

พฤติกรรมการไหลและการบวมตัวของ PLA ผสมผงอนุภาคนาโนเคลย์

ระพีพันธ์ แดงตันกี¹⁾ สิริญา ขวพันธ์¹⁾ กะรัต เพ็ชรเจริญ²⁾ และ กิรติ พินิจเศรษฐวงศ์²⁾

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลและการบวมตัวของ PLA ผสมอนุภาคนาโนเคลย์ โดยใช้เครื่อง คาปิลารี รีโอมิเตอร์ (Capillary Rheometer) พบว่าพฤติกรรมการไหลโดยรวมของ PLA ผสมนาโนเคลย์เป็นแบบ pseudo plastic ซึ่งเมื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมพบว่าการผสมเคลย์ลงใน PLA ทำให้ความเค้นเฉือน ความหนืดเฉือน และความหนืดยืดดึงลดลง โดยเฉพาะอัตราส่วนที่ผสมเคลย์ 10% โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าทั้งสามปรับลดลงมากที่สุด อีกทั้งในอัตราส่วนนี้สามารถลดร้อยละการบวมตัวของ PLA ได้เมื่อเทียบกับ PLA ที่ไม่ผสมเคลย์ จากผลการทดลองทั้งสมบัติ การไหลและพฤติกรรมการบวมตัวของด้ายทั้งสองขนาด (อัตราส่วนของความยาวด้ายต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของด้าย (L/D) เท่ากับ 10/1 และ 20/1) พบว่าอัตราส่วนที่ให้สมบัติการไหลดีที่สุดคือการผสมสารตัวเติมเคลย์ในปริมาณ 10% โดย น้ำหนัก

คำสำคัญ : พอลิแลคติก แอซิด, นาโนเคลย์, สมบัติการไหล, การบวมตัว

* ¹⁾ อาจารย์ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
อีเมล : rdg@kmutnb.ac.th

²⁾ นักศึกษา ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ

Rheological behavior and extrudate swell of PLA filled with nanoclay

Rapeephun Dangtungee^{*1)} Sarinya shawaphun¹⁾ Karat Petcharoen²⁾ and Kerati Pinijsattawong²⁾

ABSTRACT

This research was investigated rheological behavior and extrudate swell of polylactic acid (PLA) filled with nanoclay in capillary rheometer. Generally, all compositions exhibited pseudo plastic behavior. Effect of fillers loading was also investigated. An increasing amount of nanoclay tend to decrease shear stress, shear viscosity and elongational viscosity especially 10 wt% of nanoclay. Also, 10 wt% of nanoclay composites presented swelling ratio with lower than swelling of neat PLA. Following both L/D ratios (10/1 and 20/1), the best ratio to improve rheological behavior and extrudate swell was nanoclay composites filled with 10 wt% of nanoclay.

Keywords: Polylactic acid, Nanoclay, Polymer rheology, Die swell

*¹⁾ Lecturer, Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok E-mail: rdg@kmutnb.ac.th

