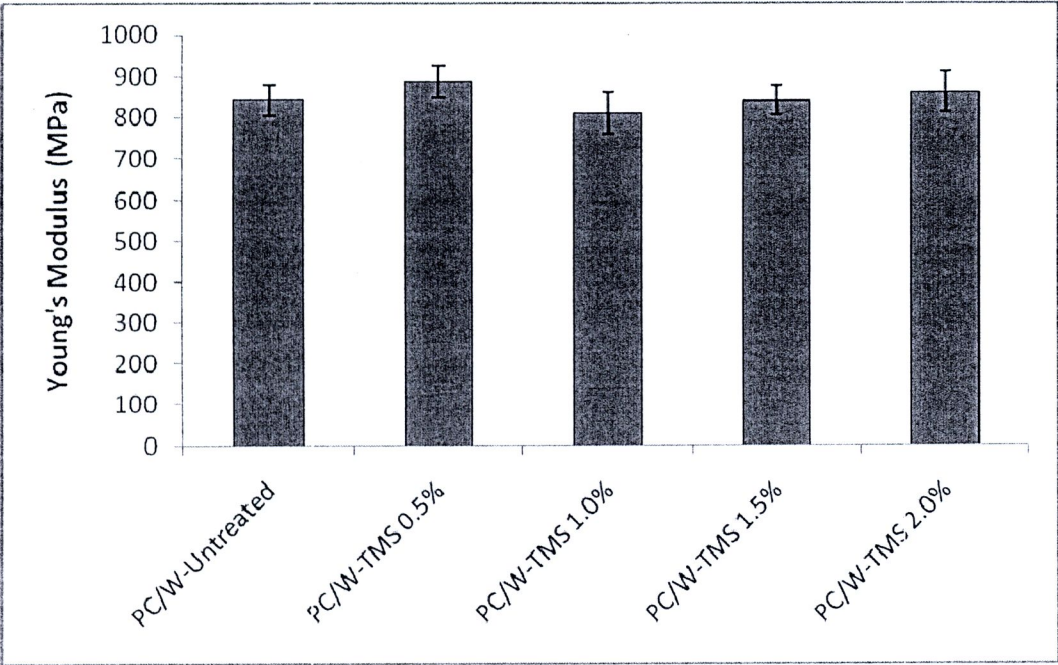


ภาพที่ 49 แสดงค่า flexural strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการปรับปรุงด้วยไซเลนชนิด TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน

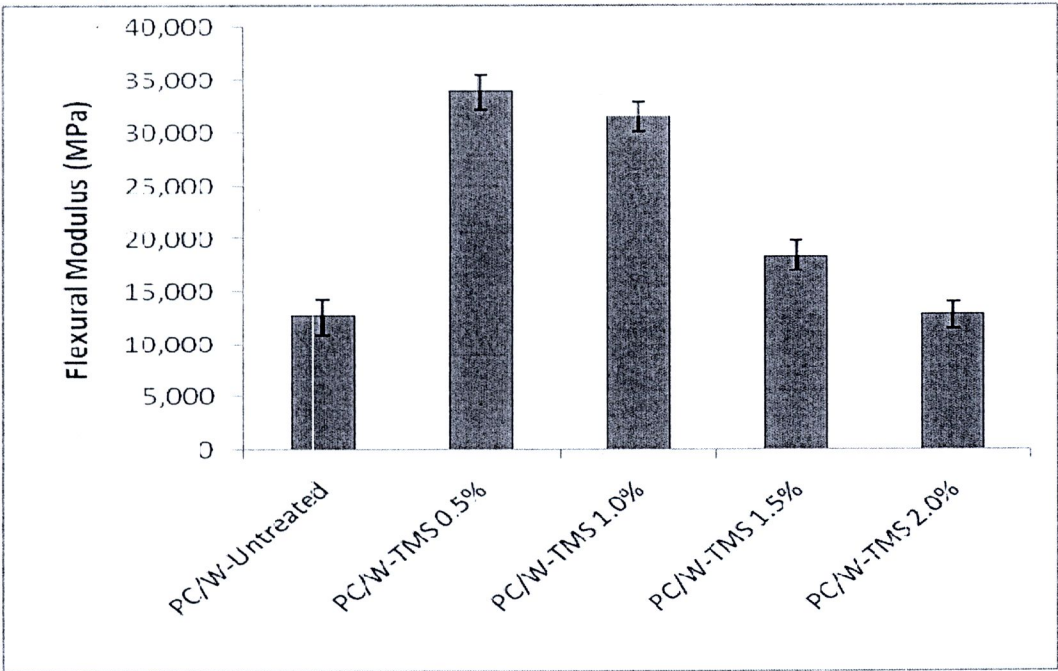
จากเทคนิค FTIR ซึ่งจะพบพีกเอกลักษณ์ของ Si-O-Si (บ่งบอกถึงการมีอยู่ของ polysiloxane) เกิดขึ้นในช่วง wave number ประมาณ $925-1105\text{ cm}^{-1}$ โดยในช่วง wave number นี้ยังพบพีกเอกลักษณ์ของ Si-O-C ($1014-1090\text{ cm}^{-1}$) (บ่งบอกถึงปฏิกิริยาการควบแน่นที่เกิดระหว่างฟังก์ชันไฮดรอกซิลและไฮดรอกซิล) ได้อีกด้วย [26] ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะระบุพีกที่แน่ชัดของการเกิด polysiloxane จาก FTIR spectrum ได้

จากภาพที่ 49 ปริมาณการใช้ไฮดรอกซิล TMS ในการปรับปรุงแรงยึดติดระหว่างพื้นผิวส่งผลต่อค่า flexural strength ของวัสดุคอมพอสิตในแนวโน้มเดียวกันกับค่า tensile strength คือที่ปริมาณการใช้ TMS 0.5wt% ให้ผล flexural strength ที่สูงที่สุด และจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณไฮดรอกซิลในการปรับปรุง ผลที่ได้ก็เกิดจากผลการรวมตัวของไฮดรอกซิลด้วยกันเองเกิดเป็น polysiloxane ซึ่งไปส่งผลให้เกิดเป็นช่องว่างเล็กๆ ในส่วนที่ไม่เกิดการยึดติดกันระหว่างพื้นผิว เมื่อได้รับแรงโค้งงอส่วนที่เป็นช่องว่างไม่สามารถรับหรือส่งผ่านแรงได้ ส่งผลให้เกิดการแตกหักได้ง่ายขึ้น ผลที่ได้จึงเป็นเช่นเดียวกันกับผลของ tensile strength

ค่า Young's modulus ของพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิตที่มีการเติมฟังก์ชันไฮดรอกซิลที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารคู่ควบไฮดรอกซิล TMS ในปริมาณต่างๆกัน แสดงดังภาพที่ 50 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้ไฮดรอกซิล TMS ไม่ได้ส่งผลให้เกิดการปรับปรุงค่า Young's modulus ของคอมพอสิตที่เด่นชัด เนื่องจาก Young's modulus ของคอมพอสิตแต่ละชนิดยังคงมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่อยู่ในช่วงเดียวกัน แม้ว่าไฮดรอกซิล TMS ได้แสดงผลของการช่วยในการยึดติดกันหรือปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพื้นผิวของฟังก์ชันไฮดรอกซิลได้กับพอลิคาร์บอเนต ซึ่งแสดงให้เห็นมาแล้วในผลต่อค่า strength ของคอมพอสิต แต่สำหรับค่า Young's modulus นั้น การเกิด silanol ในคอมพอสิตจากการใช้ TMS ในการปรับปรุงความเข้ากันได้ ไม่ได้ส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนรูปเมื่อได้รับแรงดึงเปลี่ยนไปอย่างชัดเจน ซึ่งก็อาจเกิดจากปริมาณการรวมตัวเกิดเป็น polysiloxane ที่ไม่ได้มีปริมาณมากเกินไปจนตอบสนองต่อการรับแรงดึงอย่างเห็นได้ชัด แม้จะมีการเพิ่มปริมาณการใช้ไฮดรอกซิลในการปรับปรุงแล้วก็ตาม ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างไฮดรอกซิล TMS กับพอลิคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นทำให้การส่งผ่านแรงจากพอลิเมอร์เมตริกซ์ไปยังฟังก์ชันไฮดรอกซิลไม่เกิดได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับคอมพอสิตที่ไม่ได้รับการปรับปรุงความเข้ากันได้ ซึ่งจะเห็นได้จากผลของ flexural modulus ดังแสดงในภาพที่ 51 คอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตในทุกปริมาณการปรับปรุงด้วยไฮดรอกซิล TMS ได้แสดงให้เห็นถึงค่า flexural modulus ที่เพิ่มขึ้น จาก 12,643 MPa สำหรับ PC/W-Untreated ไปเป็น 33,876 MPa สำหรับ PC/W-TMS 0.5% ซึ่งเป็นปริมาณการใช้ที่ส่งผลให้ได้ค่า flexural modulus สูงที่สุด เนื่องจากไฮดรอกซิลได้เข้าไปช่วยในการเชื่อมต่อกันระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์เมตริกซ์กับอนุภาคของฟังก์ชันไฮดรอกซิล เมื่อได้รับแรงโค้งงอวัสดุจะสามารถ

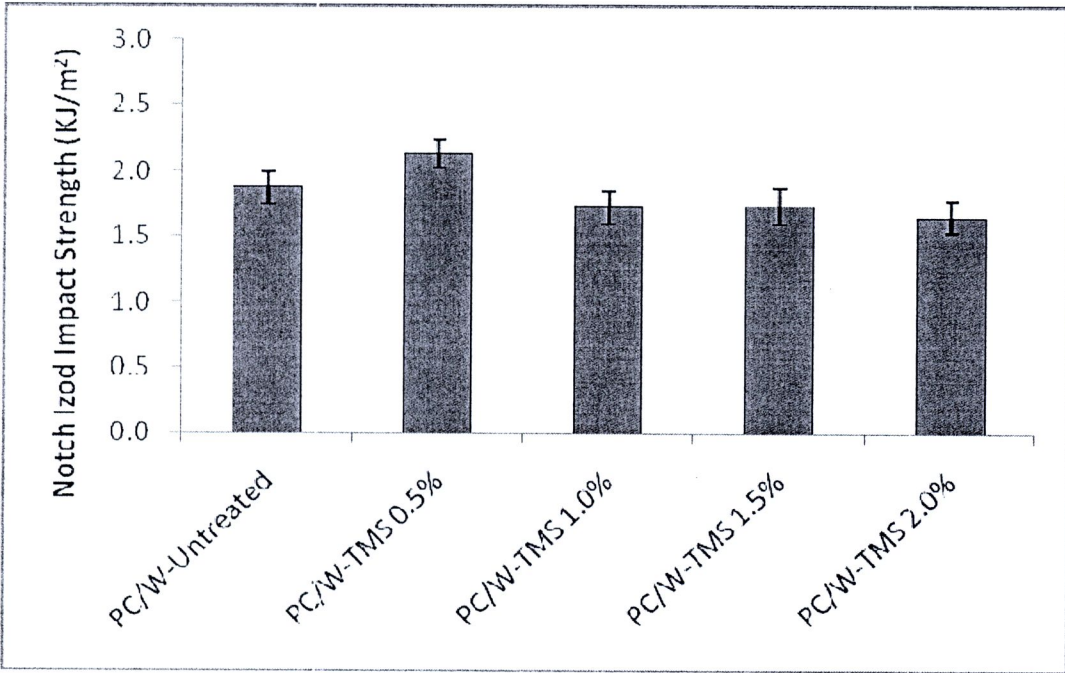


ภาพที่ 50 แสดงค่า Young’s modulus ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการปรับปรุงด้วย
ไซเลนชนิด TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 51 แสดงค่า flexural modulus ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการปรับปรุงด้วย
ไซเลนชนิด TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน

ต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปได้มาก จากการเกิดการยึดติดกันที่แข็งแรงมากขึ้นนี้ไปช่วยในการจัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ ทำให้การจัดเรียงตัวตามแนวแรงที่ได้รับเป็นไปได้ยากขึ้น เนื่องจากการรับแรงโค้งงอแตกต่างจากการรับแรงแบบดึงยืด ดังนั้นการเกิด polysiloxane จึงส่งผลอย่างมากต่อความ stiffness ของคอมพอสิต เมื่อทำการเพิ่มปริมาณการใช้ไซเลนในการปรับปรุงจึงส่งผลให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างไซเลนด้วยกันเองมีมากขึ้น การเกิด polysiloxane จึงเพิ่มมากขึ้นทำให้ไปลดความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยาระหว่างไซเลนกับพอลิคาร์บอนเนต การเชื่อมขวางระหว่างตัวไซเลนกับพอลิคาร์บอนเนตจึงเกิดน้อยลง ดังนั้นจำนวนอนุภาคผงซีลีอ์ไมท์ที่ช่วยในการต้านทานการเปลี่ยนรูปจึงลดลงไปด้วย ทำให้เมื่อได้รับแรงโค้งงอจึงมีการจัดเรียงโครงสร้างไปตามแนวแรงได้ง่ายขึ้น ค่า flexural modulus จึงมีแนวโน้มที่ลดลงและลดลงอย่างมากสำหรับ PC/W-TMS 1.5% และ PC/W-TMS 2.0%



