

รายการอ้างอิง

- [1] วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์. เอกสารประกอบการสอนวิชา การรีไซเคิลพลาสติก. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [2] Mustafa, N. Plastic Waste Management: Disposal, Recycling, and Reuse. New York: Marcel Decker, 1993.
- [3] Paszum, D.; and Spychaj, T. Chemical recycling of poly(ethylene terephthalate). Industrial & Engineering Chemistry Research 36, 4 (1997): 1373-1383.
- [4] Pang, K.; Kotek, R.; and Tonelli, A. Review of conventional and novel polymerization processes for polyesters. Progress in Polymer Science, *in press*.
- [5] ปรีชา พหลเทพ. โพลีเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2536.
- [6] เสาวรจณี ช่วยจุลจิตรี และ อมร เพชรสม. การสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจาก ขวดพลาสติกที่ใช้แล้ว. รายงานผลการวิจัยรัชดาภิเษกสมโภชจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.
- [7] Goodman, I.; and Rhys, J.A. Polyester. Vol.1: Saturated Polyesters. London: American Elsevier, 1965.
- [8] Sasee, F.; and Emig, G. Chemical recycling of polymer materials. Chemical Engineering & Technology 21 (1998): 777-789.
- [9] La Monitia, F.P. Recycling of Plastic Materials. Toronto-Scarborough: Chem Tec, 1993.
- [10] กิตติภูมิ กลับดี และธีรศักดิ์ สรรพศิริ, การปรับปรุงวิธีการผลิตพลาสติกผสมระหว่างพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับพอลิเอทีลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้ว. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- [11] Alessandro, P.; and Amabile, P. Recycled poly(ethylene terephthalate) and its short glass fibres composites: effects of hygrothermal aging on the thermo-mechanical behaviour. Polymer 45 (2004): 7995-8004.
- [12] Palova, S.; and Sérgio, P. Mechanical properties of polypropylene reinforced with recycled-PET fibres. Journal of Materials Processing Technology 143-144 (2003): 517-520.

- [13] Guclu, G.; Kasgoz, A.; Ozbudak, S.; Ozgumus, S.; and Orbay, M. Glycolysis of poly(ethylene terephthalate) wastes in xylene. Journal of Applied Polymer Science 69 (1998): 2311-2319.
- [14] Shukla, S.R.; and Mathur, M.R. Action of alkali on polybutylene terephthalate and polyethylene terephthalate polyesters. Journal of Applied Polymer Science 75 (2000): 1097-1102.
- [15] Ligorati, F.; Aglietti, G.; and Nova, V.E. U.S. Patent 3,776,945, 1973.
- [16] Campanelli, J.R.; Kamal, M.R.; and Cooper, G. Kinetics of glycolysis of Poly(ethylene terephthalate) melts. Journal of Applied Polymer Science 54 (1994): 1731-1740.
- [17] Xi, G.; Lu, M.; and Sun, C. Study on Depolymerization of waste poly(ethylene terephthalate) into monomer of bis(2-hydroxyethyl terephthalate). Polymer Degradation and Stability 87 (2005): 117-120.
- [18] Ghaemy, M.; Mossaddegh, K. Depolymerisation of poly(ethylene terephthalate) fibre wastes using ethylene glycol. Polymer Degradation and Stability 90 (2005) 570-576.
- [19] Ikadious, N.E. Recycling of poly(ethylene terephthalate): Identification of glycolysis products. Journal of Elastomers and Plastics 32, 2 (2000): 140-151.
- [20] Chen, J.W.; and Chen, L.W. The glycolysis of poly(ethylene terephthalate). Journal of Applied Polymer Science 73 (1999): 35-40.
- [21] Baliga, S.; and Wong, W.T. Depolymerization of poly(ethylene terephthalate) recycled from post-consumer soft-drink bottles. Journal of Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry 27 (1989): 2071-2082.
- [22] Kao, C.Y.; Cheng, W.H.; and Wan, B.Z. Investigation of catalytic glycolysis of poly(ethylene terephthalate) by differential scanning calorimetry. Thermochimica Acta 292 (1997): 95-104.
- [23] Vaidya, U.R.; and Nadkarni, V.M. Unsaturated polyesters from PET waste: Kinetics of polycondensation. Journal of Applied Polymer Science 34 (1987): 235-245.

