Kasetsart J. (Nat. Sci.) 33 : 111 - 125 (1999) ว. เกษตรศาสตร์ (วิทย.) ปีที่ 33 : 111 - 125 (2542)

สมบัติทางความร้อนและทางกายภาพของแผ่นฟิล์มพลาสติกรีไซเคิล

Thermal and Physical Properties of Recycled - Plastic Film

สุปรียา ตรีวิจิตรเกษม[1] มาลี สุทธิโอภาส[1] และ สิริ สิรินิลกุล[2]

Supreya Trivijitkasem, Malee Suthiopad, and Siri Sirininlakul

ABSTRACT

Thermal and physical properties of plastic film were studied by Differential Scanning Calorimetry and Dynamic Mechanical Analysis. It is found that recycled plastic film possesses slightly different thermal and physical properties from non - recycled one. Melting point and heat capacity of recycled plastic film are lower than non - recycled one. When applied static stress 5.00×10^5 Pa and dynamic stress 4.55×10^5 Pa at frequency 1.0 Hz, recycled plastic film reveals lower modulus and higher strain. The elasticity of plastic film is decreased when temperature is increased.

Key words : recycled, heat capacity, static stress, dynamic stress

บทคัดย่อ

การศึกษาด้วยชุดวิเคราะห์ความร้อนและชุดวิเคราะห์กลจลน์ พบว่าแผ่นฟิล์มพลาสติกรีไซเคิลมีสมบัติทางความร้อนและสมบัติทางกายภาพต่างจากแผ่นฟิล์มที่ผลิตจากเม็ดพลาสติกโดยตรงเล็กน้อย โดยแผ่นฟิล์มรีไซเคิลมีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่าและมีความจุความร้อนน้อยกว่าแผ่นฟิล์มที่ผลิตจากเม็ดพลาสติกโดยตรง เมื่อใส่ความเค้นสถิต 5.00×10^5 Pa และความเค้นจลน์ 4.55×10^5 Pa ที่ความถี่ 1.0 Hz แผ่นฟิล์มรีไซเคิลมีมอดุลัสน้อยกว่าและมีความเครียดมากกว่าแผ่นฟิล์มที่ผลิตจากเม็ดพลาสติกโดยตรง และความยืดหยุ่นของแผ่นฟิล์มมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

[1] ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพ 10900
Department of Physics, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

[2] ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กรุงเทพ 10110
Department of Physics, Faculty of Science, Srinakharinwirot University, Bangkok 10110, Thailand.

คำนำ

ผลิตภัณฑ์พลาสติก เช่น ถุงก๊อบแก๊บ ขวดน้ำพลาสติก และหลอดกาแฟ ฯลฯ เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีราคาถูกและนำมาใช้งานได้สะดวก จึงมีโรงงานจำนวนมากที่ผลิตวัสดุพลาสติกเหล่านี้ ทำให้ขยะของผลิตภัณฑ์พลาสติกเหล่านี้มีปริมาณเพิ่มขึ้น ในประเทศไทยมีขยะพลาสติกในแต่ละปีประมาณ 150,000 ตัน ดังนั้นการนำขยะพลาสติกเหล่านี้มาหลอม แล้วขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกรีไซเคิลจึงเป็นวิธีช่วยลดปริมาณขยะและลดปัญหาสิ่งแวดล้อม ภาชนะที่ทำจากผลิตภัณฑ์พลาสติกรีไซเคิลได้แก่ เครื่องรับโทรศัพท์ ถุงขยะ ฯลฯ

การวิจัยนี้ ได้ศึกษาสมบัติทางความร้อน และทางกายภาพของแผ่นฟิล์มพลาสติกรีไซเคิลเปรียบเทียบกับแผ่นฟิล์มพลาสติกที่ผลิตจากเม็ดพลาสติกโดยตรง ซึ่งต่อไปนี้จะใช้ r แทนแผ่นฟิล์มพลาสติกรีไซเคิลและ n แทนแผ่นฟิล์มที่ผลิตจากเม็ดพลาสติกโดยตรง ในที่นี้แผ่นฟิล์ม r เป็นแผ่นฟิล์มที่ผลิตจากเศษแผ่นฟิล์ม n ภายในโรงงาน โดยนำเศษแผ่นฟิล์ม n มาหลอมที่อุณหภูมิพอเหมาะ แล้วผสมกับเม็ดพลาสติกบางส่วน และนำมาขึ้นรูปเป็นถุงก๊อบแก๊บหรือถุงขยะ สมบัติทางความร้อนและทางกายภาพที่ได้ศึกษานี้ ใช้วิธี thermal analysis (Wunderlich, 1990)

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การทดสอบสมบัติทางความร้อนของแผ่นฟิล์ม

แผ่นฟิล์มที่ใช้ในการศึกษาเป็นแผ่นฟิล์มชนิด LDPE (low density polyethylene) ซึ่งมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.73 - 0.84 g/cm^3

เมื่อวัดความหนาของแผ่นฟิล์มตัวอย่างด้วยไมโครมิเตอร์แล้ว พับแผ่นฟิล์มหลาย ๆ ชั้น ให้มีความหนาประมาณ 0.5 mm เจาะแผ่นฟิล์มให้เป็นแผ่นกลมด้วยที่เจาะกระดาษ ชั่งน้ำหนักของแผ่นฟิล์มกลมด้วยเครื่องชั่งอย่างละเอียด (Sartorius) แล้วใส่ในกะทะอะลูมิเนียมเล็ก ๆ ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.60 mm ลึก 0.93 mm และปิดแน่นด้วยฝาอะลูมิเนียมหนา 0.08 mm นำแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่บรรจุอยู่ในกะทะอะลูมิเนียมปิดนี้ ใส่ในเตาข้างหนึ่งของชุดวิเคราะห์ความร้อน Differential Scanning Calorimeter (DSC7, Perkin - Elmer) และใส่กะทะอะลูมิเนียมเปล่า ซึ่งปิดฝาในลักษณะเดียวกับใบแรกลงในเตาอีกข้างหนึ่ง เพื่อใช้เป็นตัวอ้างอิง เปิดเครื่อง DSC ให้เตาร้อนขึ้นจากอุณหภูมิ 15°C ไปถึง 200°C ด้วยอัตรา 15°C/min และผ่านแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในเตาด้วยอัตรา 2 cm^3/min เครื่อง DSC จะบันทึกปริมาณความร้อนที่ถูกดูดกลืนเข้าไปในแผ่นฟิล์มเทียบกับตัวอ้างอิงที่อุณหภูมิต่าง ๆ

1.1 การหาความจุความร้อนของแผ่นฟิล์ม

ความจุความร้อน C_p ที่อุณหภูมิต่าง ๆ หาได้จากการไหลความร้อน (heat flow) dH/dt ที่คายออกมาหรือถูกดูดกลืนเข้าไปในแผ่นฟิล์ม (McNaughton and Mortimer, 1975) ดังสมการ

$$\frac{dH}{dt} = mC_p \frac{dT}{dt} \qquad (1)$$

โดย m เป็นมวลของแผ่นฟิล์ม และ dT/dt เป็นอัตราเพิ่มหรือลดอุณหภูมิ ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ใช้ dT/dt = 15°C /min

ความจุความร้อนที่ได้จากสมการ (1) อาจมีความคลาดเคลื่อนบ้าง จึงต้องแก้ความคลาดเคลื่อนนี้โดยเปรียบเทียบกับค่าความจุความร้อนจากสารมาตรฐานที่ทราบค่าความจุความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในที่นี้ใช้แผ่น sapphire (Al_2O_3) เป็นสารมาตรฐาน ซึ่งมีมวล m′ = 0.0337 กรัม และมีความหนา 0.275 mm ใส่แผ่น sapphire กลมในกะทะอะลูมิเนียม ปิดฝา

