บทที่ 4

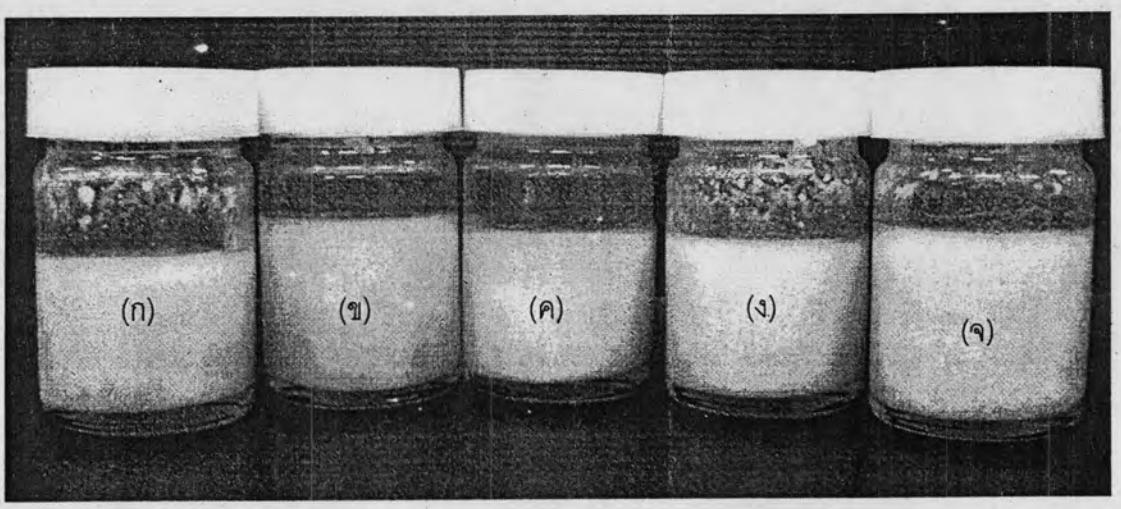
ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 ลักษณะเฉพาะและสมบัติของผลผลิตไกลโคไลซ์จากขวดเพ็ตที่ใช้แล้ว

4.1.1 ลักษณะของผลผลิตไกลโคไลซ์

จากการนำขวดน้ำดื่มเพ็ตที่ผ่านการบดด้วยเครื่องพัลวาไรเซอร์ ดังรูปที่ 4.1 มาทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิสกับเอทิลีนไกลคอล ได้ผลผลิตไกลโคไลซ์ที่มีลักษณะเป็นของเหลวหนืด สีเขียวอมฟ้า ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งสีดังกล่าวอาจเกิดจากสารเติมแต่งที่ผสมในขั้นตอนการผลิตขวดน้ำดื่ม

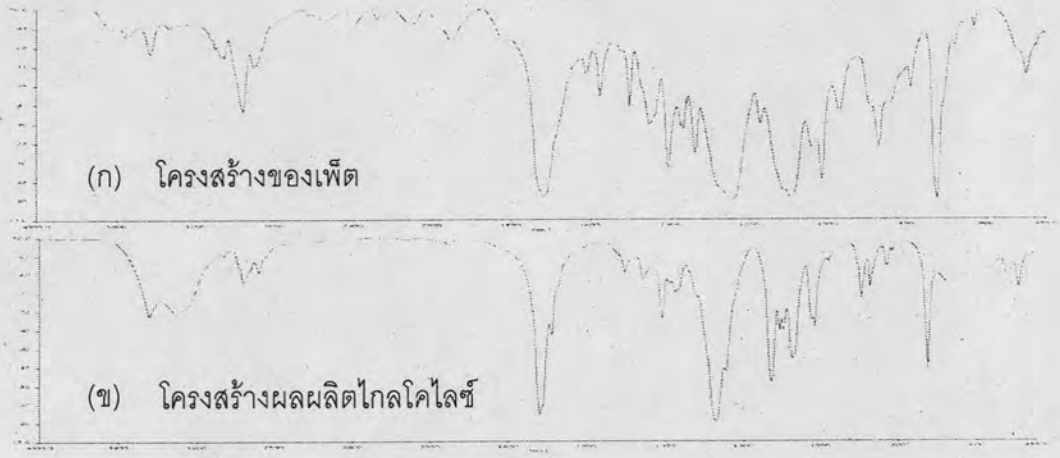
รูปที่ 4.1 ขวดเพ็ตที่ผ่านการบดแล้ว



รูปที่ 4.2 ผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไกลโคลิซิสของขวดเพ็ต โดยใช้เวลา 1 (ก) 2 (ข) 3 (ค) 4 (ง) และ 5 (จ) ชั่วโมง

4.1.2 โครงสร้างทางเคมีของผลผลิตไกลโคไลซ์

เมื่อนำผลผลิตไกลโคไลซ์และขวดเพ็ตไปวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีได้สเปตรัมดังรูปที่ 4.3 ซึ่งพบตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญดังแสดงในตารางที่ 4.1



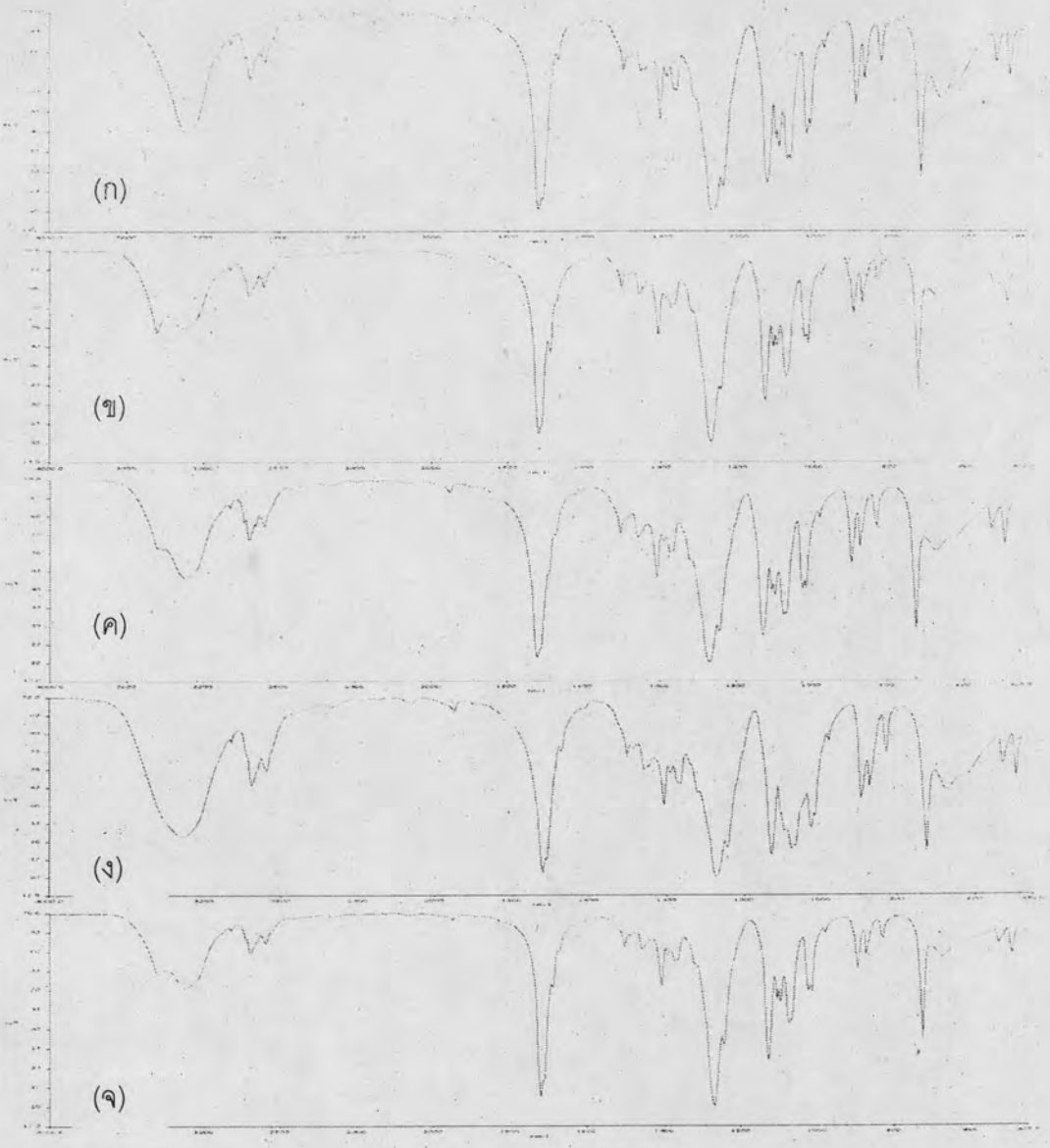
รูปที่ 4.3 FT-IR สเปกตรัมเปรียบเทียบระหว่าง ขวดเพ็ต (ก) และ ผลผลิตไกลโคไลซ์ (ข)

ตารางที่ 4.1 ตำแหน่งของพีกสำคัญที่พบในสเปกตรัมของผลผลิตไกลโคไลซ์และขวดเพ็ต

ตำแหน่งพีก ($ซม^{-1}$)	รูปแบบการสั่น
3200-3400 $ซม^{-1}$	O-H ยืดของหมู่ไฮดรอกซิล
2800-3000 $ซม^{-1}$	C-H ยืดของ CH_2
1600-1800 $ซม^{-1}$	C=O ยืดของหมู่เอสเทอร์
1200-1400 $ซม^{-1}$	C-O-C ยืด
1000-1100 $ซม^{-1}$	C-OH ยืด
700-800 $ซม^{-1}$	แอโรแมติก

เมื่อเปรียบเทียบ FT-IR สเปกตรัมของผลผลิตไกลโคไลซ์กับ FT-IR สเปกตรัมของขวดเพ็ต ดังแสดงในรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า FT-IR สเปกตรัมของสารทั้งสองมีความแตกต่างกันเล็กน้อย โดยพบพีกที่ช่วงตำแหน่ง 3200-3600 $ซม^{-1}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งของไฮดรอกซิลในผลผลิตไกลโคไลซ์อย่างชัดเจน แต่ในสเปกตรัมของขวดเพ็ตมีความเข้มของพีกดังกล่าวน้อยมาก สำหรับพีกที่ตำแหน่งสำคัญอื่นๆของผลผลิตไกลโคไลซ์กับขวดเพ็ตพบว่ามีความคล้ายคลึงกันกล่าวคือสารทั้งสองแสดงพีกที่ตำแหน่ง 1600-1800 $ซม^{-1}$ ของเอสเทอร์ พีกที่ตำแหน่ง 1200-1400 $ซม^{-1}$ แสดงถึงพันธะ –C-O-C- ของหมู่เอสเทอร์ และพีกที่ตำแหน่ง 700-800 $ซม^{-1}$ แสดงถึงโครงสร้างเป็นวง

แหวนแอโรแมติก ซึ่งที่กล่าวมานี้ชี้ให้เห็นว่า ผลผลิตไกลโคไลซ์เป็นส่วนประกอบของโมเลกุลของเพ็ตที่ถูกตัดออกเป็นโมเลกุลขนาดเล็ก โดยมีหมู่ไฮดรอกซิลที่ปลายโมเลกุล นอกจากนี้เมื่อนำผลผลิตไกลโคไลซ์มาทดสอบความสามารถในการละลายในน้ำและเอทานอล พบว่าผลผลิตไกลโคไลซ์สามารถละลายในน้ำได้บางส่วนและละลายในเอทานอลได้ดี เป็นการยืนยันว่าโครงสร้างของผลผลิตไกลโคไลซ์ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล



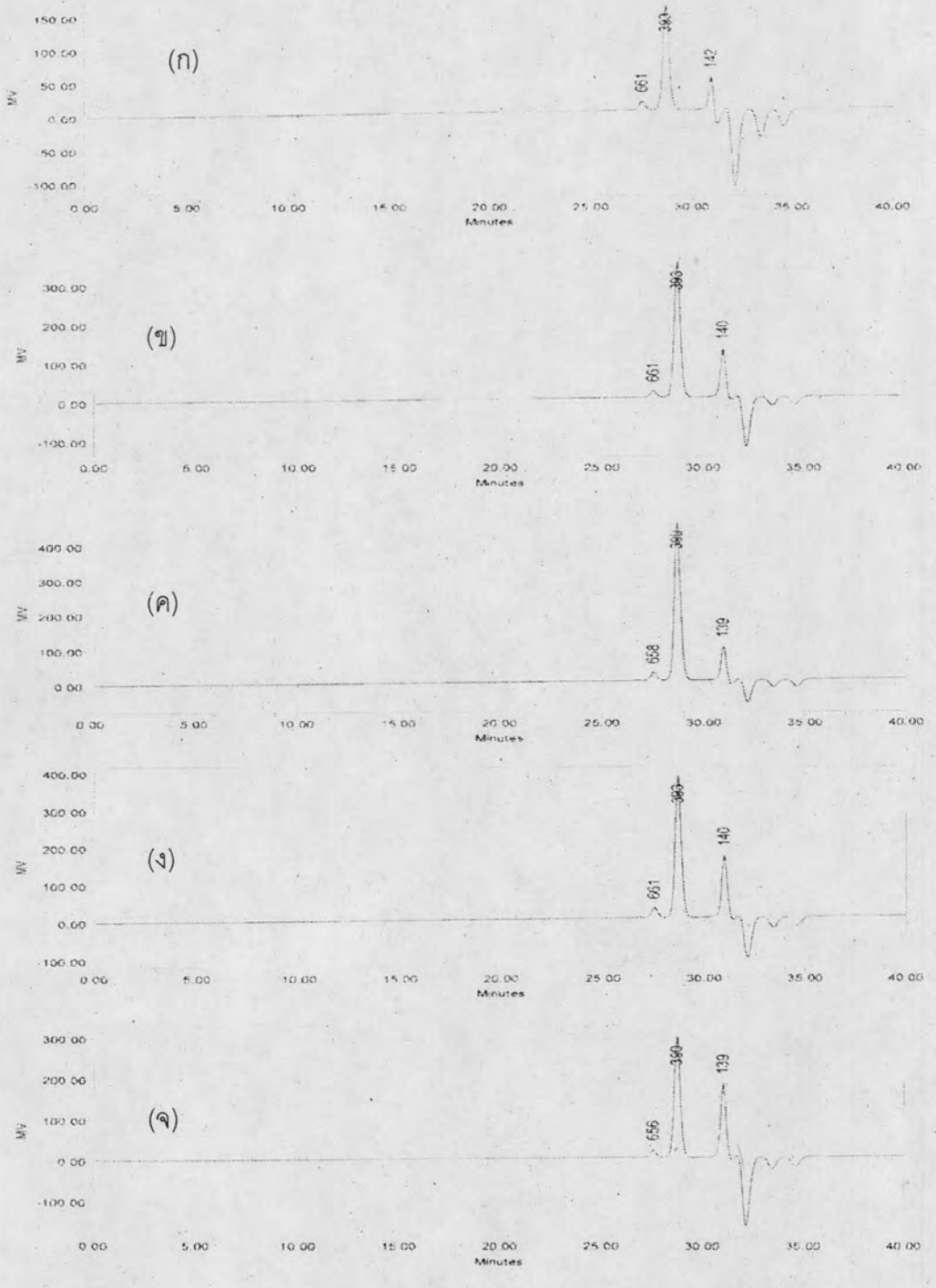
รูปที่ 4.4 FT-IR สเปกตรัมของผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไกลโคลิซิสโดยใช้เวลา 1 (ก) 2 (ข) 3 (ค) 4 (ง) และ 5 (จ) ชั่วโมง

เมื่อนำผลผลิตไกลโคไลซ์ที่เวลาทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิสเป็น 1 ถึง 5 ชั่วโมงมาตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน ดังรูปที่ 4.4 พบว่า หมู่ฟังก์ชันในสเปกตรัมของผลผลิตไกลโคไลซ์แต่ละสูตรมีตำแหน่งพีกเหมือนกัน แต่มีลักษณะและความเข้มของพีกที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ตำแหน่ง

3200-3600 ซม$^{-1}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิล เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิสแตกต่างกันพบว่าผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ได้แสดงลักษณะของแถบดูดกลืนในช่วงพีกนี้แตกต่างกัน ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่า ผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไกลโคลิซิส โดยใช้เวลาที่ต่างกันนั้นเป็นของผสมของสารที่มีหมู่ไฮดรอกซิล แต่อาจมีโครงสร้างทางเคมีและจำนวนที่แตกต่างกันออกไป อีกประการหนึ่งเป็นผลมาจากปริมาณของเอทิลีนไกลคอลที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาที่เหลืออยู่ในผลผลิตไกลโคไลซ์ แต่ทั้งนี้สามารถกำจัดเอทิลีนไกลคอลส่วนเกินได้โดยการกรองและทำการอบให้แห้ง

4.1.3 น้ำหนักโมเลกุลของผลผลิตไกลโคไลซ์

เมื่อนำผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไกลโคลิซิสโดยใช้เวลา 1 2 3 4 และ 5 ชั่วโมง ไปวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิคเจลเพอมีเอชันโครมาโทกราฟี (GPC) ได้โครมาโทแกรม ตามรูปที่ 4.5 ซึ่งแสดงพีกทั้งหมด 3 พีก แต่ละพีกบอกถึงค่าน้ำหนักโมเลกุลของแต่ละองค์ประกอบที่แตกต่างกันไป ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.5 GPC โครมาโทแกรมของผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไกลโคลิซิส โดยใช้เวลา 1 (ก) 2 (ข) 3 (ค) 4 (ง) และ 5 (จ) ชั่วโมง

I25207891

ตารางที่ 4.2 น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลของผลผลิตไกลโคไลซ์

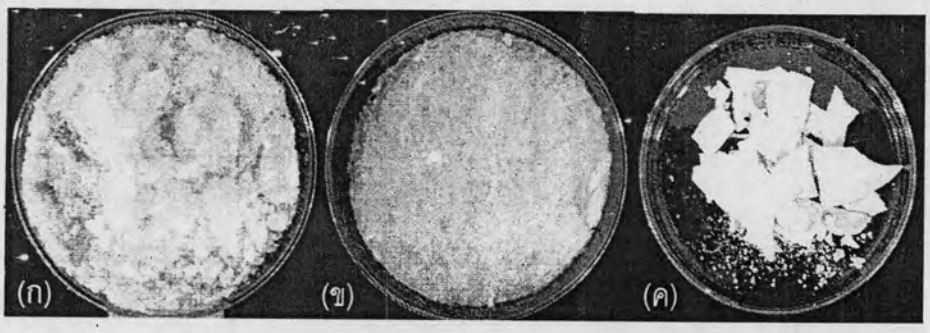
สูตร	พีก	M_p*	$\overline{M}_n$	$\overline{M}_w$	Polydispersity
1	1	661	654	657	1.0045
	2	393	389	391	1.0050
	3	142	144	144	1.0024
2	1	661	654	657	1.0046
	2	393	389	391	1.0050
	3	140	140	141	1.0029
3	1	658	651	655	1.0048
	2	390	386	388	1.0050
	3	139	141	141	1.0043
4	1	661	655	658	1.0049
	2	393	389	391	1.0050
	3	140	140	140	1.0033
5	1	656	650	653	1.0043
	2	390	386	388	1.0050
	3	139	139	139	1.0031

* M_p คือ ค่าน้ำหนักโมเลกุลที่ปรากฏบนพีกในโครมาโทแกรม

จากตารางที่ 4.2 พบว่า ผลผลิตไกลโคไลซ์ทั้ง 5 สูตร แสดงการปรากฏของสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำทั้งหมด 3 กลุ่ม กล่าวคือ พีกที่แสดงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวนมีค่าอยู่ในช่วง 650-655 อาจจะเป็นเตตระเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 830 ผสมกับไตรเมอร์ของ บิส(2-ไฮดรอกซีเอทิล)เทเรฟทาเลต [bis(2-hydroxyethyl)terephthalate; BHET] ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 638 ส่วนพีกที่แสดงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวนมีค่าอยู่ในช่วง 386-389 อาจจะเป็นไดเมอร์และมอนอเมอร์ของ BHET ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 446 และ 254 ตามลำดับ และพีกที่แสดงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวนเท่ากับ 139-144 อาจจะเป็นสารอื่นๆที่เกิดจากปฏิกิริยาข้างเดียวหรือสิ่งแปลกปลอมที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ หรือตัวเร่งปฏิกิริยา หรือเอทิลีนไกลคอลที่เหลืออยู่ในผลผลิตไกลโคไลซ์

4.1.4 องค์ประกอบของผลผลิตไกลโคไลซ์

ในการศึกษาถึงองค์ประกอบของผลผลิตไกลโคไลซ์ว่ามีผลอย่างไรต่อการนำไปสังเคราะห์เป็นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตต่อไปนั้น จำเป็นต้องนำผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไกลโคลิซิสโดยใช้เวลาต่างๆ มาหาองค์ประกอบและปริมาณของแต่ละองค์ประกอบ โดย ใช้น้ำกลั่นเย็น และน้ำกลั่นร้อน ณ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นตัวทำละลายในการจำแนกองค์ประกอบต่างๆในผลผลิตไกลโคไลซ์ พบว่าองค์ประกอบที่ละลายในน้ำกลั่นเย็นน่าจะเป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลเล็กๆโดยมีลักษณะเป็นผลึกสีขาว ดังรูปที่ 4.6(ก) เนื่องจากหมู่ปลายทั้งสองข้างของโมเลกุลเล็กๆ เป็นหมู่ไฮดรอกซิล ทำให้มีความเป็นขั้วสูงสามารถละลายน้ำได้ แต่สารประกอบที่มีโมเลกุลใหญ่ขึ้นจะมีส่วนที่ไม่ละลายน้ำมากขึ้น แต่ยังมีหมู่ปลายเป็นไฮดรอกซิลเท่าเดิม จึงทำให้ความสามารถในการละลายน้ำลดลงโดยไม่ละลายในน้ำกลั่นเย็น แต่ยังสามารถละลายได้ในน้ำกลั่นร้อนอุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อกรองและอบแห้งมีลักษณะเป็นผลึกเรียวยาวสีขาวโดยไม่มีสารเติมแต่ง เช่น ผงสีที่ใส่ลงในขวดเพ็ตตกตะกอนออกมาด้วย ดังรูปที่ 4.6(ข) และสารประกอบที่มีโมเลกุลใหญ่มากขึ้น จะไม่สามารถละลายในน้ำกลั่นร้อน เนื่องจากมีส่วนของวงแอโรแมติกมากขึ้น ทำให้ความเป็นขั้วลดลงจนไม่สามารถละลายน้ำกลั่นร้อนได้ โดยส่วนนี้มีลักษณะเป็นผงสีฟ้าจับตัวกันเป็นก้อน ซึ่งสีฟ้าน่าจะเกิดจากสารเติมแต่งที่ผสมในกระบวนการผลิตของขวดน้ำดื่ม ดังรูปที่ 4.6(ค)



รูปที่ 4.6 ลักษณะองค์ประกอบของผลผลิตไกลโคไลซ์ ส่วนที่ละลายน้ำเย็น (ก) ส่วนที่ละลายน้ำร้อน (ข) และส่วนที่ไม่ละลายน้ำ (ค)

4.1.4.1 ปริมาณขององค์ประกอบในผลผลิตไกลโคไลซ์

ตารางที่ 4.3 ปริมาณขององค์ประกอบในผลผลิตไกลโคไลซ์

เวลาในการทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิส (ชั่วโมง)	ส่วนที่ละลายน้ำ				ส่วนที่ไม่ละลายน้ำ (%)
	น้ำเย็น* (%)	น้ำร้อน** (%)	อัตราส่วนผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ละลายในน้ำเย็นต่อน้ำร้อน	รวม	
1	17.24	50.23	0.34:1	67.47	9.24
2	17.47	56.31	0.31:1	73.79	7.94
3	18.72	52.71	0.36:1	71.43	7.88
4	22.08	49.66	0.45:1	71.74	7.33
5	27.06	44.98	0.60:1	72.04	7.23