²⁾ Student, Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

บทนำ

ในปี พ.ศ. 2547 ประเทศไทยมีปริมาณขยะโดยเฉลี่ยประมาณ 39,956 ตัน/วันหรือคิดเป็น 14.58 ล้านตัน/ปี และในจำนวนนั้นเป็นขยะพลาสติกร้อยละ 16.83 (กรมควบคุมมลพิษ, 2548) อีกทั้งยังมีปริมาณเพิ่มขึ้นมากในทุกปี ดังนั้นการกำจัดขยะพลาสติกจึงทำได้ยาก หากทิ้งให้ย่อยสลายเองตามธรรมชาติก็ใช้เวลานานหลายสิบปีหรือบางชนิดก็ไม่ย่อยสลาย แนวทางหนึ่งที่จะช่วยแก้ไขปัญหारेื่องการย่อยสลายพลาสติกคือการใช้พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ (Biodegradable polymers) อาศัยเอ็นไซม์จากเชื้อจุลินทรีย์ในการตัดสลายโซ่แล้วได้ผลผลิตเป็น น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่ง Biodegradable polymers ที่กำลังเป็นที่นิยมคือ Polylactic acid (PLA) ในปัจจุบันปริมาณการผลิต PLA เมื่อเทียบกับพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพอื่นๆนับว่าเป็นปริมาณสูงที่สุดคือ ประมาณร้อยละ 90 โดยส่วนแบ่งทางการตลาดที่เหลือเป็นของ Polybutylene succinate (PBS), Polyvinyl alcohol (PVOH) และพอลิเมอร์ที่มีแบ่งเป็นองค์ประกอบหลัก (Biodegradable materials and natural fiber composites in agriculture and horticulture, 2002) แต่ข้อเสียของ PLA คือ เปราะ ความทนต่อแรงกระแทก (Impact strength) ต่ำ และมีราคาสูง ทำให้มีต้นทุนการผลิตสูงตามไปด้วย ซึ่งการผสมสารตัวเติม (Additive) ช่วยให้ต้นทุนการผลิตลดลงและช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ได้ โดยสารตัวเติมที่เลือกใช้คือ เคลย์ (Clay) หรือแร่ดินเหนียวมอนท์มอริลโลไนท์ ซึ่งเป็นวัสดุทางธรรมชาติเช่นกัน เคลย์เป็นสารเสริมแรงจึงช่วยให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงมากขึ้น อีกทั้งเคลย์เป็นสารที่มีขั้วถูกเปลี่ยนให้มีสมบัติไม่มีขั้ว โดยการแทนที่ประจุต่างๆด้วยประจุของสารอินทรีย์จะได้แร่ดินเหนียวที่เรียกว่าออร์กาโนฟิลิกเคลย์ (Organophilic clay) หรือเรียกว่าออร์กาโนเคลย์ (Organoclay) ลักษณะเด่นคือมีความชอบสารอินทรีย์อยู่ด้านในระหว่างชั้นซิลิเกต แต่ชอบนอกของแผ่นซิลิเกตยังมีความเป็นขั้วเหลืออยู่ เกิดการขยายตัวของระยะห่างระหว่างชั้นผลึก ทำให้ชั้นผลึกห่างกันเกาะกันอย่างหลวมๆ หลักการนี้จึงเป็นกลไกสำคัญ

ในการเตรียมอนุภาคนาโนนาโนเมตรจากธรรมชาติจึงเรียกว่านาโนเคลย์ ดังนั้นเมื่อนานาโนเคลย์ผสมกับ PLA ทำให้ได้ polymer-clay nanocomposites ที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถสลายตัวได้ในธรรมชาติ 100%

งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาถึงสมบัติต่างๆของ PLA ผสมกับเคลย์ทำให้ได้เป็น PLA-montmorillonite nanocomposite หรือ PLACNs (Suprakas et al., 2002) โดยใช้ Dynamic mechanical analysis (DMA) วัดการเสถียรของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ พบว่า storage modulus (G') และ loss modulus (G'') ของ PLACNs มีค่าสูงกว่า PLA แสดงว่าเคลย์ทำให้วัสดุผสมมีความคงทนมากขึ้น และจากสมบัติการหักงอ พบว่าเมื่อปริมาณเคลย์มากขึ้นทำให้มีค่าการต้านทานการหักเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดที่ PLACN4% (มีเคลย์เป็นองค์ประกอบ 4 wt%) และค่า heat distortion temperature (HDT) เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณเคลย์เพิ่มขึ้นและจะมีค่าสูงสุดที่ PLACN7% และจากการทดสอบการสลายตัวพบว่า ภายใน 2 เดือน PLACN4% เกิดการสลายตัวอย่างสมบูรณ์เนื่องจากการกระจายตัวของเคลย์จะมีความเป็นเนื้อเดียวกันกับ PLA นอกจากนี้ในการทดสอบการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวพบว่า PLACNs มีพฤติกรรมแบบ pseudo-solid คือความหนืดเพิ่มขึ้นตามอัตราเฉือน อีกทั้งเมื่อปริมาณเคลย์มากขึ้นทำให้ค่า G' มากขึ้น ถ้าปริมาณเคลย์สูงขึ้นจะทำให้พอลิเมอร์ผสมมีพฤติกรรมแบบ solid-like ซึ่งปริมาณเคลย์เท่ากับ 4wt% ถือได้ว่าเป็นจุดเริ่มต้นในการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหลจากของเหลวไปเป็นของแข็ง (Defeng et al., 2006) นอกจากนี้ การศึกษาพฤติกรรมการไหลของระหว่าง PLA กับส่วนผสมอื่นๆพบว่าข้อจำกัดของการผสมขึ้นอยู่กับโครงสร้างและปริมาณสารผสมเช่นการเตรียมพอลิเมอร์ PLA ผสมกับ Polybutylene succinate (PBS) (Amita et al., 2007) พบว่าการผสมเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมเกิดขึ้นเมื่อปริมาณ PBS น้อยกว่า 20wt% ส่วนค่าความต้านทานการยืดดึงจะมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ PBS นอกจากนี้ในการศึกษาอิทธิพลของความยาวสายในเครื่องทดสอบ