แน่นด้วยวิธีเดียวกับแผ่นฟิล์ม แล้วใส่ในเตาข้างเดียวกับที่ใส่ฟิล์มตัวอย่างของเครื่อง DSC7 บันทึกความร้อนที่ถูกดูดกลืนเข้าไปใน sapphire เทียบกับตัวอ้างอิงที่อุณหภูมิ 15°C ไปถึง 200°C

ความจุความร้อน C_p ของแผ่นฟิล์มที่อุณหภูมิหนึ่ง หาได้จากสมการ

$$\frac{C_p}{C_p'} = \frac{y}{y'}\frac{m'}{m} \qquad (2)$$

โดย C_p' เป็นความจุความร้อนของ sapphire และ y เป็นความสูงของกราฟ heat flow เมื่อเทียบกับ base line

2. การทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม

ตัดแผ่นฟิล์มให้เป็นแนวยาวประมาณ 1 cm ด้วยใบมีดโกนสองเล่มที่วางขนาบแท่งอะลูมิเนียมซึ่งมีความกว้างสม่ำเสมอ 4.41 mm หนีบแผ่นฟิล์มที่ตัดออกมาด้วยที่หนีบในชุดทดลองชนิด extension ของเครื่อง Dynamic Mechanical Analyzer (DMA7, Perkin - Elmer) วัดความยาวของแผ่นฟิล์มด้วยเครื่อง DMA7 แล้วใส่ความเค้นสถิตแก่แผ่นฟิล์ม เพื่อให้หัววัดอยู่ติดกับฟิล์มตัวอย่างตลอดการทดลอง ใส่ความเค้นจลน์แก่แผ่นฟิล์มเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของแผ่นฟิล์ม ซึ่งการศึกษาครั้งนี้ให้อัตราส่วนของความเค้นสถิตและความเค้นจลน์ หรือ auto tension เป็น 110 % และความถี่ 1.0 Hz ตลอดการทดลอง

2.1 การหาความเครียดและมอดุลัส

ความเค้นจลน์ σ_t ที่ให้กับแผ่นฟิล์มเป็นฟังก์ชันของเวลา t (McCrum *et al.*, 1990) ดังนี้

$$\sigma_t = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta) \qquad (3)$$

โดย σ_0 เป็นแอมพลิจูดของความเค้น มีหน่วยเป็น Pa และ ω เป็นความถี่เชิงมุม

โดยทั่วไป แผ่นฟิล์มพลาสติกมีสมบัติ viscoelastic จึงมีความเครียดตามหลังความเค้นด้วยมุม δ (Figure 1) เมื่อแผ่นฟิล์มได้รับความเค้นจลน์ จะมีความเครียดจลน์ ε_t ในแผ่นฟิล์ม ดังนี้

$$\varepsilon_t = \varepsilon_0 \sin \omega t \qquad (4)$$

โดย ε_0 เป็นแอมพลิจูดของความเครียด

สมการ (3) เขียนใหม่เป็น

$$\sigma_t = \sigma_0 \sin \omega t \cos \delta + \sigma_0 \cos \omega t \sin \delta \qquad (5)$$

โดยความเค้น $\sigma_0 \cos \delta$ มีเฟสเดียวกับความเครียด และ $\sigma_0 \sin \delta$ มีเฟสต่างจากความเครียด 90° จากสมการ (4) และสมการ (5) จะได้มอดุลัสเก็บสะสม E′ และมอดุลัสสูญเสีย E″ ในแผ่นฟิล์มเป็น

$$E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}\cos\delta \text{ และ } E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}\sin\delta \qquad (6)$$

ดังนั้นมอดุลัสเชิงซ้อน E* เป็น

$$E^* = E' - iE''$$

และขนาดของมอดุลัสเชิงซ้อนเป็น

$$|E^*| = \sqrt{E'^2 + E''^2}$$

จากสมการ (6) จะได้ tan δ หรือ loss factor เป็น

$$\tan\delta = \frac{E''}{E'}$$

ถ้า tan δ มีค่ามาก แสดงว่า แผ่นฟิล์มมีความหนืดมาก และ tan δ มีค่าน้อย แสดงว่าแผ่นฟิล์มมีความยืดหยุ่น

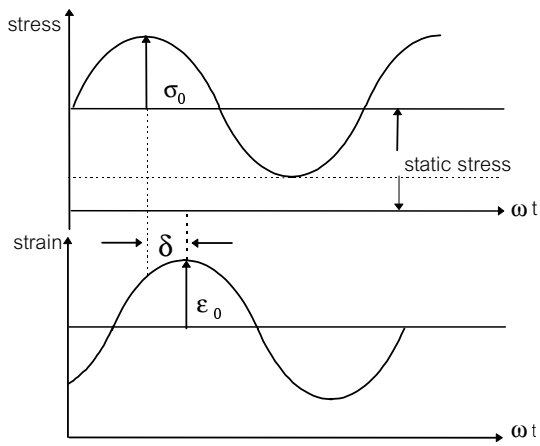

Figure 1 Response of a viscoelastic material to a sinusoidal stress of frequency ω.

ผลและวิจารณ์

การศึกษาครั้งนี้ ใช้แผ่นฟิล์มพลาสติกรีไซเคิล 8 ตัวอย่าง และแผ่นฟิล์มพลาสติกที่ผลิตจากเม็ดพลาสติกโดยตรง 4 ตัวอย่าง ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 71.8 % และอุณหภูมิ 26°C

1. สมบัติทางความร้อน

การศึกษาสมบัติทางความร้อนของแผ่นฟิล์มด้วยเครื่อง DSC7 เมื่อทำให้แผ่นฟิล์มตัวอย่างร้อนขึ้นจาก 15°C ไปถึง 200°C ในอัตรา 15°C /min และทำให้แผ่นฟิล์มตัวอย่างเย็นลงจาก 200°C ไปถึง 15°C ในอัตราเดียวกัน เครื่อง DSC จะบันทึกการไหลความร้อนในแผ่นฟิล์มที่อุณหภูมิต่าง ๆ Figure 2 แสดง heating curve และ cooling curve ของแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่ 10 ความร้อนของการหลอม (heat of fusion, ΔH_f) ของแผ่นฟิล์มหาได้จากพื้นที่ภายใน curve (Bair, 1994) และอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) เป็นค่าที่อ่านจาก heating curve และ ไม่ได้พิจารณาค่าจาก cooling curve เพราะแผ่นฟิล์มได้หลอมเหลวและเปลี่ยนสภาพไป

Table 1 แสดง ชนิด ความหนา และ มวล ของแผ่นฟิล์มที่ใช้ในการทดลอง อุณหภูมิหลอมเหลว ความร้อนของการหลอมต่อมวล (ΔH) ความจุความร้อนที่ 28°C, 40°C และที่ T_m ของแผ่นฟิล์ม โดยความจุความร้อนของแผ่นฟิล์มหาได้จากสมการ (2)

Figure 3 เปรียบเทียบความจุความร้อนของแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่ 2 ซึ่งเป็นพลาสติกรีไซเคิลกับความจุความร้อนของ sapphire ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้ค่าจากตารางมาตรฐาน ในการศึกษาครั้งนี้ พบว่าแผ่นฟิล์มพลาสติก r ทุกตัวอย่างมี peak ของความจุความร้อนมากกว่าหนึ่ง peak ในขณะที่แผ่นฟิล์ม n มีเพียง peak เดียว แสดงว่านอกจาก LDPE แล้ว แผ่นฟิล์ม r ยังมีสารอื่นเจือปนเข้าไปด้วย

