

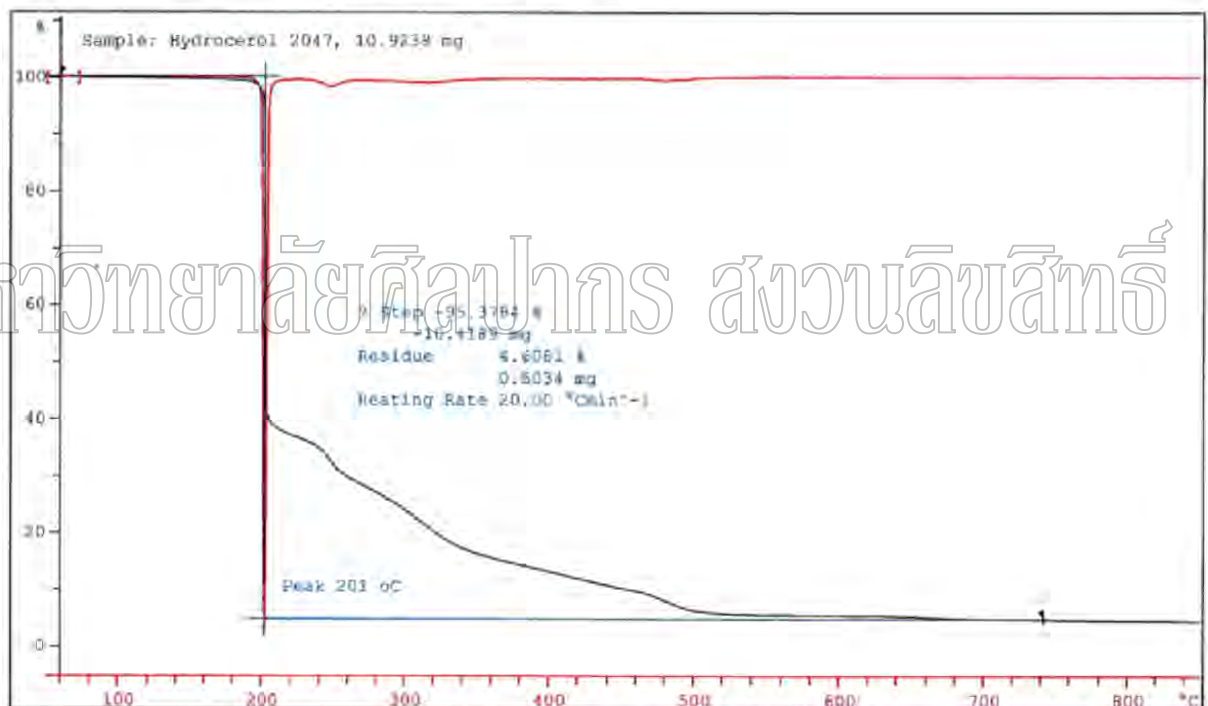
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะของ Hydrocerol 2047

4.1.1 การศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของ Hydrocerol 2047 โดยอาศัยเครื่อง TGA

ทำการทดสอบ TGA เพื่อศึกษาปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนของ Hydrocerol 2047 ภายใต้บรรยากาศของอากาศ (air) โดยใช้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส ต่อนาที พบว่าได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.1

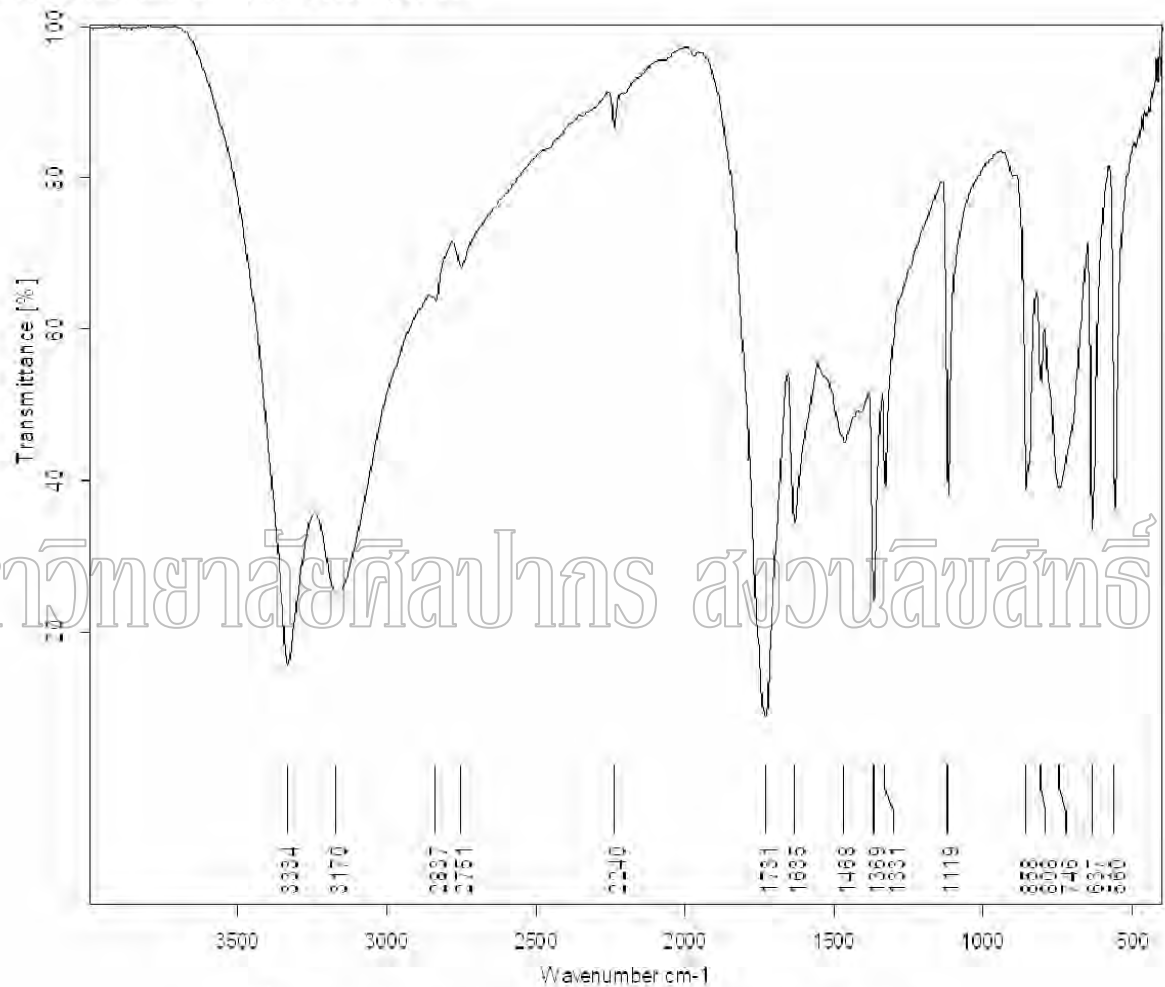


รูปที่ 4.1 แสดงน้ำหนักที่ลดลงของ Hydrocerol 2047 เมื่อเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อน ภายใต้อากาศ ที่อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที

จากรูปที่ 4.1 พบว่าที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส น้ำหนักของ Hydrocerol 2047 จะมีค่าลดลง 62% จากนั้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ภายหลังการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวพบว่ามีสารผลิตภัณฑ์เป็นผงสีน้ำตาลหลงเหลืออยู่ ซึ่งจาก Thermogram สามารถสรุปได้ว่า Hydrocerol 2047 เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวปลดปล่อยก๊าซที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นหลักดังนั้นในขั้นตอนการผลิตคอมปาวด์ด้วยเครื่อง Twin Screw Extruder จึงจำเป็นต้องทำการผสมภายใต้อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียสเพื่อไม่ให้

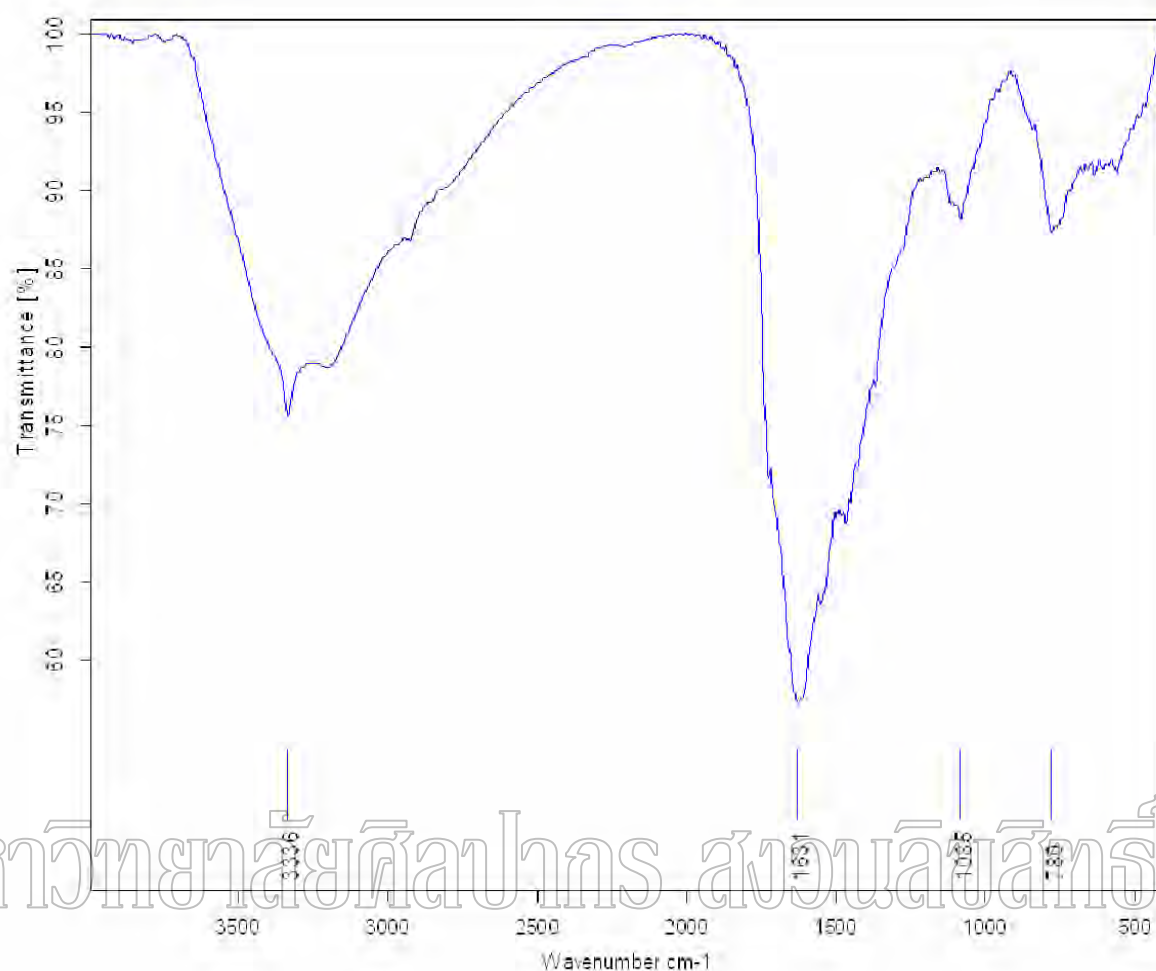
Hydrocerol 2047 เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวก่อนขั้นตอนการขึ้นรูปจริง และในขั้นตอนการขึ้นรูปด้วยเครื่อง Injection molding ต้องใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปสูงกว่า 200 องศาเซลเซียสเพื่อให้ Hydrocerol 2047 เกิดการสลายตัวปลดปล่อยก๊าซออกมามากที่สุด

4.1.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของ Hydrocerol 2047 ก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค FTIR Spectra



รูปที่ 4.2 แสดง FTIR Spectra ของ Hydrocerol 2047 ก่อนเผา

เพื่อศึกษาถึงหมู่ฟังก์ชันของ Hydrocerol 2047 ก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อน จึงนำ Hydrocerol 2047 ไปเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 ชั่วโมงใน electric furnace ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนอย่างสมบูรณ์ แล้วนำตัวอย่างที่ได้ทั้งก่อนและหลังการเผาไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 แสดง FTIR Spectra ของ Hydrocerol 2047 หลังเผา

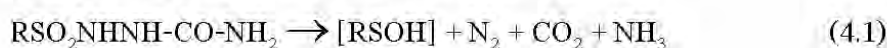
เมื่อทำการเปรียบเทียบ FTIR Spectra จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 ของ Hydrocerol 2047 ก่อนและหลังเผา จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าเปอร์เซ็นต์ Transmittance ที่ความยาวคลื่นต่างๆของ Hydrocerol 2047 ก่อนและหลังเผา [41]

| Peak ของ Hydrocerol 2047 ก่อนเผา ( $\text{cm}^{-1}$ ) | Peak ของ Hydrocerol 2047 หลังเผา ( $\text{cm}^{-1}$ ) | คำอธิบาย                                                                |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 3334                                                  | 3336                                                  | } เกิดจากการยืดออกอย่างสมมาตรของพันธะ N-H                               |
| 3170                                                  | ไม่ปรากฏ                                              |                                                                         |
| 2837-2716                                             | ไม่ชัดเจน                                             | เกิดจากการยืดของพันธะ C-H ใน $\text{CH}_2$ $\text{CH}_3$ และหมู่ alkane |
| 1731                                                  | ไม่ปรากฏ                                              | เกิดจากการยืดของพันธะ C=O ในเอสเทอร์                                    |
| 1635                                                  | 1631                                                  | เกิดจากหมู่ C=C ของหมู่ Phenyl ring                                     |

| Peak ของ Hydrocerol<br>2047 ก่อนเผา (cm <sup>-1</sup> ) | Peak ของ Hydrocerol<br>2047 หลังเผา (cm <sup>-1</sup> ) | คำอธิบาย                                     |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 1468                                                    | ไม่ปรากฏ                                                | เกิดจาก N-H Secondary amine                  |
| 1331                                                    | ไม่ปรากฏ                                                | เกิดจากการยึดของพันธะ C-N                    |
| 1119                                                    | 1085                                                    | เกิดจากโครงสร้างที่สมมาตรของ SO <sub>2</sub> |

Hydrocerol 2047 เป็น Chemical foaming agents ที่มีองค์ประกอบหลักเป็น Sulfonyl semicarbazides [22-23, 35] ซึ่งมีปฏิกิริยาการสลายตัวดังสมการที่ 4.1



เมื่อเปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันของ Hydrocerol 2047 ก่อนและหลังเผา พบว่าเมื่อ Hydrocerol 2047 เกิดการสลายตัวจะทำให้การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆหายไปบางช่วงคือ ที่ 3170, 1731, 1468 และ 1331 cm<sup>-1</sup> ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาการสลายตัวของ Hydrocerol 2047 ส่งผลให้พันธะ N-H, C=O, N-H Secondary amine และ C-N หายไปจากโครงสร้าง ซึ่งสอดคล้องกับปฏิกิริยาการสลายตัวที่เกิดขึ้นในสมการที่ 4.1 ที่พันธะที่หายไปจากโครงสร้างจะไปเกิดเป็นก๊าซในโตรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และแอมโมเนีย

## 4.2 ผลของปริมาณ Hydrocerol 2047 ที่มีต่อลักษณะทางกายภาพของพอลิพรอไพลีนและพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว

### 4.2.1 ผลของปริมาณ Hydrocerol 2047 ต่อความหนาแน่นของพอลิพรอไพลีนและพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว

