

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการสังเคราะห์กราฟท์โคพอลิเมอร์

การทดลองนี้ได้ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์กราฟท์โคพอลิเมอร์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังและน้ำยางธรรมชาติได้แก่ ชนิดของแป้งมันสำปะหลัง คือ แป้งดิบ (native starch) แป้งออกซิไดซ์ (Gelsize-75) และ แป้งแอมโฟเทอริก (Geltron-245) แปรสัดส่วนของแป้งมันสำปะหลังต่อน้ำหนักแห้งยางธรรมชาติตั้งแต่ 70/30, 80/20 และ 90/10 แปรปริมาณสารริเริ่มปฏิกิริยา (PPS) ตั้งแต่ 0 ไปจนถึง 20 pph (คิดเทียบกับน้ำหนักรวมของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด) อุณหภูมิในการสังเคราะห์ตั้งแต่ 40-60°C และเวลา 1-5 h เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์กราฟท์โคพอลิเมอร์

4.1.1 ผลการสังเคราะห์กราฟท์โคพอลิเมอร์ของแป้งดิบ

1. อัตราส่วนของแป้งดิบต่อยางธรรมชาติเท่ากับ 70 ต่อ 30

ใช้แป้งดิบจำนวน 7 g ผสมกับน้ำกลั่น 50 ml น้ำยางธรรมชาติ 5 g ผสมกับน้ำกลั่น 50 ml และ PPS 10 pph ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40–70°C เป็นเวลา 2–5 h ลักษณะของพอลิเมอร์ที่ได้ผสมอธิบายในตารางที่ 4.1 กรณีที่ใช้เมทานอลปริมาณน้อยในการตกตะกอน (800 ml) ได้ตะกอนของพอลิเมอร์ผสมเป็นก้อนขนาดใหญ่ มีแป้งมันสำปะหลังและยางธรรมชาติเกาะรวมกัน ของเหลวสีมีสีเหลืองเล็กน้อย ตะกอนมีสีเข้มมากขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาในการสังเคราะห์เพิ่มขึ้น จากนั้นรีดให้เป็นแผ่นบางและนำไปอบ แต่เมื่อทดลองใช้เมทานอลปริมาณมากในการตกตะกอน (1500 ml) จะได้ตะกอนเป็นผงเล็กๆ ในระหว่างการตกตะกอนจะมีการเกาะรวมกันของตะกอน มีเพียงบางส่วนที่ไม่เกาะกลุ่ม (ประมาณ 30%) และหลังจากการกรองตะกอนมีลักษณะรวมกัน ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะที่เหนียวติด (tacky) ของยางธรรมชาติ เพราะการกรองจะใช้เครื่องกรองแบบลดความดันทำให้มีแรงกระทำกับตะกอนสูง และสามารถนำตะกอนที่ได้มาบดให้ละเอียดได้ง่ายกว่าการตกตะกอนด้วยเมทานอลปริมาณน้อย หลังอบจะเกิดการแยกเฟสระหว่างยางธรรมชาติและแป้งที่สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจน เพราะยางธรรมชาติมีลักษณะเป็นสีเหลือง การแยกเฟสของยางธรรมชาติดังกล่าวจะเกิดขึ้นกับทุกสภาวะการทดลอง เมื่อพิจารณาเวลาและอุณหภูมิในการสังเคราะห์ พบว่าการสังเคราะห์ที่ใช้เวลา 3-5 h และอุณหภูมิ 70°C ทำให้สีของตะกอนที่ได้คล้ำมากกว่าการสังเคราะห์ที่เวลาและอุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่ำกว่า ดังนั้นในการทดลองต่อไปจะเลือกการใช้เมทานอลเท่ากับ 1500 ml เพราะตะกอนไม่เกาะกลุ่มกันเป็นก้อนและสามารถบดตะกอนให้ละเอียดได้ง่ายกว่าการตกตะกอนด้วยเมทานอลปริมาณน้อย

ตารางที่ 4.1 ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการสังเคราะห์ใช้อัตราส่วนระหว่างแป้งดิบต่อน้ำยางธรรมชาติเท่ากับ 70/30 สังเคราะห์ที่อุณหภูมิและเวลาแตกต่างกัน และปริมาณ PPS เท่ากับ 10 pph

Reaction temperature (°C)	Reaction time (h)	Appearance
40	2*	หลังหยุดปฏิกิริยาได้ของเหลวสีขาวขุ่น ไม่มีแป้งและยางเกาะติดแท่งแม่เหล็ก ตกตะกอนได้ของเหลวสีขาวขุ่น และเกิดตะกอนก้อนเล็กๆ สีขาว ตะกอนบางส่วนเกาะรวมกัน และบางส่วน (ประมาณ 30%) กระเจายาว ของเหลวขุ่นเล็กน้อย หลังกรองตะกอนรวมกันเป็นก้อนและของเหลวใส หลังอบได้ของแข็งสีขาว และการแยกเฟสของยางเกิดขึ้นน้อยมาก

50	2*	หลังหยุดปฏิบัติหน้าที่ของเหลวสีขาวขุ่น มีแฉ่งและยางเกาะติดแท่งแม่เหล็กเล็กน้อย (ประมาณ 2%) ตกตะกอนได้ของเหลวสีขาวขุ่น และเกิดเป็นตะกอนเล็กๆ ตะกอนเกาะกันเป็นก้อน บางส่วน (ประมาณ 30%) ยังคงเป็นผงเล็กๆ กระจายตัวรวมกัน และส่วนของเหลวใส หลังกรองตะกอนทั้งหมดรวมเป็นก้อนเดียวกัน และของเหลวที่ใส หลังอบได้ตะกอนสีขาว และการแยกเฟสของยางเกิดขึ้นน้อยมาก
	2 และ 3	หลังหยุดปฏิบัติหน้าที่ของเหลวสีขาวขุ่น ไม่มีแฉ่งและยางเกาะติดแท่งแม่เหล็ก เมื่อตกตะกอนเกิดตะกอนเล็กๆ จากนั้นตะกอนจับตัวกันเป็นก้อนใหญ่และของเหลวใส นำก้อนดังกล่าวไปรีดเป็นแผ่นบางและล้างด้วยน้ำ หลังอบได้เป็นแผ่นสีขาวมีความเปราะ มีการแยกเฟสของยางประมาณ 4%
	4 และ 5	หลังหยุดปฏิบัติหน้าที่ของเหลวสีขาวขุ่น ไม่มีแฉ่งและยางเกาะติดแท่งแม่เหล็ก ตกตะกอนได้ของเหลวสีขาวขุ่นเกิดตะกอนเล็กๆ แล้วตะกอนจับตัวเป็นก้อนใหญ่และของเหลวที่ใส นำก้อนดังกล่าวไปรีดเป็นแผ่นบาง หลังอบได้เป็นแผ่นสีครีมมีความเปราะและสังเกตเห็นเป็นยางบางส่วน การแยกเฟสของยางเกิดขึ้นประมาณ 7%
60	1 และ 2	หลังหยุดปฏิบัติหน้าที่ของเหลวสีขาวขุ่น ไม่มีแฉ่งและยางเกาะติดแท่งแม่เหล็ก ตกตะกอนได้ของเหลวสีขาวขุ่น เกิดตะกอนเล็กๆ แล้วจับตัวเป็นก้อนใหญ่และของเหลวที่ใส นำก้อนดังกล่าวไปรีดเป็นแผ่นบางและล้างด้วยน้ำ หลังอบได้เป็นแผ่นสีขาวมีความเปราะ มีการแยกเฟสของยางไม่ถึง 5%
	2*	หลังหยุดปฏิบัติหน้าที่ของเหลวสีขาวขุ่นและมีแฉ่งและยางเกาะติดบนแท่งแม่เหล็กเล็กน้อย (ประมาณ 3%) ตกตะกอนได้ของเหลวสีขาวขุ่น ตะกอนส่วนใหญ่เกาะกันเป็นก้อน มีบางส่วน (ประมาณ 30%) ที่ยังเป็นผงเล็กๆ กระจายและของเหลวใส หลังกรองตะกอนรวมกันเป็นก้อนเดียวและของเหลวใส หลังอบได้ตะกอนเป็นสีขาว และเห็นการแยกเฟสของยางน้อยมาก
	3	หลังการเติม PPS ลงไปประมาณ 2.30 h พบการจับตัวของแฉ่งและยางเกิดขึ้นที่แท่งแม่เหล็ก ปล่อยให้ปฏิบัติหน้าที่ดำเนินไปครบ 3 h แฉ่งและยางเกาะติดที่แท่งแม่เหล็กและก้อนดังกล่าวแยกกันอยู่กับน้ำใสสีเหลืองอ่อน หลังตกตะกอนได้ของเหลวสีขาวขุ่นและตะกอนสีเหลืองอ่อนตรงส่วนล่างของบีกเกอร์ หลังอบได้ของแข็งเปราะสีเหลือง นำส่วนที่เป็นก้อนเกาะติดบนแท่งแม่เหล็กไปรีดให้เป็นแผ่นและล้างด้วยน้ำ หลังอบแยกเฟสบางส่วน การแยกเฟสของยางเกิดขึ้นประมาณ 7%
70	2	หลังเติม PPS ประมาณ 1 h ของผสมจับตัวเป็นก้อนภายในขวดปฏิบัติหน้าที่ เมื่อปฏิบัติหน้าที่ดำเนินไปครบ 2 h แยกระหว่างกันส่วนที่จับตัวและของเหลวใสสีเหลืองอ่อน ตกตะกอนได้เป็นสีขาวขุ่นและตะกอนสีเหลืองอ่อนตรงส่วนล่างของบีกเกอร์ หลังอบจะได้ของแข็งสีเหลืองและเปราะ ส่วนที่เป็นก้อนรีดเป็นแผ่นและล้างด้วยน้ำ หลังอบได้ตะกอนสีครีม และเห็นการแยกเฟสของยางประมาณ 5%

*ตกตะกอนด้วยเมทานอล 1500 ml

2. อัตราส่วนของแป้งดิบต่ออย่างธรรมชาติเท่ากับ 80/20

แบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วน ในส่วนที่หนึ่งใช้แป้งดิบจำนวน 8 g ผสมกับน้ำกลั่น 50 ml น้ำยางธรรมชาติ ปริมาณ 3.33 g ผสมกับน้ำกลั่น 50 ml และแปรปริมาณ PPS ตั้งแต่ 1, 2, 5, 10, 15 และ 20 pph ทำการทดลองที่

อุณหภูมิระหว่าง 40–70°C เป็นเวลา 1–5 h ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่ได้อธิบายในตารางที่ 4.2 พอลิเมอร์ผสมมีลักษณะเช่นเดียวกันกับที่สัดส่วนแป้งมันสำปะหลังต่อยางธรรมชาติ 70 ต่อ 30 เมื่อพิจารณาปริมาณของ PPS ที่แตกต่างกัน พบว่าที่ PPS เท่ากับ 1-5 pph หลังตกตะกอนจะได้ของเหลวข้นกว่าที่ 10-20 pph แต่ตะกอนหลังอบแห้งไม่มีความแตกต่างกัน ยังคงสังเกตเห็นการแยกเฟสของยางธรรมชาติ แต่น้อยกว่าที่อัตราส่วน 70 ต่อ 30 เนื่องมาจากปริมาณของยางธรรมชาติที่น้อยกว่าจึงทำให้เกิดการจับตัวน้อยกว่า

ส่วนที่สองเป็นการทดลองที่เพิ่มความเข้มข้นของพอลิเมอร์มากขึ้น โดยเพิ่มปริมาณของสารตั้งต้นเป็น 8 เท่าของการทดลองส่วนที่หนึ่ง และใช้ปริมาณ PPS ลดลงเป็น 0.4, 0.5 และ 0.6 pph แป้งมันสำปะหลังที่ใช้เท่ากับ 64 g ผสมกับน้ำกลั่น 400 ml น้ำยางธรรมชาติ 26.4 g ผสมกับน้ำกลั่น 400 ml ทดลองที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 1, 1.30, 1.45 และ 2 h ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่ได้อธิบายในตารางที่ 4.3 ลักษณะทั่วไปของพอลิเมอร์ผสมมีความเหมือนกันทุกสภาวะการทดลอง สังเกตเห็นการแยกเฟสของยางธรรมชาติเช่นเดียวกัน แต่มีความแตกต่างกันไปตามสภาวะการทดลอง

ตารางที่ 4.2 ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการสังเคราะห์ใช้อัตราส่วนระหว่างแป้งดิบต่อน้ำยางธรรมชาติเท่ากับ 80/20 สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ เวลา และปริมาณ PPS แตกต่างกัน

Reaction temperature (°C)	Reaction time (h)	PPS content (pph)	Appearance
40	2	10	หลังหยุดปฏิกิริยาได้ของเหลวสีขาวขุ่น ไม่มีแบ่งและยางเกาะติดแท่งแม่เหล็ก หลังตกตะกอนได้ของเหลวสีขาวขุ่น เกิดตะกอนเล็กๆ กระจายตัว และบางส่วนรวมตัวกันเป็นก้อน และกระจายตัวดี (ประมาณ 30%) ส่วนที่เป็นของเหลวขุ่นเล็กน้อย หลังกรองจะได้ของเหลวใส ส่วนตะกอนเป็นของแข็งสีขาวเกาะกันเป็นก้อน หลังจากอบได้ของแข็งสีขาว และมียางแยกเฟสเล็กน้อย
50	1	10	พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีลักษณะเดียวกันกับที่อุณหภูมิ 40°C
	2	1	หลังหยุดปฏิกิริยาได้ของเหลวสีขาวขุ่น ไม่มีแบ่งและยางเกาะติดแท่งแม่เหล็ก ตกตะกอนได้ของเหลวสีขาวขุ่น เกิดตะกอนเล็กๆ และของเหลวหลังตกตะกอนสีขาวขุ่น หลังกรองของเหลวใสและขาวขุ่นเล็กน้อย และตะกอนบางส่วนเกาะกัน บางส่วนกระจายตัวดี (ประมาณ 30%) หลังอบได้ของแข็งสีขาว เห็นการแยกเฟสของยางประมาณ 1%
		2.5 และ 5	หลังหยุดปฏิกิริยาได้ของเหลวสีขาวขุ่น มีแบ่งและยางเกาะติดแท่งแม่เหล็กเล็กน้อย ตกตะกอนได้ของเหลวสีขาวขุ่น เกิดเป็นตะกอนเล็กๆ กระจายตัว ตะกอนไม่เกาะกลุ่มกัน และของเหลวที่ได้สีขาวขุ่นน้อยกว่าที่ PPS เท่ากับ 1 pph หลังกรองพบว่าตะกอนเกาะกันเป็นก้อนบางส่วนยังคงกระจายตัวดี (ประมาณ 20%) และของเหลวจากการกรองขุ่นเล็กน้อย หลังอบได้ของแข็งสีขาว เห็นการแยกเฟสเล็กน้อยประมาณ 1%
		10	หลังหยุดปฏิกิริยาได้ของเหลวสีขาวขุ่น มีแบ่งและยางเกาะติดแท่งแม่เหล็กเล็กน้อย ตกตะกอนได้ของเหลวสีขาวขุ่น แล้วเกิดเป็นตะกอนเล็กๆ ตะกอนรวมกลุ่มกันน้อยมาก และของเหลวที่ได้หลังตกตะกอนมีความใส

50			กว่าที่ 5 pph หลังกรองตะกอนเกาะติดกัน และของเหลวใส หลังอบได้ตะกอนเป็นของแข็งสีขาว และเห็นการแยกเฟสของอย่างมากประมาณ 7%
		15 และ 20	หลังหยุดปฏิกิริยาได้ของเหลวสีขาวขุ่น มีแบ่งและยางเกาะติดแท่งแม่เหล็กเล็กน้อย ตกตะกอนได้ของเหลวสีขาวขุ่น เกิดเป็นตะกอนเล็กๆ กระจายตัวเป็นผว่วน ไม่เกาะเป็นก้อน และของเหลวขุ่นขาว เมื่อกรองตะกอนจะเกาะกันเป็นก้อนและของเหลวใส หลังอบได้ของแข็งสีขาว และเห็นการแยกเฟสของยางเล็กน้อยประมาณ 2%
	3 และ 4	10	หลังหยุดปฏิกิริยาได้ของเหลวสีขาวขุ่น มีแบ่งและยางเกาะติดแท่งแม่เหล็กเล็กน้อย ตกตะกอนได้ของเหลวสีขาวขุ่น เกิดตะกอนเล็กๆ กระจายตัวตะกอนบางส่วนกระจายตัวดี และเกาะรวมกัน ตะกอนที่รวมตัวกันจะแยกออกจากกันเมื่อมีแรงไปกระทำ เมื่อกรองตะกอนจะรวมตัวกันและของเหลวหลังกรองใส หลังอบได้ตะกอนของแข็งสีขาว (คล้ายกว่าที่ 2 h) และเห็นการแยกเฟสของยางเล็กน้อยประมาณ 2%
60	5	10	หลังหยุดปฏิกิริยาได้ของเหลวสีขาวขุ่น มีแบ่งและยางเกาะติดแท่งแม่เหล็กเล็กน้อย แบ่งและยางเกาะติดที่ขอบของขวดปฏิกิริยา เมื่อตกตะกอนได้ของเหลวสีขาวขุ่นเกิดเป็นตะกอนเล็กๆ ตะกอนบางส่วนกระจายตัวดีและเกาะติดกัน และของเหลวหลังตกตะกอนใส หลังการกรองได้ตะกอนรวมกันเป็นก้อนและของเหลวใส หลังการอบได้ของแข็งสีครีม และเห็นการแยกเฟสของยางเล็กน้อยประมาณ 3%
	1	5	หลังหยุดปฏิกิริยาได้ของเหลวสีขาวขุ่น มีแบ่งและยางเกาะติดแท่งแม่เหล็กเล็กน้อย ตกตะกอนได้ของเหลวสีขาวขุ่น แล้วเกิดเป็นตะกอนเล็กๆ ตะกอนบางส่วนเกาะกัน และบางส่วนกระจายตัว และของเหลวมีสีขาวขุ่น ตะกอนมาเกาะรวมกันและของเหลวใสหลังการกรอง หลังอบได้ของแข็งสีขาว และเห็นการแยกเฟสของยางเล็กน้อยมาก
	2	5 และ 10	หลังหยุดปฏิกิริยาได้ของเหลวสีขาวขุ่น มีแบ่งและยางเกาะติดแท่งแม่เหล็กเล็กน้อย ตกตะกอนได้ของเหลวสีขาวขุ่น เกิดเป็นตะกอนเล็กๆ เกาะกันเป็นก้อน และกระจายตัว (ประมาณ 20%) และของเหลวใส เมื่อกรองตะกอนมารวมกันเป็นก้อนและของเหลวใส หลังอบแห้งได้ตะกอนเป็นของแข็งสีขาว และเห็นการแยกเฟสของยางเล็กน้อยประมาณ 3%
70	2	10	เมื่อเติม PPS ประมาณ 1.30 h มีแบ่งและยางจับตัวกันเกาะติดแท่งแม่เหล็ก และปล่อยปฏิกิริยาดำเนินไปครบ 2 h พบว่าแบ่งและยางที่เกาะบนแท่งแม่เหล็กแยกกันอยู่กับของเหลวสีเหลืองอ่อน เมื่อนำของเหลวสีเหลืองอ่อนเทลงในเมทานอล จะเป็นของเหลวสีขาวขุ่น ดังที่พบว่าเมื่อตะกอนสีเหลืองเกิดขึ้น หลังอบได้ตะกอนสีเหลืองใสเปราะ และของแข็งสีขาวที่มาจากแบ่งและยางจับตัว และเห็นการแยกเฟสของยางประมาณ 3%



ตารางที่ 4.3 ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการสังเคราะห์ใช้อัตราส่วนระหว่างแป้งดิบต่อน้ำยางธรรมชาติเท่ากับ 80/20 ที่อุณหภูมิ 50°C แปรเวลาและปริมาณ PPS

PPS content (pph)	Reaction time (h)	Appearance
0.4	1	หลังหยุดปฏิกิริยาได้ของเหลวสีขาวขุ่น มีแป้งและยางเกาะติดแท่งแม่เหล็กเล็กน้อย ตกตะกอนใต้ของเหลวสีขาวขุ่น เกิดเป็นตะกอนเล็กๆ ตะกอนบางส่วนเกาะกันเป็นก้อนใหญ่ และตะกอนเล็กๆ แวนลอยอยู่ในของเหลวสีขาวขุ่น หลังตกตะกอนของเหลวขาวขุ่นเล็กน้อย เมื่อกรอง ตะกอนเกาะกันเป็นก้อนใหญ่และของเหลวใส หลังอบได้ตะกอนสีขาว และสังเกตเห็นการแยกเฟสของยางประมาณ 3%
	1.30 และ 1.45	หลังหยุดปฏิกิริยาได้ของเหลวสีขาวขุ่น มีแป้งและยางเกาะติดแท่งแม่เหล็กเล็กน้อย ตกตะกอนใต้ของเหลวสีขาวขุ่น เกิดเป็นตะกอนเล็กๆ ตะกอนบางส่วนเกาะกันเป็นก้อน และบางส่วนแวนลอยอยู่ในของเหลวสีขาวขุ่น หลังตกตะกอนของเหลวขุ่นเล็กน้อย เมื่อกรอง ได้ตะกอนเกาะกันเป็นก้อนใหญ่และของเหลวใส หลังอบได้ตะกอนสีขาว และเห็นการแยกเฟสของยางประมาณ 3%
	2	หลังหยุดปฏิกิริยาได้ของเหลวสีขาวขุ่น มีแป้งและยางเกาะติดแท่งแม่เหล็กเล็กน้อย ตกตะกอนใต้ของเหลวสีขาวขุ่น เกิดเป็นตะกอนเล็กๆ รวมตัวเป็นก้อนใหญ่และบางส่วนแวนลอยอยู่ในของเหลวสีขาวขุ่น หลังกรอง ตะกอนเกาะกันเป็นก้อนใหญ่ และของเหลวใส หลังอบได้ตะกอนสีขาว และสังเกตเห็นการแยกเฟสของยางประมาณ 5%
0.5	1	ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่ได้เหมือนกับที่ปริมาณ PPS เท่ากับ 0.4 pph สังเกตเห็นการแยกเฟสของยางประมาณ 5%
	1.30 และ 1.45	ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่ได้เหมือนกับที่ปริมาณ PPS เท่ากับ 0.4 pph สังเกตเห็นการแยกเฟสของยางประมาณ 5%
	2	ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่ได้เหมือนกับที่ปริมาณ PPS เท่ากับ 0.4 pph สังเกตเห็นการแยกเฟสของยางประมาณ 7%
0.6	1	ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่ได้เหมือนกับที่ปริมาณ PPS เท่ากับ 0.4 pph ที่เวลา 1 h
	1.30	ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่ได้เหมือนกับที่ปริมาณ PPS เท่ากับ 0.5 pph ที่เวลา 1.30 h
	1.45 และ 2	หลังหยุดปฏิกิริยาได้ของเหลวสีขาวขุ่น มีแป้งและยางเกาะติดแท่งแม่เหล็กเล็กน้อย เกิดตะกอนเล็กๆ ตะกอนบางส่วนรวมตัวกันเป็นก้อนใหญ่ และบางส่วนกระจายตัวดีของเหลวหลังตกตะกอนขุ่นขาวแต่ใสกว่าที่ 1.30 h หลังกรองพบว่าได้ตะกอนก้อนใหญ่ และของเหลวที่ได้จากการกรองใส อบแห้งได้ตะกอนสีขาว และเห็นการแยกเฟสของยางประมาณ 5%

3. อัตราส่วนของแป้งดิบต่อยางธรรมชาติเท่ากับ 90/10

ใช้แป้งมันสำปะหลัง 9 g ผสมกับน้ำกลั่น 50 ml น้ำยางธรรมชาติ 1.67 g ผสมกับน้ำกลั่น 50 ml และ PPS 10 pph ที่อุณหภูมิ 40, 50, 60 และ 70°C เป็นเวลา 2 h หลังจากหยุดปฏิกิริยาแล้วจึงนำไปตกตะกอนด้วยเมทานอล

กรองพอลิเมอร์สมที่ตกตะกอนได้ และอบเช่นเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา ลักษณะของพอลิเมอร์สมอธิบายในตารางที่ 4.4 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้สีของตะกอนที่ได้คล้ำขึ้นเช่นเดียวกันกับการทดลองที่ผ่านมา

ตารางที่ 4.4 ลักษณะของพอลิเมอร์สมใช้อัตราส่วนระหว่างแป้งดิบต่อน้ำยางธรรมชาติเท่ากับ 90/10 ที่เวลาเท่ากับ 2 h ปริมาณ PPS เท่ากับ 10 pph และอุณหภูมิแตกต่างกัน

Reaction temperature (°C)	Appearance
40	หลังหยุดปฏิกิริยาได้ของเหลวสีขาวขุ่น ไม่มีแป้งและยางเกาะติดแท่งแม่เหล็ก ตกตะกอนได้ของเหลวสีขาวขุ่น แล้วจึงเกิดเป็นตะกอนเล็กๆ ตะกอนเป็นผงร่วนไม่เกาะติดกัน กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอไม่รวมตัวกัน และของเหลวขุ่นเล็กน้อย หลังกรองของเหลวขาวขุ่น ตะกอนเกาะติดกันและของเหลวขุ่นเล็กน้อย หลังอบได้ของแข็งสีขาว และเห็นการแยกเฟสของยางเล็กน้อยมาก
50	หลังหยุดปฏิกิริยาได้ของเหลวสีขาวขุ่น ไม่มีแป้งและยางเกาะติดแท่งแม่เหล็ก ตกตะกอนได้ของเหลวสีขาวขุ่น แล้วเกิดเป็นตะกอนเล็กๆ ตะกอนบางส่วนเกาะกันและกระจายตัว (ประมาณ 30%) และของเหลวใสกว่าที่อุณหภูมิ 40°C เมื่อกรองตะกอนเกาะรวมกันและบางส่วนมีการกระจายเป็นผงร่วน หลังอบได้ของแข็งสีขาว และเห็นการแยกเฟสของยางเล็กน้อยมาก
60	หลังหยุดปฏิกิริยาได้ของเหลวสีขาวขุ่น มีแป้งและยางเกาะติดแท่งแม่เหล็กเล็กน้อย ตกตะกอนได้ของเหลวสีขาวขุ่น แล้วเกิดเป็นตะกอนเล็กๆ ตะกอนบางส่วนเกาะกันและกระจายตัวดี (ประมาณ 30%) หลังตกตะกอนได้ของเหลวใสกว่าที่อุณหภูมิ 50°C หลังกรองตะกอนมาเกาะรวมกันและของเหลวใส หลังอบได้ของแข็งสีครีม และเห็นการแยกเฟสของยางเพียงเล็กน้อย
70	หลังหยุดปฏิกิริยาได้ของเหลวสีขาวขุ่น มีแป้งและยางเกาะติดแท่งแม่เหล็กเล็กน้อย ตกตะกอนได้ของเหลวสีขาวขุ่น แล้วเกิดเป็นตะกอนเล็กๆ ตะกอนบางส่วนเกาะกันและกระจายตัวดี (ประมาณ 30%) หลังตกตะกอนได้ของเหลวใสกว่าที่อุณหภูมิ 60°C หลังกรองตะกอนมาเกาะรวมกันและของเหลวใส หลังอบได้ของแข็งสีครีมและคล้ำกว่าที่ 60°C และเห็นการแยกเฟสของยางประมาณ 1%

จากการทดลองการใช้อัตราส่วนของแป้งดิบต่อน้ำยางธรรมชาติที่สัดส่วนต่างๆ กันทั้ง 3 อัตราส่วน พบว่าหลังหยุดปฏิกิริยาได้ของเหลวสีขาวขุ่น มีแป้งและยางธรรมชาติเกาะที่แท่งแม่เหล็ก ปริมาณการเกาะกันของแป้งดิบและยางธรรมชาติขึ้นอยู่กับปริมาณของยางธรรมชาติ โดยที่ 10, 20 และ 30 wt% ของยางธรรมชาติจะมีแป้งและยางเกาะกันประมาณ 1, 3 และ 5-7% ตามลำดับ หลังจากตกตะกอนด้วยเมทานอลได้เป็นของเหลวสีขาวขุ่นและตะกอนสีขาวเกาะกันเป็นกลุ่ม และมีการแยกเฟสของยางธรรมชาติหลังอบแห้ง พบว่าอัตราส่วนของแป้งดิบต่อน้ำยางธรรมชาติเท่ากับ 70/30 และ 80/20 เกิดการแยกเฟสของยางธรรมชาติมากกว่าที่อัตราส่วนของแป้งดิบต่อน้ำยางธรรมชาติเท่ากับ 90/10 และที่อุณหภูมิเท่ากับ 70°C และเวลาตั้งแต่ 3 h เป็นต้นไปของอัตราส่วนของแป้งดิบต่อน้ำยางธรรมชาติเท่ากับ 70/30 และ 80/20 ทำให้เกิดการเกาะกันระหว่างแป้งดิบและยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นในขณะการกวนผสมมากกว่าที่อุณหภูมิและเวลาอื่นๆ ซึ่งการเกาะกันของแป้งและยางธรรมชาติดังกล่าวบ่งชี้ถึงการเกิดการแยกเฟสของยางธรรมชาติที่เพิ่มมากขึ้นหลังจากตะกอนได้รับการอบแห้ง ดังนั้นจึงเลือกสัดส่วนแป้งดิบต่อน้ำยางธรรมชาติเท่ากับ 80/20 เพื่อศึกษาอิทธิพลของแป้งดิบแปรชนิดต่างๆ ต่อการสังเคราะห์กราฟท์โคพอลิเมอร์

4.1.2 ผลการสังเคราะห์กราฟที่โคพอลิเมอร์ของแป้งออกซิไดซ์ (Gelsize-75)

เป็นการศึกษาการสังเคราะห์กราฟที่โคพอลิเมอร์ของแป้งออกซิไดซ์ โดยใช้อัตราส่วนของแป้งต่อยางธรรมชาติ เท่ากับ 80/20 แปรปริมาณ PPS ตั้งแต่ 1-10 pph ที่อุณหภูมิเท่ากับ 40-70°C และเวลา 1-3 h ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่ได้แสดงในตารางที่ 4.5 แป้งดัดแปรชนิดนี้ทำให้ของผสมเกิดการจับตัวกันและแยกกันระหว่างส่วนที่จับตัวและส่วนที่เป็นของเหลว ตะกอนที่ได้เกาะกันค่อนข้างเหนียวมีลักษณะเป็นผลึก และเกิดการแยกเฟสของยางธรรมชาติที่สามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจนในปริมาณที่ค่อนข้างสูง จากลักษณะดังกล่าวบอกได้ว่าแป้งออกซิไดซ์ไม่เหมาะสมต่อการนำไปทำพอลิเมอร์ผสม

ตารางที่ 4.5 ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมเมื่อใช้แป้งออกซิไดซ์ใช้อัตราส่วนระหว่างแป้งดิบต่อน้ำยางธรรมชาติ เท่ากับ 80/20 สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ เวลา และปริมาณ PPS แตกต่างกัน

Reaction temperature (°C)	PPS content (pph)	Reaction time (h)	Appearance
40	5	2	หลังหยุดปฏิกิริยาได้ของเหลวสีขาวขุ่น ไม่มีแป้งและยางเกาะติดแท่งแม่เหล็ก ตกตะกอนได้ตะกอนเป็นผงสีขาวขุ่น และของเหลวหลังตกตะกอนมีสีขาวขุ่น ของเหลวที่ได้จากการกรองใส หลังจากอบแห้งได้ตะกอนที่จับตัวติดกันเป็นแผ่นสีขาวขุ่น และค่อนข้างนุ่มมีก้อนยางประมาณ 5%
50	3	3	หลังหยุดปฏิกิริยาได้ของเหลวสีขาวขุ่น ไม่มีแป้งและยางเกาะติดแท่งแม่เหล็ก หลังตกตะกอนมีส่วนที่จับตัวเป็นแผ่นอยู่ตรงส่วนล่างของบีกเกอร์ และของเหลวหลังตกตะกอนมีสีขาวขุ่น เมื่อกรองของเหลวที่ได้ใส ตะกอนเป็นผงสีขาว และแผ่นยางซึ่งเกาะติดกระดาษกรอง หลังอบแห้งได้ตะกอนที่จับตัวติดกันเป็นก้อนสีขาวขุ่น ลักษณะค่อนข้างนุ่ม ยืดหยุ่นเล็กน้อย และได้แผ่นยางสีเหลืองประมาณ 20%
	5	2 และ 3	พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีลักษณะเดียวกับที่ 40°C
60	1	1 และ 2	หลังหยุดปฏิกิริยาได้ของเหลวสีขาวขุ่นไม่มีแป้งและยางเกาะติดแท่งแม่เหล็ก เมื่อตกตะกอนได้ตะกอนเป็นผง ของเหลวหลังตกตะกอนสีขาวขุ่น เมื่อกรองได้ตะกอนเป็นผงสีขาวรวมตัวกันเป็นก้อน หลังอบได้ตะกอนสีขาว มีความแข็งและค่อนข้างเหนียวในบางส่วน มีการแยกเฟสของยางออกมาเป็นก้อนประมาณ 20%
	2	1 และ 2	ที่เวลา 1 h มีลักษณะเช่นเดียวกับการใช้ PPS 1 pph ที่เวลา 2 h แป้งและยางจับตัวกันเป็นก้อนหลังเติม PPS ลงไปประมาณ 1 h และ 20 min และมีส่วนที่เป็นก้อนยางประมาณ 50%
	3	1	ไม่มีแป้งและยางเกาะติดแท่งแม่เหล็ก เมื่อตกตะกอนๆ เป็นผงละเอียด ของเหลวหลังตกตะกอนสีขาวขุ่น เมื่อกรองได้ตะกอนที่เป็นผงสีขาวรวมตัวกันเป็นกลุ่ม หลังอบได้ตะกอนสีขาวออกเหลืองเล็กน้อย เกาะกันเป็นก้อน ก้อนดังกล่าวเปราะสามารถหักได้ง่าย มีการแยกเฟสของยางออกมาเป็นก้อนประมาณ 20%
		2	พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีลักษณะเดียวกับที่ PPS เท่ากับ 2 pph ที่เวลา 2 h
	5	1 และ 2	แป้งและยางจับตัวกันเป็นก้อนหลังเติม PPS ลงไปประมาณ 44 min และมีส่วนที่เป็นก้อนยางประมาณ 50%

70	1	1 และ 2	แป้งและยางจับตัวกันเป็นก้อนหลังเติม PPS ลงไปประมาณ 20 min และหลังอบแห้งมีก้อนยางที่แยกออกมาประมาณ 40%
	2	1 และ 2	แป้งและยางจับตัวกันเป็นก้อนหลังเติม PPS ลงไปประมาณ 24 min และหลังอบแห้งมีก้อนยางแยกออกมาประมาณ 50%
	5	1 และ 2	แป้งและยางจับตัวกันเป็นก้อนหลังเติม PPS ลงไปประมาณ 26 min และหลังอบแห้งมีก้อนยางแยกออกมาประมาณ 60%

4.1.3 ผลการสังเคราะห์กราฟท์โคพอลิเมอร์ของแป้งแอมโฟเทอริก (Geltron-245)

เป็นการศึกษาแป้งแอมโฟเทอริก โดยใช้อัตราส่วนของแป้งต่อเนื้อยางธรรมชาติเท่ากับ 80/20 จากการสังเกตลักษณะทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ พบว่าแป้งชนิดนี้มีความหนืดสูง สังเกตได้จากปริมาณน้ำที่ใช้ในการศึกษา เพราะว่าเมื่อใช้ปริมาณน้ำที่เท่ากับแป้งดิบไม่สามารถกวนได้ เพราะมีความหนืดสูงมาก ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่ได้แสดงในตารางที่ 4.6 จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าแป้งแอมโฟเทอริกไม่มีความเหมาะสมต่อการสังเคราะห์กราฟท์โคพอลิเมอร์ เนื่องจากความหนืดที่สูงมาก ทำให้ของผสมมีเนื้อ (total solid content) น้อย

ตารางที่ 4.6 ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมเมื่อใช้แป้งดัดแปรชนิด Geltron-245 ใช้อัตราส่วนระหว่างแป้งดิบต่อน้ำยางธรรมชาติเท่ากับ 80/20 สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ เวลา ปริมาณ PPS และปริมาณน้ำแตกต่างกัน

Reaction temperature (°C)	PPS content (pph)	Water content (ml)	Reaction time (h)	Appearance
30	5	50	2	หลังหยุดปฏิกิริยาได้ของเหลวสีขาวขุ่น ไม่มีแป้งและยางเกาะติดแท่งแม่เหล็ก ตกตะกอนได้ตะกอนเล็กๆ กระจายตัวและของเหลวที่ได้ใส หลังกรองได้ตะกอนเกาะกันเป็นก้อนและของเหลวใส หลังอบแห้งได้ตะกอนสีขาว และตะกอนเกาะกันเป็นก้อนแข็งบดละเอียดไม่ได้
40	5	50	2	ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่ได้เหมือนกันกับที่ 30°C
50	1	50	2 และ 3	ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่ได้เหมือนกันกับที่ 30°C
	5	50	2	หลังหยุดปฏิกิริยาได้ของเหลวสีขาวขุ่น ไม่มีแป้งและยางเกาะติดแท่งแม่เหล็กเล็กน้อย เมื่อดกตะกอนได้ตะกอนเล็กๆ สีขาวกระจายตัวและของเหลวที่ได้ใส หลังกรองตะกอนเกาะกลุ่มรวมกัน และได้ของเหลวใส หลังอบแห้งได้ตะกอนสีขาว และตะกอนเกาะกันเป็นก้อนแข็งบดละเอียดไม่ได้ มีการแยกเฟสของยางเล็กน้อย
			3	หลังหยุดปฏิกิริยาได้ของเหลวสีขาวขุ่น มียางเกาะติดแท่งแม่เหล็กตกตะกอนได้ตะกอนเล็กๆ สีขาวกระจายตัวและของเหลวใส หลังกรองตะกอนสีเหลืองเกาะกันและของเหลวใส หลังอบแห้งได้ตะกอนสีเหลือง และตะกอนสามารถบดละเอียดได้ มีการแยกเฟสของยางเล็กน้อยประมาณ 3%

