ผลของการอบแห้งต่อการลดลงของความชื้นและสมบัติการต้านทานแรงดึงของพอลิคาร์บอเนต
Drying Effect on Moisture Reduction and Tensile Strength Property of Polycarbonate

อรรถพล สิมประดิษฐ์พันธุ์[1] พิชัย นามประกาย[2] และณรงค์ชัย โอเจริญ[3]

บทคัดย่อ

พอลิคาร์บอเนตเป็นพลาสติกที่มีความสามารถในการดูดความชื้น ซึ่งความชื้นเป็นสาเหตุสำคัญอย่างหนึ่งที่ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณลักษณะและสมบัติต่างๆ ลดลง เช่น ฟองอากาศ ประกายเงิน และสมบัติเชิงกล จึงมีความจำเป็นที่ต้องทำการอบแห้งเม็ดพลาสติกพอลิคาร์บอเนตก่อนการขึ้นรูป ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงผลของการอบแห้งต่อการลดลงของความชื้นของเม็ดพลาสติกพอลิคาร์บอเนต และสมบัติการต้านทานแรงดึงของผลิตภัณฑ์พลาสติกพอลิคาร์บอเนต โดยทำการอบแห้งเม็ดพลาสติกพอลิคาร์บอเนตที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 0.186-0.193% มาตรฐานเปียก ณ อุณหภูมิ 80, 100 และ 120 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ด้วยเครื่องอบแห้งแบบถังและแบบถังทรงกระบอกหมุน ซึ่งมีความเร็วอากาศอยู่ที่ 0.4 และ 4 m/s ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า เม็ดพลาสติกพอลิคาร์บอเนตที่อบแห้งด้วยเครื่อง-อบแห้งแบบถังทรงกระบอกหมุนมีปริมาณความชื้นที่หลงเหลือหลังการอบแห้งต่ำกว่าเม็ดพลาสติกพอลิคาร์บอเนตที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถัง และผลิตภัณฑ์พอลิคาร์บอเนตที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติกพอลิคาร์บอเนตที่ผ่านการอบแห้งมีค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงกว่าผลิตภัณฑ์พอลิคาร์บอเนตที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติกพอลิคาร์บอเนตที่ไม่ผ่านการอบแห้ง

คำสำคัญ : การอบแห้ง, ความต้านทานแรงดึง, ความชื้น, พอลิคาร์บอเนต

Abstract

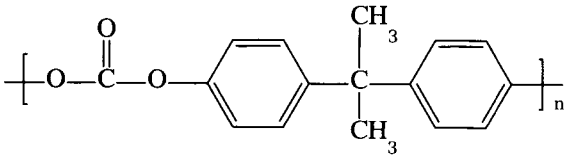
Polycarbonate is plastic that have ability to absorb moisture. The moisture is caused to decreasing in character and many properties such as bubble, silver streak and mechanical properties, the drying process of polycarbonate pellets is needed. This research aimed to study drying effect on moisture reduction of polycarbonate pellets and tensile strength property of polycarbonate product. The polycarbonate pellets, which was initial moisture content of about 0.186-0.193% wet basis were dried at 80, 100 and 120 °C for 5 hrs by hopper dryer and rotary dryer with the hot air velocity of 0.4 and 4 m/s, respectively. The results showed that polycarbonate pellets of drying with rotary dryer had less residual moisture content than polycarbonate pellets of drying with hopper dryer, and polycarbonate product molded from dried polycarbonate pellets had higher tensile strength than polycarbonate product molded from non-dried polycarbonate pellets.