การไหล Capillary rheometer พบว่าความยาวตายเพิ่มขึ้นมีผลทำให้การบวมตัวมีค่าลดลง (Rapeephun *et al.*, 2006) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาพฤติกรรมการไหลของ Polyamide-based nanocomposites ในแง่ของชนิดของพอลิเมอร์และปริมาณเคลย์ ซึ่งพบว่าสมบัติการไหลมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างของอนุภาคนาโนอย่างชัดเจน (Incarnato *et al.*, 2004)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งหมดพบว่า การศึกษาพฤติกรรมการไหล เช่น Viscoelastic ความหนืด ความยืดหยุ่น หรือ ความเค้นเฉือน มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมการผลิตพลาสติกและพอลิเมอร์ เนื่องจากพฤติกรรมการไหลช่วยในการควบคุมกระบวนการผลิตเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่มีคุณภาพตามต้องการ ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษากฎการไหลและการบวมตัวของ PLA ผสมผงอนุภาคนาโนเคลย์ โดยใช้เครื่อง Capillary Rheometer ทำการวัดค่า Shear Deformation, Elongation Deformation และ Die Swell โดยที่การศึกษาพฤติกรรมการไหลเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (Shear stress) และอัตราเฉือน (Shear rate) ซึ่งใน Capillary Rheometer ได้จากความดันตกที่ปากตายและความเร็วในการอัดพอลิเมอร์หลอมเหลว ตามสมการการไหลในท่อ Capillary (Rapeephun *et al.*, 2006)

ดังสมการที่ (1) และ (2)

$$\tau_{app} = \frac{R\Delta P}{2L} \quad (1)$$

$$\gamma'_{app} = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad (2)$$

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราเฉือนที่ได้จากการปรับแก้ข้อมูล (Correction) แบบ Bagley และ Rabinowitsch เป็นไปตามสมการที่ (3) และ (4)

$$\tau_{true} = \frac{R\Delta P}{2(L+nR)} = \frac{\Delta P}{2(L/R+n)} \quad (3)$$

$$\gamma'_{true} = \frac{3n'+1}{4n'} \gamma'_{app} \quad (4)$$

ซึ่งค่าความเค้นเฉือนและอัตราเฉือนส่งผลโดยตรงต่อความหนืดของพอลิเมอร์ ดังสมการที่ (5)

$$\eta_{true} = \frac{\tau_{true}}{\gamma'_{true}} \quad (5)$$

นอกจากนี้ ความสัมพันธ์ต่างๆบอกลักษณะพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่เกิดจากการเฉือนและการยืดดึงภายในท่อ Capillary ผ่านสู่ปากตาย โดยใช้ทฤษฎีของ Cogswell ดังสมการที่ (6) และ (7)

$$N = \frac{\gamma'_{app}}{4\gamma'_{true} - 3\gamma'_{app}} \quad (6)$$

$$P_e = (\tau_{app} - \tau_{true}) \frac{4L}{D} \quad (7)$$

ซึ่งสมการทั้งสองสามารถทำเป็นสมการใหม่ ตามสมการที่ (8) และ (9)