* เปอร์เซ็นต์ปริมาณส่วนที่ละลายน้ำเย็นคำนวณจากสูตร ค.1ก ในภาคผนวก ค.1

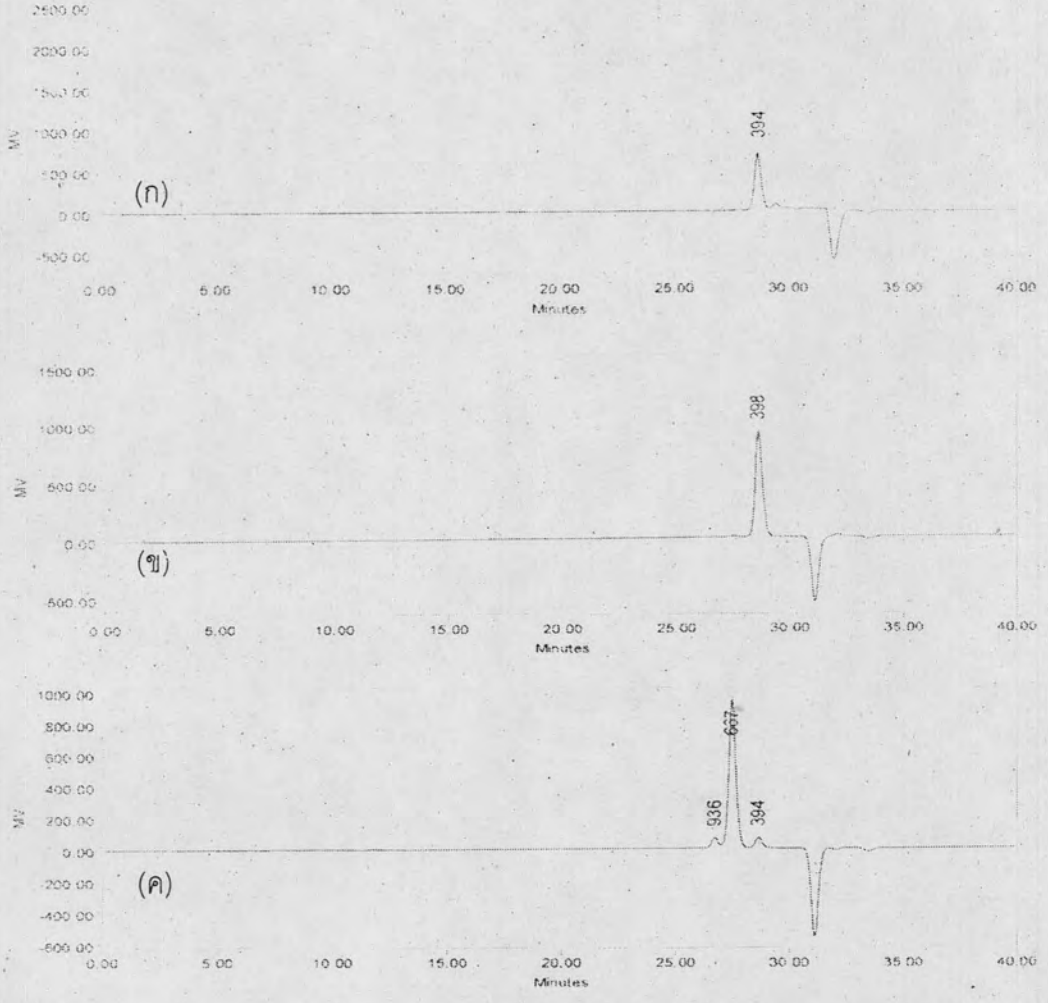
** เปอร์เซ็นต์ปริมาณส่วนที่ละลายน้ำร้อนคำนวณจากสูตร ค.1ข ในภาคผนวก ค.1

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้เวลาทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิส 2 3 4 และ 5 ชั่วโมง มีปริมาณส่วนที่ละลายน้ำใกล้เคียงกัน และมากกว่าปริมาณส่วนที่ละลายน้ำของการทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิส 1 ชั่วโมง แต่เห็นได้ว่าเมื่อใช้เวลาทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิส 3 4 และ 5 ชั่วโมง ส่วนที่ละลายในน้ำเย็นมีปริมาณมากขึ้น และส่วนที่ละลายน้ำร้อนมีปริมาณลดลง เมื่อใช้เวลาทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิสมากขึ้น แต่เมื่อใช้เวลาทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิส มากกว่า 2 ชั่วโมงขึ้นไป การทำปฏิกิริยาของเอทิลีนไกลคอลจะเป็นการเข้าทำปฏิกิริยาส่วนที่ละลายน้ำร้อนเพิ่มขึ้น ทำให้ส่วนที่ละลายในน้ำร้อนมีขนาดเล็กลงกลายเป็นส่วนที่สามารถละลายน้ำเย็นได้ เป็นผลทำให้ส่วนที่ละลายในน้ำร้อนลดลงและส่วนที่ละลายน้ำเย็นเพิ่มขึ้น

ดังนั้น เพื่อศึกษาว่าองค์ประกอบแต่ละส่วนของผลผลิตไกลโคไลซ์ว่าเป็นสารชนิดใด จึงได้นำแต่ละส่วนที่แยกได้ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆ ซึ่งได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.1.4.2 น้ำหนักโมเลกุลขององค์ประกอบในผลผลิตไกลโคไลซ์

เมื่อนำองค์ประกอบในผลผลิตไกลโคไลซ์แต่ละส่วนที่แยกได้ ไปวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิคเจลเพอมีเอชันโครมาโทกราฟี (GPC) ได้โครมาโทแกรมดังรูปที่ 4.7 และแสดงน้ำหนักโมเลกุลในตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.7 GPC โครมาโทแกรมของส่วนที่ละลายน้ำเย็น (ก) ส่วนที่ละลายน้ำร้อน (ข) และส่วนที่ไม่ละลายน้ำ (ค) ของผลผลิตไกลโคไลซ์ ที่ได้จากปฏิกิริยาไกลโคลิซิส 4 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.4 น้ำหนักโมเลกุลขององค์ประกอบในผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไกลโคลิซิส 4 ชั่วโมง

สูตร	พีก	M_p*	$\overline{M}_n$	$\overline{M}_w$	Polydispersity
ส่วนที่ละลายน้ำเย็น	1	394	391	393	1.0044
ส่วนที่ละลายน้ำร้อน	1	398	394	395	1.0044
ส่วนที่ไม่ละลายน้ำ	1	936	930	934	1.0047
	2	667	661	664	1.0049
	3	394	391	392	1.0032

* M_p คือ ค่าน้ำหนักโมเลกุลที่ปรากฏบนพีกในโครมาโทแกรม

จากรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า น้ำหนักโมเลกุลของแต่ละส่วนมีค่าที่แตกต่างกัน ส่วนที่ละลายในน้ำเย็นมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวนมีค่าอยู่ที่ 391 ซึ่งค่าที่ได้ใกล้เคียงกับน้ำหนักโมเลกุลของมอนอเมอร์และไดเมอร์ของ BHET จึงอาจสันนิษฐานได้ว่าส่วนที่ละลายน้ำเย็นประกอบด้วยมอนอเมอร์และไดเมอร์ในปริมาณเล็กน้อย ส่วนที่ละลายในน้ำร้อนมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวนมีค่าอยู่ที่ 394 ซึ่งค่าที่ได้ใกล้เคียงกับน้ำหนักโมเลกุลของมอนอเมอร์และไดเมอร์ของ BHET เช่นกันแต่อาจมีริมาณไดเมอร์ที่มากกว่าส่วนที่ละลายในน้ำเย็น และส่วนที่ไม่ละลายน้ำแสดงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน 3 ค่า คือ 391 661 และ 930 ซึ่งค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวนที่เท่ากับ 391 อาจจะเป็นน้ำหนักของมอนอเมอร์และไดเมอร์ที่หลงเหลืออยู่ในองค์ประกอบ ส่วนน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวนเท่ากับ 661 และ 930 มีค่าใกล้เคียงกับน้ำหนักโมเลกุลของไตรเมอร์และโอลิโกเมอร์ที่มีหน่วยซ้ำประมาณ 4-5 หน่วยของ BHET ตามลำดับ จึงอาจสันนิษฐานได้ว่า ส่วนที่ไม่ละลายน้ำมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นพวกไตรเมอร์โดยมี มอนอเมอร์ ไดเมอร์ และโอลิโกเมอร์ที่มีหน่วยซ้ำประมาณ 4-5 หน่วยของ BHET ปนอยู่เล็กน้อย ผลการทดลองดังกล่าวนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ M.Ghaemy และ K.Mossaddegh [18] ซึ่งได้นำส่วนที่ละลายในน้ำเย็นและส่วนที่ละลายในน้ำเดือดของผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิสขยะเส้นใยเพ็ตมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค HPLC mass spectrometry และ NMR spectroscopy พบว่า ผลผลิตไกลโคไลซ์ส่วนที่ละลายน้ำเย็นเป็น BHET ซึ่งเป็นมอนอเมอร์ของเพ็ตและส่วนที่ละลายน้ำเดือดเป็นพวกไตรเมอร์ของ BHET

4.1.4.3 ค่าไฮดรอกซิลขององค์ประกอบในผลผลิตไกลโคไลซ์

นำผลผลิตไกลโคไลซ์ส่วนที่ละลายน้ำเย็น น้ำร้อน และไม่ละลายน้ำมาทดสอบหาค่าไฮดรอกซิล โดยใช้การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4274 method C ซึ่งค่าไฮดรอกซิลจะเป็นตัวที่บอกปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลที่มีในผลผลิตไกลโคไลซ์แต่ละส่วน

จากการทดสอบหาค่าไฮดรอกซิลของผลผลิตไกลโคไลซ์ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าไฮดรอกซิลขององค์ประกอบในผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไกลโคลิซิส 4 ชั่วโมง

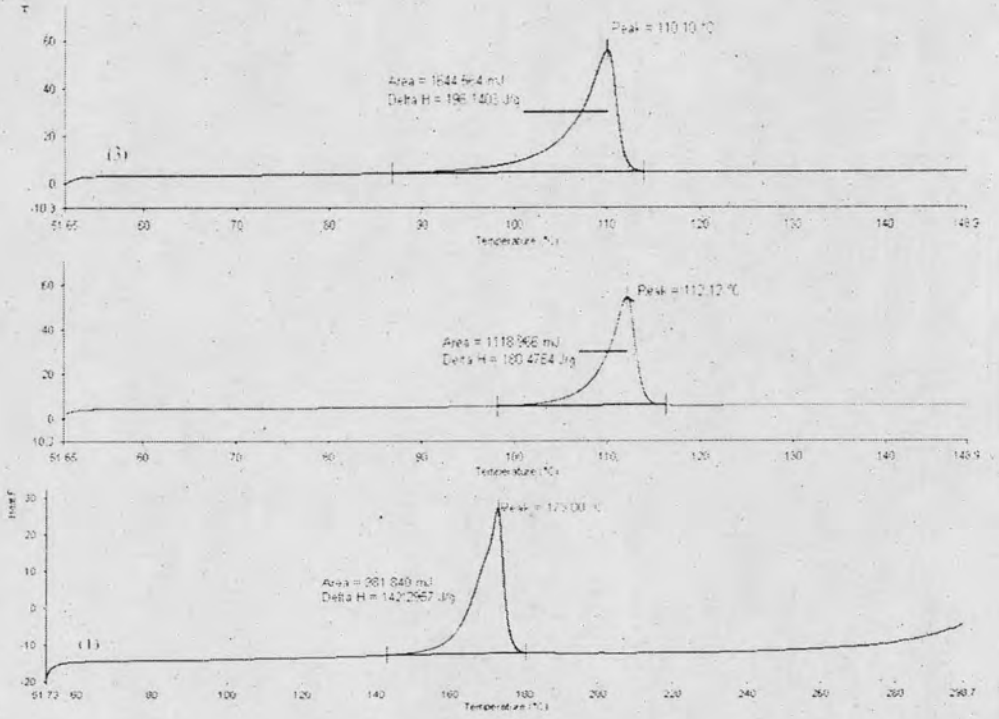
ชนิดของผลผลิตไกลโคไลซ์	ค่าไฮดรอกซิล (มิลลิกรัม KOH/กรัม)
ส่วนที่ละลายน้ำเย็น	390.14
ส่วนที่ละลายน้ำร้อน	341.87
ส่วนที่ไม่ละลายน้ำ	255.96