Figure 4 แสดงความจุความร้อนที่อุณหภูมิ 28°C และ 40°C เทียบกับความหนาของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง

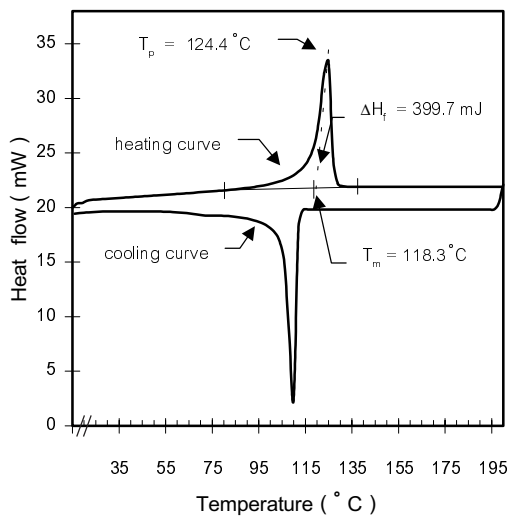

Figure 2 Heating and cooling curve of non - recycled plastic film (sample # 10).

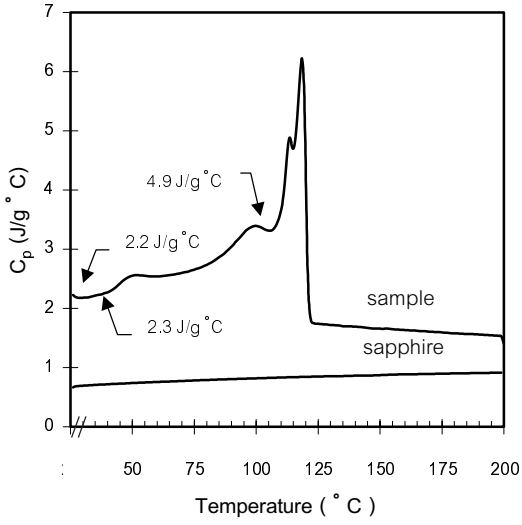

Figure 3 Heat capacity as a function of temperature of recycled plastic film (sample # 2) and sapphire.

Table 1 Thermal properties of plastic film.

Sample	Type	Thickness	Mass	T_m	ΔH	C_p (J/g°C)		
		(mm)	(mg)	(°C)	(J/g)	28°C	40°C	T_m
1(r)	white plastic	0.025	2.4	89.5	86.8	3.2	3.4	4.9
2(r)	black plastic	0.026	5.9	111.4	97.4	2.2	2.3	4.9
3(r)	light plastic	0.030	5.2	95.0	66.3	1.9	2.1	3.8
4(r)	light plastic	0.030	4.3	95.9	81.3	2.2	2.3	4.7
5(r)	light plastic	0.044	8.2	95.0	81.6	1.9	2.0	3.5
6(r)	light plastic	0.046	4.2	94.9	77.9	2.3	2.4	4.4
7(r)	light plastic	0.047	2.5	113.9	67.7	2.5	2.7	7.0
8(r)	light plastic	0.066	6.3	110.2	90.4	2.6	2.7	4.5
9(n)	white plastic	0.011	7.8	117.5	184.2	2.0	2.0	6.3
10(n)	light plastic	0.013	2.6	118.3	153.7	1.8	1.8	6.5
11(n)	white plastic	0.016	7.8	121.3	202.3	3.8	4.0	10.9
12(n)	white plastic	0.102	16.7	117.1	142.6	2.0	2.1	4.9

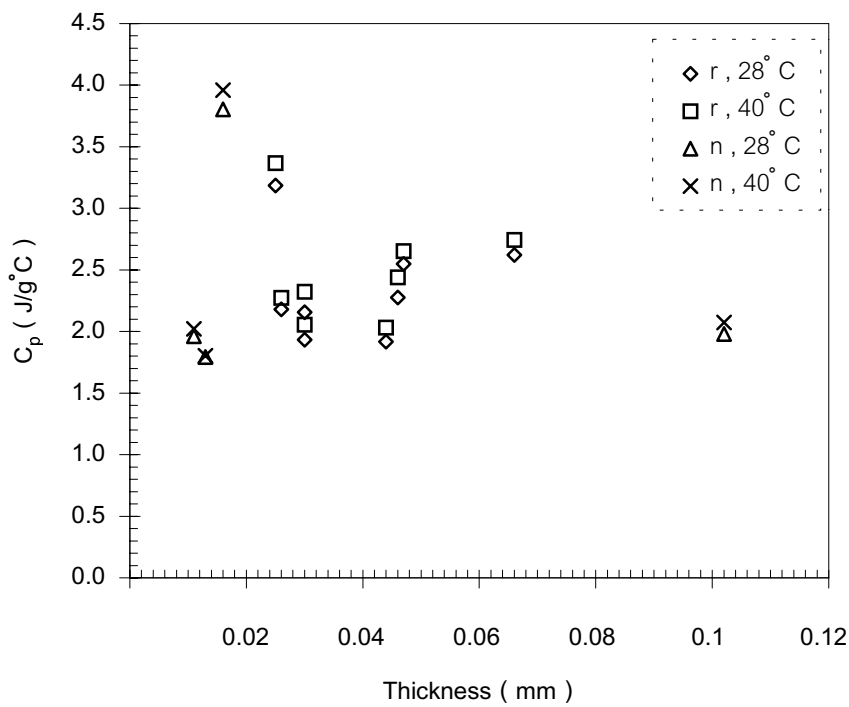

Figure 4 Heat capacity at 28°C and 40°C vs. thickness of plastic film.

ซึ่งความจุความร้อนของแผ่นฟิล์ม r และ n มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยความจุความร้อนของแผ่นฟิล์ม r และ n (โดยเฉลี่ย) มีค่าใกล้เคียงกัน จาก Figure 5 จะเห็นว่าอุณหภูมิหลอมเหลว ความจุความร้อน และความร้อนของการหลอมต่อมวลที่อุณหภูมิหลอมเหลวของแผ่นฟิล์ม n มีค่ามากกว่าแผ่นฟิล์ม r อย่างไรก็ตาม การนำแผ่นฟิล์มพลาสติกมาใช้งานนั้นส่วนใหญ่จะใช้งานที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นสมบัติทาง

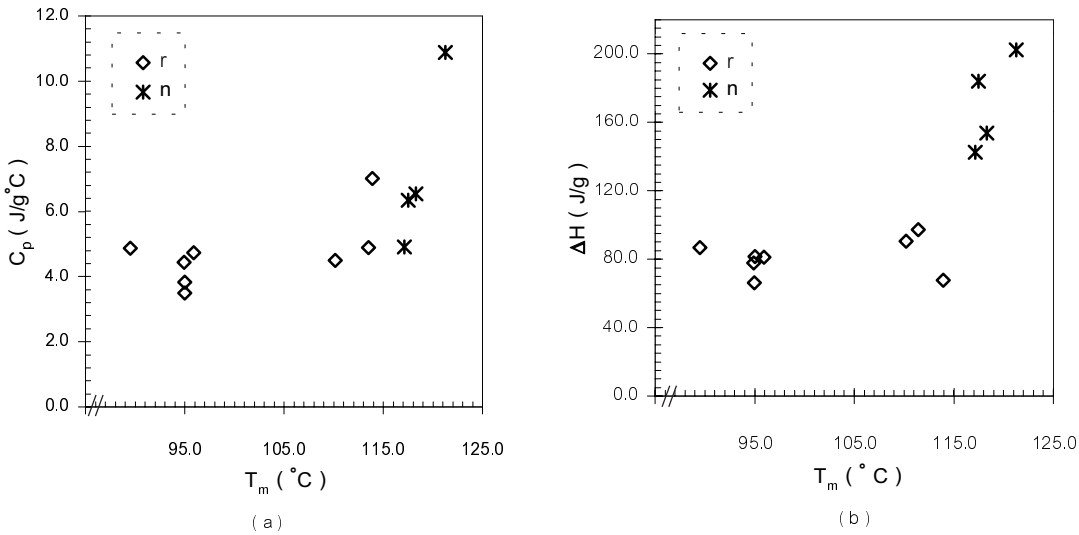

Figure 5 (a) Heat capacity at T_m and (b) heat of fusion per gram at T_m vs. melting temperature of plastic film.