ภาพที่ 52 แสดงค่า Impact strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอนเนตที่มีการปรับปรุงด้วยเลนชนิด TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน

ค่า impact strength ของวัสดุคอมพอสิตระหว่างผงซีลีอ์ไมท์กับพอลิคาร์บอนเนตที่การปรับปรุงด้วยไซเลนในปริมาณต่างๆ กันถูกแสดงดังภาพที่ 52 จากการที่ผงซีลีอ์ไมท์ที่ใส่เข้าไปเป็นจุดบกพร่องในชิ้นงานและจุดเริ่มต้นของการแตกหักเมื่อชิ้นงานได้รับแรง แม้จะ

มีการใช้ไซเลนในการปรับปรุงการยึดติดกันระหว่างพื้นผิว แต่ก็ไม่ได้ส่งผลที่ชัดเจนในการช่วยปรับปรุงค่า impact strength ของคอมพอสิต จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่า Notch Izod Impact strength มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีการปรับปรุงการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวด้วยไซเลนชนิด TMS ในปริมาณการใช้ 0.5wt% ซึ่งให้ค่า impact strength ที่สูงที่สุด แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการช่วยปรับปรุงการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้ไซเลนชนิดนี้ในปริมาณอื่นๆ โดยจะเห็นได้จากเมื่อทำการเพิ่มปริมาณการใช้ไซเลนในการปรับปรุง ค่า impact strength ของคอมพอสิตจะมีค่าลดลงและมีแนวโน้มที่ค่อนข้างคงที่ (มีค่าอยู่ในช่วงเบี่ยงเบนมาตรฐานเดียวกัน)

โดยทั่วไปแล้วปัจจัยที่จะส่งผลให้ค่า impact strength ของคอมพอสิตระหว่างพอลิเมอร์กับวัสดุจำพวกเส้นใยธรรมชาติมีค่าเพิ่มขึ้นจะมาจาก 2 ปัจจัยด้วยกัน คือ การปรับปรุงแรงยึดติดระหว่างพื้นผิวของพอลิเมอร์กับอนุภาคฟิลเลอร์ และอีกวิธีการหนึ่งคือทำให้คอมพอสิตมีความยืดหยุ่นและเป็นอลาสติกที่เพิ่มขึ้น [41] เนื่องจากการเพิ่มปริมาณไซเลน TMS ไม่ได้ส่งผลช่วยในการปรับปรุงการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวของตัวฟิลเลอร์กับพอลิเมอร์เมตริกซ์ให้เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังไม่ได้เพิ่มความยืดหยุ่นและเป็นอลาสติกให้กับคอมพอสิต เมื่อรวมกับผลของการที่ไซเลนเกิดปฏิกิริยากันเองเกิดเป็น polysiloxane ด้วยแล้ว ทำให้อนุภาคของผงไม้ไม่สามารถช่วยในการดูดซับและส่งผ่านแรงให้กับพอลิเมอร์เมตริกซ์ได้ดี วัสดุจึงเกิดการแตกหักอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับแรงอย่างทันทีทันใด ค่า impact strength ของคอมพอสิตจึงมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้ TMS จาก 0.5wt%

4.1.2.2 ผลต่อสมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิต

ตารางที่ 8 แสดงค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิต ซึ่งปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน

ตัวอย่างชิ้นงาน	ค่าการนำความร้อน (W/m K)
PC/W- Untreated	0.1088 ± 0.0023
PC/W- TMS 0.5%	0.0928 ± 0.0005
PC/W- TMS 1.0%	0.0941 ± 0.0002
PC/W- TMS 1.5%	0.0933 ± 0.0010
PC/W- TMS 2.0%	0.0916 ± 0.0008

จากการทดสอบสมบัติการนำความร้อนของคอมพอสิตระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลีอไมท์ ที่ใช้ไซเลน TMS ปรับปรุงความเข้ากันได้ปริมาณที่แตกต่างกัน แสดงผลการทดสอบไว้ดังตารางที่ 8 พบว่าค่าการนำความร้อนของคอมพอสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลนมีค่าการนำความร้อนที่ลดลงในทุกปริมาณการปรับปรุง โดยปกติการปรับปรุงการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวด้วยไซเลนจะเป็นส่วนที่ช่วยทำให้เกิดการลดลงของปริมาณช่องว่างระหว่างอนุภาคผงซีลีอไมท์กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ โดยช่องว่างที่ว่ำนี้นี้จะเป็นส่วนที่ส่งผลให้สมบัติการนำความร้อนของคอมพอสิตลดลง เนื่องจากอากาศนำความร้อนได้น้อยกว่าพอลิคาร์บอเนตและผงซีลีอไมท์ ดังนั้นการปรับปรุงด้วยไซเลนจึงน่าจะส่งผลให้การนำความร้อนของคอมพอสิตสูงขึ้น แต่จากการทดสอบค่าการนำความร้อนพบว่า ค่าการนำความร้อนที่ลดลงในทุกปริมาณการปรับปรุงด้วยไซเลนคือน่าจะเป็นผลมาจากค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าของ โมเลกุล polysiloxanes เมื่อเทียบกับพอลิคาร์บอเนต ($K \sim 0.13 \text{ W/m K}$ [42]) จึงเป็นตัวที่ช่วยส่งผลให้ค่าการนำความร้อนรวมในระบบของคอมพอสิตมีค่าลดลง เมื่อทำการพิจารณาผลของปริมาณการปรับปรุงด้วยไซเลนแล้ว พบว่าแม้จะเพิ่มปริมาณการใช้ไซเลนแต่ก็ไม่ได้ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนของคอมพอสิตมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงพอที่จะกล่าวได้ว่าปริมาณการใช้ไซเลน TMS เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพื้นผิวของผงซีลีอไมท์กับพอลิคาร์บอเนตไม่ได้ส่งผลต่อค่าการนำความร้อนของคอมพอสิตอย่างเห็นได้ชัด

จากการทดสอบสมบัติต่างๆ เพื่อศึกษาผลของปริมาณสารก่อกวนไซเลนที่มีต่อการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างผงซีลีอไมท์กับพอลิคาร์บอเนต เมื่อพิจารณาถึงการทดสอบสมบัติเชิงกลจะเห็นได้ว่า PC/W-TMS 0.5% มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับการปรับปรุงด้วยไซเลน TMS ในปริมาณมากขึ้น ผลจากการทดสอบชี้ให้เห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณการใช้ไซเลน TMS จาก 0.5wt.% ไปเป็น 1.0wt.%, 1.5wt.% และ 2.0wt.% ความแข็งแรงของคอมพอสิตมีแนวโน้มที่ลดลงทั้งค่า tensile strength และ flexural strength ส่วนความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนรูป (flexural modulus) นั้น มีค่าลดลงเป็นอย่างมาก ในขณะที่ Young's modulus มีค่าค่อนข้างคงที่แม้จะทำการเพิ่มปริมาณการใช้ไซเลนแล้วก็ตาม ผลการทดสอบสมบัติการนำความร้อนนั้น ปริมาณการใช้ไซเลนในการปรับปรุงไม่ได้ส่งผลให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ จึงพอจะกล่าวได้ว่าสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนของคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตในระบบแต่ละตัวมีค่าใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าจากการศึกษาผลของปริมาณสารก่อกวนไซเลนที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิต PC/W-TMS 0.5% ให้ผลการทดสอบที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้ไซเลน TMS ในปริมาณอื่นๆ

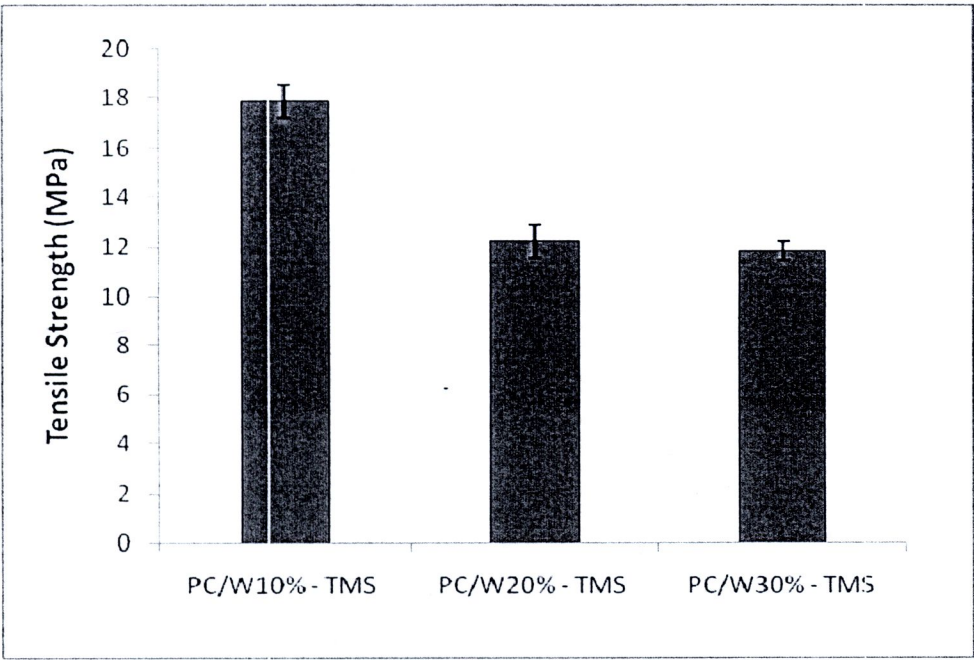
4.2 ผลของปริมาณผงซีลี้อยไม้ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมพอสิต

จากการศึกษาถึงผลของชนิดและปริมาณสารคู่ควบไซเลนที่มีต่อการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพื้นผิวของผงซีลี้อยไม้กับพอลิคาร์บอเนตในการทดลองส่วนแรก ได้แสดงให้เห็นว่าไซเลนชนิด N-(3-Trimethoxysilylpropyl) diethylenetriamine ในปริมาณ 0.5wt.% เหมาะสมที่สุดในการช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างผงซีลี้อยไม้กับพอลิคาร์บอเนต ดังนั้นในการทดลองส่วนที่สองซึ่งจะเป็นการศึกษาผลของปริมาณการใช้ผงซีลี้อยไม้ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ซึ่งต้องการเลือกปริมาณการใช้ผงซีลี้อยไม้ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้สมบัติเชิงกลและสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนที่ดีของคอมพอสิต จะทำการศึกษาโดยปรับเปลี่ยนปริมาณการใช้ผงซีลี้อยไม้เป็น 10%, 20% และ 30% โดยน้ำหนักของคอมพอสิต และในการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างผงซีลี้อยไม้กับพอลิคาร์บอเนตจะเลือกใช้ไซเลน TMS ในปริมาณ 0.5% ของน้ำหนักผงซีลี้อยไม้

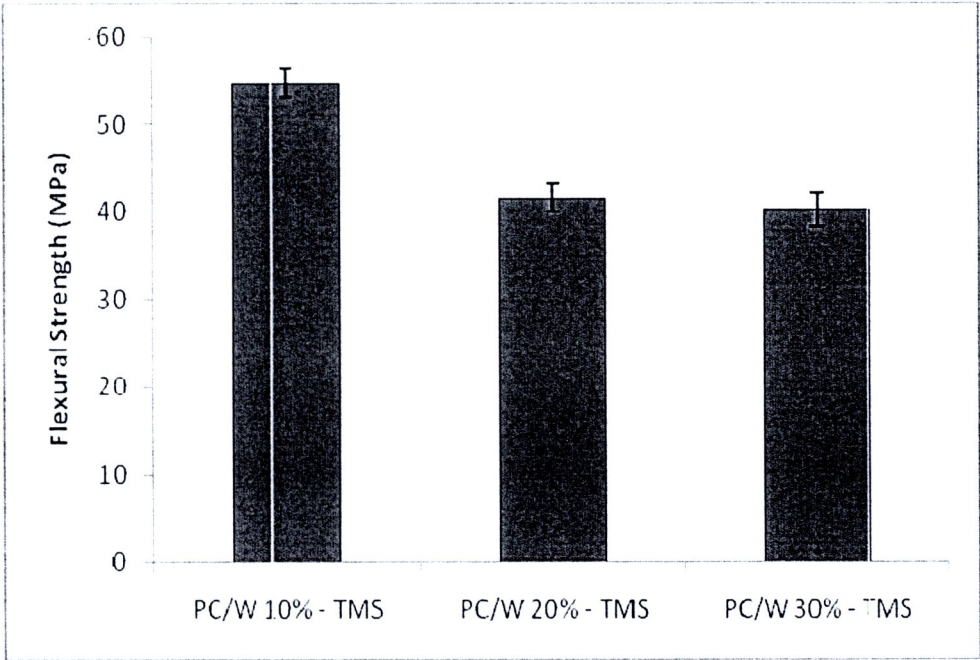
4.2.1 ศึกษาผลของปริมาณผงซีลี้อยไม้ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมพอสิต

