บทที่ 3

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

การวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์เริ่มต้นและพอลิเมอร์เบลนด์ในอัตราส่วนต่างๆ แสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

3.1. ผลการวิเคราะห์หาโครงสร้างและองค์ประกอบของพอลิเมอร์เริ่มต้นด้วยเทคนิคโปรตอนเอ็นเอ็มอาร์สเปกโทรสโกปี (^{1}H-NMR)

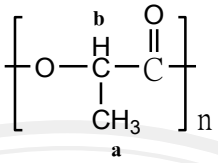
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบของพอลิเมอร์เริ่มต้นแต่ละชนิดด้วยเทคนิค ^{1}H-NMR สำหรับสเปกตรัมของ PLA มีลักษณะและตำแหน่งของพีคที่ระบุ ดังรูป 3.1 และตารางที่ 3.3 ซึ่งพบพีค 2 ตำแหน่ง คือค่าเคมิคอลชิฟท์ 1.57 ppm (พีค a) เป็นพีคของเมทิลโปรตอน (CH_3-$\dot{C}$-) และค่า เคมิคอลชิฟท์ 5.18 ppm (พีค b) เป็นพีคของเมไทน์โปรตอน (-$\dot{C}$-***H***) ซึ่งเมื่อพิจารณาอัตราส่วนของพื้นที่ใต้พีคของพีคทั้งสอง ซึ่งเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับจำนวนโปรตอนเป็น 3 : 1 ซึ่งตรงกับจำนวนโปรตอนของเมทิลโปรตอน (3H) และเมไทน์โปรตอน (1H) ในหน่วยซ้ำของ PLA ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าพอลิเมอร์มีโครงสร้างเป็น PLA จริง โดยไม่พบตำแหน่งพีคของสารอื่นเจือปน

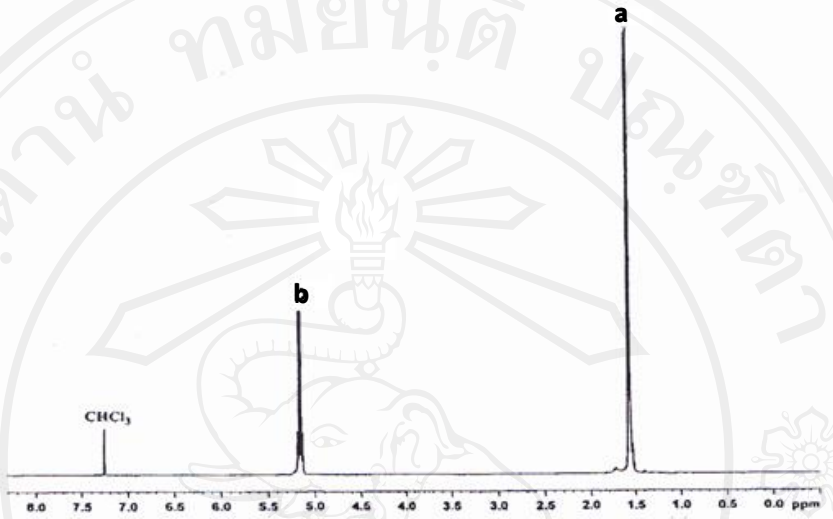
ตาราง 3.1 ตำแหน่งสัญญาณ ^{1}H-NMR สเปกตรัมของ PLA

สัญลักษณ์โปรตอน	ค่าเคมิคอลชิฟท์*, δ (ppm)
a	1.57
b	5.18

* วัดจากกึ่งกลางของพีค

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved





รูป 3.1 ^{1}H-NMR สเปกตรัมขอ PLA

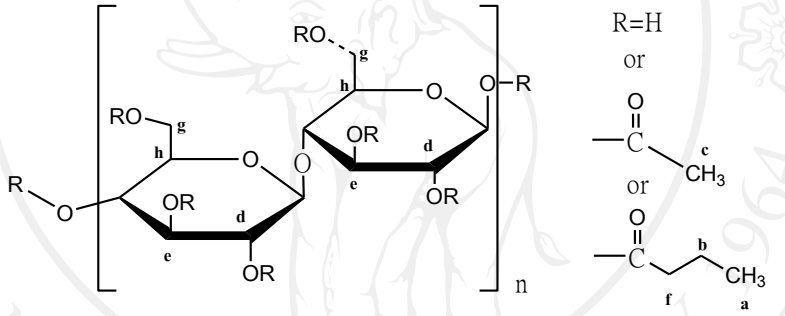
สำหรับผลการวิเคราะห์ ^{1}H-NMR สเปกตรัมของ CAB สามารถระบุตำแหน่งของพีคดังรูป 3.2 และตาราง 3.4 เนื่องจาก CAB มีโครงสร้างที่ซับซ้อน โดยมีหมู่อะซิเตท (CH_3-$\overset{O}{\overset{\|}{C}}$-)และหมู่บิวทิเรท ($CH_3$-$CH_2$-$CH_2$-$\overset{O}{\overset{\|}{C}}$-) สร้างพันธะเอสเทอร์กับหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสเป็นไปอย่างสุ่ม ดังนั้นสามารถระบุตำแหน่งของพีคได้อย่างคร่าวๆ คือ ที่ค่าเคมิคอลชิฟท์ที่ 0.90 ppm (พีค a) เป็นพีคของเมทิลโปรตอนของหมู่บิวทิเรต ($C\boldsymbol{H}_3$-CH_2-CH_2-$\overset{O}{\overset{\|}{C}}$-) ค่าเคมิคอลชิฟท์ที่ 1.54 ppm (พีค b) เป็นพีคของเบต้า-เมทิลีนโปรตอน (β -CH_2) ของหมู่บิวทิเรท (CH_3-$C\boldsymbol{H}_2$-CH_2-$\overset{O}{\overset{\|}{C}}$-) ค่าเคมิคอลชิฟท์ 2.11 ถึง 2.33 ppm (พีค f) เป็นพีคของ แอลฟา-เมทิลีนโปรตอน (α -CH_2) ของหมู่บิวทิเรท (CH_3-CH_2-$C\boldsymbol{H}_2$-$\overset{O}{\overset{\|}{C}}$-) ค่าเคมิคอลชิฟท์ 1.66-1.67 ppm (พีค c) เป็นพีคของเมทิลโปรตอนในหมู่อะซิติล ($C\boldsymbol{H}_3$-$\overset{O}{\overset{\|}{C}}$-) ค่าเคมิคอลชิฟท์ 3.33-3.51 ppm (พีค g) เป็นพีคของเมทิลีนโปรตอนของโครงสร้างเซลลูโลสที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 (C_6) และค่า เคมิคอลชิฟท์ 3.63 – 5.07 ppm (พีค h) และ 1.90 ppm (พีค d+e) เป็นพีคของเมไทน์โปรตอน(-$\overset{|}{C}$-$\boldsymbol{H}$) ของโครงสร้างเซลลูโลสตำแหน่งคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 และ 5 ($C_{1,5}$) และ ตำแหน่งคาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ถึง 4 ($C_{2\text{-}4}$) ตามลำดับ

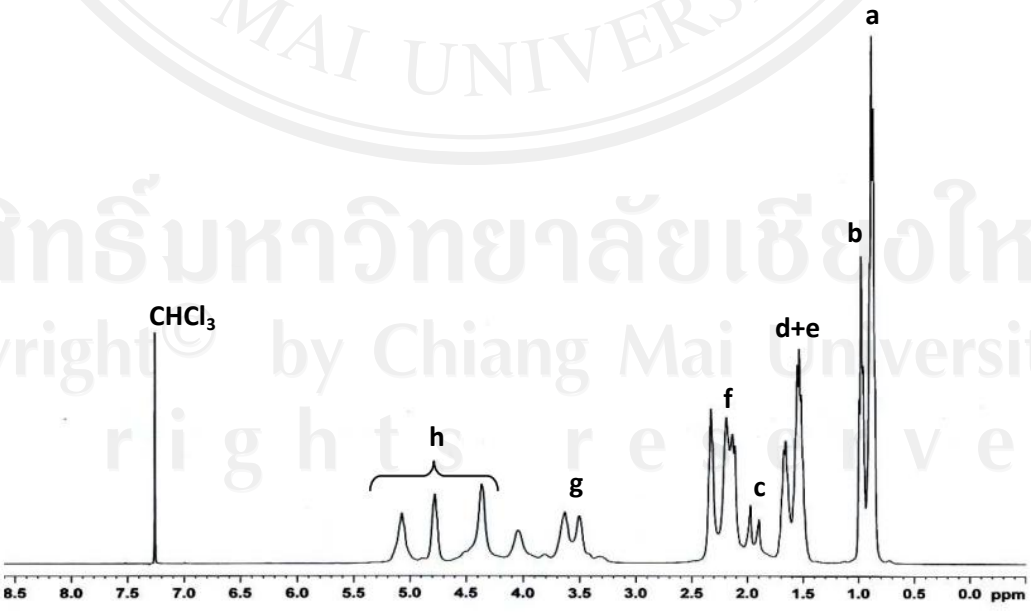
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 3.2 ตำแหน่งสัญญาณ ^{1}H-NMR สเปกตรัมของ CAB

สัญลักษณ์โปรตอน	ค่าเคมิคอลชิฟท์*, δ (ppm)
a	0.90
b	1.54
c	1.90
d+e	1.66-1.67
f	2.11-2.33
g	3.33-3.51
h	3.63-5.07

* วัดจากกึ่งกลางของพีค





รูป 3.2 ^{1}H-NMR สเปกตรัมของ CAB

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

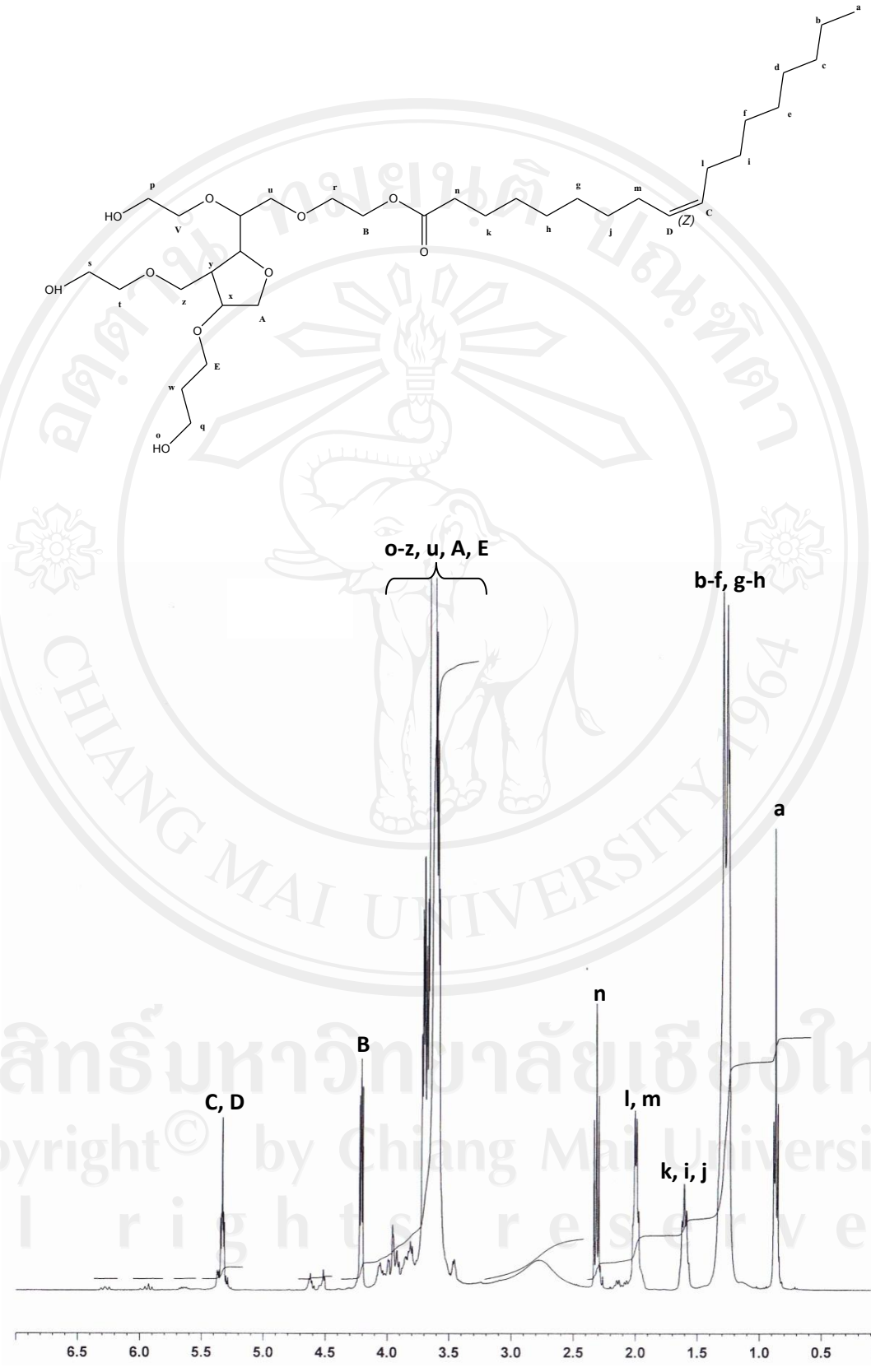
เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของ T80 สามารถระบุตำแหน่งของพีคดังรูป 3.3 และตาราง 3.5 จากโครงสร้างของ T80 จะเห็นว่าเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนและใหญ่ สามารถระบุพีคหลักอย่างคร่าวๆ ได้ดังนี้คือ ค่าเคมิคอลชิฟท์ที่ 0.86 (พีค a) เป็นพีคของเมทิลโปรตอน (CH_3-C-) ค่าเคมิคอลชิฟท์ที่ 1.23-1.28 (พีค b-f, g-h) เป็นพีคที่มีการซ้อนทับของพีคของเมทิลีนโปรตอน (CH_2) ค่าเคมิคอลชิฟท์ที่ 1.42-1.55 (พีค k, i, j) เป็นพีคที่มีการซ้อนทับของพีคของเมทิลีนโปรตอน (CH_2) ที่อยู่ตำแหน่งเบต้า (β) ของพันธะคู่และหมู่คาร์บอนิล (-C(=O)-) ค่าเคมิคอลชิฟท์ที่ 1.95-1.97 (พีค l, m) เป็นพีคของเมทิลีนโปรตอน (CH_2) ที่อยู่ตำแหน่งแอลฟา (α) ของพันธะคู่ ค่าเคมิคอลชิฟท์ที่ 2.26 (พีค n) เป็นพีคของเมทิลีนโปรตอน (CH_2) ที่อยู่ตำแหน่งแอลฟา (α) ของหมู่คาร์บอนิล (-C(=O)-) ค่าเคมิคอลชิฟท์ที่ 3.55-3.96 (พีค o-z, A, E) เป็นพีคที่มีการซ้อนทับของพีคของเมทิลีนโปรตอน (CH_2) ที่มีตำแหน่งอยู่ใกล้เคียงกับออกซิเจนอะตอมหรือหมู่ไฮดรอกซิล (O หรือ -OH) ค่าเคมิคอลชิฟท์ที่ 4.49 (พีค B) เป็นพีคของเมทิลีนโปรตอน (CH_2) ที่มีตำแหน่งอยู่ใกล้เคียงกับออกซิเจนอะตอม (O) และหมู่คาร์บอนิล (-C(=O)-) ค่าเคมิคอลชิฟท์ที่ 5.37 (พีค C, D) พีคของเมไทน์โปรตอน (-C-H) ของพันธะคู่

ตาราง 3.3 ตำแหน่งสัญญาณ ^{1}H-NMR สเปกตรัมของ T80

สัญลักษณ์โปรตอน	ค่าเคมิคอลชิฟท์*, δ (ppm)
a	0.86
b-f, g-h	1.23-1.28
k, i, j	1.42-1.55
l, m	1.95-1.97
n	2.26
o-z, A, E	3.55-3.96
B	4.49
C, D	5.37

* วัดจากกึ่งกลางของพีค

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 3.3 ^{1}H-NMR สเปกตรัมของ T80

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

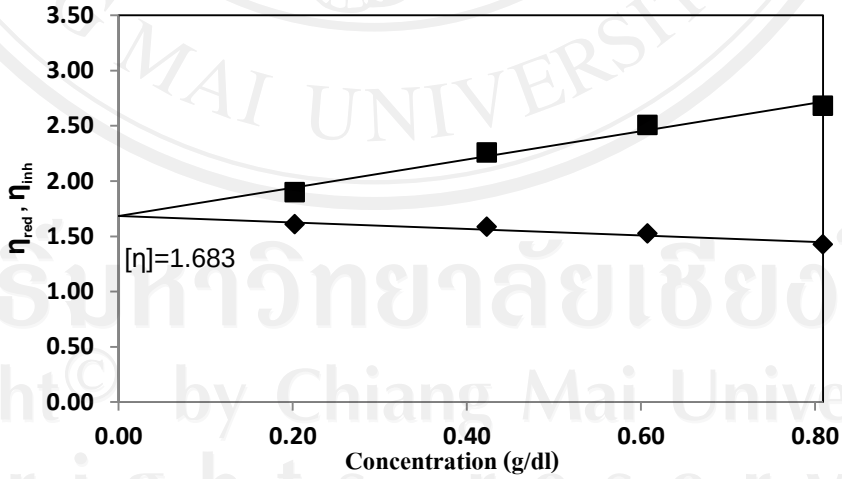
จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบของพอลิเมอร์เริ่มต้นด้วยเทคนิคโปรตอนเอ็นเอ็มอาร์สเปกโทรสโกปี ยืนยันได้ว่า พอลิเมอร์เริ่มต้น PLA, CAB และ T80 เป็นสารบริสุทธิ์และไม่มีสารอื่นเจือปน

3.2. น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยความหนืด

จากผลของค่าเวลาการไหล (flow-time, t) ของสารละลายพอลิเมอร์ที่ความเข้มข้นต่างๆ และตัวทำละลายบริสุทธิ์ นำมาคำนวณเป็นค่าความหนืดลดทอน (Reduced viscosity, η_{red}) และ ค่าความหนืดภายใน (Inherent viscosity, η_{inh}) ซึ่งแสดงวิธีการคำนวณใน ภาคผนวก ก และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดลดทอนและค่าความหนืดภายในกับค่าความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์จะได้กราฟคู่ (Double extrapolation) และลากเส้นแนวโน้มของกราฟทั้งสองเส้นไปที่ความเข้มข้นของสารละลายเท่ากับศูนย์ จะพบจุดตัดของกราฟเป็นจุดเดียว คือ **ค่าความหนืดแท้จริง (Intrinsic viscosity,** $[\eta]$) ดังแสดงในรูป 3.4 และ 3.5 ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดแท้จริง, $[\eta]$ กับน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยความหนืด (Viscosity-average molecular weight, $\overline{M}_v$) ตามสมการของ Mark-Houwink-Sakurada (สมการ 3.1)

$$[\eta] = K\overline{M}_v^{a} \qquad (3.1)$$

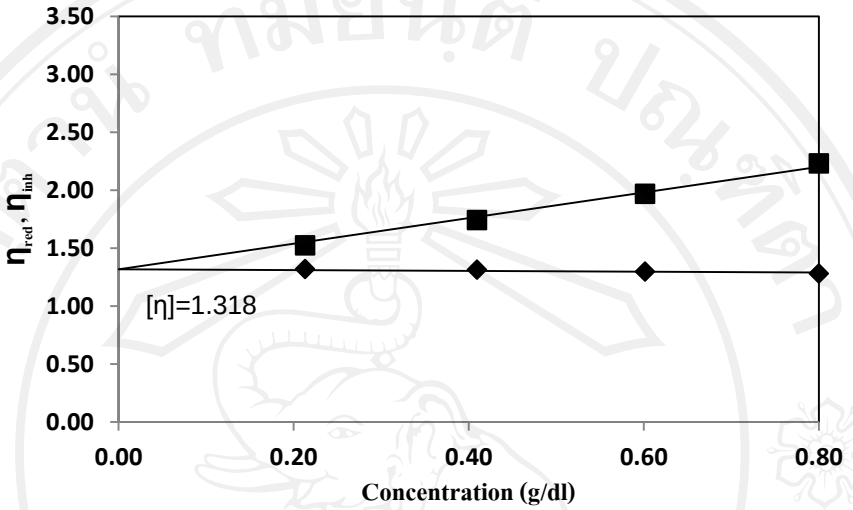
โดยที่ค่า K และ a คือ ค่าคงที่



รูป 3.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง η_{red} (■) และ η_{inh} (◆) กับความเข้มข้นของ PLA ในตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม ที่อุณหภูมิ 25.0 ± 0.1 องศาเซลเซียส