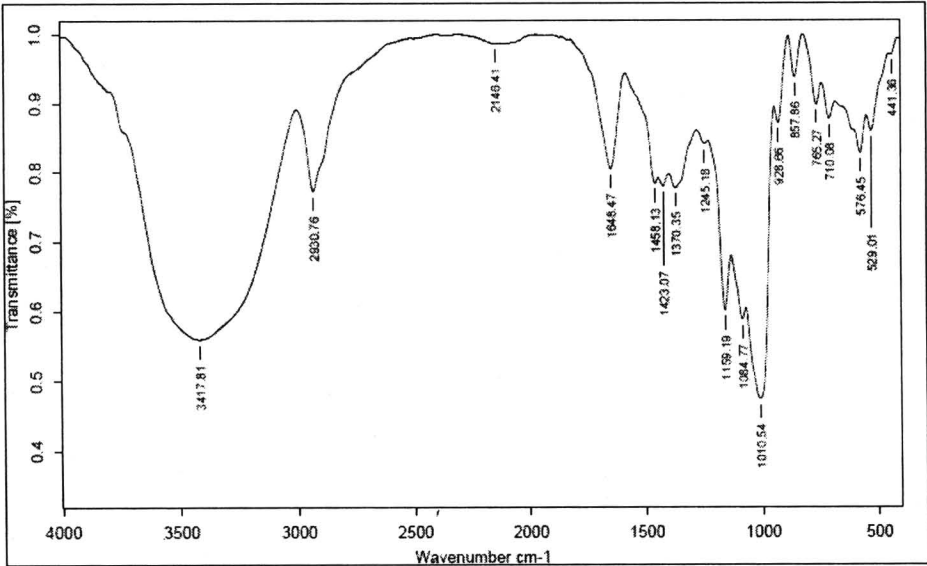
60	1	175	1 และ 2	หลังหยุดปฏิบัติรายได้ของเหลวสีขาวขุ่น มียางเกาะติดแท่งแม่เหล็ก เมื่อตกตะกอนได้ตะกอนเล็กๆ สีขาวกระจายตัว และของเหลวใส หลังกรองตะกอนเกาะกันและได้ของเหลวใส หลังอบแห้งได้ตะกอนสีเหลือง และตะกอนสามารถบดละเอียดได้ มีการแยกเฟสของยางเล็กน้อยประมาณ 5%
60	5	175	1	หลังหยุดปฏิบัติรายได้ของเหลวสีขาวขุ่น ไม่มีแบ่งและยางเกาะติดแท่งแม่เหล็ก เมื่อตกตะกอนได้ตะกอนสีขาวจับตัวเป็นก้อนเหนียว และของเหลวใส หลังกรองตะกอนเกาะกันและได้ของเหลวใส หลังอบแห้งได้ตะกอนสีเหลือง และตะกอนสามารถบดละเอียดได้ มีการแยกเฟสของยางเล็กน้อย
			2	หลังหยุดปฏิบัติรายได้ของเหลวสีขาวขุ่น ไม่เกาะติดแท่งแม่เหล็ก เมื่อตกตะกอนได้ตะกอนสีขาวเล็กๆ สีขาวจากนั้นจะจับตัวเป็นก้อนเหนียวๆ และของเหลวใส หลังกรองตะกอนเกาะกันและได้ของเหลวใส หลังอบแห้งได้ตะกอนสีเหลือง และบดละเอียดได้ มีการแยกเฟสของยางประมาณ 5%
		125	2	ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่ได้เหมือนกับปริมาณเท่ากับ 175 ml และเวลา 2 h
70	1	275	1 และ 2	หลังหยุดปฏิบัติรายได้ของเหลวสีขาวขุ่น ไม่มีแบ่งและยางเกาะติดแท่งแม่เหล็ก ทำการตกตะกอนได้ตะกอนสีขาวอมเหลือง และจับตัวเป็นก้อนเหนียวๆ ของเหลวใส หลังกรองได้ตะกอนสีเหลืองอ่อน และของเหลวใส หลังอบแห้งได้ตะกอนสีเหลือง และสามารถบดละเอียดได้ มีการแยกเฟสของยางประมาณ 3%
	5	150	1 และ 2	เมื่อทำการกวนแบ่งกับน้ำ เป็นเวลา 4 min ของผสมที่ได้มีความหนืดเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเพิ่มปริมาณน้ำลงไประหว่างการทดลอง สังเกตเห็นว่าของผสมเกิดการแยกชั้น โดยชั้นล่างหนืดเป็นแบ่งเปียก ส่วนชั้นบนเป็นน้ำ ไม่สามารถทำการทดลองต่อได้ มีการแยกเฟสของยางเล็กน้อยประมาณ 3%
		205	1 และ 2	เมื่อทำการกวนแบ่งกับน้ำ เป็นเวลา 4 min ของผสมที่ได้มีความหนืดเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเพิ่มปริมาณน้ำลงไประหว่างการทดลอง สังเกตเห็นว่าของผสมเกิดการแยกชั้น โดยชั้นล่างหนืดเป็นแบ่งเปียก ส่วนชั้นบนเป็นน้ำ ไม่สามารถทำการทดลองต่อได้
		275	1 และ 2	หลังหยุดปฏิบัติรายได้ของเหลวสีขาวขุ่น ไม่มีแบ่งและยางเกาะติดแท่งแม่เหล็ก เมื่อตกตะกอนได้ตะกอนสีขาวอมเหลืองจับตัวเป็นก้อนเหนียวๆ และของเหลวที่เหลืองใส เมื่อกรองตะกอนเป็นก้อนและของเหลวใส หลังอบแห้งได้ตะกอนสีเหลือง และสามารถบดละเอียดได้ มีการแยกเฟสของยางเล็กน้อย
80	1	325	1	หลังหยุดปฏิบัติรายได้ของเหลวสีขาวขุ่น ไม่มีแบ่งและยางเกาะติดแท่งแม่เหล็ก เมื่อตกตะกอนได้ตะกอนสีขาวอมเหลืองจับตัวเป็นก้อนเหนียวและของเหลวใส เมื่อกรองตะกอนเป็นก้อนสีเหลือง และ

				ของเหลวใส หลังอบแห้งได้ตะกอนสีเหลืองเข้ม และสามารถบดละเอียดได้ มีการแยกเฟสของเล็กน้อยประมาณ 6%
80	5	325	1 และ 2	พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีลักษณะเหมือนกับปริมาณ PPS เท่ากับ 1 pph

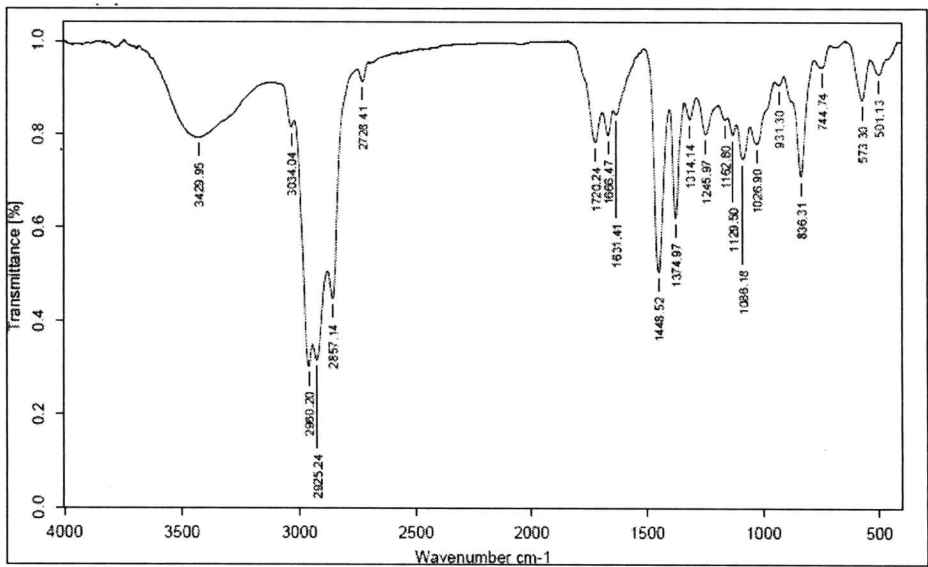
พอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการทดลองสังเคราะห์กราฟท์โคพอลิเมอร์ทั้งหมดนี้ ไม่เหมาะสมที่จะนำไปเป็นวัตถุดิบในการขึ้นรูปเป็นโฟม เนื่องจากการสังเคราะห์ดังกล่าวใช้น้ำเป็นจำนวนมาก ทำให้มีปริมาณของแข็งน้อย การนำไปขึ้นรูปเป็นโฟมจำเป็นต้องเติมแป้งมันสำปะหลังลงไป ซึ่งได้ทำการทดลองแล้ว ปรากฏว่าแป้งจับตัวเป็นก้อน ไม่สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นโฟมได้ จึงไม่มีความจำเป็นที่จะทดลองหาปริมาณการกราฟท์ในพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งและน้ำยางธรรมชาติ เพราะไม่สามารถนำไปใช้ได้ แต่ยังคงมีความจำเป็นที่จะพิสูจน์การเกิดกราฟท์โคพอลิเมอร์ระหว่างแป้งและน้ำยางธรรมชาติ อย่างไรก็ตามจากการทดลองศึกษาอิทธิพลของชนิดของแป้งมันสำปะหลังทั้งสามชนิด พบว่าแป้งดิบมีความเหมาะสมมากที่สุดในการสังเคราะห์กราฟท์โคพอลิเมอร์ เพราะแป้งออกซิไดซ์จับตัวกันเป็นก้อนในระหว่างการทำปฏิกิริยาและมีการแยกเฟสกับยางธรรมชาติมากกว่าแป้งอีกสองชนิด แป้งแอมโฟเทอริกมีความหนืดสูงมากเกินไปทำให้ใช้ปริมาณน้ำในการทดลองที่สูงขึ้น และตะกอนหลังอบแห้งมีสีเหลืองและแข็งมาก บดละเอียดได้ยากกว่าแป้งดิบ ดังนั้นในการศึกษาเพื่อตรวจสอบการเกิดกราฟท์โคพอลิเมอร์ จึงเลือกใช้แป้งดิบในสัดส่วนของแป้งดิบต่อยางธรรมชาติเท่ากับ 80/20 มาทำการศึกษาการเกิดกราฟท์โคพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค FTIR และ ¹H-NMR โดยทำการสกัดยางธรรมชาติที่ไม่เกิดปฏิกิริยากับแป้งออกไปด้วยวิธีการ Soxhlet extraction ในโทลูอีนที่ 110°C เป็นเวลา 40 h

4.2 ผลการตรวจสอบกราฟท์โคพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

FTIR สเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังและยางธรรมชาติแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ แถบการสั่นของหมู่ฟังก์ชันของแป้งมันสำปะหลังและยางธรรมชาติแสดงในตารางที่ 4.7 พบว่าบางตำแหน่งของแป้งมันสำปะหลังและยางธรรมชาติมีการซ้อนทับกัน



รูปที่ 4.1 FTIR สเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลัง

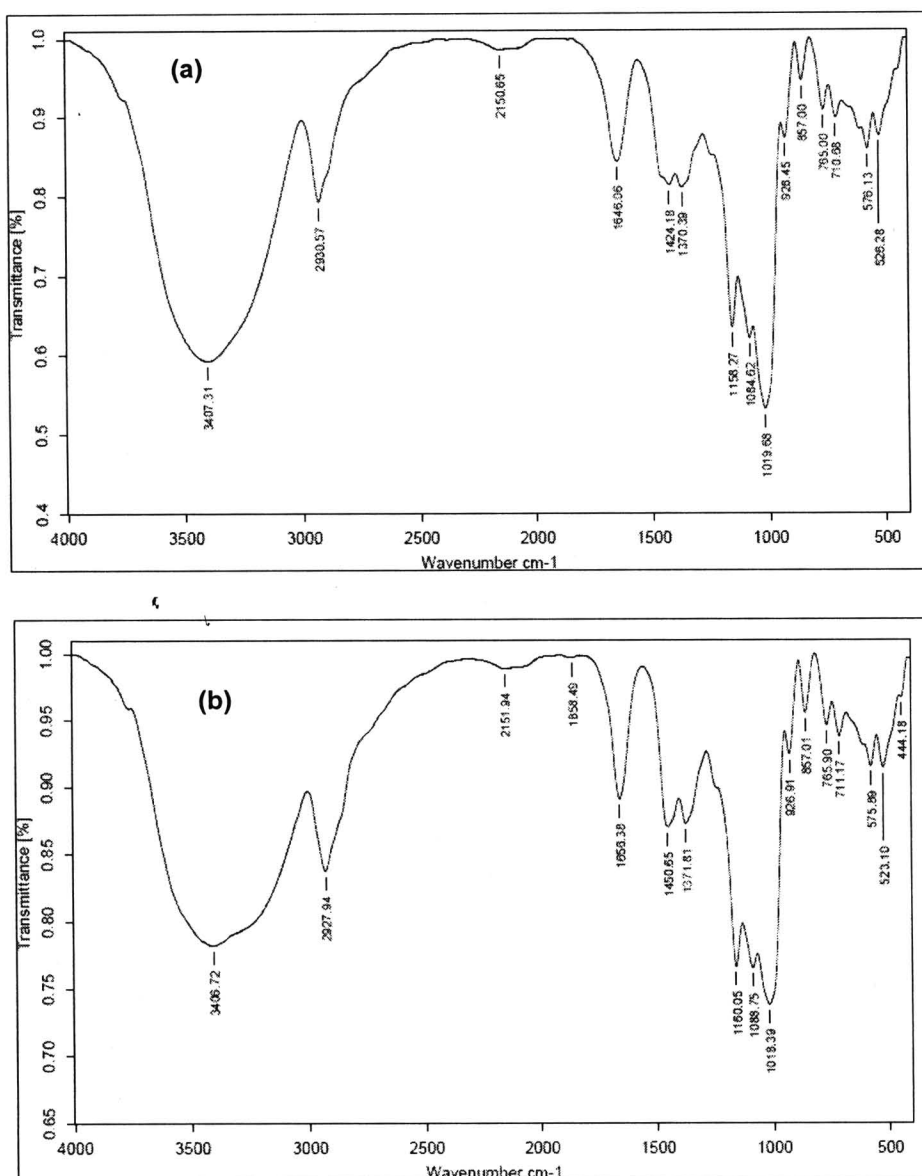


รูปที่ 4.2 FTIR สเปกตรัมของยางธรรมชาติ

ตารางที่ 4.7 หมู่ฟังก์ชันบนตำแหน่งเลขคลื่นต่างๆ ของยางธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลังจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR

Sample	Wave number (cm ⁻¹)	Assignment
Cassava starch (Kaewtatip and Tanrattanakul, 2008; Mano <i>et al</i> , 2003)	3900-3300	O-H stretching
	2930	C-H asymmetric stretching
	1648	δ(O-H) of water
	1458	CH ₂ deformation
	1423-1370	C-H bending and wagging
	1159, 1084, 1010	C-O stretching (C-O-C, C-O-H)
Natural rubber (Santos <i>et al.</i> , 2005)	3429	O-H stretching
	2926, 2925, 2854	C-H stretching
	1720, 1666	C=CH stretching
	1448	CH ₃ deformation
	1374	CH ₂ deformation
	836	C=CH (bending)

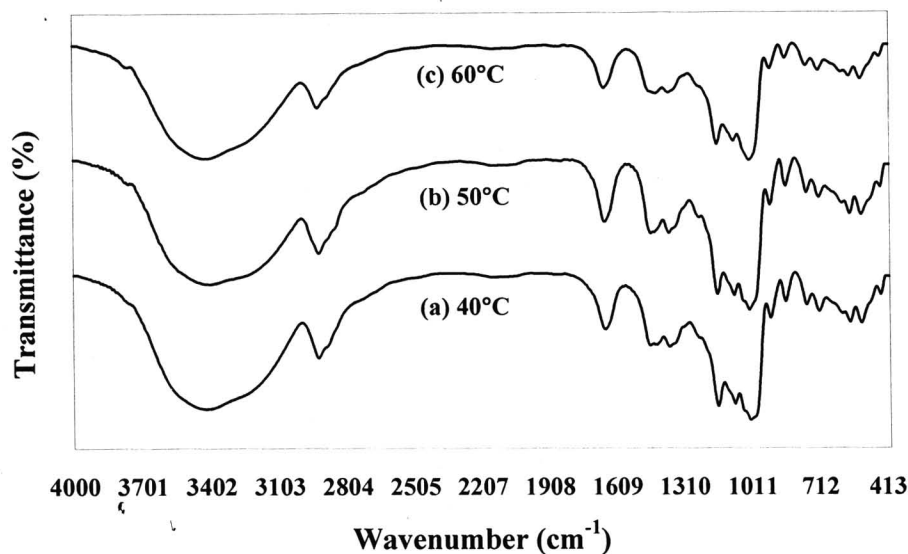
รูปที่ 4.3a และ 4.3b แสดง FTIR สเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ PPS เท่ากับ 0.5 pph ก่อนและหลังการทำ Soxhlet extraction ตามลำดับ พบว่าเส้นสเปกตรัมทั้งสองรูปไม่มีความแตกต่างกันและมีลักษณะเหมือนกับสเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังที่แสดงในรูปที่ 4.1 เนื่องจากฟีดของแป้งมันสำปะหลังและยางธรรมชาติมีการซ้อนทับกันอยู่หลายตำแหน่งดังแสดงในตารางที่ 4.7 จึงทำให้ไม่สามารถเห็นฟีดที่เป็นลักษณะเฉพาะของยางธรรมชาติได้ในรูปที่ 4.3a ที่เป็นตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสมที่ยังไม่มีการสกัดเอายางธรรมชาติออกไป



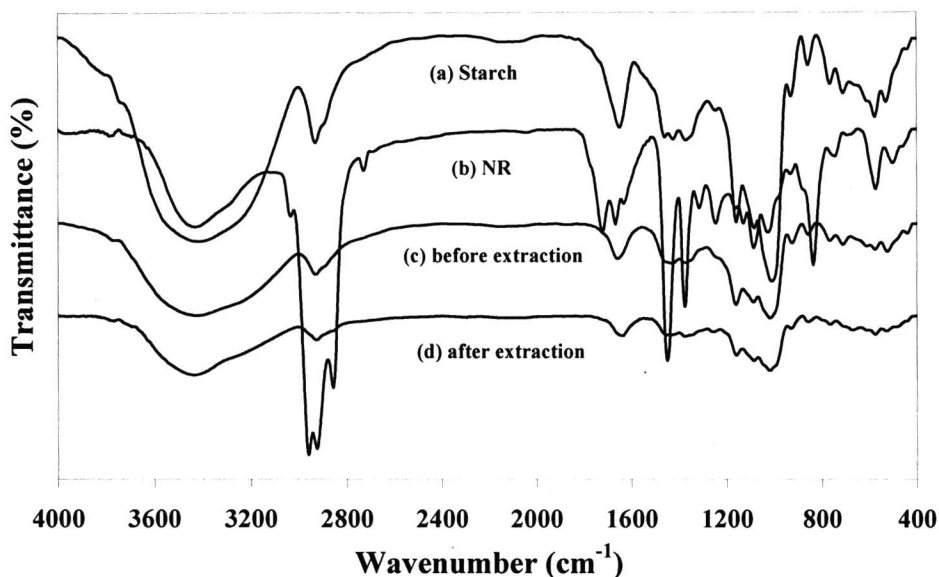
รูปที่ 4.3 FTIR สเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วนแป้งดิบต่ออย่างธรรมชาติเท่ากับ 80/20 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 50°C เวลา 2 h และ PPS 0.5 pph โดยที่ (a) ก่อนทำ Soxhlet extraction และ (b) หลังทำ Soxhlet extraction

นำพอลิเมอร์ผสมที่สังเคราะห์ในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน (40-60°C) เป็นเวลา 2 h และมีปริมาณ PPS เท่ากับ 0.5 pph ทำการสกัดอย่างธรรมชาติที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกไปตามวิธีการ Soxhlet extraction ที่กล่าวมาแล้ว นำไปตรวจสอบด้วยเทคนิค FTIR ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.4 สังเกตได้ว่าเส้นสเปกตรัมมีลักษณะเหมือนกัน ผลการทดลองบ่งชี้ว่าอุณหภูมิในการสังเคราะห์ไม่มีผลต่อพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ แต่ที่ต้องพิจารณาโดยละเอียดคือ การไม่แสดงพีคของยางธรรมชาติในตัวอย่างที่ไม่ได้ทำการสกัดยางออกไป ทำให้เป็นที่สงสัยว่าการตรวจสอบด้วยเทคนิค FTIR โดยพิจารณาจากเส้นสเปกตรัมโดยตรงดังเช่นที่แสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 อาจจะไม่เหมาะสม เพราะมีการซ้อนทับของตำแหน่งเลขคลื่นต่างๆของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด รูปที่ 4.5 ยืนยันการซ้อนทับกันของสเปกตรัมของแป้งมัน

สำปะหลังและยางธรรมชาติ รวมทั้งยืนยันการไม่เห็นลักษณะเฉพาะของยางธรรมชาติในพอลิเมอร์ผสมทั้งก่อนทำการสกัดและหลังการสกัดเอายางธรรมชาติบางส่วนออกไป



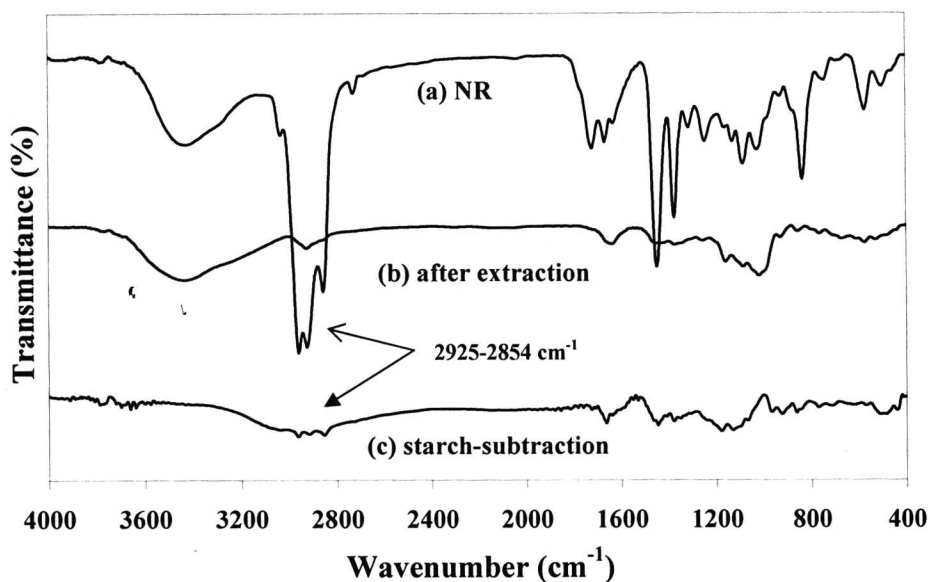
รูปที่ 4.4 FTIR สเปกตรัมพอลิเมอร์ผสมหลังทำ Soxhlet extraction ที่อัตราส่วนแป้งดิบต่อยางธรรมชาติเท่ากับ 80/20 อุณหภูมิ 50°C เวลา 2 h และ PPS 0.5 pph ที่อุณหภูมิ 40°C, 50°C และ 60°C



รูปที่ 4.5 FTIR สเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลัง ยางธรรมชาติ และพอลิเมอร์ผสมก่อนทำ Soxhlet extraction และพอลิเมอร์ผสมหลังทำ Soxhlet extraction ที่อัตราส่วนแป้งดิบต่อยางธรรมชาติเท่ากับ 80/20 อุณหภูมิ 50°C เวลา 2 h และ PPS 0.5 pph

การแปรผล FTIR อีกวิธีหนึ่งคือ การนำเส้นสเปกตรัมมาหักลบกัน (substraction) ถ้าหากพอลิเมอร์ผสมยังคงมียางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบรวม เมื่อนำสเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังไปหักลบออกจากสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมที่ทำการสกัดเอายางธรรมชาติที่ไม่เกิดการกราฟท์กับแป้งออกไปแล้ว จะปรากฏพีคของยางธรรมชาติที่ซ้อนทับกับ

พิกของแป้งมันสำปะหลัง เทคนิคนี้ประสบความสำเร็จในการตรวจสอบยางธรรมชาติในพอลิเมอร์ผสมที่ทำการ Soxhlet extraction ดังแสดงในรูปที่ 4.6 สเปกตรัม c เป็นผลลัพธ์จากการนำสเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังหักลบออกจากสเปกตรัมของเส้น b จะเห็นว่าสเปกตรัม c แสดงพิกที่ตำแหน่ง 2926, 2925 และ 2854 cm^{-1} ซึ่งเป็นพิกที่สำคัญและเด่นชัดมากของยางธรรมชาติ ด้วยเทคนิคนี้แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมมีกราฟที่โคพอลิเมอร์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังและยางธรรมชาติเกิดขึ้น ข้อสรุปนี้จะยืนยันอีกครั้งโดยการตรวจสอบด้วยเทคนิค NMR ต่อไป ถึงแม้ว่าเทคนิค FTIR นี้มีข้อดีด้านการเตรียมตัวอย่างที่ไม่ยุ่งยาก แต่ผลการทดลองไม่เด่นชัดเท่าที่ควรสำหรับการวิจัย ดังนั้นการตรวจสอบการเกิดกราฟที่โคพอลิเมอร์ในโฟมจะไม่ใช้เทคนิค FTIR



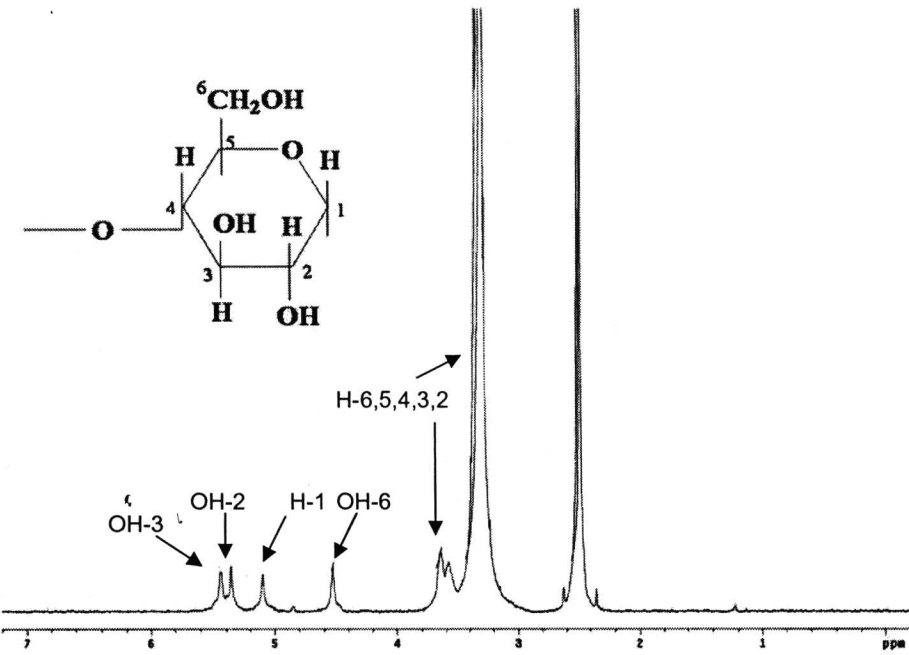
รูปที่ 4.6 FTIR สเปกตรัมของยางธรรมชาติ พอลิเมอร์ผสมก่อนทำ Soxhlet extraction และ พอลิเมอร์ผสมหลังทำ Soxhlet extraction และลบสเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลัง ที่อัตราส่วนแป้งดิบต่อยางธรรมชาติเท่ากับ 80/20 อุณหภูมิ 50°C เวลา 2 h และ PPS 0.5 pph

4.3 ผลการตรวจสอบกราฟที่โคพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโกปี

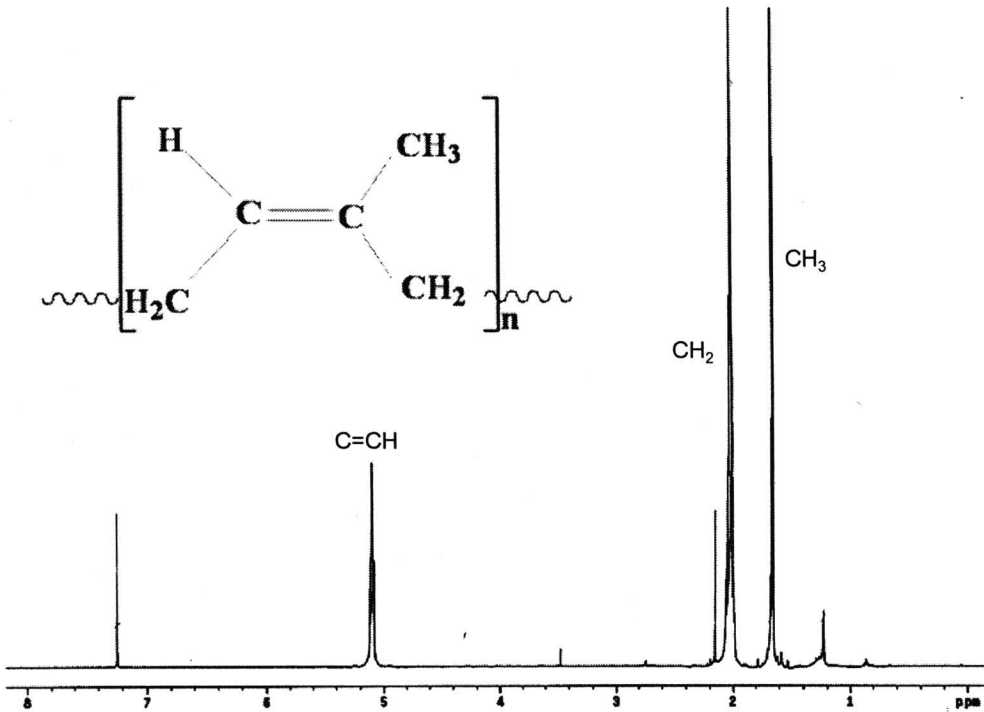
$^1\text{H-NMR}$ สเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังที่ละลายใน DMSO-d_6 และยางธรรมชาติที่ละลายใน CDCl_3 แสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ กลุ่มสัญญาณของแป้งมันสำปะหลังและยางธรรมชาติแสดงในตารางที่ 4.8 มีการซ้อนทับกันที่ตำแหน่ง δ 5.10 ppm ของแป้งมันสำปะหลังและยางธรรมชาติ แต่สัญญาณที่ตำแหน่งนี้เป็นลักษณะเด่นของยางธรรมชาติ และยังมีสัญญาณที่ตำแหน่งอื่นๆ อีกหลายตำแหน่งของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ซ้อนทับกับยางธรรมชาติ ดังนั้น การซ้อนทับที่ตำแหน่งนี้จึงไม่เป็นปัญหาในการวิเคราะห์

รูปที่ 4.9 แสดง $^1\text{H-NMR}$ สเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมหลังทำ Soxhlet extraction แล้วและละลายในตัวทำละลายของแป้ง (DMSO-d_6) จะเห็นว่ามีลักษณะเหมือนกับรูปที่ 4.7 นั่นคือแป้งมันสำปะหลัง ส่วนรูปที่ 4.10 เป็นสเปกตรัมจากตัวอย่างเดียวกันที่ละลายในตัวทำละลายของยางธรรมชาติ (CDCl_3) ซึ่งสเปกตรัมเส้นนี้ถึงแม้จะมีลักษณะคล้ายกับรูปที่ 4.7 คือมีสัญญาณที่ตำแหน่ง 1.60 ppm และ 2.18 ppm แต่ไม่ใช่ลักษณะของยางธรรมชาติเนื่องจากไม่ปรากฏพิกที่ตำแหน่ง 5.10 ppm โดยที่ตัวอย่างนี้เป็นพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้เติม PPS ดังนั้น ถ้าหากมียางธรรมชาติผสมอยู่ด้วย จะต้องปรากฏพิกที่ตำแหน่ง 5.10 ppm เพราะการเกิดกราฟที่โคพอลิเมอร์นั้น ไม่ได้เกิดบนพันธะคู่ทุกพันธะใน

โมเลกุลของยาง ผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4.10 ยืนยันว่าการทำ Soxhlet extraction ในโครงการวิจัยนี้สามารถสกัดยางธรรมชาติที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกไปได้หมดอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 4.7 $^1\text{H-NMR}$ สเปกตรัม ของแป้งมันสำปะหลังละลายใน DMSO-d_6



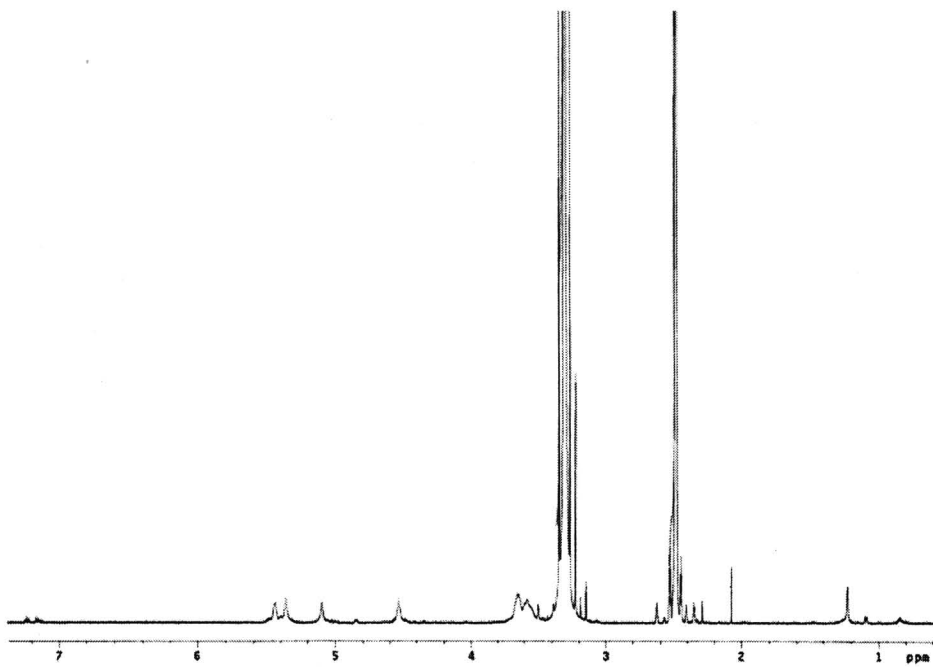
รูปที่ 4.8 $^1\text{H-NMR}$ สเปกตรัม ของยางธรรมชาติละลายใน CDCl_3

ตารางที่ 4.8 ¹H-NMR Assignment ของแป้งมันสำปะหลังและยางธรรมชาติวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ¹H-NMR

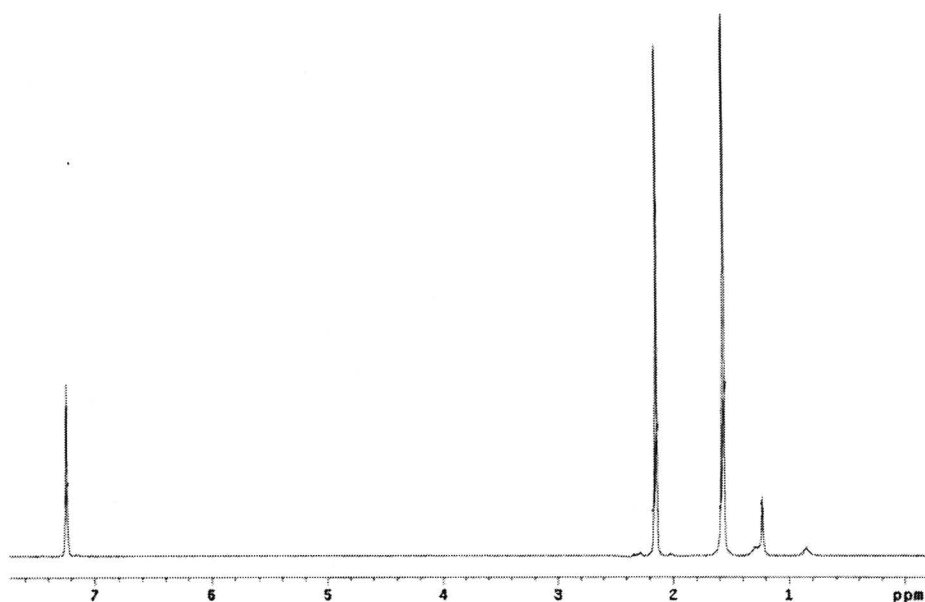
Sample	Solvent	¹ H Assignment	Chemical shift (ppm)
Cassava starch (Chi <i>et al.</i> , 2008a)	DMSO-d ₆	H-1	5.10
		H-6 ^a ,5,4,3,2	3.65-3.30
		H-4 (end group)	3.07
		H-6 ^b	3.46
		OH-2	5.36
		OH-3	5.44
		OH-6	4.53
Natural rubber (Oliverira <i>et al.</i> , 2005)	CDCl ₃	C=CH	5.10
		CH ₂	2.01
		CH ₃	1.65

^a : H-6,6' (1-4 linkage)

^b : H-6,6' (1-6 linkage)

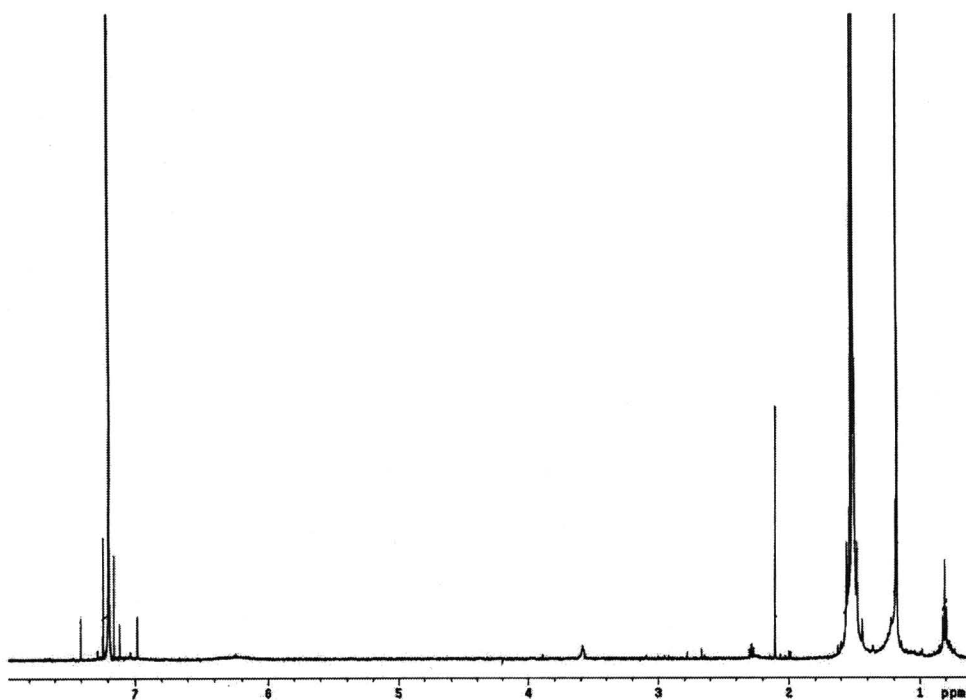


รูปที่ 4.9 ¹H-NMR สเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติม PPS หลังการทำ Soxhlet extraction โดยใช้ DMSO-d₆ เป็นตัวทำละลาย ที่อัตราส่วนแบ่งดิบต่อยางธรรมชาติเท่ากับ 80/20 อุณหภูมิ 50°C และเวลา 2 h



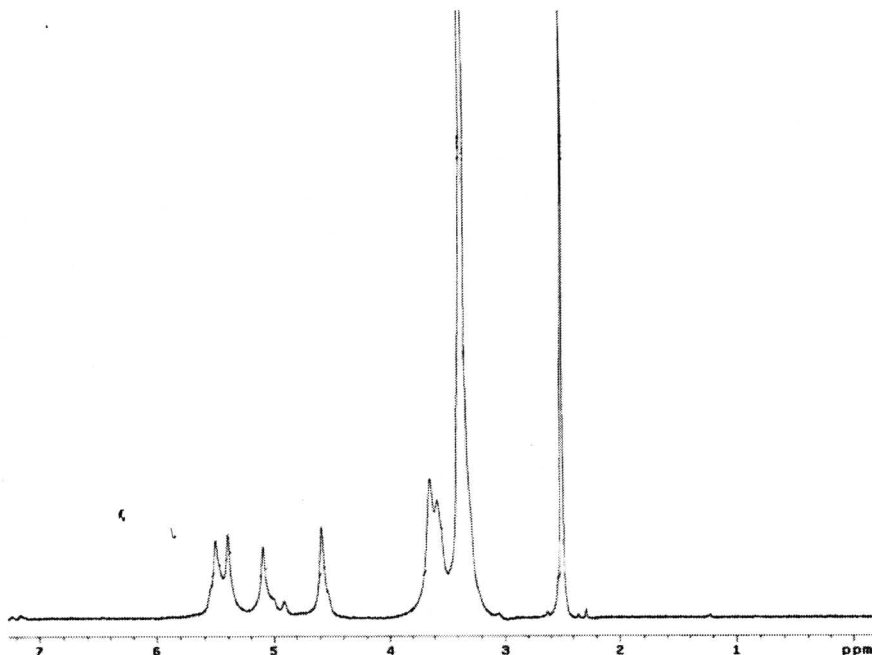
รูปที่ 4.10 $^1\text{H-NMR}$ สเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติม PPS หลังการทำ Soxhlet extraction โดยใช้ CDCl_3 เป็นตัวทำละลาย ที่อัตราส่วนแบ่งดิบต่ออย่างธรรมชาติเท่ากับ 80/20 อุณหภูมิ 50°C และเวลา 2 h

ทำการตรวจสอบลักษณะ $^1\text{H-NMR}$ สเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังที่ผสมกับ CDCl_3 อีกครั้ง โดยเตรียมตัวอย่างดังนี้ ผสมแป้งกับ CDCl_3 ทิ้งไว้เป็นเวลา 12 h กรองแป้งออกโดยการไหลผ่านสำลี ได้ของเหลวใส นำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.11 พบว่ามีลักษณะเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.10

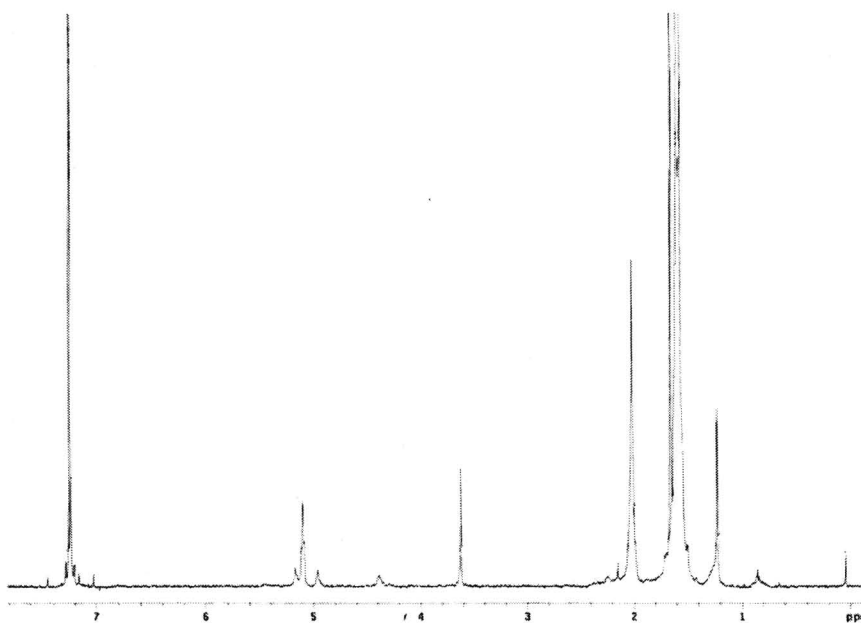


รูปที่ 4.11 $^1\text{H-NMR}$ สเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลัง ใช้ CDCl_3 เป็นตัวทำละลาย

นำพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม PPS และทำการสกัดเอาอย่างธรรมชาติที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกไป ละลายใน DMSO- d_6 และ $CDCl_3$ ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.12 และ 4.13



รูปที่ 4.12 1H -NMR สเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมที่เติม PPS หลังการทำ Soxhlet extraction โดยใช้ DMSO- d_6 เป็นตัวทำละลาย ที่อัตราส่วนแบ่งดิบต่ออย่างธรรมชาติเท่ากับ 80/20 อุณหภูมิ $50^\circ C$ เวลา 2 h และ PPS เท่ากับ 0.5 pph



รูปที่ 4.13 1H -NMR สเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมที่เติม PPS หลังการทำ Soxhlet extraction โดยใช้ $CDCl_3$ เป็นตัวทำละลาย ที่อัตราส่วนแบ่งดิบต่ออย่างธรรมชาติเท่ากับ 80/20 อุณหภูมิ $50^\circ C$ เวลา 2 h และ PPS เท่ากับ 0.5 pph

สเปกตรัมในรูปที่ 4.12 มีลักษณะเหมือนกับสเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังในรูปที่ 4.7 ทุกประการ ส่วนสเปกตรัมในรูปที่ 4.13 แสดงสัญญาณของยางธรรมชาติทั้งสามตำแหน่ง จึงสรุปได้ว่ามีกราฟที่โคพอลิเมอร์เกิดขึ้นจริงในการทำปฏิกิริยาสังเคราะห์ที่ผ่านมา ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ¹H-NMR สนับสนุนผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR

โครงการวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์กราฟที่โคพอลิเมอร์ ระหว่างแป้งมันสำปะหลังและน้ำยางธรรมชาติ ตามทฤษฎี การเกิดกราฟที่โคพอลิเมอร์ผสมจะเกิดที่ผิวหน้าของพอลิเมอร์ และปริมาณการเกิดจะไม่มากนัก เนื่องจากว่ามีข้อจำกัดหลายประการในการนำส่วนที่สังเคราะห์นี้ไปใช้งาน จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบปริมาณการเกิดกราฟที่โคพอลิเมอร์ ส่วนผสมของแป้งและน้ำยางธรรมชาติที่แขวนลอยอยู่ในน้ำหลังการผสม จะเกิดการตกตะกอนเมื่อวางทิ้งไว้ข้ามคืน การเตรียมพอลิเมอร์ผสมต้องเจือจางด้วยน้ำเป็นจำนวนมาก ทำให้ไม่สามารถนำพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการสังเคราะห์มาใช้ในการขึ้นรูปเป็นโฟมโดยตรง ถ้าไม่มีการกำจัดน้ำออกไป นอกจากนี้เมื่อทำการเติมแป้งลงไปในพอลิเมอร์ผสมหลังสังเคราะห์จะทำให้เกิดการจับตัวกันเป็นก้อน ระหว่างพอลิเมอร์ผสมและแป้งมันสำปะหลังที่เติมลงไป ไม่สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นโฟมได้เพราะมีการแยกเฟสระหว่างน้ำและของแข็ง แต่สันนิษฐานว่าน่าจะมีการเกิดกราฟที่โคพอลิเมอร์ในระหว่างการขึ้นรูปโฟมแป้งมันสำปะหลังที่ผสมน้ำยางธรรมชาติ ที่เรียกว่า *in situ graft copolymer* ซึ่งจะกล่าวในภายหลัง

4.4 อิทธิพลของอุณหภูมิ เวลา และความดันที่ใช้ในการขึ้นรูปโฟมแป้ง

การทดลองชุดนี้เป็นการทดลอง เพื่อต้องการหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปโฟมแป้ง โดยแปรอุณหภูมิตั้งแต่ 170-200°C เวลาตั้งแต่ 3-5 min และความดัน 0, 500, 1000, 1500 และ 2000 psi (0, 3.44, 6.89, 10.34, และ 13.78 MPa) ส่วนผสมที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 4.1 และลักษณะของโฟมที่เตรียมได้บรรยายในตารางที่ 4.9

การที่ผิวหน้าของโฟมมีความขรุขระ เนื่องจากผลของแว็กซ์ (wax) ที่ทาลงบนแม่แบบเพื่อใช้เป็นสารป้องกันการติดแม่แบบ เมื่อลดปริมาณของแว็กซ์ที่ทาลงบนแม่แบบให้น้อยลงทำให้โฟมที่ได้มีผิวหน้าที่เรียบมากขึ้น โฟมแป้งที่ใช้ความดัน 500 psi และ 1000 psi มีลักษณะเหมือนกัน และมีความหนาใกล้เคียงกันมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับโฟมแป้งที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยความดันอื่นๆ ส่วนโฟมที่ใช้ความดันในการขึ้นรูปเท่ากับ 0-2000 psi มีลักษณะไม่เหมาะสมต่อการนำไปเป็นชั้นทดสอบ เพราะว่าที่ความดัน 0 psi โฟมมีลักษณะโค้งงอและเสียรูป ที่ความดัน 1500 psi ได้โฟมที่มีผิวหน้าไม่เรียบและแผ่นโฟมแต่ละแผ่นที่สภาวะการทดลองเดียวกันมีความหนาไม่เท่ากัน ที่ความดัน 2000 psi ได้โฟมมีสีคล้ำกว่าที่ความดันอื่นๆ และโฟมแต่ละแผ่นมีความหนาไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงเลือกโฟมแป้งที่ขึ้นรูปด้วยความดันเท่ากับ 500 psi และ 1000 psi เพื่อนำไปทดสอบหาค่าความหนาแน่นและสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้ง ผลของความหนาแน่นและสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.9 ลักษณะของโฟมแป้งที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ เวลา และความดันแตกต่างกัน

Baking temperature (°C)	Baking time (min)	Baking pressure (psi)	Apparence
170	3	1000	โฟมที่ได้แข็งเปราะ บิดเบี้ยว โค้งงอ เสียรูป บางส่วนของแผ่นโฟมหลุดตัว ความหนาของแผ่นโฟมที่ได้ไม่สม่ำเสมอ ไม่เหมาะสมจะนำมาทำเป็นชั้นทดสอบ

	4 และ 5	1000	โฟมที่ได้แข็งเปราะ ไม่โค้งงอ มีความหนาเสมอทั่วทั้งแผ่น ผิวหน้าบางจุดขรุขระ สึกต่ำกว่าที่ 500 psi สีของโฟมที่ได้คล้ำขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการอบ แผ่นโฟมที่ได้สามารถเตรียมเป็นชั้นทดสอบได้
	4	0	โฟมที่ได้แข็งเปราะ บิดเบี้ยว โค้งงอ เสียรูป บางส่วนของแผ่นโฟมหดตัว ความหนาของแผ่นโฟมที่ได้ไม่สม่ำเสมอ ผิวหน้าไม่เรียบ (ขรุขระ) ไม่สามารถเตรียมเป็นชั้นทดสอบได้
		500	โฟมที่ได้แข็งเปราะ โค้งงอ เสียรูป ความหนาไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น บางจุดมีผิวหน้าไม่เรียบเสมอกัน ไม่สามารถเตรียมเป็นชั้นทดสอบได้
		1500	โฟมที่ได้แข็งเปราะ โฟมไม่โค้งงอ มีความหนาสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น โฟมแต่ละแผ่นมีความหนาแตกต่างกันเล็กน้อย และผิวหน้าของโฟมบางจุดไม่สม่ำเสมอ (ขรุขระเล็กน้อย) สีของโฟมคล้ำกว่าที่ 500 psi ที่เวลาเดียวกัน แผ่นโฟมสามารถเตรียมเป็นชั้นทดสอบได้
		2000	โฟมที่ได้แข็งเปราะ ความหนาสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น ผิวหน้าเรียบน้อยกว่า สึกต่ำกว่า และบางกว่าที่ 1000 psi ไม่เหมาะสมที่นำมาทำเป็นชั้นทดสอบ
	5	500	โฟมที่ได้แข็งเปราะ มีความหนาสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น บางแผ่นผิวหน้าไม่ค่อยเรียบเสมอกัน (ขรุขระ) สึกต่ำกว่าที่ 4 min ที่ความดันเดียวกัน แผ่นโฟมที่ได้สามารถเตรียมเป็นชั้นทดสอบได้
180	3	1000	โฟมที่ได้แข็งเปราะ โค้งงอเล็กน้อย ความหนาของแผ่นโฟมไม่สม่ำเสมอเป็นบางจุด ผิวหน้าไม่เรียบเป็นบางจุด (ขรุขระ) แผ่นโฟมที่ได้มีลักษณะที่ไม่เหมาะสมจะนำมาทำเป็นชั้นทดสอบ
	4 และ 5	500	โฟมที่ได้แข็งเปราะ ความหนาสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น แต่บางจุดผิวหน้าไม่เรียบ (เล็กน้อยมาก) สีของโฟมคล้ำขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการอบ แผ่นโฟมที่ได้สามารถเตรียมเป็นชั้นทดสอบได้
	4 และ 5	1000	โฟมที่ได้แข็งเปราะ ความหนาสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น บางจุดผิวหน้าไม่เรียบ (ขรุขระเล็กน้อย) สึกต่ำกว่าที่ 500 psi ที่เวลาเท่ากัน สีของโฟมที่ได้คล้ำขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการอบ แผ่นโฟมที่ได้สามารถเตรียมเป็นชั้นทดสอบได้
190	3, 4 และ 5	1000	โฟมที่ได้ แข็งเปราะ มีความหนาสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น ผิวหน้าบางส่วน ไม่ค่อยเรียบเสมอกัน (ขรุขระเล็กน้อย) สึกต่ำกว่าแผ่นโฟมที่ขึ้นรูปที่ 180°C สีของโฟมที่ได้คล้ำขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการอบ แผ่นโฟมที่ได้สามารถเตรียมเป็นชั้นทดสอบได้
200	3, 4 และ 5	1000	โฟมที่ได้แข็งเปราะ แผ่นโฟมมีความหนาไม่สม่ำเสมอเป็นบางจุด และผิวหน้าไม่เรียบ สีของโฟมที่ได้คล้ำกว่าทุกอุณหภูมิที่กล่าวมา แผ่นโฟมที่ได้สามารถเตรียมเป็นชั้นทดสอบได้

ค่าความหนาแน่นของโฟมแป้งมีค่าใกล้เคียงกัน และที่อุณหภูมิ 180°C แสดงความแตกต่างความหนาแน่น



มากกว่าที่อุณหภูมิอื่น ส่วนค่ามอดุลัส (flexural modulus, E) ค่าความเค้นสูงสุด (maximum stress, σ_{max}) และค่าความเครียด ณ ความเค้นสูงสุด (ϵ_{max}) ของโฟมแข็งที่ขึ้นรูปในสภาวะต่างๆนี้ มีค่าใกล้เคียงกันเช่นกัน โฟมแข็งที่ได้มีลักษณะแข็งเปราะและไม่มีจุดคราก แต่เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพที่สังเกตได้ พบว่าอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อตัวอย่างโฟมที่เตรียมได้ เพราะโฟมมีความแตกต่างอย่างชัดเจนคือ การขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 200°C โฟมแข็งมีสีคล้ำมากที่สุดจึงจะไม่ใช้อุณหภูมินี้ต่อไป ส่วนที่อุณหภูมิ 190°C โฟมมีสีคล้ำกว่าที่ 180°C และเมื่อพิจารณาโฟมแข็งที่อุณหภูมิ 170°C พบว่าเกิดการบิดเบี้ยวและโค้งงอเมื่อนำโฟมออกจากแม่แบบ ไม่เหมาะสำหรับการเตรียมเป็นชิ้นทดสอบ ดังนั้นจึงเลือกใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปโฟมแข็งเท่ากับ 180°C สำหรับการทดลองตั้งแต่นี้ต่อไป แต่ยังคงทำการแปรปริมาณเวลาที่ใช้ในการอบเท่ากับ 4 min และ 5 min และความดันเท่ากับ 500 psi และ 1000 psi

ตารางที่ 4.10 ความหนาแน่นและสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแข็ง ที่สภาวะในการขึ้นรูปต่างๆกัน ภายใต้ 40 %RH และระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน

T(°C)/ t(min)/ P(psi)	Density (g/cm ³)	E (MPa)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{max} (%)
170/4/500	0.1634 ± 0.0102	114 ± 26	1.52 ± 0.27	1.03 ± 0.30
170/5/500	0.1598 ± 0.0191	165 ± 19	1.74 ± 0.32	1.22 ± 0.25
170/4/1000	0.1648 ± 0.0067	132 ± 7	1.30 ± 0.24	1.71 ± 0.22
170/4/1000	0.1651 ± 0.0143	144 ± 19	1.20 ± 0.43	1.42 ± 0.26
180/4/500	0.1323 ± 0.0134	103 ± 25	0.95 ± 0.23	1.37 ± 0.18
180/5/500	0.2067 ± 0.0189	143 ± 24	1.73 ± 0.31	1.63 ± 0.30
180/4/1000	0.1571 ± 0.0031	207 ± 67	2.00 ± 0.37	1.16 ± 0.35
180/5/1000	0.1434 ± 0.0259	180 ± 69	1.68 ± 0.48	1.32 ± 0.40
190/3/500	0.1697 ± 0.0175	114 ± 41	1.08 ± 0.23	1.36 ± 0.41
190/4/1000	0.1841 ± 0.0198	208 ± 54	1.92 ± 0.51	1.28 ± 0.41
190/5/1000	0.1699 ± 0.0108	164 ± 25	2.00 ± 0.42	1.75 ± 0.33

T(°C)/ t(min)/ P(psi) = เวลา/อุณหภูมิ/ความดัน

4.5 อิทธิพลของกลีเซอรอลต่อความหนาแน่นและสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแข็ง

ศึกษาอิทธิพลของกลีเซอรอลต่อการเตรียมและสมบัติเชิงกลของโฟมแข็ง โดยแปรปริมาณกลีเซอรอลตั้งแต่ 0-20 pph (ส่วนต่อ 100 ส่วนของแข็งโดยน้ำหนัก) และใช้สารฟู คือ โซเดียมไบคาร์บอเนตเท่ากับ 0.1 pph ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 4 min และ 5 min ภายใต้ความดัน 500 psi และ 1000 psi จากการทดลองพบว่าโฟมแข็งที่ไม่เติมกลีเซอรอล (0 pph) ในทุกสภาวะการขึ้นรูปหลังนำโฟมออกจากแม่แบบ ผิวหน้าของโฟมมีรอยแตกเกิดขึ้นเนื่องจากโดยธรรมชาติของแข็งที่มีสมบัติแข็งเปราะ น้ำที่เติมลงไปในช่วงขั้นตอนการเตรียมโฟมไม่สามารถทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ได้ เพราะการทดลองใช้อุณหภูมิสูงในการทำเป็นโฟม ทำให้น้ำระเหยออกไปอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับความร้อนในการทำให้เกิดโฟม จึงส่งผลให้โฟมมีความเปราะและเกิดรอยแตกที่ผิวหน้าดังกล่าวเกิดขึ้น โฟมที่ไม่เติมกลีเซอรอลไม่สามารถนำมาเตรียมเป็นชิ้นทดสอบได้ มีการใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ของแข็งอยู่ทั่วไป และปริมาณกลีเซอรอลมีผลต่อการขึ้นรูปและสมบัติเชิงกลของแข็งด้วยเช่นกัน การเติมกลีเซอรอลช่วยให้แกะโฟมออก

จากแม่แบบได้ง่าย ผิวหน้าของดโฟมไม่มีรอยแตก การเติมกลีเซอรอลปริมาณ 15 pph และ 20 pph ทำให้โฟมเสีรูปหลังสัมผัสกับความชื้นที่สภาวะบรรยากาศปกติ แผ่นโฟมมีลักษณะบิดเบี้ยว โค้งงอ และโพรงอากาศภายในโฟมแบ่งยุบตัว ไม่สามารถเตรียมโฟมแบ่งดังกล่าวเป็นชั้นทดสอบได้ เนื่องจากกลีเซอรอลเป็นสารชอบน้ำ การเติมในปริมาณมากเกินไปจะทำให้โฟมดูดความชื้นในอากาศได้มากขึ้น ซึ่งแบ่งก็เป็นพอลิเมอร์ที่ดูดความชื้นในอากาศได้ดีเช่นเดียวกัน โดยทั่วไปการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรนียมเติมกลีเซอรอลประมาณ 15 pph ขึ้นไป แต่เนื่องจากโครงการวิจัยนี้ทำการเตรียมแผ่นโฟม การที่ผนังเซลล์ของโครงสร้างโฟมไม่แข็งแรง ยุบตัวง่าย ถึงแม้จะได้เทอร์โมพลาสติกสตาโรนียที่เหนียวขึ้นก็ตาม ไม่มีความเหมาะสมในการทำเป็นโฟมกันกระแทก เมื่อลดปริมาณกลีเซอรอลเป็น 5 pph และ 10 pph จะได้แผ่นโฟมที่มีความแข็งแรงมากขึ้น ยังคงลักษณะความเป็นโฟมอยู่ ดังนั้นจึงเลือกโฟมแบ่งที่มีปริมาณกลีเซอรอลเท่ากับ 5 pph และ 10 pph ทดสอบหาค่าความหนาแน่นและสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้ง ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 อิทธิพลของปริมาณกลีเซอรอลต่อความหนาแน่นและสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแบ่ง ที่เก็บไว้ 7 วัน ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 40%

Glycerol content (pph)	Baking time (min)	Baking pressure (psi)	Density (g/cm ³)	E (MPa)	σ _{max} (MPa)	ε _{max} (%)
5	4	1000	0.1961 ± 0.0349	149 ± 28	1.99 ± 0.53	1.68 ± 0.47
	5	500	0.1958 ± 0.0058	154 ± 27	2.74 ± 0.61	2.58 ± 0.24
		1000	0.1777 ± 0.0134	155 ± 28	2.35 ± 0.47	2.15 ± 0.52
10	4	1000	0.1364 ± 0.0190	135 ± 31	1.88 ± 0.43	1.89 ± 0.40
	5	500	0.1417 ± 0.0111	119 ± 12	1.66 ± 0.28	2.05 ± 0.47
		1000	0.1314 ± 0.0136	115 ± 16	1.74 ± 0.21	2.07 ± 0.43

เมื่อเติมกลีเซอรอลปริมาณ 5 pph ความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.1777-1.1961 g/cm³ มีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้เวลาในการอบนานขึ้นหรือใช้ความดันมากขึ้น แต่เมื่อใช้ปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นเป็น 10 pph ค่าความหนาแน่นลดลงอยู่ในช่วง 0.1313-0.1417 g/cm³ ผลของเวลาและความดันมีแนวโน้มเดียวกันกับที่ใช้ 5 pph การใช้เวลานานขึ้นหรือใช้ความดันเพิ่มขึ้นช่วยให้สารฟูแตกตัวได้ดีขึ้น เกิดเป็นโพรงอากาศได้มากขึ้นความหนาแน่นจึงลดลง การเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลทำให้แบ่งมีลักษณะยืดหยุ่นมากขึ้น เพราะกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ของแบ่งจึงทำให้แบ่งเกิดเป็นโฟมได้ง่ายขึ้นความหนาแน่นจึงลดลง ถึงแม้ว่าการเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลเป็น 10 pph จะทำให้ความหนาแน่นลดลง แต่ทำให้มอดูลัสแรงดัดโค้งและความเค้นสูงสุดของโฟมแบ่งมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน แบ่งและกลีเซอรอลมีหมู่ไฮดรอกซิลที่มีความสามารถในการดูดซับความชื้น ทำให้โฟมแบ่งดูดซับความชื้นในอากาศได้มากขึ้นเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น จากงานวิจัยที่ผ่านมา (Lourdin *et al.*, 1995) พบว่าเมื่อเติมกลีเซอรอลลงไปในแบ่งประมาณ 12 wt% ทำให้อุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน (T_g) และสมบัติเชิงกลบางประการของแบ่งลดลง แต่เมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นมากกว่า 12 wt% ทำให้เกิดการกระบวนการต้านพลาสติกไซเซชัน (antiplasticization) เพราะแบ่งและกลีเซอรอลเกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายเนื่องจากเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของแบ่ง ทำให้แบ่งเกิดการเคลื่อนไหวโมเลกุลได้ยากขึ้น นอกจากนี้เมื่อปริมาณของกลีเซอรอลเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความหนืดของแบ่งและส่วนผสมลดลง ส่งผลให้กระบวนการเกิดพลาสติกไซเซชันของแบ่งและกลีเซอรอลยากขึ้น เพราะแรงเฉือนที่ใช้ในการผสมลดลงทำให้ผสมเข้ากันได้ยากมากขึ้น (Ro'z *et al.*, 2006) ส่วนค่า E ของโฟมแบ่งที่มีกลีเซอรอล 5 pph มีค่าอยู่ในช่วง 149-155 MPa ในขณะที่โฟมแบ่งที่มีกลีเซอ-

รอล 10 pph จะมีค่า E อยู่ในช่วง 115-135 MPa แต่เนื่องจากปริมาณกลีเซอรอลที่ใช้มีปริมาณน้อย (5-10 pph) จึงทำให้โฟมแข็งมีลักษณะเปราะ ค่า σ_{max} และ ϵ_{max} ของตัวอย่างทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน แต่โฟมที่มีกลีเซอรอล 5 pph มีค่า σ_{max} สูงกว่าเล็กน้อย ดังนั้นจึงเลือกใช้กลีเซอรอล 5 pph ในการเตรียมโฟมแข็งสำหรับการทดลองดังต่อไปนี้

4.6 อิทธิพลของปริมาณสารฟูตอความหนาแน่นและสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแข็ง

ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารฟู โดยเลือกใช้สารฟูชนิดโซเดียมไบคาร์บอเนต (sodium bicarbonate, NaHCO_3) สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปเท่ากับ 180°C เป็นเวลา 4 min และ 5 min ภายใต้ความดัน 500 psi และ 1000 psi ปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนต ตั้งแต่ 0-0.5 pph และใช้กลีเซอรอลเท่ากับ 5 pph เนื่องจากยังไม่สามารถสรุปสภาวะการขึ้นรูปโฟมได้ จึงเลือกสภาวะการขึ้นรูปดังกล่าวข้างต้นในการศึกษาอิทธิพลของสารฟูชนิดโซเดียมไบคาร์บอเนตต่อความหนาแน่นและสมบัติเชิงกลของโฟมแข็ง โดยที่สารฟูชนิดนี้สามารถแตกตัวและปล่อยก๊าซออกมาได้ที่อุณหภูมิ 140°C ปริมาณก๊าซที่ปล่อยออกมาเท่ากับ 260 ml/g (สมศักดิ์, 2547)

ผลการทดลองการแปรปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนตแสดงในตารางที่ 4.12 พบว่าเมื่อขึ้นรูปที่ความดัน 1000 psi เป็นเวลา 4 min ความหนาแน่นของโฟมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของโฟมเมื่อเติมสารฟูอยู่ในช่วง $0.1628\text{--}0.1816\text{ g/cm}^3$ โฟมที่มีสารฟูมีความหนาแน่นสูงกว่าโฟมที่ไม่มีสารฟูเล็กน้อย แต่ยังคงถือว่ามีความหนาแน่นอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน เมื่อใช้เวลาในการขึ้นรูปเป็น 5 min ความหนาแน่นของโฟมกลับมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีสารฟูเพิ่มขึ้น และมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง $0.1754\text{--}0.1839\text{ g/cm}^3$ การเติมสารฟูทำให้ความหนาแน่นลดลง การขึ้นรูปโฟมที่ความดัน 500 psi เป็นเวลา 5 min ทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจาก 0.1582 g/cm^3 ไปเป็น $0.1961\text{--}0.2022\text{ g/cm}^3$ การที่ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อเติมสารฟู อาจเนื่องมาจากความดันที่ใช้ในการขึ้นรูปโฟมค่อนข้างน้อย (500 psi) ทำให้สารฟูชนิดนี้แตกตัวและปล่อยก๊าซได้น้อยจึงทำให้เกิดเป็นโฟมได้ยากกว่าการใช้ความดันสูง (1000 psi) การอัดที่เวลานานกว่า (5 min) อาจทำให้สารฟูมีเวลาปลดปล่อยก๊าซได้นานกว่าจึงทำให้เกิดเป็นโฟมได้ง่ายกว่า ส่งผลให้ความหนาแน่นลดลงเมื่อใช้เวลาในการอบที่สูงกว่า เมื่อพิจารณาสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้ง พบว่าโฟมมีลักษณะเปราะ ไม่มีจุดครากเหมือนกันทุกสภาวะการทดลอง สมบัติเชิงกลของโฟมมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่น โฟมที่มีความหนาแน่นสูงจะมีความแข็งแรงสูงกว่าโฟมที่มีความหนาแน่นต่ำ ถึงแม้ว่าความหนาแน่นของโฟมที่แสดงในตารางที่ 4.12 จะมีค่าแตกต่างกัน แต่จัดได้ว่ามีค่าอยู่ในช่วงเดียวกันหรือแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ค่าต่างๆของสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งแต่ละค่า (E , σ_{max} และ ϵ_{max}) ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อใช้สภาวะการขึ้นรูปต่างกันและมีปริมาณสารฟูต่างกัน แต่เป็นที่สังเกตว่าโฟมที่มีโซเดียมไบคาร์บอเนตปริมาณ 0.1 pph และขึ้นรูปที่ 1000 psi เป็นเวลา 5 min มีค่าความเค้นสูงสุด (σ_{max}) สูงที่สุด เนื่องจากความหนาแน่นและสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมเหล่านี้มีค่าใกล้เคียงกัน จึงใช้ลักษณะทางกายภาพของโฟมที่สังเกตได้เป็นเกณฑ์ประกอบการพิจารณา โฟมที่ไม่มีโซเดียมไบคาร์บอเนตจะมีลักษณะสีขาว โฟมจะมีสีคล้ำมากขึ้นเมื่อมีโซเดียมไบคาร์บอเนตมากขึ้น ดังนั้น การเตรียมโฟมสำหรับการทดลองต่อไป จะเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตปริมาณ 0.1 pph เพราะมีสีคล้ำขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น และการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตช่วยให้การเตรียมเป็นโฟมง่ายขึ้นและดีกว่าโฟมที่ไม่มีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต สภาวะการอบที่ความดัน 1000 psi เป็นเวลา 5 min ให้ค่าความเค้นสูงสุดและความเครียดมากที่สุด ดังนั้นจะเลือกใช้สภาวะการขึ้นรูปนี้สำหรับเตรียมโฟมในการทดลองต่อไป จากการทดลองการขึ้นรูปโฟมแข็งพบว่าเมื่อแข็งได้รับความชื้นจะทำให้โฟมแข็งมีความอ่อนแอและเสียรูป จึงทำการปรับปรุงข้อด้อยดังกล่าวของโฟมแข็ง โดยทำการเติมน้ำยารวมชาติลงไปผสมกับโฟมแข็งที่ได้ ส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมโฟมแข็งเพื่อผสมกับน้ำยารวมชาติแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 4.12 อิทธิพลของปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนตต่อความหนาแน่นและสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของ
โฟมแป้งที่เก็บไว้ 7 วัน ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 40%

Baking Pressure (psi)	Baking Time (min)	Sodium bicarbonate (pph)	Density (g/cm ³)	E (MPa)	σ _{max} (MPa)	ε _{max} (%)
1000	4	0	0.1501 ± 0.0131	112 ± 20	1.47 ± 0.42	2.66 ± 0.43
		0.1	0.1628 ± 0.0209	168 ± 30	2.00 ± 0.40	1.47 ± 0.30
		0.3	0.1999 ± 0.0485	191 ± 37	2.25 ± 0.59	1.69 ± 0.61
		0.5	0.1816 ± 0.0137	178 ± 42	1.93 ± 0.50	1.33 ± 0.36
	5	0	0.2069 ± 0.0377	179 ± 47	2.29 ± 0.91	1.92 ± 0.65
		0.1	0.1839 ± 0.0168	187 ± 35	3.05 ± 0.78	2.27 ± 0.50
		0.3	0.1719 ± 0.0145	181 ± 64	2.70 ± 0.75	1.60 ± 0.32
		0.5	0.1754 ± 0.0063	185 ± 42	2.70 ± 0.71	1.54 ± 0.58
500	5	0	0.1582 ± 0.0100	149 ± 27	2.36 ± 0.73	2.62 ± 1.27
		0.1	0.1961 ± 0.0222	200 ± 38	2.79 ± 0.62	1.69 ± 0.28
		0.3	0.1984 ± 0.0391	182 ± 38	2.66 ± 0.62	1.38 ± 0.46
		0.5	0.2022 ± 0.0189	163 ± 53	1.82 ± 0.63	1.83 ± 0.39

4.7 อิทธิพลของปริมาณยางธรรมชาติต่อความหนาแน่น สมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยาของโฟมแป้ง

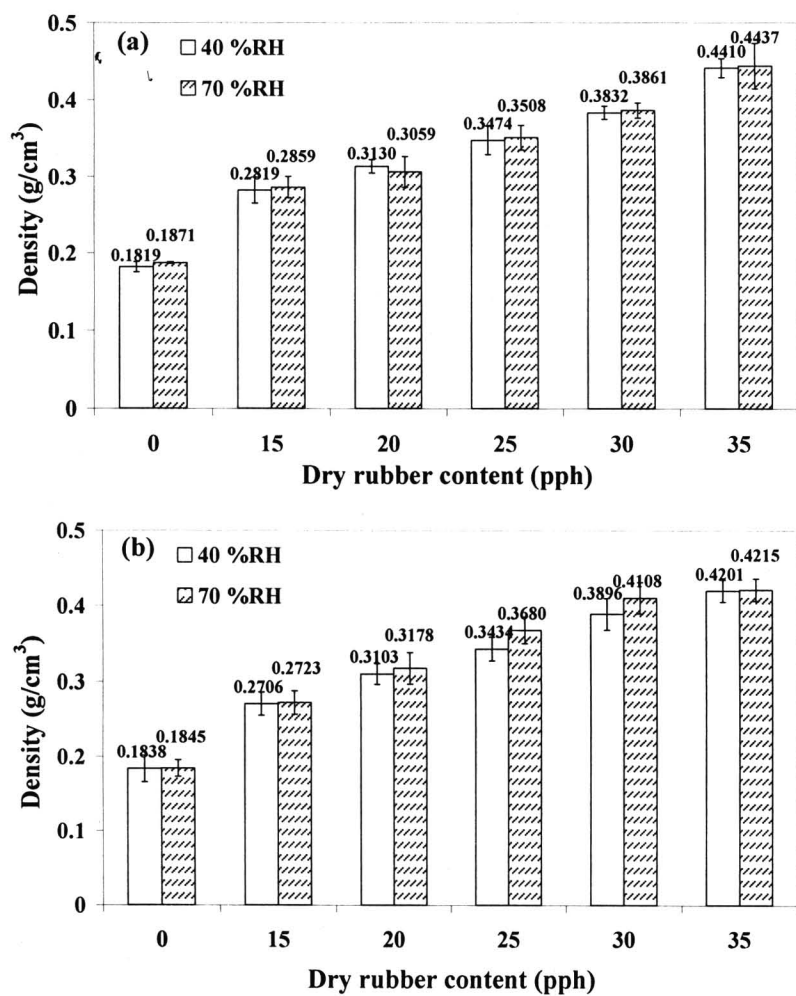
การทดลองชุดนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของปริมาณยางธรรมชาติ ที่มีต่อความหนาแน่นและสมบัติเชิงกลของโฟมผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลัง โดยแปรปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับ 0-35 pph (ส่วนต่อ 100 ส่วนของแป้งมันสำปะหลัง โดยน้ำหนัก) ตรวจสอบอิทธิพลของระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บ 2 วัน และ 7 วัน และตรวจสอบอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ที่ 40% และ 70% กำหนดเรียกความชื้นสัมพัทธ์ที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 40% ว่าความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ (low relative humidity) และความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงกว่า 40% เรียกว่าความชื้นสัมพัทธ์สูง (high relative humidity) เนื่องจากแป้งและกลีเซอรอลเป็นสารที่ชอบน้ำ ดังนั้น จึงทำการทดสอบภายใต้การเก็บไว้ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างกันและเก็บเป็นเวลาต่างกัน

กระบวนการกลายเป็นโฟมของแป้งและส่วนผสมที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ ในแม่แบบที่ร้อนมีขั้นตอนในการเกิดเป็นโฟมได้หลายขั้นตอนด้วยกันคือ การให้ความร้อนแก่แป้งและส่วนผสมด้วยอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิที่ทำให้แป้งเกิดเจล (gelatinization) เป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดเดือดของน้ำ หรืออุณหภูมิที่ทำให้สารฟูสลายให้ก๊าซได้ จากนั้นเมื่อแป้งเกิดเป็นเจลจะมีความหนืดเพิ่มขึ้น น้ำที่เป็นส่วนประกอบจะระเหยออกที่บริเวณขอบของแม่แบบ ทำให้แป้งกลายเป็นโพรงอากาศ เมื่อน้ำระเหยออกไปหมดโพรงอากาศดังกล่าวแห้งจึงได้เป็นลักษณะโฟมออกมา โฟมที่เพิ่งออกจากแม่แบบมีความชื้นประมาณ 2-4% (Shogren *et al.*, 1998a; Soykeabkaew *et al.*, 2004; Kiatkamjornwong *et al.*, 2001) เมื่อแป้งและส่วนผสมได้รับความร้อนแป้งมีความหนืดเพิ่มขึ้น ทำให้แป้งมีลักษณะการไหลเฉพาะตัว (rheological characteristic) แป้งที่หนืดจะมีความแข็งแรงอีลาสติก (elastic strength) ในระดับหนึ่งซึ่งเพียงพอต่อการทำให้เกิดการขยายตัวกลายเป็นโพรงอากาศเมื่อน้ำระเหยออกไป ซึ่งเมื่อโพรงอากาศหลายๆโพรงขยายตัวพร้อมกัน จะทำให้โพรงอากาศเชื่อมติดกันกลายเป็นลักษณะเซลล์ปิด (Shogren *et al.*, 1998a) และในการขึ้นรูปโฟมแป้งด้วยวิธีการอบนั้น ปริมาณส่วนผสมที่ใส่ลงไปในแม่แบบมีความสำคัญในการทำให้เกิดเป็นโฟม เพราะถ้าปริมาณส่วนผสมที่

ใส่ลงไปในแม่แบบน้อยเกินไป จะไม่สามารถขึ้นรูปให้กลายเป็นโฟมได้ เพราะมีความดันไม่เพียงพอ (Cinelli *et al.*, 2005; Lawton *et al.*, 1999; Lawton *et al.*, 2004) หรือถ้าหากส่วนผสมมากเกินไป จะมีส่วนที่ล้นออกมาขณะเกิดเป็นโฟมและกลายเป็นของเสีย

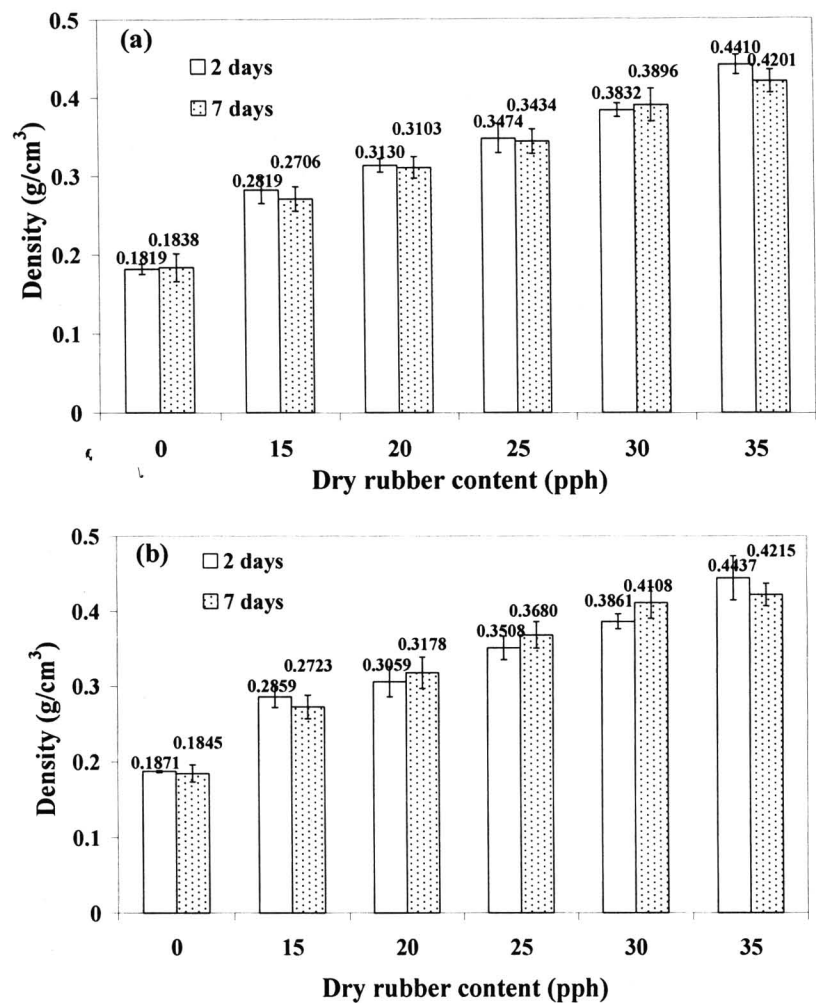
4.7.1 ผลการทดสอบความหนาแน่น

อิทธิพลของปริมาณยางธรรมชาติต่อความหนาแน่นของโฟมแบ่งแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าเมื่อปริมาณเนื้อยางแห้งเพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นทั้งในระยะเวลาที่เก็บ 2 วัน และ 7 วัน ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 40% และ 70% ระยะเวลาการเก็บและความชื้นสัมพัทธ์มีผลเล็กน้อยต่อความหนาแน่นของโฟม หรืออาจกล่าวได้ว่าไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความหนาแน่น การที่โฟมมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามปริมาณเนื้อยางแห้งนั้น อาจเกิดจากยางธรรมชาติเกิดเป็นโฟมได้น้อย ทำให้โฟมมีเนื้อแน่นมากขึ้น ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ด้วยการดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และจากการทดลองพบว่าเมื่อเติมยางธรรมชาติ จะต้องใช้ปริมาณวัสดุในการขึ้นรูปโฟมมากกว่าการไม่เติมยางธรรมชาติเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นโฟมที่ดี



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงอิทธิพลปริมาณยางธรรมชาติต่อความหนาแน่นของโฟมแบ่งเก็บภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH แบ่งระยะเวลาในการเก็บ: (a) 2 วัน และ (b) 7 วัน

รูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบความหนาแน่นที่เก็บไว้เป็นระยะเวลาต่างกันเพื่อสะดวกต่อการพิจารณาอิทธิพลของระยะเวลาในการเก็บภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์เดียวกัน จากการวิเคราะห์ทำให้สรุปได้ว่า ความหนาแน่นของโพลียูรีเทนมีค่าใกล้เคียงกันดังที่กล่าวมาแล้ว