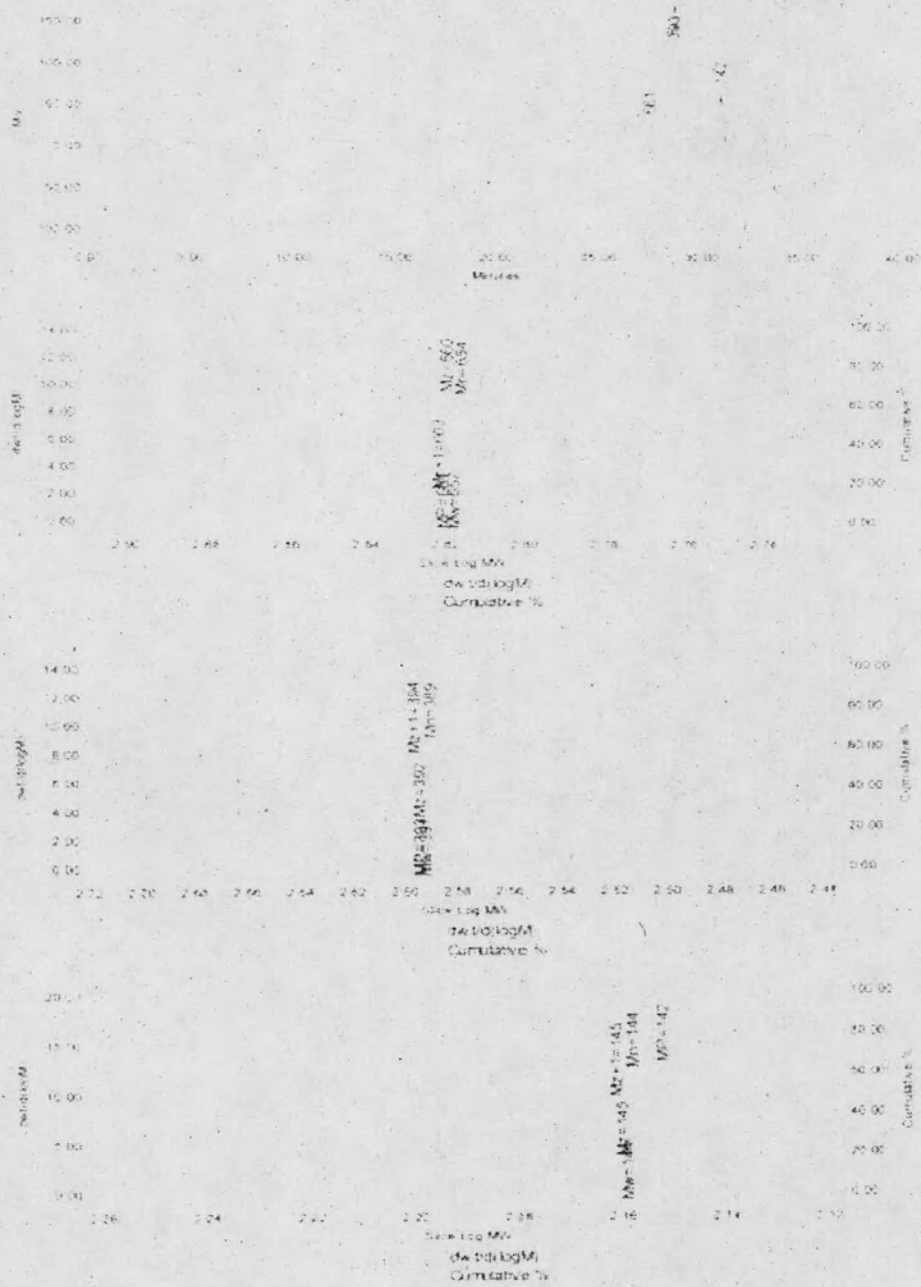
- [24] Pimpan, V.; Sirisook, R.; and Chuayjuljit, S. Synthesis of unsaturated polyester resin from post-consumer PET bottles: Effect of type of glycol on characteristics of unsaturated polyester resin. Journal of Applied Polymer Science 88(3) (2003): 788-792.
- [25] Thavornsetawat, T.; Chuayjuljit, S.; and Pimpan, V. Synthesis of plasticizer for PVC from terephthalic acid based on chemical recycling of post-consumer PET bottles. Journal of Scientific Research, Chulalongkorn University 27(1) (2002): 1-8.
- [26] Saravari, O.; Vessabutr, R.; and Pimpan, V. Synthesis of urethane oil from waste poly(ethylene terephthalate) bottles. Journal of Applied Polymer Science 92(4) (2004): 3040-3045.
- [27] Tomita, K. Studies on the formation of poly(ethylene terephthalate): 1. Propagation of bis(2- hydroxyethyl) terephthalate. Polymer 14 (1973): 50-54.
- [28] Shah, T.H.; Bhatti, J.I.; and Gamlen, G.A. Aspects of the chemistry of poly(ethylene terephthalate): 5. Polymerization of bis(hydroxyethyl) terephthalate by various metallic catalysts. Polymer 25 (1984): 1333-1336.
- [29] ASTM D4274-05 Standard Test Methods for Testing Polyurethane Raw Materials: Determination of Hydroxyl Numbers of Polyols
- [30] ASTM D790 Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials
- [31] ASTM D256 Standard Test Method for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics
- [32] ASTM D2240 Standard Test Method for Rubber Property Durometer Hardness

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ลักษณะเฉพาะและสมบัติของผลผลิตไกลโคไลซ์จากขวดเปิดที่ใช้แล้ว

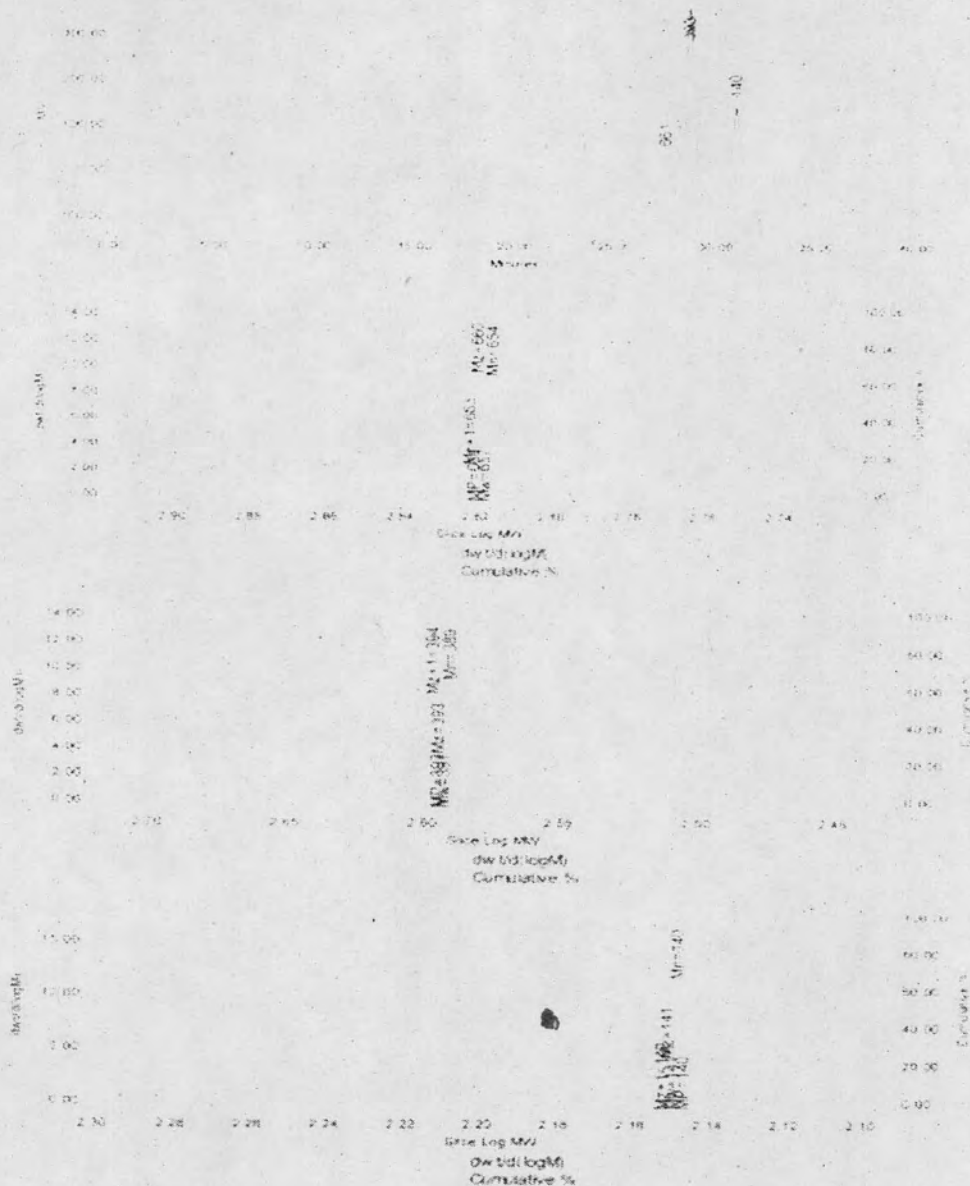
ก.1 น้ำหนักโมเลกุลของผลผลิตไกลโคไลซ์



รูปที่ ก.1.1 น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ใช้เวลาไกลโคไลซิส 1 ชั่วโมง