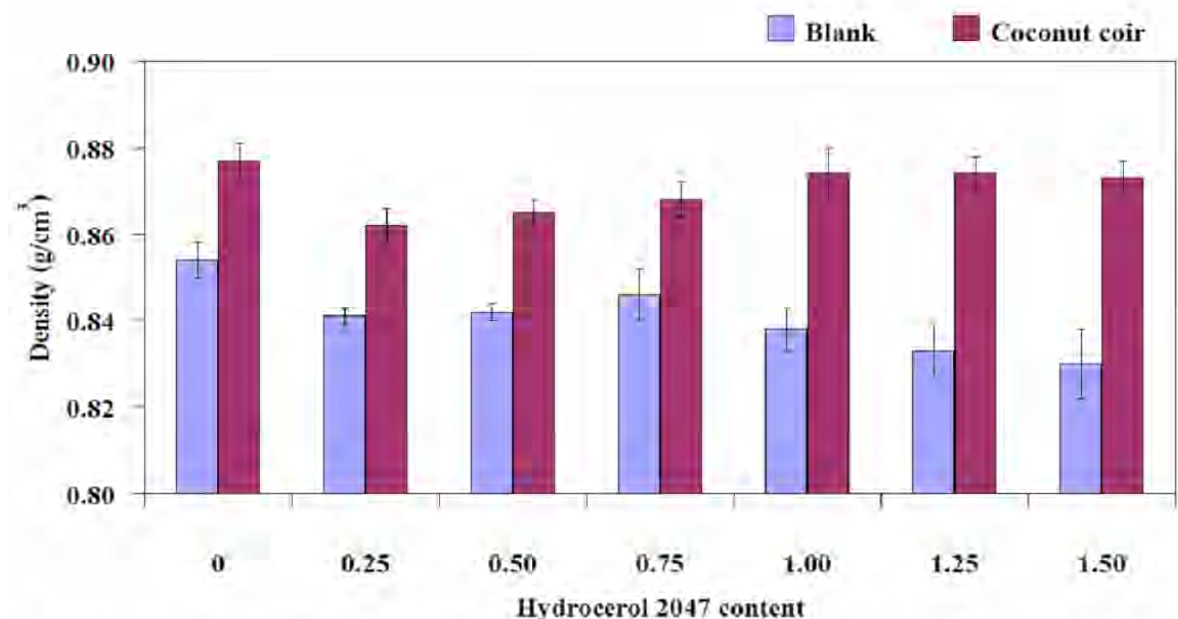
ความหนาแน่นของพอลิพรอไพลีนและพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 ต่างๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 จากรูปแสดงให้เห็นว่าการเติม Hydrocerol 2047 ส่งผลให้พอลิพรอไพลีนมีความหนาแน่นลดลงมากกว่าพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว เนื่องจากการเติมเส้นใยมะพร้าวมีผลทำให้ค่าความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวมีค่าเพิ่มมากขึ้น จึงไปขัดขวางการเกิดและเติบโตของเซลล์โฟม และการเพิ่มขึ้นของค่าความหนืดของพอลิเมอร์ยังส่งผลให้อัตราการสูญเสียก๊าซออกจากระบบเพิ่มมากขึ้น [4-6] ทำให้อัตราการเกิดและเติบโตของเซลล์ในพอลิพรอไพลีนมีค่าสูงกว่าพอลิพรอไพลีนคอมพอสิต ค่าความหนาแน่นของพอลิพรอไพลีนจึงลดลงมากกว่าพอลิพรอไพลีนคอมพอสิต

สำหรับพอลิพรอไพลีนนั้น การเติม Hydrocerol 2047 เท่ากับ 0.25 phr จะมีผลทำให้ค่าความหนาแน่นลดลงและมีค่าเกือบคงที่ จนกระทั่งปริมาณของ Hydrocerol 2047 เท่ากับ 0.75 phr

จากนั้นค่าความหนาแน่นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งมีค่าต่ำสุดที่ปริมาณ Hydrocerol 2047 เท่ากับ 1.50 phr เหตุผลที่ทำให้ความหนาแน่นของพอลิพรอไพลีนมีการลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณการเติม Hydrocerol ก็เนื่องมาจากการเกิดเซลล์โฟมที่มีขนาดเล็กลงในจำนวนมากขึ้น

ส่วนความหนาแน่นของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใย

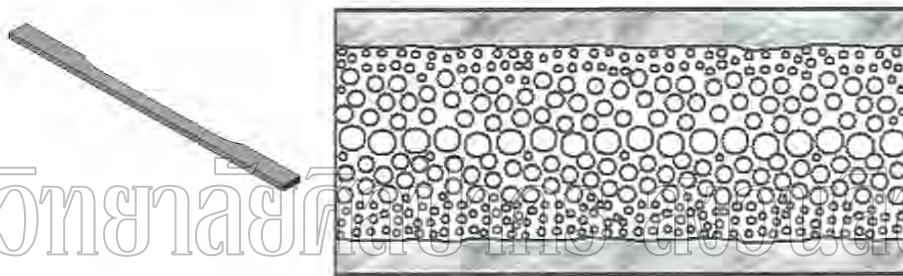
มะพร้าวจะมีค่าต่ำสุดที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 เท่ากับ 0.25 phr และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 เพิ่มมากขึ้น โดยการเพิ่มมากขึ้นของความหนาแน่นนั้น น่าจะเนื่องมาจากมีการสูญเสียก๊าซ (จากการสลายตัวของ Hydrocerol 2047) ออกจากระบบ พอลิพรอไพลีนคอมพอสิตหลอมเหลวมีความหนืดสูง ทำให้โอกาสในการเกิดจุดเริ่มต้นของฟองก๊าซมีน้อยและก๊าซเกิดการแพร่เข้าไปในจุดเริ่มต้นของฟองก๊าซได้ยาก ก๊าซจึงมีแนวโน้มที่จะเกิดการแพร่ออกไปจากระบบในระหว่างขั้นตอนการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ เพราะค่าความดันในระบบอันเนื่องมาจากแรงดันไฮดรอลิกลดน้อยลงในช่วงนั้น ซึ่งเหตุการณ์นี้จะเกิดมากขึ้นเมื่อแรงดันของก๊าซในระบบมีค่าเพิ่มมากขึ้น (ปริมาณ Hydrocerol 2047 มากขึ้น) จนกระทั่งที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 เท่ากับ 1.00 phr ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวจึงมีค่าคงที่ น่าจะเนื่องมาจากเกิดสมดุลระหว่างการเกิดโฟมในระบบและการแพร่ออกของก๊าซที่มากเกินไป



รูปที่ 4.4 ผลของปริมาณ Hydrocerol 2047 ต่อความหนาแน่นของพอลิพรอไพลีนและพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว

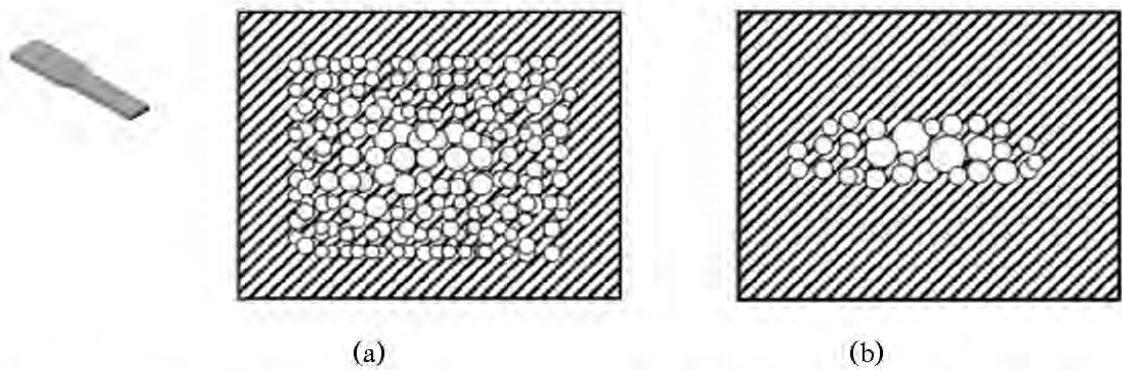
4.2.2 ผลของปริมาณ Hydrocerol 2047 ต่อโครงสร้างเซลล์ของพอลิพรอไพลีนและพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว

จากการศึกษา Cell morphology ของชิ้นงานพอลิพรอไพลีนและพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเติม Hydrocerol 2047 พบว่าโครงสร้างมีลักษณะเป็นแบบแกนวิชกือบริเวณแกนกลาง (core) ของชิ้นงานจะมีลักษณะเป็นเซลล์เล็กจำนวนมากที่ถูกห่อหุ้มด้วยผิวพอลิเมอร์แข็ง (solid skin) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 เซลล์ที่เกิดขึ้นจะเกิดในทิศทางการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว โดยจะเกิดเฉพาะที่แกนกลางของชิ้นงานเท่านั้น ผงของชิ้นงานที่เกิดขึ้นจะเป็นพอลิเมอร์แข็งเนื่องจากเมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวเกิดการไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ก็จะไปสัมผัสกับผิวแม่พิมพ์ที่เย็นตามรูปแบบการไหลแบบ fountain flow ของการฉีดพลาสติกทำให้พอลิเมอร์เกิดการแข็งตัวก่อนที่จะเกิดการขยายตัว ถ้าจึงเกิดการขยายตัวได้ที่บริเวณแกนกลางของชิ้นงานที่ยังคงหลอมเหลวอยู่ทำให้เซลล์โฟมเกิดได้ที่บริเวณแกนกลางของชิ้นงานเท่านั้น



รูปที่ 4.5 แสดงแบบจำลองโครงสร้างแบบแกนวิชของชิ้นงานพอลิพรอไพลีนที่มีโครงสร้างแบบโฟม ตามแนวยาว [23]

ถึงแม้ว่า Cell morphology ของชิ้นงานพอลิพรอไพลีนและพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตจะเกิดแบบแกนวิชเหมือนกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบกันในภาคตัดขวางจะพบว่ามีลักษณะแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ลักษณะของเซลล์ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานพอลิพรอไพลีนจะเกิดดังแสดงในรูปที่ 4.6 (a) กล่าวคือเซลล์จะเกิดตลอดแกนกลางภาคตัดขวางของชิ้นงาน ในขณะที่ลักษณะของเซลล์ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตนั้น เซลล์โฟมที่เกิดขึ้นจะกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (b) ทั้งนี้เป็นเพราะจุดกำเนิดในการเกิดเซลล์โฟมของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตจะเกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างพอลิพรอไพลีนและเส้นใย ซึ่งการขยายตัวของเซลล์จะเกิดขึ้นบริเวณนั้นมากกว่าจะไปเกิดจุดกำเนิดใหม่เนื่องจากผลของความหนืดที่สูงในระบบ โดยลักษณะของเซลล์และขนาดของเซลล์ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการผสมของ Hydrocerol 2047



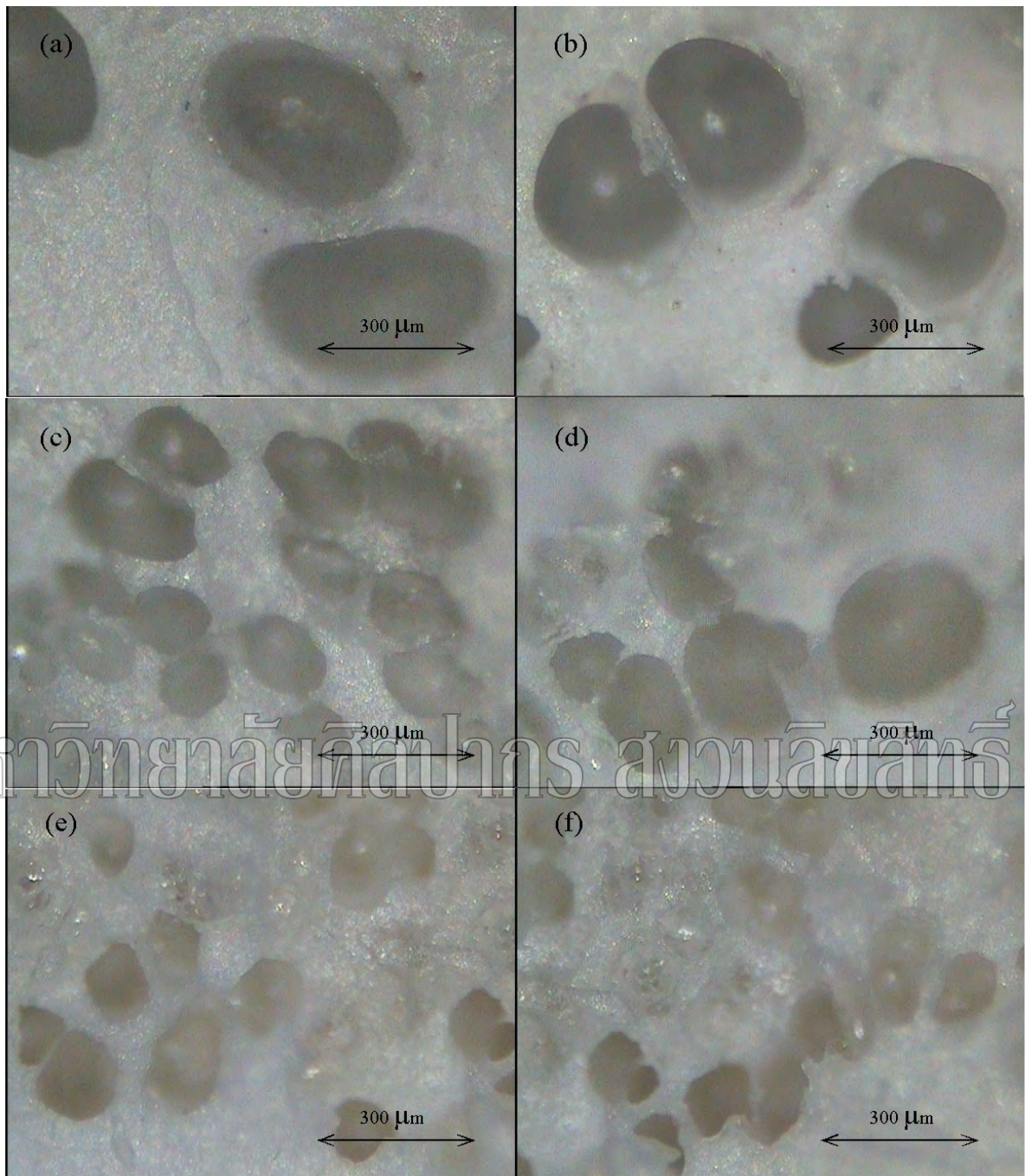
รูปที่ 4.6 แสดงแบบจำลองโครงสร้างภาคตัดขวางของเซลล์โฟมของชิ้นงาน (a) พอลิพรอไพลีน และ (b) ชิ้นงานพอลิพรอไพลีนคอมพอสิต

เมื่อนำตัวอย่างมาศึกษาลักษณะภาคตัดขวางของชิ้นงานด้วยเครื่อง Optical microscope พบว่าลักษณะของเซลล์ในชิ้นงานคอมพอสิตที่ไม่มีการเติมสารเสริมแรง ที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 ต่างๆ ได้ผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเซลล์มีลักษณะเป็นแบบเซลล์ปิด และปริมาณของ Hydrocerol 2047 มีอิทธิพลต่อลักษณะและขนาดของเซลล์ กล่าวคือ ที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 เท่ากับ 0.25 phr เซลล์ที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่ และมีจำนวนน้อย เนื่องจากมีก๊าซเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการสลายตัวของ Hydrocerol 2047 น้อย ดังนั้นก๊าซที่เกิดขึ้นนี้จึงมีแนวโน้มที่จะมารวมตัวกันเพื่อที่จะมีแรงดันให้เพียงพอสำหรับการเกิดเป็นเซลล์โฟมได้ เมื่อปริมาณของ Hydrocerol 2047 เพิ่มมากขึ้นเซลล์จะมีขนาดลดลง จนกระทั่งปริมาณของ Hydrocerol 2047 เท่ากับ 1.00 phr เซลล์โฟมที่เกิดขึ้นจะเกิดการเชื่อมต่อกันคล้ายกับเซลล์เปิด เนื่องจากก๊าซที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการสลายตัวของ Hydrocerol 2047 เกิดมากขึ้นทำให้แรงดันของก๊าซภายในเซลล์เพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งพอลิเมอร์เมทริกซ์ไม่สามารถรักษาสภาพของเซลล์ไว้ได้ เซลล์จึงเกิดการเชื่อมต่อกันคล้ายกับเซลล์เปิด [4-6,28] ระดับการเชื่อมต่อกันของเซลล์จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณของ Hydrocerol 2047 เพิ่มมากขึ้น