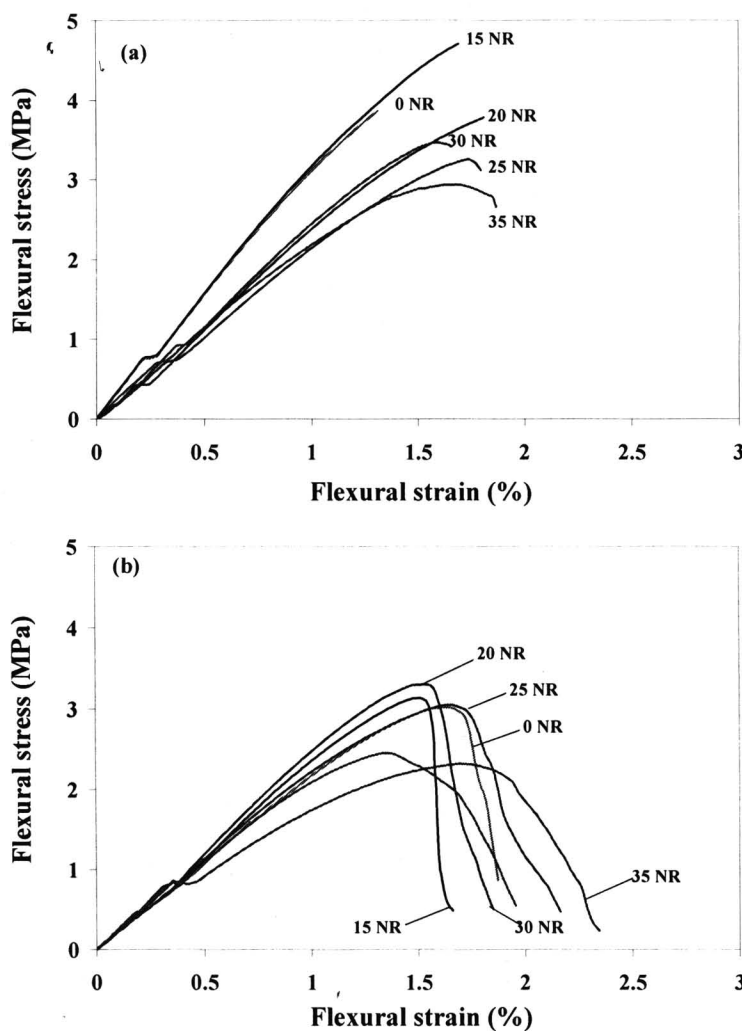


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงอิทธิพลปริมาณยางธรรมชาติต่อความหนาแน่นของโพลียูรีเทนที่เก็บไว้ 2 วัน และ 7 วัน แปร ความชื้นสัมพัทธ์ที่ใช้เก็บ: (a) 40 %RH และ (b) 70 %RH

4.7.2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดต่อแรงดัดโค้ง ของโพลียูรีเทนผสมยางธรรมชาติที่มีปริมาณยางธรรมชาติต่างกันและเก็บไว้เป็นเวลา 7 วัน ก่อนทำการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.16 ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 40% (รูปที่ 4.16a) โพลียูรีเทนแสดงลักษณะแตกหักแบบเปราะ (brittle fracture) การเติมยางธรรมชาติจนถึง 20 pph ไม่ได้เปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการแตกหัก โพลียูรีเทนยังมีลักษณะแบบเปราะ แต่เมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 25 pph เป็นต้นไป โพลียูรีเทนจะมีจุดคราก (yield point) ซึ่งบ่งบอกถึงการเริ่มเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมแบบเปราะเป็นแบบเหนียว (brittle-to-ductile transition) ส่วนรูปที่ 4.16b โพลียูรีเทนทุกชนิดจะแสดงจุดคราก แม้แต่โพลียูรีเทนเองก็มีลักษณะแตกหักที่เหนียวขึ้นเช่นกัน พื้นที่ใต้กราฟบ่งบอกถึงพลังงานที่ใช้ในการทำให้เกิดการแตกหัก แสดงว่าการเก็บตัวอย่างไว้ที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงจะช่วยให้โพลียูรีเทนเหนียว (tough) มากขึ้น ตารางที่ 4.13 และ 4.14 แสดงค่าสมบัติความทนต่อ

แรงดัดโค้งของโฟมแบ่งที่ผสมยางธรรมชาติในปริมาณต่างๆ เก็บภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำและสูง เป็นเวลา 2 วัน และ 7 วัน ตามลำดับ เป็นที่น่าสังเกตว่าการเติมยางธรรมชาติทำให้โฟมแบ่งมีค่ามอดุลัสแรงดัดโค้ง (E) เพิ่มขึ้นในทุกสภาวะ การทดลองและทุกตัวอย่างที่มีการเติมยางธรรมชาติ ทั้งๆที่ไม่มีการเติมสารวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ ค่าความเค้น ณ จุดสูงสุด (σ_{max}) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเติมยางธรรมชาติ ในทางกลับกันค่าความเครียด ณ จุดความเค้นสูงสุด (ϵ_{max}) และความเครียด ณ จุดขาด (ϵ_b) กลับมีค่าลดลงเมื่อเติมยางธรรมชาติ แต่เนื่องจากโฟมทุกตัวอย่างมีค่าความเครียด ณ จุดขาด ต่ำมาก (น้อยกว่า 3%) จึงยังจัดเป็นโฟมที่เปราะ สมบัติเชิงกลของโฟมขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของโฟม ซึ่งการพิจารณาเรื่องนี้ได้บรรยายไว้ใน manuscript ที่แนบไว้ในภาคผนวก อิทธิพลของปริมาณยางธรรมชาติต่อสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งยังไม่สามารถหาข้อสรุปได้ เพราะค่าต่างๆที่วัดได้ขึ้นอยู่กับแต่ละสมบัติและแต่ละสภาวะการทดลอง แต่มีแนวโน้มว่าที่ปริมาณยางธรรมชาติสูงๆจะมีสมบัติลดลง ความแตกต่างในสมบัติแต่ละสมบัติของโฟมต่างๆนี้มีค่าต่างกันเล็กน้อย ยกเว้นค่ามอดุลัสที่มีความแตกต่างมากกว่าสมบัติอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของค่า E และ σ_{max} เมื่อมีการเติมยางธรรมชาติ บ่งชี้ว่าแบ่งและน้ำยางธรรมชาติมีความเข้ากันได้ดีระดับหนึ่ง จึงสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับโฟมแบ่ง แต่ไม่ได้ช่วยปรับปรุงความสามารถในการยืด



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดต่อแรงดัดโค้งของโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติ ปริมาณ 0-35 pph เก็บไว้ 7 วัน ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ต่างกัน: (a) 40 %RH และ (b) 70 %RH

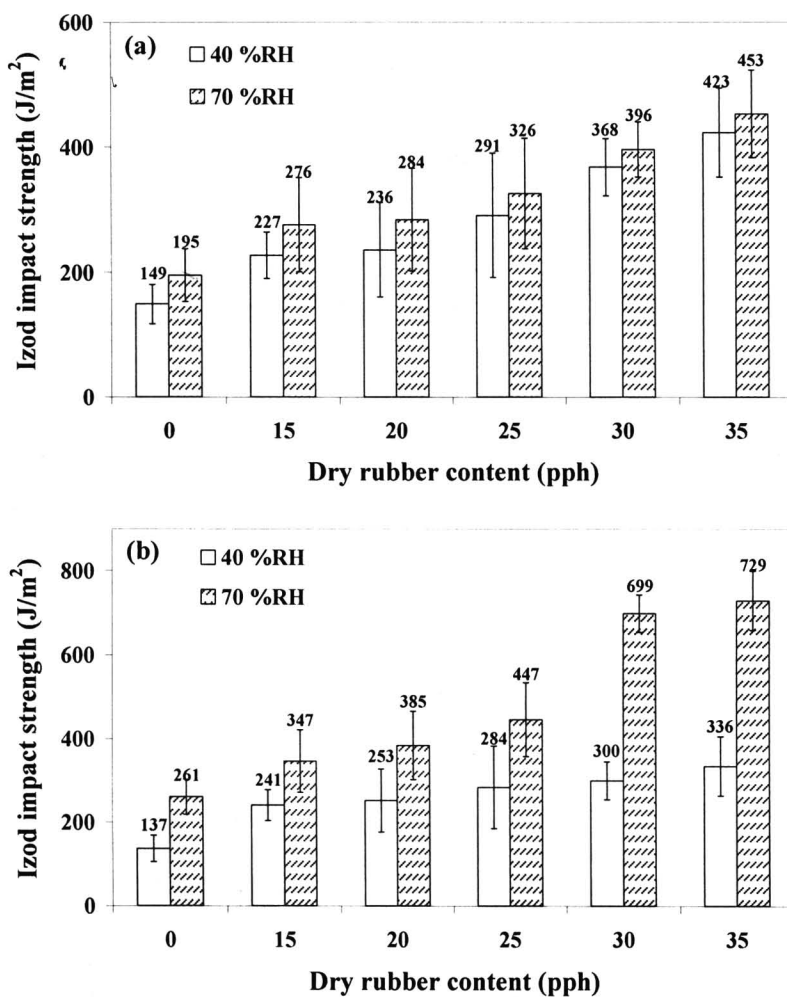
ตารางที่ 4.13 อิทธิพลของปริมาณยางธรรมชาติต่อสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแข็งที่เก็บไว้ 2 วัน ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 40% และ 70%

Relative humidity (%)	Dry rubber content (pph)	E (MPa)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\epsilon_{\max}$ (%)	ϵ_b (%)
40	0	199 ± 19	2.89 ± 0.70	2.12 ± 0.42	2.12 ± 0.32
	15	321 ± 45	3.80 ± 0.35	1.43 ± 0.28	1.47 ± 0.28
	20	322 ± 53	3.81 ± 0.58	1.38 ± 0.14	1.36 ± 0.18
	25	241 ± 54	2.50 ± 0.64	1.22 ± 0.21	1.25 ± 0.21
	30	302 ± 25	4.15 ± 0.28	1.80 ± 0.12	1.93 ± 0.10
	35	244 ± 23	3.51 ± 0.23	1.96 ± 0.23	1.96 ± 0.20
70	0	156 ± 19	2.37 ± 0.34	2.28 ± 0.20	2.29 ± 0.19
	15	272 ± 51	3.43 ± 0.73	1.56 ± 0.19	1.60 ± 0.20
	20	288 ± 41	3.83 ± 0.46	1.64 ± 0.13	1.65 ± 0.11
	25	233 ± 24	2.79 ± 0.58	1.57 ± 0.28	1.62 ± 0.24
	30	252 ± 26	2.93 ± 0.41	1.53 ± 0.16	2.72 ± 0.39
	35	172 ± 14	2.28 ± 0.38	2.51 ± 0.43	2.77 ± 0.44

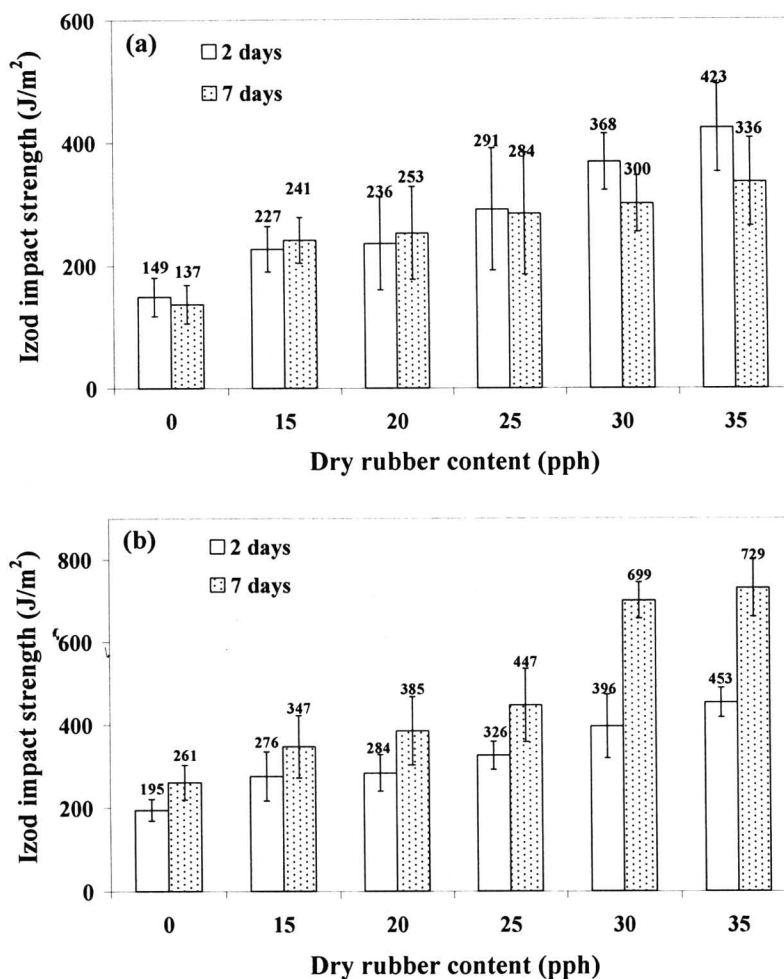
ตารางที่ 4.14 อิทธิพลของปริมาณยางธรรมชาติต่อสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแข็งที่เก็บไว้ 7 วัน ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 40% และ 70%

Relative humidity (%)	Dry rubber content (pph)	E (MPa)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\epsilon_{\max}$ (%)	ϵ_b (%)
40	0	148 ± 19	2.98 ± 0.27	1.76 ± 0.18	1.80 ± 0.21
	15	279 ± 42	3.19 ± 0.55	1.39 ± 0.12	1.46 ± 0.13
	20	283 ± 25	3.35 ± 0.42	1.50 ± 0.14	1.85 ± 0.46
	25	251 ± 26	3.15 ± 0.51	1.65 ± 0.13	1.70 ± 0.21
	30	221 ± 32	2.47 ± 0.44	1.44 ± 0.18	2.00 ± 0.23
	35	219 ± 25	2.56 ± 0.31	1.65 ± 0.18	2.37 ± 0.18
70	0	249 ± 47	3.34 ± 0.77	1.75 ± 0.50	1.75 ± 0.34
	15	325 ± 34	4.29 ± 0.59	1.65 ± 0.14	1.68 ± 0.13
	20	296 ± 35	3.82 ± 0.46	1.71 ± 0.22	1.85 ± 0.31
	25	257 ± 30	3.19 ± 0.50	1.63 ± 0.13	1.69 ± 0.26
	30	265 ± 30	3.28 ± 0.46	1.60 ± 0.18	2.26 ± 0.20
	35	261 ± 25	3.07 ± 0.32	1.55 ± 0.10	2.06 ± 0.23

ความต้านทานต่อแรงกระแทกของโพน้ำยางและโพน้ำยางผสมน้ำยางธรรมชาติแสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18 ยางธรรมชาติทำให้โพน้ำยางมีความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามที่คาดหวังไว้ เพราะยางธรรมชาติเป็น สารเพิ่มความเหนียวหรือเพิ่มความต้านทานต่อแรงกระแทก ดังนั้น โครงการวิจัยนี้จึงบรรลุวัตถุประสงค์ในการเตรียม โพน้ำยางที่เพิ่มความต้านทานต่อแรงกระแทกด้วยน้ำยางธรรมชาติ ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยาง ธรรมชาติเพิ่มขึ้น อิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อสมบัตินี้เห็นได้ชัดเจนเมื่อเก็บไว้ 7 วัน (รูปที่ 4.17) การเก็บตัวอย่างไว้ ที่บรรยากาศห้องเป็นเวลานานขึ้น ทำให้โพน้ำยางมีโอกาสดูดความชื้นในบรรยากาศมากขึ้น น้ำเป็นพลาสติกไซเซอร์ของโพน้ำยาง ทำให้โพน้ำยางยืดหยุ่นได้มากขึ้น จึงรับแรงกระแทกได้มากขึ้น การเก็บตัวอย่างก่อนทดสอบเป็นเวลา 2 วัน ทำให้ค่าความ ต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเช่นกันแต่เพิ่มขึ้นน้อยกว่าการเก็บไว้เป็นเวลา 7 วัน อิทธิพลของระยะเวลาในการเก็บ ตัวอย่างต่อความต้านทานต่อแรงกระแทกแสดงในรูปที่ 4.18 การเก็บไว้เป็นเวลา 7 วัน มีความต้านทานต่อแรงกระแทก สูงกว่าการเก็บไว้ที่ 2 วัน อย่างชัดเจนเมื่อทำการเก็บตัวอย่างภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์สูง ซึ่งเป็นสภาพบรรยากาศ ภายในห้องปฏิบัติการที่ทำการทดลอง การเติมยางธรรมชาติการเก็บตัวอย่างที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ (40%) จะเห็นได้ว่า ความชื้นสัมพัทธ์มีอิทธิพลสูงกว่าระยะเวลาในการเก็บตัวอย่าง



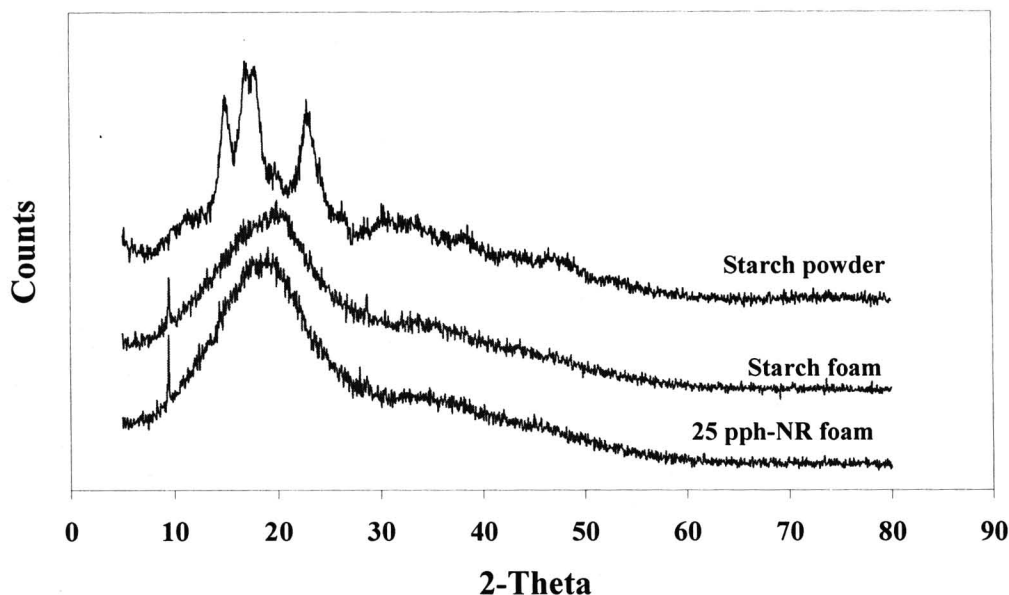
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงอิทธิพลปริมาณยางธรรมชาติต่อสมบัติความต้านทานต่อของโพน้ำยางที่ภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH แปรระยะเวลาในการเก็บ: (a) 2 วัน และ (b) 7 วัน



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงอิทธิพลปริมาณยางธรรมชาติต่อความต้านทานต่อแรงกระแทกของโฟมแข็ง ที่ระยะเวลาในการเก็บ 2 วัน และ 7 วัน ภายใต้: (a) 40 %RH และ (b) 70 %RH

4.7.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

โดยปกติโฟมจะมีผลึกสูง เมื่อเกิดเป็นโฟมเทอร์โมพลาสติกแล้ว ความเป็นผลึกจะหายไป ทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของโฟมแข็งมันสำปะหลังทั้งที่เดิมและไม่เติมยางธรรมชาติด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และเปรียบเทียบกับโครงสร้างผลึกของโฟมแข็งมันสำปะหลัง รูปที่ 4.19 แสดงแบบแผนการกระเจิงของโฟมในตัวอย่างโฟมและผงแข็ง โฟมแข็งและโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติมีลักษณะเป็นอสัณฐาน และแสดงลักษณะ amorphous halo คือการมี base line ที่โป่งนูน อันเนื่องมาจากความเป็นระเบียบในระยะสั้นของโมเลกุล (short range order) เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นผลึกของแข็งได้แตกออกในขณะที่แข็งได้รับความร้อนในการทำให้เกิดเป็นโฟมตั้งแต่ประมาณ 100-110°C (Shogren *et al.*, 1998a) ส่วนสเปกตรัมของผงแข็งแสดงลักษณะที่เป็นผลึกชนิดบี (B-type) (Shogren *et al.*, 1996; Bhatagar and Hanna, 1996; Thuwall *et al.*, 2006) ซึ่งมีค่า 2θ เท่ากับ 15, 18 และ 23.3° ปริมาณผลึก (degree of crystallinity, X_c) ที่หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟประมาณ 37% โดยเชื่อว่าโครงสร้างของผลึกนี้เป็นการจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวม้วนคู่ของอะไมโลเพกตินสายสั้น (Wu and Sarko, 1987)



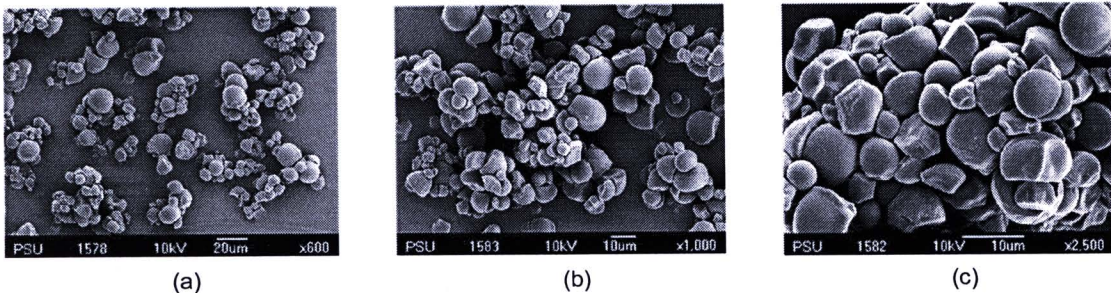
รูปที่ 4.19 XRD pattern ของผงแป้ง โฟมแป้ง และโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ 25 pph

4.7.4 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยา

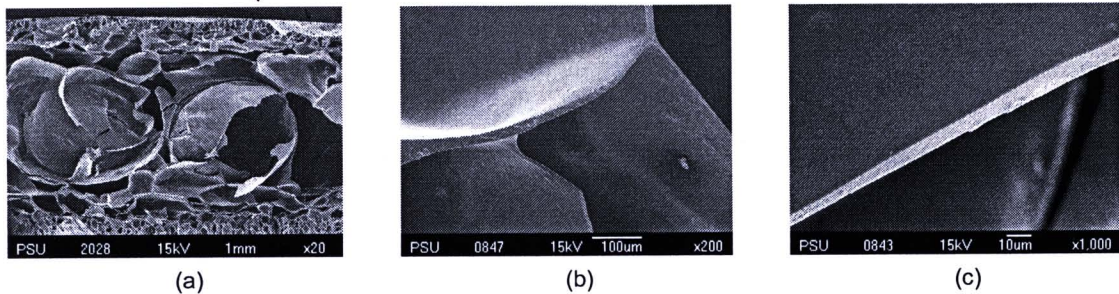
รูปที่ 4.20a-c แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของแป้งมันสำปะหลัง พบว่าแป้งมีลักษณะเป็นเม็ดค่อนข้างกลม และมีขนาดเล็กกว่า 10 μm เมื่อแป้งที่มีน้ำเป็นส่วนผสมได้รับความร้อนเม็ดแป้งเกิดการพองตัวและแตกตัวกลายเป็นเจล ทำให้มีความหนืดเพิ่มขึ้น จากนั้นน้ำจะเหวี่ยงออกไปทำให้มีโพรงอากาศเกิดขึ้น การเกิดขึ้นของโพรงอากาศจะต้องมีแรงดันของน้ำและส่วนผสมภายในแม่แบบที่มากพอ เมื่อน้ำจะเหวี่ยงออกไปทำให้แป้งที่เป็นเจลดังกล่าวแห้งและแข็งตัวกลายเป็นโฟม (Lawton *et al.*, 1999) โฟมแป้งที่ได้จากการอบทั่วไปมีลักษณะเหมือนกันคือ มีโครงสร้างแตกต่างกันระหว่างผิวหน้าและแกนกลางหรือที่เรียกว่า skin-core morphology หรือนักวิจัยบางกลุ่มเรียกว่าโครงสร้างแบบแซนวิช (sandwich structure) (Cinelli *et al.*, 2006) โดยที่ผิวด้านนอก (outer skin) ของโฟม (ด้านบนและด้านล่างที่สัมผัสกับแม่แบบ) จะมีโพรงอากาศขนาดเล็ก และมีโครงสร้างเป็นเซลล์ปิด เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีการสัมผัสกับแม่แบบที่ร้อน ทำให้แป้งบริเวณนี้เกิดเป็นเจลได้ก่อนและแห้งอย่างรวดเร็วโพรงอากาศจึงขยายตัวได้น้อย ส่วนบริเวณแกนกลาง (interior) ของโฟม (ระหว่างผิวที่สัมผัสกับแม่แบบ) จะมีโพรงอากาศขนาดใหญ่ ผนังเซลล์บาง และโครงสร้างเป็นเซลล์เปิดมากกว่าโครงสร้างที่เป็นเซลล์ปิด เนื่องจากน้ำที่ระเหยมีปริมาณมาก และน้ำจะระเหยออกไปอย่างรวดเร็วส่งผลให้เกิดเป็นโพรงอากาศขนาดใหญ่ (Kiatkamjornwong *et al.*, 2001; Shogren *et al.*, 2002; Preechawong *et al.*, 2005; Cinelli *et al.*, 2006) โพรงอากาศขนาดใหญ่ดังกล่าวมีผนังเซลล์ที่แตกออกจากกันเพราะแรงดันที่สูงจึงกลายเป็นเซลล์เปิด

รูปที่ 4.21a-c แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของโฟมแป้ง พบว่ามีลักษณะโครงสร้างแบบที่เรียกว่า skin-core morphology โดยจะมีโพรงอากาศขนาดใหญ่บริเวณแกนกลาง ผนังเซลล์ของโฟมแป้ง (รูปที่ 4.21b-c) มีความบางมาก เมื่อเปรียบเทียบกับโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติที่ปริมาณยางธรรมชาติ 15 pph ดังแสดงในรูปที่ 4.22b-c สังเกตได้ว่ารูปที่ 4.22a มีขนาดของโพรงอากาศเล็กกว่าของโฟมแป้งในรูปที่ 4.21a ซึ่งจะมีลักษณะเป็นเซลล์ปิด เนื่องจากยางธรรมชาติทำให้แป้งและส่วนผสมมีความหนืดเพิ่มขึ้น เมื่อความหนืดเพิ่มขึ้น น้ำจะระเหยออกไปได้ยาก ทำให้มีผนังเซลล์หนามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโฟมแป้ง และสังเกตเห็นว่ายางธรรมชาติในบางสัดส่วน สามารถกระจายตัวในเนื้อแป้งและยึดเกาะกับเฟสของแป้งได้ดีไม่มีการแยกเฟส ซึ่งลักษณะสัณฐานวิทยาที่ได้นี้สอดคล้องกับสมบัติความทนต่อ

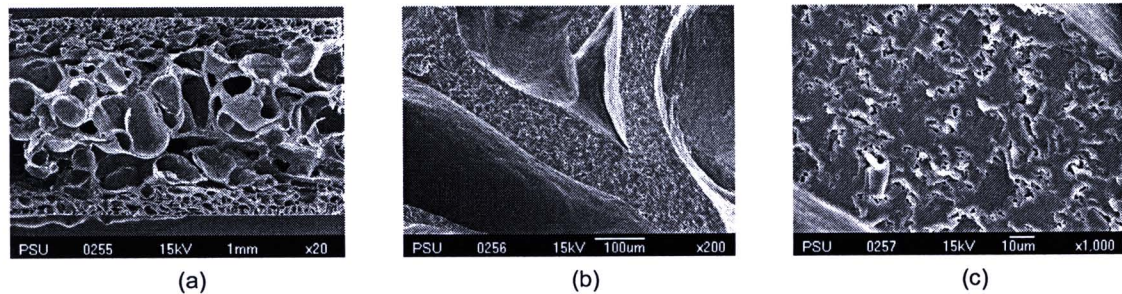
แรงดัดโค้ง และสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก เพราะยางธรรมชาติผสมเข้ากันกับแป้งได้ดีทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น และยางธรรมชาติทำให้ผนังเซลล์ของโฟมหนาขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโฟมแป้งที่ไม่ผสมยางธรรมชาติ รูปที่ 4.23a-c และ 4.24a-c แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ 20 pph และ 25 pph ตามลำดับพบว่าโครงอากาศของโฟมมีขนาดเล็กกว่าโครงอากาศของโฟมแป้ง สังเกตเห็นยางธรรมชาติกระจายตัวและรวมตัวกันมากขึ้นแสดงในรูปที่ 4.24c



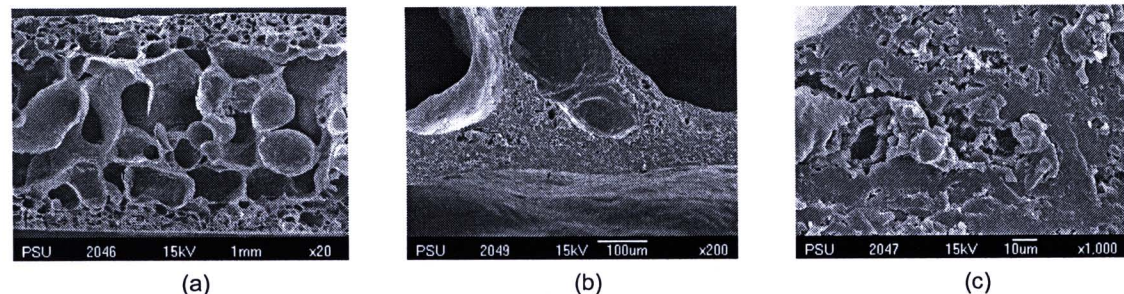
รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแป้งมันสำปะหลัง



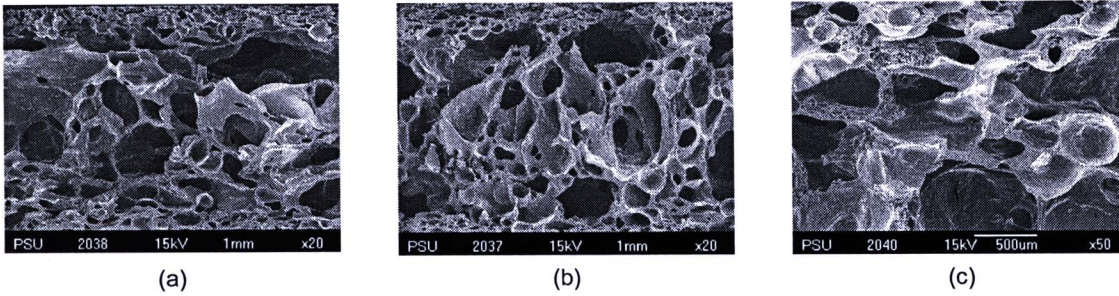
รูปที่ 4.21 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโฟมแป้ง



รูปที่ 4.22 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ 15 pph

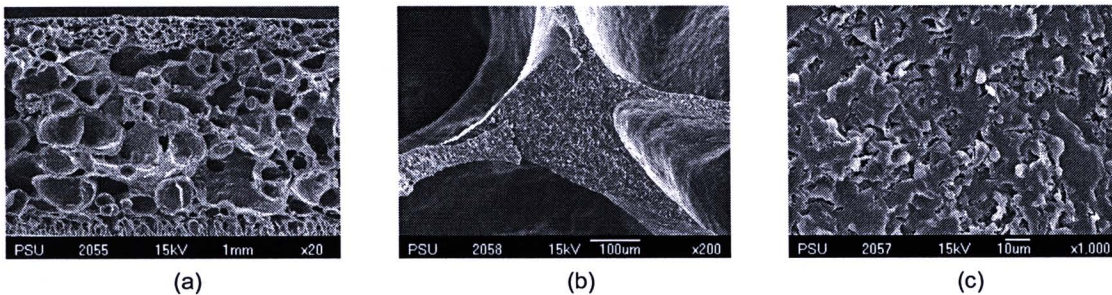


รูปที่ 4.23 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ 20 pph

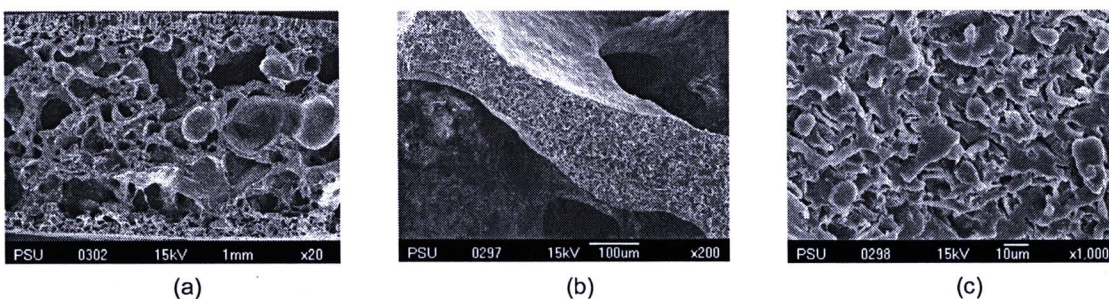


รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ 25 pph

รูปที่ 4.25a-c และ 4.26a-c เป็นลักษณะพื้นฐานวิทยาของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ 30 pph และ 35 pph ตามลำดับพบว่าโฟมมีโพรงอากาศเล็กลงและมีความไม่สม่ำเสมอของโฟมแป้งเพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น บริเวณแกนกลางของโฟมบ่งบอกได้ถึงลักษณะการกระจายตัวของยางธรรมชาติที่ไม่สม่ำเสมอคือ บางจุดยางธรรมชาติกระจายตัวได้ดี แต่ในบางจุดเกาะกลุ่มกัน เนื่องจากปริมาณยางธรรมชาติที่มากเกินไปทำให้เกิดการแยกเฟสขึ้น ปริมาณยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้นทำให้โพรงอากาศมีขนาดเล็กลง และโพรงอากาศด้านที่มีการสัมผัสกับแม่แบบของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ 35 pph มีขนาดเล็กกว่าที่ปริมาณยางธรรมชาติในสัดส่วนอื่นๆ การใช้กำลังขยายสูงขึ้นทำให้สังเกตเห็นลักษณะการกระจายของยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำยางธรรมชาติทำให้ความหนืดของส่วนผสมเพิ่มขึ้น เพราะน้ำยางธรรมชาติจะเข้าไปแทรกในแป้งระหว่างการอบ ทำให้ขัดขวางการระเหยของน้ำ แป้งจึงกลายโม่ได้ยากขึ้น (Kiatkamjornwong *et al*, 2001) เช่นเดียวกันกับการเติมเส้นใยลงไปในโฟมแป้ง (Lawton *et al.*, 2004; Cinelli *et al.*, 2006) ที่ทำให้โฟมแป้งมีโพรงอากาศเล็กลง จากลักษณะพื้นฐานวิทยาสามารถอธิบายการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นและสมบัติเชิงกล เมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นได้



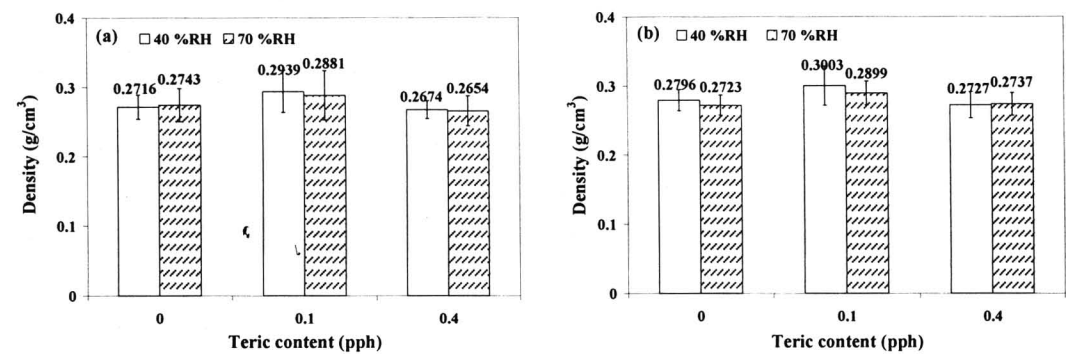
รูปที่ 4.25 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ 30 pph



รูปที่ 4.26 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ 35 pph

4.8 อิทธิพลของสารลดแรงตึงผิวต่อความหนาแน่นและสมบัติเชิงกลของโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมยางธรรมชาติ

เนื่องจากน้ำยางธรรมชาติมีลักษณะเป็นคอลลอยด์ (colloid) การใช้สารลดแรงตึงผิวอาจจะช่วยให้การกระจายตัวของน้ำยางธรรมชาติในแป้งดีขึ้น หรือทำให้การผสมแป้งและน้ำยางธรรมชาติเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้น จากสมมติฐานนี้ จึงเลือกใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ คือ Teric[®] 16A16 เติร์ยมโฟมที่มียางธรรมชาติ 15 pph ตรวจสอบสมบัติเชิงกล โดยเก็บตัวอย่างโฟมเป็นเวลา 2 วัน และ 7 วัน ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์สองค่า ความหนาแน่นของโฟมเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.27 เป็นที่สังเกตว่า ปริมาณ 0.1 pph ของสารลดแรงตึงผิวทำให้โฟมมีความหนาแน่นสูงที่สุด แต่ค่าความหนาแน่นที่วัดได้ทั้งหมดนี้ ยังคงจัดอยู่ในช่วงเดียวกัน



รูปที่ 4.27 อิทธิพลของปริมาณ Teric[®] 16A16 ต่อความหนาแน่นของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติปริมาณ 15 pph เก็บภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH แปรระยะเวลาในการเก็บ: (a) 2 วัน และ (b) 7 วัน

อิทธิพลของสารลดแรงตึงผิวต่อสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแสดงในตารางที่ 4.15 และ 4.16 การเติมสารลดแรงตึงผิวทำให้ค่ามอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกกรณี และทำให้ค่าความเครียดลดลงในทุกกรณีเช่นเดียวกัน ส่วนค่าความเค้นสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิว ยกเว้นโฟมที่เก็บไว้เป็นเวลา 7 วัน ที่ 70 %RH จะมีค่าลดลงเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิว ไม่สามารถสรุปอิทธิพลของปริมาณสารลดแรงตึงผิวได้อย่างชัดเจน เนื่องจากมีความแตกต่างกันในแต่ละสมบัติและแต่ละสภาวะการเก็บโฟม

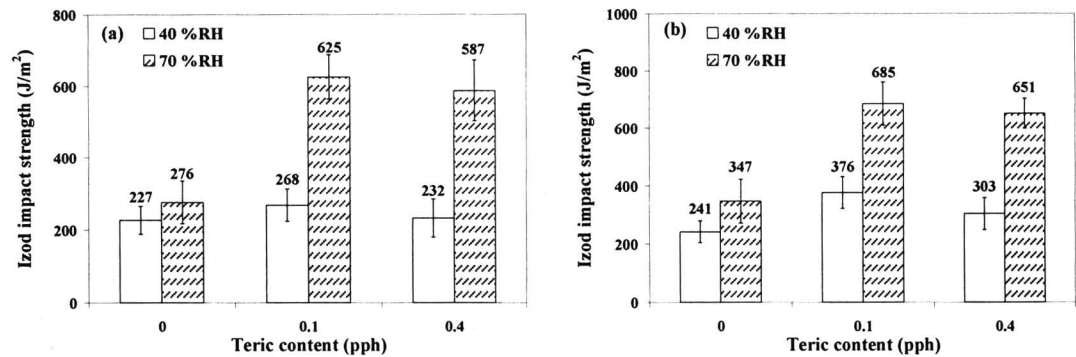
ตารางที่ 4.15 อิทธิพลของ Teric[®] 16A16 ต่อสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติปริมาณ 15 pph เก็บตัวอย่าง 2 วัน ภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH

Relative humidity (%)	Teric content (pph)	E (MPa)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{max} (%)	ϵ_b (%)
40	0	199 ± 19	2.89 ± 0.70	2.12 ± 0.42	2.12 ± 0.32
	0.1	285 ± 27	3.75 ± 0.75	1.88 ± 0.28	1.91 ± 0.30
	0.4	243 ± 42	3.12 ± 0.46	1.71 ± 0.33	1.73 ± 0.49
70	0	156 ± 19	2.37 ± 0.34	2.28 ± 0.20	2.29 ± 0.19
	0.1	249 ± 58	3.20 ± 0.69	1.87 ± 0.41	2.01 ± 0.37
	0.4	255 ± 47	3.07 ± 0.53	1.62 ± 0.17	1.73 ± 0.24

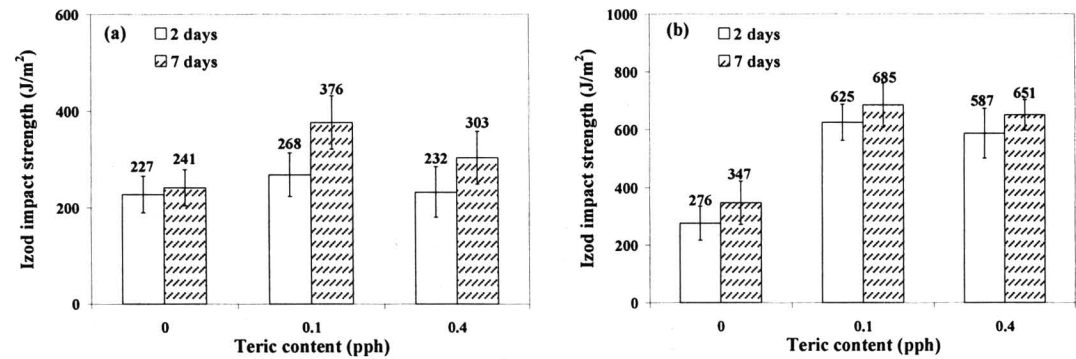
ตารางที่ 4.16 อิทธิพลของ Teric® 16A16 ต่อสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติปริมาณ 15 pph เก็บตัวอย่าง 7 วัน ภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH

Relative humidity (%)	Teric content (pph)	E (MPa)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{max} (%)	ϵ_b (%)
40	0	249 ± 47	3.34 ± 0.77	1.75 ± 0.50	1.75 ± 0.34
	0.1	291 ± 37	3.49 ± 0.78	1.57 ± 0.29	1.71 ± 0.32
	0.4	300 ± 40	3.73 ± 0.54	1.56 ± 0.13	1.72 ± 0.42
70	0	148 ± 19	2.98 ± 0.27	1.76 ± 0.18	1.80 ± 0.21
	0.1	237 ± 43	2.50 ± 0.43	1.31 ± 0.13	1.55 ± 0.18
	0.4	210 ± 28	2.02 ± 0.32	1.15 ± 0.08	1.28 ± 0.14

อิทธิพลของสารลดแรงตึงผิว Teric® 16A16 นั้นเห็นได้อย่างชัดเจนในการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก ดังแสดงในรูปที่ 4.28 และ 4.29 สารลดแรงตึงผิวช่วยทำให้ความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นในทุกกรณี และเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเก็บไว้ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์สูง (70 %RH)

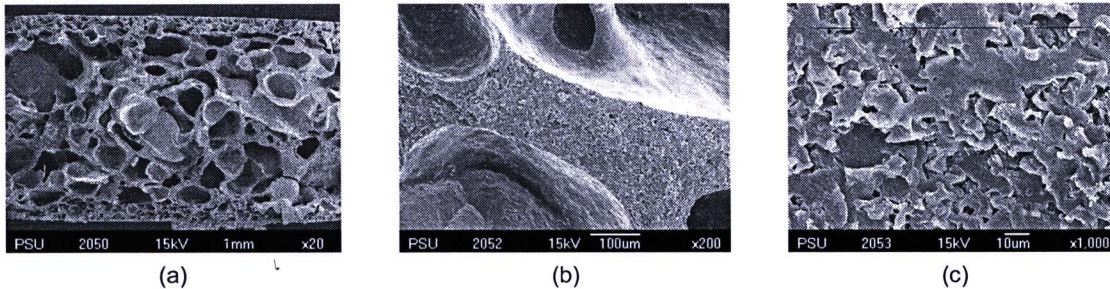


รูปที่ 4.28 อิทธิพลของปริมาณ Teric® 16A16 ต่อความต้านทานต่อแรงกระแทกของโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติ 15 pph เก็บภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH และระยะเวลาในการเก็บ: (a) 2 วัน และ (b) 7 วัน



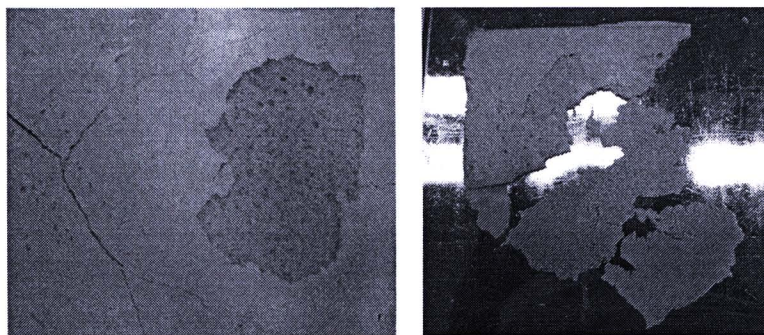
รูปที่ 4.29 อิทธิพลของปริมาณ Teric® 16A16 ต่อความต้านทานต่อแรงกระแทกของโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติ 15 pph ที่เก็บเป็นเวลา 2 วัน และ 7 วัน ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์แตกต่างกัน: (a) 40 %RH และ (b) 70 %RH

การที่ความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงขึ้นเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิว น่าจะมีสาเหตุมาจากการกระจายตัวที่ดีขึ้นของน้ำยางธรรมชาติเมื่อผสมกับผงแป้ง และอีกสาเหตุหนึ่งอาจเนื่องมาจากการที่สารลดแรงตึงผิวชนิดนี้ชอบน้ำ ทำให้โฟมมีโอกาสดูดความชื้นในอากาศได้เพิ่มขึ้น ทำให้โฟมมีความยืดหยุ่นมากขึ้น จึงรับแรงกระแทกได้มากขึ้น สันฐานวิทยาของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ 15 pph ที่เติมสารลดแรงตึงผิวเท่ากับ 0.1 pph แสดงในรูปที่ 4.30a-c โฟมมีลักษณะเป็น skin-core morphology เหมือนกับรูปที่ 4.22a แต่ดูเหมือนว่าสารลดแรงตึงผิวช่วยให้บริเวณผิวหน้าโฟม (skin) มีความหนาลดลง (บริเวณแกนกลางมีความหนาเพิ่มขึ้น) ภาพถ่ายที่กำลังขยายสูงขึ้นไม่ได้แตกต่างจากตัวอย่างที่ไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว (รูปที่ 4.22b-c)



รูปที่ 4.30 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ 15 pph ที่เติมสารลดแรงตึง 0.1 pph

จากผลการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิด Teric® 16A16 ไม่มีอิทธิพลต่อความหนาแน่นอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้ค่ามอดูลัสและความเค้นสูงสุดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และทำให้สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวทำให้น้ำยางธรรมชาติมีความเสถียรมากขึ้น (Kiatkamjornwong *et al.*, 2001; Shey *et al.*, 2006) ทำให้น้ำยางธรรมชาติจับตัวกันเองและจับตัวกับแป้งช้าลงจึงผสมเข้ากับแป้งและกระจายตัวในแป้งได้ดีขึ้นดังที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่การเติม Teric® 16A16 ทำให้มีข้อด้อยในด้านการเตรียมโฟม เนื่องจากทำให้โฟมเกาะติดแม่แบบ และในบางครั้งไม่สามารถแกะโฟมออกจากแม่แบบได้ รูปที่ 4.31 แสดงภาพถ่ายแผ่นโฟมที่มีตำหนิและรอยแตกเนื่องมาจากการเกาะติดบนแม่แบบ (รูปซ้ายมือ) และแผ่นโฟมที่เกิดการแตกหักหลังแกะออกจากแม่แบบ ดังนั้นจึงไม่เติม Teric® 16A16 ในการเตรียมโฟมสำหรับการทดลองต่อไป



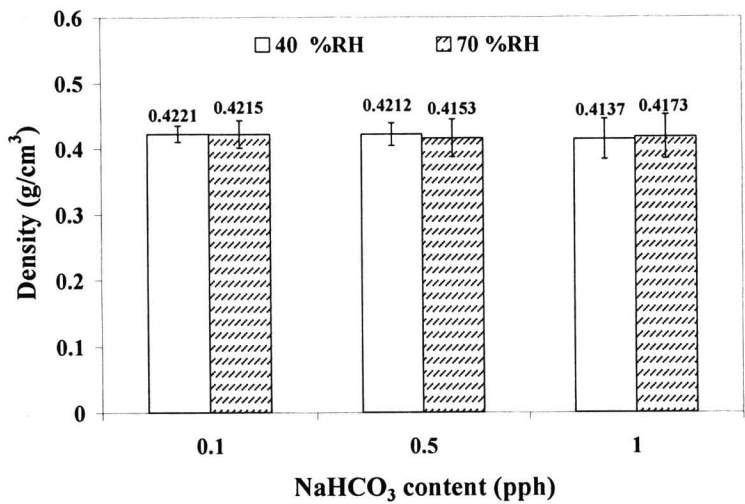
รูปที่ 4.31 ภาพถ่ายจากกล้องถ่ายภาพรูปดิจิทัลแสดงลักษณะโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ 15 pph ที่เติมสารลดแรงตึงผิว 0.4 pph

4.9 อิทธิพลของสารฟูตต่อความหนาแน่นและสมบัติเชิงกลของโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมยางธรรมชาติ

เนื่องจากการทดลองที่ผ่านมาพบว่าเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น ในการทดลองนี้จึงทำการศึกษาวิธีการลดความหนาแน่นของโฟม โดยเลือกใช้สารฟูต 2 ชนิด คือ โซเดียมไบคาร์บอเนต แปรปริมาณเท่ากับ 0.1, 0.5 และ 1 pph และอะโซไดคาร์บอเนต (ADC) แปรปริมาณเท่ากับ 0.1, 0.25 และ 0.5 pph ทำการเตรียมโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ 35 pph เก็บขึ้นทดสอบภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH และเก็บไว้ 7 วัน ก่อนการทดสอบ

4.9.1 โซเดียมไบคาร์บอเนต

อิทธิพลของโซเดียมไบคาร์บอเนตต่อความหนาแน่นของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ 35 pph แสดงในรูปที่ 4.32 พบว่าเมื่อปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นความหนาแน่นของโฟมมีค่าลดลงเล็กน้อย อิทธิพลของโซเดียมไบคาร์บอเนตต่อสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ 35 pph แสดงในตารางที่ 4.17 และ 4.18 ค่ามอดุลัสและค่าความเค้นสูงสุดของโฟมมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่น การแปรปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนตไม่มีผลต่อค่าความเครียดสูงสุดและความเครียด ณ จุดขาด



รูปที่ 4.32 อิทธิพลของปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนตต่อความหนาแน่นของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ 35 pph ที่เก็บไว้ 7 วัน เก็บภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH

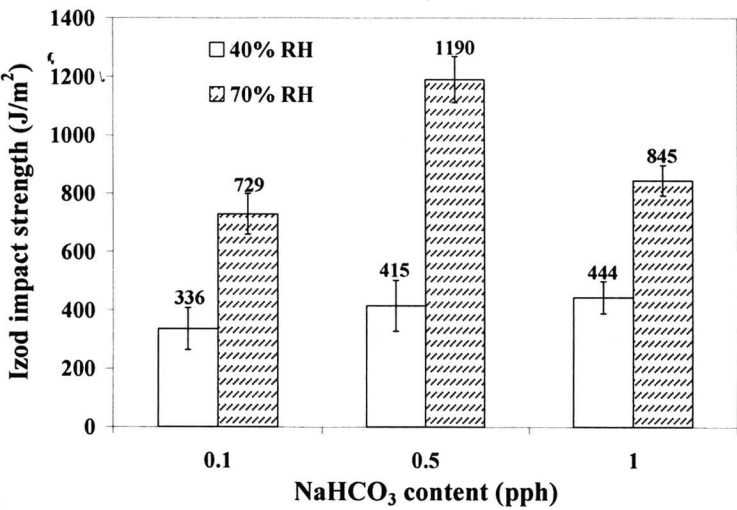
ตารางที่ 4.17 อิทธิพลของปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนตต่อสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ 35 pph ที่เก็บไว้ 7 วัน ภายใต้ 40 RH%

NaHCO ₃ (pph)	E (MPa)	σ _{max} (MPa)	ε _{max} (%)	ε _b (%)
0.1	261 ± 25	3.07 ± 0.42	1.55 ± 0.10	1.70 ± 0.23
0.5	215 ± 40	2.67 ± 0.53	1.76 ± 0.16	1.86 ± 0.31
1	213 ± 31	2.45 ± 0.31	1.59 ± 0.09	1.78 ± 0.21

ตารางที่ 4.18 อิทธิพลของปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนตต่อสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติ 35 pph ที่เก็บไว้ 7 วันภายใต้ 70 RH%

NaHCO ₃ (pph)	E (MPa)	σ _{max} (MPa)	ε _{max} (%)	ε _b (%)
0.1	219 ± 25	2.56 ± 0.38	1.55 ± 0.17	2.36 ± 0.9
0.5	174 ± 18	2.05 ± 0.38	1.65 ± 0.21	2.50 ± 0.42
1	156 ± 39	1.69 ± 0.44	1.48 ± 0.08	2.15 ± 0.28

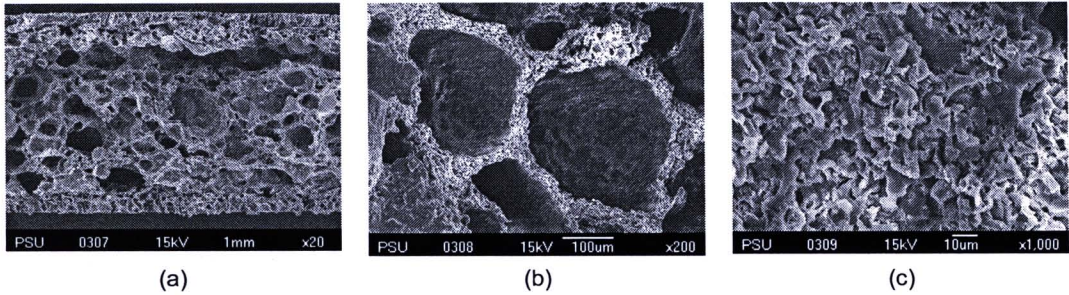
ปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนตมีอิทธิพลต่อความต้านทานต่อแรงกระแทกของโฟมและขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.33 ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ (40 %RH) ความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น ส่วนที่ความชื้นสัมพัทธ์สูง (70 %RH) ความต้านทานต่อแรงกระแทกมีค่าสูงสุดเมื่อปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนตเท่ากับ 0.5 pph ปริมาณ 1 pph ให้ค่าสูงกว่าปริมาณ 0.1 pph



รูปที่ 4.33 อิทธิพลของปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนตต่อแรงกระแทกของโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติ 35 pph ที่เก็บไว้ 7 วัน ภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH

รูปที่ 4.34a-c แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติ 35 pph ที่มีปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนตเท่ากับ 1 pph ลักษณะของโฟมยังคงเป็นแบบ skin-core morphology แต่จะสังเกตเห็นได้ว่ารอยหักที่ผิวหน้าของโฟม ไม่เรียบ ขรุขระมากกว่าโฟมที่มีโซเดียมไบคาร์บอเนตเท่ากับ 0.1 pph (รูปที่ 4.26b และ 4.34b) รอยที่ผิวหน้าดังกล่าวน่าจะเกิดมาจากการแตกตัวให้ก๊าซของสารฟู เมื่อปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนตมากขึ้นขนาดของเซลล์บริเวณแกนกลางมีขนาดเล็กลง ผนังเซลล์มีความหนาลดลงและมีความขรุขระมากขึ้น (รูปที่ 4.26c และ 4.34c) จากการสังเกตลักษณะทางกายภาพของโฟมที่มีปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนตต่างกัน พบว่าเมื่อโฟมมีสีน้ำตาลและจะคล้ำขึ้นเมื่อปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนตเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lai และคณะ, (1989) และ Zhou และ Hana (2004) นอกจากนี้โซเดียมไบคาร์บอเนตทำให้กระบวนการเตรียมโฟมเป็นไปได้อย่างขึ้น เนื่องจากโฟมเหนียวเกาะติดแน่นกับแม่แบบ และจะเกาะติดแน่นขึ้นเมื่อมีปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น นี่คือข้อเสียถ้าใช้ปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนตมากกว่า 0.1 pph ข้อดีของโซเดียมไบคาร์บอเนตคือราคาถูก หาซื้อได้ง่าย ถึงแม้ว่าปริมาณ

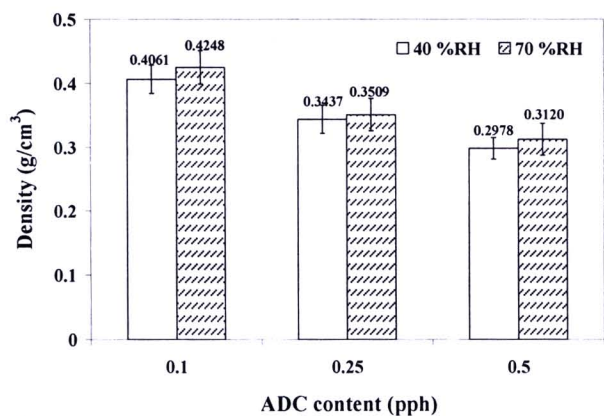
โซเดียมไบคาร์บอเนต 0.5 pph จะให้ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น แต่ค่าความหนาแน่นไม่ลดลงและยังก่อให้เกิดปัญหาด้านการขึ้นรูปโฟม



รูปที่ 4.34 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติ 35 pph ที่มีโซเดียมไบคาร์บอเนต 1 pph

4.9.2 อะโซไดคาร์บอนาไมด์ (ADC)

อิทธิพลของสารฟูนิด ADC ต่อความหนาแน่นของโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติแสดงในรูปที่ 4.35 จะเห็นว่าความหนาแน่นลดลงตามปริมาณสารฟู่ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก ADC เป็นสารฟู่ที่ใช้ในการเตรียมโฟมยางธรรมชาติ จึงทำให้โฟมมีความหนาแน่นลดลง การเก็บตัวอย่างไว้ที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงจะให้ค่าความหนาแน่นสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการเก็บไว้ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ อาจเป็นเพราะโฟมดูดความชื้นจากบรรยากาศเมื่อเก็บไว้ที่ความชื้นสัมพัทธ์สูง



รูปที่ 4.35 อิทธิพลของปริมาณ ADC ต่อความหนาแน่นของโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติ 35 pph ที่เก็บไว้ 7 วันภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH

อิทธิพลของ ADC ต่อสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติ 35 pph แสดงในตารางที่ 4.19 และ 4.20 สมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งมีค่าลดลงตามปริมาณ ADC ที่เพิ่มขึ้น เพราะโฟมที่มีความหนาแน่นต่ำลงจะมีความแข็งแรงลดลง (Lawton *et al.*, 1999) ความชื้นสัมพัทธ์สูงทำให้ความแข็งแรงของโฟมลดลง เนื่องจากการดูดซับความชื้นในบรรยากาศ ดังเช่นที่กล่าวมาแล้วในเบื้องต้น

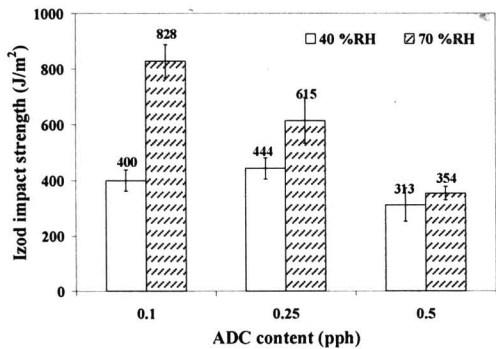
ความต้านทานต่อแรงกระแทกของโฟมมีค่าลดลงตามปริมาณ ADC ยกเว้นตัวอย่างที่ทดสอบที่ 40 %RH ดังแสดงในรูปที่ 4.36 เนื่องจากยางธรรมชาติเกิดเป็นโฟมได้มากขึ้น ทำให้มีโพรงอากาศภายในตัวโฟมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ยางธรรมชาติซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับแรงสามารถรับแรงได้น้อยลง

ตารางที่ 4.19 อิทธิพลของปริมาณ ADC ต่อสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ 35 pph
ระยะเวลาในการเก็บตัว 7 วัน ภายใต้ 40 RH%

ADC (pph)	E (MPa)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{max} (%)	ϵ_b (%)
0.10	224 ± 33	2.66 ± 0.41	1.71 ± 0.21	1.90 ± 0.33
0.25	179 ± 44	2.13 ± 0.47	1.60 ± 0.19	1.95 ± 0.34
0.50	154 ± 20	1.68 ± 0.22	1.63 ± 0.13	2.12 ± 0.27

ตารางที่ 4.20 อิทธิพลของปริมาณ ADC ต่อสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ 35 pph
ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน ภายใต้ 70 RH%

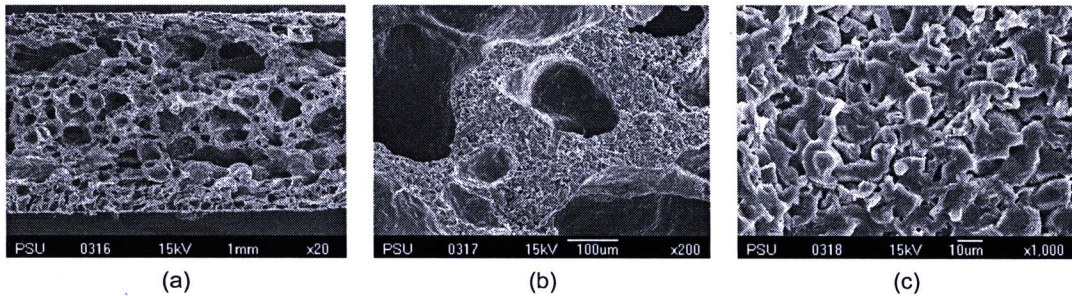
ADC (pph)	E (MPa)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{max} (%)	ϵ_b (%)
0.10	184 ± 27	2.16 ± 0.30	1.71 ± 0.17	2.39 ± 0.25
0.25	144 ± 28	1.25 ± 0.28	1.16 ± 0.08	1.60 ± 0.24
0.50	121 ± 18	1.06 ± 0.21	1.17 ± 0.20	1.57 ± 0.24



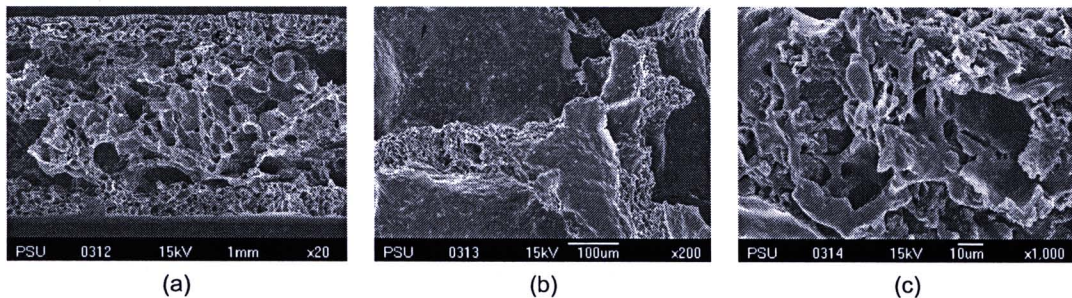
รูปที่ 4.36 อิทธิพลของปริมาณ ADC ต่อความต้านทานต่อแรงกระแทกของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ 35 pph
ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน ภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH

รูปที่ 4.37a-c, รูปที่ 4.38a-c และ รูปที่ 4.39a-c แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติที่ปริมาณ ADC เท่ากับ 0.10-0.50 pph ตามลำดับ พบว่าโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติมีโพรงอากาศขยายใหญ่ขึ้นเมื่อปริมาณ ADC เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ 35 pph ที่เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (รูปที่ 4.26) พบว่าที่ปริมาณ ADC เท่ากับ 0.1 pph ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีลักษณะภายนอกของโฟมไม่แตกต่างกัน สีของโฟมไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อใช้ ADC แตกต่างกัน และจากการสังเกตลักษณะทางกายภาพที่ปรากฏหลังการขึ้นรูปของโฟมที่ใช้ ADC และโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ปริมาณเท่ากับ 0.50 pph พบว่าโฟมจาก ADC มีความหนาแน่นน้อยกว่า สารฟูทั้ง 2 ชนิดมีความสามารถในการแตกตัวให้ก๊าซที่อุณหภูมิไม่เท่ากัน และปริมาณก๊าซที่ให้หลังการแตกตัวไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับปริมาณและสภาวะการใช้ของสารฟูแต่ละชนิด โดยโซเดียมไบคาร์บอเนตสามารถแตกตัวอย่างช้าๆ ได้ที่อุณหภูมิ 100°C แต่จะแตกตัวอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิเท่ากับ 140°C และให้ก๊าซประมาณ 267 ml/g ในขณะที่ ADC แตกตัวในช่วงอุณหภูมิเท่ากับ 170-205°C และให้ก๊าซประมาณ 220 ml/g เมื่อพิจารณาที่ปริมาณการใช้เท่ากัน ADC จะแตกตัวให้ปริมาณก๊าซน้อยกว่า แต่จะแตกตัวได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าโซเดียมไบคาร์บอเนต แต่เมื่อพิจารณาความเหมาะสมของการใช้สารฟูแต่ละตัวพบว่าโซเดียมไบคาร์บอเนตไม่เหมาะกับการใช้งานที่ใช้ความดันสูง เพราะทำให้ประสิทธิภาพการ

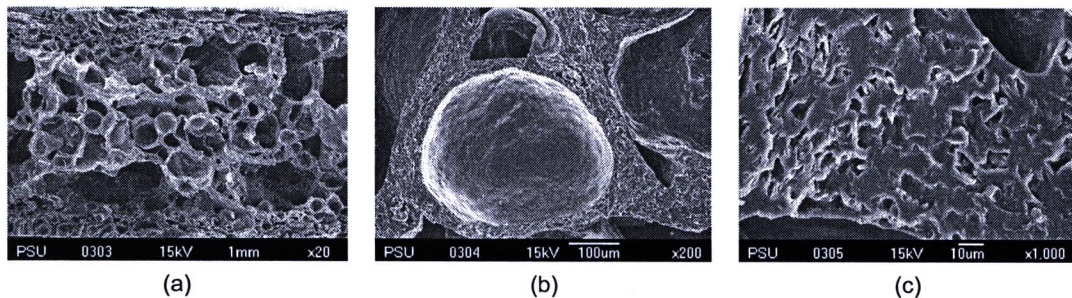
ปล่อยก๊าซลดลง และอาจจะต้องใช้ร่วมกับกรดต่างๆเพื่อเป็นตัวกระตุ้นให้สารฟุ้งแตกตัวได้ดีขึ้น ส่วน ADC ในบางครั้งจำเป็นต้องใช้สารกระตุ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำให้ ADC แตกตัวเรียกสารพวกนี้ว่า “Kicker” เช่น ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide) ไกลคอล (glycol) หรือยูเรีย (urea) เป็นต้น (สมศักดิ์, 2547)



รูปที่ 4.37 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโพลีเอไมด์ผสมยางธรรมชาติ 35 pph และ ADC 0.1 pph



รูปที่ 4.38 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโพลีเอไมด์ผสมยางธรรมชาติ 35 pph ผสม ADC 0.25 pph



รูปที่ 4.39 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโพลีเอไมด์ผสมยางธรรมชาติ 35 pph ที่ ADC เท่ากับ 0.5 pph

จากการทดลองใช้สารฟุ้งเพื่อลดความหนาแน่นของโพลีเอไมด์ผสมยางธรรมชาติ โดยเลือกใช้สารฟุ้งสองชนิดดังกล่าว พบว่าโซเดียมไบคาร์บอเนตไม่มีผลต่อความหนาแน่น และสมบัติความทนต่อแรงตึงตัวของโพลีเอไมด์ผสมยางธรรมชาติมีแนวโน้มลดลง แต่ทำให้สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มความยุ่งยากในขั้นตอนการขึ้นรูปโพลีเอไมด์ ทำให้ความหนาแน่น สมบัติความทนต่อแรงตึงตัว และสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกลดลง ดังนั้นจึงเลือกปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนตเท่ากับ 0.1 pph เพื่อเตรียมโพลีเอไมด์ผสมยางธรรมชาติในการทดลองต่อไป

4.10 อิทธิพลของสารริเริ่มปฏิกิริยาต่อความหนาแน่นและสมบัติเชิงกลของโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมน้ำ ยางธรรมชาติ

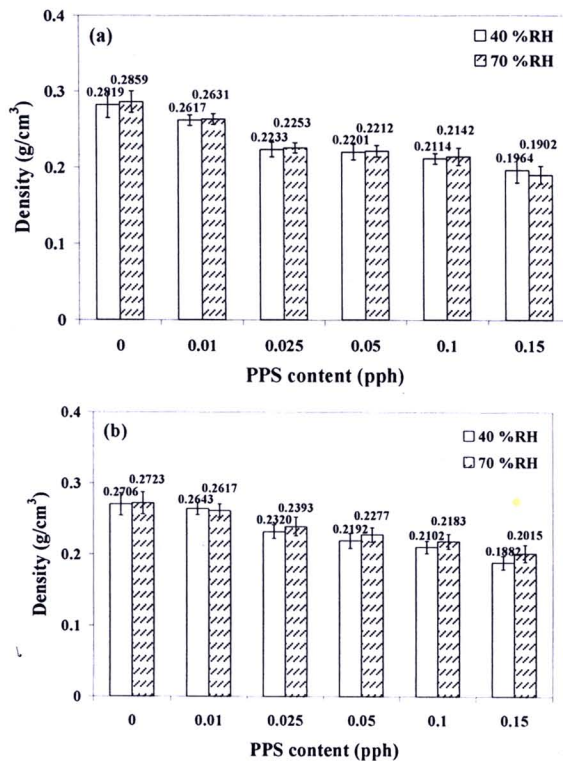
จากการผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและน้ำยางธรรมชาติในการเตรียมโฟม พบว่าแป้งมันสำปะหลังและน้ำยางธรรมชาติมีความสามารถในการเข้ากันได้ในระดับหนึ่ง แต่น้ำยางธรรมชาติจะเกิดการจับตัวเป็นก้อน โดยทั่วไปเมื่อแป้งละลายน้ำจะมีค่า pH ประมาณ 6 ส่งผลให้น้ำยางธรรมชาติจับตัวในขณะที่ทำการผสมกับแป้งมันสำปะหลัง จึงเป็นเหตุให้แป้งและน้ำยางธรรมชาติผสมเข้ากันได้ไม่ดีนัก ดังนั้นเพื่อต้องการให้เกิดปฏิกิริยากราฟท์โคพอลิเมอร์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังและน้ำยางธรรมชาติในระหว่างการให้ความร้อนในขณะที่ขึ้นรูปเป็นโฟม หรือที่เรียกว่า *in situ grafting* จึงเลือกใช้สารริเริ่มปฏิกิริยาสองชนิดคือ โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (potassium persulphate, PPS) ซึ่งเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาที่ละลายน้ำ และเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (benzoyl peroxide, BPO) เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาที่ไม่ละลายน้ำ สารริเริ่มปฏิกิริยาทั้งสองชนิดสามารถเกิดอนุมูลอิสระขึ้นโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังและน้ำยางธรรมชาติ ทำให้เกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสอง จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า PPS เหมาะแก่การเกิดปฏิกิริยากับแป้งเพราะว่า PPS สามารถละลายน้ำได้ สามารถใช้ PPS เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาที่แตกตัวแบบรีดอกซ์และแบบแตกตัวด้วยความร้อน และมีการนำ PPS มาใช้ในการสังเคราะห์กราฟท์โคพอลิเมอร์ของน้ำยางธรรมชาติกับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ (Kaewtatip and Tanrattanakul, 2008; Paveena, 2005; Sittipong, 2004) ส่วน BPO เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาชนิดที่แตกตัวด้วยความร้อนทำให้น้ำยางธรรมชาติเกิดการเชื่อมขวางกันได้ (Kiatkamjornwong *et al.*, 2001) และยังใช้ในการทำให้เกิดการกราฟท์โคพอลิเมอร์ระหว่างแป้งและพอลิเอทิลีน (Lourdin *et al.*, 1995)

4.10.1 การแปรปริมาณ PPS ที่ปริมาณยางธรรมชาติคงที่

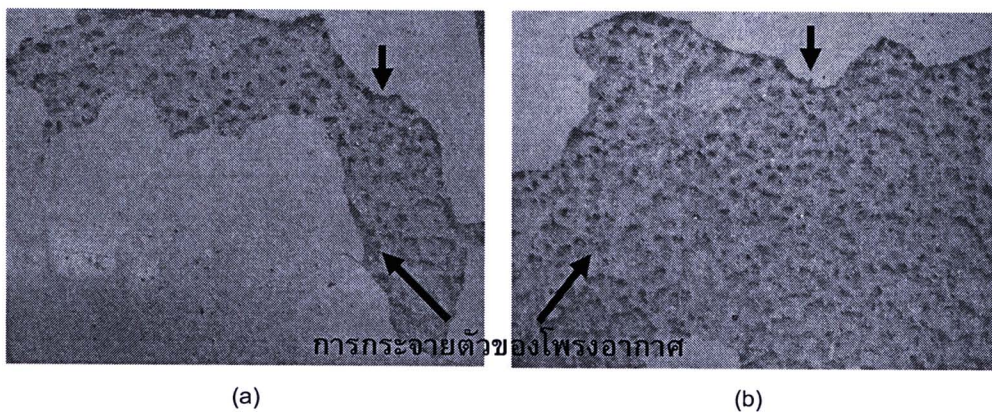
ทำการศึกษาอิทธิพลของสารริเริ่มปฏิกิริยาต่อความหนาแน่น และสมบัติเชิงกลของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ เลือกใช้โฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ 15 pph แปรปริมาณ PPS ตั้งแต่ 0, 0.01, 0.025, 0.05, 0.10 และ 0.15 pph ละลาย PPS ด้วยน้ำก่อนผสมกับแป้งมันสำปะหลังและน้ำยางธรรมชาติ เพื่อให้ PPS สามารถกระจายเข้าไปในเฟสของแป้งมันสำปะหลังและน้ำยางธรรมชาติได้ในระหว่างการผสมและขึ้นรูป ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่าง 2 วัน และ 7 วัน ภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH

ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณ PPS ต่อความหนาแน่นของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ 15 pph แสดงในรูปที่ 4.40 พิจารณาภายใต้ 40 %RH ที่ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่าง 2 วัน พบว่าความหนาแน่นลดลงเมื่อ PPS เพิ่มขึ้น โดยค่าความหนาแน่นที่ได้จะอยู่ในช่วง 0.1964-0.2819 g/cm³ และพิจารณาที่ 70 %RH พบว่าความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกันซึ่งความหนาแน่นที่ได้จะอยู่ในช่วง 0.1902-0.2859 g/cm³ ที่ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่าง 7 วัน (รูปที่ 4.40b) ความหนาแน่นมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ PPS เพิ่มขึ้น โดยค่าความหนาแน่นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 40% และ 70% อยู่ในช่วง 0.1882-0.2706 g/cm³ และ 0.2015-0.2723 g/cm³ ตามลำดับ การลดลงของความหนาแน่นจะสามารถอธิบายได้ด้วยการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติซึ่งจะได้อธิบายต่อไป

จากการสังเกตสีของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติที่เติม PPS พบว่าสีของโฟมคล้ำขึ้นเมื่อปริมาณ PPS เพิ่มขึ้น โดยโฟมที่เติม PPS ตั้งแต่ 0-0.05 pph มีสีเหมือนกัน แต่เมื่อปริมาณ PPS เพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.10 pph จะพบว่าโฟมมีสีคล้ำขึ้นโดยที่เปลี่ยนจากสีขาวครีมไปเป็นสีน้ำตาลอ่อน รูปที่ 4.41a และ 4.41b แสดงลักษณะโดยรวมของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติที่เติม PPS เท่ากับ 0.25 pph และ 0.5 pph ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าลักษณะของโพรงอากาศมีความแตกต่างกันเมื่อปริมาณ PPS เพิ่มขึ้น โดยโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติที่ไม่เติม PPS มีโพรงอากาศกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ แต่เมื่อมี PPS ตั้งแต่ 0.25 pph เป็นต้นไปโพรงอากาศจะกระจายตัวไม่สม่ำเสมอดังแสดงในรูป และโฟมมีผิวด้านบนและด้านล่างบางมาก เมื่อแกะโฟมออกจากแม่แบบ โฟมเกิดความเสียหายไม่สามารถนำมาเตรียมเป็นชิ้นทดสอบได้



รูปที่ 4.40 กราฟแสดงอิทธิพลของ PPS ต่อความหนาแน่นของโฟมแปงผสมยางธรรมชาติ 15 pph เก็บภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH แปรระยะเวลาในการเก็บ: (a) 2 วัน และ (b) 7 วัน



รูปที่ 4.41 ภาพถ่ายจากกล้องถ่ายภาพจุลทรรศน์แสดงลักษณะของโฟมแปงผสมยางธรรมชาติ 15 pph โดยเติม PPS เท่ากับ (a) 0.25 pph และ (b) 0.50 pph

เมื่อ PPS เพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นลดลง อาจเนื่องมาจากปริมาณ PPS ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียง โดยพอลิเมอร์อาจมีอนุภาคลิขระเกิดขึ้น และเหนียวทำให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่โมเลกุล ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์สั้นลง ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลง PPS ได้ถูกนำไปใช้เป็นสารสำหรับลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ (อรสา, 2546) โดยในตารางที่ 4.21 แสดงน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ จากโฟมแปงผสมยางธรรมชาติ 15 pph และมีปริมาณ PPS ระหว่าง 0-0.10 pph ทดสอบหาน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติด้วยเทคนิคเจลเพอร์มิเอชันโครมาโตกราฟี (gel permeation chromatography, GPC) พบว่าน้ำหนักโมเลกุลของยาง

ธรรมชาติลดลงเมื่อปริมาณ PPS เพิ่มขึ้น เพราะการใช้ PPS ในปริมาณที่มากขึ้นเหนี่ยวนำให้เกิดการตัดสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติลดลง

ตารางที่ 4.21 น้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ ที่มีปริมาณ PPS ตั้งแต่ 0-0.10 pph จากเทคนิค GPC

PPS content (pph)	$\overline{M}_w$	$\overline{M}_n$	$\overline{M}_w / \overline{M}_n$
0	1,989,681	668,579	2.97599
0.025	1,130,594	388,658	2.90897
0.05	313,023	110,606	2.83006
0.10	256,487	105,627	2.42822

อิทธิพลของ PPS ต่อสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติ ที่ระยะเวลาในการเก็บ 2 วัน แสดงในตารางที่ 4.22 พิจารณากายใต้ 40 %RH พบว่าค่า E และ σ_{max} มีแนวโน้มลดลง โดยค่า E ลดลงจาก 321 MPa เป็น 131 MPa และค่า σ_{max} ลดลงจาก 3.80 MPa เป็น 1.23 MPa เมื่อปริมาณ PPS เพิ่มขึ้นจาก 0-0.15 pph ส่วนค่าความเครียดทั้งค่า ϵ_{max} และค่า ϵ_b มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อปริมาณ PPS เพิ่มขึ้น และพิจารณากายใต้ 70 %RH พบว่าเมื่อปริมาณ PPS เพิ่มขึ้นจาก 0-0.15 pph ค่า E และ σ_{max} มีแนวโน้มลดลงจาก 272 MPa เป็น 109 MPa และค่า σ_{max} ลดลงจาก 3.43 MPa ไปเป็น 1.02 MPa ส่วนค่า ϵ_{max} และ ϵ_b มีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.22 สมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติ 15 pph แปรปริมาณ PPS ระหว่าง 0-0.15 pph ระยะเวลาในการเก็บ 2 วัน กายใต้ 40 %RH และ 70 %RH

Relative humidity (%)	PPS content (pph)	E (MPa)	σ_{max} (Mpa)	ϵ_{max} (%)	ϵ_b (%)
40	0	321 ± 45	3.80 ± 0.35	1.43 ± 0.28	1.47 ± 0.28
	0.01	250 ± 24	3.50 ± 0.57	1.86 ± 0.24	1.88 ± 0.25
	0.025	206 ± 19	2.67 ± 0.38	1.79 ± 0.29	1.90 ± 0.35
	0.05	207 ± 37	2.49 ± 0.45	1.56 ± 0.21	1.78 ± 0.31
	0.10	192 ± 28	2.15 ± 0.36	1.60 ± 0.28	1.69 ± 0.30
	0.15	131 ± 19	1.23 ± 0.29	1.42 ± 0.25	1.48 ± 0.27
70	0	272 ± 51	3.43 ± 0.73	1.56 ± 0.19	1.60 ± 0.20
	0.01	251 ± 34	3.69 ± 0.58	2.05 ± 0.43	2.15 ± 0.46
	0.025	172 ± 16	1.78 ± 0.25	1.33 ± 0.14	1.79 ± 0.29
	0.05	170 ± 29	2.15 ± 0.39	1.84 ± 0.41	1.81 ± 0.42
	0.10	167 ± 28	1.77 ± 0.38	1.46 ± 0.15	1.71 ± 0.13
	0.15	109 ± 17	1.02 ± 0.17	1.30 ± 0.22	1.43 ± 0.22

ตารางที่ 4.23 แสดงอิทธิพลของ PPS ต่อสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติ ที่ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน พิจารณากายใต้ 40 %RH พบว่าเมื่อปริมาณ PPS เพิ่มขึ้นจาก 0-0.15 pph ทำให้ค่า E และ σ_{max} มีแนวโน้มลดลง โดยค่า E ลดลงจาก 325 MPa เป็น 164 MPa และค่า σ_{max} ลดลงจาก 4.29 MPa เป็น