ตารางที่ ก.1.1 น้ำหนักโมเลกุลของผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ใช้เวลาไกลโคลิซิส 1 ชั่วโมง

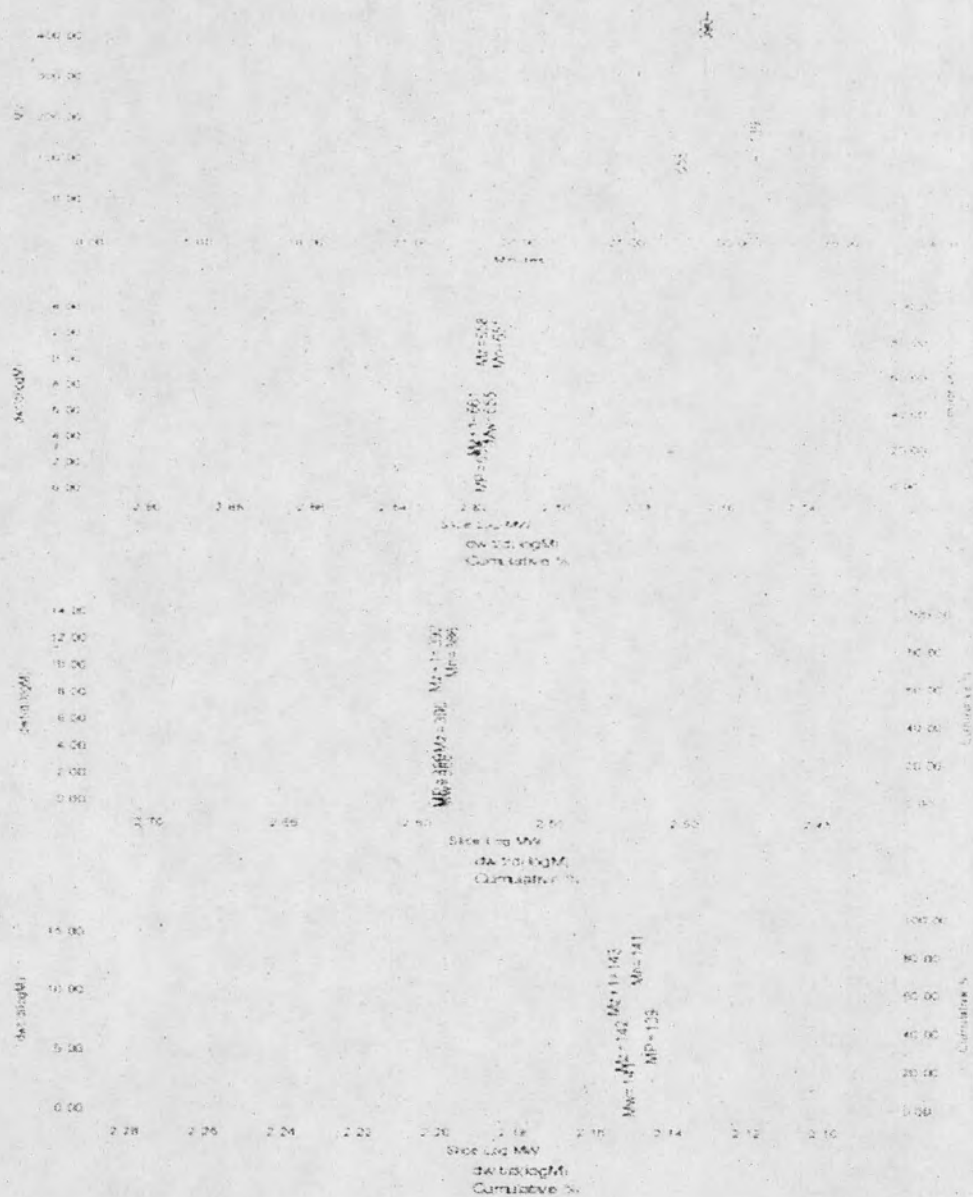
พีค	Retention Time (min)	Adjusted RT (min)	Mn (Daltons)	Mw (Daltons)	Mp (Daltons)	Mz (Daltons)	Mz+1 (Daltons)	Polydispersity
1	27.517	27.517	654	657	661	660	663	1.004470
2	28.688	28.688	389	391	393	392	394	1.005008
3	30.971	30.971	144	144	142	145	145	1.002357



รูปที่ ก.1.2 น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ใช้เวลาไกลโคลิซิส 2 ชั่วโมง

ตารางที่ ก.1.2 น้ำหนักโมเลกุลของผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ใช้เวลาไกลโคลิซิส 2 ชั่วโมง

พีค	Retention Time (min)	Adjusted RT (min)	Mn (Daltons)	Mw (Daltons)	Mp (Daltons)	Mz (Daltons)	Mz+1 (Daltons)	Polydispersity
1	27.518	27.518	654	657	661	660	663	1.004620
2	28.687	28.687	389	391	393	393	394	1.004956
3	31.001	31.001	140	141	140	141	142	1.002880



รูปที่ ก.1.3 น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ใช้เวลาไกลโคไลซิส 3 ชั่วโมง

ตารางที่ ก.1.3 น้ำหนักโมเลกุลของผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ใช้เวลาไกลโคไลซิส 3 ชั่วโมง