4.2.1.1 ผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิต

จากภาพที่ 53 แสดงผลของ tensile strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงซีลี้อยไม้ในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยทำการศึกษาที่ปริมาณการเติมผงซีลี้อยไม้เป็น 10%, 20% และ 30% โดยน้ำหนัก พบว่า PC/W-TMS เมื่อปริมาณผงซีลี้อยไม้ในคอมพอสิตเพิ่มขึ้นมีผลทำให้แนวโน้มของความสามารถในการทนแรงดึงสูงสุดมีค่าลดลง สาเหตุเนื่องมาจากการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของอนุภาคผงซีลี้อยไม้ โดยอนุภาคผงซีลี้อยไม้มีแนวโน้มที่จะเกิดการรวมกลุ่มและจับตัวกันเป็นก้อนมากขึ้นจากผลของแรงดึงดูดระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของผงซีลี้อยไม้ [43] ซึ่งเห็นได้จากโครงสร้างจุลภาคของคอมพอสิตที่แสดงให้เห็นพื้นผิวที่แตกหักจากการทดสอบด้วยเทคนิค SEM ดังภาพที่ 55 โดยพบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณผงซีลี้อยไม้ลงในคอมพอสิตจะส่งผลให้เกิดการรวมกลุ่มกันของอนุภาคผงซีลี้อยไม้ที่เพิ่มขึ้นด้วย (จากภาพ 53 ข และ ค) ซึ่งส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของผงซีลี้อยไม้ในคอมพอสิตที่แย่ลง นอกจากนี้แล้วภาพที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค SEM ยังแสดงให้เห็นถึงความไม่เข้ากันระหว่างอนุภาคผงซีลี้อยไม้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ สังเกตได้จากการที่มีช่องว่างหรือส่วนที่ไม่เกิดการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวทั้งสองเฟสในจำนวนที่เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งก็น่าจะเป็นผลมาจากความสามารถในการขยายตัวทางความร้อน (Thermal expansion) ของวัสดุทั้งสองที่แตกต่างกัน [43] เมื่อทำการผสมสารทั้งสองชนิดเข้าด้วยกันแล้วนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูปโดยการให้ความร้อนหลังจากนั้นก็ให้ความเย็นในกระบวนการหล่อเย็น สิ่งเหล่านี้จะเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลอย่างมากต่อการหดตัวของวัสดุที่

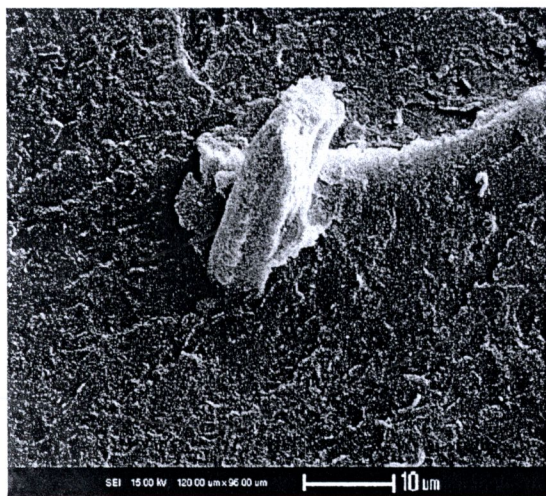


ภาพที่ 53 แสดงค่า tensile strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงซีลีเนียมในปริมาณที่แตกต่างกัน

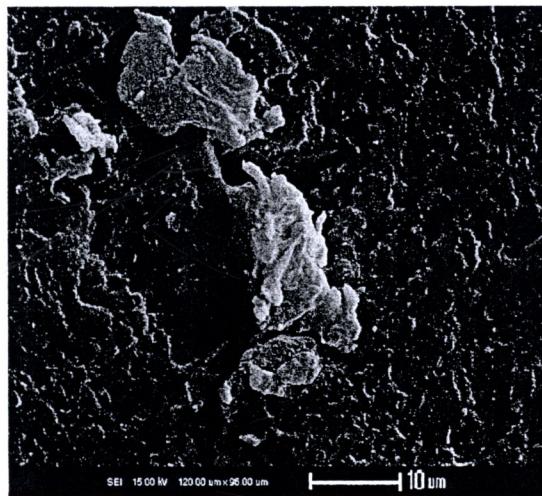


ภาพที่ 54 แสดงค่า flexural strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงซีลีเนียมในปริมาณที่แตกต่างกัน

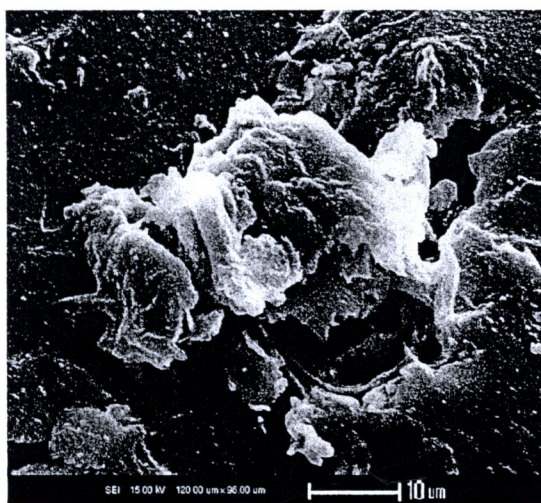
ไม่เท่ากันเกิดเป็นช่องว่างระหว่างเฟสทั้งสอง ด้วยเหตุผลเหล่านี้ทำให้ค่า tensile strength ของคอมพอสิตมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณผงซีลีอ์ไมล์ลงในวัสดุคอมพอสิต และเมื่อทำการพิจารณาถึงค่า flexural strength (ภาพที่ 54) พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งก็สามารถอธิบายผลที่เกิดขึ้นโดยให้เหตุผลเดียวกันกับค่า tensile strength ก่อนหน้านี้



(ก)



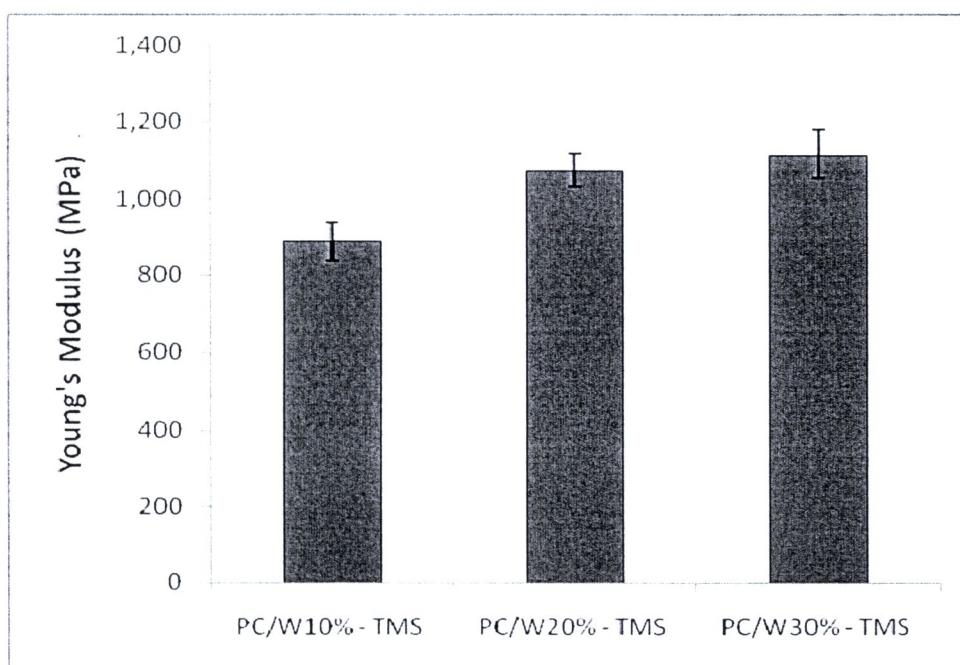
(ข)



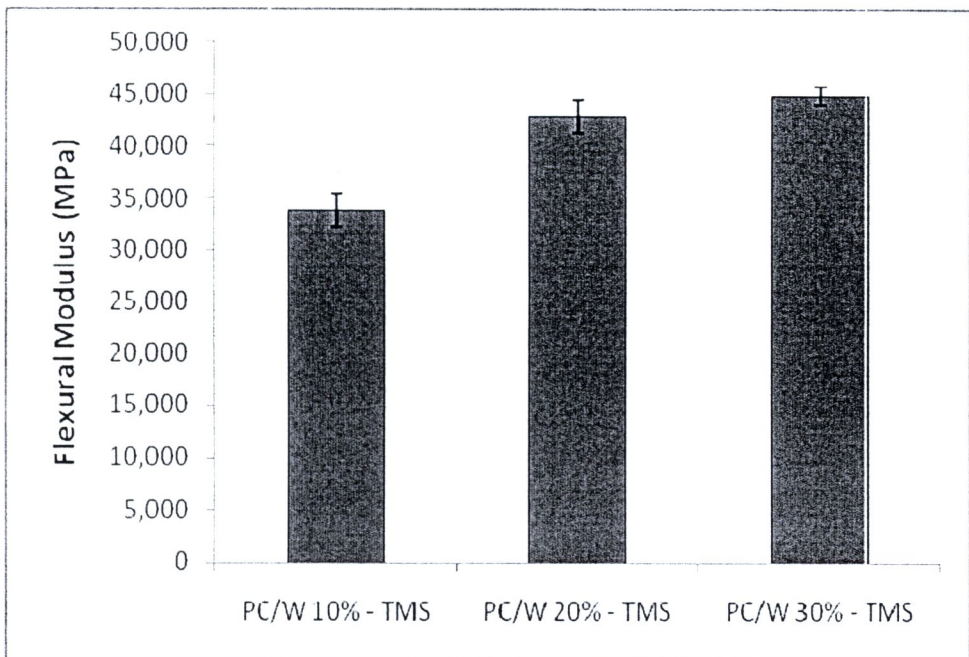
(ค)

ภาพที่ 55 แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุคอมพอสิตของ PC/W-TMS composites ที่ปริมาณการเติมผงไมล์ที่แตกต่างกัน (ก) 10%wt (ข) 20%wt (ค) 30%wt ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

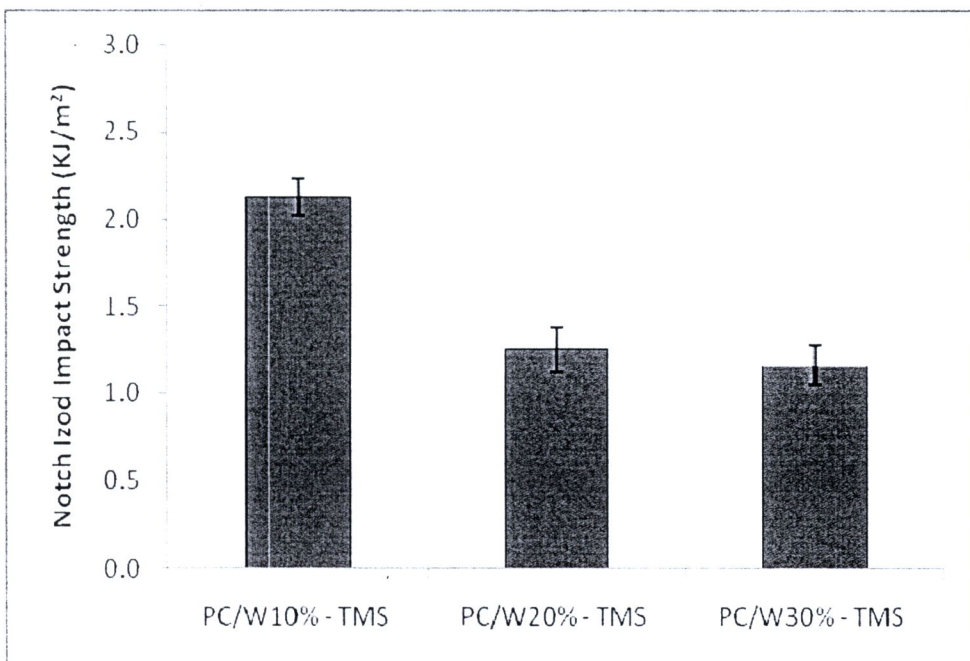
ค่า Young's modulus ของพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิตที่มีการเติมผงซีลี้อยู่ในปริมาณที่แตกต่างกันแสดงดังภาพที่ 56 จากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณผงซีลี้อยู่ในคอมพอสิต ค่า Young's modulus ของพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิตมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น (จากประมาณ 887 MPa สำหรับ PC/W10%-TMS ไปเป็น 1,073 MPa และ 1,115 MPa สำหรับ PC/W20%-TMS และ PC/W30%-TMS ตามลำดับ) การที่ค่า Young's modulus มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการเติมเฟสของผงซีลี้อยู่ซึ่งมีความ rigid ที่มากกว่าเฟสของพอลิคาร์บอเนต ทำให้เมื่อยังเพิ่มปริมาณการเติมผงซีลี้อยู่ คอมพอสิตที่ได้จะยังมีความอดุลีหรือความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนรูปที่สูงขึ้น แต่จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณผงซีลี้อยู่จาก 20wt.% ไปเป็น 30wt.% ค่า Young's modulus ของคอมพอสิตมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น สาเหตุก็อาจจะเนื่องมาจากความไม่เข้ากันระหว่างอนุภาคผงซีลี้อยู่กับพอลิคาร์บอเนต ปริมาณผงซีลี้อยู่ที่เพิ่มขึ้นเป็นตัวทำให้เกิดพื้นที่ที่เป็นช่องว่าง (void) (ภาพที่ 55 ค) หรือมีความไม่เข้ากันระหว่างอนุภาคผงซีลี้อยู่กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่มากขึ้นด้วย [27] ด้วยเหตุนี้ค่าความอดุลีโดยรวมของคอมพอสิตจึงไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างที่เราควรจะเป็น