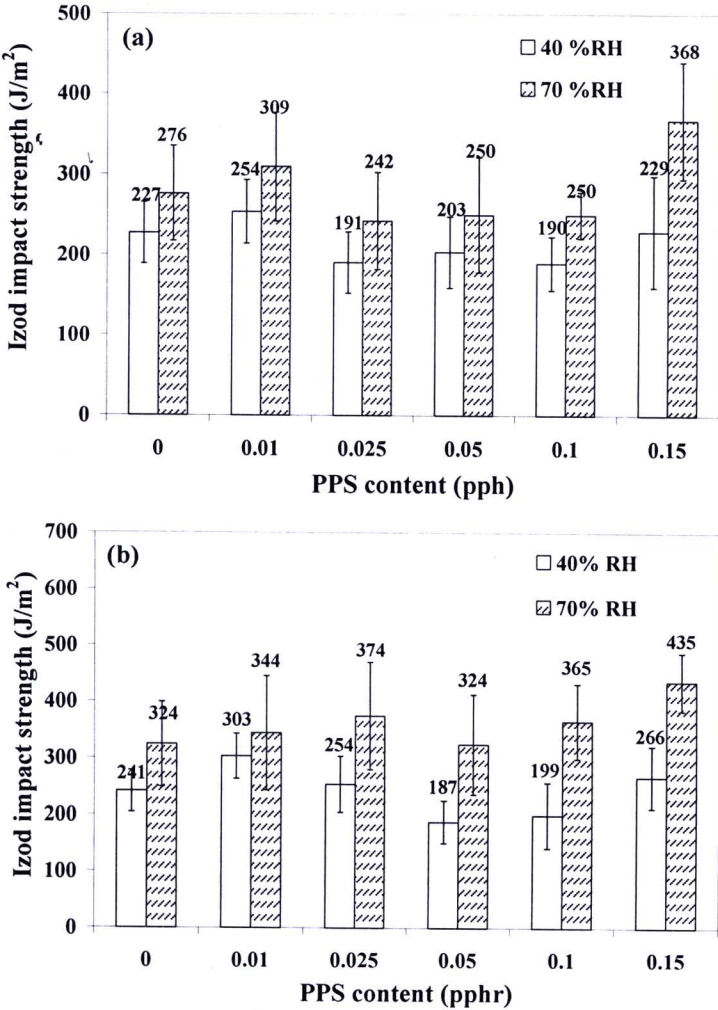
1.50 MPa ตามลำดับ ส่วนค่า $\epsilon_{\max}$ และ ϵ_b มีค่าใกล้เคียงกัน พิจารณาภายใต้ 70 %RH พบว่าเมื่อปริมาณ PPS เพิ่มขึ้นจาก 0-0.15 pph ทั้งค่า E และ $\sigma_{\max}$ มีแนวโน้มลดลงจาก 279 MPa เป็น 95 MPa และค่า $\sigma_{\max}$ ลดลงจาก 3.19 MPa เป็น 0.74 MPa ตามลำดับ ส่วนค่า $\epsilon_{\max}$ และ ϵ_b มีค่าใกล้เคียงกัน การเติม PPS ลงไปในโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติทำให้ค่า E และ $\sigma_{\max}$ ลดลง เนื่องจากยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลลดลง เพราะ PPS เข้าไปตัดสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ โดยพบว่าโฟมที่มีปริมาณ PPS สูงกว่าจะมีผิวด้านบนและผิวด้านที่บางกว่าและมีการกระจายตัวของโพรงอากาศที่ไม่สม่ำเสมอมากกว่าโฟมที่มีปริมาณ PPS ต่ำกว่า เพราะยางธรรมชาติที่ถูกตัดสายโซ่จะขัดขวางการเกิดโฟมน้อยกว่าธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง

ตารางที่ 4.23 สมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติ 15 pph แปรปริมาณ PPS ระหว่าง 0-0.15 pph ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน ภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH

Relative humidity (%)	PPS content (pph)	E (Mpa)	$\sigma_{\max}$ (Mpa)	$\epsilon_{\max}$ (%)	ϵ_b (%)
40	0	325 ± 34	4.29 ± 0.59	1.65 ± 0.14	1.68 ± 0.13
	0.01	287 ± 35	3.82 ± 0.45	1.75 ± 0.18	1.84 ± 0.17
	0.025	230 ± 25	2.96 ± 0.38	1.85 ± 0.25	1.91 ± 0.39
	0.05	220 ± 34	2.60 ± 0.37	1.64 ± 0.15	1.75 ± 0.15
	0.10	178 ± 21	1.99 ± 0.33	1.42 ± 0.09	1.53 ± 0.10
	0.15	164 ± 38	1.50 ± 0.44	1.30 ± 0.17	1.42 ± 0.23
70	0	279 ± 42	3.19 ± 0.55	1.39 ± 0.12	1.46 ± 0.13
	0.01	189 ± 18	1.54 ± 0.25	1.12 ± 0.33	1.27 ± 0.30
	0.025	164 ± 15	1.49 ± 0.14	1.13 ± 0.10	1.36 ± 0.21
	0.05	154 ± 17	1.18 ± 0.12	0.93 ± 0.08	1.13 ± 0.05
	0.10	148 ± 21	1.22 ± 0.23	1.04 ± 0.15	1.16 ± 0.14
	0.15	95 ± 15	0.74 ± 0.11	0.96 ± 0.15	1.54 ± 0.24

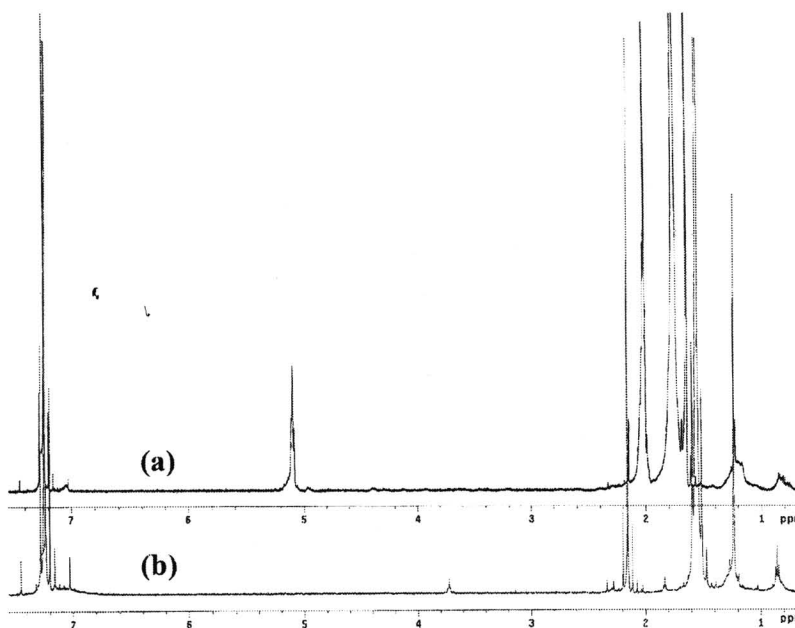
ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของโฟมผสมยางธรรมชาติ ที่เติม PPS ระยะเวลาในการเก็บ 2 วัน แสดงในรูปที่ 4.42a พิจารณาภายใต้ 40 %RH พบว่าเมื่อปริมาณ PPS เพิ่มขึ้นจาก 0-0.15 pph มีสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกอยู่ในช่วง 190-254 J/m² พิจารณาที่ 70 %RH พบว่าเมื่อปริมาณ PPS เพิ่มขึ้นจาก 0-0.15 pph สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกจะอยู่ในช่วง 242-368 J/m² โดยที่ปริมาณ PPS เท่ากับ 0.15 pph ให้สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงสุดมีค่าเท่ากับ 368 J/m² รูปที่ 4.42b แสดงอิทธิพลของ PPS ต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติ 15 pph ที่ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน พิจารณาภายใต้ 40 %RH พบว่าเมื่อปริมาณ PPS เพิ่มขึ้นจาก 0-0.15 pph ทำให้สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกที่ได้อยู่ในช่วง 187-266 J/m² ซึ่งค่าที่ได้ดังกล่าวใกล้เคียงกันแม้ว่าจะมีแนวโน้มลดลง พิจารณาภายใต้ 70 %RH พบว่าสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกที่ได้อยู่ในช่วง 324-435 J/m² โดยค่าที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อปริมาณ PPS เพิ่มขึ้นจาก 0-0.15 pph การเติม PPS ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ทำให้สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของโฟมเปลี่ยนแปลง ดังนั้นสามารถบอกได้ว่าการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติไม่มีผลต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก แต่จะส่งผลต่อสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้ง

เพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าการเติม PPS ในการเตรียมโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติ ทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟท์โคพอลิเมอร์ระหว่างการขึ้นรูปโฟม จึงได้ทำการตรวจสอบโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติที่มีการเติม PPS ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ โดยการนำโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติ 15 pph ที่ไม่เติม PPS ไปทำ Soxhlet extraction ตามวิธีการที่กล่าวมาแล้ว และนำไปตรวจสอบด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.43 (เส้น b) พบว่าไม่มีสัญญาณที่ตำแหน่ง 5.10 ppm ซึ่งเป็นตำแหน่งของพันธะคู่ในสเปกตรัมของยางธรรมชาติ แสดงว่าในการทำ Soxhlet extraction ยางธรรมชาติได้ถูกสกัดออกไปหมด สเปกตรัม a ได้จากการนำโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติ 15 pph ที่เติม PPS เท่ากับ 0.025 pph ไปทำ Soxhlet extraction ด้วยวิธีการเดียวกันไป และตรวจสอบด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ พบว่าโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติที่เติม PPS มีสัญญาณที่ตำแหน่ง 5.10 ppm ซึ่งเป็นสเปกตรัมของยางธรรมชาติ โดยที่สเปกตรัมดังกล่าวที่ได้มีลักษณะเหมือนกันกับรูปที่ 4.7 ซึ่งได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.3 ดังนั้นจากการตรวจสอบด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ สามารถสรุปได้ว่าเกิดปฏิกิริยากราฟท์โคพอลิเมอร์ระหว่างกระบวนการขึ้นรูปของแข็งมันสำปะหลังและน้ำยางธรรมชาติ



รูปที่ 4.42 กราฟแสดงอิทธิพลของ PPS ต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติ 15 pph แปรปริมาณ PPS ระหว่าง 0-0.15 pph เก็บตัวอย่างภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH แปรระยะเวลาในการเก็บ: (a) 2 วัน และ (b) 7 วัน

จากผลการทดลองแปรปริมาณ PPS เพื่อเลือกปริมาณ PPS ที่เหมาะสม จากการพิจารณาลักษณะทางกายภาพพบว่าที่ปริมาณ PPS ต่ำกว่า 0.05 pph สีของแผ่นโฟมที่ได้ไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยสีใกล้เคียงกันกับโฟมที่ไม่เติม PPS เมื่อพิจารณาลักษณะการกระจายตัวของโพรงอากาศ พบว่าที่ 0.025 pph โฟมมีการกระจายของโพรงอากาศสม่ำเสมอว่าที่ 0.05 pph จากค่าความหนาแน่น และสมบัติเชิงกลที่ได้ใกล้เคียงกัน ดังนั้นในการทดลองต่อไปจะเลือก PPS เท่ากับ 0.025 pph เพื่อการศึกษาอิทธิพลของ PPS ต่อสมบัติต่างๆ ของโฟมแข็งสำหรับผลิตแผ่นฉนวนกันความร้อนที่ทำการแปรปริมาณของยางธรรมชาติ



รูปที่ 4.43 ^1H -NMR สเปกตรัมของโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติ 15 pph หลัง Soxhlet extraction โดยที่ (a) เติม PPS เท่ากับ 0.025 pph และ (b) ไม่เติม PPS

4.10.2 การแปรปริมาณยางธรรมชาติที่ปริมาณ PPS คงที่

การทดลองนี้ศึกษาสมบัติต่างๆของโฟมผสมยางธรรมชาติ โดยแปรปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับ 15, 20, 25, 30 และ 35 pph และให้ปริมาณของ PPS คงที่เท่ากับ 0.025 pph ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่าง 2 วัน และ 7 วัน ภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH

ตารางที่ 4.24 แสดงความหนาแน่นของโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติที่มีการเติม PPS แปรปริมาณยางธรรมชาติ 15-35 pph ที่ระยะเวลาในการเก็บ 2 วัน ที่ 40 %RH ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นจาก 15-35 pph โดยที่ค่าความหนาแน่นที่ได้เพิ่มขึ้นจาก 0.2233-0.4001 g/cm^3 และการเก็บภายใต้ 70 %RH ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นจาก 15-35 pph โดยค่าความหนาแน่นที่ได้เพิ่มขึ้นจาก 0.2253-0.4038 g/cm^3 ที่ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน พิจารณาภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH พบว่าเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นจาก 15-35 pph ทำให้มีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น โดยค่าความหนาแน่นที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.2320-0.4000 g/cm^3 และจาก 0.2393-0.4035 g/cm^3 ตามลำดับ การเติมน้ำยางธรรมชาติทำให้โฟมแข็งมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.24 ความหนาแน่นของโฟมแป่งผสมยางธรรมชาติที่มี PPS ปริมาณ 0.025 pph ระยะเวลาในการเก็บ 2 วัน และ 7 วัน เก็บภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH

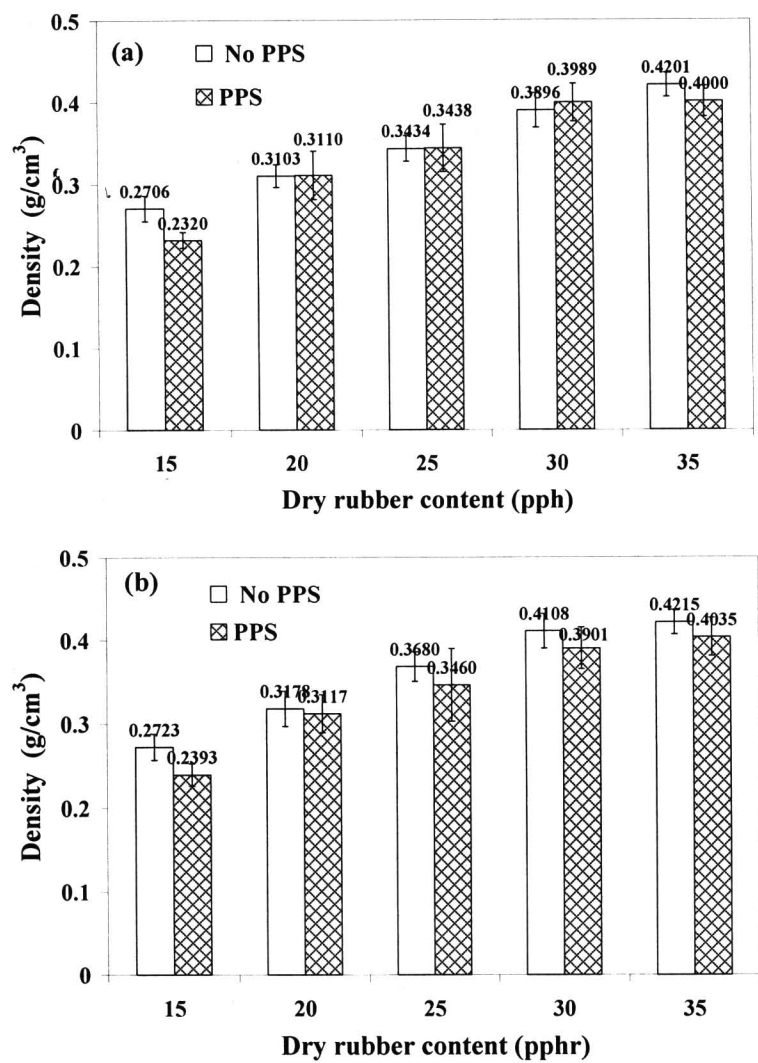
Storage time (day)	Dry rubber content (pph)	Density (g/cm ³)	
		40 %RH	70 %RH
2	15	0.2233 ± 0.0096	0.2253 ± 0.0067
	20	0.3007 ± 0.0222	0.3017 ± 0.0284
	25	0.3415 ± 0.0399	0.3498 ± 0.0435
	30	0.4079 ± 0.0174	0.4023 ± 0.0149
	35	0.4001 ± 0.0195	0.4038 ± 0.0189
7	15	0.2320 ± 0.0096	0.2393 ± 0.0132
	20	0.3110 ± 0.0295	0.3117 ± 0.0226
	25	0.3438 ± 0.0289	0.3460 ± 0.0434
	30	0.3889 ± 0.0231	0.3901 ± 0.0250
	35	0.4000 ± 0.0185	0.4035 ± 0.0231

กราฟแสดงการเปรียบเทียบความหนาแน่นของโฟมแป่งผสมยางธรรมชาติ ที่มีการเติมและไม่เติม PPS ใช้ปริมาณยางธรรมชาติต่างๆ กันที่ระยะเวลาในการเก็บ 7 วันและเก็บภายใต้ 40 %RH แสดงในรูปที่ 4.44a พบว่าโฟมที่เติม PPS มีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าโฟมที่ไม่เติม PPS ซึ่งโฟมที่ไม่เติม PPS มีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.2706-0.4201 g/cm³ และโฟมที่เติม PPS มีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.2320-0.4000 g/cm³ และรูปที่ 4.44b แสดงความหนาแน่นของโฟมที่เก็บภายใต้ 70 %RH พบว่าโฟมที่ไม่เติม PPS มีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.2723-0.4215 g/cm³ และโฟมที่เติม PPS มีค่าอยู่ในช่วง 0.2393-0.4035 g/cm³ จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าโฟมแป่งผสมยางธรรมชาติที่เติม PPS มีความหนาแน่นต่ำกว่าโฟมแป่งผสมยางธรรมชาติที่ไม่เติม PPS เป็นผลเนื่องมาจากการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ เพราะ PPS ทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติสั้นลง ส่งผลให้ยางธรรมชาติขาดช่วงการเกิดเป็นโฟมของแป่งได้ลดลง ส่งผลให้แป่งและส่วนผสมกลายเป็นโฟมได้ง่ายขึ้นจึงทำให้ความหนาแน่นลดลง

ตารางที่ 4.25 แสดงผลการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแป่งผสมยางธรรมชาติ 15-35 pph ที่เติม PPS ระยะเวลาในการเก็บ 2 วัน ที่ 40 %RH โฟมที่มีปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับ 20 pph จะมีค่า E สูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 273 MPa และปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับ 25 pph ให้ค่าสูงใกล้เคียงกัน (268 MPa) ค่า σ_{max} ที่ปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับ 20 pph มีค่าสูงสุด ค่าที่ได้เท่ากับ 3.89 MPa ส่วนค่า ϵ_{max} และ ϵ_b มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ที่ 70 %RH พบว่าค่า E และ σ_{max} มีค่าสูงสุดที่ปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับ 20 pph โดยค่าที่ได้เท่ากับ 261 MPa และ 3.54 MPa ตามลำดับ ส่วนค่า ϵ_{max} และ ϵ_b มีค่าใกล้เคียงกันที่ปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับ 15-30 pph แต่ที่ปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับ 35 pph มีค่า ϵ_{max} และ ϵ_b สูงสุด ค่าที่ได้เท่ากับ 2.32% และ 3.30% ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามค่าที่ได้ยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.26 แสดงสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแป่งผสมยางธรรมชาติ 15-35 pph ที่มีการเติม PPS ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน ที่ 40 %RH ค่า E และ σ_{max} มีค่าสูงสุดที่ปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับ 20 pph โดยค่าที่ได้เท่ากับ 292 MPa และ 3.68 MPa ตามลำดับ ส่วนค่า ϵ_{max} และ ϵ_b มีค่าใกล้เคียงกัน ที่ 70 %RH ค่า E มีค่าสูงสุดที่

ปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับ 25 pph โดยค่าที่ได้เท่ากับ 205 MPa และที่ปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับ 20 pph ที่ให้ค่าใกล้เคียงกันด้วย (202 MPa) ค่า σ_{max} มีค่าสูงสุดที่ปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับ 20 pph มีค่าเท่ากับ 2.54 MPa และที่ปริมาณยางเท่ากับ 20 pph มีค่าใกล้เคียงกัน (2.52 MPa) ค่า ϵ_b มีค่าสูงกว่าค่า ϵ_{max} แต่ค่าที่ได้ยังคงใกล้เคียงกัน การลดลงของสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งเนื่องจาก PPS ซึ่งเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาเป็นตัวการที่เหนี่ยวนำให้เกิดการขาดจากกันของสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ รูปที่ 4.45 และ รูปที่ 4.46 แสดงการเปรียบเทียบค่ามอดุลัส (E) และความเค้นสูงสุด (σ_{max}) ระหว่างโฟมแป่งผสมยางธรรมชาติที่เติมและไม่เติม PPS ระยะเวลาในการเก็บ 7 วันตามลำดับ จะเห็นได้ชัดว่าการเติม PPS ให้ค่า E และ σ_{max} มีค่าลดลง ยกเว้นตัวอย่างเก็บไว้ที่ 40 %RH มีค่า E และ σ_{max} สูงขึ้นเล็กน้อยหลังการเติม PPS



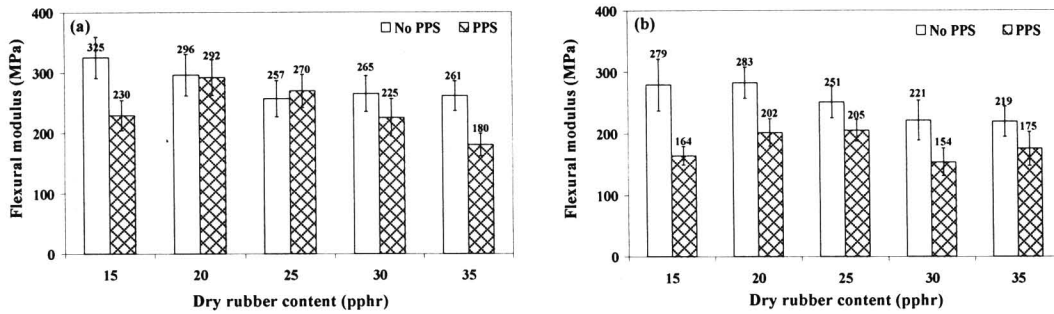
รูปที่ 4.44 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความหนาแน่นของโฟมแป่งผสมยางธรรมชาติที่ไม่เติม PPS และเติม PPS ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ต่างกัน: (a) 40 %RH และ (b) 70 %RH

ตารางที่ 4.25 สมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติที่มี PPS ปริมาณ 0.025 pph
ระยะเวลาในการเก็บ 2 วัน เก็บภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH

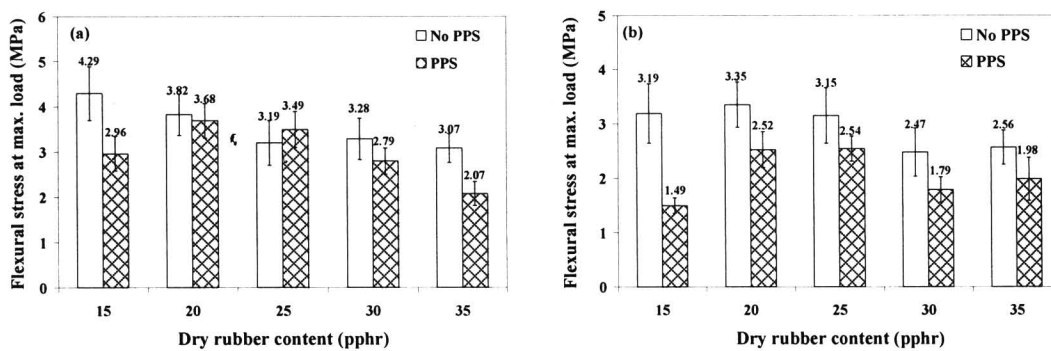
Relative humidity (%)	Dry rubber content (pph)	E (MPa)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\epsilon_{\max}$ (%)	ϵ_b (%)
40	15	206 ± 19	2.67 ± 0.38	1.79 ± 0.29	1.90 ± 0.35
	20	273 ± 39	3.89 ± 0.50	1.90 ± 0.48	1.93 ± 0.47
	25	268 ± 40	3.52 ± 0.29	1.68 ± 0.23	1.71 ± 0.23
	30	214 ± 25	2.70 ± 0.26	1.70 ± 0.09	1.77 ± 0.10
	35	185 ± 26	2.43 ± 0.55	1.65 ± 0.36	2.09 ± 0.52
70	15	172 ± 16	1.78 ± 0.25	1.33 ± 0.14	1.79 ± 0.29
	20	261 ± 50	3.54 ± 0.53	1.88 ± 0.42	1.99 ± 0.47
	25	247 ± 31	3.23 ± 0.49	1.72 ± 0.14	1.77 ± 0.14
	30	207 ± 35	2.42 ± 0.41	1.68 ± 0.16	1.97 ± 0.25
	35	169 ± 41	2.31 ± 0.62	2.32 ± 0.37	3.30 ± 0.75

ตารางที่ 4.26 สมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติที่มีการเติม PPS ปริมาณ 0.025 pph
ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน เก็บภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH

Relative humidity (%)	Dry rubber Content (pph)	E (MPa)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\epsilon_{\max}$ (%)	ϵ_b (%)
40	15	230 ± 25	2.96 ± 0.38	1.85 ± 0.25	1.91 ± 0.39
	20	292 ± 30	3.68 ± 0.38	1.60 ± 0.11	1.69 ± 0.21
	25	270 ± 27	3.49 ± 0.40	1.66 ± 0.30	1.80 ± 0.36
	30	225 ± 31	2.79 ± 0.29	1.62 ± 0.21	1.79 ± 0.22
	35	180 ± 18	2.07 ± 0.26	1.83 ± 0.21	2.23 ± 0.28
70	15	164 ± 15	1.49 ± 0.14	1.13 ± 0.10	1.36 ± 0.21
	20	202 ± 22	2.52 ± 0.33	1.94 ± 0.14	2.29 ± 0.21
	25	205 ± 18	2.54 ± 0.23	1. 91 ± 0.19	2.32 ± 0.18
	30	154 ± 22	1.79 ± 0.23	1.81 ± 0.19	2.92 ± 0.52
	35	175 ± 28	1.97 ± 0.39	1.73 ± 0.20	2.43 ± 0.25

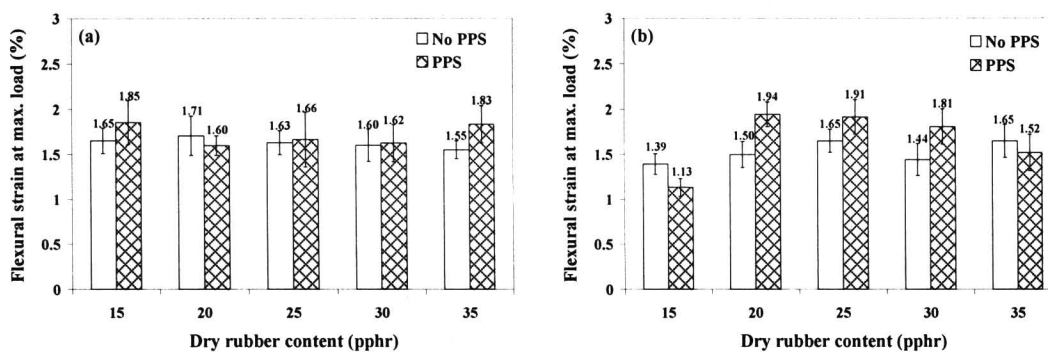


รูปที่ 4.45 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่ามอดุลัสของโพลิเมอร์ยางธรรมชาติที่ไม่เติม PPS และเติม PPS ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ต่างกัน: (a) 40 %RH และ (b) 70 %RH

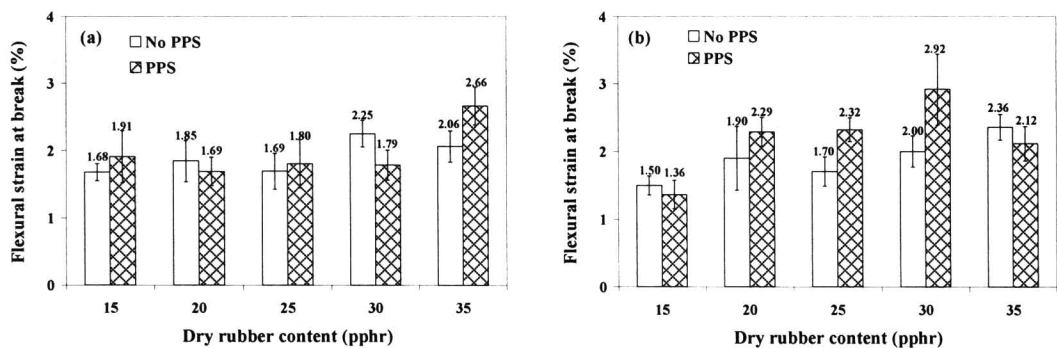


รูปที่ 4.46 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเค้นสูงสุดของโพลิเมอร์ยางธรรมชาติที่ไม่เติม PPS และเติม PPS ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ต่างกัน: (a) 40 %RH และ (b) 70 %RH

รูปที่ 4.47 และ รูปที่ 4.48 แสดงการเปรียบเทียบค่า $\epsilon_{\max}$ และ ϵ_b ของโพลิเมอร์ยางธรรมชาติที่เติมและไม่เติม PPS ถึงแม้ว่ารูปภาพจะแสดงความแตกต่างกันของค่าความเครียดเหล่านี้ แต่เมื่อพิจารณาปริมาณที่เปลี่ยนแปลงไป และค่าของความเครียดนี้ พบว่ามีค่าต่างกันเล็กน้อย



รูปที่ 4.47 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเครียดสูงสุดของโพลิเมอร์ยางธรรมชาติที่ไม่เติม PPS และเติม PPS ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ต่างกัน: (a) 40 %RH และ (b) 70 %RH

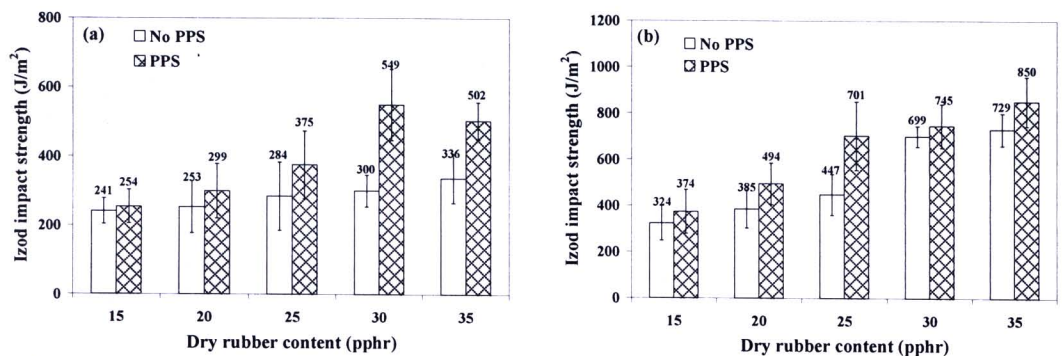


รูปที่ 4.48กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเครียด ณ จุดขาดของโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติไม่เติม PPS และเติม PPS ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ต่างกัน: (a) 40 %RH และ (b) 70 %RH

ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติ 15-35 pph ที่มีการเติม PPS แสดงในตารางที่ 4.27 โฟมที่เก็บไว้ 2 วัน ที่ 40 %RH มีความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเมื่อยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น โดยค่าที่ได้จะอยู่ในช่วง 241-437 J/m² และเมื่อพิจารณาที่ 70 %RH พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 240-525 J/m² ที่ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน ภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH พบว่าสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกที่ได้เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น โดยค่าดังกล่าวจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 437-502 J/m² และ 374-859 J/m² ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของความต้านทานต่อแรงกระแทกเนื่องมาจากปริมาณยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น เพราะยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นมากกว่าแข็ง สามารถรับแรงกระแทกได้มากกว่าแข็ง ทำการเปรียบเทียบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติ 15-35 pph ของโฟมที่เติมและไม่เติม PPS แสดงในรูปที่ 4.49 พบว่าโฟมที่เติม PPS มีสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงกว่าโฟมที่ไม่เติม PPS น่าจะเนื่องจากการเกิดกราฟที่โคพอลิเมอร์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังและน้ำยางธรรมชาติระหว่างการขึ้นรูป

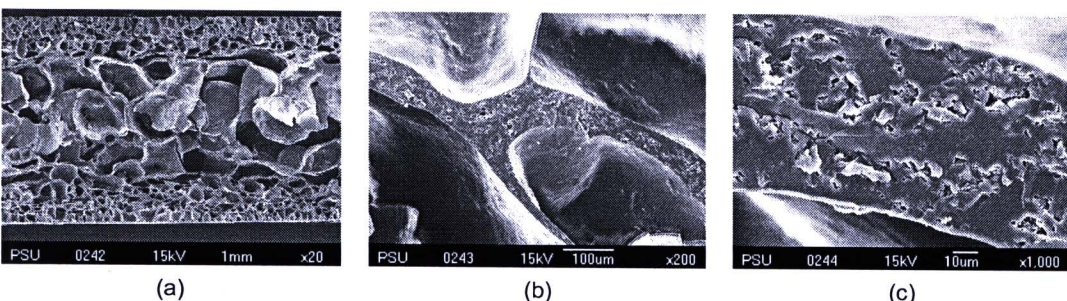
ตารางที่ 4.27 สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติที่มี PPS ปริมาณ 0.025 pph ระยะเวลาในการเก็บ 2 วัน และ 7 วัน ภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH

Storage time (day)	Dry rubber content (pph)	Izod impact strength (J/m ²)	
		40 %RH	70 %RH
2	15	241 ± 38	240 ± 60
	20	253 ± 42	261 ± 48
	25	349 ± 52	381 ± 57
	30	515 ± 67	539 ± 78
	35	437 ± 63	525 ± 89
7	15	254 ± 49	374 ± 95
	20	299 ± 79	494 ± 90
	25	375 ± 98	701 ± 148
	30	549 ± 103	745 ± 94
	35	502 ± 54	850 ± 107

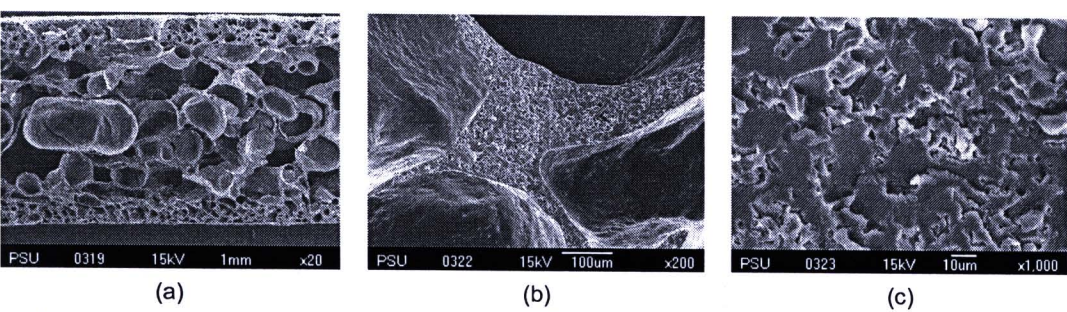


รูปที่ 4.49 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสมบัติความต้านทานต่อแรงดัดโค้งของโพลีเอทิลีนผสมยางธรรมชาติที่ไม่เติม PPS และเติม PPS เก็บไว้ 7 วัน ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ต่างกัน: (a) 40 %RH และ (b) 70 %RH

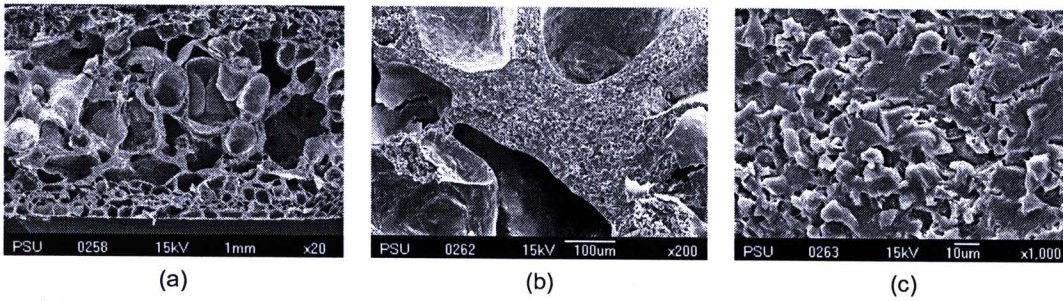
ลักษณะฐานวิทยาศาสตร์ของโพลีเอทิลีนผสมยางธรรมชาติที่เติม PPS แปรปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับ 15-35 pph แสดงในรูปที่ 4.50a-c, รูปที่ 4.51-c และ รูปที่ 4.52a-c ตามลำดับ พบว่าเมื่อยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นทำให้โพลีเอทิลีนมีผนังเซลล์ที่หนาขึ้น ผนังเซลล์ของโพลีเอทิลีนที่หนาขึ้นสอดคล้องกับสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.50 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโพลีเอทิลีนผสมยางธรรมชาติ 15 pph และ PPS เท่ากับ 0.025 pph



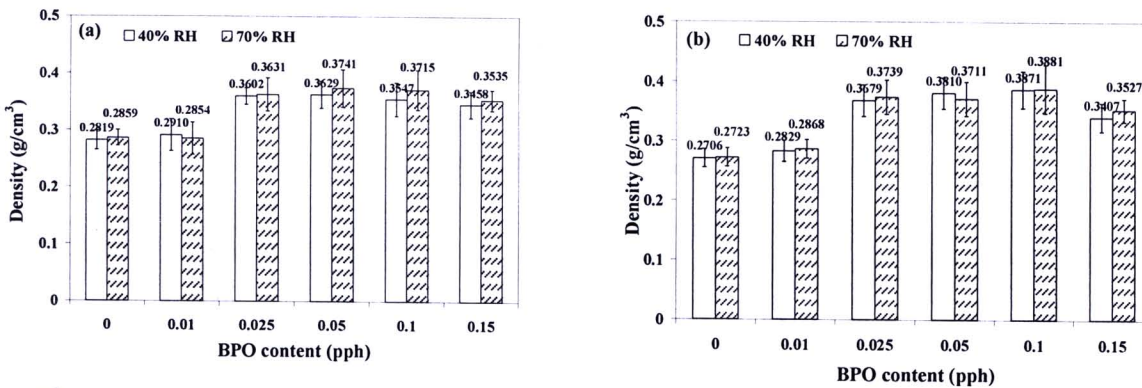
รูปที่ 4.51 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโพลีเอทิลีนผสมยางธรรมชาติ 25 pph และ PPS เท่ากับ 0.025 pph



รูปที่ 4.52 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติ 35 pph และ PPS เท่ากับ 0.025 pph

4.10.3 การแปรปริมาณ BPO ที่ปริมาณยางธรรมชาติคงที่

ผลการทดสอบความหนาแน่นของโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติ 15 pph ทำการแปรปริมาณ BPO แสดงในรูปที่ 4.53 เมื่อปริมาณ BPO เพิ่มขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของโฟมมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณ BPO เท่ากับ 0.05 pph ทำให้ค่าความหนาแน่นสูงกว่าที่สัดส่วนอื่นๆ ที่ปริมาณ BPO เท่ากับ 0.01 pph มีความหนาแน่นใกล้เคียงกันกับตัวอย่างที่ไม่มี BPO แต่เมื่อปริมาณ BPO เท่ากับ 0.025-0.15 pph ทำให้ความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นเมื่อเติม BPO อาจเนื่องมาจาก BPO ทำให้ยางธรรมชาติเกิดการเชื่อมขวางโมเลกุล (crosslink) จากงานวิจัยของ Kiatkamjornwong และคณะ (2001) ระบุว่า BPO ทำให้ยางธรรมชาติเกิดการเชื่อมขวางกันในการเตรียมโฟมแข็งมันสำปะหลังผสมน้ำยางธรรมชาติ ส่งผลให้ความหนืดของแข็งเพิ่มขึ้น แข็งจึงกลายเป็นโฟมได้ยากขึ้น



รูปที่ 4.53 กราฟแสดงอิทธิพลของปริมาณ BPO ต่อความหนาแน่นของโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติ 15 pph เก็บภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH แปรระยะเวลาในการเก็บ: (a) 2 วัน และ (b) 7 วัน

ผลการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติ 15 pph แปรปริมาณ BPO เท่ากับ 0-0.15 pph แสดงในตารางที่ 4.28 และตารางที่ 4.29 ที่ระยะเวลาในการเก็บ 2 วัน พิจารณายภายใต้ 40 %RH พบว่าค่า E เพิ่มขึ้นหลังจากการเติม BPO ในทุกตัวอย่าง ค่าสูงสุดปรากฏในตัวอย่างที่มีปริมาณ BPO เท่ากับ 0.025 pph ซึ่งเป็นการเพิ่มจาก 321 MPa เป็น 461 MPa ค่า σ_{max} มีค่าเพิ่มขึ้นหลังการเติม BPO และปริมาณ BPO ที่ให้ค่าสูงสุดคือ 0.05 pph โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 3.80 MPa เป็น 5.11 MPa และที่ปริมาณ BPO เท่ากับ 0.025 pph ให้ค่าสูงใกล้เคียงกันด้วย (4.99 MPa) ส่วนค่า ϵ_{max} และ ϵ_b มีค่าใกล้เคียงกัน พิจารณายภายใต้ 70 %RH พบว่าการเติม BPO ทำให้ค่า E เพิ่มขึ้น ยกเว้นตัวอย่างที่มีปริมาณ BPO เท่ากับ 0.10 pph ที่ให้ค่าลดลงเล็กน้อย โดยปริมาณที่ให้ค่า E สูงสุดคือ 0.15 pph ค่าเพิ่มขึ้นจาก 272 MPa เป็น 363 MPa ค่า σ_{max} เพิ่มขึ้นเมื่อเติม BPO ค่าสูงสุดที่ปรากฏในตัวอย่างที่มี BPO