$$\varepsilon' = \frac{4\tau_{app}}{3(N+1)P_e} \quad (8)$$

$$\sigma = \frac{3(N+1)P_e}{8} \quad (9)$$

ค่าอัตราการยืดดึงและความเค้นยืดดึงมีความสัมพันธ์กับความหนืดยืดดึง ดังสมการที่ (10)

$$\eta_e = \frac{\sigma}{\varepsilon'} \quad (10)$$

ค่าการบวมตัวสามารถหาได้จากสมการที่ (11)

$$\% \text{ swell} = \left(\frac{D_{exit} - D_{die}}{D_{die}} \right) \times 100 \quad (11)$$

ตารางที่ 1 Nomenclatures

สัญลักษณ์	ความหมาย
τ_{app}	ความเค้นเฉือน (Apparent shear stress)
τ_{true}	ความเค้นเฉือนจริง (True shear stress)
$\dot{\gamma}_{app}$	อัตราเฉือน (Apparent shear rate)
$\dot{\gamma}_{true}$	อัตราเฉือนจริง (True shear rate)
η_{true}	ความหนืดจริง (True shear viscosity)
ϵ'	อัตราการยืดดึง (Elongational rate)
σ	ความเค้นยืดดึง (Elongational stress)
η_e	ความหนืดยืดดึง (Elongational viscosity)
R	รัศมีของตาย
P	ความดันตกที่ปากตาย
L	ความยาวของตาย
Q	อัตราการไหลเชิงปริมาตร
n	ตัวคูณที่ได้มาจาก Bagley correction
n'	ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นความเค้นเฉือนกับเส้นอัตราเฉือน ได้มาจาก Rabinowitsch correction
N	ค่าคงที่จากการทดลอง
P_e	ความดันที่บริเวณทางเข้าตาย
D	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของตาย
D_{exit}	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพอลิเมอร์ไหลออกนอกปากตาย
%swell	ร้อยละการบวมตัว

วัสดุและวิธีการทดลอง

1. วัสดุ

- Polylactic acid เกรด PLA 4042D ค่า glass transition temperature (T_g) 325 K (52 °C) และ melting temperature (T_m) 408 K (135 °C) ความหนาแน่น 1.25 g/cm³ ความต้านทานแรงยึดดึง 16 kpsi (110.32 MPa) ความทนแรงกระแทก 2.5 joules

- นาโนเคลย์ (Nanoclay) ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 200 นาโนเมตร จากบริษัทพอลิเมอร์อินโนเวชัน จำกัด (Hard clay, SiO₂ 57% Min.) อยู่ในรูปแบบผงละเอียด ความสว่าง 88% มีค่าการดูดซับน้ำมันเท่ากับ 80กรัม/100 กรัม

2. เครื่องมือ

- Twin –screw extruder (PRISM 100R)
- Capillary Rheometer รุ่น CEAST Rheologic 5000 twin bore

3. การเตรียม polymer composites

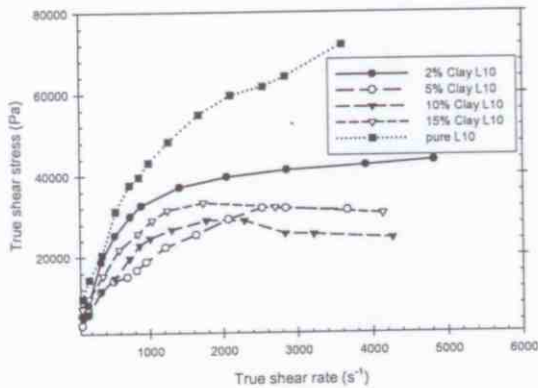
อบ PLA ที่ 50 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนใช้งาน จากนั้น นำ PLA และเคลย์ผสมในอัตราส่วนปริมาณเคลย์เท่ากับ 0, 2, 5, 10 และ 15% โดยน้ำหนัก โดยใช้เครื่อง Twin –screw extruder (PRISM 100R) ใช้อุณหภูมิในบริเวณ Feed zone 160 °C Metering zone 180 °C และ Compression zone 200 °C หลังจากผสมเสร็จ อบ PLA ที่ 50 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนวัดพฤติกรรมการณ์ไหลด้วยเครื่อง Capillary Rheometer รุ่น CEAST Rheologic 5000