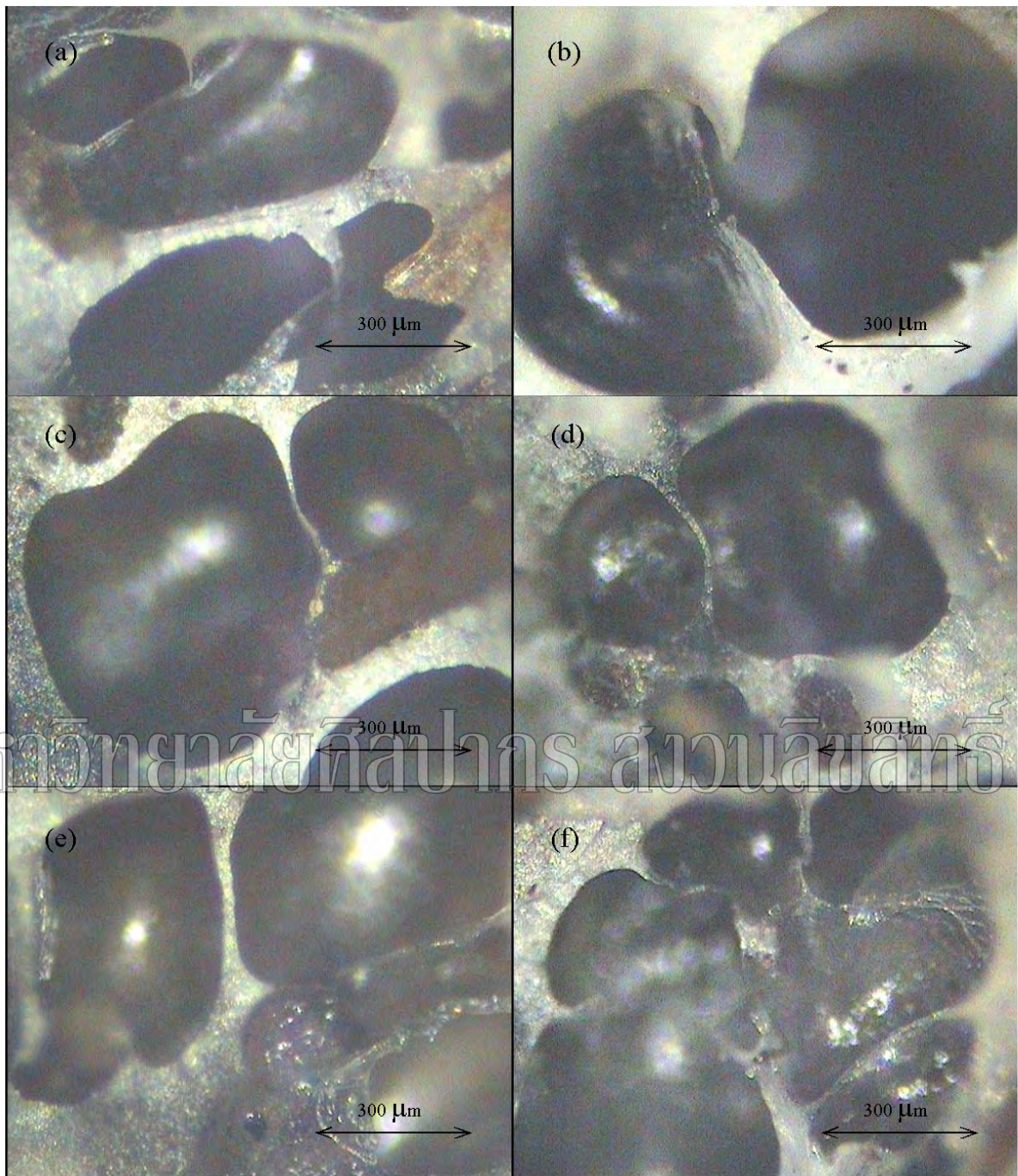
เมื่อทำการศึกษาอิทธิพลของการเติม Hydrocerol 2047 ต่อโครงสร้างเซลล์ของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว ได้ผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.8 จากรูปพบว่าการเติมสารเสริมแรงมีอิทธิพลทำให้เซลล์มีขนาดใหญ่ขึ้น ผนังเซลล์เกิดการเชื่อมต่อกันเป็นเซลล์เปิดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากผลของความยาวของเส้นใยที่มีขนาดยาวกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเซลล์ทำให้เซลล์เกิดการเชื่อมต่อกันเป็นเซลล์เปิดเพิ่มมากขึ้น ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของเซลล์เมื่อปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 เพิ่มมากขึ้นพบว่ามีลักษณะเช่นเดียวกับโครงสร้างเซลล์ของพอลิพรอไพลีนที่ไม่มีการเติมสารเสริมแรง โดยที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 เท่ากับ 0.25 phr เซลล์ของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวจะมีขนาดใหญ่มีจำนวนน้อยและมีลักษณะเป็นวงรี เนื่องจากการมีก๊าซเกิดขึ้นใน

โครงสร้างน้อยทำให้ก๊าซที่เกิดขึ้นนี้จึงมีแนวโน้มที่จะมารวมตัวกันเพื่อที่จะมีแรงดันให้เพียงพอสำหรับการเกิดเป็นเซลล์โฟม ปริมาณแรงดันของก๊าซในเซลล์ค่านั้นน้ำหนักของเนื้อพลาสติกจึงดันให้เซลล์มีรูปร่างเป็นทรงรี เมื่อปริมาณของ Hydrocerol 2047 มีค่าเพิ่มมากขึ้นเท่ากับ 0.50 phr เซลล์ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปเป็นแบบเป็นทรงกลมที่มีขนาดเล็กลงเนื่องจากแรงดันภายในเซลล์เพิ่มสูงขึ้นจึงสามารถรักษาสภาพทรงกลมไว้ได้โดยไม่ถูกกดทับโดยน้ำหนักของเนื้อพลาสติก [23] และเมื่อปริมาณของ Hydrocerol 2047 มีค่าเพิ่มมากขึ้นอีกเซลล์จะมีขนาดเล็กลง ปริมาณของเซลล์ในโครงสร้างจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นและระดับการเชื่อมต่อกันของเซลล์จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์



รูปที่ 4.7 แสดง Optical micrographs ของภาคตัดขวางของชิ้นงานพอลิพรอไพลีนที่มีโครงสร้างแบบโพนที่มีอัตราส่วนของ Hydrocerol 2047 ต่างๆ ดังนี้ (a) 0.25, (b) 0.50, (c) 0.75, (d) 1.00, (e) 1.25 และ (f) 1.50 phr

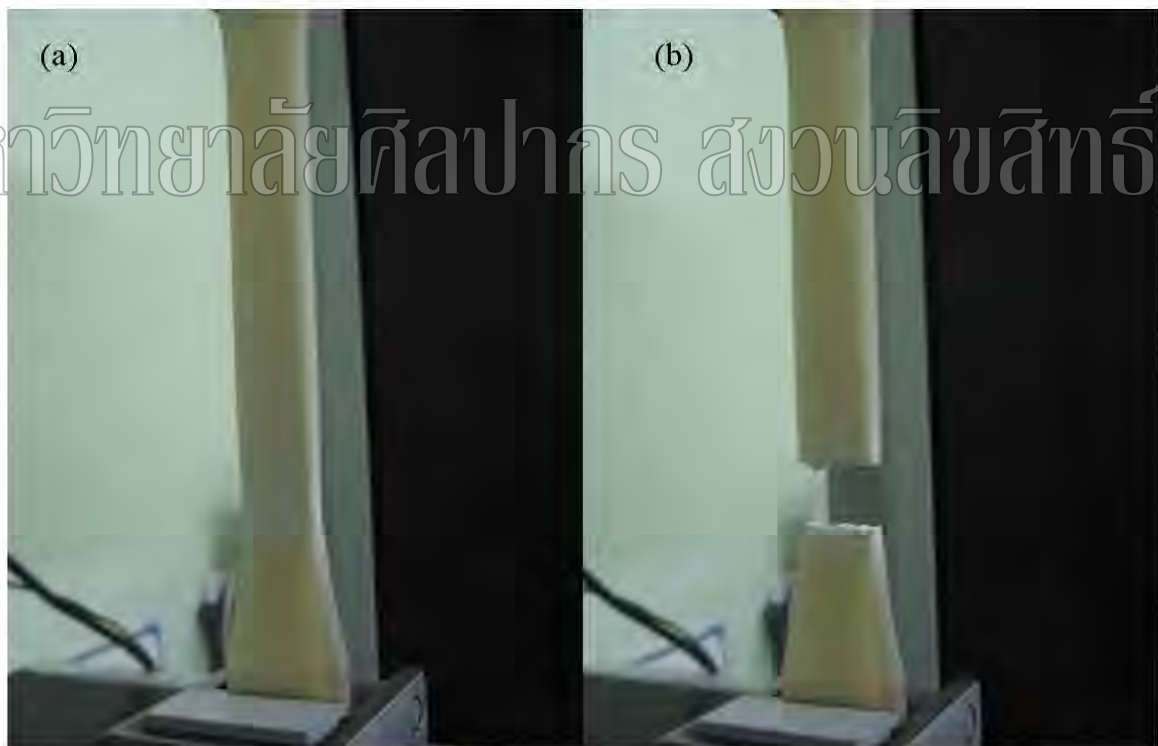


รูปที่ 4.8 แสดง Optical micrographs ของภาคตัดขวางของชิ้นงานพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวที่อัตราส่วนของ Hydrocerol 2047 ต่างๆ ดังนี้ (a) 0.25, (b) 0.50, (c) 0.75, (d) 1.00, (e) 1.25 และ (f) 1.50 phr

### 4.3 ผลของโครงสร้างแบบโพลีที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิต

4.3.1 ผลของโครงสร้างแบบโพลีต่อสมบัติความต้านทานต่อการดึงยึดของพอลิพรอไพลีนและพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว

เมื่อนำชิ้นงานพอลิพรอไพลีนและพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเติม Hydrocerol 2047 ไปทดสอบความต้านทานต่อการดึงยึดพบว่า เมื่อชิ้นงานได้รับแรงดึงยึดจะมี craze เกิดขึ้นจำนวนมากตลอดระยะเกจ (gauge length) ดังแสดงในรูปที่ 4.9 เนื่องมาจากการที่ชิ้นงานมีโครงสร้างภายในเป็นแบบแซนวิช เมื่อได้รับแรงดึงยึดเซลล์ที่แกนกลางของชิ้นงานจึงเป็นตัวริเริ่มให้เกิด craze ขึ้นจำนวนมากตลอดระยะเกจ ซึ่งตำแหน่งที่ craze จะเกิดการเติบโตต่อไปจนเกิดการขาดในแต่ละชิ้นงานนั้นจะแตกต่างกันไปไม่มีรูปแบบที่แน่นอน พอลิพรอไพลีนและพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเติม Hydrocerol 2047 จะมีลักษณะการเกิด craze ในชิ้นงานรูปแบบเดียวกันและเกิดการขาดออกของชิ้นงานโดยที่ไม่มีการเกิด cold drawing ขึ้นซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างแบบโพลีมีอิทธิพลทำให้การเกิด deformation ของพอลิพรอไพลีนเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 4.9 แสดงการเกิด craze ขึ้นในชิ้นงานพอลิพรอไพลีนที่มีโครงสร้างเป็นโพลี (a) เมื่อชิ้นงานได้รับแรงดึงยึด และ (b) แสดงการขาดออกของชิ้นงาน

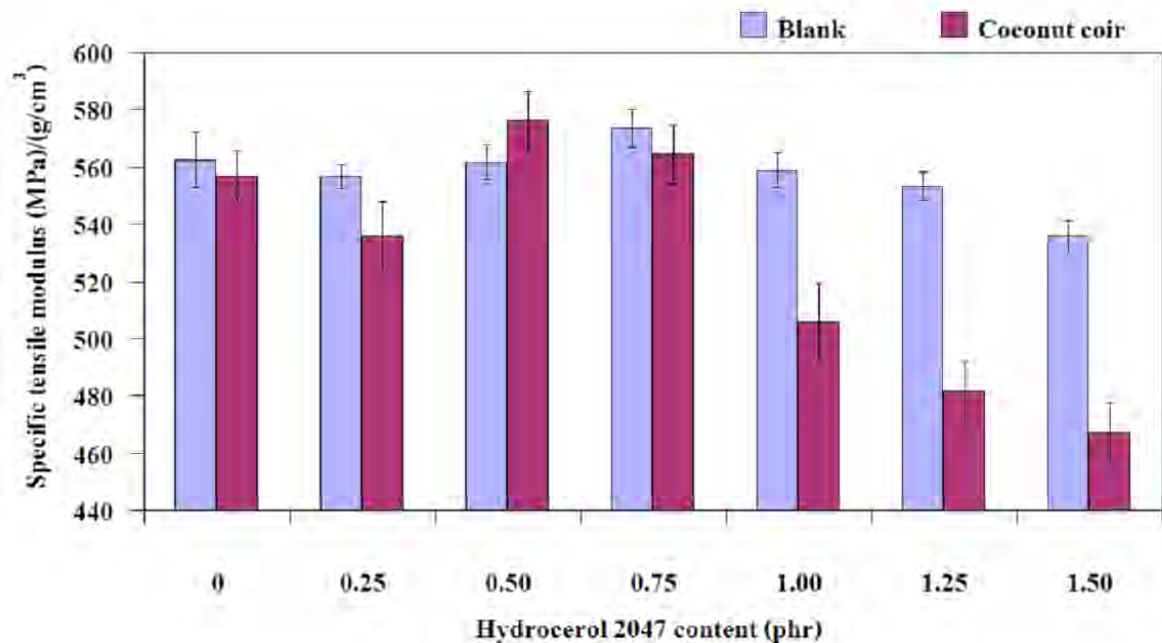
จากการทดสอบความต้านทานต่อการดึงยึดของชิ้นงานคอมพอสิตที่มีและไม่มีการเติมเส้นใยมะพร้าวที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 ต่างๆ สามารถแสดงผลการทดลองได้ดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 โดยรูปที่ 4.10 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Specific tensile modulus กับ

ปริมาณของ Hydrocerol 2047 ของพอลิพรอไพลีนและพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวและรูปที่ 4.11 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Specific tensile strength กับปริมาณของ Hydrocerol 2047 ของพอลิพรอไพลีนและพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว

จากรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าการเติม Hydrocerol 2047 ลงไปในพอลิพรอไพลีน 0.25 phr จะมีผลทำให้ค่า Specific tensile modulus มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีการเติม Hydrocerol 2047 ทั้งนี้เนื่องจากการเติม Hydrocerol 2047 นั้นมีผลทำให้วัสดุเกิดเป็นโครงสร้างแบบโฟมขึ้นตรงกลางของชิ้นงานทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานจึงมีค่าลดลง และเมื่อเพิ่มปริมาณของ Hydrocerol 2047 ต่อไปชิ้นงานจะมีค่า Specific tensile modulus เพิ่มมากขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 เท่ากับ 0.75 phr เนื่องจากเมื่อปริมาณการเติมของ Hydrocerol 2047 เพิ่มมากขึ้นจะมีผลทำให้เซลล์โฟมที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กลงดังแสดงในรูปที่ 4.7 ส่งผลให้พอลิพรอไพลีนรอบๆเซลล์มีความต่อเนื่องกันมากขึ้น ค่า Specific tensile modulus จึงมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อปริมาณของ Hydrocerol 2047 เท่ากับ 1.00 phr ระดับการเชื่อมต่อกันเป็นเซลล์เปิดของชิ้นงานจะเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่า Specific tensile modulus ของชิ้นงานจึงมีค่าลดลง