Keywords : Drying, Tensile Strength, Moisture, Polycarbonate

[1]นักศึกษาปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
[2]อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
[3]อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

1. บทนำ

พลาสติก (plastic) หมายถึง สารประกอบอินทรีย์ที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อนำมาใช้แทนวัสดุธรรมชาติ พลาสติกบางชนิดมีความเป็นขั้ว (polarity) สูง เช่น พอลิคาร์บอเนต (polycarbonate, PC), พอลิเอไมด์ (polyamide, PA) และอีพอกซี (epoxy, EP) จึงทำให้มีความสามารถในการดูดความชื้นสูงตามไปด้วย [1-4] โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลาสติก PC เป็นพลาสติกที่มีหมู่คาร์บอเนต (CO_3) อยู่ในสายโซ่โมเลกุล ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งมีความเป็นขั้วสูง จึงทำให้สามารถดูดความชื้นได้ดี [5] โดยมีอัตราการดูดความชื้นประมาณ 0.150% จากการทดสอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ASTM D 570 นอกจากนี้พลาสติก PC มีการจัดเรียงโมเลกุล ภายในโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน (amorphous) มีความหนาแน่น 1.20 g/cm^3 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน 0.2 W/mK [6] มีความใสสูง ใช้งานได้ที่อุณหภูมิกว้างตั้งแต่ -100 °C ถึง 145 °C มีอัตราการหดตัวต่ำ มีความเหนียวสูง ทนแรง กระแทกได้สูงมาก มีสมบัติเป็นฉนวนทางไฟฟ้าที่ดีมาก และทนต่อสารเคมีและรอยขีดข่วนต่ำ ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปได้จากพลาสติก PC ได้แก่ ขวดพลาสติก แผ่นปกคลุมหลังคาใส หมวกกันน็อก โคมไฟฟ้า ภาชนะบรรจุน้ำร้อน ภาชนะบรรจุอาหาร หรือเครื่องดื่มสำหรับทารก แผ่นซีดีรอม อุปกรณ์ทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ กรอบไฟรถยนต์ ใบพัดเรือ คอนแทคเลนส์ เลนส์แว่นตานิรภัย ชิ้นส่วนของเล่น อุปกรณ์ทางการแพทย์ แผงควบคุมอุปกรณ์ และชิ้นส่วนประกอบภายในรถยนต์ [7]



รูปที่ 1 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของ PC

ในการผลิตเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์พลาสติก PC ที่มีคุณภาพและมีความเหมาะสม ประกอบกับพลาสติกบางชนิดมีการดูดความชื้นสูง จึงมีความจำเป็นที่จะต้องนำเม็ดพลาสติก PC ซึ่งใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์มาอบไล่ความชื้นหรืออบแห้งก่อน เนื่องจากความชื้นมีส่วนทำให้ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ได้เกิดความบกพร่อง เช่น เกิดฟองอากาศ (bubble) เกิดประกายเงิน (silver streak) และมีสมบัติเชิงกลลดลง [8,9] ในการอบแห้งเม็ดพลาสติกจะอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิตามมาตรฐานที่กำหนดไว้สำหรับพลาสติกแต่ละชนิดด้วยเครื่องอบไล่ความชื้นหรือเครื่องอบแห้งที่ติดตั้งมากับเครื่องขึ้นรูปที่เรียกว่า เครื่องอบแห้งแบบถัง (hopper dryer) โดยใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งเครื่องอบแห้งแบบถังมีข้อจำกัดในส่วนของการที่วัสดุที่นำมาอบแห้งได้รับความร้อนที่แตกต่างกัน เนื่องจากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถังวัสดุหรือเม็ดพลาสติกจะวางเรียงซ้อนกันอย่างหนาแน่นอยู่ภายในห้องอบแห้ง (drying chamber) และการกระจายตัวของอากาศร้อนภายในห้องอบแห้งไม่ทั่วถึง ส่งผลให้ปริมาณความชื้นที่ลดลงของเม็ดพลาสติกเป็นไปอย่างเชื่องช้าและไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังอาจทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าในปริมาณที่สูง ซึ่งแตกต่างจากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถังทรงกระบอกหมุน (rotary dryer) ที่วัสดุมีการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องและภายในตัวถังมีแผ่นครีบรูปทรงคล้ายเกลียวทำหน้าที่บังคับให้วัสดุเคลื่อนที่ไปข้างหน้าขณะที่แนบติดอยู่กับผิวของถังที่ได้รับการถ่ายโอนความร้อนมาจากแหล่งความร้อน ส่งผลให้ความชื้นที่มีอยู่ในวัสดุมีการระเหยออกมาได้อย่างรวดเร็ว และมีความสม่ำเสมอกันทั่วทุกตำแหน่ง รวมทั้งมีส่วนช่วยในการประหยัดพลังงาน และเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้งอีกทางหนึ่งด้วย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงลักษณะการลดลงของความชื้นในเม็ดพลาสติก PC ที่ได้รับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถังและแบบถังทรงกระบอกหมุน และศึกษาถึงผลของการอบแห้งดังกล่าวต่อสมบัติการต้านทานแรงดึงของผลิตภัณฑ์พลาสติก PC