เท่ากับ 0.15 pph ซึ่งเป็นการเพิ่มขึ้นจาก 3.43 MPa เป็น 5.39 MPa ส่วนความเครียดทั้งค่า ϵ_{max} และค่า ϵ_b มีค่าใกล้เคียงกัน ที่ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน (ตารางที่ 4.29) พบว่าค่า E เพิ่มขึ้นเมื่อเติม BPO ยกเว้นตัวอย่างที่มี BPO

ตารางที่ 4.28 อิทธิพลของ BPO ต่อสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติ 15 pph ระยะเวลาในการเก็บ 2 วัน เก็บภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH

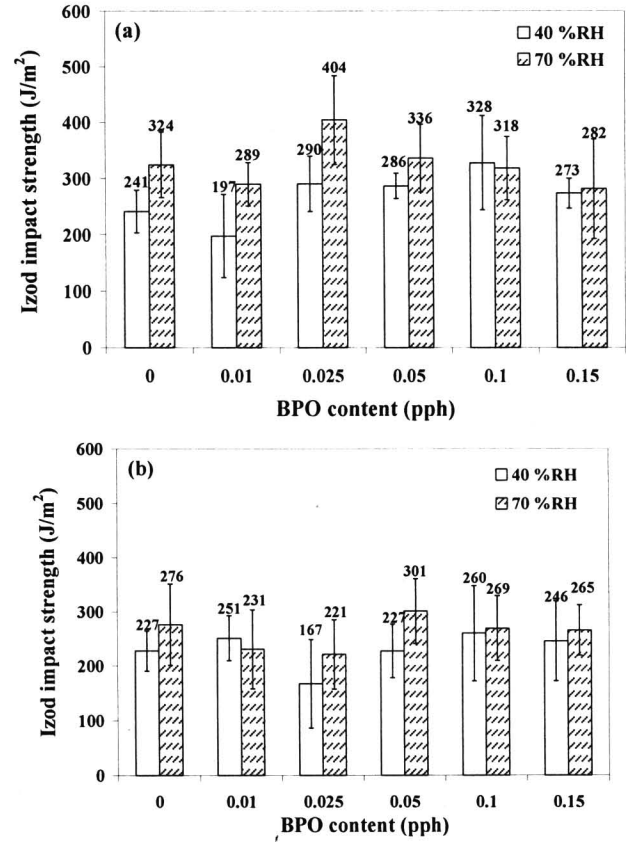
Relative humidity (%)	BPO content (pph)	E (MPa)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{max} (%)	ϵ_b (%)
40	0	321 ± 45	3.80 ± 0.35	1.43 ± 0.28	1.47 ± 0.28
	0.01	350 ± 65	4.42 ± 1.03	1.50 ± 0.20	1.64 ± 0.26
	0.025	461 ± 86	4.99 ± 0.79	1.27 ± 0.25	1.31 ± 0.27
	0.05	389 ± 53	5.11 ± 0.61	1.66 ± 0.37	1.71 ± 0.37
	0.1	388 ± 61	4.52 ± 0.70	1.40 ± 0.22	1.37 ± 0.18
	0.15	384 ± 80	4.24 ± 0.70	1.26 ± 0.21	1.30 ± 0.21
70	0	272 ± 51	3.43 ± 0.73	1.56 ± 0.19	1.60 ± 0.20
	0.01	298 ± 89	3.92 ± 0.91	1.77 ± 0.23	2.04 ± 0.26
	0.025	336 ± 67	4.72 ± 0.84	1.93 ± 0.23	1.99 ± 0.25
	0.05	350 ± 55	4.95 ± 0.86	1.87 ± 0.14	1.98 ± 0.15
	0.1	264 ± 33	3.82 ± 0.55	1.89 ± 0.15	2.07 ± 0.15
	0.15	363 ± 78	5.39 ± 0.84	1.95 ± 0.28	2.03 ± 0.26

ตารางที่ 4.29 อิทธิพลของ BPO ต่อสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติ 15 pph ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน เก็บภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH

Relative humidity (%)	BPO content (pph)	E (MPa)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{max} (%)	ϵ_b (%)
40	0	339 ± 53	4.49 ± 0.82	1.65 ± 0.13	1.68 ± 0.13
	0.01	323 ± 79	4.17 ± 0.98	1.68 ± 0.14	1.67 ± 0.26
	0.025	360 ± 77	4.34 ± 0.78	1.49 ± 0.12	1.51 ± 0.12
	0.05	335 ± 30	4.49 ± 0.60	1.74 ± 0.18	1.79 ± 0.17
	0.1	371 ± 32	4.93 ± 0.46	1.65 ± 0.22	1.67 ± 0.23
	0.15	381 ± 89	4.81 ± 0.87	1.60 ± 0.25	1.68 ± 0.24
70	0	273 ± 43	3.06 ± 0.64	1.36 ± 0.14	1.47 ± 0.16
	0.01	237 ± 25	2.75 ± 0.34	1.45 ± 0.14	1.86 ± 0.12
	0.025	294 ± 52	4.06 ± 0.64	1.89 ± 0.19	2.05 ± 0.22
	0.05	285 ± 33	3.57 ± 0.46	1.61 ± 0.14	1.70 ± 0.12
	0.1	285 ± 32	3.31 ± 0.23	1.55 ± 0.21	1.90 ± 0.24
	0.15	310 ± 36	4.06 ± 0.48	1.69 ± 0.12	1.82 ± 0.10

เท่ากับ 0.01 pph ที่ให้ค่าลดลงเล็กน้อย โดยค่าสูงสุดปรากฏที่ปริมาณ BPO เท่ากับ 0.15 pph ซึ่งเพิ่มขึ้นจาก 339 MPa เป็น 381 MPa ค่า σ_{max} เพิ่มขึ้นเมื่อเติม BPO แต่ตัวอย่างที่มี BPO เท่ากับ 0.01 pph ให้ค่าลดลงเล็กน้อย ค่า σ_{max} สูงสุดที่ปริมาณ BPO เท่ากับ 0.10 pph โดยค่าเพิ่มขึ้นจาก 4.49 MPa เป็น 4.93 MPa ซึ่งเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ค่า ϵ_{max} และ ϵ_b มีค่าใกล้เคียงกัน พิจารณายาได้ 70 %RH พบว่าค่า E มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเติม BPO เพิ่มขึ้น ซึ่งค่าที่ได้อยู่ในช่วง 237-310 MPa ค่า σ_{max} มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติม BPO ยกเว้นตัวอย่างที่ BPO เท่ากับ 0.01 pph ที่ให้ค่าลดลงเล็กน้อย ปริมาณ BPO ที่ทำให้ค่าสูงสุด คือ 0.025 pph และ 0.15 pph ทำให้ค่า σ_{max} เพิ่มขึ้นจาก 3.06 MPa เป็น 4.06 MPa ส่วนค่า ϵ_{max} และ ϵ_b มีค่าใกล้เคียงกัน การเติม BPO ทำให้ค่า E และค่า σ_{max} ของโฟมเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจาก BPO ทำให้ยางธรรมชาติเกิดการเชื่อมขวางกัน

รูปที่ 4.54 แสดงอิทธิพลของปริมาณ BPO ต่อความต้านทานต่อแรงกระแทก ที่ระยะเวลาในการเก็บ 2 วัน (รูปที่ 4.54a) พิจารณายาได้ 40 %RH พบว่าการเติม BPO ทำให้สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกมีค่าในช่วง 197-328 J/m² พิจารณายาได้ 70 %RH พบว่าที่ BPO เท่ากับ 0.025 pph ทำให้สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกมีค่าสูงสุดค่าที่ได้ เท่ากับ 404 J/m² รูปที่ 4.54b แสดงสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ 15 pph ที่ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน พิจารณายาได้ 40 %RH และ 70 %RH พบว่าค่าที่ได้อยู่ในช่วง 167-301 J/m² และ 221-301 J/m² ตามลำดับ



รูปที่ 4.54 กราฟแสดงอิทธิพลของ BPO ต่อความต้านทานต่อแรงกระแทกของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ 15 pph เก็บยาได้ 40 %RH และ 70 %RH แปรระยะเวลาในการเก็บ: (a) 2 วัน และ (b) 7 วัน

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติ 15 pph ที่มีการแปรปริมาณ BPO ระหว่าง 0-0.15 pph พบว่าผลการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้ง (ค่า E และ σ_{max}) สอดคล้องกันกับสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก โดยที่เมื่อ BPO เพิ่มขึ้นทำให้สมบัติทั้งสองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นดังกล่าวน่าจะมาจากการเชื่อมขวางกันของยางธรรมชาติ พิจารณาสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติ 15 pph พบว่าการเติม PPS ให้ค่าสูงกว่า BPO เนื่องจาก PPS เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาที่ละลายน้ำได้ ทำให้สามารถแทรกเข้าไปในกายโมเลกุลของแข็งมันสำปะหลังและยางธรรมชาติได้ดีกว่า จึงทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมากกว่า ส่งผลให้สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติที่เติม PPS สูงกว่าโฟมที่เติม BPO ดังแสดงในตารางที่ 4.30

ตารางที่ 4.30 เปรียบเทียบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติ 15 pph แปรปริมาณ PPS และ BPO ระหว่าง 0-0.15 pph ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน ภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH

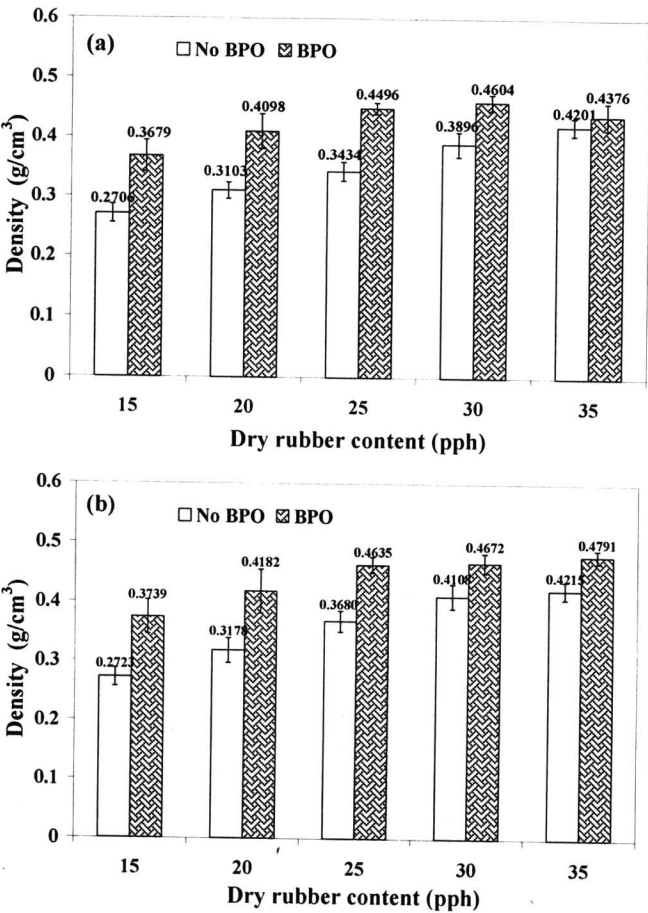
Initiator content (pph)	Impact strength (J/m ²)			
	40 %RH		70 %RH	
	PPS	BPO	PPS	BPO
0.01	303 ± 40	197 ± 42	344 ± 101	289 ± 73
0.025	254 ± 49	277 ± 98	374 ± 95	466 ± 97
0.05	187 ± 37	286 ± 49	324 ± 88	336 ± 60
0.1	199 ± 58	328 ± 88	365 ± 66	318 ± 60
0.15	266 ± 55	273 ± 74	435 ± 51	282 ± 46

4.10.4 การแปรปริมาณยางธรรมชาติที่ปริมาณ BPO คงที่

ผลการทดสอบความหนาแน่นของโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติระหว่าง 15-35 pph และเติม BPO ปริมาณ 0.025 pph แสดงในตารางที่ 4.31 ที่ระยะเวลาในการเก็บ 2 วัน ภายใต้ 40 %RH และ 70%RH พบว่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมียางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าที่ได้อยู่ในช่วง 0.3602-0.4538 g/cm³ และ 0.3631-0.4608 g/cm³ ตามลำดับ และระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน พบว่าค่าความหนาแน่นที่ได้เพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.3679-0.4376 g/cm³ และ 0.3739-0.4791 g/cm³ ภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความหนาแน่นของโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติที่เติมและไม่เติม BPO ดังแสดงในรูปที่ 4.55 พบว่าโฟมที่เติม BPO มีความหนาแน่นสูงกว่าที่ไม่เติม BPO เนื่องจาก BPO ทำให้ยางธรรมชาติเกิดการเชื่อมขวางกันส่งผลให้ความหนืดของส่วนผสมเพิ่มขึ้น แป้งและส่วนผสมจึงกลายเป็นโฟมได้ยากขึ้น จึงทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น สมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติ 15-35 pph ที่มีการเติม BPO ระยะเวลาในการเก็บ 2 วัน แสดงในตารางที่ 4.32 พิจารณาภายใต้ 40 %RH พบว่าค่า E ที่ปริมาณยางธรรมชาติ 15-35 pph มีแนวโน้มลดลง โดยเมื่อยางธรรมชาติเท่ากับ 35 pph ค่าที่ได้ลดลงจาก 461 MPa เป็น 271 MPa ค่า σ_{max} มีแนวโน้มลดลงเมื่อยางธรรมชาติจาก 4.99 MPa ไปเป็น 3.07 MPa เมื่อเติมยางธรรมชาติเท่ากับ 15-35 pph พิจารณาภายใต้ 70 %RH พบว่าค่า E ลดลงหลังจากเติมยางธรรมชาติในทุกตัวอย่าง โดยค่าที่ได้ลดลงจาก 336 MPa ไปเป็น 177 MPa ค่า σ_{max} ที่ได้มีค่าลดลงจาก 4.72 MPa ไปเป็น 2.82 MPa ส่วนค่า ϵ_{max} และ ϵ_b ที่ปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับ 20-30 pph มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าที่ได้เท่ากับ 2.58%, 2.47% และ 2.15% และ 2.71%, 3.05% และ 2.60% ตามลำดับ ผลการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติ ที่ปริมาณ 15-35 pph และเติม BPO ที่ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน แสดงในตารางที่ 4.33

ตารางที่ 4.31 ความหนาแน่นของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติที่มี BPO ปริมาณ 0.025 pph ระยะเวลาในการเก็บ 2 วัน และ 7 วัน เก็บภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH

Storage time (day)	Dry rubber content (pph)	Density (g/cm ³)	
		40 %RH	70 %RH
2	15	0.3602 ± 0.0147	0.3631 ± 0.0291
	20	0.3907 ± 0.0200	0.3897 ± 0.0329
	25	0.4390 ± 0.0138	0.4493 ± 0.0138
	30	0.4510 ± 0.0104	0.4565 ± 0.0096
	35	0.4538 ± 0.0153	0.4608 ± 0.0151
7	15	0.3679 ± 0.0265	0.3739 ± 0.0288
	20	0.4098 ± 0.0293	0.4182 ± 0.0369
	25	0.4496 ± 0.0096	0.4635 ± 0.0131
	30	0.4604 ± 0.0132	0.4672 ± 0.0161
	35	0.4376 ± 0.0228	0.4791 ± 0.0110



รูปที่ 4.55 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความหนาแน่นของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ ที่ไม่เติม BPO และเติม BPO ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ต่างกัน: (a) 40 %RH และ (b) 70 %RH

ตารางที่ 4.32 สมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติที่มี BPO ปริมาณ 0.025 pph
ระยะเวลาในการเก็บ 2 วัน เก็บภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH

Relative humidity (%)	Dry rubber content (pph)	E (MPa)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\epsilon_{\max}$ (%)	ϵ_b (%)
40	15	461 ± 86	4.99 ± 0.79	1.27 ± 0.25	1.31 ± 0.27
	20	337 ± 66	4.28 ± 0.89	1.59 ± 0.16	1.59 ± 0.18
	25	308 ± 37	4.01 ± 0.64	1.66 ± 0.18	1.67 ± 0.17
	30	311 ± 54	3.73 ± 0.63	1.57 ± 0.16	1.64 ± 0.36
	35	271 ± 42	3.07 ± 0.56	1.46 ± 0.14	1.49 ± 0.17
70	15	336 ± 67	4.72 ± 0.84	1.93 ± 0.23	1.99 ± 0.25
	20	218 ± 34	3.55 ± 0.71	2.58 ± 0.24	2.71 ± 0.33
	25	177 ± 61	3.07 ± 0.47	2.47 ± 0.31	3.05 ± 0.23
	30	205 ± 33	2.82 ± 0.53	2.15 ± 0.28	2.60 ± 0.30
	35	247 ± 34	3.00 ± 0.49	1.63 ± 0.15	1.78 ± 0.21

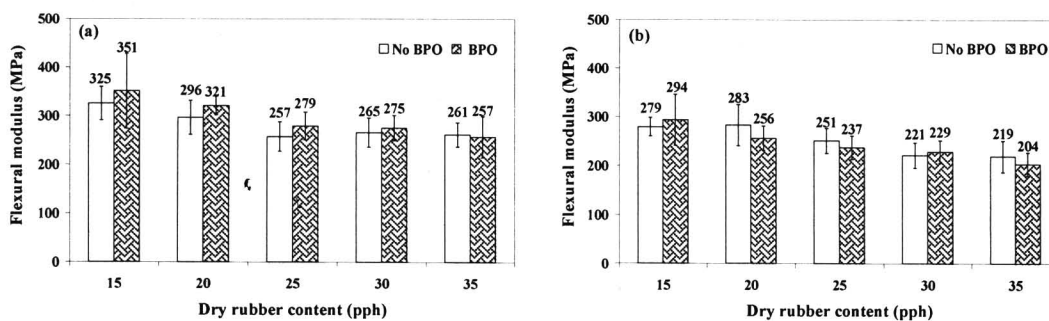
ตารางที่ 4.33 สมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติที่ BPO ปริมาณ 0.025 pph
ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน เก็บภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH

Relative humidity (%)	Dry rubber content (pph)	E (MPa)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\epsilon_{\max}$ (%)	ϵ_b (%)
40	15	360 ± 77	4.34 ± 0.78	1.49 ± 0.12	1.51 ± 0.12
	20	317 ± 22	4.12 ± 0.52	1.62 ± 0.23	1.63 ± 0.24
	25	293 ± 52	4.06 ± 0.86	1.91 ± 0.24	1.97 ± 0.26
	30	277 ± 51	3.52 ± 0.71	1.70 ± 0.19	1.94 ± 0.33
	35	257 ± 42	3.25 ± 0.48	1.71 ± 0.20	1.82 ± 0.24
70	15	294 ± 52	4.06 ± 0.64	1.89 ± 0.19	2.05 ± 0.22
	20	250 ± 30	2.41 ± 0.41	1.29 ± 0.13	1.64 ± 0.20
	25	241 ± 31	2.45 ± 0.38	1.55 ± 0.17	1.95 ± 0.21
	30	229 ± 35	2.23 ± 0.37	1.41 ± 0.22	1.96 ± 0.29
	35	204 ± 24	2.31 ± 0.33	1.84 ± 0.32	2.80 ± 0.25

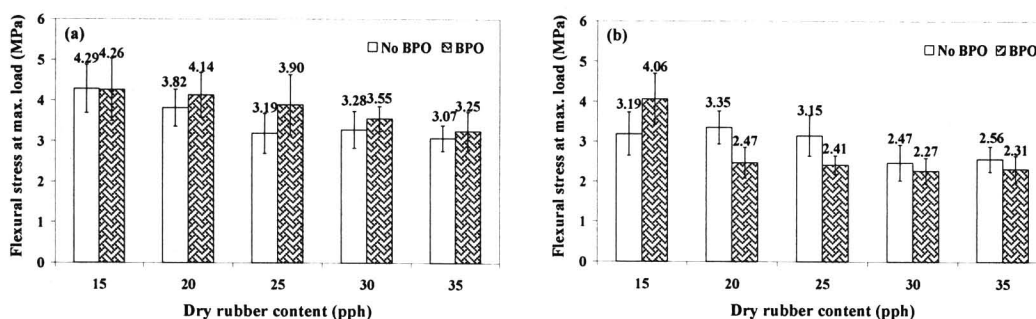
จากตารางที่ 4.33 พิจารณภายใต 40 %RH พบว่าค่า E ที่ปริมาณยางธรรมชาติ 15-35 pph โดยลดลงจาก 306 MPa ไปเป็น 257 MPa ค่า $\sigma_{\max}$ ที่ได้ลดลงจาก 4.34 MPa ไปเป็น 3.25 MPa ส่วนค่า $\epsilon_{\max}$ และ ϵ_b มีค่าใกล้เคียงกัน และพิจารณาภายใต 70 %RH พบว่าในทุกตัวอย่างที่ทดลองค่า E ลดลงหลังจากเติมยางธรรมชาติค่าที่ได้ลดลงจาก 294 MPa ไปเป็น 204 MPa ค่า $\sigma_{\max}$ ลดลงจาก 4.06 MPa ไปเป็น 2.23 MPa ที่ปริมาณยางธรรมชาติ 15-35 pph ส่วนค่า $\epsilon_{\max}$ และ ϵ_b มีค่าใกล้เคียงกัน โฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติที่มีการเติม BPO จะมีค่า E และค่า $\sigma_{\max}$ ลดลงเมื่อ

ปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น การลดลงของค่าดังกล่าวเป็นผลเนื่องมาจากปริมาณยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาณของ BPO ยังคงเท่าเดิม จึงทำให้ยางธรรมชาติเกิดการเชื่อมขวางกันได้น้อยลงเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น

รูปที่ 4.56a และรูปที่ 4.56b แสดงการเปรียบเทียบค่า E ของโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติตั้งแต่ 15-35 pph ของโฟมที่เติมและไม่เติม BPO ที่ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน ภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH ตามลำดับ พบว่าโฟมที่เติมและไม่เติม BPO มีค่า E ใกล้เคียงกันแม้ว่าจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น รูปที่ 4.57 แสดงการเปรียบเทียบค่า σ_{max} ของโฟมที่เติมและไม่เติม BPO พิจารณาภายใต้ 40 %RH (รูปที่ 4.57a) พบว่าค่า σ_{max} ของโฟมที่เติมและไม่เติม BPO มีค่าใกล้เคียงกันแม้ว่าโฟมที่เติม BPO จะมีค่าสูงกว่าโฟมที่ไม่เติม BPO และเมื่อพิจารณาภายใต้ 70 %RH (รูปที่ 4.57b) พบว่าค่า σ_{max} ของโฟมที่เติมและไม่เติม BPO มีค่าใกล้เคียงกัน



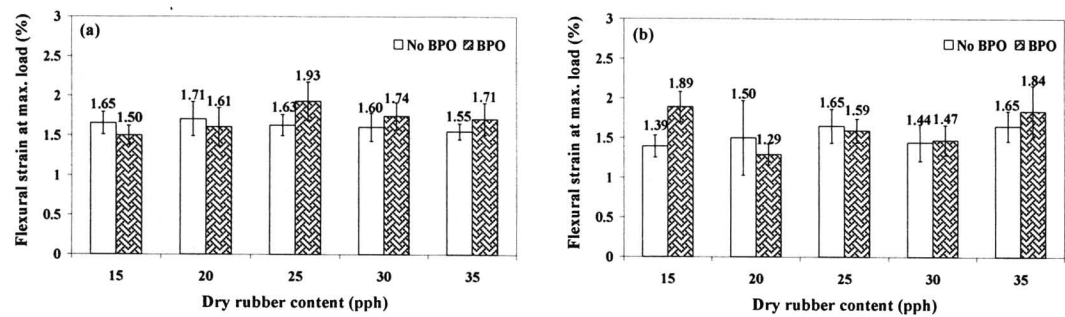
รูปที่ 4.56 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่ามอดูลัสของโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติที่ไม่เติม BPO และเติม BPO ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ต่างกัน: (a) 40 %RH และ (b) 70 %RH



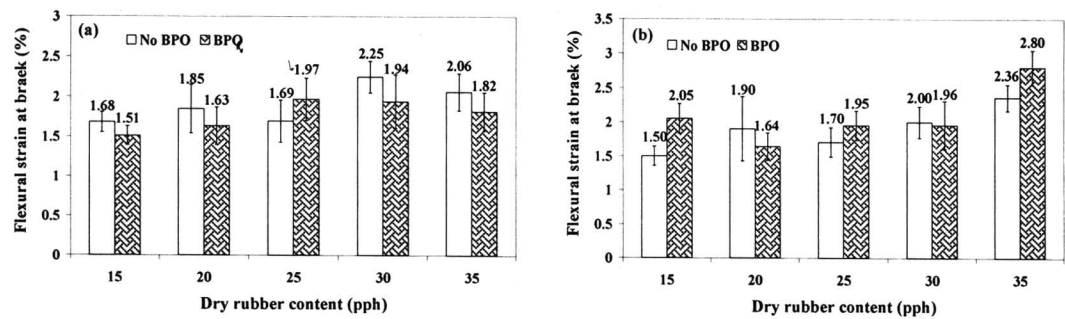
รูปที่ 4.57 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเค้นสูงสุดของโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติ ที่ไม่เติม BPO และเติม BPO ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ต่างกัน: (a) 40 %RH และ (b) 70 %RH

รูปที่ 4.58 แสดงการเปรียบเทียบค่า ϵ_{max} ของโฟมที่เติมและไม่เติม BPO พิจารณาภายใต้ 40 %RH (รูปที่ 4.58a) และ 70 %RH (รูปที่ 4.58b) พบว่าค่า ϵ_b ของโฟมที่เติมและไม่เติม BPO มีค่าใกล้เคียงกัน รูปที่ 4.59 แสดงการเปรียบเทียบค่า ϵ_b ของโฟมที่เติมและไม่เติม BPO พิจารณาภายใต้ 40 %RH (รูปที่ 4.59a) พบว่าค่า ϵ_b ของโฟมที่เติมและไม่เติม BPO มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาภายใต้ 70 %RH (รูปที่ 4.59b) พบว่าค่า ϵ_b ของโฟมที่เติมและไม่เติม BPO มีค่าใกล้เคียงกันแม้ว่าค่า ϵ_b จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเติมยางธรรมชาติ โฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติที่เติม BPO ทำให้ความแข็งแรงลดลงเนื่องจาก BPO ไม่สามารถละลายน้ำอาจจะมีผลทำให้เกิดการเชื่อมขวางในเฟสของยางธรรมชาติมากกว่าการเชื่อมโยงกันระหว่างแป้งมันสำปะหลังและยางธรรมชาติ ผลการทดสอบสมบัติความต้านทาน

ต่อแรงกระแทกของโฟมแบ่งผสมยาง ที่มีการเติม BPO แปรปริมาณทางธรรมชาติ 15-35 pph ระยะเวลาในการเก็บ 2 วัน แสดงในตารางที่ 4.34



รูปที่ 4.58 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเครียดสูงสุดของโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติที่ไม่เติม BPO และเติม BPO ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ต่างกัน: (a) 40 %RH และ (b) 70 %RH

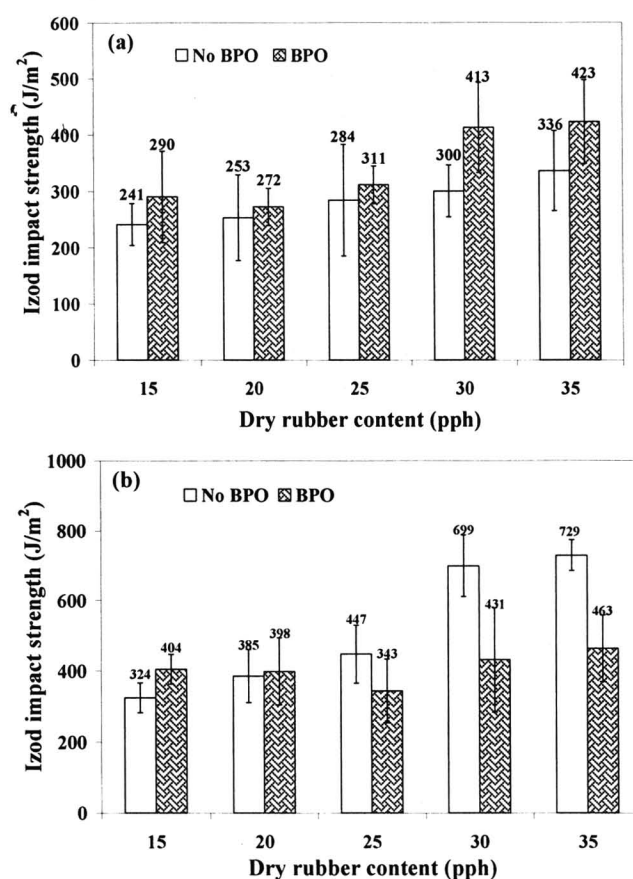


รูปที่ 4.59 กราฟแสดงการเปรียบเทียบเครียด ณ จุดขาดของโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติ ที่ไม่เติม BPO และเติม BPO ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ต่างกัน: (a) 40 %RH และ (b) 70 %RH

ตารางที่ 4.34 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติที่มีการเติม BPO ปริมาณ 0.025 pph ระยะเวลาในการเก็บ 2 วัน และ 7 วัน ภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH

Storage time (day)	BPO content (pph)	Impact strength (J/m ²)	
		40 %RH	70 %RH
2	15	167 ± 49	221 ± 79
	20	243 ± 40	350 ± 35
	25	280 ± 50	344 ± 77
	30	365 ± 31	375 ± 44
	35	413 ± 51	434 ± 50
7	15	290 ± 81	404 ± 64
	20	272 ± 33	398 ± 52
	25	311 ± 33	343 ± 77
	30	413 ± 80	431 ± 87
	35	423 ± 74	463 ± 59

พิจารณาภายใต้ 40 %RH พบว่าสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับ 15-35 pph โดยค่าที่ได้เพิ่มขึ้นจาก 167 J/m² เป็น 413 J/m² พิจารณาภายใต้ 70 %RH พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 221 J/m² เป็น 434 J/m² และที่ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน พิจารณาภายใต้ 40 %RH พบว่ายางธรรมชาติทำให้สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้น ยกเว้นที่ปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับ 25 pph ที่ให้ค่าลดลงเล็กน้อย และค่าที่ได้อยู่ในช่วง 272-423 J/m² พิจารณาภายใต้ 70 %RH พบว่าสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้น ยกเว้นที่ปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับ 25 pph ที่ให้ค่าลดลง แต่ค่าที่ได้ยังคงอยู่ในช่วงเดียวกันโดยมีค่าอยู่ในช่วง 343-463 J/m² การเพิ่มขึ้นของสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก เนื่องจากยางธรรมชาติที่เติมลงไปในโฟมแบ่งทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเหนียว (toughening agent) ให้แก่โฟม เพราะยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นจึงสามารถดูดซับแรงกระแทกได้มากกว่าโฟม จึงทำให้สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น รูปที่ 4.60 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกที่เติมและไม่เติม BPO

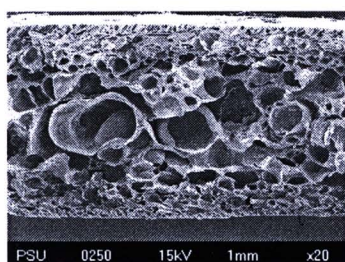


รูปที่ 4.60 กราฟแสดงการเปรียบเทียบเครีด ณ จุดขาดของโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติที่ไม่เติม BPO และเติม BPO ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ต่างกัน: (a) 40 %RH และ (b) 70 %RH

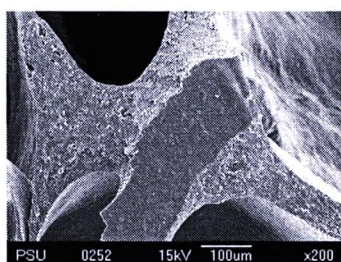
พิจารณาภายใต้ 40 %RH (รูปที่ 4.60a) พบว่าโฟมแบ่งที่เติมและไม่เติม BPO ที่ปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับ 15-25 pph มีสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกใกล้เคียงกัน แต่ที่ 30-35 pph โฟมที่เติม BPO มีค่าสูงกว่าโฟมที่ไม่เติม BPO เล็กน้อย และภายใต้ 70 %RH (รูปที่ 4.60b) พบว่าโฟมแบ่งที่เติมและไม่เติม BPO ที่ปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับ 15-25 pph มีสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกใกล้เคียงกัน แต่ที่ 30-35 pph โฟมที่ไม่เติม BPO มีค่าสูงกว่า

โฟมที่เติม BPO เล็กน้อย การเปลี่ยนแปลงของสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของโฟมที่เติมและไม่เติม BPO ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำทำให้โฟมแข็งไม่สามารถดูดซับความชื้นจากอากาศได้ จึงทำให้โฟมแข็งที่เติมและไม่เติม BPO มีค่าใกล้เคียงกัน แต่การเก็บตัวอย่างภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์สูงทำให้โฟมที่ไม่เติม BPO ดูดซับความชื้นจากอากาศได้มากกว่าโฟมที่เติม BPO เพราะโฟมเกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างแป้งมันสำปะหลังและยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติเกิดการเชื่อมขวางกันเอง จึงทำให้โฟมดูดซับความชื้นได้น้อยกว่าโฟมที่ไม่เติม BPO จึงทำให้โฟมที่เติม BPO มีค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกต่ำกว่าโฟมที่ไม่เติม BPO

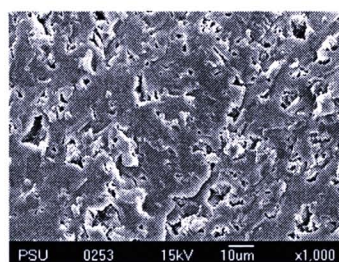
ลักษณะฐานฐานวิทยาของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติที่เติม BPO ดังแสดงในรูปที่ 4.61a-c และ 4.62a-c ที่มีปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับ 15 pph และ 35 pph ตามลำดับ เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของยางธรรมชาติ พบว่าเมื่อปริมาณยางธรรมชาติมากขึ้น เนื้อโฟมมีความขรุขระมากขึ้น (รูป c)



(a)

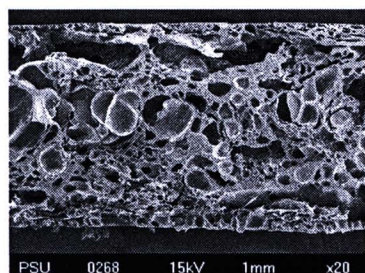


(b)

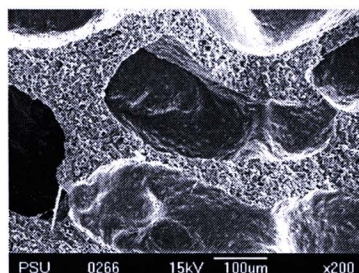


(c)

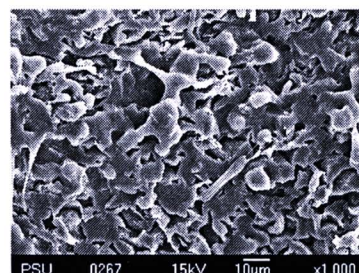
รูปที่ 4.61 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติที่มีการเติม 15 pph เติม BPO เท่ากับ 0.025 pph



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 4.62 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ 35 pph เติม BPO เท่ากับ 0.025 pph

4.10.5 การเปรียบเทียบการเติม PPS และ BPO ที่มีการแปรปริมาณยางธรรมชาติ

เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารริเริ่มปฏิกิริยาทั้งสองชนิด ทำการเปรียบเทียบระหว่างการเติม PPS และ BPO โดยแปรปริมาณของยางธรรมชาติเท่ากับ 15, 20, 25, 30 และ 35 pph ปริมาณของสารริเริ่มปฏิกิริยาคงที่เท่ากับ 0.025 pph ที่ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่าง 7 วัน ภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH

ตารางที่ 4.35 แสดงการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ 15-35 pph ระหว่างการเติม PPS และ BPO ที่ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน พิจารณาภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH พบว่าที่ปริมาณยางธรรมชาติตั้งแต่ 15-35 pph โฟมที่เติม PPS มีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าโฟมที่เติม BPO เนื่องจาก PPS ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติลดลงจึงทำให้เกิดเป็นโฟมได้ง่ายกว่าการเติม BPO เพราะ BPO สามารถทำให้ยางธรรมชาติเกิดการเชื่อมขวางกันจึงทำให้ขัดขวางการเกิดเป็นโฟมของแป้ง จึงทำให้มีความหนาแน่นสูงกว่าโฟมที่เติม PPS ตาราง

ที่ 4.36 แสดงการเปรียบเทียบค่า E ของโฟมแปรงผสมยางธรรมชาติ 15-35 pph ระหว่างการเติม PPS และ BPO ที่ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน พิจารณากายใต้ 40 %RH และ 70 %RH พบว่าที่ปริมาณยางธรรมชาติตั้งแต่ 15-35 pph โฟมที่เติม PPS มีค่ามอดุลัสต่ำกว่าโฟมที่เติม BPO ทุกตัวอย่าง ตารางที่ 4.37 แสดงการเปรียบเทียบค่า σ_{max} ของโฟมแปรงผสมยางธรรมชาติ 15-35 pph ระหว่างการเติม PPS และ BPO ที่ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน พิจารณากายใต้ 40 %RH และ 70 %RH พบว่าในทุกตัวอย่างโฟมที่เติม PPS ค่าความเค้นสูงสุดน้อยกว่าโฟมที่เติม BPO การที่โฟม PPS มีความแข็งแรง (ค่า E และ σ_{max}) ลดลงเพราะการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ และ BPO ทำให้ยางธรรมชาติเกิดการเชื่อมขวางกันส่งผลให้ผลโฟมมีความแข็งแรงสูงกว่าโฟมที่เติม PPS ตารางที่ 4.38 แสดงการเปรียบเทียบค่า ϵ_{max} ของโฟมที่เติม PPS และเติม BPO ที่ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน พิจารณากายใต้ 40 %RH และ 70 %RH พบว่าเมื่อยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นมีค่า ϵ_{max} ของโฟมที่เติม PPS และ BPO มีค่าใกล้เคียงกัน แม้ว่าโฟมที่เติม PPS จะมีแนวโน้มน้อยกว่าโฟมที่เติม BPO ตารางที่ 4.39 แสดงการเปรียบเทียบค่า ϵ_b ของโฟมที่เติม PPS และ BPO ที่ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน พิจารณากายใต้ 40 %RH และ 70 %RH พบว่าเมื่อยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นมีค่า ϵ_b ของโฟมที่เติม PPS และ BPO มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นสารริเริ่มปฏิกิริยาทั้งสองชนิดไม่ได้ทำให้ค่าความเครียดของโฟมแปรงผสมยางธรรมชาติเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 4.35 ความหนาแน่นของโฟมแปรงผสมยางธรรมชาติที่มีการเติม PPS และ BPO ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน กายใต้ 40 %RH และ 70 %RH

Dry rubber content (pph)	Density (g/cm ³)			
	40 %RH		70 %RH	
	PPS	BPO	PPS	BPO
15	0.2320 ± 0.0096	0.3679 ± 0.0265	0.2393 ± 0.0132	0.3739 ± 0.0288
20	0.3110 ± 0.0295	0.4098 ± 0.0293	0.3117 ± 0.0226	0.4182 ± 0.0369
25	0.3438 ± 0.0289	0.4496 ± 0.0096	0.3460 ± 0.0434	0.4635 ± 0.0131
30	0.3889 ± 0.0231	0.4604 ± 0.0132	0.3901 ± 0.0250	0.4672 ± 0.0161
35	0.4000 ± 0.0185	0.4376 ± 0.0228	0.4035 ± 0.0231	0.4791 ± 0.0110

ตารางที่ 4.36 ค่ามอดุลัสของโฟมแปรงผสมยางธรรมชาติที่มีการเติม PPS และ BPO ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน กายใต้ 40 %RH และ 70 %RH

Dry rubber content (pph)	E (MPa)			
	40 %RH		70 %RH	
	PPS	BPO	PPS	BPO
15	230 ± 25	360 ± 77	164 ± 15	294 ± 52
20	292 ± 30	317 ± 22	202 ± 22	250 ± 30
25	270 ± 27	293 ± 52	205 ± 18	241 ± 31
30	225 ± 31	277 ± 51	154 ± 22	229 ± 35
35	180 ± 18	257 ± 42	175 ± 28	204 ± 24