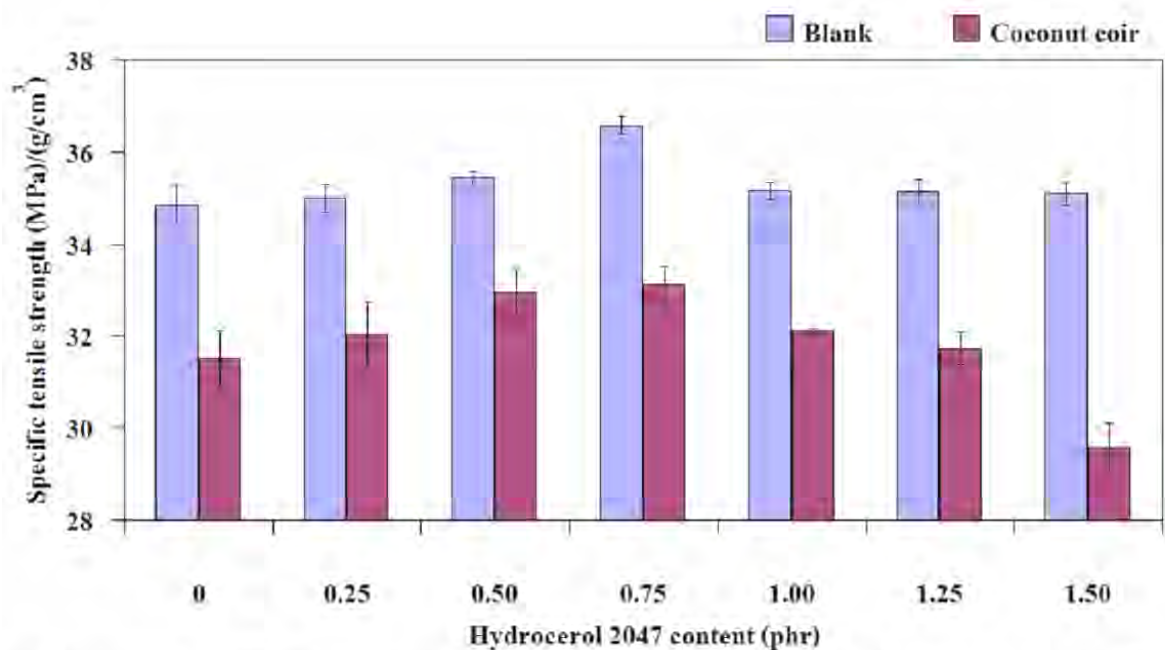
เมื่อทำการพิจารณาผลของการเติม Hydrocerol 2047 ต่อความต้านทานต่อการดึงยึดของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวพบว่า การเติม Hydrocerol 2047 ปริมาณ 0.25 phr ลงในพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวมีผลทำให้ค่า Specific tensile modulus ลดลง จากนั้นจึงมีค่าเพิ่มมากขึ้นจนมีค่าสูงสุดและมีค่ามากกว่าพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่ไม่มีการเติม Hydrocerol 2047 ที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 เท่ากับ 0.50 phr จากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณ Hydrocerol 2047 มากขึ้นค่า Specific tensile modulus จะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งมีค่าต่ำสุดที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 เท่ากับ 1.50 phr

เมื่อเปรียบเทียบค่า Specific tensile modulus ที่ได้จากการทดสอบชิ้นงานพอลิพรอไพลีนและพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวพบว่าในชิ้นงานที่ไม่มีการเติม Hydrocerol 2047 พอลิพรอไพลีนจะมีค่า Specific tensile modulus ที่สูงกว่าพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตเนื่องจากผลของการยึดเกาะกันที่ผิวหน้าระหว่างเมทริกซ์และเส้นใยมะพร้าวที่ไม่ดี ทำให้ความแข็งแรงของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตมีค่าลดลง เมื่อเติม Hydrocerol 2047 ลงไป 0.25 phr พอลิพรอไพลีนคอมพอสิตจะมีปริมาณการลดลงของค่า Specific tensile modulus มากกว่าพอลิพรอไพลีนเนื่องจากพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตมีการเกิดเซลล์ที่มีขนาดใหญ่กว่าและมีลักษณะเป็นทรงรีทำให้เกิด craze ในชิ้นงานได้ง่ายขึ้น ค่าความแข็งแรงจึงมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิพรอไพลีน



รูปที่ 4.10 แสดงค่า Specific tensile modulus ของพอลิพรอไพลีนและพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว ที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 ต่างๆ

เมื่อปริมาณของ Hydrocerol 2047 มีค่าเพิ่มมากขึ้นเท่ากับ 0.50 phr ค่า Specific tensile modulus ของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตจะมีความมากขึ้นจนกระทั่งมีค่าสูงกว่าพอลิพรอไพลีน เนื่องจากเซลล์ของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตมีลักษณะเปลี่ยนแปลงจากทรงรีขนาดใหญ่เป็นเป็นทรงกลมที่มีขนาดเล็กลงทำให้เมทริกซ์มีความต่อเนื่องกันมากขึ้น เส้นใยถูกผลักมาอยู่ใกล้กันมากขึ้นทำให้ความทนทานต่อแรงดึงยิ่งจึงมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อปริมาณของ Hydrocerol 2047 มีค่าเพิ่มมากขึ้นต่อไปเซลล์จะมีขนาดลดลง ปริมาณของเซลล์ในโครงสร้างจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นแต่ระดับการเชื่อมต่อกันของเซลล์จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วยทำให้ความแข็งแรงของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่ในกรณีของพอลิพรอไพลีนเมื่อปริมาณของ Hydrocerol 2047 มีค่าเพิ่มมากขึ้นค่า Specific tensile modulus จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งปริมาณของ Hydrocerol 2047 เท่ากับ 0.75 phr จากนั้นค่า Specific tensile modulus ของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตจึงค่าลดลงอย่างต่อเนื่องดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 4.11 แสดงค่า Specific tensile strength ของพอลิพรอไพลีนและพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว ที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 ต่างๆ

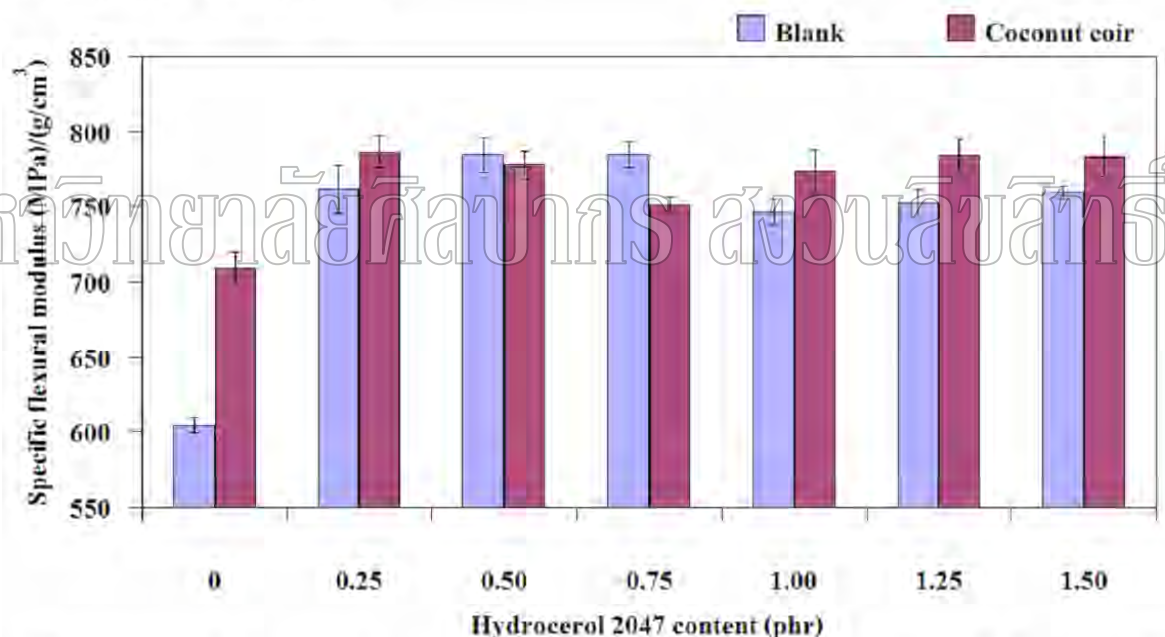
เมื่อทำการศึกษาผลของปริมาณ Hydrocerol 2047 ต่อค่า Specific tensile strength ของชิ้นงานพบว่าได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.11 จากแสดงให้เห็นว่าการเติม Hydrocerol 2047 ปริมาณ 0.25 phr ลงไปในพอลิพรอไพลีนและพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวจะมีผลทำให้ค่า Specific tensile strength มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งมีค่าสูงสุดที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 เท่ากับ 0.75 phr ทั้งในชิ้นงานพอลิพรอไพลีนและพอลิพรอไพลีนคอมพอสิต เนื่องมาจากการที่เมื่อปริมาณ Hydrocerol 2047 เพิ่มมากขึ้นขนาดของเซลล์โฟมจะมีขนาดลดลง เมื่อได้รับแรงดึงยึดเซลล์ก็จะเกิดการยืดออก เซลล์ขนาดเล็กจะถูกดึงยืดให้ผนังเซลล์เข้าใกล้กันได้มากกว่าเซลล์ที่มีขนาดใหญ่ทำให้ต้องใช้แรงมากขึ้นในการดึงชิ้นงานที่มีเซลล์ขนาดเล็ก ดังนั้นค่า Specific tensile strength ของชิ้นงานจึงมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณของ Hydrocerol 2047 เพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อปริมาณของ Hydrocerol 2047 เท่ากับ 1.00 phr เป็นต้นไป ลำดับการเชื่อมต่อเป็นเซลล์เปิดจะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณ Hydrocerol 2047 เพิ่มมากขึ้นทำให้เซลล์จึงมีขนาดใหญ่ขึ้น มีที่ว่างเกิดขึ้นภายในเซลล์มากขึ้นจึงเกิดการยืดออกได้ง่ายดังนั้นค่า Specific tensile strength จึงมีแนวโน้มลดลง

จากรูปที่ 4.11 เมื่อเปรียบเทียบค่า Specific tensile strength ของชิ้นงานพอลิพรอไพลีนและพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวพบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่า Specific tensile strength ของชิ้นงานพอลิพรอไพลีนและชิ้นงานพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 เป็นไปในรูปแบบเดียวกัน แต่ค่า Specific

tensile strength ของชิ้นงานพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตจะมีค่าต่ำกว่าพอลิพรอไพลีนเนื่องจากเส้นใยมะพร้าวจะไปขัดขวางการเกิดการยืดออกของชิ้นงาน ทำให้ค่า Specific tensile strength ของชิ้นงานพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตมีค่าลดลง

4.3.2 ผลของโครงสร้างแบบโฟมต่อสมบัติความต้านทานต่อการโค้งงอของพอลิพรอไพลีนและพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว

เมื่อทำการศึกษาความต้านทานต่อการโค้งงอของพอลิพรอไพลีนและพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 ต่างๆ พบว่าได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.12 และ 4.14 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Specific flexural modulus กับปริมาณของ Hydrocerol 2047 และความสัมพันธ์ระหว่างค่า Specific flexural strength กับปริมาณของ Hydrocerol 2047 ของพอลิพรอไพลีนและพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว



รูปที่ 4.12 แสดงค่า Specific flexural modulus ของพอลิพรอไพลีนและพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว ที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 ต่างๆ

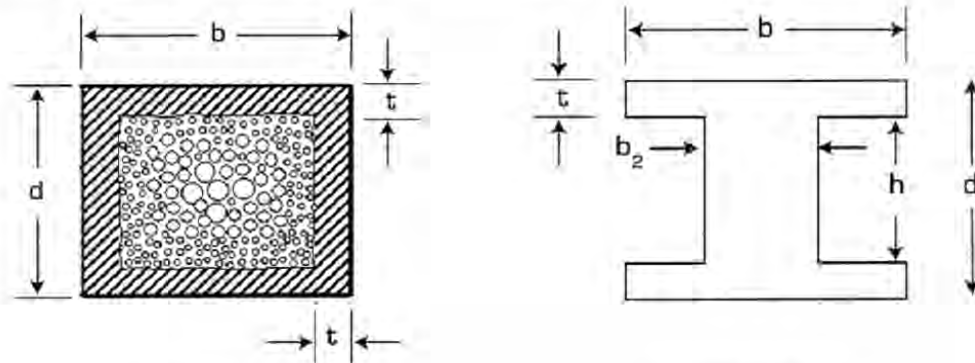
จากรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าการเติม Hydrocerol 2047 ปริมาณ 0.25 phr จะส่งผลให้ค่า Specific flexural modulus ของพอลิพรอไพลีนมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิพรอไพลีนที่ไม่มีการเติม Hydrocerol 2047 เนื่องจากการเติม Hydrocerol 2047 จะส่งผลให้ความหนาแน่นของชิ้นงานลดลง ในขณะที่แรงเค้นสูงสุดที่บริเวณผิววัสดุ (maximum fiber stress) น่าจะมีค่าคงที่ อันเนื่องมาจากการมีโครงสร้างแบบแซนวิชของตัวอย่าง (ผนังเป็นพลาสติกของแข็งชนิดเดิม) [42]

ดังนั้นจึงทำให้ค่า Specific flexural modulus ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่ามอดูลัสการโค้งงอ (flexural modulus) กับความหนาแน่นของชิ้นงานมีค่าเพิ่มมากขึ้น

เมื่อปริมาณการเติมของ Hydrocerol 2047 ในชิ้นงานพอลิพรอไพลีนมีค่าเพิ่มมากขึ้นต่อไปจะส่งผลให้ค่า Specific flexural modulus ของพอลิพรอไพลีนมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากที่น้ำหนักเท่ากันชิ้นงานพอลิพรอไพลีนที่มีการเติม Hydrocerol 2047 เพิ่มมากขึ้นจะมีความหนาของผนังเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณของก๊าซเกิดในระบบ แรงดันของก๊าซจึงผลักพอลิเมอร์หลอมเหลวให้ไปอยู่ที่ผนังด้านข้าง [22-23] ความหนาของผนังจึงมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อพิจารณาชิ้นงานพอลิพรอไพลีนที่มีโครงสร้างแบบโฟมดังแสดงในรูป 4.13 (ซ้าย) ให้เป็นชิ้นงานเนื้อเดียวกันที่มีโครงสร้างแบบ I-beam ดังแสดงในรูป 4.13 (ขวา) จะพบว่าค่าความหนาของผนังของชิ้นงานโฟม ( $t$ ) จะส่งผลต่อค่าความกว้างของแกนกลาง I-beam ( $b_2$ ) ดังแสดงในสมการที่ 4.1 เมื่อความกว้างของชิ้นงานโฟม ( $b$ ) มีค่าคงที่และอัตราส่วนระหว่างค่ามอดูลัสการโค้งงอของแกนกลางโฟม ( $E_c$ ) และค่ามอดูลัสการโค้งงอของผนังชิ้นงานโฟม ( $E_p$ ) มีค่าคงที่ ซึ่งค่าความกว้างของแกนกลาง I-beam จะส่งผลต่อค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (moment of inertia,  $I$ ) ของชิ้นงานดังแสดงในสมการที่ 4.2 ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของค่าความหนาของผนังของชิ้นงานโฟมจะส่งผลต่อให้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นงานมีค่าเพิ่มมากขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยซึ่งเป็นค่าความต้านทานการโค้งงอจะทำให้ปริมาณการโค้งงอที่สามารถเกิดขึ้นได้สูงสุดในชิ้นงาน ( $y$ ) มีค่าลดลง ซึ่งปริมาณการโค้งงอที่สามารถเกิดขึ้นสูงสุดในชิ้นงานจะแปรผกผันกับค่ามอดูลัสการโค้งงอของชิ้นงานดังแสดงในสมการที่ 4.3 ดังนั้นพอลิพรอไพลีนจึงมีค่า Specific flexural modulus เพิ่มขึ้นเมื่อเติม Hydrocerol 2047 ซึ่งค่า Specific flexural modulus ของพอลิพรอไพลีนจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณของ Hydrocerol 2047 เพิ่มมากขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่ปริมาณของ Hydrocerol 2047 เท่ากับ 0.50 phr และมีค่าคงที่จนถึงที่ปริมาณของ Hydrocerol 2047 เท่ากับ 0.75 phr