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

1) เครื่องอบแห้งแบบถังทรงกระบอกหมุน ดังแสดงในรูปที่ 2 นำมาใช้อบแห้งเม็ดพลาสติก PC ประกอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1/2 hp เครื่องเป่าลม (blower) ขนาด 186 W มีความเร็วอากาศ 4 m/s อุปกรณ์ให้ความร้อน (heater) ขนาด 5 kW และมีความจุประมาณ 5 kg

2) เครื่องอบแห้งแบบถัง ดังแสดงในรูปที่ 3 ยี่ห้อ Shini รุ่น SHD-25 ของบริษัท Shini Electric Heaters Co., Ltd. ประเทศไต้หวัน นำมาใช้อบแห้งเม็ดพลาสติก PC ประกอบด้วยเครื่องเป่าลมขนาด 90 W มีความเร็วอากาศ 0.4 m/s อุปกรณ์ให้ความร้อน ขนาด 2.8 kW และมีความจุประมาณ 25 kg

3) เครื่องวิเคราะห์ความชื้น (moisture analyzer) ยี่ห้อ AND รุ่น MX-50 นำมาใช้ในการวัดค่าความชื้นเริ่มต้น และค่าความชื้นหลังการอบแห้งของเม็ดพลาสติก PC

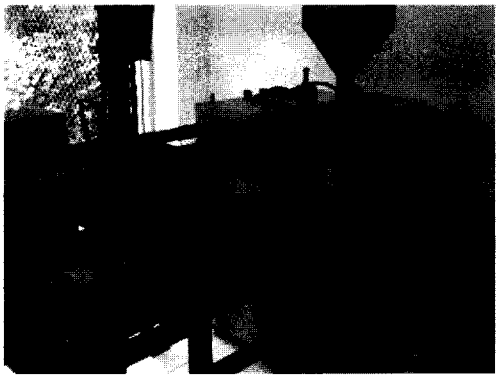
4) เครื่องฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติก (injection molding machine) ยี่ห้อ Battenfeld รุ่น BA 250/50 CDC ของบริษัท Battenfeld ประเทศออสเตรียนำมาใช้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ชิ้นงานทดสอบพลาสติก PC

5) เครื่องทดสอบสมบัติการต้านทาน แรงดึง (tensile testing machine) ยี่ห้อ Lloyd รุ่น LR10KPlus 10 kN ของบริษัท Lloyd Instruments Ltd. ประเทศอังกฤษ นำมาใช้ในการทดสอบความต้านทานแรงดึงของผลิตภัณฑ์พลาสติก PC

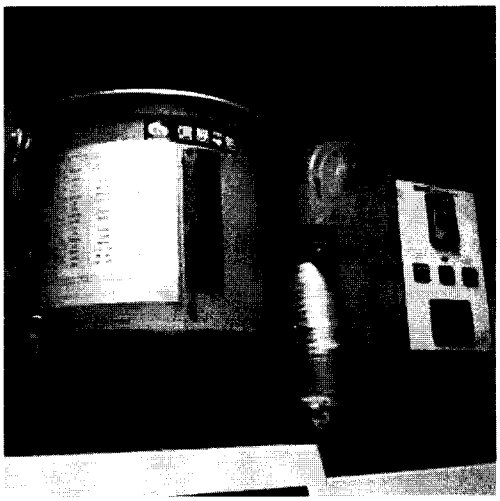
6) เม็ดพลาสติก PC Makrolon เกรด 2405 ของบริษัทไบเออร์ไทย ดังแสดงในรูปที่ 4