ภาพที่ 56 แสดงค่า Young's modulus ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงซีลี้อยู่ในปริมาณที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 57 แสดงค่า flexural modulus ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงซีลีเนียมในปริมาณที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 58 แสดงค่า Impact strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงซีลีเนียมในปริมาณที่แตกต่างกัน

การเพิ่มเฟสของผงไม้ลงไปในพอลิเมอร์ส่งผลอย่างยิ่งต่อการเพิ่มขึ้นของค่า flexural modulus ของวัสดุเพราะเป็นส่วนที่ช่วยลดการเสียรูปของวัสดุเมื่อได้รับแรง จากภาพที่ 57 จะเห็นได้ว่าค่า flexural modulus ของคอมพอสิตเมื่อมีการเพิ่มปริมาณผงไม้จะไม่จะมีแนวโน้มเหมือนกันกับผลของ Young's modulus คือมีการเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเพิ่มปริมาณผงไม้จาก 10wt.% ไปเป็น 20wt.% จากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 30wt.% ซึ่งเหตุผลที่ใช้อธิบายก็เป็นเช่นเดียวกันกับผลของ Young's modulus

ค่า Impact strength ของวัสดุคอมพอสิตระหว่างผงไม้กับพอลิคาร์บอเนตแสดงดังภาพที่ 58 หลังจากที่มีการเพิ่มปริมาณผงไม้ลงในคอมพอสิตพบว่าความสามารถในการต้านทานแรงกระแทกมีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากเฟสของผงไม้ที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับกับอิทธิพลที่มีต่อค่า tensile strength และ flexural strength การเพิ่มปริมาณผงไม้ไม่มีผลทำให้บริเวณที่เป็นช่องว่าง (void) หรือส่วนที่ไม่เกิดการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวมีเพิ่มมากขึ้น ซึ่งยืนยันผลการทดลองจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค SEM (ภาพที่ 55 ก และ 55 ข) ช่องว่างที่เกิดขึ้นส่งผลเป็นอย่างไรต่อค่า impact strength เนื่องจากเฟสที่ไม่ต่อเนื่องกันนี้ไม่สามารถที่จะทำการรับและส่งผ่านแรงได้ดี โดยเฉพาะเมื่อต้องทำการรับแรงอย่างทันทีทันใด เมื่อพิจารณาถึงการรวมตัวของอนุภาคผงไม้ที่เกิดเป็นกลุ่มก้อนแล้ว ความสามารถในการส่งผ่านแรงไปยังพอลิเมอร์เมตริกซ์ยังเกิดขึ้นได้ยาก ดังนั้นผลในการต้านทานแรงกระแทกจึงมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณผงไม้ลงในคอมพอสิต

4.2.1.2 ผลต่อสมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิต

ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของพอลิคาร์บอเนต ผงไม้ และคอมพอสิตสามารถหาได้จากสมการที่ 7 (Rule of mixtures) ซึ่งค่าที่ได้เป็นค่าทางทฤษฎีและมีการเปรียบเทียบผลกับค่าที่ได้จากการทดลองดังแสดงในตารางที่ 9 โดยทั่วไปแล้วเมื่อทำการเพิ่มปริมาณผงไม้ลงในเฟสของพอลิเมอร์ค่าการนำความร้อนของพอลิเมอร์น่าจะมีแนวโน้มที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากผงไม้เป็นเฟสที่มีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าเฟสของพอลิเมอร์ การเพิ่มปริมาณผงไม้ที่แตกต่างกันในแต่ละระดับ (10wt.% ไปเป็น 20wt.% และ 30wt.%) น่าจะแสดงให้เห็นถึงผลของค่าการนำความร้อนที่ค่อนข้างแตกต่างกัน แต่จากการศึกษาพบว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณผงไม้ลงไปในการคอมพอสิตค่าการนำความร้อนของคอมพอสิตจะมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยในแต่ละระดับของการเพิ่มปริมาณ โดยจากตารางที่ 9 ค่าการนำความร้อนของคอมพอสิตมีค่าที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยแม้จะทำการเพิ่มปริมาณผงไม้จาก 10wt.% ไปเป็น 20wt.% และ 30wt.% ซึ่งจากทฤษฎีแล้วแต่ละระดับของการเพิ่มผงไม้ลงไป

ควรจะมีค่าการนำความร้อนที่แตกต่างกันมากกว่านี้ การเติมผงซีลี้อยู่ในพอลิเมอร์ได้แสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนที่ดีขึ้นมาก ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีดังสมการที่ 7 พบว่าค่าการนำความร้อนที่ได้จากการทดลองมีค่าที่น้อยกว่ามาก สาเหตุอาจมาจากช่องว่างที่เกิดขึ้นจากความไม่เข้ากันระหว่างเฟสของพอลิเมอร์เมตริกซ์กับผงซีลี้อยู่ โดยช่องว่างที่เกิดขึ้นนี้เป็นตัวที่ส่งผลให้เกิดการลดลงของค่าการนำความร้อนในวัสดุเป็นอย่างมาก

$$k_c = k_m \phi_m + k_f \phi_f$$

..... (8)

เมื่อ k_c , k_m และ k_f คือค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) ของวัสดุคอมพอสิต, พอลิคาร์บอเนตเมตริกซ์, และฟิลเลอร์ (ผงซีลี้อยู่) ตามลำดับ ϕ_m และ ϕ_f คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของเมตริกซ์และฟิลเลอร์ ตามลำดับ [33]

ตารางที่ 9 แสดงค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงซีลี้อยู่ในปริมาณที่แตกต่างกัน

สัดส่วนในคอมพอสิต (%wt)		ค่าการนำความร้อน (W/m K)	
พอลิคาร์บอเนต	ผงซีลี้อยู่	การทดลอง	ทฤษฎี
0	100	0.0800	
100	0	0.1650	
90	10	0.0928 ± 0.0005	0.1565
80	20	0.0920 ± 0.0001	0.1480
70	30	0.0916 ± 0.0004	0.1395

จากการทดสอบสมบัติต่างๆ เพื่อศึกษาผลของปริมาณผงขี้เลื่อยไม้ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิต เมื่อพิจารณาถึงการทดสอบสมบัติเชิงกลสรุปได้ว่าการเพิ่มปริมาณผงขี้เลื่อยไม้ไม่ทำให้ความแข็งแรงของวัสดุคอมพอสิตโดยรวมลดลง ซึ่งจะเห็นได้จากค่า tensile strength, flexural strength รวมถึง impact strength ที่มีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ modulus ของวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางตรงกันข้ามคือมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มปริมาณผงขี้เลื่อยไม้ เมื่อพิจารณาถึงสมบัติเชิงกลทั้งสองแบบนี้แล้ว จะเห็นได้ว่าผลของ strength มีค่าที่แตกต่างกันมากกว่าผลของ modulus ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงสมบัติเชิงกลโดยรวมของวัสดุคอมพอสิต PC/W10%-TMS ได้ให้ผลทางสมบัติเชิงกลที่ค่อนข้างดีที่สุดที่สุดเมื่อเทียบกับการเติมผงขี้เลื่อยไม้ในปริมาณอื่นๆ ในส่วนของผลการทดสอบสมบัติการนำความร้อนนั้น ปริมาณการเติมผงขี้เลื่อยไม้ไม่ได้ส่งผลให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนของคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตในระบบแต่ละตัวมีค่าใกล้เคียงกันมาก

ดังนั้นจากการศึกษาผลของปริมาณผงขี้เลื่อยไม้ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิต PC/W10%-TMS 0.5% ให้ผลการทดสอบที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับการเติมผงขี้เลื่อยไม้ในปริมาณอื่นๆ

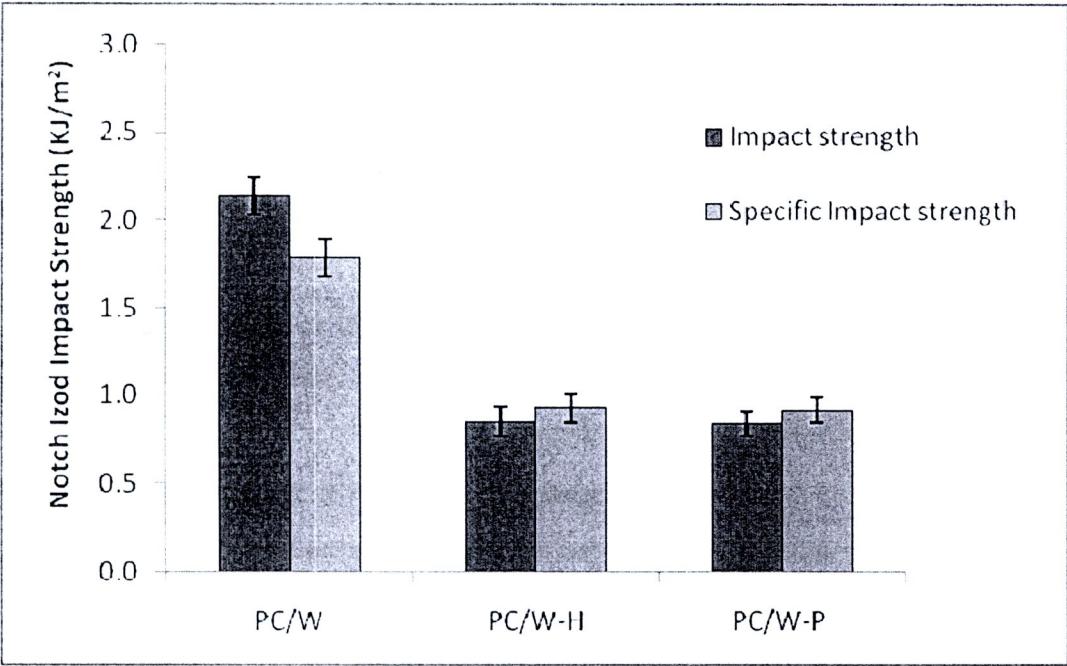
4.3 ผลของชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟองที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมพอสิต

จากการศึกษาถึงผลของชนิดและปริมาณสารคู่ควบไซเลนที่มีต่อการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพื้นผิวของผงซีลี้อยู่ไม่กับพอลิคาร์บอเนตในการทดลองส่วนแรก และการศึกษาผลของปริมาณผงซีลี้อยู่ไม่ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิตในส่วนที่สอง ได้แสดงให้เห็นว่าไซเลนชนิด N-(3-Trimethoxysilylpropyl) diethylenetriamine ในปริมาณ 0.5wt.% กับการเติมผงซีลี้อยู่ไม่ในปริมาณ 10wt.% มีสมบัติเชิงกลและสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนที่ดีที่สุด ดังนั้นในการทดลองส่วนนี้จะเลือกใช้คอมพอสิต PC/W10%-TMS 0.5% เพื่อการศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟอง (Blowing agent) 2 ชนิด คือ Hydrocerol HK 40B และ 5-Phenyl-1H-Tetrazole ต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการนำความร้อนของวัสดุโฟมคอมพอสิต โดยจะทำการปรับเปลี่ยนปริมาณการใช้เป็น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 phr

4.3.1 ศึกษาผลของการใช้สารทำให้เกิดฟองที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมพอสิต

4.3.1.1 ผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิต

จากการศึกษาถึงผลของการใช้สารทำให้เกิดฟองที่มีต่อค่า impact strength ซึ่งแสดงดังภาพที่ 59 โดยทำการเปรียบเทียบกับวัสดุคอมพอสิต PC/W ซึ่งมีสมบัติเชิงกลและสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนที่ดีที่สุดซึ่งได้จากการทดลองในสองส่วนแรก จะเห็นได้ว่าความสามารถในการทนต่อแรงกระแทกของคอมพอสิตที่เป็นโฟมมีค่าน้อยกว่า เนื่องจากเมื่อได้รับแรงอย่างทันทีทันใดชิ้นงานไม่สามารถดูดซับและกระจายแรงได้ดีพอ เพราะมีเฟสของช่องว่างที่เข้ามาเป็นตัวขัดขวางการส่งผ่านแรงภายในเมตริกซ์ ทั้งนี้เป็นผลมาจากโครงสร้างเซลล์โฟมที่มีช่องว่างอยู่ภายใน วัสดุจึงเกิดการแตกหักอย่างรวดเร็วโดยที่ไม่สามารถส่งผ่านแรงได้ทันสำหรับค่า impact strength ของวัสดุโฟมคอมพอสิตของทั้ง PC/W-H และ PC/W-P นั้นมีค่าไม่แตกต่างกัน



ภาพที่ 59 แสดงค่า Impact strength ของวัสดุคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟอง 2 ชนิด Hydrocerol HK 40B (H) และ 5-Phenyl-1H-Tetrazole (P) ปริมาณ 0.5phr

ตารางที่ 10 แสดงค่าความแข็ง (Hardness) ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอนตกับผงซีลีเยอไม้ที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟอง

ตัวอย่างชิ้นงาน	Hardness (Shore D)
PC/W	61.8 ± 1.6
PC/W - H 0.5	44.4 ± 2.5
PC/W - P 0.5	50.6 ± 1.8

ความแข็ง (Hardness) คือสมบัติความต้านทาน ในการเปลี่ยนแปลงขนาดรูปร่าง หรือการเกิดรอยขีดขีดเสียหายบริเวณพื้นผิว หรือความแข็งที่พื้นผิววัสดุนั่นเอง [44] จากการทดสอบสมบัติ Hardness ของชิ้นงานคอมพอสิตซึ่งได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 10 พบว่าค่า Hardness จะลดลงเมื่อมีการใช้สารทำให้เกิดฟองในการขึ้นรูปชิ้นงานเป็นวัสดุโฟมคอมพอสิต เมื่อพื้นผิวได้รับแรงกดจากเดิมที่ภายใต้พื้นผิวมีส่วนของเนื้อเมตริกซ์ในการช่วยรับและส่งผ่านแรง แต่จากโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นโพรงและมีช่องว่างอยู่เป็นจำนวนมากในวัสดุโฟมทำให้การรับและ

ส่งผ่านแรงเป็นไปได้อย่างขึ้น ผิวหน้าของวัสดุจึงเกิดการยุบตัวได้มากขึ้นเมื่อได้รับแรงกด ค่าความแข็งจึงลดลงเหลือเพียง D44.4 สำหรับ PC/W - H และ D50.6 สำหรับ PC/W - P ทั้งนี้เนื่องจากผลของโครงสร้างเซลล์โฟมที่ใหญ่กว่าสำหรับการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด Hydrocerol HK 40B เมื่อเทียบกับการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole เมื่อขึ้นงานวัสดุโฟมคอมพอสิตได้รับแรงกดบนพื้นผิวจะมีการส่งผ่านแรงภายใต้พื้นผิวของชิ้นงานเกิดขึ้น ส่วนของเมตริกซ์ในวัสดุคอมพอสิตจะช่วยในการรับและส่งผ่านแรง โครงสร้างของเซลล์โฟมที่เกิดขึ้นนี้ไปมีผลในการลดพื้นที่ในการรับและส่งผ่านแรง ยิ่งเซลล์โฟมมีขนาดใหญ่ก็จะไปมีผลในการลดพื้นที่ในการรับแรงมากขึ้น ดังนั้นวัสดุโฟมคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole ซึ่งให้ขนาดของเซลล์โฟมในวัสดุโฟมคอมพอสิตที่เล็กกว่าจึงมีค่า Hardness ที่มากกว่า

จากโครงสร้างเซลล์โฟมที่เกิดจากการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟองทั้ง 2 ชนิด การสลายตัวของ Hydrocerol HK 40B จะมีการปลดปล่อยก๊าซ CO₂ [23] ในขณะที่การสลายตัวของ 5-Phenyl-1H-Tetrazole จะทำให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซ N₂ ออกมา [24] ทำให้วัสดุคอมพอสิตมีโครงสร้างเป็นโพรงหรือรูพรุน เมื่อพิจารณาขนาดของรูพรุนหรือโพรงที่เกิดขึ้นจะเห็นได้ว่าวัสดุโฟมคอมพอสิตที่ใช้ Hydrocerol HK 40B เป็นสารทำให้เกิดฟองมีขนาดของรูพรุนหรือโพรงที่ใหญ่กว่าวัสดุโฟมคอมพอสิต 5-Phenyl-1H-Tetrazole เป็นสารทำให้เกิดฟอง จากกฎการแพร่ของเกรแฮม ซึ่งกล่าวว่าอัตราการแพร่ผ่านของแก๊สจะแปรผกผันกับรากที่สองของความหนาแน่นของแก๊ส ภายใต้อุณหภูมิและความดันเดียวกัน [46] ดังสมการต่อไปนี้

$$r \propto \frac{1}{\sqrt{d}} \tag{9}$$

เมื่อ r คือ อัตราการแพร่ และ d = ความหนาแน่นของแก๊ส ถ้าเปรียบเทียบอัตราการแพร่ของแก๊สภายใต้สภาวะเดียวกัน จะได้ดังนี้

$$\frac{r_1}{r_2} = \sqrt{\frac{d_2}{d_1}} \tag{10}$$

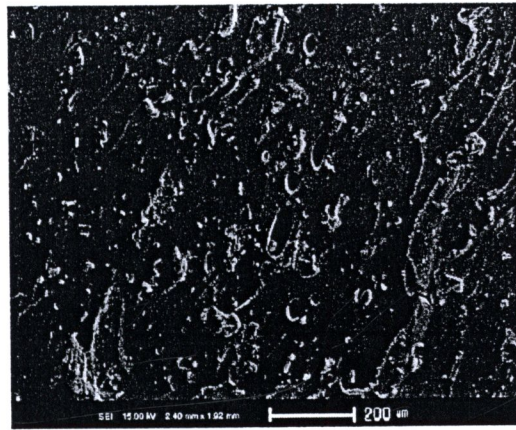
แต่ความหนาแน่นแปรผกผันกับมวลโมเลกุล (M) ดังนั้นจะได้ว่า

$$\frac{r_1}{r_2} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} \tag{11}$$

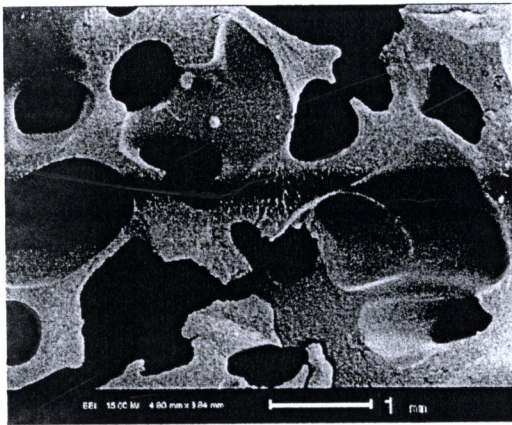
นั่นหมายความว่า แก๊สที่มีน้ำหนักมากกว่าจะเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าแก๊สที่เบากว่านั่นเอง ซึ่งจากการปลดปล่อยการของสารทำให้เกิดฟองทั้งสองชนิด แก๊ส CO₂ (ได้จากสารทำให้เกิดฟองชนิด Hydrocerol HK 40B) มีน้ำหนักโมเลกุลที่มากกว่าแก๊ส N₂ (ได้จากการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟองชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole) แก๊ส CO₂ จึงมีความสามารถในการแพร่ได้น้อยกว่า ดังนั้นในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปเมื่อสารทำให้เกิดฟองเกิดการสลายตัวและปลดปล่อยแก๊ส CO₂ ออกมา โมเลกุลของแก๊ส CO₂ ก็น่าจะแพร่ผ่านพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิตได้น้อยและเกิดเป็นเซลล์โฟมที่มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับเซลล์โฟมที่เกิดจากแก๊ส N₂ ซึ่งสามารถแพร่ผ่านเนื้อพอลิคาร์บอเนตได้ดีกว่า แต่จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ดังภาพที่ 60 จะเห็นได้ว่าเซลล์โฟมที่เกิดจากแก๊ส CO₂ (ภาพที่ 60 ง) จะมีขนาดใหญ่กว่าเซลล์โฟมที่เกิดจากแก๊ส N₂ (ภาพที่ 60 จ) ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของความหนืดที่แตกต่างกันในวัสดุโฟมคอมพอสิต จากการทดสอบดัชนีการไหล (MFI) ของวัสดุโฟมคอมพอสิต (ดังตารางที่ 11) จะเห็นได้ว่าวัสดุโฟมคอมพอสิต PC/W-P 0.5 จะมีความหนืดมากกว่าวัสดุโฟมคอมพอสิต PC/W-H 0.5 ภายใต้สภาวะที่มีความหนืดสูง แรงดันของแก๊สที่เกิดจากการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟองไม่สามารถทำให้เซลล์โฟมที่เกิดขยายขนาดให้ใหญ่ขึ้นได้ มีผลทำให้เซลล์โฟมของวัสดุโฟมคอมพอสิต PC/W-P 0.5 มีขนาดของเซลล์โฟมที่เล็กกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุโฟมคอมพอสิต PC/W-H 0.5 ซึ่งในระบบมีความหนืดน้อยกว่านั่นเอง

ตารางที่ 11 แสดงค่าดัชนีการไหล (MFI) ของพอลิคาร์บอเนตและโฟมพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิตไม้ที่ปริมาณการใช้สารทำให้เกิดฟอง 0.5 phr

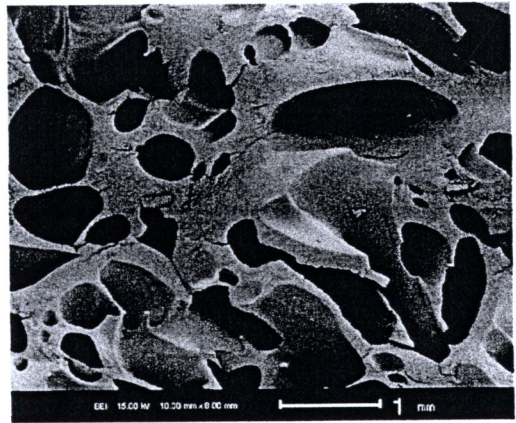
ตัวอย่างชิ้นงาน	MFI (g/10min)
Neat PC	5.20
PC/H	4.76
PC/P	4.05
PC/W-H	3.23
PC/W-P	2.34



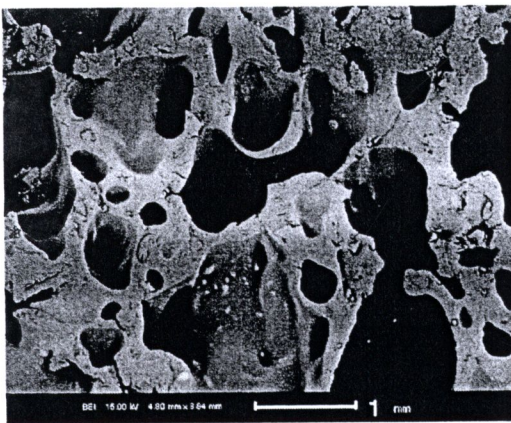
(ก)



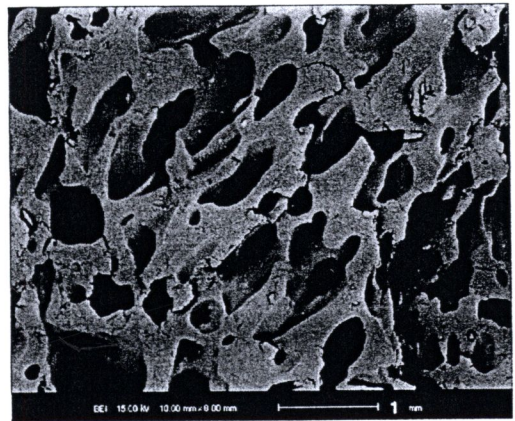
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

