



รหัสโครงการ SUT7-710-54-12-01

รายงานการวิจัย

การเตรียมฟิล์มพลาสติกชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง  
พอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติ  
Preparation of Bioplastic Film from  
Polylactic Acid/Natural Rubber Blends

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT7-710-54-12-01



รายงานการวิจัย

การเตรียมฟิล์มพลาสติกชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง  
พอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติ  
Preparation of Bioplastic Film from  
Polylactic Acid/Natural Rubber Blends

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จันทิมา ดีประเสริฐกุล  
สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2554

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

เมษายน 2555

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัยสำหรับโครงการวิจัยการเตรียมฟิล์มพลาสติกชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติ นี้ นอกจากนี้ งานวิจัยคงไม่สามารถลุล่วงได้หากขาดผู้ช่วยวิจัยทั้งระดับปริญญาโทและปริญญาตรี เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือและวิเคราะห์วิทยาศาสตร์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี รวมถึงความอนุเคราะห์จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีในการใช้เครื่องเป่าฟิล์ม คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผู้สนใจอ่านงานวิจัยฉบับนี้จะได้รับประโยชน์ตามสมควร

จันทิมา ตีประเสริฐกุล

หัวหน้าโครงการฯ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

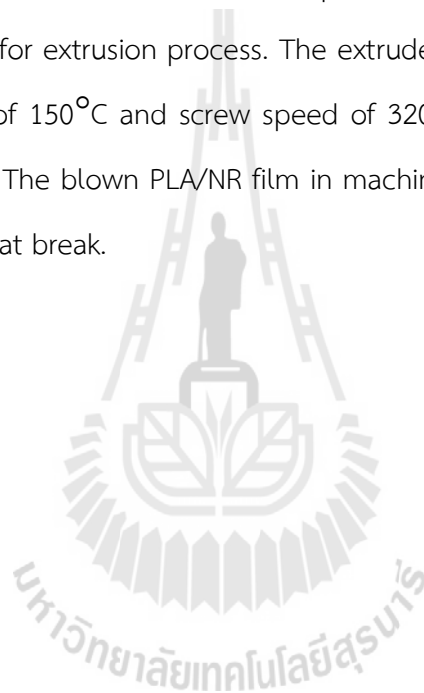
## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาเพื่อเตรียมฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และยางธรรมชาติ (NR) ที่มีปริมาณยางธรรมชาติผสมอยู่ 10% (โดยน้ำหนัก) ด้วยกระบวนการรีด (extrusion process) และกระบวนการเป่าฟิล์ม (film-blowing process) ภายใต้การปรับสภาวะการขึ้นรูปต่าง ๆ พบว่า พอลิเมอร์ผสม PLA/NR นี้สามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ด้วยกระบวนการทั้งสอง โดยสภาวะที่เหมาะสมในการรีด พบที่ อุณหภูมิหัวรีด  $147^{\circ}\text{C}$  ความเร็วรอบ 3 rpm และอัตราส่วนการดึงเท่ากับ 1 โดยฟิล์มที่ได้มีลักษณะเปราะ และสภาวะที่เหมาะสมในการเป่าฟิล์ม พบที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$  ความเร็วรอบสูงสุดที่ 320 rpm จากฟิล์มที่ได้ ฟิล์มบางตามแนวเครื่อง (MD) แสดงค่ามอดุลัสและความเครียดที่จุดขาดสูงที่สุด



## Abstract

In this work, the preparation of bioplastic films from polylactic acid/natural rubber blends (at natural rubber of 10 wt%) via extrusion and film-blowing processes was studied. The bioplastic PLA/NR films can be prepared under both processes at specific processing conditions. The die temperature of 147°C, screw speed of 3 rpm and draw ratio of 1 were the optimum conditions for extrusion process. The extruded PLA/NR film was brittle. The processing temperature of 150°C and screw speed of 320 were the optimum conditions for film-blowing process. The blown PLA/NR film in machine direction showed the highest modulus and elongation at break.



## สารบัญ

### หน้า

กิตติกรรมประกาศ .....	ก
บทคัดย่อ .....	ข
Abstract .....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	ฉ
สารบัญรูป .....	ช
<b>บทที่ 1</b> .....	<b>1</b>
1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย .....	1
1.2 ขอบเขตของโครงการวิจัย .....	2
1.3 ทฤษฎี สมมติฐาน หรือกรอบแนวความคิด (Conceptual Framework).....	2
1.4 การทบทวนวรรณกรรม (Literature review).....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย .....	4
<b>บทที่ 2</b> .....	<b>5</b>
2.1 วัสดุและสารเคมี .....	5
2.2 การเตรียมตัวอย่าง .....	5
2.3 การขึ้นรูป .....	5
2.3.1 กระบวนการรีด (Extrusion process).....	5
2.3.2 กระบวนการเป่าฟิล์ม (Blown-film process).....	6
2.4 การทดสอบสมบัติการดึง (Tensile test).....	6
<b>บทที่ 3</b> .....	<b>7</b>
3.1 กระบวนการรีด (Extrusion process) .....	7

3.2	กระบวนการเป่าฟิล์ม (Film-blowing process).....	9
3.2.1	สมบัติการดึง (Tensile properties).....	11
บทที่ 4	.....	16
เอกสารอ้างอิง	.....	17
ประวัติผู้วิจัย	.....	18



## สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1	สมบัติการดึงของฟิล์ม PLA/NR10 จากการเป่า.....	11
ตารางที่ 3.2	สมบัติการดึงของฟิล์ม PLA/NR ชนิด MD_บาง เก็บที่อุณหภูมิ 40°C ในระยะเวลาต่าง ๆ	13





## สารบัญรูป

รูปที่ 3.1	ตัวอย่างฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/NR จากกระบวนการรีด.....	8
รูปที่ 3.2	ลักษณะ PLA bubble ที่ความเร็วรอบ 120 rpm และอุณหภูมิ 160°C.....	9
รูปที่ 3.3 ก)	ลักษณะ PLA/NR10 bubble ที่ความเร็วรอบ 200 rpm และอุณหภูมิ 150°C.....	10
รูปที่ 3.3 ข)	ลักษณะ PLA/NR10 bubble ที่ความเร็วรอบ 320 rpm และอุณหภูมิ 150°C.....	10
รูปที่ 3.4	ตัวอย่างลักษณะ PLA/NR10 ในสถานะที่ไม่สามารถเป่าเป็นฟิล์มได้.....	11
รูปที่ 3.5	กราฟระหว่างความเค้นและความเครียดของฟิล์ม PLA/NR เมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 40°C และ ระยะเวลาต่าง ๆ.....	12
รูปที่ 3.6	ตัวอย่างฟิล์ม MD_บาง ภายใต้การทดสอบการดึง ก่อนการขาด.....	13
รูปที่ 3.7 ก)	เทอร์โมแกรมจาก DSC ในส่วนสีขาวทึบแสงของฟิล์ม PLA/NR10 ภายใต้การดึง.....	14
รูปที่ 3.7 ข)	เทอร์โมแกรมจาก DSC ในส่วนโปร่งแสงของฟิล์ม PLA/NR10 ภายใต้การดึง.....	15