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

จากรูป 3.4 พบว่าค่าความหนืดแท้จริงของ PLA มีค่าเท่ากับ 1.683 dl g^{-1} โดยมีค่าคงที่ K กับ a ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เท่ากับ $5.45x10^{-4}$ dl g^{-1} และ 0.73 ตามลำดับ [71] ซึ่งสามารถคำนวณค่า $\overline{M}_v$ จากสมการ 3.1 ได้เท่ากับ $6.03x10^4$ g/mol



รูป 3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง η_{red} (■) และ η_{inh} (◆) กับความเข้มข้นของ CAB ในตัวทำละลายเอทิลอะซิเตท ที่อุณหภูมิ 30 ± 0.1 องศาเซลเซียส

จากรูป 3.5 ค่าความหนืดแท้จริงของ CAB มีค่าเท่ากับ 1.318 dl g^{-1} โดยมีค่าคงที่ K กับ a ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เท่ากับ 1.13×10^{-4} dl g^{-1} และ 0.83 ตามลำดับ [71] ซึ่งสามารถคำนวณค่า $\overline{M}_v$ จากสมการ 3.1 ได้เท่ากับ $7.94x10^4$ g mol^{-1}

จากผลการหาค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของพอลิเมอร์เริ่มต้นสามารถสรุปค่าความหนืดแท้จริงและค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยความหนืด ดังตาราง 3.4

ตาราง 3.4 ค่าความหนืดแท้จริงและค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยความหนืดของพอลิเมอร์เริ่มต้น

พอลิเมอร์	**ค่าความหนืดแท้จริง, [η] (dl g^{-1})**	**น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยความหนืด, $\overline{M}_v$ (g mol^{-1})**
PLA	1.683	$6.03x10^4$
CAB	1.318	$7.94x10^4$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.3. ความเป็นไปได้ของอัตราส่วนพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB/T80

เมื่อเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ตามสัดส่วนโดยน้ำหนักของ PLA, CAB และ 80 ในตาราง 2.3 พบว่า ฟิล์มพอลิเมอร์ในอัตราส่วนต่างๆ สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ ยกเว้นในกรณีที่ใช้สัดส่วนโดยน้ำหนักของ T80 มากกว่า 0.167 จะมีการแยกเฟสที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า ดังแสดงผลในตาราง 3.5

ตาราง 3.5 ความเป็นไปได้ของอัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ PLA, CAB และ T80

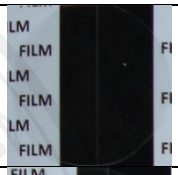
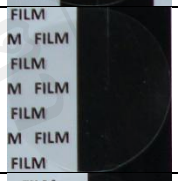
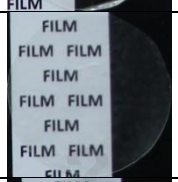
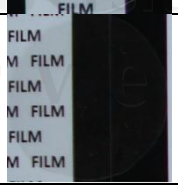
สูตร	สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์เบลนด์			ขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้	หมายเหตุ
	PLA	CAB	T80		
1	-	1.000	-	✔	-
2	1.000	-	-	✔	-
3	0.500	0.500	-	✔	
4	0.667	0.167	0.167	✔	-
5	0.167	0.667	0.167	✔	-
6	0.333	0.333	0.333	✔	มีการแยกเฟสที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า
7	0.500	-	0.500	✘	มีการแยกเฟสที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า
8	-	0.500	0.500	✔	-
9	0.167	0.167	0.667	✔	มีการแยกเฟสที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า
10	-	-	1.000	✘	-

3.4. ลักษณะความใสของฟิล์ม

จากการศึกษาสมบัติการส่องผ่านแสงของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ได้ค่าความใส (Transparency)และความขุ่น (Opacity) ตามตารางที่ 3.6 โดยค่าที่ใช้คำนวณจากค่าการดูดกลืนแสงแสดงในภาคผนวก ข และนำค่าความใสไปพล๊อตกราฟดังแสดงในรูป 3.6

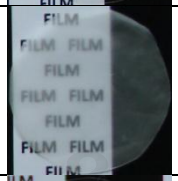
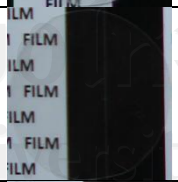
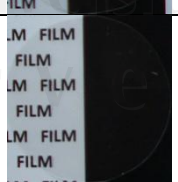
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 3.6 ความใสของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่อัตราส่วนต่างๆ

สูตร	สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์เบลนด์			ความใส (Tranperency)	ความขุ่น (Opacity)	ลักษณะทางกายภาพ
	PLA	CAB	T80			
1	1.000	-	-	91.43 ± 1.18	0.74 ±0.12	
2	0.500	0.500	-	45.03 ± 5.62	3.45 ± 0.44	
3	-	1.000	-	89.53 ± 1.32	0.90 ± 0.10	
4	0.950	-	0.050	73.78 ± 6.86	2.63 ± 0.86	
5	0.725	0.225	0.050	49.30 ± 4.64	4.62 ± 1.07	
6	0.475	0.475	0.050	49.11 ± 11.10	4.65 ± 0.86	
7	0.225	0.725	0.050	54.68 ± 8.71	3.69 ± 1.46	
8	-	0.950	0.050	90.48 ± 3.72	1.65 ± 0.71	

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

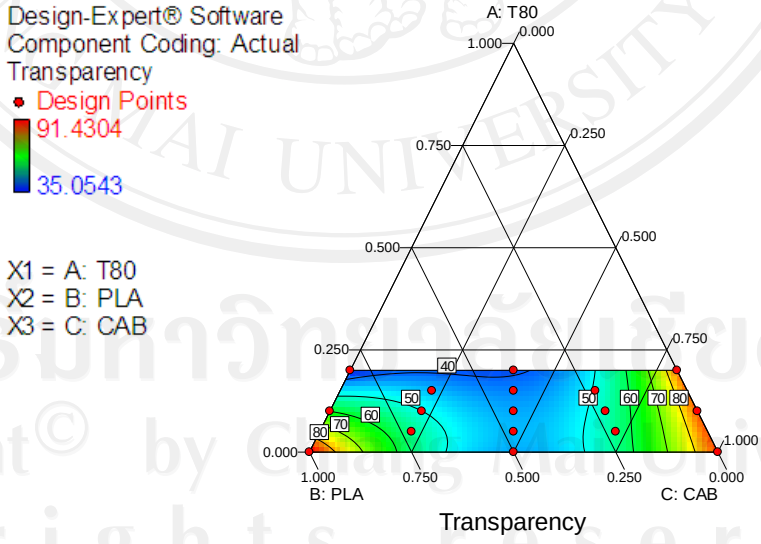
ตาราง 3.6 ความใสของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่อัตราส่วนต่างๆ (ต่อ)

สูตร	สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์เบลนด์			ความใส (Tranperency)	ความขุ่น (Opacity)	ลักษณะทางกายภาพ
	PLA	CAB	T80			
9	0.900	-	0.100	60.34 ± 11.47	3.21 ± 1.19	
10	0.675	0.225	0.100	55.29 ± 2.42	3.61 ± 2.34	
11	0.450	0.450	0.100	44.24 ± 2.11	5.75 ± 0.36	
12	0.225	0.675	0.100	51.27 ± 1.49	3.99 ± 1.05	
13	-	0.900	0.100	89.22 ± 4.18	0.54 ± 0.12	
14	0.850	-	0.150	42.12 ± 1.29	7.83 ± 0.26	
15	0.625	0.225	0.150	41.59 ± 2.93	4.90 ± 1.07	
16	0.425	0.425	0.150	42.34 ± 7.02	4.58 ± 2.19	
17	0.225	0.625	0.150	51.55 ± 9.68	4.91 ± 0.81	

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 3.6 ความใสของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่อัตราส่วนต่างๆ (ต่อ)

สูตร	สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์เบลนด์			ความใส (Tranperency)	ความขุ่น (Opacity)	ลักษณะทางกายภาพ
	PLA	CAB	T80			
18	-	0.850	0.150	89.59 ± 6.30	0.86 ± 0.54	
19	0.800	-	0.200	35.05 ± 6.57	6.42 ± 2.82	
20	0.400	0.400	0.200	39.66 ± 5.97	6.20± 1.02	
21	-	0.800	0.200	86.83 ± 2.72	1.65 ± 0.56	



Multiple regression results :

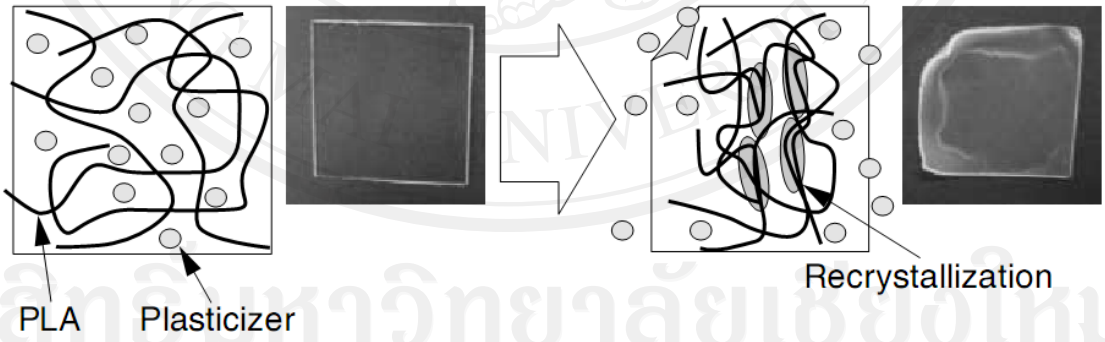
Transparency = +51.28 *A+90.88 *B+89.43 *C-181.63*B*C+1245.35 * A * B^2 * C

โดยที่ A = T80 B = PLA และ C = CAB (R^2 = 0.9845, p < 0.0001)

รูป 3.6 Contour plot ค่าความใสของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB/T80 ที่อัตราส่วนต่างๆ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

จากรูป 3.6 จะพบว่า ฟิล์ม PLA และ CAB บริสุทธ์จะมีความใสมากที่สุด แต่เมื่อเติม T80 ลงไปจะมีอิทธิพลทำให้ฟิล์ม PLA มีความใสลดลงตามปริมาณ T80 ที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเติม T80 ลงใน PLA ทำให้ในโครงสร้างของ PLA เกิดปริมาตรอิสระมากขึ้น ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ของ PLA เกิดการเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น จึงเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดการจัดเรียงตัวของผลึกเพิ่มขึ้น ฟิล์มจึงขุ่นมากขึ้น นอกจากนี้สามารถเกิดการหลุดออก (Bleeding-out) ของสารเพิ่มความยืดหยุ่น แล้วเกิดการตกผลึกใหม่ของ PLA ดังรูป 3.7 ซึ่งการหลุดออกนี้จะเกิดขึ้นเมื่อทิ้งไว้ให้แห้งจึงทำให้ฟิล์ม PLA มีลักษณะแข็งและมีสีขาว (ความใสลดลง) ดังงานวิจัยของ Shinichi KANAZAWA[72] และอีกสาเหตุหนึ่งเป็นผลของการกระเจิงของแสง (Light scattering effect) เนื่องจาก T80 เป็นตัวก่ออิมัลชัน (Emulsifier) และเป็นตัวช่วยในการแพร่กระจาย (Dispersing agent) จึงทำให้พอลิเมอร์เบลนด์มีลักษณะเป็นฟิล์มอิมัลซิไฟด์ (Emulsified films) มีลักษณะเป็นอนุภาคแขวนลอยอยู่ในฟิล์ม ทำให้ฟิล์มมีความขุ่นเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Younes Zahedi[73] ในขณะที่ CAB เป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำกันที่มีขนาดใหญ่และมีหมู่แขนงขนาดใหญ่จึงทำให้สายโซ่ CAB เกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ยากทำให้โครงสร้างเป็นอสัณฐาน ดังนั้นการเติม T80 ลงไปจึงไม่ได้มีอิทธิพลให้สายโซ่ CAB เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดผลึกขึ้นในโครงสร้าง ส่งผลให้ฟิล์ม CAB ที่เติมและไม่เติม T80 มีความใสใกล้เคียงกันและฟิล์ม CAB มีความขุ่นน้อยกว่าฟิล์ม PLA



รูป 3.7 การเกิดการตกผลึกใหม่เนื่องจากการหลุดออกของพลาสติไซเซอร์[2]

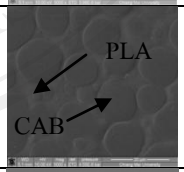
สำหรับฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB ทุกอัตราส่วนมีความใสลดลงอย่างชัดเจนและเมื่อเติม T80 ลงในพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB ในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้ฟิล์มมีความใสลดลงอย่างชัดเจนด้วยเช่นกัน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.5. ลักษณะพื้นผิวและความเข้ากันได้ของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์

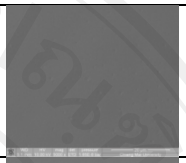
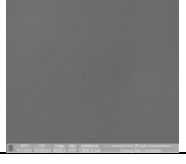
การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและความเข้ากันได้ของฟิล์ม ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงภาพถ่ายโดยใช้กำลังขยาย 5000 เท่า ดังตาราง 3.7 เมื่อพิจารณาผลภาพถ่าย ไม่พบเห็นการแยกเฟสของ PLA และฟิล์ม CAB แต่พบการแยกเฟสของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของ PLA/CAB เท่ากับ 0.5/0.5 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่ามีการแยกเฟสระหว่าง PLA และ CAB โดยพบเฟส CAB กระจายตัวเป็นเฟสขนาดใหญ่เล็กบนเฟสของ PLA อาจเนื่องมาจากความแตกต่างกันในระดับโมเลกุล (Molecular level) แต่เมื่อเติม T80 ลงไปพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB ไม่ปรากฏการแยกเฟส ซึ่ง T80 ทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม (Compatibilizer) ซึ่งทำหน้าที่คล้ายสะพานเชื่อมและยึดเกาะระหว่างวัฏภาค (Interface interaction)[74] ของ PLA และ CAB โดยจะเห็นว่าฟิล์มมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous phase)

ตาราง 3.7 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยกำลังขยาย 5000 เท่า

สูตร	สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์เบลนด์			SEM
	PLA	CAB	T80	
1	1.000	-	-	
2	0.500	0.500	-	
3	-	1.000	-	
4	0.950	-	0.050	
5	0.725	0.225	0.050	

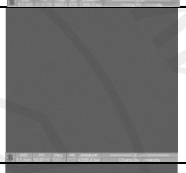
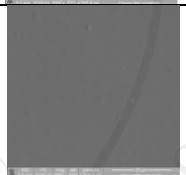
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 3.7 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยกำลังขยาย 5000 เท่า (ต่อ)

สูตร	สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์เบลนด์			SEM
	PLA	CAB	T80	
6	0.475	0.475	0.050	
7	0.225	0.725	0.050	
8	-	0.950	0.050	
9	0.900	-	0.100	
10	0.675	0.225	0.100	
11	0.450	0.450	0.100	
12	0.225	0.675	0.100	
13	-	0.900	0.100	
14	0.850	-	0.150	
15	0.625	0.225	0.150	

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 3.7 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยกำลังขยาย 5000 เท่า (ต่อ)

สูตร	สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์เบลนด์			SEM
	PLA	CAB	T80	
16	0.425	0.425	0.150	
17	0.225	0.625	0.150	
18	-	0.850	0.150	
19	0.800	-	0.200	
20	0.400	0.400	0.200	
21	-	0.800	0.200	

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.6 สมบัติเชิงกล

การวัดสมบัติเชิงกลโดยการทดสอบแรงดึงจะใช้ตัวอย่างฟิล์มชนิดละ 5 ตัวอย่าง ข้อมูลค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาด ร้อยละการยืด ณ จุดขาด และค่ายังมอดูลัสของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ได้แสดงผลในตาราง 3.8 และรูป 3.8 โดยกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curve) แสดงในภาคผนวก ค เมื่อพิจารณาค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาดของฟิล์ม CAB และ PLA มีค่าเท่ากับ 67.17±2.20 MPa และ36.38±8.25 MPa ตามลำดับ แสดงว่าฟิล์ม CAB มีความแข็งแรงกว่าฟิล์ม PLA ทั้งนี้เนื่องจากในโครงสร้างของพอลิเมอร์ CAB มีแรงกระทำของพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเป็นแรง

กระทำที่เกิดขึ้นระหว่างสายโซ่ (Intermolecular forces) และแรงกระทำภายในสายโซ่เดียวกัน (Intramolecular forces) (รูป 3.10) ทำให้สายโซ่ยึดกันอย่างแข็งแรงมากในพอลิเมอร์ CAB ในขณะที่พอลิเมอร์ PLA มีเพียงพันธะไฮโดรเจนที่เป็นแรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างสายโซ่เท่านั้น (รูป 3.9) และเมื่อเติม T80 ปริมาณ 10%wt. ในฟิล์ม PLA และฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB จะให้ค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาดสูงสุด โดยที่ค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างเห็นได้ชัดในกรณีที่มี PLA เป็นส่วนประกอบ ซึ่งเมื่อพิจารณาหน่วยซ้ำของ PLA และ CAB ดังรูป 3.11 จะพบว่า CAB มีโครงสร้างในสายโซ่หลักเป็นหมู่ที่มีขนาดใหญ่ และมีหมู่แทนที่ขนาดใหญ่แยกแขนงออกจากสายโซ่หลัก ส่งผลให้ปริมาตรอิสระ (Free volume) ลดลงเนื่องจากความเกะกะของหมู่แขนงขนาดใหญ่ ทำให้โอกาสในการเข้าแทรกระหว่างสายโซ่ CAB ของ T80 ที่มีขนาดใหญ่จึงมีน้อยกว่าเมื่อเทียบกับสายโซ่ของ PLA ดังแสดงในรูป 3.12 ซึ่งเมื่อเติม T80 ลงไปทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ของ PLA ในพอลิเมอร์เบลนด์ที่อยู่ในส่วนของ อสัณฐาน (Amorphous region) เกิดการเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น จึงทำให้โมเลกุลของ PLA ที่มีขนาดเล็กสามารถจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ง่ายขึ้น และเกิดผลึกใหม่เนื่องจากการหลุดออกของ T80 จากสายโซ่ PLA[72] ด้วย ส่งผลให้ฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่มี PLA เป็นองค์ประกอบหลักมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นกว่าฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่มี CAB เป็นองค์ประกอบหลัก ทำให้ทนต่อแรงดึงได้มากกว่าก่อนที่จะขาด ซึ่งชี้ให้เห็นว่า T80 มีผลต่อสมบัติเชิงกลของ PLA มากกว่า CAB