ตารางที่ 4.37 ค่าความเค้นสูงสุดของโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติที่มีการเติม PPS และ BPO ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน ภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH

Dry rubber content (pph)	$\sigma_{\max}$ (MPa)			
	40 %RH		70 %RH	
	PPS	BPO	PPS	BPO
15	2.96 ± 0.38	4.34 ± 0.78	1.49 ± 0.14	4.06 ± 0.64
20	3.68 ± 0.38	4.12 ± 0.52	2.52 ± 0.33	2.41 ± 0.41
25	3.49 ± 0.40	4.06 ± 0.86	2.54 ± 0.23	2.45 ± 0.38
30	2.79 ± 0.29	3.52 ± 0.71	1.79 ± 0.23	2.23 ± 0.37
35	2.07 ± 0.26	3.25 ± 0.48	1.97 ± 0.39	2.31 ± 0.33

ตารางที่ 4.38 ค่าความเครียดสูงสุดของโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติที่มีการเติม PPS และ BPO ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน ภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH

Dry rubber content (pph)	$\epsilon_{\max}$ (%)			
	40 %RH		70 %RH	
	PPS	BPO	PPS	BPO
15	1.85 ± 0.25	1.49 ± 0.12	1.13 ± 0.10	1.89 ± 0.19
20	1.60 ± 0.11	1.62 ± 0.23	1.94 ± 0.14	1.29 ± 0.13
25	1.66 ± 0.30	1.91 ± 0.24	1.91 ± 0.19	1.55 ± 0.17
30	1.62 ± 0.21	1.70 ± 0.19	1.81 ± 0.19	1.41 ± 0.22
35	1.83 ± 0.21	1.71 ± 0.20	1.52 ± 0.20	1.84 ± 0.32

ตารางที่ 4.39 ค่าความเครียด ณ จุดขาดของโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติที่มีการเติม PPS และ BPO ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน ภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH

Dry rubber content (pph)	ϵ_b (%)			
	40 %RH		70 %RH	
	PPS	BPO	PPS	BPO
15	1.91 ± 0.39	1.51 ± 0.12	1.36 ± 0.21	2.05 ± 0.22
20	1.69 ± 0.21	1.63 ± 0.24	2.29 ± 0.21	1.64 ± 0.20
25	1.80 ± 0.36	1.97 ± 0.26	2.32 ± 0.18	1.95 ± 0.21
30	1.79 ± 0.22	1.94 ± 0.33	2.92 ± 0.52	1.96 ± 0.29
35	2.66 ± 0.28	1.82 ± 0.24	2.12 ± 0.25	2.80 ± 0.25

ตารางที่ 4.40 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงกระทำของโฟมที่เติม PPS และ BPO ที่ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน พิจารณภายใต้ 40 %RH พบว่าทุกตัวอย่างของโฟมที่เติม PPS จะมีสมบัติความต้านทานต่อแรงกระทำสูงกว่าโฟมที่เติม BPO แม้ว่าค่าที่ได้จะใกล้เคียงกัน และพิจารณาภายใต้ 70 %RH พบว่าโฟมที่เติม

PPS มีสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงกว่าโฟมที่เติม BPO เพราะว่า PPS เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาที่ละลายน้ำได้ จึงทำให้แทรกตัวเข้าไปในโมเลกุลของแป้งได้มากกว่า BPO จึงทำให้เกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างโมเลกุลของแป้งและยางธรรมชาติมากกว่า BPO

ตารางที่ 4.40 สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติที่มีการเติม PPS และ BPO ระยะเวลาในการเก็บ 7 วัน ภายใต้ 40 %RH และ 70 %RH

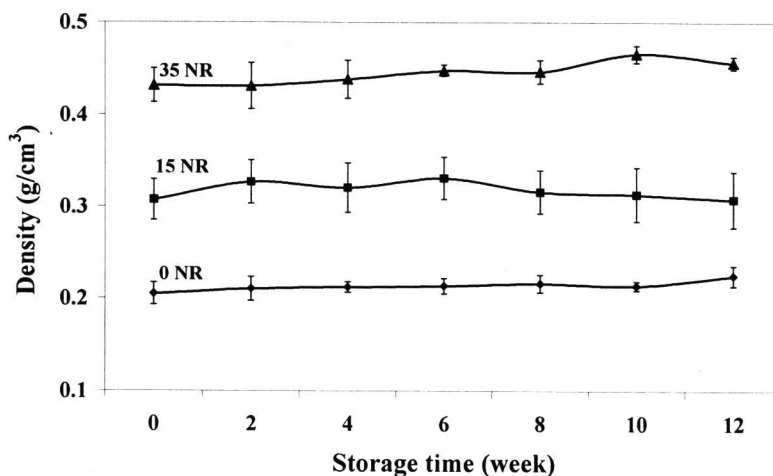
Dry rubber content (pph)	Impact strength (J/m ²)			
	40 %RH		70 %RH	
	PPS	BPO	PPS	BPO
15	254 ± 49	290 ± 81	374 ± 95	404 ± 64
20	299 ± 79	272 ± 33	494 ± 90	398 ± 52
25	375 ± 98	311 ± 33	701 ± 148	343 ± 77
30	549 ± 103	413 ± 80	745 ± 94	431 ± 87
35	502 ± 54	423 ± 74	850 ± 107	463 ± 59

4.11 อิทธิพลของระยะเวลาในการเก็บโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ

ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการเก็บโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ 0, 15 และ 35 pph ต่อความหนาแน่นและสมบัติเชิงกล ที่ทำการเก็บเป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ ภายใต้ 70 %RH ทดสอบสมบัติดังกล่าวทุกสองสัปดาห์ เนื่องจากการนำตัวอย่างไปใช้งานจริงไม่สามารถควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ในขณะใช้งานได้ ดังนั้นจึงทำการทดลองชุดนี้เพื่อต้องการทดสอบสมบัติต่างๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อระยะเวลาในการเก็บเพิ่มขึ้น ผลการทดสอบการเก็บโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ 0-35 pph เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ แสดงในตารางที่ 4.41 และรูปที่ 4.63

ตารางที่ 4.41 ความหนาแน่นของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ แปรปริมาณยางธรรมชาติระหว่าง 0-35 pph เก็บภายใต้ 70 %RH เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์

Storage time (สัปดาห์)	Density (g/cm ³)		
	Dry rubber content (pph)		
	0	15	35
0	0.2047 ± 0.0120	0.3072 ± 0.0224	0.4315 ± 0.0184
2	0.2099 ± 0.0130	0.3264 ± 0.0236	0.4308 ± 0.0249
4	0.2117 ± 0.0057	0.3203 ± 0.0270	0.4379 ± 0.0206
6	0.2130 ± 0.0085	0.3306 ± 0.0231	0.4473 ± 0.0062
8	0.2156 ± 0.0095	0.3157 ± 0.0235	0.4461 ± 0.0127
10	0.2131 ± 0.0049	0.3129 ± 0.0293	0.4656 ± 0.0093
12	0.2239 ± 0.0111	0.3074 ± 0.0304	0.4558 ± 0.0068



รูปที่ 4.63 ความหนาแน่นของโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติ แปรปริมาณยางธรรมชาติระหว่าง 0-35 pph เก็บภายใต้ 70 %RH เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์

พบว่าความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเวลาในการเก็บนานขึ้นและเกิดขึ้นกับทุกตัวอย่าง การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นมีผลเนื่องมาจากแบ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความชอบน้ำ สามารถดูดซับความชื้นได้ เพราะโมเลกุลของแบ่งประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิลเป็นจำนวน 4 หมู่ ภายในหน่วยกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก และในกระบวนการผสมได้ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ซึ่งกลีเซอรอลมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่จำนวน 3 หมู่ ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลดังกล่าวมีความเป็นขั้วสูงจึงสามารถดูดซับความชื้นในอากาศได้สูง (Danjaji *et al.*, 2001) ดังนั้นเมื่อระยะเวลาในการเก็บนานขึ้น จึงทำให้ความหนาแน่นของโฟมเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.42 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติที่ทำการเก็บเป็นเวลา 12 สัปดาห์ ภายใต้ 70 %RH คำนวณโดยใช้สมการที่ 4.1

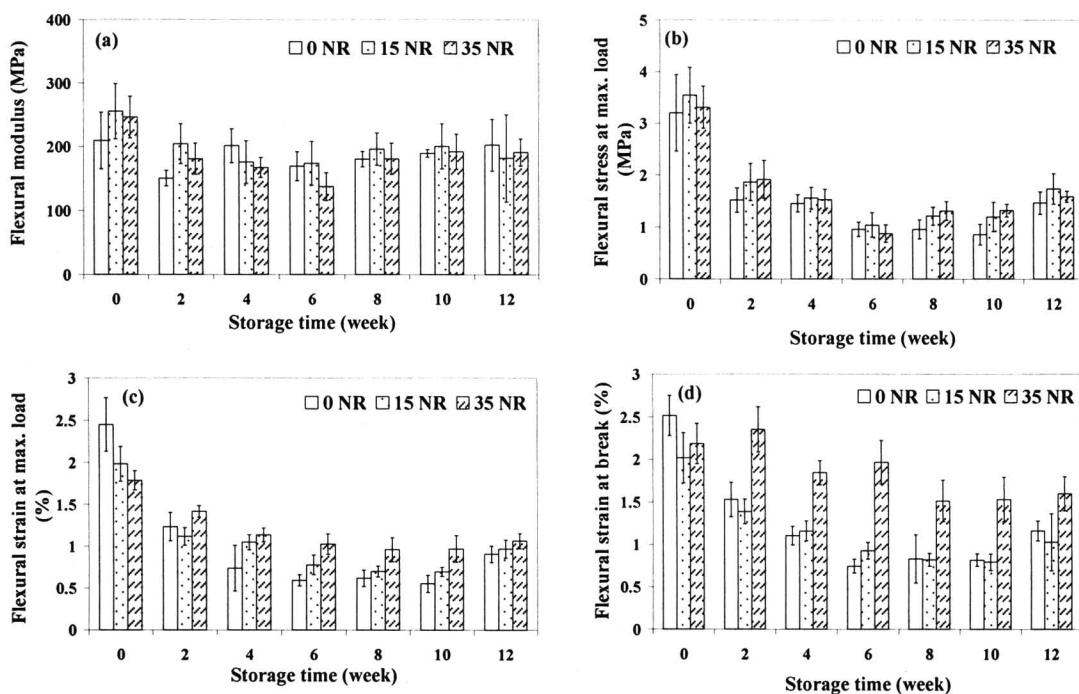
$$\text{Change in properties (\%)} = \frac{D_0 - D}{D_0} \quad (4.1)$$

โดยที่ D_0 คือ ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างเท่ากับ 0 สัปดาห์ และ D คือ ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างที่เวลาต่างๆ

ตารางที่ 4.42 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติ แปรปริมาณยางธรรมชาติ 0-35 pph เก็บเป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ ภายใต้ 70 %RH

Storage time (week)	Change in properties (%)		
	Dry rubber content (pph)		
	0	15	35
2	-3	-6	0
4	-3	-6	-1
6	-4	-8	-4
8	-5	-3	-3
10	-4	-2	-8
12	-9	0	-6

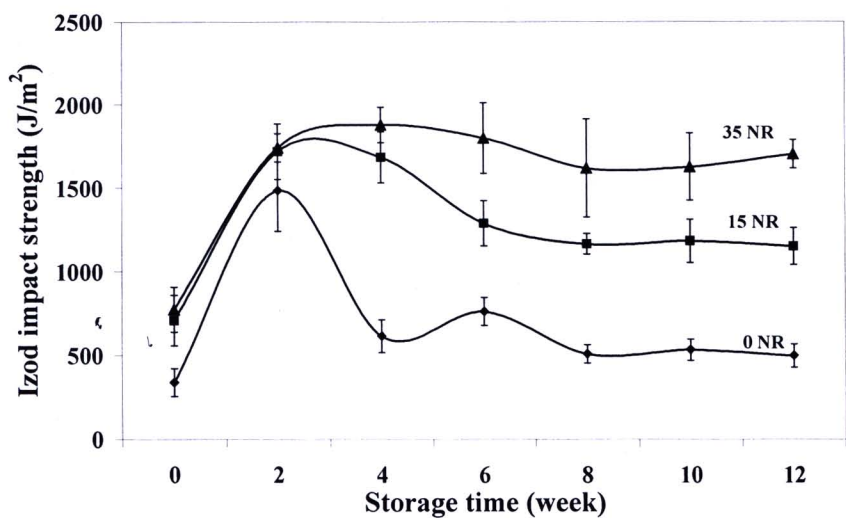
รูปที่ 4.64 แสดงผลการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติ 0-35 pph เก็บเป็นเวลา 12 สัปดาห์ ภายใต้ 70 %RH พบว่าค่า E (รูปที่ 4.64a) ในสัปดาห์แรกโฟมแบ่งทุกตัวอย่างมีค่าสูงสุด และที่ปริมาณยางธรรมชาติต่างกันมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อระยะเวลาในการเก็บเพิ่มขึ้นเป็น 12 สัปดาห์ ทำให้ค่า E ของทุกตัวอย่างลดลง รูปที่ 4.64b แสดงค่า σ_{max} พบว่าเมื่อผ่านไป 2 สัปดาห์ ทำให้โฟมมีค่า σ_{max} ลดลง และระยะเวลาในการเก็บนานขึ้นค่าที่ได้ใกล้เคียงกัน แม้ว่าในสัปดาห์ที่ 8-12 จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแต่ค่าที่ได้ยังคงใกล้เคียงกัน รูปที่ 4.64c แสดงค่า ϵ_{max} พบว่าทุกตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกัน และมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาในการเก็บนานขึ้น โดยในช่วงแรก (0-2 สัปดาห์) โฟมแบ่งที่ไม่เติมยางธรรมชาติมีค่าสูงกว่าทุกตัวอย่าง แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไป 12 สัปดาห์ทำให้โฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติ 35 pph มีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่มียางธรรมชาติ 0-15 pph แต่ค่าที่ได้ยังคงใกล้เคียงกัน และโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติ 35 pph มีค่า ϵ_{max} ลดลงน้อยกว่าที่สัดส่วนอื่นๆ เนื่องจากแบ่งดูดซับความชื้นจากอากาศทำให้ความแข็งแรงลดลง เพราะน้ำจะทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ให้แก่แบ่ง ส่วนค่า ϵ_b แสดงในรูปที่ 4.64d พบว่าในสัปดาห์แรกโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติทุกตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกัน แต่จะสังเกตได้ว่าเมื่อระยะเวลาในการเก็บนานเท่ากับ 2 สัปดาห์ โฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติ 35 pph จะมีค่าสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติ 0 และ 15 pph การที่โฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติ 35 pph มีค่า ϵ_b สูงกว่าตัวอย่างอื่นๆ เพราะว่ายางธรรมชาติที่อยู่ในแบ่งจะทำให้แบ่งดูดซับความชื้นได้น้อยลง และยางธรรมชาติหน้าที่เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงและช่วยให้แบ่งมีความยืดหยุ่นได้มากขึ้นดังนั้นระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างเป็นเวลา 12 สัปดาห์ทำให้สมบัติความทนต่อแรงดัดโค้ง (ค่า E, σ_{max} , ϵ_{max} และ ϵ_b) ของโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติลดลง



รูปที่ 4.64 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความต้านทานต่อแรงกระแทกของโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติ เก็บภายใต้ 70 %RH เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ โดยที่ (a) E, (b) σ_{max} , (c) ϵ_{max} และ (d) ϵ_b

รูปที่ 4.65 แสดงสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติที่ระยะเวลา 0-12 สัปดาห์ พบว่าโฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติทุกตัวอย่างมีค่าสูงสุดเมื่อระยะเวลาในการเก็บเท่ากับ 2 สัปดาห์ แต่หลังจากสัปดาห์ที่ 2 โฟมแบ่งผสมยางธรรมชาติ 15-35 pph จะมีแนวโน้มคงที่เมื่อระยะเวลาในการเก็บนานขึ้น ส่วนโฟมแบ่งที่

ไม่เต็มยางธรรมชาติจะมีค่าต่ำกว่าโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติ 15-35 pph และมีค่าลดลงเมื่อเวลาในการเก็บนานขึ้น การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นดังกล่าว เป็นเพราะความแข็งแรงของโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติขึ้นอยู่กับแข็งมากกว่าส่วนที่เป็นยาง เพราะแข็งดูดซับความชื้นไว้ในโมเลกุล ดังนั้นน้ำจึงทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์โดยจะเข้าไปแทรกในโมเลกุลของแข็ง ทำให้แรงที่ยึดเกาะกันระหว่างโมเลกุลอ่อนตัวลง (กลั่นรงค์ และ เกื้อกูล, 2546) จึงทำให้แข็งมีความแข็งแรงลดลง ตารางที่ 4.43 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติที่ทำการเก็บเป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ ภายใต้ 70 %RH



รูปที่ 4.65 สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติ เก็บเป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ เก็บภายใต้ 70 %RH

ตารางที่ 4.43 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติ เก็บเป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ เก็บภายใต้ 70 %RH

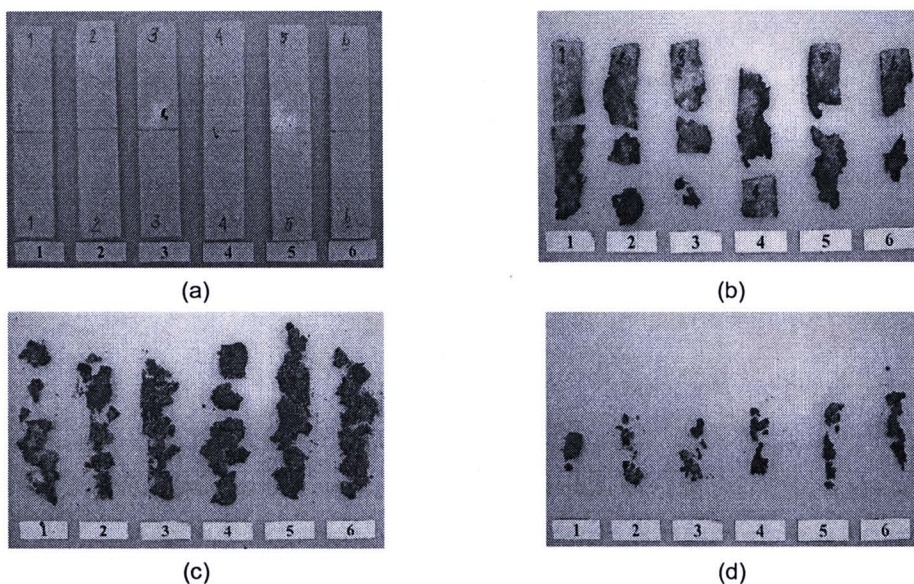
Storage time (week)	Change in properties (%)		
	Dry rubber content (pph)		
	0	15	35
2	-339	-143	-125
4	-82	-138	-143
6	-51	-82	-133
8	-51	-64	-109
10	-58	-67	-110
12	-48	-63	-120

4.12 ผลการทดสอบความสามารถในการย่อยสลาย

ศึกษาอิทธิพลของปริมาณยางธรรมชาติ และสารริเริ่มปฏิกิริยาที่มีต่อการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดิน ใช้โฟมแข็งผสมยางธรรมชาติ 0, 15 และ 35 pph และโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติ 15 pph ที่มี PPS เท่ากับ 0.025 pph โดยทั่วไปนิยมทำการวัดน้ำหนักที่เปลี่ยนไป (weight loss measurment) หลังการทดสอบฝังดินที่ระยะเวลาต่างๆ

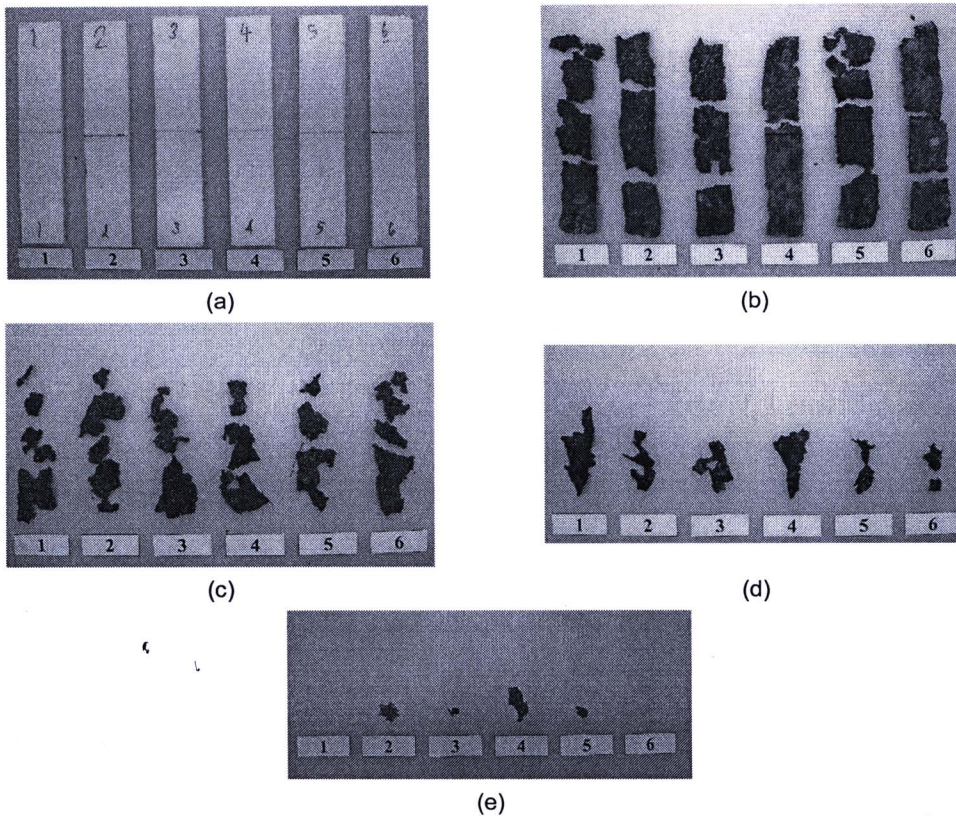
เพราะขั้นตอนของการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยจุลินทรีย์ จะทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือทางกายภาพ ทำให้พอลิเมอร์เกิดการสูญเสียน้ำหนักหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นแร่ธาตุ (ธนาวดี, 2549) การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพดังกล่าว เป็นวิธีการตรวจสอบทางอ้อมที่ทำให้ทราบถึงระดับการถูกย่อยสลายของพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ แต่การทดลองในโครงการวิจัยนี้ไม่สามารถหาน้ำหนักของโพลีหลังฝังดินได้ เพราะการกำจัดดินที่เกาะบนชิ้นทดสอบออกให้สมบูรณ์นั้นไม่สามารถทำได้โดยการใช้แปรงขัด จำเป็นจะต้องใช้น้ำล้างออก ซึ่งการใช้น้ำจะทำให้แป้งบางส่วนหลุดออกไปขณะทำการล้าง เนื่องจากแป้งไวต่อน้ำเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงทำการวัดการเปลี่ยนแปลงด้วยการสังเกตลักษณะการเปลี่ยนทางกายภาพและปริมาณชิ้นทดสอบที่เหลืออยู่

รูปที่ 4.66 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของโพลีแป้งที่ไม่ผสมยางธรรมชาติ ที่ฝังดินเป็นเวลา 0-6 สัปดาห์ พบว่าโพลีแป้งมีการเปลี่ยนแปลงมากขึ้นเมื่อเวลาในการฝังดินนานขึ้น เมื่อทำการฝังดินต่อไปถึงสัปดาห์ที่ 8 ไม่สามารถหาชิ้นทดสอบได้แสดงว่าชิ้นทดสอบได้ถูกย่อยสลายจนมีขนาดเล็กมาก ๆ



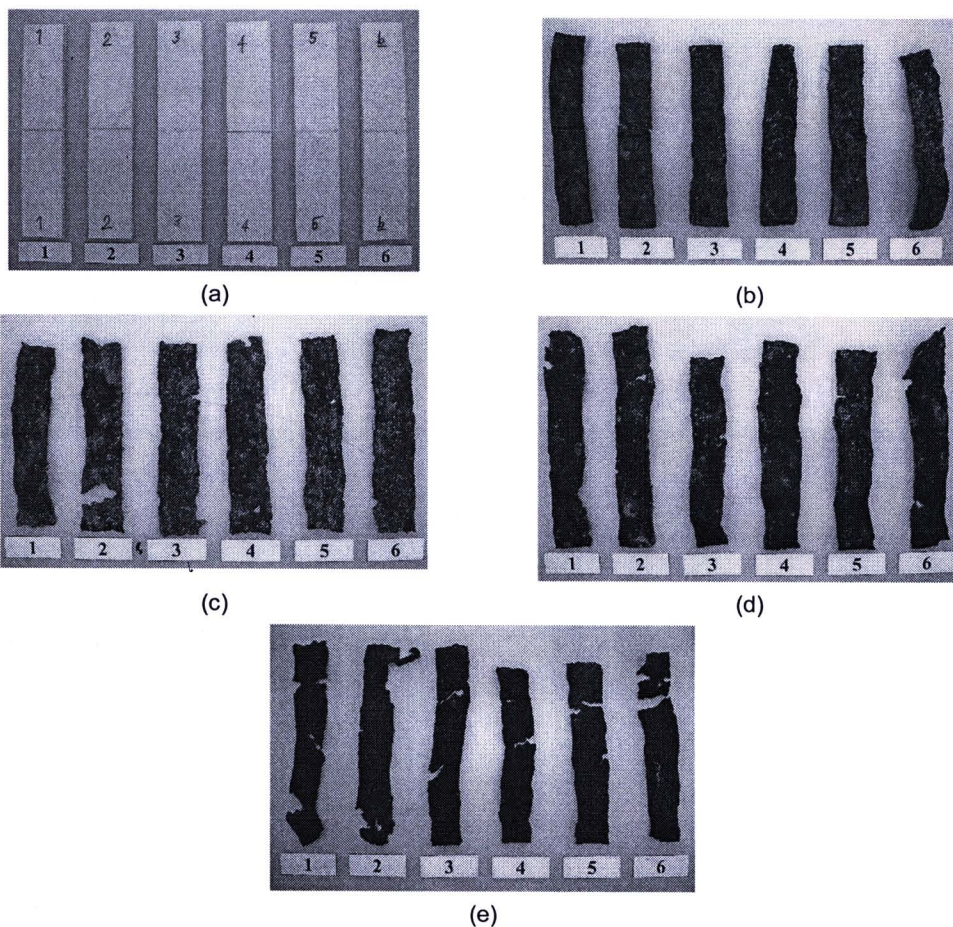
รูปที่ 4.66 ภาพถ่ายของโพลีแป้ง หลังฝังดินเป็นระยะเวลา (a) 0 สัปดาห์, (b) 2 สัปดาห์, (c) 4 สัปดาห์ และ (d) 6 สัปดาห์

รูปที่ 4.67 และ รูปที่ 4.68 แสดงผลการทดสอบการย่อยสลายของโพลีแป้งผสมยางธรรมชาติปริมาณ 15 pph และ 35 pph ตามลำดับ โดยฝังดินเป็นระยะเวลาตั้งแต่ 0-16 สัปดาห์ ตัวอย่างชุดนี้ไม่มีการผสม PPS จะเห็นได้ว่าปริมาณยางธรรมชาติที่ต่างกันทำให้การย่อยสลายเกิดขึ้นได้ไม่เท่ากัน ปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มชิ้นการย่อยสลายเกิดได้ยากขึ้น ชิ้นทดสอบมีการขาดออกจากกัน มีขนาดเล็กลง และผิวหน้าของชิ้นทดสอบมีความเสียหายเกิดขึ้น เมื่อระยะเวลาในการทดสอบนานขึ้น ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นโดยกระบวนการของจุลินทรีย์ที่มีในธรรมชาติ (Shah *et al.*, 2008) โพลีแป้งผสมยางธรรมชาติ 15 pph มีขนาดตัวอย่างเหลือน้อยมากหรือหาไม่พบในสัปดาห์ที่ 16 ในขณะที่โพลีแป้งผสมยางธรรมชาติปริมาณ 35 pph มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักในช่วงเวลา 16 สัปดาห์ รูปที่ 4.69 แสดงผิวหน้าของชิ้นทดสอบของโพลีแป้งผสมยางธรรมชาติ 35 pph ที่มีระยะเวลาในการทดสอบเท่ากับ 12 และ 16 สัปดาห์ตามลำดับ



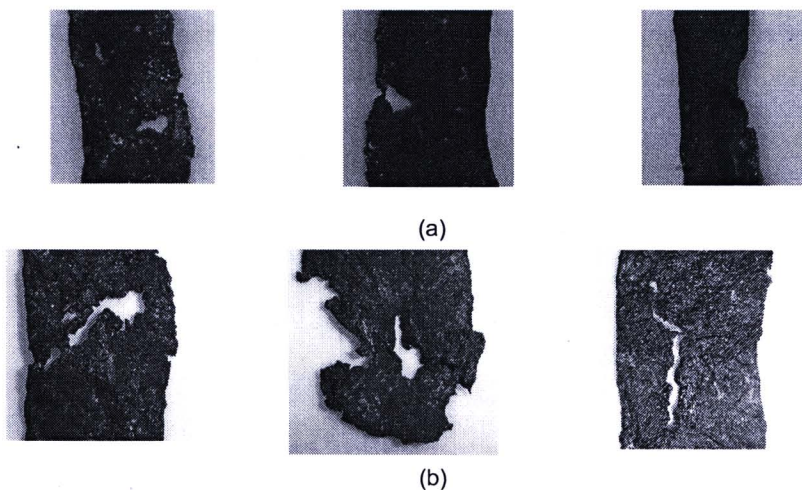
รูปที่ 4.67 ภาพถ่ายของโฟมแปรงผสมยางธรรมชาติ 15 pph หลังฝังดินเป็นระยะเวลา (a) 0 สัปดาห์, (b) 4 สัปดาห์, (c) 8 สัปดาห์, (d) 12 สัปดาห์ และ (e) 16 สัปดาห์

การย่อยสลายทางชีวภาพของแป้งเกิดขึ้นได้ เนื่องจากในธรรมชาติแป้งเป็นอาหารที่ดีของจุลินทรีย์ และโครงสร้างโมเลกุลของแป้งมีความเหมาะสมต่อการย่อยสลายโดยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ หากแป้งมีโครงสร้างเป็นกึ่งก้านจะช่วยทำให้การย่อยสลายเกิดได้เร็วขึ้น (ธนาวดี, 2549) เพราะการย่อยสลายจะเกิดขึ้นกับส่วนที่เป็นอณูฐานก่อนส่วนที่เป็นผลึก (Ikada, 1999) จุลินทรีย์ในธรรมชาติมีอยู่ทั่วไป และมีความหลากหลายขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม เช่น ความชื้น น้ำ และสารอาหาร จุลินทรีย์แต่ละชนิดสามารถสังเคราะห์เอนไซม์ที่มีความจำเพาะและเหมาะสมต่อการย่อยสลายของพอลิเมอร์แต่ละชนิด การเจริญเติบโตได้ดีของจุลินทรีย์จะทำให้การย่อยสลายเกิดได้รวดเร็วขึ้น (Senna *et al.*, 2007) พอลิเมอร์แต่ละชนิดมีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกัน ดังนั้นจำเป็นต้องใช้เอนไซม์ในการย่อยสลายที่ต่างกัน ซึ่งจุลินทรีย์แต่ละชนิดสังเคราะห์เอนไซม์ได้ไม่เหมือนกัน กระบวนการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของพอลิเมอร์จึงไม่ได้อาศัยการทำงานของจุลินทรีย์เพียงชนิดเดียว พอลิเมอร์บางชนิดจำเป็นต้องใช้จุลินทรีย์หลายตัวในการทำให้เกิดการย่อยสลาย โดยส่วนใหญ่จะใช้วิธีการทดสอบเคลียร์โซน เพื่อต้องการทราบชนิดของจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายพอลิเมอร์ ชนิดนั้นๆ ได้ (Shah *et al.*, 2008) สำหรับพอลิเมอร์ในธรรมชาติ เช่น พอลิแซ็กคาไรด์ และโปรตีนสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย เนื่องจากจุลินทรีย์ในธรรมชาติเป็นจำนวนมากสามารถสังเคราะห์เอนไซม์ที่ย่อยสลายพอลิเมอร์เหล่านี้ได้ (ธนาวดี, 2549) การย่อยสลายทางชีวภาพของแป้งมันสำปะหลังและยางธรรมชาติน่าจะแตกต่างกัน เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีและองค์ประกอบอื่นๆต่างกัน การวิเคราะห์กลไกการย่อยสลายทางชีวภาพและการตรวจหาเอนไซม์หรือจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายแป้งและยางธรรมชาติ ไม่ได้อยู่ในขอบข่ายของการวิจัยนี้ กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพของแป้งมันสำปะหลังเป็นที่เผยแพร่กันแล้ว ส่วนการย่อยสลายทางชีวภาพของยางธรรมชาติอาจมีข้อมูลไม่มากนัก ซึ่งโครงการวิจัยนี้ได้ขยายผลการทดลอง โดยส่งตัวอย่างโฟมแปรงที่ผสมยางธรรมชาติเหล่านี้ให้กับนักวิจัยสาขาจุลชีววิทยา เพื่อศึกษาการย่อยสลายโดยการฝังดิน

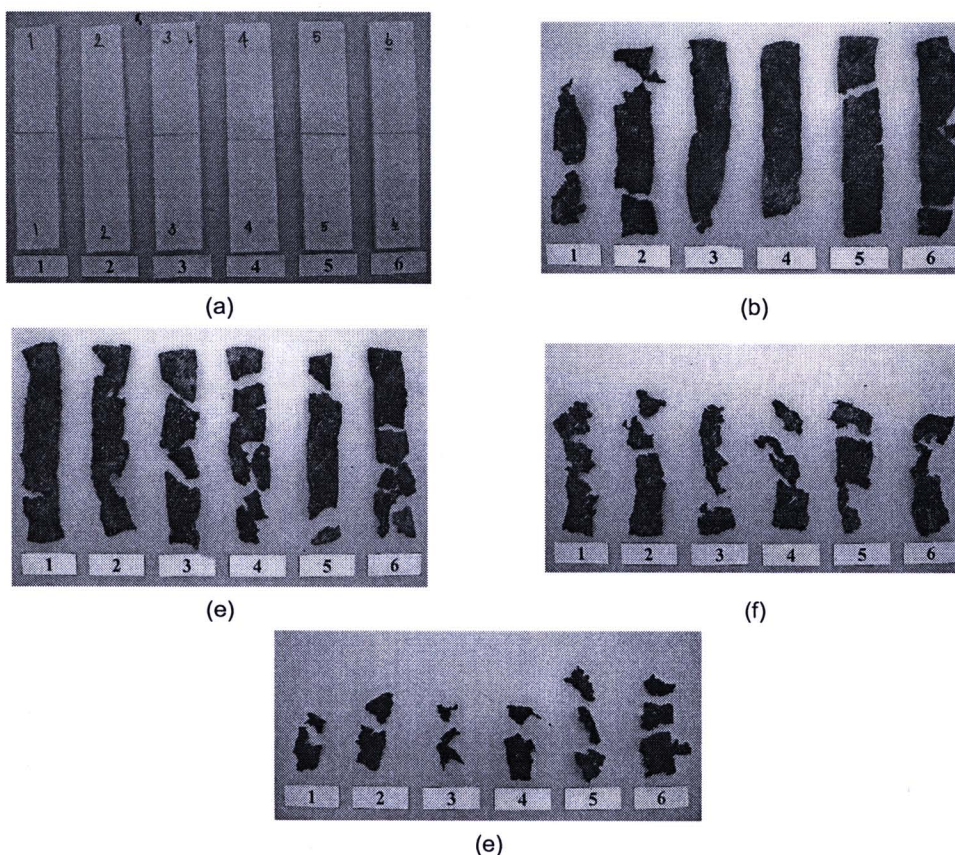


รูปที่ 4.68 ภาพถ่ายของโพลีโพรพิลีนผสมยางธรรมชาติ 35 pph หลังฝังดินเป็นระยะเวลา (a) 0 สัปดาห์, (b) 4 สัปดาห์, (c) 8 สัปดาห์, (d) 12 สัปดาห์ และ (e) 16 สัปดาห์

รูปที่ 4.70 แสดงผลการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยการฝังดินของโพลีโพรพิลีนผสมยางธรรมชาติ 15 pph ที่มีการเติม PPS ที่ระยะเวลา 0-16 สัปดาห์ ตามลำดับ พบว่าชั้นทดสอบมีการย่อยสลายเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการทดสอบนานขึ้น เกิดการขาดออกจากกันของชั้นทดสอบและการเปลี่ยนแปลงที่ผิวหน้า เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างโพลีโพรพิลีนที่เติมและไม่เติม PPS พบว่าโพลีโพรพิลีนที่เติม PPS มีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าโพลีโพรพิลีนที่ไม่เติม PPS ซึ่งผลจากการย่อยสลายสามารถยืนยันว่ามีการเชื่อมโยงกันระหว่างโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังและยางธรรมชาติเกิดขึ้น การเชื่อมโยงดังกล่าวจะทำให้ช่องว่างระหว่างเฟสของแป้งมันสำปะหลังและยางธรรมชาติลดลง ทำให้น้ำเข้าไปแทรกในช่องว่างระหว่างเฟสและในโมเลกุลของแป้งได้ยากขึ้น เมื่อน้ำไม่สามารถเข้าไปแทรกในโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังได้ ทำให้ความสามารถในการย่อยสลายลดลง เพราะน้ำมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตและการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ นอกจากนั้นน้ำและความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้เกิดการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งนำไปสู่กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ เพราะน้ำช่วยละลายสารประกอบแร่ธาตุซึ่งเป็นอาหาร เป็นที่อยู่อาศัย และช่วยในการเคลื่อนที่ของจุลินทรีย์ หากบริเวณที่จุลินทรีย์อาศัยอยู่มีน้ำในปริมาณน้อยจะส่งผลให้การเจริญเติบโตและการขยายพันธุ์ของจุลินทรีย์ลดลง จึงทำให้ประสิทธิภาพของการย่อยสลายลดลง



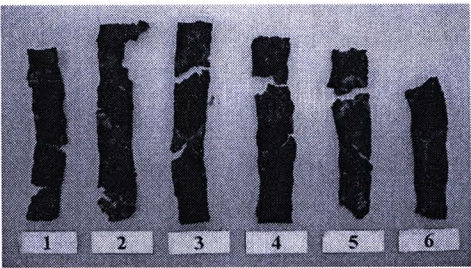
รูปที่ 4.69 ภาพถ่ายขยายผิวหน้าของโพลีโพรพิลีน 35 pph หลังฝังดินเป็นระยะเวลา (a) 12 สัปดาห์ และ (b) 16 สัปดาห์



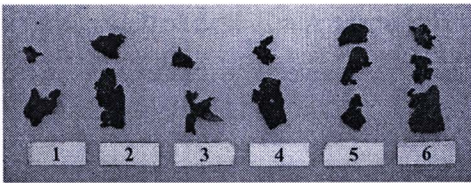
รูปที่ 4.70 ภาพถ่ายของโพลีโพรพิลีน 15 pph ที่มี PPS เท่ากับ 0.025 pph หลังฝังดินเป็นระยะเวลา (a) 0 สัปดาห์, (b) 4 สัปดาห์, (c) 8 สัปดาห์, (d) 12 สัปดาห์ และ (e) 16 สัปดาห์

ได้ดำเนินการทดลองฝังดินตัวอย่างโพลีโพรพิลีน 30 pph และโพลีโพรพิลีนที่มี PPS ต่อไปอีกจนถึงสัปดาห์ที่ 20 พบว่าปริมาณยางธรรมชาติ 30 pph ยังทำให้ชิ้นตัวอย่างคงรูปร่างเดิมอยู่ แต่มีการฉีกขาดมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.71 แต่โดยทั่วไป ระยะเวลาในการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ที่จัดอยู่ในกลุ่มย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้น จะ

ใช้เวลาการทดสอบนานกว่า 6 เดือน (24 สัปดาห์) และการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์อาจเกิดขึ้นภายใน 1 ปี ส่วน
โพลีเมอร์ที่มีการเติม PPS นั้น การย่อยสลายทางชีวภาพเกิดมากขึ้นเมื่อฝังดินต่อไปจนถึงสัปดาห์ที่ 20 (รูปที่ 4.72)



รูปที่ 4.71 ภาพถ่ายหลังการฝังดินเป็นเวลา 20 สัปดาห์ของโพลีเมอร์ผสมยางธรรมชาติ 30 pph



รูปที่ 4.72 ภาพถ่ายหลังการฝังดินเป็นเวลา 20 สัปดาห์ของโพลีเมอร์ผสมยางธรรมชาติ 15 pph
และ PPS 0.025 pph