## บทที่ 1

### บทนำ

ปัจจุบันพอลิเอทิลีนแอกซีดเป็นพอลิเมอร์ที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก จัดเป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางทั้งในด้านบรรจุภัณฑ์และทางการแพทย์ อย่างไรก็ตาม พอลิเอทิลีนแอกซีดมีสมบัติที่เปราะ และความสามารถในการขึ้นรูป (processability) ที่ต่ำ ยังคงเป็นข้อจำกัดในการใช้ประโยชน์และกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพ นอกเหนือจากราคาของพลาสติกประเภทนี้ที่มีราคาสูง ยังคงมีความจำเป็นในการปรับปรุงสมบัติ เพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป และลดค่าใช้จ่ายในการผลิตผลิตภัณฑ์จากพลาสติกชีวภาพนี้ จากงานวิจัยที่ทำมาก่อนหน้านี้ คณะผู้วิจัยพบว่า สมบัติด้านความเหนียวของพอลิเอทิลีนแอกซีดสามารถปรับปรุงได้ด้วยการผสมกับยางธรรมชาติซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีในประเทศไทยและไม่มีการทำวัลคาไนเซชันในยาง ทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่ช่วยลดปัญหาความเปราะของพอลิเอทิลีนแอกซีดและยังสามารถย่อยสลายได้ ไม่มีข้อจำกัดเรื่องโครงสร้างร่างแห นอกจากนี้ ยังพบว่าสามารถเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนแอกซีดและยางธรรมชาติเป็นแผ่นบางด้วยกระบวนการกดอัด (compression molding) ได้ อย่างไรก็ตาม การประยุกต์ใช้งานในด้านบรรจุภัณฑ์ที่สำคัญจะอยู่ในรูปของฟิล์ม การขึ้นรูปฟิล์มในอุตสาหกรรมทั่วไปจะใช้กระบวนการเป่าฟิล์ม (film blowing process) หรือการอัดรีด (extrusion process) ทำให้ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาเพื่อเตรียมฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมนี้ด้วยกระบวนการขึ้นรูปฟิล์มที่มีใช้กันในอุตสาหกรรมทั่วไปเพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้

#### 1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อหาสภาวะการขึ้นรูปฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนแอกซีดและยางธรรมชาติด้วยกระบวนการขึ้นรูปที่ใช้ในอุตสาหกรรม และ เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพของฟิล์มที่เตรียมได้และสภาวะการขึ้นรูป

## 1.2 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ผสมพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติที่อัตราส่วน 90/10 โดยน้ำหนัก (เป็นอัตราส่วนการผสมที่ ให้สมบัติเหนียวดีที่สุดจากข้อมูลวิจัยที่ทำมาก่อน) ขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมด้วยกระบวนการรีดและกระบวนการ เป่าฟิล์ม โดยปรับสภาวะของกระบวนการ (ตัวแปร) ได้แก่ อุณหภูมิการขึ้นรูป ความเร็วรอบ อัตราส่วน ความเร็วในการดึง (draw ratio) เพื่อให้เป็นฟิล์มได้ (ภายใต้กรอบ processability) และศึกษาสมบัติการดึง ของฟิล์มที่ได้

## 1.3 ทฤษฎี สมมติฐาน หรือกรอบแนวความคิด (Conceptual Framework)

แม้ว่าความสามารถในการขึ้นรูปของพอลิแล็กติกแอซิดจะต่ำ การฟอร์มตัวเป็นฟิล์มด้วย กระบวนการขึ้นรูปฟิล์มทั่วไปทำได้ยาก การผสมยางธรรมชาติซึ่งโดยธรรมชาติมีสมบัติยืดหยุ่น (elastic) น่าจะช่วยเพิ่มความสามารถในการดึงยึดและฟอร์มตัวเป็นฟิล์มของพอลิแล็กติกแอซิดได้ นอกเหนือจากได้ ฟิล์มที่มีสมบัติเหนียว (tough)

## 1.4 การทบทวนวรรณกรรม (Literature review)

พอลิแล็กติกแอซิด [Poly(lactic acid), PLA] เป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยเป็นพอลิ เอสเทอร์ชนิดอะลิฟาติกสายโซ่ตรง (linear aliphatic polyester) ที่ได้จากกรดแล็กติก (lactic acid) ซึ่งได้ จากการหมักแป้ง<sup>1,2</sup> PLA เป็นพอลิเมอร์ที่ได้รับความสนใจในการนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านบรรจุภัณฑ์และทางการแพทย์ ทั้งนี้เพราะ PLA มีสมบัติเชิงกลที่ดี สามารถย่อยสลาย ได้ทางชีวภาพ และเตรียมจากแป้งซึ่งจัดเป็นทรัพยากรที่สามารถเกิดขึ้นใหม่ทดแทนได้ (renewable resources) อย่างไรก็ตาม PLA มีโมดูลัสสูง และความเครียดที่จุดขาดต่ำ (strain at break) รวมทั้งมีราคา ค่อนข้างสูง จึงมีข้อจำกัดในการนำมาใช้ประโยชน์ การทำพอลิเมอร์ผสมเป็นทางเลือกที่ใช้เพื่อปรับปรุง สมบัติดังกล่าว<sup>3,4,5,6</sup> จากงานที่ทำมาก่อนหน้านี้ พอลิแล็กติกแอซิดจะมีสมบัติด้านความเหนียวสูงขึ้นเมื่อ ผสมด้วยยางธรรมชาติมากขึ้นจนถึงอัตราส่วนการผสม PLA/NR 90/10 (โดยน้ำหนัก) จะมีค่า elongation at break, tensile toughness และ impact strength เท่ากับ 20.13%, 499 MPa และ 6.66 kJ/m<sup>2</sup> ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่าดังกล่าวของ PLA ที่ 9.30%, 317 MPa และ 2.34 kJ/m<sup>2</sup> ตามลำดับ<sup>7</sup>

พอลิแล็กติกแอซิดมีค่าอุณหภูมิหลอม ( $T_m$ ) ในช่วง  $150 - 190^\circ\text{C}$  อุณหภูมิทรานสิชันแก้ว ( $T_g$ ) ในช่วง  $50-60^\circ\text{C}$  และอุณหภูมิการเกิดผลึกขณะให้ความร้อน ( $T_{cc}$ ) ช่วง  $95-105^\circ\text{C}$ <sup>1,2,8</sup> และมีอัตราการเกิดผลึกที่ช้า ซึ่งโดยทั่วไปในการขึ้นรูปจึงควรทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (quench) แล้วให้ความร้อนอีกครั้ง ในช่วงระหว่าง  $T_g$  และ  $T_{cc}$  เพื่อให้พอลิเมอร์อยู่ในสภาวะยาง (rubbery state) ซึ่งเป็นสภาวะที่พอลิเมอร์สามารถดึงยืดได้เมื่อให้แรงกระทำ ซึ่งเอื้อต่อการจัดเรียงตัวตามแนว (orientation) และการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ได้ สำหรับเกรดของ PLA ที่จะใช้ในงานวิจัยนี้แสดง  $T_m$  สองพีคในช่วง  $\sim 146-152^\circ\text{C}$   $T_g$  ที่  $52^\circ\text{C}$  และ  $T_{cc}$  ที่  $116^\circ\text{C}$  ซึ่งค่าอุณหภูมิเหล่านี้เปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อผสมกับยางธรรมชาติ รวมทั้งปริมาณผลึกของ PLA