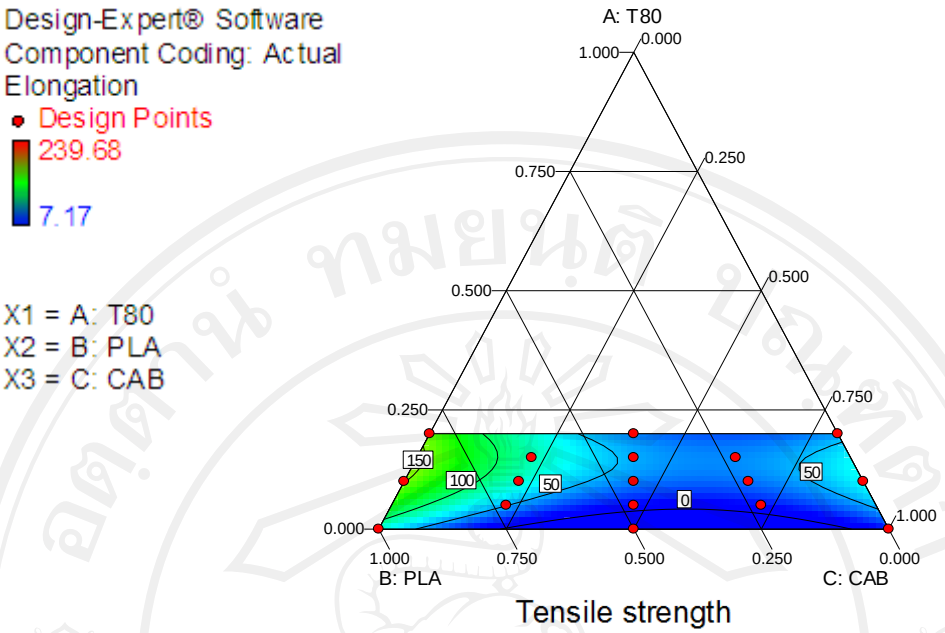
จากรูป 3.13 แสดง Contour plot ของค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์เบลนด์ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ PLA, CAB และ PLA/CAB ที่เติม T80 ส่วนใหญ่มีแนวโน้มที่จะยืดได้มากกว่าฟิล์มที่ไม่เติม T80 เนื่องจากในโครงสร้างของ T80 ประกอบด้วยส่วนที่เป็นสายโซ่ตรงของไฮโดรคาร์บอน ซึ่งสามารถเคลื่อนที่แทรกไปมาระหว่างสายโซ่ของ PLA และ CABได้ดี นอกจากนี้พบว่าฟิล์ม PLA สามารถยืดได้มากกว่าฟิล์ม CAB เนื่องจาก T80 นั้นจะแทรกตัวเข้าไปในระหว่างสายโซ่ของ PLA ได้มากกว่า CAB ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างในสายโซ่หลักของ CAB ประกอบด้วยหมู่ที่มีขนาดใหญ่ และยังมีหมู่แทนที่ขนาดใหญ่แยกแขนงออกจากสายโซ่หลักอีกด้วย ทำให้โอกาสที่ T80 ซึ่งมีโครงสร้างขนาดใหญ่แทรกตัวเข้าไปได้ยาก โดยที่ T80 จะเพิ่มปริมาตรอิสระจึงทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้มากขึ้น จึงทำให้เกิดความอ่อนนุ่มและยืดหยุ่นมากขึ้น และ ฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB/T80 ยืดได้น้อยที่สุดอาจเนื่องมาจากความไม่เข้ากันระหว่างองค์ประกอบทั้งสาม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 3.8 ค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาด ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด และค่ายังมอดูลัสของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ในแต่ละอัตราส่วน

สูตร	สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์เบลนด์			ความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาด (MPa)	ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%)	ค่ายังมอดูลัส (MPa)
	PLA	CAB	T80			
1	1.000	-	-	36.38±8.25	160.96±21.01	944.01±88.49
2	0.500	0.500	-	18.68±3.23	194.58±21.92	877.07±176.49
3	-	1.000	-	67.17±2.20	67.21±14.86	1,030.25±99.80
4	0.950	-	0.050	69.05±9.00	119.05±18.12	470.06±34.20
5	0.725	0.225	0.050	18.18±3.94	273.77±14.08	1,557.08±67.73
6	0.475	0.475	0.050	11.17±7.18	209.32±10.55	967.97±83.18
7	0.225	0.725	0.050	18.39±2.31	228.45±13.67	1,001.80±77.10
8	-	0.950	0.050	53.09±4.30	77.96±17.50	699.40±34.40
9	0.900	-	0.100	139.68±27.66	329.21±30.45	1,015.73±136.98
10	0.675	0.225	0.100	62.14±4.86	255.88±18.27	1,400.80±1,01.10
11	0.450	0.450	0.100	46.46±4.12	325.78±15.70	647.72±132.62
12	0.225	0.675	0.100	17.53±2.35	106.40±26.73	848.75±62.37
13	-	0.900	0.100	63.42±6.85	89.77±29.39	718.73±69.63
14	0.850	-	0.150	74.22±8.70	177.38±11.00	613.00±23.30
15	0.625	0.225	0.150	68.55±5.03	181.75±15.85	1,458.67±53.16
16	0.425	0.425	0.150	25.25±8.52	226.77±18.45	1,051.53±85.55
17	0.225	0.625	0.150	25.06±3.43	184.77±18.55	751.37±40.57
18	-	0.850	0.150	37.19±8.70	147.06±16.00	280.00±22.80
19	0.800	-	0.200	118.82±38.75	161.53±14.98	903.16±80.15
20	0.400	0.400	0.200	38.17±5.92	161.17±8.18	775.10±48.39
21	-	0.800	0.200	67.66±7.52	118.46±13.63	271.31±26.967

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

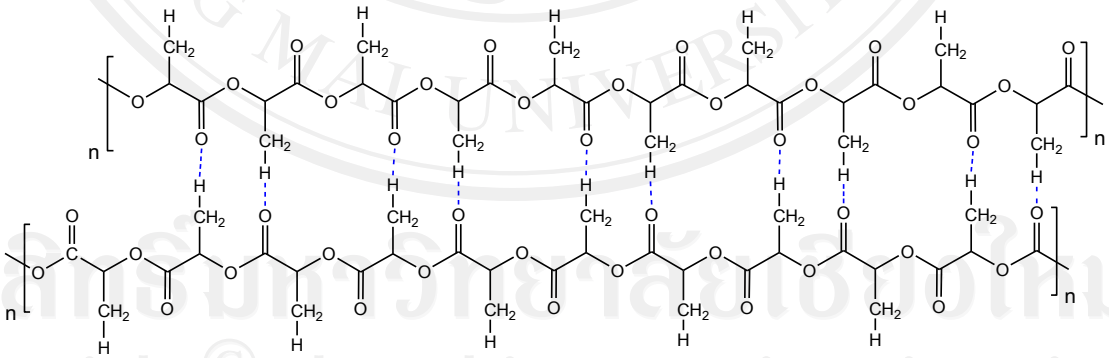


Multiple regression results :

Tensile strength = -3074.49781*A + 77.97017*B + 19.66549*C - 353.59494*B*C

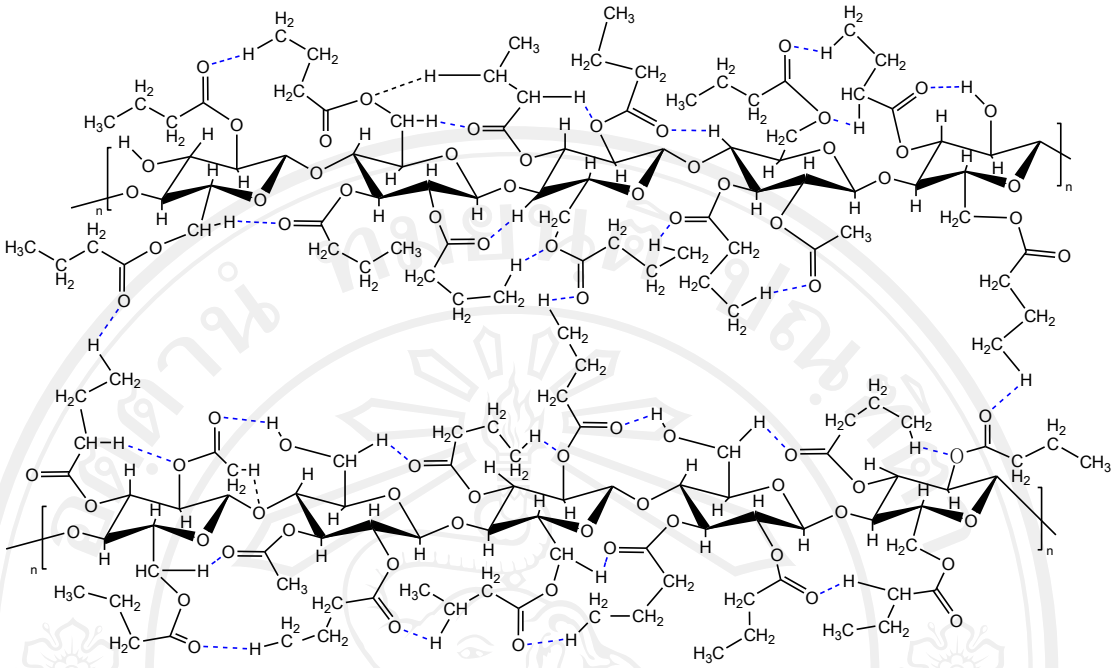
โดยที่ A = T80 B = PLA และ C = CAB (R^2 = 0.6666, p = 0.0191)

รูป 3.8 Contour plot ค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB/T80 ที่อัตราส่วนต่างๆ



รูป 3.9 โครงสร้างของพอลิเมอร์ PLA

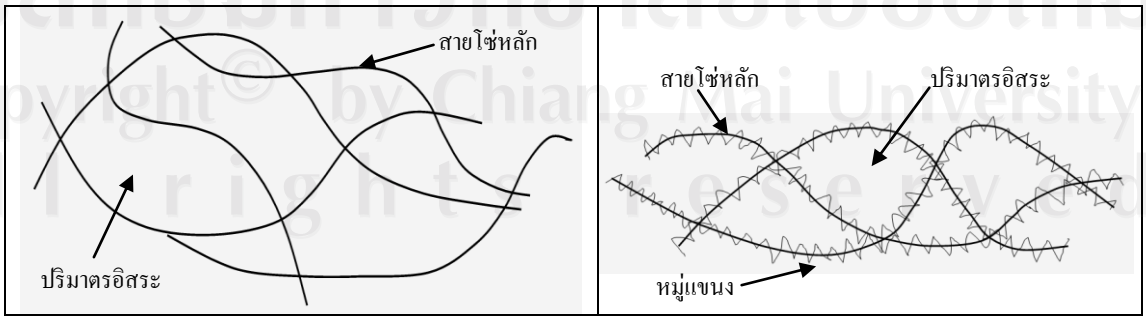
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 3.10 โครงสร้างของพอลิเมอร์ CAB

(ก) (ข)

รูป 3.11 โครงสร้างหน่วยซ้ำของ PLA (ก) และ CAB (ข)



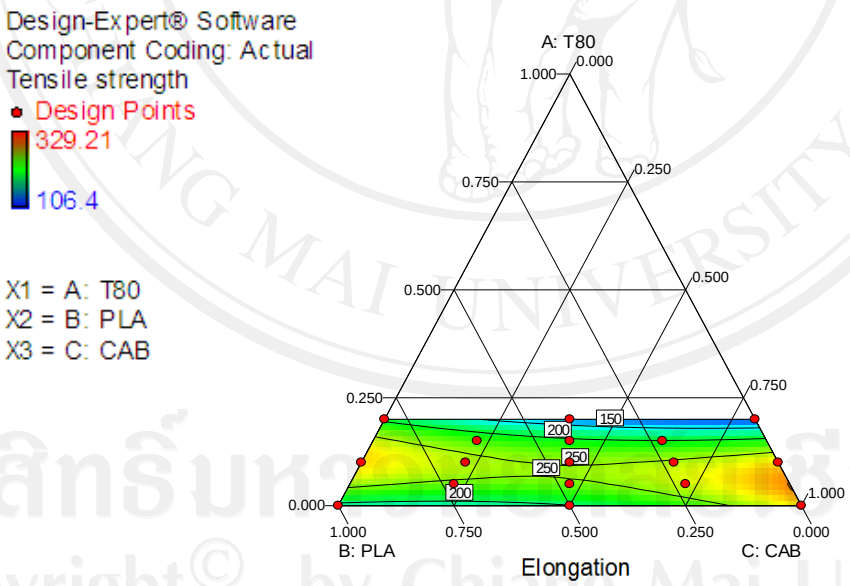
(ก) (ข)

รูป 3.12 ภาพจำลองการเข้าแทรกระหว่างสายโซ่ของ PLA (ก) และ CAB (ข)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

จากรูป 3.14 แสดงค่า Contour plot ของยังมอดูลัสของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยที่ค่ายังมอดูลัสจะบอกถึงความแข็งแรง เปราะ และความสามารถโค้งงอได้ (ยืดหยุ่น) ของฟิล์ม ซึ่งจากกราฟพบว่าฟิล์มทุกชนิดอ่อนนุ่มลงเมื่อเติม T80 ทั้งนี้เป็นผลของพลาสติไซเซอร์ (Plasticizing effect) และค่ายังมอดูลัสของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีปริมาณ CAB ประมาณ 20-30%wt. จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติม T80 มากขึ้น

เมื่อพิจารณากราฟความเค้น-ความเครียด ของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่อัตราส่วนต่างๆในรูป 3.15-3.17 พบว่าจากรูป 3.15 PLA ที่เติมและไม่เติม T80 จะปรากฏจุดคราก (Yield point) ซึ่งเป็นจุดที่พอลิเมอร์มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสัณฐานถาวร และหลังจากนั้นจะยืดออก และมีการยืดได้ไม่มากก่อนที่จะขาด ซึ่งแสดงถึงสมบัติแบบพลาสติกชนิดแข็งเกร็ง (Rigid plastic) นอกจากนี้พื้นที่ภายใต้เส้นกราฟจะบอกถึงความเหนียว (Toughness) ของฟิล์มพอลิเมอร์โดยอธิบายได้ว่าฟิล์ม PLA ที่เติม T80 จะมีความเหนียวมากกว่าฟิล์มที่ไม่มี T80 นอกจากนี้พบว่าฟิล์ม PLA ที่เติม T80 ปริมาณ 10% wt. จะมีความเหนียวมากที่สุด



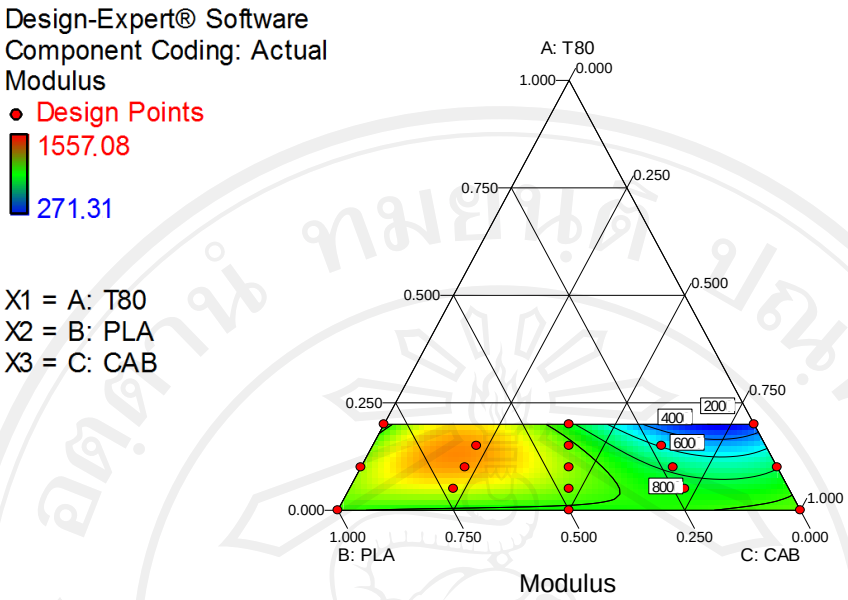
Multiple regression results :

Elongation = +9208.94225 * A * B+8178.39134 * A* C

โดยที่ A = T80 B = PLA และ C = CAB (R^2 = 0.5059, p = 0.1216)

รูป 3.13 Contour plot ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB/T80 ที่อัตราส่วนต่างๆ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

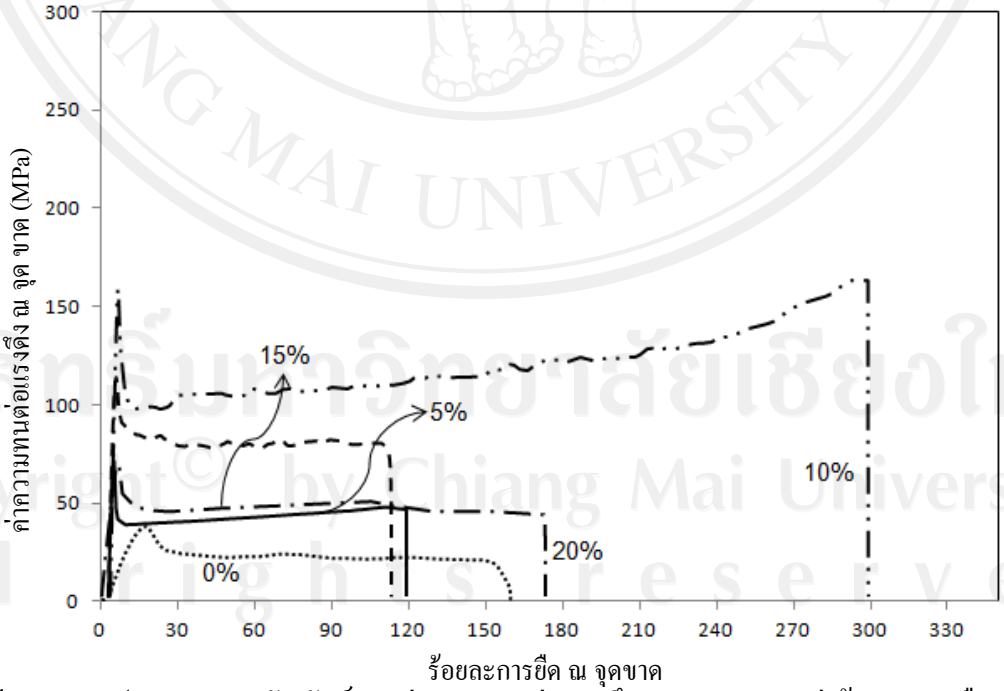


Multiple regression results :

Modulus = -1.340×10^{4}*A +9877.99* B+1025.623*C

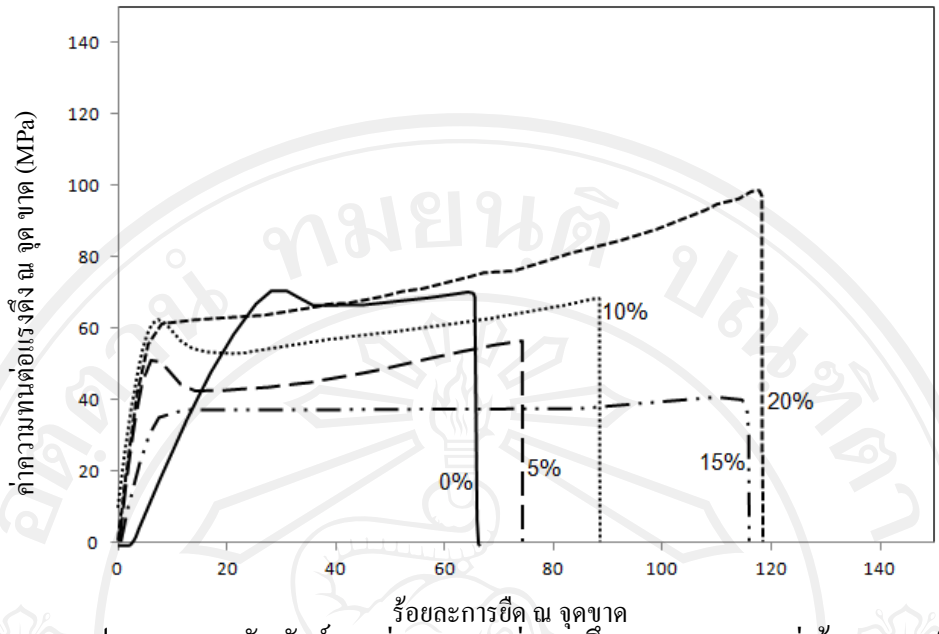
โดยที่ A = T80 B = PLA และ C = CAB ($R^2 = 0.7371$, p = 0.0830)

รูป 3.14 Contour plot ค่ายังมอดูลัสของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB/T80 ที่อัตราส่วนต่างๆ