4. การทดสอบพฤติกรรมการณ์ไหล

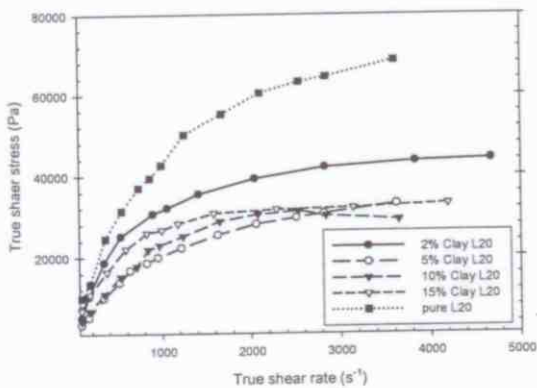
การศึกษาพฤติกรรมการณ์ไหลสามารถวัดจากเครื่อง Capillary Rheometer โดยใช้พารามิเตอร์ ดังนี้ อัตราส่วนของความยาวตายต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของตาย (L/D) เท่ากับ 10/1 และ 20/1 ตามลำดับ อุณหภูมิในการทดสอบ 190 °C และความเค้นเฉือน (Shear rate) เท่ากับ 700, 800, 1000, 1300, 1600, 1900, 2100 และ 2600 s⁻¹ ตามลำดับ

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ผลของปริมาณนาโนเคลย์



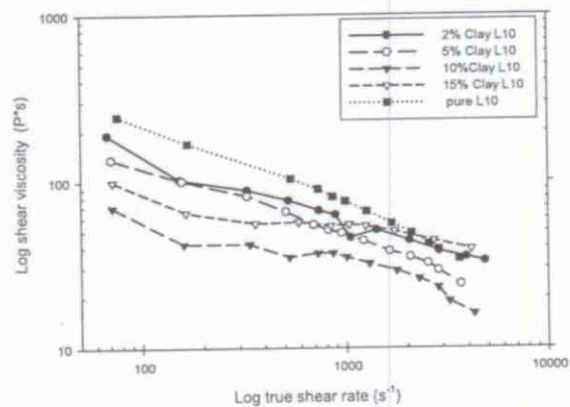
รูปที่ 1(a) ผลของปริมาณเคลย์ที่มีกับ True shear rate กับ True shear stress ที่ $L/D = 10/1$



รูปที่ 1(b) ผลของปริมาณเคลย์ที่มีกับ True shear rate กับ True shear stress ที่ $L/D = 20/1$

ผลของปริมาณเคลย์ที่มีต่อความเค้นเฉือนจริง (True shear stress) ตามสมการที่ (3) และสมการที่ (4) ที่ความยาวตาย 10 และ 20 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 1(a) และ 1(b) ตามลำดับ โดยทำการทดลองที่อัตราเฉือน (Shear rate) เท่ากับ $700\text{--}2600\text{ s}^{-1}$ พบว่า อัตราเฉือนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้นอย่างไม่เป็นเส้นตรง ซึ่งเป็นพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์แบบ pseudo plastic เมื่อเปรียบเทียบความเค้นเฉือนที่อัตราเฉือนต่ำพบว่า พอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีความเค้นเฉือนที่ใกล้เคียงกันแต่ที่อัตราเฉือนสูงพบว่า PLA ที่ไม่ผสมสารตัวเติมเกิดความเค้นเฉือนสูงสุด และเมื่อเติมเคลย์ 10wt% เกิดความเค้นเฉือนต่ำที่สุด สาเหตุที่เกิดขึ้นเนื่องจากเคลย์เป็นสารที่มีขั้ว แต่ PLA เป็นสารที่ไม่มีขั้ว