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูปฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด พบว่า มีตัวแปรของกระบวนการขึ้นรูปหลายตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด Ou และ CakMak เติร์ยมฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดด้วยเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวและศึกษาถึงผลของการดึงในสองทิศทาง (biaxial stretching) ต่อผลึกของฟิล์ม พบว่า การดึงโดยลำดับ (sequential) จะได้ฟิล์มที่มีความเป็นระเบียบของผลึก (crystalline order) ที่สูงกว่าการดึงแบบพร้อมกัน (simultaneous) และการดึงแนวขวาง (transverse direction) จะค่อย ๆ ทำลายโครงสร้างผลึกที่จัดเรียงตัวตามแนวยาว (machine direction) และเสนอให้มีการทำการอบอ่อนภายใต้ความเครียด (strained annealing) เพื่อเพิ่มความเป็นระเบียบ (order)<sup>9</sup> Lee และคณะ พบว่า อุณหภูมิ  $80^\circ\text{C}$  เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ใช้ในการดึงเพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีการจัดเรียงตัวตามแนวแรง (oriented)<sup>10</sup> เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิโพลีเอทิลีนส์ทั่วไป การขึ้นรูปฟิล์ม PLA ด้วยกระบวนการเป่าทำได้ยากกว่า ฟิล์มมีความแข็งแรงมากกว่าและถูกดึงยืด (elongation) ได้น้อยกว่า จึงอาศัยการเติมสารเติมแต่ง<sup>11,12</sup> โคพอลิเมอร์และ/หรือการใช้เทคนิคการหล่อเย็น<sup>13</sup> เพื่อช่วยให้สามารถขึ้นรูปได้ เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ มุ่งหาแนวทางและสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับยางธรรมชาติด้วยการปรับตัวแปรการขึ้นรูป และศึกษาสมบัติทางกายภาพของฟิล์มที่เตรียมได้

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

จากการวิจัยทำให้รู้ว่า การขึ้นรูปฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับยางธรรมชาติ ด้วยกระบวนการเป่าและกระบวนการรีดสามารถทำได้ สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมนี้แตกต่างจากพอลิแล็กติกแอซิด แม้ว่าสภาวะในการขึ้นรูปยังจำกัด แต่การผสมด้วยยางธรรมชาติก็ช่วยให้ผลิตฟิล์มที่อัตราการผลิตสูงขึ้นและใช้พลังงานความร้อนน้อยลงได้



## บทที่ 2

### วิธีดำเนินการวิจัย

โครงการนี้ มีวิธีดำเนินการวิจัยประกอบด้วยขั้นตอนหลัก คือ การขึ้นรูปฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับยางธรรมชาติ (PLA/NR) ที่มีปริมาณยาง 10% (โดยน้ำหนัก) ด้วยกระบวนการรีด (extrusion process) ที่ตัวแปรการขึ้นรูปต่าง ๆ และทำการทดสอบสมบัติการดึงของฟิล์มที่เตรียมได้

#### 2.1 วัสดุและสารเคมี

1. พอลิแล็กติกแอซิด (PLA) ซื้อจาก บ. NatureWorks LLC เกรด 4042D (ใช้สำหรับงานฟิล์ม)
2. น้ำยางธรรมชาติเข้มข้นชนิดแอมโมเนียสูง (High ammonia natural rubber latex) ซื้อจาก บ.ไทยฮั้ว ยางพารา จำกัด (มหาชน) ทำการอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 70°C

#### 2.2 การเตรียมตัวอย่าง

1. ทำการผสม PLA กับยางธรรมชาติ ที่สัดส่วนการผสมให้ได้ PLA/NR ที่มีปริมาณยาง 10% โดยน้ำหนัก โดยใช้เครื่องบดผสมภายใน Haake รุ่น Rheomix 600p ความเร็วรอบของแกนหมุน 50 rpm ที่อุณหภูมิ 180 เป็นเวลา 17 นาที โดยก่อนผสมทำการอบทิ้งเม็ด PLA และยางที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
2. นำออกจากเครื่องบดผสมภายใน ที่ยังพอลิเมอร์ผสมให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำมาบดด้วยเครื่องบด Riken Electric Co, Ltd. ให้มีลักษณะเป็นเม็ด

#### 2.3 การขึ้นรูป

##### 2.3.1 กระบวนการรีด (Extrusion process)

1. ติดตั้งหัวรีดเข้ากับเครื่องรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder) Brabender รุ่น DSE35/17D เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรูเท่ากับ 35 มิลลิเมตร และ L/D เท่ากับ 17 ปรับค่าอุณหภูมิที่กระบอกหุ้มสกรู 4 ตำแหน่ง และที่หัวรีด
2. ตั้งค่าความเร็วรอบ (rpm) การหมุนของสกรูที่ค่าต่าง ๆ

3. ปรับอัตราส่วนการดึง (draw ratio) ด้วยการปรับความเร็วรอบของ take-up roll ของ Brabender โดยระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งจากหัวรีดเท่ากับ 7 เซนติเมตร

### 2.3.2 กระบวนการเป่าฟิล์ม (Blown-film process)

1. ทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องเป่าฟิล์มขนาดเล็ก (mini-type) Southeast machinery รุ่น SE/HD-45 MINI ซึ่งมี L/D เท่ากับ 28/1 เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวรีดแบบวงแหวน ขนาด 60 มิลลิเมตร และความกว้างของวงแหวน (die gap) เท่ากับ 1 มิลลิเมตร
2. ปรับความเร็วรอบของสกรูและอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปที่ค่าต่าง ๆ ให้สามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มที่เสถียร (stable) ได้

### 2.4 การทดสอบสมบัติการดึง (Tensile test)

1. ทดสอบสมบัติการดึงของฟิล์มด้วยเครื่อง Instron universal testing รุ่น 5569 โดยใช้ load cell ขนาด 5 kN
2. จับยึดชิ้นตัวอย่างด้วยหัวจับ (grip) ขนาดของ gauge length เท่ากับ 7.62 มิลลิเมตร ทำการดึงที่ความเร็วของ crosshead 1 มิลลิเมตร/นาที ที่อุณหภูมิห้อง
3. ทำการทดสอบชิ้นตัวอย่าง อย่างละ 5 ชิ้น บันทึกผล
4. อ่านค่าความเค้นที่จุดขาด ความเครียดที่จุดขาด คำนวณหามอดุลัส ความเหนียวดึง
5. เก็บฟิล์มที่อุณหภูมิ 40°C ในตู้อบเป็นระยะเวลา 0-4 สัปดาห์ ก่อนนำมาทดสอบ เพื่อศึกษาผลของ physical aging (ภายหลังการทดสอบ ฟิล์มบางบริเวณจะมีสีขาวขุ่นและบางบริเวณจะใสไม่มีสี นำทั้งสองส่วนนี้ทดสอบสมบัติทางความร้อน โดยใช้ Differential Scanning Calorimetry, DSC)

## บทที่ 3

### ผลและการอภิปราย

ในบทนี้ จะกล่าวถึงการขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติที่อัตราส่วนการผสม 90/10 โดยน้ำหนัก (PLA/NR10) ด้วยกระบวนการรีดและการเป่าฟิล์มที่สภาวะต่าง ๆ สมบัติการดึงของฟิล์มที่ได้ รวมทั้งผลของ physical aging ของฟิล์ม