จากตารางที่ 4.5 พบว่าส่วนที่ละลายน้ำเย็นมีค่าไฮดรอกซิลมากกว่าค่าไฮดรอกซิลของส่วนที่ละลายในน้ำร้อน และส่วนที่ไม่ละลายน้ำมีค่าไฮดรอกซิลน้อยที่สุด ซึ่งแสดงว่าผลผลิตไกลโคไลซ์ส่วนที่ละลายน้ำเย็นมีขนาดโมเลกุลที่เล็กกว่าส่วนที่ละลายน้ำร้อนและส่วนที่ไม่ละลายน้ำ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาค่าไฮดรอกซิลของส่วนที่ละลายในน้ำเย็น พบว่ามีค่าอยู่ระหว่างค่าไฮดอรกซิลของ BHET (441.7) [21] และไดเมอร์ของ BHET (265.0) [18] แสดงว่าในส่วนที่ละลายในน้ำเย็นนี้มี BHET เป็นส่วนใหญ่ ในกรณีของส่วนที่ละลายน้ำร้อน มีค่าไฮดรอกซิลลดลงแต่ยังอยู่ระหว่าง BHET กับ ไดเมอร์ แสดงว่าในส่วนที่ละลายในน้ำร้อนมีปริมาณของไดเมอร์เพิ่มขึ้นนั่นเอง

4.1.4.4 อุณหภูมิหลอมเหลวขององค์ประกอบในผลผลิตไกลโคไลซ์

เมื่อนำผลผลิตไกลโคไลซ์ส่วนที่ละลายน้ำกลั่นเย็น น้ำกลั่นร้อนและไม่ละลายน้ำมาหาอุณหภูมิหลอมเหลวด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริเมทรี (DSC) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.8 และ ตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.8 DSC เทอร์โมแกรมของส่วนที่ละลายในน้ำเย็น (ก) ส่วนที่ละลายในน้ำร้อน (ข) และส่วนที่ไม่ละลายน้ำ (ค) ของผลผลิตไกลโคไลซ์ ที่ได้จากปฏิกิริยาไกลโคลิซิส 4 ชั่วโมง

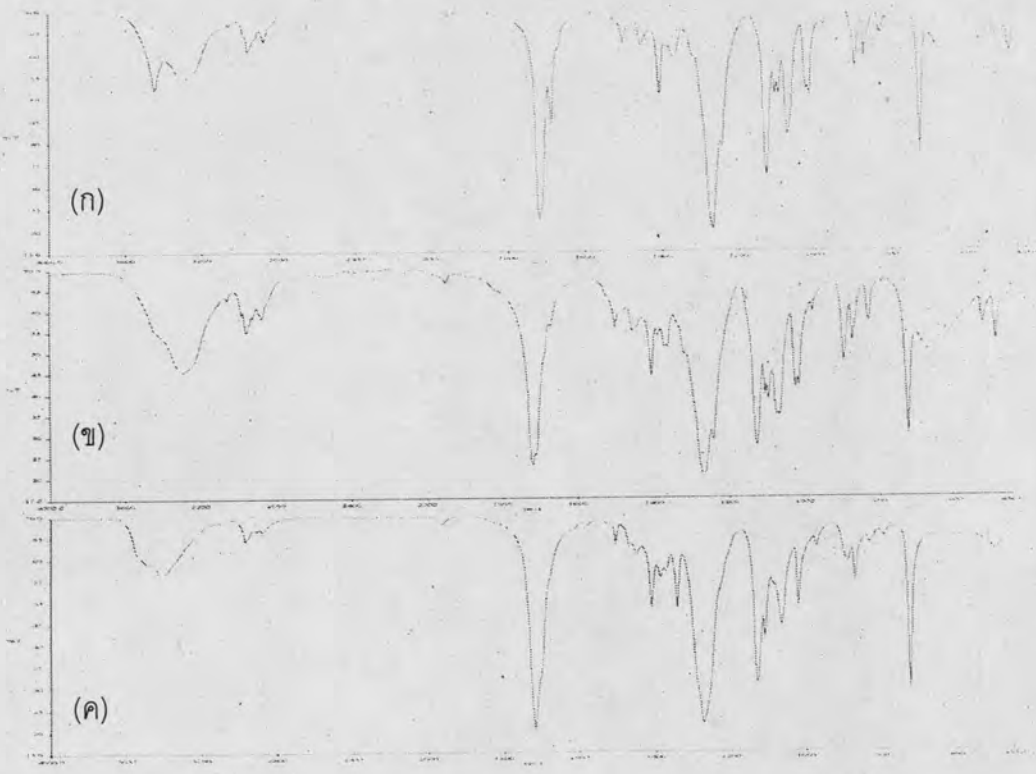
ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิหลอมเหลวขององค์ประกอบในผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไกลโคลิซิส 4 ชั่วโมง

องค์ประกอบในผลผลิตไกลโคไลซ์	อุณหภูมิหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)
ส่วนที่ละลายน้ำในเย็น	110
ส่วนที่ละลายน้ำในร้อน	112
ส่วนที่ไม่ละลายน้ำ	173

จากรูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.5 จะเห็นว่าแต่ละสัดส่วนมีอุณหภูมิหลอมเหลวที่แตกต่างกัน คือ ส่วนที่ไม่ละลายในน้ำมีอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) เท่ากับ 173 องศาเซลเซียส ส่วนที่ละลายน้ำร้อน มีอุณหภูมิหลอมเหลว เท่ากับ 112 องศาเซลเซียส และส่วนที่ละลายในน้ำเย็นมี อุณหภูมิ

หลอมเหลว เท่ากับ 110 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างอย่างชัดเจนระหว่างส่วนที่ละลายน้ำและส่วนที่ไม่ละลายน้ำ แต่แตกต่างเพียงเล็กน้อยในส่วนที่สามารถละลายในน้ำร้อนกับน้ำเย็น ซึ่งสามารถบอกได้ส่วนที่ละลายน้ำเป็นสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลเล็กกว่าส่วนที่ไม่ละลายน้ำ และส่วนที่ละลายน้ำเย็นมีน้ำหนักโมเลกุลที่น้อยกว่าส่วนที่ละลายน้ำร้อนเล็กน้อย เมื่อนำผลการทดลองข้างต้นมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ M.Ghaemy และ K.Mossaddegh [18] ที่พบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของ BHET มีค่าเท่ากับ 109 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิหลอมเหลวช่วง 112-115 องศาเซลเซียส พบว่าเป็นอุณหภูมิหลอมเหลวของมอนอเมอร์ที่มีไดเมอร์ผสมอยู่ จึงเป็นการยืนยันได้ว่า ส่วนที่ละลายในน้ำเย็นซึ่งมีอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส นั้น มีไดเมอร์ผสมอยู่เล็กน้อย และส่วนที่ละลายในน้ำร้อนมีไดเมอร์ผสมอยู่มากขึ้น

4.1.4.5 โครงสร้างทางเคมีขององค์ประกอบในผลผลิตไกลโคไลซ์



รูปที่ 4.9 FT-IR สเปกตรัมของ ส่วนที่ละลายน้ำเย็น (ก) ส่วนที่ละลายในน้ำร้อน (ข) และส่วนที่ไม่ละลายน้ำ (ค) ของผลผลิตไกลโคไลซ์ ที่ได้จากปฏิกิริยาไกลโคลิซิส 4 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าพีกที่ปรากฏใน FT-IR สเปกตรัมของส่วนที่ละลายน้ำเย็น ส่วนที่ละลายน้ำร้อน และส่วนที่ไม่ละลายน้ำ มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของพีกที่ตำแหน่ง 3200-3600 ซม$^{-1}$ซึ่งเป็นพวกหมู่ไฮดรอกซิล ในส่วนที่ละลายน้ำ ซึ่งประกอบด้วย BHET เป็นส่วนใหญ่นั้นจะแสดงพีกที่ตำแหน่ง 3446.92 ซม$^{-1}$ออกมาอย่างเห็นได้ชัด แต่เมื่อมี

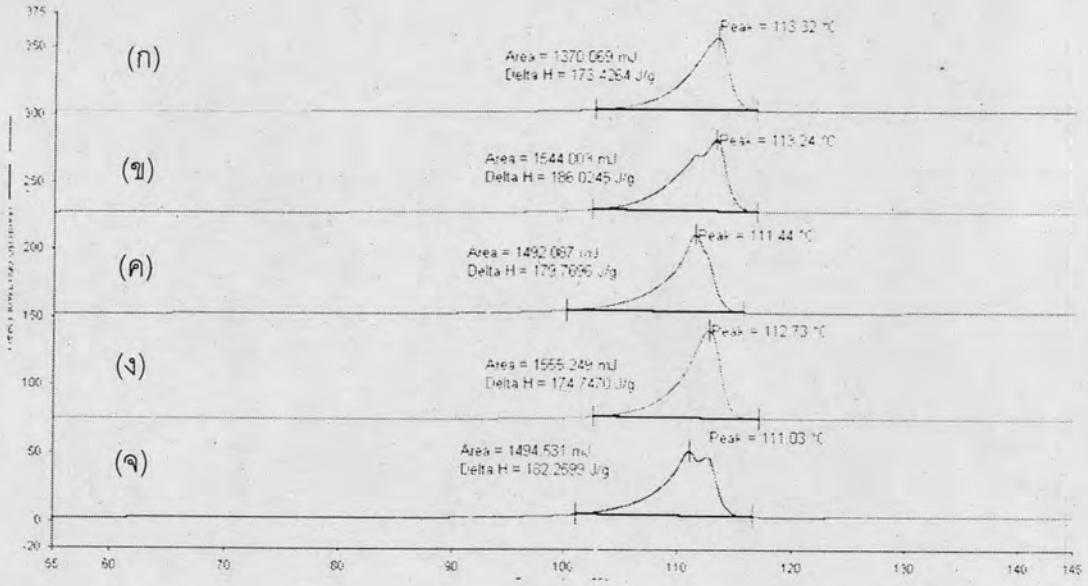
ไดเมอร์มาผสมอยู่มากขึ้นดังเช่น ในส่วนละลายในน้ำร้อน พีกที่ตำแหน่งดังกล่าวมีความเข้มของพีกที่ลดลง แต่พีกของหมู่ไฮดรอกซิลของไดเมอร์กลับเพิ่มขึ้นและมีความกว้างของพีกมากขึ้น จาก FT-IR สเปกตรัมของส่วนที่ละลายน้ำร้อนพบว่าสัดส่วนขนาดของพีกที่ตำแหน่ง 1600-1800 ซม$^{-1}$ เทียบกับขนาดพีกที่ตำแหน่ง 3200-3600 ซม$^{-1}$ มีสัดส่วนน้อยกว่าสัดส่วนของพีกเดียวกันนี้ของส่วนที่ไม่ละลาย ซึ่งสามารถบอกได้ว่าส่วนที่ละลายน้ำร้อนมีหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างทางเคมีมากกว่าส่วนที่ไม่ละลายน้ำและมีหมู่เอสเทอร์ในโครงสร้างทางเคมีน้อยกว่าส่วนที่ไม่ละลายน้ำ การที่ส่วนไม่ละลายน้ำมีหมู่เอสเทอร์ที่มากขึ้นและมีหมู่ไฮดรอกซิลที่ลดลงแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างทางเคมีของส่วนที่ละลายน้ำมีขนาดโมเลกุลที่เล็กกว่าส่วนที่ไม่ละลายน้ำ

จากผลการทดลองของการหาน้ำหนักโมเลกุล ค่าไฮดรอกซิล อุณหภูมิหลอมเหลว และสูตรโครงสร้างทางเคมีที่หาด้วย FT-IR ของแต่ละองค์ประกอบเห็นได้ว่าองค์ประกอบของผลผลิตไกลโคไลซ์ที่แยกได้มีความแตกต่างกัน และยืนยันได้ว่าองค์ประกอบของส่วนที่ละลายน้ำเย็นคือมอนอเมอร์ที่มีไดเมอร์ผสมอยู่เล็กน้อย ส่วนที่ละลายน้ำร้อนคือมอนอเมอร์ที่มีไดเมอร์ของ BHET ผสมอยู่มากขึ้น และส่วนที่ไม่ละลายน้ำเป็นสารประกอบของไตรเมอร์เป็นส่วนใหญ่ และมีมอนอเมอร์ ไดเมอร์ และเตตระเมอร์ของ BHET ปนอยู่เล็กน้อย

การนำผลผลิตไกลโคไลซ์ไปสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต จะไม่นำส่วนของไตรเมอร์และเตตระเมอร์ไปทำปฏิกิริยา เนื่องจากส่วนนี้มีสิ่งเจือปนที่เป็นพวกสารเติมแต่ง ดังนั้นในการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนจะวิเคราะห์เฉพาะมอนอเมอร์ซึ่งสกัดแยกมาจากส่วนที่ละลายน้ำกลั่นเย็นและไดเมอร์ซึ่งสกัดแยกมาจากส่วนที่ละลายน้ำกลั่นร้อน เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผลผลิตไกลโคไลซ์ในส่วนที่ละลายน้ำเมื่อใช้เวลาทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิสเพิ่มขึ้นจาก 1 ถึง 5 ชั่วโมงตามลำดับ