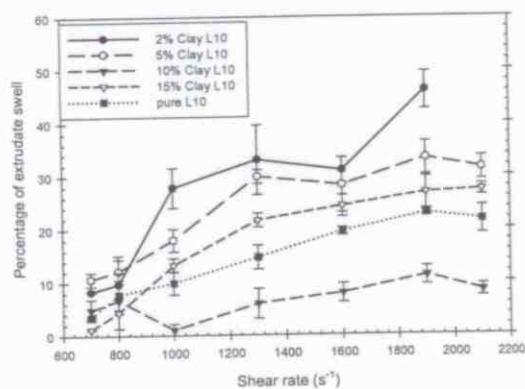
หรือมีขั้วต่ำ ทำให้สารทั้งสองชนิดเข้ากันได้ยากและเคลย์สามารถเข้าไปแทรกอยู่ภายในสายโซ่โมเลกุลของ PLA ได้บางส่วน ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของ PLA เกิดการคลายตัวและเกาะกันอย่างหลวมๆ เมื่อมีแรงมากกระทำจึงทำให้สายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์มีความเค้นเฉือนลดลง และการเติมเคลย์มากขึ้นทำให้ความเค้นเฉือนลดลง จากการพิจารณาผลการทดลองอัตราส่วนของความยาวตายต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของตาย (L/D) เท่ากับ 10/1 และ 20/1 พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน



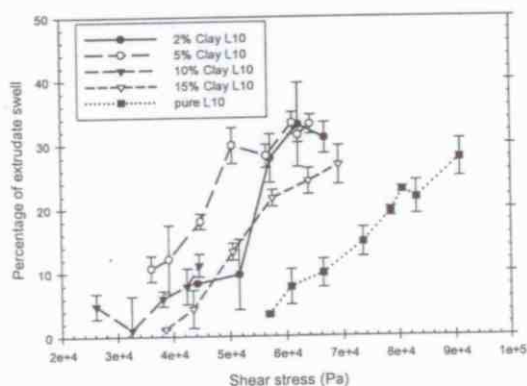
รูปที่ 2 ผลของปริมาณเคลย์ที่มีกับ Log true shear rate กับ Log shear viscosity ที่ $L/D = 10/1$

ผลของปริมาณเคลย์ที่มีต่อความหนืดเฉือน (Shear viscosity) ตามสมการที่ (5) ที่ความยาวตาย 10 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 2 พบว่า อัตราเฉือนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนืดเฉือนลดลง ซึ่งแสดงพฤติกรรมการไหลแบบ shear-thinning เนื่องจากการเพิ่มอัตราเฉือนทำให้การพันกันของสายโซ่โมเลกุลเกิดการคลายตัวและถูกยัดดึงออก ส่งผลให้ความหนืดเฉือนลดลง ซึ่งเป็นไปตามลักษณะของการไหลแบบ pseudo plastic เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนืดเฉือนที่อัตราเฉือนเดียวกันพบว่า PLA ที่ไม่ผสมสารตัวเติมเกิดความหนืดเฉือนสูงสุด และถ้าผสมเคลย์ทำให้ความหนืดเฉือนลดลง แสดงว่านาโนเคลย์สามารถแทรกอยู่ในสายโซ่โมเลกุลของ PLA ส่งผลให้มีการไหลที่ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบปริมาณเคลย์พบว่าเมื่อเติมเคลย์ 10wt% ให้ความหนืดเฉือนต่ำที่สุด เนื่องจากปริมาณเคลย์ 10wt% อาจเกิดความสมดุลระหว่างเฟสของ PLA และอนุภาคนาโนเคลย์ ซึ่งสังเกตได้จากเมื่อเพิ่มปริมาณเคลย์เป็น 15wt% พบว่า ความหนืดที่

ได้กลับสูงขึ้น ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากการจับตัวกันเองเป็นกลุ่มก้อนของเคลย์และไม่สามารถแทรกไปในระหว่างสายโซ่โมเลกุลของ PLA ได้หมด ส่งผลให้ค่าความหนืดเฉือนสูงขึ้นมากกว่าการเติมเคลย์ 10wt% ซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้มีลักษณะเดียวกันกับการทดลองที่ผสมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตลงในพอลิพรอพิลีน (Dangtungee et al., 2005) ซึ่งพบว่าอนุภาคนาโนสามารถแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ในปริมาณหนึ่งเท่านั้น ในส่วนของผลการทดลองอื่นๆ พบว่าผลการทดลองอัตราส่วนของความยาวด้ายต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของด้าย (L/D) เท่ากับ 10/1 และ 2/1 มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน



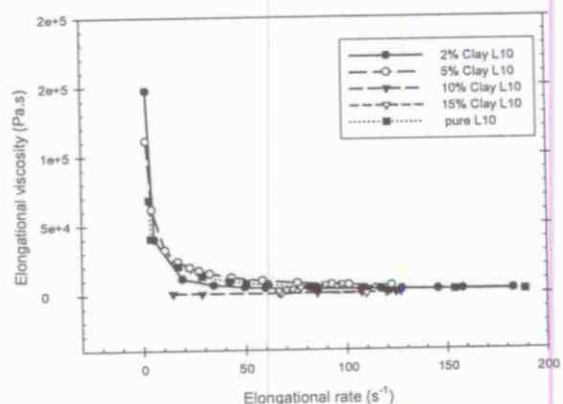
รูปที่ 3(a) ผลของปริมาณเคลย์ที่มีกับ Shear rate กับ Percentage of extrudate swell ที่ L/D = 10/1



รูปที่ 3(b) ผลของปริมาณเคลย์ที่มีกับ Shear stress กับ Percentage of extrudate swell ที่ L/D = 10/1

ผลของปริมาณเคลย์ที่มีต่อร้อยละการบวมตัว (Percentage of extrudate swell) ที่ความยาวด้าย 10 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 3(a) และ 3(b) พบว่าอัตรา

เฉือนและความเค้นเฉือนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ร้อยละการบวมตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราเฉือนที่เพิ่มขึ้นทำให้พอลิเมอร์สะสมความเค้นเอาไว้ เมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลผ่านปากด้าย สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เกิดการจัดเรียงตัวใหม่และปลดปล่อยความเค้น (Released stress) ออกมา ทำให้พอลิเมอร์เกิดการบวมตัวขึ้น เมื่อเปรียบเทียบร้อยละการบวมตัวที่อัตราเฉือนเดียวกันพบว่าเมื่อเติมเคลย์ 10wt% มีแนวโน้มการบวมตัวน้อยที่สุด ซึ่งเป็นไปตามค่าความหนืดที่แสดงไว้ในรูปที่ 2 และทำให้ความเค้นที่สะสมอยู่ภายในสายโซ่โมเลกุลของ PLA มีปริมาณน้อย (ดูที่รูปที่ 3(b)) ดังนั้นเมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลผ่านปากด้าย จึงเกิดการบวมตัวน้อยที่สุด อีกทั้งการบวมตัวของพอลิเมอร์ในแต่ละอัตราส่วนจะเกิดขึ้นที่ค่าความเค้นเฉือนต่างกัน ขึ้นอยู่กับปริมาณสารตัวเติม



รูปที่ 4 ผลของปริมาณเคลย์ที่มีกับ Elongational rate กับ Elongational viscosity ที่ L/D = 10/1

ผลของปริมาณเคลย์ที่มีต่อความหนืดยืดดึง (Elongational viscosity) ตามสมการที่ (8) และ สมการที่ (10) ที่ความยาวด้าย 10 มิลลิเมตร จากความสัมพันธ์ต่างๆ บอกถึงพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่เกิดจากการเฉือนและการยืดดึงภายในท่อ Capillary ผ่านไปสู่ปากด้าย โดยใช้ทฤษฎีของ Cogswell ใช้ค่าคงที่และความดันบริเวณทางเข้าด้าย ตามสมการที่ (6) และ สมการที่ (7) เพื่อหาค่าความเค้นยืดดึงตามทฤษฎีในสมการที่ (9) และนำไปหาค่าความหนืดยืดดึงในที่สุดแสดงในรูปที่ 4 พบว่า อัตราการยืดดึงเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนืดยืดดึงลดลง เนื่องจากการเพิ่มอัตราการยืดดึงทำให้การพันกันของสายโซ่โมเลกุลเกิดการคลายตัวและ