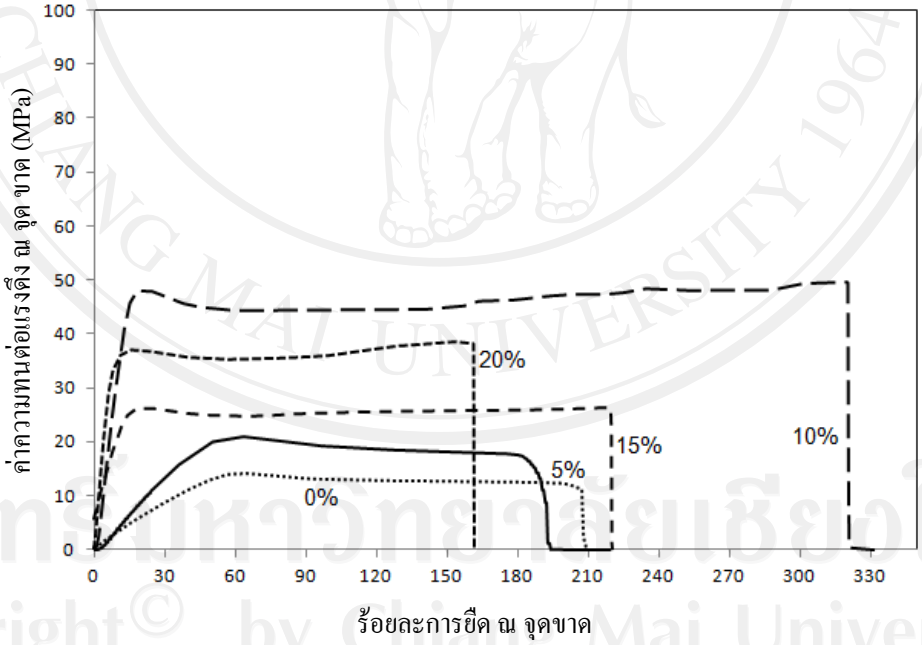


รูป 3.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาด และค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์ม PLA ที่ใช้ปริมาณ T80 ต่างๆ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 3.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาด และค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์ม CAB ที่ใช้ปริมาณ T80 ต่างๆ



รูป 3.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาด และค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของ ฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB ที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของเท่ากับ 0.500/0.500 ที่ใช้ปริมาณ T80 ต่างๆ

สำหรับรูป 3.16 และ3.17 ซึ่งเป็น กราฟความเค้น-ความเครียดของฟิล์ม CAB บริสุทธิ์และฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB ตามลำดับ พบว่าฟิล์มที่เติมและไม่เติม T80 จะไม่ปรากฏจุดคราก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ซึ่งเมื่อออกแรงดึงวัสดุไม่มีการเปลี่ยนโครงสร้างสัณฐาน มีการยืดได้มากก่อนที่จะขาด ซึ่งแสดงถึงสมบัติแบบพลาสติกชนิดยืดหยุ่น (Flexible plastic) เนื่องจากผลของสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่เติมลงไป โดยพบว่าเมื่อเติม T80 ปริมาณ 10%wt. ในฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB และเติม T80 ปริมาณ 20%wt. ในฟิล์ม CAB จะมีความเหนียวมากที่สุด

เมื่อพิจารณากราฟความเค้น-ความเครียดโดยแยกพิจารณาจากปริมาณ T80 ที่เติมลงไปดังรูป 3.18 (ก)-(จ)

จากรูป 3.18(ก) พบว่าฟิล์ม PLA กราฟมีความชันน้อยใช้แรงในการยืดน้อย เป็นสมบัติของพอลิเมอร์ที่มีลักษณะที่แข็ง (Hard) และสามารถยืดไปได้มาก แต่เมื่อดูจากปริมาณพื้นที่ใต้กราฟแล้วจะใช้พลังงานน้อยในการทำให้วัสดุนั้นขาดซึ่งเป็นสมบัติของพอลิเมอร์ที่มีความเปราะ (Brittle)

ฟิล์ม CAB กราฟมีความชันสูงใช้แรงมากแต่ยืดไปได้น้อยเป็นสมบัติของพอลิเมอร์ที่มีลักษณะที่แข็ง (Hard) และขาดที่ระยะยืดน้อยๆซึ่งเป็นสมบัติของพอลิเมอร์ที่มีความเปราะ

ฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB กราฟมีความชันมากกว่าฟิล์ม CAB เป็นสมบัติของพอลิเมอร์ที่มีลักษณะที่แข็งและแตกหักง่าย ยืดออกไปได้มาก ซึ่งเป็นสมบัติของพอลิเมอร์ที่มีความเหนียว ชี้ให้เห็นว่าเมื่อผสมพอลิเมอร์ระหว่าง CAB และ PLA พอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้จะมีลักษณะที่ผสมกันระหว่างพอลิเมอร์เริ่มต้นทั้งสองตัวคือยืดได้มากเหมือน PLA และแข็งเหมือน CAB

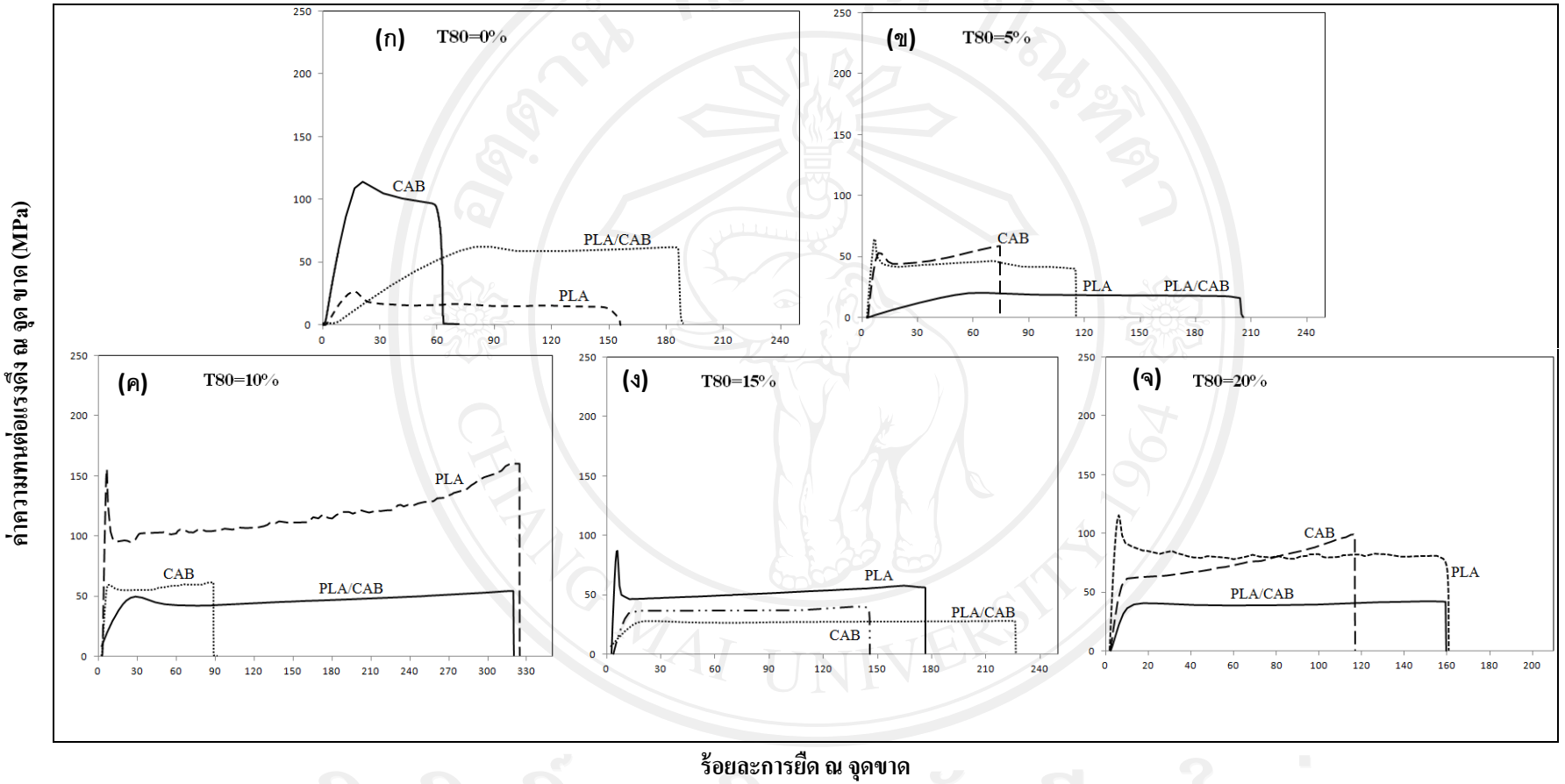
จากรูป 3.18(ข) เมื่อเติม T80 ปริมาณ 5%wt. ลง ในพอลิเมอร์เบลนด์ทั้ง 3 ชนิด พบว่าฟิล์มทั้งสามชนิดมีลักษณะอ่อนนุ่ม (Soft) เช่นเดียวกัน โดย CAB มีความเหนียวมากกว่า PLA ในขณะที่ฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB มีความอ่อนนุ่มมากที่สุดและสามารถยืดได้มากที่สุด

จากรูป 3.18(ค) เมื่อเติม T80 ปริมาณ 10%wt. ลงในฟิล์มพอลิเมอร์ทั้ง 3 ชนิด พบว่าฟิล์ม PLA มีลักษณะแข็งและเหนียวโดยมีความเหนียวมากกว่า CAB ส่วนฟิล์ม CAB และฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB มีลักษณะอ่อนนุ่มโดยฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB สามารถยืดไปได้มากกว่า CAB แต่ยืดได้น้อยกว่า PLA

จากรูป 3.18(ง) เมื่อเติมทวีน 80 ปริมาณ 15%wt. ลงในพอลิเมอร์เบลนด์ทั้ง 3 ชนิด พบว่าฟิล์ม PLA และฟิล์ม CAB มีลักษณะอ่อนนุ่ม โดยที่ฟิล์ม PLA จะมีความแข็งมากที่สุด

จากรูป 3.18(จ) เมื่อเติม T80 20%wt. ในฟิล์มพอลิเมอร์ทั้ง 3 ชนิด พบว่าฟิล์มทั้งมี 3 ชนิด มีความอ่อนนุ่มและเหนียว โดยที่ฟิล์ม PLA ความเหนียวมากที่สุด ในขณะที่ฟิล์ม CAB และฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB มีความเหนียวที่ใกล้เคียงกัน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 3.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาด และค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์ม PLA, CAB และ PLA/CAB ที่มีปริมาณ T80 ต่างกัน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.7 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนและโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา

จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยแสดงข้อมูลค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) อุณหภูมิหลอมผลึก (Crystalline melting temperature, T_m) อุณหภูมิเกิดผลึก (Crystallization temperature, T_c) พลังงานที่ใช้ในการเกิดผลึก (Heat of Crystallization, ΔH_c) และพลังงานที่ใช้ในการเกิดสลายผลึก (Heat of melting, ΔH_m) ในตาราง 3.10

ตาราง 3.9 ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และอุณหภูมิหลอมผลึกของพอลิเมอร์เริ่มต้นชนิดต่างๆเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง

พอลิเมอร์	สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์			
	T_g (°C)	T_g อ้างอิง (°C)	T_m (°C)	T_m อ้างอิง (°C)
PLA	58.5	50.0 -58.0 [75-76]	-	120-170 [75-76]
CAB	108.5	98.0-110.0 [71]	-	165 [71]

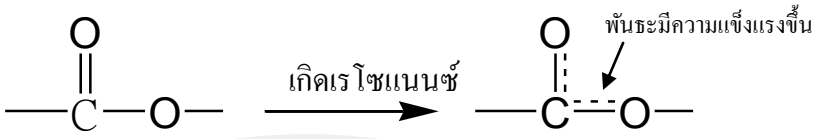
จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของ PLA ปรากฏพีค T_g ที่ 58.5 องศาเซลเซียสซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลอ้างอิงของ Martin and L.Averousc และ Vernica Carneiro [75-76]ซึ่งมีค่า T_g ในช่วง 50.0 -58.0 องศาเซลเซียส แต่ไม่ปรากฏ T_m และ CAB ปรากฏพีค T_g ที่ 108.5 องศาเซลเซียสซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลอ้างอิงของ EASTMAN CHEMICAL COMPANY [71] ซึ่งมีค่า T_g ในช่วง 98.0-110.0 องศาเซลเซียส และไม่ปรากฏ T_m ด้วยเช่นกัน แสดงให้เห็นว่าฟิล์ม PLA และฟิล์ม CAB มีโครงสร้างเป็น อสัณฐาน โดยจะพบว่า T_g ของ CAB มีค่ามากกว่า PLA ด้วยเหตุผลที่ว่า CAB มีพันธะอีเทอร์ (C-O-C) ซึ่งทำให้สายโซ่มีความยืดหยุ่นแต่ก็ไม่สามารถทำให้โครงสร้างบิดหมุนได้อย่างอิสระ โครงสร้างหลักมีขนาดใหญ่ ยังมีหมู่แทนที่ขนาดใหญ่ซึ่งในประกอบด้วยหมู่บิวทิลอะซิเตท และหมู่อะซิเตท ซึ่งเป็นพันธะเอสเทอร์สามารถเกิดเรโซแนนท์ได้เช่นเดียวกับ PLA ดังแสดงในรูป 3.19 จึงทำให้โครงสายโซ่หลักมีความแข็งแรงมาก ไม่ค่อยมีความยืดหยุ่น การที่สายโซ่จะหมุนเคลื่อนตัวได้อย่างอิสระต้องใช้พลังงานสูงมากค่า T_g จึงมีค่ามากกว่า PLA ที่ไม่มีหมู่แทนที่ขนาดใหญ่อยู่กับสายโซ่หลัก ในขณะที่พอลิเมอร์เบลนด์ของ PLA/ CAB มีค่า T_g ปรากฏ 2 ค่า คือ 52.13, 106.2 องศาเซลเซียส (รูป 3.28) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าพอลิเมอร์ PLA และ CAB เข้ากันไม่ได้ทั้งนี้อาจมาจากโครงสร้างทางโมเลกุลของพอลิเมอร์ทั้งสอง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 3.10 ข้อมูลสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์ที่อัตราส่วนที่ต่าง ๆ

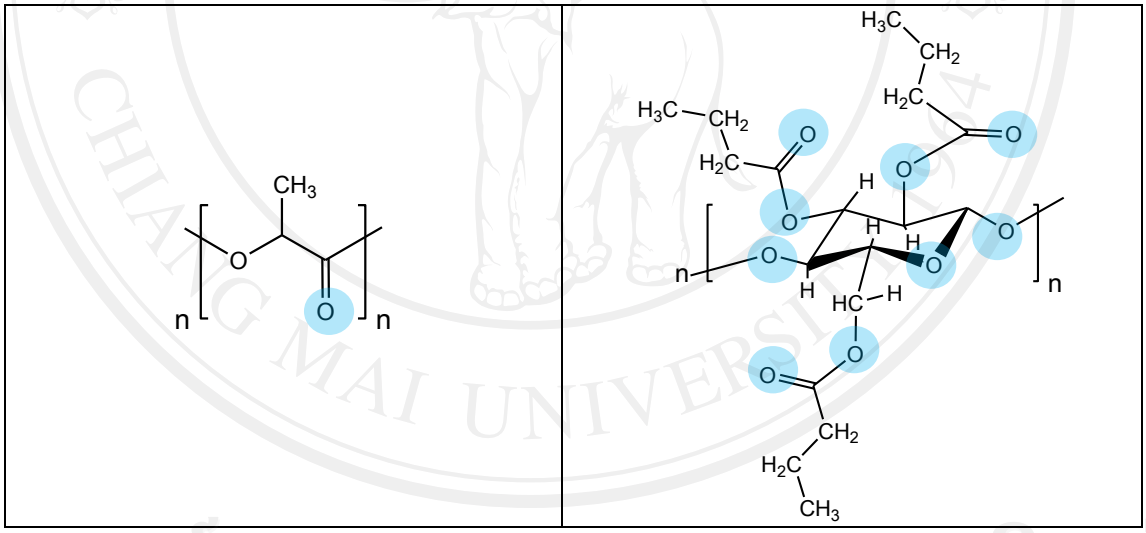
สูตร	สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์เบลนด์			DSC (Second run)				
	PLA	CAB	T80	T_g (^{0}c)	T_c (^{0}c)	ΔH_c (J/g)	T_m (^{0}c)	ΔH_m (J/g)
1	1.000	-	-	58.5	-	-	-	-
2	0.500	0.500	-	52.1, 106.2	-	-	-	-
3	-	1.000	-	108.6	-	-	-	-
4	0.950	-	0.050	50.5	121.7	6.6391	148.8	9.3009
5	0.725	0.225	0.050	52.5	-	-	-	-
6	0.475	0.475	0.050	52.5	-	-	-	-
7	0.225	0.725	0.050	50.9	93.8	8.6889	148.3	1.2626
8	-	0.950	0.050	96.2	-	-	-	-
9	0.900	-	0.100	47.7	107.5	25.73	147.8	29.81
10	0.675	0.225	0.100	50.3	-	-	-	-
11	0.450	0.450	0.100	48.6	-	-	-	-
12	0.225	0.675	0.100	46.1	-	-	-	-
13	-	0.900	0.100	86.5	-	-	-	-
14	0.850	-	0.150	41.3	108.5	26.5065	148.2	31.21
15	0.625	0.225	0.150	47.2	-	-	-	-
16	0.425	0.425	0.150	45.1	-	-	-	-
17	0.225	0.625	0.150	40.5	121.8	1.20	145.5	1.14
18	-	0.850	0.150	53.9	-	-	-	-
19	0.800	-	0.200	32.0	92.0	28.2978	148.3	33.33
20	0.400	0.400	0.200	42.3	117.0	1.8540	148.3	2.3
21	-	0.800	0.200	40.5	-	-	-	-

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 3.19 ลักษณะการเกิดเรโซแนนซ์

นอกจากนี้ยังมีผลของพันธะไฮโดรเจนโดยพบว่าทั้ง PLA และ CAB สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนซึ่งเป็นแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่แข็งแรงมากจึงทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ทั้งสองมีความแข็งแต่เปราะแตกหักง่าย เมื่อพิจารณารูป 3.20 (ข) จะเห็นว่าโครงสร้างของ CAB ใน 1 หน่วยซ้ำสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ 9 พันธะ แต่ในขณะที่ PLA สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้เพียง 1 พันธะเท่านั้น นอกจากนี้ CAB สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนทั้งในและระหว่างสายโซ่เดียวกัน ดังรูป 3.9 ซึ่งการที่สายโซ่ของ CAB จะหมุนเคลื่อนตัวได้อย่างอิสระนั้นต้องใช้พลังงานสูงมาก ค่า T_g จึงมีค่ามากกว่า PLA เพราะเหตุนี้ CAB จึงแข็งแรงและเปราะมากกว่า PLA โดยสอดคล้องกับค่ายังมอดูลัสในสมบัติเชิงกล โดย CAB มีค่ามากกว่า PLA

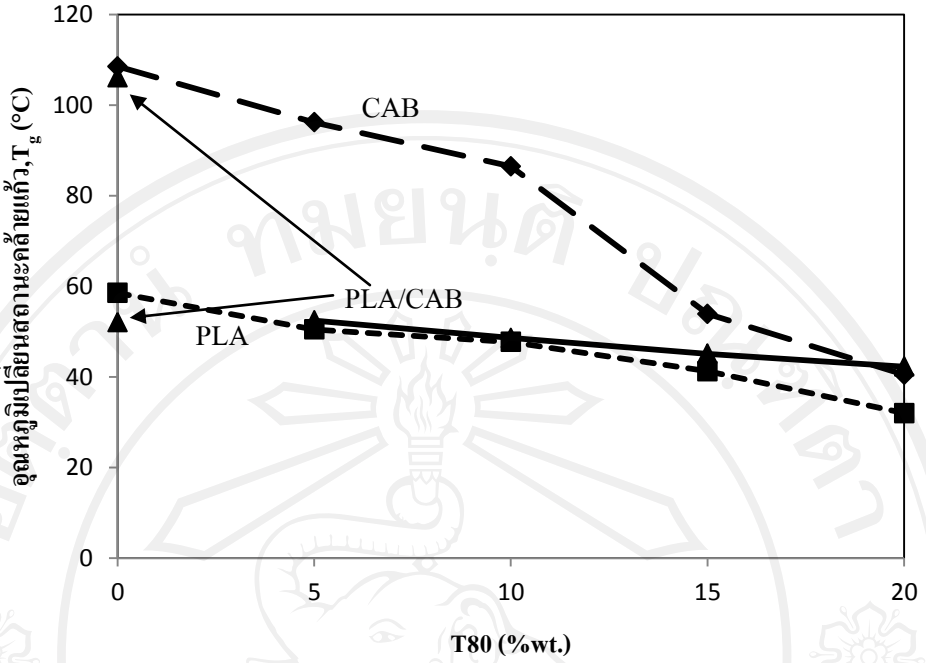


(ก) (ข)

ตำแหน่งที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน

รูป 3.20 ตำแหน่งที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างหน่วยซ้ำของสายโซ่หลัก
(ก) PLA และ (ข) CAB