ภาพที่ 60 แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุโฟมคอมพอสิตของ (ก) PC/W ที่กำลังขยาย 50 เท่า (ข) PC/H (ค) PC/P (ง) PC/W-H และ (จ) PC/W-P ปริมาณการใช้สารทำให้เกิดฟอง 0.5 phr ที่กำลังขยาย 25 เท่า

สำหรับวัสดุโพลิคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่ไม่ได้รับการเติมผงขี้เลื่อยไม้ พบว่าวัสดุโพลิคอมพอสิต PC/P 0.5 (ภาพที่ 60 ค) ซึ่งมีความหนืดในระบบที่มากกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุโพลิคอมพอสิต PC/H 0.5 (ภาพที่ 60 ข) ให้เซลล์โพลิที่มีขนาดเล็กกว่า นอกจากนี้เมื่อพิจารณาระหว่างระบบของวัสดุโพลิคอมพอสิตที่มีการเติมและไม่ได้เติมผงขี้เลื่อยไม้จะเห็นได้ว่าระบบที่มีการเติมผงขี้เลื่อยไม้ (ค่าความหนืดมากกว่า) ก็ให้ผลของขนาดเซลล์โพลิที่เล็กกว่าระบบที่ไม่ได้เติมผงขี้เลื่อยไม้ (ค่าความหนืดน้อยกว่า) เช่นเดียวกัน โดยจากภาพที่ 60 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของวัสดุโพลิคอมพอสิตของ PC/W-H และ PC/W-P จะมีจำนวนรูพรุนหรือเซลล์โพลิที่มากกว่าวัสดุโพลิคอมพอสิตของ PC/H และ PC/P ทั้งนี้เนื่องจากผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมลงไปได้ทำหน้าที่เป็น nucleating agent คือเป็นตัวก่อให้เกิดโครงสร้างเซลล์ของโพลิขึ้น โดยผงขี้เลื่อยไม้จะช่วยในการลดแรงตึงผิวที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟสของพอลิเมอร์หลอมเหลวกับก๊าซ หรืออาจไปเกิดช่องว่างระหว่างผิวสัมผัสทำให้สามารถเกิดฟองก๊าซได้ง่ายขึ้น [18, 20] ดังนั้นการเติมผงขี้เลื่อยไม้จึงเป็นการช่วยเพิ่มจำนวนเซลล์โพลิในโครงสร้างของวัสดุโพลิคอมพอสิต

4.3.1.2 ผลต่อสมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิต

ค่าการนำความร้อนของคอมพอสิตระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับผงขี้เลื่อยไม้และโพลิคอมพอสิตระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับผงขี้เลื่อยไม้แสดงดังตารางที่ 12 จากการศึกษาค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของวัสดุโพลิคอมพอสิตกับผงขี้เลื่อยไม้พบว่า สารทำให้เกิดฟองทั้งสองชนิดมีส่วนช่วยปรับปรุงสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนให้คอมพอสิตระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับผงขี้เลื่อยไม้ได้ โดยการใช้ Hydrocerol HK 40B ในสัดส่วน 0.5 phr (PC/W - H 0.5) เป็นสารทำให้เกิดฟองให้ค่าการนำความร้อนอยู่ที่ 0.0844 W/mK ส่วนการใช้ 5-Phenyl-1H-Tetrazole ในสัดส่วน 0.5 phr (PC/W - P 0.5) เป็นสารทำให้เกิดฟองให้ค่าการนำความร้อนอยู่ที่ 0.0875 W/mK ค่าการนำความร้อนที่ลดลงของคอมพอสิตเมื่อมีการใช้สารทำให้เกิดฟองทั้งสองชนิด เกิดจากการที่สารทำให้เกิดฟองเกิดการสลายตัวและปลดปล่อยก๊าซออกมาเมื่อได้รับความร้อนในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปภายใต้ความดัน เมื่อความดันของกระบวนการลดลงก๊าซจะเกิดการขยายตัวทำให้เกิดโครงสร้างแบบเซลล์ขึ้นในเนื้อเมทริกซ์ [45] ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากเทคนิค SEM ดังแสดงในภาพที่ 60 จากภาพที่ 60 ง และ 60 จ ได้แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างแบบโพลิที่เกิดจากการใช้สารทำให้เกิดฟองในวัสดุคอมพอสิต โครงสร้างแบบเซลล์โพลินี้เป็นตัวที่ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนของคอมพอสิตลดลง เนื่องจากช่องว่างที่เกิดขึ้นเป็นตัวเพิ่มระยะทางในการส่งผ่านความร้อนในเนื้อพอลิเมอร์ โดยช่องว่างที่เกิดขึ้นจะมีอากาศแทรกอยู่ซึ่งโดยทั่วไปแล้วอากาศจะมีความสามารถในการนำความร้อนที่น้อยกว่าของแข็ง ดังนั้นคอมพ

ลิตที่ได้จึงมีค่าการนำความร้อนที่ลดลง เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นของชิ้นงานวัสดุโคมคอมพอสิตพบว่ามีความหนาแน่นที่ไม่แตกต่างกัน นั่นหมายถึงภายในชิ้นงานวัสดุโคมคอมพอสิตมีพื้นที่ที่เป็นช่องว่างในปริมาตรใกล้เคียงกัน แต่จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM (ภาพที่ 60 ง และ 60 จ) พบว่าวัสดุโคมคอมพอสิต PC/W-H มีขนาดของเซลล์โคมที่ใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับวัสดุโคมคอมพอสิต PC/W-P และเมื่อพิจารณาถึงค่าการนำความร้อนพบว่าวัสดุโคมคอมพอสิต PC/W-H มีค่าการนำความร้อนที่น้อยกว่า PC/W-P แสดงให้เห็นว่าวัสดุโคมคอมพอสิตที่โครงสร้างของเซลล์โคมมีขนาดใหญ่จะมีสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนที่ดีกว่าวัสดุโคมคอมพอสิตที่โครงสร้างของเซลล์โคมมีขนาดเล็ก ทั้งนี้เนื่องจากในวัสดุโคมที่มีขนาดของเซลล์ใหญ่จะมีพื้นที่หรือระยะทางที่ใช้ในการพาความร้อนมากกว่าวัสดุโคมที่มีขนาดของเซลล์โคมเล็ก ซึ่งการส่งผ่านความร้อนโดยการพาความร้อนนี้จะช่วยลดค่าการนำความร้อนให้กับตัววัสดุได้ [22]

ตารางที่ 12 แสดงค่าการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลีเนียมที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟอง

ตัวอย่างชิ้นงาน	ค่าการนำความร้อน (W/m K)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
PC/W	0.0928 ± 0.0005	1.197 ± 0.001
PC/W - H 0.5	0.0844 ± 0.0002	0.825 ± 0.003
PC/W - P 0.5	0.0875 ± 0.0003	0.829 ± 0.003

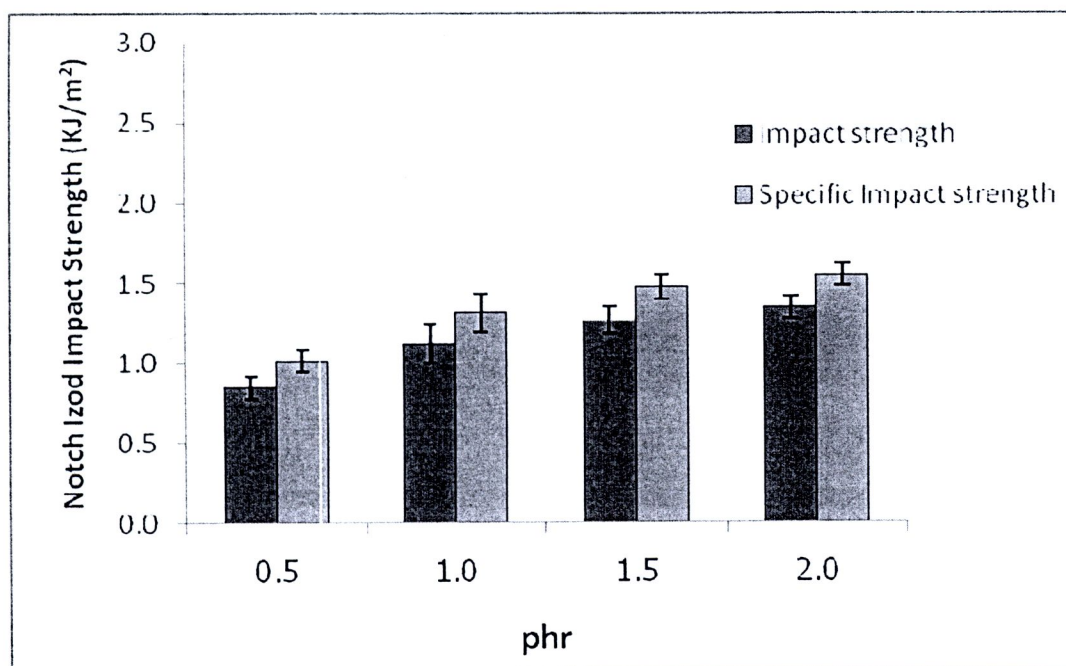
4.3.2 ศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารทำให้เกิดฟองที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมพอสิต

จากการศึกษาผลของการใช้สารทำให้เกิดฟองที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมพอสิตในตอนแรกของการทดลองส่วนที่ 3 พบว่าการใช้สารทำให้เกิดฟองเพื่อจุดประสงค์ในการขึ้นรูปชิ้นงานให้เป็นวัสดุโคมคอมพอสิตได้ส่งผลให้ชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้มีค่า impact strength ที่ลดลงเล็กน้อย รวมถึงค่า Hardness ที่มีการลดลงด้วยเช่นกัน ในขณะที่ความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิตก็มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการเพิ่มสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนให้กับวัสดุคอมพอสิต สารทำให้เกิดฟองทั้ง Hydrocerol HK 40B และ 5-Phényl-1H-Tetrazole ซึ่งได้ทำการทดลองใช้ในปริมาณ 0.5 phr ได้ทำให้คอมพอสิตที่ได้มีลักษณะโครงสร้างภายในเป็นเซลล์โคม ในขั้นต่อไปจึงได้ทำการเพิ่มปริมาณการใช้สารทำให้เกิดฟองทั้ง

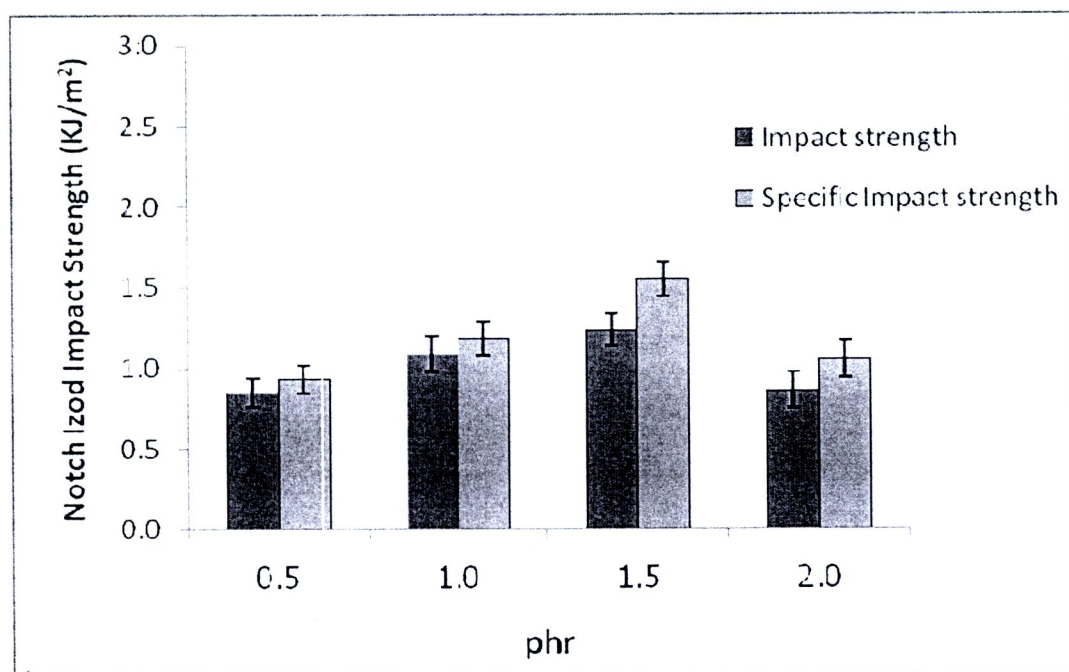
สองชนิดในการขึ้นรูปเป็นวัสดุโฟมคอมพอสิต แล้วทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ทั้งสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมพอสิต

4.3.2.1 ผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิต

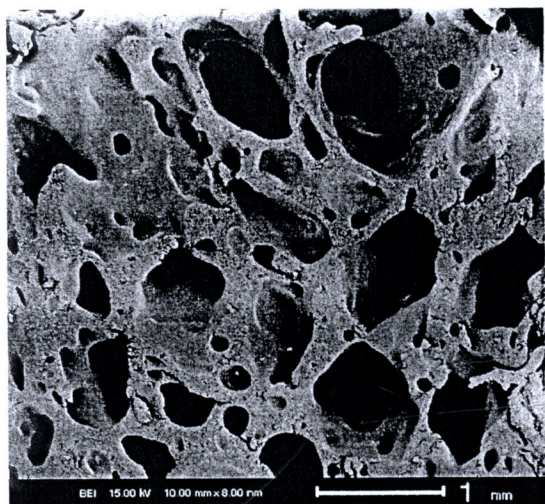
ค่า impact strength ของวัสดุโฟมคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟอง 5-Phenyl-1H-Tetrazole (PC/W-P) และ Hydrocerol HK 40B (PC/W-H) แสดงดังภาพที่ 61 และ 62 ตามลำดับ จากการศึกษาชนิดและปริมาณการใช้สารทำให้เกิดฟอง พบว่าค่า impact strength ของวัสดุโฟมคอมพอสิตในทุกๆ ปริมาณการใช้สารทำให้เกิดฟองทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกันมาก ยกเว้นที่ปริมาณการใช้สารทำให้เกิดฟอง 2.0 phr โดยการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole ปริมาณ 2.0 phr (PC/W-P2.0) จะให้ค่า impact strength ที่สูงกว่าการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด Hydrocerol HK 40B ปริมาณ 2.0 phr (PC/W-H2.0) และเป็นค่า impact strength ที่สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกปริมาณการใช้สารทำให้เกิดฟองของทั้งสองชนิด จากภาพที่ 61 จะเห็นได้ว่าค่า impact strength ของ PC/W-P มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณการใช้สารทำให้เกิดฟอง สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากเมื่อสารทำให้เกิดฟองเกิดการสลายตัวและปลดปล่อยก๊าซออกมามีการใช้สารทำให้เกิดฟองที่ปริมาณน้อยๆก็จะทำให้ได้ก๊าซที่ปลดปล่อยออกมาน้อยเช่นกัน ก๊าซที่ปลดปล่อยออกมานี้จึงมีแรงดันไม่มากพอที่จะทำให้เกิดเป็นเซลล์โฟมที่เสถียร โดยสามารถยืนยันจากภาพที่ได้จากการผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ดังแสดงในภาพที่ 63 จะเห็นได้ว่าจากการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole ในปริมาณ 0.5 phr (ภาพที่ 63 ก) ทำให้ได้โฟมคอมพอสิตที่มีลักษณะเป็นโครงหรือรูพรุนขนาดใหญ่ มีเซลล์โฟมที่เป็นทรงกลมเล็กๆอยู่เพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการใช้สารทำให้เกิดฟองในปริมาณที่มากกว่า โครงสร้างโครงหรือรูพรุนขนาดใหญ่นี้เป็นสาเหตุของการลดลงของค่า impact strength ซึ่งน่าจะเกิดจากการสลายตัวของฟองไม่รวมถึงความชื้นที่มีอยู่ในเนื้อเมตริกซ์ แรงดันจากการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟองในปริมาณที่น้อยไม่สามารถทำให้พอลิเมอร์เมตริกซ์เกิดการเคลื่อนที่ไปแทนพื้นที่ของรูพรุนขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นได้ โดยจะสังเกตเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole จำนวนรูพรุนหรือเซลล์โฟมที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กลงและเพิ่มจำนวนมากขึ้น ซึ่งก็เนื่องมาจากมีการปลดปล่อยก๊าซจากการสลายตัวที่มากขึ้นทำให้มีแรงดันมากพอที่จะทำให้พอลิเมอร์เมตริกซ์เคลื่อนที่ไปแทนส่วนที่เป็นโครงขนาดใหญ่รวมถึงเกิดเป็นเซลล์โฟมที่เสถียรได้ ดังนั้นช่องว่างขนาดใหญ่ซึ่งถือเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงานในการรับแรงจึงลดลง ค่า impact strength ของวัสดุโฟมคอมพอสิตจึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้ 5-Phenyl-1H-Tetrazole



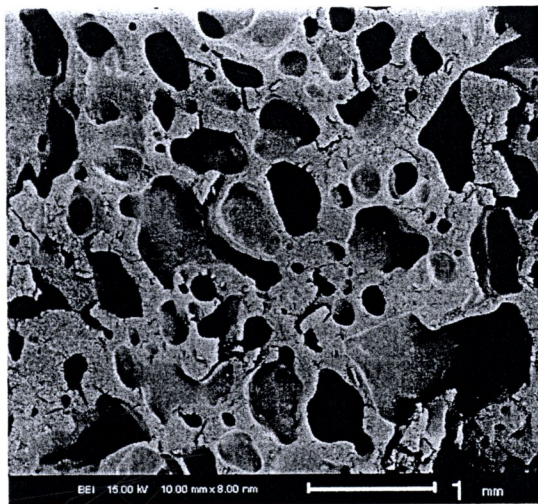
ภาพที่ 61 แสดงค่า Impact strength ของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole ในปริมาณที่แตกต่างกัน



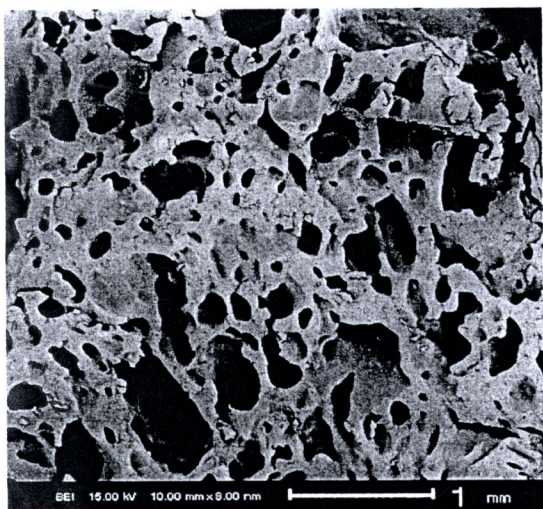
ภาพที่ 62 แสดงค่า Impact strength ของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด Hydrocerol HK 40B ในปริมาณที่แตกต่างกัน



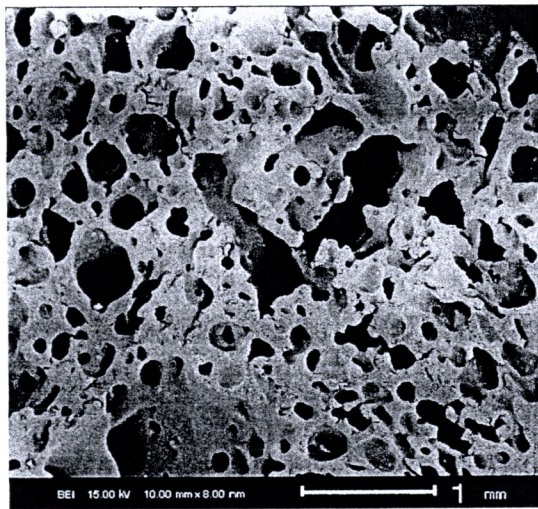
(ก)



(ข)

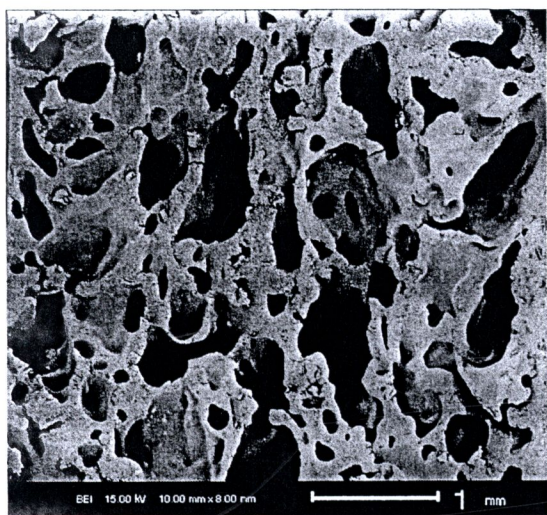


(ค)

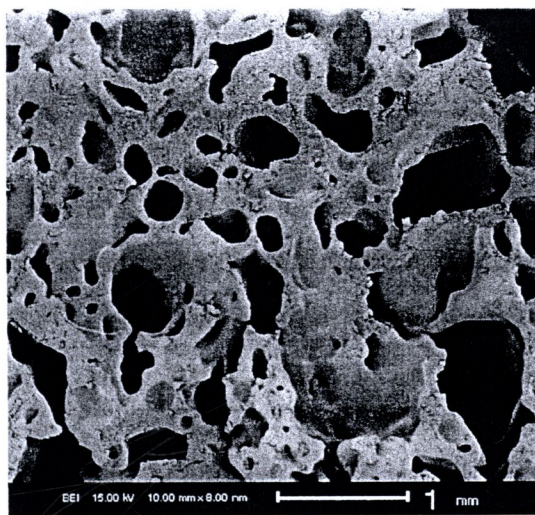


(ง)

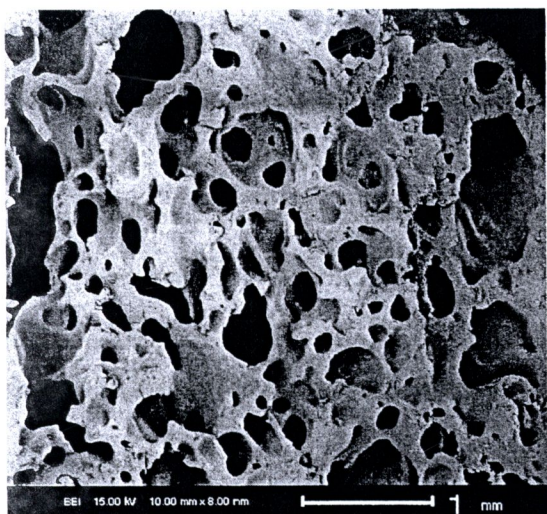
ภาพที่ 63 แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุโพลีอิมไดด์ที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole ในปริมาณที่แตกต่างกัน (ก) 0.5 (ข) 1.0 (ค) 1.5 และ (ง) 2.0 phr ที่กำลังขยาย 12 เท่า



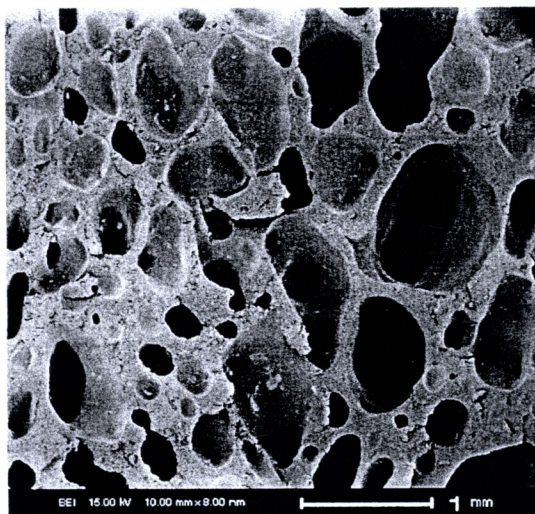
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 64 แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุโพรพิลีนคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด Hydrocerol HK 40B ในปริมาณที่แตกต่างกัน (ก) 0.5 (ข) 1.0 (ค) 1.5 และ (ง) 2.0 phr ที่กำลังขยาย 12 เท่า

ในส่วนของการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด Hydrocerol HK 40B (ภาพที่ 62) พบว่าค่า impact strength ของวัสดุโพรพิลีนคอมพอสิตจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้สารทำให้เกิดฟอง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการใช้ถึง 2.0 ค่า impact strength กลับมีการลดลง ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณก๊าซที่เพิ่มขึ้นจากการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟองทำให้ความดันภายในเซลล์