4.1.5 อุณหภูมิหลอมเหลวของผลผลิตไกลโคไลซ์

เมื่อนำผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไกลโคลิซิส ตั้งแต่ 1-5 ชั่วโมง เฉพาะส่วนที่ละลายน้ำทั้งหมดมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC ได้ผลการวิเคราะห์เป็นเทอร์โมแกรมดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 DSC เทอร์โมแกรมของผลผลิตไกลโคไลซ์ส่วนที่ละลายในน้ำซึ่งได้จากปฏิกิริยาไกลโคลิซิสที่ 1 (ก) 2 (ข) 3 (ค) 4 (ง) และ 5 (จ) ชั่วโมง

จากรูปจะเห็นได้ว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิสเพิ่มขึ้น อุณหภูมิหลอมเหลวของส่วนที่ละลายน้ำได้ มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยอยู่ในช่วง 111-113 องศาเซลเซียส แต่เมื่อพิจารณาลักษณะของเทอร์โมแกรม จะพบว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิสเพิ่มขึ้น เทอร์โมแกรมจะปรากฏเป็น 2 พีก อย่างเห็นได้ชัด โดยพีกที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะปรากฏให้เห็นชัดเจนขึ้น ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากค่าอัตราส่วนของผลผลิตไกลโคไลซ์ดังตารางที่ 4.3 สามารถ สรุปได้ว่า เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิสเพิ่มมากขึ้น จะยิ่งสามารถตัดโซ่โมเลกุลจากไดเมอร์ให้เป็นมอนอเมอร์ หรือ BHET ได้เพิ่มมากขึ้น

4.2 ลักษณะเฉพาะและสมบัติของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากผลผลิตไกลโคไลซ์

4.2.1 ลักษณะของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

จากการนำผลผลิตไกลโคไลซ์เฉพาะส่วนที่เป็นมอนอเมอร์และไดเมอร์มาสังเคราะห์เป็นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตโดยใช้ภาวะต่างๆกัน ดังตารางที่ 4.8 ได้พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่มีลักษณะดังรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.7 สูตรที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

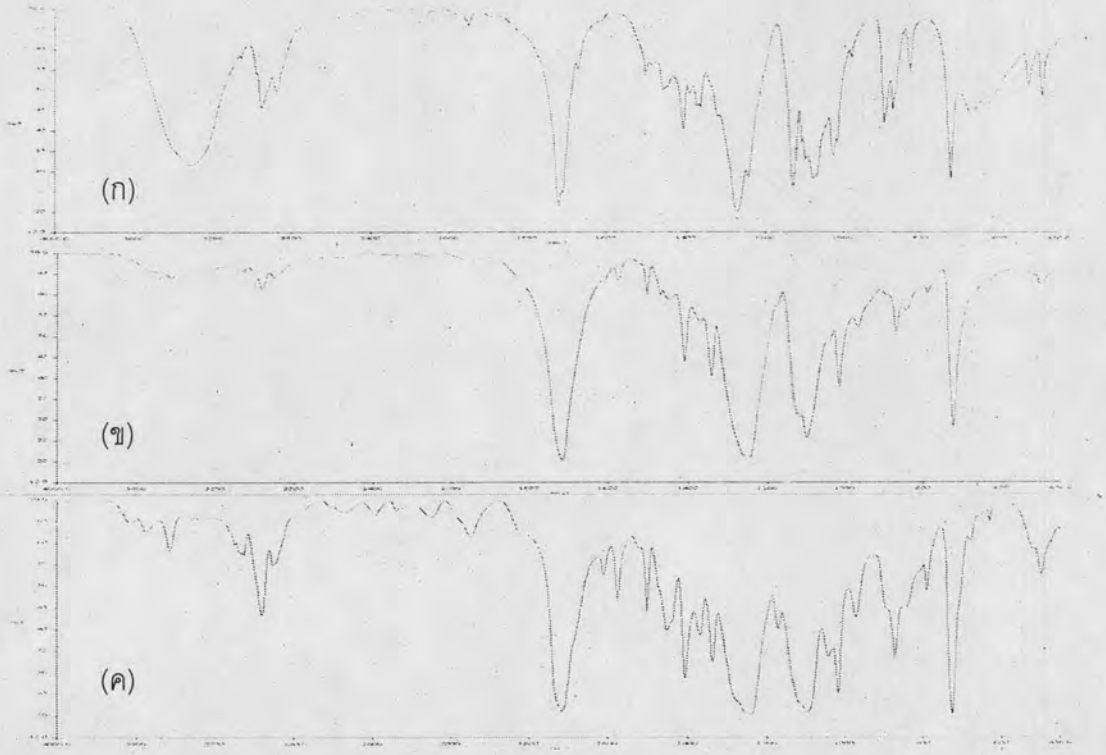
สูตร	ประเภทของผลผลิตไกลโคไลซ์		เวลาที่ใช้สังเคราะห์
	เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิส	ส่วนประกอบที่นำไปใช้	
1	1 ชั่วโมง	ส่วนที่ละลายน้ำ	2 ชั่วโมง
2	2 ชั่วโมง	ส่วนที่ละลายน้ำ	2 ชั่วโมง
3	3 ชั่วโมง	ส่วนที่ละลายน้ำ	2 ชั่วโมง
4	4 ชั่วโมง	ส่วนที่ละลายน้ำ	2 ชั่วโมง
5	5 ชั่วโมง	ส่วนที่ละลายน้ำ	2 ชั่วโมง
6	5 ชั่วโมง	ส่วนที่ละลายน้ำเย็น	2 ชั่วโมง
7	5 ชั่วโมง	ส่วนที่ละลายน้ำร้อน	2 ชั่วโมง
8	4 ชั่วโมง	ส่วนที่ละลายน้ำ	3 ชั่วโมง

รูปที่ 4.11 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้จากผลผลิตไกลโคไลซ์สูตรที่ 1 (ก) 2 (ข) 3 (ค) 4 (ง) 5 (จ) 6 (ฉ) 7 (ช) และ 8 (ซ)

จากรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นถึงสีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้ พบว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากสูตรที่ 1 ถึง 5 มีสีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ไม่แตกต่างกันมากโดยมีสีขาวครีม แต่พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ได้จากการสังเคราะห์สูตรที่ 8 มีสีแตกต่างจากสูตรที่ 4 ซึ่งใช้ผลผลิตไกลโคไลซ์ชนิดเดียวกัน แต่สูตรที่ 8 ใช้เวลาในการสังเคราะห์นานกว่า ปรากฏว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้มีสีที่เข้มขึ้นเป็นสีเหลืองครีมอมน้ำตาล สีที่เข้มขึ้นอาจเป็นผลมาจากการเกิดการเสื่อมสภาพทางความร้อนขึ้นขณะสังเคราะห์ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต หากพิจารณาสีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากสูตรที่ 6 ซึ่งใช้ผลผลิตไกลโคไลซ์เฉพาะส่วนที่ละลายน้ำเย็นในการสังเคราะห์ ได้สีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเป็นสีน้ำตาลเข้ม และสูตรที่ 7 ซึ่งใช้ผลผลิตไกลโคไลซ์เฉพาะส่วนที่ละลายน้ำร้อนเท่านั้นในการสังเคราะห์ได้ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่มีสีขาวขุ่น แสดงว่า เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์ที่ผสมด้วยไดเมอร์เล็กน้อย มีค่าต่ำกว่าที่สังเคราะห์จากไดเมอร์ที่ผสมมอนอเมอร์เล็กน้อย

4.2.2 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้เมื่อเปรียบเทียบกับขวดเพ็ต และผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ แสดงในรูปที่ 4.12

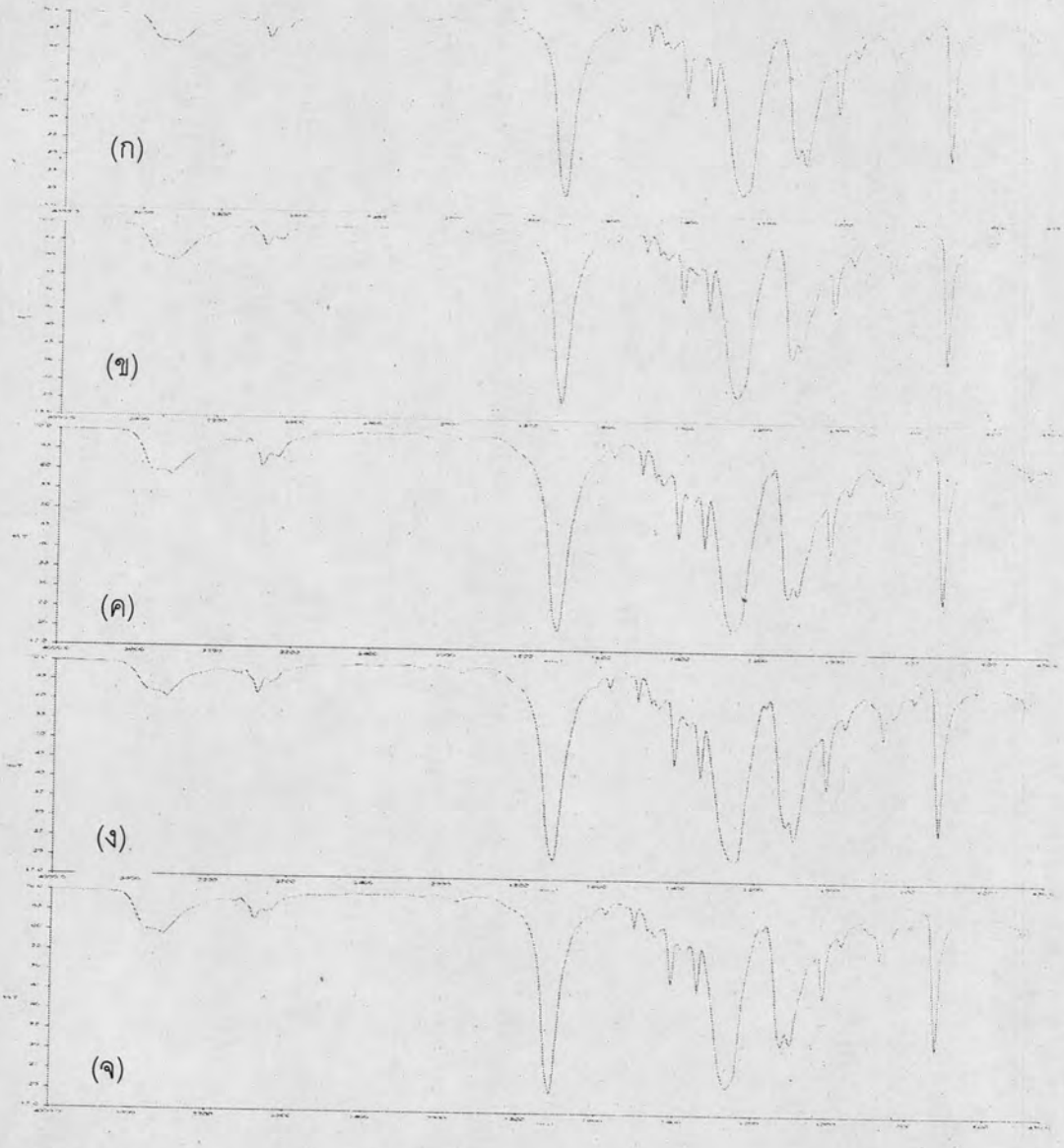


รูปที่ 4.12 FT-IR สเปกตรัมของผลผลิตไกลโคไลซ์ ที่ใช้เวลาทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิส 4 ชั่วโมง (ก) พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้จากสูตรที่ 7 (ข) และ ขวดเพ็ต (ค)