#### 3.1 กระบวนการรีด (Extrusion process)

ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติตามต้องการ จะต้องคำนึงถึงอัตราการผลิต (production rate) พลังงานที่ใช้ในการผลิต รวมทั้งค่าใช้จ่ายอื่น ๆ ในการผลิต โดยให้มีอัตราการผลิตสูง ใช้พลังงานต่ำ และค่าใช้จ่ายน้อย การผลิตฟิล์มก็อาศัยแนวคิดภายใต้กรอบดังกล่าวเช่นกัน

เมื่อทำการขึ้นรูปฟิล์มจาก PLA/NR10 ด้วยกระบวนการรีดโดยปรับอุณหภูมิและความเร็วรอบ พบว่า สามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่กระบอกหุ้มสกรู 4 ตำแหน่งและที่หัวรีด เท่ากับ 130 135 140 145 147°C (จากข้อมูล DSC อุณหภูมิการหลอมของ PLA อยู่ในช่วง 146-152°C) ทั้งนี้ เมื่อทำการปรับอุณหภูมิที่หัวรีดค่าต่าง ๆ พบว่า มีเพียงช่วง 147-148°C เท่านั้นที่สามารถขึ้นฟิล์มได้ และที่ความเร็วรอบ 3 rpm เท่ากับความเร็วที่พอลิเมอร์หลอมไหลผ่านหัวรีดมีค่าเท่ากับ 11.5 mm/s จะสามารถได้ฟิล์มที่สามารถถูกดึงยึดโดย take-up roll ได้ เมื่อหล่อเย็นด้วยอากาศที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเพิ่มความเร็วรอบ ไม่สามารถขึ้นฟิล์มนี้ได้

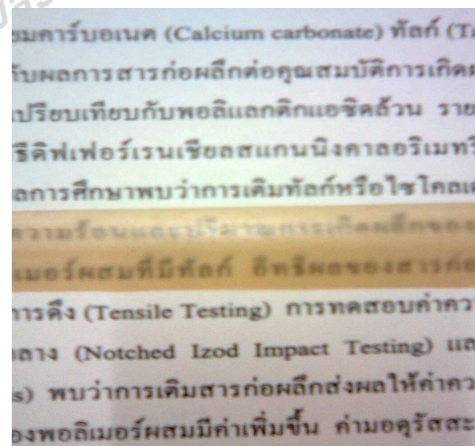
##### 3.1.1 อัตราส่วนการดึง (Draw ratio)

อัตราส่วนการดึง (DR) คือ อัตราส่วนระหว่างความเร็วของ take-up roll และความเร็วของพอลิเมอร์หลอมไหลผ่านหัวรีด ในการศึกษาเมื่อปรับความเร็วของ take-up roll ค่าต่าง ๆ พบว่า ที่อัตราส่วนการดึงเท่ากับ 1 เท่านั้นที่สามารถได้ฟิล์ม ได้ฟิล์มที่มีความหนา 0.50 มิลลิเมตร ตัวอย่างฟิล์มที่ได้แสดงดังรูป 3.1 ที่อัตราส่วนการดึงสูงกว่านี้ พอลิเมอร์หลอมเกิดการ “ขาด” ระหว่างดึง ไม่สามารถรีดเป็นฟิล์มได้



ในกระบวนการรีด สามารถขึ้นรูปฟิล์มของพอลิเมอร์ผสม PLA/NR10 ได้ แม้ว่าสามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ แต่ฟิล์มที่ได้ หากมีแรงบิดเพียงเล็กน้อย ฟิล์มก็แตกหักแบบเปราะ ทำให้ไม่สามารถนำมาทดสอบการดึง (tensile test) ได้ เนื่องจากฟิล์มเกิดการแตกหักในขั้นตอนการจับยึด (grip)

จากการศึกษาโครงสร้างของ PLLA ภายใต้การดึงของ Lee และคณะ โดยเตรียมฟิล์มด้วยกระบวนการกดอัด (compression molding) แล้วทำการดึงฟิล์มด้วยเครื่องทดสอบการดึงที่อัตราการดึงต่าง ๆ พบว่า ที่อัตราการดึงสูงจะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวตามแนวแรง (orientation) สูง<sup>10</sup> เมื่อทำการขึ้นรูป PLA/NR10 ด้วยกระบวนการกดอัดเพื่อเตรียมแผ่นฟิล์ม พบว่า กรณีฟิล์มบางจากการกดอัดจะมีความเหนียว ดึง พับ บิดได้ หากเป็นแผ่นแข็ง (ความหนา 0.20 มิลลิเมตร) จะมีความเหนียวน้อยกว่า บิดได้ แต่จะหักเมื่อพับ (ความหนามีบทบาทต่อสมบัติเชิงกล) นอกจากประเด็นเรื่องความหนา ฟิล์มที่ได้จากกระบวนการกดอัดยังแตกหักยากกว่าที่ได้จากการกระบวนการรีดมาก ความแตกต่างของสมบัติของฟิล์มที่เกิดขึ้นจากสองกระบวนการนี้น่าจะมาจากในกระบวนการกดอัด สายโซ่พอลิเมอร์มีเวลาในการเข้าสู่สมดุล เกิดการจัดเรียงตัวที่ดีกว่าในกระบวนการรีดซึ่งเมื่อพอลิเมอร์ไหลผ่านหัวรีด ผ่าน take-up roll ที่อุณหภูมิห้อง สายโซ่พอลิเมอร์มีเวลาไม่เพียงพอจะเข้าสู่สมดุลก็เกิดการแข็งตัว (solidify) แล้ว หากทำการอบอ่อน (annealing) พร้อมกับการดึงฟิล์ม (stretching) ภายหลังการรีดฟิล์มอาจช่วยทำให้สมบัติเชิงกลสูงขึ้นได้ แม้กระบวนการกดอัดจะให้ฟิล์มที่มีสมบัติที่ดีกว่า โดยทั่วไปกระบวนการกดอัดไม่ใช่กระบวนการเพื่อขึ้นรูปฟิล์มในระดับอุตสาหกรรม



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/NR จากกระบวนการรีด

### 3.2 กระบวนการเป่าฟิล์ม (Film-blowing process)

เมื่อนำ PLA มาขึ้นรูปด้วยเครื่องเป่าฟิล์มนี้ พบว่า สามารถขึ้นฟิล์มที่เสถียรได้เมื่อใช้ความเร็วรอบของสกรูเท่ากับ 120 rpm และอุณหภูมิ 160°C ซึ่งแสดงดังรูป 3.2 สำหรับการขึ้นรูป PLA/NR10 โดยปรับความเร็วรอบสกรูและอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปค่าต่าง ๆ พบว่า ที่ 200 และ 320 rpm (สูงกว่าที่ใช้กับ PLA) และอุณหภูมิ 150 และ 150°C (ต่ำกว่าที่ใช้กับ PLA) ตามลำดับ สามารถขึ้นรูป PLA/NR นี้เป็นฟิล์มที่เสถียรได้ ดังรูป 3.3 (ก และ ข) สำหรับรูปที่ 3.4 แสดงให้เห็นว่าสามารถนำเข้ากระบวนการได้แต่ไม่สามารถขึ้นฟิล์มที่เสถียรได้ เป็นที่น่าสังเกตว่า กรณีฟิล์ม PLA/NR ที่เสถียรสามารถใช้ความเร็วรอบสูงขึ้นและอุณหภูมิต่ำกว่า PLA ได้ นั่นคือ ให้อัตราการผลิตสูงและใช้พลังงานความร้อนน้อยลง