2.2 วิธีการทดลอง

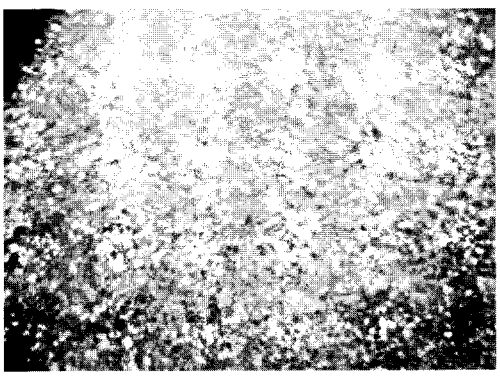
1) นำเม็ดพลาสติก PC มาทำการทดสอบหาปริมาณความชื้นเริ่มต้นด้วยเครื่องวิเคราะห์ความชื้น



รูปที่ 2 เครื่องอบแห้งแบบถังทรงกระบอกหมุน



รูปที่ 3 เครื่องอบแห้งแบบถัง



รูปที่ 4 เม็ดพลาสติก PC เกรด 2405

2) อบแห้งเม็ดพลาสติก PC ด้วยเครื่องอบแห้งแบบถัง และแบบถังทรงกระบอกหมุนที่อุณหภูมิ 80, 100 และ 120°C เป็นเวลา 5 hrs ซึ่งแต่ละตัวอย่างมีน้ำหนักเริ่มต้นที่ 3 kg โดยทำการเก็บตัวอย่างเม็ดพลาสติก PC ประมาณ 15 g ที่ช่วงระยะเวลาการอบแห้ง 30 นาที เพื่อนำมาวัดปริมาณความชื้นหลังการอบแห้งของตัวอย่างต่างๆ ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความชื้น จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาหาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิ กับปริมาณความชื้นที่วัดได้ดังกล่าว

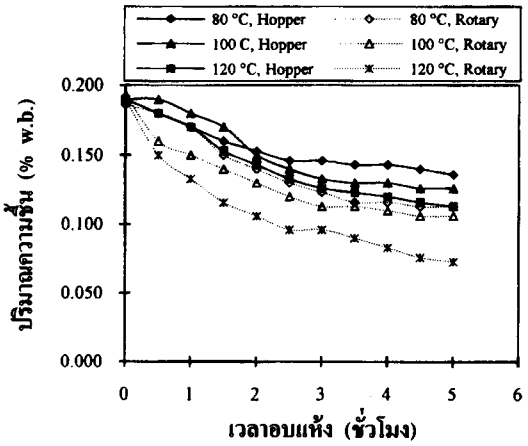
3) นำเม็ดพลาสติกที่ไม่ผ่านการอบแห้ง และที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งทั้งสองแบบที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง มาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบลด้วยกระบวนการฉีด เพื่อนำไปทดสอบสมบัติการต้านทานแรงดึง (tensile strength) โดยใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูป 265, 265, 255 และ 245°C สำหรับโซนที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ และความดันฉีด 30, 35 และ 20 bar สำหรับระยะที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

4) ทดสอบสมบัติการต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638 และเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้