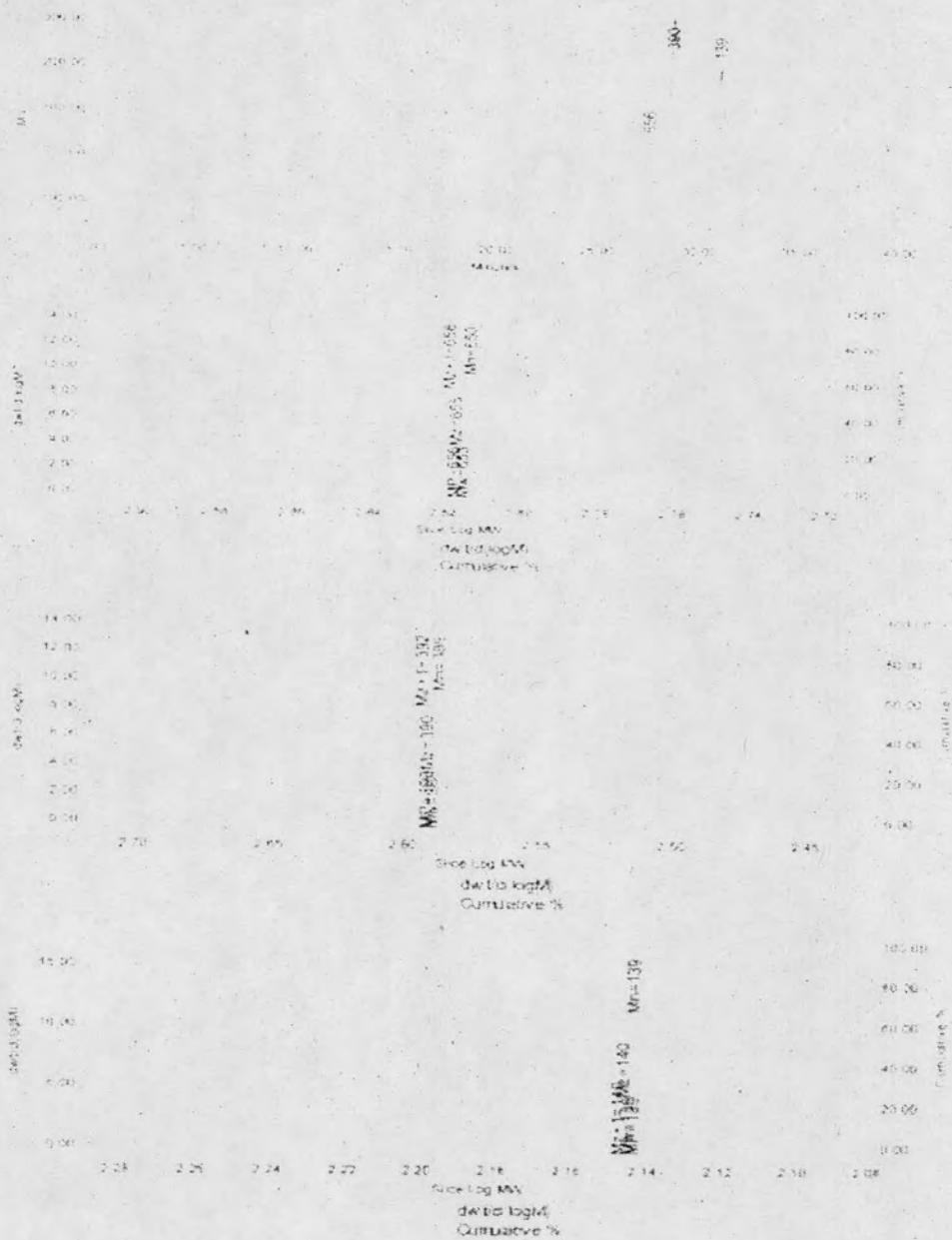
พีค	Retention Time (min)	Adjusted RT (min)	Mn (Daltons)	Mw (Daltons)	Mp (Daltons)	Mz (Daltons)	Mz+1 (Daltons)	Polydispersity
1	27.529	27.529	651	655	658	658	661	1.004786
2	28.700	28.700	386	388	390	390	392	1.004969
3	31.012	31.012	141	141	139	142	143	1.004283



รูปที่ ก.1.4 น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ใช้เวลาไกลโคลิซิส 4 ชั่วโมง

ตารางที่ ก.1.4 น้ำหนักโมเลกุลของผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ใช้เวลาไกลโคลิซิส 4 ชั่วโมง

พิก	Retention Time (min)	Adjusted RT (min)	Mn (Daltons)	Mw (Daltons)	Mp (Daltons)	Mz (Daltons)	Mz+1 (Daltons)	Polydispersity
1	27.518	27.518	655	658	661	661	665	1.004917
2	28.686	28.686	389	391	393	393	395	1.005031
3	31.005	31.005	140	140	140	141	141	1.003329



รูปที่ ก.1.5 น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ใช้เวลา
ไกลโคไลซิส 5 ชั่วโมง

ตารางที่ ก.1.5 น้ำหนักโมเลกุลของผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ใช้เวลาไกลโคไลซิส 5 ชั่วโมง

พิก	Retention Time (min)	Adjusted RT (min)	Mn (Daltons)	Mw (Daltons)	Mp (Daltons)	Mz (Daltons)	Mz+1 (Daltons)	Polydispersity
1	27.534	27.534	650	653	656	655	656	1.004349
2	28.703	28.703	386	388	390	390	392	1.004958
3	31.021	31.021	139	139	139	140	140	1.003108

ก.2 ค่าไฮดรอกซิลของผลผลิตไกลโคไลซ์ส่วนที่ละลายน้ำ

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ 20.1271 กรัม นำมาละลายในน้ำ 1000 มิลลิลิตร

สารละลายฟทาลิกแอนไฮไดรด์

ฟทาลิกแอนไฮไดรด์ = 114.402 กรัม ใน ไพรีดีน = 700 มิลลิลิตร

การทดสอบค่าไฮดรอกซิล

ใช้ สารละลายฟทาลิกแอนไฮไดรด์ 25 มิลลิลิตร และใช้ ไพรีดีน 50 มิลลิลิตร ในการทดลองหนึ่งครั้ง

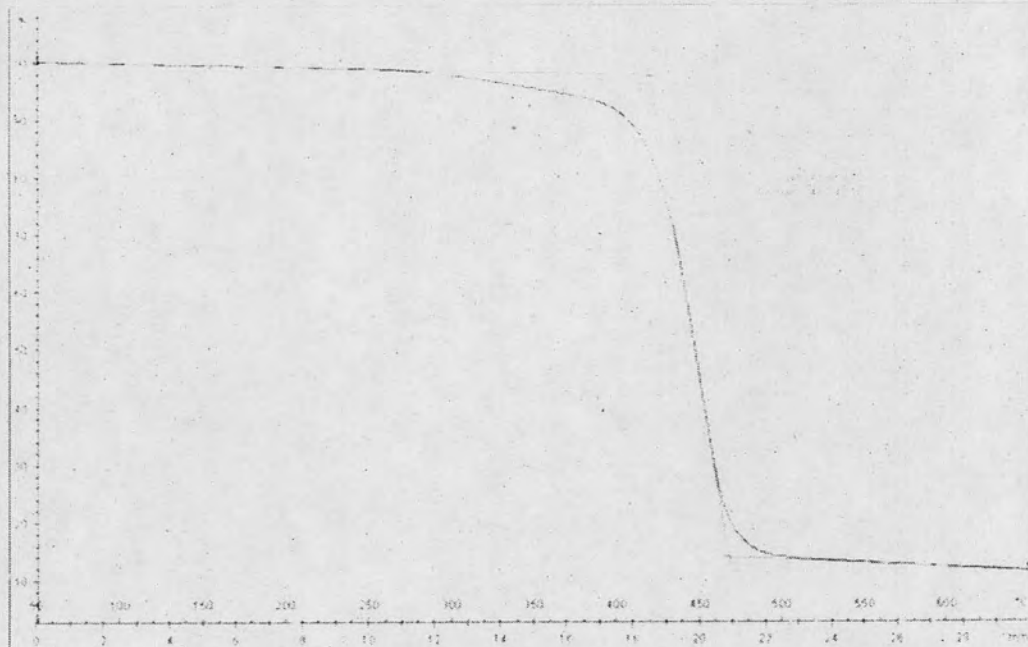
ชนิดผลผลิต ไกลโคไลซ์	ครั้งที่	น้ำหนักสาร ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	ค่าไฮดรอกซิล (มิลลิกรัม KOH/กรัม)	เฉลี่ย
1 ชั่วโมง	1	2.7237	76.3	187.47	<u>191.58</u>
	2	2.7262	75.5	195.68	
2 ชั่วโมง	1	2.7058	73.4	219.29	<u>216.46</u>
	2	2.7107	73.9	213.63	
3 ชั่วโมง	1	2.7131	72.2	231.32	<u>219.87</u>
	2	2.7237	74.3	208.42	
4 ชั่วโมง	1	2.7017	72.8	226.00	<u>224.10</u>
	2	2.7218	73.0	222.19	
5 ชั่วโมง	1	2.7264	69.3	260.53	<u>256.49</u>
	2	2.7120	70.2	252.45	