เมื่อปริมาณของ Hydrocerol 2047 มีค่ามากกว่า 1.00 phr ค่า Specific flexural modulus ของพอลิพรอไพลีนจะมีค่าลดลงเนื่องจากโครงสร้างของเซลล์เปลี่ยนเป็นเซลล์เปิดส่งผลให้เนื้อพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่บริเวณแกนกลางของชิ้นงานโฟมมีปริมาณลดลง ค่ามอดูลัสการโค้งงอที่บริเวณแกนกลางโฟม ( $E_c$ ) จึงมีค่าลดลง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่มีโครงสร้างแบบโฟมให้เป็นชิ้นงานที่มีโครงสร้างแบบ I-beam การลดลงของค่ามอดูลัสการโค้งงอที่บริเวณแกนกลางโฟมจะส่งผลให้ค่าความกว้างของแกนกลาง I-beam ( $b_2$ ) มีค่าลดลงดังแสดงในสมการที่ 4.1 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยจึงมีค่าลดลง และส่งผลให้ค่า Specific flexural modulus มีค่าลดลง เมื่อปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 มีค่าเพิ่มมากขึ้นเป็น 1.25 และ 1.50 phr ค่า Specific flexural modulus ของพอลิพรอไพลีนจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 สูงก๊าซที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา

การสลายตัวของ Hydrocerol 2047 จะมีเพิ่มมากขึ้นทำให้แรงดันของก๊าซภายในเซลล์มีค่าสูงซึ่งจะผลักเนื้อโฟลโฟรไพลีนไปอยู่ที่ผนังทำให้ความหนาของผนังมีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่า  $b_2$  จึงมีค่าเพิ่มมากขึ้น [22-23, 42-44] ส่งผลให้ค่า Specific flexural modulus มีค่าเพิ่มมากขึ้น



Structural foam

I-section beam

รูปที่ 4.13 แสดงโครงสร้างของชิ้นงานโฟม (structural foam) เปรียบเทียบกับ โครงสร้าง I-beam ที่มีความแข็งแรงเท่ากัน [23]

$$b_2 = \left( \frac{E_C}{E_S} \times b \right) + 2t \quad (4.1)$$

$$I = \frac{bd^3 - bh^3 + b_2h^3}{12} \quad (4.2)$$

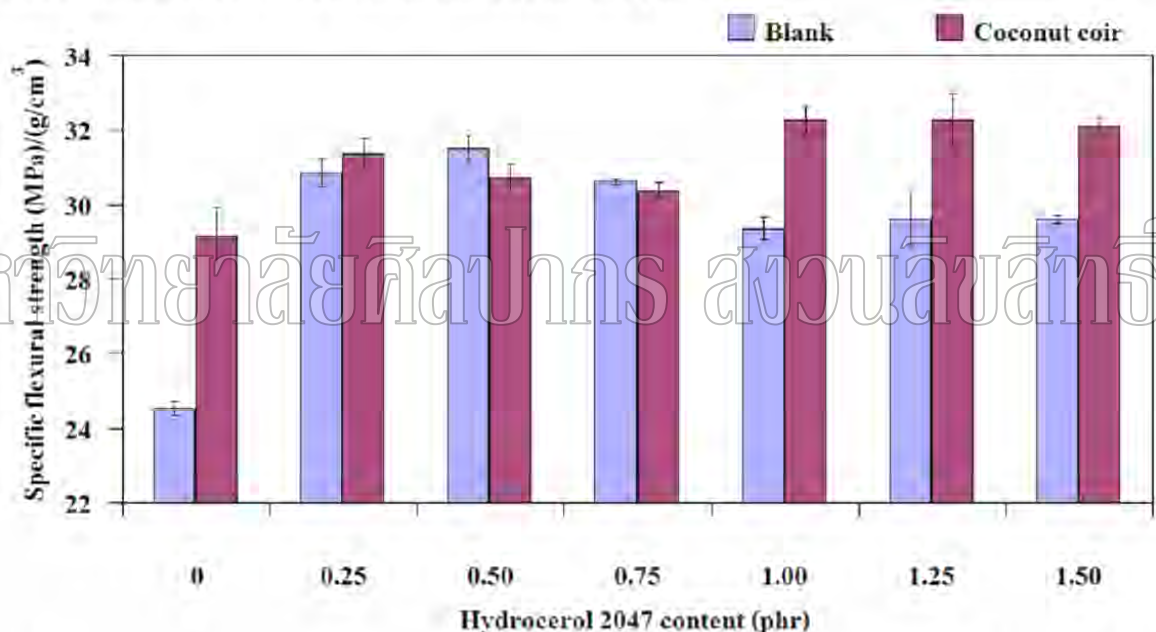
$$y = \frac{5WL^3}{384E_S I} \quad (4.3)$$

|           |                                                                                |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------|
| เมื่อ $b$ | คือ ความกว้างของชิ้นงานโฟม                                                     |
| $t$       | คือ ความหนาของผนังชิ้นงานโฟม                                                   |
| $b_2$     | คือ ความกว้างของแกนกลาง I-beam เมื่อพิจารณาความหนาของผนังด้านข้างของชิ้นงานโฟม |
| $h$       | คือ ความสูงของแกนกลาง I-beam                                                   |
| $d$       | คือ ความสูงของชิ้นงานโฟม                                                       |
| $E_C$     | คือ ค่ามอดุลัสการโค้งงอของแกนกลางโฟม                                           |
| $E_S$     | คือ ค่ามอดุลัสการโค้งงอของผนังชิ้นงานโฟม                                       |
| $y$       | คือ ปริมาณการโค้งงอที่เกิดขึ้นสูงสุดในชิ้นงาน (ที่กึ่งกลาง beam)               |
| $W$       | คือ ค่าแรงคดที่ให้กับชิ้นงานโดยเป็นแรงที่กระจายเท่ากันทุกจุดในชิ้นงาน          |
| $L$       | คือ ความยาวของชิ้นงาน                                                          |

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 ต่อค่า Specific flexural modulus ของโฟลโฟรไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว พบว่าเมื่อเติม

Hydrocerol 2047 เท่ากับ 0.25 phr จะทำให้ค่า Specific flexural modulus ของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตมีค่าเพิ่มมากขึ้นจนมีค่าสูงสุด แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 ต่อไปจะทำให้ Specific flexural modulus พอลิพรอไพลีนคอมพอสิตมีค่าลดลงจนกระทั่งถึงปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 เท่ากับ 0.75 phr แต่เมื่อปริมาณของ Hydrocerol 2047 มีค่ามากกว่า 1.00 phr ค่า Specific flexural modulus ของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นจนมีค่าคงที่ที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 เท่ากับ 1.25 และ 1.50 phr

เมื่อเปรียบเทียบค่า Specific flexural modulus ของพอลิพรอไพลีนและพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว พบว่าเมื่อไม่มีการเติม Hydrocerol 2047 พอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวจะมีค่า Specific flexural modulus สูงกว่าพอลิพรอไพลีนเนื่องจากผลของความแข็งแรงของเส้นใย [45-47]



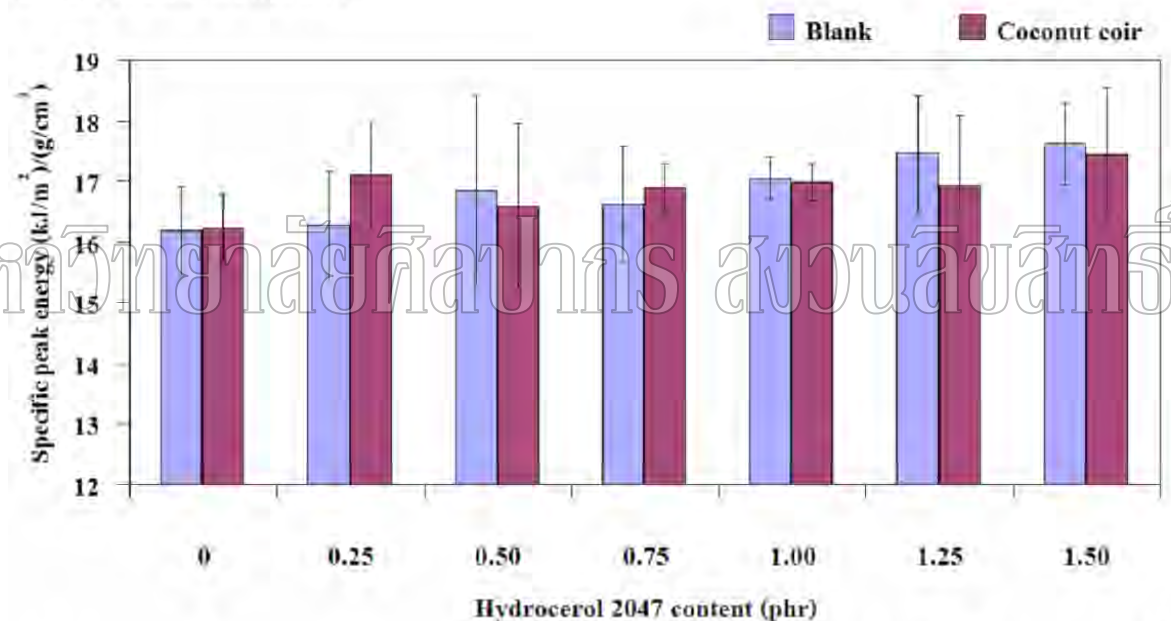
รูปที่ 4.14 แสดงค่า Specific flexural strength ของพอลิพรอไพลีนและพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว ที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 ต่างๆ

จากรูปที่ 4.14 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Specific flexural strength กับปริมาณของ Hydrocerol 2047 ของพอลิพรอไพลีนและพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว จากรูปแสดงให้เห็นว่าผลของการเติม Hydrocerol 2047 ต่อค่า Specific flexural strength ของพอลิพรอไพลีนและพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตมีแนวโน้มของกราฟเช่นเดียวกับกราฟในรูปที่ 4.12 เนื่องจากที่ความเครียดคดงที่เท่ากับ 5% เมื่อค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นงานมีค่าเพิ่มมากขึ้นก็จะต้องในแรงเค้นมากขึ้นในการทำให้ชิ้นงานเกิดการโค้งงอและจากรูปที่ 4.13 เมื่อค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นงานมีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่าความทนทานต่อการโค้งงอของชิ้นงานก็จะมีค่า

เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเส้นกราฟความสัมพันธ์ที่ได้ในรูปที่ 4.14 จึงมีลักษณะเดียวกับเส้นกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.12

4.3.3 ผลของโครงสร้างแบบโพนีต่อสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิพรอไพลีนและพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว

เมื่อทำการพิจารณาผลของการเติม Hydrocerol 2047 ต่อสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิพรอไพลีนและพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว พบว่าได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Specific peak energy กับปริมาณของ Hydrocerol 2047 และความสัมพันธ์ระหว่างค่า Specific break energy กับปริมาณของ Hydrocerol 2047 ของพอลิพรอไพลีนและพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว



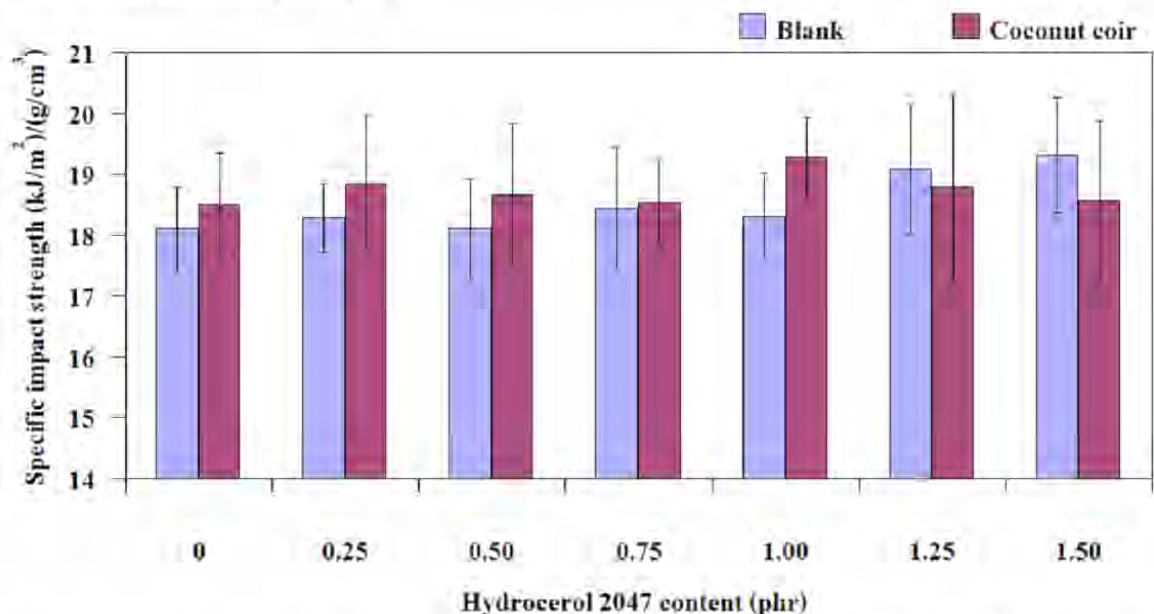
รูปที่ 4.15 แสดงค่า Specific peak energy ของพอลิพรอไพลีนและพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว ที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 ต่างๆ

จากรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าการเติม Hydrocerol 2047 ปริมาณ 0.25 phr จะส่งผลให้ค่า Specific peak energy ของพอลิพรอไพลีนและพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวมีค่าเพิ่มมากขึ้น การเพิ่มขึ้นของ Specific peak energy ของชิ้นงานแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างที่เป็นเซลล์ของชิ้นงานพอลิพรอไพลีนเมื่อมีการเติม Hydrocerol 2047 จะไปช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานเมื่อชิ้นงานได้รับเมื่อได้รับแรงกระแทกทำให้ต้องให้พลังงานที่เพิ่มมากขึ้นในการทำให้ชิ้นงานเริ่มเกิดการริเริ่มแตกเมื่อปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่า Specific peak energy เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากเมื่อปริมาณการเติม

Hydrocerol 2047 เพิ่มมากขึ้นเซลล์มีลำดับการเชื่อมต่อเป็นเซลล์เปิดเพิ่มมากขึ้นทำให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น

จากรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่าการเติม Hydrocerol 2047 ปริมาณ 0.25 phr จะไม่ส่งผลต่อค่า Specific impact strength จนกระทั่งที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 เท่ากับ 1.00 phr ค่า Specific impact strength ของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวจึงมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อยและมีค่าคงที่ และที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 เท่ากับ 1.25 phr ค่า Specific impact strength ของพอลิพรอไพลีนจึงมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อยและมีค่าคงที่เมื่อปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 เพิ่มมากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบค่า Specific peak energy และ Specific impact strength จากกราฟที่ 4.15 และ 4.16 ทั้งของพอลิพรอไพลีนและพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวพบว่าค่า Specific impact strength มีค่าสูงกว่าค่า Specific peak energy เพียงเล็กน้อยเท่านั้น แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานมีสมบัติที่ค่อนข้างแข็งแรง เพราะ เมื่อชิ้นงานเกิดการริเริ่มแตกรอยแตกก็จะขยายตัวทำให้ชิ้นงานเกิดการหักออกอย่างรวดเร็ว โดยชิ้นงานพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวจะมีความแตกต่างระหว่างค่า Specific impact strength และค่า Specific peak energy สูงกว่าชิ้นงานพอลิพรอไพลีนแสดงให้เห็นว่าเส้นใยมะพร้าวจะไปหน่วงให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักช้าลง [38]