รูปที่ 3.2 ลักษณะ PLA bubble ที่ความเร็วรอบ 120 rpm และอุณหภูมิ 160°C



รูปที่ 3.3 ก) ลักษณะ PLA/NR10 bubble ที่ความเร็วรอบ 200 rpm และอุณหภูมิ 150°C



รูปที่ 3.4 ข) ลักษณะ PLA/NR10 bubble ที่ความเร็วรอบ 320 rpm และอุณหภูมิ 150°C



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างลักษณะ PLA/NR10 ในสภาวะที่ไม่สามารถเป่าเป็นฟิล์มได้

### 3.2.1 สมบัติการดึง (Tensile properties)

ฟิล์ม PLA/NR10 ที่ได้จากการเป่ามีความหนาที่ไม่สม่ำเสมอ เมื่อนำมาทดสอบสมบัติการดึงจึงเลือกชิ้นทดสอบจากบริเวณที่หนาและบาง โดยตัดชิ้นทดสอบทั้งตามแนวยาว (machine direction, MD) และแนวขวาง (transverse direction, TD) ได้ผลดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติการดึงของฟิล์ม PLA/NR10 จากการเป่า

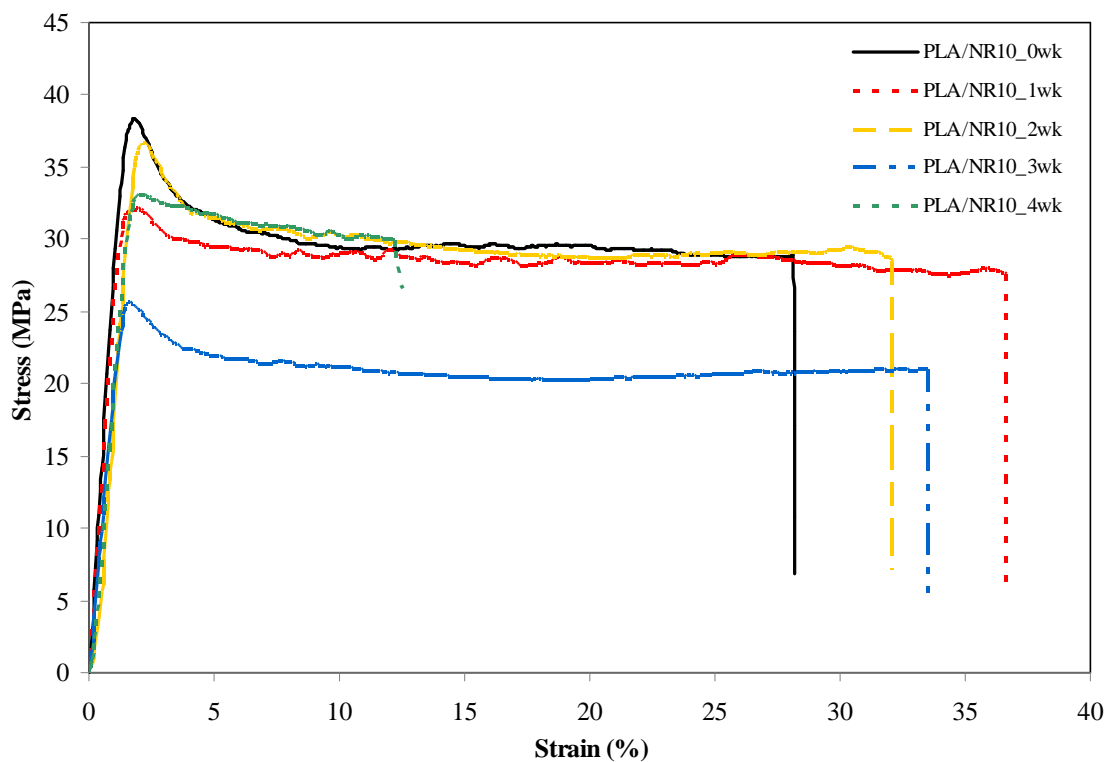
ฟิล์ม PLA/NR	ความหนา <sup>a</sup> (mm)	ความแข็งแรง ดึง (MPa)	ความเครียดที่ จุดขาด (%)	มอดุลัส (GPa)	ความเหนียว (MPa)
MD_หนา	0.182-0.332	18.53 ± 3.37	3.18 ± 0.35	1.91 ± 0.35	57.47 ± 18.88
MD_บาง	0.092-0.117	28.65 ± 1.33	31.51 ± 3.04	2.64 ± 0.29	918.82 ± 82.09
TD_หนา	0.219-0.292	17.81 ± 1.04	2.22 ± 0.41	2.02 ± 0.20	36.32 ± 7.09
TD_บาง	0.082-0.106	23.92 ± 1.25	14.41 ± 1.18	2.55 ± 0.36	346.56 ± 14.68

<sup>a</sup> โดยทั่วไป ฟิล์มเป่าที่มีความหนาดังแต่ 0.075 mm จัดเป็นฟิล์มหนา



จากตาราง 3.1 จะเห็นว่า สมบัติการดึงของฟิล์มในสองทิศทางแตกต่างกัน โดยสมบัติตามแนวยาว (MD) จะมีค่าสูงกว่าตามแนวขวาง (TD) ซึ่งน่าจะเป็นผลจากการจัดเรียงตัวตามแนวแรงที่สูงกว่าตามแนว ยาว ฟิล์มบางจะทนต่อการดึงสูงกว่าฟิล์มหนา อย่างไรก็ตาม ทั้งฟิล์มบางและหนาในที่นี้ต่างจัดว่าเป็นฟิล์ม แข็ง (ไม่ยืดหยุ่น) (เปรียบเทียบกับฟิล์มจาก PP, LDPE และ HDPE)

เมื่อทำการทดลอง physical aging แก่ฟิล์ม PLA/NR ชนิด MD\_บาง (ซึ่งแสดงสมบัติการดึงที่ดีที่สุด) โดยเก็บที่อุณหภูมิ 40°C เป็นระยะเวลา 0-4 สัปดาห์ แล้วนำทดสอบสมบัติเชิงกลได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3.5 จะเห็นว่า ฟิล์ม PLA/NR แสดงพฤติกรรมแบบเหนียว มีการเกิด yielding และมีสมบัติเชิงกลต่ำลงเมื่อเก็บ ไว้เป็นเวลาดั้งแต่ 3 สัปดาห์ โดยผลของสัปดาห์ที่ 4 ลักษณะ yielding ไม่ชัดเจน ในเบื้องต้น เชื่อว่า PLA เกิดการ depolymerize ทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง ค่าสมบัติการดึงต่าง ๆ ได้ รวบรวมในตารางที่ 3.2