3. ผลและวิจารณ์

3.1 ผลของการอบแห้งต่อการลดลงของความชื้น

จากการทดลองพบว่า เม็ดพลาสติก PC มีค่าความชื้นเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 0.186–0.190% มาตรฐานเปียก (wet basis, w.b.) และเมื่อนำเม็ดพลาสติก PC ไปอบแห้งพบว่า เม็ดพลาสติก PC ที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถังทรงกระบอกหมุนมีค่าความชื้นที่หลงเหลือหลังการอบแห้งต่ำกว่าเม็ดพลาสติก PC ที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถัง ดังแสดงในรูปที่ 5 อาจเนื่องมาจากเครื่องอบแห้งแบบถังทรงกระบอกหมุน มีการเคลื่อนที่ของห้องอบแห้งอยู่ตลอดเวลา จึงทำให้เม็ดพลาสติก PC มีการเคลื่อนที่ตามไปด้วย และทำให้เม็ดพลาสติก PC ได้รับการถ่ายโอนความร้อนจากอากาศร้อนในอัตราที่สูง ส่งผลให้เม็ดพลาสติก PC มีการลดลงของความชื้นหรือมีอัตราการระเหยของน้ำที่สะสมอยู่ในปริมาณที่สูงและรวดเร็วกว่าการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถัง และอาจเนื่องมาจากเครื่องอบแห้งแบบถังทรงกระบอกหมุนมีความเร็วอากาศร้อนที่ใช้อบแห้งที่สูงกว่าเครื่องอบแห้งแบบถัง [10] นอกจากนี้พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงมีค่าความชื้นที่หลงเหลือหลังการอบแห้งที่ต่ำกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ อาจเนื่องมาจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศร้อนกับอุณหภูมิของเม็ดพลาสติก PC มีค่ามากกว่าการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิอากาศต่ำ [11–14]

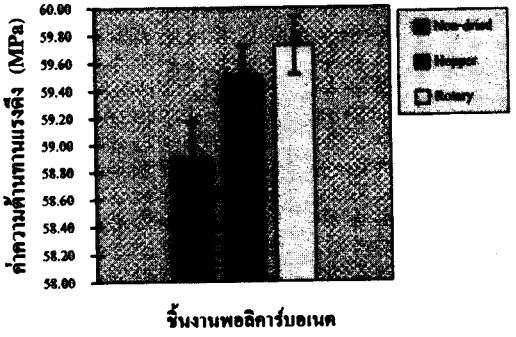


รูปที่ 5 เปรียบเทียบค่าความชื้นของเม็ดพลาสติก PC ที่ผ่านการอบแห้งในสภาวะการทดลองต่างๆ

3.2 ผลของการอบแห้งต่อสมบัติการต้านทานแรงดึง

จากการทดสอบสมบัติการต้านทานแรงดึงของผลิตภัณฑ์ระหว่างผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติก PC ที่ไม่ได้รับการอบแห้ง และที่ได้รับการอบแห้งแล้วด้วยเครื่องอบแห้งแบบถังและแบบถังทรงกระบอกหมุนที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติก PC ที่ได้รับการอบแห้งแล้ว มีค่าสูงกว่าชิ้นงานทดสอบที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติก PC ที่ไม่ได้รับการอบแห้ง [15, 16]

ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยเฉพาะชิ้นงานทดสอบที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติก PC ที่ได้รับการอบแห้งด้วยเครื่องแบบถังทรงกระบอกหมุนมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานทดสอบที่สภาวะอื่นๆ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการอบแห้งมีส่วนช่วยทำให้ความชื้นในเม็ดพลาสติก PC ลดลง ส่งผลให้ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติก PC ที่ได้รับการอบแห้งมีค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น [17, 18] และเม็ดพลาสติก PC ที่ได้รับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถังทรงกระบอกหมุนมีปริมาณความชื้นที่หลงเหลือหลังการอบแห้งต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะการทดลองอื่นๆ นอกจากนี้สามารถอธิบายได้ว่าความชื้นที่ได้แพร่ซึมผ่านเข้าไปแทรกตัวอยู่ในโครงสร้างโมเลกุลของเม็ดพลาสติก PC มีส่วนทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล ส่งผลให้ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติก PC ที่ไม่ได้รับการอบแห้งมีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำหรือลดลง [8, 19–25]