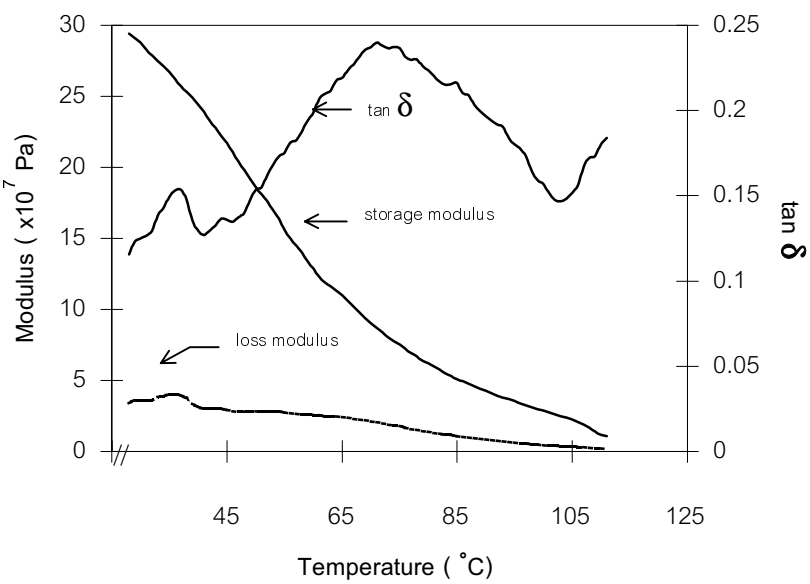

Figure 6 DMA temperature scan of recycled plastic film (sample # 8) showing storage modulus, loss modulus and tangent delta in machine direction.

ความร้อนที่อุณหภูมิหลอมเหลวของแผ่นฟิล์มจึงไม่มีความสำคัญ

2. สมบัติทางกายภาพ

การศึกษาสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ด้วยเครื่อง DMA 7 นั้น ศึกษาเฉพาะ extension mode โดยทำการยืดแผ่นฟิล์มในแนวขนานเครื่องและแนวตั้งฉากเครื่องด้วย dynamic stress 4.55×10^5 Pa ที่ความถี่ 1.0 Hz และใช้ auto tension 110 % จะได้ static stress 5.00×10^5 Pa ตลอดการทดลอง โดยทำให้แผ่นฟิล์มร้อนจาก 25°C ไปถึง 110°C (บางตัวอย่างทำให้ร้อนถึง 125°C) ในอัตรา 2°C/min เครื่อง DMA 7 จะบันทึกมุมเฟสและการกระจัดของแผ่นฟิล์มเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ

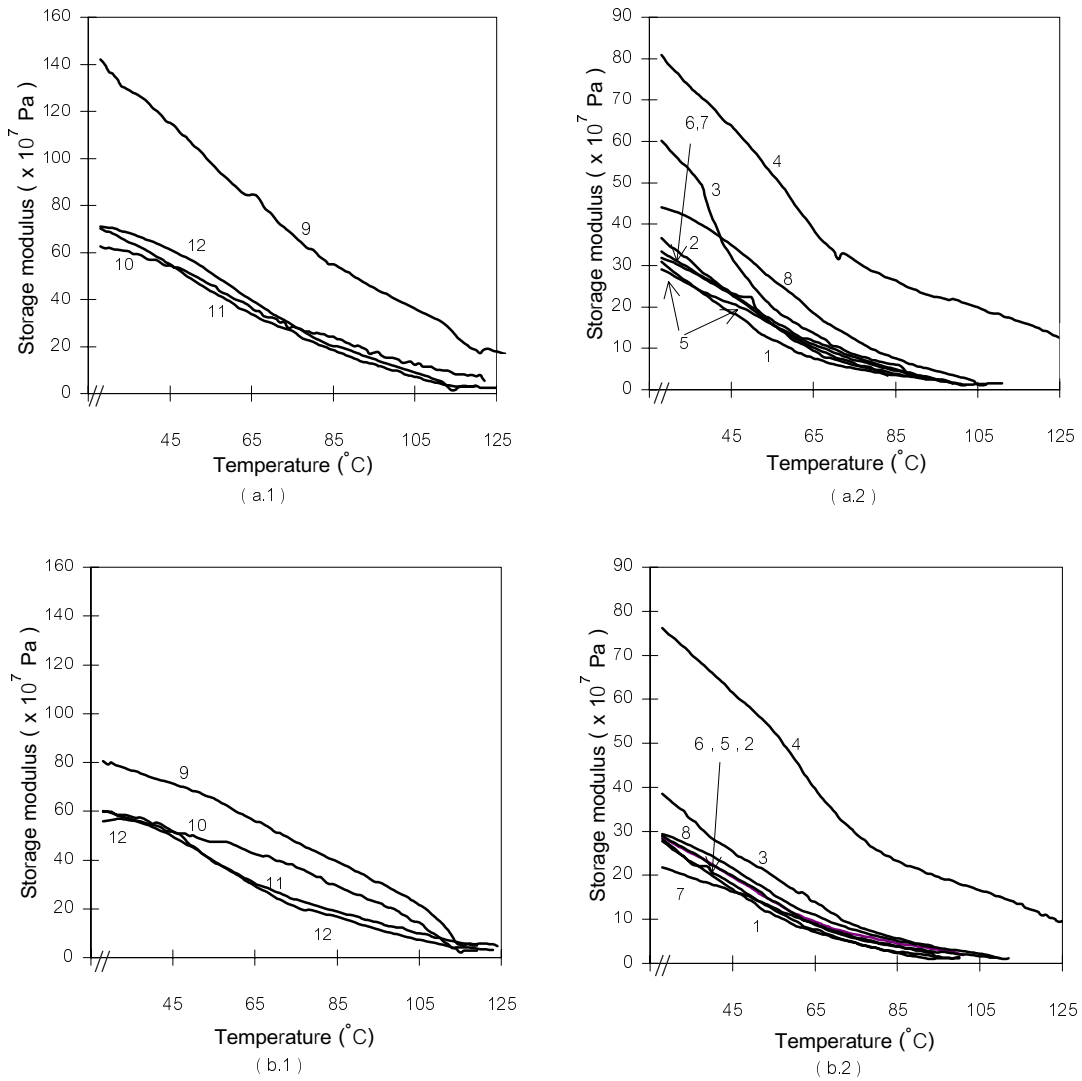

Figure 7 Storage modulus vs. temperature of plastic film in (a) machine direction and (b) transverse direction.