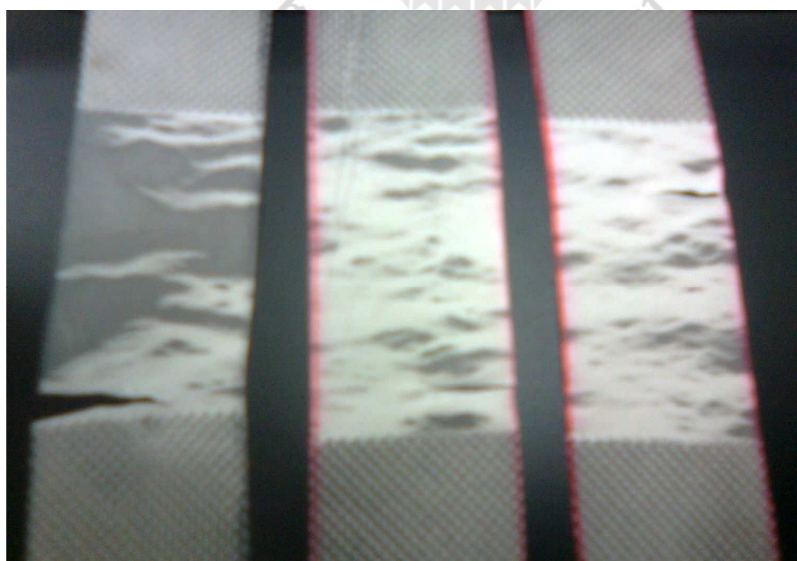


รูปที่ 3.6 กราฟระหว่างความเค้นและความเครียดของฟิล์ม PLA/NR เมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 40°C และ ระยะเวลาต่าง ๆ

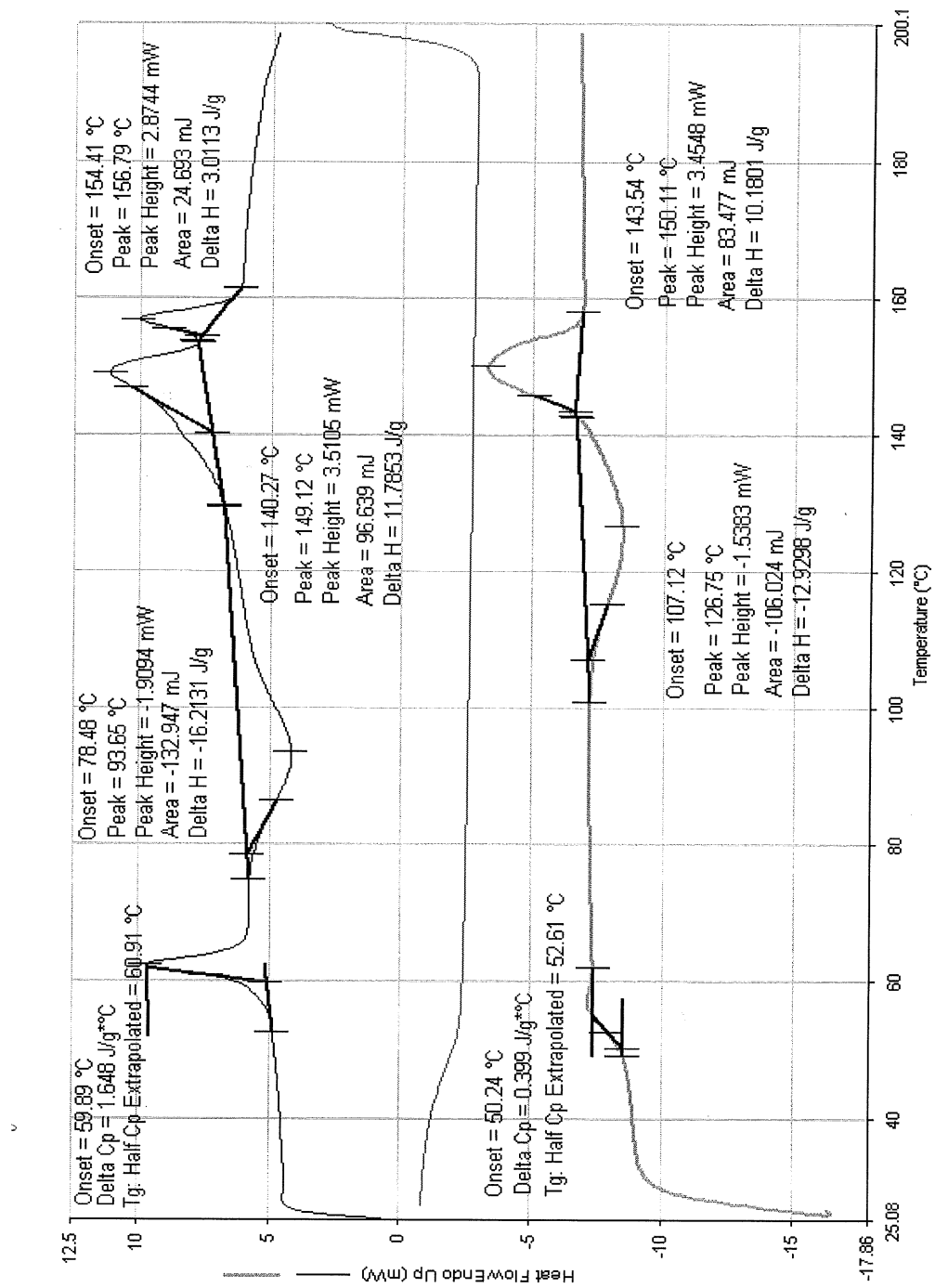
ตารางที่ 3.2 สมบัติการดึงของฟิล์ม PLA/NR ชนิด MD\_บาง เก็บที่อุณหภูมิ 40°C ในระยะเวลาต่าง ๆ

Aging time (สัปดาห์)	ความแข็งแรงดึง (MPa)	ความเครียดที่ จุดขาด (%)	มอดุลัส (GPa)	ความเหนียว (MPa)
0	28.65 ± 1.33	31.51 ± 3.04	2.64 ± 0.29	918.82 ± 82.09
1	27.44 ± 0.93	36.36 ± 7.20	2.19 ± 0.44	1008.15 ± 212.28
2	29.65 ± 2.78	31.72 ± 8.12	1.25 ± 0.39	907.89 ± 192.39
3	20.95 ± 2.96	32.50 ± 23.08	1.16 ± 0.73	723.35 ± 546.93
4	27.59 ± 3.50	12.37 ± 0.81	1.33 ± 0.49	336.59 ± 44.92