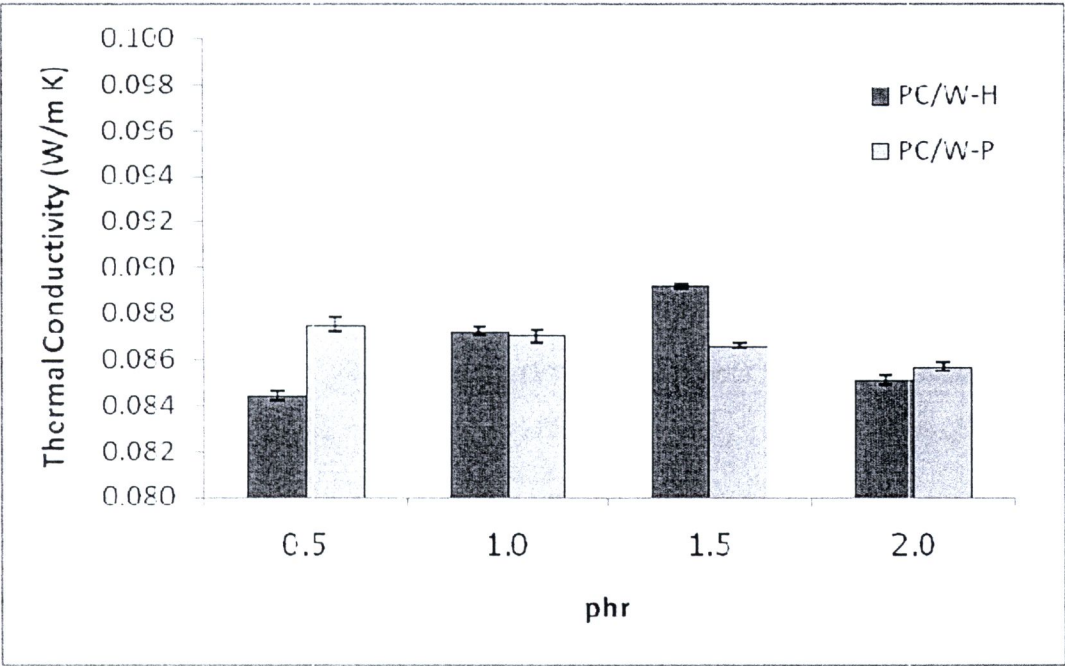
โพลีมีค่าเพิ่มขึ้น ความดันที่มากเกินไปอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการแตกออกของเซลล์โพลี เซลล์โพลีที่แตกออกจึงเกิดการรวมตัวกับเซลล์โพลีที่อยู่ใกล้ๆเกิดเป็นเซลล์โพลีที่มีขนาดใหญ่ขึ้น สอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ของการใส่สารทำให้เกิดฟองชนิด Hydrocerol HK 40B ดังแสดงในภาพที่ 64 จะเห็นได้ว่าที่ปริมาณการใช้ Hydrocerol HK 40B 0.5, 1.0 และ 1.5 phr มีรูพรุนหรือเซลล์ โพลีขนาดเล็กเกิดขึ้นในชิ้นงานจำนวนมาก แต่สำหรับการใส่สารทำให้เกิดฟองปริมาณ 2.0 phr จะพบว่าเซลล์โพลีที่เกิดขึ้นมีขนาดเซลล์ที่ใหญ่และมีลักษณะที่ค่อนข้างกลม อีกทั้งยังมีจำนวนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ Hydrocerol HK 40B ในปริมาณอื่น ซึ่งเซลล์โพลีขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นนี้ส่งผลอย่างยิ่งต่อความสามารถในการรับและส่งผ่านแรง ค่า impact strength ของโพลีคอมพอสิตจึงลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้ Hydrocerol HK 40B จนถึง 2.0 phr

จากตารางที่ 13 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบสมบัติ Hardness ของชิ้นงานโพลีคอมพอสิต พบว่าการเพิ่มปริมาณการใช้สารทำให้เกิดฟองของทั้ง Hydrocerol HK 40B และ 5-Phenyl-1H-Tetrazole ไม่ได้ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า Hardness อย่างมีนัยสำคัญ ค่าความแข็งแรงบริเวณพื้นผิวของวัสดุโพลีคอมพอสิตในแต่ละปริมาณการใช้สารทำให้เกิดฟองยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน โดยสารทำให้เกิดฟองชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole ได้ทำให้วัสดุโพลีคอมพอสิตที่ได้มีค่า Hardness ที่มากกว่าการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด Hydrocerol HK 40B ซึ่งก็เนื่องมาจากผลของขนาดเซลล์โพลีที่เล็กกว่า แต่จากค่า Hardness ของวัสดุโพลีคอมพอสิตทั้งสองชนิดทำให้ทราบได้ว่าโพลีคอมพอสิตที่ได้เป็นโพลีประเภทโพลีแข็ง

ตารางที่ 13 แสดงค่า Hardness ของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใส่สารทำให้เกิดฟองในปริมาณที่แตกต่างกัน

ปริมาณการใช้ (phr)	Hardness (Shore D)	
	PC/W-H	PC/W-P
0.5	44.4 ± 2.5	50.6 ± 1.8
1.0	47.0 ± 1.4	51.6 ± 1.9
1.5	40.2 ± 2.5	52.1 ± 1.8
2.0	38.9 ± 2.3	52.7 ± 1.5

4.3.2.2 ผลต่อสมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิต

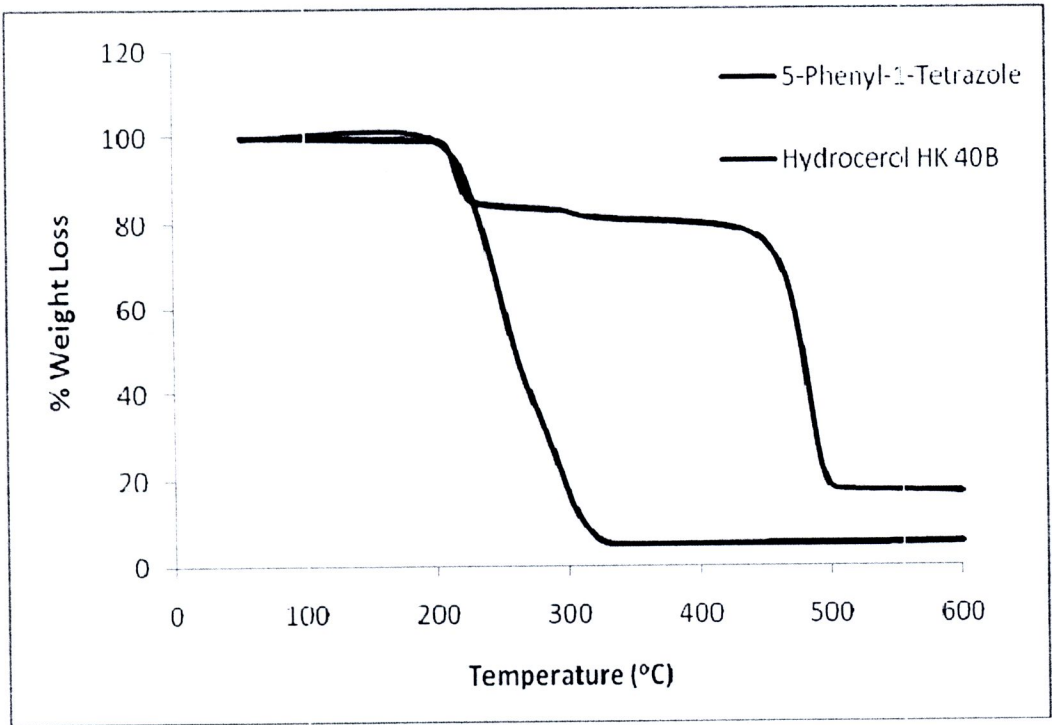


ภาพที่ 65 แสดงค่าการนำความร้อนของวัสดุโคมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองในปริมาณที่แตกต่างกัน

จากการทดสอบสมบัติในการนำความร้อนของชิ้นงานโคมพอสิตที่ได้จากการใช้สารทำให้เกิดฟองทั้งสองชนิดให้ผลเป็นไปตามภาพที่ 65 ค่าการนำความร้อนของโคมพอสิตที่มีการใช้ 5-Phenyl-1H-Tetrazole เป็นสารทำให้เกิดฟองมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้ ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณสารทำให้เกิดฟองที่เพิ่มขึ้นได้ทำให้ปริมาณก๊าซที่เกิดจากการสลายตัวทางความร้อนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้ความสามารถในการฟอร์มตัวเป็นเซลล์โฟมมีมากขึ้น โครงสร้างภายในจึงเกิดเป็นเซลล์โฟมจำนวนมาก โดยสามารถยืนยันได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ดังภาพที่ 63 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเซลล์โฟมจะมีความสม่ำเสมอและมีจำนวนมากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณการใช้ 5-Phenyl-1H-Tetrazole จำนวนเซลล์โฟมที่เพิ่มขึ้นนี้ได้ไปเป็นตัวขัดขวางการส่งผ่านความร้อนภายในเนื้อเมทริกซ์ ทำให้ความสามารถในการนำความร้อนของคอมพอสิตลดลง แม้ว่าที่ปริมาณการใช้สารทำให้เกิดฟองน้อยๆ ได้ทำให้โคมพอสิตมีโครงสร้างภายในเป็นโพรงขนาดใหญ่ แต่ก็มีจำนวนไม่มากพอที่จะทำให้ค่าการนำความร้อนของโคมพอสิตลดลง ส่วนค่าการนำความร้อนของโคมพอสิตที่ใช้ Hydrocerol HK 40B เป็น

สารทำให้เกิดฟอง กลับพบว่าค่าการนำความร้อนของชิ้นงานโฟมคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้จาก 0.5 phr ไปเป็น 1.0 และ 1.5 phr ซึ่งเป็นเรื่องที่ยอมรับได้ยาก ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากที่ปริมาณการใช้น้อยๆ แรงดันของก๊าซที่เกิดจากการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟอง ไม่สามารถผลักดันให้โครงสร้างภายในเนื้อเมตริกซ์เกิดเป็นเซลล์โฟมที่เสถียรได้ เซลล์โฟมที่เกิดขึ้นจึงมีลักษณะเป็นโพรงขนาดใหญ่รวมอยู่กับเซลล์โฟมที่มีขนาดเล็กจำนวนมาก ซึ่งโพรงหรือรูพุนขนาดใหญ่นี้เป็นตัวที่ส่งผลอย่างยิ่งให้เกิดการลดลงของค่าการนำความร้อน และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณการใช้สารทำให้เกิดฟองแรงดันก๊าซภายในที่เกิดจากการสลายตัวของ Hydrocerol HK 40B ก็จะมีปริมาณเพิ่มขึ้น จนทำให้สามารถฟอร์มตัวเกิดเป็นเซลล์โฟมขนาดเล็กและเสถียรได้ ทำให้พื้นที่ภายในเมตริกซ์ที่เป็นโพรงขนาดใหญ่ลดจำนวนลง ค่าการนำความร้อนจึงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อทำการเพิ่มปริมาณการใช้ Hydrocerol HK 40B เป็น 2.0 phr เซลล์โฟมที่เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากจะเกิดการแตกออกของผนังเซลล์โฟมและเชื่อมต่อกับเซลล์ที่อยู่ใกล้เคียง เกิดเป็นเซลล์โฟมที่มีขนาดใหญ่ ช่องว่างหรือรูพุนขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นนี้เป็นตัวเพิ่มระยะทางในการส่งผ่านความร้อนในเนื้อเมตริกซ์ ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนมีการลดลงอีกครั้ง

เมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนของวัสดุโฟมคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองทั้งสองชนิด จะเห็นได้ว่าวัสดุโฟมคอมพอสิตของ 5-Phenyl-1H-Tetrazole มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำที่สุดที่ปริมาณการใช้ 2.0 phr ในขณะที่วัสดุโฟมคอมพอสิตของ Hydrocerol HK 40B มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำที่สุดที่ปริมาณการใช้ 0.5 phr และเป็นปริมาณการใช้ที่ทำให้ได้ค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ 5-Phenyl-1H-Tetrazole ในปริมาณ 2.0 phr แต่เมื่อพิจารณาถึงโครงสร้างภายในของวัสดุโฟมคอมพอสิตจากภาพที่ 63 และ 64 พบว่าโฟมคอมพอสิตที่ใช้ Hydrocerol HK 40B เป็นสารทำให้เกิดฟองมีปริมาณเซลล์โฟมที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ 5-Phenyl-1H-Tetrazole โดยจากภาพที่ 66 ซึ่งแสดงพฤติกรรมสลายตัวทางความร้อนของสารทำให้เกิดฟองทั้งสองชนิด ทำให้ทราบว่า ณ อุณหภูมิที่ทำการขึ้นรูป (ประมาณ 238°C) Hydrocerol HK 40B ได้เกิดการสลายตัวไปประมาณ 16% ในขณะที่ 5-Phenyl-1H-Tetrazole เกิดการสลายตัวไปประมาณ 25% ส่งผลให้ก๊าซที่เกิดจากการสลายตัวของ 5-Phenyl-1H-Tetrazole มีปริมาณมากกว่า ทำให้มันสามารถฟอร์มตัวเป็นเซลล์โฟมที่มีความเสถียรและมีปริมาณเซลล์ที่มากกว่าการใช้ Hydrocerol HK 40B ดังนั้นการใช้ 5-Phenyl-1H-Tetrazole ที่ปริมาณ 2.0 phr จะทำให้ได้โฟมคอมพอสิตที่มีสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนที่ดีและมีโครงสร้างของเซลล์โฟมที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ



ภาพที่ 66 แสดง TGA thermogram ของสารทำให้เกิดฟอง