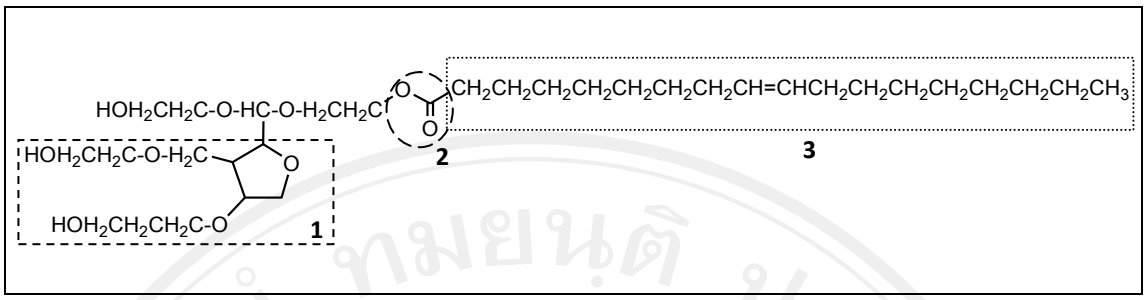
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



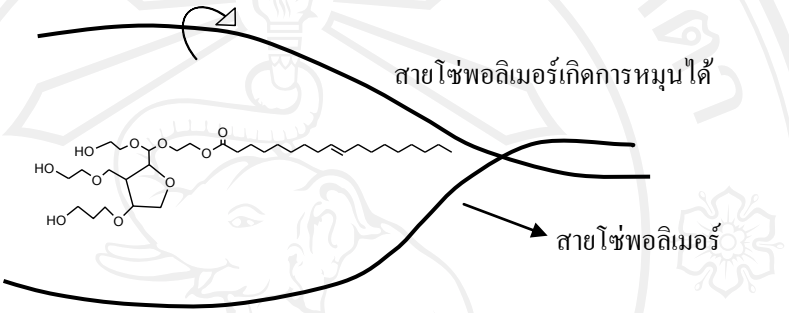
รูป 3.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) กับปริมาณ T80 ที่เติมลงในฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA (■) CAB (◆) และ PLA/CAB (▲) ที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนัก 0.500/0.500

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของการเติม T80 ลงในฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB ที่อัตราส่วนต่างๆ ตามรูป 3.21 พบว่า ค่า T_g ของฟิล์มทุกตัวที่เติม T80 ในอัตราส่วนต่างๆ มีค่าลงลดเมื่อเปรียบเทียบกับ PLA ที่ไม่เติม T80 และค่า T_g ลดลงมากขึ้นเมื่อเติม T80 เพิ่มขึ้นด้วยเหตุผลที่ว่า T80 ซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วย 3 ส่วนตามรูป 3.22 ที่มีหน้าที่ต่างกัน ส่วนที่ 1 ของ T80 เป็นส่วนที่ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์แยกออกจากกัน เมื่อ T80 ถูกแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ ทำให้มีปริมาตรอิสระเพิ่มขึ้น การหมุนบางส่วนของสายโซ่พอลิเมอร์เป็นไปได้ง่ายขึ้นดังรูป 3.23 และในส่วนที่ 2 หมู่เอสเทอร์ **-O-C**($\overset{\delta^-}{O}$)($\overset{\delta^+}{}$) ของ T80 เป็นหมู่ที่มีสภาพขั้ว โดยสามารถเกิดแรงกระทำไฮโดรเจนกับสายโซ่พอลิเมอร์ทั้งสองชนิด (PLA และ CAB)ได้ ทำให้แรงกระทำไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์มีค่าลดลงดังรูป 3.24 ส่งผลให้ปริมาตรอิสระในพอลิเมอร์มีมากขึ้นทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนตัวได้อย่างอิสระด้วยเช่นกัน จึงเป็นเหตุให้ค่า T_g ลดลง ส่งผลให้พอลิเมอร์มีสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนไปโดยพอลิเมอร์สามารถบิดงอและยืดหยุ่นดีขึ้นสอดคล้องกับผลสมบัติเชิงกลดังที่กล่าวมาในหัวข้อ 3.5 นอกจากนี้ T80, PLA และ CAB เป็นโมเลกุลที่มีสภาพขั้วเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงมีความสามารถเข้ากันได้ (Compatibility) เป็นอย่างดี โดยเกิดแรงกระทำไฮโดรเจนซึ่งกันและกัน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



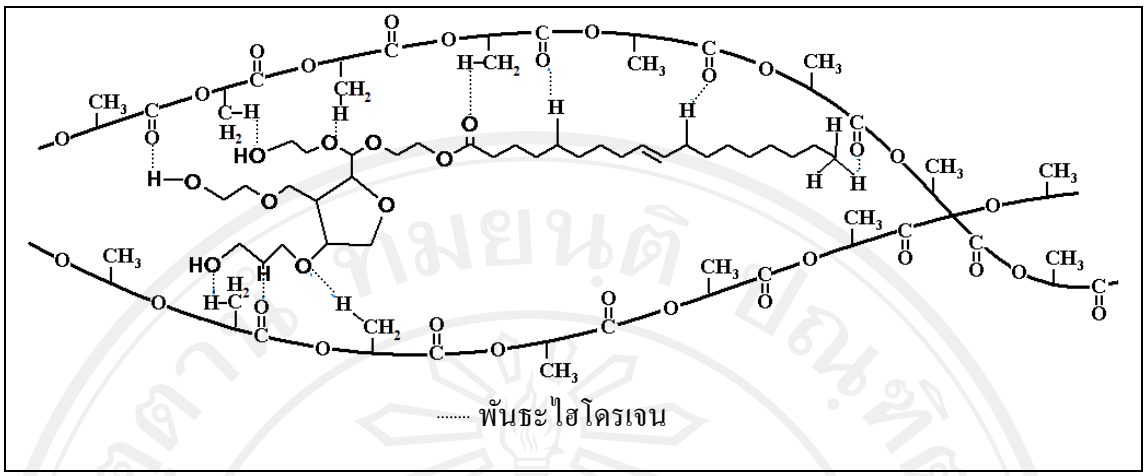
รูป 3.22 โครงสร้างของทวีน 80



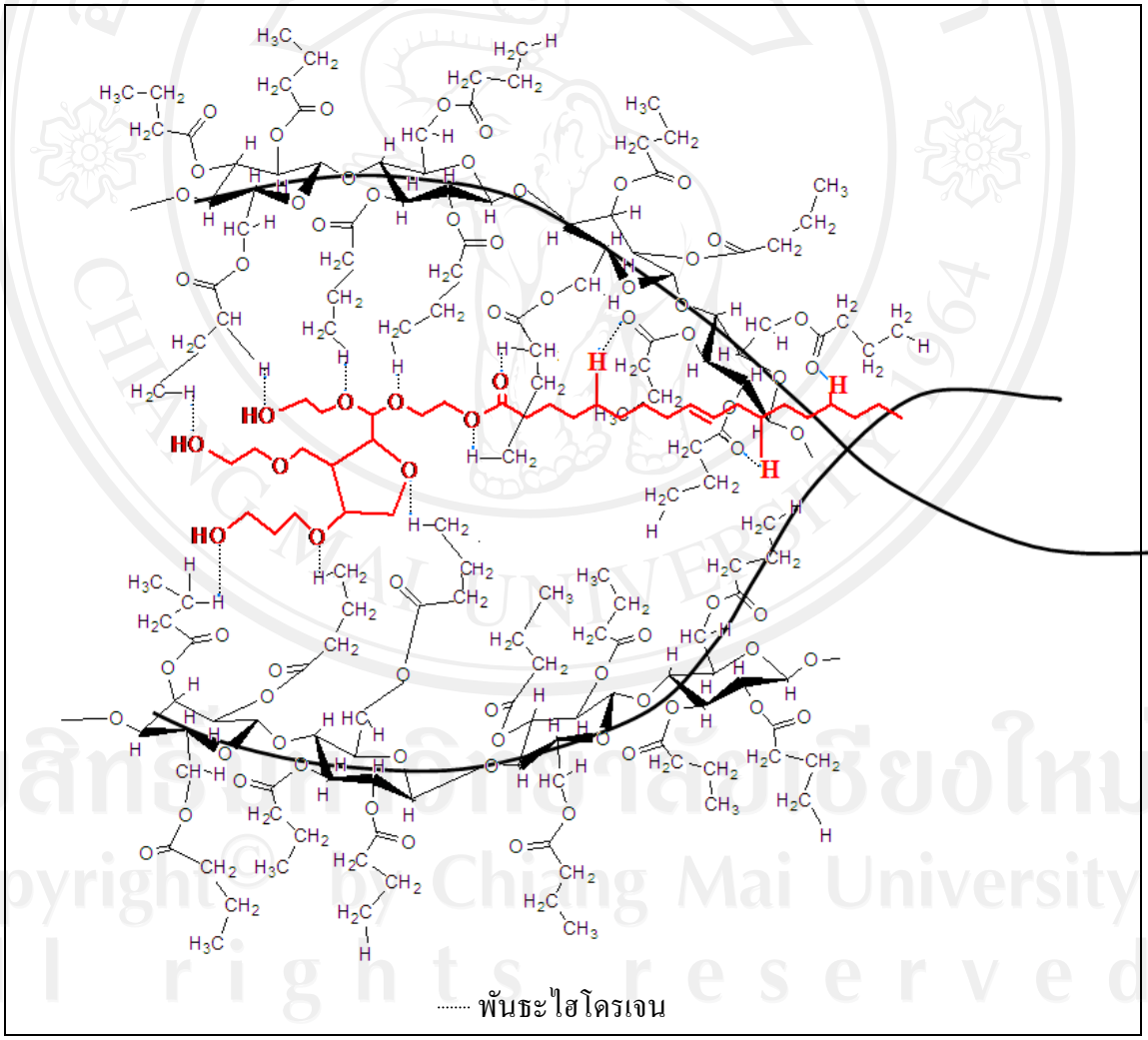
รูป 3.23 ภาพจำลองการแทรกตัวของทวีน 80 ในสายโซ่พอลิเมอร์

T80 เป็นไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ตรง และมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ สามารถแทรกตัวเข้าไปอยู่ระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ และสามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ได้ง่าย ทำให้การวางตัวของสายโซ่ในบริเวณอสัณฐานของพอลิเมอร์มีปริมาตรอิสระเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อให้ความร้อนกับพอลิเมอร์ในการเปลี่ยนสถานะจากสถานะคล้ายแก้ว (Glassy state) ไปเป็นสถานะคล้ายยาง (Rubbery state) จะใช้พลังงานน้อยลง เนื่องจากโมเลกุลของพอลิเมอร์เบลนด์ที่อยู่ในส่วนอสัณฐานเกิดการเคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น จึงไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานในการเปลี่ยนสถานะสูง ทำให้พอลิเมอร์เบลนด์ที่เติม T80 มีค่า T_g ลดลง และมีความสามารถในการยืดเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์โดยมีค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ตามรูป 3.13

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



(ก)



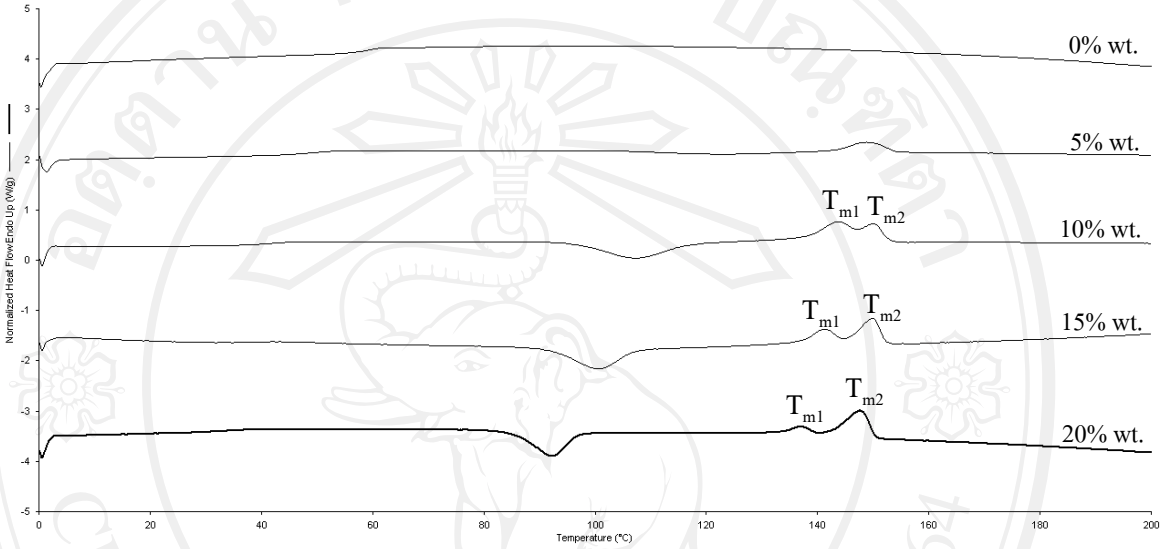
(ข)

รูป 3.24 ภาพจำลองของการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ของ

(ก) PLA กับ T80 (ข) CAB กับ T80

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ในส่วนที่ 3 หมู่อัลคิลใน T80 ซึ่งเป็นสายตรงมีจำนวนคาร์บอน 17 อะตอมจะไปทำให้สายโซ่พอลิเมอร์อยู่ห่างกัน และไม่เกิดความระเกะระกะ (Steric hindrance) ในการหมุนของสายโซ่พอลิเมอร์ เปรียบเสมือนหมู่อัลคิลทำหน้าที่หล่อลื่นให้สายโซ่พอลิเมอร์มีการหมุนเคลื่อนตัวได้อย่างสะดวก เรียกผลที่เกิดขึ้นว่า *การหล่อลื่นภายใน (Internal lubricant)* [29] ค่า T_g จึงต่ำลง

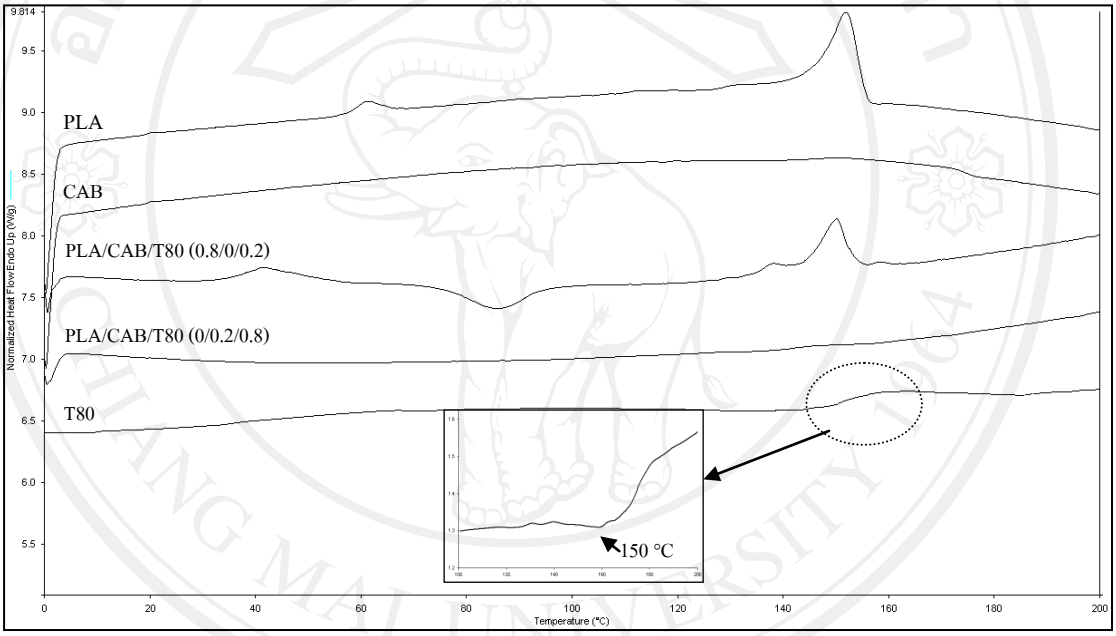


รูป 3.25 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม PLA โดยเติม T80 ที่ปริมาณต่างๆ

จากเทอร์โมแกรม DSC รูป 3.25 พบว่า การเติม T80 ลงในฟิล์ม PLA เมื่อให้ความร้อนกับ PLA จะเกิดผลึกใหม่และปรากฏพีค T_c ขึ้น นอกจากนี้พบว่าพีค T_m ที่ปรากฏ 2 พีค เนื่องมาจากขนาดผลึกของ PLA ที่ต่างกัน ซึ่งอาจมาจากการเกิดผลึกของ PLA ที่แตกต่างกัน 2 สาเหตุ คือ การเกิดผลึกอันเนื่องมาจาก T80 เหนี่ยวนำให้ PLA เกิดการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ โดย T80 ที่เติมลงไปจะเคลื่อนที่แทรกอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ในบริเวณอสัณฐานของ PLA ทำให้สายโซ่ PLA เกิดการเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น ก่อให้เกิดการเหนี่ยวนำให้ PLA เกิดการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและสาเหตุที่สองคือ การเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) เนื่องจากการหลุดออกของ T80 จากสายโซ่ PLA[72] ซึ่งเมื่อเติม T80 ในปริมาณมากขึ้นจะทำให้เกิดผลึกมากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับค่าพลังงานความร้อนในการหลอมผลึกของ PLA ที่เพิ่มขึ้นในรูป 3.27 แต่ผลไม่สอดคล้องกับสมบัติเชิงกลที่พบว่าฟิล์ม PLA ที่เติม T80 ปริมาณ 10%wt. มีค่าความทนแรงดึง ณ จุดขาดสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจาก T80 มีจุดเดือดที่ 148 องศาเซลเซียส [49] ซึ่งอาจมีผลต่อช่วงของการเกิดผลึกได้ ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์ครั้งที่หนึ่ง (First run) ดังรูป 3.28 พบว่าเทอร์โมแกรมของ T80 เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเป็นขั้น(Step) ในลักษณะเดียวกับ T_g ที่อุณหภูมิประมาณ 150 องศาเซลเซียสซึ่งสามารถบ่งบอกได้ว่าเป็นจุดเดือดของ T80 [81] โดยเมื่อเทียบผลในการวิเคราะห์ครั้งที่หนึ่ง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

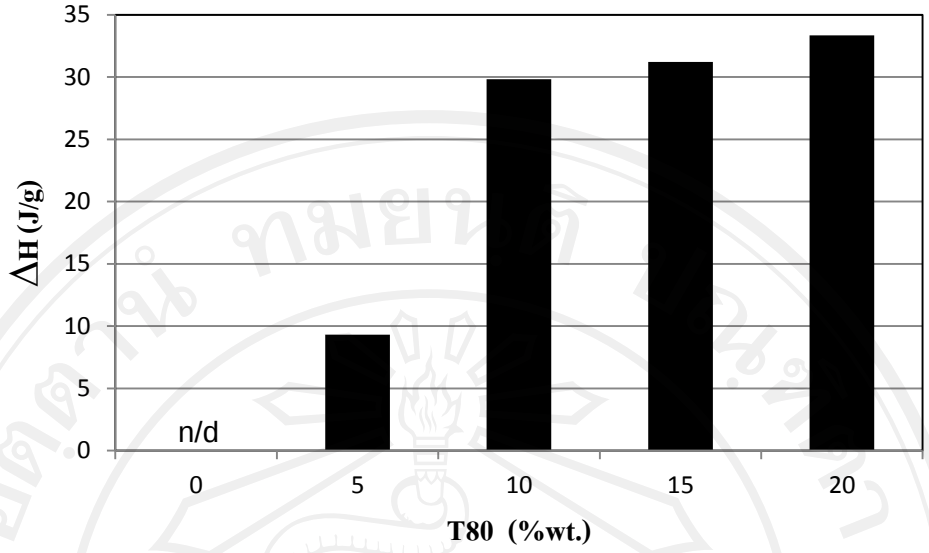
(First run) ของฟิล์ม PLA CAB และฟิล์มเบลนด์ของ PLA/CAB/T80 ในสูตร 0.8/0/0.2 และ 0/0.8/0.2 จะพบการเปลี่ยนแปลงของเทอร์โมแกรมในช่วง 159 และ 150 องศาเซลเซียสตามลำดับ นั่นหมายความว่าในการวิเคราะห์ครั้งที่สองก็สามารถเกิดการระเหยของ T80 ในระบบได้เช่นเดียวกันเพราะเป็นระบบปิด โดยพีค T_{m2} อาจเกิดการซ้อนทับกันระหว่างพีคของการหลอมผลึก PLA และพีคของการระเหย T80 ได้ เนื่องจากเป็นพีคที่ดูดกลืนความร้อน (Endothermic peak) เช่นเดียวกัน นอกจากนี้พบว่าเมื่อปริมาณ T80 เพิ่มขึ้นทำให้มีพื้นที่ใต้พีคที่มากเพราะ T80 เกิดการระเหยมากนั่นเอง ดังนั้นปริมาณความร้อนที่ดูดกลืน (ΔH) ณ ตำแหน่งนี้ไม่ใช่ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการหลอมผลึก(ΔH_m) จึงไม่สามารถเทียบเป็นปริมาณผลึกได้