รูปที่ 6 เปรียบเทียบค่าความทานต้านแรงดึงของผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติก PC ที่อบแห้งในสภาวะต่างๆ และที่ไม่อบแห้ง

4. สรุป

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การอบแห้งเม็ดพลาสติก PC ด้วยเครื่องอบแห้งแบบถังทรงกระบอกหมุน และการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงสามารถลดความชื้นในเม็ดพลาสติก PC ได้สูงกว่าการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถังและการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ จึงส่งผลให้มีความชื้นที่เหลืออยู่หลังการอบแห้งในเม็ดพลาสติก PC ที่ต่ำกว่า และผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติก PC ที่ผ่านการอบแห้งแล้วมีค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงกว่าผลิตภัณฑ์พลาสติก ที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติก PC ที่ไม่ผ่านการอบแห้ง โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติก PC ที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถังทรงกระบอกหมุนมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยในครั้งนี้ประสบผลสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับการสนับสนุนทุนในการทำวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี นอกจากนี้ยังได้รับการสนับสนุนในส่วนของอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบการศึกษาทดลอง จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

[1] Soles, C.L., Chang, F.T., Bolan, B.A., Hristov, H.A., Gidley, D.W. and Yee, A.F., 1998. "Contributions of the Nanovoid Structure to the Moisture Absorption Properties of Epoxy Resins," **Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics**. 36,17 (December) : 3035–3048.

[2] Buehler, F.U. and Seferis J.C., 2000. "Effect of Reinforcement and Solvent Content on Moisture Absorption in Epoxy Composite Materials," **Composite: Part A**. 31,7 (July) : 741–748.

[3] Wu, T. and Ke, Y., 2006. "The Absorption and Thermal Behaviors of PET-SiO_2 Nano-

Composite Films," **Polymer Degradation and Stability**. 91,9 (September) : 2205-2212.

[4] Wang, J., Gong, J., Gong, Z., Yan, X., Wang, B., Wu, Q. and Li, S., 2010. "Effect of Curing Agent Polarity on Water Absorption and Free Volume in Epoxy Resin Studied by PALS," **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**. 268,14 (July) : 2355-2361.

[5] Weibin, G., Shimin, H., Minjiao, Y., long, J. and Yi, D., 2009. "The Effects of Hydrothermal Aging on Properties and Structure of Bisphenol A Polycarbonate," **Polymer Degradation and Stability**. 94,1 (January) : 13-17.

[6] Crawford, R.J., 2005. **Plastics Engineering**. 3rd ed. Burlington : Elsevier Butterworth-Heinemann.

[7] อรรถพล สิมประดิษฐ์พันธุ์, กวีวัฒน์ มณีนวล และ สุดารัตน์ บุญจ่ำ, 2552. **ความสามารถในการขึ้นรูปของพอลิคาร์บอเนตในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน**. ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

[8] Lawrence, S.St., Willett, J.L. and Carriere, C.J., 2001. "Effect of Moisture on the Tensile Properties of Poly (Hydroxyl Ester Ether)," **Polymer**. 42,13 (June) : 5643-5650.

[9] Kumosa, L., Benedikt, B., Armentrout, D. and Kumosa, M., 2004."Moisture Absorption Properties of Unidirectional Glass/ Polymer Composites Used in Composite (Non-Ceramic) Insulators," **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**. 35,9 (September) : 1049-1063.

[10]อิทธิพล แก่งสันเทียะ, อำนาจ บุญลอย, ประสิทธิ์ คำพันยิ้ม และพงษ์เจต พรหมวงศ์, 2550. "การอบแห้งพริกไทยในหอมีครีบแบบ--ฟลูอิดไดซ์หมุนควง," **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย**. ครั้งที่ 21, 17-19 ตุลาคม 2550, จังหวัดชลบุรี.