ซึ่งในที่นี้ศึกษาเฉพาะค่าที่ได้จาก heating curve ดัง Figure 6 ซึ่งแสดง มอดุลัสเก็บสะสม มอดุลัสสูญเสีย และ tan δ ของแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่ 8 โดยมอดุลัสเก็บสะสม E′ เป็นการวัดความแข็งตึง (stiffness) ของแผ่นฟิล์มซึ่งแสดงความสามารถในการเก็บพลังงานเพื่อให้แผ่นฟิล์มกลับเข้าสู่สภาพเดิมหลังการใช้งาน และมอดุลัสสูญเสีย E″ เป็นค่าที่แสดงพลังงานที่สูญเสียไปในการใช้งาน ซึ่งจะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมอดุลัสเก็บสะสมมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว แต่มอดุลัสสูญเสียมีค่าลดลงอย่างช้า ๆ และ tan δ มีสอง peak ซึ่งแสดงว่ามีสารอื่นเจือปนในแผ่นฟิล์ม r

Figure 7 เปรียบเทียบมอดุลัสเก็บสะสม Figure 8 เปรียบเทียบมอดุลัสสูญเสีย และ Figure 9 เปรียบเทียบมอดุลัสเชิงซ้อน ของแผ่นฟิล์มทุก

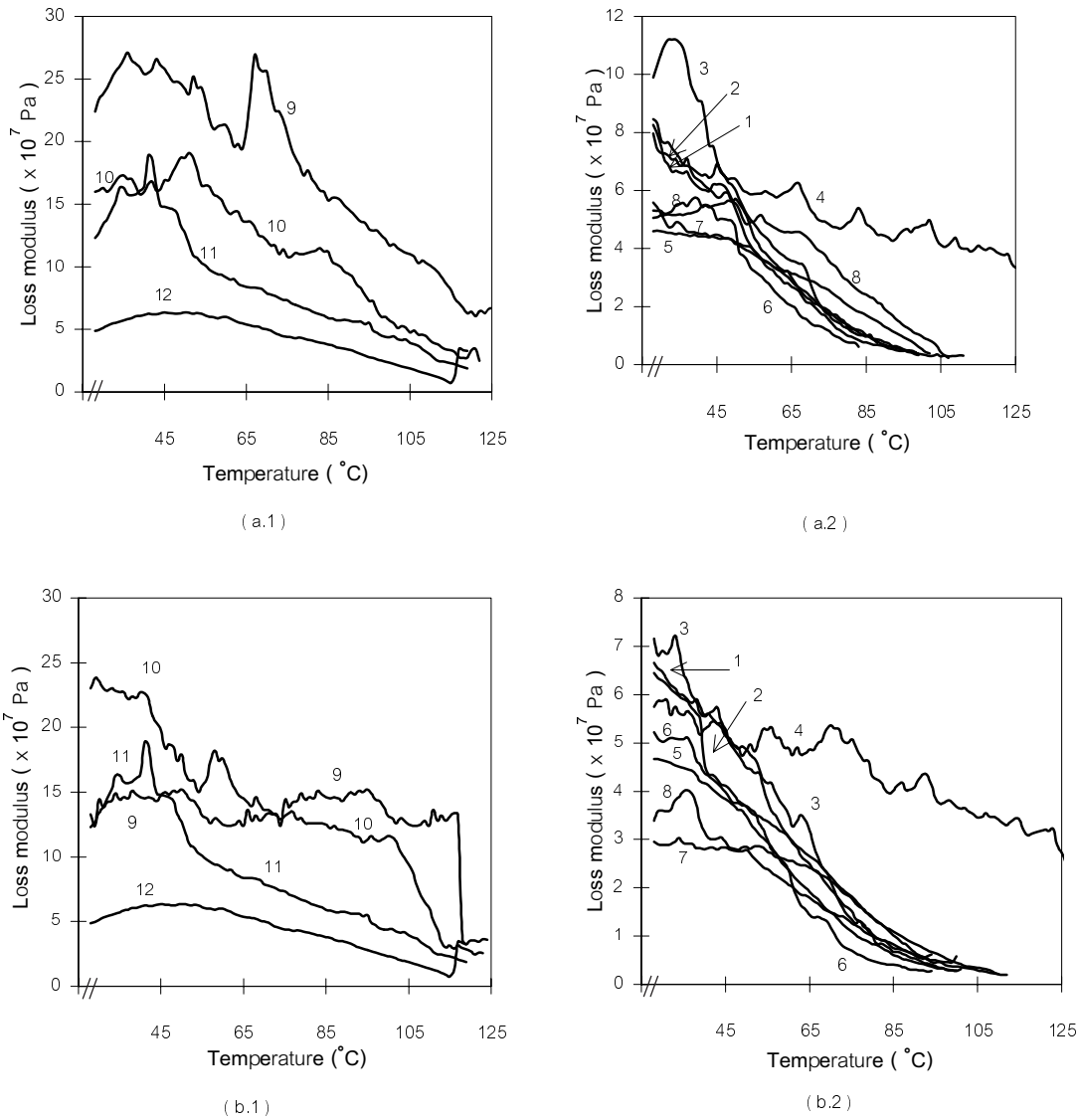

Figure 8 A plot of loss modulus as a function of temperature of plastic film in (a) machine direction and (b) transverse direction.

ตัวอย่างเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิในแนวขนานเครื่องและแนวตั้งฉากเครื่อง ตัวเลข 1, 2, 3,..., 12 ใน Figure 7 - 9 แทนแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่ 1, 2, 3,..., 12 ตามลำดับ มอดุลัสเชิงซ้อน E* เป็นค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการเก็บสะสมพลังงานและการสูญเสียพลังงานของแผ่นฟิล์ม

Figure 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง มอดุลัสเก็บสะสมกับความหนาของแผ่นฟิล์มในแนวทั้งสองที่อุณหภูมิ 28°C และ 40°C ซึ่งจะเห็นว่ามอดุลัสเก็บสะสมของแผ่นฟิล์ม r มีค่าใกล้เคียงกับแผ่นฟิล์ม n ในแนวขนานเครื่อง แต่มีค่าน้อยกว่าแผ่นฟิล์ม n ในแนวตั้งฉากเครื่อง

Table 2 และ Table 3 แสดงความเครียด มอดุลัสเก็บสะสม มอดุลัสสูญเสีย มอดุลัสเชิงซ้อน และ