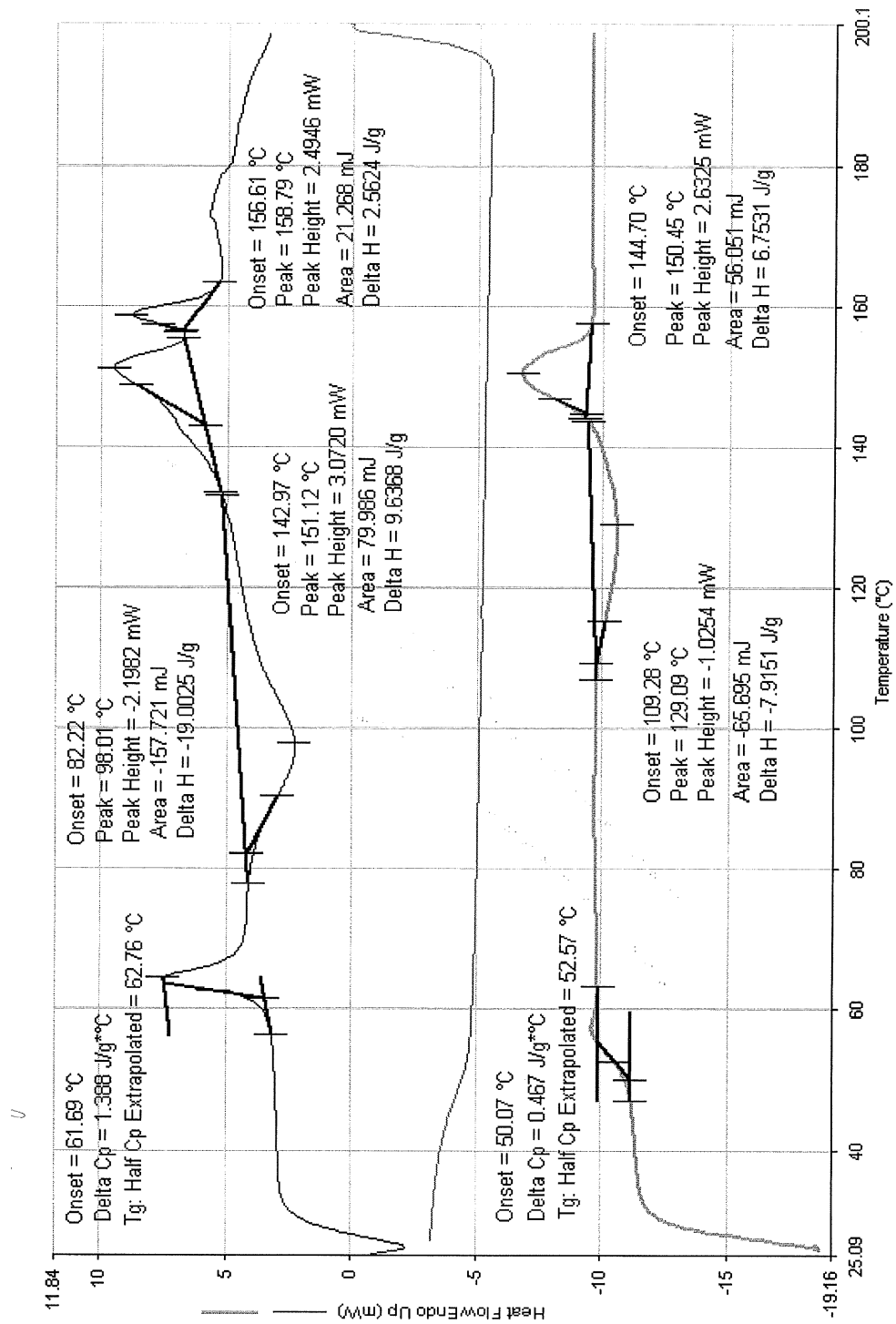
ภายใต้การทดสอบการดึงฟิล์ม MD\_บางนี้ สังเกตพบว่า ในระหว่างการดึง ฟิล์มเปลี่ยนจากโปร่งแสง เป็นสีขาวทึบแสง ก่อนการขาด ดังรูป 3.6 ซึ่งอาจเกิดจากส่วนของเฟสยางเท่านั้น (ลักษณะคล้ายการเกิด shear-banding) อย่างไรก็ตาม เมื่อทดสอบส่วนสีขาวทึบแสงและส่วนโปร่งแสงด้วยเทคนิค DSC ที่อัตราการให้ความร้อน 20°C ผลดังแสดงในรูปที่ 3.7 พบว่า ทั้งส่วนสีขาวทึบแสงและส่วนโปร่งแสงมีองค์ประกอบเดียวกัน ดูจากการให้ความร้อนครั้งที่หนึ่ง (เส้นบนสุดในรูป) ซึ่งเป็นลักษณะของ PLA ดังนั้น ส่วนทึบแสง ไม่ใช่ยางธรรมชาติเท่านั้น การศึกษากลไกการแตกหัก (fracture mechanics) น่าจะทำให้เข้าใจการแตกหักของวัสดุนี้ได้



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างฟิล์ม MD\_บาง ภายใต้การทดสอบการดึง ก่อนการขาด



รูปที่ 3.8 ก) เทอร์โมแกรมจาก DSC ในส่วนสีขาวทึบแสงของฟิล์ม PLA/NR10 ภายใต้การตั้ง



รูปที่ 3.9 ข) เทอร์โมแกรมจาก DSC ในส่วนโปร่งแสงของฟิล์ม PLA/NR10 ภายใต้การดั่ง



## บทที่ 4

### สรุปและข้อเสนอแนะ

แผ่นฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับยางธรรมชาติที่มีปริมาณยาง 10% โดยน้ำหนัก สามารถเตรียมได้ด้วยกระบวนการรีดและกระบวนการเป่า โดยสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปที่เหมาะสมในการรีด พบที่อุณหภูมิหัวรีด  $147^{\circ}\text{C}$  ความเร็วรอบ 3 rpm และอัตราส่วนการดึงเท่ากับ 1 โดยฟิล์มที่ได้มีลักษณะเปราะ ส่วนสภาวะที่เหมาะสมในการเป่า พบที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$  ความเร็วรอบสูงสุดที่ 320 rpm ฟิล์มบางตามแนวเครื่อง (MD) แสดงค่ามอดุลัสและความเครียดที่จุดขาดสูงที่สุด และฟิล์มหนาตามแนวขวาง (TD) แสดงค่าดังกล่าวต่ำที่สุด

จากการศึกษานี้ ในเบื้องต้น แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการขึ้นรูป (processability) เป็นฟิล์มได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับยางธรรมชาติซึ่งต่างเป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ แม้ว่าจะมีสภาวะในการขึ้นรูปได้ที่จำกัดก็ตาม ยังมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาผลของตัวแปรในแต่ละกระบวนการขึ้นรูปเพื่อเพิ่มสภาวะในการขึ้นรูปให้กว้างขึ้นและสามารถทำ scale-up ได้ รวมทั้งศึกษาเทคนิคภายหลังการขึ้นรูปฟิล์ม เช่น การอบอ่อน การดึงเพื่อจะให้ฟิล์มมีสมบัติตามต้องการได้ เป็นต้น

## เอกสารอ้างอิง (References)

1. Lunt J. Large-scale production, properties and commercial applications of polylactic acid polymers. *Polym Degrad Stab* 1998, 59, 145–51.
2. Garlotta, D. A literature review of poly(lactic acid). *J Polym Environ* 2001, 9, 63–84.
3. Fimbeau S., Grelier S., Copinet A., Coma V., Novel biodegradable films made from chitosan and poly(lactic acid) with antifungal properties against mycotoxinogen strains. *Carbohydr Polym* 2006, 65, 185–193.
4. Nugraha E.S., Copinet A., Tighzert L., Coma V., Mechanical and barrier properties of biodegradable films made from chitosan and poly(lactic acid) blends. *J Polym Environ* 2003, 12, 1–6.
5. Guan J., Eskridge K.M., Hanna M.A., Acetylated starch-poly(lactic acid) loose-fill packaging materials. *Ind Crops Prod* 2005, 22, 109–123.
6. Focarete M.L., Scandola M., Dobrzynski P., Kowalczyk M. *Macromolecules* 2002, 35(22), 8472–7.
7. Somdee P., Suksut B., and Deeprasertkul C., “Physical Study on Toughening of Polylactic acid with Natural Rubber,” Proceedings of The Pure and Applied Chemistry International Conference 2009 (PACCON 2009), Naresuan University, Phitsanulok, Thailand, January 14-16,2009.
8. Datta R., Tsai S.P., *FEMS Microbiol Rev* 1995,16,221.
9. Ou X. and CakMak M., Influence of biaxial stretching mode on the crystalline texture in polylactic acid films, *Polymer* 49, 2008, 5344–5352.
10. Lee J.K., Lee K.H., Jin B.S., Structural development and biodegradability of uniaxially stretched poly(L-lactide). *Eur Polym J* 37, 2001, 907–14.
11. Sodergard A., Selin J.F., Niemi M., Johansson C.J., Meinander K. Processable poly(hydroxy acids). *US Patent* 6,559,244B1; 2003.
12. Hiltunen E, Selin J-F, Skog M. Polyactide films. *US Patent* 6,117,928; 2000.
13. Tweed E.C., Stephens H.M., Riegert T.E., Polylactic acid blown film and method of manufacturing same. *US Patent Application* 2006/0045940A1; 2006.