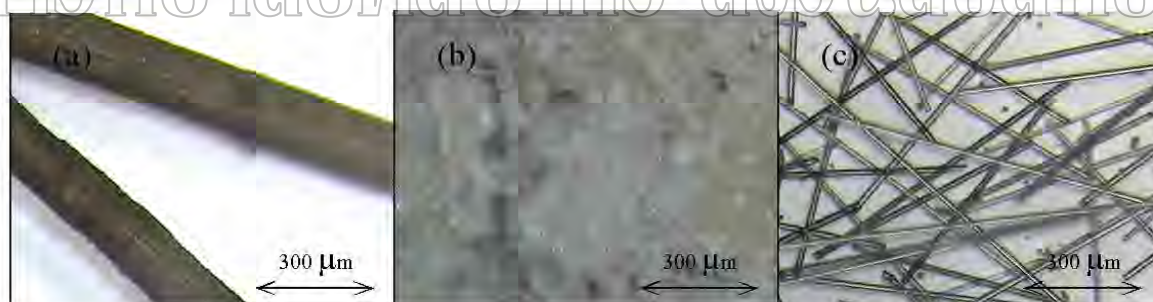


รูปที่ 4.16 แสดงค่า Specific impact strength ของพอลิพรอไพลีนและพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว ที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 ต่างๆ

#### 4.4 อิทธิพลของชนิดของสารเสริมแรงที่มีต่อลักษณะทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีโครงสร้างแบบโฟม

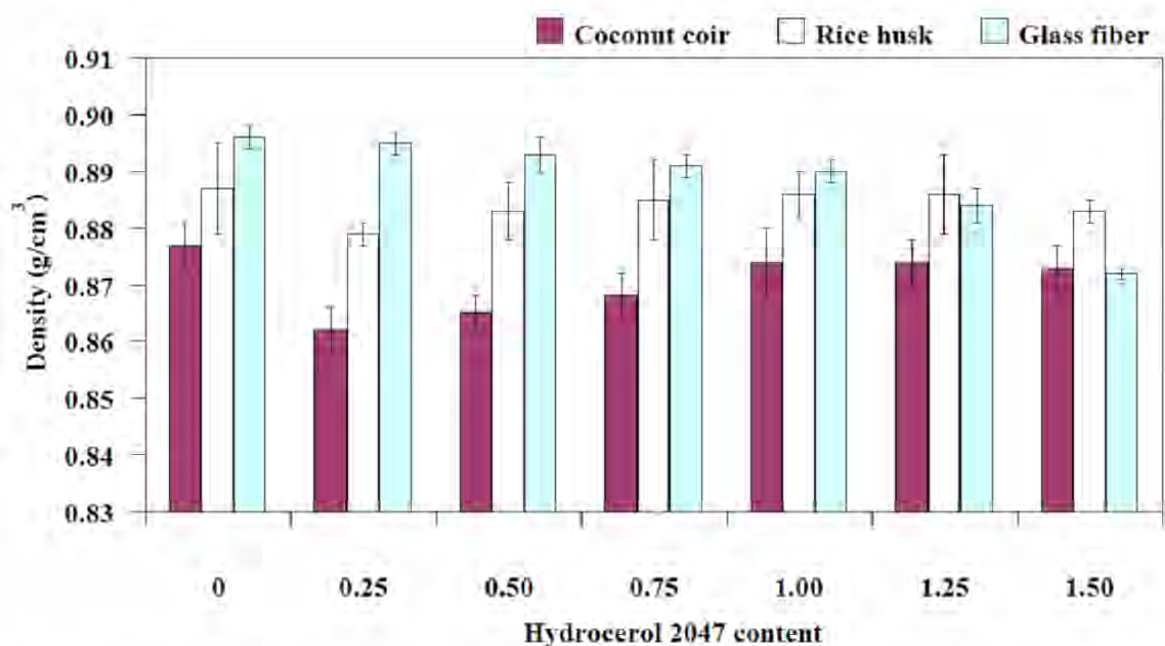
4.4.1 ผลของชนิดของสารเสริมแรงต่อความหนาแน่นของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่ปริมาณ Hydrocerol 2047 ต่างๆ

จากการศึกษาลักษณะอนุภาคของสารเสริมแรงด้วยเครื่อง Optical microscope พบว่าอนุภาคของสารเสริมแรงมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.17 จากรูปแสดงให้เห็นว่าเส้นใยมะพร้าวมีลักษณะเป็นเส้นใย (fiber) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่กว่าและมีความยาวของเส้นใยมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแก้วที่มีลักษณะเป็นเส้นใยเช่นเดียวกัน ส่วนผงแคลบมีลักษณะของอนุภาคเป็นแผ่นบาง (flake) ที่มีรูปร่างไม่แน่นอนและมีขนาดความกว้างมากกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมะพร้าวและผงแคลบ นอกจากนี้เส้นใยแก้วยังมีบางส่วนเกิดการแตกหักกลายเป็นอนุภาคนขนาดเล็กเนื่องจากการเสียดสีในเครื่อง twin-screw extruder ระหว่างการผสม ในขณะที่เส้นใยธรรมชาติซึ่งมีความยืดหยุ่นสูงจึงไม่มีการแตกหักของเส้นใยเกิดขึ้น เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นของอนุภาคของสารเสริมแรงในแต่ละชนิดจะพบว่าเส้นใยแก้วจะมีความหนาแน่นสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยมะพร้าวและผงแคลบ [19] และผงแคลบที่มีลักษณะอนุภาคเป็นแผ่นจะมีความหนาแน่นสูงกว่าเส้นใยมะพร้าวที่มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว



รูปที่ 4.17 แสดง Optical micrographs ของอนุภาคสารเสริมแรง (a) เส้นใยมะพร้าว (b) ผงแคลบ และ (c) เส้นใยแก้ว

ความหนาแน่นของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยสารเสริมแรงชนิดต่างกัน คือเส้นใยมะพร้าว ผงแคลบและเส้นใยแก้วที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 ต่างๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.18 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีเส้นใยแก้วเป็นสารเสริมแรงจะมีความหนาแน่นสูงสุด และพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยผงแคลบจะมีความหนาแน่นสูงกว่าพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว เนื่องจากผลของความหนาแน่นของอนุภาคของสารเสริมแรงที่เส้นใยแก้วจะมีความหนาแน่นสูงสุด และผงแคลบมีความหนาแน่นสูงกว่าเส้นใยมะพร้าว



รูปที่ 4.18 ผลของชนิดของสารเสริมแรงต่อความหนาแน่นของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีปริมาณ Hydrocerol 2047 ต่างๆ

พอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วจะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นที่ปริมาณ Hydrocerol 2047 ต่างๆแตกต่างกับพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวและผงแคลบ ซึ่งเมื่อมีการเติม Hydrocerol 2047 ปริมาณ 0.25 phr จะทำให้ความหนาแน่นของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเติมเส้นใยแก้วลดลงเล็กน้อย เมื่อเพิ่มปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 ต่อไปก็จะมีผลทำให้ความหนาแน่นของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเติมเส้นใยแก้วลดลงเล็กน้อยอย่างต่อเนื่อง โดยความหนาแน่นของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเติมเส้นใยแก้วจะมีค่าต่ำสุดเมื่อเติม Hydrocerol 2047 เท่ากับ 1.50 phr ส่วนพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยผงแคลบจะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 ต่างๆ เป็นแบบเดียวกับพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว โดยความหนาแน่นของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเติมแคลบเป็นสารเสริมแรงจะมีค่าต่ำสุดที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 เท่ากับ 0.25 phr

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณความหนาแน่นของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยผงแคลบและเส้นใยมะพร้าวที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 เท่ากับ 0.25 phr พบว่าพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวจะมีค่าความหนาแน่นลดลงมากกว่าพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยผงแคลบ เนื่องจากโครงสร้างของเส้นใยมะพร้าวมีลักษณะเป็นสารไม่มีขั้วห่อหุ้มอยู่ช่วยทำหน้าที่เป็น coupling agent ระหว่างพอลิพรอไพลีนเมทริกซ์และเส้นใย [13] ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเมทริกซ์และสารเสริมแรงของพอลิพรอไพลีน

ดินที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวดีกว่าพอลิพรอไพลีนที่มีการเสริมแรงด้วยผงแคลบ ทำให้ก๊าซที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการสลายตัวของ Hydrocerol 2047 ละลายอยู่ในพอลิพรอไพลีนที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวได้ดีกว่าพอลิพรอไพลีนที่มีการเสริมแรงด้วยผงแคลบ [4-6]

ทั้งนี้ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นที่แตกต่างกันของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยสารเสริมแรงต่างชนิดกันนั้นเป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเซลล์โฟมภายในชิ้นงานที่แตกต่างกันในพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตแต่ละชนิดซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปในหัวข้อ 4.4.2

4.4.2 ผลของชนิดของสารเสริมแรงต่อลักษณะของเซลล์ของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่ปริมาณ Hydrocerol 2047 ต่างๆ

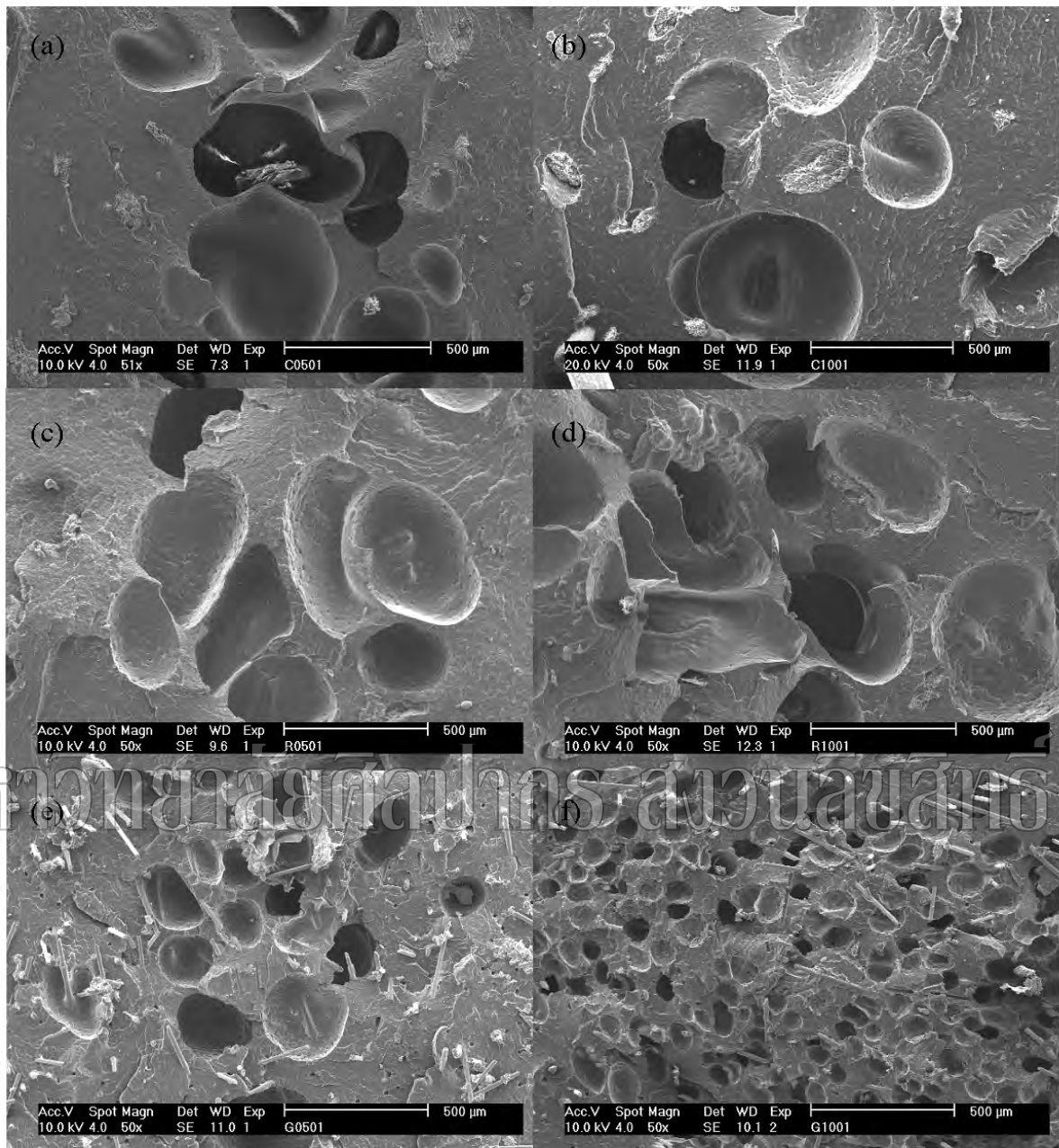
เมื่อนำพื้นผิวที่เกิดการแตกหักจากการทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทกมาศึกษา ลักษณะของเซลล์ของโครงสร้างแบบโฟมของชิ้นงานพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตด้วยเครื่อง SEM พบว่าลักษณะของเซลล์ในชิ้นงานพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว และเส้นใยแก้วมีลักษณะเป็นทรงกลมและจะมีขนาดเล็กลงเมื่อปริมาณการเติมของ Hydrocerol 2047 มีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่วนในชิ้นงานพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยผงแคลบนั้น เซลล์ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอน โดยที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 เท่ากับ 0.50 phr เซลล์จะมีลักษณะเป็นทรงรีแต่เมื่อปริมาณการเติมของ Hydrocerol 2047 เพิ่มขึ้นเป็น 1.00 phr เซลล์ที่เกิดขึ้นจะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน โดยในทุกชิ้นงานพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตระดับการเชื่อมต่องานเป็นเซลล์เปิดจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 มีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบจำนวนเซลล์และขนาดของเซลล์ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตแต่ละชนิด พบว่าพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วจะมีจำนวนเซลล์ที่เกิดขึ้นมากที่สุดและเซลล์ที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กที่สุด และพอลิพรอไพลีนที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวจะมีจำนวนเซลล์ที่เกิดขึ้นน้อยที่สุดและเซลล์ที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่มากที่สุด

จากทฤษฎีการเกิดฟองก๊าซ [22-23] กล่าวว่าถ้าถ้าของเหลวมีค่าแรงตึงผิวต่ำจะทำให้ฟองก๊าซเกิดง่ายขึ้น การมีอนุภาคของแข็งอื่นเจือปนอยู่ในระบบของเหลวจะทำให้แรงตึงผิวที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็งและของเหลวมีค่าต่ำ ทำให้ฟองก๊าซเกิดง่ายขึ้นหรืออาจไปทำให้เกิดช่องว่าง (void) ขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสซึ่งจะเป็นจุดที่ฟองก๊าซสามารถเติบโตต่อไป เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบของเส้นใยพบว่าโครงสร้างของเส้นใยมะพร้าวจะมีลิกนินซึ่งเป็นสารที่ไม่มีขั้ว ห่อหุ้มอยู่ถึง 35% [10-15] ผงแคลบนั้นจะมีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลสและยังมีปริมาณซิลิกาอยู่สูงโดยมีองค์ประกอบเป็นลิกนินอยู่ภายในโครงสร้างเพียง 23% ส่วนเส้นใยแก้วนั้นเป็นเส้นใยที่มีองค์ประกอบเป็น  $\text{SiO}_2$  เพียงอย่างเดียว เมื่อเปรียบเทียบสภาพผิวของอนุภาคสารเสริมแรงจะพบว่า