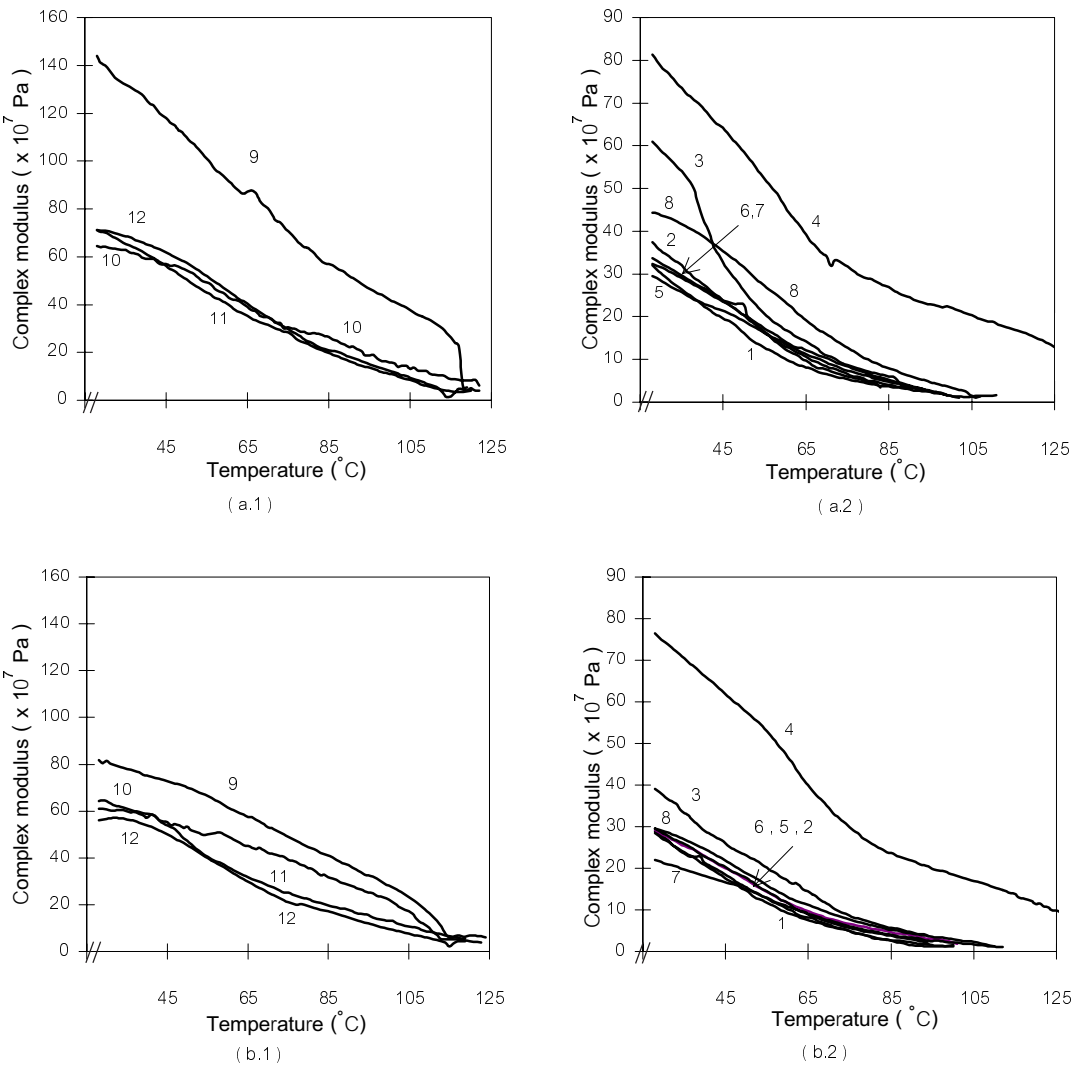

Figure 9 Correlation between complex modulus with temperature of plastic film in (a) machine direction and (b) transverse direction.

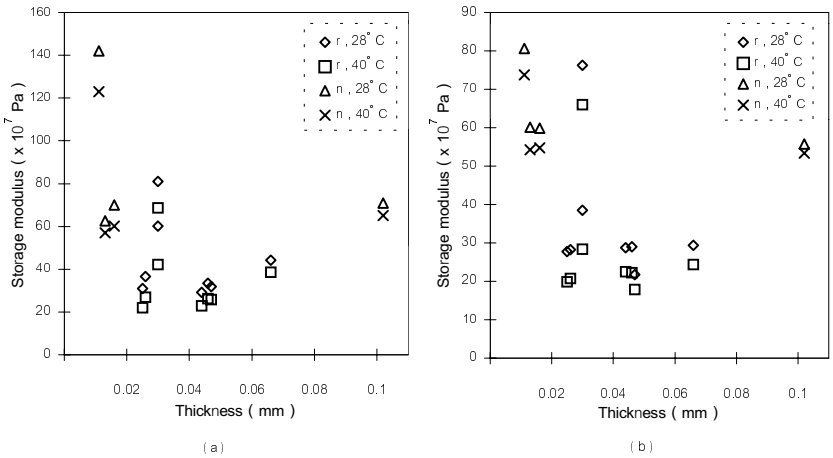

Figure 10 A plot of storage modulus versus film thickness at 28°C and 40°C in (a) machine direction and (b) transverse direction.

Table 2 Physical properties of plastic film in machine direction.

Sample	Type	Thickness (mm)	Length (mm)	T (°C)	Strain (%)	E′ (× 10^7 Pa)	E″ (× 10^7 Pa)	E* (× 10^7 Pa)	tan δ
1(r)	white	0.025	11.098	28	0.1422	30.94	8.26	32.03	0.2670
				40	0.2006	21.88	6.12	22.72	0.2799
2(r)	black	0.026	12.097	28	0.1215	36.60	7.96	37.50	0.2176
				40	0.1643	26.97	6.37	27.70	0.2364
3(r)	light	0.030	10.966	28	0.0746	60.10	9.89	60.90	0.1645
				40	0.1051	42.30	9.09	43.30	0.2150
4(r)	light	0.030	9.543	28	0.0559	80.90	8.46	81.30	0.1047
				40	0.0659	68.70	6.59	69.00	0.0959
5(r)	light	0.044	9.777	28	0.1546	29.10	4.60	29.50	0.1580
				40	0.1964	22.80	4.42	23.20	0.1941
6(r)	light	0.046	10.192	28	0.1350	33.40	5.06	33.70	0.1516
				40	0.1697	26.30	5.31	26.80	0.2016
7(r)	light	0.047	9568	28	0.1407	31.90	5.58	32.40	0.1752
				40	0.1731	25.90	4.52	26.30	0.1745
8(r)	light	0.066	10.900	28	0.1185	44.10	5.31	44.40	0.1205
				40	0.1531	38.50	5.70	38.90	0.1480
9(n)	white	0.011	12.001	28	0.0314	142.00	22.40	144.00	0.1580
				40	0.0359	123.00	25.40	126.00	0.2066
10(n)	light	0.013	11.664	28	0.0712	62.50	16.00	64.50	0.2552
				40	0.0778	56.90	16.00	59.10	0.2814
11(n)	white	0.016	11.941	28	0.0644	70.10	12.00	71.10	0.1711
				40	0.0748	60.10	12.00	61.20	0.1990
12(n)	white	0.102	13.231	28	0.0639	71.02	5.35	71.20	0.0754
				40	0.0696	65.00	6.65	65.30	0.1023

Table 3 Physical properties of plastic film in transverse direction.

Sample	Type	Thickness (mm)	Length (mm)	T (°C)	Strain (%)	E′ ($\times 10^7$ Pa)	E″ ($\times 10^7$ Pa)	E* ($\times 10^7$ Pa)	tan δ
1(r)	white	0.025	11.098	28	0.1597	27.70	6.66	28.50	0.2402
				40	0.2206	19.90	5.58	20.70	0.2805
2(r)	black	0.026	12.097	28	0.1570	28.30	6.45	29.00	0.2279
				40	0.2150	20.70	4.58	21.20	0.2214
3(r)	light	0.030	10.966	28	0.1162	38.47	7.16	39.10	0.1861
				40	0.1570	28.42	5.55	29.00	0.1952
4(r)	light	0.030	9.543	28	0.0594	76.20	5.75	76.40	0.0755
				40	0.0686	66.00	5.29	66.20	0.0802
5(r)	light	0.044	9.777	28	0.1560	28.80	4.66	29.20	0.1615
				40	0.1992	22.50	4.16	22.90	0.1847
6(r)	light	0.046	10.192	28	0.1546	29.00	5.22	29.50	0.1798
				40	0.2002	22.30	4.38	22.80	0.1961
7(r)	light	0.047	9568	28	0.2068	21.80	2.95	22.00	0.1352
				40	0.2510	17.90	2.79	18.20	0.1557
8(r)	light	0.066	10.900	28	0.1539	29.40	3.39	29.60	0.1154
				40	0.1853	24.40	3.16	24.60	0.1295
9(n)	white	0.011	12.001	28	0.0552	80.60	13.30	81.70	0.1655
				40	0.0599	73.80	14.60	75.30	0.1971
10(n)	light	0.013	11.664	28	0.0714	60.07	23.00	64.30	0.3834
				40	0.0782	54.21	22.70	58.80	0.4185
11(n)	white	0.016	11.941	28	0.0749	59.90	12.30	61.10	0.2053
				40	0.0801	54.80	16.40	57.20	0.2993
12(n)	white	0.102	13.231	28	0.0812	55.80	4.87	56.00	0.0873
				40	0.0846	53.40	6.16	53.80	0.1154