ถูกยืดดึงออก จึงเกิดการไหลที่ดีขึ้นและความหนืดยืดดึงลดลง เมื่อเปรียบเทียบความหนืดยืดดึงที่อัตราการยืดดึงเดียวกันพบว่า ทุกอัตราส่วนมีความหนืดยืดดึงที่ใกล้เคียงกันมาก แสดงว่าอนุภาคของนาโนเคลย์ที่เข้าไปแทรกอยู่ในสายโซ่โมเลกุลของ PLA ส่งผลต่อความหนืดยืดดึงน้อยมาก จากผลการทดลองอัตราส่วนของความยาวด้ายต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของด้าย (L/D) เท่ากับ 10/1 และ 20/1 พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาสมบัติการไหลของ PLA ผสมกับอนุภาคนาโนเคลย์ ด้วยเครื่อง Capillary rheometer พบว่าอัตราเขื่อนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเค้นเฉือนและร้อยละการบวมตัวเพิ่มขึ้นแต่ความหนืดเฉือนลดลง และถ้าความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ร้อยละการบวมตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนอัตราการยืดดึงเพิ่มขึ้นทำให้ความหนืดยืดดึงลดลง อิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมพบว่าการผสมนาโนเคลย์ลงใน PLA ทำให้ความเค้นเฉือน ความหนืดเฉือน และความหนืดยืดดึงลดลง โดยเฉพาะอัตราส่วนที่ผสมนาโนเคลย์ 10%โดยน้ำหนัก ผลการทดลองจากค่าร้อยละการบวมตัวพบว่าการผสมนาโนเคลย์ลงไปใน PLA ในอัตราส่วน 2%, 5% และ 15% โดยน้ำหนัก ทำให้การบวมตัวเพิ่มขึ้น แต่ในอัตราส่วน 10% โดยน้ำหนักกลับมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับ PLA ที่ไม่ผสมนาโนเคลย์ จากผลการทดลองทั้งสมบัติการไหลและพฤติกรรมการบวมตัวพบว่าปริมาณที่เหมาะสมที่สุดที่ให้สมบัติการไหลและการบวมตัวดีที่สุด คือ การเติมปริมาณสารตัวเติมนาโนเคลย์ 10% โดยน้ำหนัก

กิตติกรรมประกาศ

ทางผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ซึ่งเป็นผู้ให้ทุนสนับสนุนนักวิจัยในการทำงานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. 2548. "สรุปสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย พ.ศ. 2547." กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ.
- Biodegradable materials and natural fiber composites in agriculture and horticulture. 2002. "Biodegradable plastics." Market Development in Europe. 7-16. www.ktbl.de
- Suprakas S.R., Kazunobu Y., Masami O. and Kazue U. 2002. "New polylactide-layered silicate nanocomposites. 2. Concurrent improvements of material properties, biodegradability and melt rheology." Journal of Polymer. 44: 857-866.
- Defeng W., Liang W., Lanfeng W. and Ming Z. 2006. "Rheology and thermal stability of polylactide/clay nanocomposites." Journal of Polymer degradation and stability. 91: 3149-3155.
- Amrita B., Rahul K.G. and Sati N.B. 2007. "Compatibility of biodegradable poly(lactic acid) (PLA) and poly(butylene succinate) (PBS) blends for packaging application." Korea-Australia Rheology Journal. 19: 125-131.

- Rapeephun D., Satyen S.D., Supawan T. and Supaphol P. 2006. "Melt rheology and extrudate swell of low-density polyethylene/ethylene-octene copolymer blends." *Polymer testing*. 25: 888-895.
- Incarnato L., Scarfato P., Scatteia L. and Acierno D. 2004. "Rheological behavior of new melt compounded copolyamide nanocomposites." *Journal of Polymer*. 45: 3487-3496.
- Rapeephun D., Yun J. and Supaphol P. 2005. "Melt rheology and extrudate swell of calcium carbonate nanoparticle-filled isotactic polypropylene." *Polymer testing*. 24: 2-11.