## ประวัติคณะผู้วิจัย

1. ชื่อ(ภาษาไทย) นางสาวจันทิมา ดีประเสริฐกุล  
(ภาษาอังกฤษ) Miss Chantima Deeprasertkul
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3 1018 00922 64 1
3. ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์
4. หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้พร้อมโทรศัพท์ โทรสาร และ E-mail  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์  
111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000  
โทรศัพท์/โทรสาร 044-22 4434/044-22 4605  
E-mail chantima@sut.ac.th
5. ประวัติการศึกษา  
Ph.D (Macromolecular Science) Case Western Reserve University, USA.  
วท.ม. (วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์) มหาวิทยาลัยมหิดล ประเทศไทย  
วท.บ. (วิทยาศาสตร์เคมี) มหาวิทยาลัยมหิดล ประเทศไทย
6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ  
Polymer rheology  
Polymer melts, blends and suspensions
7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ
  - 7.1 งานวิจัยที่ดำเนินการเสร็จสิ้น
    - 7.1.1 โครงการ การศึกษาความไม่สม่ำเสมอของการไหลของพอลิเมอร์ผสมในกระบวนการอัดรีด แหล่งทุนสนับสนุน: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สถานภาพ: หัวหน้าโครงการวิจัย)
    - 7.1.2 โครงการ ผลของการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของยางและปริมาณของแข็งต่อความหนืดของน้ำยางธรรมชาติ แหล่งทุนสนับสนุน: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ฝ่ายอุตสาหกรรม (สถานภาพ: หัวหน้าโครงการวิจัย)
    - 7.1.3 โครงการ การคัดเลือกแบคทีเรียที่มีศักยภาพในการผลิตพอลิไฮดรอกซีแอลคาโนเอท (พีเอชเอ) จากแป้งมันสำปะหลังและน้ำตาลจากอ้อย แหล่งทุนสนับสนุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) (สถานภาพ: ผู้ร่วมวิจัย)

7.1.4 โครงการ การศึกษาผลของสารก่อผลึกต่อการตกผลึกของพอลิแล็กติกแอซิด แหล่งทุนสนับสนุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) (สถานภาพ: หัวหน้าโครงการ)

7.1.5 โครงการ การศึกษาสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับยางธรรมชาติ แหล่งทุนสนับสนุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) (สถานภาพ: หัวหน้าโครงการ)

7.2 งานวิจัยที่กำลังทำ

7.2.1 โครงการ การเตรียมฟิล์มพลาสติกชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติ แหล่งทุนสนับสนุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) (สถานภาพ: หัวหน้าโครงการ) ปีงบประมาณ 2554

7.2.2 โครงการ ผลของลักษณะจำเพาะระดับโมเลกุลต่อวิทยาการระเหยของนาโนคอมโพสิทระหว่างพอลิเอทิลีนและนาโนซิลิกา แหล่งทุนสนับสนุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) (สถานภาพ: หัวหน้าโครงการ) ปีงบประมาณ 2554

8. ผลงานทางวิชาการ

B. Suksut and C. Deeprasertkul, "Effects of Nucleating Agents on Physical Properties of Poly(lactic acid) and Its Blend with Natural Rubber," *J Polym Environ* (2011) 19(1) 288-296.

Ratchanok Thanaman, and Chantima Deeprasertkul, "Linear Viscoelastic Properties of Nanosilica Filled Polyethylene Melts," Proceedings of The 5<sup>th</sup> International Workshop for East Asian Young Rheologists, Pusan National University, Pusan, Korea, January 21-23 (2010).

Buncha Suksut, and Chantima Deeprasertkul, "Effect of Nucleating Agent on Crystallization and Dynamic Mechanical Properties of Polylactic acid and Natural Rubber Blends," Proceedings of The 4<sup>th</sup> International Workshop for Far East Asian Young Rheologists (IWFEAYR-4), Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, January 21-23 (2009).

Patcharaporn Somdee, Buncha Suksut, and Chantima Deeprasertkul, "Physical Study on Toughening of Polylactic acid with Natural Rubber," Proceedings of The

- Pure and Applied Chemistry International Conference 2009 (PACCON 2009), Naresuan University, Phitsanulok, Thailand, January 14-16 (2009), p310-313.
- J. Sridee, C.Ruksakulpiwat, and C. Deeprasertkul, "Flow Behavior of Natural Rubber Latex Concentrates:Effect of Volume Fraction and Temperature," Proceedings of The 42nd IUPAC World Polymer Congress, Taipei, Taiwan, June 29-July 4, (2008) p.112.
- พรทิพย์ ประกายมณีวงศ์ ไชยวัฒน์ รักสกุลพิวัฒน์ และ จันทิมา ดีประเสริฐกุล. (2550). ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็ง ขนาดอนุภาคและสมบัติวิทยากระแสของน้ำยางธรรมชาติ. วารสารวิทยาศาสตร์รมช. 35(4): 239-245.
- จันทิมา ดีประเสริฐกุล และ ไชยวัฒน์ รักสกุลพิวัฒน์. (2549). ผลของการกระจายตัวของขนาดอนุภาคยางและปริมาณของแข็งต่อความหนืดของน้ำยางธรรมชาติ. ใน: วิจัยยางพารา เพื่ออนาคตที่ยั่งยืน, วราภรณ์ ขจรไชยกูล. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.), กรุงเทพมหานคร, หน้า 269-277.
- Jatuporn Sridee, Chantima Deeprasertkul, Chaiwat Ruksakulpiwat, "Applicability of Mooney and Krieger-Dougherty equations to natural rubber latex," 31<sup>st</sup> Congress on Science and Technology of Thailand, Nakhon Ratchasima, Thailand, Oct.18-20, (2005) p.228
- C.Deeprasertkul and M.Jakkujan "Effect of Molecular Weight and Comonomer Content on Capillary Flow Instabilities of Metallocene Ethylen/1-Octene Copolymer," 8<sup>th</sup> Pacific Polymer Conference, Bangkok, Thailand, Nov. 25-27, (2003) p.133
- C. Deeprasertkul and M.Jakkujan "Dependence of Temperature and Comonomer Content on Pressure Oscillation of Metallocene Ethylene/Octene Copolymer in Capillary Flow," 29<sup>th</sup> Congress on Science and Technology of Thailand, KhonKaen, Thailand, Oct.20-22, (2003) p.210
- C. Deeprasertkul and S.Yaisang "Flow Instabilities of High Density Polyethylene/Low Density Polyethylene Blends," 29<sup>th</sup> Congress on Science and Technology of Thailand, KhonKaen, Thailand, Oct.20-22, (2003) p.215