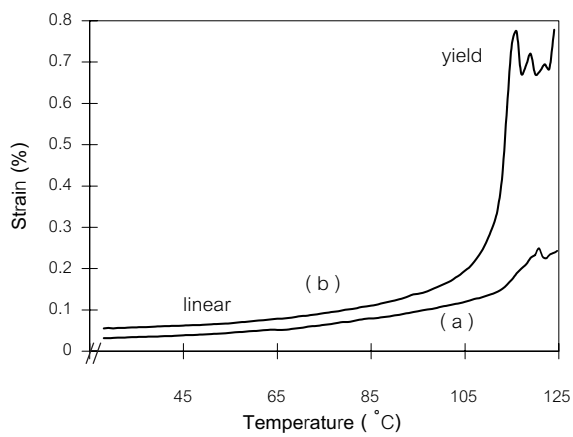

Figure 11 Thermal strain as a function of temperature of non - recycled plastic film (sample # 9) in (a) machine direction and (b) transverse direction.

tan δ ที่อุณหภูมิ 28°C และ 40°C ในแนวทั้งสองตามลำดับ โดยใช้แผ่นฟิล์มตัวอย่างชนิดเดียวกันกับที่ได้แสดงใน Table 1

Figure 11 เปรียบเทียบความเครียดในแนวทั้งสองเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิของแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่ 9 โดยความเครียดในแนวตั้งฉากเครื่องจะสูงกว่าความเครียดในแนวขนานเครื่อง และการคราก (yield) ในแนวตั้งฉากเครื่องเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าในแนวขนานเครื่อง และจาก peak ของความเครียดสามารถนำมาหาอุณหภูมิหลอมเหลว T_m ในแนวทั้งสองได้

Figure 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับความหนาของแผ่นฟิล์มในแนวทั้งสองที่อุณหภูมิ 28°C และ 40°C ซึ่งจะเห็นว่าความเครียดในแนวทั้งสองของแผ่นฟิล์ม r มีค่ามากกว่าแผ่นฟิล์ม n แสดงว่าภายใต้ความเค้นเดียวกัน แผ่นฟิล์ม r จะยืดออกมามากกว่าแผ่นฟิลม n

Table 4 และ Table 5 เปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนและสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม ซึ่งจะเห็นว่า แผ่นฟิล์ม r มีสมบัติทางความร้อนและทางกายภาพด้อยกว่าแผ่นฟิล์ม n เล็กน้อย

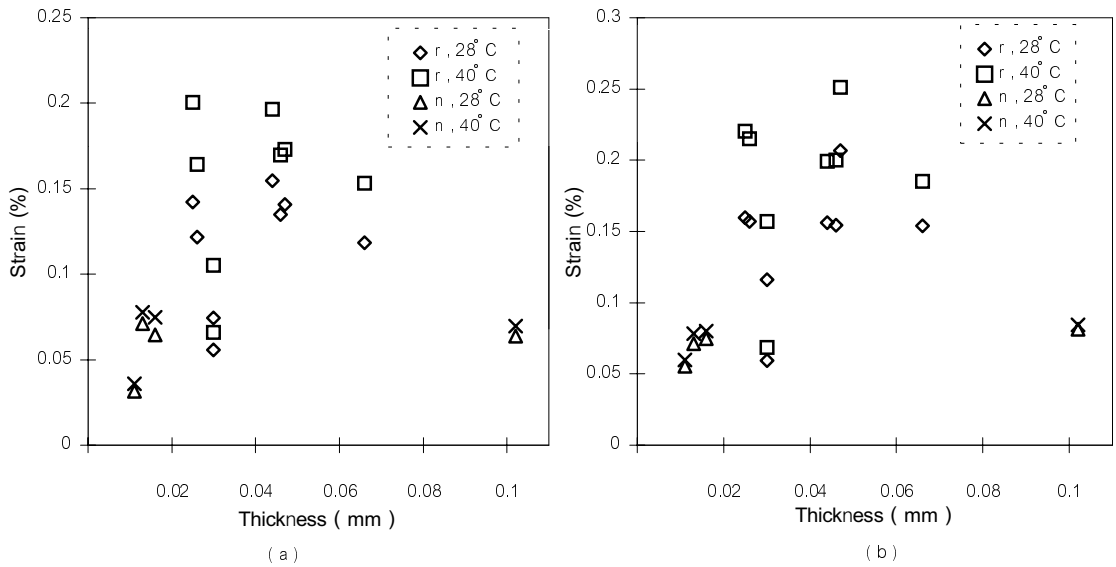

Figure 12 A plot of thermal strain versus film thickness at 28°C and 40°C in (a) machine direction and (b) transverse direction.

Table 4 A comparision of thermal properties of plastic film.

Type	T_m	ΔH	C_P (J/g °C)		
	(° C)	(J/g)	28°C	40°C	T_m
r	89 - 114	66 - 97	1.9 - 3.2	2.0 - 3.4	3.5 - 7.0
n	117 - 121	142 - 202	1.8 - 3.8	1.8 - 4.0	4.9 - 10.9

Table 5 A comparision of physical properties of plastic film.

Type	T (°C)	ε (%)	E′	E″	E*	tan δ
	Machine direction					
r	28	0.056 - 0.155	29.1 - 80.9	4.6 - 9.9	29.5 - 81.3	0.1047 - 0.2670
	40	0.066 - 0.201	21.9 - 68.7	4.4 - 9.1	22.7 - 69.0	0.0959 - 0.2799
n	28	0.031 - 0.071	62.5 - 142.0	5.4 - 22.4	64.5 - 144.0	0.0754 - 0.2552
	40	0.036 - 0.078	56.9 - 123.0	6.6 - 25.4	59.1 - 126.0	0.1023 - 0.2814
	Transverse direction					
r	28	0.059 - 0.207	21.8 - 76.2	3.0 - 7.2	22.0 - 76.4	0.0755 - 0.2402
	40	0.069 - 0.251	17.9 - 66.0	2.8 - 5.6	18.2 - 66.2	0.0802 - 0.2805
n	28	0.055 - 0.081	55.8 - 80.6	4.9 - 23.0	56.0 - 81.7	0.0873 - 0.3834
	40	0.060 - 0.085	53.4 - 73.8	6.2 - 22.7	53.8 - 75.3	0.1154 - 0.4185

สรุป

1. สมบัติทางความร้อน

สมบัติทางความร้อนของแผ่นฟิล์มที่ได้ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิหลอมเหลว T_m ความร้อนของการหลอมต่อมวล ΔH ความจุความร้อน C_P ที่อุณหภูมิ 28°C, 40°C และที่จุดหลอมเหลว ซึ่งสรุปผลได้ดัง Table 4 ดังนี้

1.1 อุณหภูมิหลอมเหลว T_m ของแผ่นฟิล์ม n สูงกว่าแผ่นฟิล์ม r โดยไม่ขึ้นกับความหนาของแผ่นฟิล์ม (Figure 5)

1.2 ความร้อนของการหลอมต่อมวลที่อุณหภูมิหลอมเหลวของแผ่นฟิล์ม ขึ้นกับอุณหภูมิหลอมเหลว ความร้อนของการหลอมต่อมวลของแผ่นฟิล์ม n มีค่ามากกว่าแผ่นฟิล์ม r และไม่ขึ้นกับความหนาของแผ่นฟิล์ม

1.3 ความจุความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ โดยไม่ขึ้นกับความหนาของแผ่นฟิล์ม ความจุความร้อนที่ 28°C และ 40°C ของแผ่นฟิล์ม n ที่ความหนาต่าง ๆ แปรเปลี่ยนในช่วงที่กว้างกว่าแผ่นฟิล์ม r (Figure 4)

1.4 ความจุความร้อนที่อุณหภูมิหลอมเหลวของแผ่นฟิล์ม n ที่ความหนาต่าง ๆ มีค่าโดยเฉลี่ยมากกว่าแผ่นฟิล์ม r

จึงสรุปว่า แผ่นฟิล์ม n มีสมบัติทางความร้อนดีกว่าแผ่นฟิล์ม r โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อนำแผ่นฟิล์มมาใช้งานที่อุณหภูมิสูงขึ้น แผ่นฟิล์ม n จะสามารถทนความร้อนได้มากกว่า นั่นคือต้องใช้ความร้อนในการหลอมต่อมวลที่อุณหภูมิจุดหลอมเหลวมากกว่า และมีความจุความร้อนสูงกว่าแผ่นฟิล์ม r แต่ในทางปฏิบัติ มักนำแผ่นฟิล์มมาใช้งานที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งสมบัติทางความร้อนที่อุณหภูมิห้องของแผ่นฟิล์มnและ r มีค่าใกล้เคียงกัน จึงสามารถนำแผ่นฟิล์ม r มาใช้งานแทนแผ่นฟิล์ม n ได้

2. สมบัติทางกายภาพ

สมบัติทางกายภาพที่ได้ศึกษาได้แก่ มอดุลัสเก็บสะสม มอดุลัสสูญเสีย มอดุลัสเชิงซ้อน ความเครียดและมุมเฟสที่อุณหภูมิ 28°C และ 40°C โดยใช้ dynamic stress 4.55×10^5 Pa ที่ความถี่ 1.0 Hz และ static

stress 5.00×10^5 Pa ซึ่งสรุปผลได้ดัง Table 5 ดังนี้

2.1 มอดุลัสของแผ่นฟิล์มมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและมอดุลัสในแนวขนานเครื่องมากกว่าแนวตั้งฉากเครื่อง (Figure 7 - 9) เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิเดียวกัน แผ่นฟิล์ม n มี มอดุลัส (โดยเฉลี่ย) ในแนวทั้งสองที่สูงกว่าแผ่นฟิล์ม r

2.1.1 แผ่นฟิล์ม n มีค่ามอดุลัสเก็บสะสม E′ สูง จึงมีสมบัติยืดหยุ่นมากกว่าแผ่นฟิล์ม r

2.1.2 แผ่นฟิล์ม n มีค่ามอดุลัสสูญเสีย E″ สูง จึงมีสมบัติหนืดมากกว่าแผ่นฟิล์ม r

2.1.3 แผ่นฟิล์ม n มีค่ามอดุลัสเชิงซ้อน E* สูง จึงมีทั้งความยืดหยุ่นและความหนืดมากกว่าแผ่นฟิล์ม r

2.2 ความเครียด ε ของแผ่นฟิล์มในแนวทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ (Figure 11) และสามารถหาอุณหภูมิหลอมเหลวได้ ซึ่งพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิหลอมเหลวที่หาได้จากเครื่อง DSC

2.2.1 ที่อุณหภูมิเดียวกัน ความชันของกราฟความเครียดของแผ่นฟิล์ม n น้อยกว่าแผ่นฟิล์ม r โดยความชันในช่วง linear และช่วง yield ของแผ่นฟิล์ม n และ r ในแนวตั้งฉากเครื่องมีค่ามากกว่าในแนวขนานเครื่อง

2.2.2 ที่อุณหภูมิ 28°C แผ่นฟิล์ม n ทุกตัวอย่างมีค่าความเครียดใกล้เคียงกัน และมีค่าน้อย แต่แผ่นฟิล์ม r ที่ความหนาต่าง ๆ มีความเครียดโดยเฉลี่ยมากกว่าแผ่นฟิล์ม n (Figure 12)

2.2.3 แผ่นฟิล์ม r มีค่าความเครียดในแนวทั้งสองแตกต่างกันมากกว่าแผ่นฟิล์ม n

2.3 loss factor หรือ tan δ ของแผ่นฟิล์ม r มีหลาย peak (Figure 6) แสดงว่าแผ่นฟิล์ม r มีสารอื่นเจือปนด้วย ซึ่งตรงกับผลที่ได้ศึกษาจากเครื่อง DSC

จึงสรุปได้ว่า แผ่นฟิล์ม r มีสมบัติทางกายภาพต่างจากแผ่นฟิล์ม n เล็กน้อย โดยแผ่นฟิล์ม n ในแนวขนานเครื่องและในแนวตั้งฉากเครื่อง มีสภาพยืดหยุ่นมากกว่า มีค่ามอดุลัสสูงกว่าและมีความเครียดน้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากแผ่นฟิล์ม r มีสารอื่นเจือปนเข้าไป ทำให้สมบัติยืดหยุ่นของแผ่นฟิล์มเปลี่ยนไป

อย่างไรก็ตาม แผ่นฟิล์ม r มีสมบัติทางความร้อนและทางกายภาพต่างจากแผ่นฟิล์ม n ไม่มากนัก และจากการศึกษาสมบัติทางกลของแผ่นฟิล์มพลาสติกรีไซเคิล (สุปรียา และรันบีร, 2539) พบว่าแผ่นฟิล์มพลาสติกรีไซเคิลมีสมบัติทางกลใกล้เคียงกับแผ่นฟิล์มพลาสติกที่ผลิตจากเม็ดพลาสติกโดยตรง ดังนั้นจึงสมควรนำแผ่นฟิล์ม r มาใช้งานแทนแผ่นฟิล์ม n เช่น ใช้ทำถุงขยะ เพื่อเป็นการประหยัดทรัพยากรธรรมชาติ และเพื่อลดปริมาณขยะที่มีขนาดเพิ่มขึ้นทุกปี

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

สุปรียา ตรีวิจิตรเกษม และ รันบีร ซิงห์. 2539. สมบัติทางกลของแผ่นฟิล์มพลาสติกรีไซเคิล. ว. เกษตรศาสตร์ (วิทย.) 30 : 98 - 103.

Bair, H. E. 1994. Glass Transition Measurements by DSC. ASTM STP 1249, pp.50-74. In R. J. Seyler, ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia.

McCrum, N.G., C. P. Buckley, and C. B. Bucknall. 1990. Principles of Polymer Engineering. Oxford Univ. Press. New York. 391 p.

McNaughton, J. L. and C. T. Mortimer. 1975.

Differential Scanning Calorimetry. IRS ; Physical Chemistry Series 2, Volume 10. Butterworths, London.

Wunderlich, B. 1990. Thermal Analysis. Academic Press, inc., San Diego, 450 p.

วันรับเรื่อง : 10 มี.ค. 41
วันรับตีพิมพ์ : 15 ม.ค. 42