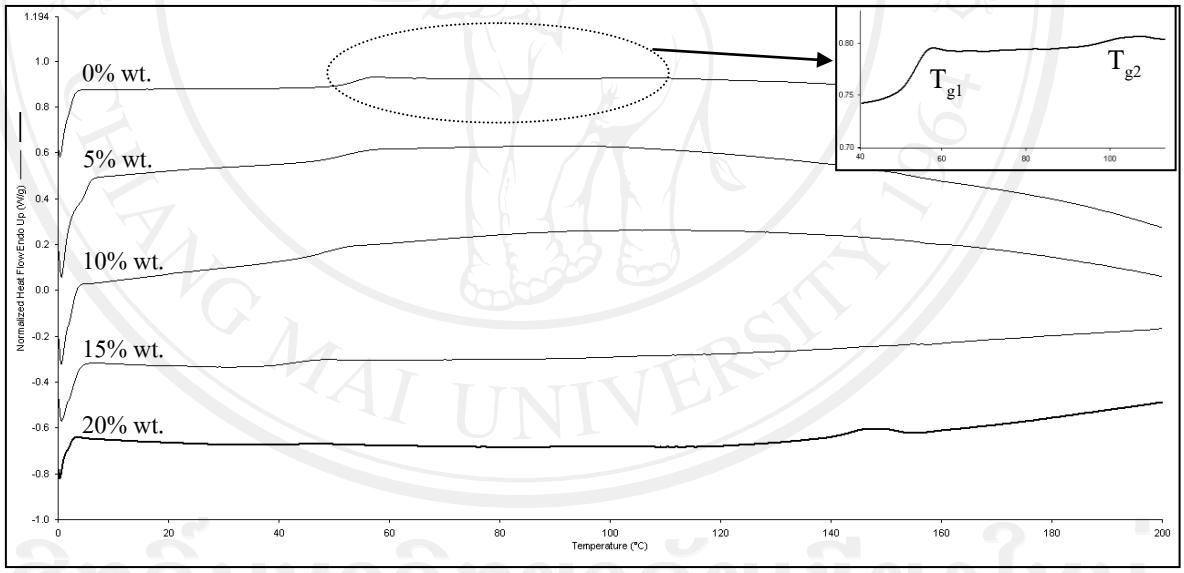
รูป 3.26 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม PLA CAB PLA/CAB/T80 (0.8/0/0.2) PLA/CAB/T80 (0/0.2/0.8) และ T80 ที่ได้จากการวิเคราะห์ครั้งที่หนึ่ง (First run)

นอกจากนี้ DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB ในรูป 3.28 พบว่าเมื่อเติม T80 20% wt. จะมีพีค T_m เกิดขึ้นที่ 148.3 องศาเซลเซียสซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิของการหลอมผลึกของ PLA และมี ΔH_m = 2.3 J/g ดังนั้นจึงชี้ให้เห็นว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB สามารถเกิดผลึกเกิดขึ้นได้ เมื่อเติม T80 มากกว่า 20% wt.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 3.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Δ H กับปริมาณ T80 ที่เติมลงฟิล์ม PLA



รูป 3.28 DSC เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ครั้งที่สอง (Second run)ของฟิล์ม PLA/CAB ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับ 0.5/0.5 โดยเติม T80 ที่ปริมาณต่างๆ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.8 การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม

ผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB/T80 ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 30.0 ± 1.0 องศาเซลเซียส ร้อยละของความชื้นสัมพัทธ์ 50 ± 2 โดยค่าเฉลี่ยของอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (WVPR) และความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ (WVP) ได้แสดงผลในตาราง 3.11 (วิธีการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง)

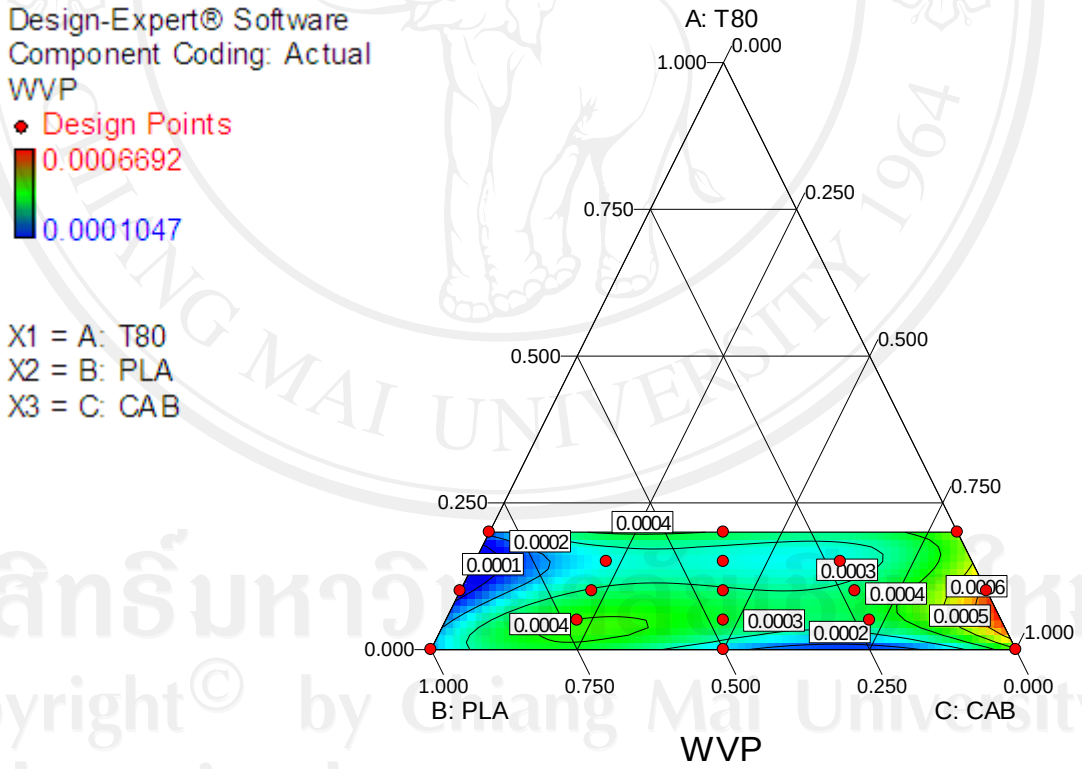
ตาราง 3.11 ค่าเฉลี่ยของอัตราการซึมผ่านไอน้ำและความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB/T80 ที่อัตราส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 30.0 ± 1.0 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ± 2

สูตร	สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์เบลนด์			WVPR (g/m^2. day)	WVP $x10^4$ ($g.m/m^2$. day.mmHg)
	PLA	CAB	T80		
1	1.000	-	-	58.01 ± 1.23	1.84 ± 0.11
2	0.500	0.500	-	81.89 ± 10.08	2.40 ± 0.06
3	-	1.000	-	147.51 ± 8.84	4.64 ± 0.29
4	0.950	-	0.050	41.98 ± 0.54	1.31 ± 0.04
5	0.725	0.225	0.050	126.64 ± 37.14	4.73 ± 1.64
6	0.475	0.475	0.050	126.11 ± 11.50	3.54 ± 0.42
7	0.225	0.725	0.050	108.95 ± 4.24	4.24 ± 0.33
8	-	0.950	0.050	126.16 ± 5.40	2.06 ± 0.16
9	0.900	-	0.100	36.67 ± 2.75	1.05 ± 0.11
10	0.675	0.225	0.100	56.24 ± 5.66	2.09 ± 0.57
11	0.450	0.450	0.100	71.98 ± 4.42	2.42 ± 0.01
12	0.225	0.675	0.100	64.62 ± 2.95	2.02 ± 0.01
13	-	0.900	0.100	202.87 ± 1.24	6.69 ± 0.03
14	0.850	-	0.150	49.35 ± 4.42	1.44 ± 0.05
15	0.625	0.225	0.150	102.41 ± 6.19	3.06 ± 0.05
16	0.425	0.425	0.150	74.28 ± 1.41	2.65 ± 0.19
17	0.225	0.625	0.150	104.88 ± 0.18	3.44 ± 0.33

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 3.11 ค่าเฉลี่ยของอัตราการซึมผ่านไอน้ำและความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB/T80 ที่อัตราส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 30.0 ± 1.0 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ± 2 (ต่อ)

สูตร	สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์เบลนด์			WVPR (g/m^2. day)	WVP $x10^4$ ($g.m/m^2$. day.mmHg)
	PLA	CAB	T80		
18	-	0.850	0.150	106.83 ± 1.41	3.70 ± 0.17
19	0.800	-	0.200	58.01 ± 0.71	2.03 ± 0.07
20	0.400	0.400	0.200	128.40 ± 4.24	4.19 ± 0.03
21	-	0.800	0.200	58.01 ± 1.23	1.84 ± 0.11



Multiple regression results :

WVP = +0.17411*A+2.07903x10^{4}*B+4.86657x10^{-4}*C+1.92278 x10^{-3}*A*C*(B-C)

โดยที่ A = T80 B = PLA และ C = CAB (R^2 = 0.8259, p = 0.0496)

รูป 3.29 Contour plot ค่า WVP ของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB/T80 ที่อัตราส่วนต่างๆ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

จากข้อมูลในตาราง 3.11 นำมาพล๊อตกราฟแบบ Contour ดังแสดงในรูป 3.29 พบว่าฟิล์ม CAB มีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำเท่ากับ 4.644×10^{-4} g.m/m^2.day.mmHg ซึ่งมีค่ามากกว่าฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB และฟิล์มพอลิเมอร์ CAB ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.4×10^{-4} และ 1.839×10^{-4} g.m/m^2.day.mmHg ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องจากสายโซ่พอลิเมอร์ของ CAB มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่า PLA ทำให้โมเลกุลของน้ำซึ่งเป็นโมเลกุลขนาดเล็กสามารถผ่านเข้าออกฟิล์มพอลิเมอร์ได้ง่ายและมากกว่า PLA

และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของการเติม T80 ลงในฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำลดลงเมื่อเติม T80 ลงใน PLA เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเติม T80 ทำให้สายโซ่ของ PLA เกิดการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบชิดกันมากขึ้นและเกิดผลึกใหม่เนื่องจากการหลุดออกของ T80 จากสายโซ่ PLA[72] ส่งผลให้เกิดผลึกของ PLA ซึ่งการมีโครงสร้างผลึกเพิ่มขึ้นทำให้มีช่องว่างระหว่างสายโซ่น้อยลง การเข้าออกของน้ำจึงลดลงด้วย และความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มต่ำสุดเมื่อเติม T80 10%wt. เนื่องจาก PLA มีปริมาณผลึกมากที่สุดนั่นเอง สำหรับการเติม T80 ในฟิล์ม PLA/CAB และ CAB ที่ปริมาณต่างๆนั้น ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนแต่เมื่อพิจารณาแนวโน้มโดยรวม พบว่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์จากน้อยไปมากตามลำดับ คือ PLA PLA/CAB และ CAB

นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีองค์ประกอบของ CAB มากขึ้นจะทำให้ฟิล์มมีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำได้เพิ่มขึ้น เนื่องจาก CAB จะไปขัดขวางการจัดเรียงตัวเป็นผลึกของ PLA จึงทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์มีช่องว่างที่ไอน้ำสามารถซึมผ่านได้มากขึ้น

3.9 การแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจน

ผลการทดสอบความสามารถในการการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA, CAB และฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB ที่อัตราส่วนต่างๆ แสดงค่าเฉลี่ยอัตราการซึมผ่านออกซิเจน (OTP) และการแพร่ผ่านออกซิเจน (OP) ในตาราง 3.12 (การคำนวณแสดงในภาคผนวก จ)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

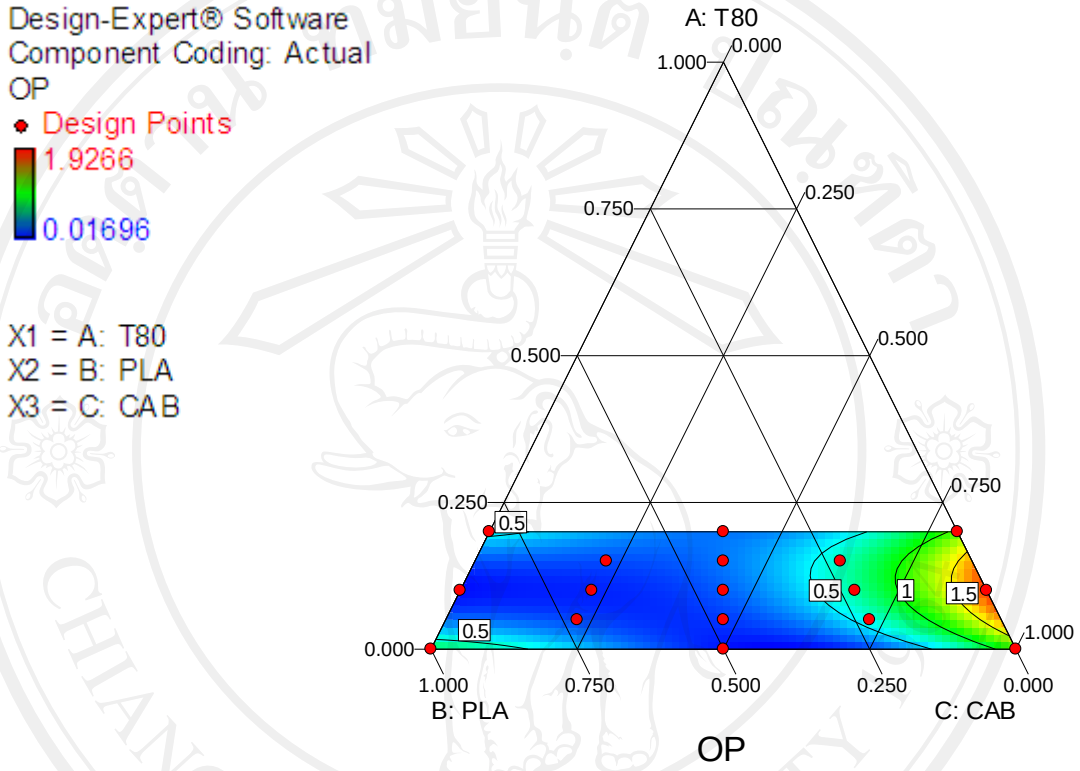
ตาราง 3.12 ค่าเฉลี่ยอัตราการซึมผ่านออกซิเจนและการแพร่ผ่านออกซิเจนของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB/T80 อัตราส่วนต่างๆ

สูตร	สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์เบลนด์			OTR (cm^3/m^2. day.kPa)	OP (cm^3.mm/m^2. day.kPa)
	PLA	CAB	T80		
1	1.000	-	-	112.67 ± 14.05	0.07±0.01
2	0.500	0.500	-	640.00 ± 14.93	0.17±0.00
3	-	1.000	-	4891.33 ± 111.10	1.17±0.03
4	0.950	-	0.050		
5	0.725	0.225	0.050	185.33 ± 11.50	0.13±0.01
6	0.475	0.475	0.050	423.00 ± 46.03	0.11±0.01
7	0.225	0.725	0.050	1359.00 ± 38.69	0.86±0.02
8	-	0.950	0.050		
9	0.900	-	0.100	108.33 ± 5.51	0.04±0.00
10	0.675	0.225	0.100	240.00 ± 11.00	0.06±0.00
11	0.450	0.450	0.100	332.33 ± 34.56	0.21±0.02
12	0.225	0.675	0.100	1158.67 ± 118.85	0.32±0.03
13	-	0.900	0.100	4234.33 ± 178.25	1.93±0.08
14	0.850	-	0.150		
15	0.625	0.225	0.150	321.67 ± 16.04	0.07±0.00
16	0.425	0.425	0.150	278.33 ± 42.67	0.06±0.01
17	0.225	0.625	0.150	838.33 ± 25.58	0.57±0.02
18	-	0.850	0.150		
19	0.800	-	0.200	94.33 ± 4.16	0.06±0.00
20	0.400	0.400	0.200	231.67 ± 17.21	0.13±0.01
21	-	0.800	0.200	3858.33 ± 119.46	1.01±0.03

จากผลในตาราง 3.12 นำค่า OP ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่อัตราส่วนต่างๆ ไปพล๊อตกราฟแบบ Contour แสดงดังรูป 3.30 พบว่าความสามารถในการแพร่ผ่านออกซิเจนของฟิล์ม CAB ดีกว่า

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ฟิล์ม PLA/CAB และฟิล์ม PLA ทั้งนี้อาจเนื่องจาก CAB มีการชิดกันของสายโซ่พอลิเมอร์น้อยกว่า PLA ทำให้โมเลกุลของออกซิเจนที่เป็นโมเลกุลขนาดเล็กสามารถผ่านเข้าออกฟิล์มพอลิเมอร์ได้ง่ายและมากกว่า PLA เช่นเดียวกับการซึมผ่านของน้ำ



Multiple regression results :

OP = -32.61950 * A+0.72581 * B+1.20794 * C-39.27654 * A * B * C

โดยที่ A = T80 B = PLA และ C = CAB (R^2 = 0.9083, p = 0.0067)

รูป 3.30 Contour plot ค่า OP ของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB/T80 ที่อัตราส่วนต่างๆ

และเมื่อพิจารณาการเติม T80 ลงในพอลิเมอร์เบลนด์ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าความสามารถในการแพร่ผ่านออกซิเจนของ PLA ลดลงเมื่อใช้ T80 เพิ่มขึ้น ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับการซึมผ่านของไอน้ำ คือ T80 ช่วยทำให้สายโซ่ของ PLA ชิดกันมากขึ้นและส่งผลให้เกิดผลึกของ PLA อีกทั้งเกิดผลึกใหม่เนื่องจากการหลุดออกของ T80 จากสายโซ่ PLA[72] ด้วย โดยเฉพาะเมื่อใช้ T80 10%wt. ซึ่ง PLA จะมีปริมาณผลึกสูงสุด ทำให้มีช่องว่างระหว่างสายโซ่น้อยลง ทำให้การเข้าออกของก๊าซออกซิเจนลดลงด้วย

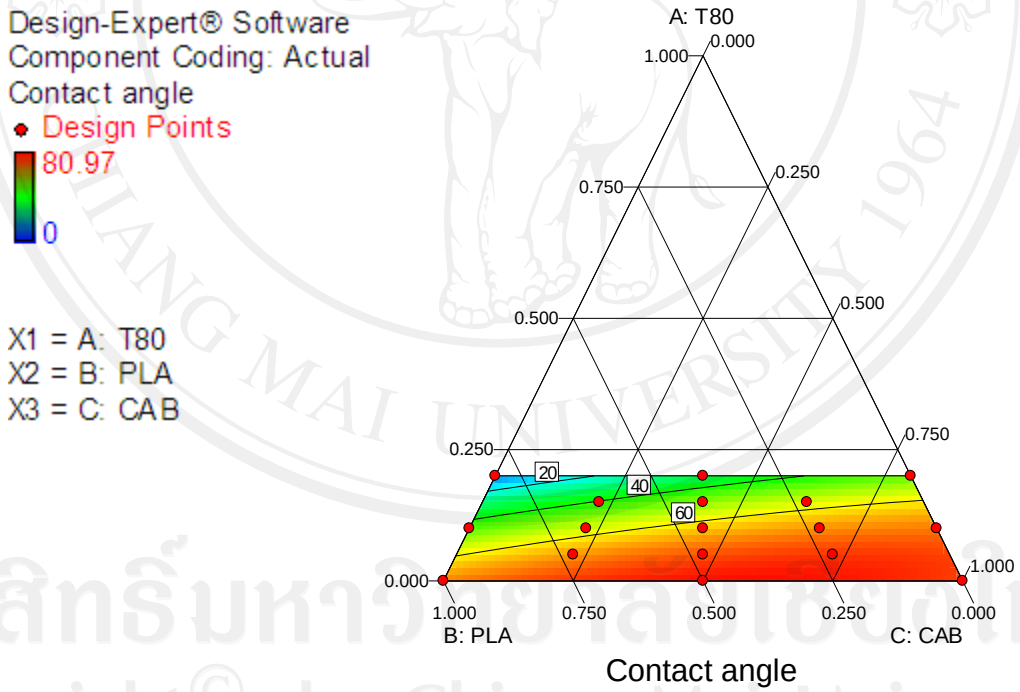
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สำหรับฟิล์ม PLA/CAB และ CAB มีความสามารถในการผ่านออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเติม T80 ที่เพิ่มขึ้นถึง 10 %wt. และความสามารถในการแพร่ผ่านออกซิเจนของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์จากน้อยไปหามากมีลำดับดังนี้ คือ PLA, PLA/CAB และ CAB