Normality ของ NaOH = 0.5085

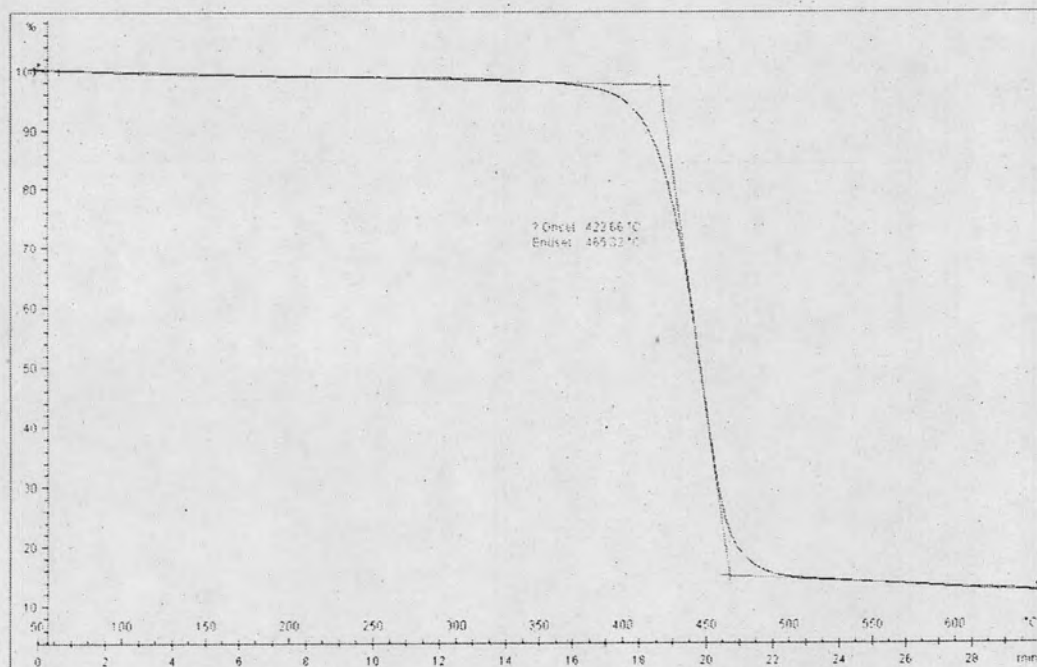
ปริมาณของ NaOH ที่ใช้ในการไทเทรต blank = 94.20 มิลลิลิตร

ลักษณะเฉพาะและสมบัติของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากผลผลิต
ไกลโคไลซ์

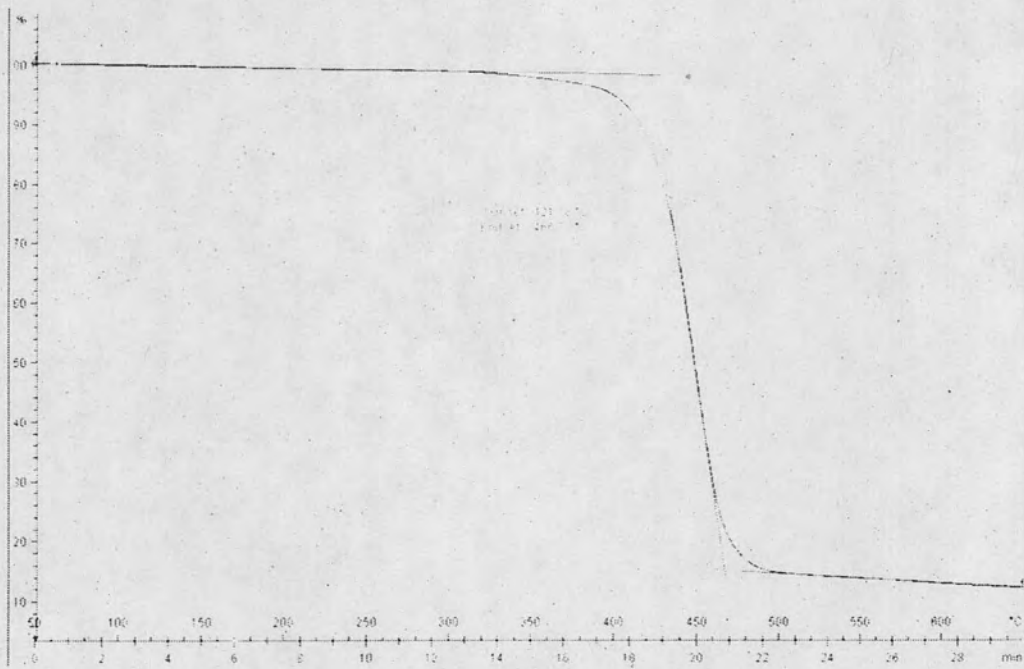
ก.3 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต



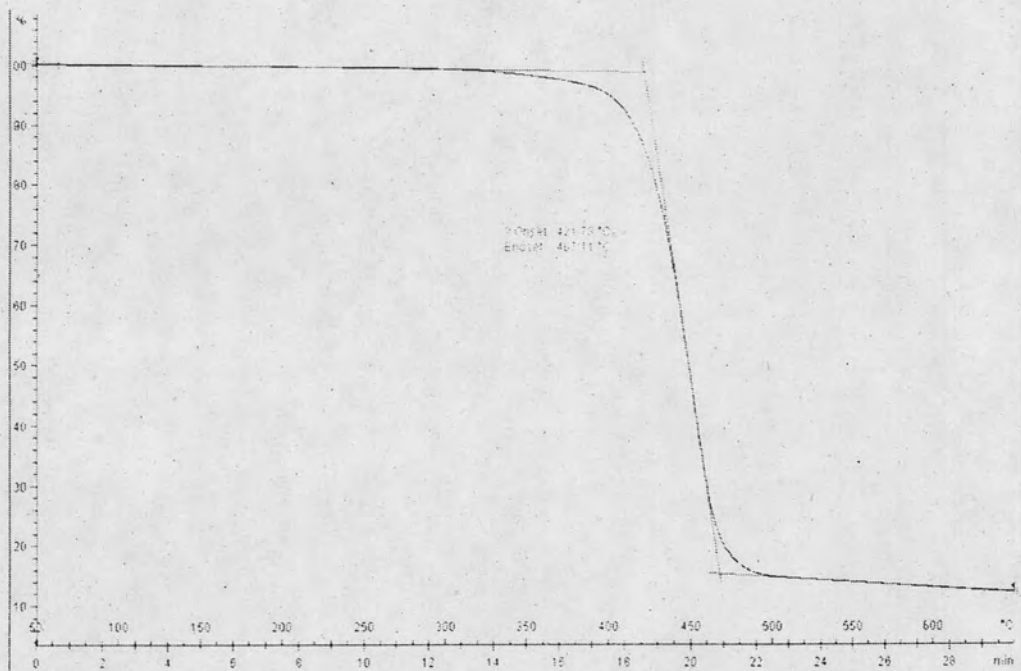
รูปที่ ก.3.1 TGA เทอร์โมแกรมของพีดีที่สังเคราะห์จากผลผลิตไกลโคไลซ์ที่เวลาทำปฏิกิริยา
ไกลโคไลซิส 1 ชั่วโมงและใช้เวลาสังเคราะห์ 2 ชั่วโมง



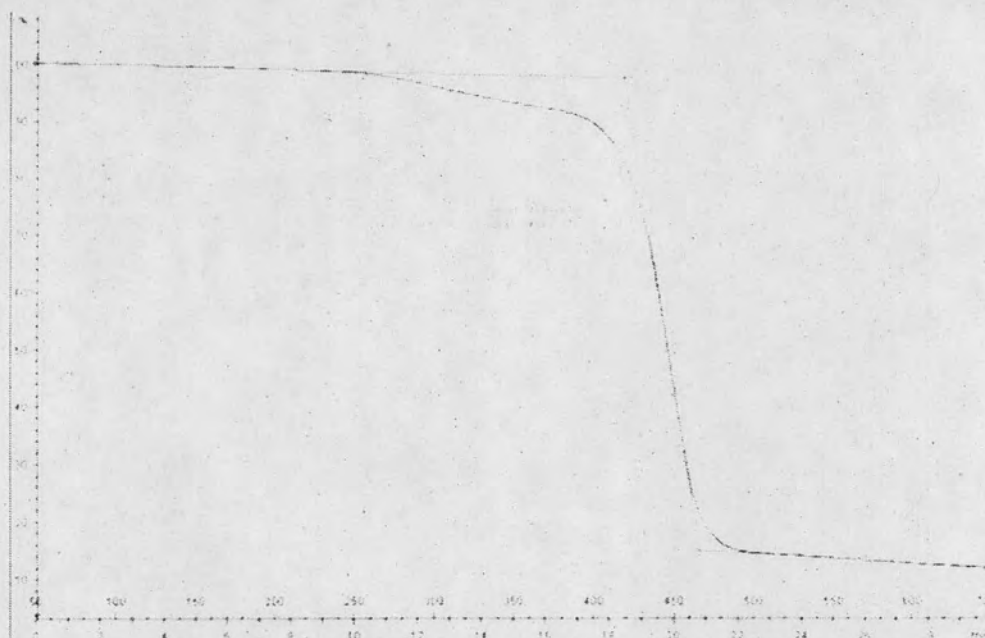
รูปที่ ก.3.2 TGA เทอร์โมแกรมของพีดีที่สังเคราะห์จากผลผลิตไกลโคไลซ์ที่เวลาทำปฏิกิริยา
ไกลโคไลซิส 2 ชั่วโมงและใช้เวลาสังเคราะห์ 2 ชั่วโมง



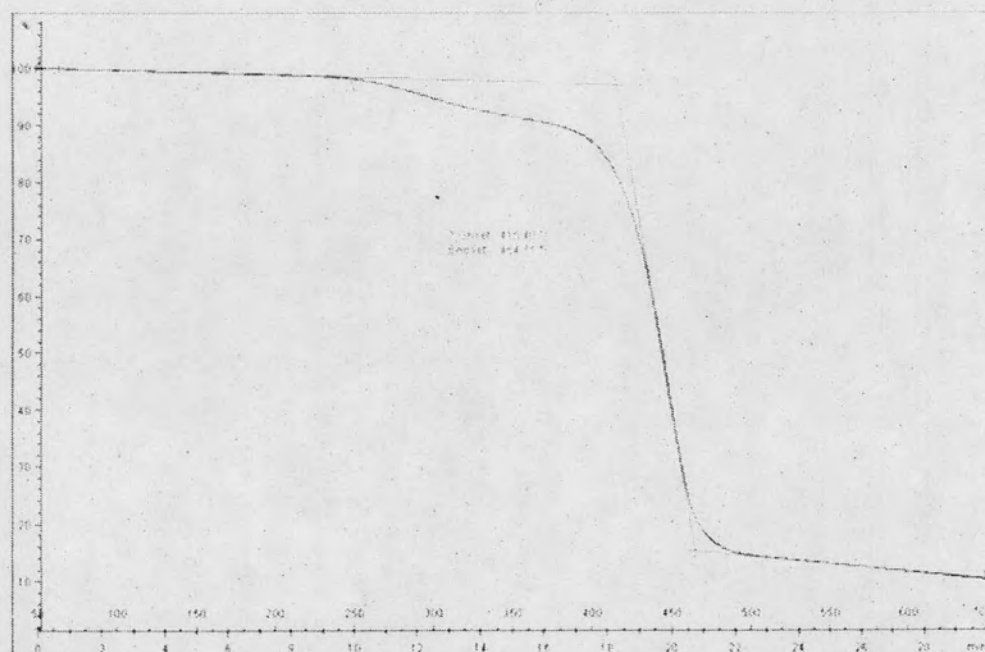
รูปที่ ก.3.3 TGA เทอร์โมแกรมของพีตที่สังเคราะห์จากผลผลิตไกลโคไลซ์ที่เวลาทำปฏิกิริยา
ไกลโคไลซิส 3 ชั่วโมงและใช้เวลาสังเคราะห์ 2 ชั่วโมง