จากรูปที่ 4.12(ข) จะเห็นได้ว่าพีกที่ตำแหน่ง 3200-3600 ซม$^{-1}$ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของหมู่ไฮดรอกซิลปรากฏเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ แสดงให้เห็นว่าในพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้มีหมู่ไฮดรอกซิลลดน้อยลง นอกจากนี้ พีกช่วง 1200-1400 ซม$^{-1}$ ที่แสดงถึงพันธะ –C-O-C- และพีก 1700-1800 ซม$^{-1}$ ที่แสดงถึงพันธะ C=O ของหมู่เอสเทอร์ มีความเข้มของพีกมากขึ้นเมื่อเทียบกับพีกของผลผลิตไกลโคไลซ์และมีลักษณะคล้ายกับพีกของขวดเพ็ต นั่นคือ ผลผลิตไกลโคไลซ์ได้เกิดปฏิกิริยาเป็นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

4.2.2.1 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิส

ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้จากสูตรที่ 1 ถึง สูตรที่ 5 ที่สังเคราะห์จากผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ใช้เวลาทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิส 1 2 3 4 และ 5 ชั่วโมง โดยทั้งหมดใช้เวลาสังเคราะห์ 2 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.13



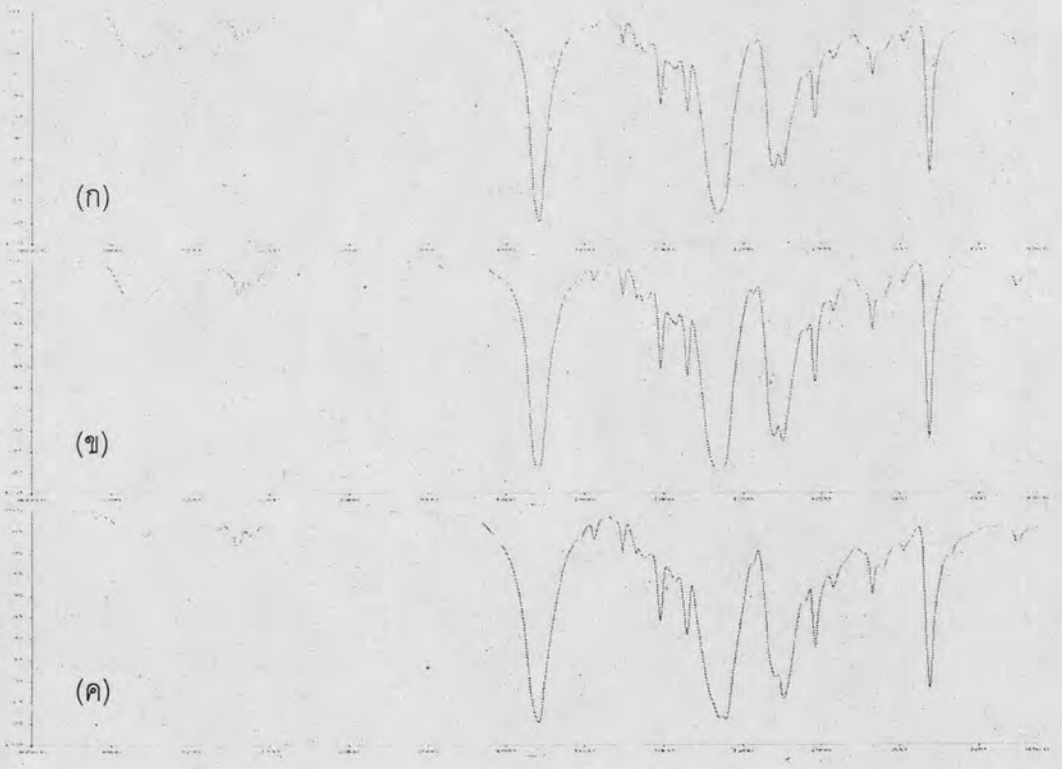
รูปที่ 4.13 FT-IR สเปกตรัมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้จากสูตรที่ 1 (ก) 2 (ข) 3 (ค) 4 (ง) และ 5 (จ)

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าพีกที่ปรากฏในพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้จากสูตรที่ 1 ถึง สูตรที่ 5 มีสเปกตรัมที่คล้ายกันทั้งหมดคือ มีพีกช่วง 3200-3600 ซม$^{-1}$ ที่ลดลง และมีพีกช่วง 1200-1400 ซม$^{-1}$ ที่เป็นพีกแสดงพันธะ –C-O-C ของหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์มากขึ้น เมื่อเทียบกับ

สเปกตรัมของผลผลิตไกลโคไลซ์ แสดงว่าเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิสไม่มีผลทำให้โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเปลี่ยนแปลง

4.2.2.2 ผลขององค์ประกอบในผลผลิตไกลโคไลซ์

ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้จากสูตรที่ 5 6 และ 7 ที่สังเคราะห์จากผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ใช้เวลาทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิส 5 ชั่วโมง โดยสูตรที่ 5 จะใช้ผลผลิตไกลโคไลซ์ส่วนที่ละลายน้ำ สูตรที่ 6 ใช้เฉพาะส่วนที่ละลายน้ำเย็น และ สูตรที่ 7 ใช้เฉพาะ ส่วนที่ละลายน้ำร้อน ทั้ง 3 สูตรใช้เวลาสังเคราะห์ 2 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.14

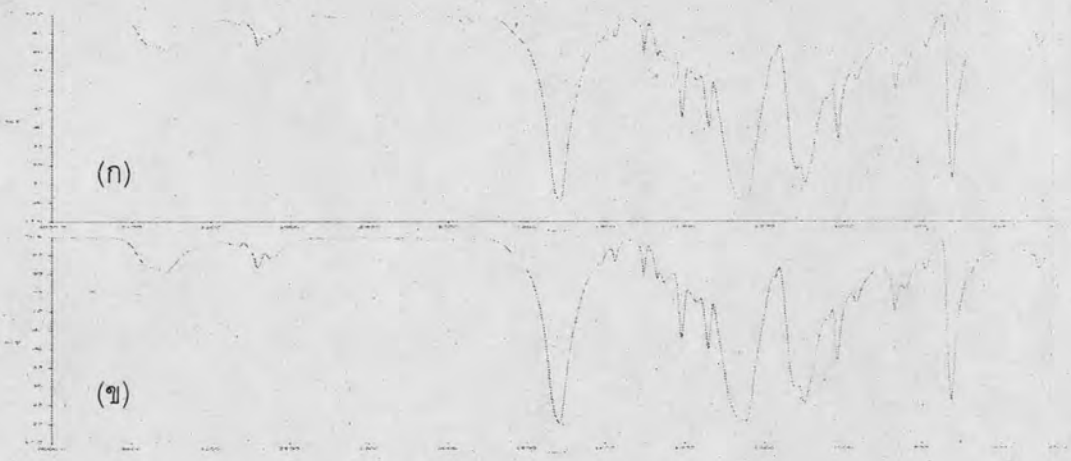


รูปที่ 4.14 FT-IR สเปกตรัมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้จากสูตรที่ 5 (ก) 6 (ข) และ 7 (ค)

จากรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้จากสูตรที่ 7 จะมีพีกช่วง 3200-3600 ซม$^{-1}$ น้อยกว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากสูตรที่ 5 และ 6 แต่มีพีกช่วง 1200-1400 ซม$^{-1}$ กว้างกว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากสูตรที่ 5 และ 6 เล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากสูตรที่ 7 ในโครงสร้างทางเคมีจะมีหมู่ปลายที่เป็นไฮดรอกซิลที่น้อยกว่าและมีหมู่เอสเทอร์ที่มากกว่าสูตรที่ 5 และ 6 ซึ่งสามารถบอกได้ว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตสูตรที่ 7 น่าจะมีสายโซ่โมเลกุลที่ยาวกว่าสูตรที่ 5 และ 6

4.2.2.3 ผลของเวลาในการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

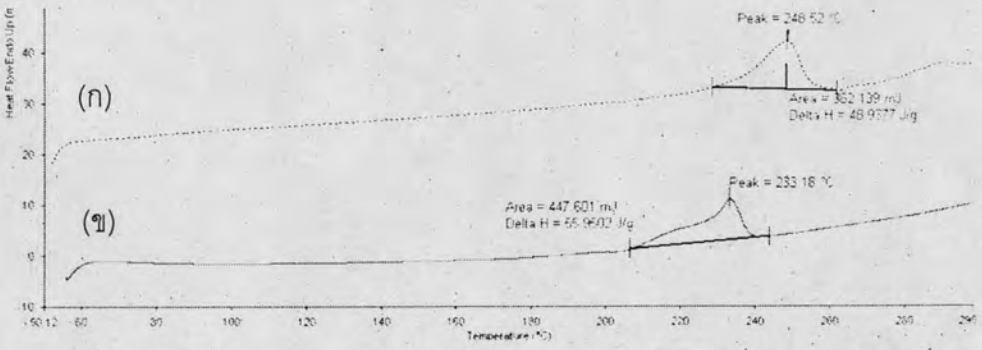
ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้จากสูตรที่ 4 และ 8 ที่สังเคราะห์จากผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ใช้เวลาทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิส 4 ชั่วโมง โดยสูตรที่ 4 ใช้เวลาสังเคราะห์ 2 ชั่วโมงและ สูตรที่ 8 ใช้เวลาสังเคราะห์ 3 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 FT-IR สเปกตรัมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้จากสูตรที่ 4 (ก) และ 8 (ข)

จากรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้จากสูตรที่ 4 และ 8 มีสเปกตรัมที่เหมือนกันมากซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ 2 และ 3 ชั่วโมงไม่มีผลทำให้โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเปลี่ยนแปลง

4.2.3 อุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต



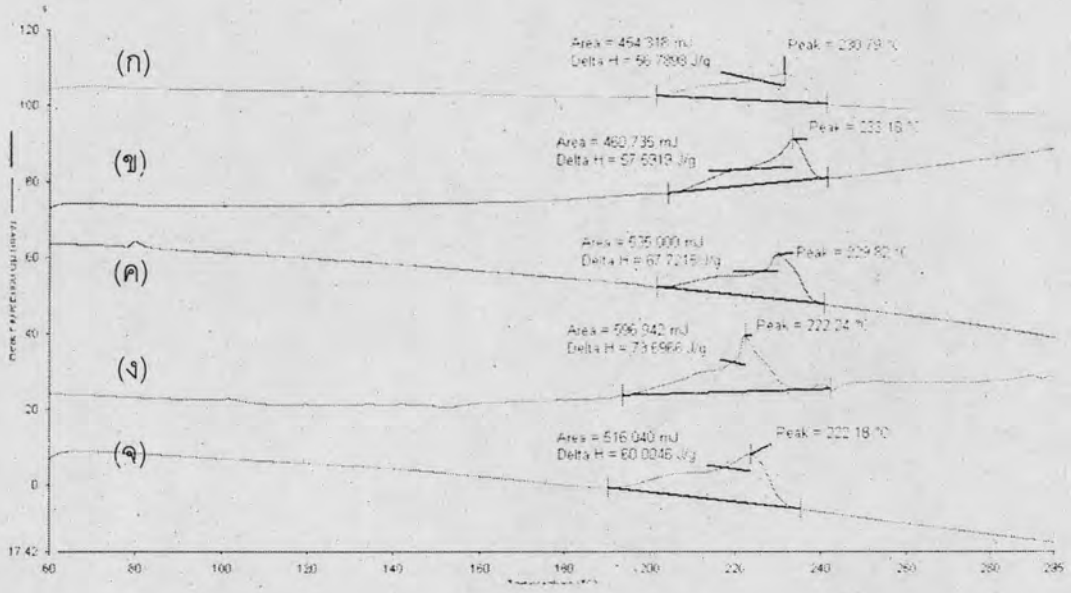
รูปที่ 4.16 DSC เทอร์โมแกรมของขวดเพ็ต (ก) เทียบกับเพ็ตที่สังเคราะห์สูตรที่ 2 (ข)

จากรูปที่ 4.16 แสดงอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้เทียบกับขวดน้ำเพ็ตพบว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้จากสูตรที่ 2 มีอุณหภูมิหลอมเหลว 233 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของขวดเพ็ตที่ 249 องศา

เซลเซียส แสดงให้เห็นว่าเพ็ตที่สังเคราะห์ได้มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่าขวดเพ็ตและน่าจะมีองค์ประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำกว่า