เมื่อพิจารณาฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่มี CAB เป็นองค์ประกอบหลัก พบว่าเมื่อมีความสามารถในการผ่านออกซิเจนสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่ม CAB จะส่งผลให้สายโซ่ของพอลิเมอร์แยกห่างออกจากกันมากยิ่งขึ้น การเข้าออกของโมเลกุลก๊าซออกซิเจนจึงมีค่ามากขึ้น

3.10 ค่ามุมสัมผัส (contact angle)

เมื่อนำฟิล์ม PLA, CAB และฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่อัตราส่วนต่างๆ วัดค่ามุมสัมผัสด้วยเครื่องวัดค่ามุมสัมผัสได้ผลดังแสดงในตาราง 3.13 และรูป 3.31



Multiple regression results :

Contact angle = -808.21049 * A+69.63293 * B+75.70542 * C

โดยที่ A = T80 B = PLA และ C = CAB ($R^2 = 0.9938$, $p < 0.0001$)

รูป 3.31 Contour plot ค่า contact angle ของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB/T80 ที่อัตราส่วนต่างๆ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 3.13 ค่ามุมสัมผัสและลักษณะมุมสัมผัสเฉลี่ยของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ชนิดต่าง ๆ

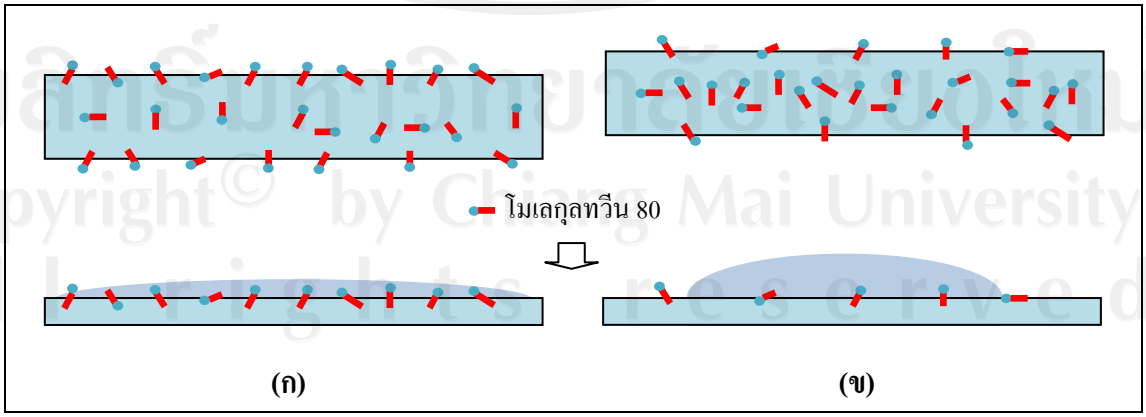
สูตร	สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์เบลนด์			มุมสัมผัสเฉลี่ย (องศา)
	PLA	CAB	T80	
1	1.000	-	-	71.92
2	0.500	0.500	-	68.18
3	-	1.000	-	80.97
4	0.950	-	0.050	52.05
5	0.725	0.225	0.050	76.39
6	0.475	0.475	0.050	77.35
7	0.225	0.725	0.050	76.74
8	-	0.950	0.050	67.64
9	0.900	-	0.100	45.10
10	0.675	0.225	0.100	46.16
11	0.450	0.450	0.100	59.81
12	0.225	0.675	0.100	71.35
13	-	0.900	0.100	66.14
14	0.850	-	0.150	n/d
15	0.625	0.225	0.150	53.84
16	0.425	0.425	0.150	42.74
17	0.225	0.625	0.150	57.84
18	-	0.850	0.150	43.77
19	0.800	-	0.200	n/d
20	0.400	0.400	0.200	41.00
21	-	0.800	0.200	43.29

จากผลการทดลองพบว่า T80 ที่เติมลงในฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB ที่อัตราส่วนต่างๆ มีอิทธิพลโดยเมื่อเติม T80 มุมสัมผัสระหว่างฟิล์มกับหยดน้ำมีค่าลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

กับฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่ได้เติม T80 และเมื่อเติม T80 ในปริมาณมากขึ้นมุมสัมผัสก็จะลดลงด้วยเช่นกัน ดังแสดงลักษณะของมุมสัมผัสในตาราง 3.14 พบว่าหยดน้ำมีการแผ่กระจาย (Spreading) ไปบนฟิล์มพอลิเมอร์มากขึ้นเมื่อใช้ T80 มากขึ้น ค่ามุมสัมผัสจะบ่งบอกถึงลักษณะการแผ่กระจายของหยดน้ำบนฟิล์ม ถ้าค่ามุมสัมผัสน้อยๆนั้นแสดงให้เห็นว่าหยดน้ำแผ่กระจายบนฟิล์มได้ดีนั่นเอง ทั้งนี้เนื่องจาก T80 ทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ชอบน้ำ (Hydrophilic) มากขึ้น จะส่งผลให้ฟิล์มมีการเปียกผิว (Spreading wetting) มากขึ้น โดยค่ามุมสัมผัสจะบ่งบอกถึงลักษณะการแผ่กระจายของหยดน้ำบนฟิล์ม ถ้าค่ามุมสัมผัสน้อยๆนั้นแสดงให้เห็นว่าหยดน้ำแผ่กระจายบนฟิล์มได้ดีนั่นเอง ทั้งนี้ในการเกิดผลึกขึ้นในพอลิเมอร์นั้นก็สามารถทำให้พอลิเมอร์มีความไม่ชอบน้ำเพิ่มมากขึ้นได้[82] แต่อย่างไรก็ตามจากผลที่ได้พบว่าฟิล์มที่มีผลึกเกิดมากที่สุดจากผลทางสมบัติเชิงกลคือ PLA/CAB/T80 อัตราส่วน 0.9/0/0.1 นั้นมีมุมสัมผัสที่ลดลงเมื่อเทียบกับ PLA ที่ไม่เติม T80 จึงชี้ให้เห็นว่าอิทธิพลของ T80 ที่เติมลงไปนั้นมีผลทำให้ฟิล์มมีความชอบน้ำมากกว่าอิทธิพลของการเกิดผลึกโดยทำให้ฟิล์มมีความไม่ชอบน้ำ

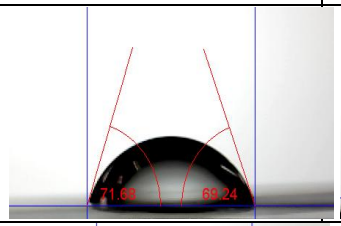
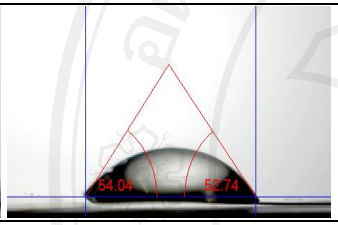
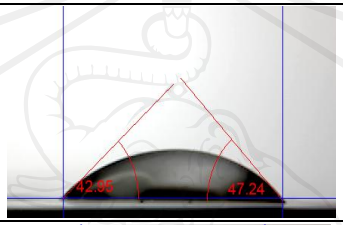
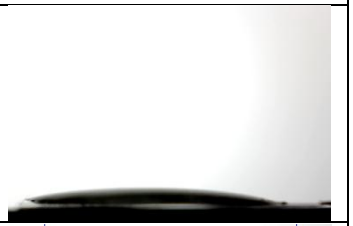
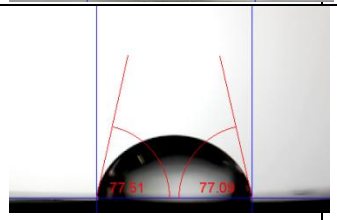
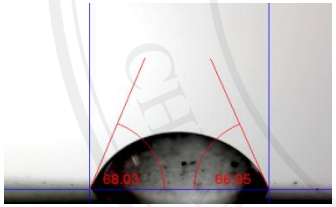
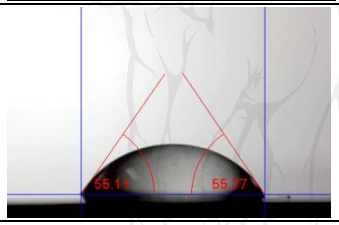
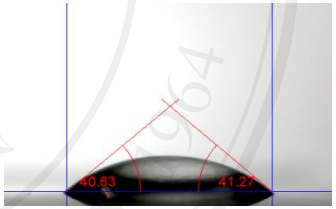
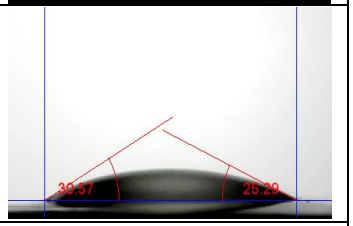
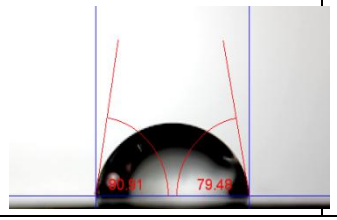
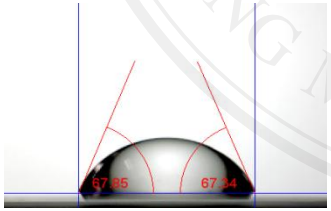
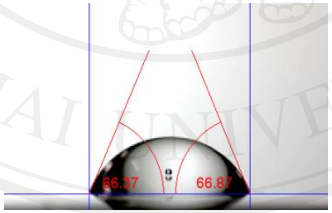
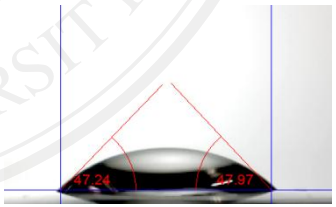
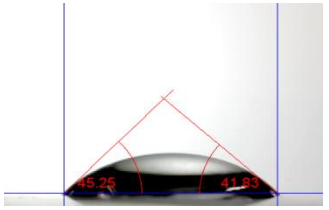
นอกจากนี้พบว่าฟิล์ม PLA ที่เติม T80 จะมีค่ามุมสัมผัสลดลงมากกว่าฟิล์ม CAB ที่เติม T80 อาจเนื่องจาก T80 แทรกตัวอยู่ที่ผิวพอลิเมอร์น้อยกว่าใน PLA ดังรูป 3.32 โดย T80 ที่กระจายอยู่ในแมทริกซ์ของ PLA สามารถเคลื่อนตัวออกมาที่ผิวได้ง่ายกว่า T80 ที่กระจายอยู่ในแมทริกซ์ของ CAB เนื่องจากโครงสร้างของพอลิเมอร์ PLA เป็นโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนเหมือน CAB จึงทำให้ผิวของฟิล์ม PLA มีความชอบน้ำมากกว่าเมื่อเทียบกับ CAB หยดน้ำจะแผ่กระจายบนฟิล์ม PLA มากกว่า CAB จึงทำให้มุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับฟิล์มจึงมีค่าน้อยกว่าฟิล์ม CAB และฟิล์ม PLA จะไม่สามารถวัดค่ามุมสัมผัสได้เมื่อเติม T80 มากกว่า 15%wt. ขึ้นไป โดยลักษณะของหยดน้ำจะแผ่กระจายเรียบไปกับฟิล์ม PLA ในลักษณะชั้นเดี่ยว (Monolayer) ดังแสดงในตาราง 3.14



รูป 3.32 ภาพจำลองการกระจายตัวของโมเลกุลทวีน 80 ในพอลิเมอร์เบลนด์และการแผ่กระจายของหยดน้ำบนฟิล์ม (ก) PLA (ข) CAB

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 3.14 ลักษณะมุมสัมผัสของฟิล์ม PLA ฟิล์ม CAB และฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB ที่อัตราส่วน 0.5/0.5

ฟิล์มพอลิเมอร์	T80 (%wt.)				
	0	5	10	15	20
PLA					
PLA/CAB (0.5/0.5)					
CAB					

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.11 สมบัติการต้านการเกิดฝ้าบนฟิล์ม (Antifogging properties)

การทดสอบประสิทธิภาพการต้านทานการเกิดฝ้าบนฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่เวลาต่างๆ ด้วยวิธีการทดสอบแบบ Hot fog test และ Cold fog test โดยทำการทดลองกับตัวอย่างฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์แต่ละชนิดซ้ำ 3 ครั้ง และเวลาที่เริ่มเกิดฝ้าบนฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ชนิดต่าง ๆ แสดงดังตาราง 3.15 และรูป 3.33-3.34

ตาราง 3.15 เวลาที่เริ่มเกิดฝ้าบนฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ชนิดต่าง ๆ โดยวิธีการทดสอบแบบ Cold fog test และ Hot fog test

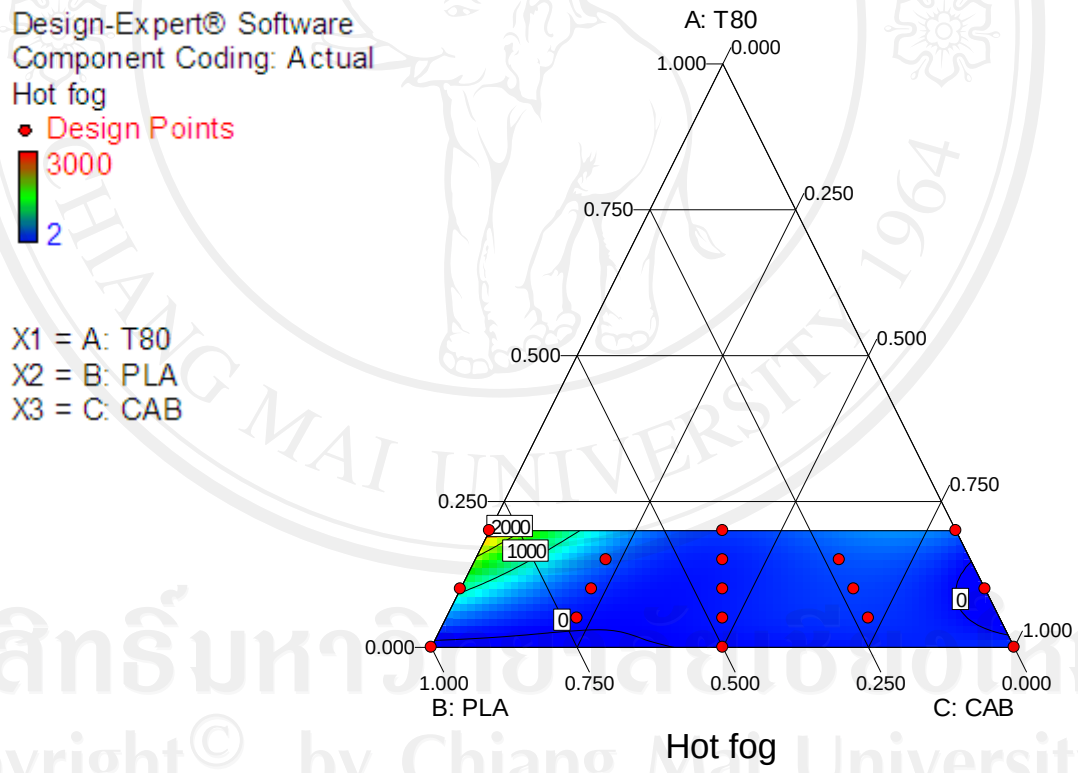
สูตร	สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์เบลนด์			Hot fog test เวลา (วินาที)	Cold fog test เวลา (วินาที)
	PLA	CAB	T80		
1	1.000	-	-	2.00	84.00
2	0.500	0.500	-	2.33	90.00
3	-	1.000	-	2.10	100.00
4	0.950	-	0.050	31.59	292.00
5	0.725	0.225	0.050	60.00	234.00
6	0.475	0.475	0.050	180.00	393.33
7	0.225	0.725	0.050	60.00	312.00
8	-	0.950	0.050	130.00	196.00
9	0.900	-	0.100	845.00	1756.00
10	0.675	0.225	0.100	41.00	205.00
11	0.450	0.450	0.100	211.00	212.00
12	0.225	0.675	0.100	60.07	202.00
13	-	0.900	0.100	208.33	220.67
14	0.850	-	0.150	1400.00	1809.00
15	0.625	0.225	0.150	214.07	215.00
16	0.425	0.425	0.150	202.00	219.00
17	0.225	0.625	0.150	211.00	225.00
18	-	0.850	0.150	200.00	295.00

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 3.15 เวลาที่เริ่มเกิดฝ้าบนฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ชนิดต่าง ๆ โดยวิธีการทดสอบแบบ Cold fog test และ Hot fog test (ต่อ)

สูตร	สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์เบลนด์			Hot fog test เวลา (วินาที)	Cold fog test เวลา (วินาที)
	PLA	CAB	T80		
19	0.800	-	0.200	∞*	∞**
20	0.400	0.400	0.200	220.00	184.00
21	-	0.800	0.200	199.00	396.67

*, **หมายถึง ไม่ปรากฏฝ้าตลอดช่วงการทดสอบ 3 ชั่วโมง และ 7 วัน ตามลำดับ



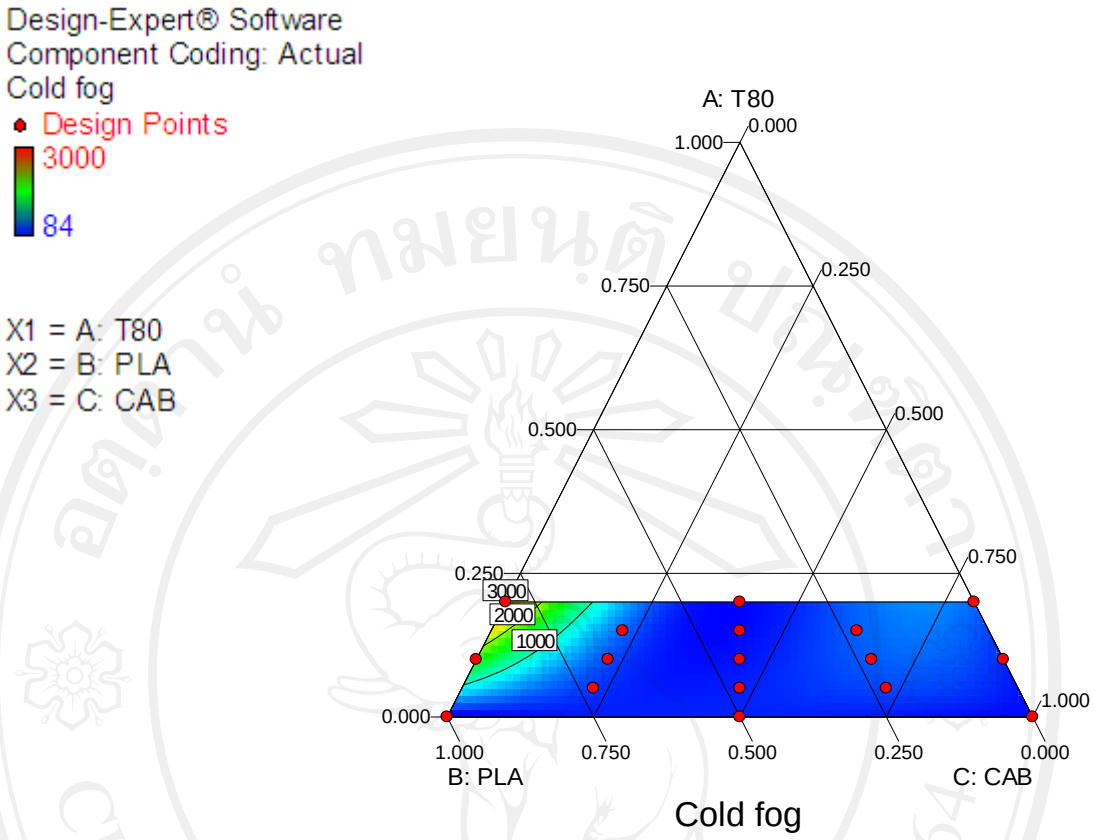
Multiple regression results :