[11]นภาภรณ์ พลายโถ, 2548. **ผลของการพรีทรีทเมนต์ที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งและคุณภาพของกล้วยแผ่น**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สายวิชาเทคโนโลยี-พลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

[12]มานะ สุยะรา, 2550. **อิทธิพลของระดับความสุกที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งและคุณภาพของกล้วยแผ่น**. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรม--ศาสตรมหาบัณฑิต สายวิชาเทคโนโลยี--พลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

[13]Zielinska, M. and Markowski, M., 2010. "Air Drying Characteristics and Moisture Diffusivity of Carrots," **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**. 49,2 (February) : 212-218.

[14]ปิยะพงษ์ จันดาประดิษฐ์, วทัญญู รอดประพันธ์ และ กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์, 2552. "การศึกษาเปรียบเทียบอบแห้งปลาทูด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง," **วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มศว**. 4,2 (กรกฎาคม-ธันวาคม) : 37-44.

[15]Athijayamani, A., Thiruchitrambalam, M., Natarajan, U. and Pazhanivel, B., 2009. "Effect of Moisture Absorption on the Mechanical Properties of Randomly Oriented Natural Fibers/Polyester Hybrid Composite," **Materials Science and Engineering**. 517,1-2 (August) : 344-353.

[16]Danjaji, I.D., Nawang, R., Ishiaku, U.S., Ismail, H. and Mohd Ishak, Z.A.M., 2002 "Degradation Studies and Moisture Uptake of Sago-Starch-Filled Linear Low-Density Polyethylene Composites," **Polymer Testing**. 21,1 (October) : 75-81.

[17]de Deus, J.F., Monteiro, S.N. and d'Almeida, J.R.M., 2005. "Effect of Drying, Molding Pressure, and Strain Rate on the Flexural Mechanical Behavior of Piassava (Attalea Funifera Mart) Fiber-Polyester Composites," **Polymer Testing**. 24,6 (September) : 750-755.

[18]Li, Y., Mai, Y.W. and Ye, L., 2000. "Sisal Fibre and Its Composites: A Review of Recent Developments," **Composites Science and Technology**. 60,11 (August) : 2037-2055.

[19]Yang, B., Huang, W.M., Li, C. and Chor, J.H., 2005. "Effect of Moisture on Glass Transition Temperature of Polyurethane Shape Memory Polymer Filled with Nano-Carbon Powder," **European Polymer Journal**. 41,5 (May) : 1123-1128.

[20]Morgan, R.J., O'Neal, J.E. and Fanter, D.L., 1980. "The Effect of Moisture on the Physical and Mechanical Integrity of Epoxies," **Journal of Materials Science**. 15,3 (March) : 751-764.

[21]Shen, J., Chen, C.C. and Sauer, J.A., 1985. "Effects of Sorbed Water on Properties of Low and High Molecular Weight PMMA: 1. Deformation and Fracture Behavior," **Polymer**. 26,4 (April) : 511-518.

[22]Mostovoy, S. and Ripling, E. J., 1971. "The Fracture Toughness and Stress Corrosion Cracking Characteristics of an Anhydride-Hardened Epoxy Adhesive," **Journal of Applied Polymer Science**. 15,3 (March) : 641-659.

[23] Chaleat, C.M., Halley, P.J. and Truss, R.W., 2008. "Properties of a Plasticised Starch Blend. Part 1: Influence of Moisture Content on Fracture Properties," **Carbohydrate Polymers**. 71,4 (March) : 535-543.

[24]Chaleat, C.M., Amadry, G.M., Halley, P.J. and Truss, R.W., 2008. "Properties of a Plasticised Starch Blend-Part 2: Influence of Strain Rate, Temperature and Moisture on the Tensile Yield Behaviour," **Carbohydrate Polymers**. 74,3 (November) : 366-371.

[25]Lassila, L.V.J., Nohrstrom, T. and Vallittu, P.K., 2002. "The Influence of Short-Term Water Storage on the Flexural Properties of Unidirectional Glass Fiber-Reinforced Composites," **Biomaterials**. 23,10 (May) : 2221-2229.