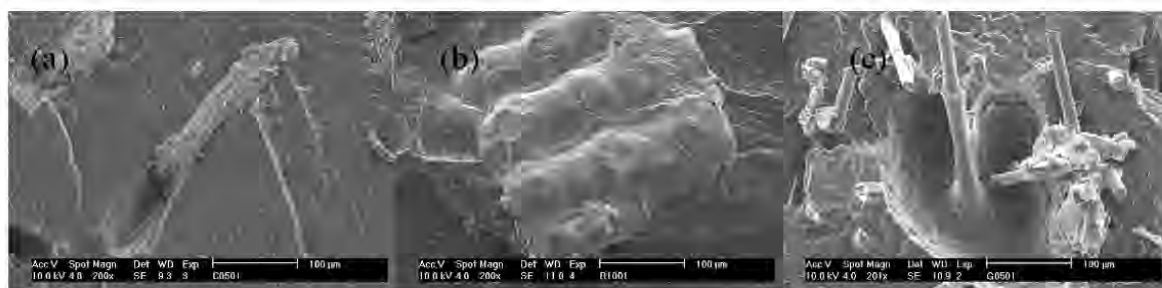
เส้นใยแก้วมีสภาพขั้วที่สูงสุด เส้นใยแก้วจึงมีสภาพขั้วแตกต่างจากพอลิพรอไพลีน (ที่ไม่มีขั้ว) มากที่สุดทำให้แรงดึงดูดที่รอยต่อระหว่างพอลิเมอร์และเส้นใยมีค่า โดยที่น้ำหนักของสารเสริมแรงที่ใช้เท่ากัน เส้นใยแก้วจะมีจำนวนมากกว่าผงแคลสและเส้นใยมะพร้าวเนื่องจากขนาดของเส้นใยแก้วมีขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 4.17 นอกจากนี้ยังเกิดการแตกหักในระหว่างการผสมด้วยเครื่อง Twin screw extruder ทำให้เป็นเส้นใยที่มีขนาดเล็กลง จึงทำให้พอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีเส้นใยแก้วเป็นสารเสริมแรงมีจุลินทรีย์เริ่มการเกิดฟองก๊าซในระบบของเหลวจำนวนมาก ปริมาณของก๊าซที่ละลายอยู่ในพอลิเมอร์หลอมเหลวที่จะไปทำให้เซลล์เกิดการขยายตัวจึงมีปริมาณลดลง เซลล์ที่เกิดขึ้นจึงมีลักษณะเป็นเซลล์ปิดขนาดเล็กจำนวนมาก [48]

ส่วนพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยผงแคลสจะมีจุลินทรีย์เริ่มในการเกิดฟองก๊าซน้อยกว่าคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว เนื่องจากความแตกต่างของสภาพขั้วระหว่างพอลิเมอร์และผงแคลสมีน้อยกว่า นอกจากนี้ ขนาดของผงแคลสที่ใหญ่และมีจำนวนน้อยทำให้มีจุลินทรีย์เริ่มในการเกิดฟองก๊าซมีจำนวนน้อยกว่าเส้นใยแก้ว ดังนั้น เมื่อแรงดันภายในพอลิเมอร์หลอมเหลวลดลงหลังจากไหลออกจากกระบอกหลอมจึงเกิดจุดกำเนิดฟองก๊าซจำนวนน้อย แต่ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่และมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิพรอไพลีนที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว

ในขณะที่เส้นใยมะพร้าวมีสภาพขั้วที่ใกล้เคียงกับพอลิพรอไพลีน จึงทำให้แรงดึงดูดที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคของเส้นใยมะพร้าวและพอลิเมอร์หลอมเหลวมีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแก้วและผงแคลส ดังนั้น โอกาสในการเกิดฟองก๊าซขึ้นในระบบของเหลวจึงมีน้อยกว่า ทำให้พอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวมีเซลล์ที่มีจำนวนน้อยแต่มีขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วและผงแคลส



รูปที่ 4.19 แสดง SEM micrographs ของภาคตัดขวางของชิ้นงานที่เกิดการแตกหักจากการทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิพรอโพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วย (a,b) เส้นใยมะพร้าว, (c,d) ผงเกล็ด และ (e,f) เส้นใยแก้ว ที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 เท่ากับ 0.50 (ซ้าย) และ 1.00 phr (ขวา)



รูปที่ 4.20 แสดงลักษณะของสารเสริมแรงที่ภาคตัดขวางของชิ้นงานพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วย (a) เส้นใยมะพร้าว, (b) ผงแกลบ และ (c) เส้นใยแก้วเกิดการแตกหักเมื่อได้รับแรงกระแทก

รูปที่ 4.20 แสดงลักษณะของสารเสริมแรงที่ภาคตัดขวางของชิ้นงานที่เกิดการแตกหักจากการทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก จากรูปแสดงให้เห็นว่าพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวจะมีการยึดเกาะที่แข็งแรงระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ซึ่งเห็นได้จากเมื่อชิ้นงานได้รับแรงกระแทกจะเกิดการขาดออกของเส้นใยขึ้นที่ผิวของรอยแตก เนื่องจากสภาพความแข็งแรงตามธรรมชาติของเส้นใยมะพร้าว แต่ในพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยผงแกลบและเส้นใยแก้ว ที่ผิวหน้าของการแตกหักของชิ้นงาน สารเสริมแรงจะเกิดการหลุดออกจากเมทริกซ์ โดยที่ไม่เกิดการแตกหักซึ่งแสดงให้เห็นถึงการยึดเกาะที่ไม่แข็งแรงระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ เมื่อเทียบกับเส้นใยมะพร้าว อย่างไรก็ตาม การเติม MA-g-PP ช่วยทำให้เกิดการเปียกผิวของเส้นใยและอนุภาคในระบบถึงแม้ว่าจะเกิดการเปียกผิวอย่างไม่สมบูรณ์

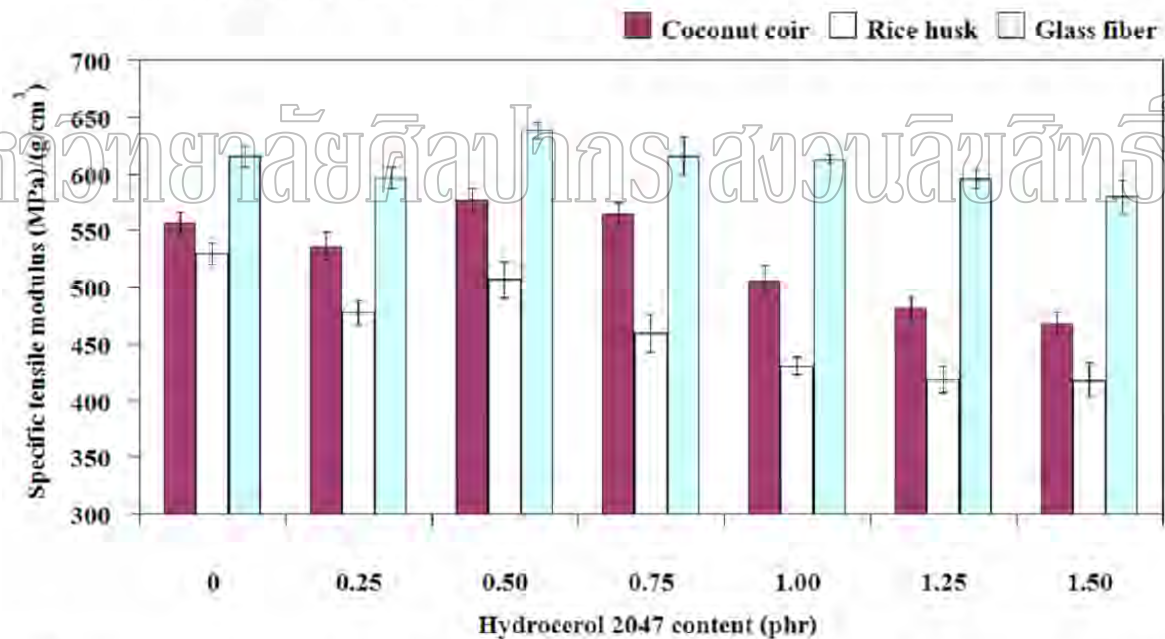
4.4.3 ผลของชนิดของสารเสริมแรงต่อสมบัติความต้านทานต่อการดึงยึดของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่ปริมาณ Hydrocerol 2047 ต่างๆ

จากการทดสอบความต้านทานต่อการดึงยึดของชิ้นงานคอมพอสิตที่มีที่มีการเสริมแรงด้วย เส้นใยมะพร้าว ผงแกลบ และเส้นใยแก้วที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 ต่างๆ สามารถแสดงผลการทดลองได้ดังรูปที่ 4.21 และ 4.22 โดยรูปที่ 4.21 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Specific tensile modulus กับปริมาณของ Hydrocerol 2047 ของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตและรูปที่ 4.22 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Specific tensile strength กับปริมาณของ Hydrocerol 2047 ของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิต

จากรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นว่าพอลิพรอไพลีนที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วจะมีค่า Specific tensile modulus สูงสุดเนื่องจากเส้นใยแก้วมีความแข็งแรงมากที่สุด จากนั้นจึงเป็นพอลิพรอไพลีนที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวและผงแกลบตามลำดับ การที่ค่า Specific tensile modulus ของวัสดุคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วและเส้นใยมะพร้าวมีค่าสูงกว่าวัสดุคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยผงแกลบนั้น เนื่องจากลักษณะของอนุภาคสารเสริมแรงที่มี

ลักษณะเป็นเส้นใย ทำให้เมื่อได้รับแรงดึงยืดแรงจะเกิดการถ่ายเทแรงผ่านพอลิเมอร์เมทริกซ์ไปยังเส้นใยทำให้ค่าความต้านทานต่อการดึงยืดของวัสดุคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่วนพอลิพรอไฟลีนที่มีการเสริมแรงด้วยผงแคลบจะมีค่า Specific tensile modulus ต่ำเนื่องจากลักษณะอนุภาคของสารเสริมแรงที่มีลักษณะเป็นแผ่น เมื่อได้รับแรงดึงยืดจึงมีการถ่ายเทแรงระหว่างเมทริกซ์และสารเสริมแรงที่ไม่ดี ทำให้เกิดจุดรวมแรง (stress concentration) ขึ้นที่อนุภาคของสารเสริมแรง ทำให้ความต้านทานต่อการดึงยืดของชิ้นงานมีค่าลดลง

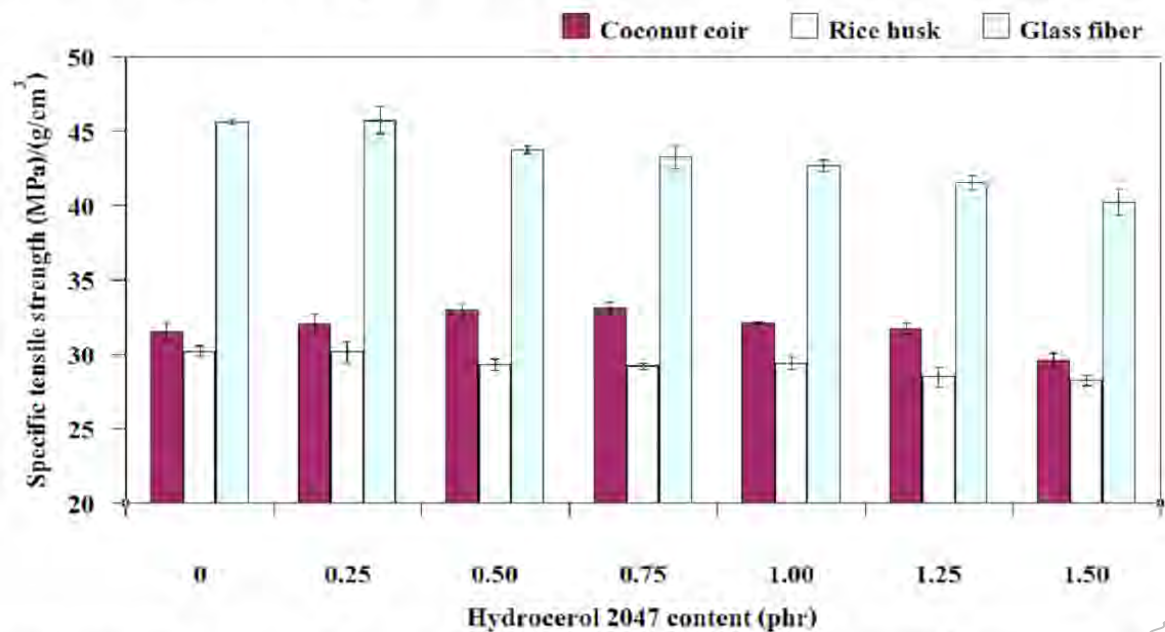
การเติม Hydrocerol 2047 ลงไปในพอลิพรอไฟลีนคอมพอสิต 0.25 phr จะมีผลทำให้ค่า Specific tensile modulus ของทุกชิ้นงานมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีการเติม Hydrocerol 2047 เมื่อเพิ่มปริมาณของ Hydrocerol 2047 ต่อไป ชิ้นงานจะมีค่า Specific tensile modulus เพิ่มมากขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 เท่ากับ 0.50 phr โดยชนิดของสารเสริมแรงไม่มีอิทธิพลต่อลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่า Specific tensile modulus ที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 ต่างๆ



รูปที่ 4.21 แสดงค่า Specific tensile modulus ของพอลิพรอไฟลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว ผงแคลบและเส้นใยแก้ว ที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 ต่างๆ

จากรูปที่ 4.22 แสดงให้เห็นว่าการเติม Hydrocerol 2047 ลงไปในพอลิพรอไฟลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยผงแคลบและเส้นใยแก้วจะทำให้ค่า Specific tensile strength ของชิ้นงานมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากพอลิพรอไฟลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยผงแคลบและเส้นใยแก้วมีปริมาณการเกิดเซลล์เพิ่มมากขึ้น ทำให้ชิ้นงานมีที่ว่างเกิดขึ้นภายในมากขึ้น เมื่อปริมาณ Hydrocerol 2047 เพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่

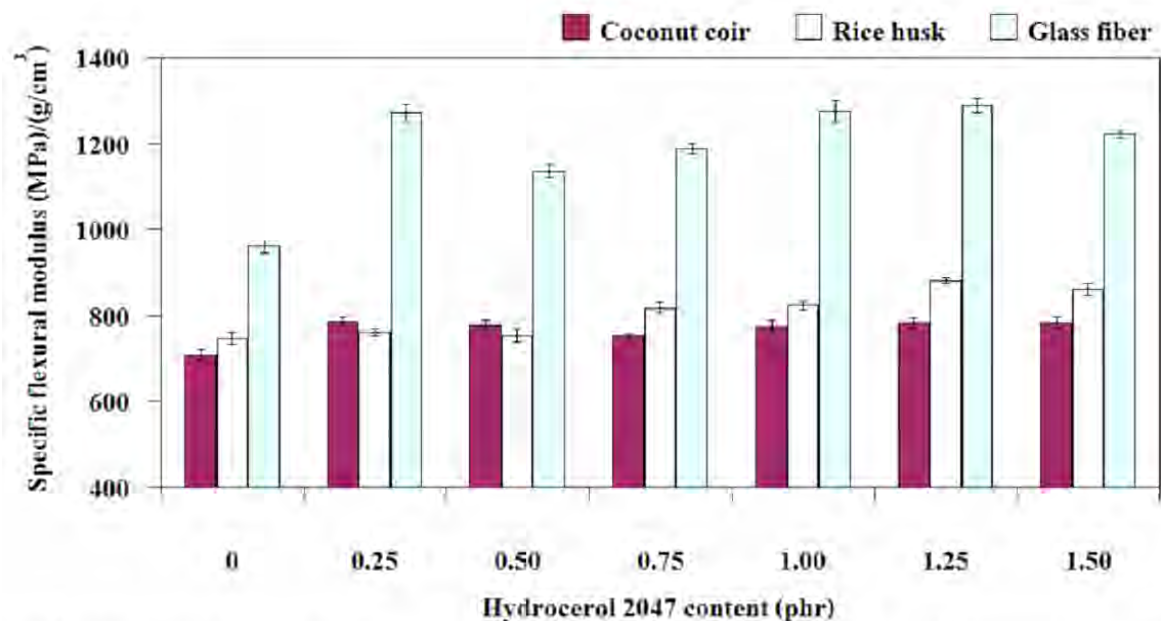
4.19 จึงเกิดการยืดออกได้ง่าย ค่า Specific tensile strength จึงมีแนวโน้มลดลง พอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วจะมีค่าความต้านทานต่อการดึงยืดสูงสุด เนื่องจากความแข็งแรงของเส้นใยแก้วที่มีค่าสูงกว่าเส้นใยมะพร้าวและผงเกล็ด