4.2.3.1 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิส

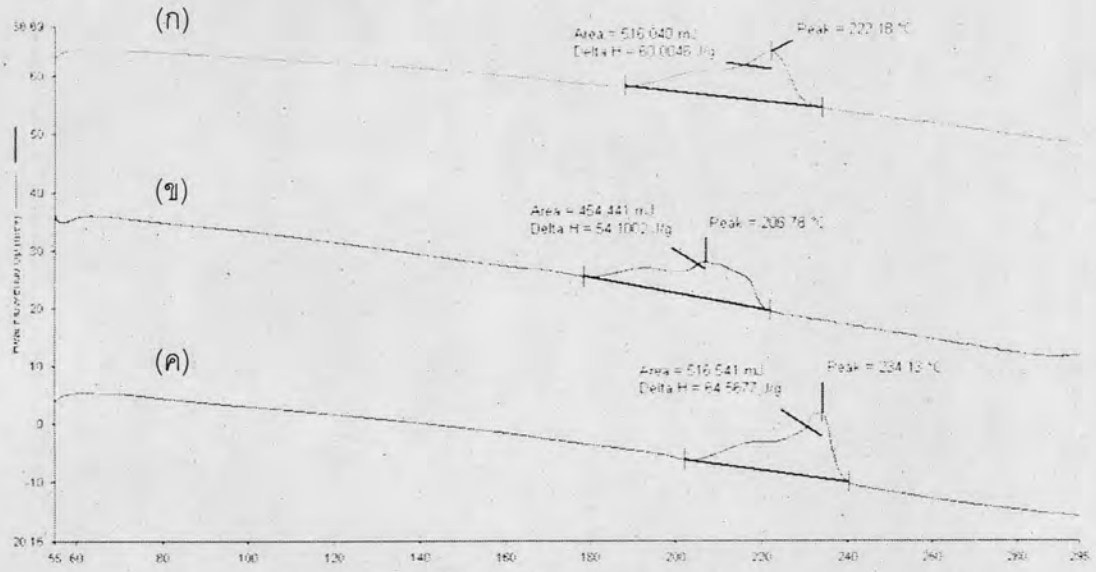
อุณหภูมิหลอมเหลวพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์สูตรที่ 1 ถึง สูตรที่ 5 แสดงดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้จากสูตรที่ 1 (ก) 2 (ข) 3 (ค) 4 (ง) และ 5 (จ)

จากรูปที่ 4.17 อุณหภูมิหลอมเหลวพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้จากสูตรที่1 2 3 4 และ 5 มีอุณหภูมิหลอมเหลว เป็น 231 233 230 222 และ 222 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากสูตรที่ 1 2 และ 3 ซึ่งใช้ผลผลิตไกลโคไลซ์ที่เวลาทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิส 1 2 และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ มีอุณหภูมิหลอมเหลว ที่ใกล้เคียงกันและมีอุณหภูมิหลอมเหลว มากกว่า พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากสูตรที่ 4 และ 5 มีอุณหภูมิหลอมเหลวใกล้เคียงกัน การที่อุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแต่ละสูตรมีใกล้เคียงกันหรือมีค่ามากกว่า เป็นเพราะอัตราส่วนของไดเมอร์ต่อมอนอเมอร์ที่ใช้สังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตของแต่ละสูตรมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งอัตราส่วนของไดเมอร์ต่อมอนอเมอร์ที่ใช้สังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตของสูตรที่ 1 2 และ 3 มีอัตราส่วนของไดเมอร์ต่อมอนอเมอร์ใกล้เคียงกันแต่มีอัตราส่วนของไดเมอร์ต่อมอนอเมอร์ที่สูงกว่าสูตรที่ 4 และ 5 ที่มีอัตราส่วนของไดเมอร์ต่อมอนอเมอร์ใกล้เคียงกัน

4.2.3.2 ผลขององค์ประกอบในผลผลิตไกลโคไลซ์

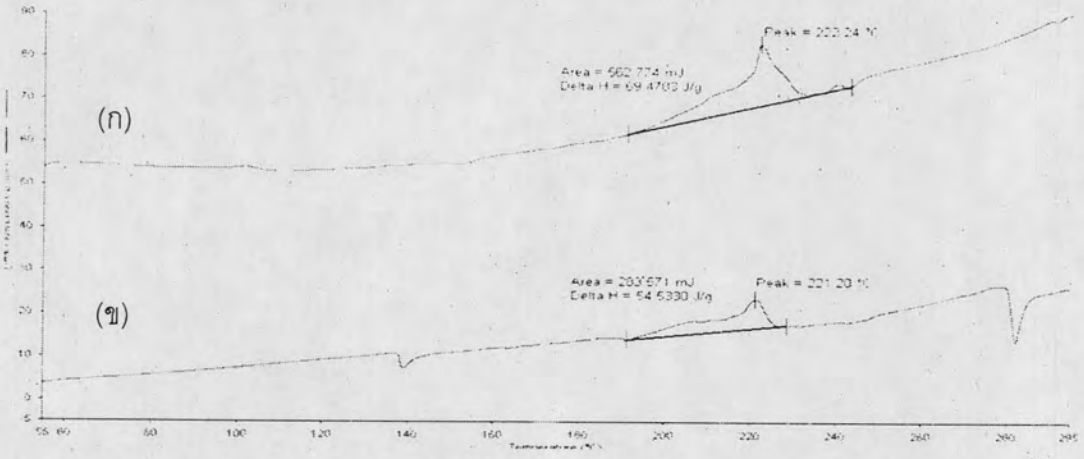


รูปที่ 4.18 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้จากสูตรที่ 5 (ก) 6 (ข) และ 7 (ค)

รูปที่ 4.18 แสดงอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากสูตรที่ 5 6 และ 7 ซึ่งทั้งสามสูตรใช้ผลผลิตไกลโคไลซ์ โดยสูตรที่ 5 ใช้แบบไม่แยกองค์ประกอบ สูตรที่ 6 ใช้เฉพาะส่วนที่ละลายน้ำเย็น และสูตรที่ 7 ใช้เฉพาะส่วนที่ละลายน้ำร้อน โดยอุณหภูมิหลอมเหลวของทั้ง 3 สูตรมีค่าเท่ากับ 222 207 และ 234 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากผลผลิตไกลโคไลซ์ที่มีปริมาณไดเมอร์สูงกว่า ซึ่งเป็นส่วนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมีค่าอุณหภูมิหลอมเหลวสูงกว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้จากผลผลิตไกลโคไลซ์ที่มีปริมาณไดเมอร์เล็กน้อย เนื่องจากพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากโมเลกุลใหญ่เมื่อเกิดปฏิกิริยาสายโซ่โมเลกุลที่ได้จึง เป็นการต่อกันของโมเลกุลใหญ่ ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมากขึ้น ซึ่งตรงข้ามกันกับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากผลผลิตไกลโคไลซ์ที่มีมอนอเมอร์อยู่ในปริมาณมากซึ่งเป็นน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งเป็นการต่อของโมเลกุลเล็ก ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีโมเลกุลไม่สูง

ดังนั้นในเวลาของการสังเคราะห์ที่เท่ากัน คือ 2 ชั่วโมง สูตรที่ 7 ซึ่งมีโอกาสได้พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่น้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า อุณหภูมิหลอมเหลวจึงสูงกว่า

4.2.3.3 ผลของเวลาในการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต



รูปที่ 4.19 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้จากสูตรที่ 4 (ก) และ 8 (ข)

เมื่อนำพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากสูตรที่ 4 และ 8 ซึ่งใช้ผลผลิตไกลโคไลซ์ชนิดเดียวกัน แต่ต่างกันที่เวลาในการใช้สังเคราะห์ ถึง 2 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ มาศึกษาสมบัติทางความร้อนได้เทอร์โมแกรม ดังรูปที่ 4.14 พบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากสูตรที่ 4 และ 8 มีค่าเท่ากับ 222 และ 221 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์มากขึ้นอุณหภูมิหลอมเหลว ลดลงเล็กน้อย เพราะฉะนั้นการสังเคราะห์ที่เวลา 2 ชั่วโมง เป็นเวลาที่เหมาะสม เนื่องจากยิ่งเพิ่มเวลาในการสังเคราะห์นานขึ้นไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิหลอมเหลว

4.2.4 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

ตารางที่ 4.8 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

สูตร	อุณหภูมิสลายตัว, T_d (องศาเซลเซียส)
1	420
2	423
3	422
4	422
5	419
6	415
7	424
8	418
ขวดน้ำเพ็ต	426

4.2.4.1 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิส

จากตารางที่ 4.8 จะเห็นได้ว่า พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากสูตรที่ 1 2 3 4 และ 5 มีอุณหภูมิการสลายตัวใกล้เคียงกัน โดยแปรผันตามปริมาณไดเมอร์ที่มีอยู่ในผลผลิตไกลโคไลซ์ กล่าวคือที่ 5 ชั่วโมงที่มีไดเมอร์น้อยที่สุดเพ็ตมีการอุณหภูมิการสลายตัวต่ำที่สุด

4.2.4.2 ผลขององค์ประกอบในผลผลิตไกลโคไลซ์

จากตารางที่ 4.8 เมื่อพิจารณาอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากสูตรที่ 5 6 และ 7 เป็นสูตรที่ใช้ผลผลิตไกลโคไลซ์ที่เวลาการทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิส 5 ชั่วโมงเหมือนกันแต่แตกต่างกันที่องค์ประกอบ พบว่าอุณหภูมิสลายตัวของสูตรที่ 7 ที่ใช้ผลผลิตไกลโคไลซ์ที่เป็นไดเมอร์ผสมมอนอเมอร์เล็กน้อยในการสังเคราะห์ มีอุณหภูมิสลายตัวสูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 424 องศาเซลเซียสและมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิสลายตัวของขวดเพ็ตมีค่าเท่ากับ 426 องศาเซลเซียส สำหรับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตสูตรที่ 6 ที่ใช้ผลผลิตไกลโคไลซ์ที่เป็นมอนอเมอร์ผสมไดเมอร์เล็กน้อยในการสังเคราะห์ มีอุณหภูมิสลายตัวต่ำที่สุด มีค่าเท่ากับ 415 องศาเซลเซียส จึงอาจกล่าวได้ว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตของสูตรที่ 7 มีขนาดสายโซ่โมเลกุลที่ใหญ่กว่าของสูตรที่ 5 และ 6 ที่เป็นเช่นนี้เพราะการขยายสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตสูตรที่ 7 ที่สังเคราะห์จากโมเลกุลใหญ่เมื่อขยายสายโซ่โมเลกุลซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยากันของ

โมเลกุลใหญ่ ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ มีโมเลกุลสูงมากขึ้น จึงมีเสถียรภาพทางความร้อนใกล้เคียงกับขวดเพ็ต ซึ่งตรงข้ามกันกับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตสูตรที่ 6 ซึ่งมีมอนอเมอร์ในปริมาณมาก จึงเป็นการทำปฏิกิริยากันของโมเลกุลเล็ก ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลไม่สูงเท่ากับที่ใช้ส่วนไดเมอร์อย่างเดียว

4.2.4.3 ผลของเวลาในการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

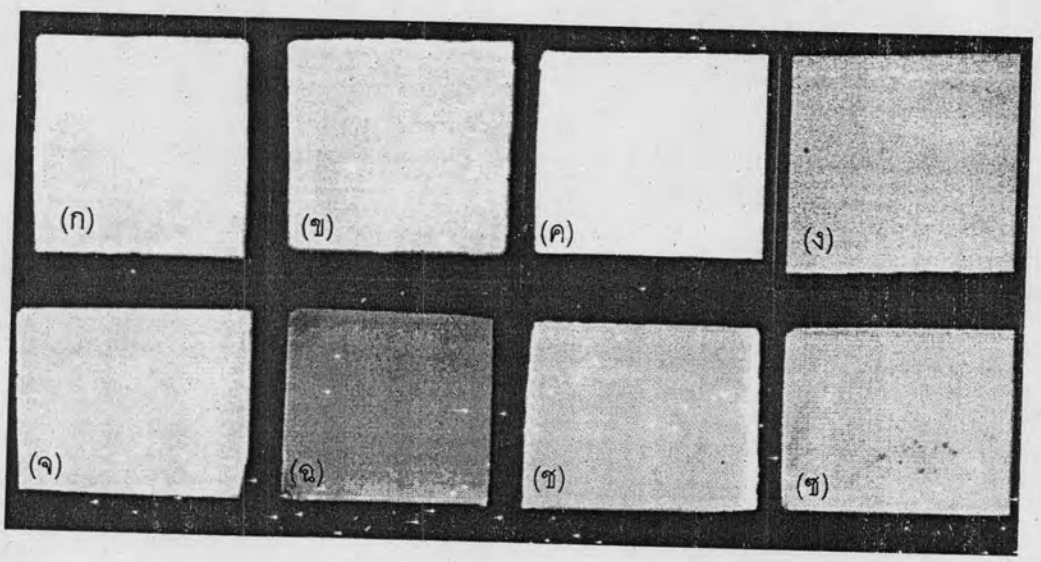
อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตสูตรที่ 8 มีค่าเท่ากับ 418 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตสูตรที่ 4 มีค่าเท่ากับ 422 องศาเซลเซียส ซึ่งทั้งสองสูตรใช้ผลผลิตไกลโคไลซ์ชนิดเดียวกันแต่แตกต่างกันที่เวลาในการสังเคราะห์ซึ่งสูตรที่ 8 จะใช้เวลาสังเคราะห์ 3 ชั่วโมงและเพ็ตสูตรที่ 4 จะใช้เวลาสังเคราะห์ 2 ชั่วโมง ที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อทำการสังเคราะห์เป็นเวลานานขึ้นที่อุณหภูมิสูงพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จะเริ่มเกิดการสลายตัวทำให้สายโซ่โมเลกุลขาดลงเป็นสายโซ่โมเลกุลที่มีขนาดสั้นกว่าที่สังเคราะห์ที่เวลา 2 ชั่วโมง เพราะฉะนั้นการสังเคราะห์ที่เวลา 2 ชั่วโมง เป็นเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