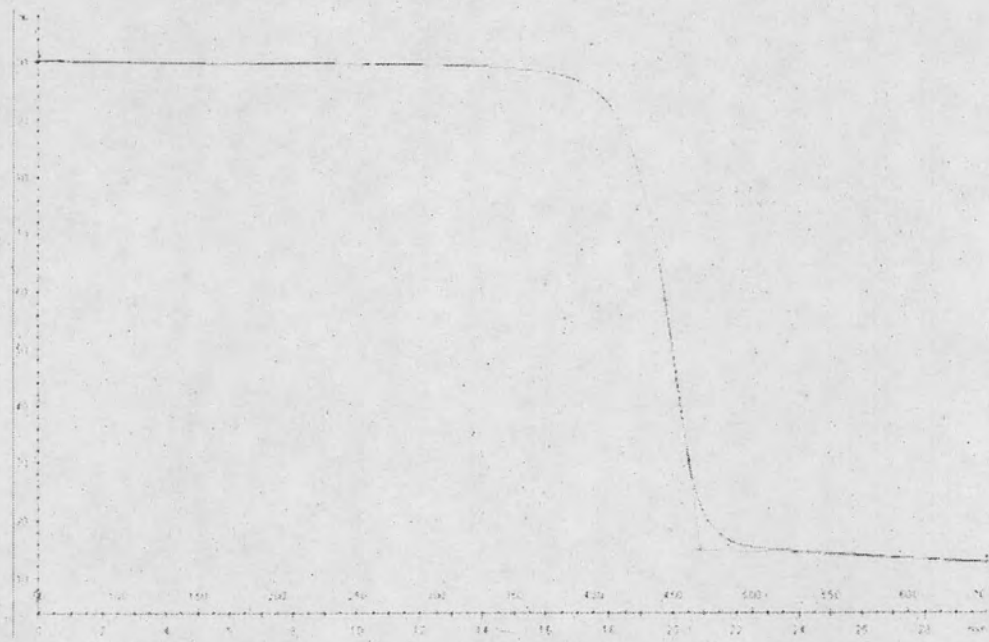
รูปที่ ก.3.4 TGA เทอร์โมแกรมของพีตที่สังเคราะห์จากผลผลิตไกลโคไลซ์ที่เวลาทำปฏิกิริยา
ไกลโคไลซิส 4 ชั่วโมงและใช้เวลาสังเคราะห์ 2 ชั่วโมง



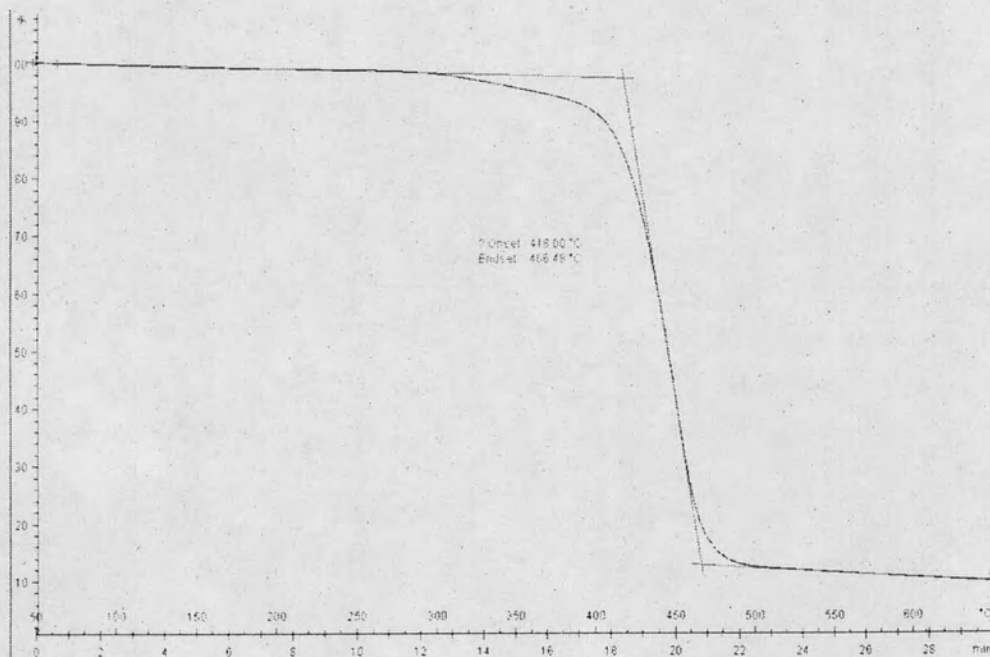
รูปที่ ก.3.5 TGA เทอร์โมแกรมของพีตที่สังเคราะห์จากผลผลิตไกลโคไลซ์ที่เวลาทำปฏิกิริยา
ไกลโคไลซิส 5 ชั่วโมงและใช้เวลาสังเคราะห์ 2 ชั่วโมง



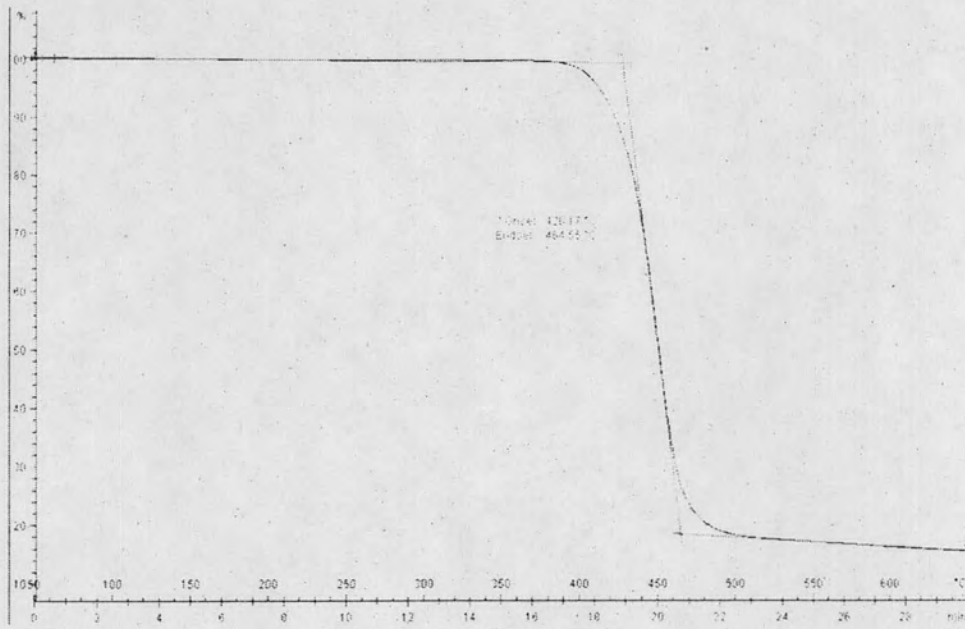
รูปที่ ก.3.6 TGA เทอร์โมแกรมของพีตที่สังเคราะห์จากส่วนที่ละลายน้ำเย็นของผลผลิต
ไกลโคไลซ์ที่เวลาทำปฏิกิริยาไกลโคไลซิส 5 ชั่วโมงและใช้เวลาสังเคราะห์ 2 ชั่วโมง



รูปที่ ก.3.7 TGA เทอร์โมแกรมของเพ็ดที่สังเคราะห์จากส่วนที่ละลายน้ำร้อนของผลผลิต
ไกลโคไลซ์ที่เวลาทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิส 5 ชั่วโมงและใช้เวลาสังเคราะห์ 2 ชั่วโมง



รูปที่ ก.3.8 TGA เทอร์โมแกรมของเพ็ดที่สังเคราะห์จากผลผลิตไกลโคไลซ์ที่เวลาทำปฏิกิริยา
ไกลโคลิซิส 4 ชั่วโมงและใช้เวลาสังเคราะห์ 3 ชั่วโมง



รูปที่ ก.3.9 TGA เทอร์โมแกรมของขดน้ำเพ็ด

ภาคผนวก ข

ลักษณะและสมบัติของแผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต

ข.1 ค่าของการทดสอบความทนแรงกระแทก

สูตรที่	ค่าความทนแรงกระแทก					เฉลี่ย	SD
	1	2	3	4	5		
1	469.04	251.28	264.86	257.89	410.41	330.70	101.78
2	487.50	464.28	271.42	493.50	514.66	446.27	99.38
3	437.64	448.00	463.28	497.78	337.82	436.90	59.88
4	407.56	420.48	338.41	445.28	-	402.93	45.77
5	440.47	423.72	452.38	527.02	215.00	411.72	116.85
6	332.50	280.00	302.94	208.60	239.53	272.71	49.38
7	468.72	497.53	502.5	421.42	-	472.54	37.19
8	448.18	423.98	406.25	-	-	426.14	21.05

ข.2 ค่าของการทดสอบความทนแรงดัดโค้ง

สูตรที่	ค่าความทนแรงดัดโค้ง					เฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5		
1	4.055	3.353	3.623	3.891	3.564	3.6972	0.277
2	4.990	5.082	4.910	5.804	3.873	4.9318	0.694
3	5.549	2.848	5.862	4.468	-	4.6818	1.361
4	2.950	4.257	6.166	3.572	4.367	4.2624	1.208
5	4.275	3.652	4.701	4.125	5.368	4.4242	0.647
6	4.175	2.952	3.401	3.125	4.268	3.4012	0.604
7	4.042	6.782	6.901	7.120	4.368	5.8426	1.504
8	2.891	4.746	3.851	4.202	4.782	4.1124	0.777

ข.3 ค่าของการทดสอบความแข็ง

สูตรที่	ชั้นงาน	ค่า Hardness shore C					เฉลี่ย	SD
		1	2	3	4	5		
1	1	80	74	76	84	80	<u>83</u>	<u>4</u>
	2	81	90	83	84	85		
	3	80	90	85	85	84		
	4	84	85	82	80	85		
	5	88	83	85	87	82		
2	1	85	93	92	82	91.5	<u>90</u>	<u>4</u>
	2	85.5	84.5	93	89	93		
	3	94	94	86	90	95		
	4	90	92.5	94	85	92		
	5	93.5	92	92.5	85	89		
3	1	81.5	83	85	95	88	<u>89</u>	<u>4</u>
	2	83	91	78	92	84		
	3	92	89	85	96.5	87		
	4	95	90	89	90	91		
	5	89.5	90	91.5	91	88		
4	1	86.5	91.5	88.5	91	94.5	<u>90</u>	<u>3</u>
	2	88	88	93	94.5	90.5		
	3	87.5	88.5	86	91.5	84.5		
	4	91.5	92	95.5	92.5	91		
	5	83	87	86.5	87.5	89		
5	1	86	87	80.5	86	87	<u>90</u>	<u>3</u>
	2	89	90	92	91.5	90		
	3	91	91	90.5	93	92		
	4	87	90.5	93.5	92	94		
	5	94	93.5	93	90.5	95		

ข.3 (ต่อ)

สูตรที่	ชั้นงาน	ค่า Hardness shore C					เฉลี่ย	SD
		1	2	3	4	5		
6	1	80.5	82	80	84	89	<u>85</u>	<u>5</u>
	2	84	82	82	84	83		
	3	92	96	83	94	93		
	4	87	85	88	88	91		
	5	79	77	81	85	82		
7	1	89	92	93	95	92	<u>90</u>	<u>3</u>
	2	90	89.5	91	92	88		
	3	87.5	90	90.5	91	91		
	4	90.5	88.5	88	93	95		
	5	84.5	81.5	85	93.5	91.5		
8	1	90	89.5	90	93	93	<u>90</u>	<u>3</u>
	2	86.5	92	88	94.5	89.5		
	3	89	92	91.5	95	94.5		
	4	86	87	93.5	92	88		
	5	85	86	84	89	87		

ภาคผนวก ค

ค.1 การคำนวณเปอร์เซ็นต์ส่วนประกอบของผลผลิตไกลโคไลซ์

$$\text{เปอร์เซ็นต์ Yield ของ BHET monomer (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักของ BHET มอนอเมอร์ที่ไกลโคไลซ์ได้}}{\text{น้ำหนักของ BHET ที่คิดได้ตามทฤษฎี}} \times 100 \quad (\text{ค.1ก})$$

$$\text{ปริมาณโพลิโกเมอร์(\%)} = \frac{\text{น้ำหนักของโพลิโกเมอร์ที่ไกลโคไลซ์ได้}}{\text{น้ำหนักทั้งหมดของมอนอเมอร์และโพลิโกเมอร์รวมกัน}} \times 100 \quad (\text{ค.1ข})$$

ค.2 การคำนวณค่าไฮดรอกซิล

ค่าไฮดรอกซิลสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\text{ค่าไฮดรอกซิล (มิลลิกรัม KOH/กรัม)} = \frac{(B-A) N \times 56.1}{W}$$

เมื่อ B คือ ปริมาตรของสารละลาย NaOH (มิลลิลิตร) ที่ใช้ในการไทเทรต blank

A คือ ปริมาตรของสารละลาย NaOH (มิลลิลิตร) ที่ใช้ในการไทเทรตสารตัวอย่าง

N คือ ความเข้มข้น (normality) ของสารละลาย NaOH

W คือ น้ำหนักของสารตัวอย่าง (กรัม)

โดยที่ ความเข้มข้น (Normality) ของสารละลาย NaOH สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{Normality} = \frac{W}{V \times 0.2042}$$

เมื่อ W คือ น้ำหนักของ $\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$ (กรัม)

V คือ ปริมาตรของสารละลาย NaOH (มิลลิลิตร) ที่ใช้ในการไทเทรต $\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพิพัฒน์ จันทิวาเจริญ เกิดเมื่อวันที่ 2 มีนาคม พ.ศ. 2526 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ จากภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2547 หลังจากนั้น เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อภาคต้นในปีการศึกษา 2548 และสำเร็จการศึกษาในภาคปลายของปีการศึกษา 2549 รวมระยะเวลาในการศึกษา 2 ปี