รูปที่ 4.22 แสดงค่า Specific tensile strength ของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว ผงเกล็ดและเส้นใยแก้ว ที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 ต่างๆ

4.4.4 ผลของชนิดของสารเสริมแรงต่อสมบัติความต้านทานต่อการโค้งงอของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่ปริมาณ Hydrocerol 2047 ต่างๆ

เมื่อทำการศึกษาความต้านทานต่อการโค้งงอของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว ผงเกล็ดและเส้นใยแก้วที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 ต่างๆ พบว่าได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.23 และ 4.24 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Specific flexural modulus กับปริมาณของ Hydrocerol 2047 และความสัมพันธ์ระหว่างค่า Specific flexural strength กับปริมาณของ Hydrocerol 2047 ของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว ผงเกล็ดและเส้นใยแก้วตามลำดับ



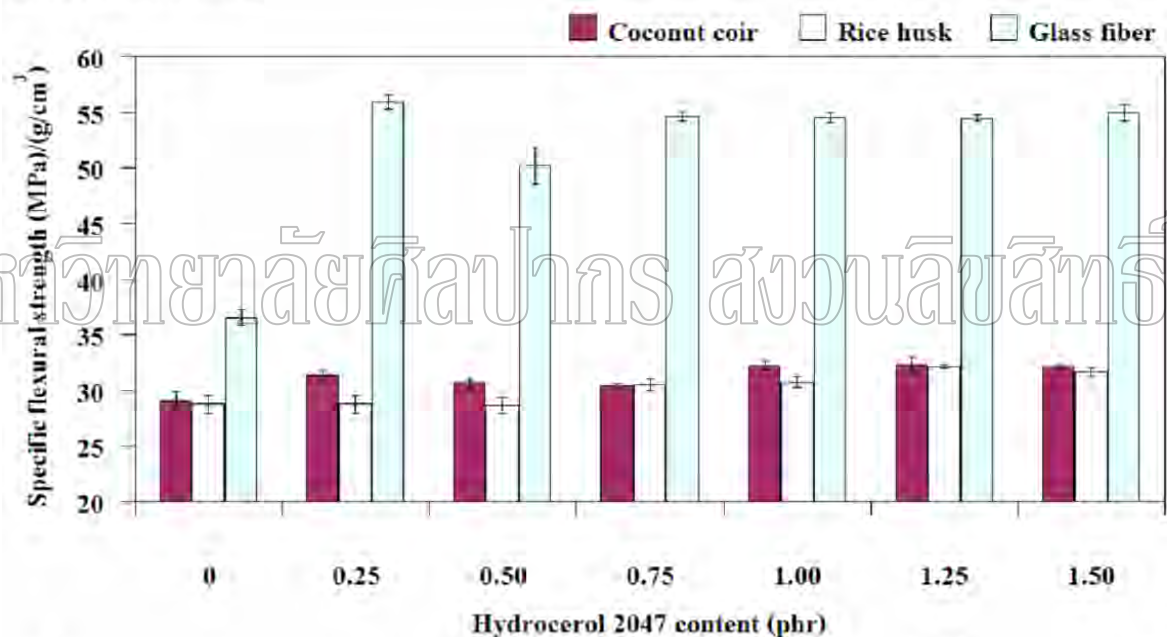
รูปที่ 4.23 แสดงค่า Specific flexural modulus ของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว พงเกลบและเส้นใยแก้ว ที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 ต่างๆ

จากรูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นว่าค่า Specific flexural modulus ของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วจะมีค่าสูงสุด จากนั้นจึงเป็นพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยพงเกลบและเส้นใยมะพร้าว ตามลำดับ เนื่องจากเส้นใยแก้วเป็นเส้นใยที่มีองค์ประกอบเป็น  $\text{SiO}_2$  เพียงอย่างเดียวทำให้มีความแข็งแรงของเส้นใยสูงสุด วัสดุคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วจึงมีความทนทานต่อการโค้งงอสูงสุด ส่วนพงเกลบนั้นแม้ว่าจะมีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลสแต่ก็มีองค์ประกอบที่เป็นซิลิกาอยู่ในอนุภาคอยู่ถึง 11.30% ทำให้วัสดุคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยพงเกลบมีความแข็งแรงมากกว่าวัสดุคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 ต่อค่า Specific flexural modulus ของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว พบว่าเมื่อเติม Hydrocerol 2047 เท่ากับ 0.25 phr จะทำให้ค่า Specific flexural modulus ของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตมีค่าเพิ่มมากขึ้นจนมีค่าสูงสุด แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 ต่อไปจะทำให้ Specific flexural modulus พอลิพรอไพลีนคอมพอสิตมีค่าลดลงจนกระทั่งถึงปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 เท่ากับ 0.75 phr แต่เมื่อปริมาณของ Hydrocerol 2047 มีค่ามากกว่า 1.00 phr ค่า Specific flexural modulus ของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นจนมีค่าคงที่ที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 เท่ากับ 1.00 และ 1.25 phr

นอกจากนี้ในจากรูปที่ 4.23 ยังแสดงให้เห็นว่าการเติม Hydrocerol 2047 ปริมาณ 0.25 phr ไม่ทำให้ค่า Specific flexural modulus ของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยผงเกล็ดเกิดการเปลี่ยนแปลง จนกระทั่งที่ปริมาณการเติมของ Hydrocerol 2047 เท่ากับ 0.75 phr ค่า Specific flexural modulus ของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยผงเกล็ดจึงมีค่าเพิ่มมากขึ้น จนมีค่าสูงสุดที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 เท่ากับ 1.25 phr แล้วจึงมีค่าคงที่

ซึ่งผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างค่า Specific flexural strength กับปริมาณของ Hydrocerol 2047 ที่แสดงในรูปที่ 4.24 ก็แสดงแนวโน้มของเส้นกราฟเช่นเดียวกัน โดยพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วจะมีค่า Specific flexural modulus และค่า Specific flexural strength สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวและผงเกล็ด



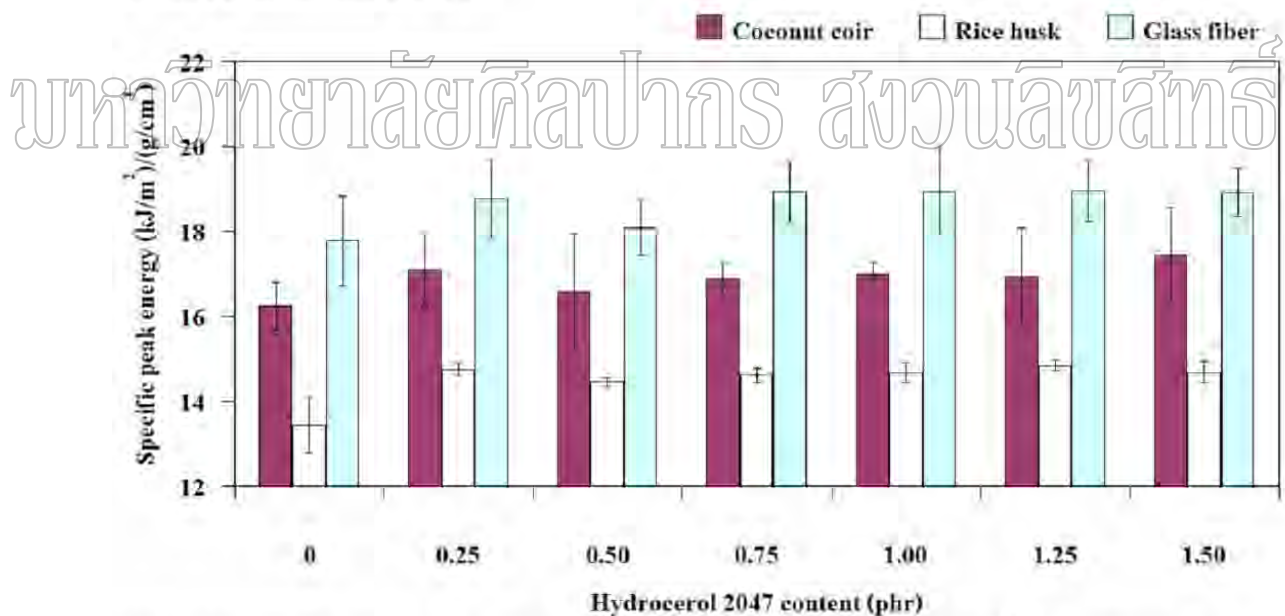
รูปที่ 4.24 แสดงค่า Specific flexural strength ของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว ผงเกล็ดและเส้นใยแก้ว ที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 ต่างๆ

4.4.5 ผลของชนิดของสารเสริมแรงต่อสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่ปริมาณ Hydrocerol 2047 ต่างๆ

เมื่อทำการพิจารณาผลของการเติม Hydrocerol 2047 ต่อสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว ผงเกล็ดและเส้นใยแก้ว ตามลำดับ พบว่าได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.25 และ 4.26 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Specific peak energy กับปริมาณของ Hydrocerol 2047 และความสัมพันธ์ระหว่างค่า

Specific break energy กับปริมาณของ Hydrocerol 2047 ของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว พงเกลบและเส้นใยแก้ว

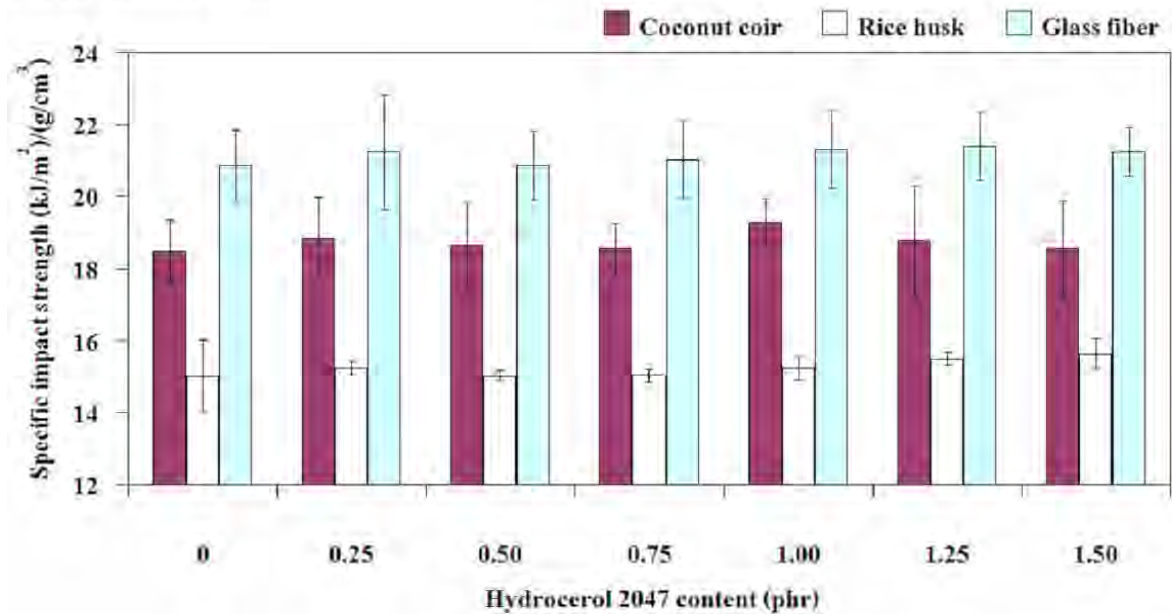
จากรูปที่ 4.25 แสดงให้เห็นว่าค่า Specific peak energy ของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วจะมีค่าสูงสุด จากนั้นจึงเป็นพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยพงเกลบและเส้นใยมะพร้าว ตามลำดับ เนื่องจากเส้นใยแก้วเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงของเส้นใยสูงสุด วัสดุคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วจึงมีความทนทานต่อแรงกระแทกสูงสุด โดยพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยพงเกลบจะมีค่า Specific peak energy ต่ำสุดเนื่องจากพงเกลบมีลักษณะของอนุภาคเป็นแบบแผ่น ซึ่งเมื่อได้รับแรงจะไม่สามารถกระจายแรงออกไปได้เกิดเป็นจุดรวมแรงขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานเมื่อได้รับแรงกระแทกลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วและเส้นใยมะพร้าวที่มีลักษณะอนุภาคของสารเสริมแรงเป็นเส้นใยทำให้เมื่อได้รับแรงจะเกิดการกระจายของแรงไปตามความยาวของเส้นใย ทำให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานเมื่อขึ้นงานได้รับแรงกระแทกเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.25 แสดงค่า Specific peak energy ของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว พงเกลบและเส้นใยแก้ว ที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 ต่างๆ

เมื่อพิจารณาผลของการเติม Hydrocerol 2047 ต่อค่า Specific peak energy พบว่าการเติม Hydrocerol 2047 ปริมาณ 0.25 phr จะส่งผลให้ค่า Specific peak energy ของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตเพิ่มมากขึ้น โดยเมื่อเพิ่มปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 จะส่งผลให้ค่า Specific peak energy มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นในทุกชิ้นงานคอมพอสิต โดยชนิดของสารเสริมแรงที่ใช้ในวัสดุคอม

พอลิเมอร์ไม่มียุทธูปการเปลี่ยนแปลงของค่า Specific peak energy เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการเติม Hydrocerol 2047



รูปที่ 4.26 แสดงค่า Specific impact strength ของพอลิพรอไฟลีนคอมพอลิเมอร์ที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว พงกกลบและเส้นใยแก้ว ที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 ต่างๆ

จากรูปที่ 4.26 แสดงให้เห็นว่าค่า Specific impact strength ของพอลิพรอไฟลีนคอมพอลิเมอร์ที่ปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 ต่างๆมีแนวโน้มเดียวกับกราฟในรูปที่ 4.25 กล่าวคือการเติม Hydrocerol 2047 จะส่งผลให้ค่า Specific impact strength ของพอลิพรอไฟลีนคอมพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มมากขึ้นและการเพิ่มขึ้นของปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 จะส่งผลให้ค่า Specific impact strength ของชิ้นงานคอมพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นแบบเซลล์โฟมจะช่วยลดความว่องไวต่อรอยแตก (crack) ของชิ้นงาน [38] ทำให้ต้องใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นในการทำให้รอยแตกเกิดการเติบโตจนเกิดการแตกหัก ซึ่งเมื่อชิ้นงานมีโครงสร้างที่เป็นเซลล์เปิดเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ความว่องไวต่อรอยแตกของชิ้นงานลดลง ดังนั้นเมื่อปริมาณการเติม Hydrocerol 2047 ในชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น ชิ้นงานจึงมีค่า Specific impact strength เพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบค่า Specific peak energy และ Specific impact strength จากกราฟที่ 4.25 และ 4.26 พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า Specific impact strength เทียบกับค่า Specific peak energy ของพอลิพรอไฟลีนคอมพอลิเมอร์ที่มีการเสริมแรงด้วยพงกกลบจะมีค่าต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิพรอไฟลีนคอมพอลิเมอร์ที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วและเส้นใยมะพร้าวที่มีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า Specific impact strength เทียบกับค่า Specific peak energy ใกล้เคียงกัน เนื่องจากสารเสริมแรงที่มีลักษณะเป็นเส้นใยจะช่วยหน่วงให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักช้าลง ส่งผลให้

ค่า Specific impact strength ของชิ้นงานมีค่าเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่พอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยผงแคลเซียมจะมีจุดรวมแรงเกิดขึ้นที่อนุภาคของผงแคลเซียมทำให้รอยแตกที่เกิดขึ้นเกิดการเติบโตอย่างรวดเร็ว ค่า Specific impact strength จึงมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่า Specific peak energy

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์