ผลของอุณหภูมิหลอมเหลว และอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตพบว่าสมบัติทางความร้อนของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้มีค่าสูงขึ้นเมื่อของไดเมอร์ในผลผลิตไกลโคไลซ์มีค่ามากขึ้น เพราะการขยายสายโซ่โมเลกุลจะเป็นการขยายของส่วนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ที่ได้ยาวมากขึ้น จะเห็นได้จากพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตสูตรที่ 7 มีค่าอุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิสลายตัวสูงที่สุดและใกล้เคียงกับขวดเพ็ตมากที่สุด และพบว่าสอดคล้องกับสูตรโครงสร้างที่วิเคราะห์จาก FT-IR คือเมื่อสายโซ่โมเลกุลมีการต่อที่ยาวขึ้นหมู่ไฮดรอกซิลที่ปลายสายโซ่ลดลง ดังนั้นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตสูตรที่ 7 จึงมีหมู่ไฮดรอกซิลน้อยที่สุด

4.3 ลักษณะและสมบัติของแผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

4.3.1 ลักษณะของแผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ขึ้นรูปแล้วมีสีและลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 4.20

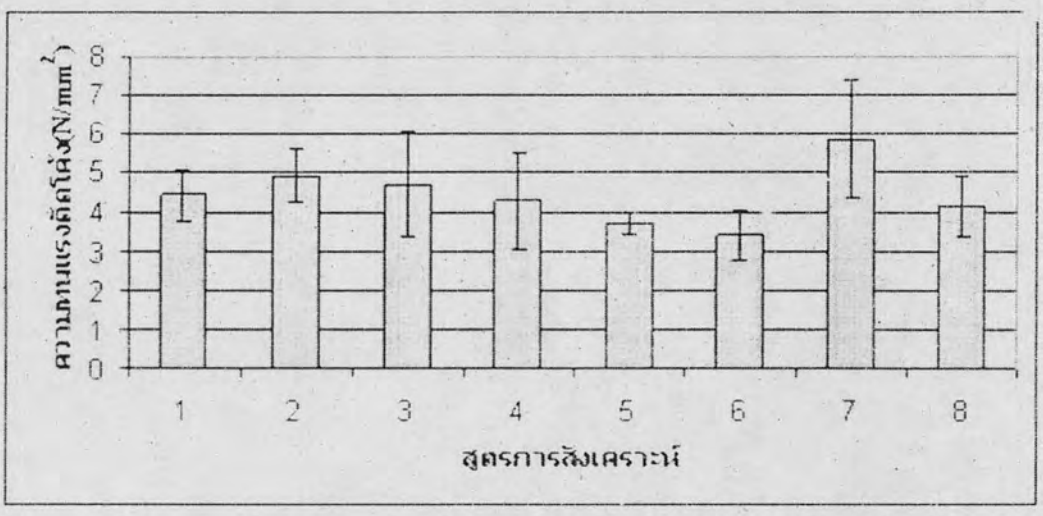


รูปที่ 4.20 แผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากสูตรที่ 1 (ก) 2 (ข) 3 (ค) 4 (ง) 5 (จ) 6 (ฉ) 7 (ช) และ 8 (ซ)

จากรูปที่ 4.20 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตสังเคราะห์ได้จากสูตรที่ 1 2 3 4 และ 5 เมื่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน มีสีเป็นสีขาวครีมที่ไม่แตกต่างกัน พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ได้จากสูตรที่ 6 เมื่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน มีสีชิ้นงานเป็นสีน้ำตาลเข้ม พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ได้จากสูตรที่ 7มีสีชิ้นงานเป็นสีขาว และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ได้จากสูตรที่ 8 มีสีชิ้นงานเป็นสีเหลืองครีมอมน้ำตาล ซึ่งสีของชิ้นงานนี้มีสีตามสีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้ก่อนนำมาขึ้นรูป

4.3.2 ความทนแรงดัดโค้ง

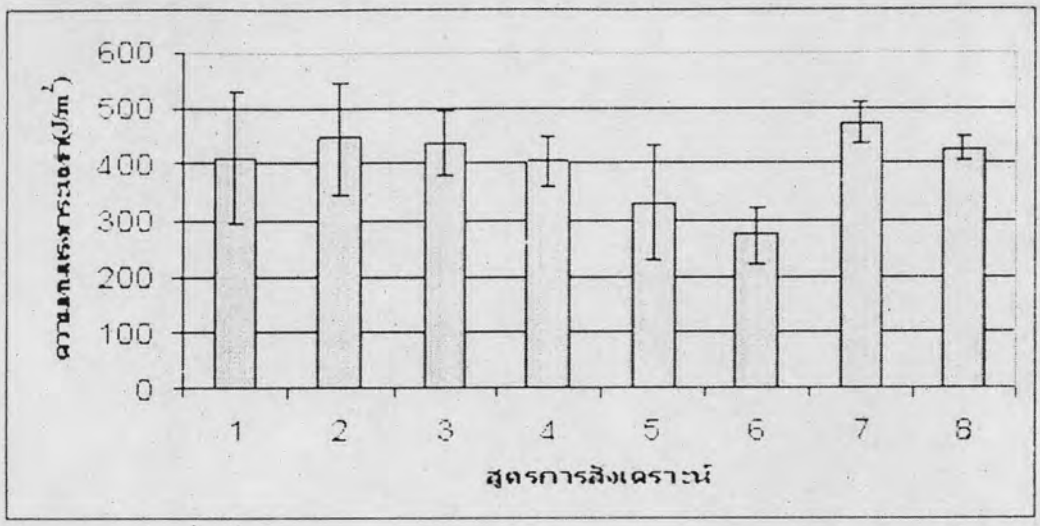
ผลการทดสอบความทนแรงดัดโค้งของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยผลผลิตไกลโคไลซ์ชนิดต่างๆ ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้จากสูตรต่างๆ

จากรูปที่ 4.21 จะเห็นได้ว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตสูตรที่ 6 ซึ่งสังเคราะห์จากผลผลิตไกลโคไลซ์ที่มีมอนอเมอร์ผสมไดเมอร์เล็กน้อย มีค่าความทนแรงดัดโค้งต่ำที่สุด และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตสูตรที่ 7 ซึ่งสังเคราะห์จากผลผลิตไกลโคไลซ์ที่มีปริมาณไดเมอร์สูงขึ้น มีค่าทนแรงดัดโค้งมากที่สุด ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตสูตรที่ 7 มีสายโซ่โมเลกุลที่ยาวและน้ำหนักโมเลกุลที่มากกว่า ทำให้มีความสามารถในการต้านทานแรงดัดโค้งได้ดีกว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและมีสายโซ่สั้นกว่า ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต สูตรที่ 6 ซึ่งหากพิจารณาแนวโน้มแล้วนั้นเห็นได้ว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากผลผลิตไกลโคไลซ์ที่มีอัตราส่วนไดเมอร์ต่อมอนอเมอร์มาก ส่งผลให้ความสามารถในการทนแรงดัดโค้งมากขึ้น

4.3.3 ความทนแรงกระแทก

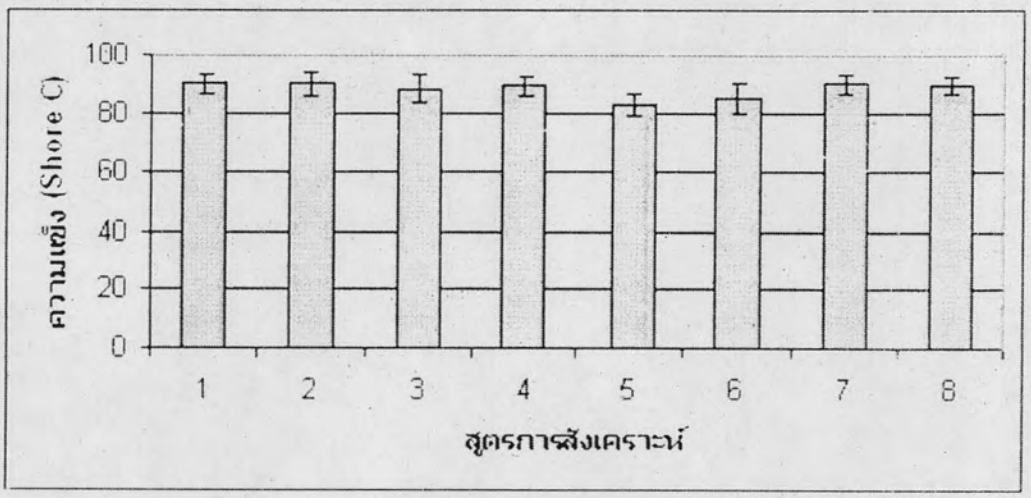


รูปที่ 4.22 ความทนแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้จากสูตรต่างๆ

จากรูปที่ 4.22 จะเห็นได้ว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตสูตรที่ 7 ซึ่งสังเคราะห์จากผลผลิตไกลโคไลซ์ที่มีปริมาณไดเมอร์สูงกว่า มีความทนแรงกระแทกสูงที่สุดและพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตสูตรที่ 6 ที่สังเคราะห์จากผลผลิตไกลโคไลซ์ซึ่งมีมอนอเมอร์ผสมไดเมอร์เล็กน้อย มีความทนแรงกระแทกต่ำที่สุด นอกจากนี้ยัง พบว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากสูตรที่ 1 2 และ 3 ซึ่งใช้ผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไกลโคลิซิส 1 2 และ 3 ชั่วโมง มีความทนแรงกระแทกใกล้เคียงกันและสูงกว่า ความทนแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากสูตรที่ 4 และ 5 ซึ่งสังเคราะห์จากผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไกลโคลิซิส 4 และ 5 ชั่วโมง เนื่องจากมีอัตราส่วนของไดเมอร์ต่อมอนอเมอร์น้อยกว่าผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไกลโคลิซิส 1 2 และ 3 ทั้งนี้เพราะพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากผลผลิตไกลโคไลซ์ที่มีส่วนของน้ำหนักโมเลกุลสูงมากกว่าจึงเกิดการขยายได้สายโซ่โมเลกุลมากกว่า ทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีสายโซ่โมเลกุลที่ยาวกว่า จึงทำให้พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้มีความทนแรงกระแทกได้สูงกว่า ซึ่งค่าที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับความทนแรงดัดโค้ง

4.3.4 ความแข็ง

ผลการทดสอบความแข็งของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้แต่ละชนิดด้วยเครื่องดูโรมิเตอร์ ชนิด Shore C ดังแสดงในรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 ความแข็งของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้จากสูตรต่างๆ

จากรูปที่ 4.23 จะเห็นได้ว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ขึ้นทุกสูตรมีความแข็งไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 83-90 การที่พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้มีค่าความแข็งใกล้เคียงกันและมีค่าความแข็งที่สูง แสดงว่า องค์ประกอบของผลผลิตไกลโคไลซ์ไม่มีผลต่อความแข็งของเพ็ต