Hot fog time = +33474.59 * A -122.89 * B +125.46 * C

โดยที่ A = T80 B = PLA และ C = CAB (R^2 = 0.9511, p = 0.0002)

รูป 3.33 Contour plot ค่าเวลาที่เริ่มเกิดฝ้าของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB/T80 ที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อทดสอบด้วยวิธี Hot fog Test

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



Multiple regression results :

Cold fog time = +6522.92 * A +106.58 * B + 99.88 * C - 89276.95 * A * B^2 * C

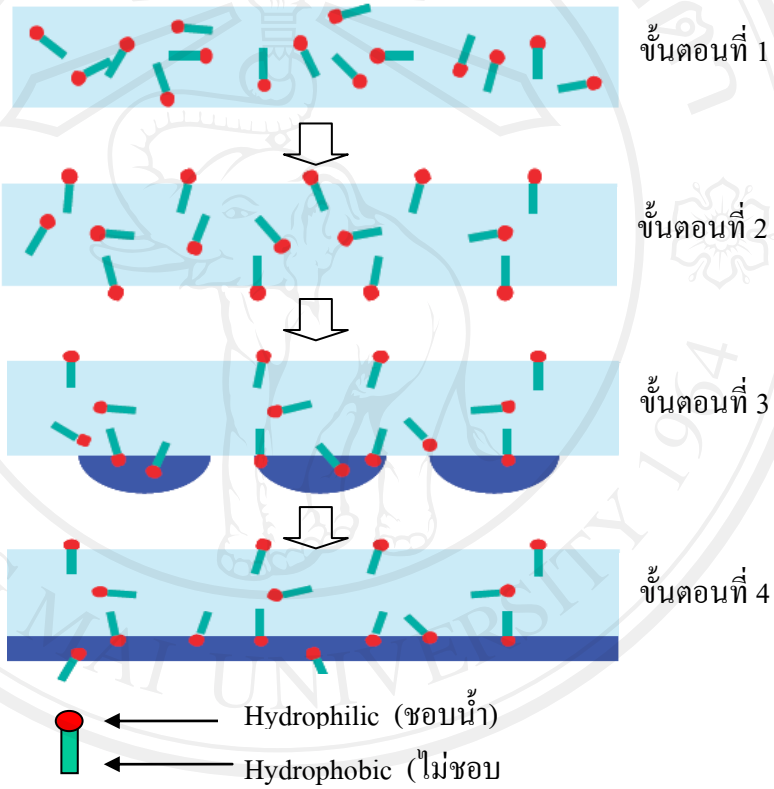
โดยที่ A = T80 B = PLA และ C = CAB (R^2 = 0.9805, p < 0.0001)

รูป 3.34 Contour plot ค่าเวลาที่เริ่มเกิดฝ้าของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB/T80 ที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อทดสอบด้วยวิธี Cold fog Test

จากรูป 3.33 และ 3.34 Contour plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่เริ่มเกิดฝ้าบนฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB/T80 ที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยวิธี Hot fog test และ Cold fog test พบว่าผลของการทดสอบด้วยวิธี Cold fog test ให้ผลที่เหมือนกันกับวิธี Hot fog test แต่เวลาที่เริ่มเกิดฝ้าจะช้ากว่าเท่านั้น ฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ทั้งหมดที่ไม่เติม T80 เกิดฝ้าได้เร็วกว่าฟิล์มที่เติม T80 โดยสามารถชะลอการเกิดฝ้าได้นานขึ้นเมื่อเติม T80 มากขึ้น โดยกระบวนการการต้านการเกิดฝ้าบนฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่มี T80 ตามรูป 3.35 จะเกิดขึ้นโดย T80 ที่กระจายอยู่ในแมทริกซ์ของพอลิเมอร์เบลนด์ (ขั้นตอนที่ 1) จะเกิดการเคลื่อนไปอยู่ที่ผิวฟิล์มและเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ โดยส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) ของ T80 จะเรียงตัวอยู่ที่ผิวของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ จึงทำให้ผิวของฟิล์มมี

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ความชอบน้ำมากขึ้น (Hydrophilicity) (ขั้นตอนที่2) และเมื่อไอน้ำไปเกาะบนฟิล์ม ส่วนของ T80 ที่ชอบน้ำที่เกาะบนผิวของฟิล์มจะละลายในน้ำ ทำให้ค่าลดแรงตึงผิวของฟิล์มลดลง หยดน้ำจะแผ่ออกบนผิวฟิล์มและฝ้าที่เกาะบนฟิล์มก็จะหายไป (ขั้นตอนที่ 3-4) PLA สามารถชะลอการเกิดฝ้าได้นานอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB ที่อัตราส่วนต่างๆ และฟิล์ม CAB ด้วยเหตุที่ว่า CAB มีโครงสร้างขนาดใหญ่ และมีหมู่แทนที่ขนาดใหญ่ โครงสร้างมีความซับซ้อนทำให้ T80 ที่แทรกอยู่ใน CAB สามารถเคลื่อนตัวมาอยู่ที่ผิวได้น้อยและช้ากว่า PLA มาก ดังนั้นฟิล์มพอลิเมอร์ถ้ายิ่งมีองค์ประกอบของ CAB มากขึ้นเท่าไรก็จะยิ่งทำให้ฟิล์มนั้นเกิดฝ้าเร็วขึ้น

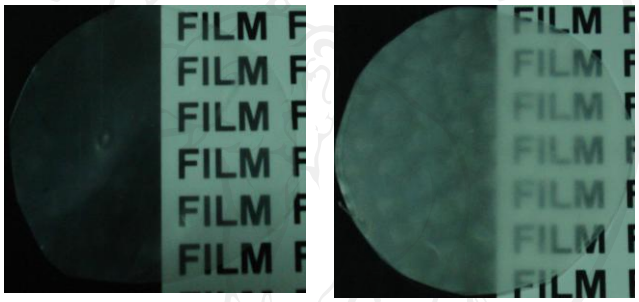


รูป 3.35 กระบวนการในการต้านทานการเกิดหยดน้ำ [77]

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.12 การวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบ T80 ในฟิล์ม

การวิเคราะห์เพื่อตรวจหา T80 ในฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่อัตราส่วนต่างๆ ก่อนและหลังการทดสอบ cold fog test และ hot fog test ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ โดยผลอินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มทั้งหมดเทียบกับอินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม PLA, CAB และ T80 ดังรูป 3.38 และ 3.39 สำหรับพีคของการสั่นสะเทือน (Vibration Peak) ของหมู่ฟังก์ชันต่างๆในฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่อัตราส่วนต่างๆ แสดงในตาราง 12 – 32 ในภาคผนวก ฉ โดยยกตัวอย่างสูตรฟิล์มที่ 19 คือฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB/T80 อัตราส่วน 0.8/0/0.2 ดังตาราง 3.16 พบว่าหลังจากการทดสอบ hot fog test และ cold fog test ยังคงปรากฏพีคของ T80 ที่ความเลขคลื่น 3500.02, 2924.59, 1740.50, 1487.29, 1375.44, 1077.09 และ 777.12 อยู่



(ก) (ข)

รูป 3.36 ลักษณะปรากฏของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB/T80 ที่อัตราส่วน 0.8/0/0.2

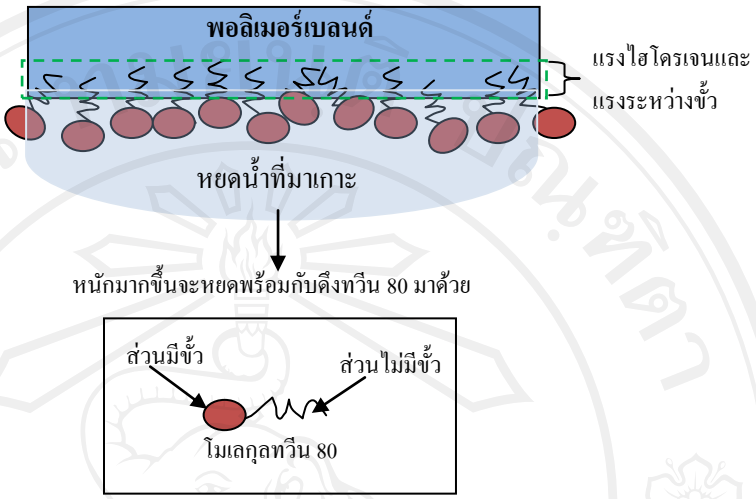
(ก) ก่อนการทดสอบ hot fog test

(ข) หลังผ่านการทดสอบ hot fog test

จากลักษณะปรากฏของที่ฟิล์มหลังผ่านการทดสอบ hot fog test ของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/CAB/T80 ที่อัตราส่วน 0.8/0/0.2 ดังรูป 3.36 พบว่าฟิล์มมีความขุ่นเพิ่มมากขึ้นนั้นอาจเนื่องจากการเกิดผลึกจากการหลุดออกของ T80 จากพอลิเมอร์[72] ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า T80 จึงมีโอกาสที่จะหลุดออกจากพอลิเมอร์ได้ ทั้งนี้เนื่องจากสภาวะในการทดสอบ hot fog test ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการเร่งให้เกิดไอน้ำทำให้ไอน้ำขึ้นไปเกาะบนฟิล์มเกิดฝ้าและหยดน้ำเป็นจำนวนมาก อาจส่งผลให้เกิดการชะล้าง T80 หลุดออกจากผิวฟิล์มบางส่วน เนื่องด้วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์กับ T80 และแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง T80 กับน้ำเป็นแรงไฮโดรเจน (H-bond) และแรงระหว่างขั้ว (Dipole-dipole) เช่นเดียวกัน ดังรูป 3.37 จะเห็นว่าเป็นแรงยึดเหนี่ยวที่มีความแข็งแรงเท่าๆกัน แต่เมื่อมีน้ำมาเกาะเป็นจำนวนมากขึ้นเรื่อยๆ จนหยดน้ำมีขนาดใหญ่ จึงทำให้มีแรงดึงจากน้ำหนักของหยดน้ำมากพอที่จะดึง T80 โดยเฉพาะบริเวณผิวหน้าของพอลิเมอร์ให้

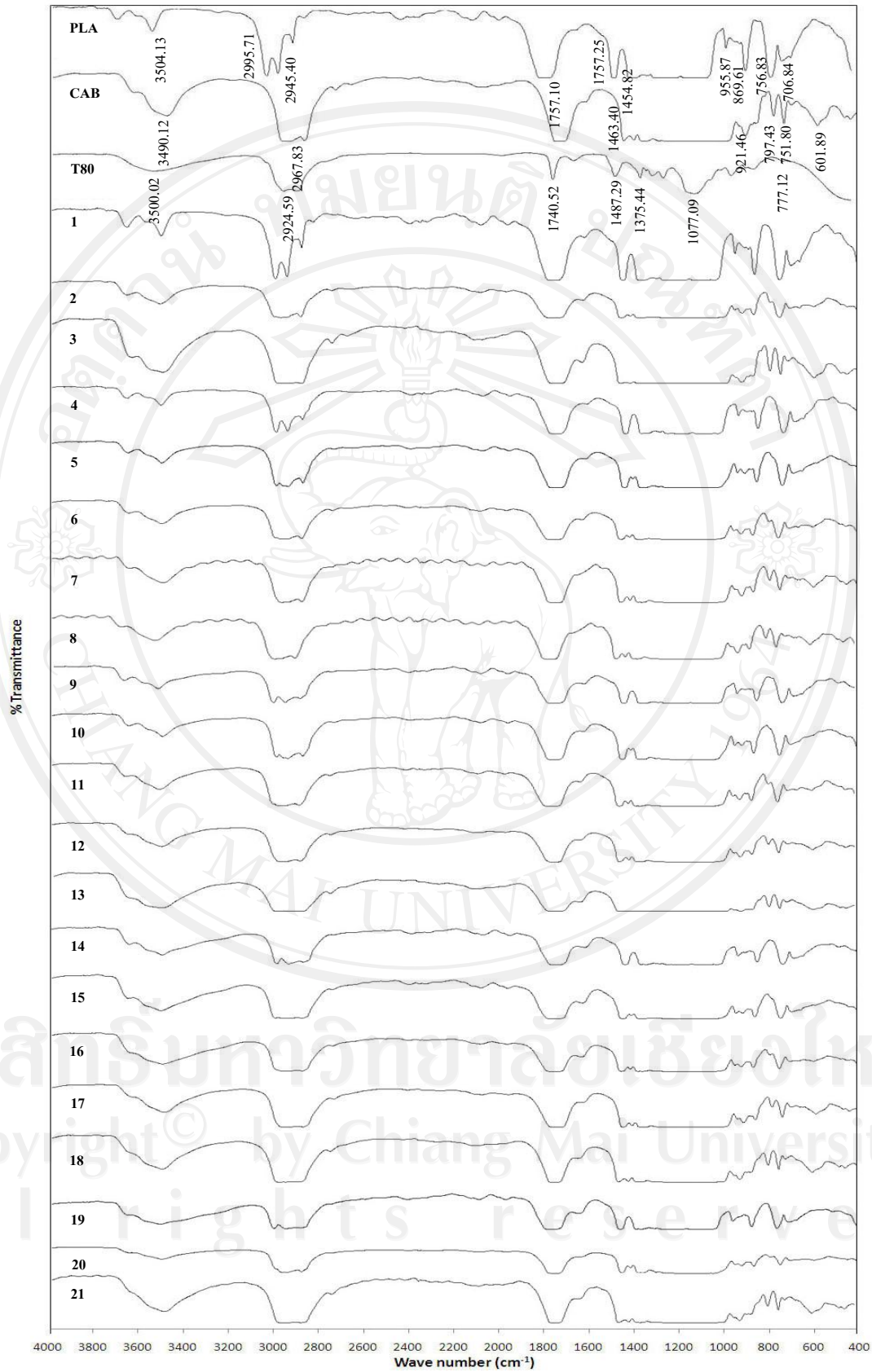
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

หลุดออกจากพอลิเมอร์เบลนด์ได้ นอกจากนั้นความร้อนยังสามารถทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่าง T80 กับพอลิเมอร์เบลนด์ได้อีกเช่นเดียวกัน



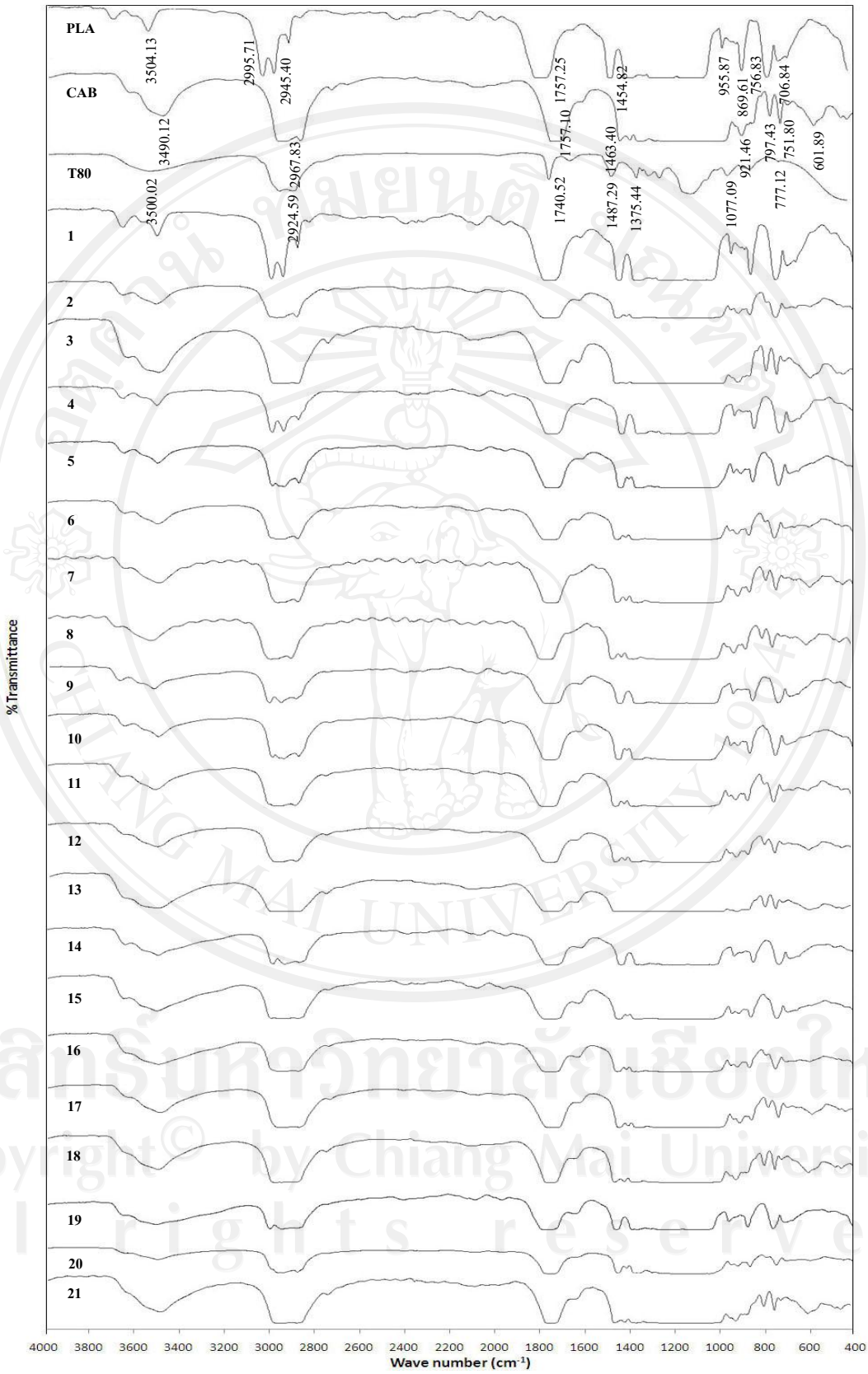
รูป 3.37 ภาพจำลองการหลุดของ T80 จากผิวของฟิล์ม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 3.38 อินฟราเรดสเปกตรัมฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์อัตราส่วนต่างๆ หลังทดสอบ Cold fog test

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 3.39 อินฟราเรดสเปกตรัมฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์อัตราส่วนต่างๆ หลังทดสอบ Hot fog test

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 3.16 พีคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของฟิล์ม PLA/CAB/T80 ที่อัตราส่วน 0.800/0/0.200 ก่อนและหลังทดสอบ Cold fog test และ Hot fog test

ชนิดของการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน (Vibration assignment)	ความยาวคลื่น (Wave number ,cm^{-1})					
	T80	CAB	PLA	ฟิล์มก่อนทดสอบ PLA/CAB/T80	ฟิล์มหลังทดสอบ Cold fog test	ฟิล์มหลังทดสอบ Hot fog test
O-H (stretch)	3500.02 (s)	-	3504.13 (s)	3503.63 (s)	3503.78 (s)	3504.22 (s)
sp^3 C-H (stretch)	2924.59 (s)	-	2995.71 (s)	2995.48 (s)	2995.49 (s)	2994.55 (s)
-COOH (overtone)	-	-	2945.40 (s)			
C=O (stretch)	1740.50 (s)	-	1757.25 (s)	1781.20 (s)	1781.80 (s)	1739.18 (s)
C=C (stretch)	1740.50 (s)	-	-			
-COOH (stretch)	-	-	1454.82 (s)	1455.01 (s)	1454.24 (s)	1454.18 (s)
CH_2 (bending) in plane	1487.29 (w)	-	-	1375.49 (w)	1371.30 (w)	1373.79 (w)
CH_3 (bending) in plane	1375.44 (w)	-	-			
C-O-C (stretch)	1077.09 (s)	-	-			
O-H (bending) out of plane	-	-	955.87 (w)	954.52 (w)	954.56 (w)	954.19 (w)
C-H_2 (rocking)	777.12 (w)	-	-	869.66 (w)	869.75 (w)	870.16 (w)
C-H (bending) out of plane	-	-	869.61 (w) 756.83 (w)	756.44 (w)	756.44 (w)	756.39 (w)
O-H wagging	-	-	706.84 (w)	706.96 (w)	706.95 (w)	707.85 (w)

หมายเหตุ (s) หมายถึง strong peak, (w) หมายถึง weak peak

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved